

مقایسه‌ی کارآیی مدل زمان-سطح و آبنمود واحد لحظه‌ای کلارک در بازسازی آبنمودهای سیل حوضه‌ی آبخیز کسلیان

کاکا شاهدی^{۱*}

هانیه اسدی^۲

محمد گلشن^۳

چکیده

تخمین رواناب در حوضه‌های آبخیز فاقد آمار همواره مورد توجه محققان و سازمان‌های مرتبط در مطالعه‌ی بسیاری از پروژه‌ها بوده است. پژوهش حاضر با هدف بررسی دقت و کارآیی مدل‌های زمان-سطح و آبنمود واحد لحظه‌ای کلارک در تخمین آبنمود خروجی حوضه‌های فاقد آمار صورت گرفته است. محل مطالعه‌ی حوضه‌ی آبخیز کسلیان انتخاب گردید. ابتدا با استفاده از نقشه‌ی توپوگرافی منطقه‌ی مورد مطالعه و نرم‌افزار ArcGIS نمودار زمان-سطح تهیه گردید. سپس با استفاده از داده‌های باران نگار و انتخاب رگبار مناسب، آبنمود سیل مربوط به هر رگبار با کمک مدل زمان-سطح به دست آمد و نتایج با آبنمودهای ثبت شده‌ی مربوطه در خروجی حوضه مقایسه شد. سپس با اعمال ضریب ذخیره، آبنمود واحد لحظه‌ای کلارک به منظور بازسازی آبنمود واحد مشاهده‌ای در خروجی حوضه‌ی آبخیز کسلیان به دست آمد. محاسبه‌ی ضریب ذخیره با استفاده از روش‌های ترسیمی، کلارک، لینزلی، میشل، جانستن و کراس، ایتن، هویت و لانگبین، ناش، کارتر، مورگان و جانسن و بل انجام گرفت. در نهایت برای مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از شاخص‌های جذر میانگین مربعات خطا، میزان انحراف از دبی اوج، ضریب کارآیی و خطای نسبی دبی اوج، زمان تا اوج و زمان پایه استفاده گردید. نتایج نشان داد روش ترسیمی در محاسبه‌ی ضریب ذخیره از دقت بالاتری برخوردار است و مدل کلارک نیز نتایج بهتری نسبت به مدل زمان-سطح ارائه کرد که نشان‌دهنده‌ی اثر ضریب ذخیره در روندیابی سیلاب در حوضه‌ی آبخیز جنگلی کسلیان می‌باشد. لذا می‌توان از این روش برای محاسبه‌ی آبنمود ناشی از رگبار در حوضه‌های بدون آمار استفاده کرد.

کلمات کلیدی: آبنمود واحد لحظه‌ای، مدل زمان-سطح، ضریب ذخیره، کسلیان.

مقدمه

اصولاً در هیدرولوژی هدف، پیش‌بینی کمی از چگونگی فرآیند بارش-رواناب و انتقال آن به نقطه‌ی خروجی و در نهایت تعیین میزان دبی عبوری در مقطع کنترلی به منظور برآورد سیل ناشی از یک بارش است. از آنجایی که ثبت و نشر ورودی‌ها و خروجی‌های حوضه‌ی آبخیز نیاز به ایستگاه‌های مربوط و دستگاه‌های ثابت مخصوص دارد و چون احداث و نگهداری چنین ایستگاه‌هایی از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست، لذا لازم است در حوضه‌های فاقد آمار از خصوصیات فیزیکی حوضه‌ی آبخیز به عنوان عامل نشان‌دهنده‌ی عکس‌العمل نسبت به ورودی‌های آن استفاده گردد (حشمت‌پور، ۱۳۷۸: ۳) که می‌توان با توجه به خروجی مدل‌های طراحی شده منطبق با تئوری‌های علمی که پس از تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های تأثیرگذار حاصل شده‌اند، درصد کارآیی مدل را نسبت به نمونه‌های مشاهده‌ای تعیین کرد. از طرفی برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب‌های سطحی می‌تواند راهی مؤثر برای پیشگیری و کنترل سیل باشد که خود نیازمند آمار و اطلاعات است، به همین جهت در حوضه‌های آبخیز بدون آمار، استفاده از روش‌های تجربی و یا مدل‌های مبتنی بر خصوصیات حوضه‌ی آبخیز به منظور استخراج مشخصات سیلاب را ملزم می‌نماید (صادقی و دهقانی، ۱۳۸۵: ۱۵۲).

در این راستا روش زمان-سطح^۱ به عنوان یک مدل بارش-رواناب یکی از مناسب‌ترین و ساده‌ترین تکنیک‌های روندیابی حوضه‌ها می‌باشد این روش که به اختصار TA نامیده می‌شود یک روش توزیعی بوده و به عنوان یک روش روندیابی هیدرولوژیکی حوضه‌ای، آبنمود سیلاب را بر اساس هایدروگراف بارش مؤثر محاسبه می‌نماید (شکوهی و ثقفیان، ۱۳۸۵: ۴۰). در این روش با صرف‌نظر کردن از اثرات ذخیره، حوضه‌ی آبخیز به کمک خطوط همزمان پیمایش تا خروجی حوضه به تعدادی زیر مساحت تقسیم می‌شود. بررسی کارآیی این مدل در حوضه‌ی آبخیز بازفت در مقایسه با مدل کلارک صورت گرفته است که در مجموع مدل کلارک نتایج بهتری را نسبت به مدل زمان-سطح ارائه کرده است (جهانبخش اصل و همکاران، ۱۳۹۱: ۴۹).

از طرفی استفاده صحیح از تئوری مربوط به آبنمود واحد لحظه‌ای^۲ به مفهوم رواناب سطحی حاصل از یک واحد بارش مازاد آبی در حوضه‌ی آبخیز (رامیرز، ۲۰۰۰: ۲۷) بدون داشتن اطلاعات مربوط به بارندگی و فقط با داشتن خصوصیات قابل دسترس فیزیوگرافی و ژئومورفولوژی حوضه بسیار کارا می‌باشد. برای به دست آوردن آبنمود واحد لحظه‌ای (IUH) مدل‌های متعددی وجود دارد که یکی از این روش‌ها مدل کلارک (۱۹۴۵) یا روش تأخیر و تنسیق^۳ می‌باشد. در این روش به دلیل قابلیت به دست آوردن ساده متغیرهای مورد

1- Time-Area (TA)

2- Instantaneous Unit Hydrograph (IUH)

3- Lag and Route Technique

نیاز آن به عنوان کاربردی‌ترین روش تهیه‌ی آبنمود واحد لحظه‌ای می‌باشد (علیزاده، ۱۳۸۵: ۵۸۱) به نحوی که بر اساس گزارش‌های موجود در حدود ۴۰ تا ۶۰ درصد پروژه‌های اجرایی اداره‌ی مهندسی ارتش آمریکا از روش آبنمود واحد لحظه‌ای کلارک استفاده می‌نماید (کول و فدمن^۱، ۱۹۹۸: ۱۰). آبنمود واحد کلارک از سه عامل زمان تمرکز، ضریب ذخیره و منحنی زمان-سطح استفاده می‌کند.

بررسی کارآیی آبنمود واحد لحظه‌ای IUH در ونزوئلا (روتزیگر-ایتوربه و همکاران، ۱۹۷۹، ۱۹۸۲)، در ایالت‌های مختلف آمریکا (جمفلت و وانگ^۲، ۱۹۹۴، جیمز و همکاران^۳، ۱۹۸۷)، در تایوان (ین و لی^۴، ۱۹۹۷) و در هند (کومار و همکاران، ۲۰۰۲، بهادرا و همکاران، ۲۰۰۸) در مقایسه با سایر روش‌ها صورت گرفته است. همچنین برای دستیابی دقیق‌تر به پارامترهای مورد نیاز در تهیه‌ی IUH روش‌های مختلف از قبیل حداقل مربعات (زاو و همکاران^۵، ۱۹۹۵)، سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی^۶ و سنجش از دور (بورلتسیکاس و همکاران^۷، ۲۰۰۶، اوزال و ییلماز^۸، ۲۰۰۷) بررسی گردیده‌اند.

چی^۹ (۱۹۹۵) در پژوهشی در حوضه‌ی داون کریک در برآورد دبی جریان از مدل موج دینامیکی و مدل کلارک استفاده کرد که نتایج نشان داد دبی حاصل از مدل کلارک به مقادیر مشاهده شده نزدیک می‌باشد. در مطالعه‌ای در حوضه‌ی رودخانه‌ی کارده در استان خراسان رضوی، آبنمود واحد مصنوعی کلارک تطابق خوبی با داده‌های مشاهده‌ای نشان داده است (نوربخش و همکاران، ۲۰۰۵: ۴۵۵).

همچنین در بررسی کارآیی آبنمود واحد لحظه‌ای کلارک در حوضه‌ی آبخیز بازفت، ضریب ذخیره با استفاده از روش‌های ترسیمی، کلارک و لیزلی به دست آمد که در نتیجه روش ترسیمی از دقت مناسب برای تخمین آبنمود واحد مشاهده‌ای برخوردار بوده است (صادقی و دهقانی، ۱۳۸۵: ۱۵۲).

اوزال و ییلماز (۲۰۰۷) در بخشی از حوضه‌ی اولوس در ترکیه به تخمین هیدروگراف واحد مصنوعی کلارک با استفاده از GIS پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که می‌توان از این روش هیدروگراف واحد حوضه با تداوم‌های مختلف را به منظور اهداف طراحی به دست آورد.

1- Kull and Feldman

2- Hjelmheth and Wang

3- James et al.,

4- Yen & Lee

5- Zhao et al.,

6- Geographical Information System (GIS)

7- Bourletsikas

8- Usul and Yilmaz

9- Chih

صادقی و همکاران (۲۰۱۵) در بررسی کارآیی آبنمود واحد لحظه‌ای کلارک در حوضه‌ی گلاز اشنویه در آذربایجان غربی از چهار روش در تهیه‌ی منحنی زمان-سطح استفاده نمودند که نتایج نشان داد روش بهینه‌ی توزیعی- مکانی زمان پیمایش از بیشترین دقت برخوردار بوده است.

در سایر مطالعات در ایران، عمدتاً از روش‌های مختلف آبنمود واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیک، ژئومورفوکلیماتیک، ناش و روسو در حوضه‌های آبخیز امامه (نصیری، ۱۳۸۴؛ خالقی و همکاران، ۲۰۱۴)، کسلیان (قهرمان، ۱۳۷۴؛ حشمت‌پور، ۱۳۷۸؛ خالقی و همکاران، ۲۰۱۱) استفاده و بعضاً نتایج به دست آمده با سایر روش‌های برآورد سیلاب مقایسه شده است.

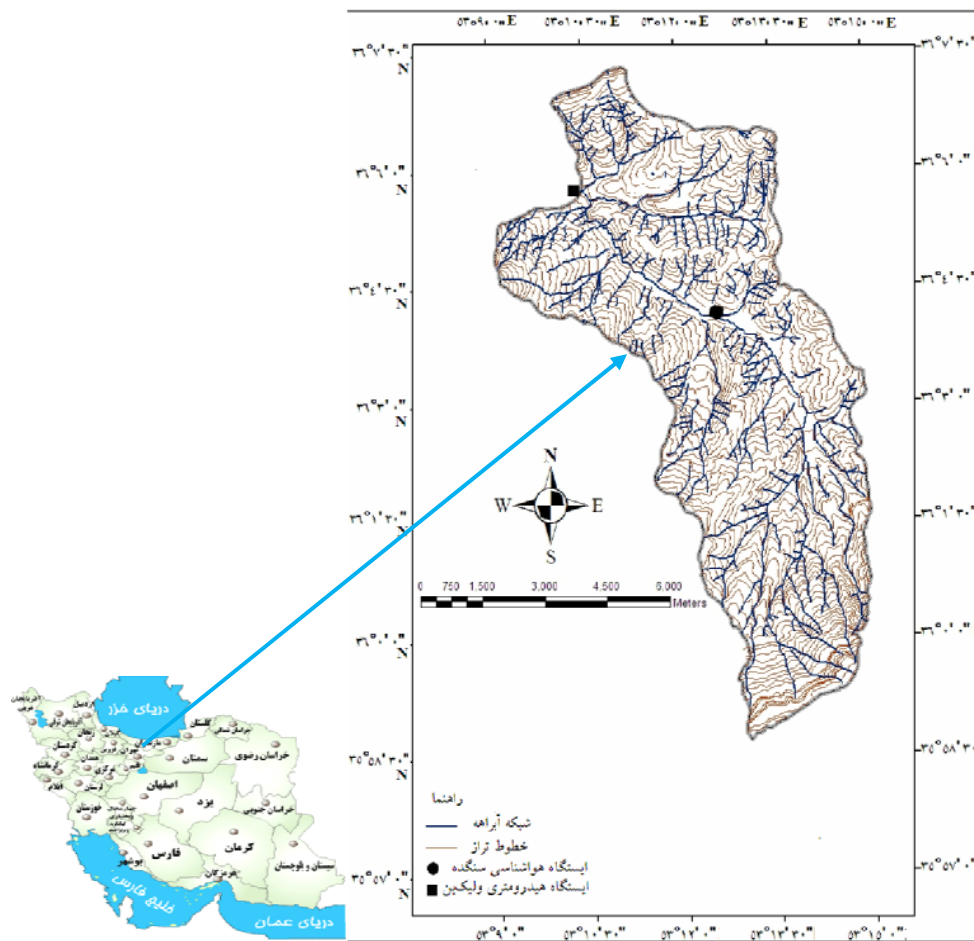
بر اساس سوابق موجود تحقیق می‌توان اذعان نمود که تاکنون تحقیق مشخصی در رابطه با مقایسه‌ی کارآیی مدل زمان-سطح و آبنمود واحد لحظه‌ای کلارک به منظور بررسی تأثیر ضریب ذخیره در بازسازی آبنمودهای سیل حوضه‌های آبخیز جنگلی صورت نگرفته است. از طرفی در حوضه‌های فاقد داده‌های پایه امکان تهیه‌ی آبنمود با استفاده از روش‌های تحلیل بارش و رواناب وجود ندارد. به همین جهت در حوضه‌های آبخیز بدون آمار استخراج مشخصات سیلاب و تهیه‌ی آبنمودها با استفاده از روش‌های تجربی و یا مدل‌های مبتنی بر ویژگی‌های حوضه‌ی آبخیز بسیار کارا می‌باشد. در این راستا به منظور تخمین سیلاب در حوضه‌های فاقد آمار و با توجه به معرف بودن حوضه‌ی آبخیز کسلیان و داشتن اطلاعات کامل بارش و دبی، مقایسه و ارزیابی کارآیی این دو مدل در حوضه‌ی مذکور مد نظر قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

به منظور انجام تحقیق حاضر، حوضه‌ی آبخیز معرف کسلیان در استان مازندران واقع در دامنه‌ی شمالی سلسله جبال البرز انتخاب شد. حوضه‌ی مذکور بین عرض جغرافیایی $35^{\circ} 58' 30''$ و $36^{\circ} 7' 15''$ شمالی و طول جغرافیایی $53^{\circ} 8' 44''$ و $53^{\circ} 15' 42''$ شرقی قرار گرفته است و دارای مساحت $66/75$ کیلومتر مربع، محیط $42/5$ کیلومتر، حداقل و حداکثر ارتفاع به ترتیب 1100 و 2700 متر از سطح دریا و طول بزرگ‌ترین آبراهه $17/33$ کیلومتر است. شکل (۱) شمای کلی منطقه‌ی مورد مطالعه و محل ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد.

برای انجام این تحقیق از آمار بارندگی ایستگاه سنگده به عنوان نزدیک‌ترین ایستگاه به مرکز ثقل حوضه و اطلاعات ثبت شده سیل در ایستگاه ولیکن واقع در خروجی (شکل ۱) استفاده گردید. تعداد ۴۸ رگبار منفرد ایستگاه باران‌نگار از مجموع کل رگبارهای اتفاق افتاده طی سال‌های ۱۳۵۴ تا ۱۳۸۶ به لحاظ برخورداری از شرایط استفاده برای تهیه‌ی آبنمود واحد انتخاب شد. برای تعیین متوسط تلفات بارش از شاخص فی^۱ و از

طریق تجزیه باران نگار و آبنمود رگبار مربوطه به روش سعی و خطا استفاده گردید. برای به‌دست آوردن آبنمود سیل از آبنمود کل، با رسم خط از ابتدای شاخه بالارونده تا انتهای شاخه خشکیدگی آب پایه جدا شد. در ادامه آبنمود واحد حوضه‌ی آبخیز مذکور پس از تعیین ارتفاع رواناب مستقیم و مدت زمان بارش مؤثر تهیه شد (علیزاده، ۱۳۸۵: ۳۱۷). سپس منحنی S مربوط به هر سیلاب تهیه و آبنمودهای سیل به آبنمودهای واحد ۳ ساعته تبدیل شدند و در نهایت آبنمود واحد ۳ ساعته متوسط مشاهده‌ای به دست آمد که آبنمود حاصل به منظور بررسی کارایی مدل کلارک مورد استفاده قرار گرفت.



شکل (۱) شمای کلی و ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری حوضه‌ی آبخیز کسلیان

برای تهیه‌ی منحنی زمان-سطح که در هر دو مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد ابتدا نقشه‌ی رقومی شده‌ی حوضه با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ از سازمان نقشه‌برداری کشور تهیه شد. سپس با استفاده از آن نقشه‌ی مدل رقومی ارتفاع^۱ با اندازه‌ی پیکسل برابر ۲۰ متر تهیه و بر اساس آن، نقشه‌های شیب و جهت شیب در محیط

1- Digital Elevation Model

نرم‌افزار ARCGIS تهیه شدند. سپس برای تهیه‌ی نقشه‌ی همزمان تمرکز یک ساعته حوضه بر اساس روش نیمرخ آبراهه (سینگ، ۱۳۸۱: ۳۲۴).

زمان تمرکز محاسبه و زمان پیمایش مناسب انتخاب گردید. زمان تمرکز با توجه به تعریف آن، که عبارت است از فاصله‌ی زمانی بین انتهای بارش مازاد تا نقطه‌ی عطف هیدروگراف در شاخه‌ی نزولی (مهدوی، ۱۳۸۱: ۲۱۱)، در ۴۸ هیدروگراف موجود تعیین و میانگین آنها محاسبه گردید. سپس با استفاده از DEM و لایه‌ی رقومی شده‌ی آبراهه نیمرخ طولی بزرگ‌ترین آبراهه به دست آمد و نیمرخ به قطعاتی به تعداد فواصل زمانی انتخاب شده تقسیم و با انطباق محور زمان تمرکز بر محور طول رودخانه، ارتفاع نقاط تقاطع هم زمان تمرکز با آبراهه‌ی اصلی به دست آمد. با متصل کردن نقاط ارتفاعی متناظر آنها خطوط هم‌زمان تمرکز و نهایتاً مساحت محصور شده بین آنها در محیط نرم افزار ARCGIS به دست آمد.

در مدل زمان-سطح برای محاسبه‌ی آبنمود رابطه‌ی (۱) به ازای بارش مؤثر متغیر در زمان بکار گرفته شد:

$$Q_j = \sum_{k=1}^j I_k A_{j-k-1} \quad \text{رابطه‌ی (۱)}$$

j معرف گام زمانی، Q دبی جریان خروجی، I شدت بارش مؤثر و A مساحت محدود به دو خط همزمان پیمایش متوالی است.

با استفاده از مدل زمان-سطح می‌توان توزیع زمانی بارش خالص را در محاسبات بارش-رواناب لحاظ نمود (مطابق رابطه‌ی ۱). همچنین اثر دو ویژگی مهم ژئومورفولوژیکی حوضه، یعنی شکل حوضه و الگوی زهکشی آن، در تعیین شکل آبنمود سیل و دبی اوج آن عملاً در این روش خود را آشکار می‌سازند. البته این امر وابسته به میزان دقت روش تعیین موقعیت خطوط همزمان پیمایش می‌باشد (شکوهی و ثقفیان، ۱۳۸۵: ۴۱).

در روش آبنمود واحد لحظه‌ای کلارک منحنی زمان-سطح به دست آمده به عنوان یک جریان ورودی به حوضه‌ی آبخیز در نظر گرفته شد که به یک مخزن فرضی واقع در مجرای خروجی حوضه‌ی آبخیز با ویژگی‌های مشابه ذخیره وارد می‌شود. جریان ورودی سپس بر اساس شرایط حاکم بر آبراهه به طرف پایین دست روندیابی می‌شود. کلارک برای روندیابی جریان از معادله‌ی ماسکینگام و با فرض ثبات مقدار ورودی در ابتدا و انتهای بازه‌ی زمانی مورد نظر از رابطه‌ی (۲) استفاده کرد:

$$Q_2 = \frac{\Delta t_c}{k + 0.5\Delta t_c} I_1 + \frac{K - 0.5\Delta t_c}{k + 0.5\Delta t_c} Q_1 \quad \text{رابطه‌ی (۲)}$$

در رابطه‌ی (۲) Δt_c زمان تمرکز هر بخش بر حسب ساعت، I_1 میزان جریان ورودی اولیه، Q_1 جریان خروجی اولیه، Q_2 جریان خروجی بعد از زمان Δt_c و K ضریب ذخیره می‌باشند (علیزاده، ۱۳۸۵).

پارامتر K بر حسب ساعت با استفاده از روش ترسیم‌ی بر اساس رابطه‌ی (۳)، نشان‌دهنده‌ی اثر ذخیره کانال بر روی آب‌نمود می‌باشد و از تقسیم جریان در نقطه خمیدگی آب‌نمود مستقیم بر نرخ تغییرات مخزن در همان زمان به دست آمد.

$$K = \frac{-Q}{dQ/dt} \quad \text{رابطه‌ی (۳)}$$

علاوه بر این روش در صورتی که اطلاعات مربوط به حوضه‌ی آبریز معلوم باشد، می‌توان از فرمول‌های تجربی برای تعیین زمان تأخیر جهت تعیین K استفاده کرد. لذا پارامتر K به عنوان ضریب ذخیره یا زمان تأخیر (نجمایی، ۱۳۶۹) با استفاده از رابطه‌های (۴) تا (۱۳) به ترتیب منسوب به روش‌های کلارک (۱۹۴۵)، لینزلی (۱۹۴۵)، میشل (۱۹۴۸)، جانستن و کراس (۱۹۴۹)، ایتن (۱۹۵۴)، هویت و لانگبین (۱۹۵۵)، ناش (۱۹۶۰)، کارتر (۱۹۶۱)، مورگان و جانسن (۱۹۶۲)، بل (۱۹۶۷) بر حسب ساعت به دست آمدند:

$$k = \frac{cL}{\sqrt{S_c}} \quad c \in [0.8, 2.2] \quad \text{رابطه‌ی (۴)}$$

$$k = \frac{bL\sqrt{A}}{\sqrt{S_c}} \quad b \in [0.04, 0.075] \quad \text{رابطه‌ی (۵)}$$

$$k = 1.05A^{0.6} \quad \text{رابطه‌ی (۶)}$$

$$k = 1.5 + 90 \frac{W}{S} \quad \text{رابطه‌ی (۷)}$$

$$k = 1.2 \left(\frac{WA}{Lr} \right)^{1.3} \quad r \in [1, 2] \quad \text{رابطه‌ی (۸)}$$

$$k = cA^{0.4} \quad c \in [1, 3] \quad \text{رابطه‌ی (۹)}$$

$$k = \frac{27.6A^{0.3}}{S_o^{0.3}} \quad \text{رابطه‌ی (۱۰)}$$

$$k = 1.7 \left(\frac{L}{\sqrt{S_c}} \right)^{0.6} \quad \text{رابطه‌ی (۱۱)}$$

$$k = 2.8t^{0.81} \quad \text{رابطه‌ی (۱۲)}$$

$$k = cA^{0.33} \quad c \in [0.5, 3] \quad \text{رابطه‌ی (۱۳)}$$

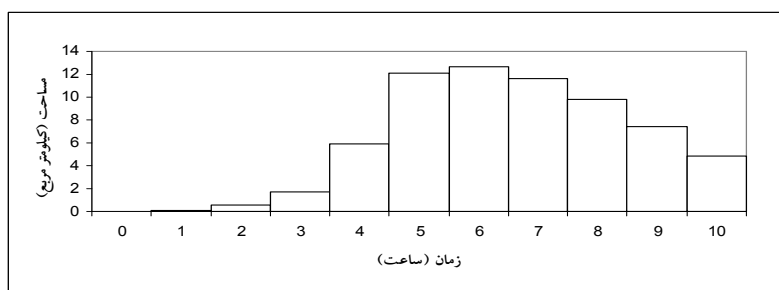
که در روابطه ارایه شده، L طول رودخانه‌ی اصلی بر حسب مایل، S_e شیب متوسط رودخانه‌ی اصلی بر حسب فوت بر مایل، A مساحت بر حسب مایل مربع، S شیب متوسط حوضه بر حسب فوت بر مایل، W عرض متوسط حوضه بر حسب مایل، Γ ضریب انشعاب، S_e شیب متوسط حوضه به جزء بر 10000 و t ضریب انشعاب می‌باشد.

برای انتخاب مقادیر ضرایب منطقه‌ای از مقادیر حداقل و حداکثر پیشنهادی در هر روش و نیز میانگین آنها استفاده شد و سپس مراحل مختلف تهیه‌ی IUH تا آخرین مرحله و دستیابی به آبنمود واحد ۳ ساعته ادامه یافته و نهایتاً ضریب منتهی به منطبق‌ترین آبنمود واحد ۳ ساعته با مقدار متوسط مشاهده‌ای آن به عنوان ضریب مناسب برای منطقه‌ی مورد مطالعه مد نظر قرار گرفت. بدین ترتیب پس از تعیین ضریب ذخیره‌ی (K) و منحنی زمان-سطح با کمک روش‌های مذکور، آبنمود واحد لحظه‌ای کلارک محاسبه گردید و سپس برای مقایسه با آبنمود واحد متوسط به دست آمده از سیلاب‌های مشاهده‌ای به آبنمود واحد ۳ ساعته تبدیل شد.

آبنمودهای تخمینی به دست آمده از مدل زمان-سطح نیز با آبنمودهای مشاهده‌ای ایستگاه ولیک‌بن مقایسه شدند. در تحقیق حاضر برای ارزیابی کارآیی نتایج حاصل از دو مدل زمان-سطح و آبنمود واحد لحظه‌ای کلارک با مقادیر مشاهده‌ای، از شاخص‌های آماری جذر میانگین مربعات خطا، میزان انحراف از دبی اوج، ضریب کارآیی و خطای نسبی دبی اوج، زمان تا اوج و زمان پایه علاوه بر مقایسه کیفی آنها استفاده گردید.

بحث و نتایج

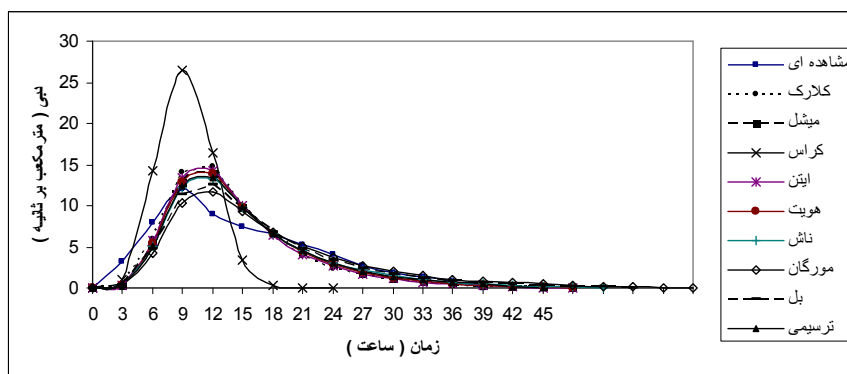
نمودار زمان-سطح حوضه با استفاده از روش نیمرخ آبراهه ترسیم گردید که در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲) نمودار زمان-سطح با روش نیمرخ آبراهه در حوضه‌ی آبخیز کسلیان

مقادیر K با استفاده از روش‌های ترسیمی، کلارک، لینزلی، میشل، جانستن و کراس، ایتن، هویت و لانگبین، ناش، کارتر، مورگان و جانسن و بل به ترتیب ۷،۸۸، ۶/۴۹، ۱/۱۲، ۷/۳۷، ۱/۷۵، ۶/۹۵، ۷/۳۳، ۷/۹۸، ۰/۹۸، ۹/۹۰ و ۸/۷۶ ساعت به دست آمد که دبی‌های حاصل از روش لینزلی و کارتر منفی بوده لذا کاربرد این روش‌ها نیاز به واسنجی ضریب منطقه‌ای دارد.

در شکل (۳) آبنمودهای شبیه‌سازی شده با استفاده از روش‌های مختلف تعیین ضریب ذخیره در مدل کلارک و آبنمود واحد مشاهده‌ای ۳ ساعته‌ی حوضه نشان داده شده است. همچنین نتایج کمی مقایسه آبنمودهای مذکور با استفاده از آماره‌های مختلف در جدول (۱) ارائه گردیده است.



شکل (۳) آبنمودهای شبیه‌سازی شده با استفاده از روش‌های مختلف تعیین ضریب ذخیره در مدل کلارک و آبنمود واحد مشاهده‌ای ۳ ساعته حوضه

جدول (۱) ارزیابی کمی آبنمودهای شبیه‌سازی شده با استفاده از روش‌های مختلف تعیین ضریب ذخیره در مدل کلارک و آبنمود واحد مشاهده‌ای ۳ ساعته حوضه

ضریب کارایی	جذر میانگین مربعات خطا	انحراف در دبی اوج	خطای نسبی (درصد)			شاخص آماری روش
			زمان تا اوج	زمان پایه	دبی اوج	
۰/۷۶	۱/۶۴	۰/۹۰	۳۳/۳۳	۱۵/۳۸	۱۱/۳۸	ترسیمی
۰/۶۵	۱/۹۷	۰/۸۲	۳۳/۳۳	۱۵/۳۸	۲۲/۲۲	کلارک
۰/۷۳	۱/۶۸	۰/۸۷	۳۳/۳۳	۲۳/۰۸	۱۵/۱۸	میشل
-۱/۳۶	۵/۵۰	۰/۴۵	۰	۳۸/۴۶	۱۲۰/۹۶	جانستن و کراس
۰/۷۰	۱/۷۸	۰/۸۴	۳۳/۳۳	۲۳/۰۸	۱۸/۴۶	ایتن
۰/۷۳	۱/۶۹	۰/۸۷	۳۳/۳۳	۲۳/۰۸	۱۵/۴۹	هویت و لانگبین
۰/۷۶	۱/۵۴	۰/۹۰	۳۳/۳۳	۳۰/۷۷	۱۰/۶۳	ناش
۰/۷۹	۱/۳۴	۱/۰۲	۳۳/۳۳	۵۳/۸۵	۲/۰۸	مورگان و جانسن
۰/۷۹	۱/۴۲	۰/۹۵	۳۳/۳۳	۳۸/۴۶	۵/۱۷	بل

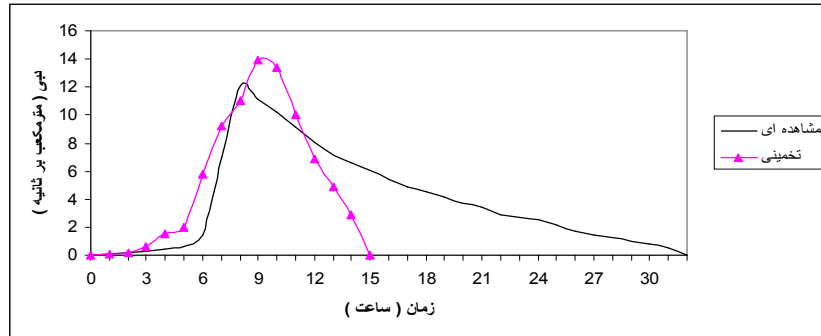
با توجه به نتایج جدول (۱) بر پایه خطاهای نسبی تعیین شده برای زمان پایه، دبی و زمان تا اوج در یک مقایسه‌ی پارامتریک می‌توان دریافت حداکثر خطای تخمین مربوط به زمان تا اوج بوده است و مدل در برآورد دبی اوج موفق‌تر از سایر پارامترها بوده است. همچنین مقایسه‌ی نتایج جدول (۱) نشان می‌دهد که خطای نسبی دبی اوج و مجذور میانگین مربعات خطای ناشی از آبنمود به دست آمده طی تخمین از روش مورگان-جانسن کمتر از روش‌های دیگر می‌باشد که با در نظر گرفتن تمامی شاخص‌های آماری مورد استفاده در این تحقیق و نیز متعارف بودن کاربرد آن، می‌توان گفت که در کل آبنمود به دست آمده طی تخمین از روش ترسیمی بهتر از سایر روش‌ها می‌باشد و روش مورگان-جانسن با ارزش نسبی تقریباً مشابه با روش ترسیمی در رتبه‌ی دوم اولویت برای منطقه مورد بررسی قرار دارد.

همچنین در شکل‌های (۴) تا (۱۳) آبنمودهای تخمینی به دست آمده از مدل زمان-سطح با آبنمودهای مشاهداتی ایستگاه ولیک‌بن مقایسه شده‌اند که نتایج کمی مقایسه‌ی آبنمودهای مذکور نیز در جدول (۲) نشان داده شده است.

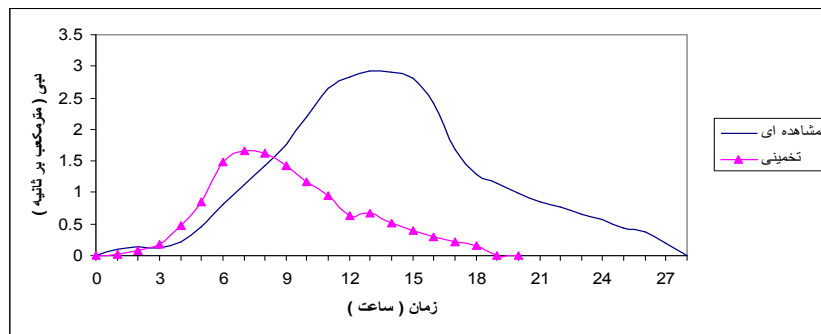
جدول (۲) مقادیر شاخص‌های آماری مورد استفاده در ارزیابی مدل زمان-سطح

ضریب کارایی	جذر میانگین مربعات خطا	انحراف در دبی اوج	خطای نسبی (درصد)			سیلاب
			زمان تا اوج	زمان پایه	دبی اوج	
۰/۴۳	۲/۶۱	۰/۸۳	۱۲/۵۰	۵۳/۱۲	۱۹/۷۸	۱۳۶۶/۸/۴
-۰/۳۷	۱/۱۴	۱/۶۸	۳۸/۴۶	۲۸/۵۷	۴۰/۷۹	۱۳۶۷/۶/۳۰
-۰/۸۶	۶/۱۸	۱/۵۸	۲۸/۵۷	۵۷/۷۸	۳۶/۹۵	۱۳۷۲/۲/۱۷
-۰/۱۹	۰/۵۱	۱/۵۹	۳۳/۳۳	۳۹/۲۹	۳۷/۰۴	۱۳۷۲/۴/۲۱
۰/۴۹	۲/۰۶	۱/۲۶	۰/۰۰	۶۶/۶۶	۲۰/۸۵	۱۳۷۳/۷/۳۰
۰/۲۷	۱/۹۹	۱/۴۰	۱۲/۵۰	۶۳/۱۶	۲۸/۶۱	۱۳۷۳/۹/۵
۰/۴۸	۱/۷۳	۱/۶۷	۰/۰۰	۲۵/۵۸	۴۰/۴۶	۱۳۷۴/۷/۲۰
-۰/۴۰	۰/۷۶	۱/۲۲	۵۰/۰۰	۳۷/۹۳	۱۸/۴۹	۱۳۷۵/۷/۱۵
۰/۳۵	۳/۹۵	۱/۶۶	۷/۶۹	۳۲/۲۵	۳۹/۹۳	۱۳۸۲/۳/۵
۰/۰۶	۰/۸۳	۱/۹۲	۲۵/۰۰	۴۲/۴۲	۴۸/۱۳	۱۳۸۲/۷/۱۳

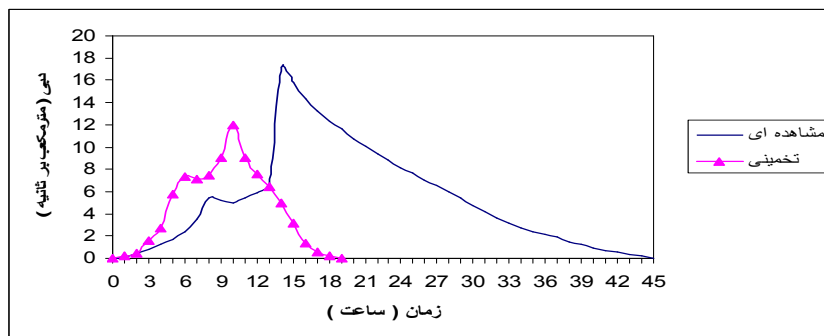
مقایسه‌ی نتایج جدول (۱) و (۲) نشان می‌دهد که ضریب کارآیی روش کلارک نسبت به روش زمان - سطح بیشتر می‌باشد. همچنین خطای نسبی دبی اوج، زمان پایه و زمان تا اوج و مجذور میانگین مربعات خطای ناشی از آبنمودهای به دست آمده طی تخمین از روش کلارک کمتر از مدل زمان - سطح می‌باشد که با نتایج (جهانبخش اصل و همکاران، ۱۳۹۱) مبنی بر برتری مدل کلارک مطابقت دارد.



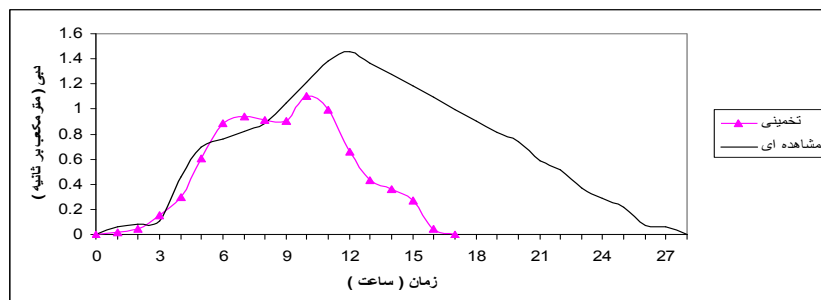
شکل (۴) آبنمود مشاهداتی و تخمینی حاصل از مدل زمان-سطح (۶۶/۸/۴)



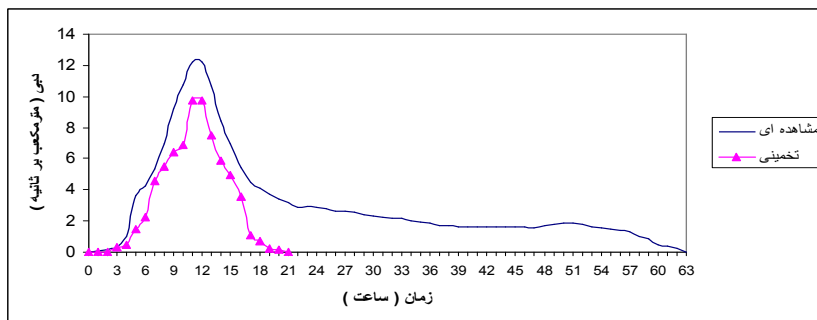
شکل (۵) آبنمود مشاهداتی و تخمینی حاصل از مدل زمان-سطح (۶۷/۶/۳۰)



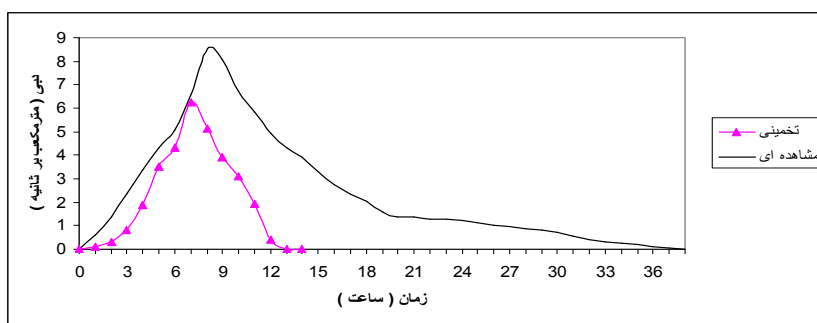
شکل (۶) آبنمود مشاهداتی و تخمینی حاصل از مدل زمان-سطح (۷۲/۲/۱۷)



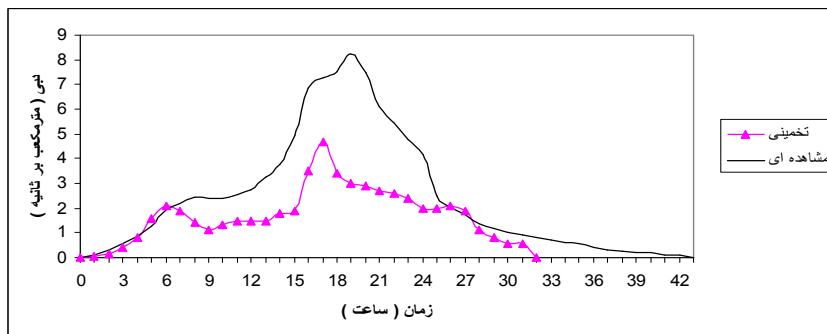
شکل (۷) آبنمود مشاهداتی و تخمینی حاصل از مدل زمان-سطح (۷۲/۴/۲۱)



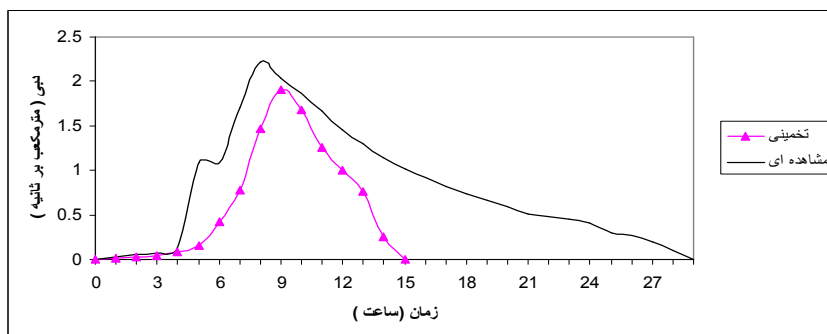
شکل (۸) آبنمود مشاهداتی و تخمینی حاصل از مدل زمان - سطح (۷۳/۷/۳۰)



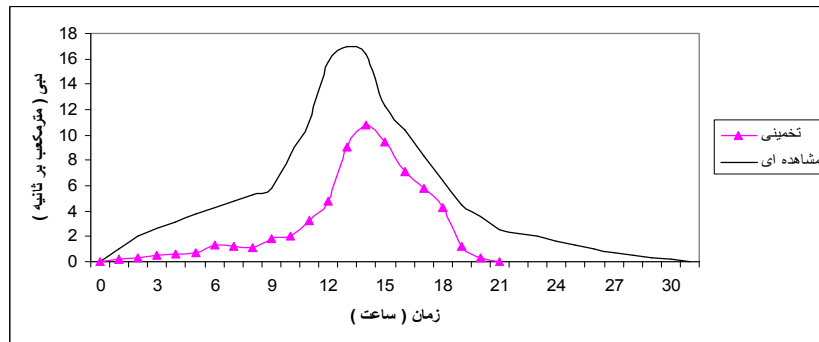
شکل (۹) آبنمود مشاهداتی و تخمینی حاصل از مدل زمان - سطح (۷۳/۹/۵)



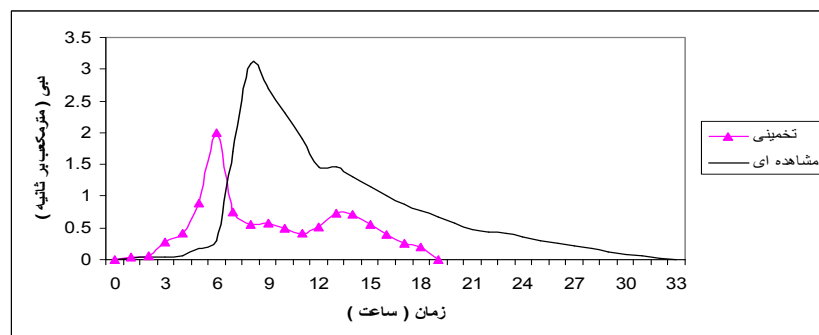
شکل (۱۰) آبنمود مشاهداتی و تخمینی حاصل از مدل زمان - سطح (۷۴/۷/۲۰)



شکل (۱۱) آبنمود مشاهداتی و تخمینی حاصل از مدل زمان - سطح (۷۵/۷/۱۵)



شکل (۱۲) آبنمود مشاهده‌ای و تخمینی حاصل از مدل زمان-سطح (۸۲/۳/۵)



شکل (۱۳) آبنمود مشاهده‌ای و تخمینی حاصل از مدل زمان-سطح (۸۲/۷/۱۳)

با توجه به اشکال (۴) تا (۱۳) در یک ارزیابی نظری می‌توان گفت که شکل شاخه بالارونده در آبنمودهای تخمینی در بیشتر موارد از شکل شاخه بالارونده در آبنمود مشاهده‌ای تبعیت کرده است. از طرفی مقدار دبی پیک آبنمود مشاهده‌ای، بیشتر از مقادیر تخمینی حاصل از مدل زمان-سطح می‌باشد و فقط در آبنمود مربوط به رگبار (۶۶/۸/۴) مقدار دبی پیک تخمینی بیشتر از مقادیر مشاهده‌ای است. زمان تا اوج در اکثر موارد کمتر از مقادیر مشاهده‌ای است و زمان پایه در همه‌ی موارد کمتر از زمان پایه‌ی آبنمود مشاهده‌ای به دست آمده است با توجه به اینکه تأثیر ضریب ذخیره در روندیابی سیل به روش ماسکینگام در مدل کلارک باعث شد که شیب شاخه نزولی آبنمود کاهش یابد و زمان پایه‌ی آبنمود طولانی‌تر شود. لذا نتایج آبنمود خروجی مدل زمان-سطح در مقایسه با مدل کلارک از کارایی کمتری برخوردار است که با نتایج به دست آمده توسط جهانبخش اصل و همکاران (۱۳۹۱) مطابقت دارد.

در یک مقایسه‌ی کیفی از نتایج به دست آمده در شکل (۳) می‌توان دریافت که کاربرد مدل کلارک دبی اوج بیشتری را نسبت به آبنمود مشاهده‌ای نشان داده است. نتایج حاصل از کاربرد روش‌های مختلف در تخمین ضریب ذخیره نشان داد که دبی‌های حاصل از روش لینزلی همچون نتایج به دست آمده توسط صادقی و دهقانی (۱۳۸۵) در حوضه‌ی آبخیز بازفت منفی بوده و لذا از چرخه‌ی مقایسه و ارزیابی‌های بعدی

حذف شد. دلیل آن را می‌توان به عدم سازگاری ضرایب منطقه‌ای ارایه شده برای حوضه‌ی آبخیز معرف جنگلی کسلیان و طبعاً ضرورت واسنجی ضریب منطقه‌ای روابط و مدل‌های ارائه شده نسبت داد. همچنین مقایسه‌ی شاخص‌های آماری جدول (۱) نشان می‌دهد که آبنمود به دست آمده طی تخمین از روش ترسیمی بهتر از سایر روش‌ها است که با نتایج تحقیقات صادقی و دهقانی (۱۳۸۵) در حوضه‌ی آبخیز بازفت مطابقت دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بخشی از دقت برآورد خصوصیات آبنمود به روش مورد استفاده در تعیین پارامترها وابسته بوده که با نتایج به دست آمده توسط سابل (۱۹۸۸)، افشار (۱۳۶۴) و صادقی و همکاران (۲۰۱۵) در حوضه‌ی رودخانه‌ی گلاز اشنویه نیز مطابقت دارد.

به طور کلی مقایسه نتایج این تحقیق با سایر مطالعات مربوط به تهیه‌ی آبنمود واحد لحظه‌ای با استفاده از روش‌های مختلف (بن و لی، ۱۹۹۷؛ کومار و همکاران، ۲۰۰۲؛ بهادرا و همکاران، ۲۰۰۸) و همچنین (قهرمان، ۱۳۷۴؛ حشمت‌پور، ۱۳۷۸؛ نصیری، ۱۳۸۴؛ خالقی و همکاران، ۲۰۱۱ و ۲۰۱۴ و صادقی و همکاران، ۲۰۱۵) مبنی بر توانایی قابل قبول روش مذکور در برآورد سیلاب دلالت دارد.

با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق دبی حاصل از روش آبنمود واحد کلارک دارای نتایج نزدیک به مقدار مشاهده شده می‌باشد که با تحقیقات چی (۱۹۹۵)، نوربخش و همکاران (۲۰۰۵)، اوزال و یلماز (۲۰۰۷)، صادقی و دهقانی (۱۳۸۵) تطابق دارد.

نتیجه‌گیری

این تحقیق به منظور بررسی کارآیی مدل‌های کلارک و زمان-سطح در بازسازی آبنمود خروجی حوضه‌ی آبخیز بدون داشتن اطلاعات مربوط به بارندگی و فقط با داشتن خصوصیات قابل دسترس فیزیوگرافی و ژئومورفولوژی حوضه و طبعاً ارزیابی سیلاب در منطقه‌ی مذکور انجام پذیرفت. با توجه به نتایج به دست آمده ضریب کارآیی مدل کلارک نسبت به مدل زمان-سطح بیشتر می‌باشد. همچنین خطای نسبی دبی اوج، زمان پایه و زمان تا اوج و جذر میانگین مربعات خطای ناشی از آبنمودهای به دست آمده طی تخمین از مدل کلارک کمتر از مدل زمان-سطح می‌باشد. بنابراین با در نظر گرفتن تمامی شاخص‌های آماری مورد استفاده در این تحقیق می‌توان گفت که مدل کلارک در شبیه‌سازی آبنمود واحد سیلاب در حوضه‌ی آبخیز معرف کسلیان در استان مازندران به طور کلی از کارآیی بالا برخوردار بوده و نشان‌دهنده‌ی اثرات ذخیره در تخمین صحیح‌تر از سیلاب خروجی حوضه می‌باشد و مدل زمان-سطح به دلیل عدم استفاده از ضریب ذخیره در روندیابی سیلاب دقت کافی برای شبیه‌سازی هیدروگراف سیل، در این حوضه را ندارد. همچنین آبنمود به دست آمده طی تخمین از روش ترسیمی بهتر از سایر روش‌ها است و می‌توان نتیجه گرفت که بخشی از دقت برآورد خصوصیات آبنمود به روش مورد استفاده در تعیین پارامتر وابسته بوده و در صورت تخمین صحیح پارامترها، دقت آن به مراتب افزایش خواهد یافت.

منابع

- افشار، عباس (۱۳۶۴)، «هیدرولوژی مهندسی»، انتشارات مرکز نشر دانشگاهی، تهران.
- جهانبخش اصل، سعید؛ رضائی بنفشه، مجید؛ گودرزی، مسعود؛ غفوری روزبهانی، عبدالمحمد و محمدحسین مهدیان (۱۳۹۱)، «ارزیابی کاربرد روش زمان-سطح و هیدروگراف واحد لحظه‌ای کلارک در برآورد دبی سیلاب بازفت کارون»، مجله‌ی جغرافیا و برنامه ریزی، جلد ۱۶، شماره‌ی ۴۱، صص ۴۹-۶۶.
- حشمت‌پور، علی (۱۳۷۸)، «بررسی کارآیی آبنمود واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیک و ژئومورفوکلیماتیک در حوضه‌ی آبخیز معرف کسلیان»، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
- سینگ، وی.پی. (۱۳۸۱)، «سیستم‌های هیدرولوژیکی (مدل‌سازی بارندگی-رواناب)»، ترجمه‌ی نجفی م.ر.، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ دوم.
- شکوهی، علیرضا و بهرام ثقفیان (۱۳۸۵)، «مقایسه‌ی روش‌های استخراج خطوط همزمان پیمایش برای استفاده در روش روندیابی زمان-مساحت»، مجله‌ی تحقیقات منابع آب ایران، جلد ۲، شماره‌ی ۳، صص ۳۹-۵۰.
- صادقی، سیدحمیدرضا و مرتضی دهقانی (۱۳۸۵)، «دقت روش‌های تخمین ضریب ذخیره‌ی آبنمود واحد لحظه‌ای در بازسازی آبنمود واحد سیل (مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی آبخیز بازفت)»، مجله‌ی علوم کشاورزی و منابع طبیعی، جلد ۱۳، شماره‌ی ۳، صص ۱۵۲-۱۶۰.
- صادقی، سیدحمیدرضا؛ مرادی، حمیدرضا؛ مزین، ملیحه و مهدی وفاخواه (۱۳۸۴)، «کارآیی روش‌های مختلف تجزیه و تحلیل آماری در مدل‌سازی بارش-رواناب (مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی آبخیز کسلیان)»، مجله‌ی علوم کشاورزی و منابع طبیعی، جلد ۱۲، شماره‌ی ۳، صص ۸۱-۹۰.
- علیزاده، امین (۱۳۸۵)، «اصول هیدرولوژی کاربردی»، انتشارات دانشگاه امام رضا، چاپ بیستم.
- قهرمان، بیژن (۱۳۷۴)، «آبنمود واحد لحظه‌ای ژئومورفو-آب و هوایی»، نشریه‌ی دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، جلد ۷، شماره‌ی ۱، صص ۲۸-۵۴.
- مهدوی، محمد (۱۳۸۱)، «هیدرولوژی کاربردی»، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ سوم.
- نصیری، علی (۱۳۸۴)، «آنالیز روابط متغیرهای ژئومورفولوژی-هیدرولوژی در مدل‌سازی برآورد سیل (مطالعه‌ی موردی حوضه‌ی آبخیز امامه)»، رساله دکتري، گرایش ژئومورفولوژی و مدیریت محیط زیست دانشگاه تهران.

- Scantily Gauged Watersheds**”, Environmental Modeling & Software, Vol. 23, PP. 1013-1025.
- Bourletsikas, A., Baltas, E. & Mimikou, M., (2006), “**Rainfall-runoff Modeling for an Experimental Watershed of Western Greece Using Extended Time-area Method and GIS**”, Journal of Spatial Hydrology, Vol. 6, No. 1, PP. 93-104.
- Chih, H.W., (1995), “**Rainfall-runoff Modeling Down Creek Watershed**”, Journal of Chinese Soil and Water Conservation, Vol.4, PP. 279-292.
- Clark, C.O., (1945), “**Storage and Unit Hydrograph**”, Transaction of the ASCE, Vol. 110, PP. 1419-1446.
- Hjelmfelt, A. & Wang, M., (1994), “**General Stochastic unit Hydrograph, Journal of Irrigation and Drainage Engineering**”, ASCE, Vol. 120, No. 1, PP. 138-148.
- James, W.P., Winsor, P.W. & Williams, J.R., (1987), “**Synthetic Unit Hydrograph**”, Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 113, No. 1, PP 70-81.
- Khaleghi, M.R., Ghodusi, J. & Ahmadi, H., (2014), “**Regional Analysis Using the Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph (GIUH) Method**”, Journal of Soil & Water Res., Vol. 9, No. 1, PP. 25–30.
- Khaleghi, M.R., Gholami, V., Ghodusi, J. & Hosseini, H., (2011), “**Efficiency of the Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph Method in Flood Hydrograph Simulation**”, Journal of CATENA, Vol. 87, No. 2, PP. 163-171.
- Kull, D.W. & Feldman, A.D., (1998), “**Evaluation of Clerk’s Unit Graph Method to Spatially Distributed Runoff, ASCE**”, Journal of Hydrologic Engineering, Vol. 3, No. 1, PP. 9-19.
- Kumar, R., Chatterjee, C., Lohani, A.K., Kumar, S. & Singh, R.D., (2002), “**Sensitivity Analysis of the GIUH Based Clark Model for a Catchment**”, Journal of Water Resources Management, Vol. 16, PP. 263-278.
- Noorbakhsh, M.E., Rahnema, M.B. & Montazeri, S., (2005), “**Estimation of Instantaneous Unit Hydrograph with Clark’s Method Using GIS Techniques**”, Journal of Applied Science, Vol. 5, No. 3, PP. 455-458.
- Ramirez, J.A., (2000), “**Prediction and Modeling of Flood Hydrology and Hydraulics. In: Inland Flood Hazards: Human, Riparian and Aquatic Communities**”, Wohl E. (ed.), Cambridge University Press, PP. 293-329
- Rodriguez-Iturbe, I., Devoto, G. & Valdes, J.B., (1979), “**Discharge Response Analysis and Hydrologic Similarity: The Interrelation between the Geomorphological IUH and the Storm Characteristics**”, Water Resources Research, Vol. 15, No. 6, PP. 1435-1444.

-
- Rodriguez-Iturbe, I., Gonzalez, M. & Bras, R.L., (1982), “**A Geomorphoclimatic Theory of the Instantaneous Unit Hydrograph**”, Water Resources Research, Vol. 18(4), PP. 877-886.
- Sabol, G.V., (1988), “**Clark Unit Hydrograph and R-parameter Rstimation**”, J. Hydraulic Eng. Vol. 114, No. 1, PP. 103-111
- Sadeghi, S.H.R., Mostafazadeh, R. & Sadoddin, A., (2015), “**Changeability of Simulated Hydrograph from a Steep Watershed Resulted from Applying Clark’s IUH and Different Time–area Histograms**”, Environ Earth Sci., Vol. 74, PP. 3629–3643
- Usul, N. & Yilmaz, M., (2007), “**Estimation of Instantaneous Unit Hydrograph with Clark’s Technique GIS**”, PP. 1-16. <http://gis.esri.com/library/userconf/proc02/pap1229/p1229.htm>.
- Yen, B.C. & Lee, K.T., (1997), “**P**”, Journal of Hydrologic Engineering, Vol. 2, No. 1, PP. 1-9.
- Zhao, B., Tung, Y.K. & Yang, J.C., (1995), “**Estimation of Unit Hydrograph by Ridge Least Squares Method**”, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 121, No. 3, PP. 253-259.