Journal of Watershed Engineering and Management
Volume 9, Issue 3, 2017, Pages 262-275

نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز
جلد ۹، شماره ۳، ۱۳۹۶، صفحات ۲۶۲-۲۷۵

تحلیل حساسیت مدل مبتنی بر موج سینماتیک KW–GIUH نسبت به روش‌های مختلف برآورد نفوذ و ضرایب زبری

علیرضا شکوهی*[1]، اصغر عزیزیان[2]، راضیه جماعت[3] و وی‌جی سینگ[4]

[1] استاد گروه مهندسی آب، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، [2] استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، [3] دانش‌آموخته کارشناسی ارشد رشته مهندسی مدیریت و منابع آب، موسسه آموزش عالی صائب، ابهر و [4] استاد گروه بیوتکنولوژی و مهندسی کشاورزی، دانشگاه A&M تگزاس، کالج استیشن، امریکا

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۷/۱۰

چکیده

پیش‌بینی صحیح سیلاب همواره یکی از چالش‌های اساسی محققین و مهندسین بوده و به همین خاطر در طول دهه-های اخیر مدل‌های ریاضی متعددی برای این منظور توسعه داده شده است. برای مدل‌سازی مناسب سیلاب و رواناب در یک حوضه، تخمین صحیح میزان نفوذ آب در خاک عاملی مهم بشمار می‌آید. تاکنون مدل‌های ریاضی و تجربی زیادی برای محاسبه میزان نفوذ آب در خاک و بارش خالص (بارش منجربه تولید رواناب) ارائه شده که هر کدام دارای مزایا و معایب خاص خود می‌باشند. در پژوهش حاضر به‌جای ارزیابی منفرد روش‌های محاسبه نفوذ به ارزیابی چهار روش مختلف برآورد نفوذ یعنی شاخص Ø، هورتون، گرین-امپت و SCS بر عملکرد مدل ژئومورفولوژیکی مبتنی بر موج سینماتیک KW-GIUH پرداخته شده است. همچنین، تحلیل حساسیت عملکرد مدل KW-GIUH نسبت به روش‌های مختلف برآورد نفوذ و ضرایب زبری جریان دامنه‌ای و آبراهه‌ای از دیگر اهداف این پژوهش می‌باشد. نتایج حاصل از ارزیابی هیدروگراف سیلاب شبیه‌سازی شده با استفاده از هر روش و داده‌های مشاهداتی در حوضه کسیلیان، حاکی از عملکرد بالای روش‌های هورتون و شاخص Ø نسبت به دو روش دیگر دارد. شاخص کارائی نش-ساتکلیف به‌دست آمده از روش‌های هورتون و شاخص Ø به‌ترتیب معادل ۹۴/۹ و ۹۰/۳ بوده و این در حالیست که برای روش‌های گرین-امپت و SCS مقدار این شاخص به‌ترتیب معادل ۷۷/۷ و ۷۶/۳ می‌باشد. تحلیل حساسیت نتایج به‌دست آمده از روش‌های مختلف نفوذ نیز حاکی از آن است که عملکرد مدل KW-GIUH نسبت به روش‌های گرین-امپت و شاخص Ø به‌ترتیب بیشترین و کمترین حساسیت را دارا می‌باشد. نتایج حاصل از بررسی اثر مقادیر مختلف ضرایب زبری جریان دامنه‌ای و آبراهه‌ای بر دبی اوج سیلاب نیز نشان می‌دهد که ضریب زبری دامنه‌ای تاثیر به مراتب بالاتری از ضریب زبری آبراهه‌ای دارد. حداکثر تغییر مقدار دبی اوج به‌دست آمده از مقادیر مختلف ضریب زبری دامنه‌ای و آبراهه‌ای به‌ترتیب برابر ۶۴ و ۲۵ درصد می‌باشد. در یک جمع‌بندی کلی می‌توان چنین نتیجه گرفت که عملکرد مدل KW-GIUH نسبت به روش برآورد نفوذ و ضریب زبری جریان دامنه‌ای از حساسیت بالایی برخوردار می‌باشد و به همین خاطر توصیه می‌شود، در انتخاب این دو پارامتر به ویژه در حوضه‌های فاقد آمار و یا آمار کم دقت کافی به‌عمل آید.

واژه‌های کلیدی: شاخص Ø، گرین-امپت، مدل ژئومورفولوژیکی، هورتون، SCS

* مسئول مکاتبات: shokoohi@eng.ikiu.ac.ir

مقدمه

برای مدیریت صحیح منابع آب، مدیریت و کنترل سیلاب و همچنین طراحی مناسب پروژه‌های آبی، بایستی ارزیابی کاملی از میزان رواناب و سیلاب‌های منطقه صورت گیرد. طراحی پروژه‌های بزرگ منابع آب (همانند سدها) نیازمند آگاهی کافی از فرایندهای بارش-رواناب می‌باشد. از سویی دیگر، مدیریت و بهره‌برداری کمی و کیفی از رواناب‌ها نیازمند درک صحیح فرایند حرکت آب در سطح حوضه و شبکه آبراهه‌ها دارد (Chahinian و همکاران، ۲۰۰۵). برای مدل‌سازی مناسب مقدار رواناب در یک حوضه، تخمین صحیح میزان نفوذ آب در خاک عاملی مهم بشمار می‌آید. در طول دهه‌های گذشته روابط ریاضی و تجربی متعددی توسط محققین مختلف برای برآورد مقدار نفوذ آب در خاک ارائه شده است (Abodd و همکاران، ۲۰۱۲).

انتخاب رابطه‌ای کارا و کاربردی به منظور مدل‌سازی مناسب رواناب سطحی، عامل بسیار مهمی در مدیریت و کنترل سیلاب می‌باشد (Chahinian و همکاران، ۲۰۰۵). به عبارت بهتر، هسته اصلی و مرکزی بسیاری از مدل‌های بارش-رواناب (همچون HEC-HMS، SWAT، VIC-3L و ...) عامل نفوذ می‌باشد. تاکنون پژوهش‌های متعددی در زمینه ارزیابی روابط (ریاضی و تجربی) تخمین نفوذ صورت گرفته است. Chahinian و همکاران (۲۰۰۵) چهار رابطه مختلف نفوذ (Morel-Seytoux، SCS، هورتون و فیلیپ) را مورد ارزیابی قرار دادند. طبق نتایج به‌دست آمده، رابطه Morel-Seytoux بهترین عملکرد و رابطه SCS بدترین عملکرد را نتیجه داده است. همچنین، عملکرد رابطه هورتون در تخمین میزان نفوذ از رابطه فیلیپ بهتر بوده است. Mishra و همکاران (۲۰۰۵) با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده از کشورهای هند و آمریکا به ارزیابی ۱۴ رابطه مختلف نفوذ پرداختند. این محققین از شاخص کارائی Nash-Sutcliffe برای رتبه‌بندی روابط استفاده نمودند. در این رتبه‌بندی، مدل‌های تجربی Huggin و Monke، کاستیاکوف اصلاح شده و روش کاستیاکوف به‌ترتیب رتبه‌های ۵/۵۷، ۵/۳۰ و ۵/۲۲ از ۱۰ را به خود اختصاص دادند. همچنین مدل‌های نیمه‌تجربی Singh-Yu، هولتان و هورتون به‌ترتیب دارای رتبه ۶/۵۲، ۵/۵۷ و ۵/۴۸ و مدل‌های فیزیکی غیرخطی و مدل خطی Smith-Parlange رتبه‌های ۵/۴۸ و ۵/۲۲ را به خود اختصاص دادند.

در تحقیقی دیگر، Yukuan و همکاران (۲۰۰۷) سه روش هورتون، کاستیاکوف و کاستیاکوف اصلاح شده را برای برآورد نفوذ در سطح حوضه، مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاصل از ارزیابی بین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی به‌وسیله روابط مذکور، نشان داد که مدل هورتون مناسب‌ترین رابطه برای برآورد نفوذ می‌باشد. Neshat و Parekar (۲۰۱۴) نیز به ارزیابی عملکرد پنج روش کاستیاکوف، گرین-امپت، هورتون، SCS و فیلیپ پرداختند. نتایج حاصل از مقایسه بین داده‌های مشاهداتی و به‌دست آمده از روش‌های مذکور نشان داد که روش کاستیاکوف دارای بهترین عملکرد می‌باشد. همچنین، Abodd و همکاران (۲۰۱۲) به ارزیابی اثر روش‌های نفوذ گرین-امپت و SCS بر عملکرد مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS پرداختند. نتایج نشان داد که ضریب همبستگی بین داده‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی سیلاب در صورت استفاده از روش‌های SCS و گرین-امپت به‌ترتیب در حدود ۸۸ و ۷۲ درصد خواهد بود. به عبارت بهتر روش SCS از کارائی مطلوبتری نسبت به روش گرین-امپت برخوردار می‌باشد.

واقعیت آن است که ارزیابی روش‌های برآورد نفوذ به تنهایی نمی‌تواند ملاک مناسبی برای بررسی رجحان یک روش بر روش دیگر باشد. نتایج بعضا متضاد حاصل از مطالعات منفرد روی روش‌های مختلف که در بالا به تعدادی از آن‌ها اشاره شد، گویای این امر می‌باشد. بر این اساس، به نظر می‌رسد که در قالب مدل‌های ریاضی نیز در مورد دقت و توانایی‌های روش‌های برآورد نفوذ به بررسی پرداخت. این امر که روش برآورد سیل و تاثیر توام داده‌های ورودی بر عملکرد مدل می‌تواند در رتبه‌بندی روش‌های نفوذ نتایج دیگری ببار آورد، قابل بحث می‌باشد. اولین فرض مورد پرسش می‌تواند تأثیر بزرگ مقیاس بودن و یا کوچک مقیاس بودن و به عبارت بهتر یکپارچه بودن، توزیعی و یا نیمه توزیعی بودن مدل در این رتبه‌بندی است. Johnson و همکاران (۲۰۰۳) در

حوضه‌ای واقع در محدوده شهر نیویورک به ارزیابی عملکرد مدل‌های هیدرولوژیکی HSPF[1] و SMR[2] که به‌ترتیب از دو مفهوم متفاوت مازاد نفوذ[3] (دیدگاه هورتونی) و مازاد ظرفیت اشباع[4] استفاده می‌کنند، پرداختند. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که مدل HSPF نسبت به مدل SMR در شبیه‌سازی سیلاب به ویژه در زمستان، دارای عملکرد بهتری بوده و در سوی مقابل مدل SMR از عملکرد خوبی در فصل تابستان برخوردار می‌باشد.

Hung و همکاران در سال ۲۰۱۲ به ارزیابی عملکرد مدل‌های VIC-3L و SWAT در حوضه وِیهی کشور چین پرداختند. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که مدل SWAT نسبت به مدل VIC-3L، میزان رواناب را بیشتر برآورد نموده است. علت اصلی این امر، برآورد کم میزان نفوذ در مدل SWAT می‌باشد که از دیدگاه هورتونی برای مدل‌سازی فرایند نفوذ آب در خاک استفاده می‌نماید و این در حالی است که مدل VIC-3L از مفهوم مازاد اشباع برای مدل‌سازی میزان نفوذ استفاده می‌نماید.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بررسی توانایی‌ها و ارجحیت روش‌های برآورد نفوذ نسبت به یکدیگر در قالب مدل‌های ریاضی محدود بوده و مطالعات موجود نیز بیشتر به مدل‌های با مقیاس بزرگ و بعضا یکپارچه پرداخته‌اند. پژوهش حاضر به‌دنبال یافتن پاسخی برای میزان اثر روش‌های مختلف برآورد نفوذ بر عملکرد مدل‌های ریاضی بارش-رواناب نیمه توزیعی با مبنای هیدرولیکی می‌باشد. مدل ریاضی مورد استفاده در این پژوهش مدل KW-GIUH[5] می‌باشد که یک مدل ریاضی بارش-رواناب از نوع مفهومی[6] بوده و از مفاهیم هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی برای شبیه‌سازی سیل استفاده می‌نماید.

بررسی مطالعات صورت گرفته در نقاط مختلف جهان با شرایط اقلیمی و توپوگرافیکی متفاوت، حاکی از کارائی قابل قبول این مدل می‌باشد. در این میان، می‌توان به تحقیقات صورت گرفته در آمریکا (Lee و Yen، ۱۹۹۷)، تایوان (Lee و Yen، ۱۹۹۷)، فلسطین (Shadeed و همکاران، ۲۰۰۷)، ژاپن (Chiang، ۲۰۰۷)، هندوستان (Kumar و Kumar، ۲۰۰۸)، روسیه (Lee و همکاران، ۲۰۰۹) و ایران (Azizian و Shokoohi، ۲۰۱۴؛ ۲۰۱۵) اشاره نمود. عمده تحقیقات مذکور غالباً در زمینه بررسی کارائی آن بوده و مطالعه‌ای در مورد اثر روش‌های مختلف برآورد نفوذ بر عملکرد این مدل کارا تاکنون گزارش نشده است.

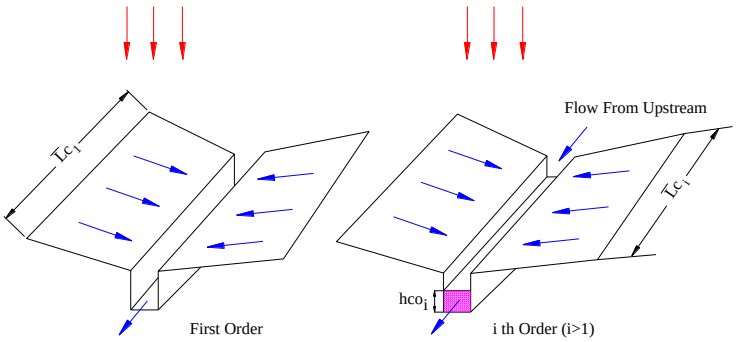
در بیشتر پژوهش‌های صورت گرفته با استفاده از این مدل عمدتاً از روشی به نام شاخص Ø برای برآورد سهم نفوذ استفاده شده است. علت استفاده از این مدل خاص که مشخصات آن به تفصیل در بخش مواد و روش‌ها ارائه شده است، اهمیت بسیار زیاد پارامترهای فیزیوگرافی و کلیماتولوژی (شدت بارش موثر) در ساختار مدل می‌باشد. در مقاله حاضر، عمدتاً به بررسی و تحلیل حساسیت اثر روش‌های مختلف نفوذ (شاخص Ø، هورتون، گرین-امپت و روش شماره منحنی SCS) پرداخته شده است. از آنجا که مدل مزبور مدلی است با مبنای هیدرولیکی و در آن برای ترکیب اثرات سیل ناشی از زیرحوضه‌های مختلف از روندیابی در سطح حوضه و رودخانه استفاده می‌شود و برای دیدن اثر مهمترین عامل هیدرولیک جریان بر خروجی مدل در کنار روش‌های برآورد نفوذ، به ارزیابی اثرات ضرایب زبری جریان دامنه‌ای و آبراهه‌ای بر عملکرد مدل ریاضی KW-GIUH نیز پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

ساختار مدل مبتنی بر موج سینماتیک KW-GIUH: یکی از چالش‌های اساسی محققین در استفاده از مدل‌های مبتنی بر پارامترهای ژئومورفولوژیکی حوضه، تخمین زمان تمرکز جریان-های دامنه‌ای[7] و آبراهه‌ای[8] در حوضه‌های فاقد آمار و یا با آمار ناکافی می‌باشد. Lee و Yen (۱۹۹۷)، با استفاده از تئوری موج سینماتیک روشی را جهت محاسبه زمان تمرکز جریان‌های سطحی و آبراهه‌ای

[1] Hydrological Simulation Program-Fortran
[2] Soil Moisture Routing
[3] Infiltration excess
[4] Saturation excess
[5] Kinematic Wave-based Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph
[6] Conceptual
[7] Overland flow
[8] Channel flow

ارائه نمودند که در آن حوضه به صورت صفحه‌ای V شکل در نظر گرفته می‌شود. در این روش، صفحات کناری به‌عنوان میدان جریان‌های سطحی و میان دو صفحه مذکور به‌عنوان میدان جریان آبراهه‌ای شناخته می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱- صفحه V شکل (Wooding، ۱۹۶۵)

هرکدام از صفحات، جریان جانبی را به داخل کانالی با شیب و سطح مقطع ثابت تخلیه می‌نمایند. متوسط طول جریان سطحی منتهی به آبراهه رده iام (با مقطع Vشکل) از رابطه زیر به‌دست می‌آید.

$$\bar{L}_{oi} = \frac{A \times P_{oAi}}{2N_i \times \bar{L}_{ci}} \quad (۱)$$

$$T = \left(\frac{n_o . L_{oi}}{S_{oi}^{0.5} . i_e^{m-1}}\right)^{\frac{1}{m}} \quad (۲)$$

که در آن، A مساحت کلی حوزه آبخیز (کیلومتر مربع)، P_{oAi} نسبت مساحت زیرحوضه‌های منتهی به آبراهه رده iام به مساحت کل حوضه، N_i تعداد آبراهه‌های رده iام، $\bar{L}_{ci}$ متوسط طول آبراهه‌های رده iام (کیلومتر)، S_{oi} متوسط شیب زیرحوضه‌های منتهی به آبراهه با رده i، n_o ضریب زبری بخش دامنه‌ای و m ثابت معادله (طبق رابطه مانینگ مقدار آن ۱/۳۳ است) می‌باشند. معادله پیوستگی و معادله اندازه حرکت برای جریان‌های سطحی به‌صورت زیر می‌باشد.

$$\frac{\partial h_{oi}}{\partial t} + \frac{\partial q_{oi}}{\partial x} = q_l \quad (۳)$$

$$q_{oi} = \alpha . h_{oi}^m \quad (۴)$$

که در آن، x جهت جریان، h_{oi} عمق جریان سطح الارض منتهی به آبراهه رده iام (متر)، q_{oi} دبی جریان سطحی منتهی به آبراهه رده iام در واحد عرض (متر مربع بر ثانیه)، m ثابت معادله، α پارامتر معرف مشخصات هیدرولیکی جریان سطحی و q_l دبی جریان جانبی که به دبی کلی اضافه می‌شود، می‌باشند. با ترکیب معادلات فوق با یکدیگر و حل آن برای مسیرهای مختلف جریان (بر روی سطح زیرحوضه‌ها و آبراهه‌های با رده‌های مختلف) رابطه زیر برای محاسبه زمان تمرکز آبراهه رده iام به‌دست خواهد آمد.

$$T_{xi} = \frac{B_i}{2q_l L_{oi}}(h_{csi} - h_{coi}) = \frac{B_i}{2q_l L_{oi}}\left[\left(h_{coi}{}^m + \frac{2q_l n_c L_{oi} L_{ci}}{B_i \bar{S}_{ci}^{1/2}}\right)^{1/m} - h_{coi}\right] \quad (۵)$$

$$h_{coi} = \left[\frac{i_e . n_c . (N_i . A_i - A . P_{oAi})}{N_i . B_i . S_{ci}^{0.5}}\right]^{\frac{1}{m}} \quad (۶)$$

$$for \quad (1 < i < \Omega)$$

که در آن، B_i عرض آبراهه رده iام (متر)، h_{coi} عمق جریان آبراهه رده iام، n_c ضریب زبری آبراهه، L_{ci} طول جریان آبراهه با رده iام (کیلومتر)، S_{ci} شیب متوسط آبراهه با رده iام، h_{csi} عمق آب در حال تعادل آبراهه رده iام و i_e شدت بارش موثر (میلی‌متر بر ساعت) می‌باشند. مدل مبتنی بر موج سینماتیک KW-GIUH با استفاده از روابط فوق، به محاسبه زمان تمرکز در آبراهه‌ها پرداخته و با جمع هیدروگراف واحد مربوط به تمامی مسیرهای ممکن در خروجی حوضه، هیدروگراف واحد لحظه‌ای حوزه آبخیز را محاسبه می‌نماید.

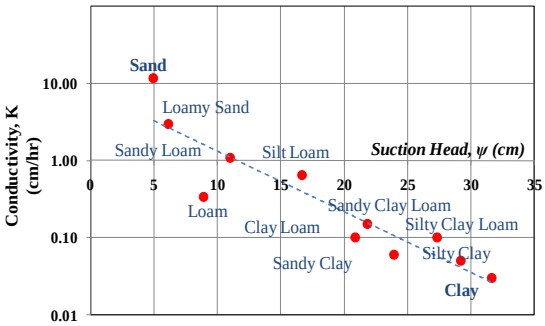
همان‌طور که از روابط فوق ملاحظه می‌شود، بسیاری از پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه زمان تمرکز را می‌توان از روی نقشه‌های توپوگرافی یا مدل‌های رقومی ارتفاعی (DEMs) به‌دست آورد. علاوه بر موارد فوق، پارامتری که می‌تواند عملکرد مدل را به شدت تحت تاثیر خود قرار دهد، مقدار شدت بارش

موثر (i_e) و عدم تخمین مناسب ضرایب زبری جریان دامنه‌ای و آبراهه‌ای می‌باشد. شدت بارش موثر، مقدار خالص بارش (پس از کسر سهم نفوذ آب در خاک) ورودی به سطح خاک می‌باشد. بر این اساس، می‌توان دریافت که نفوذ، یکی از عوامل بسیار مهم و اساسی در عملکرد مناسب مدل‌های بارش-رواناب می‌باشد و در این میان هر چه مقیاس زمانی کوچک‌تر شود، اهمیت نفوذ در عملکرد مدل بیشتر می‌شود. برای برآورد سهم نفوذ آب در خاک، روابط متعددی پیشنهاد شده است که هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارا می‌باشند. در ادامه به بررسی و معرفی چهار روش مختلف برآورد نفوذ پرداخته شده است.

روش‌های مختلف برآورد نفوذ: در این پژوهش از چهار روش مختلف هورتون، گرین-امپت، شاخص Ø و SCS برای برآورد نفوذ و بارش خالص استفاده شده است. خلاصه‌ای از روش‌ها و مدل‌های نفوذ مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین، در شکل و جدول ۲ پارامترهای مورد نیاز روش گرین-امپت ارائه شده است. پس از برآورد بارش خالص با استفاده از روش‌های مذکور، مدل KW-GIUH برای هر روش به صورت مجزا اجرا، واسنجی و تحلیل حساسیت شد.

جدول ۱- روش‌های نفوذ مورد استفاده در پژوهش حاضر

نام روش	پارامترها	معادله
شاخص Ø	$\varnothing$ نفوذ (میلی‌متر بر ساعت)، P مقدار بارش (میلی‌متر)، R میزان رواناب (سانتی‌متر) و T مدت زمان بارش مازاد (ساعت).	$\phi=\frac{P-R}{T}$
گرین-امپت	F نفوذ تجمعی در زمان t (سانتی‌متر)، K_s ضریب هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (سانتی‌متر بر ساعت)، ψ پتانسیل مکش خاک در جبهه رطوبتی (سانتی‌متر)، $\Delta\theta$ افزایش محتوی رطوبتی خاک به واسطه حرکت جبهه رطوبتی.	$F=Kt+\psi\Delta\theta.Ln\left(1+\frac{F}{\psi\Delta\theta}\right)$
هورتون	f_t شدت نفوذ در زمان t از شروع بارش (میلی‌متر بر ساعت)، f_c شدت نفوذ نهائی، f_o شدت نفوذ اولیه، t زمان از شروع بارش (ساعت) و K ثابت هورتون که بستگی به کاربری اراضی و جنس خاک دارد (بر ساعت).	$f_t=f_c+(f_o-f_c)e^{-kt}$
SCS	F نفوذ تجمعی (سانتی‌متر)، c ثابت معادله و a,b ضرائب مربوط به نوع خاک که از منحنی‌های شماره‌دار نفوذ تعیین می‌شوند.	$F=at^b+c$



شکل ۲- تغییرات ضریب هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در بافت‌های مختلف خاک (برگرفته از: راولز و براکنسیک، ۱۹۸۵)

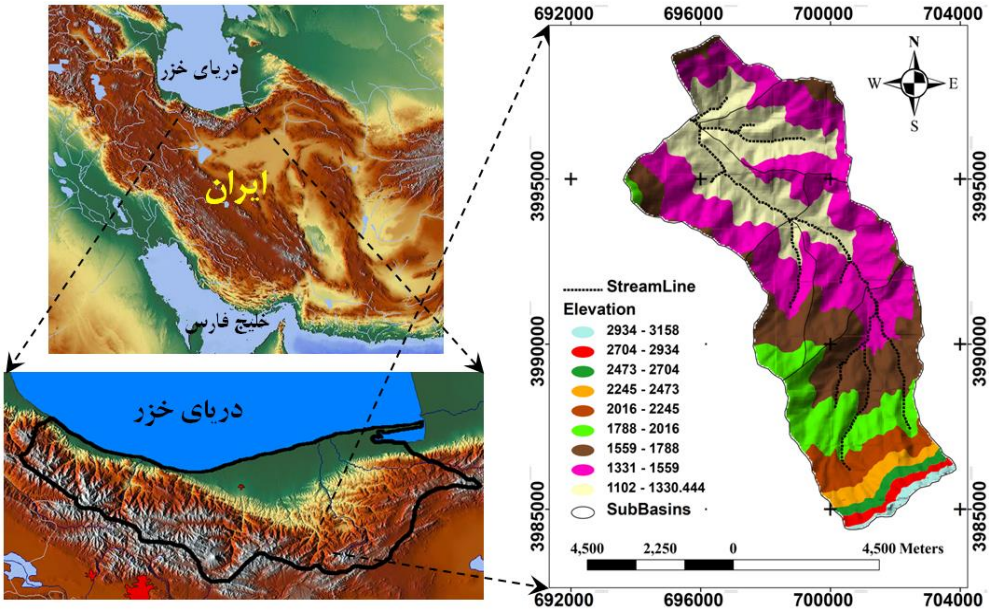
Texture	Porosity n	Residual Porosity(Θ_r)	Effective Porosity (Θ_e)	Suction Head ψ (cm)	Conductivity K(cm/hr)
Sand	0.437	0.02	0.417	4.95	11.78
Loamy Sand	0.437	0.036	0.401	6.13	2.99
Sandy Loam	0.453	0.041	0.412	11.01	1.09
Loam	0.463	0.029	0.434	8.89	0.34
Silt Loam	0.501	0.015	0.486	16.68	0.65
Sandy Clay Loam	0.398	0.068	0.33	21.85	0.15
Clay Loam	0.464	0.155	0.309	20.88	0.1
Silty Clay Loam	0.471	0.039	0.432	27.3	0.1
Sandy Clay	0.43	0.109	0.321	23.9	0.06
Silty Clay	0.47	0.047	0.423	29.22	0.05
Clay	0.475	0.09	0.385	31.63	0.03

جدول ۲- پارامترهای مدل گرین-امپت (برگرفته از: راولز و براکنسیک، ۱۹۸۵)

منطقه مورد مطالعه: محدوده مورد مطالعه در این تحقیق، حوضه کسیلیان یکی از زیرحوضه‌های رودخانه تالار در استان مازندران می‌باشد. این حوضه با توجه به وضعیت طبیعی آب و هوا و پوشش گیاهی، معرف مناطق کوهستانی و جنگلی در البرز میانی می‌باشد. این حوضه در شرق راه آهن تهران- مازندران و در ۲۷ کیلومتری بخش پل سفید به مختصات ′۱۱ °۵۳ تا ′۱۷ °۵۳ طولی و ′۵۹ °۳۵ تا ′۰۷ °۳۶

عرضی واقع شده است. حوضه کسیلیان به مساحت ۶۷ کیلومتر مربع و با محیط ۳۷/۸ کیلومتر به‌وسیله رودخانه کسیلیان به طول حدود ۱۷ کیلومتر زهکشی می‌شود. متوسط شیب این حوضه ۱۶/۴ درصد و محدوده تغییرات ارتفاعی آن بین ۱۱۰۰ تا ۲۶۵۰ متر می‌باشد. ایستگاه هیدرومتری ولیک بن که در انتهای حوضه (در محدوده روستای ولیک بن) قرار دارد، از نظر آمار جریان از وضعیت مطلوبی برخوردار می‌باشد.

همچنین، این حوضه دارای شش ایستگاه باران‌سنج معمولی به نام‌های سنگده، درزیکلا، اوریملک، سوت کلا، کله، ولیک چال و شش ایستگاه باران‌سنج ذخیره‌ای به نام‌های کشته، خاکستر، کته اوجا، پنارکا، خجیردشت، والرو و گتی نو می‌باشد. موقعیت حوضه این رودخانه و مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با ابعاد سلولی ۵۰ متر در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- موقعیت حوضه، وضعیت شبکه آبراهه‌ها و DEM حوضه کسیلیان

استخراج پارامترهای ژئومورفولوژیکی موردنیاز مدل KW-GIUH: همان‌طور که در بخش‌های قبل عنوان شد، شبیه‌سازی سیلاب با استفاده از مدل KW-GIUH نیازمند استخراج پارامترهای ژئومورفولوژیکی حوضه از روی مدل‌های رقومی ارتفاعی می‌باشد. برای استخراج پارامترهای مذکور از الحاقیه ArcHydro در بستر GIS و مدل رقومی ارتفاعی با ابعاد سلولی ۵۰ متر (به‌دست آمده از روی نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور) استفاده به‌عمل آمده است. همچنین، آستانه شکل‌گیری آبراهه‌ها[1] نیز ۰/۵ درصد اختیار شده که طبق آن بزرگ‌ترین رده آبراهه بر اساس روش استراهلر معادل چهار به‌دست آمد. در جداول ۵ و ۶ مهمترین پارامترهای ژئومورفولوژیکی مورد نیاز مدل KW-GIUH و نیز احتمال مربوط به انتقال وضعیت یک قطره آب در مسیرهای مختلف در حوضه کسیلیان ارائه شده است. البته لازم به ذکر است که برای محاسبه احتمال مربوط به انتقال وضعیت یک قطره آب در مسیرهای مختلف از رابطه (۷) استفاده به‌عمل آمده است.

$$P_{oAi} = \frac{1}{A}\left(N_i\bar{A}_i - \sum_{i=1}^{i-1} N_i\bar{A}_i P_{xixj}\right) \qquad (۷)$$

که در آن، A مساحت کل حوضه (کیلومتر مربع)، N_i تعداد آبراهه‌های رده iام، $\bar{A}_i$ متوسط مساحت حوزه آبخیز رتبه iام (کیلومتر مربع) و P_{xixj} احتمال انتقال وضعیت برای یک قطره باران جاری در آبراهه رده iام (رده پائین) برای وارد شدن به آبراهه با رده jام (رده بالاتر) که به‌وسیله رابطه (۸) قابل محاسبه می‌باشد.

$$P_{xixj} = \frac{N_{i,j}}{N_i} \qquad (۸)$$

[1] Stream Delineation Thresholds

که در آن، $N_{i,j}$ تعداد آبراهه‌های رده iام که به آبراهه‌های رده jام می‌ریزند، می‌باشد. پس از انجام رده‌بندی آبراهه‌ها به روش استراهلر در بستر GIS، به راحتی می‌توان تمامی پارامترهای موردنیاز برای استفاده در معادلات (۱) تا (۸) را به‌دست آورد. در شکل ۴ وضعیت آبراهه‌های با رده‌های مختلف حوضه کسیلیان به روش استراهلر نشان داده شده است.

جدول ۵- پارامترهای ژئومورفولوژیکی موردنیاز مدل KW-GIUH در حوضه کسیلیان

پارامتر	آبراهه ۱	آبراهه ۲	آبراهه ۳	آبراهه ۴
Ni	۵۳	۱۷	۵	۱
L_{ci} (Km)	۰/۶۶	۱/۵۳	۰/۹۶	۱۰/۵۲
A_i (Km^2)	۰/۷۲	۲/۸۸	۶/۹۷	۶۷/۸۶
Po_{Ai}	۰/۵۶	۰/۲۷	۰/۰۹	۰/۰۸
S_{ci}	۰/۰۸۳	۰/۰۴۴	۰/۰۳۵	۰/۰۴۰
S_{oi}	۰/۳۲۴	۰/۲۶۷	۰/۲۳۱	۰/۲۲۲

جدول ۶- احتمال انتقال وضعیت یک قطره آب در مسیرهای مختلف در حوضه کسیلیان

مسیر حرکت جریان		$N_{i,j}$	$Px_ix_j = N_{i,j} / Ni$
X1	X2	۴۶	۰/۸۷
X1	X3	۰	۰/۰۰
X1	X4	۶	۰/۱۱
X2	X3	۱۰	۰/۵۹
X2	X4	۸	۰/۴۷
X3	X4	۵	۱

ضرایب زبری مانینگ برای سطح‌الارض (n_o) و آبراهه (n_c) در این مطالعه برای هر مورد واسنجی و ارزیابی شد ولی در عین حال تلاش شد با بازدیدهای میدانی و توجه به وضعیت زیرحوضه‌ها و آبراهه‌ها (از نظر نوع پوشش گیاهی، جنس خاک و . . .) و همچنین با استفاده از مقادیر پیشنهاد شده در مراجع مختلف مانند مطالعات Chow در سال ۱۹۵۹ برای ضریب زبری آبراهه‌ای و Usul و Yilmaz (۲۰۰۲) برای ضریب زبری سطح‌الارض (جدول ۷) ارقام اولیه پیشنهاد و نهایتا در پروسه واسنجی و ارزیابی در حد معقول و قابل قبول حفظ شوند.

جدول ۷- مقادیر ضریب زبری انواع کاربری‌های موجود در سطح حوضه (اقتباس از Usul و Yilmaz، ۲۰۰۲)

نوع پوشش و کاربری حوضه	ضریب مانینگ جریان سطح‌الارض
جنگلی	۰/۱۵
بوته‌زار، درختچه‌زار	۰/۶۰
مرتع و علف‌زار	۰/۲۴
کشت‌زار	۰/۱۷

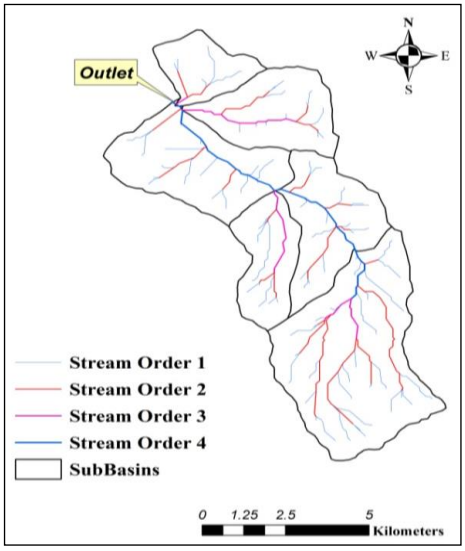
هیدروگراف‌های مورد استفاده برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل: برای ارزیابی عملکرد مدل KW-GIUH در حوضه کسیلیان از هیدروگراف‌های ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری ولیک‌بن واقع در خروجی حوضه استفاده به‌عمل آمده است. بررسی آمار ثبت شده حاکی از آن است که در این ایستگاه تنها چهار واقعه ثبت شده از وضعیت مطلوبی برخودار می‌باشند. لذا با توجه به داده‌های موجود برای واسنجی مدل از دو واقعه (رخدادهای مورخه ۷۲/۰۱/۰۸ و ۶۶/۰۷/۱۷) و برای صحت‌سنجی آن از دو واقعه (رخدادهای مورخه ۸۴/۰۸/۱۸ و ۷۲/۰۶/۱۳) دیگر استفاده شد. همچنین در این تحقیق برای ارزیابی عملکرد مدل از شاخص نش-ساتکلیف که به شرح معادله زیر می‌باشد، استفاده شد.

$$EFF = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{T}\left(Q_o^t - Q_m^t\right)^2}{\sum_{t=1}^{T}\left(Q_o^t - \bar{Q}_o\right)^2} \qquad (۹)$$

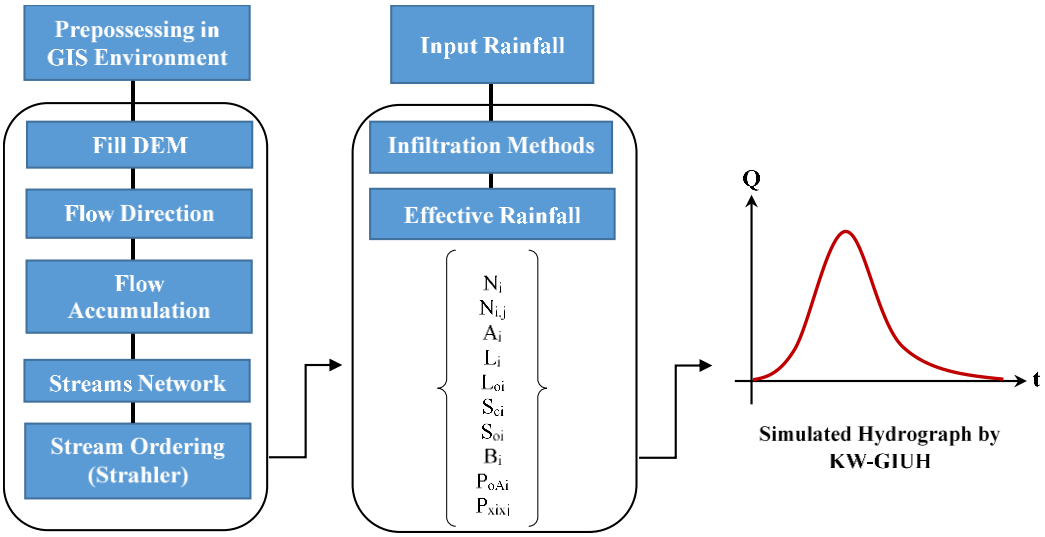
که در آن، Q_m^t دبی شبیه‌سازی شده در زمان t، Q_0^t دبی مشاهداتی در زمان t و $\overline{Q_o}$ متوسط دبی در بازه زمانی شبیه‌سازی می‌باشند. ضریب نش-ساتکلیف در محدوده‌ای بین یک تا ∞- متغیر می‌باشد. EFF=۱ نشان‌دهنده تطابق کامل دبی مشاهداتی و دبی شبیه-سازی شده می‌باشد. به عبارت بهتر این ضریب هرچه به یک نزدیک‌تر باشد، حاکی از کارائی بالای مدل می-باشد. در نهایت برای درک بهتر نحوه عملکرد مدل KW-GIUH و نیز مشخص شدن جایگاه روش‌های مختلف نفود و پارامترهای ژئومورفولوژیکی بر خروجی حاصل از آن، فلوچارت کلی شبیه‌سازی به‌وسیله مدل KW-GIUH در شکل ۵ نشان داده شده است.

پس از واسنجی مدل KW-GIUH و مشخص شدن میزان نفوذ آب در خاک (در هر روش)، اقدام به

تغییر مقدار نفوذ بین بازه ۱۰۰+ و ۱۰۰- درصد شد و هر بار مدل اجرا و هیدروگراف سیلاب به‌دست آمد. برای بررسی هر چه بهتر نتایج، مقدار دبی اوج به‌دست آمده در هر بار اجرای مدل بر مقدار دبی اوج به‌دست آمده در مرحله واسنجی تقسیم شد تا نسبت دبی بدون بعد حاصل شود. همچنین، مقدار نفوذ نیز در هر بازه بر مقدار نفوذ واسنجی شده تقسیم شد تا مقدار نفوذ بدون بعد متناسب با دبی بدون بعد حاصل شود.



شکل ۴- شبکه آبراهه‌ها و رده آن‌ها در حوضه کسلیان

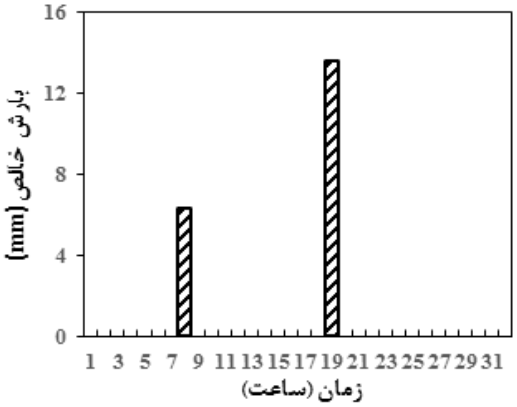


شکل ۵- فلوچارت کلی شبیه‌سازی سیلاب با استفاده از مدل KW-GIUH

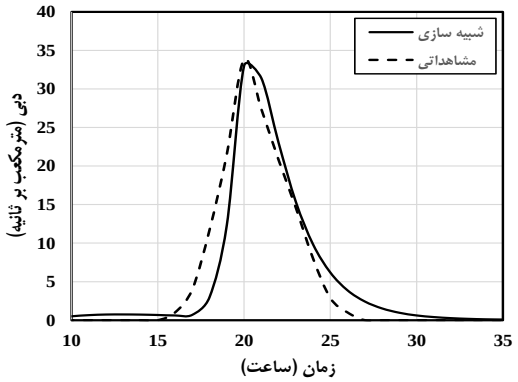
نتایج و بحث

نتایج مدلسازی مبتنی بر روش نفوذپذیری Ø:

نتایج حاصل از مدل‌سازی هیدروگراف سیلاب به روش نفوذپذیری Ø، حاکی از عملکرد مناسب این مدل دارد به‌طوری که شاخص کارائی نش-ساتکلیف مدل به‌طور متوسط معادل ۹۰/۳ درصد می‌باشد. همچنین، مقادیر متوسط ضرائب زبری آبراهه و زیرحوضه‌ها در مرحله واسنجی به‌ترتیب معادل ۰/۰۹ و ۰/۵ و متوسط مقدار شاخص Ø معادل ۶/۲ به‌دست آمده است. در شکل‌های ۶ و ۷ بارش خالص و همچنین هیدروگراف جریان به‌دست آمده (برای یکی از رخدادهای مورد استفاده) از شبیه‌سازی مدل KW-GIUH نشان داده شده است.



شکل ۶- مقادیر بارش خالص پس از کسر مقدار نفوذ



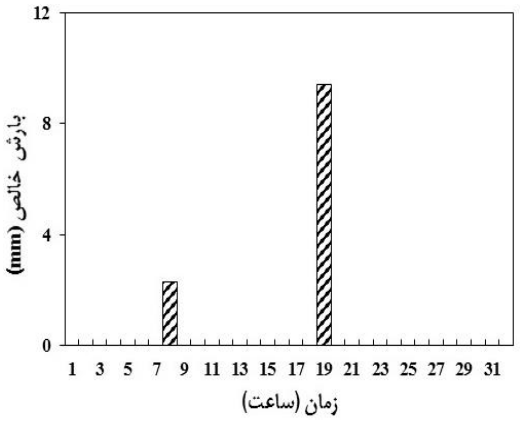
شکل ۷- دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی (روش نفوذ Ø)

همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده، در صورت استفاده از روش نفوذ Ø، عملکرد مدل در شبیه‌سازی سیلاب مناسب ارزیابی می‌شود. طبق نتایج به‌دست آمده، اختلاف بین دبی اوج مشاهداتی و شبیه‌سازی کمتر از ۲/۵ درصد بوده و مدل به خوبی توانسته زمان رخداد دبی اوج را محاسبه نماید. همچنین، بررسی عملکرد مدل در شبیه‌سازی حجم رواناب نیز حاکی از آن است که حداکثر اختلاف بین حجم شبیه‌سازی و مشاهداتی به کمتر از سه درصد می‌باشد.

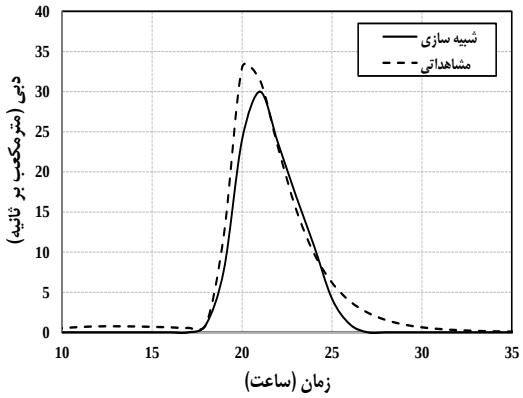
نتایج مدل‌سازی مبتنی بر روش نفوذپذیری هورتون: نتایج حاصل از مدل‌سازی هیدروگراف سیلاب به روش نفوذپذیری هورتون و نیز بارش خالص در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. با توجه به خصوصیات خاک حوضه مورد مطالعه (از آنجائی که بافت غالب خاک و پوشش گیاهی در حوضه کسیلیان از نوع لومی و جنگلی می‌باشد، مقدار پارامترهای k، f_o و f_c به‌ترتیب معادل ۱/۸، ۳۲۵ و ۱۰ میلی‌متر بر ساعت در نظر گرفته شد) معادله نفوذ به روش هورتن به شرح معادله زیر به‌دست آمد.

$$f = 10 + (315)\, e^{-1.8t} \qquad (۱۰)$$

بررسی نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که شاخص کارائی مدل در صورت استفاده از روش نفوذ هورتن، معادل ۹۴/۹ درصد می‌باشد (مقادیر متوسط ضرائب زبری آبراهه و زیرحوضه‌ها در مرحله واسنجی به‌ترتیب معادل ۰/۱۲ و ۰/۵۹ به‌دست آمده است). همچنین، میزان خطای مدل در برآورد دبی اوج سیلاب و حجم سیلاب به‌ترتیب برابر است با نه و ۱۹/۵ درصد بوده و زمان رسیدن به دبی اوج هیدروگراف شبیه‌سازی شده نیز اختلافی در حدود یک ساعت با داده‌های مشاهداتی را نشان می‌دهد.



شکل ۸- مقادیر بارش خالص پس از کسر مقدار نفوذ



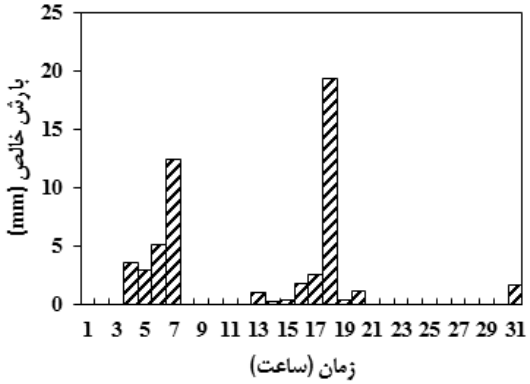
شکل ۹- دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی (روش نفوذ هورتن)

نتایج مدل‌سازی مبتنی بر روش نفوذپذیری SCS: نتایج حاصل از مدل‌سازی هیدروگراف سیلاب به روش نفوذپذیری SCS و نیز بارش خالص در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. با توجه به نوع بافت خاک حوضه (بافت غالب خاک حوضه از نوع لومی می‌باشد و به همین خاطر مقادیر پارامترهای a, b, c به‌ترتیب معادل ۰/۰۵۶۶، ۰/۱۳۱- و ۰/۰ اختیار شدند) و از روی منحنی‌های شماره‌دار نفوذ، معادله نفوذ SCS به صورت زیر به‌دست آمد.

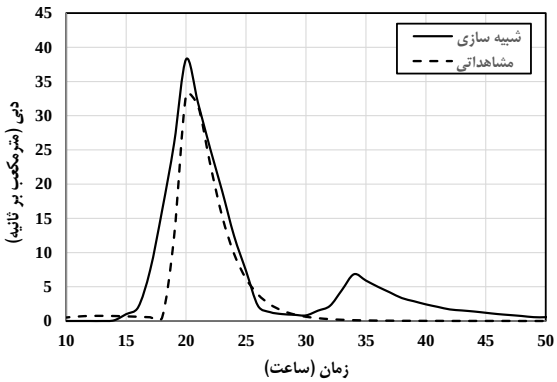
$$f = 0.0566 \times t^{-0.131005} \qquad (۱۱)$$

بررسی نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که شاخص کارائی مدل در صورت استفاده از روش نفوذ SCS، نسبت به دو روش هورتن و شاخص Ø کمتر بوده و معادل ۷۶/۳ درصد می‌باشد (مقادیر متوسط ضرائب زبری آبراهه و زیرحوضه‌ها در مرحله واسنجی

به‌ترتیب معادل ۰/۲۷ و ۰/۸۳ به‌دست آمده است). همچنین میزان خطای مدل در برآورد دبی اوج سیلاب و حجم سیلاب به‌ترتیب برابر است با ۱۵/۶و ۴۰/۶ درصد بوده و زمان رسیدن به دبی اوج هیدروگراف شبیه‌سازی شده نیز در حدود یک ساعت بیشتر برآورد شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، استفاده از یک روش متفاوت برای محاسبه میزان نفوذ آب در خاک، تا چه اندازه می‌تواند در تخمین حجم سیلاب، دبی اوج آن و متعاقب آن بر ابعاد و اندازه‌های طرح‌های مهندسی رودخانه‌ای تاثیرگذار باشد.



شکل ۱۰- مقادیر بارش خالص پس از کسر مقدار نفوذ

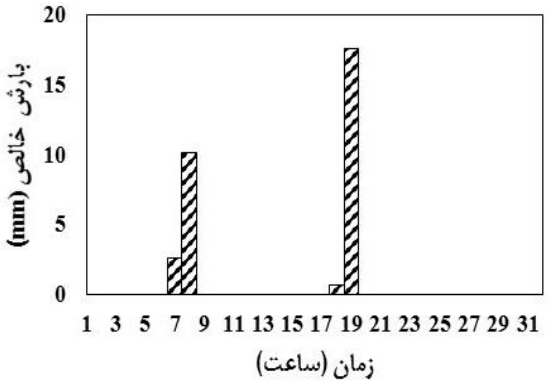


شکل ۱۱- دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی (روش نفوذ SCS)

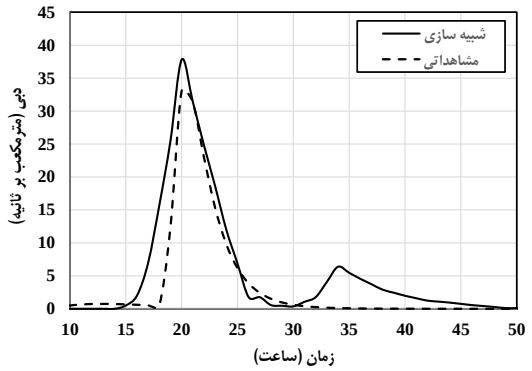
روش نفوذ گرین–امپت: نتایج حاصل از مدل‌سازی هیدروگراف سیلاب به روش نفوذپذیری گرین-امپت و نیز بارش خالص در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است. با توجه به نوع بافت خاک حوضه، معادله نفوذ تجمعی به روش گرین-امپت به صورت زیر به‌دست آمد.

$$F = 21.52671 + 0.014342t \qquad (۱۲)$$

محاسبات انجام شده حاکی از آن است که شاخص کارائی مدل KW-GIUH در صورت استفاده از روش گرین-امپت، معادل ۷۷/۷ درصد بوده و تا حدود بسیار زیادی با مقدار به‌دست آمده از روش SCS تطابق دارد (مقادیر متوسط ضرائب زبری آبراهه و زیرحوضه‌ها در مرحله واسنجی به‌ترتیب معادل ۰/۲۳ و ۰/۸۹ به‌دست آمد). همچنین، میزان خطای مدل در برآورد دبی اوج سیلاب و حجم سیلاب به‌ترتیب برابر با ۱۵/۶و ۳۵/۷ درصد بوده و زمان رسیدن به دبی اوج هیدروگراف شبیه‌سازی شده نیز در حدود یک ساعت بیشتر برآورد شد.



شکل ۱۲- مقادیر بارش خالص پس از کسر مقدار نفوذ



شکل ۱۳- دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی (روش نفوذ گرین-امپت)

در جدول ۸ نیز خلاصه‌ای از مشخصات مربوط به هیدروگراف سیلاب به‌دست آمده از روش‌های مختلف نفوذ ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، عملکرد روش‌های هورتون و شاخص Ø از منظر

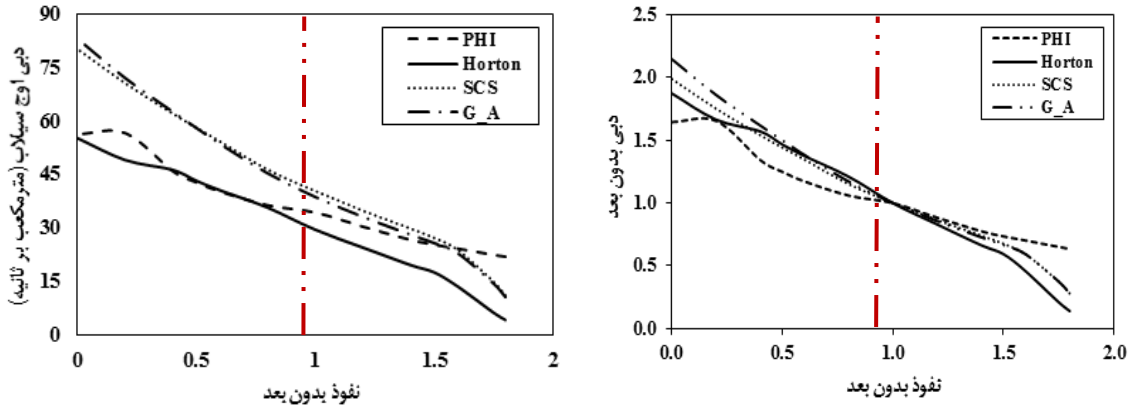
شاخص نش-ساتکلیف مطابقت خوبی را نشان می‌دهد. اما بررسی مشخصات مهمی مانند دبی اوج، زمان رسیدن به دبی اوج و حجم سیلاب در دو روش، حاکی از برتری قابل توجه شاخص Ø دارد. نتایج به‌دست آمده از روش‌های گرین-امپت و SCS نیز تقریباً مشابه هم بوده و در هر دو روش عملکرد در شبیه‌سازی دبی و زمان رسیدن به اوج یکسان می‌باشد. در یک جمع-بندی کلی می‌توان چنین نتیجه گرفت شاخص Ø مناسب‌ترین روش برای برآورد مقدار نفوذ و نیز شبیه-سازی سیلاب به‌وسیله مدل KW-GIUH می‌باشد.

جدول ۸- مقایسه کارایی روش‌های مختلف برآورد نفوذ بر عملکرد مدل KW-GIUH

روش مدل‌سازی نفوذ	شاخص نش-ساتکلیف (NSE)	خطای نسبی برآورد دبی اوج سیلاب	خطای نسبی برآورد حجم سیلاب (درصد)	اختلاف زمان دبی اوج سیلاب (ساعت)
شاخص Ø	۹۰/۳	۲/۵	۳/۰	۰
هورتون	۹۴/۹	۹/۰	۱۹/۵	۱
SCS	۷۶/۳	۱۵/۶	۴۰/۶	۱
گرین-امپت	۷۷/۷	۱۵/۴	۳۵/۶	۱

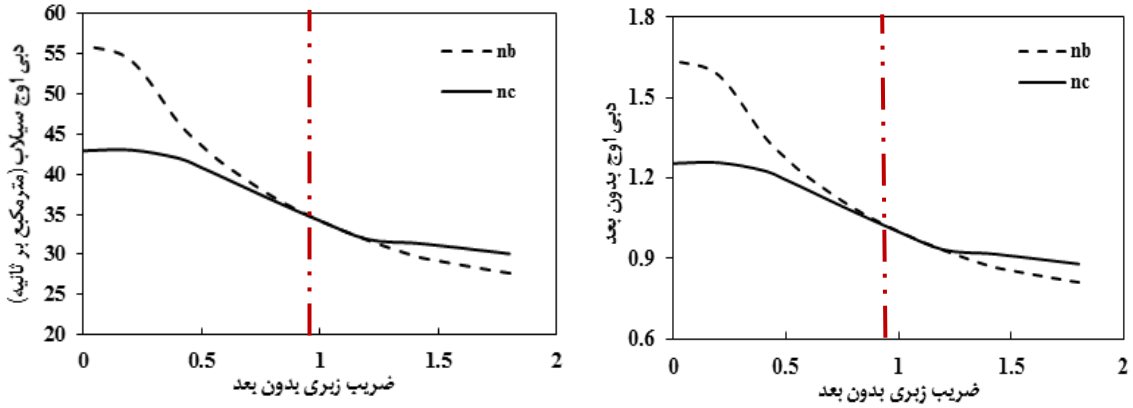
علاوه بر موارد ذکر شده در بالا، برای مشخص نمودن معادله نفوذ مناسب و کارا برای مدل‌سازی سیلاب به‌وسیله مدل KW-GIUH سعی شد تا میزان حساسیت مدل به هر کدام از روش‌های مختلف برآورد نفوذ مشخص شود.

تحلیل حساسیت دبی اوج سیلاب نسبت به روش‌های مختلف برآورد نفوذ: در شکل ۱۴ میزان تغییرات دبی بدون بعد در روش‌های مختلف برآورد نفوذ نشان داده شده است. ارزیابی نتایج به‌دست آمده از روش‌های مختلف نفوذ نشان می‌دهد که عملکرد مدل KW-GIUH نسبت به روش گرین-امپت بیشترین حساسیت و نسبت به روش Ø کمترین حساسیت را دارا می‌باشد. بازه تغییرات دبی اوج در روش گرین-امپت و شاخص Ø به ازای تغییر مقدار نفوذ بین ۱۰۰+ و ۱۰۰- درصد (یعنی دو برابر و منهای دو برابر)، به‌ترتیب در حدود ۰/۲۷ تا ۲/۱۵ و ۰/۶۳ تا ۱/۶۵ برابر مقدار دبی به‌دست آمده در مرحله واسنجی می‌باشد. همچنین، حساسیت مدل KW-GIUH نسبت به مقادیر کم نفوذ بدون بعد (مقادیر کوچک‌تر از یک) بسیار زیاد می‌باشد و این در حالی است که برای مقادیر بالای نفوذ بدون بعد (مقادیر بزرگ‌تر از یک) میزان حساسیت دبی اوج هیدروگراف شبیه‌سازی به مراتب کمتر می‌باشد. همچنین، همان‌طور که ملاحظه می‌شود، روش هورتون دبی اوج کمتری را نتیجه می‌دهد و این در حالی است که روش‌های گرین-امپت و SCS دبی اوج بیشتری را به‌دست داده‌اند.



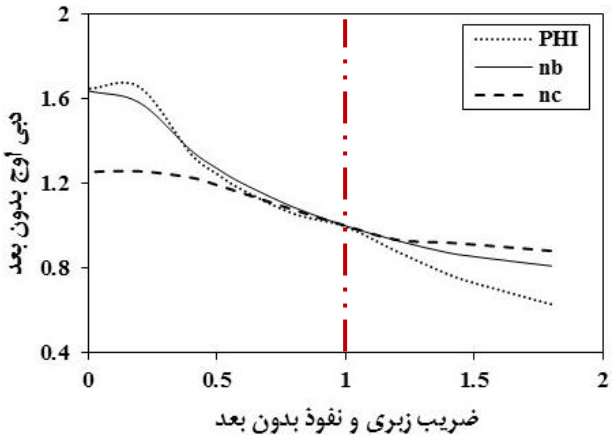
شکل ۱۴- حساسیت دبی اوج سیلاب نسبت به روش‌های مختلف برآورد نفوذ

تحلیل حساسیت دبی اوج سیلاب نسبت به ضرایب زبری آبراهه‌ای و دامنه‌ای: تعیین ضرایب زبری مناسب به‌دلیل تاثیرگذاری بر زمان تمرکز، سرعت و دبی اوج سیلاب‌ها از اهمیت بالایی برخوردار هستند. همان‌طور که در بخش مربوط به ساختار مدل نیز عنوان شد، ضرایب زبری آبراهه‌ای (n_c) و دامنه‌ای (n_b) یکی از پارامترهای ورودی بسیار مهم مدل KW-GIUH می‌باشند. از این‌رو در این بخش به تحلیل حساسیت عملکرد مدل نسبت به مقادیر مختلف ضرائب زبری آبراهه‌ای و دامنه‌ای پرداخته شده است. در این بخش نیز مقدار ضرائب زبری بین بازه ۱۰۰+ تا ۹۵- درصد و با گام ۲۰ درصد تغییر و مدل هر بار اجرا شد. در شکل ۱۵ تغییرات دبی اوج و دبی اوج بدون بعد نسبت به مقادیر بدون بعد ضرایب زبری نشان داده شده است (با توجه به حجم بالای نتایج، تنها مقادیر به‌دست آمده از روش Ø ارائه شده است). طبق نتایج به‌دست آمده، حساسیت دبی اوج سیلاب نسبت به ضریب زبری دامنه‌ای بیشتر از ضریب زبری آبراهه‌ای می‌باشد. بازه تغییرات دبی اوج بدون بعد برای ضریب زبری دامنه‌ای و آبراهه‌ای به ازای تغییر مقدار ضریب زبری بین ۱۰۰+ و ۱۰۰- درصد، به‌ترتیب در حدود ۰/۸۲ تا ۱/۶۴ و ۰/۸۱ تا ۱/۲۵ می‌باشد. به عبارت بهتر با افزایش ۱۰۰ درصدی ضریب زبری دامنه‌ای، دبی اوج در حدود ۱۸ کاهش و با کاهش ۱۰۰ درصدی ضریب زبری دامنه، دبی اوج در حدود ۶۴ درصد افزایش می‌یابد. این مقادیر برای ضریب آبراهه‌ای بین ۱۹ تا ۲۵ درصد می‌باشد. افزایش مقدار ضریب زبری به معنای افزایش مقاومت در برابر حرکت جریان بوده و موجب کاهش دبی اوج و افزایش زمان پایه سیلاب خواهد شد (عکس این مطلب نیز صادق می‌باشد). همچنین، نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که حساسیت مدل KW-GIUH نسبت به مقادیر کم ضریب زبری (خصوصاً زبری دامنه‌ای) بسیار بیشتر بوده و با کاهش ضریب زبری دامنه‌ای مقدار دبی تا حدود ۶۴ درصد افزایش خواهد یافت. این در حالی است که افزایش ۱۰۰ درصدی ضریب زبری آبراهه‌ای و دامنه‌ای تاثیر به مراتب کمتری بر کاهش دبی اوج دارد. در نتیجه چنانچه مدل‌ساز ضرائب زبری را بیش برآورد نماید، خطای کمی را بر عملکرد مدل تحمیل خواهد نمود.



شکل ۱۵- حساسیت دبی اوج سیلاب نسبت به مقادیر مختلف ضرایب زبری آبراهه‌ای (n_c) و دامنه‌ای (n_b)

علاوه‌بر نمودارهای فوق، در شکل ۱۶ نیز میزان تغییرات دبی اوج بدون بعد در برابر ضرایب زبری و نفوذ بدون بعد مربوط به روش نفوذ Ø نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، حساسیت دبی اوج سیلاب نسبت به نوع روش نفوذ و ضریب زبری دامنه‌ای بیشتر از تاثیر ضریب زبری آبراهه‌ای می‌باشد. به عبارت بهتر پارامترهای نفوذ و ضریب زبری دامنه‌ای از اهمیت بسیار زیادی در مرحله واسنجی برخوردار بوده و ضریب زبری آبراهه‌ای تاثیر به مراتب کمتری بر نتایج حاصل از مدل KW-GIUH دارد.



شکل ۱۶- تغییرات دبی اوج سیلاب بدون بعد نسبت به ضریب زبری و نفوذ بدون بعد

نتیجه‌گیری

مدل‌سازی صحیح سیلاب و رواناب نیازمند آگاهی کافی از فرایندهای حاکم بر حرکت آب در سطح زمین می‌باشد. یکی از مهم‌ترین فرایندهایی که همواره در بسیاری از مدل‌های ریاضی مورد چالش محققین بوده است، فرایند نفوذ آب در خاک می‌باشد. عدم توجه به این فرایند منجربه محاسبه مقادیر غیرقابل قبول دبی اوج و حجم سیلاب خواهد شد و متعاقب آن طرح‌های منابع آب و مهندسی رودخانه با مشکل روبرو خواهند شد. در مقاله حاضر به جای ارزیابی روش‌های مختلف نفوذ به‌طور مجرد، به ارزیابی چهار روش مرسوم برآورد نفوذ یعنی شاخص Ø، هورتون، گرین-امپت و SCS بر عملکرد مدل ژئومورفولوژیکی KW-GIUH به‌عنوان یک مدل مفهومی نیمه توزیعی با مبنای هیدرولیکی در سطح حوضه پرداخته شده است. همچنین، در این تحقیق حساسیت عملکرد مدل مزبور نسبت به روش‌های مختلف برآورد نفوذ و ضرایب زبری جریان دامنه‌ای و آبراهه‌ای به خاطر اثر توامان دو عامل مهم مزبور بر عملکرد مدل تحلیل شد.

نتایج به‌دست آمده از کاربرد مدل KW-GIUH در حوضه کسیلیان حاکی از آن است که عملکرد روش-های هورتون و شاخص Ø از منظر شاخص نش-ساتکلیف تقریباً یکسان می‌باشد. اما بررسی مشخصات مهمی همچون دبی اوج، زمان رسیدن به دبی اوج و حجم سیلاب در دو روش، حاکی از برتری قابل توجه شاخص Ø دارد. نتایج به‌دست آمده از روش‌های گرین-امپت و SCS نیز تقریباً مشابه هم بوده و در هر دو روش، مقدار دبی و زمان رسیدن به اوج یکسان می‌باشد. طبق نتایج به‌دست آمده در این پژوهش، شاخص Ø مناسب‌ترین روش برای برآورد مقدار نفوذ و بارش خالص برای مدلی همچون KW-GIUH می-باشد. نتایج به‌دست آمده در این پژوهش با تحقیقات Shadeed و همکاران (۲۰۰۷)، Lee و Cheng (۲۰۰۹) و Lee و Hung (۲۰۱۳) هم‌خوانی مناسبی را نشان می‌دهد. طبق نتایج به‌دست آمده در مطالعات محققین مزبور، استفاده از شاخص فای و روش هورتون موجب افزایش کارائی مدل KW-GIUH برای شبیه‌سازی سیلاب می‌شود. این امر به خوبی نشان می‌دهد که استفاده از روش‌های ساده و تک پارامتری لزوما نتایج ضعیف‌تری از مدل‌های پیچیده و با مبنای فیزیکی بهتر به‌دست نمی‌دهد. مطالعات حاضر نشان می‌دهد که بررسی منفرد روش‌های نفوذ بدون جایگاه کاربرد آن‌ها می‌تواند گمراه کننده باشد. آنچه که سبب کارایی بهتر یک روش نفوذ نسبت به روش دیگر می‌شود، هماهنگی روش مورد استفاده با دیگر پارامترهای ورودی و ساختار مدل برای شبیه‌سازی موارد مورد نظر می‌باشد.

در این تحقیق، ملاحظه شد که حساسیت مدل KW-GIUH نسبت به مقادیر کم نفوذ بدون بعد بسیار زیاد می‌باشد و این در حالی است که برای مقادیر بالای نفوذ بدون بعد، میزان حساسیت دبی اوج هیدروگراف شبیه‌سازی به مراتب کمتر می‌باشد. همچنین، روش‌های هورتون و گرین-امپت به‌ترتیب دبی اوج کمتر و بیشتری را به‌دست می‌دهند.

نتایج حاصل از بررسی اثر مقادیر مختلف ضرایب زبری جریان دامنه‌ای و آبراهه‌ای بر دبی اوج سیلاب

نیز نشان می‌دهد که ضریب زبری جریان دامنه‌ای نسبت به ضریب زبری آبراهه‌ای تاثیر بیشتری را بر عملکرد مدل KW-GIUH به‌جای می‌گذارد. به‌عنوان مثال حداکثر تغییر مقدار دبی اوج به‌دست آمده از مقادیر مختلف ضریب زبری دامنه‌ای و آبراهه‌ای به‌ترتیب برابر ۶۴ و ۲۵ درصد می‌باشد. تحقیقات صورت گرفته توسط Lee و Yen (۱۹۹۷) نیز نشان می‌دهد که حساسیت مدل KW-GIUH نسبت به ضریب زبری دامنه‌ای و شدت بارش به مراتب بسیار بیشتر از تاثیر ضریب زبری آبراهه می‌باشد. در یک جمع‌بندی نهائی می‌توان عنوان نمود که پارامترهای نفوذ و ضریب زبری دامنه‌ای از اهمیت بسیار زیادی در مرحله واسنجی برخوردار بوده و ضریب زبری آبراهه‌ای تاثیری به مراتب کمتر بر نتایج حاصل از مدل KW-GIUH دارد. در نتیجه به هنگام استفاده از این مدل خصوصاً در حوضه‌های فاقد آمار توصیه می‌شود در برآورد مقدار نفوذ و ضریب زبری دامنه‌ای دقت بیشتری به‌عمل آید.

منابع مورد استفاده

1. Azizian, A. and A.R. Shokoohi. 2014. DEM resolution and stream delineation threshold effects on the results of geomorphologic based rainfall-runoff models. Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, 5: 1-15.
2. Azizian, A. and A.R. Shokoohi. 2015. Effects of data resolution and stream delineation threshold area on the results of a kinematic wave based GIUH model. Water SA, 41(10): 61-69.
3. Chahinian, N., R. Moussa, P. Andrieux and M. Voltz. 2005. Comparison of infiltration models to simulate flood events at the field scale. Journal of Hydrology, 306: 191-214.
4. Chiang, C.H. 2007. Incorporating subsurface-flow mechanism into geomorphology based IUH Modeling. Journal of Hydrology, 311(1-4): 91-105.
5. Johnson, M.S., W.F. Conn, V.K. Mehta, T.S. Steenhius, E.S. Brooks and J. Boll. 2003. Application of two hydrologic models with different runoff mechanisms to a hillslope dominated watershed in the north-eastern US: a comparison of HSPF and SMR. Journal of Hydrology, 284: 57-76.
6. Kumar, A. and D. Kumar. 2008. Predicting direct runoff from hilly watershed using geomorphology and stream-order law ratios: case study. Journal of Hydrologic Engineering, 13(7): 570-576.
7. Lee, K.T. and B.C. Yen. 1997. Geomorphology and kinematic-wave-based hydrograph derivation. Journal of Hydrologic Engineering, 123(1): 73-80.
8. Lee, K.T., N.Ch. Chen and B.I. Gartsmman. 2009. Impact of stream network structure on the transition break of peak flows. Journal of Hydrology, 367: 283–292.
9. Lee, K.T., N.C. Chen and Y.R. Chung. 2008. Derivation of variable IUH corresponding to time varying rainfall intensity during storms. Hydrological Sciences Journal, 53(2): 323-327.
10. Lee. K.T. and N.K. Cheng. 2009. A current version of the model of a unit hydrograph and its use in Taiwan and Russia. Geography and Natural Reason RCES, 30: 79-85.
11. Lee, K.T. and J.K. Hung. 2013. Runoff simulation considering time-varying partial contributing area based on current precipitation index. Journal of Hydrology, 486: 443–454.
12. Mishra, S., J. Tyagi and V. Singh. 2003. Comparison of infiltration models. Hydrological Processes, 17: 2629–2652.
13. Neshat, E. and M. Parekar. 2014. Comparison of vertical infiltration methods. Agricultural Science and Natural Resources, 11(3): 142-162 (in Persian).
14. Shadeed, S., H. Shaheen and A. Jayyousi. 2007. GIS-based KWGIUH hydrological model of semi-arid catchments: the case of Faria Catchment, Palestine. The Arabian Journal for Science and Engineering, 32(1): 3-16.
15. Usul, N. and M. Yilmaz. 2002. A pilot project for flood analysis by integration of hydrologic hydraulic models and geographic information systems (in Turkish). METU, Ankara, Turkey, 14(2): 13-19.
16. Wooding, R.A. 1965. A hydraulic model for the catchment-stream problem. II. Numerical solutions. Journal of Hydrology, 3: 254-267.
17. Yukuan, W., F. Bin, X. Pei, W. Daojie, W. Xiantuo and W. Yongqiang. 2007. Validation of three infiltration models on purple soil under simulated rainfall. Progress in Natural Science, 71(9): 1059-1066.

Sensitivity analysis of KW-GIUH rainfall runoff model with respect to infiltration methods and roughness coefficients

Alireza Shokoohi[*1], Asghar Azizian[2], Razieh Jemaat[3] and Vijay Singh[4]
[1] Professor , Faculty of Engineering and Technology, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran, [2] Assistant Professor, Faculty of Engineering and Technology, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran, [3] MSc, Water Resources Engineering and Management, Abhar Institute of higher education, Abhar, Iran and [4] Professor, Department of Biological and Agricultural Engineering, Texas A and M University, College Station, USA

Received: 01 March 2016 Accepted: 01 October 2016

Abstract

Flood forecasting in a sound way leading to correct results has been a challenge for all researchers and engineers for many decades, which is the basic reason for developing many different types of mathematical rainfall runoff models. Correct estimation of infiltration during a storm is essential to a justified and rational modeling of runoff at watershed scale. There are many experimental or mathematical models for simulating infiltration and deriving net rainfall with pros and cons. In the present research, instead of evaluating infiltration simulation methods solely, four more widely used methods; namely, ϕ index, Horton, Green-Ampt and SCS methods were selected to find out their effects on the performance of a kinematic wave based geomorphological model called KW-GIUH. Furthermore, a sensitivity analysis with respect to different infiltration methods and different overland and channel roughness coefficient were performed. Horton and ϕ method led to a better performance of the model in terms of observed and simulated hydrographs in the study watershed. In this regard, Nash-Sutcliffe efficiency indices for Horton and ϕ index methods were obtained as 94.9 and 90.3, respectively, while it was 77.7 for Green–Ampt and 76.3 for SCS infiltration method. According to results of sensitivity analysis, KW-GIUH performance has the most and least sensitivity when using Green–Ampt and ϕ index as the infiltration method, respectively. Although studying in a steep watershed with an overland slope of about 17% and a small area of about 38 km^2, changing the overland roughness coefficient has more effect on the model performance comparing with the change of channel roughness coefficient. Simulated flood peaks changed about 64 % due to changing the overland roughness coefficient while this value amounted to 25% for channel one. Shortly, it is concluded that KW-GIUH is highly sensitive to infiltration simulation method and overland roughness coefficient.

Key words: Geomorphologic model, Green-Ampt, Horton, SCS, ϕ index

[*]Corresponding Author: shokoohi@eng.ikiu.ac.ir