



## روندیابی جریان سطحی با استفاده از روش‌های موج سینماتیک و زمان-مساحت در حوزه آبخیز بالادست سد بوستان استان گلستان

واحدبردی شیخ<sup>۱</sup>، سلیمه سقر<sup>۲</sup>، عبدالرضا بهره‌مند<sup>۳</sup> و چوقی بایرام کمکی<sup>۴</sup>

۱- دانشیار، گروه آبخیزداری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، (نویسنده مسوول: v.sheikh@yahoo.com)

۲ و ۳- کارشناسی ارشد و دانشیار، گروه آبخیزداری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۴- استادیار، گروه مدیریت مناطق بیابانی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

تاریخ دریافت: ۹۶/۵/۱۱ تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۰/۸

صفحه: ۲۱۲ تا ۲۲۴

### چکیده

این پژوهش دو روش روندیابی جریان سطحی موج سینماتیک و زمان-مساحت در حوزه آبخیز بالادست سد بوستان را مورد بررسی قرار داده است. در ابتدا ضمن بررسی ویژگی‌ها و شرایط استفاده از این روش‌ها و بیان خصوصیات هیدرولیکی و هیدرولوژیکی جریان رواناب در سطح حوزه آبخیز، اقدام به نوشتن الگوریتم و کدنویسی روش‌های موج سینماتیک و مدت-مساحت گردید. و هیدروگراف جریان در خروجی حوزه آبخیز برآورد شد. پس از ارزیابی نتایج مدل در دوره واسنجی و اعتبارسنجی، مقادیر ناشی-ساتکلیف به ترتیب برای روش موج سینماتیک ۰/۸۸۲ و ۰/۷۴۵ و برای روش زمان-مساحت ۰/۹۰۳ و ۰/۷۴۸ به دست آمد. نتایج نشان داد که اختلاف فاز زمانی میان هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی خصوصاً در زمان تا اوج وجود دارد. یکی از دلایل عدم انطباق کامل را می‌توان به کمبود تعداد ایستگاه‌های بارانسنجی حوزه آبخیز و عدم امکان تهیه نقشه مناسب توزیع بارندگی برای حوزه آبخیز دانست. با توجه به نقشه زون‌بندی بارش که با روش نزدیکترین فاصله در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی به دست آمد، دو پهنه بارندگی مشخص گردید و میزان بارندگی در هر پهنه یکنواخت در نظر گرفته شده اما اختلاف بارندگی در دو پهنه نسبتاً زیاد بود که یکی از مهم‌ترین عوامل بروز خطا در شبیه‌سازی زمان وقوع هیدروگراف می‌توان قلمداد کرد. به‌طور کلی با توجه به فرضیات و محدودیت‌های مدل‌ها، روش‌های مذکور جهت شبیه‌سازی هیدروگراف جریان خروجی مناسب می‌باشند. از جمله محدودیت‌های روش موج سینماتیک فرض برابری شیب سطح آب با شیب بستر است که کاربرد آن را برای حوزه‌های آبخیز کوچک و دامنه‌های شیب‌دار محدود می‌کند. همچنین در روش زمان-مساحت توزیعی اثر ذخیره‌ای برای هر پیکسل در نظر گرفته می‌شود که بسیار ناچیز و قابل صرف‌نظر است در حالی که اثر ذخیره‌ای کل حوزه بسته به تراکم شبکه آبراهه‌ها و شکل حوزه می‌تواند چشم‌گیر باشد.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی توزیعی، هیدروگراف جریان، اراضی لسی ایستگاه تمر

### مقدمه

زیرحوزه‌ها استفاده کرده است. خطای محاسباتی این روش از ۱/۵ تا ۵/۸ درصد متغیر بوده است. اغلب این اختلافات در دبی پیک و حجم سیلاب بوده است. به‌طوری‌که دبی پیک شبیه‌سازی شده بیشتر و یا کمتر از دبی پیک مشاهداتی بوده است. بورتلسیکاس و همکاران (۳) فرآیند بارش-رواناب در یک آبخیز جنگلی کوهستانی در کشور یونان را با تلفیق روش زمان-مساحت در بستر GIS، شبیه‌سازی نمودند. نتایج آن‌ها بیانگر تطابق ضعیف و وجود یک تاخیر فاز در هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده با هیدروگراف‌های مشاهداتی بود. پاودل و همکاران (۲۵) در حوزه رودخانه ویرجینیا مدل توزیعی مادکلارک و مدل یکپارچه کلارک را مقایسه نمودند. در این تحقیق برای شبیه‌سازی رواناب از روش شماره منحنی (SCS) استفاده شد. آن‌ها با مقایسه نتایج کارایی مدل یکپارچه کلارک و مدل توزیعی مادکلارک نتیجه گرفتند که روش توزیعی مادکلارک دقت بیشتری دارد. در این تحقیق شبیه‌سازی به روش مادکلارک در دو حالت استفاده از مقادیر CN متوسط و CN توزیعی صورت گرفت که نتایج نشان داد، در شرایط استفاده از CN توزیعی دبی پیک و حجم سیل افزایش می‌یابد، اما زمان رسیدن به پیک کمتر می‌شود. محمدی (۱۹) مدل بارش رواناب توزیعی GFHM را برای پیش‌بینی و شبیه‌سازی هیدروگراف سیل حوزه آبخیز جعفرآباد با استفاده از روش موج سینماتیک و در محیط GIS

به‌منظور کنترل سیلاب در آبخیزها، رودخانه‌ها و یا دریاچه‌های پشت سدها، بندها و همچنین جهت حفاظت کناره‌های رودخانه‌ها لازم است تا تغییرات ارتفاع و حجم آب و نیز مدت و شدت جریان ورودی و خروجی به منطقه مورد مطالعه را در طول زمان سیل معین نمود که این عمل را روندیابی سیل می‌نامند (۱۲). به‌طور کلی روش‌های روندیابی سیل را می‌توان به دو گروه روندیابی هیدرولیکی<sup>۱</sup> و روندیابی هیدرولوژیکی<sup>۲</sup> تقسیم کرد. اگر جریان آب فقط به صورت تابعی از زمان در مکان مشخص روندیابی شود، این نوع روش، روندیابی هیدرولوژیکی و یا توده‌ای نامیده می‌شود و در آن اصل پیوستگی جریان و رابطه دبی-ذخیره<sup>۳</sup> (با فرض یکنواخت بودن جریان) استفاده می‌شود. اگر روندیابی جریان در طول سیستم به صورت تابعی از زمان و مکان موردنظر باشد، این روش به نام روش هیدرولیکی یا روندیابی توزیعی شناخته می‌شود و در این روش از معادله پیوستگی جریان و معادله اندازه حرکت استفاده شده و اساس آن بر تئوری جریان‌های غیردائمی (معادلات سنت‌نانت<sup>۴</sup>)، استوار است. مطالعات زیادی در این زمینه انجام شده است. نجفی (۲۲) در حوزه آبخیز کومار هندوستان برای سه رخداد بارشی آن منطقه از روش روندیابی موج سینماتیک استفاده کرد و به دقت قابل قبولی دست یافت. ایشان از مدل ۷ شکل برای تقسیم‌بندی

1- Routing flood  
 4- Discharge - Storage

2- Hydraulic routing  
 5- Venant

3- Hydrological routing  
 6- GIS-based Flood Hydrograph Modelling

مطالعه و شبیه‌سازی سیلاب، روش‌های مختلف روندیابی نتایج متفاوتی را ارائه می‌دهند انتخاب روش روندیابی جریان از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. بدین منظور در این پژوهش از دو روش روندیابی جریان سطحی موج سینماتیک و زمان-مساحت استفاده و کارایی آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. روش موج سینماتیک رایج‌ترین روش روندیابی هیدرولیکی در مدل‌های بارش - رواناب است. روش زمان - مساحت یک روش روندیابی هیدرولوژیکی که اطلاعات مورد نیاز آن بسادگی از روی نقشه مدل رقمی ارتفاع و روابط تجربی ساده قابل استخراج است. لازم به ذکر است که در این مطالعه مدل‌سازی توزیعی مکانی وقایع بارش - رواناب حوزه آبخیز سد بوستان در محیط‌های برنامه‌نویسی PCRaster و Python انجام گردید.

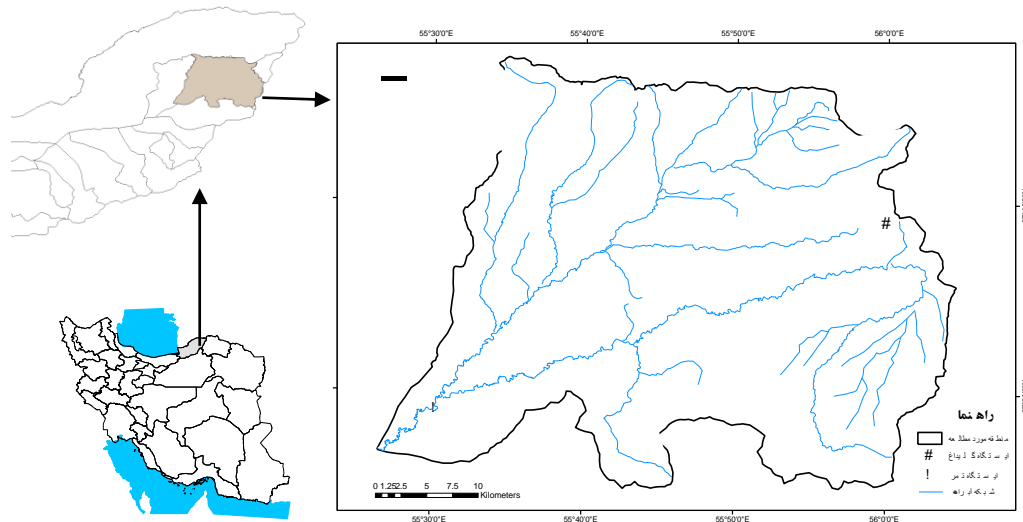
### مواد و روش‌ها

#### معرفی حوزه مورد مطالعه

حوزه آبخیز سد بوستان یکی از زیرحوزه‌های گرگانرود واقع در شرق استان گلستان با مساحت ۱۵۷۸/۷۷ کیلومتر مربع می‌باشد (شکل ۱). این حوزه آبخیز در محدوده جغرافیایی ۳۷ درجه و ۲۳ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۴۶ دقیقه عرض شمالی و ۵۵ درجه و ۲۶ دقیقه و ۲۶ ثانیه تا ۵۶ درجه و ۴ ثانیه طول شرقی واقع شده است. متوسط بارش سالانه حوزه حدود ۴۶۵ میلی‌متر و اقلیم آن نیمه‌خشک تا نیمه‌مرطوب است. حوزه آبخیز سد بوستان دارای شیب متوسط ۱۹ درصد می‌باشد و حداکثر و حداقل ارتفاع آن از سطح دریا ۲۱۴۲ و ۱۱۷ متر می‌باشد (۲۴).

با به کارگیری زبان برنامه‌نویسی PCRaster توسعه داد. نتایج حاصله از ارزیابی کارایی مدل در دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی نشان داد که مدل هیدرولوژیکی GFHM دقت قابل قبولی در شبیه‌سازی هیدروگراف سیل دارد. پریسای (۲۴) اقدام به پهنه‌بندی خطر سیل حوزه آبخیز سد بوستان با تلفیق دو مدل توزیعی مفهومی مادکلارک و مدل هیدرولیکی HEC-RAS نمود و نتایج نشان داد که درصد خطای دبی اوج شبیه‌سازی کمتر از ۳/۲ بوده و در نتیجه، مدل در شبیه‌سازی دبی اوج کارایی خوبی داشته است اما در برآورد حجم سیل چندان موفق نبوده است. قنبرآبادی (۹) به محاسبه بارش مازاد با استفاده از روش شماره منحنی و ضریب رواناب مدل WetSpa و روندیابی آن با مدل موج سینماتیک در حوزه آبخیز جعفرآباد استان گلستان پرداخته است. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که مدل موج سینماتیک جهت شبیه‌سازی هیدروگراف سیل رگبارها نسبتاً مناسب می‌باشد. سید و همکاران (۳۶) کارایی مدل‌های موج سینماتیک و هیدروگراف واحد SCS را در مقیاس آبخیز در مناطق نیمه خشک مورد مقایسه قرار دادند و برتری روش موج سینماتیک را بدلیل تقسیم‌بندی مکانی جزئی‌تر ویژگی‌های حوزه آبخیز نشان دادند. سون (۳۵) روش‌های روندیابی هیدرولوژیکی ماسکینگام و روندیابی هیدرولیکی موج سینماتیک را برای ارزیابی اقدامات مدیریت سیلاب در آبخیز سوایب ایالت آیووا مورد استفاده قرار دادند که روش موج سینماتیک هیدروگراف‌های سیلاب را بهتر از روش ماسکینگام شبیه‌سازی کرده است.

حوزه آبخیز مورد مطالعه یکی از مهم‌ترین حوزه‌های سیل خیز استان گلستان به شمار می‌آید. با توجه به اینکه در



شکل ۱- نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه  
Figure 1. The study area location map

که در آن رابطه بین دبی (Q) و مساحت (A) نشان داده می‌شود و  $\alpha$  و  $\beta$  ضرایب تجربی هستند:

$$A = \alpha Q^\beta \quad (۵)$$

دبی در هر سلول شبکه با استفاده از معادله مانینگ محاسبه می‌شود (۵،۲۰):

$$Q = \frac{A}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (۶)$$

با در نظر گرفتن  $S_0 = S_f$  و  $R = A/P$  معادله مانینگ می‌تواند در قالب منحنی سنجه نوشته شود:

$$A = \left[ \frac{n P^{2/3}}{\sqrt{S_f}} \right]^{3/5} Q^{3/5} \quad (۷)$$

$$A = \left[ \frac{n P^{2/3}}{\sqrt{S_f}} \right]^{3/5} Q^{3/5} \quad (۸)$$

$$\alpha = \left[ \frac{n P^{2/3}}{\sqrt{S_f}} \right]^{3/5}$$

که در آن A مساحت سطح خیس شده (مترمربع)، n ضریب زبری مانینگ، P محیط خیس شده (مترمربع)، S سینوس شیب، R شعاع هیدرولیکی (متر) و Q دبی (مترمکعب بر ثانیه) می‌باشد.

با مقایسه معادلات ۷ و ۵، مقادیر  $\alpha$  و  $\beta$  به صورت زیر استنباط می‌گردد:

$$\beta = 3/5 = 0.6 \quad (۹)$$

اگرچه می‌توان مقدار  $\alpha$  را برای آبراهه‌های کوچک ثابت و مستقل از شیب و مقاومت در نظر گرفت (۱۰، ۱۱) اما در این مطالعه مقدار  $\alpha$  در طول شبیه‌سازی متغیر در نظر گرفته شده و با توجه به عمق جریان محاسبه می‌شود. حل معادله موج سینماتیک در PCRaster به روش حل عددی تفاضل محدود می‌باشد. موج سینماتیک همراه با معادله مانینگ با استفاده از روش غیرخطی ضمنی و تکرار زمانی نیوتن-رافسون برای روندیابی جریان سطحی و جریان کانال محاسبه می‌شود که ناپایداری مشروط دارد (۴، ۸). به‌منظور حل عددی تفاضل محدود برای روندیابی جریان، از معادله ۳ نسبت به Q مشتق گرفته می‌شود و سپس بر حسب زمان به شکل زیر بازنویسی می‌شود.

$$\frac{\partial A}{\partial Q} = \alpha \beta Q^{\beta-1} \quad (۱۰)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \alpha \beta Q^{\beta-1} \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (۱۱)$$

با جای‌گذاری سمت راست معادله بالا در معادله ۳ رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \alpha \beta Q^{\beta-1} \frac{\partial Q}{\partial t} = q \quad (۱۲)$$

### برآورد ارتفاع رواناب با استفاده از روش شماره منحنی

برای محاسبه ارتفاع رواناب از روش شماره منحنی یا روش سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS-CN) استفاده گردید. روش SCS روش ساده و مفیدی برای حوزه‌های آبخیز بدون آمار و روشی مناسب برای لحاظ کردن چهار فاکتور مهم موثر بر تولید رواناب حوزه شامل نوع خاک، کاربری اراضی/عملیات مدیریت زمین، شرایط سطحی و شرایط رطوبت پیشین می‌باشد (۲۶). جهت برآورد ارتفاع رواناب حوزه آبخیز نقشه کاربری اراضی، گروه‌های هیدرولوژیکی خاک و اطلاعات مربوط به خاک از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گلستان گردآوری شد و با استفاده از رابطه زیر عمق رواناب محاسبه گردید.

$$Q = \frac{(P-0.2S)^2}{P+0.8S} \quad P > 0.2S \quad (۱)$$

$$Q = 0 \quad P \leq 0.2S$$

که در این رابطه Q ارتفاع رواناب تراکمی به میلی‌متر در هر گام زمانی، P ارتفاع بارندگی تجمعی بر حسب میلی‌متر در هر گام زمانی، S تلفات اولیه آب که شامل مجموع برگاب، نفوذ در خاک و ذخیره سطحی بر حسب میلی‌متر می‌باشد که به صورت زیر تابعی از شماره منحنی یا CN می‌باشد.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (۲)$$

بنابراین برای محاسبه S نیاز به مقادیر CN می‌باشد که از روی نقشه کاربری اراضی، گروه‌های هیدرولوژیکی خاک و شیب زمین برای شرایط رطوبت متوسط به دست می‌آید. از آنجایی که شرایط رطوبت پیشین برای هر واقعه بارش - رواناب متفاوت می‌باشد، مقدار CN با توجه به شرایط رطوبت پیشین اصلاح گردید. برای محاسبه عمق بارش مازاد در هر گام زمانی شبیه‌سازی، مقادیر رواناب تجمعی آن گام از مقادیر رواناب تجمعی گام قبل کسر گردید.

### روش موج سینماتیک

معادلات حاکم بر جریان‌های متغیر تدریجی به معادلات سنت ونانت معروف بوده و ترکیبی از معادله پیوستگی و معادله اندازه حرکت می‌باشند (۵). این معادلات به شرح زیر می‌باشند. موج سینماتیک با فرض این که نیروهای اینرسی و فشاری قابل اغماض باشند، بر جریان حاکم می‌شوند. معادله پیوستگی حاکم بر موج سینماتیک به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (۳)$$

که در آن q مازاد نفوذ یا جریان جانبی است. معادله اندازه حرکت برای موج سینماتیک نیز به صورت زیر بیان شده است:

$$S_0 = S_f \quad (۴)$$

که در آن  $S_0$  نیروی جاذبه برابر با  $S_f$  نیروی اصطکاک در نظر گرفته شده است؛ که نشان می‌دهد خط تراز انرژی با کف کانال موازی است و جریان پایدار و یکنواخت است. معادله اندازه حرکت می‌تواند به شکل منحنی سنجه زیر نوشته شود

اگر معادله تحلیلی فوق به تفاضل محدود تبدیل شود:

$$\frac{I_1 + I_2}{2} - \frac{O_1 + O_2}{2} = \frac{K(O_2 - O_1)}{\Delta t} \quad (16)$$

$$\frac{I_1 + I_2}{2} - \frac{O_1 + O_2}{2} = \frac{K(O_2 - O_1)}{\Delta t} \quad (17)$$

$$\bar{I}\Delta t - \bar{O}\Delta t = K(O_2 - O_1) \quad (18)$$

$$O_2 = \frac{\Delta t}{2K + \Delta t} \bar{I} + \frac{2K - \Delta t}{2K + \Delta t} O_1 \quad (18)$$

که دبی خروجی در انتهای بازه زمانی  $\Delta t$  را به دست می‌دهد. در روش کلارک، ثابت ذخیره از شاخه نزولی هیدروگراف اندازه‌گیری شده محاسبه می‌شود. در این روش با توجه به این که در نقطه عطف، ورودی به حوزه (بارش) قطع می‌گردد، لذا مقدار آن صفر می‌شود. از این رو داریم:

$$I = 0 \Rightarrow -O = \frac{dS}{dt} \quad (19)$$

و از آنجائیکه  $St = K.Ot$  است لذا مقدار ضریب ذخیره از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$k = \frac{-O}{dO/dt} \quad (20)$$

در این رابطه  $O$  دبی در نقطه عطف هیدروگراف بر حسب  $m^3/s$  و  $dO/dt$  شیب خط مماس بر هیدروگراف مشاهده‌ای در نقطه عطف هیدروگراف می‌باشد (۱).

مشابه روش هیدروگراف واحد لحظه‌ای کلارک، محاسبات رواناب در روش مادکلارک بر اساس انتقال و ذخیره حوزه انجام می‌شود. انتقال توسط مدل زمان-مساحت در قالب شبکه مربعی حوزه تعیین شده و سپس ذخیره حوزه با مدل مخزن خطی محاسبه می‌شود (۱۳). برخلاف مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای کلارک که یک مدل یکپارچه شناخته می‌شود، مدل کلارک اصلاح شده یا مادکلارک یک مدل توزیعی است. به این معنی که در این روش ابتدا یک شبکه فرضی بر روی حوزه تعریف شده، سپس برای هر سلول شبکه فاصله تا خروجی حوزه تعیین و زمان تبدیل تا خروجی محاسبه می‌گردد. در این تحقیق در ابتدا مساحت زهکشی بالادست هر سلول در محیط PCRaster به دست می‌آید سپس شعاع هیدرولیکی را نیز می‌توان با استفاده از رابطه توانی زیر محاسبه نمود که در این رابطه شعاع هیدرولیکی وابسته به مساحت تحت کنترل بوده و نمایانگر رفتار تقریبی سلول و همچنین هندسه بستر است (۲۰):

$$R_i = a_p (A_i)^{b_p} \quad (21)$$

که در آن  $A_i$  مساحت زهکشی بالادست سلول ( $km^2$ ),  $a_p$  ثابت شبکه و  $b_p$  ضریبی است که در رابطه با هندسه بستر می‌باشد. هر دو پارامتر به دوره بازگشت دبی بستگی دارند. مطابق نظر لیو و دسمت (۱۸) مقادیر پیش فرض  $a_p$  و  $b_p$  به ترتیب ۰/۰۹ و ۰/۵ در نظر گرفته شده اند. همچنین سرعت جریان در این روش، با استفاده از معادله مانینگ محاسبه می‌شود (۱۸).

$$v_i = \frac{1}{n_i} R_i^{\frac{2}{3}} S_i^{\frac{1}{2}} \quad (22)$$

رابطه بالا به شکل تفاضل محدود خطی بصورت زیر حل می‌گردد.

$$\frac{Q_{x+1}^{t+1} - Q_x^{t+1}}{\Delta x} + \alpha\beta Q_x^{-\beta-1} \frac{Q_{x+1}^{t+1} - Q_x^t}{\Delta t} = \bar{q} \quad (13)$$

### روش مادکلارک (روش زمان-مساحت توزیعی)

روش مادکلارک یک روش توزیعی- مفهومی از نوع ذخیره‌ای است که توزیع مکانی را نیز در نظر می‌گیرد. این روش در سال‌های اخیر توسعه یافته و اصول محاسباتی آن براساس تغییرات زمان حرکت رواناب از مناطق مختلف حوزه تا خروجی آن شکل می‌گیرد (۱۷). روش توسعه یافته کلارک یا مادکلارک نسخه تغییر یافته روش کلارک محسوب می‌شود. هیدروگراف واحد مصنوعی کلارک که یک هیدروگراف واحد لحظه‌ای است در سال ۱۹۴۵ به وسیله کلارک معرفی شد و به روش زمان-مساحت مشهور است (۳۱). در این روش دبی در زمان، تابعی از خصوصیات انتقال و ذخیره‌سازی حوزه آبخیز است و انتقال به وسیله تخمین زمان جریان سطحی و جریان آبراهه‌ای رواناب به دست می‌آید که پس از آن با برآورد تاخیر ناشی از اثرات ذخیره‌سازی حوزه آبخیز تعدیل می‌شود. هیدروگراف واحد لحظه‌ای کلارک دارای این مزیت است که مشخصات حوزه از قبیل شکل، طول آبراهه و زبری سطح، در هیستوگرام زمان-مساحت و در نهایت در شکل هیدروگراف نمود پیدا می‌کند. در روش هیدروگراف واحد لحظه‌ای ابتدا حوزه با خطوط همزمان تمرکز به بخش‌های مختلف تقسیم می‌شود سپس بارش مازاد لحظه‌ای واحد با توجه به خطوط همزمان تمرکز به سمت خروجی حوزه هدایت می‌شود و در مرحله بعدی روندیابی مخزن خطی که نشان‌دهنده تاثیرات ذخیره است اعمال می‌گردد. با این کار هیدروگراف واحد لحظه‌ای استخراج می‌شود (۱). مطابق روش کلارک، ذخیره در زمان  $t$  به صورت خطی به جریان خروجی از حوزه در همان زمان ارتباط دارد (تعریف مخزن خطی). در این روش ذخیره در زمان  $t$  برابر است با:

$$St = KQt \quad (14)$$

که در آن  $St$  ذخیره در زمان،  $Ot$  خروجی از مخزن در زمان  $t$  و  $K$  ضریب ذخیره می‌باشد. این ضریب تاخیر ناشی از تاثیرات ذخیره‌سازی طبیعی سیستم را نشان می‌دهد (۱۷) یا مطابق تعریف دیگر معرف زمان تخلیه آب از ذخیره کانال مسیر رودخانه است پس از این که ورودی به آبراهه قطع شود (۲۳). از معادله پیوستگی داریم (۶):

$$I - O = \frac{dS}{dt} \rightarrow I - O = K \frac{dO}{dt} \quad (15)$$

که در آن  $I$  دبی ورودی به مخزن در لحظه  $t$ ,  $O$  دبی خروجی از مخزن در لحظه  $t$ ,  $S$  میزان ذخیره مخزن در لحظه  $t$  و  $K$  ضریب ذخیره مخزن می‌باشد. مقدار  $K$  برای حوزه آبخیز مورد نظر در مطالعات پیشین (۲۴) برای ۵۰ درصد رخدادهای بارش و رواناب مطالعه شده برابر ۲ گزارش شده است. بنابراین در این تحقیق مقدار آن ثابت و برابر ۲ فرض گردید.

محاسبه شد، پس از محاسبه زمایش پیمایش توسط سرعت موج، خطوط زمان تمرکز با استفاده از زمان پیمایش به دست آمد و مساحت بین دو خط همزمان تمرکز محاسبه گردید. سپس حجم ورودی به مخزن خطی برای هر بازه زمانی که ناشی از بارش مازاد است محاسبه می‌شود. بارش مازاد برابر اختلاف بین متوسط بارش سطحی در هر سلول و مقدار تلفات از آن سلول است. بارش مازاد هر سلول با استفاده از روش مخزن خطی روندیابی شده، هیدروگراف خروجی را برای هر سلول ایجاد می‌کنند. در انتها هیدروگراف‌های خروجی سلول‌ها ترکیب شده و هیدروگراف رواناب مستقیم کل حوزه تعیین می‌گردد (۲،۲۱). فرآیند انجام تحقیق حاضر در نمودار جریانی ارائه شده در شکل ۲ خلاصه شده است.

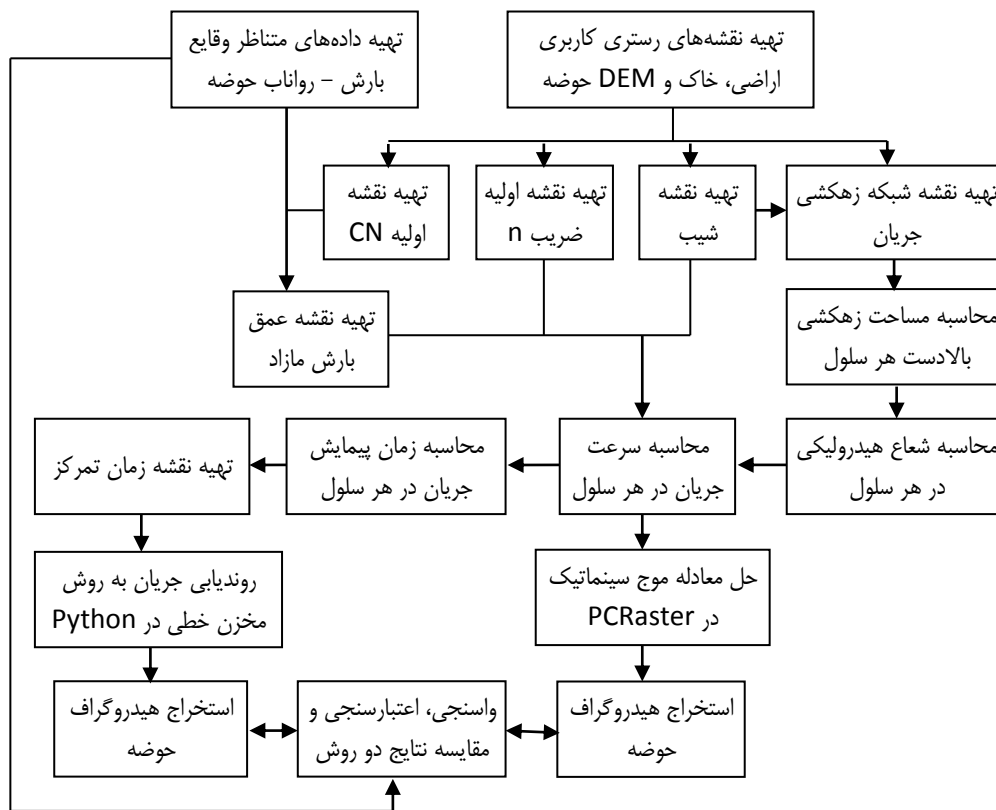
نی ضریب زبری مانینگ و  $S_i$  شیب جریان می‌باشد که بستگی به کاربری و خصوصیات آبراهه دارد. پس از محاسبه سرعت با استفاده از معادله مانینگ، رابطه زیر برای محاسبه سرعت موج، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$c_i = \frac{5v_i}{3} \quad (23)$$

پس از محاسبه سرعت موج، زمان پیمایش با استفاده از  $c_i$  رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$T_t = \frac{L}{v_i} \quad (24)$$

که در آن  $v_i$  سرعت جریان برحسب متر برثانیه و  $L$  طول جریان برحسب متر می‌باشد. وقتی که مساحت هر سلول



شکل ۲ - نمودار جریانی فرآیند انجام تحقیق  
Figure 2 . Flowchart of the research process

دوم (۳ واقعه) جهت اعتبارسنجی مدل‌های تهیه شده استفاده گردید. مشخصات وقایع سیلابی مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است. از بین مجموعه پارامترهای مدل برنامه‌نویسی شده دو پارامتر شماره منحنی و ضریب مانینگ که پارامترهای مشترک هر دو روش روندیابی جریان سطحی می‌باشند جهت واسنجی انتخاب شدند و برای بقیه پارامترها که مختص یکی از این روش‌ها می‌باشند مقادیر پیش فرض مدل مورد استفاده قرار گرفتند تا اثر واسنجی بهتر یک پارامتر خاص از یک روش باعث اریبی در مقایسه نتایج روش‌ها نگردد. در این پژوهش برای انجام واسنجی از واسنجی دستی و تابع حداقل

## نتایج و بحث

### اجرای مدل و بهینه‌سازی پارامترها

در این تحقیق برای شبیه‌سازی وقایع سیلابی و واسنجی پارامترهای مدل، آمار هم زمان بارش و دبی ایستگاه‌های تمر و گلیداغ مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت هفت رگبار مشاهده‌ای که هیدروگراف سیل آنها در محل ایستگاه تمر ثبت شده بودند انتخاب گردید. رویدادها به دو دسته به نحوی تقسیم گردید که در هر گروه پراکنشی متوازن از لحاظ فصل رخداد، حجم سیل و دبی اوج وجود داشته باشد. از دسته اول (۴ واقعه) جهت اجرا و واسنجی مدل استفاده گردید و از دسته

خاک و جدول راهنمای موجود در کتاب مهندسی ملی آمریکا، بخش هیدرولوژی (۳۷) برای هر یک از سلول‌های حوزه آبخیز مورد مطالعه تهیه گردید. نقشه کاربری اراضی و نقشه شماره منحنی بهینه‌سازی شده فصل پائیز حوزه آبخیز مورد مطالعه در شکل ۳ نشان داده شده است. بارش مازاد از روش SCS-CN محاسبه گردید که رایج‌ترین روش برآورد پیش‌بینی ارتفاع رواناب و دبی اوج جریان با استفاده از داده‌ها و اطلاعات عمق بارش، ویژگی‌های فیزیوگرافی حوزه، خصوصیات خاک و نحوه استفاده از زمین در یک حوزه آبخیز می‌باشد (۲۷، ۳۲).

مربعات خطا استفاده شد. با توجه به این که شماره منحنی تابع پوشش گیاهی و خود پوشش گیاهی هم تابع فصل می‌باشد، براساس تاریخ هر رویداد، عمل واسنجی در چهارفصل جداگانه انجام شد. پارامترهای شماره منحنی و ضریب مانینگ با توجه مقدار اولیه کالیبره شدند و مقادیر پارامترهای کالیبره شده برای اعتبارسنجی مدل استفاده شدند. در جدول ۲ مقادیر اولیه و بهینه شده این پارامترها نشان داده شده است. شایان ذکر است نقشه توزیعی مکانی شماره منحنی اولیه و یا به عبارتی شماره منحنی در شرایط رطوبتی متوسط (CN2) با استفاده از عملگر lookupscale در محیط PCRaster و نقشه‌های کاربری اراضی و گروه هیدرولوژیکی

جدول ۱- اطلاعات هیدروگراف‌های مشاهداتی مورد استفاده در این تحقیق

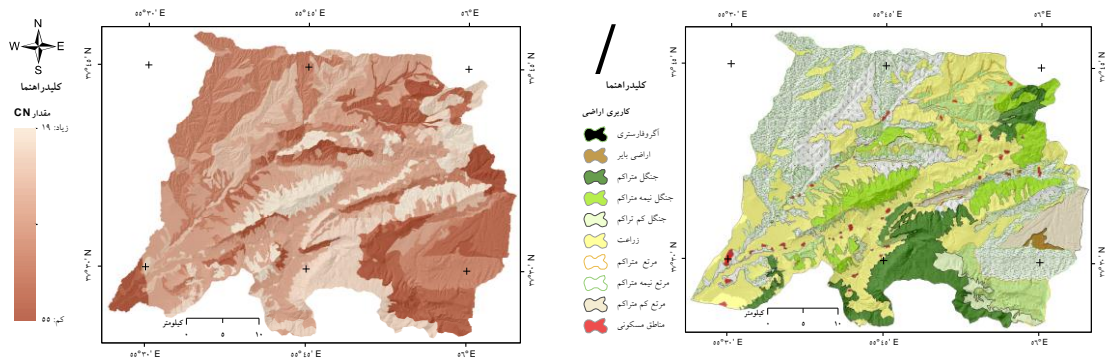
Table 1. Information of observed hydrographs used in this study

دوره	تاریخ رویداد	دبی اوج (مترمکعب بر ثانیه)	حجم سیل (هزارمترمکعب)	زمان تا اوج (ساعت)
واسنجی	۸۸/۱۲/۴	۷۳	۲۹۸	۱۰
	۸۹/۴/۲۰	۱۷۳	۳۶۴	۲۳
	۹۱/۱۱/۱۵	۱۹/۹	۱۴۷	۲۲
	۹۱/۱/۲۹	۴۶/۹	۱۲۷	۲۴
اعتبارسنجی	۹۰/۶/۳	۲۱۰	۴۱۸	۲۶
	۹۱/۲/۲۷	۵۵.۷	۱۸۷	۲۴
	۹۱/۳/۴	۱۰۹	۳۱۴	۱۶

جدول ۲- مقادیر اولیه و بهینه شده پارامتر شماره منحنی و ضریب مانینگ

Table 2. Initial and calibrated values of Curve Number and Manning coefficients

کاربری اراضی	گروه هیدرولوژیکی	CN اولیه	CN بهینه شده				ضریب مانینگ	
			بهار	تابستان	پاییز	زمستان	اولیه	بهینه شده
زراعت	B	۷۵	۷۲/۵	۷۸/۹	۷۵	۷۲/۱	۰/۱۵	۰/۱۲
	C	۸۳	۸۱/۳	۸۵/۷	۸۳	۸۱/۴	۰/۰۴	۰/۰۴
ارضای لخت	B	۸۶	۸۴/۳	۸۸/۹	۸۶	۸۴/۱	۰/۰۴	۰/۰۴
	C	۹۱	۸۹/۱	۹۳/۶	۹۱	۸۹/۲	۰/۰۴	۰/۰۴
جنگل متراکم	B	۵۵	۵۳/۵	۵۷/۴	۵۵	۵۳/۸	۰/۰۸	۰/۰۸
	C	۷۰	۶۸/۶	۷۲/۶	۷۰	۶۸/۵	۰/۰۸	۰/۰۸
جنگل نیمه متراکم	B	۶۰	۵۸/۵	۶۲/۶	۶۰	۵۸/۵	۰/۰۸	۰/۰۸
	C	۷۳	۷۱/۶	۷۵/۴	۷۳	۷۱/۷	۰/۰۸	۰/۰۸
جنگل کم تراکم	B	۶۶	۶۴/۲	۶۸/۱	۶۶	۶۴/۷	۰/۰۶	۰/۰۶
	C	۷۷	۷۵/۳	۷۹/۳	۷۷	۷۵/۶	۰/۰۶	۰/۰۶
مرتع متراکم	B	۶۱	۵۹/۴	۶۳/۴	۶۱	۵۹/۶	۰/۰۴	۰/۰۴
	C	۷۴	۷۲/۲	۷۶/۲	۷۴	۷۲/۸	۰/۰۴	۰/۰۴
مرتع نیمه متراکم	B	۶۹	۶۶/۳	۷۲/۵	۶۹	۶۶/۲	۰/۰۴	۰/۰۴
	C	۷۹	۷۶/۵	۸۲/۵	۷۹	۷۶/۵	۰/۰۴	۰/۰۴
مرتع فقیر	B	۷۹	۷۸/۳	۸۲/۸	۷۹	۷۶/۲	۰/۰۲	۰/۰۲
	C	۸۶	۸۳/۲	۸۹/۱	۸۶	۸۳/۵	۰/۰۲	۰/۰۲
آگروفارستری	B	۵۸	۵۶/۳	۶۰/۲	۵۸	۵۴/۴	۰/۰۴	۰/۰۴
	C	۷۲	۷۰/۴	۷۴/۷	۷۲	۷۰/۶	۰/۰۴	۰/۰۴
منطقه مسکونی	B	۷۴	۷۲/۰	۷۶/۳	۷۴	۷۲/۶	۰/۰۴	۰/۰۴
	C	۸۲	۸۰/۲	۸۴/۱	۸۲	۸۰/۴	۰/۰۴	۰/۰۴



شکل ۳- نقشه کاربری اراضی و نقشه شماره منحنی فصل پائیز حوزه آبخیز سد بوستان  
Figure 3. Land use map and optimized curve number map for the Bustan dam watershed in Autumn

مشاهداتی، هر سه مولفه کلیدی هیدروگراف‌ها یعنی دبی اوج، حجم سیل و زمان تا اوج سیل بصورت قابل قبولی شبیه‌سازی شده است. اگرچه، اختلافاتی از نظر کارایی کاربرد دو روش رونیدیابی مشاهده می‌شود که در بخش‌های بعدی به تفصیل مورد بحث قرار گرفته است.

#### نتایج دوره اعتبارسنجی

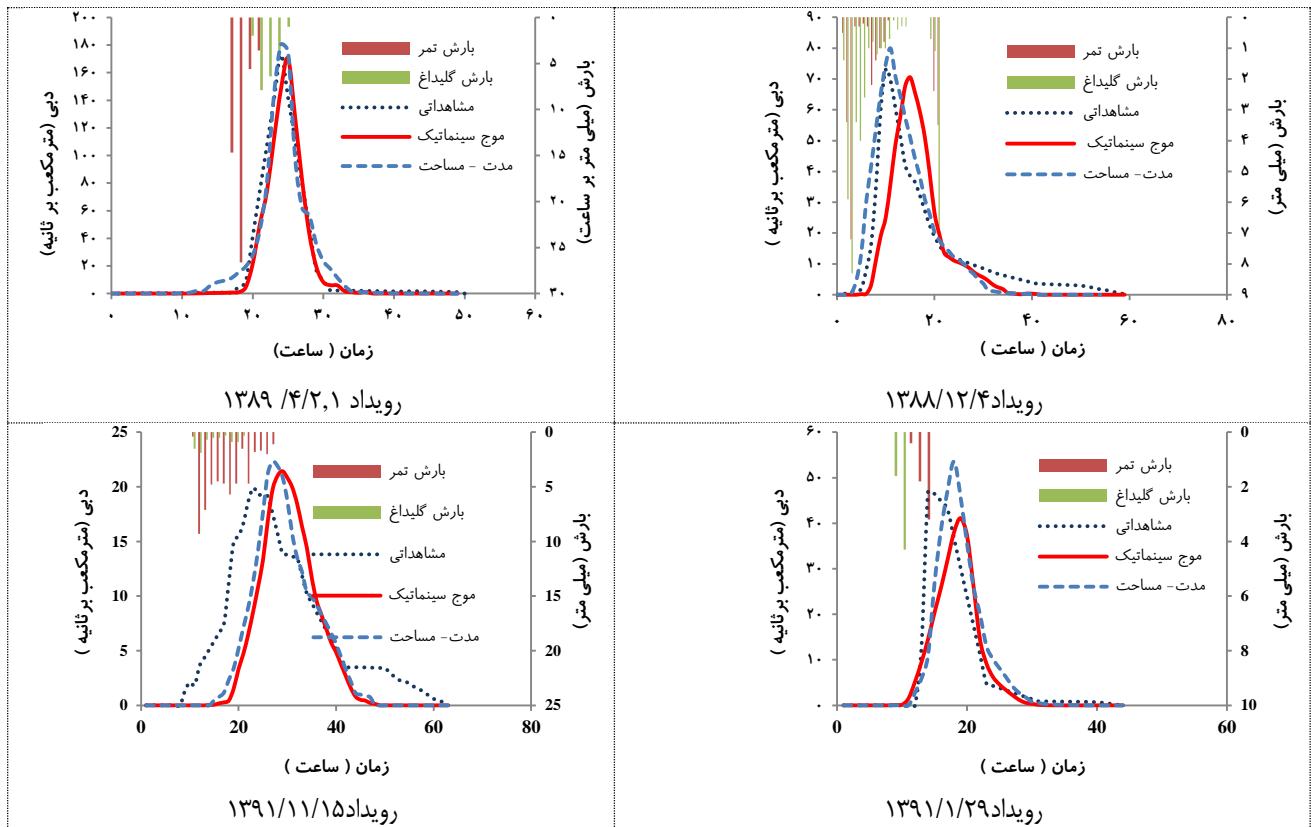
نتایج شبیه‌سازی وقایع مربوط به دوره اعتبارسنجی در شکل ۵ و جدول ۴ ارائه شده است. همانند دوره واسنجی، نتایج شبیه‌سازی هیدروگراف‌های وقایع بارش- رواناب دوره اعتبارسنجی نیز رضایت بخش می‌باشد.

#### نتایج دوره واسنجی

مقایسه هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای دو روش موج سینماتیک و زمان-مساحت، پس از انجام واسنجی در شکل ۴ ارائه شده است. همچنین مقادیر عددی دبی اوج، حجم سیل و زمان تا اوج هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در جدول ۳ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد نتایج شبیه‌سازی هر چهار واقعه بارش- رواناب دوره واسنجی با کاربرد هر دو روش رونیدیابی جریان سطحی رضایت‌بخش می‌باشد به طوری که ضمن تطابق خوب شکل کلی هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده با

جدول ۳- مقادیر دبی اوج، حجم سیل، زمان تا اوج هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در مرحله واسنجی  
Table 3. Simulated and observed values of peak discharge, flood volume and time to peak for calibration period

رویداد	مشاهداتی		دبی اوج (مترمکعب بر ثانیه)		حجم سیل (هزارمترمکعب)		زمان تا اوج (ساعت)	
	مشاهداتی	موج سینماتیک مدت-مساحت	مشاهداتی	موج سینماتیک مدت-مساحت	مشاهداتی	موج سینماتیک مدت-مساحت	مشاهداتی	موج سینماتیک مدت-مساحت
۸۸/۱۲/۴	۷۳	۷۰/۶	۲۹۸	۲۵۷	۲۲۲	۲۲۲	۱۰	۱۵
۸۹/۴/۲۰	۱۷۳	۱۷۰/۳	۳۶۴	۳۲۲	۳۸۲	۳۸۲	۲۳	۲۵
۹۱/۱۱/۱۵	۱۱۹/۹	۲۱/۳	۱۴۷	۱۰۱	۱۰۶	۱۰۶	۲۲	۲۸
۹۱/۱/۲۹	۴۶/۹	۴۱/۱	۱۲۷	۱۰۸	۱۳۲	۱۳۲	۲۴	۲۸

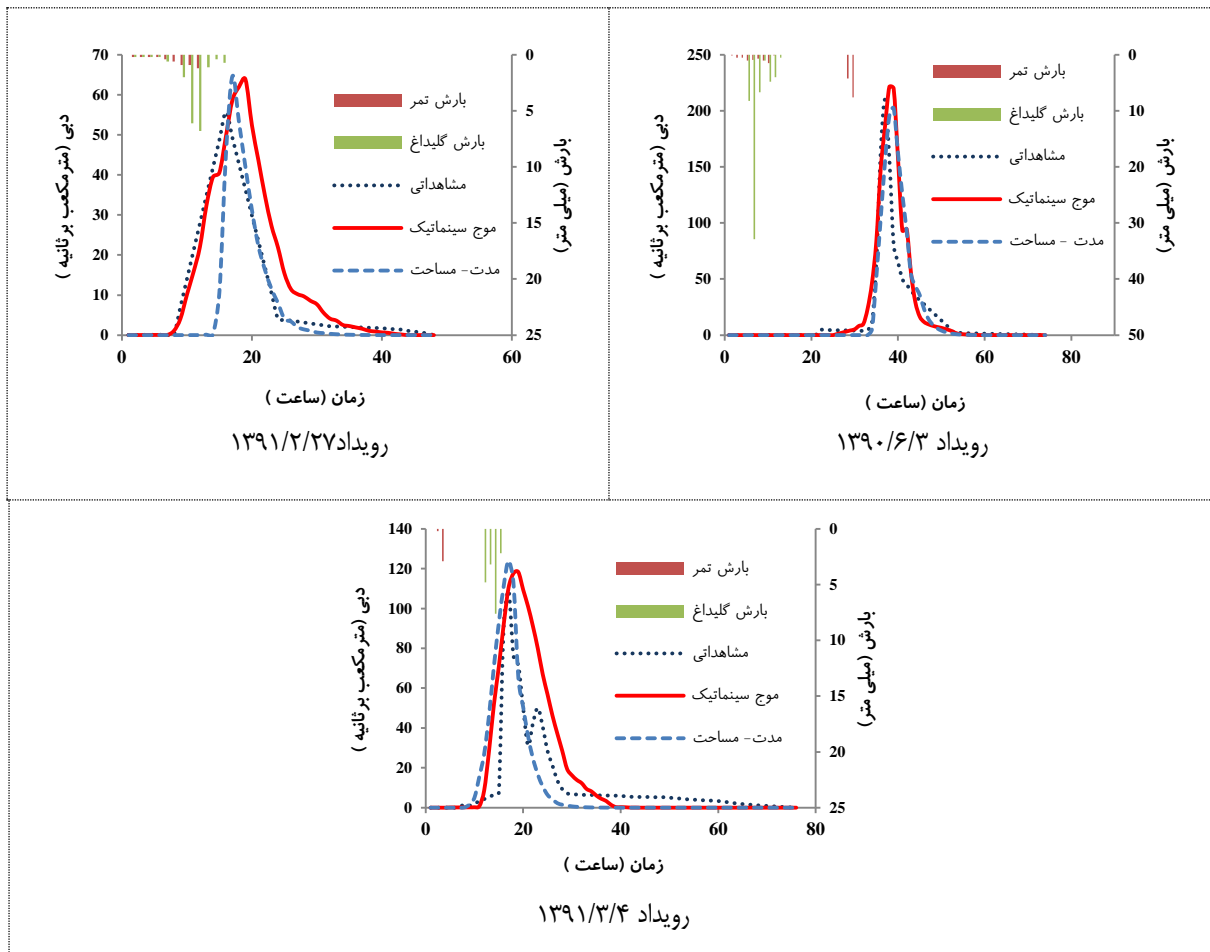


شکل ۴- هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی در مرحله واسنجی در حوزه آبخیز سد بوستان  
 Figure 4. Simulated and observed hydrographs for Bustan dam watershed during calibration period

جدول ۴- مقادیر دبی اوج، حجم سیل، زمان تا اوج هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای در مرحله اعتبارسنجی  
 Table 4. Simulated and observed values of peak discharge, flood volume and time to peak for validation period

رویداد	دبی اوج (مترمکعب بر ثانیه)			حجم سیل (هزارمترمکعب)			زمان تا اوج (ساعت)		
	مشاهده‌ای	موج سینماتیک مدت- مساحت	مشاهداتی	موج سینماتیک	مدت- مساحت	مشاهداتی	موج سینماتیک مدت- مساحت	مشاهداتی	موج سینماتیک مدت- مساحت
۹۰/۶/۳	۲۱۰	۲۲۱/۴۵	۴۱۸/۳۷	۴۸۲/۶۷	۵۳/۲۴۳	۳۶	۲۰۲/۱۷	۳۷	۳۸
۹۱/۲/۲۷	۵۵/۷	۶۳/۸۸	۱۸۷/۴۳	۱۱۶/۹۳	۲۴۴/۵۶	۲۴	۶۴/۶۶	۲۷	۲۵
۹۱/۳/۴	۱۰۹	۱۱۸/۳۷	۳۱۳/۷۰	۴۸۰/۴۷	۳۰۳/۴۱	۱۶	۱۲۳/۹۹	۱۸	۱۶





شکل ۵- هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی در مرحله اعتبارسنجی در حوزه آبخیز سد بوستان  
Figure 5. Simulated and observed hydrographs for Bustan dam watershed during validation period

جریان بویژه در روش موج سینماتیک قابل ملاحظه است. اما درصد خطای برآورد دبی اوج جریان که از مولفه‌های بسیار مهم هیدروگراف در طراحی سازه‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی می‌باشد در حدود ۱۰ درصد یا کمتر است. براساس این نتایج، روش‌های مورد استفاده و مدل توسعه داده شده کارایی نسبتاً خوبی داشته و می‌توان از آن‌ها برای شبیه‌سازی جریان خروجی حوزه آبخیز سد بوستان، با ضریب اطمینان قابل قبولی استفاده کرد. موج سینماتیک یکی از روش‌های هیدرولیکی و زمان-مساحت یکی از روش‌های هیدرولوژیکی روندیابی جریان سطحی حوزه‌های آبخیز می‌باشد. بنابراین در این مطالعه سعی گردید تا از این دو روش برای شبیه‌سازی انتقال جریان سطحی و هیدروگراف سیل حوزه آبخیز سد بوستان به کمک زبان‌های برنامه نویسی Python و PCRaster استفاده گردد. هر دو محیط نرم‌افزاری برای شبیه‌سازی تولید و انتقال رواناب سطحی در مقیاس شبکه‌های سلولی ۵۰ متر استفاده شد.

### ارزیابی کارایی مدل و مقایسه دو روش روندیابی جریان سطحی

برای ارزیابی کارایی مدل و روش‌های روندیابی مورد استفاده از آماره‌های ارزیابی ضریب ناش-ساتکلیف، ضریب تبیین، ضریب تبیین وزنی، درصد‌های خطا در برآورد حجم جریان، دبی اوج و زمان تا اوج هیدروگراف استفاده گردید که نتایج در جدول ۵ خلاصه شده است. با توجه به نتایج حاصل از ارزیابی کارایی روش‌های مورد استفاده در دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی با استفاده از شاخص‌های مختلف، می‌توان بیان داشت که روش‌های مورد استفاده دقت قابل قبولی در شبیه‌سازی هیدروگراف سیل دارند. معیار کارایی ناش-ساتکلیف به‌طور معمول برای ارزیابی انواع مدل‌های هیدرولوژی به‌ویژه ارزیابی هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده استفاده می‌گردد. پس از ارزیابی نتایج مدل در دوره واسنجی و اعتبارسنجی نتایج ناش-ساتکلیف به ترتیب برای روش موج سینماتیک ۰/۸۸۲ و ۰/۷۴۵ و برای روش زمان-مساحت ۰/۹۰۳ و ۰/۷۴۸ به دست آمد. درصد خطا در برآورد حجم

جدول ۵- کارایی روش‌های روندیابی جریان سطحی در دوره واسنجی و اعتبارسنجی مدل با استفاده از شاخص‌های مختلف  
Table 5. Performance of surface flow routing methods during model calibration and validation periods using different indices

مرحله اعتبارسنجی		مرحله واسنجی		شاخص کارایی
مدت- مساحت	موج سینماتیک	مدت- مساحت	موج سینماتیک	
۰/۷۴۸	۰/۷۴۵	۰/۹۰۳	۰/۸۸۲	ضریب ناش - ساتکلیف
۱۶/۸۷۵	۳۴/۳۷۷	۱۱/۱۲	۱۷/۹۵۵	درصد خطا در حجم جریان
۱۱/۲۰۸	۹/۷۸۵	۱۰/۰۰۸	۲۹۳/۶	درصد خطا در دبی اوج
۳/۲۳۷	۹/۲۵۷	۱۸/۳۳۸	۲۵/۶۶	درصد خطا در زمان تا اوج
۰/۶۵۳	۰/۸۰۸	۰/۷۷۶	۰/۷۰۶	ضریب تبیین
۰/۵۲۱	۰/۵۱۶	۰/۶۱۲	۰/۶۷۴	ضریب تبیین وزنی

کانال رودخانه در طول مسیر وجود ندارد، در این مطالعه از روش موج سینماتیکی استفاده گردید (۷). بنابراین پیشنهاد می‌شود که کاربرد روش‌هایی همچون موج پخشی و موج دینامیکی با تهیه داده‌های لازم در منطقه مورد مطالعه مورد ارزیابی قرار گیرند.

روش زمان- مساحت حجم جریان سیلاب‌ها را نسبت به روش موج سینماتیک بهتر شبیه‌سازی کرد که با یافته‌های پاول و همکاران (۲۵) مبنی بر اینکه روش زمان- مساحت، حجم جریان سیلاب را با دقت قابل قبولی برآورد می‌کند مطابقت دارد. حجم جریان شبیه‌سازی شده با روش موج سینماتیک کمتر از حجم سیل مشاهداتی به دست آمد که چنین یافته‌ای در تحقیق نجفی (۲۲) نیز اشاره شده است. در این تحقیق از هفت واقعه سیل برای مطالعه استفاده گردید که بررسی و مقایسه داده‌های برآورد شده و مشاهده‌ای نشان داد که کارایی این روش‌ها در برآورد دبی پیک سیلاب‌ها نسبتاً مناسب است. تقریباً در تمامی رویدادها، دبی اوج در روش زمان- مساحت بیشتر از موج سینماتیک و دبی اوج مشاهداتی است و بنابراین، کارایی روش موج سینماتیک در برآورد دبی اوج سیلاب نسبتاً بهتر از روش زمان- مساحت می‌باشد. برای اکثر رخدادهای مطالعه شده، مشاهده گردید که اختلاف مقدار بارندگی و زمان شروع و پایان رگبارها در ایستگاه‌های مورد استفاده قابل ملاحظه می‌باشد. در این تحقیق، با توجه به تعداد کم ایستگاه‌های بارانسنجی مجهز به باران نگار، برای کل حوزه آبخیز سد بوستان که مساحت قابل ملاحظه‌ای دارد فقط امکان تعیین دو پهنه بارندگی وجود داشت و میزان بارندگی در هر پهنه یکنواخت و معادل داده‌های یکی از ایستگاه‌ها در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه اختلاف بارندگی در دو پهنه نسبتاً زیاد بود یکی از مهم‌ترین عوامل بروز خطا در شبیه‌سازی زمان وقوع هیدروگراف‌های خروجی حوزه آبخیز را می‌توان به این نقیصه داده‌ای مرتبط دانست. به‌منظور ارزیابی نتایج مدل از ابعاد مختلف، از ضریب تبیین وزنی بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده نیز استفاده شد که بر اساس نتایج به دست آمده از این معیار، مقادیر دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دارای همبستگی و انطباق قابل قبولی بودند (۱۵،۲۸،۲۹). مطابق این معیار، روش موج سینماتیک نسبت به روش زمان- مساحت کارایی بهتری را نشان داد. همچنین نتایج حاصل از ارزیابی‌ها نشان داد که

ارزیابی نتایج حاصل از مدل‌های توسعه داده شده برای هر دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی با استفاده از شاخص‌های مختلف، نشان داد علی‌رغم ساده بودن توسعه مدل‌های کاملاً توزیعی مکانی دینامیک در این محیط‌ها، کارایی آن‌ها در شبیه‌سازی هیدروگراف وقایع بارش- رواناب قابل قبول است. معیار کارایی ناش- ساتکلیف که به‌طور معمول برای ارزیابی انواع مدل‌های هیدرولوژی به‌ویژه ارزیابی هیدروگراف‌های شبیه‌سازی استفاده می‌گردد کارایی مدل توسعه داده شده با هر دو روش روندیابی جریان سطحی را برای شبیه‌سازی تولید و انتقال رواناب سطحی در حوزه آبخیز سد بوستان خوب ارزیابی کرد. همچنین مقایسه چشمی هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی نشان داد که روش‌های به کار رفته رفتار هیدرولوژیکی حوزه آبخیز سد بوستان را به‌طور قابل قبولی شبیه‌سازی کرده‌اند. اگرچه اختلافاتی در بعضی از مولفه‌های هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی قابل مشاهده است که می‌تواند دلایل متعددی داشته باشد. از جمله مواردی که می‌تواند باعث این اختلافات شوند خطای موجود در داده‌های ورودی بارش، داده‌های دبی مشاهداتی مورد استفاده برای واسنجی و خطا در ساختار و فرضیات توابع و معادلات مورد استفاده می‌باشند. برای مثال برای کل حوزه آبخیز فقط دو ایستگاه بارانسنجی مجهز به بارانسنج ثابت وجود دارد که نمی‌تواند پراکنش مکانی رگبارها را بخوبی تحت پوشش قرار دهند. همچنین در این مطالعه از روش موج سینماتیک برای روندیابی انتقال جریان سطحی در حوزه آبخیز سد بوستان از سرشاخه‌های گرگانرود که مساحت نسبتاً بزرگی دارد استفاده شد. معمولاً این روش برای آبخیزهای کوچک و سطح دامنه‌ها که شیب زمین نسبتاً زیاد است و فرض برابری شیب سطح آب با شیب بستر در آنها صدق می‌کند به کار می‌رود و در مناطقی که شیب آبراهه خیلی کم است و یا در مسیریایی که وجود سازه‌های عرضی ممکن است باعث اثر پنگاب<sup>۱</sup> شود کاربرد آن توصیه نمی‌شود و معادلات موج دینامیکی ترجیح داده می‌شود (۵، ۳۴). حل روش موج دینامیکی زمان بر بوده و داده‌های بیشتری از مقاطع جریان در طول مسیر نیاز دارد که معمولاً فراهم نمی‌باشد. اگرچه حوزه آبخیز سد بوستان مساحت نسبتاً زیادی دارد اما نظر به اینکه از سرشاخه‌های گرگانرود بوده و شیب زیادی دارد؛ سازه‌های عرضی که منجر به اثر پنگاب در مسیر رودخانه شوند وجود ندارد و همچنین داده‌های کافی از مقاطع

پیکسل در نظر گرفته می‌شود که مقدار آن برای هر پیکسل بسیار ناچیز بوده و قابل صرف‌نظر است، در حالی که اثر ذخیره‌ای کل حوزه بسته به تراکم شبکه آبراهه‌ها و شکل حوزه می‌تواند یکی از دلایل بیشتر بودن دبی اوج شبیه‌سازی شده در روش زمان-مساحت باشد.

با توجه به اینکه PCRaster به‌عنوان یک محیط نرم‌افزاری توام GIS و برنامه نویسی دینامیک و با هدف تسهیل فرآیند مدل‌سازی برای متخصصان علوم زمین و محیط زیست که مهارت گسترده برنامه‌نویسی کامپیوتری ندارند طراحی شده است، کاربرد آن در این مطالعه امکان مدل‌سازی اتصال محکم<sup>۱</sup> توزیعی مکانی از طریق برقراری ارتباط بین سری‌های زمانی بارش و نقشه‌های مکانی توپوگرافی، خاک و کاربری اراضی را برای حوزه آبخیز سد بوستان که یکی از سرشاخه‌های گرگانود می‌باشد فراهم نمود (۳۳، ۱۶). افزوده شدن PCRaster به‌عنوان یک بسته الحاقی به محیط‌نامه‌نویسی سطح بالای Python قابلیت‌های آن را برای مدل‌سازی‌های عددی پیچیده توزیعی مکانی فراهم کرده است (۳۰). بنابراین پیشنهاد می‌شود با استفاده از چنین محیط‌های نرم‌افزاری، رویکرد محققان منابع طبیعی و محیط زیست کشور از صرفاً واسنجی و کاربرد مدل‌های رایج که برای شرایط جغرافیایی و داده‌های متفاوت طراحی شده‌اند به رویکرد طراحی و ارائه مدل‌های مختص شرایط جغرافیایی و داده‌های منطقه مورد مطالعه و مطابق با اهداف کاربرد مدل‌ها تغییر یابد. عبارتی یادگیری مدل‌سازی بهتر از یادگیری درباره مدل‌ها می‌باشد (۳۴).

مقایسه روش روندیابی هیدرولوژیکی زمان-مساحت با روش هیدرولوژیکی موج سینماتیک نشان داد اگرچه هر کدام از این روش‌ها در برآورد مولفه خاصی از هیدروگراف نسبت به روش دیگر مزیت نسبی و برتری دارد اما از نظر برآیند تمام مولفه‌ها نسبت به یکدیگر برتری قابل ملاحظه‌ای ندارند.

روش زمان-مساحت در خصوص پیش‌بینی حجم سیلاب و زمان تا اوج می‌تواند نتایج بسیار خوبی را ارائه نماید ولی روش موج سینماتیک حجم سیلاب را کمتر از حجم هیدروگراف مشاهداتی برآورد می‌کند. محمدی (۱۹) و قنبرآبادی (۹) نیز در مطالعات خود نشان دادند که روش موج سینماتیک حجم سیلاب را کمتر از مشاهدات برآورد می‌کند. هرچند روش موج سینماتیک در خصوص پیش‌بینی دبی اوج نسبت به روش زمان-مساحت کارایی بهتری دارد. به هر حال اختلاف بین نتایج مدل و مشاهدات را می‌توان از چند جنبه مورد بررسی قرار داد. یکی از دلایل می‌تواند مربوط به تفاوت عملکرد روش روندیابی موج سینماتیک در دامنه و رودخانه باشد. روش موج سینماتیک یک مدل هیدرولوژیکی برای روندیابی جریان است، ولی ساده‌ترین شکل از نوع جریان را در نظر می‌گیرد. یعنی جریان را در تمام سطح حوزه و کانال از نوع یکنواخت و پایدار در نظر می‌گیرد که این مسئله خود باعث بروز خطا می‌شود. دلیل بعدی می‌تواند مربوط به روش محاسبه بارش موثر باشد. برای به دست آوردن عمق رواناب در طول رگبار می‌توان از روش‌های محاسبه نفوذ همچون هورتن و گرین - امپت استفاده نمود که در اقلیم‌های خشک و نیمه خشک کارایی بهتری نسبت به سایر مدل‌های نفوذ دارند اما این روش‌ها نیازمند داده‌های دقیق خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک منطقه می‌باشند. به علت نبود چنین داده‌هایی در حوزه آبخیز سد بوستان در این مطالعه از روش مفهومی SCS استفاده گردید، که نیازمند داده‌های زیادی نمی‌باشد. از آنجایی که این روش جریان زیرقشری را محاسبه نمی‌کند کمتر بودن دبی‌های شبیه‌سازی شده و حجم سیلاب نسبت به مقادیر مشاهداتی را می‌توان به این موضوع نیز نسبت داد. البته نمی‌توان خطای موجود در داده‌های مشاهداتی دبی را که به‌عنوان ورودی توابع ارزیابی کارایی مدل‌ها استفاده می‌شوند نادیده گرفت. همچنین در روش زمان-مساحت توزیعی (مادکلارک) اثر ذخیره‌ای برای هر

## منابع

1. Alizadeh, A. 2008. Principles of applied hydrology. Publications of Ferdosi Mashhad University, 437.
2. Bhattacharya, A.K., B.M. McEnroe, H. Zhao, D. Kumar and C. Shinde. 2012. ModClark model: improvement and application. Journal of Engineering, 2(7): 100-118.
3. Bourletsikas, A., E. Baltas and M. Mimikou. 2006. Rainfall-runoff modeling for an experimental watershed of Western Greece using extended time-area method and GIS. Journal of Spatial Hydrology, 6: 1-12.
4. Bundela, D.S. 2004. Influence of digital elevation models derived from remote sensing on spatio-temporal modelling of hydrologic and erosion processes. PhD Thesis, National Soil Resources Institute, Cranfield University, 370 pp.
5. Chow, V.T., D.R. Maidment and L.W. Mays. 1988. Applied hydrology. New York: McGraw-Hill, 572 pp.
6. Clark, C.O. 1945. Storage and the unit hydrograph. ASCE Trans, 110: 1419-1446.
7. Cleveland, T.G., D.B. Thompson, X. Fang and X. He. 2008. Synthesis of unit hydrographs from a digital elevation model. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 134(2): 212-221.
8. Daneshkar Arasteh, P. 2003. Possibility of application of kinematic wave model to simulate overland flow on flood spreading plots. Pajouhesh and Sazandegi, 61: 50-56.
9. Ghanbar abadi, H. 2012. Evaluation of Kinematic wave routing method performance by GIS in Jaafar abab watershed of Golestan province. M.Sc. Thesis Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, 113 pp.
10. Govers, G. 1990. Empirical relationships on the transporting capacity of overland flow. International Association of Hydrological Sciences Publication, 189: 45-63.

11. Govers, G. 1992. Evaluation of transporting capacity formulae for overland flow. In: A. J. Parsons and A. D. Abrahams (eds.) *Overland flow: hydraulics and erosion mechanics*. London: University College London Press, 243-273.
12. Green, C.H., D.J. Parker and S.M. Tunstall. 2000. Assessment of flood control and management options. *Flood Hazard Research Center*, 124 pp.
13. Heidari, A., B. Saghafian and R. Maknoon. 2005. Flood hydrograph simulation considering input uncertainty of rainfall-runoff models. *Journal of Esteghlal*, 23(2): 93-111.
14. Henderson, F.M. 1966. *Open Channel Flow*. McMillan, New York, 522 pp.
15. Jahanbakhshasl, S., M. Rezaei Banafshe, M. Godarzi, A. Ghafari Rozbahani and N. Mahdavian. 2010. Evaluation of Taman-level method and Clarks the moment unit hydrograph for estimating the flood flow in Bazoft River of Karoon. *The Journal of Research Geography and Planning (Faculty of Environmental Sciences and Architecture)*, 41: 49-66.
16. Karssenberg, D. 2002. The value of environmental modelling languages for building distributed hydrological models. *Hydrological Processes*, 16: 2751-2766.
17. Kull, D. and A. Feldman. 1998. Evolution of Clark's unit graph method to spatially distributed runoff. *Journal of Hydrologic Engineering*. ASCE, 3(1): 9-19.
18. Liu, Y.B. and F. De Smedt. 2004. *WetSpa extension: A GIS-based hydrologic model for flood prediction and watershed management, Documentation and User Manual*. Department of Hydrology and Hydraulic Engineering. Brussels Vrije Universitei, 126 pp.
19. Mohammadi, M. 2011. *The Modeling of flood hydrograph by GIS in jafar abad watershed*. M.Sc. thesis, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, 120 pp.
20. Moore, I.D. and G.R. Foster. 1990. *Hydraulics and overland flow*. In: M. G. Anderson and T. P. Burt, (eds.) *Process studies in hillslope hydrology*. Chichester: John Wiley and Sons, 215-254.
21. Mosavinadoshani, S. and A. Vadanandemehr. 2005. *Hydrological Modeling System (HEC-HMS)*. Dibagaran Publications, 295 pp.
22. Najafi, M.R. 2003. Watershed modeling of rainfall excess transformation into runoff. *Journal of Hydrology*, 270: 273-28.
23. Najmii, M. 2006. *Engineering hydrology*. Publications of Tehran University of Science and Technology, 608 pp.
24. Parisay, Z. 2011. *Flood hazard zonation by combining Mod-Clark and HEC-RAS models in Bustan Dam Basin, Golestan Province*. M.Sc. Thesis, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, 248 pp.
25. Paudel, M., E.J. Nelson and W. Scharffenberg. 2009. Comparison of lumped and quasi-distributed Clark runoff models using the SCS curve number equation. *Journal of Hydrologic Engineering*, 14(10): 1098-1106.
26. Ponce, M. and R.H. Hawkins. 1996. Runoff Curve Number Has It Reached Maturity. *Journal Hydrologic Engineering*. January. ASCE. ISSN, 19 pp.
27. Rallison, R.E. and N. Miller. 1981. Past, Present, and Future SCS Runoff Procedure in Rainfall-Runoff Relationship, In: V.P. Singh (ed.) *Proceedings of the International Symposium on Rainfall-Runoff Modelling*, 353-364.
28. Saghafian, B., P.Y. Juhen and H. Rajaie. 2002. Runoff hydrograph simulation based on time variable isochrones technique. *Journal of Hydrology*, 261:193-203.
29. Saghafian, B., A.M.V. Lieshout and M.H. Rajaei. 2000. Distributed catchment simulation using a raster GIS. *JAG*, 2: 199- 203.
30. Schmitz, O., J. De Kok and D. Karssenberg. 2016. A software framework for process flow execution of stochastic multi-scale integrated models. *Ecological Informatics*, 32: 124-133.
31. Schulz, E.F. 1976. *Problems in applied hydrology*. Water Resource Publication, Fort Collins, Colorado, 501 pp.
32. Sharifi, M. 2006. The estimation of Curve Number using of RS and GIS. (Case Study Kameh watershed). 7<sup>th</sup> International Seminar on River Engineering, 7 pp.
33. Sheikh, V.B., A.J. Hezbi and A.R. Bahremand. 2016. Distributed Dynamic Modeling of Water Balance in the Chehelchai Watershed within A GIS Environment. *Journal of Watershed Management Research*, 6(12): 29-42.
34. Smith, R. 1999. *Fundamental Principles of Modeling and Simulation*. 1999 Computer Game Developer's Conference. San Jose, California. <https://www.modelbenders.com/papers/principles/>.
35. Sun, J. 2015. *Hydrologic and hydraulic model development for flood mitigation and routing method comparison in Soap Creek Watershed, Iowa*. MSc. thesis, University of Iowa, 138 pp.
36. Syed, A.U., A. Pouyan Nejadhashemi, S. Safferman, D. Lusch, J. Bartholic and L.J. Segerlind. 2012. A comparative analysis of Kinematic wave and SCS-UNIT hydrograph models in semi-arid watershed. XIX International Conference on Water Resources, University of Illinois at Urbana-Champaign, June, 17-22.
37. USDA-NRCS. 2009. *National Engineering Handbook*. Hydrology, 630 pp. (<https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/national/water/manage/hydrology> ).

**Vahed Berdi Sheikh<sup>1</sup>, Salime Saqqar<sup>2</sup>, Abdolreza Bahremand<sup>3</sup> and  
Chogi-Bayram Komaki<sup>4</sup>**

---

1- Associate Professor, Department of Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, (Corresponding Author: sheikh@yahoo.com)

2 and 3- M.Sc. and Associate Professor, Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

4- Assistant Professor, Department of Arid Zone Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Received: August 2, 2017                      Accepted: December 29, 2018

---

**Abstract**

This study aims to evaluate two methods of surface water routing including kinematic wave and time-area in upstream of the Bustan dam. To this end, first considering the features and application prerequisites of both methods and describing the hydraulic and hydrologic conditions within the Tamer watershed, algorithms and scripts of kinematic wave and time-area methods were developed. Then the scripts were run to simulate flow hydrograph at outlet of the watershed. The results of performance evaluation showed that Nash-Sutcliffe coefficient for kinematic wave method is 0.882 and 0.745, respectively for the calibration and validation data sets, while for the time – area method it is 0.903 and 0.748, respectively. These results showed a difference in timing of simulated and observed hydrographs especially in time to peak of hydrographs. One of the reasons for this non-compliance in hydrograph timing can be attributed to the lack of enough rain gauge stations across the watershed and errors associated with spatial distribution of rainfall on rain input maps. According to rainfall zoning map using GIS, two rainfall polygons were specified across the watershed and rainfall in each polygon was considered as uniform, but there might be a significant difference in rainfall pattern within each polygons which can be a main source of errors in timing of simulated hydrographs. In general, according to the assumptions and limitations of both models and also likely errors in rain input maps of events, performance of these surface runoff routing methods are considered suitable for simulation of outflow hydrographs. A main limitation of kinematic wave is the assumption that the hydraulic gradient is equal to the bed slope which limits its application only for small watersheds with higher slopes. In the distributed time-area method, the storage effect of pixels is very small and negligible, whereas the storage effects of whole watershed is remarkably high depending on drainage density and watershed shape factor.

**Keywords:** Distributed modeling, Flow hydrograph, Loess lands, Tamer station