

تغییرات مورفولوژیکی رودخانه و ارتباط آن با فرایندهای حاکم (مطالعه موردی: رودخانه فیروزه - شاهجوب)

❖ **محبوبه حاجی بیگلو؛** کارشناس ارشد آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی یزد
❖ **محمدتقی دستورانی؛** دانشیار دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست دانشگاه فردوسی مشهد
❖ **عباسعلی قزل سوفلو؛** استادیار گروه عمران دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد
❖ **محمد رضا اختصاصی؛** دانشیار دانشکده منابع طبیعی دانشگاه یزد

چکیده:

مورفولوژی هر سیستم رودخانه‌ای در ارتباط و تحت تأثیر فرایندهای حاکم بر آن، از جمله شرایط اقلیمی، هیدرولوژیکی، هیدرولیکی، وضعیت فرسایش، و رسوب‌گذاری و نیز خصوصیات زمین‌شناسی و توپوگرافی محیط رودخانه‌ای و حوزه بالادست آن، است. شناخت ویژگی‌ها و آثار متقابل فرم و فرایندهای حاکم در سیستم‌های رودخانه‌ای، که به شناخت رفتار رودخانه‌ها در محدوده‌های زمانی و مکانی منجر می‌شود، اهمیت ویژه‌ای در توسعه مدل‌های مفهومی در ارتباط با محیط‌های رودخانه‌ای دارد. در این تحقیق سعی شد مورفولوژی حاصل از فرایندهای حاکم بر رودخانه فیروزه - شاهجوب در خراسان شمالی ارزیابی و رابطه بین خصوصیات هندسی و عوامل مؤثر بر آنها استخراج شود. بدین منظور، مدل هیدرولیکی HEC-RAS (از طریق الحاقیه HEC-Geo RAS)، پس از آنالیز حساسیت و واسنجی، جهت شبیه‌سازی عوامل و فرایندهای حاکم اجرا گردید و روابط حاکم بر پارامترهای مختلف هندسی و عوامل مؤثر بر این پارامترها در ۳۷ بازه تفکیک شده در این رودخانه استخراج و تجزیه و تحلیل شد. بر اساس نتایج به دست آمده، با در نظر گرفتن مقادیر خطای استاندارد، سطح معنی‌داری، و ضریب تعیین، از بین مدل‌های مختلف خطی ساده، درجه ۲، درجه ۳، و نمایی، مدل‌های نمایی مناسب‌ترین روابط حاکم بر خصوصیات هندسی و عوامل مربوط به فرایندهای مؤثر بر رودخانه مورد نظرند.

واژگان کلیدی: مورفولوژی رودخانه، مدل HEC-RAS، مدل‌های رگرسیونی، رودخانه فیروزه - شاهجوب

مقدمه

از مباحث کلیدی و عمده در علم مهندسی و مدیریت رودخانه موضوع مورفولوژی کانال‌های رودخانه‌ای است که به کمک آن می‌توان به مجموعه اطلاعات مفیدی درباره شکل هندسی، فرم بستر، پروفیل طولی، مقاطع عرضی، و تغییر شکل و مکان آن‌ها در طول زمان دست یافت. مورفولوژی رودخانه‌ها از منظرهای مختلف قابل بررسی است، از جمله زمین‌شناسی، نوع مسیر، لایه‌بندی، دانه‌بندی مصالح بستر و سواحل، و قدرت و انرژی سیلاب‌ها (Breach, 2008). مطالعات در زمینه مورفولوژی رودخانه‌ها و سیلاب‌ها به منظور شناسایی کلی شکل، فرایند توسعه، و روند تغییرات آن جهت تحلیل پایداری و فرسایش کرانه‌های رودخانه‌ها و دستیابی به قانونمندی‌های کلی صورت می‌گیرد (Ahmadi, 2004). بنابراین، درک طبیعت و میزان تغییرات انجام‌یافته موجب می‌شود علل فرسایش کناره‌های رودخانه را شناسایی و روند این پدیده را در آینده ارزیابی کرد. برای نیل به این هدف، باید متغیرهایی را، که مشخصه سیستم‌های رسوبی‌اند، تحلیل و با یک شاخص تعریف‌شده مقایسه کرد.

Leopold & Maddock (1953) طی بررسی‌های خود به این نتیجه رسیدند که عرض، عمق، و سرعت جریان در بازه‌های طبیعی با مقاطع پایدار را می‌توان با معادلات ساده درجه‌دار به شرح زیر بیان کرد:

$$W = aQb \quad (1)$$

$$D = cQf \quad (2)$$

$$V = kQm \quad (3)$$

W عبارت است از عرض سطح آب در جریان مورد نظر بر حسب متر.

D عبارت است از عمق متوسط جریان بر حسب متر.

V عبارت است از سرعت متوسط مقطع بر حسب متر بر ثانیه.

معادلات مذکور برای دبی Q با مقطع پر بر حسب

متر مکعب در ثانیه قابل استفاده است.

(Najafi and Jamiri, 2005) در پژوهشی با عنوان «برآورد دبی‌های سیلابی بر اساس خصوصیات هندسی و هیدرولیکی مقاطع رودخانه» در بازه‌ای از رودخانه مهرانه‌رود، در مقاطع مختلف، از طریق روندیابی هیدرولیکی هیدروگراف‌های استخراج‌شده در بالادست، به کمک مدل یک‌بعدی MIKE ۱۱، دبی‌های سیلابی در هر یک از بازه‌ها را برآورد کردند. سپس، با استفاده از خصوصیات ژئومتری رودخانه و دبی‌های سیلابی، در مقاطع مختلف، روابط رگرسیونی استخراج شد. روابط به‌دست‌آمده از لگاریتم داده‌ها نسبت به روابط حاصل از داده‌های اصلی دارای ضریب تعیین بیشتر و خطای نسبی کمتری بود. همچنین، روابط چندمتغیره، نسبت به روابط ساده، ضریب تعیین بالاتر و خطای برآورد کمتری داشت.

(Azizian et al., 2010) در تحقیقی با عنوان «واسنجی نتایج حاصل از مدل عددی HEC-RAS در حوزه‌های فاقد ایستگاه هیدرومتری (مطالعه موردی رودخانه زواریان)»، اعلام کردند که، با توجه به نبود ایستگاه هیدرومتری بر روی رودخانه مورد مطالعه، واسنجی نتایج حاصل از اجرای مدل HEC-RAS، عملاً، امکان‌پذیر نبود، اما برای رسیدن به مقادیر نزدیک به واقعیت و به‌کاربردن یک معیار و محک برای مقادیر ضریب زبری از روش‌های تجربی بهره گرفته شد. پس از بازدیدهای صحرایی و بررسی‌های کارشناسی، حساسیت مدل به پارامترهایی، همچون سرعت متوسط، عمق جریان و عرض سطح آب، و تعیین ضریب مانینگ مناسب برای بستر رودخانه زواریان در بازه‌های مختلف تحلیل شد.

Thornes (1980) در رابطه با کانال‌های کوچک رودخانه‌ای در جنوب شرق اسپانیا، نوسانات عرض کانال‌های با جریان کم را بررسی و اظهار کرد که، در مجموع، به طرف پایین‌دست، عرض رودخانه‌ها پیوسته افزایش می‌یابد. این تغییرات عرض در پایین‌دست رودخانه به تغییرات مکانی الگوی کنش و رسوب‌گذاری

کانال فعال بر حسب فوت است.

Mosley (1979) داده‌های هیدرولوژی، رسوب‌شناسی، و مورفولوژی ۷۳ رودخانه آبرفتی را در ایجاد رابطه پیش‌بینی‌کننده برای پارامترهای هیدرولوژیکی استفاده کرد و به رابطه (۸) دست یافت:

$$Q_{ma} = 1.6Ab^{0.9}ASPRAT^{-0.376}S^{-0.392}$$

$$D_{mean} = 0.278(8)$$

که در آن Q_{ma} دبی متوسط سالانه بر حسب متر مکعب بر ثانیه، Ab سطح مقطع رودخانه در مقطع بر حسب متر مربع، $ASPRAT$ نرخ جهت (D_{max}) ، R که حاصل تقسیم عمق حداکثر مقطع بر بر شعاع هیدرولیکی مقطع پر است، S شیب رودخانه مقطع پر، و D_{mean} متوسط قطر ذرات رسوبی بستر (m) است.

Pappenberger et al. (2005) به تحلیل عدم قطعیت جریان غیرماندگار به صورت یک‌بعدی در مدل HEC-RAS با انتخاب مقادیر متفاوت ضریب زبری اقدام کردند. آن‌ها در این تحقیق محدوده‌ای بین $0.01/0.1$ تا $0.9/1$ را برای ضریب مانینگ انتخاب کردند. در خروجی‌های هیدرولیکی تغییراتی مشاهده شد که در برخی از بازه‌ها تغییرات خوب بود و در برخی از بازه‌ها نامناسب. آن‌ها بیان کردند که این آنالیز به شرایط مرزی و نوع رژیم بستگی دارد که مدل در آن اجرا می‌شود تا از این طریق بتوان تغییرات را به‌خوبی مشاهده کرد. Cook (2008) در پایان‌نامه خود، به مقایسه مدل یک‌بعدی HEC-RAS و مدل دو‌بعدی FESWMS در تهیه نقشه طغیان سیل پرداخت. از الحاقیه HEC-GeoRAS و سیستم مدل آب سطحی (SMS) از طریق ابزارهای Pre RAS و Post RAS ورودی‌های مدل جهت تهیه نقشه سیل خیزی استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان داد افزایش تعداد مقاطع عرضی در فرایند شبیه‌سازی وسعت سیل خیزی را در نزدیکی خاکریزها افزایش می‌دهد، همچنین، مدل دو‌بعدی FESWMS در فرایند پیش‌بینی وسعت سیل خیزی بالاتری را با قدرت تفکیک‌پذیری بیشتر نشان می‌دهد. این در حالی است که مدل HEC-RAS همان وسعت سیل خیزی یا حتی

نسبت داده می‌شود و، در حقیقت، عکس‌العملی است به وضعیت و فراوانی سیلاب‌های منفرد بزرگ و، همچنین، جریان‌های کوچک کم‌آبی. البته، در دیگر مناطق خشک گاهی مشاهده شده که عرض رودخانه به طرف پایین دست به‌مرور کاهش می‌یابد و همراه آن عمق و سطح مقطع نیز با کاهش مواجه است.

Hedman et al. (1972)، در ایالات متحده، رواناب

میانگین سالانه را به ابعاد رودخانه نسبت دادند. ایشان برای ۲۸ آبراهه دائمی و ۲۰ آبراهه موقتی در بخش‌های نیمه‌مرطوب و خشک ایالت کالیفرنیا روابط (۴) و (۵) را به‌دست آوردند:

$$Q_r = 186Wd^{1.54}Dd^{0.8} \quad (4)$$

$$Q_r = 186Wkern-1d^{0.8}Dd \quad (5)$$

که در آن Q_r رواناب متوسط سالانه بر حسب ایکر فوت در سال، Wd عرض رودخانه در سطح مرجع رسوبی بر حسب فوت، و Dd متوسط عمق رودخانه در سطح مرجع رسوبی بر حسب فوت است.

Brice (1974)، در تحقیقی در کشور کانادا، نشان

داد که دبی‌های سیلابی را می‌توان از روی ابعاد رودخانه به‌طور موفقیت‌آمیزی تخمین زد. وی در تحقیق خود ۷۱ رودخانه با بستر گراولی در ایالت آلبرتا انتخاب کرد و رابطه (۶) را به‌دست آورد:

$$Wb = 4.57Q^{20.527} \quad (6)$$

که در آن Wb عرض رودخانه در مقطع پر بر حسب فوت و Q_2 دبی سیلابی با دوره بازگشت دو سال بر حسب فوت مکعب در ثانیه است.

Osterkamp & Hedman (1982) در مطالعه‌ای

در ایالات متحده، بر روی ۳۲ آبراهه با شیب زیاد در ایالت‌های مونتانا، وایومینگ، داکوتای جنوبی، کلرادو، و نیومکزیکو رابطه‌ای بین Q_{ma} و W_a برقرار کردند که به صورت زیر است:

$$Q_{ma} = 0.017 W_a^{1.98} \quad (7)$$

که در آن Q_{ma} متوسط دبی سالانه بر حسب فوت مکعب بر ثانیه و W_a عرض رودخانه در سطح مرجع

یکی از موضوعات مهم و ضروری در ارزیابی شرایط هیدرولوژی حوزه، به منظور امکان اجرای تحقیق حاضر، بررسی وضعیت سیلابی حوزه مورد مطالعه است. بنابراین، باید سیلاب‌های بزرگ و استثنایی حوزه به نحو منطقی و قابل قبول برآورد شود. با توجه به اینکه آمار ۳۵ ساله آبدی رودخانه فیروزه-شاهجوب در محل ایستگاه هیدرومتری بابامان موجود است، از داده‌های متوسط آبدی سالیانه ایستگاه بابامان در انتهای بازه مورد مطالعه، از سال آبی ۱۳۵۲-۱۳۵۳ تا ۱۳۷۹-۱۳۸۰ (دوره مشترک آماری با ایستگاه‌های مجاور حوزه) جهت بررسی وضعیت آبدی رودخانه مورد نظر استفاده شده است. جدول ۱ مشخصات ایستگاه‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. در رودخانه مورد مطالعه، بر اساس نتایج به دست آمده از نتایج خروجی نرم‌افزار Hyfa توزیع لوگ نرمال سه پارامتره، به عنوان توزیع مناسب، جهت برآورد دبی‌های سیلابی انتخاب شد.

روش کار

بررسی آمار ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه طرح نشان داد که ایستگاه‌های آغمزار، دربند سنخواست، بیدواز اسفراین، و درکش آمار ناقصی داشتند که بر اساس میزان همگنی ایستگاه‌ها، آمار ایستگاه‌های ناقص بر اساس آمار ایستگاه‌های موجود تصحیح شد. پس از تکمیل و تطویل آمار ایستگاه‌های ناقص، با استفاده از رابطه همبستگی، سیلاب‌های هر ایستگاه در دوره شاخص ۱۳۵۲-۱۳۵۳ تا ۱۳۷۹-۱۳۸۰ با دوره بازگشت‌های مختلف، با برنامه رایانه‌ای Hyfa، تحلیل شد. ایستگاه‌های مورد مطالعه، اغلب، دارای آمار کوتاه‌مدت بودند و فقط ایستگاه بابامان، در خروجی حوزه مذکور، در مقایسه با ایستگاه‌های دیگر، دارای آمار بلندمدت بود. بنابراین، جهت محاسبه دبی سیلابی، دوره شاخص ۱۳۵۲-۱۳۵۳ تا ۱۳۷۹-۱۳۸۰، که همپوشانی بیشتری در ایستگاه‌های مذکور نشان داده بود، انتخاب شد. پس از تعیین دبی سیلابی هر یک از ایستگاه‌ها، دبی حداکثر سیلاب‌های رودخانه فیروزه-

بیشتر را با قدرت تفکیک پذیری کمتری نشان می‌دهد. Stevenson (2009) طی تحقیقی روی رودخانه کلیز آنالیز حساسیت را برای مدل یک‌بعدی HEC-RAS انجام داد. در این تحقیق، مدل TIN منطقه، بر اساس داده‌های عمق آب در رودخانه، طی سال‌های ۱۹۷۱ تا ۲۰۰۷، در قالب سه لایه TIN تهیه شد. نتایج نشان داد موقعیت مقاطع عرضی طی عملیات کالیبراسیون مدل تغییرات چندانی نداشت و از طرفی، شکل واقعی مقاطع طی عملیات درون‌یابی به همان شکل اولیه حفظ شده بود. آنالیز حساسیت مدل، همچنین، نشان داد زمانی که تغییرات ضریب زبری مانینگ $\pm 5\%$ است، تغییرات سطح تراز آب در پایین دست $\pm 2\text{cm}$ است که این مسئله نشان می‌دهد اگر فرایند کالیبراسیون به درستی صورت نگیرد، شبیه‌سازی ممکن است به خطا منجر شود.

در تحقیق حاضر سعی شد فرایندهای حاکم بر رودخانه فیروزه-شاهجوب و مورفولوژی حاصل از این فرایندها تجزیه و تحلیل و روابط بین عوامل حاکم بر رودخانه و تغییرات هندسی حاصل از این عوامل استخراج و بررسی شود.

روش شناسی

خصوصیات رودخانه مورد مطالعه

رودخانه فیروزه-شاهجوب از ارتفاعات جنوب و جنوب‌غربی روستای فیروزه، واقع در استان خراسان شمالی، سرچشمه می‌گیرد. ابتدای بازه مورد مطالعه در فاصله ۲/۵ کیلومتری بالادست روستای فیروزه واقع شده است. محدوده مورد مطالعه در مختصات جغرافیایی $35^{\circ}57'55''$ تا $35^{\circ}57'58''$ طول شرقی و $55^{\circ}20'14''$ تا $55^{\circ}37'03''$ عرض شمالی و به طول تقریبی ۳۳/۳ کیلومتر واقع شده است. حوزه بالادست این رودخانه در شمال روستای بابامان در حد فاصل مختصات جغرافیایی $35^{\circ}57'03''$ تا $35^{\circ}57'40''$ طول شرقی و $55^{\circ}14'14''$ تا $55^{\circ}37'35''$ عرض شمالی قرار گرفته است. مساحت حوزه آبخیز رودخانه فیروزه-شاهجوب ۱۲۳۳ کیلومتر مربع و محیط آن ۲۰۴/۴ کیلومتر است.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری محدوده مورد مطالعه

ردیف	نام ایستگاه	نام رودخانه	ارتفاع (m)	مساحت (km)	مختصات جغرافیایی			کد
					عرض	طول		
۱	بابامان	چناران	۱۰۱۰	۱۲۳۳	۲۶	۵۷	۲۹	۱۱۰۲۱
۲	قتلش	شیرین‌دره	۹۶۰	۱۳۵۵	۱۶	۵۷	۴۸	۱۱۰۲۷
۳	آغمزار	اترک	۵۶۰	۱۲۰۰۴	۵۴	۵۶	۴۱	۱۱۰۳۹
۴	دربند	سنخواست	۱۱۶۰	۱۱۲۱	۴۹	۵۶	۱۵	۴۷۰۶۳
۵	دربند	سملقان	۶۸۰	۱۰۸۷	۵۸	۵۶	۳۶	۱۱۰۳۵
۶	بیدواز	اسفراین	۱۲۰۵	۵۱۹	۳۰	۵۷	۴	۴۷۰۵۹
۷	بارزو	قلیچ	۱۵۵۰	۴۸۰	۵۷	۵۷	۳۶	۱۱۰۱۱
۸	شیرآباد	شیرآباد	۸۵۰	۱۸۳	۵۵	۵۶	۳۰	۱۱۰۳۳
۹	درکش	درکش	۱۰۴۰	۱۱۴	۴۴	۵۶	۲۶	۱۱۰۳۱

$$Q1 = Q2(A1/A2)0.75 \quad (9)$$

A1 مساحت زیرحوزه A2، مساحت کل (km²)
حوزه در ایستگاه بابامان Q2، (km²) سیلاب ایستگاه
(بابامان) با دوره بازگشت‌های مختلف (m³/s)، و Q1
سیلاب زیرحوزه با دوره بازگشت‌های مختلف (m³/s)
است. جدول ۲ مقادیر برآورد شده را نشان می‌دهد.

شاهجوب در محل سرشاخه‌ها با دوره بازگشت‌های
مختلف و بر اساس مقادیر خروجی نرم‌افزار Hyfa
تعیین شد. سپس، با استفاده از رابطه دیکن، که در ذیل
به آن اشاره شده، مقادیر برآورد شده به زیرحوزه‌های
مطالعاتی تعمیم داده شد (جدول ۱).

جدول ۲. دبی حداکثر سیلاب‌های زیرحوزه‌های حوزه رودخانه فیروزه-شاهجوب با دوره بازگشت‌های مختلف

زیرحوزه‌ها	دوره بازگشت (سال)										
	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰	۲۰۰	۱۰۰	۵۰	۲۵	۲۰	۱۰	۵	۲
۱	۳۷۶٫۶	۱۹۴٫۲	۱۵۵٫۳	۱۱۳	۸۶٫۹	۶۵٫۲	۴۷٫۴	۴۲٫۴	۲۹	۱۸٫۳	۷٫۶
۲	۴۲۸	۲۲۰٫۸	۱۷۶٫۶	۱۲۸٫۴	۹۸٫۸	۷۴٫۱	۵۳٫۹	۴۸٫۲	۳۲٫۹	۲۰٫۸	۸٫۶
۳	۴۹۳٫۷	۲۵۴٫۶	۲۰۳٫۶	۱۴۸٫۱	۱۱۳٫۹	۸۵٫۵	۶۲٫۲	۵۵٫۶	۳۸	۲۴	۱۰
۴	۶۴۷٫۸	۳۳۴٫۱	۲۶۷٫۲	۱۹۴٫۴	۱۴۹٫۵	۱۱۲٫۲	۸۱٫۶	۷۳	۴۹٫۸	۳۱٫۴	۱۳٫۱
۵	۸۲۹٫۵	۴۲۷٫۸	۳۴۲٫۱	۲۴۸٫۹	۱۹۱٫۴	۱۴۳٫۷	۱۰۴٫۵	۹۳٫۵	۶۳٫۸	۴۰٫۲	۱۶٫۷
۶	۸۶۷٫۵	۴۴۷٫۴	۳۵۷٫۸	۲۶۰٫۳	۲۰۰٫۲	۱۵۰٫۳	۱۰۹٫۳	۹۷٫۸	۶۶٫۷	۴۲٫۱	۱۷٫۵
۷	۱۰۲۹٫۱	۵۶۳٫۲	۴۵۰٫۴	۳۲۷٫۷	۲۵۲	۱۸۹٫۲	۱۳۷٫۵	۱۲۳٫۱	۸۴	۵۳	۲۲
۸	۱۱۰۹٫۳	۵۷۲٫۱	۴۵۷٫۶	۳۳۲٫۸	۲۵۶	۱۹۲٫۲	۱۳۹٫۷	۱۲۵	۸۵٫۴	۵۳٫۸	۲۲٫۴
۹	۱۳۹۹٫۲	۷۲۱٫۶	۵۷۷٫۱	۴۱۹٫۸	۳۲۲٫۹	۲۴۲٫۴	۱۷۶٫۲	۱۵۷٫۷	۱۰۷٫۷	۶۷٫۹	۲۸٫۲
۱۰	۱۴۱۰٫۲	۷۲۷٫۳	۵۸۱٫۷	۴۲۳٫۱	۳۲۵٫۴	۲۴۴٫۳	۱۷۷٫۶	۱۵۸٫۹	۱۰۸٫۵	۶۸٫۴	۲۸٫۴
کل حوزه	۱۴۲۳٫۹	۷۳۴٫۳	۵۸۷٫۳	۴۲۷٫۲	۳۲۸٫۶	۲۴۶٫۶	۱۷۹٫۳	۱۶۰٫۵	۱۰۹٫۶	۶۹٫۱	۲۸٫۷

انتخاب مدل ریاضی در مطالعات هیدرولیکی

در تحلیل جریان رودخانه‌ها، مدل‌های فیزیکی و ریاضی همچون ابزاری مناسب نقش ایفا می‌کنند. کاربرد مدل‌های فیزیکی - به دلیل نیازمندی به فضای وسیع، هزینه زیاد، و زمان طولانی - جهت انجام دادن آزمایش‌ها، اغلب، توصیه نمی‌شود. به همین دلیل، بسیاری از مسائل مهندسی رودخانه را می‌توان با مدل‌های ریاضی بررسی کرد. با در نظر گرفتن موارد فوق و با عنایت به اینکه هدف از مطالعات رودخانه فیروزه - شاهجوب تعیین تغییرات مورفولوژیکی و استخراج روابط بین پارامترهای هندسی و هیدرولیکی است، کاربرد مدل‌های ریاضی مناسب از جمله مدل HEC-RAS جهت بررسی هیدرولیک جریان‌های سیلابی ضروری است (Hazarika et al., 2005).

لازم است کلیه اطلاعات مورد نیاز نرم‌افزار از جمله ضریب مانینگ، دبی، هیدروگراف سیل، شیب بالادست و پایین‌دست (به عنوان شرایط مرزی)، و... به این نرم‌افزار داده شود.

در این مطالعه، از روابط تجربی ۱۰ تا ۱۳ برای برآورد ضریب زبری مانینگ بهره گرفته شد (Richard, 1997).

$$n=0.047d501/5 \quad (10)$$

$$n=d501/6/21.1 \quad (11)$$

$$n=0.013d651/6 \quad (12)$$

$$n=0.038d901/6 \quad (13)$$

که در این روابط d_{50} قطر متوسط ذرات نمونه‌گیری شده از رودخانه بر حسب متر است. d_{65} عبارت است از قطری که ۶۵ درصد وزنی ذرات بستر آبراهه از آن عبور می‌کند و بر حسب متر است. d_{90} عبارت است از قطری که ۹۰ درصد وزنی ذرات بستر از آن عبور می‌کند و بر حسب متر است.

به جز جنس مواد بستر آبراهه و دانه‌بندی آن‌ها، پارامترهای مؤثر دیگری نیز، مانند وضعیت پوشش گیاهی، پیچ و خم‌های رودخانه، و تغییرات سطح مقطع رودخانه، در زبری هیدرولیکی رودخانه‌ها تأثیر

می‌گذارد. بنابراین، پس از تعیین مقادیر تجربی ضریب زبری مانینگ، با استفاده از فرمول‌های فوق، لازم است مقادیر به‌دست‌آمده از این فرمول‌ها با مشاهدات صحرایی و روش کاون اصلاح شود تا تأثیر عوامل مربوط به شرایط هندسی و هیدرولیکی رودخانه هم در نظر گرفته شود.

در طول مسیر رودخانه فیروزه - شاهجوب، ۱۵۰ نمونه از مصالح بستر و جناحین رودخانه برداشت شد. محل برداشت نمونه‌ها، با توجه به تغییرات دانه‌بندی رسوبات، تغییر وضعیت شیب (توپوگرافی)، و اتصال مسیل‌های مهم به رودخانه اصلی، تعیین شد. بر این اساس، در ابتدای مسیر رودخانه هر ۵۰۰ متر یک نمونه از بستر و دو نمونه از سیلاب دشت‌ها و در بقیه طول مسیر هر ۲ کیلومتر، با توجه به یکنواختی مصالح، نمونه برداشت شد. بنابراین، پس از بازدیدهای صحرایی و بررسی‌های کارشناسی و نیز تجزیه و تحلیل نمونه‌های رسوبی برداشت‌شده، با استفاده از روش کاون، ضریب مانینگ برای بستر رودخانه فیروزه - شاهجوب در بازه‌های مختلف محاسبه شد. از نظر جریان فوق بحرانی و زیر بحرانی در رودخانه مورد مطالعه، به دلیل تغییرات ناگهانی شیب رودخانه از بازه کوهستانی در بالادست به بازه دشتی در پایین‌دست و امکان تشکیل جهش هیدرولیکی، در کاربرد مدل شرایط ترکیبی یا به عبارتی شرط مرزی در بالادست و پایین‌دست معرفی شد. شایان ذکر است که، پس از وارد کردن کلیه اطلاعات داده‌های هندسی رودخانه و داده‌های جریان، می‌توان پروفیل‌های سطح آب را با انجام دادن محاسبات هیدرولیکی در مدل مشاهده کرد.

به منظور بررسی تغییرات مورفولوژیکی رودخانه مورد مطالعه، پس از بررسی صحت و درستی داده‌های خروجی به‌دست‌آمده (از طریق واسنجی مدل HEC-RAS)، از بیشتر خروجی‌های جدول‌گونه جهت استخراج روابط آماری استفاده شد.

واسنجی و آنالیز حساسیت مدل هیدرولیکی

در این مطالعات، با توجه به اهمیت نقش سرعت در

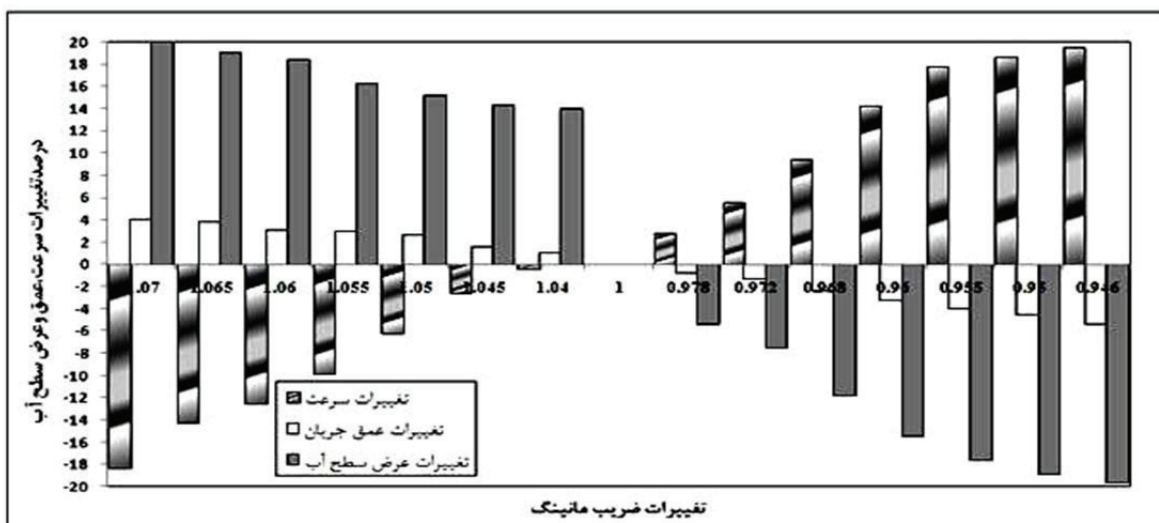
به منزله خطای کار در نظر گرفته شد (Cook, 2008). بنابراین، هر چه تعداد این مقاطع در مقایسه با کل مقاطع کمتر باشد، نشان‌دهنده آن است که کار از دقت بیشتری برخوردار است. برای کمی کردن این موضوع، درصد مقطعی که تغییرات آن‌ها بیش از ۲۰ درصد است، از دقت اولیه (۸۰ درصد) کسر می‌شود و عدد به دست آمده دقت نهایی است (جدول ۳) (شکل ۲).

پدیده فرسایش و نیز اهمیت عرض سطح آزاد آب و عمق، به عنوان پارامترهای مؤثر در مورفولوژی رودخانه، حساسیت مدل نسبت به تغییر ضریب مانینگ در سه پارامتر عرض سطح آب، سرعت، و عمق جریان بررسی شد (Azizian et al., 2010).

برای بررسی بهتر نتایج حاصل از مدل در آنالیز حساسیت، با در نظر گرفتن دقت ۸۰ درصد، تعداد مقطعی که در آن‌ها درصد حساسیت بیش از ۲۰ درصد است،

جدول ۳. نتایج آنالیز حساسیت مدل نسبت به تغییرات عرض سطح آب، عمق، و سرعت جریان (بخش اول - فیروزه)

پارامتر مورد نیاز	نوع تغییر	دقت (درصد)	تعداد مقاطع دارای حساسیت	کل مقاطع	درصد	میانگین درصد حساسیت	دقت نهایی (%)
درصد تغییرات عرض سطح آزاد آب	کاهش	۸۰	۵۶	۱۶۲۱	۳/۴۵		
به ازای ۲۰٪ تغییر ضریب مانینگ	افزایش	۸۰	۴۹۸	۱۶۲۱	۳۰/۷۲	۱۷/۰۸	۶۲/۹۲
درصد تغییرات عمق جریان به ازای ۲۰٪ تغییر ضریب مانینگ	کاهش	۸۰	۱۳۰	۱۶۲۱	۸/۰۱		
افزایش	۸۰	۷۱	۱۶۲۱	۴/۳۸	۶/۱۹	۷۳/۸۱	
درصد تغییرات سرعت جریان به ازای ۲۰٪ تغییر ضریب مانینگ	کاهش	۸۰	۲۷۲	۱۶۲۱	۱۶/۷۷		
افزایش	۸۰	۲۴۱	۱۶۲۱	۱۴/۸۶	۱۵/۸۱	۶۴/۱۹	



شکل ۲. نمایش آنالیز حساسیت سرعت، عمق، و عرض سطح آب نسبت به تغییرات ضریب مانینگ (بخش اول - فیروزه)

نرمال بودن داده‌های اصلی (هر متغیر)، بر اساس سطح احتمال در نرم‌افزار مذکور، داده‌های اصلی بررسی شد. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که بر اساس سطح احتمال (اگر سطح احتمال بزرگ‌تر از ۰/۰۵ باشد، در سطح ۹۵ درصد می‌توان چنین بیان کرد که نرمال بودن برقرار است). از این آزمون برای توابع توزیع تجمعی تجربی استفاده می‌شود و از آنجا که در تحقیق حاضر متغیرها از نوع پیوسته و دارای توزیع تجمعی بودند، از آزمون اندرسون-دارلینگ برای بررسی نرمال بودن داده‌ها استفاده شد (Hajibigloo, 2010). در خصوص داده‌های رودخانه مورد بررسی گفتنی است مشخص شد که داده‌های عرض، عمق، و دبی نرمال نبودند، بنابراین، به منظور نرمال‌سازی آن‌ها از لوگ متغیرها استفاده شد و داده‌ها نرمال شدند.

مرحله چهارم: در این مرحله میزان همبستگی بین متغیرهای هندسی و هیدرولیکی رودخانه تعیین شد. در بررسی میزان همبستگی متغیرهای مربوطه، با استفاده از همبستگی پیرسون (هر دو متغیر پیوسته‌اند) و با کمک نرم‌افزار SPSS، میزان همبستگی بین متغیرها بررسی شد (Afshani et al., 2005). در این مرحله فرض بر آن است که دبی متغیر وابسته است و عرض، عمق، سرعت، و سطح مقطع رودخانه متغیرهای مستقل‌اند.

مرحله پنجم: در این مرحله به بررسی تناسب روابط رگرسیونی خطی ساده^۲، درجه^۳،^۴ و نمایی پرداخته شد. پس از تعیین میزان همبستگی بین متغیرها، روابط رگرسیونی، با استفاده از نرم‌افزار SPSS، تعیین شد و از بین روابط تعیین‌شده بین دو متغیر (متغیر وابسته و مستقل) رابطه‌ای که بیشترین ضریب^۵ تعیین، کمترین خطای استاندارد^۶، و کمترین سطح معنی‌داری^۷ را داشت به منزله رابطه مناسب انتخاب شد (Abassi, 2010).

به منظور بررسی ارتباط بین داده‌های هندسی و هیدرولیکی به دست آمده از خروجی مدل هیدرولیکی HEC-RAS، گام‌هایی طی شد تا به یک سری از روابط آماری در مورد رودخانه مورد بررسی منجر شود؛ این مراحل به شرح زیر است:

مرحله اول: نخست در طول مسیر رودخانه به تفکیک بازه‌ها (در طول کل مسیر) بر اساس شکل پلان، پروفیل طولی رودخانه، وضعیت رسوبات بستر، وضعیت سازه‌های عرضی و جاده، و... اقدام گردید و ۳۷ بازه از ابتدای مسیر رودخانه تا انتهای آن در طول کل محدوده مورد مطالعه رودخانه انتخاب شد. مقادیر متوسط هر یک از متغیرها، از قبیل دبی، عرض، عمق، سطح مقطع، و سرعت جریان هر یک از مقاطع عرضی موجود در مدل، برای این ۳۷ بازه برای دبی با دوره بازگشت ده‌ساله محاسبه شد (پنجاه مقطع عرضی برای هر بازه در طول رودخانه مورد مطالعه در نظر گرفته شد).

مرحله دوم: آزمون همگنی داده‌ها، برای اطمینان از صحت و دقت آن‌ها، انجام گرفت. روش مورد استفاده در این تحقیق روش دنباله‌ها^۱ است. سطح معنی‌داری بزرگ ($> 0/05$) نشان می‌دهد که داده‌ها تصادفی انتخاب شده‌اند و در تحقیق حاضر، داده‌ها همگنی لازم را نشان دادند (ضریب مربوطه بزرگ‌تر از ۰/۰۵ است).

مرحله سوم: در این مرحله، به منظور بررسی ارتباط بین متغیرهای هندسی و هیدرولیکی رودخانه مورد بررسی بر اساس روابط رگرسیونی، آزمون نرمال بودن متغیرها در نرم‌افزار Mini Tab، بر اساس آزمون اندرسون-دارلینگ، انجام شد. این آزمون معیار برازش مناسب انحراف از نرمال است که بر اساس دو پارامتر چولگی و کشیدگی نمونه محاسبه می‌شود. برای تعیین

1. Runs Test
2. Linear
3. Quadratic
4. Cubic
5. Coefficient of Determination
6. Standard Error
7. Probablity Value

نتایج

تلقی نمی‌شوند. معادله (۱۵) رابطه بین دبی و عوامل دیگر را نشان می‌دهد.

جدول ۶ نتایج مدل‌های درجه ۳ را نشان می‌دهد. در مدل رگرسیونی درجه ۳، میزان R^2 افزایش یافته که نشان‌دهنده میزان تأثیر زیاد متغیرها بر دبی رودخانه است و، همان‌گونه که از مقادیر آماری P-value مشخص است، همه متغیرها در سطح ۱ درصد معنی‌دار نیستند، بنابراین، الگوهای درجه ۳ مدل‌های مناسبی برای این رودخانه تلقی نمی‌شوند. رابطه بین دبی ده‌ساله و پارامترهای هندسی و هیدرولیکی به صورت معادله (۱۶) است.

همان‌گونه که معادله (۱۷) نشان می‌دهد، تأثیر معکوس دبی جریان و سرعت جریان را می‌توان مشاهده کرد و، از طرفی، دبی و سطح مقطع جریان دارای بیشترین سطح معنی‌داری‌اند.

رابطه رگرسیونی بین عرض مقطع (متغیر وابسته) و دبی و سرعت جریان (متغیر مستقل)

به منظور بررسی نقش عوامل دبی و سرعت، به عنوان پارامترهای هیدرولیکی بر روی متغیرهای ژئومتری رودخانه (عرض، عمق)، رابطه رگرسیونی بین متغیرها محاسبه شد و بهترین روابط رگرسیونی از بین روابط موجود، بر اساس شاخص‌های آماری سطح معنی‌داری، ضریب تعیین، و میزان خطای استاندارد، استخراج شد. در این بررسی عرض مقطع به عنوان متغیر وابسته انتخاب شد و دبی و سرعت جریان متغیرهای مستقل. نتایج حاصل از این بررسی در جداول ۸، ۹ و ۱۰ آمده است.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، مدل‌های نمایی دارای P-value پایین، خطای استاندارد کم، و ضریب تعیین بالا، نسبت به مدل‌های خطی ساده، درجه ۲، و درجه ۳، هستند، بنابراین، مدل‌های نمایی مدل‌های مناسبی برای بیان ارتباط بین متغیرهای ژئومتری و هیدرولیکی در رودخانه مورد مطالعه هستند (جدول ۱۱). معادله‌های (۱۸) تا (۲۱) رابطه بین متغیر وابسته (عرض) و متغیرهای مستقل را در مدل‌های مختلف نشان می‌دهد.

رابطه رگرسیونی بین متغیر وابسته دبی و متغیرهای مستقل عرض، عمق هیدرولیکی، سطح مقطع جریان، و سرعت جریان بر اساس مقادیر سطح معنی‌داری، میزان ضریب تعیین، و خطای استاندارد بررسی شد. نتایج نشان داد که معادلات خطی ساده (درجه ۱) اغلب دارای R^2 بالا و SE بالا و P-value نسبتاً بالایی است (جدول ۴). در الگوهای درجه ۲ میزان R^2 بین متغیرها افزایش یافته، اما میزان خطای استاندارد بالاست و برخی متغیرها به دلیل مشکل هم‌خطی بودن معنی‌دار نیستند، یعنی P-value متغیرها در سطح ۱٪ به خوبی معنی‌دار نیست، بنابراین، این‌گونه مدل‌ها دارای R^2 بالا و سطوح معنی‌داری پایینی شده و مدل‌های مناسبی تلقی نمی‌شوند (جدول ۵).

در مدل‌های رگرسیونی درجه ۳، میزان R^2 افزایش یافت که نشان‌دهنده میزان تأثیر زیاد متغیرها بر دبی رودخانه است، اما کلیه متغیرها در سطح ۱٪ معنی‌دار نیستند، بنابراین، الگوهای درجه ۳ مدل‌های مناسبی برای این رودخانه نیستند (جدول ۶). میزان ضریب تعیین به‌دست‌آمده در تابع نمایی برای D ، V ، A ، W از مقادیر توابع رگرسیونی ساده، درجه ۲، و درجه ۳ بیشتر است و، همان‌گونه که از مقادیر P-value مشاهده می‌شود، متغیرها در سطح ۱٪ (فاصله اطمینان ۹۹٪) به خوبی معنی‌دار است. همچنین، در این تابع متغیرها دارای کمترین خطای استاندارد هستند، بنابراین، مدل‌های مناسبی برای رودخانه مورد بررسی به حساب می‌آیند (جدول ۷).

همان‌گونه که ذکر شد و جدول ۵ نیز نشان می‌دهد، در الگوهای درجه ۲، میزان R^2 بین متغیرها افزایش یافته است و، همان‌گونه که از مقادیر آماری P-value مشخص است، متغیرهای D^2 ، D ، V^2 ، V در سطح ۱ درصد به خوبی معنی‌دار هستند.

اما سایر متغیرها به دلیل مشکل هم‌خطی بودن معنی‌دار نیستند. این‌گونه مدل‌ها دارای R^2 بالا و سطوح معنی‌داری پایینی هستند، بنابراین، مدل‌های مناسبی

جدول ۴. نتایج الگوهای برآوردی عرض مقطع، عمق هیدرولیکی، سطح مقطع، سرعت جریان، و دبی در مدل خطی ساده

Model	ضرایب استاندارد نشده		ضرایب استاندارد شده	T	P - value
	B	خطای استاندارد	Beta		
(Constant)	۰٫۳۹۷	۰٫۱۳۰	-	۳٫۰۵۸	۰٫۰۰۴
W	-۰٫۳۰۲	۰٫۰۸۹	-۰٫۴۱۴	-۳٫۳۷۷	۰٫۰۰۲
D	-۰٫۱۰۱	۰٫۰۸۶	-۰٫۱۱۴	-۱٫۱۶۷	۰٫۲۵۲
A	۱٫۰۴۱	۰٫۰۸۶	۱٫۳۵۰	۱۲٫۰۹۷	۰٫۰۰۰
V	۰٫۱۱۷	۰٫۰۲۳	۰٫۳۳۳	۵٫۰۲۹	۰٫۰۰۰
R^۲	۰٫۹۶۸				

جدول ۵. نتایج الگوهای برآوردی عرض مقطع، عمق هیدرولیکی، سطح مقطع، سرعت جریان، و دبی در مدل درجه ۲

Model	ضرایب استاندارد نشده		ضرایب استاندارد شده	T	P - value
	B	Std. Error	Beta		
W	-۱٫۲۵۴	۱٫۰۵۲	-۲٫۱۰۴	-۱٫۲۸۳	۰٫۲۵۲
D	۰٫۲۴۳	۰٫۲۵۱	۰٫۵۱۶	۲٫۳۵۸	۰٫۰۲۴
A	۰٫۳۸۵	۱٫۴۵۴	۰٫۴۸۵	۰٫۳۰۲	۰٫۶۵۴
V	-۱٫۲۳۵	۰٫۵۵۱	-۲٫۸۲۳	-۲٫۹۱	۰٫۰۰۴
W ^۲	۰٫۶۴۲	۰٫۴۸۴	۳٫۵۰۲	۱٫۳۵۴	۰٫۲۰۷
D ^۲	-۲٫۴۵۴	۰٫۶۲۴	-۰٫۳۸۲	-۱٫۸۴۴	۰٫۰۵۶
A ^۲	۰٫۱۵۴	۰٫۴۰۵	۰٫۶۲۸	۰٫۴۸۴	۰٫۲۹۱
V ^۲	۰٫۸۴۵	۰٫۰۴۲	۳٫۲۵۲	۲٫۰۵۴	۰٫۰۰۸
(Constant)	۱٫۳۴۵	۱٫۰۰۹	-	۱٫۸۴۵	۰٫۰۸۵
R^۲	۰٫۹۶۵				

جدول ۶. نتایج الگوهای برآوردی عرض مقطع، عمق هیدرولیکی، سطح مقطع، سرعت جریان، و دبی در مدل درجه ۳

Model	ضرایب استاندارد نشده		ضرایب استاندارد شده	T	P - value
	B	Std. Error	Beta		
W	-۰٫۹۸۳	۰٫۵۸۵	۱٫۳۱۴	۰٫۶۴۱	۰٫۱۵۴
D	۰٫۵۹۵	۰٫۲۵۴	۰٫۶۴۲	۱٫۹۶۴	۰٫۰۶۱
A	۰٫۳۸۴	۰٫۵۲۲	۱٫۵۲۳	۲٫۷۸	۰٫۸۵۴
V	-۰٫۶۵۱	۰٫۳۶۱	۱٫۷۸۵	۱٫۴۵۲	۰٫۲۵
W ^۲	-۰٫۶۸۴	۰٫۴۸۹	-۲٫۳۸۵	-۱٫۲۵۸	۰٫۲۹۳
D ^۲	-۱٫۲۵۳	۰٫۷۴۲	-۰٫۴۴۰	-۱٫۸۵۴	۰٫۰۹۳
A ^۲	۰٫۵۷۸	۰٫۳۲۰	۱٫۳۴۵	۱٫۲۳۵	۰٫۳۵۳
V ^۲	-۰٫۷۵۴	۰٫۲۴۱	-۲٫۰۲۶	-۳٫۰۷۵	۰٫۳۴۲
W ^۳	۰٫۳۲۵	۰٫۳۰۵	۲٫۶۱۴	۱٫۳۰۵	۰٫۳۴۴
D ^۳	-۱٫۷۲۵	۳٫۴۵۴	-۰٫۲۳۲	-۰٫۵۲۵	۰٫۶۸
A ^۳	-۰٫۰۷۸	۰٫۱۵۰	-۰٫۴۲۰	-۰٫۸۷۵	۰٫۷۴۵
V ^۳	۰٫۰۸۴	۰٫۲۱۰	۱٫۹۴۲	۲٫۶۸۸	۰٫۵۴۱
(Constant)	۱٫۹۴۵	۲٫۴۵۴	-	۲٫۰۵۵	۰٫۰۸۸
R^۲	۰٫۹۷۲				

جدول ۷. نتایج الگوهای برآوردی عرض مقطع، عمق هیدرولیکی، سطح مقطع، سرعت جریان، و دبی در مدل نمایی

Model	ضرایب استاندارد نشده		ضرایب استاندارد شده	T	P - value
	B	Std. Error	Beta		
(Constant)	۱,۸۴۲	۰,۰۱۸	۱,۰۴۱	۱۵,۷۸۲	۰,۰۰۰
W	۰,۱۲۱	۰,۰۳۵	۰,۳۰۵	۲,۹۵۴	۰,۰۰۲
D	۰,۲۳۵	۰,۰۱۵	۲,۳۴۴	۲,۴۸۵	۰,۰۰۳
A	۰,۶۴۴	۰,۰۲۱	۰,۸۲۴	۱۰,۴۲۵	۰,۰۰۰
V	-۰,۲۲۳	۰,۰۱۱	-۰,۳۵۴	-۲,۴۶۳	۰,۰۰۵
R^۲	۰,۹۶۸				

جدول ۸. نتایج الگوهای برآوردی دبی و سرعت جریان با عرض مقطع در مدل خطی ساده

Model	ضرایب استاندارد نشده		ضرایب استاندارد شده	T	P-value
	B	Std. Error	Beta		
V	-۰,۳۷۸	۰,۰۵۳	-۰,۸۱۴	-۵,۷۰۸	۰,۰۰۰
Q	۰,۴۸۵	۰,۳۴۵	۰,۳۴۶	۲,۵۴۰	۰,۰۱۷
(Constant)	۲,۱۰۱	۰,۲۴۳	-	۱۲,۵۸۲	۰,۰۱۰
R^۲	۰,۶۸۲				

جدول ۹. نتایج الگوهای برآوردی دبی و سرعت جریان با عرض مقطع در مدل درجه ۲

Model	ضرایب استاندارد نشده		ضرایب استاندارد شده	T	P - value
	B	Std. Error	Beta		
V	-۰,۵۸۲	۰,۶۰۵	-۱,۵۰۸	-۱,۸۵۴	۰,۱۲
Q	-۷,۳۲۳	۵,۰۱۲	-۳,۵۲۳	-۱,۲۳	۰,۰۸
V'	۰,۰۹۵	۰,۰۸۲	۰,۹۳۵	۱,۲۳۵	۰,۴۳
Q'	۲,۸۰۵	۱,۲۳۲	۵,۲۵۵	۱,۸۹۲	۰,۰۷
(Constant)	۵,۰۳۶	۲,۵۲۱	-	۳,۰۵۴	۰,۰۰۵
R^۲	۰,۷۰۸				

جدول ۱۰. نتایج الگوهای برآوردی دبی و سرعت جریان با عرض مقطع در مدل درجه ۳

Model	ضرایب استاندارد نشده		ضرایب استاندارد دسده	T	P-value
	B	Std. Error	Beta		
V	-۰٫۴۳۲	۰٫۳۲۵	-۱٫۳۴۵	-۲٫۰۸	۰٫۰۱۲
Q	-۳٫۴۵۱	۳٫۲۵۲	-۷٫۳۵۲	-۳٫۵۴۱	۰٫۱۲۴
V ^۲	۰٫۰۹۸	۰٫۱۲۱	۲٫۰۵۱	۱٫۰۸۳	۰٫۲۸۵
Q ^۲	-۲٫۳۵۳	۱٫۲۵۲	-۶٫۰۵۲	-۲٫۶۳۰	۰٫۰۵۵
V ^۳	۰٫۰۲۸	۰٫۰۱۰	۰٫۶۳۵	۱٫۰۲۵	۰٫۳۸۵
Q ^۳	۰٫۸۸۱	۰٫۶۸۰	۶٫۷۸۰	۱٫۷۸۴	۰٫۰۲۵
(Constant)	۴٫۳۲۵	۲٫۳۵۰	-	۲٫۴۵۰	۰٫۰۱۱
R ^۲	۰٫۶۵۳				

جدول ۱۱. نتایج الگوهای برآوردی سرعت متوسط و دبی جریان با عرض مقطع در تابع نمای

Model	ضرایب استاندارد نشده		ضرایب استاندارد دسده	T	P-value
	B	Std. Error	Beta		
V	-۰٫۴۲۳	۰٫۰۱۲	-۰٫۴۵۳	-۵٫۲۳۵	۰٫۰۰۰
Q	۱٫۲۵۳	۰٫۰۸۳	-	۷٫۲۵۳	۰٫۰۲
(Constant)	۲٫۰۱۲	۰٫۰۶۸	-	۹٫۴۵۳	۰٫۰۰۰
R ^۲	۰٫۷۲۸				

همان‌گونه که معادله (۱۷) نشان می‌دهد، تأثیر معکوس دبی جریان و سرعت جریان را می‌توان مشاهده کرد و، از طرفی، دبی و سطح مقطع جریان دارای بیشترین سطح معنی‌داری‌اند.

رابطه رگرسیونی بین عرض مقطع (متغیر وابسته) و دبی و سرعت جریان (متغیر مستقل)

به منظور بررسی نقش عوامل دبی و سرعت، به عنوان پارامترهای هیدرولیکی بر روی متغیرهای ژئومتری رودخانه (عرض، عمق)، رابطه رگرسیونی بین متغیرها محاسبه شد و بهترین روابط رگرسیونی از بین روابط موجود، بر اساس شاخص‌های آماری سطح معنی‌داری، ضریب تعیین، و میزان خطای استاندارد، استخراج شد.

$$Q = 345/1 - 254/1 W + 243/0 D + 385/0 A - 235/1 V + 642/0 W^2 - 454/2 D^2 + 154/0 A^2 + 845/0 V^2 \quad (15)$$

$$Q = 945/1 - 983/0 W + 595/0 D + 384/0 A - 651/0 V - 684/0 W^2 - 253/1 D^2 + 578/0 A^2 - 754/0 V^2 + 325/0 W^3 - 725/1 D^3 - 078/0 A^3 + 084/0 V^3 \quad (16)$$

$$Q = 842/1 W + 121/0 D + 235/0 A + 644/0 V - 223/0 \quad (17)$$

مختلف، با توجه به یکنواخت نبودن جنس بستر و کناره‌ها، اتصال سرشاخه‌های فرعی، اراضی کشاورزی، و موانع طبیعی در طول مسیر رودخانه، تغییرات زیادی در عرض مقاطع رخ می‌دهد که به طور متوسط بیشترین عرض‌ها در رودخانه فیروزه-شاهجوب، به ترتیب، در محدوده کمتر از ۱۰ و ۱۰-۲۵ و ۲۵-۵۰ و ۵۰-۱۰۰ و بیشتر از ۱۰۰ متر است. بحث الگوی تغییر عرض و نوسانات آن در رودخانه مورد مطالعه را به دلایل مختلفی می‌توان نسبت داد که عبارت‌اند از:

۱. عریض شدن کانال رودخانه از طریق جریان‌های سیلابی بزرگ تا جایی که این مجراهای طبیعی بتوانند بزرگ‌ترین دبی‌های سیلابی را در خود جای دهند؛

۲. (۱) عدم یا کاهش فرسایش کناره‌ها به دلیل بستر سنگی و مقاوم؛

۳. (۲) دخالت‌های بشری و فعالیت‌های باغی و زراعی روستاییان در بخش‌های رودخانه و در محدوده سیلاب‌دشت‌ها داشته و رعایت نکردن حریم قانونی که موجب تغییر وضعیت بستر رودخانه می‌شود؛

۴. (۳) تغییرات سازندهای زمین‌شناسی کف و کناره‌های رودخانه در طول رودخانه که نسبت به فرسایش و نیروهای وارده از طرف جریان مقاومت متفاوتی دارند.

این تغییرات عرض در طول بازه‌های رودخانه فیروزه-شاهجوب به تغییرات مکانی الگوی کنش (فرسایش) و رسوب‌گذاری نسبت داده می‌شود. تغییرات مکانی فرسایش و رسوب‌گذاری نیز، در حقیقت، عکس‌العملی به وضعیت و فراوانی سیلاب‌های منفرد بزرگ و، همچنین، جریان‌های کوچک‌تر و کم‌آبی است که این نتایج با نتایج (Thornes 1980) همخوانی دارد. آنالیز حساسیت مدل نشان می‌دهد که، با افزایش تعداد مقاطع عرضی، میزان تغییرات پارامترهای هیدرولیکی در طول رودخانه وضوح بیشتری داشته است (فاصله متوسط مقاطع از یکدیگر حدود ۱۰ متر و در قوس‌ها فاصله مقاطع حتی کمتر در نظر گرفته شد). در بخش

در این بررسی عرض مقطع به عنوان متغیر وابسته انتخاب شد و دبی و سرعت جریان متغیرهای مستقل. نتایج حاصل از این بررسی در جداول ۸، ۹ و ۱۰ آمده است.

بر اساس نتایج به دست آمده، مدل‌های نمایی دارای P-value پایین، خطای استاندارد کم، و ضریب تعیین بالا، نسبت به مدل‌های خطی ساده، درجه ۲، و درجه ۳، هستند، بنابراین، مدل‌های نمایی مدل‌های مناسبی برای بیان ارتباط بین متغیرهای ژئومتری و هیدرولیکی در رودخانه مورد مطالعه هستند (جدول ۱۱). معادله‌های (۱۸) تا (۲۱) رابطه بین متغیر وابسته (عرض) و متغیرهای مستقل را در مدل‌های مختلف نشان می‌دهد.

$$W=101/2-378/0V+485/0Q \quad (18)$$

در تابع نمایی به دست آمده، عرض مقطع، به عنوان متغیر وابسته، با سرعت متوسط جریان رابطه معکوس دارد و با دبی جریان رابطه مستقیم دارد. در بیشتر روابط رگرسیونی به دست آمده بیشترین همبستگی و سطح معنی‌داری بین دبی جریان، به عنوان متغیر مستقل، و سایر پارامترهای هندسی و هیدرولیکی، به عنوان متغیر وابسته، وجود دارد. دبی با سطح مقطع جریان ارتباط بیشتری نشان می‌دهد، زیرا پارامتر سطح مقطع جریان دربرگیرنده دو پارامتر عرض و عمق جریان (متغیرهای هندسی رودخانه) است.

بحث و نتیجه‌گیری

رفتار جریان رودخانه‌ها تحت تأثیر فرایندهای مختلف در بستر زمان و مکان شکل می‌گیرد. برای شناخت این پدیده‌ها و عوامل مؤثر بر آن انتخاب ابزاری مناسب برای تحلیل و بررسی ضروری می‌نماید. در تحلیل جریان رودخانه‌ها مدل‌های فیزیکی و ریاضی به منزله ابزار مناسب ایفای نقش می‌کنند. با توجه به نتایج حاصل از خروجی مدل هیدرولیکی HEC-RAS برای جریان با دوره بازگشت ده‌ساله در رودخانه مورد مطالعه، به طور کلی، وضعیت عرض مقاطع از بالادست به پایین دست رودخانه از روند ثابتی پیروی نمی‌کند. در بازه‌های

زیادی، همبستگی داخلی دارند و تغییرات کوچک در مقادیر داده‌ها ممکن است به تغییرات بزرگی در برآورد ضرایب منتهی شود. در مدل‌های درجه ۲ و ۳، به دلیل مشکل هم‌خطی بودن، این مدل‌ها از اعتبار کافی برخوردار نبودند، ضمن آنکه مدل‌های مورد نظر (درجه ۲ و ۳) هم از نظر سطح معنی‌داری و هم خطای استاندارد از اعتبار کافی برخوردار نبودند. بنابراین، مدل‌نمایی، به دلایل هم‌خطی نبودن، P-value کمتر از ۱ درصد، و خطای استاندارد کمتر، نسبت به مدل‌های دیگر، مدل مناسبی معرفی می‌شود که با نتایج حاصل از تحقیقات برخی افراد همخوانی دارد (Leopold and Maddock, 1953; Hedman et al 1979; Mosley, 2005; Najafi and Jamiri 1972). روابط نمایی به‌دست‌آمده بین پارامترهای هندسی و هیدرولیکی رودخانه، در این تحقیق، مربوط به دبی با دوره بازگشت ده‌ساله حاصل از خروجی مدل HEC-RAS است. بنابراین، می‌توان گفت روابط آماری به‌دست‌آمده در شرایط مختلف و در دبی‌های با دوره بازگشت‌های دیگر ممکن است متفاوت باشد.

اول رودخانه (فیروزه) تعداد مقاطع ۱۶۲۱ و میزان دقت برآورد مدل به ازای ۲۰ درصد تغییر ضریب مانینگ برای عرض سطح آب برابر ۶۲/۹۲ درصد است. در بخش دوم رودخانه (شاهجوب)، که تعداد مقاطع ۱۴۳ است، میزان دقت برآورد مدل برای همان پارامتر ۷۲/۳۱ درصد است. در بخش سوم رودخانه (قسمت پایینی شاهجوب) تعداد مقاطع ۱۴۵ و میزان دقت برآورد مدل ۷۳/۸ درصد است که با یافته‌های Stevenson (2009) همخوانی دارد. به طور کلی، بهترین معادله جهت تحلیل روابط ژئومتری-کانال برای این رودخانه معادله‌های نمایی است که از نظر ضریب تعیین، سطح معنی‌داری، و خطای استاندارد، نسبت به مدل‌های خطی ساده، درجه ۲، و درجه ۳، مقادیر قابل قبول‌تری دارند. همچنین، گفتنی است در مدل‌نمایی مشکل هم‌خطی بودن متغیرها وجود نداشت و متغیرها بر روی یکدیگر اثر متقابل نداشتند. هم‌خطی بودن تأیید می‌کند که مجموعه‌ای از مشکلات همراه با چندخطی چندگانه وجود دارد. در این عارضه چندین مقدار ویژه نزدیک به صفر نشان می‌دهد که پیش‌گویی‌ها، به مقدار بسیار

References

- [1] Abassi, A. (2010). Evaluation of spatial variation of dry rivers (floodways) morphology (Case study: Yazd province rivers). MSc thesis, Tehran University.
- [2] Afshani, A., Noorian, M. and Hosseini Ramesheh, Z. (Translators) (2005). An explanation to SPSS 14. Bisheh Press.
- [3] Ahmadi, L. (2004). Evaluation of erosion and sedimentation in Shiraz Khoshk using unsteady method. MSc thesis, Shiraz University.
- [4] Azizian, A., Noormohammadi, S. and Behroozian, M. (2010). Calibration of the results of HEC-HMS numerical model in ungauged catchments (Case study: Zawarian river). 6th national conference on watershed management sciences and engineering, Noor, Iran.
- [5] Breach, J. S., (Translated by: Rezaeimoghaddam, M. and Saghafi, M.). (2008). Rivers and floodplains, (Vol. 1: Processes and dynamic), Ministry of culture and Islamic Guidance press.
- [6] Brice, J. (1974). Evolution of meander loops. Geol. Soc. Amer. Bull. 85, pp: 581-586.
- [7] Cook. A. C. (2008). Comparison of one-dimensional HEC-RAS with two-dimensional FESWMS model in flood inundation mapping. MSc thesis, Purdue university, USA.
- [8] Hajibigloo, M. (2010). Evaluation of the morphological changes in relation with dominant river processes (Case study: Firoze-shahjoob river), MSc thesis, Yazd University.
- [9] Hazarika, M.H., Bormudoi, A., Phosalath, S., Sengtianthr, V. and Samarakoon, L. (2005). Flood hazard in savanakheth province, Lao PDR mapping user HEC RAS, remote sensing and GIS, Journal of hydrology, 302(2-3):1-7.
- [10] Hedman, E. R., Moore, D. O. and Livingston, R. K. (1972). Selected streamflow characteristics as related to channel geometry of perennial streams in Colorado. US Geol. Survey Open-file Report, 14 p.
- [11] Kavoshpey engineering counsoltant (2008). Meterology and Hydrology report of Firoze-shahjoob river catchment.
- [12] Leopold, L. B. and Maddock, T. (1953). The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. United States Geological Survey Professional Paper 252 (57 p.).
- [13] Mosley, M. P. (1979). Prediction of Hydrologic Variables from Channel Morphology, South Island River. Journal of Hydrology (NZ), pp: 109-120.
- [14] Najafi, M. and Jamiri, M. (2005). Estimation of peak flow based on river geometry and hydraulic characteristics, Journal of agricultural engineering research, Vol. 6, No. 24, pp: 111-122.
- [15] Osterkamp, W. R. and Hedman, E. R. (1982). Perennial-streamflow characteristics related to channel geometry and sediment in Missouri River basins. U.S. Geological Survey Professional. Paper 1242, 37 p.
- [16] Pappenberger, F., Beven, K. Horritt, M. and Blazkova, S. (2005). Uncertainty in the calibration of effective roughness parameters in HEC-RAS using inundation and downstream level observations, Journal of hydrology, Vol. 302 (1-4), pp: 46-69.

- [17] Richard, J. (1997). Stanley A Schume, David E Sugden” Geomorphology”.
- Stevenson, D. (2009). 1D HEC RAS model and sensitivity analysis for River Clair from 1971–2007, report prepared for international joint commission, international upper Great Lakes study, Ottawa.
- [18] Thornes, J. B. (1980). Structural instability and ephemeral channel behavior. *Zeitschrift fur Geomorphologie, Supplementband 36*, pp:233–244.