

Evaluation of Several Empirical Models in Estimating Annual Runoff (Case Study: Hesarak Catchment in Northwest of Tehran)

Shahram Bahrami¹, Sepide Imeni^{2*}

¹ Associate Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

² Ph.D. student of Geomorphology, Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Abstract

The use of geographic information systems (GIS) and remote sensing is common to facilitate the estimation of catchment's runoff in the last century. This action is performed by using the rainfall-runoff model, which includes climate and geomorphological changes. One way to estimate the runoff height is the Curve Number (CN) method that shows the hydrological behavior of catchment. In this research, the Arc-GIS software was used for mapping curve number by integrating vegetation maps, land use and soil hydrological group, and then the annual runoff height map of Hesarak catchment was prepared. In addition, by using empirical methods, annual runoff of the study area was compared with I.C.A.R, Justin, Angeli di Sousa, and SCS-CN methods. The comparison of estimated runoff values in different methods with observations of runoff showed that the result of SCS-CN method has more adaptation to the observed runoff and discharge. The advantage of this model is the use of different parameters such as annual precipitation, soil holding, and permeability of the curve number of the basin, which causes the measured runoff to be closer to the observed value.

Key words: Curve Number, SCS Method, Runoff, Arc GIS, Hesarak Catchment.

ارزیابی چند مدل تجربی در برآورد رواناب سالیانه مطالعه موردی: حوضه حصارک در شمال غرب تهران

شهرام بهرامی، دانشیار، دانشگاه شهید بهشتی تهران، تهران، ایران
سپیده ایمنی*، دانشجوی دکترا، دانشگاه شهید بهشتی تهران، تهران، ایران

چکیده

استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی GIS و سنجش از دور در تسهیل تخمین رواناب حوضه آبخیز در قرن اخیر (دهه‌های اخیر) رواج یافته است. این عمل با استفاده از مدل بارش - رواناب انجام می‌گیرد که شامل تغییرات اقلیمی و ژئومورفولوژیکی است. یکی از روش‌های برآورد ارتفاع رواناب، روش شماره منحنی (CN) است که رفتار هیدرولوژیکی حوضه را نشان می‌دهد. در این پژوهش از نرم‌افزار Arc GIS برای تهیه نقشه شماره منحنی با تلفیق نقشه‌های پوشش گیاهی، کاربری اراضی و گروه هیدرولوژیک خاک استفاده و سپس نقشه ارتفاع رواناب سالیانه حوضه حصارک تهیه شد؛ علاوه بر این، با استفاده از روش‌های تجربی، رواناب سالیانه منطقه پژوهش برآورد و مقایسه شد. هدف این مطالعه، برآورد ارتفاع رواناب سالیانه و حداکثر دبی اوج سیل حوضه حصارک و مقایسه مقادیر رواناب برآورد شده با استفاده از روش ایکار، جاستین، انگلی - دی‌سوزا و SCS-CN در حوضه آبخیز است. مقایسه مقادیر رواناب برآورد شده در روش‌های مختلف با مقادیر رواناب مشاهداتی نشان داد روش SCS-CN انطباق بیشتری با رواناب و دبی مشاهداتی دارد. مزیت این مدل، استفاده از مؤلفه‌های مختلف نظیر بارش سالیانه، میزان نگهداشت خاک و نفوذپذیری و شماره منحنی حوضه است که سبب شده مقدار رواناب اندازه‌گیری شده از این روش به مقدار مشاهده شده نزدیک‌تر باشد.

واژه‌های کلیدی: شماره منحنی، روش SCS، رواناب، Arc GIS، حوضه آبخیز حصارک.

مقدمه

تجربی مبتنی بر کریگر، فولر، ایکار و روش مبتنی بر شماره منحنی (CN) است. در این میان روش سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) معروف به شماره منحنی (CN)^۱ با در نظر گرفتن ویژگی‌های خاک، وضعیت هیدرولوژیکی زمین و نیز کاربری اراضی و شرایط رطوبت پیشین خاک، مقدار رواناب حاصل از یک بارش را در بخش‌های مختلف حوضه برآورد می‌کند و به تعیین شماره منحنی (CN) نیاز دارد (مهدوی، ۱۳۹۰: ۱۱۳). گروه هیدرولوژیکی خاک، نوع کاربری اراضی، پوشش گیاهی، اندازه‌گیری‌های حفاظت خاک و وضعیت رطوبت خاک پیشین، ویژگی‌های اصلی استفاده‌شده حوضه آبخیز برای به‌دست‌آوردن شماره منحنی رواناب است.

پیشینه پژوهش

پژوهش‌هایی در زمینه برآورد ارتفاع رواناب یک حوضه آبخیز صورت گرفته است. این مطالعات در خارج از ایران شامل پژوهش‌های زیر است:

ساهو و همکاران^۲ (۲۰۱۰) پژوهشی را در ۷۶ حوضه کشاورزی کوچک در کشور آمریکا انجام دادند. در این پژوهش مدل اولیه SCS-CN با سایر متغیرهای موجود مقایسه و در نهایت یک مدل بهبودیافته ارائه شد.

ساندار کوما و ریشی^۳ (۲۰۱۳) در حوضه آبخیز مندل کپلی^۴ رواناب را با استفاده از SCS و RRL شبیه‌سازی کردند و با دو روش REAL و شبیه‌سازی

حوضه آبخیز به صورت سیستم باز عمل می‌کند که بارش وارد شده به آن به شکل تبخیر، رواناب و آب زیرزمینی خارج می‌شود. ضریب رواناب یا به بیانی ضریب جریان حوضه بیان‌کننده درصدی از میزان بارندگی متوسط حوضه آبخیز است که به رواناب تبدیل و از راه ارتفاع رواناب بر ارتفاع بارندگی متوسط حوضه آبخیز محاسبه می‌شود.

مقدار ضریب جریان در حوضه‌های آبخیز مختلف، متفاوت است و به عوامل متعددی چون شکل، مساحت، شیب و نوع پوشش حوضه آبخیز بستگی دارد. هرکدام از این عوامل بر میزان حجم رواناب خروجی حوضه اثر می‌گذارند (علیزاده، ۱۳۸۷: ۵۲۲).

با توجه به بحران جهانی آب، داشتن اطلاعات درست از منابع آب در نقاط مختلف برای مدیریت برنامه‌ریزی و بهینه‌سازی ضروری است. همچنین به منظور انجام اقدامات آبخیزداری و برنامه‌ریزی مدیریت بهینه منابع آب به‌ویژه در حوضه‌های آبخیز کوچک، برآورد ارتفاع رواناب سالیانه اهمیت زیادی دارد (مددی و ملکی، ۱۳۹۵: ۲). روش‌های مختلفی برای برآورد رواناب سطحی و دبی حداکثر سیلاب در پروژه‌های مختلف آبخیزداری، کنترل و مهار سیلاب و طراحی بیشتر سازه‌های هیدرولوژی وجود دارد و از آنجایی که بیشتر حوضه‌های آبخیز کوچک کشور ایستگاه هیدرومتری ندارند، برای برآورد رواناب سالیانه در منطقه پژوهش از روش‌های تجربی استفاده می‌شود. از جمله روش‌های تجربی، تخمین رواناب سطحی، برآورد رواناب سطحی با استفاده از نفوذپذیری خاک، روش استدلالی، روش

¹ Curve Number

² Sahoo et al

³ Sundar Kumar and Rishi

⁴ Mandel Kapaly

ساتیشکومار و همکاران^{۱۱} (۲۰۱۷) در مقاله‌ای میزان رواناب شمال هند را با استفاده از روش SCS-CN در محیط GIS برآورد کردند. براساس نتایج به دست آمده، آنها کاربرد این مدل و روش را برای تخمین رواناب در منطقه پژوهش خود تأیید کردند.

پژوهش‌هایی نیز در ایران در این زمینه صورت گرفته است؛ از جمله:

حجازی و مزبانی (۱۳۹۴) مقادیر ارتفاع و دبی حداکثر رواناب را با استفاده از روش شماره منحنی (CN) در حوضه آبریز سراب دره شهر برآورد کردند. نتایج نشان داد از بین مؤلفه‌های استفاده شده در زیرحوضه‌ها، دو مؤلفه فیزیوگرافی (مساحت و تراکم زهکشی) تأثیر بیشتری بر پتانسیل سیل‌خیزی حوضه آبریز سراب دارند.

شهریاری و همکاران (۱۳۹۵) در پژوهشی، بهینه‌سازی تجریمی برآورد رواناب سالیانه را در حوضه‌های بدون ایستگاه هیدرومتری در حوضه رودخانه سرخاب مدنظر قرار دادند. نتایج نشان داد برای حوضه مطالعه شده روش تورک با سطوح اطمینان ۹۵ و ۹۹ درصد، حجم رواناب سالیانه را در مقایسه با سایر روش‌های آزموده شده دقیق‌تر محاسبه می‌کند.

عبادی فر و نادری دیزگاه (۱۳۹۶) در مقاله‌ای روش‌های تجریمی را برای برآورد رواناب سالیانه در حوضه حویق در استان گیلان ارزیابی کردند. براساس نتایج، روش خوزلا با کمترین خطا (حدود ۰/۲ درصد) به‌مثابه مناسب‌ترین روش تجریمی برای

به کمک GIS رواناب را به دست آوردند. در نهایت نتایج حاصل در طول پنج سال را مقایسه کردند.

سراوانان و منجولا^۱ (۲۰۱۵) و بهورا و همکاران^۲ (۲۰۱۵) در هندوستان با استفاده از روش SCS-CN در محیط GIS، رواناب را برآورد کردند.

کوالیک و والگا^۳ (۲۰۱۵) با انجام مطالعه‌ای در چهار حوضه کشاورزی کوچک در لهستان با استفاده از توابع مجانبی نتیجه گرفتند بین مقدار شماره منحنی مشاهداتی با مقدار بارش ارتباطی قوی وجود دارد.

ویجی و همکاران^۴ (۲۰۱۵) با انتخاب روش SCS-CN و استفاده از محیط GIS، CN را به منظور تعیین وضعیت رطوبت قبلی (AMC^۵) و میانگین سالیانه عمق رواناب برای بارندگی سالیانه در حوضه آبخیز تمیل‌نادو^۶ در بخش نیلگریس^۷ پیش‌بینی کردند. نتایج به دست آمده قابل مقایسه برای اندازه‌گیری رواناب در حوضه آبخیز است.

آنوبهاتوپ نو و همکاران^۸ (۲۰۱۵) با استفاده از روش SCS سنجش از دور و GIS، عمق رواناب سطحی را در منطقه نایاک ویندیچال^۹ تخمین زدند.

وینیترا و یشودها^{۱۰} (۲۰۱۶) در مطالعه هند، با استفاده از روش SCS-CN در محیط GIS، رواناب را برآورد کردند.

¹ Saravanan and Manjula

² Bhura et al

³ Kowalik and Walega

⁴ Viji et al

⁵ Antecedent Moisture Condition

⁶ Tamilnadu

⁷ Nilgries

⁸ Anubha et al

⁹ Nayak Vindhyachal

¹⁰ Vinithra and Yeshodha

¹¹ Satheeshkumar et al

روش تعیین نفوذپذیری خاک و تعیین نقشه گروه هیدرولوژیکی خاک است. برای این مطالعه، ضرورت شناخت ویژگی‌های محیطی مؤثر بر رواناب و وقوع سیل احساس می‌شود.

روش‌شناسی پژوهش

داده‌ها و روش‌ها

در این پژوهش مقدار ارتفاع رواناب حاصل از بارندگی سالیانه حوضه آبخیز حصارک براساس روش‌ها و معادلات تجربی ایکار، انگلی - دی‌سوزا، جاستین و SCS-CN محاسبه شد. سپس مقادیر رواناب تخمین‌زده‌شده با روش‌های مختلف با هم مقایسه شدند و در نهایت به منظور اعتبارسنجی مقدار رواناب برآوردشده و تعیین مطمئن‌ترین و دقیق‌ترین روش برای برآورد رواناب، مقدار رواناب برآوردشده با مقدار رواناب مشاهداتی سازمان جنگل‌ها و مراتع کشور مقایسه شد. در شکل (۱)، مراحل پژوهش به‌طور خلاصه نشان داده شده است.

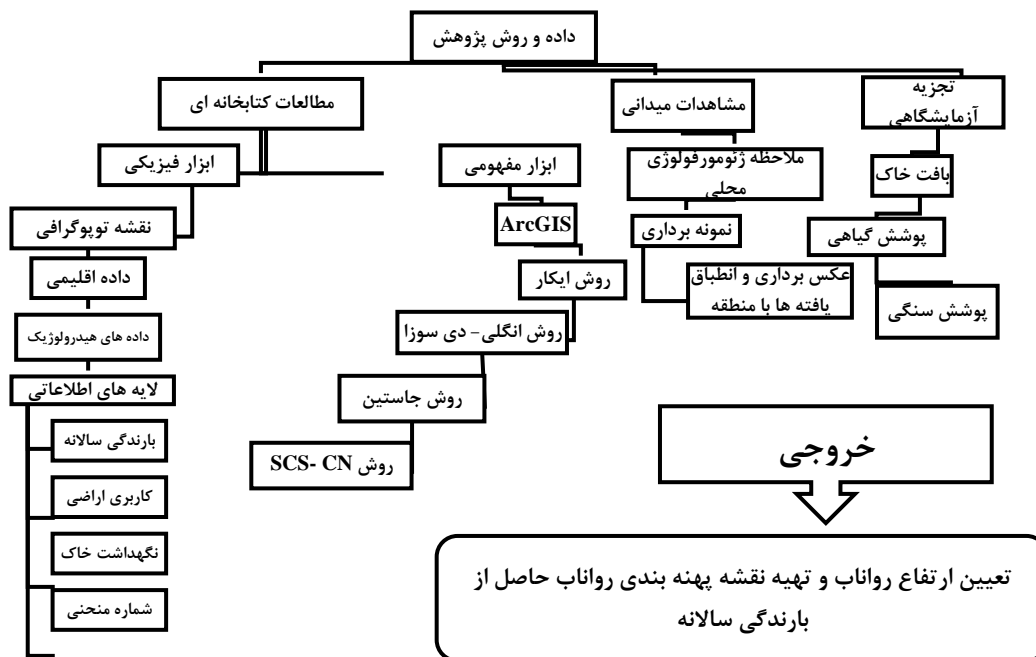
برآورد رواناب سالیانه حوضه آبریز حویق و حوضه‌های مشابه آن تعیین شد.

مصطفی‌زاده و همکاران (۱۳۹۶) شماره منحنی رویدادهای بارش و رواناب و تغییرات آن را با مؤلفه‌های بارش در حوضه آبخیز جعفرآباد تعیین کردند. نتایج نشان داد میانگین مقادیر شماره منحنی در فصل‌های تابستان و زمستان حدود ۶۰ و در فصل‌های بهار و پاییز به ترتیب ۵۰ و ۵۶ است. با برقراری ارتباط بین شماره منحنی با ویژگی‌های بارش در نمودارهای سه متغیره، مقدار زیاد شماره منحنی در بارش‌هایی با شدت بیش از ۱۰ میلی‌متر در ساعت و بیش از ۴۰ میلی‌متر برآورد شد. همچنین در رخدادهایی با ضریب رواناب ۸۰-۴۰ درصد، مقدار شماره منحنی برآوردشده بیش از ۷۰ بود.

عزیزنیا کشتلی و بیات ورکشی (۱۳۹۷) معادلات تجربی برآورد رواناب را در حوضه بابلرود ارزیابی کردند. نتایج بیان‌کننده برتری دو مدل جاستین و دی‌سوزا برای حوضه پژوهش و معادله جاستین برای حوضه کشتارگاه بوده است. همچنین مشخص شد روابط برای حوضه‌های کوچک کاربرد داشته است و با افزایش سطح حوضه، ضریب همبستگی روابط کاهش می‌یابد.

اهداف پژوهش

هدف پژوهش حاضر، برآورد ضریب رواناب سالیانه با استفاده از روش SCS و فرمول‌های موجود در واحدهای مختلف تشکیل‌دهنده حوضه آبخیز حصارک و همچنین پهنه‌بندی پتانسیل تولید رواناب در حوضه آبخیز است. نوآوری پژوهش حاضر در



شکل ۱. فلوجارت مراحل کار پژوهش (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۸)

روش SCS-CN

از اراضی و وضعیت سطح خاک از نظر نفوذپذیری متفاوت است. نتایج نشان می‌دهد از کل تلفات بالقوه حوضه یا S به‌طور متوسط حدود ۰/۲ آن پیش از شروع جریان رواناب به‌صورت تلفات اولیه عمل می‌کند و ۰/۸ بقیه آن در طول بارش صرف نفوذ سطحی و عمقی در خاک می‌شود. برای تعیین پتانسیل تولید رواناب با این روش، به نقشه‌ها و اطلاعات زمین‌شناسی و خاک‌شناسی، کاربری اراضی و گروه‌های هیدرولوژیک خاک منطقه نیاز است.

گروه هیدرولوژیک خاک: نخست ۲۰ نمونه خاک

به‌طور تصادفی از عمق ۲۰ سانتی‌متری از نقاط مختلف حوضه آبخیز حصارک برداشته شد. سپس به‌منظور تعیین بافت خاک، نمونه‌ها تجزیه آزمایشگاهی شد (شکل ۲). در نهایت براساس بافت خاک و دو مؤلفه نفوذپذیری (جدول ۱) و آبگذری (جدول ۲ و ۳)، ویژگی خاک مشخص و براساس آن، گروه هیدرولوژیک خاک تعیین شد. در واقع میزان نفوذ با

برای برآورد رواناب حاصل از بارندگی سالیانه حوضه آبخیز حصارک با استفاده از روش SCS، ارتفاع رواناب حاصل از بارندگی براساس رابطه ۱ و ۲ محاسبه می‌شود که درباره بارش‌های به‌صورت برف امکان استفاده ندارد و آب پایه را نیز دربر نمی‌گیرد (علیزاده، ۱۳۸۷: ۵۲۰) و در آن:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (1)$$

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

Q = ارتفاع رواناب (برحسب میلی‌متر)

P = حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته (برحسب میلی‌متر)

S = حداکثر توان نگهداری و نفوذ در خاک (برحسب میلی‌متر)

در رابطه ۲، CN، شماره منحنی مربوط به مقدار نفوذ آب در خاک حوضه و مقدار آن بین ۰ تا ۱۰۰ متغیر است. مقدار S با نوع پوشش، نحوه بهره‌برداری

ضرب عمق خاک نمونه‌ها در ضریب نفوذپذیری تعیین شد (حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷: ۱۳۸) (جدول ۱).

جدول ۱. میزان نفوذ براساس بافت خاک (منبع: حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷: ۱۳۸)

بافت	اینچ (cm) آب بر اینچ (cm) خاک
شن، شن لومی	۰/۰۵
شن ریز لومی، لوم شنی درشت، بافت تقریباً شنی (گراول)	۰/۱۰
لوم شنی، لوم رسی و شنی، لوم شنی ریز، رس سیلتی، رس شنی، رس	۰/۱۵
لوم، لوم سیلتی، سیلت، لوم رسی و سیلتی، لوم رسی	۰/۲۰

آبگذری نیز با توجه به جدول (۲) و نوع بافت مؤلفه کلاس آبگذری و عمق خاک نمونه‌برداری‌شده، خاک تعیین شد. سپس برپایه جدول (۳) با توجه به دو

جدول ۲. تعیین افق سطحی آبگذری خاک با توجه به نوع بافت خاک (منبع: حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷: ۱۳۸)

نفوذپذیری	بافت
بسیار آرام	رس سیلتی، رس، رس شنی
آرام	رسی، رس شنی، رس سیلتی
آرام متوسط	رسی، رس سیلتی یا رس شنی، لوم رسی و سیلتی، لوم رسی
متوسط	لوم سیلتی، لوم، لوم رسی و شنی، لوم رسی و سیلتی
سریع متوسط	لوم شنی درشت تا متوسط، لوم شنی ریز، لوم شنی بسیار متغیر
سریع	ریز، شن، شن ریز لومی، بافت ریز لومی
بسیار سریع	شن درشت یا متوسط، بافت تقریباً شنی (گراولی)

جدول ۳. تعیین کلاس آبگذری خاک (منبع: حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷: ۱۳۸)

رتبه‌بندی آبگذری نیم‌رخ خاک				کاهش آبگذری در افق‌های زیرین	آبگذری در افق‌های سطحی
عمق کمتر از ۱۰ اینچ	عمق بین ۱۰ تا ۲۰ اینچ	عمق بین ۲۰ تا ۴۰ اینچ	عمق بیش از ۴۰ اینچ		
۱ یا ۲				کم یا بدون کاهش	بسیار سریع یا سریع (بیش از ۵ اینچ در ساعت)
۵ تا ۷	۳ یا ۴	۲ یا ۳	۱ یا ۲	کاهش متوسط	
۱۰	۸ تا ۱۰	۴ تا ۸	۱ یا ۳	کاهش فاحش	
۶ تا ۸	۴ یا ۵	۳ یا ۴	۱ تا ۳	کم یا بدون کاهش	نسبتاً سریع (۲/۵ تا ۵ اینچ در ساعت)
۱۰	۸ تا ۱۰	۵ تا ۷	۳ یا ۴	کاهش متوسط	
۷ یا ۸	۶ یا ۷	۵ یا ۶	۵ یا ۶	کاهش	متوسط (۰/۸ تا ۲/۵ اینچ در ساعت)
۷ یا ۸	۶ یا ۷	۵ یا ۶	۵ یا ۶	کم یا بدون کاهش	
۸ یا ۹	۷ یا ۸	۶ یا ۷	۵ یا ۶	کاهش متوسط	نسبتاً آرام (۰/۲ تا ۰/۸ اینچ در ساعت)
۹ یا ۱۰	۸ یا ۹	۷ یا ۸	۷ یا ۸	کاهش	
۹ یا ۱۰	۹ یا ۱۰	۸ یا ۹	۷ یا ۸	کم یا بدون کاهش	کم و بسیار آرام (کمتر از ۰/۲ اینچ در ساعت)
۹ یا ۱۰	۹ یا ۱۰	۹ یا ۱۰	۹ یا ۱۰	کاهش متوسط	
۹ یا ۱۰	۹ یا ۱۰	۹ یا ۱۰	۹ یا ۱۰	کاهش	

نفوذپذیری و آبگذری، گروه هیدرولوژیک خاک
(۳) نفوذپذیری + آبگذری = گروه هیدرولوژیک خاک (HSG)

براساس جدول (۴) مشخص می‌شود (نصرتی، ۱۳۹۳: ۱۲؛ نصرتی و همکاران، ۱۳۹۲: ۱۲۵).

جدول ۴. تعیین گروه هیدرولوژیک خاک (منبع: حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷: ۱۳۸)

شاخص HSG	توصیف	گروه خاک
۵-۰	پتانسیل بسیار کم تولید رواناب	A
۱۰-۶	پتانسیل کم تولید رواناب	B
۱۵-۱۱	پتانسیل متوسط تولید رواناب	C
> ۱۶	پتانسیل زیاد تولید رواناب	D



شکل ۲. تصاویری از نمونه‌برداری و تجزیه آزمایشگاهی در منطقه پژوهش (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۸)

نقشه‌های وضعیت بهره‌برداری از اراضی و گروه‌های هیدرولوژیک خاک در محیط نرم‌افزار Arc GIS با عمل (Intersect) با همدیگر تلفیق شدند. از ترکیب لایه‌های کاربری و گروه‌های هیدرولوژیک خاک، نقشه شماره منحنی (CN) به دست آمد (حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷: ۹۵)؛ (شکل ۶).

رطوبت پیشین خاک: از نظر وضعیت رطوبت پیشین خاک، منطقه در گروه سوم (با توجه به متوسط بارندگی سالیانه ایستگاه‌های مجاور منطقه که مقدار آن ۷۶۴ میلی‌متر است و بیشتر بارندگی در فصل زمستان است؛ بنابراین رطوبت پیشین خاک حوضه در فصل خواب با بیش از ۲۸ میلی‌متر تعیین شد) قرار گرفت و مقدار رطوبت خاک زیاد است (شکل ۷).

در ادامه برای تهیه نقشه گروه هیدرولوژیک خاک از روش درون‌یابی^۱ پایه شعاعی^۲ با کمترین خطا (RMSE=۲/۰۴) و بیشترین دقت در درون‌یابی گروه‌های هیدرولوژیک نمونه‌های خاک منطقه استفاده شد.

عوامل مهم دیگر در تعیین CN، مشخص کردن انواع پوشش، کاربری اراضی و شرایط رطوبتی اولیه خاک در سطح حوضه آبخیز است. اگر توان تولید رواناب در یک منطقه کم باشد، شرایط هیدرولوژیک خوب را نشان می‌دهد (مهدوی، ۱۳۹۰: ۱۵۳).

شماره منحنی: به منظور تعیین شماره منحنی (CN) برای مجموعه‌های خاک و پوشش گیاهی، نخست

^۱ Interpolation

^۲ Radial Basis

$$R = K \times S^{0.155} \frac{P}{1.8T + 32} \quad (5)$$

$$\frac{H}{\sqrt{A}} \quad (6)$$

K ضریب رابطه است که برای مناطق مختلف فرق می‌کند، P بارندگی سالیانه، S شیب حوضه به متر، T درجه‌حرارت سالیانه به سانتی‌گراد و R ارتفاع رواناب سالیانه به سانتی‌متر است.

روش ایکار

انجمن تحقیقات کشاورزی هند رابطه ۷ را با نام ایکار برای برآورد رواناب سالیانه ارائه کرده است. در این رابطه، R رواناب سالیانه به سانتی‌متر، P بارندگی سالیانه منطقه، A مساحت منطقه به سانتی‌متر و T متوسط سالیانه دما به درجه سانتی‌گراد است (مددی و ملکی، ۱۳۹۵: ۵)؛ (جدول ۱۱).

$$R = \frac{1.115 \times P^{1.44}}{T^{1.34} \times A^{0.0613}} \quad (7)$$

رابطه انگلی - دی سوزا^۱

این دو دانشمند روابط زیر را به‌مثابه نتایج مطالعاتشان در دشت‌ها و کوهستان‌های منطقه ماهاراشترا^۲ واقع در کشور هندوستان ارائه کردند (جدول ۱۲)؛ (Mutereja, 1986: 12).

$$R = 0.85 \quad \text{برای مناطق کوهستانی} \quad (8)$$

$$\times P - 30.5$$

$$R = \frac{(P-17.8) \times P}{254} \quad \text{برای دشت‌ها} \quad (9)$$

در این روش، P بارندگی سالیانه به میلی‌متر و R رواناب سالیانه به میلی‌متر است (جدول ۱۲).

معرفی محدوده پژوهش

بارندگی سالیانه: برای تعیین متوسط بارندگی سالیانه منطقه از داده‌های میانگین بارش سالیانه ایستگاه باران‌سنجی، وزارت نیرو و سازمان هواشناسی مجاور محدوده مطالعاتی استفاده شد. داده‌های اقلیمی لازم از مرکز تماب وزارت نیرو برای سال آبی ۱۳۹۲-۱۳۷۹ تهیه و سپس داده‌های ناقص بازسازی شد. به‌منظور تهیه نقشه بارش، معادله‌ای بین ارتفاع هر ایستگاه و میانگین دوازده‌ساله آنها برقرار شد (رابطه ۴).

$$P = 540.34 H - 3567.4 \quad (4)$$

در این معادله، H، ارتفاع متوسط برحسب متر و P، میزان بارندگی متوسط سالیانه برحسب میلی‌متر است. سپس با استفاده از این معادله و DEM منطقه در محیط GIS به کمک دستور Raster Calculator، نقشه بارندگی سالیانه تهیه شد (شکل ۸).

روش جاستین

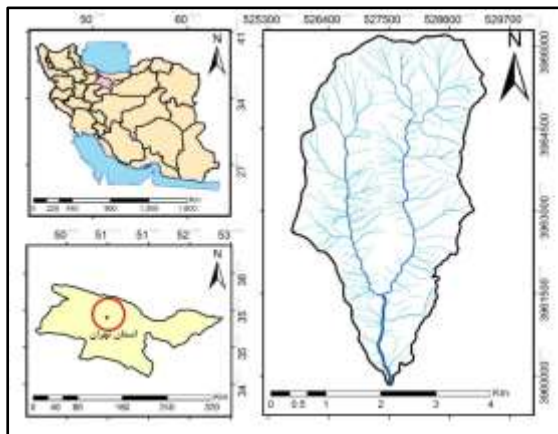
در این رابطه که در حال حاضر یکی از روش‌های متداول در برآورد رواناب سالیانه است، علاوه بر مؤلفه بارش، تبخیر نیز به‌صورت متغیر دما مؤثر واقع می‌شود و مساحت حوضه نیز با شیب حوضه به‌طور غیرمستقیم در آبدهی سالیانه دخالت می‌کند (شامحمدی حیدری، ۱۳۸۱: ۵). K، ضریب جاستین است که به قابلیت پتانسیل آبی، ویژگی‌های زمین‌شناسی و پوشش گیاهی بستگی دارد. با توجه به مطالعات انجام‌شده روی مساحت و دبی منطقه، در حوضه آبخیز حصارک مقدار ضریب K ۰/۶ در نظر گرفته شد (جدول ۱۰). شکل کلی رابطه جاستین به‌صورت زیر است (مددی و ملکی، ۱۳۹۵: ۴):

¹ Angeli di Sousa

² Maharashtra

رتبه ۱	تعداد آبراهه،	۴۹	شیب متوسط آبراهه	۱۴/۳۲
رتبه ۲	تعداد آبراهه،	۸	زمان تمرکز (روش	۰/۳۵
رتبه ۳	تعداد آبراهه،		کرپیچ به ساعت)	

از نظر زمین‌شناسی، حوضه آبخیز حصارک در ناحیه زمین‌شناختی البرز مرکزی واقع شده و جنس سنگ‌ها بیشتر توف سبز با میان‌لایه‌های آهک، و شیل با میان‌لایه‌های ماسه‌سنگ است. متوسط بارندگی سالیانه ۴۰۹/۹ میلی‌متر است. حداکثر بارش‌های ماهیانه ۱۰۲/۶۴ میلی‌متر در اسفندماه است و حداقل بارش به مقدار ۷/۹۹ میلی‌متر در مردادماه رخ می‌دهد. متوسط دما در تابستان و زمستان به ترتیب ۱۵/۶۵ و ۴/۲۸ درجه سانتی‌گراد است (شکل ۳).



شکل ۳. موقعیت محدوده پژوهش
(منبع: نویسنده‌گان، ۱۳۹۸)

یافته‌های پژوهش

بررسی مؤلفه‌های مؤثر در روش SCS

گروه‌های هیدرولوژیک خاک در حوضه حصارک براساس نتایج حاصل از انجام آزمایش‌های نفوذپذیری خاک تعیین شد؛ بدین صورت که ۲۰ نمونه خاک از سطح حوضه آبخیز برداشته و تجزیه آزمایشگاهی، و

حوضه آبخیز حصارک، حوضه‌ای کوهستانی در شمال غرب استان تهران، در ۳۰° ۱۹' تا ۵۱° ۱۷' طول شرقی و ۵۱° ۳۵' تا ۳۵° ۴۶' عرض شمالی واقع شده است. این منطقه از غرب به حوضه آبخیز کن و از شرق به حوضه آبخیز فرحزاد محدود می‌شود و مساحت آن ۱۳/۸۷ کیلومترمربع است. رودخانه حصارک، مسیل اصلی این منطقه است که از کوه بندعیش به ارتفاع ۲۷۶۶ متر سرچشمه گرفته و پس از عبور از روستای حصارک و بزرگراه آیت‌الله کاشانی در امتداد جنوب از اراضی شهران و جنت‌آباد گذشته است و در محل اتوبان تهران - کرج به مسیل برگردان غرب می‌ریزد و در نهایت به رودخانه کن می‌پیوندد.

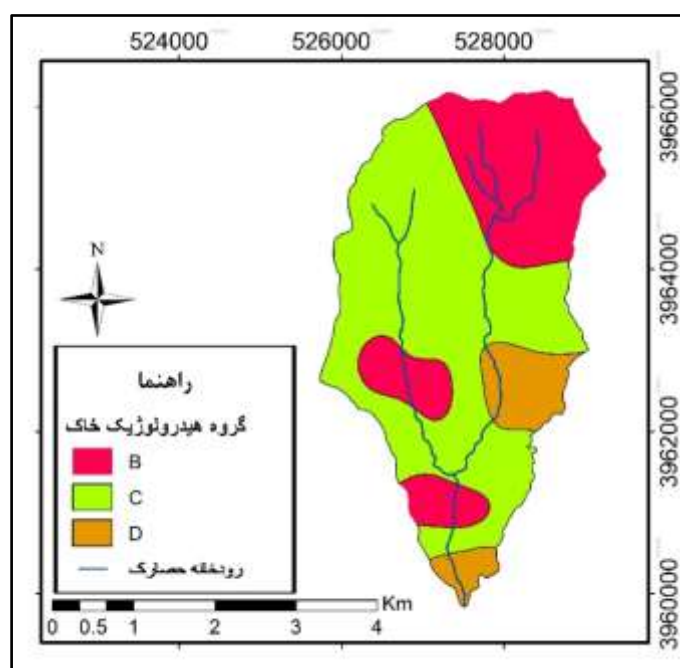
از نظر هیدرولوژیکی رودخانه حصارک دو شاخه اصلی به نام‌های چپ‌دره و دوجناران دارد که یک یال اصلی به ارتفاع حداکثر ۲۴۰۵ متر در وسط آن قرار می‌گیرد (حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷: ۱۳۶)؛ (جدول ۵).

جدول ۵. ویژگی‌های فیزیکی حوضه آبخیز و آبراهه‌های موجود در منطقه پژوهش (منبع: نویسنده‌گان، ۱۳۹۸)

نام واحد	حصارک	تعداد آبراهه، رتبه ۴	۲
مساحت حوضه (Km ²)	۱۳/۸۷	تعداد آبراهه، رتبه ۵	۱
تعداد آبراهه‌ها	۲۹۷	ضریب انشعاب لگاریتمی	۳/۹۹
مجموع طول آبراهه‌ها (Km)	۹۸/۶۱	حداقل ارتفاع (متر)	۱۵۷۹
طول آبراهه اصلی (Km)	۷/۳۶	حداکثر ارتفاع (متر)	۲۷۶۰
تراکم زهکشی (Km/Km ²)	۶/۷۴	متوسط ارتفاع (متر)	۲۱۷۰
تعداد آبراهه،	۲۳۶	شیب متوسط (%)	۳۰/۹

سنگی توف سبز توده‌ای و رسوبات کواترنری در گروه هیدرولوژیک D قرار می‌گیرند و سنگ‌های خاکستری توف سبز و شیل با میان‌لایه‌های ماسه‌سنگ در گروه هیدرولوژیک C و سنگ‌های ماسه‌سنگ توفی و کنگلومرا در گروه هیدرولوژیک B جای دارند (جدول ۶).

سپس گروه هیدرولوژیک خاک‌ها با استفاده از جداول (۲)، (۳)، (۴) و (۵) تعیین شد. براساس نقشه گروه هیدرولوژیک خاک، حوضه حصارک سه گروه خاک شامل B، C و D دارد که از نظر وسعت و گستردگی گروه C بیشترین مساحت را با پتانسیل تولید رواناب نسبتاً زیادی دارد (شکل ۴). با تطبیق نقشه گروه هیدرولوژیک خاک و زمین‌شناسی حوضه، لایه‌های



شکل ۴. نقشه گروه هیدرولوژیک منطقه پژوهش (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۸)

جنگل‌ها و مراتع و آبخیزداری استان تهران تهیه شد (سازمان جنگل‌ها و مراتع کشور، ۱۳۹۵)؛ (شکل ۵)؛ (جدول ۷).

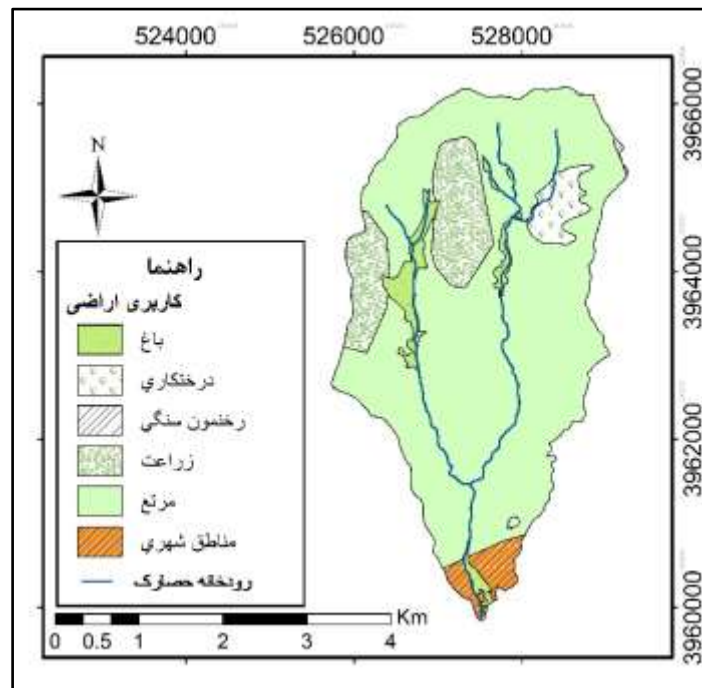
جدول ۷. مساحت کاربری‌های موجود در حوضه آبخیز حصارک (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۸)

مساحت (Km ²)	نوع کاربری	مساحت (Km ²)	نوع کاربری
۱/۶	زراعت	۰/۴	مناطق شهری
۰/۵۴	باغ	۰/۴۴	درختکاری
		۱۰/۸۸	مراتع

جدول ۶. معیار طبقه‌بندی گروه‌های هیدرولوژیک خاک منطقه پژوهش (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۸)

گروه هیدرولوژیک خاک	میزان نفوذ	B	C	D
	متوسط	متوسط	کم	بسیار کم
ویژگی	توانایی تولید رواناب	متوسط	نسبتاً زیاد	بسیار زیاد
مساحت (کیلومتر مربع)		۴/۴۳	۸/۱۴	۱/۲۹

نقشه کاربری اراضی حوضه حصارک با استفاده از بازدیدهای میدانی و اطلاعات کسب‌شده از سازمان



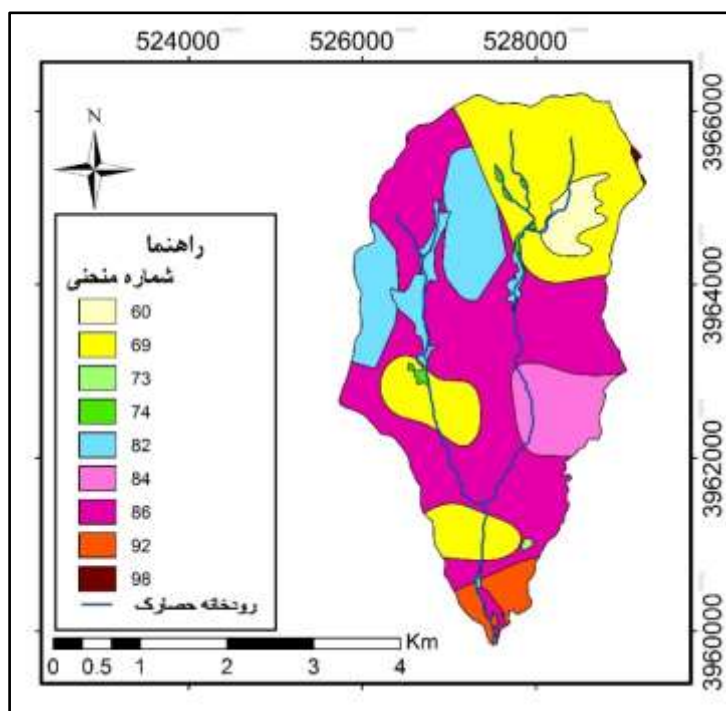
شکل ۵. نقشه کاربری اراضی منطقه پژوهش (منبع: سازمان جنگل‌ها و مراتع کشور، ۱۳۹۵)

مساحت، وضعیت هیدرولوژیکی متوسط و $2/14$ کیلومترمربع، وضعیت هیدرولوژیکی نسبتاً خوب دارد. از جدول‌های مربوط به شماره منحنی و با در نظر گرفتن وضعیت رطوبتی خاک در حالت سوم، برای هر محدوده شماره منحنی (CN) استخراج و نقشه CN تهیه شده است (جدول ۸ و شکل ۶).

تعیین شماره منحنی و مقادیر S حوضه آبخیز حصارک در مرحله بعد با ترکیب لایه‌های کاربری اراضی و گروه‌های هیدرولوژیکی خاک، نقشه شماره منحنی (CN) به دست آمد. براساس نقشه شماره منحنی (CN)، حوضه حصارک شماره منحنی 60 تا 98 دارد (شکل ۶). اراضی شهری و رخنمون‌های سنگی، بیشترین ارزش شماره منحنی و باغ‌ها، کمترین میزان CN را در حوضه حصارک دارند؛ بنابراین قسمت‌های پایین دست CN بیشتری نسبت به بالادست حوضه دارند.

بیشترین مساحت حوضه متعلق به کاربری مرتع با تراکم متوسط است که $10/88$ کیلومترمربع از مساحت حوضه را شامل می‌شود و در گروه‌های هیدرولوژیکی B، C و D قرار دارد که از لحاظ رواناب پتانسیل متوسط، نسبتاً زیاد و بسیار زیاد دارند. کاربری زمین‌های زراعی با تراکم خوب و باغ در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرد و آنها نیز در گروه هیدرولوژیک C قرار دارند.

وضعیت هیدرولوژیکی اراضی بیان‌کننده توان ایجاد رواناب در یک منطقه است و چنانچه این توان کم باشد، شرایط هیدرولوژیکی خوب است. وضعیت هیدرولوژیکی اراضی در سه حالت ضعیف، متوسط و خوب در نظر گرفته می‌شود. وضعیت هیدرولوژیکی حوضه پژوهش از نظر مراتع، زمین‌های زراعی و پوشش جنگلی (درختکاری) به دو وضعیت متوسط و خوب تقسیم شده است که $11/32$ کیلومترمربع



شکل ۶. نقشه شماره منحنی منطقه پژوهش (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۸)

جدول ۸. مقادیر شماره منحنی حوضه آبخیز حصارک (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۸)

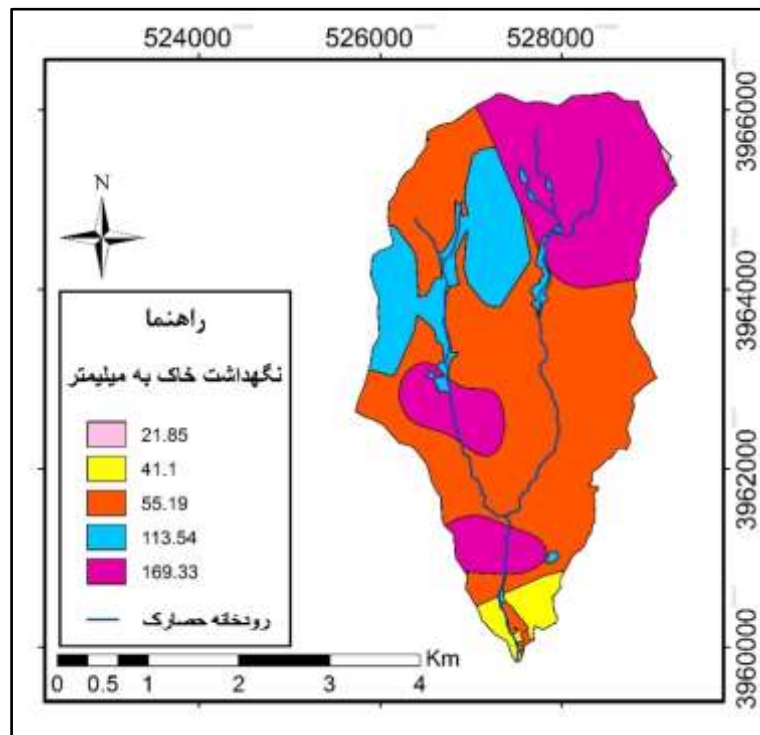
کاربری	گروه خاک								
	A	B	C	D	میانگین CN	CN اصلاح شده برای گروه رطوبتی III			
درختکاری (پوشش جنگلی)	۳۶	۶۰	۷۳	۷۹	۶۲	۵۶	۷۸	۸۷	۹۱
صخره	۹۸	۹۸	۹۸	۹۸	۹۸	۹۹	۹۹	۹۹	۹۹
زراعت	۶۵	۷۵	۸۲	۸۶	۷۷	۸۲	۸۸	۹۲	۹۴
رخنمون سنگی	۹۸	۹۸	۹۸	۹۸	۹۸	۹۹	۹۹	۹۹	۹۹
مرتع	۴۹	۶۹	۷۹	۸۴	۷۰	۶۹	۸۴	۹۱	۹۳
باغ	۵۹	۷۴	۸۲	۸۶	۷۵	۷۷	۸۸	۹۲	۹۴
مناطق شهری	۷۷	۸۵	۹۰	۹۲	۸۶	۸۹	۹۴	۹۶	۹۷

پس از تهیه نقشه CN و S حوضه آبخیز برای تعیین متوسط بارندگی سالیانه، نخست بر مبنای داده‌های بارش سالیانه ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری استفاده شده از طریق معادله رگرسیون، لایه بارش حوضه آبخیز حصارک تهیه شد. با توجه به شکل (۸)، بارش سالیانه حوضه آبخیز حصارک از ۳۹۵ میلی‌متر در جنوب تا ۷۶۴ میلی‌متر در ارتفاعات متغیر است. این

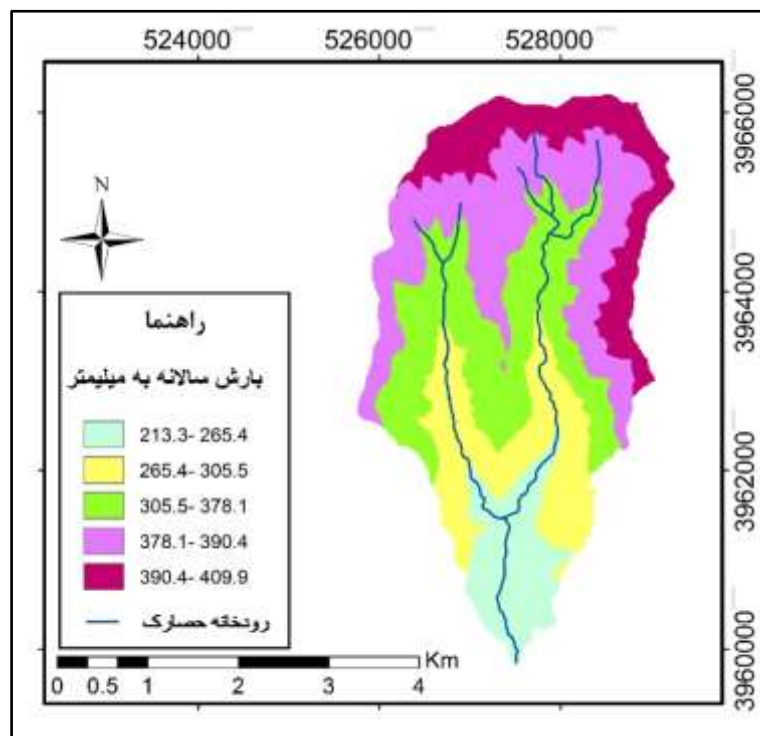
پس از تهیه نقشه CN در این مرحله از پژوهش با رابطه $s = \frac{25400}{CN} - 254$ و مقادیر به دست آمده از CN حوضه، مقدار S یا همان حداکثر توان نگهداری مربوط به ربایش^۱ و نفوذ در خاک محاسبه شد. مقدار S حوضه از ۲۱/۸۵ تا ۱۶۹/۳۳ میلی‌متر متغیر است (شکل ۷).

^۱ Interception

تفاوت عددی، نقش افزایش ارتفاع را در تغییرات بارش
حوضه حصارک به خوبی نشان می دهد.



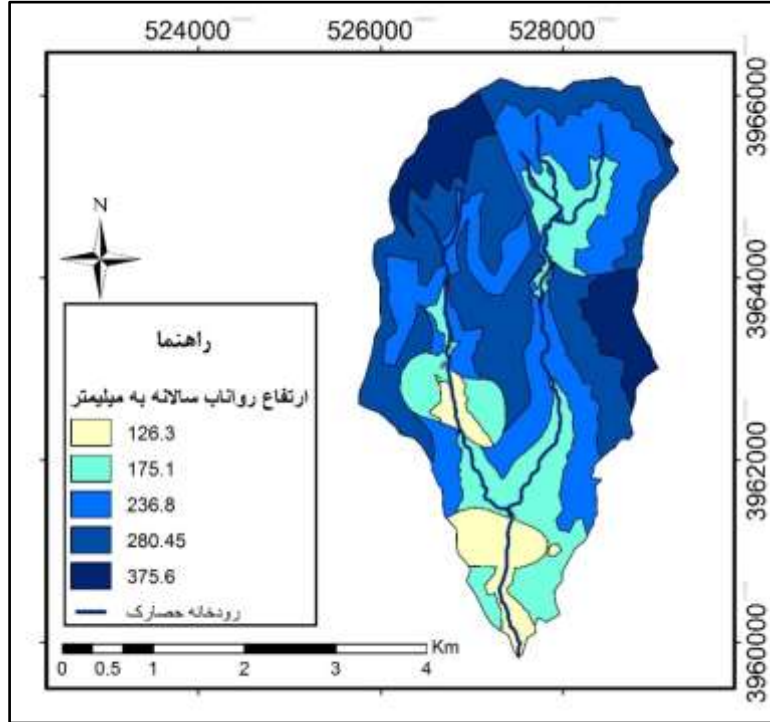
شکل ۷. نقشه نگهداشت سطحی خاک منطقه پژوهش (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۸)



شکل ۸. نقشه بارندگی سالیانه منطقه پژوهش (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۸)

حوضه حصارک با استفاده از روابط ۱ و ۲ محاسبه شد (شکل ۹ و جدول ۹).

پس از تهیه نقشه CN و S حوضه آبخیز برای محاسبه ارتفاع رواناب تولیدشده، مقدار متوسط بارندگی سالیانه استخراج شد؛ سپس ارتفاع رواناب



شکل ۹. نقشه ارتفاع رواناب حاصل از بارندگی سالیانه منطقه پژوهش (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۸)

جدول ۹. مقدار رواناب براساس روش SCS-CN در منطقه پژوهش (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۸)

گروه هیدرولوژیک خاک	ضریب رواناب (%)	مساحت (Km ²)	بارندگی (Mm)	ارتفاع رواناب (Mm)
B	۵۲/۷۶	۰/۹۹	۲۱۳/۳ - ۲۶۵/۴	۱۲۶/۳
C	۶۱/۳۴	۲/۹۷	۲۶۵/۴ - ۳۰۵/۵	۱۷۵/۱
B	۶۹/۲۸	۴/۲	۳۰۵/۵ - ۳۷۸/۱	۲۳۶/۸
C	۳۶/۳۹	۴/۳۵	۳۷۸/۱ - ۳۹۰/۴	۲۸۰/۴۵
D	۹۳/۸۶	۰/۶۱	۳۹۰/۴ - ۴۰۹/۹	۳۷۵/۶

روش جاستین

جدول ۱۰. مقدار رواناب سالیانه براساس روش جاستین در منطقه پژوهش (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۸)

ضریب رواناب %	ارتفاع رواناب سالیانه (Cm) R	شیب حوضه S (Km)	مساحت حوضه (Km ²)	ضریب K	بارش سالیانه (Mm)
۱۲	۴/۹۲	۰/۳۱	۱۳/۸۷	۰/۶	۴۰۹/۹

روش ایکار

جدول ۱۱. مقدار رواناب سالیانه براساس روش ایکار در منطقه پژوهش (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۸)

بارش سالیانه (Mm)	مساحت حوضه (Cm ²)	دمای سالیانه T (درجه سانتی گراد)	ارتفاع رواناب سالیانه R (Cm)	ضریب رواناب %
۴۰۹/۹	۱۳/۸۷	۹/۹۶	۲/۲۳	۵/۴۴

روش انگلی - دی سوزا

جدول ۱۲. مقدار دبی اوج سیلاب و رواناب براساس روش انگلی - دی سوزا در منطقه پژوهش (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۸)

بارش سالیانه (Mm)	ارتفاع رواناب سالیانه Qi	ضریب رواناب %
۴۰۹/۹	۳۲۲/۲۴	۷۸/۸۹

مقادیر رواناب منطبق بر اراضی شهری با گروه هیدرولوژیک خاک D است (جدول ۹).

اعتبارسنجی برآورد رواناب

به منظور اعتبارسنجی مقادیر رواناب برآورد شده از روابط تجربی، از اطلاعات رواناب مشاهده ای ثبت شده در سازمان جنگل و مرتع کشور استفاده شده است (سازمان جنگل ها و مراتع کشور، ۱۳۹۵). فواصل زمانی ثبت، بارش روزانه است. محاسبات حاصل از اعتبارسنجی در جدول (۱۳) آورده شده است. به دلیل اینکه مقدار رواناب برآورد شده با روش SCS-CN، بیشترین همخوانی را با مقدار رواناب مشاهداتی و ثبت شده دارد، بنابراین نتایج حاصل از اعتبارسنجی نشان می دهد میزان اختلاف ضریب رواناب مشاهده ای و ضریب رواناب برآورد شده با استفاده از روش SCS-CN ۱۰/۶۶ درصد است.

براساس مقادیر رواناب برآورد شده با استفاده از روش های انگلی - دی سوزا، جاستین، ایکار و SCS-CN، روش SCS-CN به دلیل اینکه مقادیر نفوذپذیری و نگهداشت خاک را در نظر می گیرد، نتایج دقیق تری ارائه می دهد و نسبت به روش های دیگر مطمئن تر است. با توجه به مطالعات میدانی و پیمایش صحرائی، آثار و شواهد دبی لبالبی حاشیه کانال و داغ آب سیلاب های بیشینه ثبت و براساس سطح مقطع آبراهه، دبی حداکثر محاسبه و با رواناب برآوردی مدل ها مقایسه شد؛ علاوه بر این مقادیر دبی برآورد شده براساس مدل SCS-CN، در این مطالعه با مقادیر اندازه گیری شده سازمان جنگل ها و مراتع استان تهران انطباق دارد (شرکت جهاد تحقیقات آب و انرژی، ۱۳۹۴).

پس از به دست آوردن بارش سالیانه و مقادیر نفوذ با استفاده از رابطه ۲، ارتفاع و ضریب رواناب برای حوضه پژوهش محاسبه شد (جدول ۹). بیشترین

جدول ۱۳. نتایج حاصل از متوسط بارندگی سالیانه برای اعتباریابی برآورد رواناب در حوضه آبخیز حصارک
(منبع: سازمان جنگل‌ها و مراتع کشور، ۱۳۹۵)

رویداد	بارش سالیانه (Mm)	رواناب مشاهده‌ای	ضریب رواناب مشاهده‌ای (%)	رواناب شبیه‌سازی شده	ضریب رواناب برآورد شده (%)	تغییرات ضریب رواناب دبی مشاهده‌ای و برآورد شده
۰۱ ژانویه ۲۰۰۰ تا ۰۱ ژانویه ۲۰۰۱	۴۰۹/۹	۳۱۲/۲۳	۷۶/۱۷	۲۲۲/۶۸	۵۴/۳۲	۲۱/۸۵

نتیجه‌گیری

ایران، یکی از کشورهای خشک و کم‌آب جهان با متوسط بارندگی ۲۵۰ میلی‌متر است. این مقدار بارش از نظر زمانی و مکانی نیز توزیع یکنواختی ندارد. بر این اساس ممکن است گاه بخش عمده بارش سالیانه به صورت رگبار و بارش‌های تند طی چند ساعت ریزش کند که این امر باعث وقوع سیلاب‌های مخرب در بعضی حوضه‌های آبخیز و استان‌ها شده است؛ بنابراین بررسی مخاطرات آبی در یک حوضه آبخیز در تعادل و بیلان آبی آن حوضه و شناخت چگونگی وضعیت آن حوضه طی سال‌های گذشته برای هرگونه برنامه‌ریزی و اعمال نظر نقش مهمی دارد.

نابهنجاری شرایط اقلیمی که توازن طبیعی محیط زیست را برهم می‌زند و موجب بروز صدمات و خسارات به منابع طبیعی و انسانی می‌شود، به مخاطرات آب‌وهوایی تعبیر شده است (نگارش و ویسی، ۱۳۹۱: ۸۰). حوادث طبیعی شناخته‌شده بیش از ۴۰ نوع هستند که سیل پس از زلزله در مکان دوم قرار دارد (حافظ‌نیا، ۱۳۷۷: ۶۲)؛ از این رو سیل یکی از پدیده‌های جدی هیدرواقلیمی و از جدی‌ترین بلایای طبیعی است که جوامع بشری را تهدید می‌کند. در بین تمامی عوامل تأثیرگذار بر سیل، شدت و مدت بارندگی که دو عامل اقلیمی هستند، بیشترین تأثیر را در ایجاد این پدیده داشته‌اند (فیروزی و همکاران،

۱۳۹۲: ۷۸)؛ بنابراین رابطه بارندگی - رواناب متأثر از مؤلفه‌های اقلیمی و فیزیکی حوضه آبخیز مانند تغییرات زمانی بارندگی، شیب، ارتفاع، پوشش گیاهی، رطوبت خاک، آب‌های زیرزمینی و ... است.

حوضه آبخیز حصارک، حوضه‌ای کوهستانی در شمال غرب استان تهران و در ناحیه زمین‌شناختی البرز مرکزی، بر نهشته‌های کواترنری با سنگ‌بستر سازند کرج واقع شده است. از نظر زمین‌شناسی جنس سنگ‌ها بیشتر توف سبز با میان‌لایه‌های آهک، و شیل با میان‌لایه‌های ماسه‌سنگ است که نسبتاً حساس به فرسایش‌اند. خاک کم‌عمق و شیب زیاد باعث تکوین پوشش گیاهی متراکم در حوضه پژوهش شده است و قدرت و سرعت جریان‌های سطحی در بخش‌های مختلف حوضه آبخیز حصارک دیده می‌شود.

نتایج پژوهش نشان داد نوع کاربری اراضی و پوشش گیاهی در سطح حوضه آبخیز، مهم‌ترین مؤلفه‌های تعیین‌کننده نفوذ محسوب می‌شوند که بر رواناب و پیرو آن بر دبی اوج حوضه تأثیرگذارند. براساس مطالعات انجام‌شده و با توجه به نقشه پتانسیل تولید رواناب حوضه آبخیز حصارک (شکل ۹)، در پوشش باغ با مقدار شماره منحنی ۶۹، نگهداشت سطحی ۱۶۹/۳۳ میلی‌متر و بارش سالیانه ۴۰۹/۹ میلی‌متر، ارتفاع رواناب ۱۲۶/۳ میلی‌متر است و کمترین پتانسیل تولید رواناب را دارد. رخنمون‌های

حصارک همانند حوضه سد یامچی، نوع پوشش گیاهی و نفوذپذیری در تولید رواناب حوضه تأثیرگذار است. با توجه به اینکه بیشتر سطح منطقه، مراتع کم تراکم است و سهم این نوع کاربری به دلیل نفوذ کم در ایجاد رواناب زیاد است، باید اقدامات اساسی برای جلوگیری از ایجاد رواناب و سیل در مواقع بارندگی صورت گیرد. از جمله اقدامات اساسی برای افزایش نفوذ آب، استقرار سیستم جمع‌آوری آب باران و عملیات کنتور فارو همراه با افزایش پوشش گیاهی با بذرپاشی و بوته‌کاری گیاهان مرتعی است. اجرای این اقدامات اصلاحی شرایط را برای گسترش پوشش گیاهی و کاهش رواناب حوضه آبخیز مساعدتر می‌کند؛ بنابراین نوع کاربری اراضی، مهم‌ترین مؤلفه مؤثر بر رواناب حوضه است و در یک دید کلی بخش‌های بالایی حوضه، بیشترین رواناب منطقه را ایجاد می‌کنند.

منابع

بیات، زهرا، سلیمان دهکردی، زهرا، (۱۳۹۴). ارزیابی مدل‌های تجربی در برآورد رواناب سالانه (مطالعه موردی: حوضه آبخیز فرخ‌شهر)، سومین همایش سراسری کشاورزی و منابع طبیعی پایدار، گروه ترویجی دستاران محیط زیست، ۸-۱.

حافظنیا، محمدرضا، (۱۳۷۷). روش تحقیق در علوم انسانی، چاپ دوم، تهران، انتشارات سمت.

حجازی، اسدالله، مزبانی، مهدی، (۱۳۹۴). برآورد مقادیر ارتفاع و دبی حداکثر رواناب با استفاده از روش شماره منحنی (CN) (مطالعه موردی:

سنگی بالادست حوضه پژوهش با شماره منحنی ۹۸ و نگهداشت سطحی ۲۱/۸۵ میلی‌متر و بارش سالیانه ۴۰۹/۹ میلی‌متر نیز، ارتفاع رواناب ۳۷۵/۶ میلی‌متر یعنی بیشترین پتانسیل تولید رواناب را دارند.

در مقاله‌ای مددی و ملکی (۱۳۹۵) در حوضه آبخیز اندبیل شهرستان خلخال، مقدار رواناب سالیانه منطقه را با استفاده از روش‌های تجربی برآورد کردند. آنها نتیجه گرفتند کاربرد روش‌های تجربی دلالت بر عملکرد مثبت اقدامات آبخیزداری در کنترل رواناب و رسوب در حوضه پژوهش دارد و از بین روش‌های استفاده‌شده، روش جاستین پذیرفته بوده است.

در پژوهشی بیات و سلیمان دهکردی (۱۳۹۴) در حوضه آبخیز فرخ‌شهر، مدل‌های تجربی را در برآورد رواناب سالیانه ارزیابی کردند. در این پژوهش آنها از ۵ روش تجربی تورک، کوتاین، جاستین، انجمن تحقیقات کشاورزی هندوستان و لانگین اصلاح‌شده به دلیل فراگیر بودن و همچنین قابل محاسبه بودن مؤلفه‌های لازم آنها استفاده و نتیجه را با میزان رواناب اندازه‌گیری‌شده مقایسه کردند. از میان این ۵ روش مقدار حاصل از مدل انجمن تحقیقات کشاورزی هندوستان به مقدار اندازه‌گیری‌شده نزدیک‌تر بود و همبستگی زیادی را نشان داد.

پژوهش صفاری و همکاران (۱۳۹۱) در حوضه سد یامچی (اردبیل) نشان داد بیشترین پتانسیل تولید رواناب به بخش‌های شمالی و شرقی حوضه مربوط است که کاربری بایر و نفوذپذیری کم است. همچنین برآورد حجم بارش‌های تبدیلی به رواناب برای چند دوره نشان داد رواناب تولیدی از کل بارش در دوره بازگشت ۵ ساله از ۲۹ درصد به ۵۵ درصد در دوره بازگشت ۱۰۰ ساله می‌رسد. در نتیجه در حوضه آبخیز

شهرسازی، تهران، مرکز راهکارهای دستیابی به توسعه پایدار، ۱-۱۳.

صفاری، امیر، قنواتی، عزت‌الله، بهشتی جاوید، ابراهیم، حسینی، هاشم، (۱۳۹۱). برآورد پهنه‌بندی رواناب ناشی از بارش ۲۴ ساعته با استفاده از روش SCS-CN حوضه سد یامچی اردبیل، فصلنامه بین‌المللی انجمن جغرافیایی ایران، سال ۱۱، شماره ۲۸، ۲۰۱-۲۱۷.

عبادی‌فر، مجید، نادری دیزگاه، محمدفاتح، (۱۳۹۶). ارزیابی روش‌های تجربی جهت برآورد رواناب سالانه (مطالعه موردی: حوضه آبریز حویق در استان گیلان)، دومین کنفرانس ملی هیدرولوژی ایران، شهرکرد، دانشگاه شهرکرد - انجمن هیدرولوژی ایران، ۱-۱۲.

عزیزنیا کشتلی، علی‌اصغر، بیات ورکشی، مریم، (۱۳۹۷). ارزیابی معادلات تجربی برآورد رواناب در حوضه باپلرود، هفتمین کنفرانس ملی مدیریت منابع آب ایران، یزد، دانشگاه یزد - انجمن علوم و مهندسی منابع آب ایران، ۱-۱۱.

علیزاده، امین، (۱۳۸۷). اصول هیدرولوژی کاربردی، چاپ ۲۳، مشهد، انتشارات دانشگاه امام رضا، ۸۱۱ ص.

فیروزی، فاطمه، نگارش، حسین، خسروی، محمود، (۱۳۹۲). مدل‌سازی پیش‌بینی و بررسی روند بارش در ایستگاه‌های منتخب استان فارس، فصلنامه برنامه‌ریزی منطقه‌ای، دوره ۲، شماره ۷، ۷۹-۹۱.

حوضه آبریز سراب دره‌شهر، نشریه هیدروژئومورفولوژی، دوره ۲، شماره ۵، ۶۳-۸۱.

حسین‌زاده، محمدمهدی، نصرتی، کاظم، ایمنی، سپیده، (۱۳۹۷). تعیین شماره منحنی و برآورد پتانسیل تولید رواناب حوضه آبخیز حصارک، مجله تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، دوره ۱۸، شماره ۵۱، ۱۳۳-۱۵۰.

حسین‌زاده، محمدمهدی، ایمنی، سپیده، (۱۳۹۷). برآورد ارتفاع رواناب با استفاده از روش شماره منحنی و ابزار Runoff CN-Arc در حوضه آبخیز افجه، مجله تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، دوره ۵، شماره ۲، ۹۱-۱۰۶.

سازمان جنگل‌ها و مراتع استان تهران، (۱۳۹۵). نقشه کاربری اراضی، شمال تهران، مقیاس ۱:۲۵۰۰۰.

شامحمدی حیدری، زمان، (۱۳۸۱). کاربرد مدل‌های تجربی برآورد عمق رواناب سالانه در حوضه‌های آبریز شرق جلگه خوزستان، ششمین سمینار مهندسی رودخانه، ۱-۷.

شرکت جهاد تحقیقات آب و انرژی، (۱۳۹۴). طرح جامع احیای منابع طبیعی اراضی مشرف به منطقه ۵ شهرداری تهران، گزارش هیدرولوژی.

شهریاری، مهرداد، محسن‌زاده، هرمز، محسن‌زاده، اشکان، (۱۳۹۵). بهینه‌سازی تجربی برآورد رواناب سالانه در حوضه‌های فاقد ایستگاه هیدرومتری (مطالعه موردی: حوضه رودخانه سرخاب)، پنجمین کنفرانس ملی توسعه پایدار در علوم جغرافیا و برنامه‌ریزی، معماری و

- Vindhyachal Region using Remote Sensing and GIS**, International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS, Vol 4, Pp 1- 10.
- Bhura, Chirag., Mori, P.R., Singh, N.P., Prakash, Indra., (2015). **Estimation of surface runoff for Ahmedabad urban area using SCS-CN method and GIS**, IJSTE, Int J Sci Technol Eng, Vol 1 (11), Pp 2349-2784.
- Carter, M.R., Gregorich, E.G., (2008). **Soil sampling and methods analysis**, Canadian society of soil science, second edition.
- Kowalik, T., Walega, A., (2015). **Estimation of CN parameter for small agricultural watersheds using asymptotic functions**, Water, Vol 7, Pp 939-955.
- Lewis, D., Singer, M.J., Kate, K.W., (2000). **Applicability of SCS curve number method for a California Woodlands Watershed**, Journal of Soil and Water Conservation, Second Quarter, Pp 48-55.
- Mutereja, K.N., (1986). **Applied Hydrology**, Tata Mc Graw – Hill, Pp 498-506.
- Sahu, R.K., Mishra, S.K., Eldho, T.I., (2010). **Comparative evaluation of SCS-CN-inspired**.
- Saravanan, S., Manjula, R., (2015). **Geomorphology based semi-distributed approach for modeling rainfall-runoff modeling using GIS**, Aquat Proc 4, Pp 908-916.
- Satheeshkumar, S., Venkateswaran, S., Kannan, R., (2017). **Rainfall-runoff estimation using SCS- CN and GIS approach in the Pappiredipatti watershed of the Vaniyar sub basin, South India**, Modeling Earth Systems and Environment, Vol 3 (24), Pp 1- 8.
- Sundar Kumar., P., Rishi, K.H., (2013). **Simulation of rainfall runoss SCS & RRL (case study: Tadepalli Mandal)**, international journal of engineering research and jeneral science, Vol 1, Pp 1- 11.
- Viji, R., Rajesh Prasanna, P., Ilangovan, R., (2015). **GIS Based SCS - CN Method For Estimating Runoff In Kundahpalam**
- مصطفی زاده، رئوف، میرزایی، شهناز، ندیری، پریا، (۱۳۹۶). **تعیین شماره منحنی از رویدادهای بارش و رواناب و تغییرات آن با مؤلفه‌های بارش در یک حوضه آبخیز جنگلی**، نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، دوره ۲۱، شماره ۴، ۲۸-۱۵.
- مددی، المیرا، ملکی، محسن، (۱۳۹۵). **بررسی رواناب سالانه با روش‌های تجربی در حوضه آبخیز اندبیل، شهرستان خلخال، پنجمین همایش سالانه سطح آبگیر باران، گیلان، ۱-۷.**
- مهدوی، محمد، (۱۳۹۰). **هیدرولوژی کاربردی**، جلد دو، چاپ هفتم، تهران، انتشارات دانشگاه تهران، ۴۲۴ ص.
- نصرتی، کاظم، (۱۳۹۳). **جزوه درسی خاک و منابع ارضی**، تهران، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده علوم زمین.
- نصرتی، کاظم، احمدی، محمود، ثروتی، محمدرضا، مزبانی، مهدی، (۱۳۹۲). **تعیین عوامل مؤثر بر سیل‌خیزی حوضه آبخیز دره شهر براساس مناطق همگن هیدرولوژیک**، مجله آمایش جغرافیایی فضا، سال ۳، شماره ۸، ۱۳۶-۱۱۹.
- نگارش، حسین، ویسی، جلیل، (۱۳۹۱). **تجزیه و تحلیل تغییرات بارش در سیل‌خیزی حوضه آبریز رودخانه راوند (منطقه اسلام‌آباد غرب - استان کرمانشاه)**، فصلنامه پژوهشی برنامه‌ریزی منطقه‌ای، دوره ۳، شماره ۱۱، ۷۹-۹۸.
- Anubha, T., Singh, A.K., Rakesh, V., (2015). **SCS CN Runoff Estimation for**

a case study of Krishnagiri District,
Tamilnadu. Int J Sci Res 5 (3), Pp 2319-
7064.

Watershed, Earth Sciences Research
Journal, Vol 19, Pp 59- 64.

Vinithra, R., Yeshodha, L., (2016). **Rainfall -
runoff modelling using SCS-CN method:**