

منابع آب و طراحان سازه هیدرولیکی استفاده شوند. واژه‌های کلیدی: تلفات انتقال، رودخانه‌های فصلی، معادله‌های همبستگی، حوزه آبخیز قره‌قوم و حجم جریان بالادست.

#### مقدمه

کشور ما از لحاظ شرایط آب و هوایی در زمره مناطق خشک طبقه‌بندی می‌شود. در رودخانه‌های مناطق خشک و نیمه خشک، جریان آب سطحی به طور دائمی برقرار نمی‌باشد و اغلب به دنبال بارندگی‌های فصلی، جریان سیلابی رخ می‌دهد. به همین علت، بستر رودخانه پیش از سیلاب خشک است و خاک ناحیه زیرین آن در شرایط غیراشباع قرار دارد. بنابراین، زمانی که در رودخانه‌های مناطق خشک، سیلابی رخ می‌دهد، حجم جریان با حرکت به سمت پایین دست رودخانه در اثر نفوذ به ناحیه غیراشباع کاهش می‌یابد، که این کاهش حجم، تلفات انتقال نامیده می‌شود. بخشی از این تلفات صرف اشباع نمودن سواحل رودخانه می‌گردد، مقداری از آن نیز به رطوبت خاک اضافه می‌شود و قسمتی از آن منجر به تغذیه آب زیرزمینی می‌گردد. بخش کوچکی از تلفات انتقال نیز شامل تبخیر از سطح رودخانه است. از آنجا که تلفات انتقال باعث کاهش حجم سیلاب می‌گردد، لازم است تا روابط مناسبی برای محاسبه تلفات انتقال توسعه یابد. همچنین، برآورد تلفات انتقال منجر به برآورد مناسبی از میزان نفوذ و توانمندی تغذیه آب‌های زیرزمینی از طریق رودخانه‌ها می‌گردد.

اگر چه اهمیت تلفات انتقال در مناطق خشک از سالیان دور مورد توجه بوده است، اما اطلاعات چندانی از فرآیند حاکم بر شکل‌گیری این تلفات در دست نیست [۱۱]. به علاوه، وجود این رودخانه‌ها در مناطق خشک و محروم که اغلب فاقد ایستگاه‌های اندازه‌گیری می‌باشند، برآورد تلفات انتقال در این مناطق را دشوار می‌نماید. در هر حال دیدگاه‌های متعدد و متفاوتی در تحلیل جریان و برآورد تلفات انتقال در رودخانه‌های خشک وجود دارد. کاتالدو و همکاران [۵]، جمع‌بندی مناسبی از این روش‌ها ارائه داده‌اند و آنها را در قالب شش روش مختلف طبقه‌بندی نموده‌اند که در ادامه به طور خلاصه به آنها اشاره می‌گردد.

- معادلات همبستگی ساده: در این روش حجم تلفات انتقال بر اساس یک معادله همبستگی بر حسب متغیرهای مستقل مؤثر بر تلفات انتقال بیان می‌گردد. سپس با استفاده از حجم جریان‌های

## توسعه معادله‌های همبستگی برای برآورد تلفات انتقال در رودخانه‌های فصلی حوزه آبخیز قره‌قوم

ساناز بمبئی چی<sup>۱</sup>، سید محمود حسینی<sup>۲</sup> و بیژن قهرمان<sup>۳</sup>  
تاریخ دریافت: ۸۹/۰۳/۱۲ تاریخ پذیرش: ۸۹/۰۸/۰۵

#### چکیده

در رودخانه‌های مناطق خشک، جریان آب سطحی به طور دائمی برقرار نمی‌باشد و محدود به دوره‌های زمانی کوتاه مدت می‌شود که پس از آن دوباره رودخانه خشک می‌گردد. لذا هنگام وقوع سیلاب، حجم جریان در پایین دست، به علت نفوذ به بستر رودخانه، کاهش می‌یابد، که این کاهش حجم، تلفات انتقال نامیده می‌شود. در این پژوهش سعی می‌شود تا با توسعه معادله‌های همبستگی برای حوزه آبخیز قره‌قوم در خراسان رضوی، تلفات انتقال در رودخانه‌های این حوزه را برآورد نمود. برای این منظور، اطلاعات موجود در ایستگاه‌های آب‌سنجی و ویژگی‌های فیزیکی رودخانه‌های کشف‌رود، کارده و زشک در این حوزه استخراج، تحلیل و مورد استفاده قرار گرفتند. به منظور تولید معادله‌های همبستگی، تلفات انتقال در کیلومتر اول از ابتدای هر بازه به عنوان متغیر وابسته معادله در نظر گرفته شد و چگونگی وابستگی آن به متغیرهای مستقل حجم جریان بالادست، زمان تداوم جریان، شاخص رطوبت پیشین، هدایت هیدرولیکی، شیب و عرض رودخانه مورد آزمایش قرار گرفت. در نتیجه این پژوهش مشخص شد که مؤثرترین متغیر مستقل در برآورد تلفات انتقال، حجم جریان بالادست می‌باشد. سه معادله همبستگی (خطی و غیرخطی) برای پیش‌بینی تلفات انتقال بر حسب حجم جریان بالادست و عرض رودخانه، از میان روابط موجود توصیه می‌شوند. با استفاده از این روابط می‌توان تلفات انتقال را در انتهای هر کیلومتر از مسیر رودخانه، با داشتن حجم جریان در آغاز آن کیلومتر، برآورد نمود. چنین روابطی می‌توانند توسط بهره‌برداران

- ۱- دانشجوی دکتری عمران (هیدرولیک)، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد
- ۲- نویسنده مسئول و دانشیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد shosseini@Ferdowsi.um.ac.ir
- ۳- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

ورودی و خروجی مربوط به تعدادی از رخدادهای پیشین (که متعلق به تعدادی از بازه‌های رودخانه‌ها می‌باشند)، به همراه ویژگی‌های فیزیکی هر یک از این بازه‌ها، در یک مدل آماری ضرایب معادله همبستگی برآورد می‌شوند. کاتالدو و همکاران [۴]، لین و همکاران [۹]، والترز [۱۵]، شارما و مورتی [۱۲]، با استفاده از تحلیل همبستگی روابط قابل توجهی بین تلفات انتقال و حجم جریان ورودی به دست آورده‌اند.

- معادله‌های دیفرانسیل ساده شده: این معادلات برای توصیف تغییرات در ذخیره مورد استفاده قرار می‌گیرند. جوردن [۸]، یک معادله دیفرانسیل مرتبه اول برای توصیف تلفات انتقال ارائه نموده که قادر است تلفات انتقال در مایل اول بازه مورد نظر از رودخانه را به صورت تابعی از جریان در ایستگاه بالادست آن برآورد نماید. پیبلز (۱۹۸۱) از معادلات دیفرانسیل بر اساس معادله پیوستگی (تغییر در ذخیره در واحد زمان برابر است با اختلاف بین جریان ورودی و خروجی) استفاده نموده است [به نقل از ۵].

- روش ترکیب معادلات دیفرانسیل و همبستگی: این روش فرآیندهای فیزیکی مربوط به تلفات انتقال را در نظر می‌گیرد تا به مطالعه شکل کلی معادلات پردازد و سپس با استفاده از همبستگی (یا بهینه‌سازی)، معادلات مخصوص به منطقه مورد مطالعه را به دست می‌آورد. پژوهشگرانی که این روش را به کار برده‌اند در واقع پژوهش خود را بر پایه کار لین و همکاران [۱۰] بنا نهاده‌اند، که از این بین علاوه بر کارهای انجام شده توسط لین در دهه ۱۹۸۰ می‌توان به پژوهش انجام شده توسط شارما و مورتی [۱۳] نیز اشاره نمود.

- روش مشاهدات و آزمایش‌های میدانی: در این روش با انجام آزمایش‌های میدانی، تلفات انتقال برآورد می‌شود. لذا به تجهیزات آزمایش میدانی نیاز دارد و به نواحی کوچک محدود می‌شود. روابط به دست آمده از این روش، خاص ناحیه مورد آزمایش است. ارزش پژوهش‌های انجام شده توسط این روش در تشخیص منابع تلفات انتقال می‌باشد که نیاز به مدلسازی دقیق تر تلفات انتقال را مشخص می‌نماید. از جمله مطالعات انجام شده توسط این روش می‌توان به کار انجام شده توسط هوگز و سامی [۷] اشاره نمود. آنها مدل خاصی برای تلفات انتقال ارائه نداده‌اند و تنها با تفاضل حجم‌های جریان ورودی و خروجی اندازه‌گیری شده، تلفات انتقال را برآورد نموده‌اند. همچنین، اذعان داشتند که تلفات انتقال از بستر رودخانه‌های فصلی در نواحی خشک و نیمه خشک می‌تواند بخش بزرگی از مقدار کل رواناب تولید شده در بالادست به شمار آید، به طوری که ۷۵٪ جریان بالادست در اولین رخداد و ۲۲٪ در رخداد دوم به درون مصالح رسوبی نفوذ می‌کند.

- روش روندیابی جریان: در این روش، روش‌های مرسوم روندیابی جریان (آب‌شناختی و یا هیدرولیکی) با معادله‌ای برای منظور نمودن تلفات نفوذ به بستر رودخانه ترکیب می‌شوند. سپس با روندیابی یک سیلاب در طول بازه‌ای از رودخانه و بررسی

آبمدهای حاصل در نقاط مختلف پایین دست، میزان تلفات انتقال مشخص می‌گردد. ال-هامس و ریچاردز [۶]، و شارما و مورتی [۱۴] از روش روندیابی برای برآورد تلفات انتقال استفاده نموده‌اند. روش بیلان آب‌شناختی: در این روش با استفاده از معادله بیلان، تغییرات در ذخیره یک بازه به صورت جمع جبری جریان ورودی، جریان خروجی، تبخیر، جریان عرضی، ذخیره سواحل و... در نظر گرفته می‌شود و پس از برآورد هر یک از این اجزاء به طور جداگانه، میزان تلفات انتقال از معادله بیلان مشخص می‌گردد. گودیچ و همکاران (۲۰۰۴)، و عبدالرزاق و سورمن (۱۹۹۴) با استفاده از این روش به برآورد تلفات انتقال پرداخته‌اند [به نقل از ۵]. بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که بیشتر پژوهش‌های انجام شده در زمینه تلفات انتقال در نواحی خشک کشورهای استرالیا، امریکا، آفریقا، عربستان و هندوستان انجام شده است. بنابراین انجام چنین پژوهش‌هایی در ایران ضروری به نظر می‌رسد. هدف از این پژوهش، یافتن روشی ساده و قابل کاربرد برای برآورد تلفات انتقال در رودخانه‌های فصلی حوزه آبخیز قره‌قوم در خراسان رضوی از طریق توسعه مدل‌های همبستگی بر پایه مشاهدات میدانی می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

### ۱. روش مطالعه

در این پژوهش از روش معادلات همبستگی ساده برای برآورد تلفات انتقال استفاده می‌شود. در این روش، تأثیر یک یا چند متغیر مستقل بر روی یک متغیر وابسته مورد بررسی قرار می‌گیرد. به طور کلی تلفات انتقال و گاهی حجم جریان خروجی به عنوان متغیر وابسته مدلسازی می‌شوند و متغیرهایی که به نظر می‌رسد بر روی تلفات انتقال مؤثر هستند به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته می‌شوند. سپس با استفاده از حجم جریان‌های ورودی و خروجی مربوط به تعدادی از رخدادهای پیشین (که متعلق به تعدادی از بازه‌های رودخانه‌ها می‌باشند)، به همراه ویژگی‌های فیزیکی هر یک از این بازه‌ها، در یک مدل آماری ضرایب معادله همبستگی برآورد می‌شوند.

در پژوهش حاضر، حجم تلفات انتقال ( $V_{loss}$ ) به عنوان متغیر وابسته؛ و حجم جریان بالادست ( $V_{up}$ )، شاخص رطوبت پیشین ( $Ancl$ )، زمان تداوم جریان ( $D$ )، هدایت هیدرولیکی بستر ( $K$ )، عرض ( $W$ ) و شیب رودخانه ( $S$ ) به عنوان متغیرهای مستقل در تحلیل همبستگی در نظر گرفته شدند و معادلات همبستگی با دو ساختار خطی و غیرخطی زیر مورد استفاده قرار گرفتند:

$$V_{loss} = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad (1)$$

و

$$V_{loss} = a_1 x_1^{b_1} x_2^{b_2} \dots x_n^{b_n} \quad (2)$$

که در این روابط،  $V_{loss}$  حجم تلفات انتقال،  $x_n$ ها ( $n=1,2,\dots$ ) متغیرهای مستقلی هستند که انتظار می‌رود در برآورد تلفات انتقال

مؤثر باشند و  $a_1$ ،  $a_2$  و  $b_1$  ضرایب همبستگی می باشند. در ادامه نحوه برآورد هر یک از این متغیرها توصیف می گردد.

حجم جریان بالادست ( $V_{up}$ ) عبارت از حجم جریان در ایستگاه بالادست بازه موردنظر از رودخانه می باشد که با انتگرال گیری عددی از آنمودهای ورودی بازه به ازای هر رخدادهای محاسبه گردید. حجم جریان بالادست در واقع منبع تغذیه کننده برای تلفات انتقال می باشد، لذا به عنوان یکی از متغیرهای اصلی تأثیرگذار بر تلفات انتقال محسوب می شود.

شاخص رطوبت پیشین ( $AncI$ )<sup>۱</sup> به عنوان شاخصی از رطوبت پیشین بستر رودخانه به کار می رود. رطوبت پیشین رودخانه به ویژه در ابتدای سیلاب بر نرخ نفوذ تأثیر می گذارد که می تواند توسط شاخص زیر بیان گردد [۱۵]:

$$AncI = 1 - 0.9^t \quad (3)$$

در این رابطه،  $t$  تعداد روزهای گذشته از سیلاب قبلی در ایستگاه بالادست می باشد. شاخص  $AncI$  بدون بعد بوده و در واقع بیانگر میزان توانایی خاک برای جذب آب می باشد. بدین صورت که هر چه مقدار  $AncI$  از صفر به یک نزدیک تر شود، توانایی خاک برای جذب آب بیشتر می گردد.

زمان تداوم جریان ( $D$ ) در واقع بیانگر مدت زمانی است که سیلاب در بازه موردنظر جریان دارد و در این فرصت تلفات انتقال رخ می دهد. در پژوهش حاضر، زمان پایه آنمود جریان در ایستگاه بالادست هر بازه به عنوان تداوم جریان در آن بازه منظور گردید. اگرچه دوام جریان در نقاط پایین دست متفاوت خواهد بود اما در هر صورت دوام جریان در هر یک از نقاط پایین دست تابعی از دوام جریان در ایستگاه بالادست می باشد، لذا پیش بینی کننده مناسبی برای تحلیل همبستگی خواهد بود.

جنس مصالح بستر به طور مستقیم بر روی نرخ نفوذ و در نتیجه تلفات انتقال تأثیر می گذارد، پس باید به گونه ای در تحلیل همبستگی وارد شود. در این پژوهش برای وارد نمودن تأثیر جنس بستر از مفهوم هدایت هیدرولیکی اشباع مصالح بستر رودخانه ( $K$ )، که ارتباط مستقیمی با دانه بندی خاک و نرخ نفوذ آب به داخل خاک دارد، استفاده شد. گرچه این موضوع نیز قابل بحث است که در زمان شکل گیری سیلاب به طور عملی یک هدایت هیدرولیکی مؤثر متفاوت با هدایت هیدرولیکی ساکن بستر شکل می گیرد.

عرض رودخانه ( $W$ ) نیز مانند طول بازه رودخانه بر روی میزان تلفات انتقال تأثیر می گذارد. اما عرضی از رودخانه که در برگیرنده جریان است به ازای سیلاب های مختلف و نیز در یک سیلاب مشخص، در زمان های متفاوت از عبور سیلاب متغیر خواهد بود. لذا برآورد عرض مرطوب کانال به طور کلی امکان پذیر نمی باشد. هدمن و اوسترکمپ (۱۹۸۲) عرض فعال کانال در شرایط متوسط را به عنوان شاخصی از عرض مرطوب کانال استفاده نموده اند [به نقل از ۱۵].

شیب رودخانه ( $S$ ) می تواند بر روی عمق، دوام و سطح آب گرفتگی جریان تأثیر گذارد. همچنین می تواند بیانگر اندازه مصالح بستر کانال باشد، به این صورت که به طور عام در شیب های تند مصالح درشت تر و در شیب های ملایم مصالح ریزتر وجود دارند.

از آن جا که داده های تلفات انتقال از تعدادی بازه رودخانه با طول های متفاوت جمع آوری می شوند، نمی توان داده های تلفات را پیش از استاندارد کردن وارد یک تحلیل همبستگی نمود زیرا هر چه طول بازه بیشتر باشد، به طور طبیعی میزان تلفات انتقال بیشتر خواهد بود. لذا باید به گونه ای داده های تلفات را از طول بازه مستقل نمود. به علاوه کاهش حجم جریان در طول بازه رودخانه نیز غیر خطی است، یعنی نرخ تلفات در اوایل طول بازه بیشتر از اواخر آن خواهد بود. بنابراین نمی توان با تقسیم حجم کل تلفات بر طول بازه، آن را در واحد طول به صورت یکنواخت بیان نمود. یک روش برای استاندارد نمودن داده ها، محاسبه تلفات انتقال برای کیلومتر اول بازه رودخانه می باشد که با توجه به رابطه زیر محاسبه می گردد [۸]:

$$V_1 = V_{up} \left[ 1 - \left( \frac{V_x}{V_{up}} \right)^{1/x} \right] \quad (4)$$

که در این رابطه،  $V_1$  تلفات انتقال در کیلومتر اول،  $V_{up}$  حجم جریان در ایستگاه بالادست و  $V_x$  حجم جریان در فاصله  $x$  از ایستگاه بالادست می باشند. با استفاده از این رابطه می توان تلفات انتقال برای هر کیلومتر از کانال را با محاسبه حجم جریان در ابتدای آن کیلومتر، که از تفاضل تلفات انتقال از حجم جریان در کیلومتر قبلی به دست می آید، برآورد نمود. بنابراین در تحلیل همبستگی، به جای  $V_{loss}$  در روابط (۱) و (۲) از  $V_1$  به عنوان متغیر وابسته استفاده می شود.

رابطه (۴) بر اساس معادله دیفرانسیل زیر به دست آمده است که نرخ تلفات در هر نقطه بین دو ایستگاه اندازه گیری را بر حسب حجم جریان در آن نقطه بیان می کند.

$$\frac{dV_x}{dx} = -kV_x \quad (5)$$

در این رابطه،  $x$  محور مسافت بین دو بازه است، که در جهت پایین دست مثبت می باشد،  $V_x$  حجم جریان در فاصله  $x$  و  $k$  یک عدد ثابت مثبت می باشند. از حل معادله (۵)، یک تابع توانی برای حجم جریان به دست می آید که جوردن [۸] با توسعه آن رابطه (۴) را به دست آورده است.

پیش از انجام تحلیل همبستگی لازم است تا ابتدا متغیرهای مستقل و وابسته را برآورد نمود. لذا در ادامه ابتدا به منطقه مورد مطالعه و اطلاعات جمع آوری شده برای این منظور اشاره می گردد و سپس نحوه انجام تحلیل همبستگی شرح داده می شود.

## ۲. ویژگی های منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز قره قوم با وسعت ۴۴۱۶۵ کیلومتر مربع بین طول

1- Antecedent Condition Index

جغرافیایی ۵۷°۴۹' تا ۶۱°۱۷' و عرض شمالی ۳۴°۲۳' تا ۳۷°۵۲' واقع شده است. این حوزه توسط رودخانه‌های کشف رود، جام رود، روس رود (که تقریباً به موازات هم از شمال غرب به طرف جنوب شرق امتداد داشته، به پایاب رودخانه هریرود که از کشور افغانستان در مرز پیش رباط وارد ایران می شود، می ریزند.) و تعدادی رودخانه‌های کوچک تر (که در جهت جنوب غرب-شمال شرق جریان داشته، مستقیماً از مرز گذشته وارد دشت قره قوم در کشور ترکمنستان می شوند.)، زهکشی می شود. اقلیم اغلب نواحی حوزه قره قوم از نوع نیمه خشک تا خشک می باشد و میزان بارندگی حوزه از شمال غرب به جنوب شرق کاهش می یابد. این حوزه مطابق شکل (۱) شامل محدوده‌های مطالعاتی مشهد، سنگ بست، نریمانی و آق دربند بر مبنای طبقه بندی شرکت سهامی آب منطقه ای خراسان رضوی می باشد [۲].

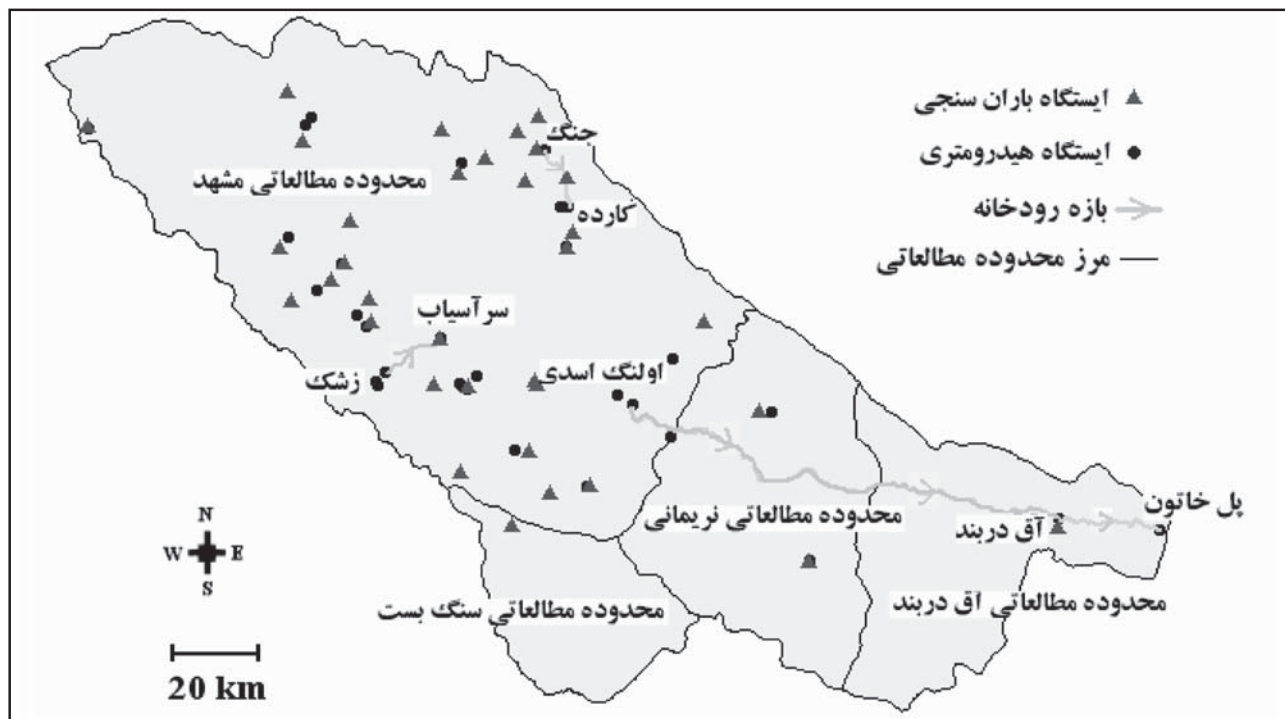
رودخانه‌های مورد مطالعه در این پژوهش، رودخانه‌های کشف رود، کارده و زشک از حوزه آبخیز قره قوم می باشند. علت انتخاب این رودخانه‌ها وجود دو ایستگاه آب سنجی بر روی هر یک از این رودخانه‌ها می باشد، زیرا برای انجام یک تحلیل همبستگی لازم است تا آبنمودهای مشاهداتی ورودی و خروجی بر روی یک بازه از رودخانه، مشخص باشند. با توجه به این محدودیت، تنها چهار بازه در حوزه آبخیز قره قوم قابل بررسی می باشند که عبارت از بازه‌های اولنگ اسدی- آق دربند و آق دربند- پل خاتون از رودخانه کشف رود، بازه جنگ-کارده از رودخانه کارده و بازه زشک-سراسیاب از رودخانه زشک می باشند. موقعیت این بازه‌ها در حوزه

آبخیز قره قوم در شکل (۱) نمایش داده شده است.

### ۳. اطلاعات جمع آوری شده

اطلاعات ثبت شده مربوط به بارندگی و سیلاب در زیرحوزه‌های قره قوم، به منظور دستیابی به رخدادهای رواناب مناسب برای تخمین تلفات انتقال، تحلیل گردید. رخدادهایی انتخاب شدند که در هر دو ایستگاه آب سنجی بالادست و پایین دست جریان داشته باشند و نیز داده‌های ثبت شده مربوط به آنها برای رسم کامل آبنمودهای ورودی و خروجی بازه کافی باشند. با توجه به این شرایط، ۸۰ رخداد انتخاب شدند. اما نکته مهم دیگری که در برآورد تلفات انتقال در یک بازه باید مورد توجه قرار گیرد، جریان‌های عرضی و انشعابات رودخانه در آن بازه می باشند. بنابراین رخدادهایی که از بررسی توزیع بارندگی و رواناب‌های ثبت شده، مشخص شد که میزان تلفات انتقال در آنها به میزان قابل توجهی تحت تأثیر رواناب حاصل از سطح زهکشی بین ایستگاه‌های آب سنجی قرار دارند، از مجموعه رخدادهای حذف شدند (در بخش ۴ به این موضوع پرداخته شده است). بدین ترتیب تعداد رخدادهای مورد استفاده در تحلیل همبستگی به ۶۰ رخداد رسید. در شکل (۲) چند نمونه از آبنمودهای ورودی و خروجی مربوط به رخدادهای مورد استفاده در همبستگی ارائه شده‌اند.

به منظور محاسبه حجم جریان بالادست و پایین دست برای هر رخداد، از آبنمودهای جریان، انترگرال گیری شد. حجم تلفات انتقال نیز از تفاضل حجم جریان بالادست و پایین دست به دست آمد و توسط رابطه (۴) حجم تلفات انتقال برای کیلومتر اول محاسبه شد.

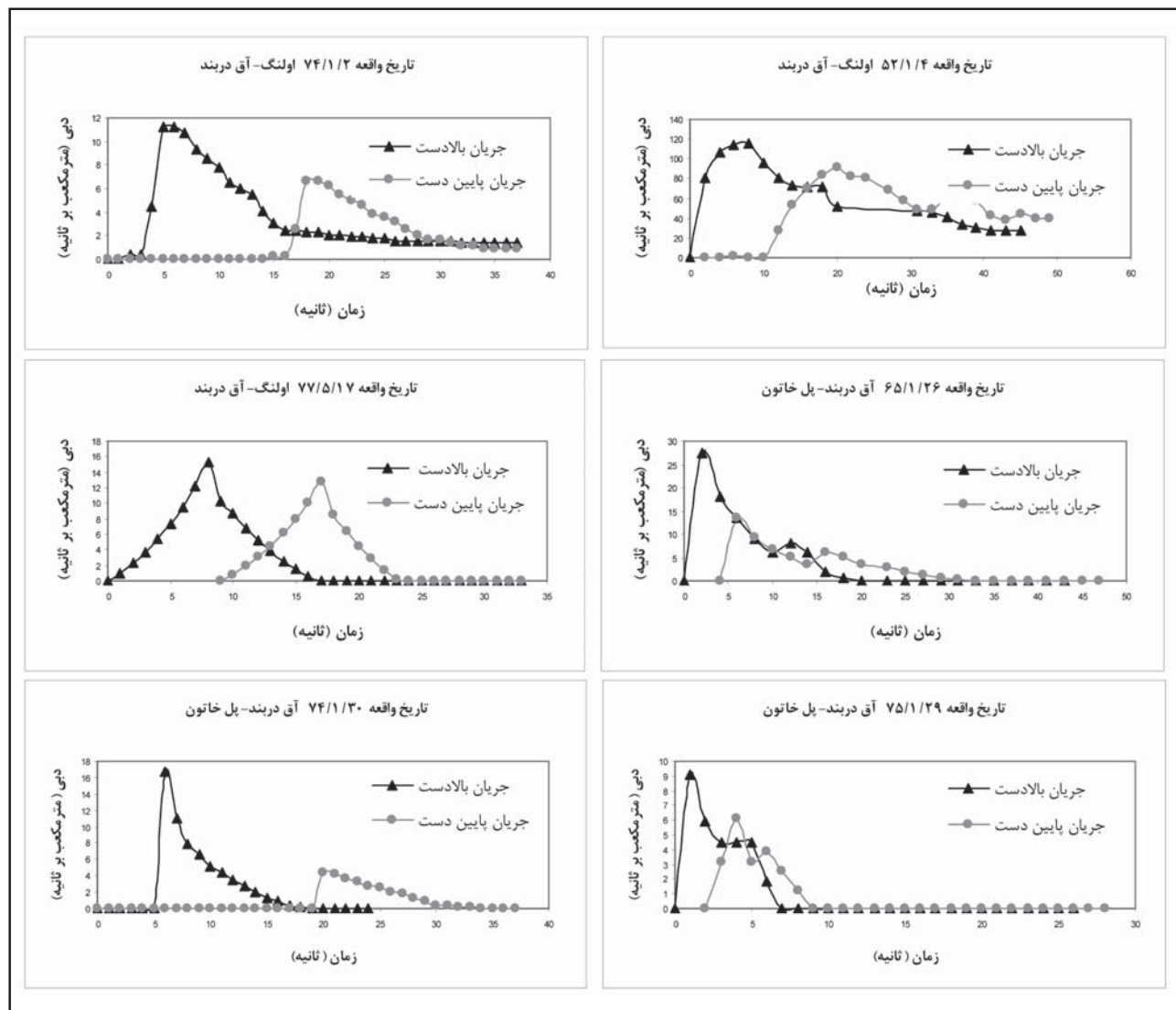


شکل ۱- موقعیت محدوده‌های مطالعاتی و بازه رودخانه‌های مورد پژوهش در حوزه آبخیز قره قوم

می باشند که از طریق بازدید و اندازه گیری های میدانی و انجام آزمایش های لازم به دست آمده اند. از هر بازه از رودخانه ها با توجه به طول و تغییر ویژگی های آن چند نمونه (در رودخانه زشک ۷ نمونه، کارده ۹ و کشف رود ۱۲ نمونه) از مصالح بستر رودخانه برداشت گردید که در مجموع ۲۸ نمونه شدند. در آزمایشگاه با استفاده از آزمایش هدایت هیدرولیکی، به دو روش بار ثابت و بار افتان، هدایت هیدرولیکی برای تمام نمونه ها اندازه گیری شد و در نهایت متغیر هدایت هیدرولیکی هر بازه از میانگین مقادیر مربوط به نمونه های آن بازه به دست آمد. لازم به توضیح است که آزمایش بار ثابت برای نمونه های درشت دانه (بزرگتر از ۰/۰۷۵ میلی متر) و آزمایش بار افتان برای نمونه های ریزدانه (کوچکتر از ۰/۰۷۵ میلی متر) انجام شد، نمونه ها در استوانه های فلزی به قطر ۱۰ و ارتفاع ۱۶/۵ سانتی متر با درصد تراکم محلی ساخته شدند. نحوه انجام این آزمایش ها مطابق مرجع [۱] می باشد. در اندازه گیری های

زمان تدوام جریان نیز متغیر دیگری است که با بررسی آبنمودهای جریان محاسبه می گردد. همانطور که بیان شد در این پژوهش زمان پایه آبنمود در ایستگاه بالادست هر بازه به عنوان زمان تدوام جریان در نظر گرفته شد و به ازای هر رخداد ثبت گردید. همچنین، رطوبت پیشین کانال با توجه به تعداد روزهای گذشته از سیلاب قبلی بر اساس رابطه (۳) برای هر رخداد و در تمام ایستگاه های موجود در دو انتهای بازه ها محاسبه شد. به طور قطع در انتخاب و تعریف این عامل عدم قطعیت هایی چون تأثیر شرایط آب و هوایی در فاصله زمانی بین دو بارش وجود دارد ولی منظور نمودن این عوامل و معرفی متغیرهای جدید (در برخی موارد غیر قابل دسترس) از نقطه نظر کاربردی چندان ضروری به نظر نمی رسد.

سایر اطلاعات مورد نیاز برای تحلیل همبستگی عبارت از هدایت هیدرولیکی، شیب و عرض کانال رودخانه در بازه موردنظر می باشند. این متغیرها مربوط به ویژگی های فیزیکی رودخانه ها



شکل ۲- نمونه هایی از هیدروگراف های سیل مشاهداتی

میدانی در محل نمونه برداری ها، شیب و عرض رودخانه ها نیز برداشت گردیدند و مقادیر نهایی آنها نیز با میانگین گیری بر روی هر بازه به دست آمدند. شیب رودخانه ها علاوه بر اندازه گیری میدانی، با برداشت طول بازه از روی نقشه ۱/۵۰۰۰۰ و اختلاف ارتفاع بین

جدول ۱- ویژگی های فیزیکی بازه های مورد استفاده در معادله

مشخصات نام بازه	طول کیلومتر	شیب متوسط	عرض متوسط متر	هدایت هیدرولیکی متوسط متر/ ثانیه
زشک-سراسیاب	۱۶/۴	۰/۰۲۲۵	۴/۶۹	۱/۳۴۴×۱۰-۵
جنگ-کارده	۱۷/۲	۰/۰۱۹۱	۷/۸	۳/۵۵۱×۱۰-۵
اولنگ-آق دربند	۱۱۴/۵	۰/۰۰۳۴	۲۲/۴۴	۴/۶۲۳×۱۰-۵
آق دربند-پل خاتون	۳۲/۲	۰/۰۰۵۱	۲۷/۵	۱/۰۲۰×۱۰-۴

جدول ۲- مقدار متغیرهای مورد استفاده در همبستگی در برخی رخدادهای (به عنوان نمونه)

بازه رخداد	t*	Ancl (-)	D ساعت	V <sub>up</sub> مترمکعب	V <sub>down</sub> مترمکعب	V <sub>down</sub> /V <sub>up</sub> (-)	V <sub>loss</sub> کل بازه مترمکعب	V <sub>loss</sub> متوسط خطی مترمکعب/کیلومتر	V <sub>1</sub> غیر خطی مترمکعب/کیلومتر
آق-پل*	۱۲	۰/۷۱۸	۱۲	۱۹۶۳۳۲/۵	۹۱۸۰۰	۰/۴۶۸	۱۰۴۵۳۲/۵	۳۲۴۶/۴	۴۵۸۰/۹
آق-پل	۶	۰/۴۶۹	۳۵	۱۴۵۸۲۷۴۳/۷	۸۰۱۲۱۲۴	۰/۵۴۹	۶۵۷۰۶۱۹/۷	۲۰۴۰۵۶/۵	۲۶۸۷۱۵/۶
آق-پل	۲۵	۰/۹۲۸	۳۱	۵۸۵۴۴۷۸/۳	۲۱۷۴۲۵۶	۰/۳۷۱	۳۶۸۰۲۲۲/۳	۱۱۴۲۹۲/۶	۱۷۷۳۵۰/۸
آق-پل	۴۳	۰/۹۸۹	۳۵	۹۷۸۳۹۰	۴۶۹۸۹۰	۰/۴۸	۵۰۸۵۰۰	۱۵۷۹۱/۹	۲۲۰۳۲/۶
آق-پل	۳۹	۰/۹۸۴	۸	۵۱۳۲۷۰	۱۸۵۱۳۰	۰/۳۶۱	۳۲۸۱۴۰	۱۰۱۹۰/۷	۱۶۰۰۰/۱
آق-پل	۱۸	۰/۸۵	۲۲	۴۴۱۰۰۰	۱۸۳۴۹۲	۰/۴۱۶	۲۵۷۵۰۸	۷۹۹۷/۱	۱۱۸۴۷/۳
آق-پل	۱	۰/۱	۲۱	۱۶۵۵۵۸۶	۱۲۵۵۹۳۲	۰/۷۵۹	۳۹۹۶۵۴	۱۲۴۱۱/۶	۱۴۱۴۴/۲
او-آق*	۳۱۸	۱	۳۱	۱۲۳۰۷۵۴/۵	۹۶۴۰۸	۰/۰۷۸	۱۱۳۴۳۴۶/۵	۹۹۰۷	۲۷۰۷۳/۱
او-آق	۱۶	۰/۸۱۵	۲۳	۱۸۷۸۱۵۴/۷	۵۶۰۳۲۲	۰/۲۹۸	۱۳۱۷۸۳۲/۷	۱۱۵۰۹/۵	۱۹۷۳۵/۷
او-آق	۷	۰/۵۲۲	۱۶	۴۸۱۷۹۹/۶	۳۴۴۵۲۰	۰/۷۱۵	۱۳۷۲۷۹/۶	۱۱۹۹	۱۴۰۹/۲
او-آق	۲۴	۰/۹۲	۲۹	۴۶۰۰۲۹	۲۲۶۷۱۰	۰/۴۹۳	۲۳۳۳۱۹	۲۰۳۷/۷	۲۸۳۴/۲
او-آق	۶	۰/۴۶۹	۲۲	۵۵۱۲۸۴	۱۶۲۱۲۶	۰/۲۹۴	۳۸۹۱۵۸	۳۳۹۸/۸	۵۸۶۱/۲
ج-ک*	۷	۰/۵۲۲	۵	۵۵۸۲۱/۶	۴۴۰۸۲	۰/۷۹	۱۱۷۳۹/۶	۶۸۲/۵	۷۶۱
ج-ک	۵	۰/۴۱	۱۳	۲۳۵۱۲۸/۱	۱۳۱۶۵۲	۰/۵۶	۱۰۳۴۷۶/۱	۶۰۱۶/۱	۷۷۹۶/۱
ج-ک	۲۴	۰/۹۲	۵	۱۳۲۲۱۳/۳	۴۸۷۲۶	۰/۳۶۹	۸۳۴۸۷/۳	۴۸۵۳/۹	۷۴۵۴/۶
ج-ک	۵۳	۰/۹۹۶	۶	۶۵۰۴۰۷/۱	۲۶۰۲۸۰	۰/۴	۳۹۰۱۲۷/۱	۲۲۶۸۱/۸	۳۳۷۲۶/۱
ج-ک	۹۶	۰/۹۹۹	۵	۴۵۲۱۷۱/۳	۲۴۶۰۲۴	۰/۵۴۴	۲۰۶۱۴۷/۳	۱۱۹۸۵/۳	۱۵۷۲۰/۶
ز-س*	۸۷	۰/۹۹۹	۱۶	۶۲۷۲۷۲/۷	۵۴۰۹۰۰	۰/۸۶۲	۸۶۳۷۲/۷	۵۲۶۶/۶	۵۶۴۰/۹

t\*: تعداد روزهای گذشته از سیلاب قبلی

x منظور از آق-پل: بازه آق دربند-پل خاتون، او-آق: بازه اولنگ اسدی-آق دربند، ج-ک: بازه جنگ-کارده و ز-س: بازه زشک-سراسیاب می باشند.

ایستگاه‌ها نیز برآورد گردیدند. شیب اندازه‌گیری شده و شیب محاسباتی به طور متوسط ۱۵٪ و حداکثر ۱۹٪ با هم اختلاف داشتند، لذا میانگین آنها مورد استفاده قرار گرفت. مجموعه این اطلاعات به همراه طول بازه‌ها در جدول (۱) آمده‌اند.

متغیرهای مورد استفاده در معادله همبستگی شامل هدایت هیدرولیکی بستر (K)، عرض (W) و شیب رودخانه (S)، در طول هر بازه ثابت می‌باشند که در جدول (۲) مشخص شدند. سایر متغیرهای مستقل که عبارتند از حجم جریان بالادست ( $V_{up}$ )، شاخص رطوبت پیشین کانال (AncI) و زمان تداوم جریان (D) و نیز متغیر وابسته یعنی تلفات انتقال در کیلومتر اول ( $V_1$ ) به ازای هر رخداد محاسبه شدند، که تعدادی از آنها به عنوان نمونه در جدول (۲) آمده‌اند.

لازم به ذکر است که در جدول (۲)،  $V_{loss}$  متوسط از تقسیم نمودن حجم کل تلفات بر طول بازه به دست آمده است و همانطور که در جدول مشاهده می‌شود با تلفات انتقال در کیلومتر اول ( $V_1$ ) متفاوت است. به عبارت دیگر، می‌توان گفت که با استفاده از  $V_1$ ، تلفات انتقال به طور غیر خطی در طول بازه تقسیم می‌شود و مقایسه مقادیر آن با  $V_{loss}$  متوسط نشان می‌دهد که مقدار آن در کیلومتر اول بازه از متوسط خطی تلفات انتقال بیشتر است. به عنوان مثال برای اولین رخداد جدول (۲) اگر حجم تلفات انتقال کل بازه بر طول بازه (۳۲/۲ کیلومتر) تقسیم گردد، حجم تلفات انتقال متوسط در هر کیلومتر ۳۲۴۶/۴ مترمکعب می‌شود. اما اگر از رابطه (۴) تلفات انتقال به طور غیرخطی محاسبه شود، در کیلومتر اول بازه ۴۵۸۰/۸۵ مترمکعب، در کیلومتر دوم ۴۴۷۳/۹۷ مترمکعب، در کیلومتر سوم ۴۳۶۹/۵۸ مترمکعب، ...، در کیلومتر دهم ۳۷۰۳/۹۸ مترمکعب، در کیلومتر بیستم ۲۹۲۵/۰۸ مترمکعب، در کیلومتر سی ام ۲۳۰۹/۹۷ مترمکعب و در کیلومتر آخر ۲۲۰۳/۴۴ مترمکعب می‌گردد (این محاسبات تا ۱۰ رقم اعشار انجام شده است).

برای مشخص نمودن میزان تغییرات متغیرهای مستقل در تمام رخدادهای مورد استفاده در تحلیل همبستگی، ضریب تغییرات آنها در جدول (۳) برای کل رخدادهای ارائه شده است. مقایسه ضریب تغییرات این متغیرها نشان می‌دهد که حجم جریان بالادست دامنه‌ی تغییرات زیادی نسبت به سایر متغیرها دارد. این امر به این دلیل است که  $V_{up}$  با بارندگی تغییر می‌کند و حتی ممکن است که میزان تغییرات حجم جریان بالادست، به ازای رخدادهای مختلف در یک بازه خاص، بسیار بیشتر از تغییرات آن از یک بازه به بازه دیگر باشد. متغیرهای AncI و D نیز به ازای هر بارندگی تغییر می‌کنند، اما میزان

تغییرات آنها از  $V_{up}$  کمتر است. S، K و W در هر بازه ثابت هستند و انتظار می‌رود ضریب تغییرات کمتری داشته باشند. به عنوان مثال هدایت هیدرولیکی در یک منطقه ممکن است تغییرات چندانی نداشته باشد اما زیاد بودن نسبی ضریب تغییرات S به دلیل تغییر قابل ملاحظه شیب از دو رودخانه زشک و کارده در مناطق کوهستانی نسبت به دو بازه رودخانه کشف رود، که در دشت واقع شده‌اند، می‌باشد. به طوری که مطابق جدول (۱) حداکثر شیب (مربوط به زشک) حدوداً ۶/۵ برابر شیب حداقل (مربوط به بازه اولنگ-آق دربند از کشف رود) است.

۴. بررسی چگونگی جریان‌های عرضی و انشعابات رودخانه‌ها  
یکی از نکات قابل توجه در توسعه روابط همبستگی برای برآورد تلفات انتقال در یک بازه، بررسی جریان‌های عرضی و انشعابات رودخانه در فاصله بین ایستگاه‌های آب‌سنجی در دو انتهای بازه می‌باشد. باید بازه‌هایی برای تحلیل همبستگی انتخاب گردند که حتی الامکان انشعابی نداشته باشند؛ و یا در صورت وجود، سهم ناچیزی از جریان را در برگیرند. بنابراین با بررسی توزیع بارندگی و رواناب‌های ثبت شده در فاصله بین ایستگاه‌های آب‌سنجی، رخدادهایی که میزان تلفات انتقال در آنها به میزان قابل توجهی تحت تأثیر رواناب حاصل از سطح زهکشی بین دو انتهای بازه قرار دارند، از مجموعه رخدادهای مورد استفاده در معادله حذف شدند. برای این منظور لازم بود تا میزان جریان ورودی توسط انشعاب‌ها و رواناب سطحی حاصل از بارندگی در طول بازه موردنظر به ازای رخدادهای مختلف تعیین گردد. در صورت وجود ایستگاه‌های آب‌سنجی بر روی انشعاب‌ها، با استفاده از اطلاعات سیلاب ثبت شده در ایستگاه‌ها، میزان جریان ورودی توسط آنها برداشت گردید. در غیر این صورت ابتدا با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی، ویژگی‌های حوزه آبخیز انشعاب مربوطه (مانند مرز حوزه و مساحت آن) تعیین گردید. سپس با استفاده از ایستگاه‌های باران‌سنجی اطراف این حوزه و یکی از روش‌های برآورد بارندگی در سطح حوزه [۳]، که در این پژوهش از روش چندضلعی‌های تیسن استفاده شد، متوسط بارندگی حوزه برآورد شد و با در نظر گرفتن ضریب رواناب، ارتفاع رواناب محاسبه و در نهایت با ضرب نمودن آن در سطح حوزه، حجم رواناب حاصل محاسبه گردید.

پس از بررسی بازه‌های مورد مطالعه در این پژوهش و محاسبه میزان جریان‌های عرضی ورودی و گاهی خروجی از این بازه‌ها، تعدادی از رخدادهای که حجم جریان‌های عرضی در آنها قابل توجه بود از مجموعه رخدادهای حذف گردیدند. منظور از خروجی، انشعابات محدود خروجی و آب اندک برداشت شده توسط

جدول ۳- ضریب تغییرات متغیرهای مستقل مورد استفاده در تحلیل همبستگی در کل رخدادهای

W	K	S	D	AncI	$V_{up}$	متغیر مستقل
۰/۳۹۶	۰/۴۳۸	۰/۷۷۶	۰/۵۷۹	۰/۷۲۹	۱/۶۴۸	ضریب تغییرات در کل رخدادهای

کشاورزان در بازه اولنگ- آق دربند می باشد که اولی بر اساس ایستگاه های آب سنجی موجود و دومی بر اساس بازدیدهای محلی برآورد شده اند. بدین ترتیب ۶۰ رخدادهای باقی ماندند که متوسط و حداکثر نسبت حجم جریان های عرضی به حجم جریان بالادست بازه در این رخدادهای به ترتیب عبارت از ۴٪ و ۱۹٪ برای جریان های ورودی و ۰/۰۵٪ و ۰/۱٪ برای جریان های خروجی می باشند.

### بحث و نتیجه گیری

پس از برآورد تمام متغیرهای مستقل و وابسته، اقدام به توسعه معادله های همبستگی با دو ساختار خطی و غیرخطی (روابط ۱ و ۲) با استفاده از نرم افزار SYSTAT گردید. در تحلیل همبستگی متغیر وابسته، یعنی تلفات انتقال در کیلومتر اول ( $V_1$ )، بر حسب متغیرهای مستقل یاد شده مورد آزمایش قرار گرفت، که نتایج این تحلیل در جدول (۴) ارائه شده است. بررسی ضرایب همبستگی خطی ( $r$ ) بین  $V_1$  و متغیرهای مستقل نشان می دهد که تلفات انتقال بیشترین همبستگی را به ترتیب با حجم جریان بالادست ( $r=0/87$ )، دوام جریان ( $r=0/45$ )، هدایت هیدرولیکی ( $r=0/23$ ) و عرض کانال ( $r=0/13$ ) دارد و سایر متغیرها از اهمیت کمتری برخوردار می باشند.

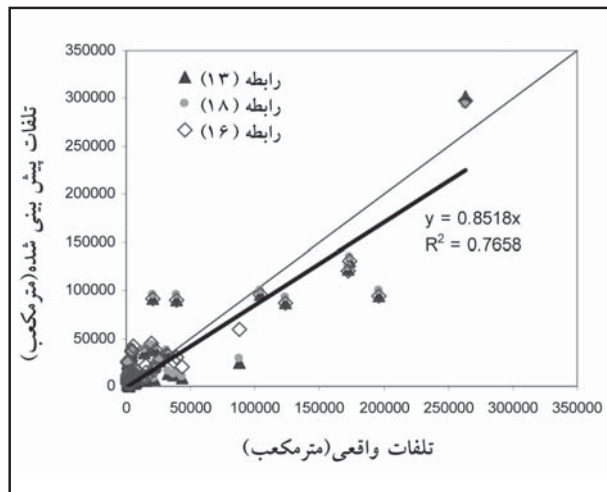
ابتدا تحلیل همبستگی با ساختار خطی انجام شد که نتایج آن در روابط (۶) تا (۱۳) از جدول (۴) مشاهده می شود. رابطه (۶) با استفاده از هر شش متغیر مستقل به دست آمد. در روابط (۷) و (۸) از متغیرهای حجم جریان بالادست، دوام جریان، هدایت هیدرولیکی و عرض کانال که بالاترین ضرایب همبستگی را دارند، استفاده شد. بار دیگر با استفاده از سه متغیر حجم جریان بالادست، دوام جریان و شاخص رطوبت پیشین کانال که بر اساس جدول (۳) ضریب تغییرات بالایی دارند، تحلیل همبستگی انجام شد. نتیجه این تحلیل نیز در رابطه (۹) از جدول (۴) ارائه شده است. همانطور که مشاهده می شود ضریب تبیین یا تعیین ( $R^2$ ) با کاهش متغیرها از شش به سه عدد تنها ۰/۰۲۱ کاهش می یابد. در روابط (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) حالت های دیگری نیز مورد بررسی قرار گرفتند. در نهایت به دلیل همبستگی زیاد بین  $V_1$  و  $V_{up}$  و همچنین نتایج موجود در پژوهش های پیشین که روابط معنی داری بین این دو متغیر به دست آورده اند، تنها از حجم جریان بالادست در رابطه (۱۳) استفاده شد. با مراجعه به جدول (۴) مشاهده می شود که ضریب تبیین در رابطه (۱۳) تنها به میزان ۰/۰۲۲ از رابطه (۶) که تمام متغیرها را در برمی گیرد، کمتر است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که بهترین عامل در پیش بینی تلفات انتقال، حجم جریان بالادست می باشد و

جدول ۴- روابط همبستگی توسعه یافته برای پیش بینی تلفات انتقال

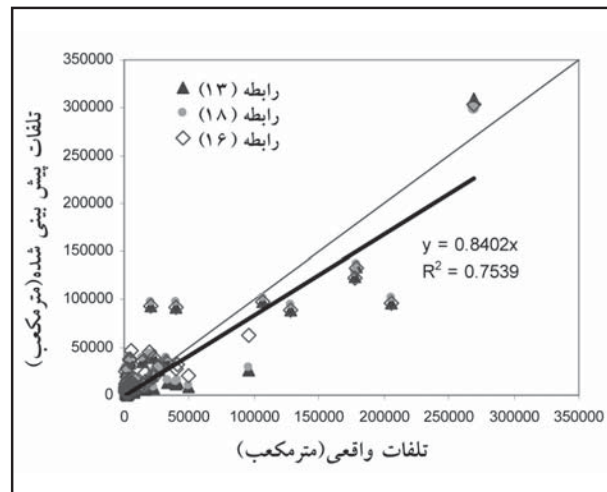
شماره رابطه	روابط همبستگی	$R^2$	$R^2$ تنظیمی*
۶	$V_1=0.0212V_{up}+110.21D+3775.56AncI+3166527K+653345.4S-1497.64W$	۰/۸۳۹	۰/۸۰۲
۷	$V_1=0.0203V_{up}+426.85D+4565653K-1944.59W$	۰/۸۳۱	۰/۸۰۱
۸	$V_1=0.0213V_{up}+35.21D-206772.3K$	۰/۸۱۸	۰/۷۹۱
۹	$V_1=0.0214V_{up}-129.97D+4457.88AncI$	۰/۸۱۸	۰/۷۹۲
۱۰	$V_1=0.0212V_{up}+246.83D-299.02W$	۰/۸۲۰	۰/۷۹۴
۱۱	$V_1=0.0218V_{up}-129.23W$	۰/۸۱۹	۰/۷۹۶
۱۲	$V_1=0.0213V_{up}-24.18D$	۰/۸۱۷	۰/۷۹۵
۱۳	$V_1=0.0212V_{up}$	۰/۸۱۷	۰/۷۹۹
۱۴	$V_1=0.052V_{up}^{0.971}D^{-0.142}AncI^{-0.087}$	۰/۸۲۴	۰/۷۷۰
۱۵	$V_1=0.239V_{up}D^{-0.054}W^{-0.678}$	۰/۸۳۶	۰/۷۸۶
۱۶	$V_1=0.241V_{up}^{0.992}W^{-0.699}$	۰/۸۳۶	۰/۷۸۵
۱۷	$V_1=0.073V_{up}^{0.971}D^{-0.220}$	۰/۸۲۲	۰/۷۶۷
۱۸	$V_1=0.063V_{up}^{0.932}$	۰/۸۲۰	۰/۷۶۴

$R^2_{adj}$

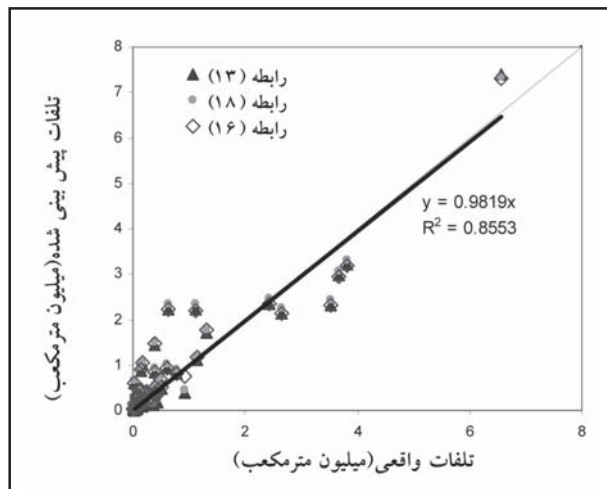




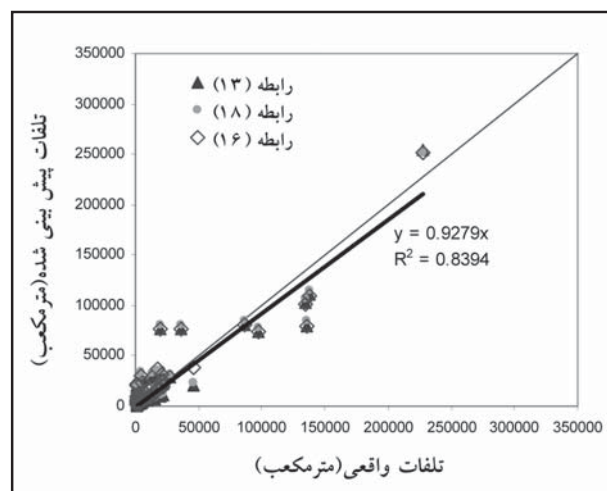
شکل ۴- بررسی روابط (۱۳)، (۱۸) و (۱۶) در یک کیلومتر دوم بازه



شکل ۳- بررسی روابط (۱۳)، (۱۸) و (۱۶) در یک کیلومتر اول بازه (خط برازش داده شده مربوط به رابطه (۱۶) است)



شکل ۶- بررسی روابط (۱۳)، (۱۸) و (۱۶) در برآورد حجم تلفات انتقال در کل بازه



شکل ۵- بررسی روابط (۱۳)، (۱۸) و (۱۶) در یک کیلومتر دهم بازه

تیین را تنها به میزان اندکی بهبود می بخشد. پژوهش های انجام شده در مناطق دیگر نیز حکایت از همبستگی زیاد بین حجم تلفات انتقال و حجم جریان بالادست دارد. همچنین از مقایسه معادلات خطی و غیرخطی ملاحظه می شود که معادلات غیرخطی نیز تا حدودی نتایج را بهتر پیش بینی می کنند. با توجه به مطالب بحث شده روابط (۱۳)، (۱۶) و (۱۸) از کاربرد بیشتری برخوردار می باشند، لذا در شکل های (۳) تا (۶) به منظور ارزیابی عملکرد این روابط در فضای مستقل و نیز ارایه ای از کاربرد جامع تر آنها، تلفات انتقال پیش بینی شده توسط این روابط با تلفات انتقال واقعی مقایسه می گردد. گرچه تلفات واقعی در کل بازه از تفاضل حجم آبنمودهای ورودی و خروجی مشاهداتی به دست می آید، اما منظور از تلفات واقعی در هر بازه (کیلومتر) میانی، تلفاتی است که از توزیع غیریکنواخت تلفات با توجه به رابطه (۴) حاصل می شود که مفهوم آن در قالب روابط (۴) و (۵) پیش تر توضیح داده شده

حذف سایر متغیرها از روابط همبستگی، خطای چندانی در پیش بینی نتایج به وجود نمی آورد. این امر با توجه به ضریب تغییرات بالای  $V_{up}$ ، مطابق جدول (۳)، نیز قابل توجیه است.

در ادامه با استفاده از ساختار غیرخطی، تحلیل همبستگی انجام شد که نتایج آن در روابط (۱۴) تا (۱۸) ارائه شده اند. متغیرهای مورد استفاده در این روابط به ترتیب متناظر با روابط خطی (۹) تا (۱۳) می باشند. با توجه به جدول (۴) مشاهده می شود که ضریب تبیین در روابط (۱۴)، (۱۵)، (۱۶)، (۱۷) و (۱۸) به ترتیب به میزان  $0/006$ ،  $0/016$ ،  $0/017$ ،  $0/005$  و  $0/003$  نسبت به حالت خطی متناظر خود افزایش یافته است. در مورد  $R^2$  تنظیمی هم روند مشابهی ملاحظه می گردد.

مقایسه روابط جدول (۴) نشان می دهد که مؤثرترین عامل در پیش بینی تلفات انتقال، حجم جریان بالادست می باشد به طوری که افزودن سایر متغیرها به معادله همبستگی، ضریب

جدول ۵- مشخصه های آماری باقیمانده های استاندارد مربوط به توسعه و آزمایش مدل ها

در فضای ارزیابی متقاطع		در فضای مدل همبستگی اصلی		رابطه
واریانس باقیمانده های استاندارد	میانگین باقیمانده های استاندارد	واریانس باقیمانده های استاندارد	میانگین باقیمانده های استاندارد	
۱/۰۱۷۸۲	۳/۰۶×۱۰ <sup>-۱۳</sup>	۱/۰۱۷۷۹	۱۷-۱۰×۱/۱۳-	۱۳
۱/۰۱۸۵	-۱/۷۲×۱۰ <sup>-۱۲</sup>	۱/۰۱۵۸	۱۲-۱۰×۷/۵۰-	۱۸
۱/۰۰۹	۱/۶۵×۱۰ <sup>-۱۱</sup>	۱/۰۰۶	۱۱-۱۰×۱/۶۳-	۱۶

مقدار باقیمانده در هر نقطه و میانگین باقیمانده ها، تقسیم بر جذر میانگین مربع باقیمانده ها (RMSE) می باشد. مقادیر مرتبط با باقیمانده های استاندارد هم در فضای مدل همبستگی اصلی و هم در فضای ارزیابی متقاطع در جدول (۵) ارائه شده اند. همان طور که مشاهده می شود مقادیر، نزدیکی لازم به مقدار صفر و یک را در هر دو حالت دارا می باشند که حکایت از نا اریب بودن مدل ها دارد.

گرچه روابط بر اساس اطلاعات بازه های بدون جریان های عرضی قابل توجه به دست آمدند، ولی وجود جریان های عرضی میانی کاربرد روابط را محدود نمی کند. به عنوان مثال سه رخداد که در مجموعه رخدادهای مورد استفاده در تحلیل همبستگی وجود ندارند و در میانه بازه جریان عرضی مشخصی به آنها وارد می شود، در نظر گرفته شدند. ابتدا تلفات انتقال و حجم جریان در انتهای بازه های یک کیلومتری تا ابتدای محل ورود جریان عرضی با استفاده از رابطه خطی (۱۳) محاسبه گردید و سپس با افزودن حجم جریان عرضی میانی به حجم جریان در آن محل، دوباره محاسبات تلفات به سمت انتهای بازه ادامه داده شد. بدین ترتیب حجم تلفات انتقال در کل بازه ۳۳۳۳۰۶/۹۲ ، ۲۷۶۴۳۶/۸۳ و ۱۱۶۰۴۳/۴ مترمکعب به دست آمد که مقادیر تلفات واقعی در این رخدادهای به ترتیب عبارت از ۳۲۶۵۷۷/۲ ، ۲۶۶۳۲۱/۷ و ۱۸۱۴۸۰/۹ می باشند.

### نتیجه گیری

پژوهش حاضر گزارشی از یک مجموعه فعالیت میدانی، آزمایشگاهی و مطالعاتی گسترده برای توسعه روابط همبستگی کاربردی به منظور برآورد تلفات انتقال در رودخانه های مناطق خشک می باشد. در این راستا، روابط همبستگی متعددی برای برآورد تلفات انتقال با توجه به اطلاعات میدانی توسعه داده شدند و مورد بررسی قرار گرفتند که از بین آنها سه رابطه (۱۳)، (۱۶) و (۱۸) برای برآورد تلفات انتقال در حوزه آبخیز قره قوم توصیه می گردند. از میان این روابط، رابطه (۱۶) بیشترین ضریب تبیین را دارا می باشد و پس از آن به ترتیب روابط (۱۸) و (۱۳) قرار دارند. بررسی مقادیر برآورد شده توسط این روابط نشان می دهد که رابطه

است. شرح چگونگی این محاسبات نیز در بخش ۳ آمده است. تلفات در بازه (کیلومتر) اول، که در فرآیند توسعه روابط همبستگی مورد استفاده قرار گرفت، نیز از این رابطه محاسبه شده است. برای این منظور حجم تلفات انتقال در کیلومترهای اول، دوم و دهم بازه و نیز بر روی کل بازه در شکل های (۳) تا (۶) ترسیم شده اند. در این نمودارها خطوط برازش برای رابطه (۱۶) رسم شده اند تا عملکرد این رابطه در مقایسه با خط برازش کامل ۴۵ درجه روشن تر گردد. با توجه به شکل های (۳) تا (۶) مشاهده می گردد که با پیشروی محاسبات از کیلومتر اول به سمت کیلومترهای بعدی بازه، روابط توسعه یافته همبستگی، تلفات انتقال را بهتر برآورد می نمایند. این بهبود در مقایسه شکل های (۴) و (۵) به طور کامل قابل ملاحظه است. به عبارت دیگر خطای این روابط در کیلومترهای اول بازه (با توجه به بیشتر بودن حجم تلفات انتقال) از سایر کیلومترها در طول بازه بیشتر است. همچنین، در محاسبه مجموع تلفات انتقال بر روی کل بازه، انطباق بیشتری بین روابط توسعه یافته وجود دارد (شکل ۶). لازم به تأکید است که در شکل (۶) تلفات بر روی کل بازه از مجموع تلفات تک تک کیلومترهای مربوط به آن بازه به دست آمده و در محاسبه تلفات هر کیلومتر نیز از روابط همبستگی استفاده شده است.

به منظور ارزیابی مدل های همبستگی ارائه شده ارزیابی متقاطع نیز انجام پذیرفت. ارزیابی متقاطع<sup>۱</sup> می تواند به روش های مختلف چون انتخاب درصدی از داده ها به منظور آزمایش مدل، و یا به صورت حذف نوبتی و تک تک داده ها، تولید مدل معادله همبستگی جدید بدون این داده و محاسبه باقیمانده در نقطه حذف شده انجام پذیرد. اگرچه روش دوم حجم محاسباتی زیادی دارد ولی مزیت آن این است که به طور عملی کل داده های موجود در تولید مدل همبستگی اصلی مورد استفاده قرار می گیرند. در این مقاله از روش دوم استفاده گردید. در صورت نا اریب بودن مدل تولید شده، می بایست میانگین باقیمانده های استاندارد آن برابر صفر و واریانس آنها برابر یک باشد. باقیمانده استاندارد در هر نقطه عبارت از تفاضل

1- Cross Validation

## تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از همکاری کمیته محترم تحقیقات شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان رضوی که حمایت مالی بخشی از این پروژه تحقیقاتی را بر عهده داشتند و نیز کارشناسان محترم آن شرکت که در انجام بعضی امور مربوط به بازدیدها و جمع‌آوری اطلاعات میدانی همکاری نمودند، کمال تشکر را دارند.

## منابع

- ۱- اطمیابی، ا. (مترجم) ۱۳۸۴. اصول مهندسی ژئوتکنیک: مکانیک خاک، نوشته داس، ب.م.، چاپ سوم، نشر کتاب دانشگاهی تهران، ۶۳۶ صفحه.
- ۲- شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان، معاونت مطالعات پایه، ۱۳۸۴. گزارش به‌هنگام‌سازی تلفیق مطالعات منابع آب حوزه آبخیز قره‌قوم، جلد ۲ (بررسی‌ها و مشخصات عمومی)، ۲۵۲ صفحه.
- ۳- علیزاده، ا. ۱۳۸۷. اصول هیدرولوژی کاربردی، انتشارات دانشگاه امام رضا (ع) مشهد، ۴۳۸ صفحه.
4. Cataldo, J.C., Behr, C., Montalto, F.A. and Pierce, R.J. 2010. Prediction of transmission losses in ephemeral streams, Western U.S.A., Journal of Open Hydrology. 4:19-34.
5. Cataldo, J.C., Behr, C. and Montalto, F.A. 2004. A summary of published reports of transmission losses in ephemeral streams in the U.S., A report to the National Center for Housing and Environment. 38pp.
6. El-Hames, A.S. and Richards, K.S. 1998. An integrated, physically based model for arid region flash Flood prediction capable of simulating dynamic transmission loss. Hydrological Processes. 12: 1219-1232.
7. Hughes, D.A. and Sami, K. 1992. Transmission losses to alluvium and associated moisture dynamics in a semiarid ephemeral channel system in Southern Africa. Hydrological Processes. 6: 45-53.
8. Jordan, P.R. 1977. Streamflow transmission losses in Western Kansas. Journal of Hydraulics Division. ASCE. 105:905-919.
9. Lane, L.J., Diskin, M.H. and Renard, K.G. 1971. Input-output relationships for an ephemeral stream channel system. Journal of Hydrology. 13: 22-40.

(۱۳) برای حجم‌های کوچک‌تر و رابطه (۱۸) برای حجم‌های بزرگ‌تر نتایج بهتری را ارائه می‌دهند. نکته قابل توجه دیگر آن است که روابط (۱۳) و (۱۸) می‌توانند تنها بر اساس حجم جریان بالادست، تلفات انتقال را پیش‌بینی کنند. لذا با استفاده از این دو رابطه می‌توان در غیاب ویژگی‌های فیزیکی رودخانه و تنها توسط حجم جریان بالادست و طول بازه رودخانه، تلفات انتقال را با دقت مناسبی برآورد نمود. اما برای کاربرد رابطه (۱۶) علاوه بر این دو متغیر، لازم است تا عرض رودخانه نیز تعیین گردد.

با استفاده از این روابط، برآورد تلفات انتقال برای هر کیلومتر از کانال با محاسبه حجم جریان در ابتدای آن کیلومتر، که از تفاضل تلفات انتقال از حجم جریان در کیلومتر قبلی به دست می‌آید، امکان‌پذیر می‌باشد. گرچه روابط بر اساس اطلاعات بازه‌های بدون جریان‌های عرضی قابل توجه به دست آمدند، ولی وجود جریان‌های عرضی میانی کاربرد روابط را محدود نمی‌کند چرا که می‌توان تلفات را تا ابتدای محل ورود جریان عرضی محاسبه نمود و سپس با افزودن حجم جریان عرضی میانی، دوباره محاسبات را به سمت انتهای بازه ادامه داد.

مقایسه روابط توسعه یافته همبستگی نشان می‌دهد که مؤثرترین عامل در پیش‌بینی تلفات انتقال، حجم جریان بالادست می‌باشد به طوری که افزودن سایر متغیرها به معادله همبستگی، ضریب تبیین را تنها به میزان اندکی بهبود می‌بخشد. پژوهش‌های انجام شده در مناطق دیگر نیز حکایت از همبستگی زیاد بین حجم تلفات انتقال و حجم جریان بالادست دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تنها با توجه به حجم جریان بالادست می‌توان تلفات انتقال را برآورد نمود، بدون آنکه دقت نتایج به میزان معنی‌داری تحت تأثیر قرار گیرد. اگرچه به نظر می‌رسد که استفاده از روابطی که بر اساس ویژگی‌های فیزیکی کانال باشند، معقول‌تر است؛ اما نتایج حاصل از مجموعه داده‌های موجود، حاکی از آن است که متقبل شدن هزینه اضافی برای اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی رودخانه قابل توجیه نمی‌باشد. پیش‌بینی تلفات انتقال با استفاده از روابط همبستگی مربوط به منطقه مورد مطالعه می‌باشد، زیرا مدل‌ها تنها برای یک سری از رخدادها در یک محل یکسان تولید و استفاده شده‌اند. لذا از آنجا که این روابط، ویژه رودخانه‌های همان منطقه می‌باشند، تلفات انتقال در مناطق دیگر را نمی‌توانند پیش‌بینی کنند. در این پژوهش نیز به علت کمبود اطلاعات، تنها داده‌های مربوط به چهار بازه از سه رودخانه کشف‌رود، کارده و زشک در حوزه آبخیز قره‌قوم در یک تحلیل همبستگی مورد استفاده قرار گرفتند. بنابراین روابط همبستگی توسعه یافته در این پژوهش، خاص رودخانه‌های حوزه آبخیز قره‌قوم می‌باشند. اما در صورت تکمیل اطلاعات در آینده، می‌توان روابط همبستگی مشابهی را برای سایر حوزه‌های منطقه خراسان رضوی توسعه داد که دامنه تغییرات وسیع‌تری از عامل‌ها را مدنظر قرار دهند.

A realistic approach. *Journal of Arid Environments*. 27: 107-112.

13. Sharma, K.D. and Murthy, J.S.R. 1994. Estimating transmission losses in an arid region. *Journal of Arid Environments*. 26: 209-219.

14. Sharma, K.D. and Murthy, J.S.R. 1995. Hydrologic routing of flow in arid ephemeral channels. *Journal of Hydraulic Engineering*. 121(6):466-471.

15. Walters, M.O. 1990. Transmission losses in arid region. *Journal of Hydraulic Engineering*. 116(1): 129-138.

10. Lane, L.J., Ferreira V.J. and Shirley, E.D. 1980. Estimating transmission losses in ephemeral stream channels. *Hydrology and Water Resources in Arizona and the South West*, Proc. 1980 meeting Arizona Section, A. W. R. A and Hydrology Section Arizona Nevada Academy of Science. 193-202.

11. Lange, J. 2005. Dynamics of transmission losses in a large arid stream channel. *Journal of Hydrology*. 306: 112-126.

12. Sharma, K.D. and Murthy, J.S.R. 1994. Estimating transmission losses in an arid region-

*Abstract***Development of Regression Equations for Estimating Transmission Losses in Ephemeral Rivers of Ghara-Ghoom Catchment**S. Bambeichi<sup>1</sup>, S. M. Hosseini<sup>2</sup> and B. Ghahraman<sup>3</sup>

Flow in streams of arid and semi-arid regions is not perennial and usually floods occur after seasonal precipitations. Therefore, the bed material is dry and underneath soil is in unsaturated condition prior to occurrence of floods. As a result, volume of flood hydrographs decreases due to infiltration as they travel downstream. This reduction in hydrograph volume is usually termed as transmission losses. Because of the existence of ephemeral rivers in most parts of Iran, study on transmission losses in these areas is necessary. In this paper, regression equations are developed for estimating transmission losses in ephemeral rivers of Ghara-Ghoom catchment in Khorasan Razavi province. To achieve this, gauging stations' data and physical characteristics of Kashafrud, Kardeh and Zoshk rivers were collected and analyzed. Transmission losses in the first kilometer was considered as dependent variable in regression analysis and its dependency was tested against upstream flow volume, flow duration, antecedent moisture content, hydraulic conductivity, slope and width of the river as independent variables. Upstream flow volume was found to be the most important variable in explaining transmission losses. Three regression equations (linear and nonlinear) were developed for relating transmission losses to the most significant involved variables for Ghara-Ghoom catchment. Estimates of transmission losses can be made for any unit length (km) by calculating the flow volume at the beginning of the unit length as flow volume minus the transmission loss in the previous unit length. Such equations can be used by water resources managers and hydraulic structure designers.

**Keywords:** *Transmission Losses, Ephemeral Rivers, Regression Equations, Ghara-Ghoom Catchment and Upstream Flow Volume.*

---

1- Ph.D. Student, Civil Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad.

2- Associate Professor, Civil Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad. shosseini@Ferdowsi.um.ac.ir

3- Professor, Faculty of Agricultural Engineering, Ferdowsi University of Mashhad.