اکوهیدرولوژی

دورهٔ ۵، شمارهٔ ۳، پاییز ۱۳۹۷، ص ۹۳۹-۹۳۱

بهبود برآورد هیدروگراف سیلاب با استفاده از مدل شمارهٔ منحنی اصلاح‌شده (رابطهٔ غیرخطی Ia-S)

ساناز دایی[۱]، میثم سالاری جزی[۲*]، خلیل قربانی[۳]، مهدی مفتاح هلقی[۳]

۱. کارشناس ارشد مهندسی آب، دانشکدهٔ مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۲. استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکدهٔ مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۳. دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکدهٔ مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۸/۰۱؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۱۲/۲۲)

چکیده

مدل شمارهٔ منحنی (SCS-CN) در حالت متداول بر اساس رابطهٔ خطی بین جذب اولیه (Ia) و بیشترین پتانسیل نگهداشت (S) حوضهٔ آبریز است، ولی این مدل برای درنظرگرفتن رابطهٔ غیرخطی Ia-S اصلاح شده است. هدف از مطالعهٔ حاضر مقایسهٔ مدل‌های متداول شمارهٔ منحنی و شمارهٔ منحنی اصلاح‌شده (رابطهٔ غیرخطی Ia-S) در برآورد هیدروگراف سیلاب در پنج حوضهٔ آبریز گالیکش، نوده، تمر، وطنا و کچیک (کاربرد ۳۷ رویداد بارش-رواناب در محاسبات و انتخاب ۱٤ رویداد برای مقایسهٔ نتایج در مرحلهٔ صحت‌سنجی) است. برای مقایسهٔ نتایج از معیارهای ریشهٔ میانگین مربعات خطا (RMSE)، نش-ساتکلیف (NSE) و خطای برآورد دبی اوج (PEP) استفاده شده است. بررسی معیارهای RMSE و NSE و PEP نشان می‌دهد کاربرد مدل شمارهٔ منحنی اصلاح‌شده (رابطهٔ غیرخطی Ia-S) در همهٔ رویدادهای مرحلهٔ صحت‌سنجی موجب بهبود برآورد هیدروگراف و دبی اوج سیلاب نسبت به کاربرد مدل متداول شمارهٔ منحنی (SCS-CN) شده است. بنابراین، نتایج نشان می‌دهد در حوضه‌های آبریز مطالعه‌شده مدل شمارهٔ منحنی اصلاح‌شده (رابطهٔ غیرخطی Ia-S) موجب بهبود درخور توجه کارایی مدل متداول شمارهٔ منحنی (SCS-CN) شده است.

کلیدواژگان: سیلاب، شمارهٔ منحنی اصلاح‌شده (رابطهٔ غیرخطی Ia-S)، شمارهٔ منحنی (SCS-CN)، هیدروگراف.

* نویسندهٔ مسئول

Email: meysam.salarigazi@gmail.com

مقدمه

برآورد رواناب مستقیم، پایهٔ طراحی سازه‌های هیدرولیکی محسوب می‌شود [۱]. به این منظور، در برنامه‌های هیدرولوژیکی، اغلب مدل‌های بارش- رواناب مبتنی بر رویداد، به علت سادگی در کاربرد استفاده می‌شوند [۲]. مدل شمارهٔ منحنی سازمان حفاظت خاک (SCS-CN) رایج‌ترین مدلی است که برای برآورد رواناب استفاده می‌شود. این مدل توسط سازمان حفاظت خاک ایالات متحده، در پاسخ به پیچیدگی‌های استفاده از زمین‌های کشاورزی و جذب هیدرولیکی بارش، بر اساس پارامتری به‌نام شمارهٔ منحنی (CN)، پیشنهاد شده است. این پارامتر به فاکتورهایی همچون بارش تجمعی، نوع خاک، کاربری اراضی و رطوبت پیشین خاک (AMC) بستگی دارد [۳ـ ۵]. یکی از علل رایج‌بودن استفاده از این مدل، ترکیب چند فاکتور در یک پارامتر است که موجب سهولت استفاده از مدل یادشده در مناطق، کاربری‌ها و شرایط آب و هوایی مختلف شده است [۱ و ۶]. این مدل تکامل‌یافته و یکی از قسمت‌های جدایی‌ناپذیر مدل‌های شبیه‌سازی پیوسته شده است [۵]. با وجود استفادهٔ گسترده، مدل SCS-CN معایبی مانند مبهم‌بودن اثر رطوبت پیشین، وابستگی قوی فقط به یک پارامتر (CN)، درنظرگرفتن مقدار ثابت ۰/۲ برای ضریب جذب اولیه و محدودیت اندازهٔ حوضه نیز دارد [۴ و ۷]. همچنین، بر اساس نظر ابراهیمیان و همکارانش در مدل SCS-CN، شیب به‌عنوان یک عامل مؤثر در ایجاد رواناب در نظر گرفته نشده است، زیرا شیب زمین‌های کشت‌شده در ایالات متحده کمتر از پنج درصد است و این مقدار بر شمارهٔ منحنی تأثیر چندانی ندارد [۸]. به همین منظور، در سال ۱۹۸۴ هاوکینز و کرازیر [۹] شکل خاصی از مدل SCS-CN را معرفی کردند که در آن مقدار جذب اولیه، صفر در نظر گرفته شد و مدل عملکرد قابل قبولی در برآورد رواناب از خود نشان داد. تا زمانی که وودوارد و همکارانش مقدار این ضریب را ۰/۰۵ معرفی کردند و در ۲۵۲ از ۳۰۷ حوضه در ایالات متحده به نتایج خوبی دست یافتند [۱۰]. در تحقیقات شای و همکارانش مقدار ضریب جذب اولیه بر اساس داده‌های بارش- رواناب از ۰/۰۱ تا ۰/۱۵۴ متغیر است [۱۱]. در حوضهٔ پنجاب استفاده از مقدار ۰/۰۵ برای ضریب جذب اولیه به‌جای ۰/۲ عملکرد بهتری داشته است [۱۲]. بلس و بستون [۱۳] و هاسر و جونز، ۱۹۹۱ [۱۴]، اعتبار پارامتر شمارهٔ منحنی را به‌عنوان یک شاخص هیدرولوژیک در برخی حوضه‌های آبخیز در ایالات متحده بررسی کردند و نشان دادند رواناب به‌دست‌آمده از بارش در مقابل تغییرات پارامتر CN بسیار حساس است و بر اهمیت به‌دست‌آوردن پارامتر منطقه‌ای تأکید کردند. گائو و همکارانش با بهینه‌کردن پارامترهای شمارهٔ منحنی و ضریب جذب اولیه، حجم سیلاب را در حوضهٔ سیچوان چین برآورد کردند. نتیجهٔ تحقیق یادشده امکان استفاده از مدل SCS-CN برای برآورد حجم سیلاب در زمین‌های شیب‌دار این منطقه را نشان می‌دهد [۱۵].

برخی محققان با درنظرگرفتن پارامترهایی مانند مقدار رطوبت پیشین، مدل استاندارد SCS-CN را اصلاح کردند. تحقیقات زیادی در زمینهٔ مقایسهٔ مدل استاندارد SCS-CN و مدل‌های اصلاحی پیشنهادشده توسط محققان انجام شده است. میشرا و سینگ با درنظرگرفتن کارکرد مؤثر و مستقیم رطوبت پیشین در برآورد رواناب، مدل استاندارد SCS-CN را اصلاح کردند [۱۶]. مدل‌های پیشنهادی آنها به مدل‌های MS معروف شده‌اند. آنها شش مدل مختلف شامل مدل استاندارد SCS-CN، دو مدل اصلاح‌شده، و مدل‌های ماکوس، فاگل و داکستین را در پنج زیرحوضه (سه حوضه از ایالات متحده و دو زیرحوضه از هندوستان) مقایسه کردند. نتایج مقایسهٔ آنها نشان داد مدل‌های اصلاح‌شدهٔ پیشنهادی عملکرد بهتری داشته‌اند. همچنین، میشرا و همکارانش با استفاده از داده‌های بارش- رواناب برخی حوضه‌های کوچک تا بزرگ ایالات متحده، عملکرد مدل‌های اصلاح‌شده و مدل استاندارد SCS-CN را بررسی کردند [۱۷ و ۱۸]. نتایج پژوهش آنها نشان داده است در مجموع، مدل‌های اصلاح‌شده در برآورد رواناب عملکرد بهتری داشته‌اند. جیائو و همکارانش معتقدند یکی از عللی که دقت پیش‌بینی رواناب در مدل SCS-CN را محدود می‌کند، این است که نمی‌تواند به طور مؤثر، اثر ذخیرهٔ بارش پیشین و تخلیهٔ آن به‌عنوان رواناب را تعیین کند [۱۹]. آنان در مطالعه‌ای مفهوم پتانسیل جذب اولیه و میزان کاهش آن برای بهبود مدل SCS-CN را توسعه دادند. مدل بهبودیافتهٔ SCS-CN با داده‌های رواناب مشاهده‌ای در هفت پلات آزمایشی ارزیابی شد. نتایج پژوهش آنها نشان داد پیش‌بینی رواناب با مدل بهبودیافته دقیق‌تر از مدل رایج SCS-CN بوده است. از آنجا که در مدل شمارهٔ منحنی SCS-CN سطوح مختلف شرایط رطوبتی پیشین (AMC) موجب تغییرات ناگهانی در مقدار شمارهٔ منحنی و در نتیجه جهش ناگهانی در

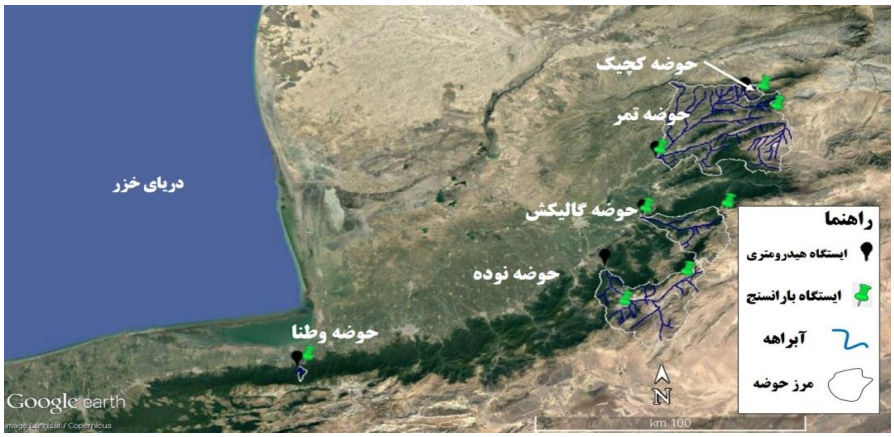
برآورد رواناب می‌شود، ساهو و همکارانش در مدل پیشنهادی خود یک تابع پیوسته برای رطوبت پیشین مؤثر بر جذب اولیه در نظر گرفتند [۲۰]. کاربرد مدل پیشنهادی و مدل SCS-CN و نیز مدل میشرا- سینگ (MS) با استفاده از مجموعهٔ بزرگی از داده‌های بارش- رواناب در ۸۲ حوضه در ایالات متحده بررسی شد. نتایج نشان‌دهندهٔ عملکرد مناسب مدل پیشنهادی نسبت به دو مدل دیگر بوده است. کارن و همکارانش در پلات‌های کشاورزی در هند مدل استاندارد SCS-CN را با مدل‌های اصلاحی از جمله مدل‌های پیشنهادی میشرا و سینگ (MS) مقایسه کردند [۲۱]. نتایج تحقیقات آنها نشان داد مدل‌های میشرا- سینگ نسبت به سایر مدل‌ها عملکرد بهتری داشت. بیشتر تحقیقات انجام‌شده در زمینهٔ بارش- رواناب و استفاده از مدل شمارهٔ منحنی بر لزوم اصلاح و منطقه‌ای کردن پارامترهای این روش تأکید دارند. تا کنون بیشتر تحقیقات انجام‌شده در ایران به گونه‌ای بوده است که با به‌کارگیری روش شمارهٔ منحنی و واسنجی پارامترها با استفاده از رویدادهای بارش- رواناب اقدام به برآورد رواناب کرده‌اند. امروزه، در تحقیقات خارج از کشور استفاده از مدل‌های اصلاح‌شدهٔ روش شمارهٔ منحنی کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده است. در تحقیق حاضر سعی شده است مدل شمارهٔ منحنی اصلاح‌شده (رابطهٔ غیرخطی Ia-S) در برخی زیرحوضه‌های استان گلستان آزمایش شده و نتایج با مدل شمارهٔ منحنی SCS-CN مقایسه شود. به نظر می‌رسد تا کنون در این زمینه تحقیق مشخصی صورت نگرفته است. درخور یادآوری است در تحقیقاتی که تا کنون در خارج از کشور و با استفاده از مدل‌های اصلاح‌شده انجام گرفته است، تأثیر این مدل‌ها فقط در برآورد ارتفاع رواناب ارزیابی شده است. در تحقیق حاضر سعی شده است اثر استفاده از مدل‌های اصلاح‌شده روی هیدروگراف شبیه‌سازی‌شدهٔ سیل بررسی شود.

مواد و روش‌ها

مشخصات حوضه‌های مطالعه‌شده: در تحقیق حاضر به دلیل تنوع اقلیمی در استان گلستان و با درنظرگرفتن وجود آمار بارش- رواناب، پنج حوضهٔ گالیکش، تمر، کچیک، نوده و وطنا انتخاب شده‌اند. داده‌های بارش و رواناب ثبت‌شده در حوضه‌های مورد بررسی از شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان گلستان دریافت شده است. در جدول ۱ مشخصات حوضه‌های مطالعه‌شده ارائه شده است. موقعیت حوضه‌های مطالعاتی در شکل ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات فیزیوگرافی حوضه‌های مطالعاتی

ردیف	نام حوضه	مساحت (کیلومترمربع)	محیط (کیلومتر)	ارتفاع متوسط (متر)	شیب متوسط حوضه (درصد)	طول آبراههٔ اصلی (کیلومتر)	تعداد رویداد بارش- رواناب
۱	تمر	۱۵۲۷	۲۸۷/۸۷	۱۱۳۱/۵	۱۹/۵	۹۴	۱۰
۲	گالیکش	۴۰۱/۴۵	۱۳۸/۵۴	۱۳۵۸/۵	۲۷/۵	۵۷/۸	۱۳
۳	کچیک	۳۶	۲۵/۸۱	۹۲۸	۱۸/۷۵	۹/۶	۳
۴	نوده	۷۸۹/۶۵	۲۰۷/۷۷	۱۵۴۰/۷	۲۸	۶۵/۶۹	۹
۵	وطنا	۱۰/۷۷	۲۰/۳۵	۸۹۸/۵	۳۲/۷۸	۷/۸	۴



شکل ۱. موقعیت حوضه‌های آبریز مطالعه‌شده در استان گلستان

مدل‌های استفاده‌شده

در تحقیق حاضر برای شبیه‌سازی بارش از مدل استاندارد SCS-CN استفاده شده است. شمارهٔ منحنی با استفاده از جدول SCS تخمین زده شده است. علاوه بر مدل استاندارد SCS-CN از مدل اصلاحی پیشنهادشده توسط میشرا و سینگ هم برای شبیه‌سازی رواناب بهره گرفته شده است تا در نهایت نتایج شبیه‌سازی این مدل‌ها با هم مقایسه شود.

مدل استاندارد SCS-CN: مقدار رواناب (Q) در مدل SCS-CN، با استفاده از بارش (P) و جذب اولیه (Ia=λ S) برآورد می‌شود:

$$Q = \frac{(P-Ia)^2}{(P-Ia)+S} \quad \text{اگر } P \geq Ia$$
$$Q = 0 \quad \text{اگر } P \leq Ia \qquad (۱)$$

مقدار S (بیشترین پتانسیل نگهداشت) با استفاده از پارامتر بی‌بعد CN (شمارهٔ منحنی) تعیین می‌شود. مقدار CN از صفر (بدون رواناب، S=∞) تا ۱۰۰ (همهٔ بارش به رواناب تبدیل شود، S=0) متغیر است. برای λ= ۰/۲ معادلهٔ ۱ به‌صورت معادلهٔ ۲ درمی‌آید. در معادلهٔ ۳ چگونگی محاسبهٔ مقدار S با استفاده از پارامتر CN آورده شده است (مقدار S برحسب میلی‌متر است) [۲۲].

$$Q = \frac{(P-0.2S)^2}{P+0.8\,S} \quad \text{اگر } P \geq Ia$$
$$Q = 0 \quad \text{اگر } P \leq Ia \qquad (۲)$$

$$S = \frac{24500}{CN} - 254 \qquad (۳)$$

مقدار CN بر اساس کاربری اراضی، گروه هیدرولوژیک خاک و جدول SCS به‌دست می‌آید. مقدار شمارهٔ منحنی، که از این جدول به‌دست می‌آید، برای شرایط رطوبتی متوسط (AMC-II) حوضه است. مقدار CN برای شرایط خشک (AMC-I) و شرایط مرطوب (AMC-III) بر اساس روابط ۴ و ۵ تعیین می‌شود [۲۲].

$$CN_I = \frac{۴/۲\ CN_{II}}{۱۰ - ۰/۰۵۸\ CN_{II}} \qquad (۴)$$

$$CN_{III} = \frac{۲۳\ CN_{II}}{۱۰ + ۰/۱۳\ CN_{II}} \qquad (۵)$$

مدل شمارهٔ منحنی اصلاح‌شده (رابطهٔ غیرخطی Ia-S)[1]

با استفاده از مفهوم درجهٔ اشباع (C=Sr) که C ضریب رواناب ($Q/(P-Ia)$=) است، [۱۸ و ۲۳] معادلهٔ ۲ را برای رطوبت پیشین (M) به شکل معادلهٔ ۶ اصلاح کردند.

$$Q = \frac{(P-Ia)(P-Ia+M)}{P-Ia+M+S} \qquad (۶)$$

مقدار رطوبت پیشین (M) با استفاده از معادلهٔ ۷ محاسبه می‌شود.

$$M = \frac{(P_5 - ۰/۲\,S_1)S_1}{P_5 + ۰/۸\,S_1} \qquad (۷)$$

در معادلهٔ یادشده p_5 مقدار بارش پنج روز قبل و S1 بیشترین پتانسیل نگهداشت مربوط به AMC_1 (شرایط رطوبت برای حالت خشک) است. از آنجا که $S_1 = S + M$ معادلهٔ ۷ به شکل معادلهٔ ۸ تغییر خواهد کرد.

$$M = ۰/۵\left[-۱/۲S + \sqrt{۰/۶۴S^2 + ۴SP_5}\right] \qquad (۸)$$

با جای‌گذاری ضریب λ به جای ۰/۲ معادلهٔ ۸ به شکل کلی معادلهٔ ۹ درآمده است.

$$M = ۰/۵\left[-(۱+\lambda)S + \sqrt{(۱-\lambda)^2 S^2 + ۴SP_5}\right] \qquad (۹)$$

از آنجا که مقدار جذب اولیه (Ia) تا حد زیادی به M وابسته است، معادلهٔ (λ=۰/۲) به‌صورت معادلهٔ ۱۰ اصلاح شده است.

$$I_a = \frac{\lambda S^2}{S+M} \qquad (۱۰)$$

این معادله یک رابطهٔ غیرخطی اصلاح‌شده بین Ia و Sاست. معادلهٔ یادشده شکل خاصی از معادلهٔ (Ia=λ S) برای شرایط خشک یا M=0 است [۲۴].

برآورد هیدورگراف رواناب

هیدروگراف بی‌بعد SCS یک هیدروگراف واحد مصنوعی است. مختصات نقاط هیدروگراف واحد از جدول بدون بعدی که در آن مقادیر نسبت زمان (t/Tp) در مقابل نسبت دبی هیدروگراف (q/qp) داده شده است، به‌دست می‌آید. با مشخص‌بودن مقادیر دبی اوج و زمان تأخیر برای بارش مازاد، می‌توان با استفاده از هیدروگراف مصنوعی، هیدروگراف واحد

1. SCS-CN (NL I_a-S)

را برآورد کرد. برای محاسبهٔ دبی اوج و زمان اوج از معادله‌های ۱۱ و ۱۲ استفاده می‌شود [۲۲].

$$q_p = \frac{CA}{T_p} \qquad (11)$$

در معادلهٔ یادشده C= ۲/۰۸ و A مساحت حوضه برحسب کیلومترمربع است. مطالعهٔ هیدروگراف‌های واحد تعدادی از حوضه‌های کوچک و بزرگ نشان داده است که زمان تأخیر (tp) حوضه تقریباً برابر ۰/۶ زمان تمرکز (Tc) حوضه است ($tp = 0.6\,Tc$). در رابطهٔ ۷، tr نشان‌دهندهٔ زمان تداوم بارش مازاد است.

$$Tp = \frac{tr}{2} + tp \qquad (12)$$

تخمین شمارهٔ منحنی و ضریب جذب اولیه در مدل SCS-CN و مدل شمارهٔ منحنی اصلاح‌شده (رابطهٔ غیرخطی Ia-S)

تخمین شمارهٔ منحنی در مدل استاندارد SCS-CN: در مدل SCS-CN، بر اساس معادلهٔ ۲ پارامترهای ورودی به مدل، شامل مقدار بارش، ظرفیت نگهداشت حوضه (S) یا شمارهٔ منحنی (CN) است که مقدار S بر اساس CNبه‌دست می‌آید. مقدار شمارهٔ منحنی حوضه‌های مطالعه‌شده از تلفیق نقشه‌های کاربری اراضی و گروه هیدرولوژیک خاک (تهیه‌شده از ادارهٔ منابع طبیعی و آبخیزداری استان گلستان) و با استفاده از جدول SCS برآورد می‌شود. در جدول ۲، مقدار شمارهٔ منحنی هر حوضه آورده شده است.

تخمین شمارهٔ منحنی و ضریب جذب اولیه در مدل شمارهٔ منحنی اصلاح‌شده (رابطهٔ غیرخطی Ia-S): در این مدل مقادیر شمارهٔ منحنی (به‌دست‌آمده از جدول SCS) و ضریب جذب اولیه (λ=۰/۲) ، با استفاده از معیار ارزیابی خطای نش- ساتکلیف (NSE) در محیط EXCEL و با استفاده از ابزار Solver برای هر رویداد بهینه می‌شود. ۷۰ درصد رویدادها برای واسنجی استفاده شده است و مقدار میانهٔ پارامتر بهینه‌شده، برای صحت‌سنجی ۳۰ درصد رویدادهای باقی‌مانده به کار رفته است.

جدول ۲. درصد مساحت کاربری اراضی و گروه هیدرولوژیک حوضه‌ها

ردیف	حوضه	کاربری اراضی (درصد)				گروه هیدرولوژیک				میانگین وزنی
		کشت آبی	کشت دیم	جنگل	مرتع	مسکونی	A	B	C	D	CN حوضه
۱	کچیک	۵۸/۵۸	–	۱۷/۰۹	۲۳/۹۷	۱/۳۶	–	۵۸/۴۷	۲۸/۰۸	۱۳/۴۵	۷۴
۲	وطنا	۰/۰۵	–	۹۹/۹۵	–	–	–	۹۹/۳	۰/۷	–	۷۲
۳	گالیکش	۲/۹	۳۷/۸۶	۵۱/۳۱	۷/۹۳	–	–	۹/۲۴	۹۰/۷۶	–	۷۵
۴	نوده	۱/۲۱	–	۲۸/۹۶	۶۹/۵۴	۰/۲۹	۱۴/۹۴	۳۲/۶۲	۴۴/۷۵	۷/۶۹	۷۳
۵	تمر	۰/۱۷	۳۴/۴۴	۲۶/۸۵	۳۸/۴۴	۰/۰۸	–	۱۶/۱۸	۸۳/۵۲	۰/۳	۷۶

معیارهای ارزیابی مدل: برای ارزیابی عملکرد مدل و تعیین مقدار خطا بین داده‌های مشاهده‌ای و محاسبه‌ای، از سه معیار ارزیابی خطا استفاده شده است. معیارهای ارزیابی خطا عبارت‌اند از:

۱. ریشهٔ میانگین مربعات خطا (RMSE) [۱۷ و ۱۸]. زمانی عملکرد مدل ایده‌آل است که مقدار RMSE برابر صفر باشد؛

۲. معیار کارایی نش- ساتکلیف (NSE با مقدار ایده‌آل برابر ۱) [۲۵]؛

۳. خطای برآورد دبی اوج PEP [۲۶ـ ۲۹].

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(Q_o - Q_c\right)_i^2} \qquad (13)$$

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(Q_o - Q_c\right)_i^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(Q_o - \overline{Q_o}\right)_i^2}\right] \qquad (14)$$

$$PEP = 1 - \frac{Q_{pc}}{Q_{po}} \qquad (15)$$

در روابط ۱۳ـــ ۱۵، N: تعداد رویدادهای مشاهده‌شده، Q_o :دبی مشاهده‌شده در گام i، Q_c :دبی محاسبه‌شده در گام i، $\overline{Q_o}$: میانگین دبی هیدروگراف سیل مشاهده‌شده، Q_{pc} دبی اوج محاسبه‌شده و Q_{po} : دبی اوج مشاهده‌شده است.

نتایج و بحث

در این بخش عملکرد مدل استاندارد SCS-CN و مدل شمارهٔ منحنی اصلاح‌شده (رابطهٔ غیرخطی Ia-S) با هم مقایسه شدند. در هر حوضه برای ۷۰ درصد از رویدادها مقادیر پارامترهای هر مدل واسنجی شده است. سپس، پارامترهای به‌دست‌آمده در مرحلهٔ قبل برای صحت‌سنجی در رویدادهای باقی‌مانده استفاده شده و مقادیر خطای ریشهٔ میانگین مربعات خطا، نش- ساتکلیف و خطای برآورد دبی اوج برای هر رویداد تخمین زده شده است. در ادامه، مقادیر میانه و دامنهٔ تغییرات معیارهای ارزیابی خطا برای هر حوضه آورده شده است. در جدول ۳ مقادیر شمارهٔ منحنی حاصل از جدول SCS و مقدار پارامترهای بهینه‌شده در مدل شمارهٔ منحنی اصلاح‌شده (رابطهٔ غیرخطی Ia-S) برای رویدادهای منتخب در مرحلهٔ واسنجی، آورده شده است.

جدول ۳. مقادیر شمارهٔ منحنی جدول SCS و پارامترهای بهینه‌شده برای حوضه‌های مطالعه‌شده

حوضهٔ گالیکش	SCS-CN		SCS-CN(NL I_a-S)		وطنا	SCS-CN		SCS-CN(NL Ia-S)	
	CN	λ	CN	λ		CN	λ	CN	λ
۱۳۹۲/۲/۵			۷۳	۰/۰۹	۱۳۹۰/۶/۵			۵۱	۰
۱۳۸۳/۱۰/۱۸			۵۱	۰/۱۱	۱۳۹۱/۶/۱۲	۷۲	۰/۲	۷۲	۰/۰۴
۱۳۹۲/۱۲/۲۲			۷۱	۰/۰۸	۱۳۹۱/۷/۲۲			۵۰	۰/۱۶
۱۳۹۱/۴/۳۰	۷۵	۰/۲	۵۸	۰/۱۳	میانه	۷۲	۰/۲	۵۱	۰/۰۴
۱۳۹۰/۷/۲۹			٦٤	۰/۱	کچیک				
۱۳۹۱/۱۱/۱۵			۵۷	۰/۲۱	۱۳۹۱/۶/۱۲	۷۴	۰/۲	۸۱	۰/۰۵
۱۳۸۳/۱۰/۲۲			٦۳	۰/۱۶	۱۳۹۳/۵/۲۳			۵۸	۰/۱۸
میانه	۷۵	۰/۲	۶۳	۰/۱۱	میانه	۷۴	۰/۲	۷۰	۰/۱۲
حوضهٔ تمر	**SCS-CN**		**SCS-CN(NL Ia-S)**		**حوضهٔ نوده**	**SCS-CN**		**SCS-CN(NL Ia-S)**	
	CN	λ	CN	λ		CN	λ	CN	λ
۱۳۹۱/۱۱/۱۱			۵۷	۰/۱۷	۱۳۸۸/۸/۱۳			۵۰	۰/۰۸
۱۳۸۹/۴/۱			۵۸	۰/۱۱	۱۳۹۱/۱/۱۲			۶۵	۰/۱
۱۳۹۱/۶/۲	۷۶	۰/۲	۸۴	۰/۱	۱۳۸۹/۴/۱	۷۳	۰/۲	۷۳	۰/۱
۱۳۹۱/۲/۲۷			۵۳	۰/۰۱	۱۳۹۰/۷/۳۰			۷۰	۰/۱۵
۱۳۹۰/۶/۴			۸۲	۰/۰۵	۱۳۸۸/۹/۱			۶۳	۰/۱۵
۱۳۹۱/۱۱/۱۵			۵۵	۰/۲۱	-	-	-	-	-
میانه	۷۶	۰/۲	۵۸	۰/۱۱	میانه	۷۳	۰/۲	۶۵	۰/۱

در حوضه‌های مطالعه‌شده، همان طور که گفته شد، ۷۰ درصد از رویدادها برای واسنجی پارامترها و ۳۰ درصد باقی‌مانده برای صحت‌سنجی در نظر گرفته شده است. بعد از واسنجی، صحت‌سنجی پارامترها با استفاده از نتایج جدول ۳ انجام شده است. جدول ۴ نشان‌دهندهٔ مقادیر ریشهٔ میانگین مربعات خطا، نش- ساتکلیف و خطای برآورد دبی اوج، برای رویدادهای منتخب در مرحلهٔ صحت‌سنجی، برای هر پنج حوضهٔ مطالعه‌شده است. بررسی جدول نشان می‌دهد در حوضهٔ گالیکش استفاده از مدل شمارهٔ منحنی اصلاح‌شده (رابطهٔ غیرخطی Ia-S)، موجب کاهش مقدار خطای ریشهٔ میانگین مربعات در هر چهار رویداد شده است. همچنین، مقادیر نش- ساتکلیف نیز در هر چهار رویداد بهبود یافته است به‌طوری که در رویداد ۱۳۹۱/۱/۲۵ این مقدار از ۱۳۸- (مدل SCS-CN) به مقدار ۴۴/۶- (مدل شمارهٔ منحنی اصلاح‌شده (رابطهٔ غیرخطی Ia-S)) افزایش یافته است. مقدار خطای برآورد دبی اوج در سه رویداد از چهار رویداد بررسی‌شده با حفظ بیش‌برآوردی یا کم‌برآوردی کاهش یافته است، ولی در رویداد ۱۳۸۷/۱۱/۳۰، مدل SCS-CN تمایل به بیش‌برآوردی و مدل شمارهٔ منحنی اصلاح‌شده (رابطهٔ غیرخطی Ia-S) تمایل به کم‌برآوردی دارد. در حوضهٔ نوده در هر چهار رویداد منتخب در مرحلهٔ صحت‌سنجی، با به‌کاربردن مدل شمارهٔ منحنی اصلاح‌شده (رابطهٔ غیرخطی Ia-S)، مقادیر ریشهٔ میانگین مربعات خطا و خطای برآورد

دبی اوج کاهش و مقدار نش- ساتکلیف افزایش یافته است. همچنین، در همهٔ رویدادهای این حوضه، عملکرد دو مدل در بیش و کم برآوردی دبی اوج یکسان بوده است. در حوضهٔ تمر، مقایسهٔ عملکرد دو مدل نشان می‌دهد مقادیر ریشهٔ میانگین مربعات خطا با استفاده از مدل اصلاح‌شده، در هر چهار رویداد کاهش یافته است. مقدار نش- ساتکلیف در هر چهار رویداد با به‌کاربردن مدل اصلاح‌شده افزایش داشته و مقدار این افزایش در رویداد ۱۳۹۰/۰۶/۰۳ نسبت به سایر رویدادها مشهودتر است. مدل شمارهٔ منحنی اصلاح‌شده (رابطهٔ غیرخطی Ia-S) در سه رویداد از چهار رویداد تمایل به بیش‌برآوردی دبی اوج داشته است و استفاده از این مدل موجب کاهش مقدار خطای برآورد دبی اوج در هر چهار رویداد شده است.

در حوضهٔ وطنا و کچیک عملکرد مدل شمارهٔ منحنی اصلاح‌شده (رابطهٔ غیرخطی Ia-S) مثبت ارزیابی شد و استفاده از آن موجب بهبود مقادیر ریشهٔ میانگین مربعات خطا، نش- ساتکلیف و خطای برآورد دبی اوج شده است. در حوضهٔ وطنا مقدار نش- ساتکلیف از ۰/۸۲- (SCS-CN) به مقدار ۰/۳ (مدل شمارهٔ منحنی اصلاح‌شده (رابطهٔ غیرخطی Ia-S)) افزایش یافته است. مقادیر ریشهٔ میانگین مربعات خطا و خطای برآورد دبی اوج به‌ترتیب از ۴/۸ و ۰/۹۵ (مدل SCS-CN) به ۲/۹۵ و ۰/۶۳ (مدل شمارهٔ منحنی اصلاح‌شده (رابطهٔ غیرخطی Ia-S) کاهش یافته است. در حوضهٔ کچیک نیز استفاده از مدل شمارهٔ منحنی اصلاح‌شده (رابطهٔ غیرخطی Ia-S) موجب کاهش بسیار زیاد خطای برآورد دبی اوج شده است.

جدول ۵، دامنهٔ تغییرات و میانهٔ مقادیر معیارهای ارزیابی خطا در حوضه‌های مطالعاتی را نشان می‌دهد. از آنجا که فقط یک رویداد در مرحلهٔ صحت‌سنجی حوضه‌های وطنا و کچیک باقی مانده است، ارائهٔ دامنهٔ تغییرات و میانه برای معیارهای ارزیابی خطای این دو حوضه امکان‌پذیر نیست. مقایسهٔ دامنهٔ تغییرات مقادیر ریشهٔ میانگین مربعات خطا و خطای برآورد دبی اوج در حوضهٔ گالیکش برای دو مدل شمارهٔ منحنی اصلاح‌شده (رابطهٔ غیرخطی Ia-S) و SCS-CN نشان می‌دهد این مقدار با به‌کاربردن مدل اصلاح‌شده بهبود یافته است. همچنین، در این حوضه طی بررسی معیار ارزیابی نش- ساتکلیف، اثر مثبت استفاده از مدل شمارهٔ منحنی اصلاح‌شده (رابطهٔ غیرخطی Ia-S)، در کاهش مقدار کمترین دامنهٔ تغییرات محسوس است. همچنین، مقادیر میانه در هر سه معیار ارزیابی خطا با استفاده از مدل شمارهٔ منحنی اصلاح‌شده (رابطهٔ غیرخطی Ia-S) بهبود یافته است. در حوضهٔ نوده نیز عملکرد مثبت مدل شمارهٔ منحنی اصلاح‌شده (رابطهٔ غیرخطی Ia-S)، با بهبود مقادیر معیارهای ارزیابی خطا، قابل مشاهده است. در حوضهٔ تمر استفاده از مدل شمارهٔ منحنی اصلاح‌شده (رابطهٔ غیرخطی Ia-S) موجب کاهش مقادیر خطای برآورد دبی اوج و ریشهٔ میانگین مربعات و افزایش مقدار معیار نش- ساتکلیف شده است، با این نتایج عملکرد مدل یادشده مثبت ارزیابی می‌شود.

جدول ۴. مقادیر RMSE، NSE و PEP برای مرحلهٔ صحت‌سنجی در حوضه‌های مطالعه‌شده

رویداد گالیکش	گالیکش						رویداد نوده	نوده					
	SCS-CN(NL I_a-S)			SCS-CN				SCS-CN(NL Ia-S)			SCS-CN		
	RMSE	NSE	PEP	RMSE	NSE	PEP		RMSE	NSE	PEP	RMSE	NSE	PEP
۱۳۸۸/۱۲/۰۳	۱۶/۱۷	-۰/۹۲	۰/۲۵	۱۷/۹۴	-۱/۳۷	۰/۵۸	۱۳۹۱/۱/۹	۱۱/۵	-۴/۹۶	-۰/۹۷	۱۱/۸۳	-۵/۳۱	-۱
۱۳۹۱/۱۱/۲۵	۸/۰۷	-۴۴/۶	-۰/۷۷	۱۴	-۱۳۸	-۲/۱۱	۱۳۹۱/۶/۱۶	۲۲/۲۸	-۲/۳۲	-۱/۷۹	۲۲/۷۴	-۲/۴۶	-۲/۴
۱۳۸۷/۱۱/۳۰	۳/۳۶	-۱/۸	۰/۹۴	۶/۵۶	-۹/۷	-۱/۳۹	۱۳۸۶/۵/۱۳	۸۱/۵۴	-۰/۲۳	۰/۸۷	۸۸/۹۶	-۰/۴۶	۰/۹۹
۱۳۹۱/۱۱/۱۳	۷/۴	-۱/۸	-۰/۱۱	۱۳/۵۶	-۸/۴	-۰/۶۲	۱۳۹۰/۶/۴	۶۰/۱۵	-۵۱/۲۱	-۲/۰۹	۶۹/۹۲	-۶۹/۵۴	-۲/۵۷

رویداد تمر	تمر						رویداد وطنا	وطنا					
	SCS-CN(NL Ia-S)			SCS-CN				SCS-CN(NL Ia-S)			SCS-CN		
	RMSE	NSE	PEP	RMSE	NSE	PEP		RMSE	NSE	PEP	RMSE	NSE	PEP
۱۳۹۰/۶/۵	۱۲/۴	-۰/۷۳	-۰/۰۰۵	۲۱/۲۷	-۴/۱۰	۰/۹	۱۳۹۳/۳/۲۴	۲/۹۵	۰/۳	۰/۶۳	۴/۸	-۰/۸۲	۰/۹۵
۱۳۹۰/۶/۳	۲۶/۸۵	-۲۰/۳۱	-۰/۲۴	۶۰/۹۸	-۱۰۸/۹۱	-۳/۱۴	رویداد کچیک	کچیک					
۱۳۹۱/۱/۱۲	۳/۵۵	-۱/۱۷	۰/۴۷	۵/۲۶	-۳/۷۵	-۰/۷۴		SCS-CN(NL Ia-S)			SCS-CN		
۱۳۸۸/۱۲/۴	۱۸/۲۸	-۰/۱۴	-۰/۳	۲۵/۲۳	-۰/۹۷	۰/۶۱	۱۳۹۱/۴/۲۶	۲/۳۷	-۱/۶۱	-۰/۰۹	۲/۸۹	-۲/۸۶	۰/۶

جدول ۵. دامنهٔ تغییرات و میانهٔ مقادیر RMSE، NSE و PEP در حوضه‌های مطالعه‌شده

مدل	معیار خطا	پارامتر	گالیکش	نوده	تمر
SCS-CN(NL I_a-S)	RMSE	میانه	۷/۷	۴۱/۲	۱۵/۳
		دامنهٔ تغییرات	(۳/۳۶) تا (۱۶/۱۷)	(۱۱/۵) تا (۸۱/۵۴)	(۳/۵۵) تا (۲۶/۸۵)
	NSE	میانه	-۱/۸	-۳/۶	-۰/۹۵
		دامنهٔ تغییرات	(-۴۴/۶) تا (-۰/۹۲)	(-۵۱/۲۱) تا (-۰/۲۳)	(-۲۰/۳۱) تا (-۰/۱۴)
	PEP	میانه	۰/۲۴	-۱/۳۸	۰/۴۷
		دامنهٔ تغییرات	(-۰/۷۷) تا (۰/۹۴)	(-۲/۰۹) تا (۰/۸۷)	(-۰/۳) تا (۰/۴۷)
SCS-CN	RMSE	میانه	۱۳/۷۸	۴۶/۳۳	۲۳/۲۵
		دامنهٔ تغییرات	(۶/۵۶) تا (۱۷/۹۴)	(۱۱/۸۳) تا (۸۸/۹۴)	(۵/۲۶) تا (۶۰/۹۸)
	NSE	میانه	-۶۹/۶۹	-۳/۸۷	-۷/۱
		دامنهٔ تغییرات	(-۱۳۸) تا (-۱/۳۷)	(-۶۹/۵۴) تا (-۰/۴۶)	(-۱۰۸/۹۱) تا (-۰/۹۷)
	PEP	میانه	-۰/۹۳	-۱/۷	۰/۷۶
		دامنهٔ تغییرات	(-۲/۱۱) تا (۰/۲۵)	(-۲/۵۷) تا (۰/۹۹)	(-۳/۱۴) تا (۰/۹)

نتیجه‌گیری

در مطالعهٔ حاضر، عملکرد مدل شمارهٔ منحنی (SCS-CN) که بر اساس کاربرد جدول SCS است، در کنار مدل شمارهٔ منحنی اصلاح‌شده (رابطهٔ غیرخطی Ia-S)، در پنج حوضهٔ آبریز در استان گلستان (گالیکش، تمر، نوده، وطنا و کچیک) ارزیابی شده است. در حوضه‌های گالیکش، تمر و نوده به‌ترتیب ۱۳، ۱۰ و ۹ رویداد بارش- رواناب انتخاب شدند که چهار رویداد برای مرحلهٔ صحت‌سنجی در نظر گرفته شد. در حوضهٔ وطنا از چهار رویداد و در حوضهٔ کچیک از سه رویداد، یک رویداد برای صحت‌سنجی پارامترها انتخاب شدند.

بررسی عملکرد این دو مدل بر اساس معیارهای آماری ریشهٔ میانگین مربعات خطا، نش- ساتکلیف و خطای برآورد دبی اوج، در پنج حوضه صورت گرفته است. موارد زیر از بررسی این معیارها نتیجه گرفته شده است:

۱. بررسی معیار ریشهٔ میانگین مربعات خطا (RMSE) و معیار نش- ساتکلیف (NSE) در مجموع پنج حوضه و ۱۴ رویداد نشان می‌دهد استفاده از مدل شمارهٔ منحنی اصلاح‌شده (رابطهٔ غیرخطی Ia-S) موجب بهبود دقت برآورد هیدروگراف سیل شده است.

۲. بررسی خطای برآورد دبی اوج (PEP) در ۱۴ رویداد منتخب در مرحلهٔ صحت‌سنجی نشان‌دهندهٔ عملکرد مثبت مدل شمارهٔ منحنی اصلاح‌شده (رابطهٔ غیرخطی Ia-S) در کاهش خطای برآورد دبی اوج است. همچنین، بررسی‌ها نشان می‌دهد مدل SCS-CN در ۵۷ درصد و مدل شمارهٔ منحنی اصلاح‌شده (رابطهٔ غیرخطی Ia-S) در ۶۴ درصد موارد تمایل به بیش‌برآوردی دبی اوج دارند. در دو رویداد از ۱۴ رویداد مدل شمارهٔ منحنی اصلاح‌شده (رابطهٔ غیرخطی Ia-S) مقدار دبی را کمتر از مدل SCS-CN و مقدار واقعی دبی اوج برآورد کرده است و در سه رویداد از ۱۴ رویداد مقدار دبی را بیشتر از مدل SCS-CN و مقدار واقعی دبی اوج برآورد کرده است.

در مجموع، نتایج نشان می‌دهد کاربرد مدل اصلاح‌شدهٔ شمارهٔ منحنی به بهبود نتایج نسبت به مدل متداول منجر شده است که با نتایج ساهو و همکارانش [۲۰] همخوانی دارد.

منابع

[1].King K W and Balogh, J. C. Curve numbers for golf course watersheds. Transactions of the ASABE. 2008; 51(3):987-996.

[2].Tramblay Y, Bouvier C, Martin C, Didon-Lescot J. F, Todorovik D, Domergue J. M. Assessment of initial soil moisture conditions for event-based rainfall–runoff modelling. Journal of Hydrology. 2010;387(3):176-187.

[3].Chung W. H, Wang I. T, Wang R. Y. Theory-based SCS-CN method and its applications. Journal of Hydrologic Engineering. 2010; 15(12):1045-1058.

[4].Ponce V. M, Hawkins R. H. Runoff curve number: Has it reached maturity. Journal of hydrologic engineering. 1996; 1(1):11-19.

[5].Soulis K. X, Valiantzas J. D. SCS-CN parameter determination using rainfall-runoff data in heterogeneous watersheds-the two-CN system approach. Hydrology and Earth System Sciences. 2012; 16(3): 1001-1015.

[6].Romero P, Castro G, Gomez J. A, Fereres E. Curve number values for olive orchards under different soil management. Soil Science Society of America Journal. 2007; 71(6):1758-1769.

[7].Hawkins R. H. Asymptotic determination of runoff curve numbers from data. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 1993; 119(2):334-345.

[8].Ebrahimian M, Nuruddin A.A, MohdSoom M.A.B, Sood, A.M. Application of NRCS-curve number method for runoff estimation in a mountainous watershed. Caspian J. Environ. Sci. 2012; 10: 103-114.

[9].Cazier D.J, Hawkins R.H.Regional application of the curve number method. Water today and tomorrow. Proc. ASCE Irrigation and Drainage Division Special Conf., ASCE. New York. 1984; 710.

[10].Woodward D.E, Hawkins R.H, Hjelmfelt J.R, Jr A.T, Mullem J.A, Quan, Q.D. Runoff curve number method: Examination of the initial abstraction ratio. Proc. world water Environ. Res. Congress.2003; 1-10.

[11].Shi Z.H, Chen L.D, Fang N.F, Qin, D.F, Cai C.F. Research on SCSCN initial abstraction ratio using rainfall runoff event analysis in the three Gorges Area, China. Catina. 2009;77(1): 1-7.

[12].Singh M. Simulating rainfall changes effects on runoff and soil erosion in submontane Punjab. M.Sc. Thesis. Punjab Agricultural University. Ludhiana. 2014.

[13].Bales J, Betson R. P. The curve number as a hydrologic index. Rainfall Runoff Relationship. 1981; 371-386.

[14].Hauser V. L, Jones O. R. Runoff curve numbers for the Southern High Plains. Transactions of the ASAE. 1991; 34(1):142-148.

[15].Gao Y, Zhu, B, Miao C. Y. Application of SCS model to estimate the volume of rainfall runoff in sloping field of purple soil. Chinese Agricultural Science Bulletin. 2006; 22(11): 396-400.

[16].Mishra S K, and Singh V. P. Another look at SCS-CN method. Journal of Hydrologic Engineering. 1999; 4(3): 257-264.

[17].Mishra S K, Jain M K, Singh V P. Evaluation of the SCS-CN-based model incorporating antecedent moisture. Water resources management. 2004; 18(6): 567-589.

[18].Mishra S. K, Sahu R K, Eldho T I, Jain M K. An improved Ia- S relation incorporating antecedent moisture in SCS-CN methodology. Water Resources Management. 2006; 20(5): 643-660.

[19].Jiao P Xu D, Wang S, Yu Y, Han S. Improved SCS-CN method based on storage and depletion of antecedent daily precipitation. Water ResourManag. 2015; 29:4753–4765.

[20].Sahu R. K, Mishra S. K, Eldho T. I. An improved AMC-coupled runoff curve number model. Hydrological processes. 2010;24(20): 2834-2839.

[21].Karn A L, Lal M, Mishra S K, Chaube U C , Pandey A. Evaluation of SCS-CN Inspired models and their comparison. Journal of Indian Water Resources Society. 2016; 36(3): 19-27.

[22].Mishra S. K, Singh V. P. Soil conservation service curve number (SCS-CN) methodology. 42th ed. Springer Science and Business Media.. 2013.

[23].Mishra S.K, Singh V.P. SCS-CN-based hydrologic simulation pack-age. In: Singh V.P,Frevert D.K, editors. Mathematical Models in SmallWatershed Hydrology and Applications. Water Resour. Publ, P.O. Box2841, Littleton, Colorado 80161. 2002. pp. 391-464.

[24].Mishra S.K, Singh V.P, Sansalone J.J, Aravamuthan V. A modifiedSCS-CN method: characterization and testing. J. Water Resour. Manage. 2003;17: 37-68.

[25].Nash J. E, Sutcliffe J. V. River flow forecasting through conceptual models.part I- A discussion of principles. Journal of Hydrology. 1970; 10(3): 282-290.

[26].Adib A, Salarijazi M, Vaghefi M, Shooshtari M. M, Akhondali A. M. Comparison between GcIUH-Clark, GIUH-Nash, Clark-IUH, and Nash-IUH models. Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences. 2010; 34(2): 91-104.

[27].Adib A, Salarijazi M, Najafpour K. Evaluation of synthetic outlet runoff assessment models. Journal of Applied Sciences and Environmental Management. 2010; 14(3): 13-18.

[28].Adib A, Salarijazi M, Shooshtari M M, Akhondali A M. Comparison between characteristics of geomorphoclimatic instantaneous unit hydrograph be produced by GcIUH based Clark Model and Clark IUH model. Journal of Marine Science and Technology. 2011; 19(2): 201-209.

[29].Eidipour A, Akhondali A. M, Zarei H, Salarijazi M. Flood hydrograph estimation using GIUH model in ungauged karst basins (Case study: Abolabbas basin). TUEXENIA. 2016;36(3): 26-33.