

Research Paper

Investigating the Factors Involved in the Curve Number Rainfall-Runoff Model

Bahram Saeidi Farzad¹Nazila Kardan^{2*}

¹ Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.

² Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.



10.22125/IWE.2024.413691.1742 .

Received:

August 28, 2023

Accepted:

January 3, 2024

Available online:

May 5, 2024

Keywords:

Curve number Model,

Direct runoff,

CN,

Rainfall,

Runoff relation,

Abstract

Estimating the amount of surface runoff and studying the relationship between rainfall and runoff is the most important issue in surface water hydrology studies. Using simple methods to estimate runoff in hydrological applications, especially in ungauged watersheds, is of particular importance. Probably the simplest conceptual method for predicting runoff depth is the use of the curve number rainfall-runoff model, which was originally developed to model the depth of runoff caused by rainstorms in small agricultural and rangeland catchments, but so far it has been applied in applications other than those originally intended. Various studies show that this method is still growing and improving and it needs to improve. In the present study, firstly, a review of the studies that investigated the factors involved in the curve number method to estimate the runoff value was done, and one of the main results of these studies is to suggest changing the value of the standard initial loss ratio (that is, changing the value of λ from 0.2 to 0.05) based on extensive field measurements and also considering rainfall-runoff response classes when using the curve number method. Secondly, some remaining challenges and future perspectives regarding this method are mentioned.

Corresponding Author: Nazila Kardan

Address: Department of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.

Email: n.kardan@azaruniv.ac.ir

Tel: 0098-914-418-6579 , 041-3145-2585

1. Introduction

Rain-runoff modeling is one of the most important applications of hydrology. Correct and accurate rainfall-runoff modeling is important for effective and optimal planning and management of water resources and prediction and prevention of natural disasters (floods and droughts). In general, there are different methods for classifying rainfall-runoff models. For example, classification of models based on computational structure are experimental model, conceptual model, and theoretical or physical model, and classification based on spatial structure of hydrological processes are lumped model, semi-distributed model, and distributed model (Sitterson et al., 2018). Rainfall-runoff models are selected according to the project objective, data availability, study dimensions, required output, and desired simplicity or complexity. Therefore, each type of model has advantages and disadvantages that should be considered in their selection.

The curve number model of the United States Soil Conservation Organization (SCS-CN) is an interesting model that, due to reasons such as the initial development of the model, the assumptions considered and its characteristics, in some references it is considered an experimental model (Beven, 2012), in others it is a semi-experimental model. (Chin, 2021) and some other conceptual models (Mishra and Singh, 2003; Soulis, 2021) or conceptual/experimental models (Mishra et al., 2019) have been mentioned.

Due to its simplicity and extensive documentation, the curve number model soon became a ubiquitous technique that is now used worldwide by many engineers and professionals in numerous hydrological applications. As an example, most of the commercial watershed models such as CREAMS, AGNPS, EPIC and SWAT, as well as free non-commercial models such as HEC-HMS and SWMM, due to their simplicity, ease of use, the need for less input data, the use of the main characteristics of runoff production, wide acceptance and the existence Substantial infrastructure at the Natural Resources Conservation Service (NRCS) and the institutional movement underway to use the curve number method in this organization (Mishra et al, 2019). There have been many review studies about this method, among them Ponce & Hawkins (1996), Mishra & Singh (2003), Hawkins et al. (2009) and Soulis (2021). The latest research conducted between the years 2021 Until 2023, it is available in the ASCE library in the form of 8 articles under the title "Special Collection of Curve Number Method in the 21st Century" (Chin, 2023). In this research, an attempt has been made to review the most important findings about the factors involved in this method and some new applications along with some suggestions, perspectives and remaining challenges regarding this method.

2. Materials and Methods

The curve number model is based on the continuity equation and two basic hypotheses. The first hypothesis equates the ratio of the actual amount of direct surface runoff (Q) to the total rainfall (P) (in other words, the maximum potential surface runoff) with the ratio of the amount of actual infiltration (F) to the maximum amount of potential retention (S). The second hypothesis relates initial losses (I_a) to maximum potential maintenance; Therefore, the curve number model includes

(a) Continuity equation:

$$P=I_a+F+Q \quad (1)$$

(b) Hypothesis of equality of ratios of two real quantities to two potential quantities:

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{P - I_a} \quad (2)$$

(c) I_a-S hypothesis:

$$I_a = \lambda S \quad (3)$$

From the combination of equations (1) and (2) and the assumption of the initial loss ratio ($\lambda=I_a/S=0.2$), in equation (3), the model number of the direct runoff depth curve Q (in inches), caused by the depth of the rainfall event, describes P (in inches) in the dominant runoff equation below:

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

This equation is true for $P \geq 0.2S$ and $Q=0$ otherwise. S is a measure of the hydrological state of the land, which depends on the maximum possible difference between P and Q . S is related to CN by the relation:

$$CN = \frac{1000}{10 + S} \quad (5)$$

where S is expressed in inches. S may range from zero to ∞ , so CN ranges inversely from 100 to zero, respectively.

3. Results

By analyzing several hundred sets of rainfall-runoff data, mainly conducted by the Agricultural Research Service, the Forest Service, and the United States Geological Survey, to understand the CN method, several distinct classes of rainfall-runoff response corresponding to the runoff equation, Equation (4) It was diagnosed that they did not have.

- Complacent: This is the simplest model of active response, i.e. a linear relationship in the form of $Q = CP$ (similar to the logical method formula). In such cases, with the increase of P , the value of CN decreases without approaching a constant value. Rainfall on active water surfaces such as channel flow can be one of the sources of such a situation.
- Violent: This type of response starts from a passive or self-righteous state. There is a P_t threshold (typically 1.5 to 3 inches) in some large, continuous rainfalls above which (extremely high runoff-to-precipitation ratios of about 0.6 to 1) the hydrologically active upland. be. Such events are rarer but can be quite consequential.
- Inactive: This is a default mode, i.e. no response to rainfall in a long-term monitoring that is rarely represented in rainfall and runoff datasets. In such a response, the land surface shows no evidence of upland flow contributions, drainage density is low or absent, vegetation is abundant, and soil absorption capacities are high.

4. Discussion and Conclusion

- The curve number method is still growing and needs improvement. This method helps to understand general hydrology (not related to CN).
- The curve number method does not correspond well with all rainfall-runoff classes in the basins. This method should not be used in "Inactive", "Complacent" and "Violent" runoff classes. It is one of the priorities of future studies in this field.
- In some studies, the effects of previous rainfall or the wetness of the basin have been taken into account, but it is not comprehensive and universal.
- Moving towards a universally accepted and unique method to determine CN from rainfall-runoff data according to the dominant soil type and vegetation variability in natural watersheds (Psomiadis et al., 2020; Soulis & Valiantzas, 2013).
- Extending the documentation of CN values to a wider range of regions, land uses and weather conditions, including emerging uses such as rooftop gardens, solar farms (power plants) or porous pavements, and considering the impact of gradual and sudden changes in land cover such as urbanization and fire (Ling et al., 2020; Kang & Yoo, 2020; Soulis, 2018; Soulis et al., 2017).

5. Six important reference

- 1) Chin, D. A. (2021a). Application of the curve-number method for varying rainfall amounts. *J. Irrig. Drain. Eng.* 147(7): 06021003.

- 2) Chin, D. A. (2021b). Deficiencies in the curve number method. *J. Irrig. Drain. Eng.* 147(5): 04021008.
- 3) Chin, D. A. (2022a). Essential considerations in applying the curve-number method. *J. Irrig. Drain. Eng.* 148(2): 04021071.
- 4) Chin, D. A. 2022b. Minimum rainfall for applying the curve-number method. *J. Irrig. Drain. Eng.* 148(8): 06022003.
- 5) Chin, D. A. 2023. "An improved curve-number method." *J. Irrig. Drain. Eng.* 149(2): 06022009.
- 6) Kang M. & Yoo C. (2020). Application of the SCS–CN Method to the Hancheon Basin on the Volcanic Jeju Island, Korea. *Water*, 12(12): 3350-3381.

بررسی عوامل دخیل در مدل بارش-رواناب شماره منحنی

بهرام سعیدی فرزاد^۱، نازیلا کاردان^{۲*}

تاریخ ارسال: ۱۴۰۲/۰۶/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۱۳

مقاله پژوهشی

چکیده

تخمین میزان رواناب سطحی و مطالعه رابطه بارش-رواناب مهم‌ترین موضوع در مطالعات هیدرولوژی آب‌های سطحی است. به‌کارگیری روش‌های ساده برای برآورد رواناب در کاربردهای هیدرولوژیکی به‌خصوص در حوضه‌های آبریز فاقد ایستگاه و آمار اندازه‌گیری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. احتمالاً ساده‌ترین روش مفهومی برای پیش‌بینی رواناب استفاده از مدل بارش-رواناب شماره منحنی است که در اصل جهت مدل‌سازی میزان عمق رواناب ناشی از رگبارهای بارندگی در حوضه‌های آبریز کوچک کشاورزی و مراتع ایجاد شده است، اما تاکنون در انواع کاربردهایی غیر از آنچه در ابتدا در نظر گرفته شده بود استفاده شده است. مطالعه منابع مختلف نشان می‌دهد تحقیق در زمینه نحوه استفاده از این مدل همچنان در حال رشد و اصلاح بوده و نیاز به پیشرفت دارد. در پژوهش حاضر اولاً مروری بر مطالعاتی که به بررسی فاکتورهای دخیل در روش شماره منحنی برای برآورد میزان رواناب پرداخته‌اند، انجام شده که از نتایج اصلی این مطالعات می‌توان به ارائه پیشنهاد تغییر مقدار نسبت تلفات اولیه استاندارد (یعنی تغییر عدد λ از عدد ۰/۲ به عدد ۰/۰۵) بر اساس اندازه‌گیری‌های گسترده میدانی و نیز لحاظ کردن کلاس‌های پاسخ بارندگی-رواناب در هنگام استفاده از روش شماره منحنی اشاره کرد ثانیاً به بعضی از چالش‌های باقی‌مانده و چشم‌انداز آینده در خصوص این روش اشاره شده است.

واژه‌های کلیدی: مدل شماره منحنی، رواناب مستقیم، CN، رابطه بارش-رواناب.

^۱ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران.

^۲ دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران (نویسنده مسئول). N.kardan@azaruniv.ac.ir

مقدمه

را در حوضه آبریز نشان دهد. مثال‌هایی از مدل‌های فیزیکی عبارت‌اند از MIKE SHE، PIHM و KINEROS (Singh, 1995). مدل‌های توده‌ای تغییرپذیری کمیت‌ها در داخل حوضه آبریز را در نظر نمی‌گیرند. در حالی که در مدل توزیعی تغییرات مکانی آنها لحاظ می‌شود. مدل‌های نیمه‌توزیعی توسعه‌یافته مدل‌های توده‌ای و خلاصه شده مدل‌های توزیعی هستند. مدل‌های تجربی و مدل‌های مفهومی از نوع مدل‌های توده‌ای هستند. بعضی از مدل‌های مفهومی و مدل‌های فیزیکی مانند SWAT و TOPMODEL جزو مدل‌های نیمه‌توزیعی و مدل‌های فیزیکی مانند MIKE SHE مدل‌های توزیعی هستند. مدل‌های بارش-رواناب با توجه به هدف پروژه، در دسترس بودن داده‌ها، ابعاد مطالعه، خروجی مورد نیاز و سادگی یا پیچیدگی مورد نظر انتخاب می‌شوند. لذا هر نوع مدل دارای معایب و محاسنی است که در انتخاب آنها باید در نظر گرفته شود. از محاسن مدل‌های تجربی می‌توان به تعداد پارامترهای بسیار کم مورد نیاز، سادگی پیاده‌سازی، زمان محاسباتی سریع‌تر و اثربخشی هزینه و از معایب آن به عدم ارتباط مدل با فیزیک حوضه و ایجاد پیامد جدی در نتایج خروجی مدل در صورت وجود خطا در داده‌های ورودی اشاره کرد و بهترین کاربرد آن در حوضه‌های آبریز فاقد ایستگاه اندازه‌گیری و نیز زمانی است که تنها خروجی مدل رواناب باشد.

از محاسن مدل‌های مفهومی می‌توان به استفاده آسان و نیز راحت بودن کالیبراسیون مدل و از معایب آن به فقدان معنای فیزیکی در معادلات و پارامترهای حاکم و عدم لحاظ تغییرپذیری مکانی در داخل حوضه آبریز اشاره نمود. در صورتی که زمان محاسبات و داده‌ها محدود باشند مدل‌های مفهومی بهترین کاربرد را دارند. بزرگ‌ترین حسن یک مدل فیزیکی ارتباط بین پارامترهای مدل و ویژگی‌های فیزیکی حوضه است که آن را واقعی‌تر می‌کند. علاوه بر آن تغییرات مکانی و زمانی در داخل حوضه در این مدل‌ها گنجانده شده است. از معایب آن می‌توان به نیاز به تعداد زیادی پارامتر برای کالیبره کردن مدل و محدود شدن استفاده از آنها به علت وجود حجم زیادی از داده‌های مورد نیاز برای اجرای آنها و مختص

مدل‌سازی بارش-رواناب یکی از مهم‌ترین کاربردهای هیدرولوژی است. مدل‌سازی صحیح و دقیق بارش-رواناب برای برنامه‌ریزی و مدیریت مؤثر و بهینه منابع آب و پیش‌بینی و پیشگیری از بلایای طبیعی (سیل و خشک‌سالی) مهم است. اولین مدل‌سازی کمی بارش-رواناب به اواسط قرن نوزدهم بازمی‌گردد، زمانی که فرمول منطقی توسط توماس جیمز مولوانی در سال ۱۸۵۱ برای تعیین دبی اوج ناشی از یک رویداد بارندگی در یک حوضه آبریز شهری کوچک معرفی شد. مدل‌سازی بارش-رواناب از آن زمان توجه زیادی را از سوی جامعه هیدرولوژیکی به خود جلب کرده است و در نتیجه مجموعه وسیعی از ادبیات در این زمینه وجود دارد (Beven, 2012). در حالت کلی روش‌های مختلفی جهت طبقه‌بندی مدل‌های بارش-رواناب وجود دارد. به‌عنوان نمونه، طبقه‌بندی مدل‌ها بر مبنای ساختار محاسباتی عبارت‌اند از مدل تجربی، مدل مفهومی^۱ و مدل تئوریک یا فیزیکی و طبقه‌بندی بر مبنای ساختار مکانی فرایندهای هیدرولوژیکی عبارت‌اند از مدل توده‌ای، مدل نیمه‌توزیعی و مدل توزیعی (Sitterson et al., 2018). مدل‌های تجربی بر مبنای قوانین فیزیکی نیستند و فقط ارتباط غیرخطی داده‌های ورودی و خروجی را در قالب یک مدل جعبه سیاه برقرار می‌کنند. فرمول منطقی، روش هیدروگراف واحد (Sherman, 1932)، معادلات رگرسیون و روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی همگی در زمره مدل‌های تجربی هستند. مدل‌های مفهومی بر اساس ذخایر مخزن و معادلات فیزیکی ساده‌شده فرآیند هیدرولوژیکی هستند که یک ایده مفهومی از رفتارها در یک حوضه آبریز ارائه می‌دهند.

مدل مخزن خطی، مدل ناش (Nash, 1959) و نیز مدل‌های استانفورد، TOPMODEL، HBV و HSPF (Devia et al., 2015) جزو مدل‌های مفهومی هستند. مدل‌های تئوریک مبتنی بر درک فیزیک مربوط به فرآیندهای هیدرولوژیکی بوده و قوانین و معادلات فیزیکی حاکم بر مدل می‌تواند بخش‌های متعددی از پاسخ‌های هیدرولوژیکی واقعی

^۱ Conceptual



موکوس (Victor Mockus) توسعه داده شد و در سال ۱۹۵۶ در کتابچه راهنمای مهندسی ملی (NEH) منتشر شد. این مدل محصول نهایی یک تحقیق میدانی بزرگ و جامعی است که در اواخر دهه ۱۹۳۰ و اوایل دهه ۱۹۴۰ انجام شد و حاصل کار محققان اولیه متعدد بود (Mockus, 1949; Sherman, 1932; Andrews, 1954; Ogrosky, 1956).

کاتالیزور اصلی برای رسیدن به این مدل، تصویب قانون حفاظت از آبخیزداری و جلوگیری از سیل در اوت ۱۹۵۴ بود که منجر به رسمیت شناختن این مدل در سطح دولت فدرال شد و از آن زمان تاکنون این مدل شاهد کاربردهای بی شماری در سراسر جهان بوده است. این مدل از آن زمان در سال‌های ۱۹۶۴، ۱۹۶۵، ۱۹۷۱، ۱۹۷۲، ۱۹۸۵ و ۱۹۹۳ بازنگری شد. آخرین مورد به‌روزرسانی آن به شکل رسمی در جولای سال ۲۰۰۴ بود (Soulis, 2021). اگرچه پیش‌نویس به‌روزرسانی دیگر آن در ۳۰ سپتامبر ۲۰۱۷ به شکل طرح مقدماتی آماده‌شده ولی هنوز این به‌روزرسانی تحت بررسی بوده و یک گزارش اخیراً از نتایج این بررسی منتشر شده است (Hawkins et al., 2020).

مدل شماره منحنی به علت سادگی و مستندات گسترده، به‌زودی به یک تکنیک فراگیر تبدیل شد که اینک در سراسر جهان توسط بسیاری از مهندسان و متخصصان در کاربردهای هیدرولوژیکی متعدد مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌عنوان نمونه اکثر مدل‌های تجاری حوضه آبریز مانند CREAMS، AGNPS، EPIC و SWAT و نیز مدل‌های غیرتجاری رایگان مانند HEC-HMS و SWMM به دلیل سادگی، سهولت استفاده، نیاز به داده‌های ورودی کمتر، استفاده از ویژگی‌های اصلی تولید رواناب، پذیرش گسترده و نیز وجود زیرساخت قابل‌توجه در سازمان حفاظت از منابع طبیعی (NRCS) و حرکت نهادی رویه شده برای روش شماره منحنی در این سازمان، از آن استفاده می‌کنند (Mishra et al., 2019).

مطالعات مروری زیادی در خصوص این روش انجام گرفته که از میان آن‌ها می‌توان به مطالعات Ponce & Hawkins (1996)، Mishra & Singh (2003) و همکاران

بودن مدل تئوریک به یک مکان یا حوضه خاص اشاره نمود. بهترین کاربرد این مدل‌ها زمانی است که داده‌های دقیق در دسترس بوده و ویژگی‌های فیزیکی فرآیندهای هیدرولوژیکی به‌دقت درک شده باشد. مهم‌ترین نقطه قوت مدل‌های توده‌ای، زمان محاسباتی اندک مورد نیاز جهت شبیه‌سازی رواناب کل و جریان در نقطه خروجی حوضه بوده و نقاط ضعف آن داشتن مفروضات بسیار در مورد فرآیندهای هیدرولوژیکی، از دست دادن وضوح مکانی داده‌ها به علت همگن فرض نمودن حوضه و ایده آل نبودن کاربرد آن در حوضه‌های آبریز بزرگ می‌باشد. حسن مدل توزیعی لحاظ کردن ناهمگنی مکانی ورودی‌ها و پارامترها و ارائه اطلاعات دقیق رواناب در نقاط مختلف حوضه (گره‌ها یا سلول‌های شبکه) و عیب آن لحاظ کردن تعداد بسیار زیادی از داده‌های توزیع‌شده و کالیبراسیون پارامترها (برای هر گره یا سلول) و نیز زمان محاسباتی زیاد مورد نیاز برای اجرای یک شبیه‌سازی می‌باشد. مزایای یک مدل نیمه‌توزیعی، زمان محاسباتی سریع‌تر و توانایی استفاده از داده‌های کمتر و پارامترهای کمتر نسبت به مدل توزیعی است. عیب آن نیاز به مهارت در به‌کارگیری داده‌های ورودی می‌باشد (Sitterson et al., 2018).

مدل شماره منحنی سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS-CN) مدلی جالب‌توجه هست که به دلایلی نظیر نحوه توسعه اولیه مدل، فرضیات در نظر گرفته شده و ویژگی‌های آن، در برخی مراجع از آن به‌عنوان مدلی تجربی (Beven, 2012)، در بعضی دیگر مدلی نیمه‌تجربی (Chin, 2021) و برخی دیگر مدلی مفهومی (Mishra and Singh, 2003; Soulis, 2021) یا مدلی مفهومی/تجربی (Mishra et al., 2019) ذکر گردیده است.

این مدل در سازمان حفاظت خاک وزارت کشاورزی ایالات‌متحده (که امروزه به‌عنوان سازمان حفاظت از منابع طبیعی (NRCS) شناخته می‌شود) برای پیش‌بینی حجم رواناب مستقیم ناشی از وقوع بارندگی‌ها و عمدتاً برای ارزیابی رواناب رگبار در حوضه‌های آبریز کوچک کشاورزی در سال ۱۹۵۴ تحت سرپرستی یک مهندس هیدرولیک به نام ویکتور

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \quad (۴)$$

این معادله برای $P \geq 0.2S$ صادق است و در غیر این صورت $Q=0$ خواهد بود. S معیاری از وضعیت هیدرولوژیکی زمین است که وابسته به حداکثر اختلاف ممکن بین P و Q است. S مرتبط با CN است و توسط رابطه:

$$CN = \frac{1000}{10 + S} \quad (۵)$$

که S به اینچ است، بیان می‌شود. همان‌طور که در معادله (۴) نشان داده شده است، $0.2S$ به‌عنوان افت اولیه (I_a) یا مقدار بارندگی مورد نیاز قبل از شروع رواناب می‌باشد ($I_a = 0.2S$) لذا اگر ارتفاع بارندگی کمتر از I_a باشد، رواناب تولید نخواهد شد. S ممکن است از صفر تا ∞ متغیر باشد، بنابراین CN به‌صورت معکوس به ترتیب از ۱۰۰ تا صفر متغیر است. مقدار عددی CN به‌طور معمول در هندبوک‌ها و کتب مرجع هیدرولوژی بر اساس گروه‌های هیدرولوژیک خاک و شرایط مختلف زمین ارائه شده و در دسترس قرار دارد. البته ممکن است در این مراجع، تغییرات لحاظ شده برای عدد CN مطابق به‌روزرسانی‌های انجام شده در NRCS صورت نگرفته باشد بنابراین لازم است توجه داشت که مرجع معتبر اصلی در حال حاضر برای انتخاب این عدد و راهنمایی استفاده از این مدل، NRCS NEH-630 است (USDA, 2004).

عوامل دخیل در روش شماره منحنی

دلایل اصلی موفقیت چشمگیر مدل شماره منحنی عبارت‌اند از سادگی در عین معتبر و پایدار بودن، آسان بودن فهم و کاربرد آن و نیز مفید بودن برای حوضه‌های آبریز بدون ایستگاه که بسیاری از عوامل مؤثر بر تولید رواناب (مانند نوع خاک، کاربری اراضی و پوشش گیاهی و شرایط رطوبت زمین) را در بر گرفته و آن‌ها را در یک پارامتر واحد به نام شماره منحنی (CN) ترکیب می‌کند. در کنار محاسن اشاره شده در فوق دارای برخی نواقص و محدودیت‌ها مانند فقدان عامل زمان در مدل، فقدان مشخصات بارندگی، عدم راهنمایی در مورد شرایط رطوبت قبلی و فقدان عامل شیب زمین است. این مزایا و معایب، روش شماره منحنی را به موضوعی دائمی در بیش از شش

(2009) و (Soulis (2021) اشاره کرد. آخرین تحقیقات انجام‌شده بین سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۳ در قالب ۸ مقاله تحت عنوان «مجموعه ویژه روش شماره منحنی در قرن بیست و یکم» در کتابخانه ASCE موجود است (Chin, 2023). در این تحقیق سعی شده است به مروری از مهم‌ترین یافته‌ها در مورد عوامل دخیل در این روش و بعضی کاربردهای جدید به همراه برخی پیشنهادها، چشم‌اندازها و چالش‌های باقی‌مانده در خصوص این روش پرداخته شود.

مواد و روش‌ها

روابط کلی حاکم در روش شماره منحنی

مدل شماره منحنی بر اساس معادله پیوستگی و دو فرضیه اساسی است. فرضیه اول نسبت مقدار واقعی رواناب مستقیم سطحی (Q) به کل بارندگی (P) (به‌عبارت‌دیگر حداکثر رواناب سطحی بالقوه) را با نسبت مقدار نفوذ واقعی (F) به مقدار حداکثر نگهداشت بالقوه (S) برابر می‌کند. فرضیه دوم تلفات اولیه (I_a) را به حداکثر نگهداشت بالقوه مرتبط می‌کند؛ بنابراین مدل شماره منحنی شامل

(الف) معادله پیوستگی:

$$P = I_a + F + Q \quad (۱)$$

(ب) فرضیه برابری نسبت‌های دو کمیت واقعی به دو کمیت بالقوه:

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{P - I_a} \quad (۲)$$

(ج) فرضیه $I_a - S$:

$$I_a = \lambda S \quad (۳)$$

از ترکیب معادلات (۱) و (۲) و فرض نسبت تلفات اولیه^۱ ($\lambda = \frac{I_a}{S} = 0.2$)، در معادله (۳)، مدل شماره منحنی میزان عمق رواناب مستقیم (Q بر حسب اینچ)، ناشی از عمق رویداد بارندگی، P (بر حسب اینچ) را در غالب معادله رواناب زیر توصیف می‌کند:

^۱ Initial abstraction ratio



زمین‌های مرتفع از نظر هیدرولوژیکی فعال می‌شوند. چنین رویدادهایی نادرتر هستند اما می‌توانند کاملاً پیامد آور باشند.

Inactive- (غیرفعال): این یک حالت پیش‌فرض است، یعنی عدم پاسخ به بارش‌ها در یک نظارت طولانی‌مدت که به‌ندرت در مجموعه داده‌های بارندگی و رواناب نشان داده می‌شود. در چنین پاسخی، سطح زمین هیچ گواهی از مشارکت‌های جریان زمین‌های مرتفع را نشان نمی‌دهد، تراکم زهکشی کم است یا وجود ندارد، پوشش گیاهی زیاد بوده و توانایی‌های جذب خاک بسیار زیاد است.

تمام این موارد در شکل ۱ نشان داده شده است. به دنبال این مشاهدات از الگوهای مختلف، توصیه شده است از روش CN برای حوضه‌های آبریزی که ممکن است پاسخ‌های رواناب غیرفعال، خودپسند یا شدید را نشان دهد استفاده نشود. به‌عنوان مثال می‌توان به حوضه‌های آبریز بسیار جنگلی دارای جریان پایه با ظرفیت نفوذ بالای خاک‌های جنگلی مرتفع اشاره کرد که شواهد کمی از جریان روزمینی را نشان می‌دهد (Hawkins et al., 2020).

رفتار مجانبی شماره منحنی

همان‌طور که در بالا اشاره شد CN ها وابسته به بارندگی هستند که برای بارندگی‌های کم مقدارشان زیاد است، اما با افزایش اندازه P کاهش می‌یابند و معمولاً به یک حالت پایدار CN نزدیک می‌شوند که به آن CN_{∞} می‌گویند. این الگوی بارندگی-رواناب «استاندارد» نامیده می‌شود که رایج‌ترین حالتی است که روی می‌دهد و با معادله زیر بیان می‌شود (Hawkins et al., 2020):

$$CN(P) = CN_{\infty} + (100 - CN_{\infty}) \exp(-kp) \quad (6)$$

که در آن k (با واحد \ln^{-1}) معیاری از میزان تغییر CN با P است. این فرمول در حالت مجانبی آن با روش CN سازگار است. فرمول جایگزین ساده‌تر و ترجیحی برای معادله (۶) این است:

$$CN(P) = CN_{\infty} + (100 - CN_{\infty}) \tau \frac{P}{P_z} \quad (7)$$

که τ از ۰ تا ۱ متغیر است و یک نمای هندسی واضح در نمودار P-CN دارد. P_z عمق بارندگی آستانه در حالت $Q = 0$ یا λS_{∞} است که $\lambda = \frac{I_a}{S}$ (در اینجا ۰/۲ یا ۰/۰۵) است. دو معادله تحت $\tau = \exp(-k \lambda S_{\infty})$ یا $k = -\ln(\tau) / P_z$ معادل هستند. رفتار استاندارد

دهه گذشته تبدیل کرده است (Soulis, 2021). از مهم‌ترین عواملی که بر میزان دقت این روش تأثیرگذارند می‌توان به کلاس‌های پاسخ بارندگی-رواناب، رفتار مجانبی شماره منحنی (بیانی از تأثیر مقدار بارندگی بر CN)، نسبت تلفات اولیه ($\lambda = \frac{I_a}{S}$)، رطوبت اولیه خاک، مدت‌زمان بارندگی، شیب زمین، کاربری اراضی و پوشش گیاهی، انتخاب اعداد CN از جداول و تغییر فصل، اشاره کرد که در ادامه به بررسی این عوامل پرداخته می‌شود.

نتایج و بحث

کلاس‌های پاسخ بارندگی-رواناب

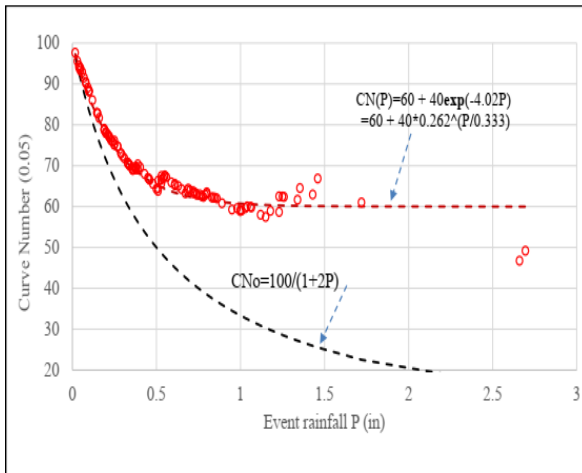
با تجزیه و تحلیل چند صد مجموعه از داده‌های بارش-رواناب که عمدتاً توسط سازمان تحقیقات کشاورزی، سازمان جنگلداری و سازمان زمین‌شناسی ایالات‌متحده جهت درک روش CN انجام شد، چندین کلاس مشخص از پاسخ بارندگی-رواناب که با معادله رواناب یعنی معادله (۴) مطابقت نداشتند تشخیص داده شد. بر این مبنا کلاس‌های پاسخ بارندگی-رواناب عبارت‌اند از:

Standard- (استاندارد): اکثر مجموعه داده‌های مورد بررسی یعنی حدود ۸۰٪ پاسخ «استاندارد» را نشان دادند که با روش CN سازگار است. در چنین مواردی که استاندارد مجانبی نامیده می‌شود، CN ها با عمق بارندگی P تغییر می‌کند، اما در بارندگی‌های بیشتر به مقدار ثابت تعادل یا CN_{∞} نزدیک می‌شوند.

Complacent- (ازخودراضی، خودپسند^۱): این ساده‌ترین الگوی پاسخ فعال یعنی یک رابطه خطی به‌صورت $Q = CP$ (مشابه با فرمول روش منطقی) است. در چنین مواردی با افزایش P ، مقدار CN بدون نزدیک شدن به مقدار ثابتی کاهش می‌یابد. بارش باران بر روی سطوح آب فعالی نظیر جریان کانالی می‌تواند از منابع چنین وضعیتی باشد.

Violent- (شدید، خشن): این نوع پاسخ از حالت غیرفعال یا خودپسند آغاز می‌شود. در برخی از بارندگی‌های مداوم و بزرگ، یک آستانه P_t ، (معمولاً ۱/۵ تا ۳ اینچ) وجود دارد که در بیشتر از آن (به شکل شدیدی با نسبت رواناب به بارش بالا یعنی حدود ۰/۶ تا ۱)

^۱ معادل مصطلح رسمی این لغت در متون فنی فارسی مرتبط با موضوع یافت نشد



شکل (۲): مثالی از الگوی مجانبی استاندارد در مختصات (P-CN).
Figure (2): An example of the standard asymptotic pattern in coordinates (P-CN) (Hawkins et al., 2020).

نسبت تلفات اولیه λ

همان طور که در معادله (۴) نشان داده شده است، روش CN از نسبت تلفات اولیه $\lambda = \frac{I_a}{S}$ برابر 0.2 استفاده کرده است. مطالعات طی سالیان گذشته نشان داده است پارامتر λ مقداری کمتر از 0.2 بوده و در حدود 0.05 است (Cazier & Hawkins, 1984; Hawkins & Khojeini, 2000; Jiang, 2001; Woodward et al., 2003). با اعمال این مقدار در معادله رواناب (۴) داریم:

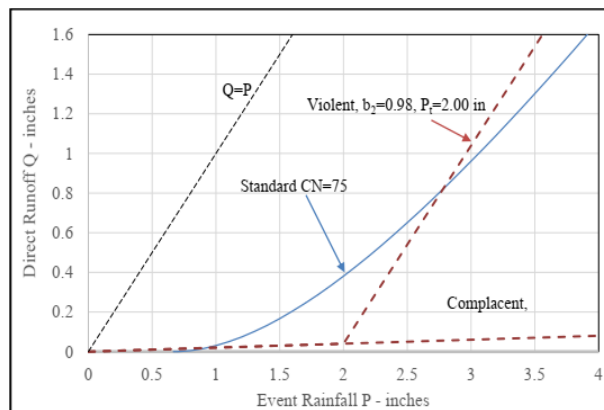
$$Q = \frac{(P - 0.05S_{0.05})^2}{(P + 0.95S_{0.05})} \quad (8)$$

این معادله برای $P \geq 0.05S_{0.05}$ صادق است و در غیراین صورت $Q=0$ خواهد بود. همان طور که از زیرنویس‌ها استنباط می‌شود S جدید در معادله (۷) با S اولیه در معادله (۴) یکسان نیست و تعریف CN نیز باید تغییر کند و به تبع آن مقادیر عددی CN (یعنی CN_{∞}) که در هندبوک‌ها بر اساس فرض $\lambda=0.2$ ارائه شده است نیز باید تغییر کند. بر اساس مطالعات انجام گرفته توسط Jiang (۲۰۰۱)، Hawkins و همکاران (۲۰۰۱) و نیز مطالعه انجام یافته بر روی 307 حوضه آبریز توسط Hawkins و همکاران (۲۰۰۲) بر اساس دو مقدار λ اشاره شده در فوق رابطه تجربی زیر به دست آمده است:

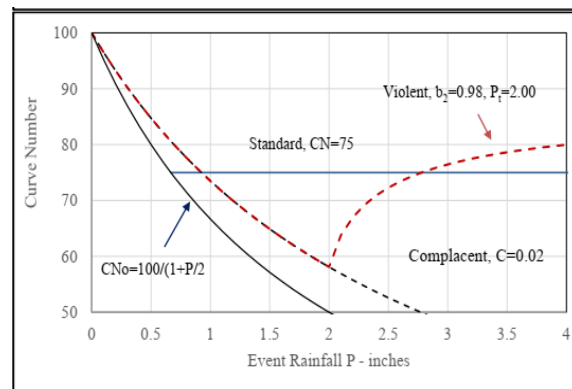
$$S_{0.05} = 1.33(S_{0.20})^{1.15} \quad (9)$$

حالت رایجی است که در شکل ۲ نشان داده شده است (Hawkins et al., 2020).

در سال ۲۰۲۲، Chin روی حداقل میزان بارندگی که برای مستقل بودن عدد منحنی قابل اجرا از مقدار بارندگی لازم است، تمرکز کرد. این امر به‌ویژه در برنامه‌های مدیریت آب رگبار مهم است. در این تحقیق نشان داده شده است که حوضه‌های آبریز با شماره منحنی ۵۰ و ۷۰ به ترتیب به حداقل میزان بارندگی ۹ سانتی‌متر (۳/۵ اینچ) و ۴ سانتی‌متر (۱/۵ اینچ) نیاز دارند.



(الف) (A)



(ب) (B)

شکل (۱): (الف) مثالی از کلاس‌های پاسخ مختلف بارش-رواناب (P-Q) (ب) همان مثال در مختصات (P-CN).

Figure (1): (a) An example of different response categories of rainfall-runoff (P-Q) (b) The same example in (P-CN) coordinates. (Hawkins et al., 2020).



شناسایی شده است که کاستی‌های روش شماره منحنی را که حدود ۷۰ سال پیش توسعه داده شده است، برطرف می‌کند.

رطوبت اولیه خاک

شرایط رطوبت پیشین^۱ (AMC)، بر مبنای عمق بارش پنج روز قبل، با تقسیم به سه سطح AMCI، AMCII و AMCIII در نسخه‌های اولیه روش SCS عامل مهمی در تعیین CN بوده است. تقسیم‌بندی فوق باعث جهش ناگهانی مقدار CN از یک سطح به سطح دیگر می‌شود که غیرمنطقی است. با توجه به مطالعات صورت گرفته مشخص شده است هیچ ارتباط روشی بین بارش قبل و شماره منحنی وجود ندارد و لذا در نسخه اصلاحی روش شماره منحنی مفهوم AMC کنار گذاشته شده و به جای آن از مفهوم شرایط رواناب پیشین^۲ (ARC) استفاده می‌شود. مفهوم ARC به‌عنوان نوارهای احتمالاتی برای ARC I (شرایط رواناب کم، ۱۲٪)، ARC II (شرایط رواناب متوسط، ۵۰٪) و ARC III (شرایط رواناب بالا، ۸۸٪) بیان می‌شود (Hjelmfelt et al., 1982; Grabau et al., 2009).

به نظر می‌رسد لحاظ نمودن رطوبت خاک برای انتخاب مناسب مقدار AMC در مقایسه با عمق بارش پنج روز قبل، انتخاب معقول‌تری باشد و اطلاع از رابطه بین رطوبت پیشین خاک و مقدار CN، برآورد رواناب در روش شماره منحنی را تا حد زیادی بهبود می‌بخشد (Shi & Wang, 2020). Saxton (۱۹۹۲) شرایط رطوبت پیشین را با یک تابع پله‌ای از محتوای آب خاک^۳ بازتعریف کرد. Jacobs و همکاران (۲۰۰۳) با کاربرد سنجش‌ازدور داده‌های رطوبت خاک در پنج حوضه در اوکلاهما، مقادیر شماره منحنی CN را تنظیم و رواناب را تخمین زدند. بر اساس شرایط آب و هوایی فلات لوئیس در چین، Huang و همکاران (۲۰۰۷) برای برآورد بهتر رواناب معادله‌ای بین محتوای آب خاک و مقدار CN ایجاد کردند.

مدت بارندگی

مدت‌زمان رگبار بخش مهمی از فرایند بارندگی-رواناب است که می‌تواند بر تخمین پارامترهای رواناب تأثیر بسزایی داشته باشد (Babu & Mishra, 2012). این در حالی است که مدت‌زمان رگبار در روش شماره منحنی در نظر گرفته نمی‌شود و لذا به دلیل تغییرپذیری فضایی-زمانی بارندگی منجر به عدم قطعیت در پیش

Hawkins و همکاران (2020) یک رابطه جدید بین مقدار S (برحسب اینچ) برای $\lambda = 0.20$ و مقدار $\lambda = 0.05$ را به‌صورت زیر پیشنهاد دادند (Hawkins et al., 2020):

$$S_{0.05} = 1.3244(S_{0.20})^{1.089} \quad (10)$$

ناصری و همکاران (۱۳۹۹) در مطالعه خود بر روی محدوده‌های مطالعاتی حوضه آبریز سفیدرود علاوه بر استفاده از فرمول (۸) با استفاده از داده‌های مشاهداتی، اقدام به کالیبره کردن مقدار ضریب λ نموده و نشان دادند در بسیاری از محدوده‌های مطالعاتی حوضه آبریز سفیدرود ضریب λ باید بسیار کمتر از مقدار توصیه شده ۰/۰۵ باشد (کمتر از ۰/۰۰۰۰۶). با این حال در دو محدوده مطالعاتی نیز مقدار بهینه ضریب λ نزدیک به ۰/۲ محاسبه شده است. Ling و همکاران (۲۰۲۰) یک روش جدید کالیبراسیون برای حوضه آبریز وانگجیاکیو در چین به کار بردند و مقدار بهینه ضریب λ را برابر ۰/۰۴۳ به دست آوردند. Chin (2022a) با گردآوری نتایج از ۷۴ حوضه آزمایشی وزارت کشاورزی ایالات متحده که دارای سوابق طولانی اندازه‌گیری با کیفیت بالا از بارندگی و رواناب هستند، به چندین مورد از مسائل فنی اصلی مرتبط با روش CN پرداخته است که یکی از نتایج کلیدی از این مطالعه این است که استفاده از مقادیر CN با پایه $\lambda = 0.05$ منجر به پیش‌بینی رواناب دقیق‌تر در محدوده رویدادهای بارندگی تجربه‌شده در این حوضه‌ها می‌شود. به‌تازگی Chin (2023) در آخرین تحقیق از سلسله تحقیقات پیوسته خود ادعای شناسایی نحوه بهبود مدل شماره منحنی را نموده است و در آن به مسئله فنی نیاز به تنظیم نسبت تلفات اولیه، λ ، برای نمایش بهتر اندازه‌گیری‌های میدانی و درعین حال حفظ مقادیر استاندارد فعلی CN_{∞} که در کتاب‌های راهنمای مهندسی یافت می‌شود، پرداخته است. کلید این بهبود، ترکیب رابطه بین CN و مقدار بارندگی در معادله استاندارد CN است. معادله بهبودیافته مدل شماره منحنی، بازمه ارتباط رواناب با مقدار بارندگی را تنها با یک پارامتر، یعنی CN_{∞} مرتبط می‌کند. درعین حال، معادله CN بهبودیافته نیازی به تعیین مقدار جدیدی برای λ ندارد و برای مقادیر کمتر بارندگی بسیار دقیق‌تر است درحالی که دقت خود را برای مقادیر بارندگی بالاتر حفظ می‌کند. او ادعا دارد به‌عنوان نقطه اوج این تحقیقات، نحوه اصلاح معادله مدل شماره منحنی فعلی

³ Soil Water Content

¹ Antecedent Moisture Conditions

² Antecedent Runoff Conditions

نشان داده‌اند (Hawkins et al., 2009; Hawkins et al., 2010).

Shi & Wang (2020) مدلی اصلاحی بر مبنای روش شماره منحنی را که شامل تنظیم اثرات شیب، رطوبت اولیه خاک و مدت رگبار است پیشنهاد دادند. Ajmal و همکاران (۲۰۲۰) یک مدل شماره منحنی تنظیم شده با شیب را بر اساس داده‌های مفصل بارندگی و رواناب ناشی از ۱۷۷۹ رویداد رگباری از ۳۹ حوزه آبریز با شیب متوسط بین ۷/۵ تا ۵۳/۵۳ درصد متفاوت در شبه جزیره کره رخ داده است، پیشنهاد کردند.

کاربری اراضی و پوشش گیاهی

از مهم‌ترین فاکتورهایی که بر تعیین مقدار CN مؤثر است کاربری اراضی و پوشش زمین است. چندین مطالعه تفاوت‌های قابل توجهی بین مقادیر به دست آمده از جداول تعیین CN بر اساس پوشش و کاربری زمین و آن‌هایی که از داده‌های مشاهداتی بارش-رواناب حوضه تخمین زده شده‌اند نشان داده است (Hawkins, 1980; Titmarsh et al., 1989; Pandit & Heck, 2008; Stewart et al., 2010; Tedela et al., 2012). تفاوت‌ها با CNهای کوچک‌تر و با انواع زمین‌هایی که کمتر در جداول شرح داده شده است، زیاد است. چنانکه در بخش «کلاس‌های پاسخ بارندگی-رواناب» در بالا اشاره شد مدل CN دارای سابقه عملکرد ناسازگار برای برخی از حوضه‌های مرطوب و جنگلی نشان داده و لذا این مدل برای برآورد رواناب در چنین حوضه‌هایی کاربردی ندارد.

انتخاب اعداد CN از جداول

کاربرد موفق روش شماره منحنی بستگی زیادی به انتخاب اعداد منحنی مناسب برای مناطق مشارکت کننده در تولید رواناب دارد. مطالعات حساسیت نشان می‌دهد که محاسبه رواناب با معادله (۱) نسبت به وجود خطا در CN نسبت به بارندگی P حساس‌تر است (Hawkins, 1975; Bondelid et al., 1982).

تغییر فصل

در ارتباط با شرایط رواناب پیشین (ARC)، CN های فصول خفته یا زمستان‌ها، مقادیر بزرگ‌تری نسبت به فصول رشد یا گرم نشان می‌دهند (Tedela et al., 2012; Price, 1998;)

بینی رواناب می‌شود (Ponce & Hawkins, 1996). چندین روش تقویت شده مدل شماره منحنی برای غلبه بر مشکل عدم اعمال زمان رگبار پیشنهاد شده است. Jain و همکاران (۲۰۰۶) مدلی با فرمول-بندی جدید با تنظیم میزان بارندگی بر اساس مدت زمان رگبار پیشنهاد کردند. Mishra و همکاران (۲۰۰۸) یک روش وابسته به مدت بارندگی را با ایجاد معادله‌ای برای مقدار CN جدید با معرفی مقدار CN حداقل و مدت زمان بارندگی ارائه کردند.

Petroselli و همکاران (۲۰۱۹) در یک مطالعه مقایسه‌ای مدلی برای شبیه‌سازی پیوسته و نیز مدلی رویداد محور بر اساس اصلاح روش شماره منحنی و اعمال مدت بارش ارائه دادند. Sahu و همکاران (۲۰۱۲) با تقسیم مقدار نفوذ تجمعی F به مقادیر نفوذ دینامیک و نفوذ استاتیک (F_c) که حاصل اعمال حداقل میزان نفوذ و مدت زمان بارندگی است، ضریب مدت رگبار را به روش شماره منحنی وارد کردند. Shi و همکاران (۲۰۱۷) با دخالت دادن پارامتر نفوذ استاتیک در نسخه‌ای از روش شماره منحنی که مبتنی بر مدل احتساب کننده رطوبت خاک (SMA^1) است، بهبود پیش‌بینی رواناب در فلات لوئیس در کشور چین را گزارش کردند. باین‌حال، در تمامی این روش‌ها هیچ ارتباطی با مقدار CN در روش اصلی مدل شماره منحنی مشخص نشده و لذا کاربرد مدل‌ها را محدود کرده است.

شیب زمین

شیب زمین یکی دیگر از عوامل اصلی مؤثر بر حرکت جریان در زمین است. مقادیر CN در جدول راهنمای USDA-NRCS (وزارت کشاورزی-منابع طبیعی و حفاظت ایالات متحده) بر اساس شیب ۵٪ است و باید با توجه به شیب واقعی تنظیم شود. تلاش‌های متعددی در خصوص لحاظ نمودن عامل شیب در روش CN انجام شده است. Sharpley & Williams (1990) در محاسبه حجم رواناب، پارامتر CN_2 تنظیم شده با شیب را معرفی کردند، اما در مطالعات میدانی صحت سنجی نشده است. Huang و همکاران (۲۰۰۶) بر اساس داده‌های قطعات آزمایشی با شیب‌های متفاوت از ۱۴ تا ۱۴۰ درصد در فلات لوئیس چین، یک معادله برای در نظر گرفتن تأثیر شیب بر مقدار CN پیشنهاد کردند. Williams و همکاران (۲۰۱۲) در کاربرد یک مدل پیوسته از روش شماره منحنی اثر مثبت شیب بر مقدار CN را گزارش کردند. اگرچه به‌طور شهودی به نظر می‌رسد هرچه قدر شیب حوضه آبریز بیشتر باشد مقدار CN نیز بیشتر خواهد بود ولی به‌طور تعجب‌آوری بعضی مطالعات رابطه منفی خفیفی را نیز



- در انتخاب اعداد CN از جداول فهرست شده در کاربردهای مختلف باید دقت کافی داشت. به دلیل نیاز به CN برای استفاده‌های جدید و فهرست نشده زمین یا شرایط غیرمعمول حوضه، تعیین CN ها از مجموعه داده‌های محلی با انجام کالیبراسیون به شدت تشویق باید شود (Grabau et al., 2009).

از چالش‌های کلیدی پیش‌رو در این روش می‌توان به موارد زیر نیز اشاره کرد:

- بهبود پیش‌بینی رواناب با روش شماره منحنی بدون از دست دادن سادگی فعلی آن (Shi & Wang, 2020; Ajmal et al., 2020).

- حرکت به سمت یک روش پذیرفته شده عمومی و منحصر به فرد برای تعیین CN از روی داده‌های بارندگی-رواناب با توجه به نوع غالب خاک و تغییرپذیری پوشش گیاهی در حوضه‌های آبریز طبیعی (Psomiadis et al., 2020; Soulis & Valiantzas, 2013).

- بهبود تخمین مقدار تلفات اولیه.

- بررسی وابستگی مقادیر CN به مقیاس و سازگاری مقادیر CN به دست آمده در مقیاس‌های مختلف (مقیاس قطعه زمین، مقیاس حوضه و غیره).

- بررسی ادغام روش شماره منحنی در مدل‌های هیدرولوژیکی پیوسته بلندمدت و اجرای سیستم‌های مختلف احتساب کننده رطوبت خاک (SMA) (Shi & Wang, 2020).

- استفاده از مدل‌سازی جدید، سیستم‌های اطلاعات زمین و تکنیک‌های سنجش از دور برای بهبود عملکرد و کارایی روش (Psomiadis et al., 2020).

- گسترش مستندسازی مقادیر CN به طیف وسیع‌تری از مناطق، کاربری‌های اراضی و شرایط آب و هوایی از جمله کاربری‌های نوظهوری مانند باغ‌های پشت‌بامی، مزارع (نیروگاه) خورشیدی یا روسازی‌های متخلخل و در نظر گرفتن تأثیر تغییرات تدریجی و ناگهانی پوشش زمین مانند شهرسازی و آتش‌سوزی (Ling et al., 2020; Kang & Yoo, 2020; Soulis, 2018; Soulis et al., 2017).

(D'Asaro et al., 2018). این ممکن است به دلیل تفاوت در رطوبت فصلی، کاربری فصلی زمین یا توزیع فصلی بارندگی باشد.

جمع‌بندی کلی

در این تحقیق مروری بر آخرین یافته‌ها در خصوص عوامل مؤثر بر روش شماره منحنی انجام گرفته و نتایج زیر همراه با پیشنهادها ارائه می‌شود:

- روش شماره منحنی هنوز در حال رشد است و نیاز به پیشرفت دارد. این روش به درک هیدرولوژی عمومی (غیر مرتبط با CN) کمک می‌کند.

- روش شماره منحنی با همه کلاس‌های بارندگی-رواناب در حوضه‌ها به خوبی مطابقت ندارد. این روش نباید در کلاس‌های رواناب «Inactive»، «Complacent» و «Violent» استفاده شود. یکی از اولویت‌های مطالعات آتی در این زمینه می‌باشد.

- ماهیت تجربی رفتار مجانبی-استاندارد نشان‌دهنده ارتباط علت و معلولی ناشناخته‌ای بین سطوح زمین و بارندگی است؛ بنابراین، این موضوع باید یک زمینه تمرکز برای مطالعه و توسعه بیشتر باشد. برای مثال: (۱) دلایل و مکانیسم‌های وقوع آن چیست؟ و (۲) ضرایب مجانبی k و τ (در معادلات (۲) و (۳)) چگونه با ویژگی‌های زمین و هیدرولوژی عمومی مرتبط باشد (Grabau et al., 2009)؟

- در بیشتر مطالعات انجام گرفته پارامتر λ مقداری کمتر از 0.2 بوده و در حدود 0.05 است. ولی منطقی است که برای هر منطقه با توجه به جمیع شرایط از جمله در رگبارهای بارندگی مختلف و فصول مختلف و انواع شرایط زمین، پارامتر مذکور متفاوت باشد و مقدار بهینه آن به صورت موضعی صحت سنجی شود (Krajewski et al., 2020).

- در بعضی مطالعات اثرات بارش قبل و یا مرطوب بودن حوضه لحاظ شده است ولی فراگیر و جهانی نیست.

- تأثیر مدت بارندگی بر روی CN قابل انتظار است، ولی هیچ

ارتباطی با مقدار CN مشخص نشده است.

- اثرات شیب حوضه بر روی CN در بین مطالعات یکسان

نیست.

" نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در رابطه با نوشتن و یا انتشار این مقاله ندارند."

- علیزاده، ا. (۱۳۸۷). اصول هیدرولوژی کاربردی، انتشارات دانشگاه امام رضا.
- ناصری، م.، زهرایی، ب.، پورسپاهی سامیان، ح.، خدادادی، م. و دولت‌آبادی، ن. (۱۳۹۹). ارزیابی روش‌های تجربی برآورد جریان در حوضه‌های بدون ایستگاه، نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۱(۳۲): ۱-۲۴.
- Ajmal M., Waseem M., Kim D. & Kim T. W. (2020). A pragmatic slope-adjusted curve number model to reduce uncertainty in predicting flood runoff from steep watersheds. *Water*, 12(5): 1469-1482.
DOI:10.3390/w12051469
- Alizadeh, A. (1387). Principles of Applied Hydrology, Imam Reza University Publications (In persian).
- Andrews, R.G. (1954). The use of relative infiltration indices for computing runoff (unpublished). Soil Conservation Service, Fort Worth, Texas, 6 p.
- Babu P. S. & Mishra S. K. (2012). Improved SCS-CN-inspired model. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(11): 1164–1172.
DOI:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000435.
- Beven, K. (2012). Rainfall-Runoff Modelling, The Primer. A John Wiley and Sons., Ltd., Publication.
- Bondelid T. R., McCuen R.H. & Jackson T. J. (1982). Sensitivity of SCS models to curve number variation. *Water Resources Bulletin*, 18(1): 111–116.
DOI:10.1111/j.1752-1688.1982.tb04536.x
- Cazier D. J. & Hawkins R. H. (1984). Regional application of the curve number method. Proceedings Specialty Conference, Irrigation and Drainage Division, American Society of Civil Engineers. Flagstaff, AZ. abstract p 710.
- Chin, D. A. (2021a). Application of the curve-number method for varying rainfall amounts. *J. Irrig. Drain. Eng.* 147(7): 06021003.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001585](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001585).
- Chin, D. A. (2021b). Deficiencies in the curve number method. *J. Irrig. Drain. Eng.* 147(5): 04021008.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001552](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001552).
- Chin, D. A. (2022a). Essential considerations in applying the curve-number method. *J. Irrig. Drain. Eng.* 148(2): 04021071.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001649](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001649).
- Chin, D. A. 2022b. Minimum rainfall for applying the curve-number method. *J. Irrig. Drain. Eng.* 148(8): 06022003.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001698](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001698).
- Chin, D. A. 2023. “An improved curve-number method.” *J. Irrig. Drain. Eng.* 149(2): 06022009.
<https://doi.org/10.1061/JIEDH.IRENG-9913>
- D’Asaro F., Grillone G. & Hawkins R. H. (2018). Curve number seasonal variation in mid-Mediterranean area. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 144(9): 1943-4774.
DOI:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001334
- Devia, G. K., Ganasri, B. P. and Dwarakish, G. S. (2015). A review on hydrological models. *Aquatic Procedia* 4: 1001–1007.
- Grabau M. R., Hawkins R. H., Ver Wiere K. E. & Slack D. C. (2009). Variety of antecedent runoff conditions for rainfall-runoff with the curve number method. In Proc., 2009 Meetings of the Hydrology Section of the Arizona.
DOI:10.1061/JRCEA4.0001313
- Hawkins R. H. (1975). The importance of accurate curve numbers in the estimation of storm runoff. *Water Resources Bulletin*, 11(5): 887–890.
DOI:10.1111/j.1752-1688.1975.tb01810.x
- Hawkins R. H. (1980). Infiltration and curve number: Pragmatic and theoretic relationships. In Proc., Watershed Management Symp, New York: ASCE, 925–937.
DOI:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001755
- Hawkins R. H. & Khojeini A. V. (2000). Initial abstraction and loss in the curve number method. Proceedings Arizona Hydrological Society.



- Hawkins R. H., Woodward D. E. & Jiang R. (2001). Investigation of the runoff curve number abstraction ratio. Proceedings of the USDA-NRCS Hydraulic Engineering Workshop. USDA-NRCS, Washington DC. CA 10pp.
DOI:10.1061/40685(2003)308
- Hawkins R. H., Woodward D. E., Hjelmfelt Jr A. T., Van Mullem J. A. & Quan Q. D. (2002). Runoff curve number method; examination of the initial abstraction ratio. Proceedings Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference, Las Vegas NV, Jul 28- Aug 1. Session 11b, 12pp.
DOI:10.1061/40685(2003)308
- Hawkins R. H., Ward, T. J., Woodward D.E. & Van Mullem J. A. (2009a). Curve number hydrology: State of The Practice, American Society of Civil Engineers.
DOI:10.1061/9780784410042
- Hawkins R.H., Ward T.J., Woodward D.E. & Van Mullem J. A. (2009b). ASCE EWRI task committee report on state of the practice in curve number hydrology, 106. Reston, VA: ASCE.
DOI:10.1061/40763(178)150
- Hawkins R. H., Ward T.J., Woodward D. E. & Van Mullem J. A. (2010). Continuing evolution of the curve number method. In Proc., Joint Federal Interagency Conf., 10. Las Vegas.
- Hawkins R. H., Moglen G. E., Ward T. J. & Woodward D. E. (2020). Updating the Curve Number: Task Group Report. In Proceedings of the Watershed Management 2020: A Clear Vision of Watershed Management—Selected Papers from the Watershed Management Conference 2020; American Society of Civil Engineers (ASCE): Reston, VA, USA; pp. 131–140.
DOI:10.1061/9780784483060.012
- Hjelmfelt Jr A. T., Kramer L. A. & Burwell R. E. (1982). Curve Numbers as Random Variables. In Rainfall-Runoff Relationship, Water Resources Publications, Littleton, CO, pp 365-370.
- Huang M., Gallichand J., Wang Z. & Goulet M. (2006). A modification to the Soil Conservation Service curve number method for steep slopes in the Loess Plateau of China. Hydrological processes, 20(3): 579–589.
DOI:10.1002/hyp.5925
- Huang M., Gallichand J., Dong C., Wang Z. & Shao M. (2007). Use of soil moisture data and curve number method for estimating runoff in the Loess Plateau of China. Hydrological processes, 21(11): 1471–1481.
DOI:10.1002/hyp.6312
- Jacobs J. M., Myers D.A. & Whitfield B. M. (2003). Improved rainfall/runoff estimates using remotely sensed soil moisture. Journal of the American Water Resources Association, 39(2): 313–324.
<https://dx.doi.org/10.1111/j.1752-1688.2003.tb04386.x>
- Jain M. K., Mishra S. K., Babu P.S., Venugopal K. & Singh V. P. (2006). Enhanced runoff curve number model incorporating storm duration and a nonlinear Ia-S relation. Journal of Hydrologic Engineering, 11(6): 631–635.
DOI:10.1061/(ASCE)1084-0699(2006)11:6(631)
- Jiang R. (2001). Investigation of runoff curve number initial abstraction ratio. MS thesis, Watershed Management, University of Arizona, Tucson, AZ. 120 pp.
DOI: 10.4236/jwarp.2016.811077
- Kang M. & Yoo C. (2020). Application of the SCS–CN Method to the Hancheon Basin on the Volcanic Jeju Island, Korea. Water, 12(12): 3350–3381.
DOI:10.3390/w12123350
- Krajewski A., Sikorska-Senoner A. E., Hejduk A. & Hejduk L. (2020). Variability of the initial abstraction ratio in an urban and an agroforested catchment. Water, 12(2): 415–442.
DOI:10.3390/w12020415

- Ling L., Yusop Z., Yap W. S., Tan W. L., Chow M. F. & Ling J. L. (2020). A calibrated, watershed-specific SCS-CN method: Application to Wangjiaqiao watershed in the three Gorges Area, China. *Water*, 12(1): 60-85.
DOI:10.3390/w12010060
- Mishra S. K. and Singh V. P. (1999). Another look at SCS-CN method. *ASCE Journal of Hydrologic Engineering*, 4:257-264.
- Mishra S. K. & Singh V. P. (2003). *Soil Conservation curve number (SCS-CN) methodology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
<http://dx.doi.org/10.1007/978-94-017-0147-1>
- Mishra S. K., Jain M. K., Babu P. S., Venugopal K. & Kaliappan S. (2008). Comparison of AMC-dependent CN-conversion formulae. *Water Resources Management*, 22(10): 1409–1420.
DOI:10.1007/s11269-007-9233-5
- Mishra, S. K., Kumre, S. K. and Pandey, A. (2019). SCS-CN method revisited in perspective of strange data. *Int J Hydrol.*, 3(4):488–498
- Mockus V. (1949). Estimation of Total (and Peak Rates of) Surface Runoff for Individual Storms: Exhibit A, Appendix B, Interim Survey Report, Grand (Neosho) River Watershed. US Department of Agriculture, Washington DC.
- Nasseri, M., Zahraie, B., Poorsepahy-Samian, H., Khodadadi, M. and Dolatabadi, N. (2021). Evaluation of Empirical Methods to Estimate Streamflow in Ungauged Basins (Case Study: the Sefidroud Watershed). *Geography and Environmental Planning*, 32(1): 1-24 (In Persian).
DOI: 10.22108/GEP.2021.125717.1369
- Ogrosky, H.O. (1956). Service objectives in the field of hydrology. Unpublished, Soil Conservation Service, Lincoln, Nebraska, 5 pp.
- Pandit A. & Heck H. H. (2008). Estimations of SCS curve numbers for concrete and asphalt. *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE; 14(4): 335–345.
DOI:10.1061/(ASCE)1084-0699(2009)14:4(335)
- Petroselli A., Grimaldi S., Piscopia R. & Tauro F. (2019). Design hydrograph estimation in small and ungauged basins: A comparative assessment of event based (EBA4SUB) and continuous (COSMO4SUB) modelling approaches. *Acta Scientiarum Polonorum series Formatio Circumiectus*, 18(4): 113–124.
DOI:10.15576/ASP.FC/2019.18.4.113
- Ponce V. M. & Hawkins R. H. (1996). Run off curve number: Has it reached maturity? *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE; 1(1): 11–19.
DOI:10.1061/(ASCE)1084-0699(1996)1:1(11)
- Price M. A. (1998). Seasonal variation in runoff curve numbers. M.S. thesis, Dept. of School of Natural Resources, Univ. of Arizona.
- Psomiadis E., Soulis K. X. & Efthimiou N. (2020). Using SCS-CN and earth observation for the comparative assessment of the hydrological effect of gradual and abrupt spatiotemporal land cover changes. *Water*, 12(5): 1386-1400.
<https://doi.org/10.3390/w12051386>
- Sahu R.K., Mishra S.K. & Eldho T. I. (2012). Improved storm duration and antecedent moisture condition coupled SCS-CN concept-based model. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(11): 1173–1179.
DOI:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000443
- Saxton K. E. (1992). *User's Manual for SPAW: A Soil-Plant-Atmosphere Water Model*; USDA-ARS: Pullman, WA, USA.
- Sharpley A. N. & Williams J. R. (1990). *EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator: 1. Model Documentation*; U.S. Department of Agriculture Technical Bulletin No. 1768; U.S. Government Printing Office: Washington, DC, USA.
DOI: 10.4236/ajps.2021.1210109



- Sherman L. K. Streamflow from rainfall by unit-graph method. *Engineering News Record*, 108:501–505, 1932.
- Shi W. & Wang N. (2020). An improved SCS-CN method incorporating slope, soil moisture, and storm duration factors for runoff prediction. *Water*, 12(5): 1335-1359.
DOI:10.3390/w12051335
- Shi W. H., Huang M. B., Gongadze K. & Wu L. H. (2017). A modified SCS-CN method incorporating storm duration and antecedent soil moisture estimation for runoff prediction. *Water Resources Management*, 31: 1713–1727.
DOI:10.1007/s11269-017-1610-0
- Singh V. P. (1995). *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resource Publications, Highlands Ranch, CO.
- Sitterson, J., Knightes, C., Parmar, R., Wolfe, K., Avant, B. and Muche, M. (2018). An Overview of Rainfall-Runoff Model Types. *International Congress on Environmental Modelling and Software*. 41. <https://scholarsarchive.byu.edu/iemssconference/2018/Stream-C/41>.
- Soulis K. X. & Valiantzas J. D. (2012). SCS-CN parameter determination using rainfall-runoff data in heterogeneous watersheds—the two-CN systems approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(3): 1001–1015.
<https://doi.org/10.5194/hess-16-1001-2012>.
- Soulis K. X. & Valiantzas J. D. (2013). Identification of the SCS-CN Parameter Spatial Distribution Using Rainfall-Runoff Data in Heterogeneous Watersheds. *Water Resources Management*, 27(6): 1737–1749.
DOI: 10.1007/s11269-012-0082-5
- Soulis K. X., Ntoulas N., Nektarios P. A. & Kargas G. (2017). Runoff reduction from extensive green roofs having different substrate depth and plant cover. *Ecological Engineering*, 102: 80–89.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.01.031>
- Soulis K. X. (2018). Estimation of SCS Curve Number variation following forest fires. *Hydrological Sciences Journal*, 63(9): 1332–1346.
DOI:10.1080/02626667.2018.1501482
- Soulis, K.X.; Psomiadis, E.; Londra, P.; Skuras, D. A New Model-Based Approach for the Evaluation of the Net Contribution of the European Union Rural Development Program to the Reduction of Water Abstractions in Agriculture. *Sustainability* 2020, 12, 7137.
- Soulis K. X. (2021). Soil conservation service curve number (SCS-CN) Method: Current applications, remaining challenges, and future perspectives. *Water*, 13(2): 192-223.
DOI:10.3390/w13020192
- Tedela N., McCutcheon S., Campbell J., Swank W., Adams M. & Rasmussen T. (2012). Curve numbers for nine mountainous eastern United States watersheds: Seasonal variation and forest cutting. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(11): 1188–1198.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000437](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000437)
- USDA (2004). *Natural Resource Conservation Service. NRCS National Engineering Handbook, Part 630, Hydrology*.
- Williams J., Kannan N., Wang X., Santhi C. & Arnold J. (2012). Evolution of the SCS runoff curve number method and its application to continuous runoff simulation. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(11): 1221–1229.
DOI:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000529
- Woodward D. E., Hawkins R. H., Jiang R., Hjelmfelt Jr A. T., Van Mullem J. A. & Quan Q. D. (2003). Runoff curve number method: examination of the initial abstraction ratio. *Proceedings World Water and Environmental Resources Congress. American Society of Civil Engineers, Washington DC*.
DOI:10.1061/40685(2003)308