

تعیین روابط پیش‌بینی رواناب در حوضه‌های آبریز کوهستانی (مطالعه موردی: حوضه‌های آبریز معرف امامه و کسلیان)

* رامین فضل‌اولی^۱، علی‌محمد آخوندعلی^۲ و عبدالکریم بهنیا^۲

^۱به‌ترتیب دانشجوی دکتری و اعضاء هیأت علمی گروه آبیاری، دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ دریافت: ۸۴/۱۰/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۸۵/۲/۱۴

چکیده

در این تحقیق روابط پیش‌بینی عمق رواناب ناشی از بارش برای حوضه‌های آبریز کوهستانی کوچک واقع در دامنه‌های شمالی و جنوبی رشته کوه البرز استخراج شد. برای این منظور دو حوضه مورد مطالعه به گونه‌ای انتخاب شدند که علاوه‌بر دارا بودن داده‌های بارش - رواناب کامل و مورد اطمینان، از موقعیت منطقه‌ای مناسبی نیز در محدوده مورد مطالعه برخوردار باشند. روابط پیش‌بینی براساس عمق بارش، شاخص بارش پیشین و دبی پایه به‌دست آمد. از روش‌های آماری به‌منظور استخراج روابط رگرسیون چند متغیره خطی و ضرایب همبستگی و خطاهای استاندارد مربوطه در مورد حوضه‌های مورد مطالعه استفاده شد. کلیه وقایع اوج مستقل برابر یا بزرگ‌تر از $0/7$ مترمکعب در ثانیه برای حوضه آبریز معرف امامه و کلیه وقایع اوج مستقل برابر یا بزرگ‌تر از یک مترمکعب در ثانیه برای حوضه آبریز معرف کسلیان، جهت آنالیز و استخراج روابط نهایی مد نظر قرار گرفتند. خطای استاندارد روابط بهینه پیش‌بینی رواناب در حوضه آبریز معرف امامه برابر با $0/248$ میلی‌متر و برای حوضه آبریز معرف کسلیان برابر با $0/205$ میلی‌متر بوده است. همچنین ضریب همبستگی چندگانه در دو حوضه مورد مطالعه به‌ترتیب برابر با $0/842$ و $0/857$ به‌دست آمد. در پایان نتایج حاصل از روابط رگرسیونی تهیه شده به حوضه‌های مجاور که از نظر خصوصیات هیدرولوژیکی مشابه بودند، تعمیم داده شد.

واژه‌های کلیدی: رگرسیون چند متغیره، شاخص بارش پیشین، عمق بارش، دبی پایه، رواناب

مقدمه

از آنجا که تا کنون رابطه جهانی واحدی برای پیش‌بینی دقیق حجم رواناب ناشی از رگبار ارائه نشده است، در مناطق مختلف، آزمایش‌ها و پروژه‌های تحقیقاتی متعددی به منظور استخراج روابط بارش - رواناب براساس شرایط محلی انجام شده و در نتیجه رابطه میان حجم بارش و رواناب توسط فرمول‌های تجربی و نیمه تجربی متعددی بیان شده است. کمیت رواناب ناشی از

وقوع بارش بر روی یک حوضه مفروض، بستگی به عوامل متعددی از جمله شرایط رطوبتی اولیه خاک حوضه و خصوصیات بارش نظیر مقدار بارش و شدت و تداوم آن دارد.

از میان روش‌های متنوعی که در گذشته به منظور تخمین حجم رواناب به کار برده شده‌اند می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

جهت تعیین مقادیر رواناب و یا رطوبت خاک استفاده شده است.

به عنوان مثال، بوید و همکاران (۲۰۰۰) مدل شاخص بارش پیشین (API) را به عنوان یک مدل تجربی جهت پیش بینی رواناب و جریان ناشی از یک واقعه سیل، معرفی نمودند.

ویسکرمی و تلوری (۱۳۸۰)، در یک کار تحقیقاتی روابط میان شاخص بارش پیشین و رواناب سطحی را در حوضه آبریز کشکان در استان لرستان مورد بررسی قرار داده و روابط همبستگی را تنها براساس شاخص بارش پیشین و ارتفاع رواناب استخراج نمودند.

به هر حال مطالعات بیشماری در گوشه و کنار دنیا به منظور تعیین روابط میان بارش و رواناب انجام شده و هنوز هم در بسیاری از مناطق، روابط بهینه همبستگی میان بارش و رواناب در حال بررسی و استخراج می باشد.

بنابراین هدف اصلی این تحقیق استخراج روابط بارش - رواناب در حوضه های آبریز معرف امامه و کسلیان به عنوان نماینده هایی برای حوضه های آبریز کوهستانی کوچک واقع در دامنه های شمالی و جنوبی رشته کوه البرز و ارزیابی میزان کارایی روابط استخراج شده به منظور تخمین ارتفاع رواناب در مقایسه با مشاهدات صحرایی و اندازه گیری های مستقیم انجام شده در حوضه های مذکور بوده است. همچنین روابط به دست آمده در این تحقیق را می توان با رعایت موارد ذکر شده در بخش نتایج این تحقیق، در مورد سایر حوضه های مشابه نیز به کار برد.

مواد و روش ها

با توجه به این که هدف این مطالعه استخراج روابطی برای پیش بینی عمق رواناب ناشی از بارش برای حوضه های آبریز کوهستانی کوچک واقع در دامنه های شمالی و جنوبی رشته کوه البرز بوده است، حوضه های مورد مطالعه به گونه ای انتخاب شدند که اولاً موقعیت مکانی مناسبی را در سرتاسر رشته کوه مذکور داشته و ثانیاً از آمار با کیفیت و طول دوره آماری مناسبی

کریگر و همکاران (۱۹۴۵) برای تخمین حجم رواناب ناشی از بارش، مطالعاتی را با منظور نمودن شاخص نفوذ به انجام رساندند.

کوهلر و لینزلی (۱۹۵۱) از پارامترهای عمق بارش، شاخص بارش پیشین^۱ (API)، شماره هفته و تداوم بارش به منظور استخراج روابط میان رواناب ناشی از بارش و پارامترهای مذکور با استفاده از روش همبستگی نموداری استفاده نمودند.

سازمان حفاظت خاک ایالات متحده (۱۹۵۷) روشی را برای تخمین حجم رواناب ناشی از بارش با استفاده از شرایط رطوبتی پیشین و پوشش سطح حوضه ارائه نمود که هم اکنون تحت عنوان روش شماره منحنی، دارای معروفیت جهانی می باشد.

هاپکینز و هاگت (۱۹۶۱) با وارد نمودن شاخص دمای پیشین^۲ (ATI) و دمای میانگین سالانه حوضه به عنوان پارامترهای اضافی تجزیه و تحلیل هایی را برای استخراج روابط بارش - رواناب به انجام رساندند. لی و بری (۱۹۶۹) با استفاده از روش همبستگی چند متغیره روابطی را میان ارتفاع رواناب به عنوان متغیر وابسته و ارتفاع بارش، دبی پایه، شاخص بارش پیشین و شماره هفته به عنوان متغیرهای مستقل برای چند حوضه از استان نیو برانزویک استخراج نمودند.

همچنین در موارد متعددی برای طراحی زهکش های سیلاب و نیز در پروژه های کنترل سیل از ضرایب رواناب برای تخمین حجم رواناب استفاده شده است (لینزلی و فرانزینی، ۱۹۸۷). لینزلی و همکاران (۱۹۸۸) با استفاده از پارامترهایی نظیر تداوم رگبار و حجم آن و نیز اینکه چه زمانی از سال باشد (هفته یا فصل) روابطی را میان بارندگی و رواناب ناشی از آن با استفاده از روش همبستگی نموداری^۳ به دست آوردند. همچنین در بسیاری از مدل های هیدرولوژیک از پارامتر شاخص بارش پیشین

1- Antecedent Precipitation Index
2- Antecedent Temperature Index
3- Coaxial Method

برخوردار باشند. با توجه به شروط ذکر شده دو حوضه آبریز معرف امامه و کسلیان جهت انجام تحقیق حاضر انتخاب شدند. حوضه‌های مذکور نظر به ویژگی‌های خاصی که دارند معرف مناسبی برای مناطق مورد مطالعه بوده‌اند که اولی معرف مناطق وسیعی از دامنه‌های جنوبی رشته کوه البرز و دومی معرف مناطق وسیعی از دامنه‌های شمالی این رشته کوه بوده‌است. همچنین حوضه‌های مورد مطالعه علاوه بر داشتن باران‌سنگ‌های متعدد در سطح حوضه، در محل خروجی نیز دارای ایستگاه هیدرومتری می‌باشند. به این ترتیب جهت انجام تحقیق حاضر از آمار روزانه بارندگی و دبی، طی یک دوره آماری ۲۹ ساله (از اول مهر ۱۳۴۹ لغایت سی و یکم شهریور ۱۳۷۸) استفاده شد، آمار مذکور از مرکز تحقیقات منابع آب ایران (تماب) دریافت گردید.

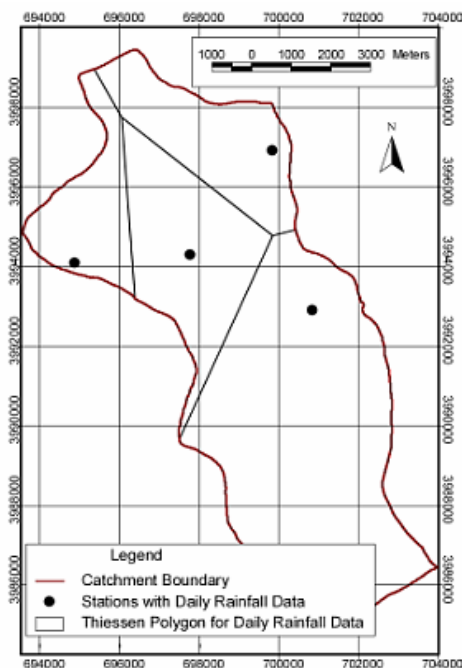
در مرحله بعد داده‌های مورد استفاده جهت انجام تحقیق مورد بررسی دقیق قرار گرفت. در این رابطه باید توجه داشت که هر چند استاندارد بودن قرائت و ثبت داده‌های هیدرولوژی تا حدود زیادی از ایجاد اشتباه در آنها می‌کاهد، اما اطمینان از کیفیت داده‌ها و کامل بودن سری آماری قبل از تجزیه و تحلیل داده‌ها ضروری است و باید به این نکته مهم توجه داشت که بدون ارزیابی صحیح داده‌ها، انجام تحلیل‌های پیچیده آماری نتایج قابل اعتمادی را به دست نخواهد داد (علیزاده، ۱۳۸۲). برای این منظور داده‌های روزانه بارش - رواناب مربوط به ایستگاه‌های هیدرومتری، کلیماتولوژی و باران‌سنجی موجود در حوضه‌های مورد مطالعه برای دوره آماری مورد مطالعه، پس از مرتب‌سازی در محیط صفحه گسترده نرم افزار Excel به‌طور دقیق مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت و در مواردی که آمار نیاز به اصلاح و بازسازی داشته، با استفاده از روش‌های مرسوم از جمله روش نسبت‌ها و نیز روش‌های رگرسیونی، تصحیحات لازم به

عمل آمد. در این رابطه جهت تسهیل و تسریع فرآیند آماده‌سازی داده‌ها، در موارد متعددی اقدام به تهیه برنامه‌های ماکرو در محیط نرم افزار Excel گردید. بنابراین کلیه آمار و اطلاعات جمع‌آوری شده پس از بررسی و حذف داده‌های پرت و بازسازی داده‌های مفقوده، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و در نهایت همگنی آمار کلیه ایستگاه‌ها مورد تأیید قرار گرفت. در جدول ۱، مساحت حوضه‌های مورد مطالعه و نیز نام و مساحت تحت پوشش ایستگاه‌های باران‌سنجی موجود در هر یک از حوضه‌های مورد مطالعه که آمار روزانه آنها موجود بود، ارائه شده است. لازم به توضیح است که ایستگاه کلیماتولوژی راحت‌آباد در ۴/۵ کیلومتری شرق روستای امامه و در خارج از حوضه آبریز معرف امامه قرار داشته ولی به لحاظ نزدیکی و هم ارتفاعی با حوضه مذکور از آمار بارندگی آن استفاده شد. از میان ایستگاه‌های مربوط به حوضه آبریز معرف امامه، کامل‌ترین آمار مربوط به ایستگاه امامه با ۲۹ سال آمار بوده است. ایستگاه امامه تقریباً در مرکز ثقل حوضه قرار گرفته است. همچنین از میان ایستگاه‌های واقع در حوضه آبریز معرف کسلیان، کامل‌ترین آمار بارندگی مربوط به ایستگاه سنگده با ۲۹ سال آمار می‌باشد. ایستگاه سنگده نیز در مرکز ثقل حوضه آبریز کسلیان واقع شده است. در شکل‌های ۱ و ۲، نقشه پلی‌گون تیسن برای ایستگاه‌های باران‌سنجی که دارای آمار بارش روزانه بوده‌اند، در دو حوضه مورد مطالعه ارائه شده است. لازم به توضیح است که پلی‌گون‌های تیسن در این شکل‌ها با استفاده از اکستنشن^۱ تیسن از نرم افزار ArcView و بدون نیاز به ترسیم عمود منصف‌ها محاسبه شده‌اند.

جدول ۱- ایستگاه‌های مورد استفاده جهت محاسبه میانگین بارش به روش تیسن.

نام حوضه	مساحت حوضه (km ²)	نام ایستگاه	نوع ایستگاه	سطح تحت پوشش (km ²)
		امامه	کلیماتولوژی	۲۲/۵۳۰
امامه	۳۷/۲۰۴	کلوکان	کلیماتولوژی	۸/۶۰۶
		راحت آباد	کلیماتولوژی	۶/۰۶۸
		سنگه	کلیماتولوژی	۳۶/۹۷۴
		درزیکلا	کلیماتولوژی	۱۲/۹۶۶
کسیلیان	۶۷/۵۱۳	ولیک چال	باران سنج معمولی	۱۰/۲۹۹
		کله	باران سنج معمولی	۷/۲۷۴

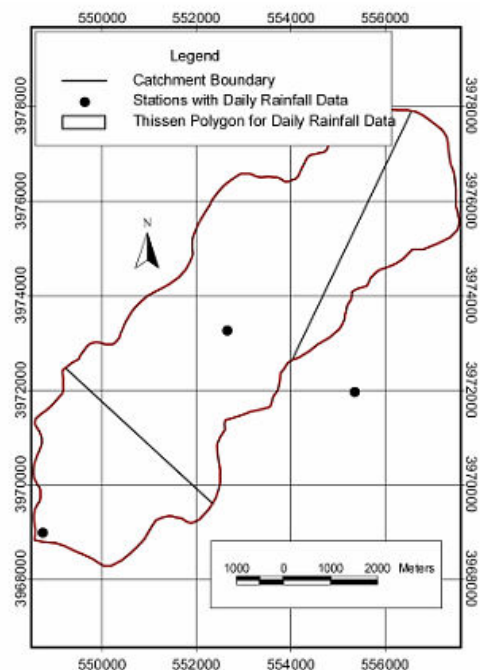
$Q_{max} > Q_{lim}$



(ب) حوضه آبریز معرف کسیلیان

$(2) p > k$

(۱)



(الف) حوضه آبریز معرف امامه

شکل ۱- نقشه پلی‌گون‌های تیسن برای حوضه‌های آبریز مورد مطالعه.

گام بعد جهت انجام تحقیق حاضر، گزینش داده‌های مستقل دبی اوج، از میان سری داده‌های روزانه موجود بوده‌است که به این منظور از شرط استقلال دبی‌های اوج متوالی، براساس روابط ۱ تا ۳ استفاده شد (ویلمز، ۲۰۰۵):

$$\frac{q_{min}}{q_{max}} < f \quad (3)$$

که در روابط فوق:

p = مدت زمان لازم برای فروکش دبی اوج اول تا لحظه شروع بازوی بالارونده هیدروگراف مربوط به دبی اوج بعدی (برحسب روز)

k = ثابت فروکش دبی پایه (برحسب روز)

q_{min} = دبی حداقل میان دو دبی اوج متوالی

q_{max} = دبی اوج

q_{lim} = شرط مرزی برای انتخاب دبی اوج

f = نسبت دبی حداقل به دبی اوج

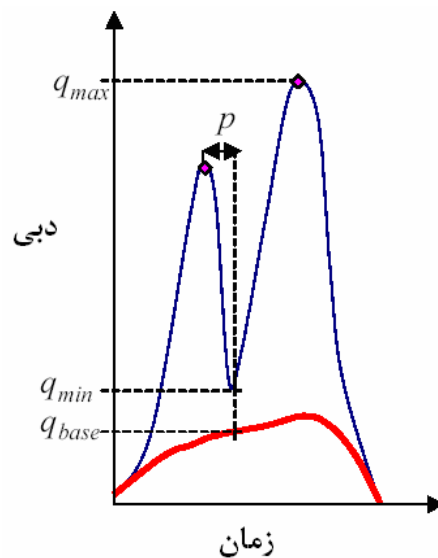
۱- فاصله زمانی آن با دبی اوج بعدی یا قبلی بزرگتر از ثابت فروکش دبی پایه (k) باشد.

۲- دبی مذکور از یک آستانه مفروض (Q_{lim}) بزرگتر باشد.

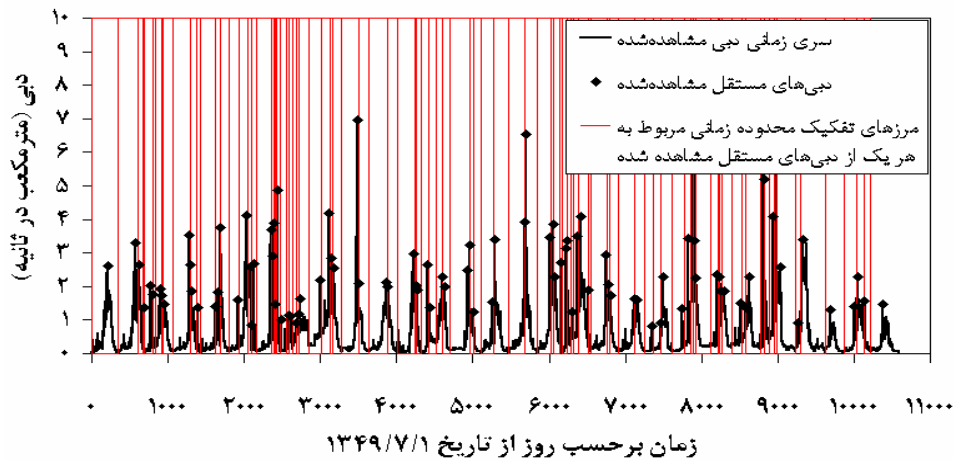
۳- نسبت دبی حداقل به دبی اوج مورد نظر کوچکتر از یک مقدار مفروض (f) باشد. در شکل ۳ نحوه جداسازی دبی‌های اوج مستقل، به صورت شماتیک نشان داده شده است.

برای این منظور پارامتر k از آنالیز مقادیر فروکش دبی روزانه براساس روابط فیلتر دیجیتال متوالی که توسط چاپمن (۱۹۹۱) ارائه شده، برای حوضه‌های آبریز معرف امامه و کسلیان به ترتیب برابر با ۱۳ و ۱۵ روز به دست آمد. مقدار آستانه مرزی برای انتخاب دبی اوج مستقل در دو حوضه آبریز معرف امامه و کسلیان به ترتیب برابر با ۰/۷ و ۱/۰ مترمکعب در ثانیه در نظر گرفته شد. مقادیر آستانه مذکور با انجام سعی و خطا و به گونه‌ای تعیین شدند که حداقل تعداد دبی‌های اوج مستقل، جهت انجام

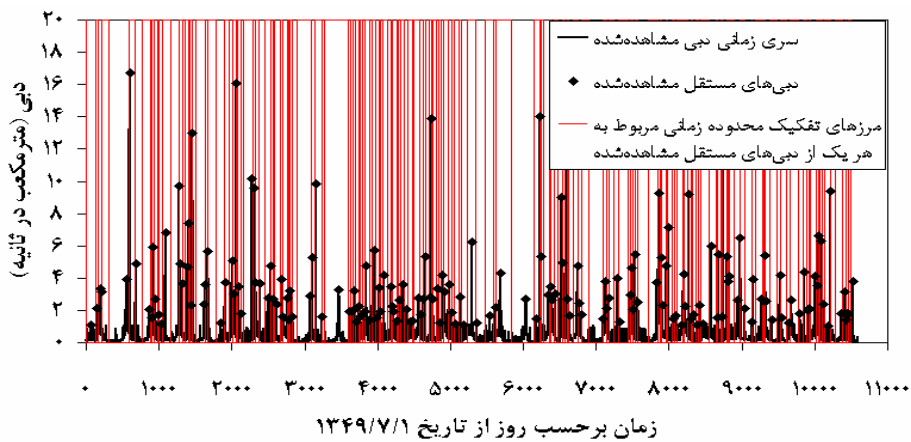
تجزیه و تحلیل‌های بعدی ایجاد شود. همچنین، برای استخراج دبی‌های اوج مستقل از میان داده‌های دبی روزانه مشاهده‌ای، مقدار نسبت دبی حداقل به دبی اوج (f) پس از انجام سعی و خطا برابر با ۰/۵ مناسب تشخیص داده شد و در نظر گرفته شد مفهوم شرط اخیر این است که هنگامی دبی مورد نظر مستقل خواهد بود که مقدار آن از دو برابر مقدار حداقل بین دو دبی اوج متوالی بزرگتر باشد. با در نظر گرفتن این شروط و اعمال آن بر روی سری داده‌های دبی روزانه مشاهده شده که مشتمل بر ۱۰۵۹۲ مشاهده (از ۱۳۴۹/۷/۱ لغایت ۱۳۷۸/۶/۳۱) در هر یک از حوضه‌های مورد مطالعه بوده است تعداد ۹۶ واقعه مستقل دبی اوج برای حوضه آبریز معرف امامه و تعداد ۱۷۵ واقعه مستقل دبی اوج برای حوضه آبریز معرف کسلیان از میان کل مشاهدات مطابق شکل‌های ۴ و ۵ استخراج شد.



شکل ۲- نمایش شماتیک نحوه جداسازی دبی‌های اوج مستقل.



شکل ۳- دبی‌های مستقل مشاهده شده در حوضه آبریز معرف امامه.



شکل ۴- دبی‌های مستقل مشاهده شده در حوضه آبریز معرف کسلیان.

$i =$ تعداد روزهای پیشین و P_t مقدار بارش روزانه در طول روز t ام برحسب میلی‌متر است.

شایان ذکر است که تفاوت رابطه ۴ با فرم اولیه معادله، در تعداد جملات آن می‌باشد زیرا تعداد جملات معادله اولیه برابر با (i) جمله و تعداد جملات معادله اصلاح شده برابر با $(i+1)$ جمله می‌باشد و علت اختلاف این است که در فرم اولیه معادله برای محاسبه مقدار پارامتر API در هر روز، مقدار بارش در آن روز که اتفاقاً بیشترین تأثیر را نیز بر روی رطوبت خاک داشته در نظر گرفته نمی‌شد ولی در فرم اصلاح شده معادله، این مشکل رفع شده و با انجام این اصلاح ضرایب همبستگی معادلات استخراج شده مقادیر بالاتری را نشان دادند. بنابراین در این تحقیق، مقدار API در هر روز با توجه به رابطه ۴، از ضرب نمودن متوسط مقدار بارش در همان

همچنین شاخص بارش پیشین (API) به‌عنوان پارامتری برای ارزیابی شرایط رطوبتی خاک در هر حوضه انتخاب گردید. در این تحقیق به‌منظور محاسبه شاخص بارش پیشین از شکل اصلاح شده معادله ارائه شده توسط کوهرلر و لینزلی (۱۹۵۱)، که طبق بررسی‌های انجام شده عمومی‌ترین رابطه موجود جهت تعیین شاخص بارش پیشین (API) بوده است، استفاده شد. فرم کلی معادله اصلاح شده که در این تحقیق پیشنهاد شده به‌صورت زیر می‌باشد:

$$API = P_0 + KP_{-1} + K^2P_{-2} + \dots + K^iP_{-i} = \sum_{t=0}^i (K^t P_t) \quad (4)$$

که در آن:

$API =$ شاخص بارش پیشین برحسب میلی‌متر
 $K =$ ثابت فروکش رطوبت خاک که کمتر از واحد بوده و بدون بعد می‌باشد.

روز و سی روز قبل از آن در یک فاکتور کاهش مناسب و تجمیع $i+1$ جمله حاصل به دست آمد.

پارامتر K در رابطه ۴، ثابت فروکش رطوبت خاک بوده و طبق تحقیقات انجام شده توسط وایزمن و لویس (۱۹۹۶) محدوده تغییرات آن بین ۰/۸ تا ۰/۹۸ می باشد. که جهت انجام این تحقیق از مقدار متوسط محدوده مذکور یعنی ۰/۹۰ استفاده شد.

جهت محاسبه شاخص بارش پیشین، بعد از اینکه مقدار ثابت فروکش رطوبت خاک (K)، تعیین گردید، میزان بارندگی در روزهای قبل نیز مورد نیاز بوده است و برای این منظور ابتدا می بایست تعداد روزهای پیشین در نظر گرفته می شد. تعداد روزهای قبل، در منابع مختلف معمولاً از ۷ تا ۶۰ روز بسته به شرایط منطقه در نظر گرفته شده است، البته مقادیر حدی حداقل ۵ روز (وایزمن و لویس، ۱۹۹۶) و حداکثر ۱۲۰ روز (انکتیل و همکاران، ۲۰۰۴) نیز در منابع دیده شده است. تعداد روزهای قبل، بستگی به وضعیت اقلیمی منطقه داشته و هر چه اقلیم منطقه به سمت گرم و خشک بودن متمایل می گردد، تعداد روزهای قبل نیز کاهش پیدا می کند زیرا در این حالت تأثیر بارندگی های قبلی روی رطوبت خاک زودتر خنثی می گردد. با این وجود تعداد روزهای قبل، هر چه بیشتر در نظر گرفته شود، محاسبه API نیز دقیق تر خواهد بود ولی از آنجایی که از یک حد معین به بعد، تأثیر آن شدیداً کاهش می یابد، در حوضه های آبریز مورد مطالعه با توجه به وضعیت اقلیمی این حوضه ها، تعداد روزهای قبل برابر با ۳۰ روز در نظر گرفته شد و به این ترتیب از انجام محاسبات طویل، پیچیده و زمان بر که در اثر طولانی شدن دوره پیشین ایجاد می شد، جلوگیری به عمل آمد. از سوی دیگر با توجه به تاریخ وقوع دبی های اوج مستقل، مقادیر بارش ثبت شده در ایستگاه های باران سنجی موجود در حوضه های مورد مطالعه در طی روز وقوع دبی اوج و ۳۰ روز قبل از آن، استخراج شد و پس از آن میزان متوسط بارش برای هر روز با در نظر

گرفتن میانگین وزنی باران ثبت شده از روش تیسن محاسبه گردید.

همچنین طول مدت یک سیل برابر با یک، دو و یا سه روز بسته به تداوم بارش، قبل و بعد و یا در همان تاریخی که حداکثر بارش روزانه به وقوع پیوسته بود، در نظر گرفته شد.

دبی پایه به عنوان شاخص ذخیره زیر سطحی در نظر گرفته شد و هیدروگراف ها همراه با هایتوگراف بارش های مربوطه به طور توأم در گراف های مشترک در مقیاس زمانی روزانه ترسیم شدند. سپس رواناب سطحی ناشی از بارش پس از جداسازی دبی پایه از هیدروگراف دبی کل با استفاده از روش فیلتر دیجیتال متوالی به دست آمد و نیز زمان فروکش رواناب مستقیم پس از دبی اوج از رابطه زیر محاسبه شد (علیزاده، ۱۳۸۲).

$$N = 0.83 A^{0.2} \quad (5)$$

که در آن:

N = زمان پس از دبی اوج هیدروگراف برحسب روز

A = مساحت حوضه برحسب کیلومتر مربع

جهت تعیین بهترین رابطه میان متغیرهای مستقل و متغیر وابسته، سه شکل کلی از معادلات پیش بینی با فرم عمومی ارائه شده به صورت معادلات زیر، بر داده های موجود برازش داده شد:

$$R = a + bP + cAPI + dBF \quad (6)$$

$$R^{0.5} = a + bP + cAPI + dBF \quad (7)$$

$$R/P = 1 - e^{-a + bP + cAPI + dBF} \quad (8)$$

در سه رابطه اخیر R ، P و API به ترتیب ارتفاع رواناب سطحی، ارتفاع بارش و شاخص بارش پیشین برحسب میلی متر بوده و BF دبی پایه برحسب مترمکعب در ثانیه می باشد. همچنین ضرایب a ، b ، c و d ضرایب معادلات رگرسیونی می باشند که در این تحقیق جهت تعیین ضرایب مذکور با استفاده از روش حداقل مربعات، از برنامه رایانه ای $SPSS$ استفاده شد.

با مرتب سازی معادله ۸ و گرفتن لگاریتم در مبنای عدد نپرین از طرفین آن، این معادله به صورت خطی در

آمده که در نتیجه ضرایب آن از روش رگرسیون خطی چندگانه قابل تعیین بوده است. معادله ۸ پس از تبدیل به صورت زیر بازنویسی گردید:

$$\ln(1-R/P)=a+bP+cAPI+dBf \quad (9)$$

به این ترتیب با توجه به ترکیب بهینه میان متغیرهای مستقل و متغیر وابسته، بین یک تا حداکثر سه ضریب رگرسیونی (و نیز یک مقدار ثابت) برای هر یک از روابط ۶، ۷ و ۹ تعیین شد و خطای استاندارد تخمین^۱ (S.E.) و ضریب همبستگی چندگانه (r) براساس روابط پایه آماری با استفاده از نرم افزار آماری SPSS محاسبه شد.

به منظور تعیین روابط رگرسیونی بهینه برای پیش بینی رواناب در حوضه های مورد نظر، داده های موجود به صورت زیر دسته بندی شدند:

۱- دبی های اوج مستقل ناشی از بارش هایی با عمق بیشتر از یک میلی متر

۲- دبی های اوج مستقل ناشی از بارش هایی با عمق بیشتر از پنج میلی متر

۳- دبی های اوج مستقل ناشی از بارش هایی با عمق بیشتر از ده میلی متر

براساس این دسته بندی تعداد کل مشاهدات مربوط به هر دسته در هر یک از حوضه های مورد مطالعه به شرح جدول ۲ به دست آمد.

در این مرحله به منظور تعیین ضرایب مربوط به معادلات ۶، ۷ و ۹، برای هر یک از دبی های مستقل گروه بندی شده، ۳۶ معادله با توجه به اندیس های ممکن در نظر گرفته شد که نهایتاً تعداد کل معادلات در نظر گرفته شده برای هر حوضه ۱۰۸ مورد بوده است (البته در مورد حوضه آبریز معرف امامه با توجه به یکی بودن ارقام مربوط به دسته های اول و دوم، تعداد کل معادلات بررسی شده برابر با ۷۲ مورد بوده است). در ارتباط با معادلات ممکن برای هر حوضه باید اشاره نمود که برای استخراج آنها از پارامترهای $P_0, API_0, API_1, BF_0, BF_1, R_0$ و R_{0+1} و R_{-1+0+1} استفاده شده است که در این پارامترها

اندیس های ۱-، ۰، و ۱ به ترتیب نمایشگر مقدار پارامتر در روز قبل از وقوع دبی اوج، روز وقوع دبی اوج و یک روز بعد از وقوع دبی اوج می باشد. بر این اساس با استفاده از معادلات ۶، ۷ و ۹ و از ترکیب این پارامترها در حالت های مختلف، تعداد قابل توجهی معادله قابل استخراج بوده که در این تحقیق از میان حالت های ممکن، ۳۶ معادله که آرایش مناسب تری داشته برای هر یک از دسته های مفروض در نظر گرفته شد و در نهایت پس از انجام تجزیه و تحلیل ها، بهترین فرم معادلات برای هر یک از حوضه های مورد مطالعه در جدول ۳ ارائه گردید.

نتایج و بحث

نتایج ارائه شده در این مقاله براساس همبستگی بهینه میان متغیر وابسته (ارتفاع رواناب) و سه متغیر مستقل شامل ارتفاع بارش، شاخص بارش پیشین و دبی پایه در فرآیند تبدیل بارش به رواناب به دست آمد. ضرایب رگرسیون خطی چند متغیره، خطاهای استاندارد و ضرایب همبستگی روابط رگرسیونی بهینه برای حوضه ها در جدول ۳ ارائه شده است. در این جدول، اندیس های منفی یک و صفر به ترتیب نشان دهنده مقدار پارامتر در یک روز قبل و در همان روز وقوع دبی اوج می باشد.

نتایج حاصل از استخراج روابط رگرسیونی نشان داد که در حوضه آبریز امامه بهترین ضرایب همبستگی به ازای مقادیر دبی اوج ناشی از بارش هایی با ارتفاع بیشتر از ۵ میلی متر و برای حوضه آبریز کسلیان بهترین روابط به ازای بارش هایی با ارتفاع بیشتر از ۱ میلی متر به دست می آید. همچنین اعداد و ارقام ارائه شده در جدول ۳ نشان می دهد که بارش برای هر دو حوضه مورد مطالعه یک پارامتر اصلی می باشد و معنی آن این است که همبستگی براساس مدل آماری، با معنی دارترین پارامتر فیزیکی دخیل در فرآیند بارش رواناب یعنی بارش، به طور مناسبی سازگاری داشته است.

جدول ۲- تعداد دبی‌های اوج مستقل مشاهده شده در حوضه‌های مورد مطالعه.

متغیر	حوضه آبریز معرف امامه	حوضه آبریز معرف کسلیان
تعداد کل دبی‌های اوج مستقل در دوره مشاهدات	۹۶	۱۷۵
دبی‌های اوج مستقل ناشی از بارش‌هایی با عمق بیشتر از یک میلی‌متر	۵۹	۱۱۲
دبی‌های اوج مستقل ناشی از بارش‌هایی با عمق بیشتر از پنج میلی‌متر	۵۹	۱۰۸
دبی‌های اوج مستقل ناشی از بارش‌هایی با عمق بیشتر از ده میلی‌متر	۵۵	۸۴

جدول ۳- شاخص‌های آماری پایه برای دبی‌های اوج مستقل ناشی از بارندگی‌هایی به ترتیب برابر یا بزرگ‌تر از ۱ و ۵ میلی‌متر به ترتیب برای حوضه‌های آبریز معرف کسلیان و امامه.

نام حوضه	شاخص رواناب	ثابت معادله	P_0	API_0	BF_0	API_{-1}	ضریب همبستگی	خطای استاندارد تخمین
		-	(mm)	(mm)	(m^3/s)	(mm)	r	S. E.
کسلیان	$R^{0.5} =$	۰/۵۴۷۵۱	۰/۰۳۳۵۴	۰/۰۱۱۱۵	۱/۶۴۱۰۲	-	۰/۸۵۶۷۱	۰/۴۵۲۶۸
	$R^{0.5} =$	۰/۵۴۶۹۳	۰/۰۴۴۷۰	-	۱/۶۴۱۰۲	۰/۰۱۰۰۱	۰/۸۵۶۶۹	۰/۴۵۲۷۲
	R=	-۴/۵۳۰۷۰	۰/۱۸۹۰۸	۰/۰۷۷۸۰	9/21456	-	۰/۸۴۸۷۶	۲/۷۴۷۹۳
	R=	-۴/۵۳۰۹۶	۰/۲۶۶۸۸	-	۹/۲۱۷۱۵	۰/۰۶۹۷۷	۰/۸۴۸۶۵	۲/۷۴۸۸۵
	$\ln(1-R/P_0) =$	-۰/۱۵۶۹۳	۰/۰۰۹۴۰	-۰/۰۰۳۷۵	-۰/۴۱۷۹۲	-	۰/۶۳۲۹۰	۰/۱۷۵۴۸
	$\ln(1-R/P_0) =$	-۰/۱۵۷۱۰	۰/۰۰۵۶۵	-	-۰/۴۱۸۱۷	-۰/۰۰۳۳۶	۰/۶۳۲۵۹	۰/۱۷۵۵۳
امامه	$R^{0.5} =$	۱/۲۲۰۸۱	۰/۰۰۰۷۴	۰/۰۱۳۵۹	۱/۵۴۷۹۹	-	۰/۸۴۲۵۳	۰/۴۹۸۱۳
	$R^{0.5} =$	۱/۲۲۰۸۲	۰/۰۱۴۳۵	-	۱/۵۴۷۳۶	۰/۰۱۲۲۰	۰/۸۴۲۴۱	۰/۴۹۸۳۰
	R=	-۲/۲۷۱۶۷	۰/۰۱۷۶۷	۰/۰۹۰۳۱	۱۰/۱۵۶۵۸	-	۰/۸۲۶۳۱	۳/۵۵۳۸۱
	R=	-۲/۲۷۰۵۰	۰/۱۰۸۱۴	-	۱۰/۱۵۳۲۲	۰/۰۸۱۰۲	۰/۸۲۶۱۱	۳/۵۵۵۶۲
	$\ln(1-R/P_0) =$	-۰/۲۶۸۱۲	۰/۰۱۰۰۷	-۰/۰۰۲۵۸	-۰/۴۳۳۹۹	-	۰/۷۳۹۵۹	۰/۱۸۷۹۶
	$\ln(1-R/P_0) =$	-۰/۲۶۸۳۲	۰/۰۰۷۴۸	-	-۰/۴۳۴۰۲	۰/۰۰۲۳۰	۰/۷۳۹۲۸	۰/۱۸۸۰۶

به منظور پیش بینی ارتفاع رواناب در دو حوضه مورد مطالعه به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

الف) برای حوضه آبریز معرف امامه

$$R^{0.5} = 1.22082 + 0.01435P_0 + 0.01220API_{-1} + 1.54736BF_0 \quad (10)$$

ب) برای حوضه آبریز معرف کسلیان؛

$$R^{0.5} = 0.54751 + 0.03354P_0 + 0.01115API_0 + 1.64102BF_0 \quad (11)$$

در مورد رابطه پیشنهادی برای حوضه آبریز معرف امامه ذکر این نکته لازم است که به‌رغم این که از میان روابط ارائه شده برای حوضه آبریز معرف امامه در جدول ۳، ضریب همبستگی و خطای استاندارد مربوط به رابطه ردیف اول، اندکی نسبت به رابطه ردیف دوم بهتر بوده ولی با وجود این، رابطه ردیف دوم برای حوضه آبریز

علت اینکه ضریب همبستگی روابط حاصل بسیار بالا (نزدیک به عدد یک) به دست نیامده ممکن است به واسطه محدود بودن داده‌های موجود باشد. علاوه بر این، برخی از پارامترهای دخیل در مدل، نظیر API و دبی پایه و نیز API و ارتفاع بارش ممکن است اثرات متقابلی بر یکدیگر داشته باشند. با وجود این ضریب همبستگی روابط استخراج شده، نسبت به حالتی که تنها از یک متغیر مستقل در روابط نهایی استفاده می‌شده بسیار بالاتر بوده و در ضمن با اطمینان ۹۵ درصد در محدوده مناسب و قابل قبولی می‌باشد.

بنابراین با توجه به ضرایب همبستگی و خطای استاندارد روابط استخراج شده در جدول ۳، بهترین روابط

معرف امامه پیشنهاد می‌شود که دلیل آن مناسب‌تر بودن ضریب بارش مربوط به روز وقوع دبی اوج (ضریب P_0) در رابطه دوم برای این حوضه می‌باشد زیرا در رابطه اول، این ضریب تقریباً نزدیک به صفر است ($0/00074$) که معقول نمی‌باشد.

به‌منظور نمایش کاربرد نتایج به‌دست آمده به‌وسیله روابط رگرسیون بهینه، مقایسه‌ای میان رواناب تخمینی از روابط مذکور و رواناب واقعی مشاهده شده برای تعدادی از وقایع مشاهده شده در حوضه‌های مورد مطالعه در جدول ۴ ارائه شده است. از مطالعه ستون انتهایی سمت چپ این جدول ملاحظه می‌شود که برای حوضه آبریز معرف امامه، حداکثر قدر مطلق میزان اختلاف میان مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده برابر با ۲ میلی‌متر و

حداکثر اختلاف مذکور برای حوضه آبریز معرف کسلیان برابر با $3/2$ میلی‌متر به‌دست آمده که نشان‌دهنده دقت قابل قبول روابط ارائه شده می‌باشد.

نتیجه‌گیری

مروری بر تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که اولاً یک رابطه کاربردی جهانی ساده و دقیق برای پیش‌بینی سیلاب وجود ندارد و ثانیاً دقت پیش‌بینی روابط ارائه شده برای حوضه‌های منفرد بستگی زیادی به در دسترس بودن داده‌های بارش و دبی رودخانه دارد. در این تحقیق روابط پیش‌بینی بهینه برای تخمین ارتفاع رواناب در دو حوضه آبریز معرف امامه و کسلیان به وسیله مدل رگرسیون خطی چند متغیره براساس پارامترهای بارش، شاخص بارش پیشین و دبی پایه استخراج شد.

جدول ۴- مقایسه مقادیر مشاهده شده و برآورد شده با استفاده از بهترین معادله رگرسیونی پیشنهاد شده برای حوضه‌های آبریز معرف امامه و کسلیان.

نام حوضه	تاریخ وقوع سیل			ارتفاع رواناب مشاهده شده (میلی‌متر)	ارتفاع رواناب برآورد شده (میلی‌متر)	اختلاف میان مقادیر ارتفاع رواناب مشاهده شده و برآورد شده (میلی‌متر)
	سال	ماه	روز			
امامه	۱۳۶۱	مهر	۱۶	۱۰/۳	۹	۱/۳
	۱۳۵۱	آبان	۱۳	۴/۹	۶	-۱/۱
	۱۳۷۰	آذر	۱۸	۵/۵	۵/۹	-۰/۴
	۱۳۵۴	دی	۲	۵/۲	۵/۲	۰/۰
	۱۳۷۴	بهمن	۲۲	۳/۶	۴/۸	-۱/۲
	۱۳۶۸	اسفند	۲۳	۶/۳	۶/۴	-۰/۱
	۱۳۵۶	فروردین	۱۸	۹/۴	۸/۹	۰/۵
	۱۳۷۱	اردیبهشت	۷	۲۳/۰	۲۵/۰	-۲/۰
	۱۳۶۲	خرداد	۱	۶/۹	۸/۵	-۱/۶
	۱۳۵۳	تیر	۱۶	۴/۹	۳/۷	۱/۲
	۱۳۵۱	مرداد	۱۵	۳/۷	۳/۵	۰/۲
	کسلیان	۱۳۶۷	مهر	۹	۱۵/۷	۱۲/۵
۱۳۶۷		آبان	۳۰	۲/۲	۲/۱	۰/۱
۱۳۷۶		آذر	۳	۳/۴	۳/۵	-۰/۱
۱۳۵۹		دی	۵	۳/۵	۳/۴	۰/۱
۱۳۵۷		بهمن	۲۸	۴/۰	۳/۲	۰/۸
۱۳۷۳		اسفند	۲۷	۴/۲	۴/۲	۰/۰
۱۳۶۲		فروردین	۴	۴/۶	۴/۸	-۰/۲
۱۳۵۱		اردیبهشت	۳۱	۲۹/۳	۲۸/۲	۱/۱
۱۳۵۵		خرداد	۱۷	۵/۰	۴/۰	۱/۰
۱۳۷۱		تیر	۲۰	۹/۵	۹/۲	۰/۳
۱۳۶۷		مرداد	۵	۱۱/۷	۱۱/۴	۰/۳
۱۳۶۲		شهریور	۲۳	۲۴/۶	۲۵/۲	-۰/۶

نتایج به دست آمده نشان داد هنگامی که روابط پیش‌بینی به صورت رابطه میان جذر ارتفاع رواناب با سایر متغیرهای وابسته استخراج شود دقت کلی پیش‌بینی نسبت به دو رابطه دیگر (روابط ۶ و ۸) بیشتر خواهد بود.

خطای استاندارد تخمین در رابطه بهینه پیش‌بینی رواناب در حوضه آبریز معرف امامه برابر با ۰/۲۴۸ میلی‌متر و برای حوضه آبریز معرف کسلیان برابر با ۰/۲۰۵ میلی‌متر بوده همچنین ضریب همبستگی چندگانه برای بهترین روابط پیش‌بینی در دو حوضه مورد مطالعه به ترتیب برابر با ۰/۸۴۲ و ۰/۸۵۷ به دست آمد.

روابط رگرسیونی ارائه شده، جهت تخمین رواناب ناشی از بارش در حوضه‌های آبریز مجاور، تحت شرایط ذیل قابل کاربرد بوده و پیشنهاد می‌شود:

- ۱- وضعیت اقلیمی مشابه.
 - ۲- وضعیت توپوگرافی مشابه.
 - ۳- وضعیت زمین‌شناسی مشابه.
 - ۴- نوع خاک و پوشش جنگلی مشابه.
- همچنین با توجه به اینکه دبی پایه یکی از پارامترهای دخیل در روابط رگرسیونی پیشنهادی می‌باشد بنابراین،

مساحت زهکشی یکسان نیز باید به شرط فوق اضافه شود زیرا مساحت‌های متفاوت در شرایط یکسان دبی‌های پایه متفاوتی را تولید خواهند نمود و اگر حوضه‌ها مساحت یکسان نداشته باشند آنگاه یک فاکتور تصحیح مناسب برای تطابق دبی‌های پایه باید تعریف شود.

در اینجا تاکید می‌شود که نتایج حاصل از این تحقیق با رعایت احتیاط در مورد حوضه‌های فاقد آمار مجاور (با خصوصیات هیدرولوژیکی مشابه) به کار برده شود و نیز آزمون‌های بیشتری در ارتباط با اختلاف‌های ناشی از تعمیم نتایج باید انجام شود.

سپاسگزاری

مؤلفین مقاله بر خود لازم می‌دانند تا از زحمات پروفیسور پاتریک ویلمز در بخش هیدرولیک دانشگاه کاتولیک لون کشور بلژیک که بارانمایی‌های ارزشمند خود نقش مؤثری را در انجام تحقیق حاضر به عهده داشته‌اند کمال تشکر و قدردانی را داشته باشند.

منابع

۱. علیزاده، ا. ۱۳۸۲. اصول هیدرولوژی کاربردی. چاپ شانزدهم. مشهد: دانشگاه امام رضا (ع). ۸۱۵ ص.
۲. گزارش‌های آماری حوضه‌های آبریز معرف امامه و کسلیان از سال آبی ۵۰-۱۳۴۹ الی ۷۸-۱۳۷۷. مرکز تحقیقات منابع آب ایران (تماب).
۳. ویسکرمی الف. و تلوری، ع. ۱۳۸۰. بررسی تأثیر رطوبت قبلی خاک بر میزان آبدوی در حوزه آبخیز کشکان. مجموعه مقالات اولین همایش بررسی راهکارهای مقابله با بحران آب. ۲۱-۱۸ اسفند ماه ۱۳۸۰. دانشگاه زابل. ۱۳۶ - ۱۲۳.
4. Anctil, F., Michel, C., Perrin, C., and Andreassian, V. 2004. A Soil Moisture Index as an Auxiliary ANN Input for Stream Flow Forecasting. Journal of Hydrology. Vol. 286. pp. 155-167.
5. Boyd, D., Smith, A.F., and Veale, B. 2000. Flood Management on the Grand River Basin. Grand River Conservation Authority Flood Management System. Cambridge. Ontario. Canada. 26pp.
6. Chapman, T.G. 1991. Comment on 'Evaluation of Automated Techniques for Base Flow and Recession Analysis' by R. J. Nathan and T. A. McMahon. Water Resources Research. Vol. 27. No. 7. pp. 1783-1784.
7. Creager, W.P., Justin, J.D., and Hinds, J. 1945. Engineering for Dams. John Wiley & Sons, Inc. New York. pp. 143-155.
8. Hopkins Jr, C.D., and Hackett, D.O. 1961. Average Antecedent Temperatures as a Factor in Predicting Runoff from Storm Rainfall. Journal of Geophysics Research. Vol. 66. pp. 3313-3315.
9. Kohler, M.A., and Linsley, R.K. 1951. Predicting the Runoff from Storm Rainfall. U. S. Weather Bureau Research Paper No 34. Washington D. C. 9pp.

10. Lee, J., and Bray, D.I. 1969. The Estimation of Runoff from Rainfall for New Brunswick Watersheds. *Journal of Hydrology*. Vol. 9. pp. 427-437.
11. Linsley, R.K., and Franzini, J.B. 1987. *Water Resources Engineering*. McGraw-Hill, Inc. New York. 716pp.
12. Linsley, Jr. R.K., Kohler, M.A., and Paulhus, J.L.H. 1988. *Hydrology for Engineers*. London. McGraw-Hill, Inc. 492p.
13. U.S. Soil Conservation Service. 1957. *National Engineering Handbook*. Sec. 4, Supplement A, Hydrology. pp. 3.10-1-3.10-8.
14. Viessman, Jr. W., and Lewis, G.L. 1996. *Introduction to Hydrology*. 4th Ed. Harper Collins. New York. 655pp.
15. Willems, P. 2005. *Statistics for Water Engineering*. IUPWARE. Interuniversity Programme in Water Resources Engineering. Academic Year 2004-2005. Katholieke Universiteit Leuven. Belgium. 355pp.

Determination of runoff prediction equations in mountainous catchments (Case study: Amameh and Kasilian representative catchments)

¹R. Fazloulou, ²A.M. Akhound Ali and ²A. Behnia

¹Respectively, Ph.D. student of hydrology, and Faculty members of, Shahid Chamran University, Ahwaz, Iran.

Abstract

Prediction equations for runoff depth from rainfall in small mountainous catchments located in the north and south face of the Alborz chain have been derived in this research. For this purpose two catchments were selected so as having full and reliable rainfall runoff data and suitable regionally representative distribution over the studying area. The prediction equations have been obtained based on the rainfall depth, antecedent precipitation index and baseflow. Statistical methods were used to obtain the multiple linear regression equations, correlation coefficients and the standard error for each of the techniques used for the watersheds. All peak events greater than 0.7 cms for Amameh representative catchment and also all peak events greater than 1.0 cms for Kasilian representative catchment were considered for analysis and deriving final equations. The standard error of the optimum prediction equations for runoff was 0.248 and 0.205 mm for Amameh and Kasilian representative catchments, respectively. Also, the multiple correlation coefficient (R) was 0.842 and 0.857, respectively. Finally, the results of the developed regression equations were extended to the neighbouring catchments of similar hydrological characteristics.

Keywords: Multiple Regression; Antecedent Precipitation Index; Rainfall Depth; Baseflow; Runoff