

آنالیز حساسیت مولفه‌های هیدروگراف جریان به تغییر در پارامترهای روش زمان - مساحت کلارک در آبخیز محمدآباد استان گلستان

رئوف مصطفی‌زاده^{۱*}، شهناز میرزایی^۲، اباذر اسمعیلی^۳ و محسن ذبیحی^۴

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

۲. دانشجوی کارشناسی‌ارشد مهندسی آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

۳. دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

۴. دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۹/۷ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۲/۲۵ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۴/۱۸)

چکیده

کاربرد مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای کلارک به جهت نیاز به داده‌های سهل‌الوصول در آبخیزهای فاقد ایستگاه هیدرومتری از اهمیت خاصی برخوردار است. هدف تحقیق حاضر شبیه‌سازی هیدروگراف واحد جریان آبخیز محمدآباد استان گلستان با استفاده از روش زمان - مساحت و انجام آنالیز حساسیت (نسبی و مطلق) نتایج شبیه‌سازی در آبخیز مورد مطالعه است. برای تعیین تغییرات سطح حوزه نسبت به زمان تمرکز (هیستوگرام زمان-مساحت) از روش دیاگرام بی‌بعد (روش لاورنسن) استفاده شده و سپس هیدروگراف واحد لحظه‌ای با مدل کلارک برای آبخیز مذکور شبیه‌سازی شد. آنالیز حساسیت مدل کلارک با تغییر دو پارامتر زمان تمرکز و ضریب ذخیره صورت گرفته و سپس حساسیت نسبی و مطلق مدل در برآورد مولفه‌های هیدروگراف واحد جریان تعیین گردید. همچنین هیدروگراف واحد مشاهداتی سیل در آبخیز با استفاده از منحنی S محاسبه و دقت مدل مذکور در برآورد هیدروگراف واحد آبخیز با معیار نش-ساتکلیف مورد ارزیابی قرار گرفت. براساس نتایج، دقت مدل مذکور در شبیه‌سازی هیدروگراف واحد جریان ۷۱ درصد است. نتایج آنالیز حساسیت مدل نشان داد که حساسیت نسبی مدل در برآورد دبی اوج هیدروگراف واحد جریان به پارامتر ضریب ذخیره برابر ۰/۶۶- می‌باشد. همچنین حساسیت مطلق مدل به پارامتر زمان تمرکز برابر ۲/۷۶- می‌باشد. در مجموع می‌توان گفت که پارامتر حساس در برآورد دقیق زمان تا اوج، متغیر زمان تمرکز محاسباتی جریان می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: هیدروگراف واحد، حساسیت نسبی، حساسیت مطلق، هیستوگرام زمان - مساحت، آبخیز محمدآباد

مقدمه

هیدروگراف واحد، عکس العمل آبخیز به بارندگی موثر واحد با مدت D ساعت است. در صورتی که مدت زمان بارش موثر واحد به سمت صفر میل نماید هیدروگراف واحد لحظه‌ای بدست می‌آید (Salas, 2006). جهت محاسبه هیدروگراف واحد لحظه‌ای، کلارک فرض کرد که یک مخزن خطی در انتهای جریان رودخانه وجود دارد که حجم ذخیره با خروجی در آن نسبت مستقیم دارد (Clark, 1945). در این روش ابتدا منحنی زمان - مساحت آبخیز استخراج می‌شود و سپس این منحنی در یک مخزن خطی روندیابی شده و هیدروگراف واحد لحظه‌ای بدست می‌آید (Wanielista, 1997). یکی از موارد اساسی در تعیین دسته پارامترهای مناسب برای اجرای مدل‌های هیدرولوژی، داشتن اطلاعات کافی از مدل مورد استفاده و

شرایط هیدرولوژیک آبخیز مورد مطالعه است (Bahremmand and De Smedt, 2007). آنالیز حساسیت، روش شناسایی اثر تغییرات پارامترهای ورودی بر روی مولفه‌های خروجی بوده و پیش‌نیاز مدل‌سازی می‌باشد. این فرایند به منظور تعیین حساسیت مدل نسبت به تغییرات پارامترهای ورودی، مشخص کردن پارامترهایی که تغییرات آن‌ها اثر معنی‌داری بر روی متغیرهای خروجی دارند و ارزیابی میزان تغییر خروجی‌های مدل نسبت به تغییر ترکیبی از پارامترهای حساس صورت می‌گیرد (McCuen, 1973., Gan et al, 2014., Giudice and Padulano, 2016). پارامتر ورودی که بیش‌ترین تغییر را بر خروجی‌های مدل داشته باشد پارامتر حساس تلقی می‌گردد و در مقابل پارامتر غیر حساس اثری بر رفتار مدل نداشته و در فرایند مدل‌سازی ممکن اصلاح و یا حذف گردد (Zoppou, 1999). در آنالیز حساسیت دو نوع ضریب حساسیت نسبی و مطلق وجود داشته بدین ترتیب که ضریب حساسیت نسبی بدون بعد بوده و برای مقایسه

هستوگرام زمان - مساحت پارامتر زمان تمرکز و با روش بهینه‌سازی پارامتر ضریب ذخیره را محاسبه نمودند. این محققان همچنین تغییرات پارامترهای ورودی را بر تغییر مولفه‌های هیدروگراف‌های رواناب مستقیم شبیه‌سازی شده مورد ارزیابی قرار دادند و نتیجه گرفتند که نتایج به تغییر پارامتر ضریب ذخیره حساس‌تر از زمان تمرکز می‌باشد. Mostafazadeh *et al* (2009)، در پیش‌بینی هیدروگراف رواناب سطحی در آبخیز جنگلی جعفرآباد استان گلستان از مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای کلارک استفاده کردند. نتایج آن‌ها در آنالیز حساسیت پارامترهای زمان تمرکز و ضریب ذخیره نشان دهنده حساسیت خروجی‌های مدل به پارامتر زمان تمرکز می‌باشد. Adib *et al* (2011)، با بیان اینکه استفاده از ویژگی‌های هیدروگراف واحد در طراحی ساختار هیدرولیکی ضروری است از مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای کلیماتژوموفولوژی بر پایه مدل کلارک در شبیه‌سازی هیدروگراف واحد در حوزه کسلیان استفاده کردند. در آنالیز حساسیت پارامترهای ورودی مدل هیدروگراف لحظه‌ای کلارک در رودخانه پورتاکوس^۷ یونان (Yannopoulos *et al* (2013)، بیان کردند که شاخه نزولی هیدروگراف، زمان تا اوج، دبی اوج و حجم رواناب نسبت به پارامترهای ورودی حساس بودند. Walega (2014)، با بیان اهمیت کالیبراسیون پارامترهای مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای کلارک، این مدل را برای آبخیز گرابینکای^۸ لهستان اجرا کرد و نتایج آنالیز حساسیت پارامتر ورودی مدل نشان داد که مدل به تغییرات ضریب ذخیره بیش از تغییرات زمان تمرکز حساس می‌باشد. در مقایسه دو مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای کلارک و هیدروگراف واحد لحظه‌ای جغرافیایی در منطقه خشک و نیمه خشک دراقازی‌خان^۹ پاکستان (Ghumman *et al* (2014)، مدل کلارک را به‌عنوان مدل بهتر در شبیه‌سازی هیدروگراف واحد معرفی نمودند. در مطالعه‌ای (Gharun *et al* (2015)، به‌منظور پیش‌بینی عملکرد آب پس از آتش‌سوزی در یک حوضه جنگلی در جنوب شرقی استرالیا از چهار مدل رگرسیون چند متغیره غیرخطی^{۱۰}، نزدیک‌ترین همسایه^{۱۱}، رگرسیون خودکار غیرخطی مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی^{۱۲} و رگرسیون نمادی^{۱۳} استفاده کردند.

حساسیت پارامترها نسبت به یکدیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد و این در حالیست که ضریب حساسیت مطلق میزان تغییر در خروجی به ازای تغییر یک واحدی پارامتر ورودی است (Kumar *et al*, 2002).

در تحقیقی به منظور توسعه مدل هیدروگراف واحد مصنوعی توزیعی در ایالت ویرجینیا (1997)، Kilgore نتیجه گرفت که تغییر بازه‌های زمانی مورد استفاده در شبیه‌سازی جریان تاثیر معنی‌داری بر شکل و مولفه‌های هیدروگراف جریان ندارد. (1998)، Alsamadi با هدف آنالیز حساسیت مدل کلارک نسبت به تغییرات مکانی بارش موثر در آبخیز اوول ران^۱ در ایالت ویرجینیا به این نتیجه رسید که نتایج مدل به صورت معنی‌داری به تغییر پارامتر مورد بررسی وابسته است. آنالیز حساسیت هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیک بر پایه مدل کلارک در آبخیز گداواری^۲ کشور هندوستان با مساحت ۸۲۰ کیلومترمربع توسط (2002) Kumar *et al* انجام گرفت و پارامترهای طول آبراهه با بالاترین رتبه و فاکتور سرعت دینامیکی جریان حساس‌ترین پارامترها در برآورد دبی اوج جریان معرفی شدند. (2003) Jain and Sinha، پس از استخراج هیدروگراف واحد از روش ژئومورفولوژیک در آبخیز باگماتی^۳ کشور نپال، به این نتیجه رسیدند که مقادیر متفاوت سرعت جریان در آبراهه بر مولفه‌های هیدروگراف واحد جریان شامل دبی اوج، زمان تا اوج و زمان پایه موثر است. در حوزه آجی^۴ در هند، (2002) Kumar *et al*، با استفاده از ویژگی‌های ژئومورفولوژیک مدل هیدروگراف لحظه‌ای کلارک و نش را با ۱۰ رویداد همزمان بارش و رواناب شبیه‌سازی کرده و پارامتر سرعت جریان و طول آبراهه را پارامتر حساس معرفی کردند. (2007) Permula *et al*، پس از توسعه مدل مخزن خطی بیان نمودند که جهت جلوگیری از خطای برآورد زیاد دبی اوج در این مدل باید دقت نمود که پارامتر زمان تاخیر در محاسبات ثابت در نظر گرفته شود. (2007) Crobeddu *et al*، در تحقیق خود پس از بهبود روش استدلالی در آبخیز وردوپراگ^۵ کشور کانادا پارامتر زمان تمرکز را به‌عنوان حساس‌ترین پارامتر مدل مذکور در برآورد خصوصیات هیدروگراف جریان معرفی کردند. Ahmad *et al* (2009)، در آبخیز کاهاه^۶ در کشور پاکستان با هدف تخمین پارامترهای مدل کلارک و توسعه این مدل با استفاده از

7. Portaikos

8. Grabinka

9. Dera Ghazi (DG) Khan

10. Non-Linear Multivariate Regression

11. K-Nearest Neighbor

12. Non-linear Autoregressive based Artificial Neural Networks

13. Symbolic Regression

1. Owl Run

2. Godavari

3. Baghmata

4. Ajay

5. Verdun borough

6. Kaha

هم‌چنین تعیین میزان تاثیرپذیری مؤلفه‌های هیدروگراف واحد آبخیز محمدآباد است. تعیین حساسیت نسبی و مطلق مولفه‌های هیدروگراف جریان نسبت به تغییر در پارامترهای مدل کلارک نیز از اهداف قابل توجه این پژوهش می‌باشد. نتایج آنالیز حساسیت پارامترهای ورودی در تشخیص پارامتر حساس می‌تواند در افزایش دقت محاسبه پارامتر حساس و نیز در گسترش کاربرد مدل زمان - مساحت کلارک به‌عنوان یکی از ابزارهای تولید آمار در مطالعات هیدرولوژیک مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

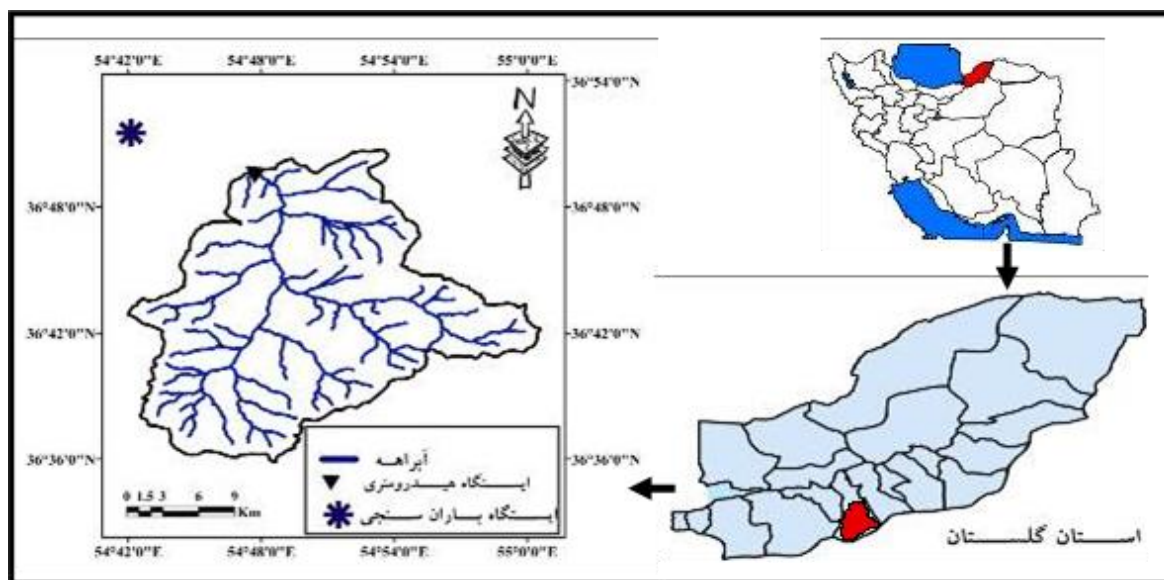
مشخصات منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز محمدآباد از زیرحوزه‌های گرگانرود با مساحتی در حدود ۴۰۰ کیلومترمربع و رودخانه‌ای به طول ۳۰/۵ کیلومتر در ۳۰ کیلومتری شرق شهرستان گرگان قرار دارد و در محدوده‌ی جغرافیایی ۴۲° ۴۸' تا ۵۲° ۴۸' طول شرقی و ۳۶° ۳۹' تا ۵۰° ۳۶' عرض شمالی واقع شده است. میانگین دمای سالانه ۱۶/۵ درجه سانتی‌گراد، متوسط بارش سالانه ۵۲۹/۶۶ میلی‌متر و ارتفاع متوسط منطقه ۱۷۶۵ متر است. بخش قابل توجهی از حوزه را مناطق کوهستانی پوشیده از جنگل با شیب زیاد تشکیل داده است. آمار دبی ساعتی ایستگاه هیدرومتری سرمو واقع در خروجی آبخیز و آمار ساعتی بارش ایستگاه باران‌سنجی فاضل‌آباد به عنوان نزدیک‌ترین ایستگاه ثابت به آبخیز در تجزیه و تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. شکل (۱)، موقعیت منطقه مورد مطالعه را در استان گلستان و ایران نمایش می‌دهد.

نتایج آنالیز حساسیت آن‌ها نشان‌دهنده حساسیت مدل رگرسیون نمادین به شاخص تفاوت پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI)^۱ نسبت به بارش می‌باشد. هم‌چنین Sadeghi et al (2015)، در حوضه گلازچای استان آذربایجان غربی به‌منظور بررسی تغییرپذیری هیدروگراف شبیه‌سازی شده از مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای کلارک استفاده کردند. آن‌ها هیستوگرام زمان-مساحت را با روش‌های پروفیل آبراهه، هیستوگرام زمان-مساحت بی‌بعد، سرعت متوسط و توزیع مکانی زمان حرکت بدست آوردند و بیان کردند که روش هیستوگرام زمان-مساحت مکانی عملکرد بهتری با توجه به شاخص‌های آماری دارد. Asadi et al (2016)، با هدف بررسی اثر ضریب ذخیره در تخمین آب‌نمود خروجی از روش زمان-مساحت و هیدروگراف واحد لحظه‌ای کلارک در آبخیز کسلیان استفاده کردند که بررسی آن‌ها نشان دهنده اثر ضریب ذخیره در روندیابی سیلاب بوده است.

افزایش اهمیت مدیریت آبخیز در طی سال‌های اخیر بخصوص مدیریت منابع آبی، منجر به توسعه مدل‌های فراوانی در زمینه مدل‌سازی بارش - رواناب و شبیه‌سازی هیدروگراف جریان شده است که این امر به‌خصوص در حوزه‌های فاقد آمار حائز اهمیت خواهد بود. یکی از ساده‌ترین و کارایی‌ترین مدل‌ها در زمینه شبیه‌سازی هیدروگراف واحد آبخیز، مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای کلارک می‌باشد که به‌دلیل سادگی و پارامترهای کم ورودی در آبخیزهای فاقد آمار به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. هدف این تحقیق آنالیز حساسیت پارامترهای مدل کلارک شامل زمان تمرکز و ضریب ذخیره و

1. Normalized Difference Vegetation Index



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان گلستان و ایران

روش تحقیق

پارامترهای فیزیوگرافی مورد نیاز برای محاسبه ضریب ذخیره از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ سازمان جغرافیایی آبخیز محمدآباد استخراج شدند. با تلفیق نقشه کاربری اراضی و گروه‌های هیدرولوژیک خاک و با در نظر گرفتن وضعیت هیدرولوژیک حوزه، شماره منحنی وزنی محاسبه گردید. در ادامه هیدروگراف واحد مشاهداتی آبخیز با استفاده از ۸ رویداد بارش و دبی متناظر به کمک منحنی S و با در نظر گرفتن مدت بارش موثر هر رویداد تهیه گردید. هم‌چنین هیدروگراف واحد لحظه‌ای با روش زمان - مساحت کلارک نیز برای آبخیز مذکور شبیه‌سازی شد. بنابراین برای تعیین تغییرات سطح حوزه نسبت به زمان تمرکز از روش دیاگرام بی‌بعد (روش لاورنسن^۱) استفاده شد (Singh, 1988). سپس با استفاده از فرمول SCS (روابط ۱ تا ۳) زمان تاخیر آبخیز بدست آمد و دیاگرام بدون بعد دارای بعد زمان گردید (Singh, 1988., Noorbakhsh et al, 2005).

$$T_{lag} = \frac{2.587L^{0.8}(S+1)^{0.7}}{1900(Y)^{0.5}} \quad (\text{رابطه ۱})$$

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

$$T_c = 1.67T_{lag} \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در آن، T_{lag} زمان تاخیر (ساعت)، L طول آبراهه اصلی (متر)، Y شیب متوسط حوزه (درصد)، S پتانسیل ذخیره و CN شماره منحنی می‌باشند. با ضرب نمودن داده‌های مربوط به مشخصات زمان-مساحت حوضه در عمق بارش، منحنی زمان - رواناب سطحی (هیدروگراف) با استفاده از رابطه (۴) محاسبه شد (Clark, 1945).

$$I_t = 0.278 \frac{A_t}{\Delta t} \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در آن، I_t ، دبی ورودی در انتهای دوره Δt (مترمکعب در ثانیه)، A_t مساحت مشارکت‌کننده در رواناب (کیلومتر مربع) می‌باشد. در ادامه با فرض ثابت بودن دبی ورودی در دوره زمانی Δt ، در هر دوره زمانی t ساعته، مقدار خروجی O_t با استفاده از رابطه (۵) بدست آمد.

$$O_t = CI_t + (1-C)O_{t-1} \quad (\text{رابطه ۵})$$

که در آن ضریب C ، با استفاده از رابطه (۶) و ضریب ذخیره K (دارای بعد زمان) برآورد شد.

$$C = 2\Delta t / 2K + \Delta t \quad (\text{رابطه ۶})$$

برای تعیین مقدار ضریب ذخیره K روش لینزلی (رابطه

۷) مورد استفاده قرار گرفت (Safavi, 2009).

$$K = \left(bL\sqrt{A}/\sqrt{S} \right) \quad (\text{رابطه ۷})$$

که در آن، K بر حسب ساعت، L طول رودخانه اصلی (کیلومتر)، A مساحت حوزه (کیلومتر مربع)، S شیب متوسط آبراهه اصلی و b ضریب متغیر از ۰/۱۵ تا ۰/۳ می‌باشد. دقت مدل مذکور در برآورد هیدروگراف واحد آبخیز مورد مطالعه با معیار نش-ساتکلیف (رابطه ۸) و شاخص تطابق^۲ (رابطه ۹) مورد ارزیابی قرار گرفت (Nash and Sutcliffe, 1970., Willmot, 1981).

$$C_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{Si} - Q_{Oi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{Oi} - \bar{Q}_O)^2} \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{Oi} - Q_{Si})^2}{\sum_{i=1}^n (|Q_{Si} - \bar{Q}_O| + |Q_{Oi} - \bar{Q}_O|)^2}$$

که در آن‌ها، Q_{Si} مقادیر دبی شبیه‌سازی شده، Q_{Oi} مقادیر دبی مشاهداتی، \bar{Q}_O میانگین دبی‌های مشاهداتی و n تعداد مشاهدات است. در تطابق کامل شبیه‌سازی، مقدار عددی شاخص نش-ساتکلیف برابر یک و در بروز خطا مقدار آن به سمت منفی بی‌نهایت میل می‌کند. شاخص تطابق نیز در مقدار عددی یک نشان‌دهنده تطابق کامل شبیه‌سازی بوده و در مقدار عددی صفر این شاخص میزان خطا بیش‌ترین مقدار است.

آنالیز حساسیت مدل با دو پارامتر زمان تمرکز و ضریب ذخیره در مدل کلارک انجام شد. در این مطالعه برای انجام آنالیز حساسیت از روش تغییر یک پارامتر در هر بار^۳ (OTA) و ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترها استفاده شده است (Alsamadi, 1998., Kumar et al, 2002). دامنه تغییرات پارامترهای مورد بررسی بر اساس تعیین حساسیت نسبی و مطلق به میزان تغییر یک درصدی و تغییر یک واحدی در پارامترهای روش زمان - مساحت کلارک انتخاب شده است. برای تعیین میزان ضرایب حساسیت مدل از روابط (۱۰) و (۱۱) استفاده شد (Kumar et al, 2002).

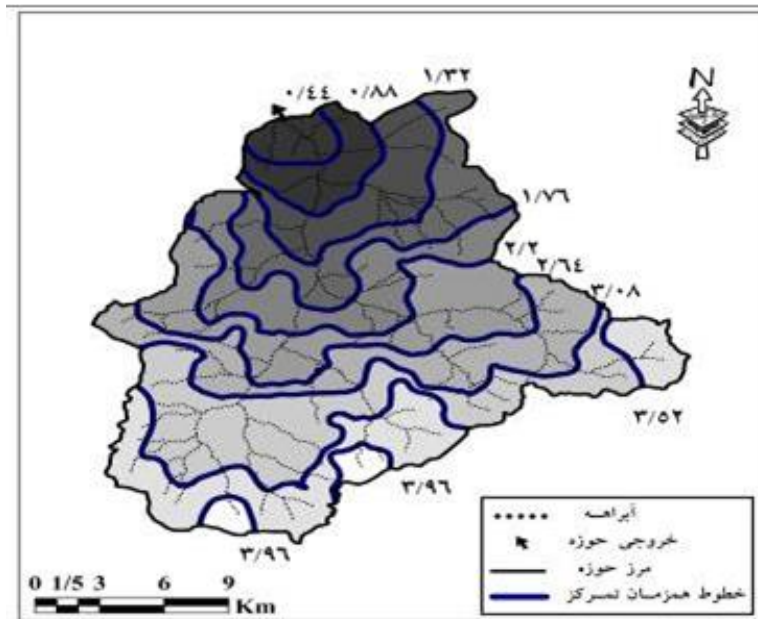
$$S = \frac{\partial O}{\partial P} = \frac{O_2 - O_1}{P_2 - P_1} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

$$S_r = \frac{\partial O}{\partial P} \frac{P}{O} = \frac{O_2 - O_1}{P_2 - P_1} \left(\frac{P}{O} \right) \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

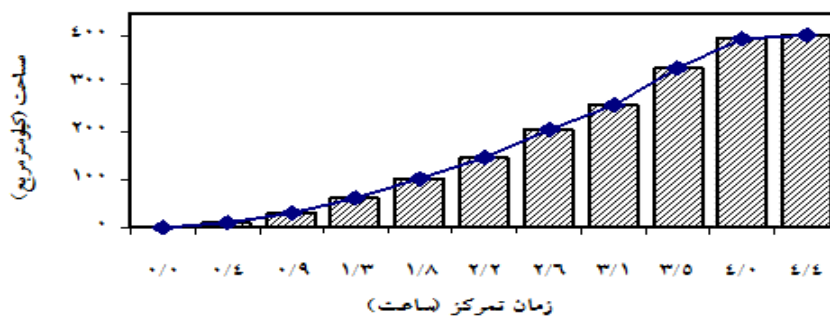
نتایج و بحث

نقشه خطوط همزمان تمرکز و نمودار زمان تمرکز- مساحت حوضه آبخیز محمدآباد با روش دیاگرام بی‌بعد در شکل‌های (۲) و (۳) نشان داده شده است. همچنین هیدروگراف واحد مشاهداتی و محاسباتی آبخیز مورد مطالعه در شکل (۴) ارائه شده است.

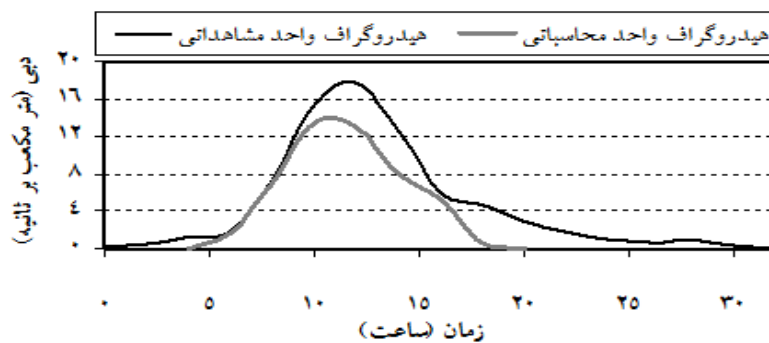
که در آن، S ضریب حساسیت مطلق (میزان تغییر مطلق در خروجی مدل به ازای تغییر یک واحد در پارامتر ورودی)، S_r ضریب حساسیت نسبی (میزان تغییر در خروجی مدل به ازای تغییر یک درصدی در پارامتر ورودی)، O میانگین مقادیر خروجی مدل (O_1 و O_2) و همچنین P میانگین مقادیر ورودی مدل (P_1 و P_2) هستند.



شکل ۲- نقشه خطوط همزمان تمرکز آبخیز (ساعت) محمدآباد



شکل ۳- نمودار زمان تمرکز- مساحت حوضه آبخیز محمدآباد

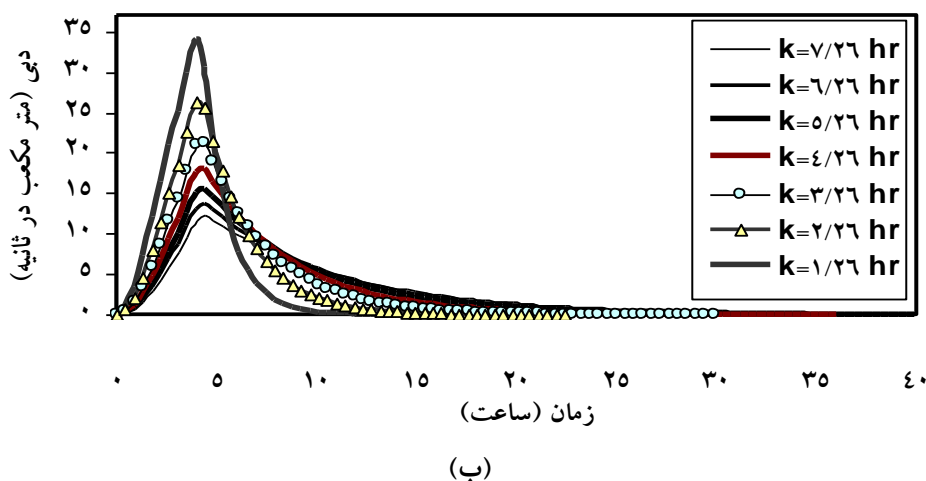
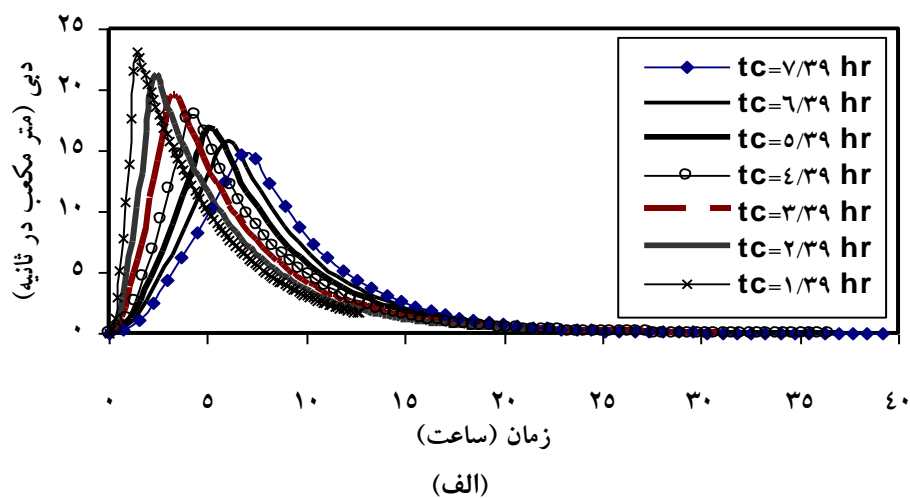


شکل ۴- هیدروگراف واحد مشاهداتی و محاسباتی آبخیز محمدآباد

ساختاری ساده است. همچنین در برآورد پارامترهای مدل شامل زمان تمرکز، ضریب ذخیره و استخراج مساحت‌های همزمان تمرکز، خصوصا در مناطق بدون آمار از فرمول‌های تجربی استفاده می‌شود که در مواردی باعث بروز خطا در نتایج می‌گردد. از طرفی خصوصیات خاک، کاربری اراضی و نیز جزئیات فیزیوگرافی آبخیز در مدل کلارک در نظر گرفته نمی‌شود که می‌تواند جز عوامل اصلی بروز خطا در نتایج باشد. در این راستا، Mostafazadeh *et al* (2009)، نیز عوامل مذکور را از دلایل بروز خطا در مدل‌سازی جریان توسط مدل کلارک در استان گلستان ذکر نموده‌اند.

نتایج شبیه‌سازی در هر بار اجرای مدل به منظور انجام آنالیز حساسیت در جدول (۱) نشان داده شده است. در شکل (۵) نتایج شبیه‌سازی هیدرولوگراف واحد جریان در فرایند انجام آنالیز حساسیت نشان داده شده است.

با توجه به شکل (۴) و همچنین مقدار عددی معیار نش-ساتکلیف به میزان ۷۱ درصد و مقدار عددی شاخص تطابق به میزان ۹۱ درصد می‌توان گفت که مدل توانایی شبیه‌سازی هیدروگراف واحد سیل در آبخیز محمدآباد را دارد. معمولا مدل‌سازی جریان در مقیاس‌های زمانی بزرگتر (روزانه و ماهانه) به دلیل اثرات تجمعی فرآیندهای نفوذ و تولید رواناب دارای دقت بالاتری بوده، در حالی که پیش‌بینی جریان سیل در مقیاس ساعتی معمولا دارای خطا است که با توجه به نتایج مطالعات انجام شده در خصوص مدل‌های مبتنی بر هیدروگراف واحد در حوضه‌های پرشیب مناطق مختلف مانند مطالعات Sadeghi and Asadi *et al* (2009)، Dehghani (2006)، Poor Hajizadeh *et al* (2010) می‌توان گفت این مقدار خطا در نتایج پژوهش حاضر نسبتا قابل قبول می‌باشد. در خصوص منابع بروز خطا در نتایج می‌توان گفت که مدل بکار گرفته شده با استفاده از مفهوم خطوط همزمان تمرکز و مساحت‌های تولید رواناب دارای



شکل ۵- حساسیت نتایج مدل کلارک نسبت به تغییرات پارامتر زمان تمرکز (الف) و ضریب ذخیره (ب)

جدول ۱- تغییرات مقادیر مولفه‌های هیدروگراف واحد آبخیز محمدآباد در فرایند آنالیز حساسیت

پارامتر	مقدار	دبی اوج (متر مکعب در ثانیه)	زمان تا اوج (ساعت)	زمان پایه (ساعت)
زمان تمرکز (ساعت)	۷/۳۹	۱۴/۶۶	۶/۶۵	۳۹/۱۷
	۶/۳۹	۱۵/۵۴	۵/۷۵	۳۸/۳۴
	۵/۳۹	۱۶/۷۰	۵/۳۹	۳۷/۱۹
	۴/۳۹	۱۸/۰۳	۴/۳۹	۳۶/۴۴
	۳/۳۹	۱۹/۵۲	۳/۳۹	۳۰/۸۵
	۲/۳۹	۲۱/۲۰	۲/۳۹	۲۱/۷۵
	۱/۳۹	۲۳/۰۸	۱/۳۹	۱۲/۶۵
پایه (ساعت)	۷/۲۶	۱۲/۲۵	۴/۳۹	۳۹/۹۵
	۶/۲۶	۱۳/۷۳	۴/۳۹	۳۹/۹۵
	۵/۲۶	۱۵/۶۱	۴/۳۹	۳۹/۹۵
	۴/۲۶	۱۸/۰۳	۴/۳۹	۳۶/۰۰
	۳/۲۶	۲۱/۲۵	۴/۳۹	۲۹/۸۵
	۲/۲۶	۲۶/۲۸	۳/۹۵	۲۲/۳۹
	۱/۲۶	۳۴/۰۱	۳/۹۵	۱۴/۴۹

گیاهی، سازند زمین شناسی، خصوصیات خاک و فیزیوگرافی آبخیز است، لذا پارامتر ضریب ذخیره ویژگی‌های فروکش جریان سیل (شاخه نزولی) را کنترل می‌کند. به عبارتی میزان ضریب ذخیره به تخلیه جریان از حوزه و تداوم سیل مربوط می‌شود که برآورد دقیق آن می‌تواند به دقت مدل در شبیه‌سازی شاخه نزولی جریان منجر گردد. نتایج محاسبه ضرایب حساسیت نسبی و مطلق با استفاده از روابط (۱۰) و (۱۱) در جدول (۲) ارائه شده است.

بر اساس نتایج شکل (۵)، می‌توان گفت که تغییر در مقدار زمان تمرکز همزمان بر دو مولفه دبی اوج و زمان تا اوج هیدروگراف تأثیر می‌گذارد. با افزایش زمان تمرکز، مقدار دبی اوج کاهش یافته و نیز زمان رسیدن به اوج هیدروگراف افزایش می‌یابد.

نتایج تغییر در پارامتر ضریب ذخیره نشان می‌دهد که مولفه اوج هیدروگراف و زمان پایه جریان بیش‌تر تغییر می‌یابد. از آن‌جا که خصوصیات ضریب ذخیره آبخیز متأثر از نوع پوشش

جدول ۲- مقادیر ضریب حساسیت نسبی و مطلق پارامترهای مدل کلارک به ازای هر یک از مولفه‌های هیدروگراف واحد جریان

پارامتر	مقدار عددی (ساعت)	ضریب حساسیت نسبی		ضریب حساسیت مطلق	
		دبی اوج	زمان تا اوج	دبی اوج	زمان تا اوج
زمان تمرکز	۴/۳۹	- ۰/۳۴	۱/۰۰	۱/۳۳ -	۱/۰۰
ضریب ذخیره	۴/۲۶	- ۰/۶۶	۰/۰۰	۲/۴۳ -	۱/۲۱

یک راستا است. هم‌چنین می‌توان گفت که در افزایش یک واحدی پارامترهای مدل کلارک، دبی اوج هیدروگراف کاهش خواهد یافت.

نتیجه‌گیری

استفاده از مدل‌هایی با تعداد پارامترهای ورودی اندک همواره مورد توجه هیدرولوژیست‌ها بوده است. بر اساس روش تحقیق

از جدول (۲)، می‌توان استنباط نمود که تغییرات ضریب ذخیره بیش‌ترین تأثیر را بر دو مولفه دبی اوج و زمان پایه هیدروگراف داشته است که با نتایج کومار و همکاران، ۲۰۰۲ در مقایسه ضرایب حساسیت نسبی پارامترها و معرفی پارامتر حساس همخوانی دارد. این در حالی است که در برآورد بهتر زمان تا اوج هیدروگراف، محاسبه دقیق پارامتر زمان تمرکز اهمیت بیش‌تری دارد که با نتایج کروبدو و همکاران، ۲۰۰۷ در

در مجموع می‌توان گفت که در برآورد صحیح دبی اوج و زمان تا اوج هیدروگراف جریان، به ترتیب محاسبه ضریب ذخیره و زمان تمرکز از اهمیت بیش‌تری برخوردار هستند. با توجه به توسعه مدل در زمینه شبیه‌سازی هیدروگراف واحد و پارامترهای ورودی متعدد، آنالیز حساسیت پارامترهای ورودی می‌تواند در توسعه استفاده از این مدل‌ها مد نظر قرار گیرد. البته بایستی در نظر داشت که در مدل‌هایی با پارامتر ورودی متعدد ممکن است هر پارامتر ورودی موثر بر روی مولفه خروجی، تحت تأثیر پارامتر دیگری باشد که در این صورت آنالیز حساسیت نیازمند دقت زیادی می‌باشد. با توجه به اینکه پارامترهای ورودی مدل با استفاده از اطلاعات فیزیوگرافی و سهل الوصول به دست می‌آید، می‌توان در حوضه‌های مجاور با تشابه خصوصیات فیزیوگرافی، خاک و کاربری اراضی از مدل مذکور استفاده نمود. هم‌چنین روش مذکور می‌تواند در حوضه‌های آبخیز زوجی (Paired Catchment) مورد ارزیابی قرار گیرد. از طرفی با برقراری ارتباط بین خروجی حوضه و ویژگی‌های یک حوضه آبخیز، در حوضه‌هایی که دارای ویژگی‌های مشابه می‌باشند می‌توان از نتایج یک حوضه در حوضه مشابه استفاده نمود (Bardossy, Zegre et al, 2010., Poor Hajizadeh et al 2009). بنابراین آنالیز حساسیت پارامترهای ورودی روش زمان-مساحت کلارک نیز می‌تواند در توسعه این روش به‌عنوان ابزار مفیدی که در تولید آمار هیدرومتری در آبخیزهای فاقد آمار مورد استفاده می‌باشد مفید واقع شود. علاوه بر این تحلیل نتایج آنالیز حساسیت مدل مذکور می‌تواند در فرایند کالیبراسیون مدل و افزایش دقت مدل در برآورد هیدروگراف سیل مورد استفاده قرار گیرد.

ذکر شده، ابتدا خطوط همزمان تمرکز و هیستوگرام زمان - مساحت آبخیز محمدآباد با استفاده از روش دیاگرام بی‌بعد (لاورنسن) تهیه شدند. سپس مدل کلارک اجرا شده و هیدروگراف واحد لحظه‌ای آبخیز شبیه‌سازی گردید. در ادامه دقت پارامترهای زمان تمرکز و ضریب ذخیره در مدل مورد آنالیز حساسیت قرار گرفتند و مقادیر مولفه‌های هیدروگراف واحد آبخیز نسبت به تغییرات پارامترها محاسبه شدند. در نهایت ضرایب حساسیت نسبی و مطلق پارامترهای مدل تعیین گردیدند. نتایج ارزیابی کارایی مدل حاکی از دقت مناسب روش دیاگرام بی‌بعد در استخراج خطوط همزمان تمرکز است. بر اساس نتایج تحقیق، مقدار معیار کارایی نش-ساتکلیف و شاخص تطابق مدل در برآورد هیدروگراف واحد آبخیز به ترتیب به میزان ۷۱ درصد و ۹۱ درصد حاکی از دقت بالای مدل در شبیه‌سازی جریان در این تحقیق است. از نتایج آنالیز حساسیت، می‌توان استنباط نمود که تمامی مولفه‌های هیدروگراف از تغییر زمان تمرکز متأثر خواهند شد، این در حالی است که تغییر ضریب ذخیره بیش‌ترین تأثیر را بر دبی اوج و زمان پایه خواهد گذاشت. از آنجا که ضرایب حساسیت نسبی بدون بعد هستند می‌توان با استفاده از آن حساسیت پارامترها را نسبت به یکدیگر مورد ارزیابی قرار داد، در حالی که واحد ضرایب حساسیت مطلق با واحد خروجی مدل به ازای پارامتر مورد نظر یکسان است. طبق نتایج می‌توان استنباط نمود که در برآورد دبی اوج و زمان پایه هیدروگراف، پارامتر ضریب ذخیره از پارامتر زمان تمرکز حساس‌تر است و در محاسبه آن به منظور برآورد صحیح هیدروگراف جریان، دقت بیش‌تری لازم است. در حالی که در برآورد بهتر زمان تا اوج هیدروگراف، محاسبه دقیق پارامتر زمان تمرکز اهمیت بیش‌تری دارد.

REFERENCES

- Adib, A., Salarijazi, M., Mahmoodian Shooshtari, M., and Mohammad Akhondali, A. (2011). Comparison between characteristics of geomorphoclimatic instantaneous unit hydrograph be produced by GCIUH based Clark model and Clark IUH model. *Marine Science and Technology*, 19(2), 201-209.
- Ahmad, M.M., Ghumman, A.R., and Ahmad, S. (2009). Estimation of Clark's instantaneous unit hydrograph parameters and development of direct surface runoff hydrograph. *Journal of Water Resources Management*, DOI 10.1007/s11269-008-9388-8.
- Al-Smadi, M. (1998). Incorporating spatial and temporal variation of watershed response in a GIS-based hydrologic model, M.Sc Thesis in Biological Systems Engineering, Virginia, Blacksburg, 148p.
- Asadi, H., Moradi, H., and Sadeghi, S.H. (2016). The effect of storage coefficient in flood routing, a case study of kasilian watershed, mazandaran province. *International Bulletin of Water Resources & Development*, IV(01), 23-33. (In Farsi)
- Asadi, H., Moradi, H.R., Telvari, A.R., and Sadeghi, S.H.R. (2010). Evaluating methods of storage coefficient of Clark's Instantaneous Unit Hydrograph in simulation of flood unit hydrograph. *Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, Water and Soil Science*, 14(53), 41-50. (In Farsi)
- Bahreman, A., and De Smedt, F. (2007). Distributed hydrological modeling and sensitivity analysis in torysa watershed, slovakia. water resources management. *Springer Science*, Doi: 10.1007/s11269-007-9168-x.

- Bardossy, A. (2007). Calibration of hydrological model parameters for ungauged catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 703-710.
- Clark, C.O. (1945). Storage and the unit hydrograph. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 110, 1419-1446.
- Crobeddu, E., Bennis, S., and Rhoulane, S. (2007). Improved rational hydrograph method. *Journal of Hydrology*, 338, 63-72.
- Gan, Y., Duan, Q., Gong, W., Tong, Ch., Sun, Y., Chu, W., Ye, A., Miao, C., and Di, Zh. (2014). A comprehensive evaluation of various sensitivity analysis methods: A case study with a hydrological model. *Environmental Modelling & Software*, 51, 269-285.
- Gharun, M., Azmi, M., and Adams, M.A. (2015). Short-term forecasting of water yield from forested catchments after bushfire: A case study from Southeast Australia. *Water*, 7, 599-614.
- Ghumman, A.R., Khaled, Kh., Hashmi, H.N., and Ahmad, M.M. (2014). Comparison of clark and geographical instantaneous unit hydrograph models for arid and semi arid regions. *International Journal of Water Resources and Arid Environments*, 3(1), 43-50
- Giudice, G.D., and Padulano, R. (2016). Sensitivity analysis and calibration of a rainfall-runoff model with the combined use of EPA-SWMM and genetic algorithm. *Acta Geophysica*, 64(5), 1755-1778.
- Jain, V., and Sinha, R. (2003). Derivation of unit hydrograph from GIUH analysis for a Himalayan river. *Journal of Water Resources Management*, 17, 355-375.
- Kilgore, J. L. (1997). Development and evaluation of a GIS-based spatially distributed unit hydrograph model. M.Sc Thesis in Biological Systems Engineering Dept, Virginia Tech, Blacksburg.
- Kumar, R., Chatterjee, C., Lohani, A.K., and Kumar, S. (2004). GIUH based Clark and Nash models for runoff estimation for an ungauged basin and their uncertainty analysis. *International Journal of River Basin Management*, 2(4), 281-290.
- Kumar, R., Chatterjee, C., Lohani, A.K., Kumar, S., and Singh, R.D. (2002). Sensitivity analysis of the GIUH based Clark model for a catchment. *Water Resources Management*, 16, 263-278.
- McCuen, R.H. (1973). The role of sensitivity analysis in hydrologic modeling. *Journal of Hydrology*, 18, 37-53.
- Mostafazadeh, R., Bahreman, A., and Sadaddin, A. (2009). Simulating the direct runoff hydrograph using Clark instantaneous unit hydrograph (Case study: Jafar-Abad Watershed, Golestan Province). *Water and Soil Conservation*, 16(3), 105-122. (In Farsi)
- Nash, J. E., and Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290.
- Noorbakhsh, M.E., Rahnama, M.B., and Montazeri, S. (2005). Estimation of IUH with Clark's method using GIS techniques. *Journal of Applied Sciences*, 5(3), 455-458.
- Perumal, M., Moramarco, T., and Melone, F. (2007). A caution about the multilinear discrete lag-cascade model for flood routing. *Journal of Hydrology*, 338, 308-314.
- Poor Hajizadeh, A., Mohseni saravi, M., Varvani, J., and Vafakhah, M. (2009). Relationship between NASH Instantance Unit Hydrograph parameters and Flow physiographical characteristics in some selection watersheds iran. *Watershed Management Researches (Pajouhesh & Sazandegi)*, 83, 21-29. (In Farsi)
- Sadeghi, S.H.R., and Dehghani, M. (2006). Efficacy of estimation methods for storage coefficient of instantaneous unit hydrograph in flood unit hydrograph regeneration. *Agricultural Sciences and Natural Resources*, 13(3), 152-160. (In Farsi)
- Sadeghi, S.H.R., Mostafazadeh, R., and Sadoddin, A. (2015). Changeability of simulated hydrograph from a steep watershed resulted from applying Clark's IUH and different time-area histograms. *Environmental Earth Sciences*, 74, 3629-3643.
- Safavi, H.R. (2009). *Engineering Hydrology*. Arkan Danesh Publishing Company, Isfahan, Iran. 620p. (In Farsi)
- Salas, J.D. (2006). Notes on Unit Hydrographs. Colorado State University. Department of Civil and Environmental Engineering. CE 322. 25p.
- Singh, V. P. (1988). *Hydrologic Systems: Rainfall-Runoff Modeling*. vol. 1. Englewood Cliffs, N.J: Prentice Hall.
- Walega, A. (2014). The importance of the objective functions and flexibility on calibration of parameters of Clark instantaneous unit hydrograph. *Geomatics, Landmanagement and Landscape*, 2, 75-85.
- Wanielista, M.P. (1997). *Hydrology Water Quantity and Water Quality Control*. University of Central Florida. 565p.
- Willmot, C.J. (1981). On the validation of models. *Physical Geography*, 2, 184-194.
- Yannopoulos, S., Christidis, Ch., Loukas, A., and Giannopoulou, I. (2013). A sensitivity analysis on the parameters of clark instantaneous unit hydrograph. *8th International Conference of EWRA "Water Resources Management in an Interdisciplinary and Changing Context"*. January, 1055-1065.
- Zegre, N., Skaugset, A.E., Som, N.A., and McDonnell, J.J. (2010). In lieu of the paired catchment approach: Hydrologic model change detection at the catchment scale. *Water Resources Research*, 46, W11544, 1-20.
- Zoppou, Ch. (1999). Review of storm water models. *CSIRO Land and Water Canberra Technical report*, 52/99.