تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال دوازدهم، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۵
Volume 12, No. 3, Fall 2016 (IR-WRR)
۱۸۹-۲۰۰

برآورد عملکرد مدل‌های رگرسیون توانی در تعیین هندسه هیدرولیکی مقطع پر کانال‌های پایدار (مطالعه موردی: حوضه تروال)

خالد اوسطی[۱*]، هادی نیری[۲] و پریسا عثمانی[۳]

چکیده

توسعه روابط هندسه هیدرولیکی در پروژه‌های احیای رودخانه و مدل‌سازی هیدرولوژیکی اهمیت قابل توجهی دارد. از اینرو، ارائه روابط منطقه‌ای جهت فرموله نمودن ابعاد مقطع پر کانال با استفاده از سطح حوضه زهکشی بالادست (به عنوان متغیر مستقل) در حوضه تروال، به عنوان هدف اصلی این تحقیق مد نظر قرار گرفت. بررسی‌های میدانی در ۲۸ – ۱۳ آبان ماه ۱۳۹۴ در طول رودخانه‌های اصلی چم سیس، سنگ سیاه، اوزون دره و رودخانه اصلی تروال انجام گرفت و فرموله کردن ابعاد مقطع پر کانال‌های پایدار بر مبنای سطح حوضه بالادست و با استفاده از داده‌های ۲۲ مقطع پایدار انجام شد. نتایج حاصله نشان‌داد که مدل‌های چندبخشی در فرموله کردن رابطه بین سطح حوضه بالادست و خصوصیات مقطع کانال پایدار، بهترین عملکرد را داشتند. مقادیر ریشه دوم میانگین مربعات خطای نسبی (RRMSE) بیشتر از ۰/۴ معادلات رگرسیونی اولیه هندسه هیدرولیکی بر اساس رابطه توانی ساده بین ابعاد مقطع پر کانال و سطح حوضه بالادست، نشان دهنده عملکرد ضعیف معادلات توانی ساده در برآورد هندسه هیدرولیکی بود در حالیکه در روابط توانی چند بخشی، نه تنها مقادیر RRMSE در برآورد سطح مقطع و عرض بالای مقطع در حـــوضه‌های بـــا مساحت کمتر از ۱۱۶۵ کیلومتر مربع، زیر ۰/۲ بود بلکه مقادیر خطای RRMSE در برآورد عمق متوسط و عمق حداکثر پر کانال در حوضه‌های با مساحت زیر ۱۰۰ کیلومتر مربع نیز به ترتیب کمتر از ۰/۱۲ و ۰/۲۵ بدست آمد. با این حال، رابطه مناسبی برای فرموله نمودن ابعاد مقطع کانال پایدار در حوضه‌های با مساحت بیش از ۱۱۶۵کیلومترمربع معرفی نشد. این امر می‌تواند به دلیل تغییر در رابطه بارش – رواناب و اثرات بیشتر فعالیت‌های انسانی در حوضه‌های بزرگتر باشد. نتایج بدست آمده از این تحقیق، اطلاعات مفیدی را فراهم می‌نماید که در پروژه‌های احیای رودخانه و طراحی سازه‌های آبی کاربرد دارد.

کلمات کلیدی: حوضه تروال، کانال پایدار، مدل‌های چند بخشی، هندسه هیدرولیکی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۲/۲۷
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۵/۲۹

۱- استادیار گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری – دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان.
۲- استادیار گروه ژئومورفولوژی- دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان.
۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد رشته مخاطرات طبیعی، گروه ژئومورفولوژی، دانشگاه کردستان
*- نویسنده مسئول

Efficiency of Power Regression Model for Bankfull Hydraulic Geometry in Stable Canals (Case Study: Tarwal Basin)

K. Osati [1], H. Nayyeri [2] and P. Osmani [3]*

Abstract

Development of hydraulic geometry relationships are of great importance in different applications of stream restoration design and hydrological modeling. Accordingly the main objective of this study was to develop regional relationships for bankfull channel dimensions in Tarwal basin using the drainage area as an independent variable. Several fieldworks, focused on Chameh Sis, Sangeh Siah, and Ozon Dareh tributaries as well as the main channel of Tarwal River, were conducted between 4 and 19 November 2015. Twenty two stable-channel cross sections were used to obtain the relationship among the bankfull channel dimensions and the drainage area. The results indicated that piecewise models are the best models for such relations. Simple power regression models were assessed as not suitable models for predicting hydraulic geometry according to the Relative Root Mean Squared Error (RRMSE) values of greater than 0.4. While for the piecewise models the RRMSE values were less than 0.2 for predicting bankfull cross sectional area and width of stable alluvial channels in basins smaller than 1165 km^2. Also the RRMSE values were less than 0.12 and 0.25 respectively for predicting mean and maximum bankfull depth of stable alluvial channels in basins smaller than 100 km^2. Nevertheless there were no ideal model to estimate bankfull channel dimensions in basins larger than 1165 Km^2. This could be a result of significant changes in rainfall-runoff relationships or the influences of anthropogenic disturbances in large basins. The results provided useful data for stream restoration as well as water structure design.

Keywords: Tarwal Basin, Stable channel, Piecewise models, Hydraulic geometry

Received: May 16, 2016
Accepted: August 19, 2016

1- Assistant professor, Dept. of Range and Watershed Management, College of Natural Resources, University of Kurdistan, Iran. Email: k.osati@uok.ac.ir
2-Assistant professor, Dept. of Geomorphology, College of Natural Resources, University of Kurdistan, Iran.
3-M.Sc. Graduated student in Natural Hazards, Dept. of Geomorphology, College of Natural Resources, University of Kurdistan, Iran.
*- Corresponding Author

۱- مقدمه

یـــکی از اهـــداف مهم در تحقیقات رودخانه‌ای، پیش‌بینی تغییـــرات رودخانه در پاسخ به متغیرهای مؤثر بر فرآیندهای آن اســـت (Hardy,2006 ؛ Newson, 2002؛Shreve, 1979). Leopold and Maddock (1953) تغییر سیستماتیک عرض کانال (W)، میانگین عمق کانال (d)، میانگین سرعت جریان (v) نسبت به دبی جریان (Q) را به عنوان هندسه هیدرولیکی معرفی نمودند. آنها براساس داده‌های ثبت شده در ایستگاه‌های هیدورمتری بیست رودخانه بزرگ در Great Plains و جنوب‌غربی ایالات متحده آمریکا، توابع توانی ساده‌ای را معرفی نمودند که ارتباط خصوصیات مذکور با دبی جریان در یک مقطع مشخص از رودخانه را ارائه می‌دهند. همچنین در یک حوضه یا یک ناحیه جغرافیایی معین، مقادیر برآوردی از این روابط توانی ساده در یک شرایط مرجع (دبی مقطع پر کانال [۱]) ضمن حرکت به سمت پایین دست حوضه (هندسه هیدرولیکی پایین دست یا DHG [۲]) دارای الگوی تغییرات مشابهی می‌باشند. روابط توانی ساده مشابهی برای تعیین ارتباط بین دبی جریان با سایر خصوصیات کانال جریان (مانند شیب سطح آب) ارائه شده است (Leopold et al.,1964؛ Hey and Thorne, 1986 ؛ Knighton, 1998). روابط DHG بصورت تابع توانی ساده زیر می‌باشند:

$$Y=aQ^b \qquad (۱)$$

که در آن؛ a و b ضرایب تجربی حاصل از رگرسیون لوگ- لوگ هستند که به ترتیب معرف ضریب و توان رابطه ارائه شده می‌باشند. تعیین معادله‌ای مشابه نیازمند استفاده از داده دبی جریان می‌باشد. بنابراین مقادیر اندازه‌گیری شده دبی در محل ایستگاه‌های هیدرومتری و یا مقادیر برآوردی با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی دبی یا روابط تجربی (در محل‌های فاقد ایستگاه) مورد نیاز می‌باشد. اغلب داده‌های مورد نیاز برای رودخانه یا بازه‌های مشخص در دسترس نمی‌باشند و برآورد دبی در محل‌های فاقد ایستگاه، نیازمند داده‌ها و محاسبات اضافی می‌باشد و اعداد برآورد شده با عدم قطعیت همراه خواهند بود. همچنین گاهی اوقات، حضور به موقع و اندازه‌گیری دبی مقطع پر کانال و تعیین ارتفاع آب معادل ارتفاع مقطع پر کانال، عملی نمی‌باشد. بنابراین با توجه به اهمیت تعیین ابعاد مقطع پر کانال در مناطق فاقد ایستگاه، محققین متعددی (Leopold et al., 1964؛ Dunne and Leopold, 1978) به ارائه و استفاده از منحنی‌های DHG منطقه‌ای مبتنی بر رابطه بین ابعاد مقطع پر کانال و سطح حوضه بالادست (بجای دبی) پرداخته‌اند که رابطه مذکور به شکل کلی زیر می‌باشد:

$$Y=\alpha A^{\beta} \qquad (۲)$$

که در آن، α و β پارامترهای تجربی می‌باشند. این فرمول برای محدوده جغرافیایی با مساحت معین و دارای خصوصیات زمین‌شناسی و آب و هوایی همگن ارائه شده است و سطح حوضه بالادست به عنوان مهم‌ترین عامل تعیین کننده دبی جریان در نظر گرفته شده است. روابط هندسه هیدرولیکی به سمت پایین دست، که از سطح حوضه بالادست (رابطه ۲) به عنوان متغیر مستقل در فرمول استفاده می‌نمایند، نسبت به روابط ارائه شده براساس دبی جریان (رابطه ۱) دارای خطای بیشتری خواهند بود (Castro and Jackson, 2001؛ Soar and Thorne, 2001) اما پیش‌بینی ابعاد کانال را براساس استفاده صرف از مدل رقومی ارتفاع (DEM) حوضه ممکن می‌سازند. چنین روابطی در طراحی اولیه کانال‌ها در پروژه‌های احیای رودخانه (Johnson and Fecko, 2008) و مدل‌سازی میزان تناسب رودخانه برای مراحل مختلف رشد ماهیان (Rosenfeld et al., 2007) بسیار کارا خواهند بود.

Castro and Jackson (2001) بیان می‌دارند که علیرغم تحقیقات گسترده انجام شده در زمینه هندسه هیدرولیکی، داده‌های محدودی درباره روابط منطقه‌ای وجود دارد و بطور کلی محدودیت‌های کاربرد جغرافیایی معادلات موجود هندسه هیدرولیکی مانند معادلات Leopold (1994) بخوبی تعیین نشده است. آنها به مقایسه سه الگوی تقسیم‌بندی مناطق برای ارائه یک معادله منطقه‌ای DHG با استفاده از ۷۶ ایستگاه اندازه‌گیری در Pacific Northwest (واشنگتن، اورگان و آیداهو) پرداختند. معیارهای تقسیم‌بندی آنها شامل تقسیم‌بندی براساس مناطق اقلیمی، مرز فیزیوگرافی استان‌ها و مناطق اکولوژیکی بود. Castro and Jackson (2001) گزارش نمودند که تفکیک مناطق براساس مناطق اکولوژیکی بهترین راه برای تفکیک مناطق دارای تغییرات مکانی از نظر دوره بازگشت دبی مقطع پر کانال می‌باشد.

به دلیل تفاوت در شکل حوضه، الگوی شبکه زهکشی، شیب، پوشش گیاهی، کاربری اراضی و فعالیت‌های مدیریتی، بزرگی و مدت تداوم دبی‌های مقطع پر کانال در حوضه‌های با سطح حوضه زهکشی بالادست یکسان می‌تواند متفاوت باشد (USDA-NRCS, 2007). لذا Faustini et al. (2009) جهت بهبود روابط از داده‌های کمکی میانگین بارش سالانه، ارتفاع و شیب متوسط بازه استفاده نمودند و با بکارگیری GIS، لایه‌های مربوطه را استخراج کردند. آنها نقش متغیرهای کمکی در ارتقای برآورد دقیق‌تر مقادیر عرض مقطع پر کانال را گزارش نمودند. میانگین بارش سالانه و شیب کانال به

عنوان عوامل اصلی مؤثر بر دبی و مورفولوژی کانال جریان مطرح می‌باشند. شیب بازه‌ها براساس لایه رقومی ارتفاع حوضه قابل محاسبه می‌باشد. در مناطق اکولوژیکی، ارتفاع مقطع (در ارتباط با سطح حوضه بالادست) به عنوان عامل مهمی در تعیین مکان تقریبی مقطع نسبت به سراب و پایاب حوضه مد نظر می‌باشد و می‌تواند به عنوان شاخصی مناسب جهت تفکیک جریان‌های با منشأ اصلی ذوب برف و جریان‌های ناشی از بارش غالب باران مد نظر قرار گیرد. همچنین ارتفاع مقطع به صورت ابزار کمکی در مدل‌سازی روابط بارش- سطح حوضه و شیب- سطح حوضه در یک ناحیه عمل می‌نماید. Faustini et al. (2009) منحنی‌های مترقی منطقه‌ای را ارائه نمودند که در واقع همان منحنی‌های منطقه‌ای هستند که به عنوان مدل‌های پیش‌بینی هندسه هیدرولیکی کانال، براساس سطح حوضه زهکشی و چند متغیرهای محیطی تأثیرگذار ارائه شدند. Faustini et al. (2009) مواد بستر، مناطق اکولوژیکی، میانگین بارش سالانه، ارتفاع، میانگین شیب بازه و فعالیت‌های انسانی را به عنوان عوامل مهم در پیش‌بینی عرض مقطع پر کانال شناسایی کردند. در این راستا، محققین متعددی تلاش نموده‌اند تا داده‌ها را براساس میانگین بارش سالانه، میانگین رواناب سالانه، شیب کانال و نوع کانال تفکیک نمایند (Rosgen (1996)؛ Miller and Davis (2003)؛ Lawlor (2004)؛ Powell et al, 2004؛ Mulvihill et al., 2009). همچنین USDA-NRCS (2007) ارائه منحنی‌های منطقه‌ای به تفکیک مناطق جنگلی/مرتعی، کشاورزی و شهری را پیشنهاد نموده است.

Wilkerson et al. (2014) در تحقیقی به بررسی رابطه عرض مقطع پر کانال و سطح حوضه زهکشی برای کانال‌های آبرفتی تک کاناله در محیط‌های دارای تنوع زمین‌شناسی، خاکشناسی، اقلیمی و بوتانیکی پرداختند. آنها با توجه به دامنه اعداد سطح حوضه زهکشی، مدل رگرسیون خطی دو بخشی را به عنوان بهترین مدل در فرموله کردن عرض مقطع پر کانال (با استفاده از سطح حوضه زهکشی به عنوان متغیر مستقل) معرفی نمودند. همچنین Wilkerson et al. (2014) گزارش نمودند که سطح حوضه زهکشی به تنهایی تخمین‌گر مناسبی برای برآورد عرض مقطع پر کانال نمی‌باشد. از این رو، آنها برای توسعه مدل مکانیسمی جامع در پیش‌بینی عرض مقطع پر کانال، به آنالیز متغیرهای اضافی (مانند بارش) پرداختند. آنها افزایش دقت برآورد عرض مقطع پر کانال را با تفکیک داده‌ها بر مبنای کلاس‌بندی بارش گزارش نمودند. این در حالی است که Chang et al. (2004) در تحقیقی نشان دادند که ابعاد مقطع پر کانال دارای ارتباط بسیار قوی با سطح حوضه زهکشی بالادست مقطع می‌باشد. Chang et al. (2004) بیان نمودند که بررسی رابطه در مقیاس مکانی کوچکتر و تقسیم‌بندی داده‌ها براساس شیب و نوع کانال، تأثیری در ارتقای مدل‌های تعریف شده براساس سطح حوضه بالادست نداشته است.

تحقیقات صورت گرفته نشان می‌دهند که توسعه روابط هندسه هیدرولیکی و ارائه منحنی‌های محلی براساس داده‌های صحرایی ابعاد کانال، در پروژه‌های احیای رودخانه و مدل‌سازی هیدرولوژیکی از اهمیت قابل توجهی برخوردار می‌باشد. از این رو، ارائه روابط منطقه‌ای جهت فرموله نمودن ابعاد مقطع پر کانال با استفاده از سطح حوضه زهکشی بالادست (به عنوان متغیر مستقل) در حوضه تروال، به عنوان هدف اصلی این تحقیق مد نظر قرار گرفت. براساس منابع موجود، عملکرد مدل‌های مختلف مانند روابط توانی چند بخشی در تعیین هندسه هیدرولیکی مقطع پر کانال‌های پایدار تاکنون براساس داده‌های صحرایی حوضه‌های داخل کشور بررسی نشده است و دقت و عملکرد مدل‌های توسعه یافته در خارج از کشور در برآورد خصوصیات مقاطع نامشخص است. همچنین ضریب و توان رابطه هندسه هیدرولیکی وابسته به خصوصیات زمین‌شناسی و آب و هوایی منطقه بوده و به دلیل شکل حوضه، الگوی شبکه زهکشی، شیب، پوشش گیاهی، کاربری اراضی و فعالیت‌های مدیریتی (USDA-NRCS, 2007) در هر محل می‌تواند متفاوت از دیگری باشد. از این‌رو تعیین مدل مناسب در برآورد مقاطع کانال‌های پایدار می‌تواند در افزایش دقت برآورد هندسه هیدرولیکی مقاطع (به عنوان ورودی مدل‌های توزیعی بارش – رواناب و طراحی مقطع بهینه در پروژه‌های احیای رودخانه)، از اهمیت قابل توجهی برخوردار باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه و عملیات صحرایی

حوضه‌ی آبخیز تروال به عنوان سرشاخه حوضه درجه دو سفید رود در شرق استان کردستان قرار دارد. رودخانه تروال با امتداد جنوبی- شمالی امتداد می‌یابد و در نهایت به قزل‌اوزن می‌رسد. شاخه‌های چم سیس، سنگ سیاه، چم شور، جوروندی و اوزون دره در داخل استان کردستان جریان دارند (شکل ۱). خروجی حوضه مورد مطالعه در پایین‌تر از ایستگاه هیدرومتری سلامت آباد- مهرآباد انتخاب شد و حوضه بالادست آن بین مختصات"۴۷ '۵۵ °۳۴ تا "۴۸ '۵۵ °۳۵ عرض شمالی و "۲۸ '۶ °۴۷ تا "۴۲ '۱۰ °۴۸ طول شرقی واقع شده است. مساحت حوضه مذکور ۷۲۴۱/۶۲ کیلومترمربع و طول رودخانه اصلی ۱۵۹/۱۲۸ کیلومتر است. براساس آمار ۲۵ ساله (از سال آبی

۶۹-۱۳۶۸ تا سال آبی ۹۳-۱۳۹۲) ایستگاه سینوپتیک قروه، متوسط بارش سالانه و متوسط تبخیر پتانسیل سالانه به ترتیب ۳۳۹/۳ میلی‌متر، ۱۷۴۸ میلی‌متر و متوسط دمای روزانه، متوسط حداکثر دما و متوسط حداقل دما به ترتیب ۱۲/۴، ۲۳/۵ و ۱/۲- درجه سانتی‌گراد است. البته با توجه به تنوع ارتفاعی مناطق مختلف حوضه، دامنه تغییرات متغیرهای اقلیمی در حوضه ترروال می‌تواند قابل توجه باشد.

بررسی‌های میدانی در ۲۸ – ۱۳ آبان ماه ۱۳۹۴ در طول رودخانه‌های اصلی چم سیس، سنگ سیاه، اوزون دره و رودخانه اصلی ترروال انجام گرفت. بدلیل وسعت زیاد منطقه و کم آب بودن شاخه چم‌شور، این رودخانه از بررسی‌ها کنار گذاشته شد. براساس خصوصیات رودخانه و کانال جریان، رودخانه‌های مورد مطالعه به ۱۷ نوع (استیل) تفکیک گردید. سپس در امتداد هر نوع رودخانه، یک تا سه مقطع انتخاب و بطور کلی اطلاعات ۳۴ مقطع (بصورت T_1 تا T_{34}) در طول رودخانه‌های مورد مطالعه برداشت شد (شکل ۱). بررسی وضعیت تعادل براساس روش رزگن نشان داد که از ۳۴ مقطع برداشت شده، ۲۲ مقطع حالت پایدار دارند (مقاطع ۳ تا ۱۰، ۱۶ تا ۲۴، ۱۳، ۲۶ ، ۲۸، ۲۹ و ۳۳ پایدار بودند – Osmani, 2016). پس از تعیین مقاطع پایدار، فرموله کردن ابعاد مقطع پر کانال برای کانال‌های پایدار صورت گرفت.

۲-۲- توسعه روابط منطقه‌ای ابعاد مقطع پر کانال

در توسعه معادلات منطقه‌ای در برآورد ابعاد مقاطع کانال‌های پایدار، اولین گام شناسایی مقطع پر کانال می‌باشد. شناسایی دقیق عمق مقطع پر کانال در عرصه، در ارتقای روابط رگرسیونی منطقه‌ای مناسب بسیار تأثیرگذار می‌باشد. در تعیین ابعاد مقطع پر کانال، شاخص‌های متعدد برای شناسایی عمق مقطع پر کانال مطرح می‌باشند و در عمل چندین شاخص در عرصه مورد استفاده قرار می‌گیرند (Sherwood and Huitger, 2005). بیش از ۱۰ شاخص از جمله شکست شیب سیلابدشت، point bars، پشته‌های برجسته و مهم، قسمت بالایی کناره کانال، بالاترین خطوط اثر شستشوی جریان، تغییر در مواد کناره کانال و تغییر در پوشش گیاهی، برای شناسایی عمق مقطع پر کانال معرفی شده‌اند (Leopold,1994؛ McCandless and Everett, 2002؛ Tetra Tech EM Inc., 2004؛ Castro and Jackson, 2001). Harrelson et al. (1994) تغییر شیب ناگهانی کناره‌های کانال، قسمت بالای یک سطح رسوبگذاری و تغییر در خصوصیات مواد کانال را به عنوان مهمترین شاخص‌ها در تشخیص مقطع پر کانال معرفی نمودند. آنها همچنین تغییر شیب مشخص بین کناره تقریبا عمودی مقطع پر کانال و سطح نسبتاً افقی سیلابدشت را به عنوان بهترین شاخص برای تعیین ارتفاع مقطع پر کانال دانسته‌اند.

همانگونه که در بخش مقدمه مقاله بیان گردید، روابط منطقه‌ای هندسه هیدرولیکی به فرم کلی رابطه (۳) ابعاد مقطع پر کانال و سطح حوضه بالادست را فرموله می‌نمایند:

$$Y = \alpha A^{\beta} \qquad (۳)$$

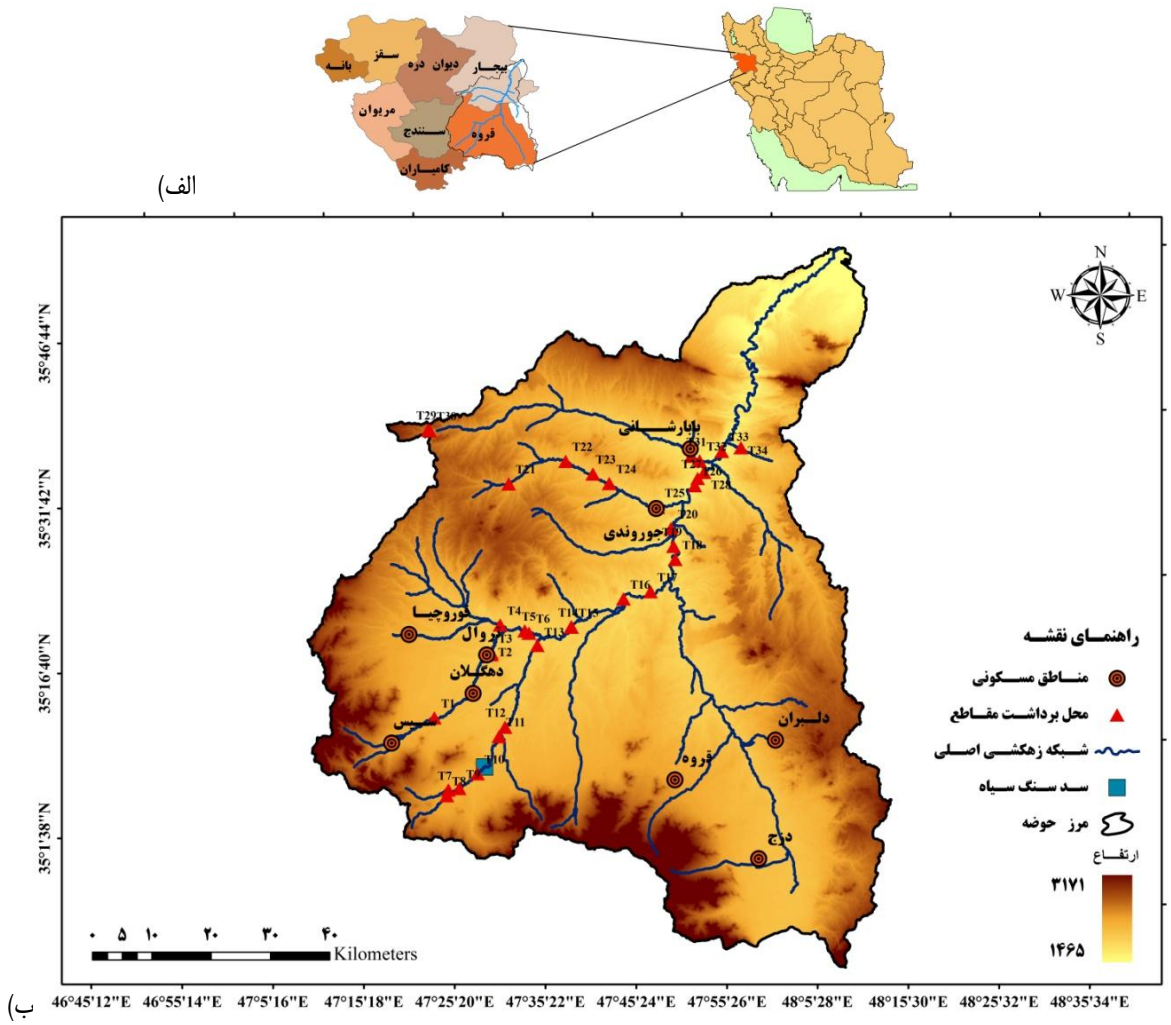
که در آن، Y ابعاد مقطع پر کانال (سطح مقطع، عرض بالا، عمق متوسط یا عمق حداکثر مقطع پر کانال)، A سطح حوضه زهکشی بالادست مقطع و α و β پارامترهای تجربی می‌باشند. در این مطالعه، سطح حوضه هیدرولوژیک بالادست هر مقطع براساس DEM (لایه رقومی ارتفاع) تهیه شده از نقشه توپوگرافی ۲۵۰۰۰ : ۱ منطقه در محیط ArcGIS تعیین گردید. ابعاد مقطع پر کانال براساس اندازه‌گیری‌های صحرایی انجام شده در روزهای ۲۸ – ۱۳ آبان ماه ۱۳۹۴ با استفاده از متر لیزری Leica Disto D5 تعیین شد. در این راستا، اندازه‌گیری پروفیل مقطع عرضی به کمک دوربین متر لیزری انجام گردید و پروفیل بخش پوشیده از آب کانال و تعیین عمق جریان به کمک شاخص‌های موجود تعیین شد. در نهایت مقاطع عرضی در نرم‌افزار اکسل ترسیم و آنالیز شده و پارامترهای مورد نیاز استخراج گردید.

رابطه (۳) برای محدوده جغرافیایی با مساحت معین و دارای خصوصیات زمین‌شناسی و آب و هوایی همگن ارائه شده است بطوریکه سطح حوضه بالادست به عنوان مهم‌ترین عامل تعیین کننده دبی جریان در نظر گرفته شده است (Faustini et al., 2009).

جهت ارتقای مدل‌های توانی از تفکیک داده‌ها بر مبنای موقعیت حوضه هیدرولوژیک، میانگین شیب طولی بازه و میانگین وزنی ارتفاع حوضه بالادست مقاطع استفاده شد. میانگین وزنی ارتفاع حوضه بالادست به عنوان شاخصی از تغییرات مکانی مقدار و نوع بارش مد نظر قرار گرفت. همچنین معادلات توانی چند بخشی مبتنی بر کلاس‌بندی اندازه حوضه به عنوان دیگر راهکار ارتقای مدل‌های توانی استفاده گردید که در این راستا مبنای تفکیک داده‌ها، محل شکست شیب منحنی رگرسیون محلی- وزن‌دار شده بر روی ابر نقاط (LOESS) بوده است (Wilkerson et al., 2014). بنابراین جهت توسعه معادلات توانی چندبخشی، مدل‌سازی تغییرات ابعاد مقطع پر

کانال نسبت به سطح حوضه زهکشی بالادست مقطع با استفاده از منحنی‌های رگرسیون محلی LOESS انجام گرفت. این منحنی‌ها که به رگرسیون محلی و ناحیه‌ای معروفند (Cleveland, 1979؛ Cleveland et al, 1988؛ Cleveland and Grosse, 1991)، روش‌های ناپارامتری صاف نمودن تغییرات داده‌ها هستند و منحنی یا سطحی را به داده‌ها برازش می‌دهند (Freund et al., 2006؛ Cohen, 1999). مدل‌سازی رگرسیون محلی LOESS نسبت به روش مدل‌سازی معمول دارای انعطاف‌پذیری بالاتری می‌باشد زیرا این روش فارغ از پیش فرض‌های لازم در مورد توابع ریاضی مورد استفـــاده برای ارائه رابطه مشابه است (Cohen, 1999). Cleveland (1979) و Helsel and Hirsch (2002) بیان داشتند که منحنی رگرسیون محلی LOESS یک ابزار جستجوگر مفید برای تشخیص فرم رابطه‌ی بین یک متغیر وابسته با یک یا چند متغیر مستقل می‌باشد. در صورت عدم استفاده از این تکنیک، تعیین فرم رابطه‌ی مناسب نیاز به محاسبات اضافی دارد (Guthrie, 2012). برای معرفی یک مدل مناسب براساس روش رگرسیون محلی LOESS، داده‌های وسیع و با تراکم مناسب مورد نیاز می‌باشد.

منحنی‌های رگرسیون محلی LOESS براساس رگرسیون چند جمله‌ای تعریف می‌شوند که نقاط مورد استفاده به صورت محلی وزن‌دار شده‌اند (Guthrie, 2012). بدین صورت که در هر نقطه از مجموعه داده‌ها، یک معادله چند جمله‌ای درجه پایین به زیر مجموعه‌ای از داده‌ها بصورت محلی و ناحیه‌ای برازش داده می‌شود. مقادیر تابع رگرسیون برای نقطه مذکور، براساس تخمین معادله چند جمله‌ای ناحیه‌ای و با استفاده از مقادیر متغیر/متغیرهای مستقل برای نقطه مورد نظر محاسبه می‌شود.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان کردستان – ایران (الف) و مقاطع برداشت شده بر روی شاخه‌های اصلی رودخانه تروال (ب)

برای اضافه نمودن منحنی رگرسیون محلی LOESS به ابر نقاط، بایستی تعداد داده‌های مورد استفاده در محاسبه هر معادله چند جمله‌ای ناحیه‌ای تعیین شود و یک تابع کرنال (تابع وزن‌دهی) برای تعیین وزن نقاط دخیل در نقطه مورد بررسی تعریف شود. برای محاسبه یک معادله چند جمله‌ای ناحیه‌ای، مقدار پیش فرض برای پارامتر صاف‌کنندگی تابع کرنل عدد ۵۰٪ است. Cleveland (1979) بیان می‌کند که مقادیر ۸۰٪-۲۰٪ پارامتر صاف کنندگی بیشتر اهداف مورد نظر در استفاده از رگرسیون محلی LOESS را پوشش می‌دهند و در حالت کلی، عدد ۵۰٪ مقدار منطقی برای شروع آزمون و خطا در برازش منحنی رگرسیون محلی LOESS است. در این مطالعه، جهت تشخیص و آنالیز روابط واقعی داده‌ها از منحنی‌های رگرسیون محلی LOESS استفاده گردید. برای تولید منحنی‌ها، پارامتر صاف‌شدگی معادل ۳۰٪ در نظر گرفته شده است (مطابق Wilkerson et al., 2014).

۲-۳- معیارهای انتخاب بهترین مدل

انتخاب بهترین مدل براساس ضریب همبستگی پیرسون (R^2) و شاخص مقادیر ریشه‌دوم میانگین مربعات خطای نسبی (RRMSE)[۳] صورت گرفته است. مقادیر RRMSE از تقسیم RMSE به میانگین داده‌ها محاسبه می‌شود. مقدار RRMSE کمتر از ۱۰ درصد، معرف شبیه‌سازی عالی، بین ۱۰ و ۲۰ درصد معرف شبیه‌سازی خوب، بین ۲۰ و ۳۰ درصد معرف شبیه‌سازی قابل قبول و کمتر از ۳۰ درصد معرف شبیه‌سازی ضعیف می‌باشد (Jamieson et al., 1991).

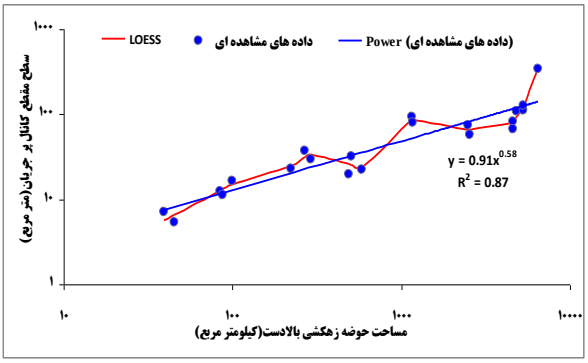
۳- نتایج و بحث

همانطور که پیش‌تر بیان شد، اولین گام شناسایی در توسعه معادلات منطقه‌ای برای برآورد ابعاد مقاطع کانال‌های پایدار، شناسایی مقطع پر کانال می‌باشد. تجربه عملیات میدانی در حوضه تروال نشان داد که از بین شاخص‌های متعدد پیشنهادی، شکست شیب بین سیلابدشت و کانال اصلی رودخانه مهمترین و کاراترین شـــاخص در شناسایی ابعاد مقطع پر کانال بود (منطبق با یافته‌های Harrelson et al., 1994). پس از شناسایی و تعیین ابعاد مقطع پر کانال، فرموله کردن ابعاد مقطع پر کانال برای مقاطع پایدار با ترسیم داده‌های سطح حوضه بالادست مقطع در مقابل ابعاد کانال در منحنی‌های Log-Log صورت گرفت. پلات اولیه داده‌ها حاکی از آن بود که داده مقطع ۲۹ اختلاف زیادی با سایر مقادیر دارد و داده پرت محسوب می‌شود. بنابراین در ادامه محاسبات، این مقطع کنار گذاشته شد. معادلات رگرسیونی اولیه هندسه هیدرولیکی براساس رابطه توانی بین ابعاد مقطع پر کانال و سطح حوضه بالادست تعیین گردید که به ترتیب نشان دهنده ضرایب همبستگی (R^2) معادل ۰/۸۷، ۰/۷۲، ۰/۴۵ و ۰/۳۰ برای برآورد سطح مقطع، عرض بالا، عمق متوسط و عمق حداکثر پر کانال بود (اشکال ۲، ۴، ۸ و ۹). این در حالی است که مقادیر RRMSE (جداول ۱ تا ۴) نشان دهنده عملکرد ضعیف تمامی معادلات پیشنهادی در برآورد هندسه هیدرولیکی براساس رابطه توانی بین ابعاد مقطع پر کانال و سطح حوضه بالادست است. بنابراین با توجه به منحنی رگرسیون محلی LOESS (اشکال ۲ تا ۹) روابط توانی چند بخشی بین ابعاد مقطع پر کانال و سطح حوضه بالادست مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از اعمال معادلات توانی دامنه‌دار (اشکال ۲ تا ۹ و جداول ۱ تا ۴) نشان دهنده افزایش قابل توجه مقادیر R^2 و کاهش قابل ملاحظه مقادیر خطای RRMSE می‌باشد بطوریکه روابط هندسه هیدرولیکی در برآورد سطح مقطع و عرض بالا در دو دامنه از سه دامنه مساحتی تعریف شده (کوچکتر از ۱۱۶۵ کیلومتر مربع) زیر ۰/۲ بوده و خطای روابط برآورد عمق متوسط و عمق حداکثر پر کانال در مساحت زیر ۱۰۰ کیلومتر مربع قابل قبول (به ترتیب کمتر از ۰/۱۲ و ۰/۲۵) می‌باشد. در بررسی دیگری، مدل توانی مبتنی بر حوضه هیدرولوژیک برای برآورد سطح مقطع پر کانال ارائه گردید. در این بررسی مقاطع مسیر حرکت آب از مقطع T_3 تا خروجی حوضه مد نظر قرار گرفت (شکل ۱). نتایج حاصله نشان دهنده تغییر اندک نسبت به نتایج مدل کلی قبلی می‌باشد (شکل ۱۰ و جدول ۱).

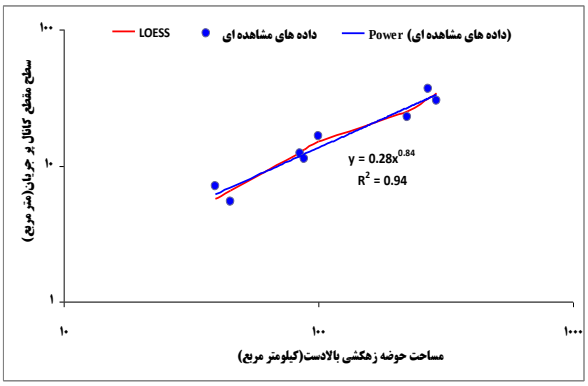
جهت بهبود روابط، کلاس‌بندی داده‌ها براساس ارتفاع متوسط حوضه بالادست و شیب طولی بازه‌ها انجام گرفت و روابط توانی چند بخشی مبتنی بر کلاس‌بندی متغیر مستقل مورد نظر (در اینجا ارتفاع متوسط حوضه بالادست یا شیب طولی بازه‌ها) تعریف گردید. نتایج حاصله نشان دهنده عدم ارتقای مدل‌ها با اعمال کلاس‌بندی ارتفاع متوسط حوضه بود. در مورد شیب طولی بازه‌ها، دقت مدل‌های برآورد سطح مقطع و عرض بالا در حوضه‌های کوچک، اندکی بهبود یافت با این حال رابطه قابل قبول اضافی نسبت به مدل‌های توانی چند بخشی تعریف شده براساس سطح حوضه بالادست معرفی نشد (اشکال ۱۱ و ۱۲ و جداول ۱ و ۲).

نتایج حاصله نشان دهنده اعتبار رابطه توانی بین سطح حوضه بالادست با خصوصیات متعدد مقطع کانال پایدار (شامل سطح مقطع، عرض بالای مقطع پر کانال، عمق متوسط و عمق حداکثر مقطع پر کانال)، در حوضه‌های با مساحت کمتر از ۱۰۰ کیلومترمربع بود در حالیکه مدل‌های توانی چندبخشی برای حوضه‌های متوسط مقیاس

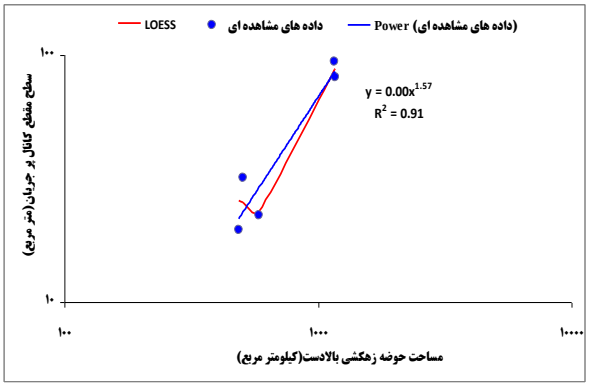
(با مساحت بین ۲۹۰ تا ۱۱۶۵کیلومترمربع) تنها در برآورد سطح مقطع و عرض بالای مقطع پر کانال، نتایج رضایت‌بخشی را ارائه دادند. با این حال، رابطه مناسبی برای فرموله نمودن ابعاد مقطع پر کانال پایدار در حوضه‌های با مساحت بیش از ۱۱۶۵کیلومترمربع معرفی نشد.



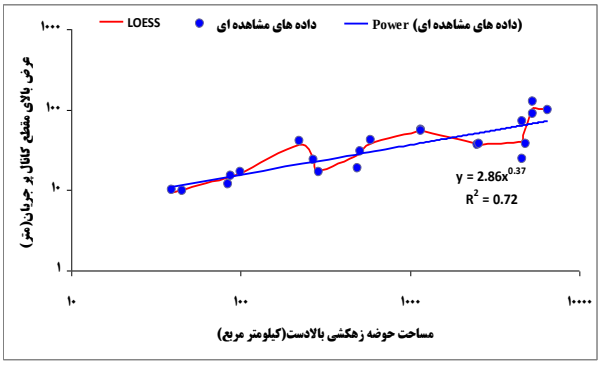
شکل ۲ – رابطه توانی بین سطح مقطع پر کانال و سطح حوضه بالادست (در حوضه‌های ۳۹ تا ۶۵۰۱ کیلومتر مربعی)



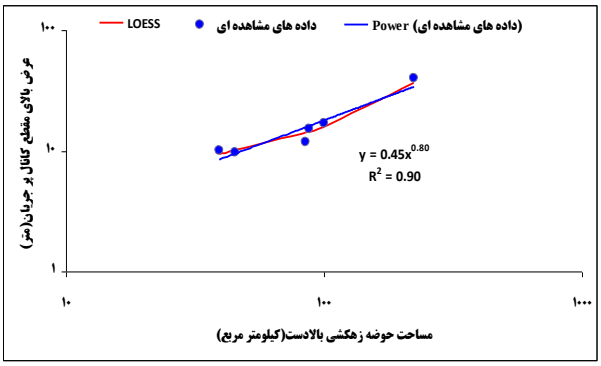
شکل ۳ – رابطه توانی چند بخشی بین سطح مقطع پر کانال و سطح حوضه بالادست (در حوضه‌های ۳۹ تا ۲۹۰ کیلومترمربعی)



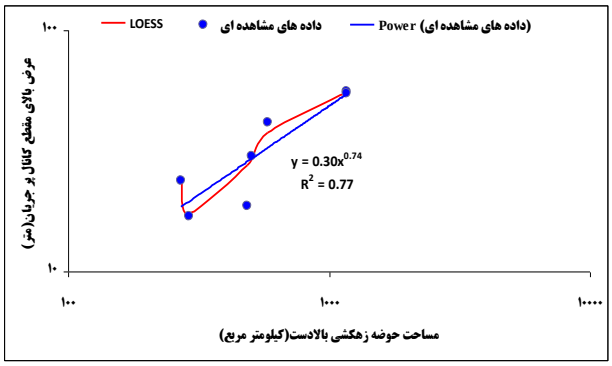
شکل ۴– رابطه توانی چند بخشی بین سطح مقطع پر کانال و سطح حوضه بالادست (در حوضه‌های ۲۹۰ تا ۱۱۶۵ کیلومتر مربعی)



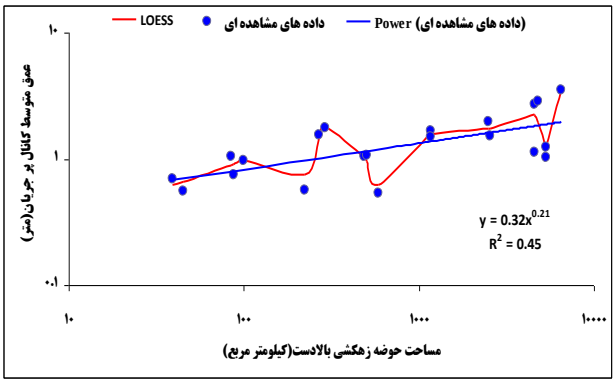
شکل ۵ – رابطه توانی بین عرض بالای مقطع پر کانال و سطح حوضه بالادست (در حوضه‌های ۳۹ تا ۶۵۰۱ کیلومترمربعی)



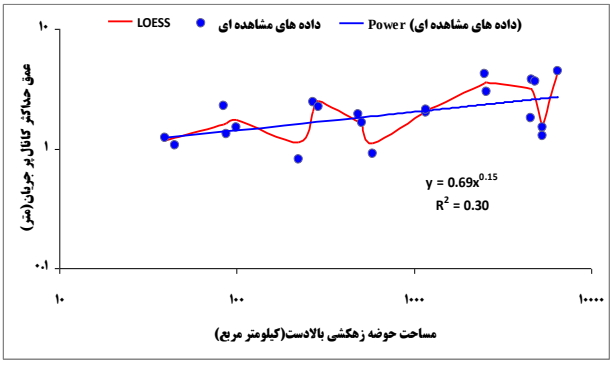
شکل ۶ – رابطه توانی چند بخشی بین عرض بالای مقطع پر کانال و سطح حوضه بالادست (در حوضه‌های ۳۹ تا ۲۲۳ کیلومتر مربعی)



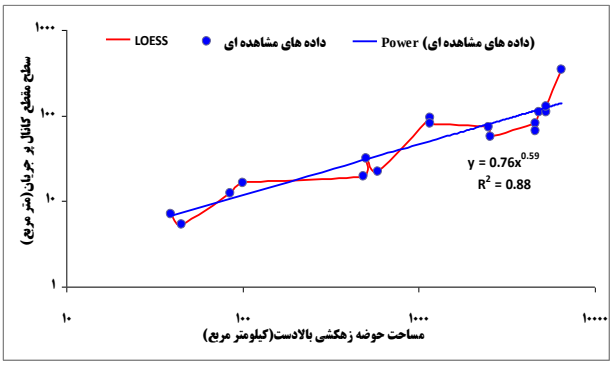
شکل ۷ – رابطه توانی چند بخشی بین عرض بالای مقطع پر کانال و سطح حوضه بالادست (در حوضه‌های ۲۲۳ تا ۱۱۶۵ کیلومتر مربعی)



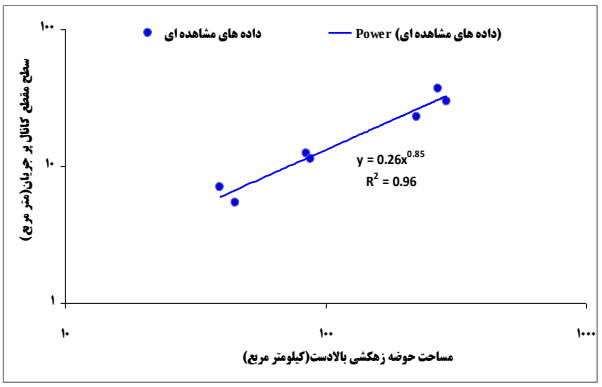
شکل ۸ – رابطه توانی بین عمق متوسط پر کانال و سطح حوضه بالادست (در حوضه‌های ۳۹ تا ۶۵۰۱ کیلومتر مربعی)



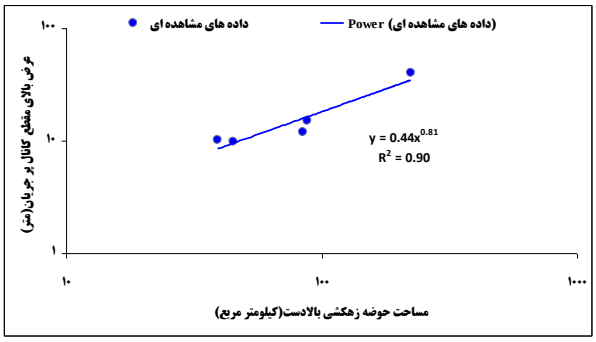
شکل ۹ – رابطه توانی بین عمق حداکثر پر کانال و سطح حوضه بالادست (در حوضه‌های ۳۹ تا ۶۵۰۱ کیلومتر مربعی)



شکل ۱۰ – رابطه توانی بین سطح مقطع پر کانال و سطح حوضه بالادست با در نظر گرفتن زیرحوضه‌ی هیدرولوژیکی (در حوضه‌های ۳۹ تا ۶۵۰۱ کیلومتر مربعی)



شکل ۱۱ – رابطه توانی چند بخشی بین سطح مقطع پر کانال و سطح حوضه بالادست با در نظر گرفتن کلاس شیب طولی بازه ۰/۴۶ تا ۰/۷۴ درصد (در حوضه‌های ۳۹ تا ۲۹۰ کیلومتر مربعی)



شکل ۱۲ – رابطه توانی چند بخشی بین عرض بالای مقطع پر کانال و سطح حوضه بالادست با در نظر گرفتن کلاس شیب طولی بازه ۰/۴۸ تا ۰/۷۴ درصد (در حوضه‌های ۳۹ تا ۲۲۳ کیلومتر مربعی)

این امر می‌تواند به دلیل تغییر در رابطه بارش – رواناب و اثرات بیشتر فعالیت‌های انسانی در حوضه‌های بزرگتر باشد. این نتایج با یافته‌های تحقیق Wilkerson et al. (2014) همخوانی دارد.

استفاده از متغیرهای کمکی و ارائه معادلات رگرسیون چند متغیره می‌تواند در ارتقای مدل‌های پیشنهادی مفید واقع شود. با این حال، بطور معمول داده‌های مشاهداتی مورد نیاز برای توسعه چنین معادلاتی در سطح مناطق جغرافیایی بزرگ در دسترس نمی‌باشند. در فرآیندهای مدلسازی، مجموعه معادلات رگرسیونی که از داده‌های سهل الوصول برای پیش‌بینی ابعاد کانال استفاده نمایند، بیش از معادلات پیشرفته‌تر مبتنی بر متغیرهای منطقه‌ای، کاربرد دارند. بطور کلی معادلات رگرسیون منطقه‌ای هندسه هیدرولیکی از دو طریق زیر ارتقا داده می‌شوند:

جدول ۱ - عملکرد مدل‌های مورد استفاده در برآورد سطح مقطع پر کانال

مدل مورد استفاده	دامنه اعداد سطح حوضه زهکشی (کیلومتر مربع)	مقادیر R^2	مقادیر RRMSE
مدل توانی	۳۹ تا ۶۵۰۱	۰/۸۷	۰/۷۴۳
مدل توانی مبتنی بر حوضه هیدرولوژیک	۳۹ تا ۶۵۰۱	۰/۸۸	۰/۷۲
مدل توانی سه بخشی	۳۹ تا ۲۹۰	۰/۹۴	۰/۱۶۶
	۲۹۰ تا ۱۱۶۵	۰/۹۱	۰/۱۳۳
	۱۱۶۵ تا ۶۵۰۱	۰/۵۵	۰/۵۴۳
مدل توانی سه بخشی اصلاح شده برای اثر شیب طولی بازه	۳۹ تا ۲۹۰	۰/۹۶	۰/۱۶۳

جدول ۲ - عملکرد مدل‌های مورد استفاده در برآورد عرض بالای مقطع پر کانال

مدل مورد استفاده	دامنه اعداد سطح حوضه زهکشی (کیلومتر مربع)	مقادیر R^2	مقادیر RRMSE
مدل توانی	۳۹ تا ۶۵۰۱	۰/۷۲	۰/۴۹
مدل توانی سه بخشی	۳۹ تا ۲۲۳	۰/۹۰	۰/۱۸۱
	۲۲۳ تا ۱۱۶۵	۰/۷۷	۰/۱۶۲
	۱۱۶۵ تا ۶۵۰۱	۰/۳۵	۰/۴۰۹
مدل توانی سه بخشی اصلاح شده برای اثر شیب طولی بازه	۳۹ تا ۲۹۰	۰/۹۰	۰/۱۷۸

جدول ۳ - عملکرد مدل‌های مورد استفاده در برآورد عمق متوسط پر کانال

مدل مورد استفاده	دامنه اعداد سطح حوضه زهکشی (کیلومتر مربع)	مقادیر R^2	مقادیر RRMSE
مدل توانی	۳۹ تا ۶۵۰۱	۰/۴۵	۰/۴۲۷
مدل توانی سه بخشی	۳۹ تا ۱۰۰	۰/۵۹	۰/۱۱۹

جدول ۴ - عملکرد مدل‌های مورد استفاده در برآورد عمق حداکثر پر کانال

مدل مورد استفاده	دامنه اعداد سطح حوضه زهکشی (کیلومتر مربع)	مقادیر R^2	مقادیر RRMSE
مدل توانی	۳۹ تا ۶۵۰۱	۰/۳۰	۰/۴۱۳
مدل توانی سه بخشی	۳۹ تا ۱۰۰	۰/۳۹	۰/۲۴۰

۱) تفکیک منطقه مورد مطالعه به مناطق همگن و منطقه‌ای نمودن مطالعه با روش مناسب

۲) ورود متغیرهای اضافی در معادلات و استفاده از رگرسیون چند متغیره

روش اول مبتنی بر انتخاب مناطق همگن و کاهش واریانس در جامعه مورد بررسی است. این روش باعث می‌شود که نمونه معرف بهتری از جامعه مورد بررسی باشد. روش دوم مبتنی بر شناسایی و استفاده از متغیرهای کمکی و کلاس‌بندی داده‌ها بر مبنای آنهاست. روش دوم باعث می‌شود که بخش غیر قابل توصیف واریانس نمونه‌ها در رابطه بین ابعاد مقطع پر کانال (به عنوان متغیر وابسته) با سطح حوضه بالادست (به عنوان متغیر مستقل) در مدل وارد شود.

در این تحقیق روش اول تأثیر بیشتری در برآوردها داشته است. با این حال تفکیک داده‌ها بر مبنای متغیرهای کلاس‌بندی شیب طولی کانال و ارتفاع متوسط سطح حوضه بالادست نیز بررسی گردید.

همچنین- همانطور که پیش‌تر ذکر شد- در بررسی اولیه مدل توانی ساده، داده مقطع ۲۹ به عنوان داده پرت تشخیص داده شد. شیب طولی زیاد بازه، می‌تواند دلیل اختلاف زیاد ابعاد مقطع ۲۹ نسبت به سایر مقاطع پایدار باشد. همچنین مقطع ۲۹ بر روی یکی از شاخه‌های فرعی نزدیک به خروجی حوضه واقع شده است که احتمالا از نظر میزان بارش شرایط متفاوتی را نسبت به سایر مقاطع با سطح حوضه زهکشی مشابه تجربه می‌نماید. ارتفاع متوسط سطح حوضه بالادست که به عنوان شاخصی از تغییرات مکانی مقدار بارش، نوع بارش، دما و ... در سطح حوضه می‌باشد، به عنوان فاکتوری مؤثر بر رابطه بین ابعاد مقطع پر کانال و سطح حوضه بالادست مقطع مورد بررسی قرار گرفت. مزیت این متغیر کلاس‌بندی در این است که معمولا لایه رقومی ارتفاع (DEM) برای همه مناطق دنیا در دسترس می‌باشد و براساس لایه رقومی ارتفاع، تغییرات مکانی ارتفاع به راحتی تعیین می‌گردد. بنابراین استفاده از آن به عنوان متغیری کمکی جهت بهبود برآورد ابعاد مقطع پر کانال پیشنهاد شده است. در این زمینه، تعیین رابطه ارتفاع با داده‌های ایستگاهی بارش و بررسی گرادیان ارتفاعی بارش در حوضه مورد بررسی می‌تواند دقت مدلسازی هندسه هیدرولیکی براساس سطح حوضه بالادست را به میزان قابل توجهی افزایش دهد و محقق را در شناسایی دقیق‌تر مناطق همگن یاری رساند. با این حال، یکی از مشکلات اصلی در استفاده از مزایای کلاس‌بندی داده‌ها در مطالعه کنونی، تعداد مقاطع کم برای کلاس‌بندی داده‌ها براساس بارش بود. محدود نمودن سطح بررسی به محدوده‌های همگن، تعداد داده‌های معرف هر ناحیه را کاهش داده و در نتیجه باعث کاهش صلابت معادلات ارائه شده می‌گردد (منطبق با نتایج Johnson and Fecko, 2008). در کل دو روش منطقه‌ای نمودن روابط هندسه هیدرولیکی و ورود متغیرهای اضافی با توجه به داده‌های موجود در حوضه مورد بررسی، می‌توانند دقت برآورد هندسه هیدرولیکی مقطع پر کانال را افزایش دهند هر چند منحنی‌های ارائه شده برای مناطق بسیار کوچک نیز ممکن است دارای واریانس و خطای برآورد قابل توجهی باشند.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، عملکرد مدل‌های توانی مختلف در برآورد ابعاد مقاطع کانال‌های پایدار حوضه تروال مورد بررسی قرار گرفت. پس از تعیین ابعاد مقطع پر کانال، روابط هندسه هیدرولیکی ارائه گردید و سپس از مدل‌های توانی ساده، مدل‌های توانی چندبخشی مبتنی بر کلاس‌بندی سطح حوضه زهکشی و مدل‌های توانی مبتنی بر مرز هیدرولوژیک و متغیرهای کلاس‌بندی شیب طولی کانال و ارتفاع متوسط سطح حوضه بالادست (به عنوان شاخصی از تغییرات مکانی مقدار بارش، نوع بارش، دما و ...) استفاده شد. نتایج حاصله نشان داد که مدل‌های توانی چندبخشی مبتنی بر کلاس‌بندی سطح حوضه زهکشی بهترین عملکرد را داشتند و در مواردی اعمال شیب طولی کانال در ارتقای مدل‌های مذکور مؤثر بود. نتایج بدست آمده از این تحقیق در پروژه‌های احیای رودخانه و عملیات متعدد عمرانی کاربرد دارد. در راستای بهبود نتایج می‌توان از فرموله نمودن ابعاد کانال براساس دبی مقطع پر کانال استفاده نمود. در این راستا داغاب وقایع سیلابی پاییز ۱۳۹۴ در مقاطع مختلف برداشت شده است که در صورت انتشار آمار دبی روزانه سال آبی ۹۵-۱۳۹۴ ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه تروال، دبی مقطع پر کانال و دوره بازگشت دبی شکل دهنده کانال قابل بررسی خواهد بود.

پی‌نوشت‌ها

1- Bankfull Discharge
2- Downstream Hydraulic Geometry
3 - Relative Root Mean Squared Error

۵- مراجع

Castro JM, Jackson PL (2001) Bankfull discharge recurrence intervals and regional hydraulic geometry relationships: patterns in the Pacific Northwest, USA. Journal of the American Water Resources Association 37 (5):1249–1262

Chang T, Fang Y, Wu H, Mecklenburg D (2004) Characteristics of bankfull channel dimensions in southeast Ohio, self-sustaining solutions for streams, wetlands and watershed. American Society of Agricultural Engineering, 8p

Cleveland WS (1979) Robust locally-weighted regression and smoothing scatterplots. Journal of the American Statistical Association 74:829–836, doi:10.2307/2286407

Cleveland WS, Devlin SJ, Grosse E (1988) Regression by local fitting methods, properties, and computation algorithms. Journal of econometrics 37(1):87–114, doi:10.1016/0304-4076(88)90077-2

Cleveland WS, Grosse E (1991) Computational methods for local regression. Statistics and Computing 1:47–62, doi:10.1007/BF01890836

Cohen RA (1999) An introduction to PROC LOESS for local regression. 24th SAS Users Group International Conference, Pap. 273, SAS Institute Inc. Cary, North Carolina, USA: 9p[Available at

Report 2004-5263, 19p. http://pubs.usgs.gov/sir/2004/5263/pdf/sir_2004_5263.pdf

Leopold LB (1994) A view of the river. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, ISBN-13: 978-0674018457, 298p

Leopold LB, Maddock JT (1953) The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. U.S. Geological Survey professional paper 282-B, 56p

Leopold LB, Wolman MG, Miller JP (1964) Fluvial processes in geomorphology. Freeman, San Francisco, California, ISBN: 0-486-68588-8, 522p

McCandless TL, Everett RA (2002) Maryland stream survey, bankfull discharge and channel characteristics of streams in the Piedmont hydrologic region. Chesapeake Bay Field Office CBFO-S02-01, U.S. Fish & Wildlife Service, prepared in cooperation with Maryland State Highway Administration and U.S. Geological Survey, 40p[available at www.fws.gov/r5cbfo]

Miller SJ, Davis D (2003) Optimizing Catskill Mountain regional bankfull discharge and hydraulic geometry relationships. in: watershed management for water supply systems: Proceedings of the American Water Resources Association 2003 International Congress, New York City, New York, June 29-July 2, 2003, 10p. http://www.catskillstreams.org/pdfs/catskill regionalcurves.pdf

Mulvihill CI, Baldigo BP, Miller SJ, DeKoskie D, DuBois J (2009) Bankfull discharge and channel characteristics of streams in New York State. U.S. Geological Survey scientific investigations report 2009-5144, 51p. http://pubs.usgs.gov/sir/2009/5144/pdf/sir2009-5144_mulvihil_bankfull_2revised508.pdf

Newson MD (2002) Geomorphological concepts and tools for sustainable river ecosystem management. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems 12(4):365–379, doi:10.1002/aqc.532

Osmani P (2016) Analysis of geomorphologic equilibrium in Tarwal Basin (Kurdistan Province). M.Sc. Thesis in natural hazards, Supervision of Hadi nayyeri, advisor: Khaled Osati, Department of Geomorphology, Faculty of Natural Resources, University of Kurdistan, Iran, 134p (In Persian)

Powell RO, Miller SJ, Westergard BE, Mulvihill CI, Baldigo BP, Gallagher AS, Starr RR (2004) Guidelines for surveying bankfull channel geometry and developing regional hydraulic-geometry relations for streams of New York State. U.S. Geological Survey open-file report 03-92, 20p. http://www.ats.ucla.edu/stat/sas/library/loesssugi.pdf]

Dunne T, Leopold LB (1978) Water in environmental planning. W. H. Freeman Company, San Francisco, 818 p

Faustini JM, Kaufmann PhR, Herlihy AT (2009) Downstream variation in bankfull width of wadeable streams across the conterminous United States. Geomorphology 108:292–311

Freund RJ, Wilson WJ, Sa P (2006) Regression analysis: statistical modeling of a response variable. Academic Press, Second edition, 459p

Guthrie W (2012) Process modeling in NIST/SEMATECH e-handbook of statistical methods. edited by C. Croarkin and P. Tobias., National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Md., Electronic document [Available at http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/]

Hardy RJ (2006) Fluvial geomorphology. Progress in Physical Geography 30(4):553–567, doi:10.1191/0309133306pp498pr

Harrelson CC, Rawlins CL, Potyondy JP (1994) Stream channel reference sites: an illustrated guide to field technique. General Technical Report RM-245, Fort Collins, Colorado, United States Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, 61 p

Helsel DR, Hirsch RM (2002) Statistical methods in water resources, techniques of water-resources investigations. Book 4, chap. A3, U.S. Geological Survey, 522p[Available at http://water.usgs.gov/pubs/twri/twri4a3/]

Hey RD, Thorne CR (1986) Stable channels with mobile gravel beds. Journal of Hydraulic Engineering 112(8):671–689

Jamieson PD, Porter JR, Wilson DR (1991) A test of the computer simulation model ARCWHEAT on wheat crops grown in New Zealand. Fields Crop Research 27:337 -350

Johnson PA, Fecko BJ (2008) Regional channel geometry equations: a statistical comparison for physiographic provinces in the eastern US. River Research and Applications 24(6):823–834

Knighton D (1998) Fluvial forms and processes: a new perspective. Arnold, New York. 383p

Lawlor SM (2004) Determination of channel-morphology characteristics, bankfull discharge, and various design-peak discharges in western Montana. U.S. Geological Survey Scientific Investigations

Engineers, Engineer Research and Development Center ERDC/CHL CR-01-1, Vicksburg, Mississippi, 416p

Tetra Tech EM Inc (2004) Assessment, geomorphic definition, and documentation of Kansas stream corridor reference reaches. Final Report for EPA Wetlands Grant CD 987073-01, Kansas City, Kans, 45p

USDA NRCS (United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service) (2007) Stream restoration design. National Engineering Handbook, part 654, USDA, NRCS, Washington, D.C, 1626p

USDA-NRCS (2007) developing regional relationships for bankfull discharge using bankfull indices. National engineering handbook part 654, Technical Supplement 5, Washington, D.C., 9pp

Wilkerson GV, Kandel DR, Perg LA, Dietrich WE, Wilcock PR, Whiles MR (2014) Continental-scale relationship between bankfull width and drainage area for single-thread alluvial channels. Water Resources Research 50:919–936, doi:10.1002/ 2013WR013916

http://ny.water.usgs.gov/pubs/of/of03092/of03-092.pdf

Rosenfeld JS, Post J, Robins G, Hatfield T (2007) Hydraulic geometry as a physical template for the river continuum: application to optimal flows and longitudinal trends in salmonid habitat. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 64(5):755–767

Rosgen DL (1996) Applied river morphology. Wildland Hydrology Books, second edition, Pagosa Springs, Colorado, ISBN-13: 978-0965328906, 350p

Sherwood J, Huitger C (2005) Bankfull characteristics of Ohio streams and their relation to peak streamflows. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5153, 38p. http://pubs.usgs.gov/sir/2005/5153/pdf/Bankfull_book.pdf

Shreve R (1979) Models for prediction in fluvial geomorphology. Mathematical Geology 11(2):165–174, doi:10.1007/BF01028963

Soar PJ, Thorne CR (2001) Channel restoration design for meandering rivers. U.S. Army Corps of