

مقدمه

خسارات گاه‌ها جبران ناپذیر پدیده سیلاب، عمدتاً ناشی از عدم برآورد دقیق سیلاب‌ها با دوره بازگشت‌های مختلف در طراحی سازه‌های آبی نظیر سرریزها، پل‌ها و ...، یا عدم رعایت پهنه سیلابی رودخانه‌ها در تملک اراضی و ساخت و ساز اعیانی‌ها می‌باشد. تاکنون مدل‌های بارش - رواناب فراوانی با قابلیت‌ها و پیچیدگی‌های متفاوتی جهت پیش‌بینی سیلاب توسعه یافته‌اند تا در طراحی سازه‌های آبی به‌کار روند و خسارات ناشی از سیلاب را تا حد امکان کاهش دهند [۳]. اما هم‌چنان یکی از مطمئن‌ترین راه‌های پیش‌بینی سیل، تحلیل فراوانی وقوع سیل با استفاده از آمار ثبت‌شده دبی اوج سیلاب در محل ایستگاه‌های هیدرومتری است. از سوی دیگر با توجه به کوتاه بودن دوره آماری ایستگاه‌های هیدرومتری، امکان پیش‌بینی وقوع سیلاب‌ها با دوره بازگشت‌های مختلف وجود ندارد که این امر استفاده از مدل‌های بارش - رواناب را ضروری ساخته است [۱۰]. یک روش دیگر برآورد دبی سیلابی، ساخت هیدروگراف مصنوعی سیل با استفاده از خصوصیات فیزیکی حوضه نظیر مساحت حوضه، ضریب رواناب، زمان تمرکز و بارش شش یا ۲۴ ساعته حوضه است [۱]. قدر مسلم، هرچه مقادیر ورودی به مدل از دقت بالاتری برخوردار باشند، صحت نتایج حاصل بیش‌تر خواهد بود. از این رو در حوضه‌هایی که دارای آمار دبی سیلابی است، با مقایسه مقادیر دبی سیلابی ثبت‌شده و مقادیر مدل‌سازی شده به روش هیدروگراف واحد مصنوعی، می‌توان پارامترهای فیزیوگرافی یک منطقه را تا حد ممکن بهینه نمود تا اطلاعات دقیق‌تری از منطقه مورد نظر در اختیار قرار گیرد. کریمی و همکاران [۶] روش‌های مختلف شبیه‌سازی هیدروگراف سیل را با استفاده از نرم‌افزار HEC-HMS در حوزه آبخیز چهل‌گزی شهرستان سنندج ارزیابی نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد که روش SCS در خصوص برآورد دبی اوج و زمان رسیدن به دبی اوج هیدروگراف سیل نسبت به روش‌های اشنایدر و کلارک برتری دارد. هم‌چنین بررسی روی پارامترهای مختلف مدل نشان داده که پارامتر شماره منحنی (ضریب رواناب) دارای حساسیت زیادی بوده است که به‌شدت دبی سیلابی را تحت تأثیر قرارداده است. کرکوتی و همکاران [۷] در مطالعه‌ای با مقایسه آمار موجود در ایستگاه‌های هیدرومتری با استفاده از روش‌های مشاهداتی، کریگر و SCS اقدام به برآورد میزان سیلاب طرح در حوزه آبخیز رودخانه قره‌سو در استان کرمانشاه کردند. با توجه به دقت مناسب روش SCS که از مشخصه‌های اقلیمی، زمین‌شناسی و فیزیوگرافی استفاده

بهینه‌سازی مقادیر ضریب رواناب و زمان تمرکز در برآورد مقادیر دبی سیلابی به روش SCS (مطالعه موردی: حوزه آبخیز رودخانه کهن‌رود)

سیدامید میرمحمدصادقی^۱ و محمد نبویان پور^۲
تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۱/۲۱

چکیده

برآورد سیلاب‌های یک حوضه با دوره بازگشت‌های مختلف یکی از راهکارهای مؤثر مدیریتی جهت کاهش خسارت‌های ناشی از سیل است. یکی از روش‌های برآورد دبی سیلابی، ساخت هیدروگراف مصنوعی سیل با استفاده از خصوصیات فیزیکی حوضه است. از این رو در حوضه‌هایی که دارای آمار دبی سیلابی است، با مقایسه مقادیر دبی سیلابی ثبت‌شده و مقادیر مدل‌سازی شده به روش هیدروگراف واحد مصنوعی، می‌توان پارامترهای فیزیوگرافی یک منطقه را تا حد ممکن بهینه نمود تا اطلاعات دقیق‌تری از منطقه مورد نظر در اختیار قرار گیرد. در این پژوهش با استفاده از داده‌های ثبت‌شده در محل ایستگاه هیدرومتری، مقادیر ضریب رواناب و زمان تأخیری به روش محاسبه افت و محاسبه انتقال از گره‌ای به گره دیگر در نرم‌افزار HEC-HMS محاسبه و با روش SCS کالیبره شده و سپس سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف مدل‌سازی شده که دبی سیلابی در تمام دوره بازگشت‌ها دارای آماره نش - ساتکلیف بالای ۰/۹ و RMSE کم‌تر از ۰/۵ هستند که نشان از بهینه‌سازی مناسب دبی‌های مدل‌سازی شده است. هم‌چنین مقادیر ضریب رواناب و زمان تمرکز بر اساس کالیبراسیون مدل، بهینه‌سازی شدند که می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های مربوط به مدیریت منابع آب و ویژگی‌های خاک یک حوزه آبخیز از قبیل نفوذپذیری مؤثر واقع شود.

کلیدواژه‌ها: دبی سیلابی، هیدروگراف، ضریب رواناب، زمان تمرکز، *Nelder Mead, Univariate Gradient*

۱. نویسنده مسئول و کارشناسی ارشد آبیاری زهکشی، دانشگاه شهرکرد. پست الکترونیک: Osadeghi10@gmail.com

۲. دانشجوی دکتری رشته مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشگاه اصفهان

آمار ثبت شده دبی سیلابی است که در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱- مقادیر دبی سیلابی ایستگاه هیدرومتری وانشان
Table1. Observed peak discharge value of Vaneshan hydrometric station

دبی اوج لحظه‌ای (m ³ /s) Instantaneous peak discharge	سال Year	دبی اوج لحظه‌ای (m ³ /s) Instantaneous peak discharge	سال Year
50	1381	6.6	1365
0.5	1382	122.72	1366
22	1383	6.5	1367
14.3	1384	8.6	1368
5.6	1385	16.1	1369
32.2	1386	22.15	1370
35	1387	35.52	1371
11.3	1388	9.9	1372
0.703	1389	55.38	1373
1.5	1390	9.7	1374
0.093	1391	1.6	1375
0.317	1392	4.05	1376
0.379	1393	9.88	1377
0.457	1394	1.73	1378
1.8	1395	9.13	1379
		1.88	1380

هم چنین اطلاعات اولیه ورودی به نرم افزار HEC-HMS به منظور مدل سازی بارش شامل مساحت زیرحوضه ها، روش محاسبه افت^۶، روش محاسبه انتقال آب از آبراهه اصلی^۷ و روش جستجوی راه حل های بهینه^۸ مطابق جدول (۲) تنظیم شده است.

می کند، نتایج این روش به عنوان سیلاب طرح پیشنهاد شده است. رومالی و همکاران [۱۳] از مدل HEC-HMS برای کالیبراسیون و صحت سنجی دبی اوج سیلاب رودخانه سگامات^۱ واقع در کشور مالزی استفاده نمودند. دبی شبیه سازی شده اولیه، با دبی مشاهده ای در حدود نه درصد و با دبی کالیبره و صحت سنجی شده در حدود سه درصد اختلاف داشتند. کارایی مدل در حالت اول ۹۰ و در حالت کالیبره ۸۰ درصد بوده است. پس از صحت سنجی نتایج هیدروگراف جریان بر اساس مقادیر کالیبره شده ترسیم گردیده است. نتایج این پژوهش نشان از کارایی مدل مذکور در کالیبراسیون و صحت سنجی مقادیر دبی اوج سیلابی داشته است. چی و یورن [۱] از مدل HEC-HMS برای شبیه سازی جریان در حوزه آبخیز دریاچه سب تونل^۲ در کشور کمبوجیه استفاده کرده اند. مدل برای ۱۳ پارامتر این نرم افزار با استفاده از ابزار شبیه ساز بهینه سازی^۳ و با روش جستجوی بهینه گرادین یکنواخت^۴ بهینه سازی و کالیبره شده است. ارزیابی داده های ماهانه و روزانه مشاهده ای و شبیه سازی شده پس از کالیبراسیون، توسط برخی توابع آماری نظیر نش-سانتکلیف^۵ صورت گرفته است که نتایج این ارزیابی، کارایی مدل مذکور را برای شبیه سازی جریان های ماهانه بیش تر از جریان های روزانه نشان داده است و مدل برای توسعه در مناطقی که کمیت و کیفیت آمار مناسب نیست، پیشنهاد شده است.

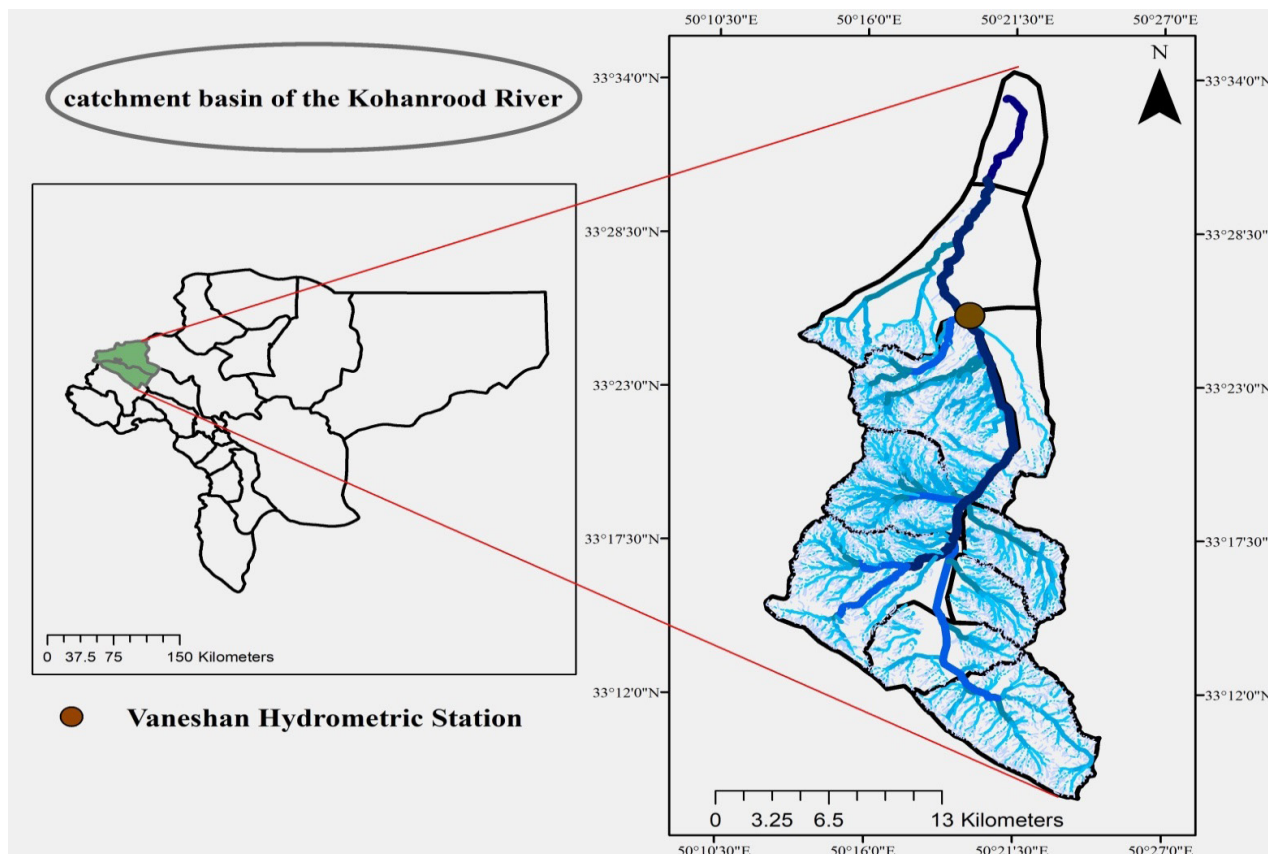
مواد و روش ها

- منطقه مطالعاتی

حوزه آبخیز رودخانه کهن رود در بخش جنوبی شهرستان گلپایگان و بخش شمالی شهرستان خوانسار با عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۱۸ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۱۲ دقیقه و طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۱۹ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۲۰ دقیقه قرار داشته و مساحت حوزه آبخیز این رودخانه در حدود ۴۷۰ کیلومتر مربع است. حداکثر و حداقل ارتفاع حوضه برابر ۳۶۵۰ و ۱۸۷۰ متر، میانگین بارش آن ۲۷۵ میلی متر و میانگین دمای آن ۱۴/۵ درجه سانتی گراد می باشد. شکل (۱) موقعیت حوزه آبخیز رودخانه کهن رود را نشان می دهد. هر ساله سیلاب در فصول زمستان و بهار در این منطقه به اراضی و حتی مناطق مسکونی حاشیه رودخانه آسیب زیادی وارد کرده که این موضوع بررسی بارش های با شدت بالا و در نهایت دبی سیلابی حاصل از آن ها را ضروری نموده است. به منظور بررسی آمار حداکثر بارش ۲۴ ساعته از آمار ایستگاه سینوپتیک گلپایگان و به منظور بررسی جریان سطحی موجود در رودخانه نیز از ایستگاه هیدرومتری وانشان استفاده شده است که در شکل (۱) محل این ایستگاه هیدرومتری نشان داده شده است. ایستگاه هیدرومتری وانشان از سال ۱۳۶۵ تا سال ۱۳۹۵ دارای

1. Segamat
2. Tonle Sap
3. Optimization Trial
4. Univariate Gradient
5. Nash- Sutcliff

6. Loss Method
7. Transform Method
8. Search Method



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و حوزه آبخیز رودخانه کهنرود

Fig1. Geographical location and catchment basin of the Kohanrood River

جدول ۲- اطلاعات اولیه ورودی مدل

Table2. Inputs of the model

اطلاعات اولیه Initial Data	نوع روش Method
محاسبه افت Loss method	SCS Curve Number
محاسبه انتقال Transform	SCS Unit Hydrograph
انتقال آب از گره‌ای به گره دیگر Routing method	Lag Time
روش جستجو Search method	Nelder Mead-Univariate Gradient

- روش پژوهش

در این پژوهش ابتدا داده‌های ثبت شده دبی سیلابی ایستگاه هیدرومتری وانشان از سازمان آب منطقه‌ای استان اصفهان جمع‌آوری شده و پس از بررسی همگنی با استفاده از آزمون ران تست^۱، داده‌ها وارد محیط نرم‌افزار هایفرن^۲ شده و توزیع برتر بر اساس معیار آکائیک

1. Run Test-
2. HYFRAN

انتخاب شده است. سپس مقادیر دبی سیلابی در محل ایستگاه وانشان با استفاده از توزیع برتر (لوگ نرمال) و با دوره بازگشت‌های مختلف برآورد شده است. برای حوزه آبخیز مورد مطالعه و تمام زیرحوضه‌های آن، مقدار ضریب رواناب از تلفیق لایه‌های شیب، پوشش گیاهی، نفوذ پذیری و نوع سازندهای زمین شناسی بدست آمده و هم‌چنین زمان تمرکز نیز به روش SCS در نظر گرفته شده است. به‌منظور برآورد دبی سیلابی از نرم‌افزار HEC-HMS استفاده شده است. این مدل دارای چهار بخش اصلی شبیه‌سازی اجزای حوضه، تجزیه و تحلیل داده‌های هواشناسی، ویژگی‌های کنترلی و تخمین پارامترها است [۴]. به‌کمک این نرم‌افزار می‌توان دبی سیلابی را به روش‌های مختلفی از جمله روش SCS برآورد نمود. هیدروگراف واحد SCS بی‌بعد و تک اوجی است. این هیدروگراف نسبت بین دبی‌های هیدروگراف واحد در هر زمان و دبی هیدروگراف واحد (U_p) در زمان رسیدن به اوج (T_p) را نشان می‌دهد. ارتباط بین این دو عامل به‌صورت رابطه زیر نشان داده شده است.

$$U_p = C \frac{A}{T_p} \quad (1)$$

در معادله فوق، A مساحت حوضه و T_p زمان رسیدن به اوج هیدروگراف است. C مقدار ثابتی است که در سیستم SI برابر ۲/۰۸ و در سیستم انگلیسی ۴۸۴ در نظر گرفته می‌شود. معادله زیر، توسط

گروه مهندسين ارتش آمريكا براي تعيين T_p پيشنهاده شده است [۴].

$$T_p = \frac{\Delta t}{2} + t_{lag} \quad (2)$$

در معادله فوق، Δt تداوم بارندگي مازاد و t_{lag} زمان تاخير حوضه است. با توجه به اين كه ورودی نرم افزار در روش SCS زمان تاخير حوضه می باشد، بنابراین رابطه زیر توسط سازمان حفاظت خاک پيشنهاده شده است [۱۱] و [۴].

$$t_{lag} = 0.6t_c \quad (3)$$

حجم رواناب به روش SCS مطابق رابطه $V = R.A$ محاسبه شده است كه A مساحت حوضه و R ارتفاع معادل رواناب سطحی بر حسب میلی متر است كه مطابق رابطه زیر محاسبه شده است.

$$R = \frac{(P-0.2S)^2}{P+0.8S} \quad (4)$$

در رابطه فوق، S ارتفاع نگهداشت آب بر حسب میلی متر است كه رابطه زیر براي تعيين آن پيشنهاده شده است [۴] و [۵].

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (5)$$

در اين رابطه CN ، ضريب رواناب است. آنچه مشخص است ضريب رواناب یکی از پارامترهای اساسی در برآورد میزان رواناب است. اين ضريب با در دست داشتن پارامترهایی چون گروه هیدرولوژیک خاک، سرعت نفوذ آب در خاک یا شیب منطقه، برای کاربری های اراضی مختلف و در شرایط رطوبتی مختلف خاک قابل محاسبه است. به طور کلی هرچه حوضه از شرایطی برخوردار باشد كه رواناب سریع تر و تلفات كم تر باشد، مقدار شماره منحنی بیش تر است و بر عكس. حدود تغییرات شماره منحنی بین صفر تا ۱۰۰ است اما عملاً هر دو مقدار امکان پذیر نیستند. زمان تمرکز، پارامتر تأثیرگذار دیگر در محاسبه مقدار رواناب است. از شروع رواناب تا زمانی كه دبی به حداکثر مقدار خود می رسد مدتی به طول می انجامد كه آن را زمان تمرکز می نامند. اين پارامتر نیز مطابق پيشنهاده SCS از طریق رابطه زیر قابل محاسبه است [۴] و [۱۱].

$$t_c = 0.000142L^{0.8} \left(\frac{25400}{CN} - 228.6 \right)^{0.7} \sqrt{S} \quad (6)$$

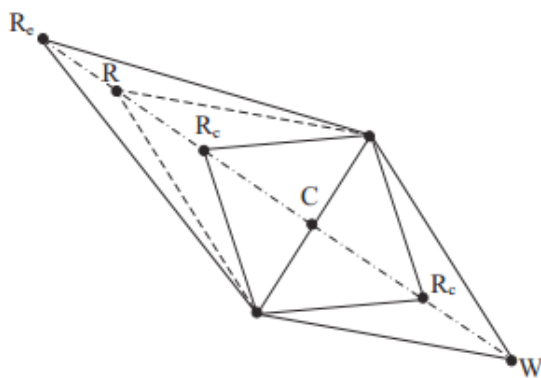
در اين رابطه نیز L طول آبراهه اصلی به متر و S شیب آبراهه اصلی بر حسب درصد است. بدین ترتیب و با روش فوق، دبی سیلابی به روش هیدروگراف واحد SCS در محیط نرم افزار HEC-HMS مدل سازی شده است. برای این منظور مساحت حوضه، زمان تاخير، ضريب رواناب و بارش شش ساعته^۱ با دوره بازگشت های مختلف وارد نرم افزار HEC-HMS شده و هیدروگراف واحد بر اساس دوره بازگشت های مختلف و بر اساس روش پيشنهاده SCS ساخته می شود. لازم بذکر است اساس محاسبات روش SCS در صورتی كه

1. SCS Storm

زمان تمرکز حوضه ها كم تر از شش ساعت باشد، بارش شش ساعته است و در غیر این صورت بارانی با تداوم زمان تمرکز حوضه مد نظر قرار می گیرد [۳]. در مرحله سوم به منظور کالیبراسیون مقادیر مدل سازی شده، درون محیط نرم افزار و با استفاده از ابزار شبیه ساز بهینه سازی در نوار ابزار محاسباتی^۲ نرم افزار HEC-HMS [۵] در محل ایستگاه هیدرومتری وانسان یک گره^۳ ایجاد کرده و در محل گره ایجاد شده یک اندازه^۴ برای تغییرات دبی تعریف کرده و با جایگذاری مقادیر دبی اوج مشاهداتی در مقادیر Gage، به روش های Univariate Gradient و Nelder Mead اقدام به جستجوی مقادیر بهینه گردید. الگوریتم Nelder Mead توسط دو محقق انگلیسی برای تخمین پارامترهای بهینه با استفاده از فرآیند تکرار به کار گرفته شد [۱۲]. این روش مکرراً ترتیبی از نقاط رئوسی را كه نقاط راس بهینه تابع هدف را پوشش دهند، می سازد و در هر تکرار راس مطابق با مقادیر تابع هدف مرتب می شود. به عبارت دیگر:

$$f(x_1) \leq f(x_2) \leq f(x_3) \leq \dots \leq f(x_{n+1}) \quad (7)$$

كه x_1 بهترین راس (كمترین مقدار تابع هدف) و x_{n+1} بدترین راس (بیشترین مقدار تابع هدف) است. راه حل ها در هر مرحله از الگوریتم ارزیابی شده و بدترین راه حل W تعیین می شود. سپس بدترین راه حل نسبت به مرکز یک سه ضلعی C منعكس شده و راه حل آن (R) جایگزین بدترین راه حل می شود. اگر نقطه منعكس شده بهتر از هر راه حل دیگری در محیط سه ضلعی باشد، سه ضلعی توسط یک ضريب توسعه كه مقداری بیش تر از ۱ دارد، گسترش می یابد (Re). اگر نقطه منعكس شده بدتر از W باشد، سه ضلعی منقبض شده و راه حل منعكس شده در مقابل مرکز قرار می گیرد (Rc). شكل (۲) نمای شماتیک الگوریتم Nelder Mead را نشان داده است [۱۵] و [۱۲].



شكل ۲- نمای الگوریتم Nelder Mead در فضای دوبعدی
Fig 2. Schematic of Nelder Mead algorithm in two-dimensional space

2. Compute
3. Junction
4. Gage

الگوریتم بهینه‌سازی دیگری که در نرم‌افزار HEC-HMS استفاده می‌شود، الگوریتم Univariate Gradient یا جستجوی یکنواخت است. اگر x^k تخمین پارامتر از تابع هدف $f(x^k)$ در اختیار باشد، الگوریتم جستجوی یکنواخت یک تخمین جدید x^{k+1} در تکرار $k+1$ تعریف می‌کند که:

$$x^{k+1} = x^k + \Delta x^k \quad (8)$$

در این رابطه Δx تصحیح پارامتر مورد نظر برای بهینه‌سازی است. هدف جستجو در این الگوریتم انتخاب Δx^k است به‌طوری‌که تخمین‌ها به سمتی پیش روند که مقدار تابع هدف حداقل شود. روشی که برای تعریف Δx^k به کار می‌رود بر پایه روش نیوتن است. در ابتدا تابع هدف توسط سری تیلور مطابق رابطه زیر تخمین زده می‌شود.

(9)

$$f(x^{k+1}) = f(x^k) + (x^{k+1} - x^k) \frac{df(x^k)}{dx} + \frac{(x^{k+1} - x^k)^2}{2} \frac{d^2 f(x^k)}{dx^2}$$

که $f(x^{k+1})$ تابع هدف در تکرار k ام و $\frac{df(x^k)}{dx}$ و $\frac{d^2 f(x^k)}{dx^2}$ به ترتیب مشتق اول و دوم تابع هدف هستند. با صفر قرار دادن مشتق رابطه (9) و ترکیب با معادله (8)، رابطه زیر حاصل خواهد شد [2] و [12].

$$\Delta x^k = - \frac{\frac{df(x^k)}{dx}}{\frac{d^2 f(x^k)}{dx^2}} \quad (10)$$

هم‌چنین به‌منظور بررسی مقادیر مدل‌سازی شده یا پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی یا مشاهده‌ای در پژوهش حاضر از دو آماره جذر میانگین مربعات خطا^۱ و ضریب نش- ساتکلیف استفاده شده است. آماره اول تعیین کننده مقدار خطا بین دو دسته داده‌های مشاهداتی و داده‌های مدل‌سازی شده است و این دو مقدار را باهم مقایسه می‌کند. رابطه جذر میانگین مربعات خطا عبارتست از:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (11)$$

در این رابطه $\hat{y}_i$ مقدار پیش‌بینی شده یا مدل‌سازی شده و y_i مقدار مشاهده شده است. هر چه مقدار میانگین مربعات خطا کوچک‌تر باشد بدین معنی است که مقادیر مشاهده‌ای و مدل‌سازی به یکدیگر نزدیک‌ترند.

آماره بعدی ضریب نش- ساتکلیف است که برای ارزیابی توان پیش‌بینی و مدل‌سازی یک مدل هیدرولوژیکی به کار می‌رود و رابطه آن عبارتست از:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (12)$$

1. Root Mean Square Error

که در این رابطه y_{sim} مقدار مدل‌سازی شده و $\bar{y}$ میانگین مقادیر مشاهده‌ای است. اگر E برابر یک باشد، مدل‌سازی عالی بوده و مقادیر مشاهده‌ای و مدل‌سازی شده در تطابق کامل هستند. مقدار E برابر با صفر نشان‌دهنده این است که تخمین‌های مدل دقتی برابر دقت میانگین داده‌های مشاهده‌ای دارد. هرچه E به یک نزدیک‌تر باشد، داده‌های مدل‌سازی شده به داده‌های مشاهده‌ای نزدیک‌تر است یا به عبارت دیگر مدل‌سازی بهتری انجام شده است.

هم‌چنین به‌منظور بررسی حساسیت مدل به پارامترها از معادله (۱۳) استفاده شده است [۱].

$$SEN = 100 \frac{Old - New}{|pc|} \quad (13)$$

در این رابطه Old: خروجی اولیه مدل، New: مقدار جدید مدل حاصل از تغییر پارامتر و pc: قدر مطلق درصد تغییرات پارامتر است

نتایج

در گام اول با توجه به دبی سیلابی ثبت‌شده در محل ایستگاه هیدرومتری وانشان، دبی سیلابی با استفاده از توزیع لوگ نرمال و برای دوره بازگشت‌های مختلف مطابق جدول (۳) برآورد شده است.

جدول ۳- مقادیر دبی سیلابی با استفاده از توزیع لوگ نرمال در ایستگاه وانشان

Table3. Flood discharge value using lognormal distribution in Vaneshan station

دبی اوج لحظه‌ای (m ³ /s) Instantaneous peak discharge	دوره بازگشت Return period
6.15	2
24.2	5
49.6	10
89.6	20
106	25
174	50
272	100

در مرحله بعدی با استفاده از اطلاعات اولیه مورد نیاز در نرم‌افزار HEC-HMS اقدام به مدل‌سازی دبی سیلابی در حوزه آبخیز مورد مطالعه شد. دبی سیلابی برای هریک از زیرحوضه‌های مطالعاتی رودخانه کهن‌رود در نرم‌افزار مذکور برای دوره بازگشت‌های دو تا ۱۰۰ ساله محاسبه شده است که نتایج برای گره ایجاد شده در محل ایستگاه وانشان مطابق جدول (۴) آمده است. لازم به ذکر است با توجه به این‌که دبی با دوره بازگشت ۲۵ ساله مطابق با ماده ۵۱ قانون توزیع عادلانه آب مصوب سال ۱۳۶۱ و آیین‌نامه مربوط به بستر و حریم رودخانه‌ها در طرح‌هایی هم‌چون ساماندهی رودخانه‌ها، دیوار سازی، استملاک اراضی و... نقش اساسی را ایفا می‌کند، از آن برای

کالیبراسیون و بهینه‌سازی مدل استفاده شده است و سپس با نتایج بهینه‌سازی شده، سایر دوره بازگشت‌ها نیز کالیبره شده است.

جدول ۴- مقادیر دبی اوج سیلابی مدل‌سازی شده در ایستگاه وانشان

Table4. Modeled value of peak flood discharge in

Vaneshan station						
دوره بازگشت	2	5	10	25	50	100
Return period						
مقدار دبی مدل‌سازی شده (m ³ /s)	8.16	25.16	65.25	112.5	181.05	286
Modeled discharge value						

مطابق جدول (۴)، میان میزان دبی مشاهده‌ای و دبی مدل‌سازی شده در محل ایستگاه هیدرومتری وانشان اختلاف وجود دارد که با توجه به حساس بودن پارامتر دبی اوج سیلاب مقدار زیادی تلقی شده است و نیاز به کالیبراسیون دارد. این اختلاف ممکن است ناشی از برآورد نه چندان دقیق دو پارامتر ضریب رواناب و زمان تمرکز باشد. زیرا سایر پارامترها از جمله بارش شش یا ۲۴ ساعته، جزو داده‌های ثبت‌شده در ایستگاه‌های هواشناسی هستند و از صحت قابل قبولی برخوردار هستند و تنها در صحت دو پارامتر مذکور تردید وجود دارد. در این صورت، هم به‌منظور کالیبراسیون مدل و هم بهینه‌سازی و برآورد دقیق‌تر پارامترهای ضریب رواناب و

زمان تمرکز، اقدام به بهینه‌سازی مدل به روش‌های جستجوی بهینه Nelder Mead (NM) و Univariate Gradient (UG) شد که نتایج در جدول (۵) آمده است (به‌دلیل قرارگیری زیرحوضه‌های یک و دو در پایین‌دست ایستگاه هیدرومتری وانشان و عدم تأثیر در هیدروگراف سیل این ایستگاه، محاسبات فقط برای زیر حوضه‌های سه تا ۱۰ آورده شده است).

با توجه به این‌که مقدار دبی ۲۵ ساله مشاهده شده در محل ایستگاه هیدرومتری وانشان که از توزیع لوگ نرمال به‌دست آمده بود، ۱۰۶ متر مکعب بر ثانیه محاسبه شده است، جدول (۶) نتایج بهینه‌سازی هر یک از پارامترهای ضریب رواناب و زمان تأخیر و تأثیر آن‌ها بر میزان دبی اوج را نشان داده است.

همان‌گونه که از جداول (۵) و (۶) مشخص است، بهینه‌سازی مقادیر ضریب رواناب و زمان تأخیر یا تمرکز تأثیر چشم‌گیری بر میزان دبی مشاهداتی دارند که این نکته، برآورد اولیه دقیق این دو پارامتر را ضروری می‌سازد. اما گاهی به‌دلیل عدم وجود اطلاعات کافی از هر یک از پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه ضریب رواناب و زمان تأخیر مانند نوع خاک، میزان نفوذپذیری، شیب، کاربری اراضی، شیب آبراهه اصلی و ...، دستیابی به برآوردهای اولیه دقیق امکان پذیر نیست و نیاز به اصلاح و بهینه‌سازی وجود دارد. شکل (۳) و (۴) نیز هیدروگراف سیل را برای مقادیر مدل‌سازی و بهینه‌سازی شده با کمک هر دو الگوریتم جستجوی بهینه نشان داده است. همان‌گونه که از شکل (۳) مشخص است هیدروگراف مدل‌سازی شده و بهینه‌سازی شده با یکدیگر اندکی اختلاف دارند اما در شکل (۴) این دو هیدروگراف کاملاً بر یکدیگر منطبق هستند

جدول ۵- نتایج بهینه‌سازی ضریب رواناب و زمان تمرکز به کمک دو الگوریتم NM و UG

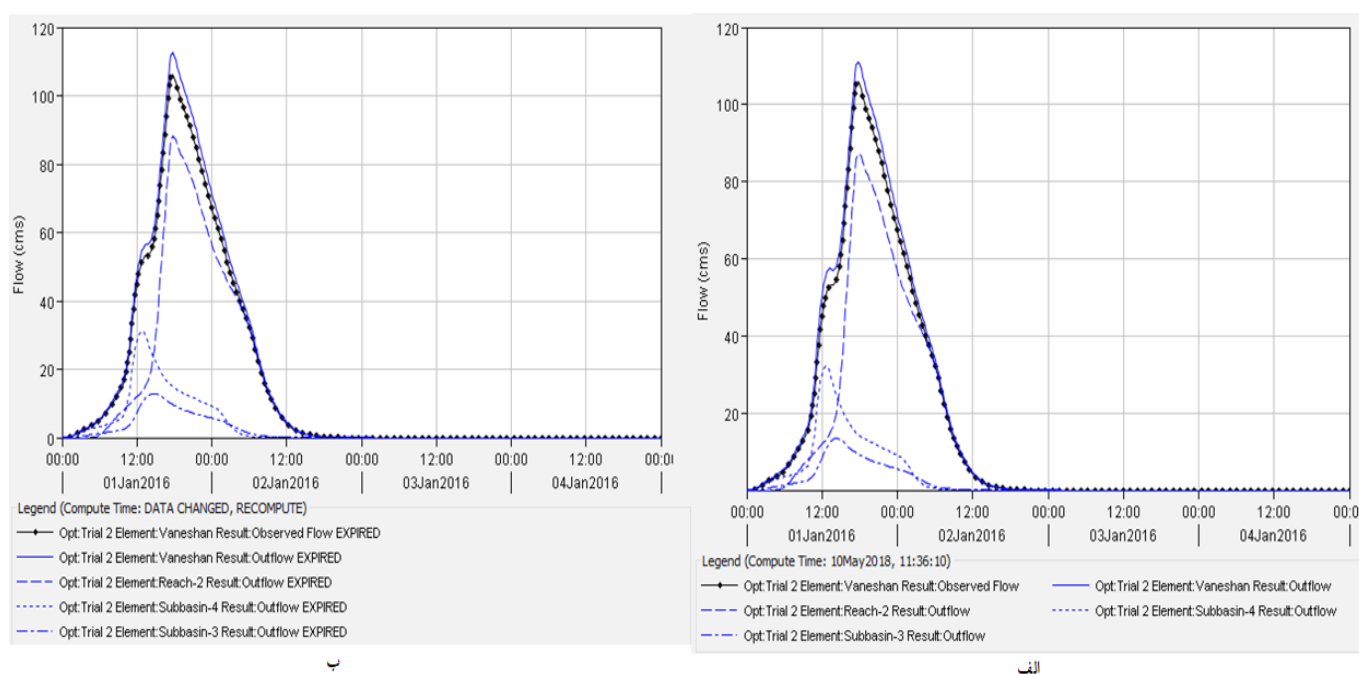
Table5. Result of curve number and lag time optimization by UG and NM algorithm

شماره زیرحوضه	مقدار اولیه CN	مقدار اولیه زمان تأخیر (min)	ضریب رواناب بهینه‌سازی شده به روش NM	ضریب رواناب بهینه‌سازی شده به روش UG	زمان تأخیر بهینه‌سازی شده به روش NM (min)	زمان تأخیر بهینه‌سازی شده به روش UG (min)
Number of sub basin	Initial value of CN	Initial value of lag time	Optimized CN by NM algorithm	Optimized CN by UG algorithm	Optimized lag time by NM algorithm	Optimized lag time by UG algorithm
3	76	232.7	73.4	73.2	232.8	214.6
4	76	144.4	74.3	74.4	144.5	135.9
5	77	150.9	75	76	151	145
6	76	192.9	77	74.75	193	195.8
7	75	205.5	71.5	73.9	205.6	208.3
8	78	131	78.9	76.25	131	132.75
9	76	86.7	75	74.65	86.8	87.75
10	77	210.75	76.3	75.4	211.2	213.7

جدول ۶- تأثیر بهینه‌سازی ضریب رواناب و زمان تأخیر بر مقدار دبی مدل‌سازی شده

Table 6. Result of curve number and lag time optimization on modeled value of flood discharge

	بهینه‌سازی ضریب رواناب به روش NM Optimized CN by NM algorithm	بهینه‌سازی ضریب رواناب به روش UG Optimized CN by UG algorithm	بهینه‌سازی زمان تأخیر به روش NM Optimized lag time by NM algorithm	بهینه‌سازی زمان تأخیر به روش UG Optimized lag time by UG algorithm
مقدار دبی اوج سیلابی (m ³ /s) peak discharge value	106	105.9	112.5	111.1
RMS Error	0.2	0.2	2	1.9
Nash- Sutcliffe	1	1	0.995	0.996



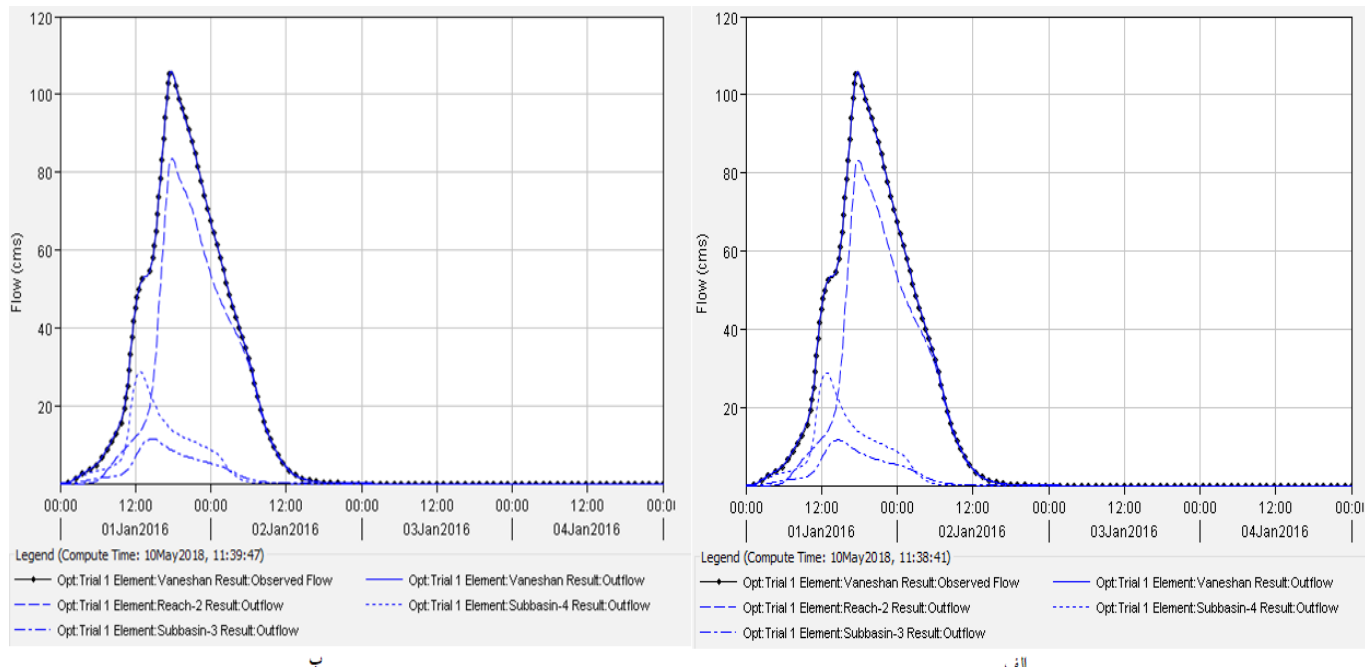
شکل ۳- مقایسه هیدروگراف بهینه‌سازی شده و هیدروگراف مدل‌سازی شده (الف: بهینه‌سازی زمان تأخیر به روش UG، ب: بهینه‌سازی زمان تأخیر به روش NM)

Fig3. Comparison between optimized and modeled hydrograph (A: Lag time optimization by UG algorithm, B: Lag time optimization by NM algorithm)

ایستگاه هیدرومتری وانسان داشته است. هم‌چنین جداول (۷) و (۸) نشان داده است که حساسیت دبی نسبت به مقادیر بهینه‌سازی شده با کمک هر دو الگوریتم جستجوی بهینه تا حدود زیادی یکسان است؛ اما حساسیت مقادیر دبی سیلابی به مقادیر بهینه‌سازی شده به روش UG اندکی بیش‌تر است. لذا با توجه به تحلیل حساسیت صورت گرفته و هم‌چنین مقادیر بهینه‌سازی شده مندرج در جدول (۶)، روش جستجوی بهینه مذکور بهینه‌سازی بهتری ارائه داده است که اختلاف

که نشان از تأثیر بهینه‌سازی مقادیر CN بر دبی سیلابی دارد. هم‌چنین جداول (۷) و (۸) نتایج تحلیل حساسیت دبی نسبت به پارامترهای بهینه‌سازی شده به کمک هر دو الگوریتم جستجوی بهینه را ارائه داده است.

نتایج تحلیل حساسیت دو پارامتر نشان داد که پارامتر ضریب رواناب با اختلاف نسبت به پارامتر دیگر، تأثیرگذاری بیش‌تری بر مقادیر دبی سیلابی در تک تک زیرحوضه‌ها و در نهایت در محل



شکل ۴- مقایسه هیدروگراف بهینه‌سازی شده و هیدروگراف مدل‌سازی شده (الف: بهینه‌سازی ضریب رواناب به روش UG، ب: بهینه‌سازی ضریب رواناب به روش NM)

Fig4. Comparison between optimized and modeled hydrograph (A: Curve number optimization by UG algorithm, B: Curve number optimization by NM algorithm)

جدول ۷- تحلیل حساسیت دبی نسبت به بهینه‌سازی پارامترها به روش UG

Table7. Flood discharge sensitivity analysis to optimized parameters by UG algorithm

درصد حساسیت دبی در هر زیرحوضه و محل ایستگاه هیدرومتری

Sensitivity percentage of flood discharge in each sub basin and hydrometric station

	CN	3	4	5	6	7	8	9	10	وانشان Vaneshan
-5		0.32	0.78	0.4	0.5	0.18	0.58	0.56	0.6	3.1
+5		-0.38	-1.14	-0.98	-0.18	-0.72	0.04	-0.78	-0.66	-3.86
T_{lag}		3	4	5	6	7	8	9	10	وانشان Vaneshan
-5		-0.18	-0.36	-0.2	-0.04	-0.26	-0.06	-0.04	-0.24	-0.26
+5		0.06	0.04	0.1	0.06	0.32	0.08	0.12	0.12	0.41

جدول ۸- تحلیل حساسیت دبی نسبت به بهینه‌سازی پارامترها به روش NM

Table8. Flood discharge sensitivity analysis to optimized parameters by NM algorithm

درصد حساسیت دبی در هر زیرحوضه و محل ایستگاه هیدرومتری

Sensitivity percentage of flood discharge in each sub basin and hydrometric station

	CN	3	4	5	6	7	8	9	10	وانشان Vaneshan
-5		0.3	0.8	0.52	0.34	0.46	0.4	0.6	0.66	2.9
+5		-0.38	-1.14	-0.74	-0.48	-0.68	-0.54	-0.88	0.92	-3.86
T_{lag}		3	4	5	6	7	8	9	10	وانشان Vaneshan
-5		-0.08	-0.16	-0.12	-0.06	-0.12	-0.06	-0.12	-0.12	-0.3
+5		0.06	0.15	0.08	0.04	0.12	0.06	0.12	0.1	0.34

مقادیر بهینه‌سازی شده را با مقادیر واقعی به حداقل رسانده است. از همین روی الگوریتم UG به‌منظور کالیبراسیون و بهینه‌سازی در روش هیدروگراف واحد SCS پیشنهاد شده است. در جدول (۹) نیز نتایج دبی سیلابی بهینه‌سازی شده برای دوره بازگشت‌های مختلف با استفاده از مقادیر ضریب رواناب و زمان تمرکز کالیبره شده آمده است. همان‌طور که از نتایج این جدول مشخص است مقادیر دبی سیلابی بهینه‌سازی شده با استفاده از مقادیر ضریب رواناب و زمان تمرکز کالیبره شده همگی دارای ضریب نش-ساتکلیف بالای ۰/۹ و جذر میانگین مربعات خطا کم‌تر از ۰/۵ هستند که نشان از توانایی الگوریتم جستجوی بهینه در بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولوژیکی دارد. در همین راستا شکل (۵) نیز مقایسه بین مقادیر دبی سیلابی مشاهده شده، مدل‌سازی شده و بهینه‌سازی شده توسط هر دو الگوریتم را نشان داده است.

بحث و نتیجه‌گیری

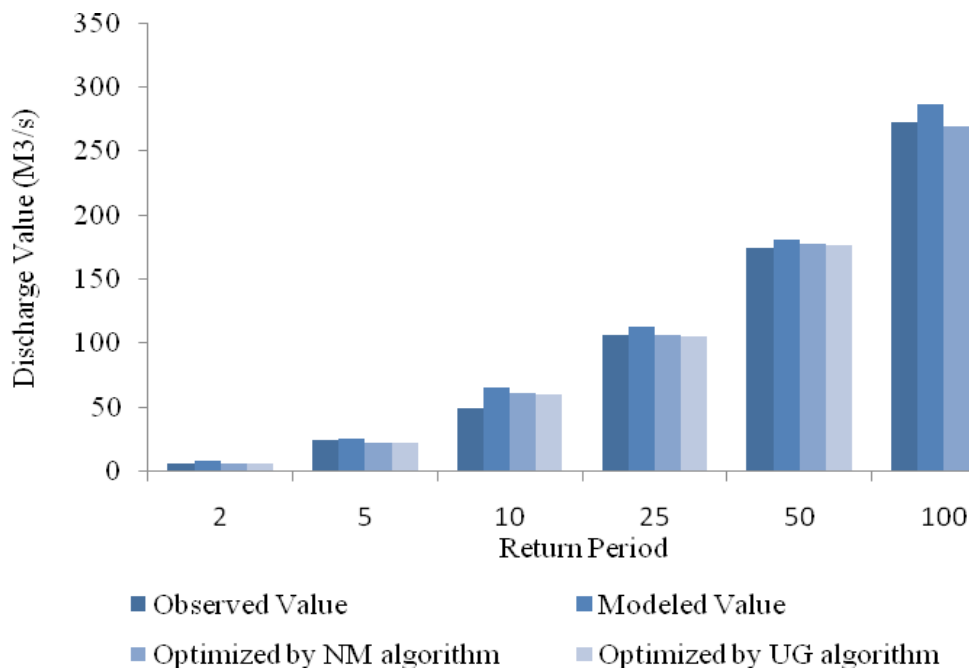
بهینه‌سازی مقادیر دبی اوج سیلابی مدل‌سازی شده علاوه بر بالابردن ضریب اطمینان در پیش‌بینی وقوع سیلاب‌ها، به تدقیق پارامترهای فیزیوگرافی که تأثیر زیادی بر سیلاب حوضه دارند، نیز می‌انجامد [۲]. از طریق کالیبراسیون مدل و تعیین دقیق مقادیر ضریب رواناب و زمان تمرکز در حوضه‌های دارای آمار می‌توان در حوضه‌های هم‌جوار که فاقد آمار ثبت شده دبی سیلابی هستند یا کمیت و کیفیت آمار مورد اطمینان نیست، از مدل‌سازی و ساخت هیدروگراف مصنوعی به روش SCS با کمک مقادیر بهینه‌سازی شده و کالیبره شده شماره منحنی و زمان تمرکز یا زمان تأخیر استفاده کرد و سیلاب‌های یک حوضه را با دوره بازگشت‌های

مختلف برآورد نمود و از آن‌ها در ساخت سازه‌های آبی یا تعیین حریم و بستر رودخانه‌ها استفاده نمود. علاوه بر این داشتن اطلاعات دقیق از مقادیر ضریب رواناب و زمان تمرکز می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های مربوط به مدیریت منابع آب و ویژگی‌های خاک یک حوزه آبخیز از قبیل نفوذپذیری کمک نماید [۹]. از میان دو الگوریتم بهینه‌سازی موجود در نرم‌افزار HEC- HMS، الگوریتم بهینه‌سازی UG به‌منظور کالیبراسیون و بهینه‌سازی در روش هیدروگراف واحد SCS پیشنهاد شده است که اختلاف مقادیر بهینه‌سازی شده را با مقادیر واقعی به حداقل رسانده است. از طرف دیگر مشکل اصلی الگوریتم بهینه‌سازی NM موجود در نرم‌افزار، توقف در نقاط بهینه محلی و هم‌گرایی زودرس بود که اجازه جستجوی راه‌حل‌های خوب و تکرار مسیر با کم‌ترین مقدار تابع هدف را نداده و لذا ادامه مسیر بهینه‌سازی برای آن میسر نبوده است. مقادیر مدل‌سازی شده دبی سیلابی در تمام دوره بازگشت‌ها دارای آماره نش-ساتکلیف بالای ۰/۹ هستند که نشان از بهینه‌سازی مناسب دبی‌های مدل‌سازی شده است. نتایج با پژوهش شاهوردی و محمدولی سامانی [۱۶] و سرتیپ و همکاران [۱۴] که از هر دو الگوریتم NM و UG برای بهینه‌سازی هیدروگراف سیلاب استفاده نموده بودند، مقایسه شد که مقادیر نش-ساتکلیف برای مقادیر بهینه‌سازی شده به‌ترتیب برابر ۰/۷ و ۰/۷۵ بوده است و هم‌چنین در این پژوهش‌ها به‌مانند پژوهش حاضر نشان داده شده است مهم‌ترین هدف در واسنجی مدل‌های مفهومی بارش-رواناب، یافتن مقادیر بهینه برای مدل می‌باشد که با استفاده از آن بتوان بهترین منحنی را برای هیدروگراف مشاهده شده و محاسبه شده برازش داد.

جدول ۹- مقایسه مقادیر مشاهده‌ای، مدل‌سازی شده و بهینه‌سازی شده در محل ایستگاه هیدرومتری وانشان

Table9. Comparison between observed, modeled and optimized flood discharge value in Vaneshan hydrometric station

دوره بازگشت (سال) Return period	2	5	10	50	100
دبی سیلابی مشاهده شده (m ³ /s) Observed discharge value	6.15	24.2	89.6	174	272
دبی سیلابی مدل‌سازی شده (m ³ /s) Modeled discharge value	8.16	25.16	65.25	181.05	286
دبی سیلابی بهینه‌سازی شده (m ³ /s) Optimized discharge value	UG	UG	UG	UG	UG
	6.6	22.6	60.16	176	268
RMS Error	0.3	0.35	0.45	0.25	0.31
Nash-Sutcliffe	0.96	0.92	0.905	0.965	0.9



شکل ۵- مقایسه مقادیر مشاهده‌ای، مدل‌سازی شده و بهینه‌سازی شده در ایستگاه هیدرومتری وانشان

Fig5. Comparison between observed, modeled and optimized discharge value in Vaneshan hydrometric station

Azizian, M. 2011. Evaluation of different hydrograph simulation methods by HEC-HMS. IRAN Water Research Journal. 5(9): 29-38. (In Persian)

7. Karkoti, A. Nazariha, M. Baghvand, A. Jafari, B. Karbasi, A. and Vosough, A. 2010. Estimation of peak discharge with Kriger and SCS method and comparison with observed data. Environmental Studies Journal. 36(55): 99-110. (In Persian)

8. Khaniya, B. Wanniarachchi, S. and Rathnayake, U. 2017. Importance of hydrologic simulation for Lids and BMPs design using HEC-HMS. International Journal of Hydrology. 1(5).

9- Mostafazadeh, R. Mirzaei, Sh. And Nadiri, P. 2016. Curve number determination using rainfall and runoff data and its variations with rainfall components in a forested watershed. Journal of Water and Soil Science. 21(4): 15-27. (In Persian)

10. Najafi, E. Safari, A. Ghanavati, E. and Karam, A. 2015. Simulation and Analysis of peak instaneous discharge with Artificial Neural Network. quantitative geomorphological researches Journal. 4(1): 90-103. (In Persian)

11. Nirav Kumar, K. Pampaniya, K. and Tiwari, M. 2017. Rainfall run-off modelling using Remote

منابع

1. Chea, S. and Oeureng, C. 2018. Flow simulation in an ungauged catchment of Tonle Sap Lake Basin in Cambodia. Water Utility Journal. 17: 3-17.

2. Dariane, A. and Javadianzadeh, M.M. 2016. Developing an efficient auto calibration algorithm for HEC-HMS program. Water Resource Management Journal. 30(6): 1923-1937.

3. Derdour, A. Bouanani, A. and Babahamed, K. 2017. Modelling rainfall runoff relations using HEC-HMS in a semi-arid region. Journal of Water and Land Development. 36(3): 45-55.

4. Hawature, D. and Najim, M. 2013. Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment. Environmental Modelling & Software Journal. 46(10): 155-162.

5. Juanhui, R. Xiuqing, Zh. Pan, Ch. Xuehua, Zh. Yanping, Ch. and Yu, Sh. 2017. An Investigation into Sub-Basin Rainfall Losses in Different Underlying Surface Conditions Using HEC-HMS: A Case Study of Loess Hilly Region in Gedong Basin in the Western Shanxi Province of China. Journal of Water. 9(11): 11-26.

6. Karimi, M. Maleki Nejad, H. Abghari, H. and

15. Servati, M. and Ghanbari, A. 2007. Flood estimation in Varband larestan Basin. Geographical Journal of Territory. 14(2): 55-74. (In Persian)
16. Shahverdi, K. and Mohammad Vali Samani, J. 2010. Automated simulation of basin characteristics using HEC- HMS, Genetic Algorithm and Autolt on observed hydrograph properties. Iran- Water Resource Research. 6 (3): 96- 99. (In Persian)
- Sensing, GIS and HEC-HMS model. Journal of Water Resource and Pollution Studies. 2(2): 1-8.
12. Rajan, A. Malakar, T. 2014. Optimal reactive power dispatch using hybrid Nelder- Mead algorithm. Electrical Power and Energy Systems Journal. 10(4): 9-24.
13. Romali, N. Yusop, Z. and Ismail, A. 2018. Hydrological modelling using HEC-HMS for flood risk assessment of Segamat Town, Malaysia. Material Science and Engineering Conference.
14. Sartip, F. Radmanesh, F. Zarei, H. and Salar Jazi, M. 2018. Automatic Calibration of the Continuous HMS-SMA Rainfall-Runoff Model using the Metaheuristic Algorithm (Case Study: Kasilian Basin). Irrigation Science and Engineering. 41 (3): 15- 28. (In Persian)

Optimization of Runoff Coefficient and Concentration Time in Estimating Flood Discharge Values by SCS Method (Case Study: Catchment Basin of Kohanrood River)

S. O. Mirmohammadsadeghi¹ and M. Nabavianpour²

Received: 28- 05- 2018 Accepted: 10- 04- 2019

Abstract

Estimation of floods in a basin with various return periods is one of the effective management strategies for reducing flood damage. One of the methods for estimating flood discharge is to make synthetic unit hydrograph using the physical characteristics of the basin. The more accurate inputs of the model, the more validated results. Hence, in basins in which Instantaneous peak discharge is recorded, by comparing observed flood discharge values and modeled values by synthetic unit hydrograph, the physiographic parameters of an area can be optimized to the extent possible and accurate information can be obtained. In this study, by using the recorded data at the hydrometric station, the runoff coefficient and the lag time were calibrated by loss method and routing method of SCS unit hydrograph in the HEC-HMS software and then Flood has been modeled with different return periods, so that, the results in all the return periods have had a Nash-Sutcliffe coefficient higher than 0.9 and RMSE lower than 0.5 which indicates appropriate optimization of the model. Also, the runoff coefficient and concentration time were optimized based on model calibration, which could be effective in water resource planning and soil characteristics of a watershed such as permeability.

Keywords: *Flood discharge, Hydrograph, Runoff coefficient, Lag time, Nelder Mead, Univariate Gradient.*

1. Corresponding author and M.Sc. in Irrigation and Drainage, University of Shahr-e Kord, Email: Osadeghi10@gmail.com

2. Ph.D. student in Water Management Engineering, University of Isfahan.