

## ارزیابی کارایی روش دیسکین به منظور استخراج هیدروگراف واحد لحظه‌ای در آبخیز جعفرآباد، استان گلستان

رئوف مصطفی‌زاده<sup>۱\*</sup>، عبدالرضا بهره‌مند<sup>۲</sup>، محسن ذبیحی<sup>۳</sup>

۱. استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده فناوری کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی

۲. دانشیار گروه آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۳. دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان دانشگاه آزاد اسلامی واحد بجنورد

(تاریخ دریافت: ۹۴/۰۴/۲۲ - تاریخ تصویب: ۹۴/۰۶/۲۲)

### چکیده

هیدروگراف واحد لحظه‌ای، هیدروگراف حاصل از بارشی به عمق واحد در مدت زمان بسیار کوتاه است که به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های مدل‌سازی فرایند بارش - رواناب، همواره مورد توجه محققان بوده است. در همین راستا پژوهش حاضر با هدف ارزیابی کارایی روش دیسکین در استخراج هیدروگراف واحد لحظه‌ای سیل در آبخیز جنگلی جعفرآباد استان گلستان با مساحتی حدود ۱۰۹ کیلومتر مربع برنامه‌ریزی شده است. بدین منظور هیدروگراف واحد معرف آبخیز از ۲۳ رویداد بارش و دبی متناظر و سپس هیدروگراف واحد لحظه‌ای مشاهداتی معرف با استفاده از روش منحنی S استخراج شد. در ادامه هیدروگراف واحد لحظه‌ای با استفاده از چهار رویداد بارش و دبی مجزا توسط روش دیسکین تهیه شد. در نهایت، هیدروگراف لحظه‌ای به دست آمده از روش دیسکین با هیدروگراف واحد لحظه‌ای طبیعی آبخیز به وسیله معیارهای آماری مقایسه شد. براساس نتایج، میانگین معیار نش - ساتکلیف برابر با ۸۵ درصد نشان می‌دهد که روش دیسکین با دقت مناسبی توانایی استخراج هیدروگراف واحد لحظه‌ای از هیدروگراف رواناب مستقیم را دارد. همچنین میانگین خطای نسبی زمان تا اوج لحظه‌ای ۶/۲۵ و خطای نسبی دبی پیک لحظه‌ای ۲/۲۴ درصد محاسبه و حجم سیل لحظه‌ای توسط مدل به میزان ۱/۹۲ درصد کمتر از حجم سیل لحظه‌ای مشاهداتی برآورد شده است. بر این اساس ارزیابی نتایج و استفاده از روش دیسکین در سایر آبخیزها در استخراج سیلاب‌های شدید و لحظه‌ای به منظور برنامه‌ریزی در جهت کاهش خسارت سیلاب توصیه می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** آبخیز جعفرآباد، روش دیسکین، منحنی S، هیدروگراف رواناب مستقیم، هیدروگراف واحد لحظه‌ای.

## مقدمه

تحلیل هیدروگراف بخش عمده‌ای از مطالعات جریان و هیدرولوژی سیل را به خود اختصاص داده است. تهیه هیدروگراف واحد آبخیز، امکان محاسبه هیدروگراف طرح، تحلیل پاسخ رگبارهایی با شدت و تداوم متفاوت، تولید آمار در مطالعات هیدرولوژی و روندیابی جریان و نیز پیش‌بینی خصوصیات سیل‌های آتی را فراهم خواهد کرد. همچنین در صورت وجود آمار بارندگی، می‌توان حداکثر سیلاب محتمل را برآورد کرد [۱۱، ۴]. امروزه مفهوم هیدروگراف واحد که توسط شرمن در سال ۱۹۳۲ ارائه شد، به یکی از ابزارهای قوی در هیدرولوژی کاربردی تبدیل شده است [۲۱، ۱۵، ۱]. تئوری هیدروگراف واحد لحظه‌ای ارائه‌شده توسط کمیته مهندسی بوستون همواره به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های فرایند بارش-رواناب مورد توجه محققان و متخصصان منابع آب است [۲۴]. با توجه به قابل رسم بودن تعداد زیادی هیدروگراف واحد با زمان‌های مختلف برای یک حوضه مشخص، شکل این هیدروگراف‌ها متفاوت بوده و به مدت زمان بارش مؤثر بستگی دارد. اگر مدت زمان بارش مؤثر واحد به سمت صفر میل کند، در این حالت هیدروگراف واحد لحظه‌ای به‌دست می‌آید که می‌توان آن را به‌راحتی به هیدروگراف‌هایی با مدت‌های متفاوت از نظر بارش مؤثر تبدیل کرد [۲۸]. به‌عبارتی، هیدروگراف واحد لحظه‌ای بیانگر توزیع زمانی رواناب سطحی حاصل از یک بارش مازاد آنی (لحظه‌ای) است. عدم وابستگی هیدروگراف واحد لحظه‌ای به مدت بارش مؤثر، آن را برای تجزیه و تحلیل نظری فرایند بارش-رواناب در حوضه آبخیز قادر می‌سازد. به‌علاوه در هیدروگراف واحد لحظه‌ای با فرض یکنواخت بودن شدت بارش در گام‌های زمانی، امکان ایجاد خطا وجود ندارد [۳]. شایان ذکر است که فرض صفر بودن مدت بارش مؤثر در تئوری هیدروگراف واحد لحظه‌ای غیرواقعی است؛ ولی چون این عامل از اجزای هیدروگراف حذف می‌شود، در جنبه‌های تحقیقاتی رابطه بارش و سیلاب مناسب‌تر است. براساس پژوهش‌های صورت‌گرفته، نتایج کاربرد هیدروگراف واحد لحظه‌ای در کشورهای مختلف دنیا از جمله ونزوئلا، ایالت‌های مختلف آمریکا و تایوان در تخمین مؤلفه‌های سیلاب تأیید شده است. در همین راستا سینگ [۳۱] پیشنهاد می‌کند که مؤلفه‌های هیدروگراف واحد لحظه‌ای

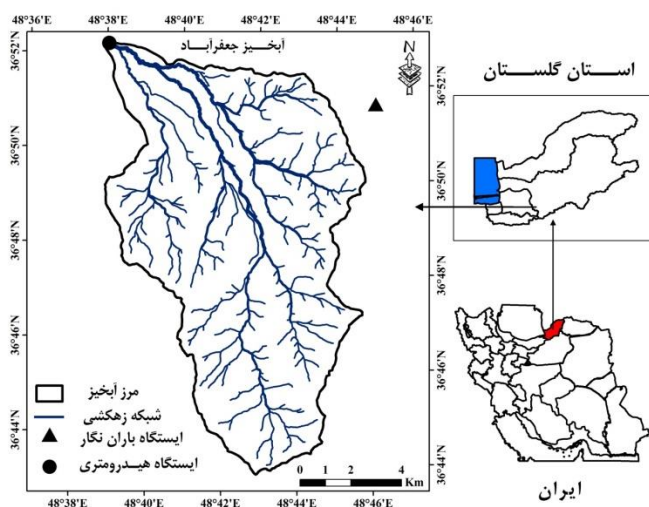
در هر لحظه متناسب با شیب منحنی S در آن لحظه است. به بیان دیگر با مشتق گرفتن از منحنی S هیدروگراف واحد لحظه‌ای به‌دست می‌آید. کلارک براساس تعیین روند منحنی زمان-مساحت به هیدروگراف واحد لحظه‌ای دست یافت [۲۹، ۷]. نش در سال ۱۹۵۹ مدلی مفهومی را به‌عنوان آبشاری از مخازن خطی متوالی برای استخراج هیدروگراف واحد لحظه‌ای پیشنهاد کرد که با توجه به کارایی مناسب آن، در مناطق مختلف به‌کار گرفته شده و در حال توسعه است [۱۲]. آسولین و مولم [۱۴] روش دیسکن را برای استخراج هیدروگراف رواناب در شدت و مدت‌های متفاوت در یک آبخیز به مساحت ۵۰ هکتار به‌کار گرفتند. براساس نتایج ایشان، قابلیت روش دیسکن در شبیه‌سازی هیدروگراف جریان، امکان مقایسه وضعیت‌های متفاوت بارش را فراهم می‌کند. رنارد [۲۵] مدل‌های ارائه‌شده توسط دیسکن شامل مخازن موازی، قطعه‌ای و هیدروگراف دو اوجی مثلثی را به‌عنوان ابزارهای مفیدی در توسعه داده‌های موجود و تولید آمار رواناب به‌منظور مقایسه و اجرای اثرهای طرح‌های توسعه منابع آب معرفی کرده است. در روش قطعه‌ای دیسکن شکل هیدروگراف واحد لحظه‌ای، شبیه یک هیدروگراف معمولی با یک نقطه حداکثر بوده و واحد مؤلفه‌های آن عکس زمان است [۵]. هانت [۱۷] و سینگ [۳۱] بیان کردند که اگر بتوان از داده‌های مشاهداتی، منحنی S را تهیه کرد، استخراج هیدروگراف واحد لحظه‌ای و هیدروگراف‌های واحد با مدت محدود از منحنی S می‌تواند ابزار مفیدی در محاسبات جریان‌های شدید سیلابی و حداکثر سیل محتمل باشد. همچنین صادقی و سینگ [۲۷] از منحنی S برای تهیه رسوب‌نمود واحد مشابه هیدروگراف واحد t ساعته در آبخیز امامه در شمال تهران استفاده کردند. ایشان با استفاده از معادله پیچشی و اعمال رسوب مؤثر، کارایی پذیرفتنی روش مذکور را تأیید کردند. سینگ [۳۰] روشی ساده و پارامتریک به‌منظور تهیه هیدروگراف واحد لحظه‌ای با دارا بودن خصوصیات توزیع فراوانی ارائه داد. او قابلیت مدل ارائه‌شده را در استخراج رواناب از بارش‌های مرکب، موفق ارزیابی کرد. کومار [۲۰] پاسخ هیدرولوژیک آبخیز رودخانه رامگانگا در هندوستان را با استفاده از دو مدل IUH هورتون و توزیع گامای نش پیش‌بینی کرد و با ارزیابی کارایی مدل در مدلسازی هشت رگبار به این نتیجه

### مواد و روش‌ها

آبخیز جعفرآباد با مساحتی در حدود ۱۰۹ کیلومتر مربع، از زیرحوضه‌های گرگانرود در استان گلستان است و در محدوده جغرافیایی ۴۸ درجه و ۳۷ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۴۵ دقیقه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۴۳ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۵۲ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. شیب زیاد حوضه به میزان متوسط وزنی ۴۲ درصد، یکی از عوامل بروز سیلاب‌های ناگهانی در حوضه تحقیق است. میانگین دمای سالانه ۱۵/۴۵ درجه سانتی‌گراد، متوسط بارش برابر ۵۶۶ میلی‌متر و حداقل و حداکثر ارتفاع منطقه به ترتیب ۸۰ و ۲۵۳۰ متر است. بخش بزرگی از حوضه به کاربری اراضی جنگل اختصاص داده شده است. زمین‌شناسی در منطقه مطالعاتی نیز بیشتر مربوط به سازندهای خوش‌سیلاب، جیروود و لس است [۸، ۱۰]. در پژوهش حاضر به منظور تجربه و تحلیل‌ها از آمار دبی و بارش ساعتی ایستگاه هیدرومتری تقی‌آباد در خروجی آبخیز جعفرآباد و ایستگاه باران‌سنجی فاضل‌آباد در نزدیکی مرکز ثقل حوضه، استفاده شده است. در انتخاب رگبارها، سعی شده است که بارش‌های منفرد و مجزا و نیز مولد رواناب سطحی با توزیع زمانی یکنواخت بارش در طول رگبار برای تحلیل‌ها استفاده شوند. همچنین در هیدروگراف‌های انتخابی، کامل بودن هیدروگراف‌ها و نیز تک‌اوجه بودن هیدروگراف مدنظر قرار گرفته است. در شکل ۱ موقعیت حوضه آبخیز جعفرآباد نشان داده شده است. در جدول ۱ نیز مشخصات رویدادهای انتخابی برای تجزیه و تحلیل به تفصیل ارائه شده است.

رسید که توزیع گامای ناش دارای تطابق بیشتری با داده‌های مشاهداتی است.

استفاده از روش دیسکین، امکان استخراج هیدروگراف واحد لحظه‌ای فراهم می‌کند و با استفاده از هیدروگراف مذکور می‌توان هیدروگراف‌های با تداوم‌های مختلف را به دست آورد. در ضمن هیدروگراف حاصل از مقادیر متفاوت بارش مؤثر را می‌توان شبیه‌سازی کرد. کاربرد روش دیسکین در پیش‌بینی واکنش هیدرولوژیک حوضه در برابر بارش‌های شدید و ناگهانی، امکان برنامه‌ریزی به منظور کاهش خسارت پدیده سیل و اجرای سیستم‌های هشدار سیل را فراهم می‌کند. با بررسی مطالعات و پژوهش‌های صورت گرفته در خصوص استفاده از روش‌های مختلف به منظور استخراج هیدروگراف واحد لحظه‌ای مشاهده می‌شود که تاکنون استفاده از روش دیسکین در استخراج هیدروگراف واحد لحظه‌ای در کشور لحاظ نشده است. بر همین اساس در پژوهش حاضر سعی بر آن است که با استفاده از رسم منحنی S به کمک هیدروگراف‌های مشاهداتی، هیدروگراف واحد لحظه‌ای آبخیز جعفرآباد تهیه شود و سپس با استفاده از روش دیسکین، هیدروگراف واحد لحظه‌ای از تعدادی هیدروگراف رواناب مستقیم استخراج شده و در نهایت نتایج حاصل با هیدروگراف واحد لحظه‌ای معرف استخراج شده از منحنی S مقایسه شود. همچنین ارزیابی دقت و کارایی مدل مذکور در تعیین هیدروگراف واحد لحظه‌ای از دیگر اهداف پژوهش حاضر است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز جعفرآباد در استان گلستان و ایران

جدول ۱. مشخصات رویدادهای انتخابی برای تجزیه و تحلیل

میزان نفوذ (mm/hr)	مقدار بارش (mm)	مدت بارش (hr)	تاریخ رویداد	رتبه	میزان نفوذ (mm/hr)	مقدار بارش (mm)	مدت بارش (hr)	تاریخ رویداد	رتبه	استخراج هیدروگراف واحد لحظه‌ای
۲/۰۵	۱۸/۷	۶	۱۳۸۲/۰۳/۰۳	۱۳	۲/۶۸	۱۷/۸	۴	۱۳۶۹/۰۸/۱۰	۱	منحنی S
۱/۹	۲۰/۱	۴	۱۳۸۲/۰۴/۰۳	۱۴	۲/۴۷	۲۵/۵	۲	۱۳۶۹/۱۰/۱۵	۲	
۲/۷	۳۱	۴	۱۳۸۳/۰۱/۱۳	۱۵	۲/۵۸	۱۷/۷	۶	۱۳۷۰/۰۳/۰۲	۳	
۱/۸۹	۲۰/۱	۴	۱۳۸۳/۰۱/۲۹	۱۶	۲/۶۴	۲۷/۸	۴	۱۳۷۲/۰۸/۲۳	۴	
۱/۱۵	۱۰	۴	۱۳۸۳/۰۴/۱۰	۱۷	۲/۷۹	۴۶/۷	۶	۱۳۷۴/۰۴/۰۱	۵	
۱/۱۸	۷/۲	۴	۱۳۸۳/۰۶/۲۸	۱۸	۱/۹۸	۱۲/۴	۴	۱۳۷۶/۰۸/۰۱	۶	
۲/۶	۶/۴	۲	۱۳۸۳/۱۰/۰۷	۱۹	۴/۸	۶۳/۵	۴	۱۳۷۸/۰۷/۲۱	۷	
۲/۶	۶/۸	۲	۱۳۸۳/۱۲/۰۴	۲۰	۱/۲۱	۷/۹	۴	۱۳۸۰/۰۱/۲۳	۸	
۴/۳	۴۵/۸	۶	۱۳۸۴/۰۲/۱۶	۲۱	۰/۵	۵/۴	۴	۱۳۸۰/۰۲/۲۸	۹	
۲/۶	۱۵/۸	۲	۱۳۸۴/۰۶/۰۸	۲۲	۶	۱۲/۴	۲	۱۳۸۰/۰۶/۱۰	۱۰	
۲/۸	۱۷/۷	۴	۱۳۸۴/۱۱/۲۸	۲۳	۱	۱۰/۳	۶	۱۳۸۱/۰۱/۰۳	۱۱	
-	-	-	-	-	۲/۹	۵	۲	۱۳۸۱/۰۳/۱۷	۱۲	
۸	۳۴	۲	۱۳۸۳/۰۸/۲۸	۳	۱۱/۱	۴۹	۲	۱۳۷۶/۰۷/۱۵	۱	بسیک
۱/۴	۱۳	۴	۱۳۸۳/۰۹/۰۸	۴	۱/۳۴	۱۵	۶	۱۳۸۳/۰۲/۱۵	۲	

هیدروگراف واحد لحظه‌ای

بر اساس اصل انطباق در نظریه هیدروگراف واحد خطی، برای تابع بارش مؤثری مانند  $I(\tau)$  با تداوم  $t_0$ ، هر جزء کوچکی از این بارش مؤثر، هیدروگراف رواناب مستقیمی را برابر با حاصل ضرب  $I(\tau)$  و IUH ایجاد می‌کند که با  $u(0, t - \tau)$  نشان داده می‌شود. بنابراین مقادیر محور عمودی هیدروگراف رواناب مستقیم در زمان  $t$  بر اساس رابطه ۱ به دست می‌آید [۱۷، ۵].

$$Q(\tau) = \int_0^t u(t - \tau) I(\tau) d\tau \quad (1)$$

که در آن تابع  $u(t - \tau)$  موسوم به تابع کرنل<sup>۱</sup> (هیدروگراف واحد لحظه‌ای) است و اثر جامع  $I(\tau)$ ، از شروع بارندگی ( $\tau = 0$ ) تا زمان پاسخ  $t$  را به پاسخ در زمان  $t$  تبدیل می‌کند [۳۱، ۵]. بر این اساس پاسخ حوضه، به تابع کرنل بستگی دارد و در صورت مشخص بودن آن، می‌توان رواناب ناشی از هر رگبار را به دست آورد.

تعیین هیدروگراف واحد لحظه‌ای معرف مشاهداتی آبخیز هرچند فرض می‌شود که یک حوضه فقط یک هیدروگراف واحد یکتا (برای هر مدت) دارد، ولی اغلب از تحلیل داده‌های متعدد، هیدروگراف‌های متعددی حاصل می‌شود [۱۷]. نبود تشابه را به طور معمول به نوسان موجود در بارش مؤثر یا رواناب مستقیم یا فرضیه خطی بودن نسبت می‌دهند. در نتیجه یک هیدروگراف واحد معرف به صورت میانگین زمان تا اوج و دبی اوج هیدروگراف‌های واحد رویدادهای متعدد محاسبه می‌شود [۳۱]. در تجزیه و تحلیل داده‌های بارش و رواناب، ۲۷ هیدروگراف رواناب مستقیم ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری تقی‌آباد با مدت بارش مؤثر کوتاه و مولد رواناب انتخاب شدند [۲۶]. با استفاده از منحنی S هیدروگراف‌های واحد، هیدروگراف واحد حوضه با مدت دو ساعت (برابر ۰/۲ تا ۰/۳۳ زمان تأخیر حوضه) به دست آمد و سپس با روش میانگین‌گیری زمان تا اوج و دبی اوج هیدروگراف واحد معرف دوساعته آبخیز استخراج شد [۲۴، ۱۹]. به منظور تعیین واکنش واقعی آبخیز در اثر یک ضربان بارش در ضربان‌های متوالی بارش مؤثر، از

1. Kernel Function

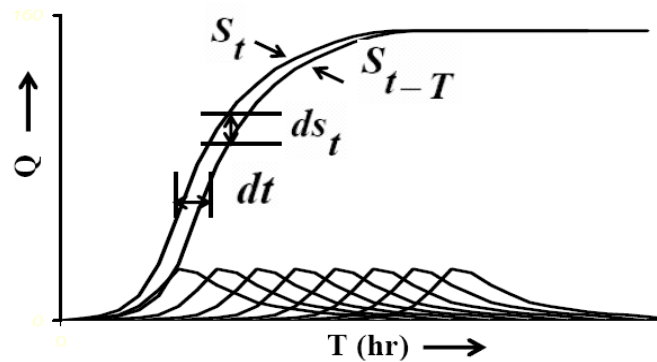
به‌سمت صفر میل کند، عرض‌های هیدروگراف واحد لحظه‌ای با استفاده از رابطه ۳ محاسبه می‌شود [۶]. از هیدروگراف واحد دوساعته معرف مشاهداتی، منحنی S تهیه شد و با استفاده از رابطه ۳ هیدروگراف واحد لحظه‌ای معرف مشاهداتی آبخیز تهیه شد و مبنای مقایسه با روش دیسکین قرار گرفت [۲۸، ۱۷]. در شکل ۲ روش استخراج هیدروگراف واحد لحظه‌ای از منحنی S نشان داده شده است.

$$u(t) = t \frac{ds}{dt} \quad (3)$$

تاخیر منحنی S استفاده می‌شود [۲۵]. با قیاس به آنچه در منحنی S برای تهیه هیدروگراف واحد با تداوم معین وجود دارد، می‌توان گفت که ارتباط منحنی S و هیدروگراف واحد براساس رابطه ۲ بیان می‌شود.

$$u(T, t) = \frac{1}{T}(S_t - S_{t-T}) \quad (2)$$

که در آن  $u(T, t)$  عرض‌های هیدروگراف واحد است که از منحنی S با تداوم t ساعته به‌دست آمده است. به‌عبارتی، برای تعیین هیدروگراف واحد لحظه‌ای با زمان تداوم T ساعت از دو هیدروگراف S با زمان t ساعت که نسبت به هم تأخیر فاز دارند، استفاده می‌شود [۲۷]. هنگامی که T،



شکل ۲. اشتقاق هیدروگراف واحد لحظه‌ای از منحنی S

ارائه شده است. مشتق  $\frac{dh}{dt}$  از هیدروگراف رواناب مستقیم ( $h_t$ )، به شکل چندضلعی است که از خطوط افقی و مایل تشکیل شده است [۵].

اگر  $X_1, X_2, \dots, X_m$  به‌عنوان ارتفاع اجزای هایتوگراف بارش مؤثر،  $H_1, H_2, \dots, H_m$  به‌عنوان ارتفاع قسمت‌های افقی در نمودار  $\frac{dh}{dt}$  بالاتر از خط مبنا و  $B_0, B_1, \dots, B_n$  نمایانگر مقادیر مجهول در تابع رشته ضربات، یعنی مشتق دوم هیدروگراف واحد لحظه‌ای  $\frac{d^2h}{dt^2}$  باشند، مقدار کل بارش اضافی E در هر رگبار برابر است با (رابطه ۵):

$$E = (x_1 + x_2 + \dots + x_m)T \quad (5)$$

که در آن T، عرض هر قسمت در هایتوگراف است. در نتیجه ارتفاع قسمت اول افقی در منحنی  $\frac{dy}{dt}$  برابر است با (رابطه ۶):

$$H_1 = B.E \quad (6)$$

که در آن  $B_0$  مشتق دوم هیدروگراف واحد لحظه‌ای است.

### روش دیسکین در استخراج هیدروگراف واحد لحظه‌ای

روش دیسکین مبتنی بر تقریب زدن هیدروگراف واحد لحظه‌ای با چندضلعی‌هایی است که از چند خط مستقیم تشکیل شده است [۱۶]. مشتق دوم این هیدروگراف شامل رشته ضرباتی در نقاط تغییر شیب چندضلعی است که بزرگی و موقعیت این ضربات از هایتوگراف بارش و هیدروگراف رواناب مستقیم استخراج می‌شود. اگر مقدار تابع رشته ضربه‌ای  $f(t_1)$  در نقطه  $t_1$ ، صفر نباشد، به‌صورت حاصل ضرب مقدار مثبت یا منفی  $A_1$  و ضربه واحد  $\sigma(t_1)$  در آن نقطه تعریف می‌شود (رابطه ۴).

$$f(t_1) = A_1 \sigma(t_1) \quad (4)$$

اگر تعداد  $n_1$  ضربه در تابع اول و تعداد  $n_2$  ضربه در تابع دوم موجود باشد، تعداد ضربات در تابع به‌دست‌آمده از کاربرد معادله پیچشی این دو تابع، برابر  $n_2 n_1$  است. به‌عبارتی در روش دیسکین، از پیچش مشتق اول تابع ورودی و مشتق دوم تابع پاسخ ضربه سیستم، مشتق سوم تابع خروجی حاصل می‌شود که مراحل روش در شکل ۲

اگر ارتفاع ضربان‌های بارش را با  $G_1, G_2, \dots, G_n$  و مختصات چندضلعی در نقاط تغییر شیب را با  $t_1, t_2, \dots$  و  $t_n$  نشان دهیم، رابطه‌های ۸ و ۹ به‌دست می‌آید:

$$G_1 = B_1 = \frac{H_1}{E} \quad h_1 = G_1 t_1 \quad (۸)$$

$$G_k = \frac{H_k}{E} \quad (۹)$$

$$h_k = h_{k-1} + G_k (t_k - t_{k-1})$$

هیدروگراف لحظه‌ای حاصل در این روش دارای مقادیر  $h_1, h_2, \dots, h_n$  است که باید مساحت چندضلعی را برابر واحد کند (رابطه ۱۰).

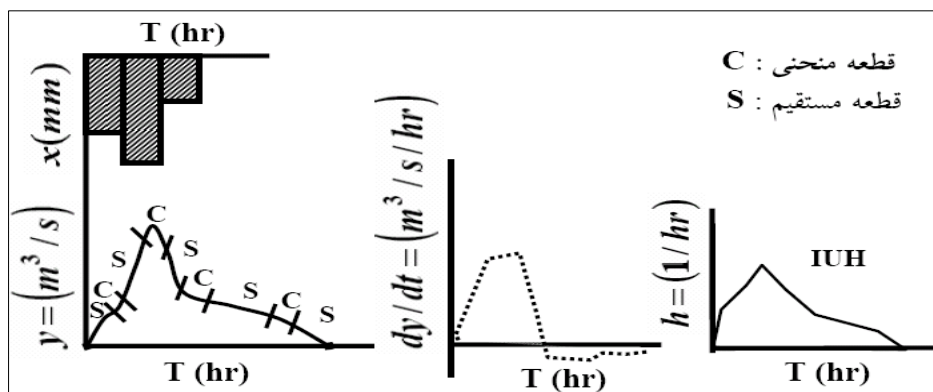
$$\int_0^t h_t dt = 1 \quad (۱۰)$$

در هایتوگراف  $n$  قسمتی، تغییر در ارتفاع بین قسمت‌های افقی در نمودار  $\frac{dy}{dt}$  برابر است با (رابطه ۷):

$$H_{k+1} - H_k = B_k E \quad (۷)$$

$$k = 0, 1, 2, \dots, n$$

این مجموعه معادلات شامل روابط مورد نیاز برای به‌دست آوردن و ارزیابی مقادیر  $(n+1)$  مجهول ضربه‌های  $B_0, B_1, \dots$  و  $B_n$  در تابع رشته ضربات  $\frac{d^r h}{dt^r}$  است. ضربه‌ها در نقاط  $t_0, t_1, \dots, t_n$  و برای زمانی است که قسمت‌های انحنادار در نمودار ( $h_t$ ) شروع می‌شود. انتگرال‌گیری از تابع رشته ضربات، نمودار شیب هیدروگراف واحد لحظه‌ای را در تمامی نقاط به‌دست می‌دهد. در نهایت، حاصل انتگرال نمودار شیب هیدروگراف واحد لحظه‌ای، چندضلعی هیدروگراف واحد لحظه‌ای است.



شکل ۳. روش استخراج هیدروگراف واحد لحظه‌ای به‌روش دیسکین (۴)

قسمت‌های افقی در نمودار بالاتر از خط مبنا با استفاده از رابطه‌های ۶ و ۷ در مورد چهار رویداد بارش به‌دست آمد. در ادامه ارتفاع بلوک‌های رشته ضربات، محاسبه شد و با انتگرال‌گیری از تابع رشته ضربات، شیب هیدروگراف واحد لحظه‌ای و سپس هیدروگراف لحظه‌ای چندضلعی برای چهار رویداد بارش با استفاده از رابطه‌های ۸ و ۹ به‌دست آمد.

به‌لحاظ اهمیت تمامی پارامترهای هیدروگراف واحد لحظه‌ای، برای ارزیابی دقت مدل دیسکین در استخراج هیدروگراف واحد لحظه‌ای از معیارهای نش-ساتکلیف (NS)، مجموع مربعات باقی‌مانده (RSS) و خطای نسبی (RE) حجم جریان، دبی پیک و زمان تا اوج و براساس روابط ۱۱ تا ۱۵ استفاده شد [۲۳، ۲۲، ۱۳].

در پژوهش حاضر به‌منظور افزایش دقت از ۲۳ رخداد برای تهیه هیدروگراف واحد لحظه‌ای به روش منحنی S استفاده شد و سپس روش دیسکین در استخراج ۴ رخداد متناظر استفاده‌نشده، ارزیابی شد. پس از تفکیک مقادیر دبی پایه (روش خط مستقیم)، ارتفاع رواناب سطحی و مقدار بارش مؤثر برای هر رگبار محاسبه شد [۹، ۲]. سپس در هیدروگراف‌های متناظر رگبارها، موقعیت خطوط مستقیم و منحنی، به‌روش سعی و خطا مشخص شد. محاسبات استخراج هیدروگراف واحد لحظه‌ای به‌روش حل جدولی در مورد چهار رویداد بارش انجام گرفت. سپس در هیدروگراف‌های متناظر رگبارها، موقعیت خطوط مستقیم و منحنی، به‌روش سعی و خطا مشخص شد. محاسبات استخراج هیدروگراف واحد لحظه‌ای به‌روش حل جدولی در نرم‌افزار اکسل براساس استخراج مقادیر (H) یا ارتفاع

1. Nash-Sutcliffe  
2. Residual Sum of Squares  
3. Relative Error

میزان معیارها کمتر باشد کارایی مدل بیشتر خواهد بود [۱۸].

**نتایج**

همان‌طور که در بخش مواد و روش‌ها ذکر شد، هیدروگراف واحد لحظه‌ای معرف آبخیز مورد مطالعه از هیدروگراف واحد معرف آبخیز با استفاده از منحنی S استخراج شد. سپس با روش دیسکین نیز هیدروگراف واحد لحظه‌ای از چهار رویداد بارش و رواناب سطحی تهیه شد که در شکل ۴ ارائه شده است.

از تفسیر شکل ۴ می‌توان استنباط کرد که IUH معرف آبخیز جعفرآباد دارای دبی اوج معادل ۱۰/۶ متر مکعب در ثانیه است. به‌ازای مقادیر متفاوت هیدروگراف رواناب مستقیم در رویدادهای انتخابی، روش دیسکین IUH‌هایی با اختلاف به‌نسبت کم استخراج کرده است. مقایسه ظاهری و آماری هیدروگراف‌ها نشان می‌دهد که مدل دیسکین توانایی خوبی در استخراج هیدروگراف واحد لحظه‌ای از هیدروگراف رواناب مستقیم دارد. مقایسه کمی نتایج روش دیسکین با IUH معرف آبخیز و ارزیابی آماری آن در جدول ۳ ارائه شده است.

$$NS = \frac{1 - \sum_{i=1}^n (Q_{si} - Q_{oi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - \bar{Q}_o)^2} \quad (11)$$

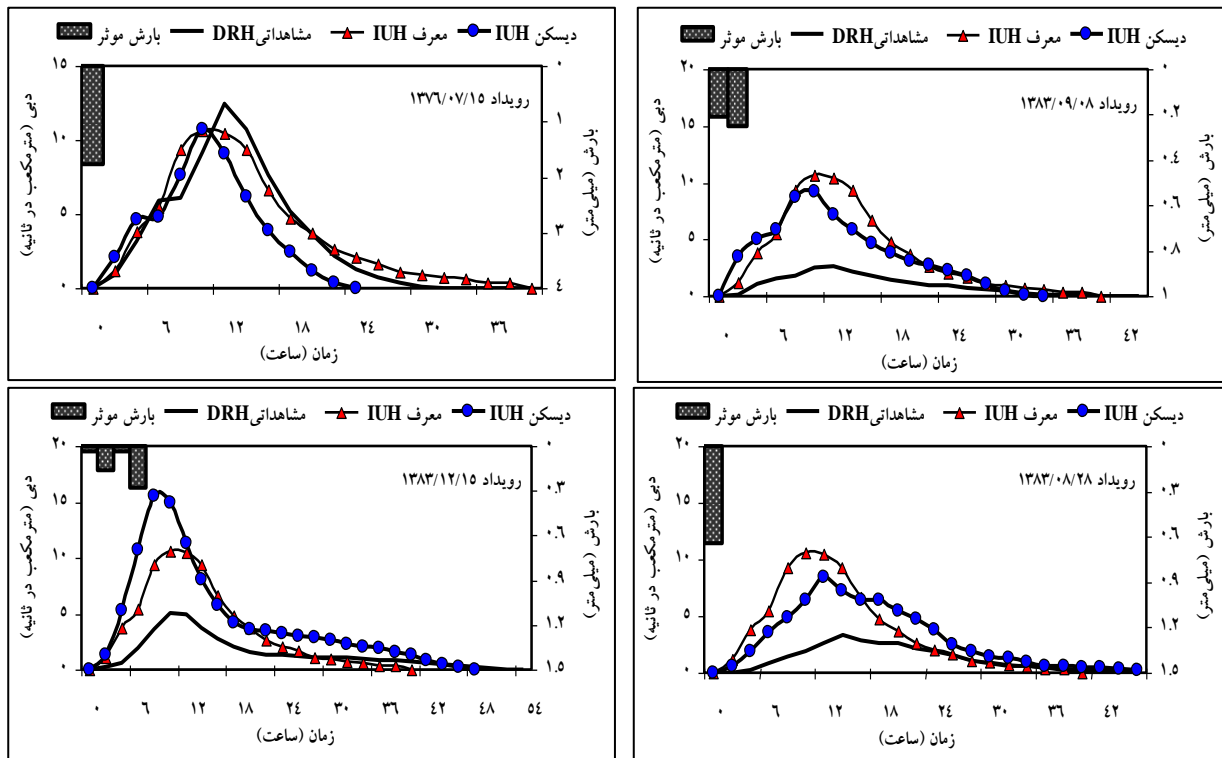
$$RSS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{si} - Q_{oi})^2}{n}} \quad (12)$$

$$RE_Q = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{si}}{\sum_{i=1}^n Q_{oi} - 1} \quad (13)$$

$$RE_{Qp} = 100 \cdot \left| \frac{Q_s(Peak) - Q_o(Peak)}{Q_o(Peak)} \right| \quad (14)$$

$$RE_{Tp} = 100 \cdot \left| \frac{T_{ps} - T_{po}}{T_{po}} \right| \quad (15)$$

که در آنها  $Q_{si}$  و  $T_{ps}$  دبی و زمان تا اوج شبیه‌سازی شده و  $Q_{oi}$  و  $T_{po}$  دبی و زمان تا اوج مشاهداتی،  $Q_o$  دبی میانگین مشاهداتی و  $n$  تعداد داده‌های متناظر در مقادیر جریان شبیه‌سازی شده و مشاهداتی هستند. در معیار نش-ساتکلیف، مقدار یک نشان‌دهنده تطابق کامل هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهداتی است؛ اما در سایر موارد هر چه



شکل ۴. مقایسه IUH استخراج شده از هیدروگراف رواناب مستقیم به روش دیسکین با IUH معرف آبخیز جعفرآباد

جدول ۳. مقادیر معیارهای کارایی روش دیسکین در استخراج هیدروگراف واحد لحظه‌ای از هیدروگراف رواناب مستقیم

RSS	(%) RE <sub>tp</sub>	(%) RE <sub>Qp</sub>	(%) RE <sub>Q</sub>	NS	رویداد	ردیف
۱/۵۶	۰	- ۰/۹۵	- ۲۹/۷۷	۰/۸۹	۱۳۷۶/۰۷/۱۵	۱
۲/۳۱۷	۲۵	- ۳۱/۷۹	۴۱/۴۳	۰/۷۷	۱۳۸۳/۱۲/۱۵	۲
۱/۳۵۸	۰	۱۵/۱۹	- ۱۳/۳	۰/۹۲	۱۳۸۳/۰۹/۰۸	۳
۱/۸۲۹	۰	۲۶/۵۱	- ۶/۰۷	۰/۸۵	۱۳۸۳/۰۸/۲۸	۴
۱/۷۶	۶/۲۵	۲/۲۴	- ۱/۹۲	۰/۸۵	-	میانگین

منحنی S تهیه شد و سپس از روش دیسکین برای استخراج هیدروگراف واحد لحظه‌ای از هیدروگراف رواناب مستقیم با توجه به بارش متناظر استفاده شد. براساس نتایج ارائه شده در جدول ۳ و مقایسه ظاهری هیدروگراف‌ها در شکل ۴ می‌توان نتیجه گرفت که روش دیسکین، دارای دقت به نسبت زیادی در برآورد مشخصه‌های هیدروگراف جریان در آبخیز جعفرآباد است. میانگین معیار نش-ساتکلیف به میزان ۸۵ درصد (جدول ۳)، نشان دهنده صحت نتایج روش دیسکین در استخراج هیدروگراف واحد لحظه‌ای است که با نتایج آسولین و مولم [۱۴] در یک راستاست. میزان خطای نسبی در دبی پیک هیدروگراف واحد برابر ۲/۲۴ درصد بوده و خطای نسبی زمان تا اوج ۶/۲۵ درصد است. باید اذعان کرد که در این روش حجم سیل لحظه‌ای در حدود ۲ درصد کمتر از حجم واحد سیل لحظه‌ای مشاهداتی برآورد شد که می‌توان این عدم دقت را ناشی از روش محاسبه بارش مؤثر و رواناب سطحی در هر رگبار دانست. همچنین بخشی از عدم دقت روش مورد استفاده در استخراج هیدروگراف واحد لحظه‌ای به روش سعی و خطا در تعیین موقعیت خطوط مستقیم و منحنی در هیدروگراف رواناب مستقیم بستگی دارد. نکته شایان توجه دیگر این است که در مورد رویداد ۱۳۸۳/۱۲/۱۵ (شکل ۴)، مقادیر معیارهای ارزیابی کارایی مدل دیسکین، در مقایسه با سایر رویدادها کمتر است، که می‌توان دلیل آن را به بیشتر بودن مدت بارش مؤثر و به عبارتی شدت بارش کم نسبت داد که اظهارات سینگ [۳۱] مبنی بر وابستگی IUH به شدت بارش مؤثر را تأیید می‌کند. در مجموع می‌توان گفت که در استفاده از هیدروگراف واحد لحظه‌ای، محدودیت‌های تحلیل پاسخ آبخیز در تداوم و توزیع زمانی رگبار وجود ندارد. بر این اساس می‌توان رفتار هیدرولوژیک آبخیزهای مختلف را نسبت به بارش واحد با همدیگر مقایسه کرد. از آنجا که روش

مقادیر میانگین معیارهای ارزیابی کارایی، به‌ویژه بالا بودن معیار نش-ساتکلیف به میزان ۸۵ درصد و حداقل بودن میانگین سایر معیارها نشان می‌دهد که مدل دیسکین توانایی خوبی در استخراج هیدروگراف واحد لحظه‌ای از داده‌های بارش و هیدروگراف رواناب مستقیم دارد.

### بحث و نتیجه‌گیری

ارزیابی واکنش هیدرولوژیک آبخیز می‌تواند امکان برنامه‌ریزی و کنترل خطرهای ناشی از سیل و نیز توسعه مدل‌های هیدرولوژیک و افزایش درک فرایندهای تولید رواناب و تشدید سیلاب را فراهم می‌کند. پس از تعیین هیدروگراف واحد لحظه‌ای می‌توان آن را به هیدروگراف با زمان‌های تناوب متفاوت تبدیل کرد و واکنش آبخیز را در هر حالت و با در نظر گرفتن وقایع بارش با خصوصیات مختلف تجزیه و تحلیل کرد. در این پژوهش، هیدروگراف واحد معرف با استفاده از ۲۳ رویداد بارش کوتاه‌مدت و دبی متناظر استخراج شده است که با اظهارات کوکونن [۱۹] در خصوص استفاده از وقایع متعدد برای پاسخ آبخیز به بارش واحد همخوانی دارد. همچنین برای تهیه هیدروگراف واحد معرف، میانگین زمان تا اوج و دبی اوج رویدادها محاسبه شده است که مؤلفه‌های آن دارای دقت زیادی است [۳۱، ۲۴]. از آنجا که ویژگی‌های رگبارهای بارندگی متغیرند، هیدروگراف واحد مستخرج از یک بارندگی نمی‌تواند بیانگر واقعی پاسخ آبخیز باشد، بر این اساس در تهیه هیدروگراف واحد معرف آبخیز از نقاط اوج و زمان تا اوج هیدروگراف‌های واحد، میانگین حسابی گرفته می‌شود و در نتیجه می‌توان با اطمینان بیشتری آن را به‌عنوان هیدروگراف واحد معرف، مبنای مقایسه قرار داد. در مرحله بعد هیدروگراف واحد لحظه‌ای معرف آبخیز جعفرآباد از



استفاده از مدل HEC-HMS، مهندسی و مدیریت آبخیز، شماره ۲: ۹۳ - ۸۳

[۹]. مهدوی، محمد، هیدرولوژی کاربردی، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۷۸: ۴۰۱.

[۱۰]. مهندسین مشاور نهرسازان رستاق، ۱۳۸۰، گزارش مطالعات پایه و تلفیق آبخیز جعفرآباد استان گلستان: ۲۱۵.

[۱۱]. نجمایی، محمد، هیدرولوژی مهندسی، انتشارات سارا، ۱۳۶۸: ۶۰۸.

[12]. Agirre Unai, Goni Mikel, Lopez, Jose Javier, Gimena, Faustino, 2005, Application of a unit hydrograph based on sub-watershed division and comparison with Nash's instantaneous unit hydrograph, *Catena*, vol. 64, pp 321-332.

[13]. ASCE, 1993, Criteria for evaluation of watershed models, *Journal of Irrigation and Drainage*, vol 119(3), pp 429-442.

[14]. Assouline, Shmuel, and Mualem, Yechezkel, 2006, Runoff from heterogeneous small bare catchments during soil surface sealing, *Water Resources Research*, vol 42, W12405, DOI: 10.1029/WR004592.

[15]. Bahremand, Abdolreza, Mostafazadeh, Raouf, 2009. Mathematical computation of Nash model parameters for hydrograph prediction. *International Conference on Approximation Methods and Numerical Modelling in Environment and Natural Resources*, 10 June, Pau, France.

[16]. Ghosh, SN. *Flood Control and Drainage Engineering*, CRC Press, 1997, pp 314.

[17]. Hunt, B. 1985, The meaning of oscillations in unit hydrograph S-curves. *Hydrological Sciences*, vol 30, pp 331-342.

[18]. Knight, Donald, Shamseldin, Asaad, 2005, *River basin modelling for flood risk mitigation*. CRC Press, pp 670.

[19]. Kokkonen, Teemu, 2003, Rainfall-Runoff modeling-comparison of modeling strategies with a focus on ungauged predictions and model integration, PhD thesis, Helsinki University of Technology.

[20]. Kumar, Anil, 2015, Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph Based Hydrologic Response Models for Ungauged Hilly Watersheds in India, *Water Resources Management*, vol 29, pp 863-883.

مورد استفاده بر مبنای محاسبات عددی استوار است، دقت روش استفاده‌شده در پژوهش حاضر را می‌توان با مبنای محاسبات عددی در استخراج هیدروگراف واحد لحظه‌ای مرتبط دانست. در نهایت پیشنهاد می‌شود از سایر روش‌های استخراج IHU مانند کلارک، زخ، نش و... نیز در تعیین واکنش آبخیزها به بارش‌های لحظه‌ای به‌منظور برنامه‌ریزی در مدیریت سیل و مقایسه با نتایج پژوهش حاضر استفاده شود.

## منابع

[۱]. بهره‌مند، عبدالرضا؛ مصطفی‌زاده، رئوف، ۱۳۸۹، مقایسه کارایی روش‌های تخمین پارامترهای مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای نش در شبیه‌سازی هیدروگراف جریان، پژوهش‌های آبخیزداری، شماره ۸۶: ۵۱ - ۴۲.

[۲]. صادقی، سیدحمیدرضا؛ افضل، علی؛ وفاخواه، مهدی؛ تلوری، عبدالرسول، ۱۳۹۱، کارایی روش‌های مختلف آنالیز آماری در تخمین مؤلفه‌های آب‌نمود واحد مصنوعی آبخیزهای شمال کشور، پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، شماره ۳: ۱۵ - ۱.

[۳]. صفوی، حمیدرضا، هیدرولوژی مهندسی، انتشارات اردکان، ۱۳۸۵: ۶۲۰.

[۴]. علیزاده، امین، اصول هیدرولوژی کاربردی، انتشارات دانشگاه امام رضا مشهد، ۱۳۷۷: ۶۳۴.

[۵]. قدسیان، مسعود، مهار سیلاب و مهندسی زهکشی، مرکز نشر آثار علمی دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۷۷: ۳۹۱.

[۶]. کارآموز، محمد؛ عراقی‌نژاد، شهاب، هیدرولوژی پیشرفته، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۴: ۴۶۵.

[۷]. مصطفی‌زاده، رئوف؛ بهره‌مند، عبدالرضا؛ سعدالدین، امیر، ۱۳۸۸، شبیه‌سازی هیدروگراف رواناب سطحی با مدل هیدروگراف لحظه‌ای کلارک (مطالعه موردی: آبخیز جعفرآباد استان گلستان)، پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، شماره ۳: ۱۰۵-۱۲۲.

[۸]. مصطفی‌زاده، رئوف؛ سعدالدین، امیر؛ بهره‌مند، عبدالرضا؛ شیخ، واحدبردی؛ نظرنژاد، حبیب. ۱۳۸۹، ارزیابی اثرات هیدرولوژیک طرح آبخیزداری جعفرآباد استان گلستان با

- [21]. Kumar, Rakesh, Chatterjee, Chandranath, Lohani, Anil Kumar, Sanjay, Sing, Raj Deva, 2002, Sensitivity Analysis of the GIUH based Clark Model for a Catchment, *Water Resources Management*, vol 16, pp 263–278.
- [22]. Moriasi, Daniel N, Arnold, Jeffrey G, Van Liew, Michael W, Bingner, Ronald L, Harmel, R. Daren, Veith, Tamie L, 2007, Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations, *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, Vol 50 (3): pp 885–900.
- [23]. Nash, JEa, Sutcliffe, Jonh V, 1970, River flow forecasting through conceptual models, Part 1, A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, vol 10, pp 282–290.
- [24]. Oguz, Beyhan, 2001, Mean Instantaneous Unit Hydrographs of Random channel Networks. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, vol 25, pp 117-126.
- [25]. Renard, Kenneth, 1977, Past, Present and Future Water Resources Research in Arid and Semiarid Areas of the Southwestern United States, *Hydrology Symposium*, 28-30. Jun, Brisbane, Australia.
- [26]. Sadeghi, Seyed Hamidreza, Mostafazadeh, Raof, Sadoddin, Amir, 2015, Changeability of simulated hydrograph from a steep watershed resulted from applying Clark's IUH and different Time Area Hystograms. *Journal of Environmental Earth Sciences*, DOI: 10.1007/s12665-015-4426-3.
- [27]. Sadeghi, Seyed Hamidreza, Singh, Jai Karan, 2005, Development of Synthetic Sediment Graph using Hydrological Data, *Journal of Agricultural Sciences and Technology (JAST)*, vol 7, pp 69-77.
- [28]. Salas, Jose D, Notes on Unit Hydrographs, Colorado State University, 2006, pp 25.
- [29]. Sarangi, Arjamadutta, Madramootoo, Chandra, Enright, Peter, Prasher, Shiv O, 2007, Evaluation of three unit hydrograph models to predict the surface runoff from a Canadian watershed, *Water Resources Management*, vol 21, pp 1127–1143.
- [30]. Singh, Sushil K, 2015, Simple Parametric Instantaneous Unit Hydrograph, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 141(5), 04014066.
- [31]. Singh, Vijay P, *Hydrologic Systems, Rainfall-runoff modeling*, Prentice Hall, 1989, pp 480.