

**بهبود برآورد هیدروگراف سیلاب با استفاده از مدل شماره منحنی اصلاح شده (رابطه غیر خطی Ia-S)**ساناز دایی<sup>۱</sup>، میثم سالاری جزی<sup>۲\*</sup>، خلیل قربانی<sup>۳</sup>، مهدی مفتاح هلقی<sup>۳</sup>

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

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

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

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

**چکیده**

مدل شماره منحنی (SCS-CN) در حالت متداول بر اساس رابطه خطی بین جذب اولیه (Ia) و بیشترین پتانسیل نگهداشت (S) حوضه آبریز است، ولی این مدل برای در نظر گرفتن رابطه غیرخطی Ia-S اصلاح شده است. هدف از مطالعه حاضر مقایسه مدل‌های متداول شماره منحنی و شماره منحنی اصلاح شده (رابطه غیرخطی Ia-S) در برآورد هیدروگراف سیلاب در پنج حوضه آبریز گالیکش، نوده، تمر، وطن و کچیک (کاربرد ۳۷ رویداد بارش-رواناب در محاسبات و انتخاب ۱۴ رویداد برای مقایسه نتایج در مرحله صحت‌سنجی) است. برای مقایسه نتایج از معیارهای ریشه 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 شماره منحنی اصلاح شده (رابطه غیرخطی Ia-S) در همه رویدادهای مرحله صحت‌سنجی موجب بهبود برآورد هیدروگراف و دبی اوج سیلاب نسبت به کاربرد مدل متداول شماره منحنی (SCS-CN) شده است. بنابراین، نتایج نشان می‌دهد در حوضه‌های آبریز مطالعه شده مدل شماره منحنی اصلاح شده (رابطه غیرخطی Ia-S) موجب بهبود درخور توجه کارایی مدل متداول شماره منحنی (SCS-CN) شده است.

**کلیدواژگان:** سیلاب، شماره منحنی اصلاح شده (رابطه غیرخطی Ia-S)، شماره منحنی (SCS-CN)، هیدروگراف.

## مقدمه

برآورد رواناب مستقیم، پایه 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 شماره 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 به نام شماره منحنی (CN)، پیشنهاد شده است. این پارامتر به فاکتورهایی همچون بارش تجمع، نوع خاک، کاربری اراضی و رطوبت پیشین خاک (AMC) بستگی دارد [۳-۵]. یکی از علل رایج بودن 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 تکامل یافته و یکی از قسمت‌های جدایی‌ناپذیر مدل‌های شبیه‌سازی پیوسته شده است [۵]. با وجود استفاده گسترده، مدل SCS-CN معایبی مانند مبهم بودن اثر رطوبت پیشین، وابستگی قوی فقط به یک پارامتر (CN)، در نظر گرفتن مقدار ثابت ۰/۲ برای ضریب جذب اولیه و محدودیت اندازه 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 کشت شده در ایالات متحده کمتر از پنج درصد است و این مقدار بر شماره 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 حوضه پنجاب استفاده از مقدار ۰/۰۵ برای ضریب جذب اولیه به جای ۰/۲ عملکرد بهتری داشته است [۱۲]. بلس و بستون [۱۳] و هاسر و جونز، ۱۹۹۱ [۱۴]، اعتبار پارامتر شماره 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 شماره منحنی و ضریب جذب اولیه، حجم سیلاب را در حوضه سیچوان چین برآورد کردند. نتیجه تحقیق یادشده امکان استفاده از مدل SCS-CN برای برآورد حجم سیلاب در زمین‌های شیب‌دار این منطقه را نشان می‌دهد [۱۵].

برخی محققان با در نظر گرفتن پارامترهایی مانند مقدار رطوبت پیشین، مدل استاندارد SCS-CN را اصلاح کردند. تحقیقات زیادی در زمینه مقایسه مدل استاندارد SCS-CN و مدل‌های اصلاحی پیشنهادشده توسط محققان انجام شده است. میسرا و سینگ با در نظر گرفتن 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 مقایسه آنها نشان داد مدل‌های اصلاح‌شده پیشنهادی عملکرد بهتری داشته‌اند. همچنین، میسرا 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 ذخیره بارش پیشین و تخلیه 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 بهبودیافته 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 شماره منحنی SCS-CN سطوح مختلف شرایط رطوبتی پیشین (AMC) موجب تغییرات ناگهانی در مقدار شماره منحنی و در نتیجه جهش ناگهانی در

مدل شماره منحنی اصلاح شده (رابطه غیرخطی Ia-S) در برخی زیرحوضه‌های استان گلستان آزمایش شده و نتایج با مدل شماره 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 اصلاح شده انجام گرفته است، تأثیر این مدل‌ها فقط در برآورد ارتفاع رواناب ارزیابی شده است. در تحقیق حاضر سعی شده است اثر استفاده از مدل‌های اصلاح شده روی هیدروگراف شبیه‌سازی شده سیل بررسی شود.

### مواد و روش‌ها

**مشخصات حوضه‌های مطالعه شده:** در تحقیق حاضر به دلیل تنوع اقلیمی در استان گلستان و با در نظر گرفتن وجود آمار بارش- رواناب، پنج حوضه گالیکش، تمر، کچیک، نوده و وطنانتخاب شده‌اند. داده‌های بارش و رواناب ثبت شده در حوضه‌های مورد بررسی از شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان گلستان دریافت شده است. در جدول ۱ مشخصات حوضه‌های مطالعه شده ارائه شده است. موقعیت حوضه‌های مطالعاتی در شکل ۱ ارائه شده است.

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 میشر-سینگ (MS) با استفاده از مجموعه بزرگی از داده‌های بارش- رواناب در ۸۲ حوضه در ایالات متحده بررسی شد. نتایج نشان‌دهنده 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 میشر و سینگ (MS) مقایسه کردند [۲۱]. نتایج تحقیقات آنها نشان داد مدل‌های میشر-سینگ نسبت به سایر مدل‌ها عملکرد بهتری داشت. بیشتر تحقیقات انجام شده در زمینه بارش- رواناب و استفاده از مدل شماره منحنی بر لزوم اصلاح و منطقه‌ای کردن پارامترهای این روش تأکید دارند. تا کنون بیشتر تحقیقات انجام شده در ایران به گونه‌ای بوده است که با به‌کارگیری روش شماره منحنی و واسنجی پارامترها با استفاده از رویدادهای بارش- رواناب اقدام به برآورد رواناب کرده‌اند. امروزه، در تحقیقات خارج از کشور استفاده از مدل‌های اصلاح شده روش شماره منحنی کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده است. در تحقیق حاضر سعی شده است

جدول ۱. مشخصات فیزیوگرافی حوضه‌های مطالعاتی

ردیف	نام حوضه	مساحت (کیلومتر مربع)	محیط (کیلومتر)	ارتفاع متوسط (متر)	شیب متوسط حوضه (درصد)	طول آبراهه 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	وطنان	۱۰/۷۷	۲۰/۳۵	۸۹۸/۵	۳۲/۷۸	۷/۸	۴



شکل ۱. موقعیت حوضه‌های آبریز مطالعه شده در استان گلستان

## مدل‌های استفاده شده

در تحقیق حاضر برای شبیه‌سازی بارش از مدل استاندارد SCS-CN استفاده شده است. شماره منحنی با استفاده از جدول تخمین زده شده است. علاوه بر مدل استاندارد SCS-CN از مدل اصلاحی پیشنهاد شده توسط میشر 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 (S) ( $I_a = \lambda S$ ) برآورد می‌شود:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \text{ اگر } P \geq I_a \quad (1)$$

$$Q = 0 \text{ اگر } P \leq I_a$$

مقدار S (بیشترین پتانسیل نگهداشت) با استفاده از پارامتر بی بعد CN (شماره منحنی) تعیین می‌شود. مقدار CN از صفر (بدون رواناب،  $S = \infty$ ) تا ۱۰۰ (همه بارش به رواناب تبدیل شود،  $S = 0$ ) متغیر است. برای  $\lambda = 0.2$  معادله ۱ به صورت معادله ۲ درمی‌آید. در معادله ۳ چگونگی محاسبه مقدار S با استفاده از پارامتر CN آورده شده است (مقدار S بر حسب میلی‌متر است) [۲۲].

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \text{ اگر } P \geq I_a \quad (2)$$

$$Q = 0 \text{ اگر } P \leq I_a$$

$$S = \frac{24500}{CN} - 254 \quad (3)$$

مقدار CN بر اساس کاربری اراضی، گروه هیدرولوژیک خاک و جدول SCS به دست می‌آید. مقدار شماره منحنی، که از این جدول به دست 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].

$$CN_I = \frac{4/2 CN_{II}}{10 - 0.058 CN_{II}} \quad (4)$$

$$CN_{III} = \frac{23 CN_{II}}{10 + 0.13 CN_{II}} \quad (5)$$

مدل شماره منحنی اصلاح شده (رابطه غیرخطی  $I_a-S$ )<sup>۱</sup> با استفاده از مفهوم درجه اشباع ( $C=Sr$ ) که C ضریب رواناب ( $Q/(P - I_a)$ ) است، [۱۸ و ۲۳] معادله ۲ را برای رطوبت پیشین (M) به شکل معادله ۶ اصلاح کردند.

$$Q = \frac{(P - I_a)(P - I_a + M)}{P - I_a + M + S} \quad (6)$$

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

$$M = \frac{(P_5 - 0.2 S_1) S_1}{P_5 + 0.8 S_1} \quad (7)$$

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

$$M = 0.5 \left[ -1/2 S + \sqrt{0.64 S^2 + 4 S P_5} \right] \quad (8)$$

با جای گذاری ضریب  $\lambda$  به جای  $0.2$  معادله ۸ به شکل کلی معادله ۹ درآمده است.

$$M = 0.5 \left[ -(1 + \lambda) S + \sqrt{(1 - \lambda)^2 S^2 + 4 S P_5} \right] \quad (9)$$

از آنجا که مقدار جذب اولیه ( $I_a$ ) تا حد زیادی به M وابسته است، معادله ( $\lambda = 0.2$ ) به صورت معادله ۱۰ اصلاح شده است.

$$I_a = \frac{\lambda S^r}{S + M} \quad (10)$$

این معادله یک رابطه غیرخطی اصلاح شده بین  $I_a$  و S است. معادله یاد شده شکل خاصی از معادله ( $I_a = \lambda S$ ) برای شرایط خشک یا  $M=0$  است [۲۴].

## برآورد هیدروگراف رواناب

هیدروگراف بی بعد SCS یک هیدروگراف واحد مصنوعی است. مختصات نقاط هیدروگراف واحد از جدول بدون بعدی که در آن مقادیر نسبت زمان ( $t/T_p$ ) در مقابل نسبت دبی هیدروگراف ( $q/q_p$ ) داده شده است، به دست می‌آید. با مشخص بودن مقادیر دبی اوج و زمان تأخیر برای بارش مازاد، می‌توان با استفاده از هیدروگراف مصنوعی، هیدروگراف واحد

1. SCS-CN (NL  $I_a-S$ )

یا شماره منحنی (CN) است که مقدار S بر اساس CN به دست می‌آید. مقدار شماره منحنی حوضه‌های مطالعه شده از تلفیق نقشه‌های کاربری اراضی و گروه هیدرولوژیک خاک (تهیه شده از اداره منابع طبیعی و آب‌خیزداری استان گلستان) و با استفاده از جدول SCS برآورد می‌شود. در جدول ۲، مقدار شماره منحنی هر حوضه آورده شده است.

**تخمین شماره منحنی و ضریب جذب اولیه در مدل شماره منحنی اصلاح شده (رابطه غیرخطی Ia-S)**: در این مدل مقادیر شماره منحنی (به دست آمده از جدول SCS) و ضریب جذب اولیه ( $\lambda=0.2$ )، 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 میانه پارامتر بهینه شده، برای صحت‌سنجی ۳۰ درصد رویدادهای باقی مانده به کار رفته است.

جدول ۲. درصد مساحت کاربری اراضی و گروه هیدرولوژیک حوضه‌ها

ردیف	حوضه	کاربری اراضی (درصد)			گروه هیدرولوژیک				میانگین وزنی CN حوضه		
		کشت آبی	کشت دیم	جنگل	مرتع	مسکونی	A	B		C	D
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

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_o - Q_c)_i^2}{\sum_{i=1}^N (Q_o - \bar{Q}_o)_i^2} \quad (14)$$

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

در روابط ۱۳-۱۵، N: تعداد رویدادهای مشاهده شده،  $Q_o$ : دبی مشاهده شده در گام  $i$ ،  $Q_c$ : دبی محاسبه شده در گام  $i$ ،  $\bar{Q}_o$ : میانگین دبی هیدروگراف سیل مشاهده شده،  $Q_{pc}$ : دبی اوج محاسبه شده و  $Q_{po}$ : دبی اوج مشاهده شده است.

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

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

در معادله یادشده  $C=2/0.8$  و  $A$  مساحت حوضه برحسب کیلومتر مربع است. مطالعه هیدروگراف‌های واحد تعدادی از حوضه‌های کوچک و بزرگ نشان داده است که زمان تأخیر (tp) حوضه تقریباً برابر  $0.6 T_c$  (زمان تمرکز  $T_c$ ) حوضه است ( $tp = 0.6 T_c$ ). در رابطه ۷، tr نشان دهنده زمان تداوم بارش مازاد است.

$$T_p = \frac{tr}{2} + tp \quad (12)$$

**تخمین شماره منحنی و ضریب جذب اولیه در مدل SCS-CN و مدل شماره منحنی اصلاح شده (رابطه غیرخطی Ia-S)**: تخمین شماره منحنی در مدل استاندارد SCS-CN: در مدل SCS-CN، بر اساس معادله ۲ پارامترهای ورودی به مدل، شامل مقدار بارش، ظرفیت نگهداشت حوضه (S)

**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 عبارتند از:

۱. ریشه 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 [۲۶-۲۹].

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

## نتایج و بحث

در این بخش عملکرد مدل استاندارد SCS-CN و مدل شماره منحنی اصلاح شده (رابطه غیرخطی Ia-S) با هم مقایسه شدند. در هر حوضه برای ۷۰ درصد از رویدادهای مقادیر پارامترهای هر مدل واسنجی شده است. سپس، پارامترهای به دست آمده در مرحله قبل برای صحت سنجی در رویدادهای باقی مانده استفاده شده و مقادیر خطای ریشه میانگین

مربعات خطا، نش-ساتکلیف و خطای برآورد دبی اوج برای هر رویداد تخمین زده شده است. در ادامه، مقادیر میانه و دامنه تغییرات معیارهای ارزیابی خطا برای هر حوضه آورده شده است. در جدول ۳ مقادیر شماره منحنی حاصل از جدول SCS و مقدار پارامترهای بهینه شده در مدل شماره منحنی اصلاح شده (رابطه غیرخطی Ia-S) برای رویدادهای منتخب در مرحله واسنجی، آورده شده است.

جدول ۳. مقادیر شماره منحنی جدول SCS و پارامترهای بهینه شده برای حوضه‌های مطالعه شده

SCS-CN(NL Ia-S)		SCS-CN		وطن	SCS-CN(NL Ia-S)		SCS-CN		حوضه گالیکش
$\lambda$	CN	$\lambda$	CN		$\lambda$	CN	$\lambda$	CN	
۰	۵۱			۱۳۹۰/۶/۵	۰/۰۹	۷۳			۱۳۹۲/۲/۵
۰/۰۴	۷۲	۰/۲	۷۲	۱۳۹۱/۶/۱۲	۰/۱۱	۵۱			۱۳۸۳/۱۰/۱۸
۰/۱۶	۵۰			۱۳۹۱/۷/۲۲	۰/۰۸	۷۱			۱۳۹۲/۱۲/۲۲
۰/۰۴	۵۱	۰/۲	۷۲	میانه	۰/۱۳	۵۸	۰/۲	۷۵	۱۳۹۱/۴/۳۰
کچیک					۰/۱	۶۴			۱۳۹۰/۷/۲۹
۰/۰۵	۸۱			۱۳۹۱/۶/۱۲	۰/۲۱	۵۷			۱۳۹۱/۱۱/۱۵
۰/۱۸	۵۸	۰/۲	۷۴	۱۳۹۳/۵/۲۳	۰/۱۶	۶۳			۱۳۸۳/۱۰/۲۲
۰/۱۲	۷۰	۰/۲	۷۴	میانه	۰/۱۱	۶۳	۰/۲	۷۵	میانه
SCS-CN(NL Ia-S)		SCS-CN		حوضه نوده	SCS-CN(NL Ia-S)		SCS-CN		حوضه تمر
$\lambda$	CN	$\lambda$	CN		$\lambda$	CN	$\lambda$	CN	
۰/۰۸	۵۰			۱۳۸۸/۸/۱۳	۰/۱۷	۵۷			۱۳۹۱/۱۱/۱۱
۰/۱	۶۵			۱۳۹۱/۱/۱۲	۰/۱۱	۵۸			۱۳۸۹/۴/۱
۰/۱	۷۳	۰/۲	۷۳	۱۳۸۹/۴/۱	۰/۱	۸۴	۰/۲	۷۶	۱۳۹۱/۶/۲
۰/۱۵	۷۰			۱۳۹۰/۷/۳۰	۰/۰۱	۵۳			۱۳۹۱/۲/۲۷
۰/۱۵	۶۳			۱۳۸۸/۹/۱	۰/۰۵	۸۲			۱۳۹۰/۶/۴
-	-	-	-	-	۰/۲۱	۵۵			۱۳۹۱/۱۱/۱۵
۰/۱	۶۵	۰/۲	۷۳	میانه	۰/۱۱	۵۸	۰/۲	۷۶	میانه

نیز در هر چهار رویداد بهبود یافته است به طوری که در رویداد ۱۳۹۱/۱/۲۵ این مقدار از ۱۳۸- (مدل SCS-CN) به مقدار ۴۴/۶- (مدل شماره منحنی اصلاح شده) (رابطه غیرخطی Ia-S)) افزایش یافته است. مقدار خطای برآورد دبی اوج در سه رویداد از چهار رویداد بررسی شده با حفظ بیش برآوردی یا کم برآوردی کاهش یافته است، ولی در رویداد ۱۳۸۷/۱۱/۳۰، مدل SCS-CN تمایل به بیش برآوردی و مدل شماره منحنی اصلاح شده (رابطه غیرخطی Ia-S) تمایل به کم برآوردی دارد. در حوضه نوده در هر چهار رویداد منتخب در مرحله واسنجی، با به کار بردن مدل شماره منحنی اصلاح شده (رابطه غیرخطی Ia-S)، مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا و خطای برآورد

در حوضه‌های مطالعه شده، همان طور که گفته شد، ۷۰ درصد از رویدادها برای واسنجی پارامترها و ۳۰ درصد باقی مانده برای صحت سنجی در نظر گرفته شده است. بعد از واسنجی، صحت سنجی پارامترها با استفاده از نتایج جدول ۳ انجام شده است. جدول ۴ نشان دهنده مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا، نش-ساتکلیف و خطای برآورد دبی اوج، برای رویدادهای منتخب در مرحله واسنجی، برای هر پنج حوضه مطالعه شده است. بررسی جدول نشان می‌دهد در حوضه گالیکش استفاده از مدل شماره منحنی اصلاح شده (رابطه غیرخطی Ia-S)، موجب کاهش مقدار خطای ریشه میانگین مربعات در هر چهار رویداد شده است. همچنین، مقادیر نش-ساتکلیف

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

دبی اوج کاهش و مقدار نش-ساتکلیف افزایش یافته است. همچنین، در همه رویدادهای این حوضه، عملکرد دو مدل در بیش و کم برآوردی دبی اوج یکسان بوده است. در حوضه تمر، مقایسه عملکرد دو مدل نشان می‌دهد مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا با استفاده از مدل اصلاح شده، در هر چهار رویداد کاهش یافته است. مقدار نش-ساتکلیف در هر چهار رویداد با به‌کاربردن مدل اصلاح شده افزایش داشته و مقدار این افزایش در رویداد ۱۳۹۰/۰۶/۰۳ نسبت به سایر رویدادها مشهودتر است. مدل شماره منحنی اصلاح شده (رابطه 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 حوضه وطن و کچیک عملکرد مدل شماره منحنی اصلاح شده (رابطه غیرخطی Ia-S) مثبت ارزیابی شد و استفاده از آن موجب بهبود مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا، نش-ساتکلیف و خطای برآورد دبی اوج شده است. در حوضه وطن مقدار نش-ساتکلیف از ۰/۸۲- (SCS-CN) به مقدار ۰/۳ (مدل شماره منحنی اصلاح شده (رابطه غیرخطی Ia-S)) افزایش یافته است. مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا و خطای برآورد دبی اوج به ترتیب از ۴/۸ و ۰/۹۵ (مدل SCS-CN) به ۲/۹۵ و ۰/۶۳ (مدل شماره منحنی اصلاح شده (رابطه غیرخطی Ia-S)) کاهش یافته است. در حوضه کچیک نیز استفاده از مدل شماره منحنی اصلاح شده (رابطه غیرخطی Ia-S) موجب کاهش بسیار زیاد خطای برآورد دبی اوج شده است.

جدول ۴. مقادیر RMSE، NSE و PEP برای مرحله صحت‌سنجی در حوضه‌های مطالعه شده

نوده						رویداد نوده	گالیکش						رویداد گالیکش
SCS-CN			SCS-CN(NL Ia-S)				SCS-CN			SCS-CN(NL Ia-S)			
PEP	NSE	RMSE	PEP	NSE	RMSE		PEP	NSE	RMSE	PEP	NSE	RMSE	
-۱	-۵/۳۱	۱۱/۸۳	-۰/۹۷	-۴/۹۶	۱۱/۵	۱۳۹۱/۱/۹	۰/۵۸	-۱/۳۷	۱۷/۹۴	۰/۲۵	-۰/۹۲	۱۶/۱۷	۱۳۸۸/۱۲/۰۳
-۲/۴	-۲/۴۶	۲۲/۷۴	-۱/۷۹	-۲/۳۲	۲۲/۲۸	۱۳۹۱/۶/۱۶	-۲/۱۱	-۱/۳۸	۱۴	-۰/۷۷	-۴۴/۶	۸/۰۷	۱۳۹۱/۱۱/۲۵
۰/۹۹	-۰/۴۶	۸۸/۹۶	۰/۸۷	-۰/۲۳	۸۱/۵۴	۱۳۸۶/۵/۱۳	-۱/۳۹	-۹/۷	۶/۵۶	۰/۹۴	-۱/۸	۳/۳۶	۱۳۸۷/۱۱/۳۰
-۲/۵۷	-۶۹/۵۴	۶۹/۹۲	-۲/۰۹	-۵۱/۲۱	۶۰/۱۵	۱۳۹۰/۶/۴	-۰/۶۲	-۸/۴	۱۳/۵۶	-۰/۱۱	-۱/۸	۷/۴	۱۳۹۱/۱۱/۱۳
وطنا						رویداد وطن	تمر						رویداد تمر
SCS-CN			SCS-CN(NL Ia-S)				SCS-CN			SCS-CN(NL Ia-S)			
PEP	NSE	RMSE	PEP	NSE	RMSE		PEP	NSE	RMSE	PEP	NSE	RMSE	
۰/۹۵	-۰/۸۲	۴/۸	۰/۶۳	۰/۳	۲/۹۵	۱۳۹۳/۳/۲۴	۰/۹	-۴/۱۰	۲۱/۲۷	-۰/۰۵	-۰/۷۳	۱۲/۴	۱۳۹۰/۶/۵
کچیک						رویداد کچیک	کچیک						
SCS-CN			SCS-CN(NL Ia-S)				SCS-CN			SCS-CN(NL Ia-S)			
PEP	NSE	RMSE	PEP	NSE	RMSE		PEP	NSE	RMSE	PEP	NSE	RMSE	
۰/۱۶	-۲/۸۶	۲/۸۹	-۰/۰۹	-۱/۶۱	۲/۳۷	۱۳۹۱/۴/۲۶	-۰/۱۴	-۳/۷۵	۵/۲۶	۰/۴۷	-۱/۱۷	۳/۵۵	۱۳۹۱/۱۱/۱۲
							۰/۶۱	-۰/۹۷	۲۵/۲۳	-۰/۳	-۰/۱۴	۱۸/۲۸	۱۳۸۸/۱۲/۴

جدول ۵. دامنه تغییرات و میانه مقادیر RMSE، NSE و PEP در حوضه‌های مطالعه‌شده

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

## نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، عملکرد مدل شماره منحنی (SCS-CN) که بر اساس کاربرد جدول SCS است، در کنار مدل شماره منحنی اصلاح‌شده (رابطه غیرخطی Ia-S)، در پنج حوضه آبریز در استان گلستان (گالیکش، تمر، نوده، وطن و کچیک) ارزیابی شده است. در حوضه‌های گالیکش، تمر و نوده به ترتیب ۱۳، ۱۰ و ۹ رویداد بارش - رواناب انتخاب شدند که چهار رویداد برای مرحله صحت‌سنجی در نظر گرفته شد. در حوضه وطن از چهار رویداد و در حوضه کچیک از سه رویداد، یک رویداد برای صحت‌سنجی پارامترها انتخاب شدند.

بررسی عملکرد این دو مدل بر اساس معیارهای آماری ریشه 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 ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و معیار نش-ساتکلیف (NSE) در مجموع پنج حوضه و ۱۴ رویداد نشان می‌دهد استفاده از مدل شماره منحنی اصلاح‌شده (رابطه غیرخطی Ia-S) موجب بهبود دقت برآورد هیدروگراف سیل شده است.

۲. بررسی خطای برآورد دبی اوج (PEP) در ۱۴ رویداد منتخب در مرحله صحت‌سنجی نشان‌دهنده عملکرد مثبت مدل شماره منحنی اصلاح‌شده (رابطه غیرخطی Ia-S) در کاهش خطای برآورد دبی اوج است. همچنین، بررسی‌ها نشان می‌دهد مدل SCS-CN در ۵۷ درصد و مدل شماره

منحنی اصلاح‌شده (رابطه غیرخطی Ia-S) در ۶۴ درصد موارد تمایل به بیش‌برآوردی دبی اوج دارند. در دو رویداد از ۱۴ رویداد مدل شماره منحنی اصلاح‌شده (رابطه 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 اصلاح‌شده شماره 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. 42<sup>th</sup> 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, Shoostari 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, Shoostari 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.