

مقایسه آبنمود واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیک، ژئومورفوکلیماتیک، روسو و آبنمود واحد SCS (مطالعه موردی: حوزه آبخیز منشاد)

فریبا زکی‌زاده^{۱*} و حسین ملکی‌نژاد^۲

چکیده

وجود ارتباط بین پارامترهای ژئومورفولوژی و هیدرولوژی، این امکان را فراهم می‌کند تا در حوزه‌هایی که از نظر ژئومورفولوژی تشابه وجود دارد، با ایجاد روابط بین این دو، اقدام به برآورد سیلاب در حوزه‌های دارای آمار و تعمیم آن به حوزه‌های مشابه بدون آمار کرد. در این زمینه روش‌های زیادی پیشنهاد شده است. از میان این روش‌ها، مقایسه دقت، صحت و درجه اطمینان روش‌های آبنمود واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیک، ژئومورفوکلیماتیک، روسو و آبنمود واحد SCS، در برآورد مشخصات آبنمود رواناب خروجی حوزه آبخیز منشاد، هدف این پژوهش است. مقایسه هیدروگراف‌های مشاهداتی و برآوردی، با به‌کارگیری شاخص‌های میانگین خطای نسبی، مجذور میانگین مربعات خطا و ضریب نش ساتکلیف، مؤید کارایی بالای تمامی روش‌ها در برآورد حجم سیلاب (با درصد خطای کمتر از ۱۲) است. نتایج نشان داد که در برآورد دبی اوج، روش ژئومورفولوژیک (با درصد خطای ۳۹/۰۳) و روش روسو (با درصد خطای ۴۲/۳۵) عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها داشتند. روش‌های مذکور در برآورد زمان تا اوج و شکل هیدروگراف کارایی پایینی داشتند. روش‌های ژئومورفوکلیماتیک و SCS نیز در برآورد دبی و زمان تا اوج و شکل هیدروگراف کارایی پایینی داشتند.

واژه‌های کلیدی: حوزه آبخیز منشاد، مدل‌های بارش-رواناب، مدل ژئومورفولوژیکی، هیدروگراف واحد لحظه‌ای.

ارجاع: زکی‌زاده ف. و ملکی‌نژاد ح. ۱۳۹۵. مقایسه آبنمود واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیک، ژئومورفوکلیماتیک، روسو و آبنمود واحد SCS (مطالعه موردی: حوزه آبخیز منشاد). مجله پژوهش آب ایران. ۲۰: ۹۷-۱۰۶.

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه یزد.

۲- دانشیار گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه یزد.

* نویسنده مسئول: fariba_zakizadeh@yahoo.com

مقدمه

از روش‌های متداول در تعیین هیدروگراف سیل ناشی از بارش‌های مشخص در یک حوزه آبخیز، استفاده از هیدروگراف واحد است. این روش اولین بار از سوی شرمن در سال ۱۹۳۲ پیشنهاد شد و از زمان ارائه آن تاکنون، به عنوان یک مفهوم کلیدی در تبدیل بارش- رواناب به کار رفته است (قهرمان و لطفی، ۱۳۸۸). هیدروگراف واحد را می‌توان از داده‌های بارش- رواناب و به شکل طبیعی استخراج کرد. در حوزه‌های بدون آمار، از خصوصیات فیزیکی حوزه آبخیز در قالب هیدروگراف‌های واحد مصنوعی، به عنوان عامل نشان دهنده عکس‌العمل نسبت به ورودی‌های آن، استفاده می‌شود. به دلیل ثابت بودن پارامترهای ژئومورفولوژیک حوزه‌های آبریز و امکان اندازه‌گیری سریع و دقیق آن‌ها، دستیابی به هیدروگراف‌های مزبور از نظر مدیریتی بسیار ارزشمند است (صادقی و همکاران، ۱۳۸۹). روش‌های مختلفی برای تهیه هیدروگراف‌های مصنوعی پیشنهاد شده است که از آن جمله می‌توان به روش‌های اشنایدر، هیدروگراف واحد مثلی، روش اداره حفاظت خاک آمریکا و هیدروگراف‌های واحد لحظه‌ای اشاره کرد (نجمایی، ۱۳۶۷). در زمینه بررسی کارایی این روش‌ها، پژوهش‌های مختلفی در داخل و خارج کشور انجام شده است. قهرمان و لطفی (۱۳۸۸)، در حوزه آبخیز جنگ، به بررسی دقت و قابلیت اعتماد هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیک، ژئومورفوکلیماتیک، نش، روسو و هیدروگراف واحد SCS، در تعیین خصوصیات هیدروگراف سیلاب در حوزه‌های بدون آمار پرداختند و به این نتیجه رسیدند که در برآورد مشخصات مهم سیلاب شامل دبی اوج، زمان اوج و حجم سیلاب، در مجموع روش ژئومورفولوژیک برترین روش است. محمدی و احمدی (۱۳۹۰)، در پژوهشی تحت عنوان ارائه مدل برآورد دبی حداکثر لحظه‌ای در حوزه‌های بدون آمار مبتنی بر مدل‌های هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژی، اشنایدر، SCS و مثلی در حوزه آبخیز کن (رودخانه سولقان)، به این نتیجه رسیدند که به ترتیب مدل‌های هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژی، اشنایدر، SCS و مثلی دارای بهترین برآورد از دبی حداکثر لحظه‌ای بوده‌اند. گومان و همکاران (۲۰۱۱)، در پژوهشی تحت عنوان کاربرد هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیک برای یک حوزه آبخیز بزرگ، در حوزه

آبخیز کاها در پاکستان، با کاربرد هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیک بر مبنای مدل نش (GIUH-Nash) به این نتیجه رسیدند که کارایی مدل مذکور در این منطقه خشک و نیمه‌خشک، بالای ۹۰٪ است. بدین ترتیب بیان کردند که می‌توان تئوری هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیک (GIUH) را برای حوزه‌های بزرگ در مناطق خشک تا نیمه‌خشک به کار برد. چودهاری و نانگتومبام (۲۰۱۲)، در پژوهشی در دو حوزه آبخیز مادهارا و گاگرا در کشور هندوستان، به مقایسه روش هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیک و روش هیدروگراف واحد SCS، پرداختند. در این پژوهش و در روش SCS، فقط از ویژگی‌های شیب و طول حوزه برای برآورد زمان تمرکز (با صرف‌نظر کردن از وضعیت کاربری اراضی) استفاده شده است. نتایج به دست آمده نشان از کارایی مشابه دو روش مذکور است.

از انواع هیدروگراف‌های واحد مصنوعی، مقایسه دقت، صحت و درجه اطمینان روش‌های آبنمود واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیک، ژئومورفوکلیماتیک، روسو و آبنمود واحد SCS در برآورد مشخصات آبنمود رواناب خروجی، هدف و بستر این پژوهش است. نتایج می‌تواند برای توسعه کاربرد این مدل‌ها در اهداف تحقیقاتی، برنامه ریزی و برآورد رفتار هیدروولوژیک حوزه‌های آبخیز بدون آمار، برای مدیریت سیلاب مورد استفاده شود.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد بررسی

حوزه آبخیز منشاد از نظر تقسیمات کشوری جز استان یزد محسوب شده و یکی از زیرحوزه‌های آبخیز میانکوه است. این حوزه با مساحتی بالغ بر ۶۰۱۰ هکتار دارای مختصات جغرافیایی "۵۴° ۹'۵۶" تا "۵۴° ۱۶'۱۶" طول شرقی و "۳۱° ۲۸'۵۹" تا "۳۱° ۳۵'۴۲" عرض شمالی است. حداکثر ارتفاع حوزه ۳۶۵۰ متر در قسمت جنوب شرقی و حداقل آن ۱۹۷۰ متر در قسمت شمال شرقی است. بخش بزرگ آبراهه‌ها از قسمت جنوب و جنوب شرقی حوزه سرچشمه گرفته که پس از الحاق به یکدیگر و تشکیل آبراهه اصلی به طول ۱۴/۵۴ کیلومتر با درجه پنج از حوزه خارج می‌شود. در منطقه مورد بررسی، دمای متوسط سالانه ۱۱ درجه سانتی‌گراد و بارش متوسط ۳۰۰/۸۶ میلی‌متر در سال است.

روش کار

مراحل کلی انجام این پژوهش، به طور خلاصه در شکل ۱ نشان داده و در ادامه نیز، روش انجام پژوهش به طور کامل بیان شده است.

۱- برای شناخت خصوصیات حوزه، کمیت‌های مورفومتریک شامل محیط، مساحت، شیب متوسط حوزه و طول آبراهه اصلی محاسبه شد. نقشه شبکه آبراهه‌های حوزه با استفاده از نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ و تصاویر Google earth منطقه تکمیل و بر اساس سیستم استراهرل رتبه‌بندی شد، پس از آن تعداد، طول و مساحت حوزه آبخیز آبراهه‌های هر رده برای محاسبه نسبت‌های هورتونی (نسبت مساحت، نسبت انشعاب و نسبت طول) تعیین شد (جدول‌های ۱ و ۲).

۲- با توجه به داده‌های سیلاب ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری دره (در خروجی حوزه) و بارش‌های ثبت شده در ایستگاه باران‌سنجی منشاء (در داخل حوزه) متعلق به شرکت آب منطقه‌ای استان یزد، شش واقعه سیلاب منفرد که نسبت به بقیه سیلاب‌ها دقت و صحت بالاتری داشته و در شرایط برفی نبوده است، تعیین شد. سپس دبی پایه را به روش خط مستقیم از هیدروگراف‌ها جدا کرده و ارتفاع رواناب مستقیم برای هر سیلاب مشخص شد. در نهایت هایتوگراف بارش مازاد در هر واقعه به روش SCS تعیین شد (جدول ۳).

۳- برآورد سرعت اوج جریان

بیشتر حجم رواناب ناشی از یک رگبار، در محدوده سرعت اوج جریان از خروجی حوزه عبور می‌کند (رودریگوئز-ایتورب و همکاران، ۱۹۸۲). برای برآورد سرعت اوج جریان در وقایع انتخابی از روش استدلالی (معادله (۱)) ارائه شده رودریگوئز-ایتورب و همکاران (۱۹۸۲) و فرمول توانی (معادله (۲)) استفاده شد:

$$V_{\Omega} = \alpha_{\Omega}^{0.6} (i_r A_{\Omega})^{0.4} \quad (1)$$

$$V_{\Omega} = m Q^n \quad (2)$$

$$\alpha_{\Omega} = \frac{\sqrt{S}}{n \sqrt{P^2}} \quad (3)$$

V_{Ω} سرعت اوج جریان (متر بر ثانیه)؛ Q دبی اوج سیلاب (مترمکعب بر ثانیه)؛ A_{Ω} مساحت حوزه (کیلومترمربع)؛ i_r شدت بارش مازاد (متر بر ثانیه)؛ α_{Ω} پارامتر موج جنبشی n ($1/S(m)^{1/3}$)؛ S شیب آبراهه اصلی (متر به کیلومتر)؛

متوسط ضریب زبری مانینگ و P محیط خیس شده به متر است.

در تئوری هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیک از رابطه معادله و در تئوری هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفوکلیماتیک و روسو از رابطه استدلالی رودریگوئز-ایتورب و همکاران، برای برآورد سرعت اوج استفاده می‌شود (قهرمان و لطفی، ۱۳۸۸). در معادله توانی برای تعیین مقادیر m و n آمار مربوط به دبی و سرعت جریان اندازه‌گیری شده برای هر سال جمع‌آوری شد، سپس روی محور لگاریتمی x مقادیر دبی و محور لگاریتمی y مقادیر سرعت جریان رسم و بهترین خط برازش با استفاده از برنامه کامپیوتری Excel ترسیم شد. بدین ترتیب معادله توانی مورد نظر، پارامترهای رابطه و مقدار ضریب همبستگی تعیین شد. چون سرعت جریان در پیک سیلاب برای محاسبه دبی اوج و زمان تا اوج نیاز است، مقادیر دبی اوج هیدروگراف مشاهده‌ای استخراج و با قرار دادن در معادله، سرعت در دبی اوج هر رگبار، تعیین شده است.

همچنین پارامتر موج جنبشی α_{Ω} را می‌توان با ایجاد رابطه بین دبی جریان و سطح مقطع خیس شده، بدون استفاده از معادله (۳) و مقدار n به دست آورد (حشمت‌پور و همکاران، ۱۳۸۱):

$$Q = a_{\Omega} \times A^m \quad (m = \frac{5}{3}) \quad (4)$$

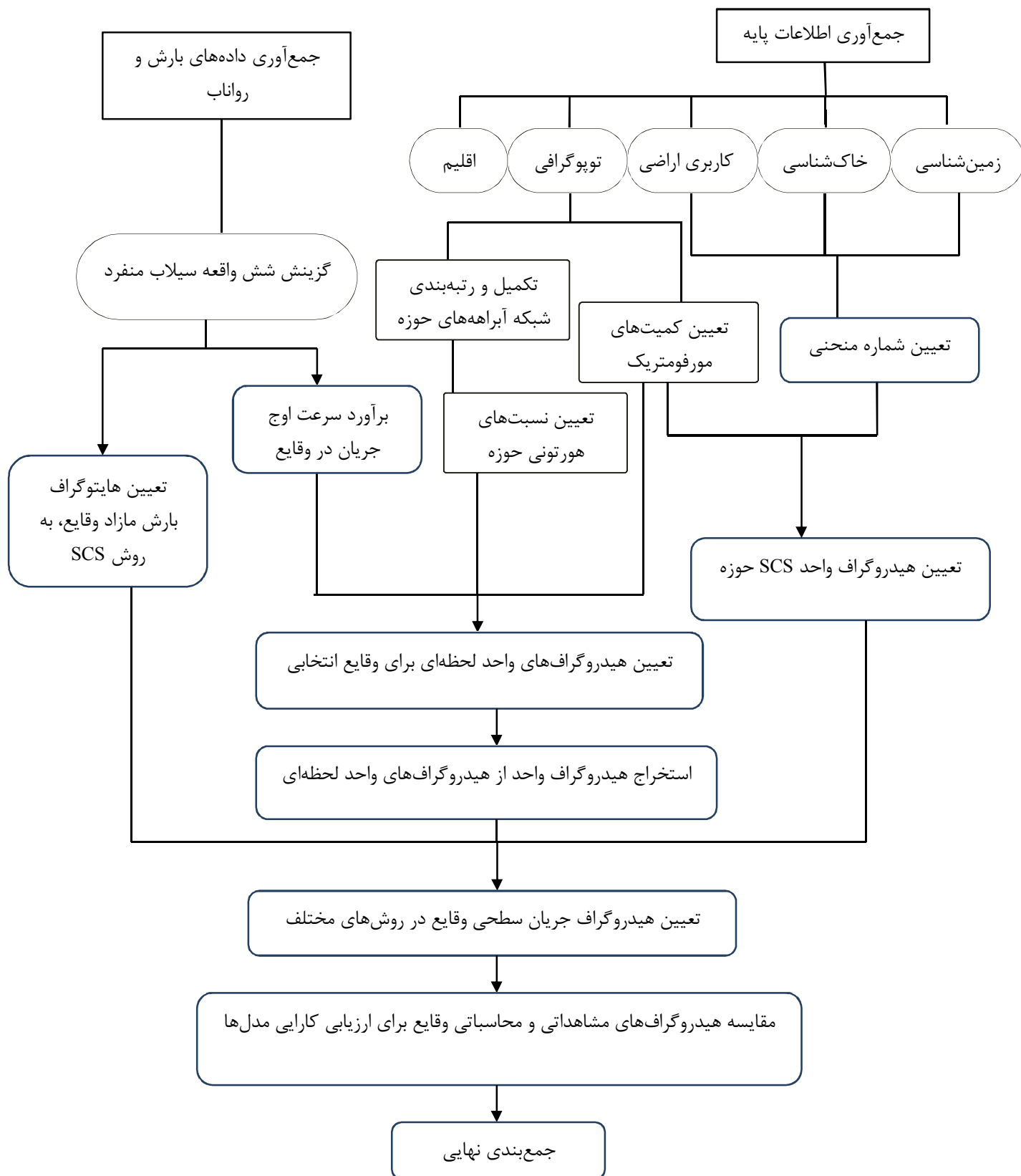
$$Q = 1.1957A^{\frac{5}{3}} \quad R^2 = 0.93 \quad (5)$$

در حوزه آبخیز منشاء روابط استدلالی و توانی ارائه شده برای برآورد سرعت اوج جریان را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$V = (1.1957)^{0.6} Q^{0.4} \quad (6)$$

$$V = 1.0026Q^{0.4144} \quad R^2 = 0.77 \quad (7)$$

که در آن V سرعت اوج جریان (متر بر ثانیه) و Q دبی اوج جریان (مترمکعب بر ثانیه) است. بر این اساس سرعت‌های اوج برای وقایع انتخابی بر اساس جدول ۴ محاسبه شده است.



شکل ۱- فلوچارت مراحل انجام پژوهش

جدول ۱- تعداد، طول و سطح بالادست هر یک از رتبه‌های آبراهه‌ای حوزه

رتبه آبراهه	تعداد آبراهه	طول آبراهه (Km)	متوسط طول آبراهه (Km)	مساحت آبخیز بالادست آبراهه (Km ²)	متوسط مساحت آبخیز بالادست آبراهه (Km ²)
۱	۶۶۸	۲۴۲/۰۳	۰/۳۶	۴۲/۹۶	۰/۰۶
۲	۱۳۷	۶۱/۲۵	۰/۴۵	۳۵/۸۲	۰/۲۶
۳	۳۳	۳۳/۱۰	۱/۰۰	۳۴/۰۱	۱/۰۳
۴	۸	۲۰/۸۷	۲/۶۱	۴۳/۶۴	۵/۴۶
۵	۱	۹/۲۳	۹/۲۳	۶۰/۱۱	۶۰/۱۱

جدول ۲- کمیت‌های مورفومتری حوزه آبخیز منشاد

نسبت انشعاب	نسبت طول	نسبت مساحت
۵/۲۹	۲/۴۰	۶/۰۹

جدول ۳- ویژگی‌های سیلاب‌های انتخابی برای تجزیه و تحلیل

تاریخ سیلاب	مقدار بارش اولیه (میلی‌متر)	مقدار بارش مؤثر (میلی‌متر)	مدت تداوم بارش مؤثر (ساعت)
۱۳۸۲/۹/۱۵	۱۳۴/۸	۲/۵	۵/۵
۱۳۸۲/۱۰/۱۸-۱۹	۷۵/۶	۸/۵۷	۱۱/۵
۱۳۸۵/۱۲/۲۴	۱۱/۵	۰/۶	۱/۷۵
۱۳۸۶/۱/۷-۹	۱۳۲/۷	۱۳	۱۷/۲۵
۱۳۸۶/۱/۱۳-۱۴	۴۶/۲	۱۰/۸	۹/۲۵
۱۳۸۸/۱۲/۷	۵/۷۳	۰/۳	۱

جدول ۴- برآورد سرعت اوج جریان با روابط استدلالی و توانی برای وقایع انتخابی

تاریخ سیلاب	دبی اوج (مترمکعب بر ثانیه)	سرعت اوج جریان در وقایع انتخابی (متر بر ثانیه)
۱۳۸۲/۹/۱۵	۸/۲۲	۲/۵۹
۱۳۸۲/۱۰/۱۹، ۱۸	۱۰/۱	۲/۸۱
۱۳۸۵/۱۲/۲۴	۰/۹۷	۱/۱۰
۱۳۸۶/۱/۷-۹	۲۵/۷	۴/۰۸
۱۳۸۶/۱/۱۳-۱۴	۲۱/۵	۳/۸۰
۱۳۸۸/۱۲/۷	۰/۷۵	۰/۹۹

$$t_p = 0.44 L_{\Omega} \left(\frac{R_B}{R_A} \right)^{0.55} R_L^{-0.38} (V^{-1}) \quad (9)$$

$$q_p \times t_b = 2 \quad (10)$$

در روابط بالا q_p دبی اوج (بر ساعت)؛ t_p زمان اوج (ساعت)؛ L_{Ω} طول رودخانه با بیشترین رتبه در حوزه آبریز (کیلومتر)؛ V سرعت اوج جریان (متر بر ثانیه)؛ R_A ، R_B ، R_L به ترتیب نسبت انشعاب، نسبت مساحت و نسبت طول هستند.

تعیین هیدروگراف‌های واحد لحظه‌ای برای وقایع انتخابی

هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیک

رودریگوئز- ایتورب و والدس (۱۹۷۹) برای تعیین هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیک معادلات زیر را ارائه دادند:

$$q_p = \frac{1.31 R_L^{0.43}}{L_{\Omega}} (V) \quad (8)$$

هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفوکلیماتیک

رودریگوئز-ایتورب و همکاران (۱۹۸۲) با قبول پایه‌های اصلی هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیک، سرعت اوج جریان را که تابعی از شدت و مدت باران است، از روابط حذف و شدت و مدت باران را در روابط در نظر گرفتند و تئوری هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفوکلیماتیک را ارائه دادند (حشمت‌پور و همکاران، ۱۳۸۱ و قهرمان و لطفی، ۱۳۸۸). برای محاسبه دبی اوج و زمان اوج در این مدل معادلات زیر ارائه شد:

$$q_p = 1.971 \Pi_i^{-0.4} \quad (11)$$

$$t_p = 0.2587 \Pi_i^{0.4} \quad (12)$$

q_p دبی اوج (برساعت)؛ t_p زمان اوج (ساعت) است. Π_i پارامتر ژئومورفوکلیماتیک است که به عنوان تابعی از اقلیم (شدت و مدت بارش مؤثر) و ژئومورفولوژی حوزه، نقش اساسی در ویژگی‌های هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفوکلیماتیک داشته و از معادله زیر به دست می‌آید:

$$\Pi_i = \frac{L_\Omega^{2.5}}{i_r \cdot A_\Omega \cdot R_L \cdot \alpha_\Omega^{1.5}} \quad (13)$$

در این رابطه L_Ω طول آبراهه با بزرگ‌ترین رتبه (کیلومتر)؛ i_r شدت بارش مؤثر (سانتی‌متر برساعت)؛ A_Ω مساحت حوزه آبریز (کیلومترمربع)؛ R_L نسبت طول هورتون و α_Ω پارامتر موج جنبشی با واحد $(1/S(m))^{1/3}$ است (رودریگوئز-ایتورب و همکاران، ۱۹۸۲).

هیدروگراف واحد لحظه‌ای روسو

روسو (۱۹۸۴) پارامترهای مدل گامای دو پارامتری که از سوی نش (۱۹۵۴) ارائه شده بود، را از طریق برازش مقادیر دبی و زمان اوج آبنمود واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیک با توزیع گاما به صورت تابعی از نسبت‌های هورتون معرفی و تابع آبنمود واحد لحظه‌ای روسو (گاما) را به صورت زیر ارائه کرد:

$$h(t) = \frac{1}{k\Gamma(\alpha)} \left(\frac{t}{k}\right)^{\alpha-1} e^{-\frac{t}{k}} \quad (14)$$

$$\alpha = 3.29 \left(\frac{R_B}{R_A}\right)^{0.78} R_L^{0.07} \quad (15)$$

$$K = \frac{0.7 \left(\frac{R_A}{R_B \cdot R_L}\right)^{0.48} L_\Omega V^{-1}}{3600} \quad (16)$$

که در آن $h(t)$ مؤلفه آبنمود واحد لحظه‌ای گاما (بر ساعت)؛ K پارامتر مقیاس (ساعت)؛ α پارامتر شکل؛ R_B نسبت انشعاب؛ R_A نسبت مساحت؛ R_L نسبت طول؛ V پارامتر دینامیکی سرعت اوج (متر بر ثانیه) و L_Ω طول آبراهه بالاترین رتبه حوزه (متر) است.

استخراج هیدروگراف واحد از هیدروگراف‌های واحد

لحظه‌ای

پس از اینکه آبنمود واحد لحظه‌ای یک ساعته روش‌های مختلف بر حسب عکس زمان (بر ساعت)، برای رگبارهای انتخابی محاسبه شد. یک بار به اندازه یک ساعت در ابعاد هیدروگراف‌ها تأخیر داده شد و عمل میانگین‌گیری انجام گرفت. بدین ترتیب ابعاد هیدروگراف واحد یک ساعته وقایع انتخابی به دست آمد (میرباقری، ۱۳۷۷). ابعاد هیدروگراف‌های واحد به دست آمده بر حسب عکس زمان (برساعت) است. برای تعیین ابعاد هیدروگراف‌های واحد بر حسب مترمکعب بر ثانیه از معادله زیر استفاده شد:

$$U(t) = \frac{\dot{U}(t) \cdot Pe \cdot A}{3600} \quad (17)$$

$\dot{U}(t)$ مقدار دبی هیدروگراف واحد در زمان t بر حسب عکس زمان (بر ساعت) در روش‌های مختلف؛ A مساحت حوزه (مترمربع)؛ Pe ارتفاع بارش مازاد (متر)؛ $U(t)$ مقدار دبی هیدروگراف واحد در زمان t (مترمکعب بر ثانیه).

هیدروگراف واحد SCS

یکی از روش‌های تعیین هیدروگراف واحد در حوزه‌های بدون آمار روش سازمان حفاظت خاک آمریکا موسوم به روش SCS است. این روش بر پایه هیدروگراف‌های واحد اندازه‌گیری شده در تعداد زیادی از حوزه‌های آبریز آمریکا، که دارای آمار و اطلاعات لازم بوده‌اند، ارائه شده است (صفوی، ۱۳۸۵). در این روش برای تعیین هیدروگراف واحد مصنوعی کافی است زمان رسیدن به دبی اوج و مقدار دبی اوج محاسبه شود. مختصات نقاط هیدروگراف واحد از جدول نمودار بدون بعد که بدین منظور تهیه شده است، به دست می‌آید. معادلات موجود در هیدروگراف واحد بدون بعد به قرار زیر است:

$$q_p = 2.083 \frac{A \cdot Q}{t_p} \quad (18)$$

$$t_p = \frac{D}{2} + t_L \quad (19)$$

$$t_L = \frac{L^{0.8} (S+1)^{0.7}}{1900Y^{0.5}} \quad (20)$$

$$D = 0.133 t_c \quad (21)$$

q_p دبی اوج (مترمکعب بر ثانیه)؛ A مساحت حوزه (کیلومتر مربع)؛ Q ارتفاع سیل به سانتی‌متر؛ t_p زمان رسیدن به دبی اوج (ساعت)؛ t_L زمان تأخیرحوزه (ساعت)؛ L طول رودخانه اصلی (فوت)؛ Y شیب متوسط حوزه

نتایج و بحث

در شکل ۲ (الف- و) آبنمود مشاهده‌ای و محاسبه‌ای به روش‌های اشاره شده، برای رگبارهای انتخابی آورده شده است. برای ارزیابی آبنمودهای محاسبه شده در مقایسه با آبنمودهای مشاهده‌ای ابتدا از شاخص آماری میانگین خطای نسبی برای مقایسه دبی اوج، زمان اوج و حجم جریان سطحی استفاده شد. سپس برای مقایسه نظیر به نظیر مختصات آبنمودهای برآوردی و مشاهده‌ای از ضریب نش ساتکلیف و مجذور میانگین مربعات خطا استفاده شده است (جدول ۵).

نتایج نشان می‌دهد که در برآورد دبی اوج هیدروگراف سیلاب، روش ژئومورفولوژیک با درصد خطای ۳۹/۰۳، بهترین عملکرد را نسبت به سایر روش‌ها دارد. روش روسو با اختلاف کمی نسبت به روش ژئومورفولوژیک (۳/۳۲ درصد) در رده دوم قرار می‌گیرد و روش‌های SCS و ژئومورفوکلیماتیک بدون کارایی لازم در برآورد این ویژگی هیدروگراف هستند. نتایج بهرامی (۱۳۸۵) در حوزه‌های پیران، پاتاق و کنگیر مبنی بر کارایی بسیار پایین روش ژئومورفوکلیماتیک در برآورد این مشخصه، مؤید نتایج این پژوهش است. نتایج نشان می‌دهد که کارایی روش‌های ژئومورفولوژیک و روسو در برآورد دبی‌های اوج بهتر از کارایی آن‌ها در برآورد زمان‌های تا اوج سیلاب است که با نتایج قهرمان و لطفی (۱۳۸۸)، در حوزه آبخیز جنگ هماهنگی دارد. در برآورد زمان تا اوج، هیچیک از روش‌ها هماهنگی خوبی با داده‌های مشاهداتی نداشته‌اند. روش SCS، در رتبه اول و روش‌های روسو و ژئومورفولوژیک در رتبه‌های دوم و سوم از نظر میزان دقت در برآورد این ویژگی هیدروگراف قرار دارند. روش ژئومورفوکلیماتیک نیز ضعیف‌ترین عملکرد را در این شبیه‌سازی داشته است. نتایج به دست آمده نشان از آن است که، در برآورد حجم سیلاب، تمامی روش‌ها عملکرد مناسبی داشته‌اند. که با نتایج سورمن (۱۹۹۵) مبنی بر دقت بالای روش GCIUH، حبیب‌نژاد روشن و همکاران (۱۳۸۳)، مبنی بر کارایی بالای روش‌های GIUH و GCIUH و قهرمان و لطفی (۱۳۸۸) مبنی بر کارایی بالای تمامی روش‌های مذکور، در برآورد این مشخصه، هماهنگی دارد. روش روسو با میانگین خطای ۷/۸۰ درصد نسبت به سایر روش‌ها، برآورد بهتری از این پارامتر داشته است. این برتری در

(درصد)؛ S نمایه نگهداشت آب در سطح حوزه (اینچ)؛ t_c زمان تمرکز و D مدت بارندگی بر حسب ساعت. برای حل معادلات مربوط به هیدروگراف واحد بدون بعد محاسبه زمان تمرکز حوزه (t_c) لازم است. با توجه به بررسی‌های پیشین در حوزه مورد بررسی و تعیین روش برانسی و ویلیامز به عنوان روش مناسب تر (سلطانی، ۱۳۸۹)، از این روش در پژوهش حاضر استفاده شده است. به این ترتیب زمان تمرکز حوزه معادل ۳/۷ ساعت برآورد شد. مقدار نمایه نگهداشت آب در سطح حوزه نیز با توجه به نقشه حوزه، معادل ۵/۷۱ اینچ تعیین شد. پس از تعیین ابعاد آبنمود واحد وقایع انتخابی به روش‌های مختلف، آبنمود جریان سطحی وقایع با به‌کارگیری روش‌های تأخیری و هیدروگراف مجموع، همچنین با توجه به مقدار بارش مازاد هر واقعه، به دست آمد.

ارزیابی کارایی مدل‌ها

برای بررسی میزان کارایی آبنمودهای استخراجی از روش‌های مورد پژوهش، از شاخص‌های آماری میانگین خطای نسبی، ضریب نش و ساتکلیف و مجذور میانگین مربعات خطا استفاده شد:

$$RE = \left| \frac{X_0 - X_e}{X_0} \right| \times 100 \quad (22)$$

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n RE_i \quad (23)$$

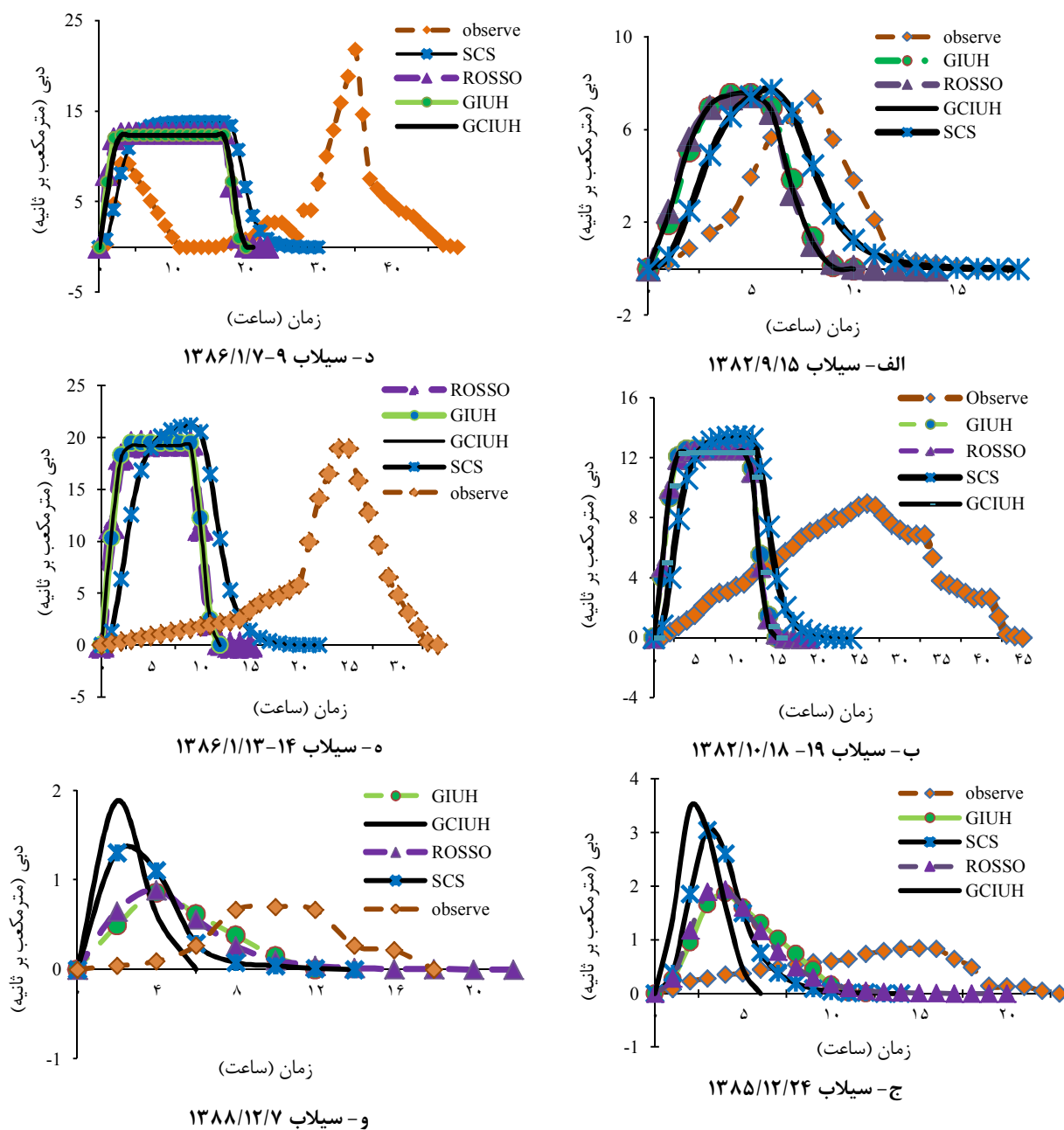
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{oi} - X_{ei})^2}{n}} \quad (24)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{ei})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - \bar{Q}_{oi})^2} \quad (25)$$

که در آن X_0 مقدار مشاهده شده پارامتر؛ X_e مقدار محاسبه شده پارامتر؛ RE خطای نسبی در هر برآورد (درصد)؛ n تعداد برآورد؛ MRE میانگین خطای نسبی (درصد)؛ RMSE مجذور میانگین مربعات خطا؛ NS ضریب نش ساتکلیف؛ Q_{oi} مقدار مشاهده شده دبی سیل؛ Q_{ei} مقدار برآورد شده دبی سیل و \bar{Q}_{oi} میانگین داده‌های مشاهده شده دبی سیل و n شماره‌ای از مقادیر دبی است. هرچه مقدار معیار نش ساتکلیف به عدد یک نزدیک‌تر باشد، نشان دهنده کارایی بیشتر مدل است به علاوه مقدار یک نشان دهنده هماهنگی کامل هیدروگراف‌های مشاهداتی و محاسباتی است. همچنین بهترین شبیه‌سازی متعلق به روشی است که مقدار کوچک‌تری از RMSE و MRE را ارائه کند.

مشاهده‌ای، در تمامی وقایع با شاخص‌های آماری، مؤید آن است که این روش‌ها کارایی پایینی در برآورد این ویژگی داشته‌اند. روش ژئومورفوکلیماتیک، نسبت به سایر روش‌ها کمترین کارایی را در برآورد شکل کامل هیدروگراف داشته است. روش‌های روسو و ژئومورفولوژیک نیز با داشتن کارایی به طور تقریبی مشابه در رده‌های اول و دوم از نظر میزان دقت در پیش‌بینی شکل کامل هیدروگراف قرار می‌گیرند.

بیشتر وقایع انتخابی مشهود است. روش ژئومورفولوژیک با اختلاف کم ۰/۲۵ درصدی خطا نسبت به روش روسو در رده دوم و روش‌های ژئومورفوکلیماتیک و SCS در رده‌های سوم و چهارم از نظر میزان دقت در برآورد حجم سیلاب قرار می‌گیرند. روش SCS در بیشتر وقایع برآورد ضعیف‌تری از این مشخصه، نسبت به سایر روش‌ها داشته است. مقایسه مقادیر دبی تک‌تک هیدروگراف‌های محاسبه‌ای با مقادیر دبی مانند آن‌ها در هیدروگراف‌های



شکل ۲- مقایسه هیدروگراف‌های مشاهداتی و محاسباتی روش‌های مختلف در وقایع انتخابی

جدول ۵- مقادیر معیارهای ارزیابی کارایی روش‌های مختلف برای رگبارهای انتخابی

روش	رویداد	نش ساتکلیف	مجذور مربعات باقیماتده ها	خطای نسبی زمان تا اوج	خطای نسبی دبی اوج	خطای نسبی حجم جریان
ژئومورفولوژیک	۱۳۸۲/۹/۱۵	-۰/۸۰	۳/۳۱	۵۰	۲/۶۸	۱/۰۳
	۱۳۸۲/۱۰/۱۹،۱۸	-۵/۱۲	۶/۹۸	۸۶/۵۴	۳۹/۸۲	۲۹/۴۷
	۱۳۸۵/۱۲/۲۴	-۵/۳۹	۰/۷۱	۷۵	۱۱۹/۷۹	۲/۰۶
	۱۳۸۶/۱/۷-۹	-۱/۷۶	۸/۴۲	۹۳/۵۷	۴۳/۰۲	۱/۴۷
	۱۳۸۶/۱/۱۳-۱۴	-۳/۴۱	۱۱/۸۸	۸۹/۵۸	۲/۸۹	۰/۳۹
	۱۳۸۸/۱۲/۷	-۱/۵۵	۰/۴۳	۶۲/۵	۲۵/۹۸	۱۳/۹۱
میانگین	-	-۳/۰۱	۵/۲۹	۷۶/۲۰	۳۹/۰۳	۸/۰۵
روسو	۱۳۸۲/۹/۱۵	-۰/۸۷	۳/۳۷	۳۱/۲۵	۲/۴۴	۰/۹۸
	۱۳۸۲/۱۰/۱۹،۱۸	-۵/۱۵	۶/۹۹	۷۳/۰۸	۴۰/۳۶	۲۹/۲۰
	۱۳۸۵/۱۲/۲۴	-۴/۰۵	۰/۶۷	۷۶/۶۷	۱۳۴/۴۶	۲/۳۷
	۱۳۸۶/۱/۷-۹	-۱/۸۰	۸/۴۷	۸۵/۷۱	۴۲/۳۱	۰/۲۳
	۱۳۸۶/۱/۱۳-۱۴	-۳/۴۰	۱۱/۸۶	۷۸/۱۳	۲/۷۴	۰/۲۴
	۱۳۸۸/۱۲/۷	-۱/۹۰	۰/۴۲	۶۵	۳۱/۸۲	۱۳/۷۵
میانگین	-	-۲/۸۶	۵/۳۰	۶۸/۳۱	۴۲/۳۵	۷/۸۰
ژئومورفوکلیماتیک	۱۳۸۲/۹/۱۵	-۰/۸۶	۳/۳۷	۵۳/۱۳	۲/۶۳	۰/۹۸
	۱۳۸۲/۱۰/۱۹،۱۸	-۵/۱۲	۶/۹۷	۸۷/۵	۳۷/۹۹	۳۰/۳۹
	۱۳۸۵/۱۲/۲۴	-۱۳/۵۹	۱/۰۷	۸۵	۳۲۶/۲۴	۲/۴۰
	۱۳۸۶/۱/۷-۹	-۱/۷۳	۸/۳۸	۹۱/۴۳	۴۳/۳۲	۱/۹۹
	۱۳۸۶/۱/۱۳-۱۴	-۳/۳۴	۱۱/۷۸	۸۹/۵۸	۱/۵۰	۰/۹۷
	۱۳۸۸/۱۲/۷	-۶/۱۹	۰/۷۲	۸۲/۵	۱۷۹/۱۷	۱۳/۷۶
میانگین	-	-۵/۱۴	۵/۳۸	۸۱/۵۲	۹۸/۴۸	۸/۴۲
SCS	۱۳۸۲/۹/۱۵	۰/۲۶	۲/۰۱	۲۸/۱۳	۵/۹۷	۱۲/۱۳
	۱۳۸۲/۱۰/۱۹،۱۸	-۴/۷۷	۶/۷۷	۵۶/۷۳	۵۰/۷۹	۲۴/۰۰
	۱۳۸۵/۱۲/۲۴	-۷/۸۱	۰/۸۹	۷۸/۳۳	۲۶۳/۵۳	۷/۳۹
	۱۳۸۶/۱/۷-۹	-۲/۱۴	۸/۹۸	۶۵/۷۱	۳۶/۵۲	۹/۷۸
	۱۳۸۶/۱/۱۳-۱۴	-۳/۳۹	۱۱/۸۵	۶۱/۴۶	۱۲/۳۷	۱۰/۲۸
	۱۳۸۸/۱۲/۷	-۴/۴۶	۰/۶۳	۷۲/۵	۱۳۳/۹۴	۵/۱۲
میانگین	-	-۳/۷۲	۵/۱۹	۶۰/۴۸	۸۳/۸۵	۱۱/۴۵

نتیجه‌گیری

در مجموع می‌توان نتیجه‌گیری کرد که روش ژئومورفولوژیک و روسو با داشتن کارایی به نسبت مناسب در برآورد دبی اوج در آبخیز مورد مطالعه، می‌توانند به عنوان روش‌هایی مناسب در برآورد مشخصه مذکور، در حوزه‌های مشابه فاقد آمار مورد استفاده شوند.

روش‌های ژئومورفوکلیماتیک و SCS در برآورد تمامی مشخصات مورد بررسی، به جز حجم سیلاب، کارایی پایینی داشتند. بنابراین، به کارگیری آن‌ها، برای برآورد هیدروگراف رواناب خروجی، برای شرایط مشابه حوزه آبخیز مورد بررسی در کشور، بدون انجام مطالعات بیشتر

توصیه نمی‌شود. نتایج به دست آمده نشان از آن است که در برآورد حجم سیلاب، تمامی روش‌ها عملکرد مناسبی داشته و با درصد خطای کمتر از ۱۲، شبیه‌سازی دقیقی از مقادیر واقعی داشته‌اند. بنابراین، می‌توانند به عنوان روش‌هایی مناسب در برآورد مشخصه مذکور، در حوزه‌های مشابه بدون آمار استفاده شوند. کارایی پایین روش‌های ژئومورفوکلیماتیک و SCS در برآورد دبی و زمان تا اوج و شکل هیدروگراف و روش‌های ژئومورفولوژیک و روسو در برآورد زمان تا اوج و شکل هیدروگراف، در حوزه آبخیز منشاد را می‌توان به شرایط منطقه مرتبط دانست. دخالت انسانی و ایجاد شرایط مسکونی و به دنبال آن تغییر در

بر مدل‌های هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژی،
اشنایدر، SCS و مثلثی. فصلنامه جغرافیای طبیعی لار.
۴(۱۳): ۳۷-۴۸.

۹. میرباقری ا. ۱۳۷۷. هیدرولوژی مهندسی. انتشارات
دانشگاه شیراز، چاپ اول، جلد اول. ۵۶۲ ص.

۱۰. نجمایی م. ۱۳۶۷. هیدرولوژی مهندسی. انتشارات
سارا، چاپ اول، جلد دوم. ۶۰۸ ص.

11. Choudhury P. and Nongthombam J. 2012. Application of NRCS Model to Watershed Having No Landcover Data. Environmental Management and Sustainable Development. 1(2):.1-13.

12. Ghumman A. R. Ahmad M. M. Hashmi H. N. and Kamal M. A. 2012. Development of geomorphologic instantaneous unit hydrograph for a large watershed, Environ. Monit. Assess. 184(5): 3153-3163.

13. Rodriguez-Iturbe I. and Valdes J. 1979. The geomorphological structure of hydrologic response. Water Resources Research. 15(6): 1409-1420.

14. Rodriguez-Iturbe I. Gonzales – Sanabria M. and Cammano G. 1982. On the climatic dependence of the IUH: A rainfall – runoff analysis of the Nash model and geomorphoclimatic theory. Water Resources Research. 18(4): 884-903.

15. Sorman A. U. 1995. Estimation of Peak discharge using GIUH model in Saudi Arabia. Water Res. Planning and Management. 121(4): 287-243.

وضعیت ژئومورفولوژیک حوزه، سبب تغییر در شکل
هیدروگراف سیلاب در منطقه شده است. بنابراین
روش‌هایی که از خصوصیات ژئومورفولوژیک، در برآورد
مشخصات هیدروگراف سیلاب بهره می‌گیرند، به دلیل
تغییرات ایجاد شده در شرایط ژئومورفولوژیک بکر حوزه،
کارایی بالایی نخواهند داشت.

منابع

۱. بهرامی ش. ۱۳۸۵. تاثیر متغیرهای ژئومورفولوژی در
ویژگی‌های سیلاب و ارزیابی آن‌ها در مدل GIUH در
۳ حوزه غرب کشور. رساله دکتری. رشته جغرافیای
طبیعی دانشگاه تهران. ۲۰۶ ص.

۲. حبیب‌نژاد روشن م. تبار احمدی خ.ض. و گنج خانلو
ح. ۱۳۸۳. بررسی کارایی آبنمود واحد لحظه‌ای
ژئومورفولوژیک، ژئومورفوکلیماتیک و آبنمود واحد
گری در حوزه آبخیز معرف ناورود. مجله منابع طبیعی
ایران. ۵۷ (۳): ۳۷۹-۳۹۰.

۳. حشمت‌پور ع. محسنی ساروی م. سعدالدین ا. و
عرفانیان م. ۱۳۸۱. بررسی کارایی هیدروگراف واحد
لحظه‌ای ژئومورفولوژیک و ژئومورفوکلیماتیک در
برآورد دبی سیلاب. مجله منابع طبیعی ایران. ۵۵(۱):
۲۵-۳.

۴. سلطانی م. ۱۳۸۹. ارزیابی اقدامات آبخیزداری بر سیل
خیزی با استفاده از مدل HEC-HMS (مطالعه موردی:
حوزه آبخیز منشاد). پایان‌نامه کارشناسی ارشد
آبخیزداری. دانشگاه یزد. ۱۰۶ ص.

۵. صفوی ح. ر. ۱۳۸۵. هیدرولوژی مهندسی. انتشارات
ارکان، چاپ اول. ۶۰۳ ص.

۶. صادقی ح. ر. افضلی ع. وفاخواه م. و تلوری ع. ۱۳۸۹.
تهیه هیدروگراف واحد مصنوعی حوزه‌های آبخیز
شمالی کشور با استفاده از ویژگی‌های فیزیوگرافی.
پژوهش‌های آبخیزداری (پژوهش و سازندگی). ۲۳(۱):
۲۳-۱۵.

۷. قهرمان ب. و لطفی م. ۱۳۸۸. کارایی مدل‌های
هیدروگراف واحد در تعیین مشخصات هیدروگراف
سیلاب. گزارش نهایی طرح تحقیقاتی شرکت سهامی
آب منطقه‌ای خراسان شمالی. ۱۱۷ ص.

۸. محمدی ع. ا. و احمدی ح. ۱۳۹۰. ارزیابی مدل برآورد
دبی حداکثر لحظه‌ای در حوزه‌های فاقد آمار مبتنی