

Research Paper

Estimation of Subsurface Flow of Hillslopes Using of Nash and SCS Models

Hossein Fariborzi¹, Touraj Sabzevari^{1*}, Reza Mohammad pour¹

1. Department of Civil Engineering, Estahban Branch, Islamic Azad University, Estahban, Iran

Received: 2020/10/12

Revised: 2020/11/10

Accepted: 2021/01/03

Use your device to scan and read the article online



DOI:

10.30495/wej.2021.26286.2273

Keywords:

Subsurface flow, Nash, SCS, hillslope

Abstract

Introduction: Subsurface flow estimation (SUF) is important in many catchments with suitable vegetation and high soil permeability and plays an essential role in the production of direct runoff in the basin. The concept of SUF in soil is even more complex compared to surface flow, so the presentation of SUF prediction models of basins with simple and practical methods is important.

Methods: In this study, SCS and Nash surface runoff precipitation models were used to estimate the subsurface flow of the catchment hillslopes. From the unit hydrograph equations of the two models, which are a function of the subsurface travel time and the amount of penetration, equations were presented to calculate the actual subsurface travel time of the hillslopes for the use of the models.

Findings: For verification of the results, the laboratory rain model with the ability to measure the flow rate of surface and subsurface hillslopes was used. The average error of SCS model compared to the laboratory model in estimating surface runoff peak is 7.8% and in estimating subsurface flow is 6.7% and the average error of Nash model in estimating runoff peak is equal to 11.21% and in estimating subsurface flow is 11.32%. The effect of slope and hydraulic conductivity of hillslopes on SUF hydrograph was also evaluated by two models.

Citation: Fariborzi H, Sabzevari T, Mohammad pour R. Estimation of subsurface flow of hillslopes using of Nash and SCS models. Water Resources Engineering Journal. 2021; 14(50): 17-30.

***Corresponding author:** Touraj Sabzevari

Address: Department of Civil Engineering, Estahban Branch, Islamic Azad University, Estahban, Iran

Tell: +989177151596

Email: tooraj.sabzevari@gmail.com

Extended Abstract

Introduction

Runoff of all hillslopes of catchments consist of three components: surface flow, subsurface flow and base flow. Subsurface flow is a rapid subsurface flow that occurs near a soil surface and is very important in the Dunne-Black mechanism in creating the saturation surface of hillslopes. This subsurface flow eventually enters the surface flow in the saturation zone and joins the creek. The basin flow is a slow subsurface flow that is usually manifested by the infiltration of rainwater into the subsurface layers and the exit of these layers from the earth's surface in rivers. Many rainfall-runoff models such as Nash, SCS, Clark, geomorphological instantaneous unit hydrograph (GIUH) models have been proposed to predict the surface flow of slopes and extensive research has been done on these models. The SCS model, developed by the Soil Conservation Service, is a well-known model used to estimate the surface flow of basins. The results of this model have been evaluated in many catchments around the world.

The basic idea of this study is based on the fact that surface rainfall-runoff models also have the ability to estimate the subsurface flow of catchments and the main difference in the concept of surface and subsurface travel time is excess rainfall and feeding intensity to the aquifer. Surface models estimate surface flow based on excess rainfall and surface travel time, so this feature can be used to estimate subsurface flow based on infiltration rate and subsurface travel time.

Materials and Methods

In this study, SCS and Nash surface rainfall-runoff models were used to estimate the subsurface flow in both the hillslope and catchment dimensions. From the unit hydrograph equations of the two models, which is a function of the subsurface travel time and the amount of penetration, equations were presented to calculate the actual subsurface travel time of the hillslopes for use in the models.

To validate the results of the two models in the hillslope dimension, the results of observational surface and subsurface flow of two laboratory models and the HYDRUS model were used. In order to validate the results of the two models in the basin dimension, information related to sub-basin No. 125 of Walnut Gulch basin and HYDRUS model were used.

Findings

To verify the results, the laboratory rain model with the ability to measure the flow rate of surface and subsurface hillslopes was used. The average error of SCS model compared to the laboratory model in estimating surface flow peak is 7.8% and in estimating subsurface flow is 6.7% and the average error of Nash model in estimating peak surface flow peak is equal to 11.21% and in estimating subsurface flow is 11.32%. The effect of slope and hydraulic conductivity of hillslopes on SUF hydrograph was also evaluated by two models.

Discussion

In this study, the subsurface flow of catchment hillslopes was estimated using two models, Nash and SCS. The use of surface rainfall-runoff models to estimate subsurface flow has been proposed for the first time and requires further research. Subsurface travel time and the amount of feeding depth or infiltration into the soil layer are two important parameters in estimating subsurface flow. To apply the two models, first a rectangular hillslope with a length of 50 meters and a width of 25 and a slope of 0.06 was considered. Sandy soil with a hydraulic conductivity of 0.6 m/h was used. To evaluate the results of both models, the above hillslope was also modeled with HYDRUS software. The error of the subsurface flow peak results in SCS model was 8.7% and in Nash model was 14.5%. The effect of changes in soil hydraulic conductivity and slope on the subsurface hydrograph of the hillslope was evaluated by the model. The impact of both parameters is significant. Then, to verify the results, the results of two laboratory models of hydrological sprinkler were used that the

surface and subsurface flow of the hillslope can be measured separately. In the first model, three slopes of 3, 6 and 9 degrees were considered for the hillslopes with three rainfall intensities of 31.73, 47.6 and 63.46 mm/h for the device. The average error in estimating the runoff peak level was 7.8% and in estimating the subsurface flow was 6.7% by SCS model. In Nash method, the average error in estimating the surface runoff peak was equal to 11.21% and in estimating the subsurface flow was 11.32%. In the second model, three slopes of 1, 5 and 10 degrees were considered for the hillslopes with three rainfall intensities of 11.40, 11.59 and 11.71 mm/h. The mean error in estimating the subsurface flow peak was 7.8% by the SCS model and 7.5% by the Nash model. Finally, models were used to estimate the subsurface flow of sub-basin No. 125 in the Walnut Gulch basin in the United States. The flow peak rate of subsurface flow by Nash and SCS methods for the event was calculated to be 16.4 and 21 lit/sec, respectively. Then, to verify the results in the basin dimension, 12 hillslopes of Walnut Gulch sub-basin were also compared in model HYDRUS software and the output results were compared. The error of the subsurface flow peak results in SCS model was 3.2% and in Nash model was 24.7%.

Conclusion

Rainfall-runoff models also have the ability to estimate the subsurface flow of catchments and the main difference in the concept of surface and subsurface travel time is excess rainfall and feeding intensity to the aquifer. Surface models estimate surface flow based on the amount of excess rainfall and surface travel time, so this feature can be used to estimate subsurface flow based on infiltration rate and subsurface travel time.

Ethical Considerations compliance with ethical guidelines

The cooperation of the participants in the present study was voluntary and accompanied by their consent.

Funding

No funding.

Authors' contributions

Design and conceptualization: Hossein Fariborzi, Tooraj Sabzevari.

Methodology and data analysis: Hossein Fariborzi, Tooraj Sabzevari, Reza Mohammad Pour.

Supervision and final writing: Tooraj Sabzevari.

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

مقاله پژوهشی

تخمین جریان زیرسطحی دامنه‌های حوضه آبریز با استفاده از مدل‌های Nash و SCS

حسین فریبرزی^۱، تورج سبزواری^{*}، رضا محمدپور^۱

۱. گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد استهبان، استهبان، ایران

چکیده

مقدمه: تخمین جریان زیرسطحی (SUF) در بسیاری از حوضه‌های آبریز با پوشش گیاهی مناسب و نفوذ پذیری خاک بالا حائز اهمیت است و نقش اساسی در تولید رواناب مستقیم حوضه دارد. مفهوم SUF در خاک در مقایسه با جریان سطحی هنوز پیچیده‌تر است، لذا ارائه مدل‌های پیش بینی SUF حوضه‌ها با روش‌های ساده و کاربردی بسیار مورد توجه واقع می‌شود.

روش: در این پژوهش از مدل‌های بارندگی رواناب سطحی SCS و Nash برای تخمین جریان زیرسطحی دامنه‌های حوضه آبریز استفاده گردید. از معادلات هیدروگراف واحد دو مدل مزبور که تابعی از زمان پیمایش زیرسطحی و مقدار نفوذ می‌باشد، معادلاتی برای محاسبه زمان پیمایش زیرسطحی واقعی دامنه‌ها جهت استفاده مدل‌ها ارائه شد.

یافته‌ها: برای صحت سنجی از نتایج مدل آزمایشگاهی باران ساز با قابلیت اندازه گیری دبی جریان سطحی و زیرسطحی دامنه مورد استفاده قرار گرفت. متوسط خطای مدل SCS نسبت به مدل آزمایشگاهی در تخمین پیک رواناب سطحی برابر ۷/۸٪ و در تخمین جریان زیرسطحی ۶/۷٪ و متوسط خطای مدل Nash در تخمین پیک رواناب سطحی برابر ۱۱/۲۱٪ و در تخمین جریان زیرسطحی ۱۱/۳۲٪ بوده است. تاثیر شیب و ضریب هدایت هیدرولیکی دامنه‌ها بر روی هیدروگراف SUF توسط دو مدل نیز مورد ارزیابی قرار گرفت.

نتیجه‌گیری: مدل‌های بارندگی-رواناب سطحی نیز توانایی تخمین جریان زیرسطحی حوضه‌های آبریز را دارا هستند و تفاوت اساسی در مفهوم زمان پیمایش سطحی و زیرسطحی، بارش مازاد و شدت تغذیه به آبخوان است. مدل‌های سطحی براساس میزان بارش مازاد و زمان پیمایش سطحی به تخمین رواناب سطحی می‌پردازند، لذا از این قابلیت می‌توان برای تخمین جریان زیرسطحی بر اساس میزان نفوذ و زمان پیمایش زیرسطحی استفاده نمود.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۲۰

تاریخ داوری: ۱۳۹۹/۰۸/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۱۳

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



DOI:

10.30495/wej.2021.26286.2273

واژه‌های کلیدی:

جریان زیرسطحی، Nash، SCS.

* نویسنده مسئول: تورج سبزواری

نشانی: گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد استهبان، استهبان، ایران.

تلفن: ۰۹۱۷۷۱۵۱۵۹۶

پست الکترونیکی: tooraj.sabzevari@gmail.com

مقدمه

رواناب کل دامنه‌های حوضه‌های آبریز از سه جزء رواناب سطحی، جریان زیرسطحی و دبی پایه تشکیل می‌گردد. منظور از جریان زیرسطحی یک جریان زیرسطحی تند است که در نزدیکی یک سطح خاک ایجاد می‌گردد و در مکانیزم دانی-بلاک در ایجاد سطح اشباع دامنه‌ها بسیار اهمیت دارد. این جریان زیرسطحی در نهایت در منطقه اشباع وارد جریان سطحی می‌گردد و به نهر می‌پیوندد. دبی پایه یک جریان زیرسطحی کند است که معمولاً در اثر نفوذ آب باران به لایه‌های زیرزمینی و خروج این لایه‌ها از سطح زمین در رودخانه‌ها نمایان می‌شود. مدل‌های بارندگی-رواناب زیادی مانند مدل Nash، SCS، Clark، هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی (GIUH) در جهت پیش‌بینی رواناب سطحی دامنه‌ها ارائه شده‌اند و تحقیقات وسیعی روی این مدل‌ها انجام گردیده است. مدل SCS که توسط سازمان حفاظت خاک آمریکا ارائه شده است یک مدل مشهور است که برای تخمین رواناب سطحی حوضه‌های فاقد آمار به کار می‌رود. نتایج این مدل در حوضه‌های آبریز بسیاری در دنیا مورد ارزیابی قرار گرفته است ((۱)، (۲)، (۳)، (۴)، (۵)).

ایده اولیه این پژوهش بر این اساس است که مدل‌های بارندگی-رواناب سطحی نیز توانایی تخمین جریان زیرسطحی حوضه‌های آبریز را دارا هستند و تفاوت اساسی در مفهوم زمان پیمایش سطحی و زیرسطحی، بارش مازاد و شدت تغذیه به آبخوان است. مدل‌های سطحی بر اساس میزان بارش مازاد و زمان پیمایش سطحی به تخمین رواناب سطحی می‌پردازند، لذا از این قابلیت می‌توان برای تخمین جریان زیرسطحی بر اساس میزان نفوذ و زمان پیمایش زیرسطحی استفاده نمود.

بررسی پاسخ هیدرولوژیکی زیرسطحی دامنه‌ها توسط مدل‌های عددی در سال‌های گذشته بسیار مرسوم بوده است و هنوز مورد توجه هیدرولوژیست‌ها است. حل معادلات ریچارد و معادلات بوسینسک به صورت عددی جهت تخمین رواناب سطحی و بررسی میزان ذخیره و رطوبت خاک بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد ((۶)، (۷)، (۸)، (۹)). یک مدل couple از معادلات مدل ریچارد و بوسینسک جهت بررسی جریان زیرسطحی در محیط اشباع-غیراشباع دامنه‌ها ارائه نمود (۱۰). مدل‌سازی عددی جریان زیرسطحی با استفاده از حل معادلات Richards و Boussinesq در نرم افزار Hydrus یکی دیگر از تکنیک‌های تخمین جریان زیرسطحی در دامنه‌ها است ((۱۱)).

یکی از روش‌های تخمین رواناب سطحی حوضه‌های فاقد آمار سیلاب، مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی (GIUH) است. این مدل‌ها معمولاً بر اساس ضرایب درجه بندی استراهلر که معمولاً با استفاده از نرم افزارها و افزونه هیدرولوژیکی GIS محاسبه می‌گردند کار می‌کنند ((۱۲)، (۱۳)، (۱۴) و (۱۵)، (۱۶)).

مدل‌های هیدروگراف واحد لحظه‌ای کاربرد مناسبی در پیش‌بینی جریان زیرسطحی دامنه‌های حوضه آبریز داشته‌اند. (۱۷) بر اساس مکانیسم دانی-بلاک، روش GIUH جریان سطحی حوضه‌های آبخیز فاقد آمار را برای پیش‌بینی هیدروگراف جریان زیرسطحی حوضه‌های آبریز گسترش داد. اساس روش پیشنهادی (۱۷) بر مبنای جداسازی منطقه

اشباع و غیراشباع دامنه‌های حوضه بود. جریان سطحی در منطقه اشباع و جریان زیرسطحی در کل صفحه در نظر گرفته شد و زمان پیمایش هر دو منطقه محاسبه می‌گردید. مدل پیشنهادی برای تخمین رواناب سطحی و زیرسطحی حوضه هنگ-چی در کشور تایوان به کار گرفته شد. (۱۶) مدل GIUH ارائه شده توسط (۱۷) را اصلاح نموده و مدلی را برای جداسازی منطقه اشباع و غیراشباع صفحات حوضه ارائه نمود. در این مدل اصلاح شده جریان سطحی از هم‌گشت (Convolution) بارش مازاد در هیدروگراف واحد لحظه‌ای جریان سطحی ایجاد می‌گردد و هیدروگراف جریان زیرسطحی از هم‌گشت (Convolution) هیدروگراف واحد لحظه‌ای زیرسطحی حوضه در مقدار نفوذ ایجاد می‌گردد. مدل اصلاح شده برای پیش‌بینی هیدروگراف رواناب سطحی و زیرسطحی حوضه کسلیان در شمال ایران به کار گرفته شد.

در تحقیقات دیگر یک مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای برای محاسبه رواناب سطحی و زیرسطحی دامنه‌های زیرحوضه شماره ۱۲۵ حوضه Walnut gulch آمریکا ارائه شد (۱۸). در این مدل شکل هندسی دامنه‌های مرکب که شکل پلان (همگرایی، واگرایی) و انحنا سطح دامنه (محدب، مقعر) حوضه است نیز در محاسبات مدل در نظر گرفته شد. برای جداسازی منطقه با جریان سطحی و زیرسطحی در دامنه‌ها از یک مدل اشباع‌پذیری دامنه‌ای مرکب ارائه شده توسط (۱۹) استفاده گردید.

در مطالعه‌های دیگر، شبیه‌سازی عددی حرکت آب در خاک تحت شرایط میدانی و آزمایشگاهی مورد بررسی و نتایج با مدل HYDRUS-2D مورد ارزیابی قرار گرفت که در نهایت با استفاده از شاخص‌های آماری مطابقت بین نتایج بسیار خوب ارزیابی گردید (۲۰).

در پژوهشی دیگر در مرکز تحقیقات کشاورزی جنوب کرمان به بررسی و پیش‌بینی حرکت آب در خاک با استفاده از مدل‌های HYDRUS-1D و SWAP و مقایسه نتایج این دو مدل با نتایج آزمایشگاهی پرداختند. که در نهایت براساس شاخص‌های آماری به این نتیجه رسیدند که هر دو مدل با ضریب همبستگی بالای ۸۳ درصد، ارزیابی خوبی در تخمین حرکت آب در خاک نسبت به مدل مشاهداتی دارند (۲۱).

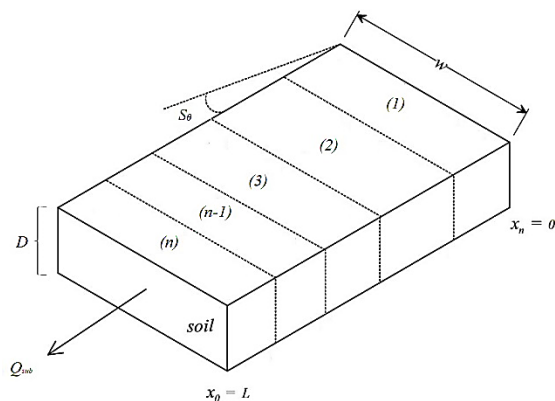
با ارزیابی مدل HYDRUS-2D در نفوذ آب به خاک با استفاده از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی در لایسمتر وزنی و بهینه کردن پارامترهای مدل، درصد رطوبت‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در یک دوره ۳۰ روزه همخوانی بسیار بالایی را نشان دادند. براساس نتایج به دست آمده مقدار R^2 به طور عموم بین ۰/۹۲ و ۰/۹۴ و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برابر ۰/۰۲۳۶ مترمکعب بر متر مکعب محاسبه و همچنین با استفاده از تخمین‌های مختلف به روش شبکه عصبی، تأثیر مشخصات هیدرولیکی خاک بر روی شبیه‌سازی‌های مدل Hydrus-2D مورد ارزیابی قرار گرفت (۲۲).

در تحقیق دیگر به بررسی روند تغییرات نفوذ آب در خاک توسط دو نرم افزار HYDRUS-2D و SEEP-W و مقایسه نتایج آن‌ها پرداخته، که در نهایت پس از اجرای دو مدل، نتایج دو بعدی تغییرات رطوبت در عمق‌های مختلف همراه با جذب برای دوره آزمایش در زمان‌های مختلف ارائه شده بسیار به هم نزدیک گزارش گردیده است (۲۳).

تحقیقاتی در دنیا به حساب می‌آید. کلیه اطلاعات مربوط به حوضه توسط سازمان USDA سرویس تحقیقاتی کشاورزی در سایت اینترنتی <http://www.ars.usda.gov> موجود می‌باشد. اطلاعات مربوط به ایستگاههای باران سنجی ثابت و ایستگاههای هیدرومتری در این سایت قابل مشاهده می‌باشد. زیرحوضه شماره ۱۲۵ حوضه آبریز مزبور دارای مساحت ۷/۱۴ هکتار می‌باشد.

۲-۲- روش تحقیق

در این بخش به توسعه مدل Nash جهت تخمین جریان زیرسطحی دامنه‌های حوضه‌های آبریز پرداخته می‌شود. اگر یک دامنه از حوضه، مطابق شکل (۲) به صورت یک دامنه مستطیل شکل و به صورت یک جعبه خاک بر روی سنگ بستر در نظر گرفته شده باشد، طول دامنه L و عمق خاک D است.



شکل ۲- یک لایه از خاک دامنه با جریان زیرسطحی

بر اساس مدل (۲۵)، یک لایه از خاک دامنه به صورت n مخزن متوالی در نظر گرفته شد که هر مخزن جریان زیرسطحی خود را به‌عنوان ورودی به مخزن بعدی می‌ریزد. هیدروگراف واحد لحظه‌ای کل دامنه به صورت زیر است:

$$u(t) = \frac{1}{k\Gamma(n)} \left(\frac{t}{k}\right)^{n-1} e^{-t/k} \quad (1)$$

که در آن $u(t)$ هیدروگراف واحد لحظه‌ای، k ضریب ذخیره ناش، n تعداد مخازن زیرسطحی خاک و $\Gamma(n)$ تابع گاما است. پارامتر k در رواناب سطحی و زیرسطحی تابعی از زمان پیمایش دامنه در جریان سطحی و زیرسطحی است. اگر زمان پیمایش زیرسطحی دامنه مطابق شکل (۱)، T_c باشد، مقدار k به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$k = \frac{T_c}{n}$$

پارامتر n تعداد مخازن است و در رواناب سطحی بر اساس هایتوگراف بارندگی و هیدروگراف رواناب سطحی مشاهداتی به روش مومنت محاسبه می‌گردد. در حوضه‌های فاقد آمار مقدار n به روش GIUH محاسبه می‌گردد. یک سری تحقیقات در جریان سطحی بر روی پارامتر n انجام گرفته است و توسط بسیاری از دانشمندان در حوضه‌های فاقد

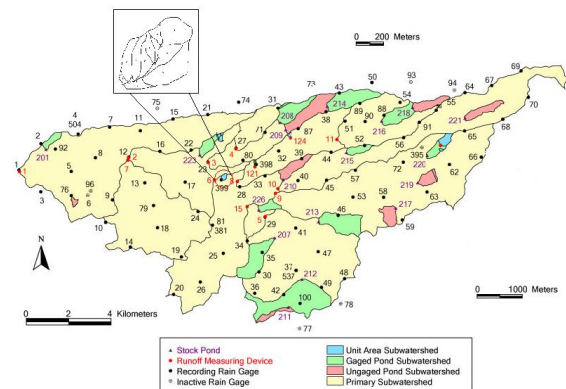
شبه سازی نفوذ آب در خاک با استفاده از مدل HYDRUS-1D و داده‌های صحرائی توسط (۲۴) مورد بررسی قرار گرفت و پس از بهینه سازی پارامترهای خاک با استفاده از نرم افزار HYDRUS به شبه سازی تغییرات نفوذ با زمان پرداختند. در نهایت نتایج نشان داد که نرم افزار HYDRUS-1D نفوذ تجمعی را به خوبی شبه سازی کرده و با گذشت زمان میزان نفوذ را کمی بیشتر از داده‌های مزرعه‌ای پیش بینی نموده است.

در پژوهش دیگر، مفهوم منحنی‌های ایزوکرون (همزمان پیمایش) (Isochron) توسط (۷) داخل خاک تعریف و هیستوگرام زمان-مساحت زیرسطحی یک دامنه از حوضه را براساس معادلات زمان پیمایش واقعی زیرسطحی محاسبه شد. هیدروگراف جریان زیرسطحی دامنه‌ها توسط نتایج یک مدل آزمایشگاهی باران ساز و شبه سازی با مدل HYDRUS 2D-3D مقایسه و مورد ارزیابی قرار گرفت. از مهمترین اهداف این پژوهش، بررسی امکان تغییر معادلات مدل‌های هیدروگراف واحد سطحی در جهت تخمین هیدروگراف جریان زیرسطحی دامنه‌های حوضه‌های آبریز و همچنین بکارگیری مدل‌های Nash و SCS جهت تخمین جریان زیرسطحی حوضه‌های آبریز می‌باشد.

مواد و روش‌ها

۱-۲- طرح مطالعاتی

در این طرح مطالعاتی، از اطلاعات مربوط به زیر حوضه شماره ۱۲۵ حوضه آبریز Walnut Gulch در ایالت Arizona آمریکا استفاده شد. جریان سطحی و زیرسطحی دامنه‌های مرکب این زیرحوضه قبلا توسط (۱۸) با استفاده از روش هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۱ حوضه آبریز مزبور را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت زیرحوضه شماره ۱۲۵ حوضه آبریز Walnut Gulch

حوضه Walnut Gulch در جنوب شرقی ایالت آریزونا آمریکا قرار دارد. مساحت کل حوضه ۱۵۰ کیلومتر مربع و معمولا پوشیده از چمن و بوته‌های گیاهی می‌باشد. این حوضه یکی از مشهورترین حوضه‌های

آمار مقدار پارامتر n برابر با $4/7$ پیشنهاد گردیده است (۲۶)، (۲۷)، (۲۸).

با در نظر گرفتن مقدار n در حوضه‌های فاقد آمار برابر $4/7$ نتایج بدست آمده از پیش‌بینی رواناب سطحی حوضه با نتایج مشاهداتی نزدیک‌تر است. در این مطالعه نیز جهت تخمین جریان زیرسطحی دامنه‌ها با استفاده از مدل Nash، مقدار n برابر $4/7$ در نظر گرفته شد. بنابراین مقدار k طبق معادله‌ی ۱ به صورت $k = \frac{T_c}{4.7}$ محاسبه می‌گردد. اگر هایتوگراف نفوذ ناشی از بارندگی در هیدروگراف واحد لحظه‌ای زیرسطحی Nash هم‌گشت (Convolution) گردد، هیدروگراف جریان زیرسطحی دامنه مطابق معادله‌ی (۲) محاسبه می‌گردد:

$$Q(t) = \sum_{i=1}^m I_i(t) u[t - (i-1)\Delta t] \quad (2)$$

که در آن $I_i(t)$ مقدار نفوذ است و Δt گام زمانی و t زمان است.

۳-۲- زمان پیمایش زیرسطحی

با در نظر گرفتن مفهوم celerity در جریان زیرسطحی، جهت محاسبه‌ی زمان پیمایش زیرسطحی یک دامنه می‌توان از معادله زیر استفاده نمود (۲۹):

$$T_c = \frac{\theta_e \cdot L}{K_s \sin \beta} \quad (3)$$

که در آن θ_e ضریب ذخیره موثر که توسط پر شدن و خالی شدن یک ستون واحد از لایه آبدار ایجاد می‌گردد و در آب‌های زیرزمینی به آبدی ویژه مشهور است.

۴-۲- مدل هیدروگراف واحد مصنوعی SCS

روش هیدروگراف واحد مصنوعی SCS که توسط سازمان حفاظت خاک آمریکا برای اولین بار ارائه گردید کاربرد وسیعی جهت تخمین رواناب سطحی حوضه‌های آبریز دارد. اگر یک بارندگی به مدت t_r بر روی سطح دامنه ببارد و زمان تأخیر و تمرکز دامنه به ترتیب t_1 و t_c باشد، زمان پیک هیدروگراف واحد SCS به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$t_p = \frac{t_r}{2} + t_1 = \frac{t_r}{2} + 0.6t_c \quad (4)$$

مقدار دبی اوج هیدروگراف واحد برای ارتفاع رواناب R (cm) به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$Q_p = \frac{2.083 AR}{t_p} \quad (5)$$

که در آن A سطح دامنه (km^2)، Q_p دبی پیک ($\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$) است، t_p زمان پیک (hr) و R ارتفاع رواناب سطحی (cm) است.

شکل ۳- هیدروگراف پیش‌بینی جریان زیرسطحی

مقدار حداکثر جریان زیرسطحی طبق روش SCS برابر $1/26$ لیتر بر ثانیه و طبق روش Nash، $1/18$ لیتر بر ثانیه محاسبه گردید. سپس همین دامنه در نرم‌افزار HYDRUS جهت بررسی نتایج مدل شده و حداکثر جریان زیرسطحی $1/28$ لیتر بر ثانیه محاسبه گردید.

HYDRUS مدلی است که در حالت‌های دو بعدی و سه بعدی به دلیل در نظر گرفتن کلیه پارامترهای تأثیرگذار مانند شیب و رطوبت اولیه خاک، در پیش‌بینی رواناب زیرسطحی بسیار مؤثر است.

اگر مقادیر t_p و Q_p در هیدروگراف واحد بدون بعد ضرب گردد، هیدروگراف رواناب سطحی ناشی از این بارندگی محاسبه می‌گردد. اگر بخواهید از مدل SCS جهت تخمین هیدروگراف جریان زیرسطحی دامنه استفاده نمایید، باید در معادله‌ی (۴) از زمان تمرکز جریان زیرسطحی (معادله ۳) استفاده گردد. حتماً برای محاسبه‌ی مقدار حداکثر جریان سطحی (Q_p) از معادله‌ی (۵) به جای پارامتر R باید مقدار نفوذ حجمی (F) در نظر گرفته شود.

اگر یک بارندگی با مقدار P به روی سطح زمین ببارد مقدار نفوذ از معادله‌ی زیر محاسبه می‌گردد:

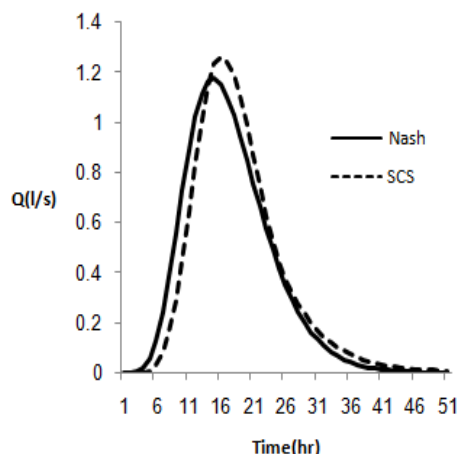
$$F = P - I_a - R \quad (6)$$

که در آن R ارتفاع رواناب، I_a نفوذ اولیه و P مقدار بارندگی تجمعی است.

۳-۱- کاربرد مدل و نتایج

۳-۱-۱- تحلیل حساسیت مدل

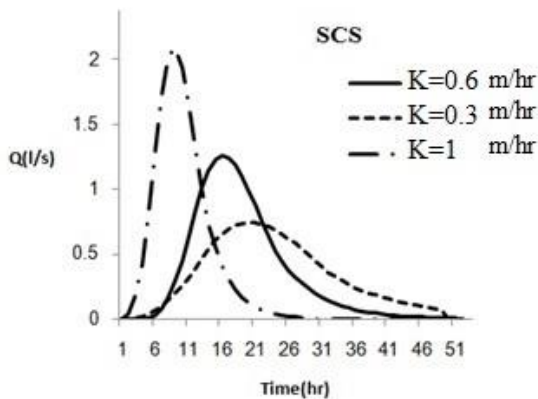
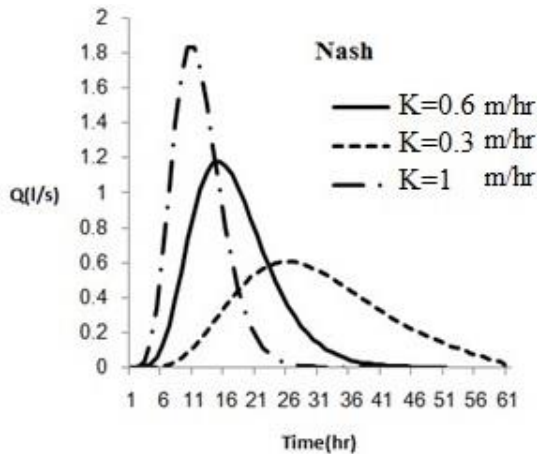
در این بخش از مقاله به تخمین جریان زیرسطحی دامنه‌های حوضه‌های آبریز طبق دو مدل SCS و Nash پرداخته می‌شود. برای کاربردی کردن دو مدل مزبور ابتدا یک دامنه مستطیل شکل به طول ۵۰ متر و عرض ۲۵ متر و شیب 0.06 در نظر گرفته شد. خاک از نوع ماسه‌ای با ضریب هدایت هیدرولیکی 0.6 متر بر ساعت می‌باشد. شدت تغذیه بارندگی 10 میلی‌متر بر ساعت به مدت 5 ساعت به صورت یکنواخت در نظر گرفته شد. زمان تمرکز جریان زیرسطحی برابر $13/89$ ساعت محاسبه گردید. هیدروگراف جریان زیرسطحی طبق دو روش SCS و Nash به صورت شکل ۳ است.



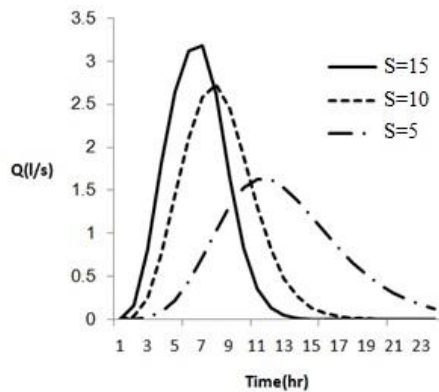
نسخه‌های اصلی مدل HYDRUS توسط سیمونک و همکاران در سال ۲۰۰۵ و ۲۰۰۸ تولید شده است.

مدل HYDRUS از معادله ریچاردز برای حل معادلات جریان در محیط متخلخل استفاده می‌کند. این معادله در رابطه (۷) نشان داده شده است (۲۰):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[rK(h) \frac{\partial h}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right] \quad (7)$$



شکل ۴- تاثیر ضریب هدایت هیدرولیکی خاک بر روی هیدروگراف جریان زیرسطحی



شکل ۵- تاثیر زاویه شیب بر روی جریان زیرسطحی به روش Nash

۳-۲- مدل آزمایشگاهی و نتایج

برای صحت سنجی نتایج دو مدل، از نتایج جریان سطحی و زیرسطحی مشاهداتی یک مدل آزمایشگاهی باران ساز استفاده گردید. مدل آزمایشگاهی باران ساز قابلیت اندازه‌گیری هیدروگراف جریان سطحی و زیرسطحی یک دامنه به صورت کاملاً جداگانه را دارد. شکل ۶ نمایی از این دستگاه را نشان می‌دهد. دستگاه باران ساز (شکل ۶) با مقداری

در این معادله θ رطوبت حجمی خاک ($L^3.L^{-3}$)، h بار فشاری آب خاک ($L.T^{-1}$)، t زمان، K ضریب هدایت هیدرولیکی خاک ($L.T^{-1}$) می‌باشد. جزییات هیدرولیکی خاک با استفاده از معادلات (۳۰) به شرح زیر مدل شد:

$$h = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h > 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$k(h) = K_s S_e' \left[1 - \left(1 - S_e'^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (9)$$

$$S_e' = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad m = 1 - \frac{1}{n} \quad (10)$$

جدول ۱- مقایسه‌ی نتایج مدل SCS و Nash با مدل HYDRUS برای دامنه شیبه سازی شده

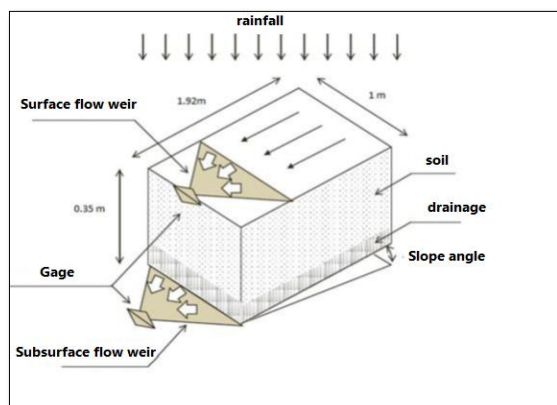
شیب (درصد)	جریان زیرسطحی (lit/Sec)			
	SCS	HYDRUS	خطا (%)	Nash HYDRUS خطا (%)
۶	۱/۲۶	۱/۳۸	۸/۷	۱/۱۸ ۱/۳۸ ۱۴/۵

برای محاسبه‌ی درصد خطای پیک رواناب‌ها از معادله‌ی زیر استفاده شده است:

$$Err = \frac{Q_{pc} - Q_{p0}}{Q_{p0}} * 100 \quad (11)$$

که در آن Q_{pc} دبی پیک محاسباتی و Q_{p0} دبی پیک مشاهداتی است. ضریب هدایت هیدرولیکی خاک (k) یک پارامتر بسیار تاثیر گذار بر روی زمان پیمایش و جریان زیرسطحی است. شکل ۴ تاثیر ضریب هدایت هیدرولیکی خاک به ازای مقادیر $k=1$ m/hr تا $k=0.3$ m/hr بر روی هیدروگراف جریان زیرسطحی را طبق مدل Nash و SCS را نشان می‌دهد. هرچه مقدار k بیشتر می‌گردد، زمان پیمایش کمتر می‌گردد و منحنی زیرسطحی جمع‌تر شده و مقدار دبی زیرسطحی افزایش می‌یابد. برعکس با افزایش ضریب k به علت افزایش زمان پیمایش شکل هیدروگراف باز شده و در زمان‌های طولانی‌تری رواناب زیرسطحی را تخلیه می‌کند. شیب دامنه‌ها نیز یک پارامتر موثر بر جریان است. شکل ۵ تاثیر زاویه شیب دامنه‌ها بر هیدروگراف زیرسطحی به ازای زاویه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه را به روش Nash نشان می‌دهد. براساس نتایج هرچه مقدار زاویه شیب کمتر باشد زمان پیمایش بیشتر و دبی جریان زیرسطحی کمتر می‌گردد.

خاک از زمین‌های کشاورزی شهر استهبان در فارس با بافت ماسه لوم-دار با ۸۵/۶ درصد ماسه، ۱۴/۱۳ درصد لای و ۰/۲۷ درصد رس پر شد. طول مخزن خاک ۱۹۲ سانتی‌متر، عرض ۱۰۰ سانتی‌متر و عمق خاک ۳۵ سانتی‌متر می‌باشد. یک لایه‌ی زهکش شن به ضخامت ۵ سانتی‌متر در کف مخزن ریخته شد. ضریب هدایت هیدرولیکی خاک در آزمایشگاه خاک ۳/۶۷ سانتی‌متر بر ساعت محاسبه گردید. جریان سطحی و زیرسطحی توسط دو سرریز جداگانه اندازه‌گیری شد. شکل ۷ شماتیکی از اجزاء دستگاه باران ساز و ابعاد دستگاه را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه فقط پیک جریان سطحی و زیرسطحی دستگاه در دسترس بود نتایج پیک‌ها با هم مقایسه گردید.



شکل ۷- شماتیکی از دستگاه باران ساز هیدرولوژی



شکل ۶- نمایی کلی از دستگاه باران ساز هیدرولوژی

سه شیب ۳، ۶ و ۹ درجه برای دامنه‌ها با سه شدت بارش‌های ۳۱/۷۳، ۴۷/۶ و ۶۳/۴۶ میلی‌متر بر ساعت برای دستگاه در نظر گرفته شد. جدول ۲ نتایج مدل آزمایشگاهی و مدل SCS برای پیک جریان سطحی و زیرسطحی را نشان می‌دهد.

جدول ۲- مقایسه نتایج مدل آزمایشگاهی و نتایج مدل SCS

شدت بارندگی I mm/h	شیب S %	جریان زیرسطحی (lit/min)			جریان سطحی (lit/min)		
		SCS	مشاهداتی	درصد خطای پیک %	SCS	مشاهداتی	درصد خطای پیک %
۳۱/۷۳	۳	۰/۱۱۱	۰/۱۱۶	۴/۳	۰/۸۱۵	۰/۸۵	۴/۱
۳۱/۷۳	۶	۰/۱۰۵	۰/۱۱۲	۶/۳	۰/۸۲۲	۰/۸۷	۵/۵
۳۱/۷۳	۹	۰/۱۰۵	۰/۱۱۲	۶/۳	۰/۸۲۵	۰/۸۹	۷/۳
۴۷/۶	۳	۰/۱۲۰	۰/۱۲۹	۷	۱/۲۷۰	۱/۳۵	۵/۹
۴۷/۶	۶	۰/۱۲۰	۰/۱۳۰	۷/۷	۱/۱۲۷	۱/۳۷	۱۷/۷
۴۷/۶	۹	۰/۱۲۰	۰/۱۱۴	۵/۳	۱/۲۷۰	۱/۳۹	۸/۶
۶۳/۴۶	۳	۰/۱۲۳	۰/۱۳۲	۶/۸	۱/۷۳۰	۱/۸۵	۶/۵
۶۳/۴۶	۶	۰/۱۲۳	۰/۱۳۵	۸/۹	۱/۷۳۰	۱/۸۶	۷/۰
۶۳/۴۶	۹	۰/۱۰۵	۰/۱۱۴	۷/۹	۱/۷۵۰	۱/۸۹	۷/۴

نیز نتایج مدل Nash در تخمین جریان سطحی و زیرسطحی نشان می‌دهد. در این روش نیز متوسط خطا در تخمین پیک رواناب سطحی برابر ۱۱/۲۱٪ و در تخمین جریان زیرسطحی ۱۱/۳۳٪ بوده است.

جدول ۲ نتایج مدل SCS در تخمین جریان سطحی و زیرسطحی دامنه‌ها را نشان می‌دهد. متوسط خطا در تخمین پیک رواناب سطحی برابر ۷/۸٪ و در تخمین جریان زیرسطحی ۶/۷٪ بوده است. جدول ۳

شدت بارندگی از ۴.۶ تا ۱۲.۲۶ میلی متر در ساعت انجام شد. جدول ۴ مقادیر دبی اوج زیرسطحی دامنه مورد نظر را برای ۳ شیب ۱ درجه، ۵ درجه و ۱۰ درجه و سه شدت بارندگی ۱۱.۴، ۱۱.۵۹ و ۱۱.۷۱ میلی متر در ساعت نشان می دهد.

برای اعتبار سنجی بیشتر، از نتایج مدل آزمایشگاهی دیگری نیز در این پژوهش استفاده شده است. (۳۱) از یک مدل شبیه ساز بارش مانند شکل ۷ استفاده و تأثیر شیب زمین را بر جریان سطحی و زیرسطحی بررسی کرده است. طول مدل ۱.۵۲ متر، عرض ۱.۲۲ متر و عمق خاک ۰.۷۸ متر است. خاک از نوع لوم و هدایت هیدرولیک خاک ۸.۱۵ میلی متر در ساعت است. این آزمایشات برای سه شیب ۱، ۵ و ۱۰ درجه و

جدول ۳- مقایسه‌ی نتایج مدل آزمایشگاهی با مدل Nash

شدت بارندگی I	شیب S	جریان زیرسطحی (lit/min)			جریان سطحی (lit/min)		
		Nash	مشاهداتی	درصد خطای پیک %	Nash	مشاهداتی	درصد خطای پیک %
۳۱/۷۳	۳	۰/۱۱۴	۰/۱۱۶	۱/۷	۰/۸۳۴	۰/۸۵۰	۱/۹
۳۱/۷۳	۶	۰/۱۰۴	۰/۱۱۲	۷/۱	۰/۸۰۱	۰/۸۷۰	۷/۹
۳۱/۷۳	۹	۰/۰۸۹	۰/۱۱۲	۲۰/۵	۰/۸۱۰	۰/۸۹۰	۹/۰
۴۷/۶	۳	۰/۱۲۳	۰/۱۲۹	۴/۷	۱/۲۲۷	۱/۳۵۰	۹/۱
۴۷/۶	۶	۰/۱۱۸	۰/۱۳۰	۹/۲	۱/۲۳۴	۱/۳۷۰	۹/۹
۴۷/۶	۹	۰/۰۸۹	۰/۱۱۴	۲۱/۹	۱/۱۶۲	۱/۳۹۰	۱۶/۴
۶۳/۴۶	۳	۰/۱۲۶	۰/۱۳۲	۴/۵	۱/۷۰۵	۱/۸۵۰	۷/۸
۶۳/۴۶	۶	۰/۱۲۱	۰/۱۳۵	۱۰/۴	۱/۵۶۹	۱/۸۶۰	۱۵/۶
۶۳/۴۶	۹	۰/۰۸۹	۰/۱۱۴	۲۱/۹	۱/۴۵۰	۱/۸۹۰	۲۳/۳

جدول ۴- مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی (31) با مدل SCS و Nash

شدت بارندگی I	شیب S	جریان زیرسطحی (lit/min)			جریان زیرسطحی (lit/min)		
		SCS	مشاهداتی	درصد خطای پیک %	NASH	مشاهداتی	درصد خطای پیک %
۱	۱۱/۴۰	۰/۲۳۵	۰/۲۵۲	۶/۷	۰/۲۲۹	۰/۲۵۲	۹/۱
۵	۱۱/۵۹	۰/۱۱۳	۰/۱۲۴	۸/۸	۰/۱۱۵	۰/۱۲۴	۷/۲
۱۰	۱۱/۷۱	۰/۰۵۷	۰/۰۶۲	۸/۰	۰/۰۵۸	۰/۰۶۲	۶/۴

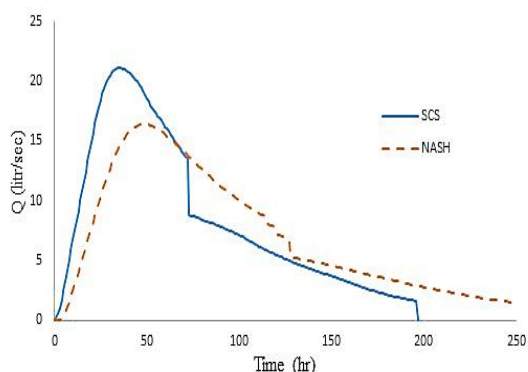
زیرحوضه مزبور از ۱۲ دامنه با اشکال هندسی متفاوت تشکیل گردیده است. شکل ۸ دامنه‌های زیرحوضه شماره ۱۲۵ را نشان می دهد. آبراهه اصلی مسیر AO می باشد. مشخصات دامنه‌ها از جمله طول و زاویه شیب و مساحت هر دامنه مطابق جدول شماره ۵ می باشد. پوشش گیاهی حوضه بیشتر از نوع چمن می باشد. ضریب هدایت هیدرولیکی خاک بر اساس نقشه GIS خاک منطقه (ماسه ریزدانه)، حدود ۰/۱۴ متر بر ساعت برای خاک منطقه در نظر گرفته شد.

جدول ۴ نتایج مدل SCS و Nash در تخمین جریان زیرسطحی دامنه‌ها را در مقایسه با مدل آزمایشگاهی (۳۱) نشان می دهد. متوسط خطا در تخمین جریان زیرسطحی در مدل SCS، ۷/۸٪ و در مدل Nash، ۷/۵٪ بوده است.

۴- نتایج تخمین جریان زیرسطحی زیر حوضه شماره ۱۲۵ Walnut Gulch

۱۰	۰/۰۰۷۶۶	۱۴۴	۵/۲	۶۸
۱۱	۰/۰۱۸۱۸	۲۹۰	۴/۱۴	۱۷۸
۱۲	۰/۰۰۳۵۷	۱۱۴	۵/۵	۵۱

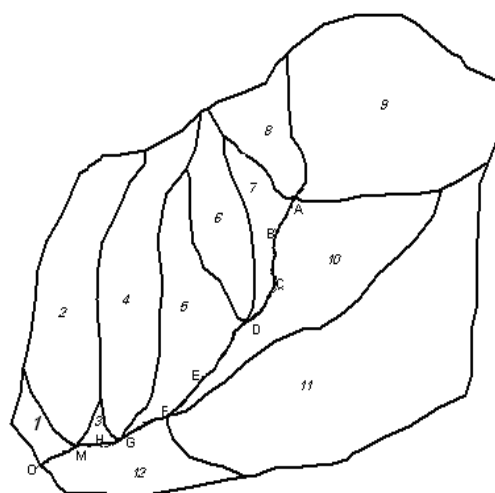
هیدروگراف جریان زیرسطحی زیرحوضه مزبور طبق روش Nash و SCS برای مقدار نفوذ ۱۰ سانتی متر به صورت شکل ۹ است:



شکل ۹- هیدروگراف جریان زیرسطحی زیرحوضه ۱۲۵

طبق روش Nash و SCS

مقدار حداکثر دبی جریان زیرسطحی به روش Nash و SCS برای رویداد مزبور به ترتیب ۱۶/۴ و ۲۱ لیتر بر ثانیه محاسبه شده است. سبزه‌ری و نوروز پور (۲۰۱۴) نیز مقادیر حداکثر پیک رواناب زیرسطحی این حوضه را بین ۱۶ تا ۳۰ لیتر بر ثانیه به روش هیدروگراف واحد لحظه ای ژئومورفولوژیکی محاسبه نموده‌اند. در ادامه جهت صحت سنجی نتایج هر دو مدل SCS و Nash هر ۱۲ دامنه زیرحوضه آبریز شماره ۱۲۵ Walnut Gulch در نرم افزار HYDRUS مدل سازی شده و هیدروگراف جریان زیرسطحی کل زیرحوضه که مجموع ۱۲ دامنه می‌باشد در جدول ۶ نشان داده شده است.



شکل ۸- دامنه‌های زیر حوضه شماره ۱۲۵ حوضه آبریز Walnut Gulch

جدول ۵- اطلاعات هندسی دامنه های زیر حوضه شماره

شماره دامنه	مساحت (km ²)	طول حوضه (m)	زاویه شیب (درجه)	زمان پیمایش (hr)
۱	۰/۰۰۰۹۳	۵۵	۸/۲۸	۱۶/۳
۲	۰/۰۰۷۲۴	۲۰۰	۴/۸۶	۵۰/۴
۳	۰/۰۰۰۳۲	۲۸	۳	۲۲/۹
۴	۰/۰۰۶۶۹	۲۲۰	۴/۱۶	۱۳۵
۵	۰/۰۰۵۰۱	۱۳۶	۵	۶۶/۷
۶	۰/۰۰۳۴۹	۱۳۸	۴/۶	۷۳/۵
۷	۰/۰۰۱۹۵	۸۵	۶	۳۴/۷
۸	۰/۰۰۲۸۰	۹۵	۵/۴	۴۳
۹	۰/۰۱۳۵۷	۲۰۰	۴/۲۹	۱۱۴

جدول ۶- مقایسه‌ی نتایج مدل Nash و SCS با مدل HYDRUS در حوضه آبریز Walnut Gulch

حوضه آبریز	جریان زیرسطحی (lit/Sec)			جریان زیرسطحی (lit/Sec)		
	SCS	HYDRUS	خطای پیک %	Nash	HYDRUS	خطای پیک %
زیرحوضه آبریز شماره ۱۲۵ Walnut Gulch	۲۱/۱	۲۱/۸	۳/۲	۱۶/۴	۲۱/۸	۲۴/۷

پارامتر مهم در تخمین رواناب زیرسطحی هستند. برای کاربردی کردن دو مدل مزبور ابتدا یک دامنه مستطیل شکل به طول ۵۰ متر و عرض ۲۵ و شیب ۰/۰۶ در نظر گرفته شد. خاک از نوع ماسه‌ای با ضریب هدایت هیدرولیکی ۰/۶ متر بر ساعت به کار گرفته شد. جهت بررسی نتایج هر دو مدل، دامنه فوق با نرم‌افزار HYDRUS نیز مدل گردید. خطای نتایج پیک جریان زیرسطحی در مدل SCS، ۸/۷٪ و در مدل

۵- بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش به تخمین رواناب زیرسطحی دامنه‌های حوضه‌های آبریز با استفاده از دو مدل Nash و SCS پرداخته شد. استفاده از مدل‌های بارندگی رواناب سطحی در جهت تخمین رواناب زیرسطحی برای اولین بار پیشنهاد شده است و نیازمند تحقیقات بیشتری می‌باشد. زمان پیمایش زیرسطحی و مقدار عمق تغذیه یا نفوذ به لایه خاک دو

پیشنهادات

با توجه به اینکه استفاده از مدل‌های بارش-رواناب سطحی Nash و SCS برای اولین بار جهت تخمین هیدروگراف جریان زیرسطحی در این تحقیق پیشنهاد گردیده، لذا پیشنهاد می‌گردد از دیگر مدل‌های بارش-رواناب سطحی نیز در تخمین جریان زیرسطحی دامنه‌های حوضه‌های آبریز مورد بررسی، مطالعه و صحت سنجی قرار گیرد.

ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

همکاری مشارکت‌کنندگان در تحقیق حاضر به صورت داوطلبانه و با رضایت آنان بوده است. و همچنین این تحقیق مستخرج از رساله‌ی دکتری می‌باشد.

حامی مالی

هزینه تحقیق حاضر توسط نویسندگان مقاله تامین شده است.

مشارکت نویسندگان

طراحی و ایده‌پردازی: حسین فریبرز، تورج سبزواری؛ روش‌شناسی و تحلیل داده‌ها: تورج سبزواری، حسین فریبرز، رضا محمدپور؛ نظارت و نگارش نهایی: تورج سبزواری.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

References

1. S. K. Mishra & Singh, V. P., Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology, vol. 42. 2013.
2. K. S. Rawat and S. K. Singh, "Estimation of Surface Runoff from Semi-arid Ungauged Agricultural Watershed Using SCS-CN Method and Earth Observation Data Sets," Water Conservation Science and Engineering, vol. 1, no. 4, pp. 233-247, 2017, doi: 10.1007/s41101-017-0016-4.
3. R. Viji, P. R. Prasanna, and R. Ilangovan, "Modified SCS-CN and Green-Ampt Methods in Surface Runoff Modelling for the Kundahpallam Watershed, Nilgiris, Western Ghats, India," Aquatic Procedia, vol. 4, no. Icwrcoc, pp. 677-684, 2015, doi: 10.1016/j.aqpro.2015.02.087.
4. H. T. Choi, J. Kim, and H. Lim, "Estimating the SCS runoff curve number in forest catchments of Korea," EGU General Assembly Conference ..., vol. 18, p. 7210, 2016, Available: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016EGUGA..18.7210C/abstract>.
5. SCS, Hydrology. National Engineering Handbook, Supplement A, Section 4, Chapter 10. .
6. S. Sahoo, B. Sahoo, and S. N. Panda, "Hillslope-storage Boussinesq model for simulating subsurface water storage dynamics in scantily-gauged catchments," Advances in Water Resources, vol. 121, pp. 219-234, 2018, doi: 10.1016/j.advwatres.2018.08.016.
7. H. Fariborzi, T. Sabzevari, S. Noroozpour, and R. Mohammadpour, "Prediction of the subsurface flow of hillslopes using a subsurface time-area model," Hydrogeology Journal, vol. 27, no. 4, pp. 1401-1417, 2019, doi: 10.1007/s10040-018-1909-9.
8. G. De Schepper, R. Therrien, J. C. Refsgaard, and A. L. Hansen, "Simulating coupled surface and subsurface water flow in a tile-drained agricultural catchment," Journal of

Nash، ۱۴/۵٪ محاسبه گردید. تاثیر تغییرات ضریب هدایت هیدرولیکی خاک و شیب بروی هیدروگراف زیرسطحی دامنه توسط مدل مورد ارزیابی قرار گرفت. تاثیر هر دو پارامتر قابل توجه است. سپس برای صحت سنجی نتایج از نتایج دو مدل آزمایشگاهی دستگاه باران ساز هیدرولوژی استفاده گردید که جریان سطحی و زیرسطحی دامنه به صورت جداگانه قابلیت اندازه‌گیری دارد. در مدل اول سه شیب ۳، ۶ و ۹ درجه برای دامنه‌ها با سه شدت بارش‌های ۳۱/۷۳، ۴۷/۶ و ۶۳/۴۶ میلی‌متر بر ساعت برای دستگاه در نظر گرفته شد. متوسط خطا در تخمین پیک رواناب سطحی برابر ۷/۸٪ و در تخمین رواناب زیرسطحی ۶/۷٪ توسط مدل SCS بوده است. در روش Nash متوسط خطا در تخمین پیک رواناب سطحی برابر ۱۱/۲۱٪ و در تخمین رواناب زیرسطحی ۱۱/۳۲٪ بوده است. در مدل دوم سه شیب ۱، ۵ و ۱۰ درجه برای دامنه‌ها به سه شدت بارش ۱۱/۴۰، ۱۱/۵۹ و ۱۱/۷۱ میلی‌متر بر ساعت در نظر گرفته شد. متوسط خطا در تخمین پیک جریان زیرسطحی ۷/۸٪ توسط مدل SCS و ۷/۵٪ توسط مدل Nash بوده است. در نهایت مدل‌ها برای تخمین رواناب زیرسطحی زیرحوضه شماره ۱۲۵ حوضه Walnut Gulch در آمریکا به کار گرفته شد. مقدار حداکثر دبی جریان زیرسطحی به روش Nash و SCS برای رویداد مزبور به ترتیب ۱۶/۴ و ۲۱ لیتر بر ثانیه محاسبه گردید. در ادامه جهت صحت سنجی نتایج در بعد حوضه، ۱۲ دامنه زیرحوضه Walnut Gulch نیز در نرم افزار HYDRUS مدل و نتایج خروجی مقایسه گردید. خطای نتایج پیک جریان زیرسطحی در مدل SCS، ۳/۲٪ و در مدل Nash، ۲۴/۷٪ محاسبه گردید. مقادیر حداکثر پیک رواناب زیرسطحی این حوضه توسط (18) بین ۱۶ تا ۳۰ لیتر بر ثانیه به روش هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی محاسبه نموده‌اند.

[Online]. Available:

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016EGUGA..18.7210C/abstract>.

- Hydrology, vol. 521, pp. 374–388, 2015, doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.12.035.
9. P. A. Troch, C. Paniconi, and E. E. Van Loon, "Hillslope-storage Boussinesq model for subsurface flow and variable source areas along complex hillslopes: 1. Formulation and characteristic response," *Water Resources Research*, vol. 39, no. 11. 2003, doi: 10.1029/2002WR001728.
 10. M. . Pikul, R. . Street, and I. Remson, "A Numerical Model Based on Coupled One-Dimensional Richards and Boussinesq Equations," *Water Resources Research*, vol. 10, no. 2, 1974.
 11. E. T. Essig, C. Corradini, R. Morbidelli, and R. S. Govindaraju, "Infiltration and deep flow over sloping surfaces: Comparison of numerical and experimental results," *Journal of Hydrology*, vol. 374, no. 1–2, pp. 30–42, 2009, doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.05.017.
 12. B. N. Malleswara Rao, "Geomorphological Instantaneous Unit Hydrograph (GIUH) for an Ungauged Watershed," *CVR Journal of Science & Technology*, vol. 15, no. 1, pp. 17–21, 2018, doi: 10.32377/cvrjst1503.
 13. A. Adib, M. Salarijazi, M. Vaghefi, M. Mahmoodian Shooshtari, and A. M. Akhondali, "Comparison between GcIUH-Clark, GIUH-Nash, Clark-IUH, and Nash-IUH models," *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, vol. 34, no. 2, pp. 91–103, 2010, doi: 10.3906/muh-0908-1.
 14. B. Sahoo, C. Chatterjee, N. S. Raghuwanshi, R. Singh, and R. Kumar, "Flood Estimation by GIUH-Based Clark and Nash Models," *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 11, no. 6, pp. 515–525, 2006, doi: 10.1061/(asce)1084-0699(2006)11:6(515).
 15. R. Kumar, C. Chatterjee, R. D. Singh, A. K. Lohani, and S. Kumar, "GIUH based clark and nash models for runoff estimation for an ungauged basin and their uncertainty analysis," *International Journal of River Basin Management*, vol. 2, no. 4, pp. 281–290, 2004, doi: 10.1080/15715124.2004.9635238.
 16. T. Sabzevari, M. H. Fattahi, R. Mohammadpour, and S. Noroozpour, "Prediction of surface and subsurface flow in catchments using the GIUH," *Journal of Flood Risk Management*, vol. 6, no. 2, pp. 135–145, 2013, doi: 10.1111/j.1753-318X.2012.01165.x.
 17. J.K. T. Lee and C. H. Chang, "Incorporating subsurface-flow mechanism into geomorphology-based IUH modeling," *Journal of Hydrology*, vol. 311, no. 1–4. pp. 91–105, 2005, doi: 10.1016/j.jhydrol.2005.01.008.
 18. T. Sabzevari and S. Noroozpour, "Effects of hillslope geometry on surface and subsurface flows," *Hydrogeology Journal*, vol. 22, no. 7, pp. 1593–1604, 2014, doi: 10.1007/s10040-014-1149-6.
 19. T. Sabzevari, A. Talebi, R. Ardakanian, and A. Shamsai, "A steady-state saturation model to determine the subsurface travel time (STT) in complex hillslopes," *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 14, no. 6, pp. 891–900, 2010, doi: 10.5194/hess-14-891-2010.
 20. M. M. Kandelous and J. Šimůnek, "Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D," *Agricultural Water Management*, vol. 97, no. 7, pp. 1070–1076, 2010, doi: 10.1016/j.agwat.2010.02.012.
 21. E. Moghbeli, F. Hasanpour, and H. Shirani, "Prediction of water movement in soil using HYDRUS-1D and SWAP models." [In Persian]
 22. J.S. Besharat, J. Behmanesh, H. Rezaee, and R. Delir Hasannya, "Evaluation of Hydrus-2D for soil water infiltration by using laboratory measurements in the weighing lysimeter," *Journal of Soil and Water Conservation Research*, vol. 5. pp. 297–306, 1393. [In Persian]
 23. S. Farazkhah saani and S. Besharat, "Investigating the trend of changes in water infiltration in soil by HYDRUS-2D and SEEP-W software and comparing their results, the second national conference on natural resources and environment protection," 2009. [In Persian]
 24. M. Farasati and H. Shakeri, "Simulation of water infiltration in the soil using HYDRUS1D software and field data," 2018, doi: 10.22069/jwsc.2018.13950.2871. [In Persian]
 25. J. . Nash, "The form of the instantaneous unit hydrograph," *International Association of*

- Hydrological Sciences, vol. 45, pp. 114–121, 1957.
26. S. . Singh, “TRANSMUTING SYNTHETIC UNIT HYDROGRAPHS INTO GAMMA DISTRIBUTION,” vol. 1, no. October, pp. 380–385, 2000.
 27. C. . Hann, B. J. Barfield, and J. C. Hayes, Design Hydrology And Sedimentology For Small Catchments. 1994.
 28. P. Keshtkaran, T. Sabzevari, and M. Karami Moghadam, “Runoff estimation of watersheds without statistics using NASH dimensionless artificial unit hydrograph model (Study design: Ajay and Kasilian Basin),” no. February 2009, 2014. [In Persian]
 29. J. J. McDonnell and K. Beven, “Debates - The future of hydrological sciences: A (common) path forward? A call to action aimed at understanding velocities, celerities and residence time distributions of the headwater hydrograph,” Water Resources Research, vol. 50, no. 6, pp. 5342–5350, 2014, doi: 10.1002/2013WR015141.
 30. V. A. N. Genuchten, “A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils 1,” Soil Science Society of America Journal, vol. 44, pp. 892–898, 1980.
 31. R. Morbidelli, C. Saltalippi, A. Flammini, M. Cifrodelli, C. Corradini, and R. S. Govindaraju, “Infiltration on sloping surfaces: Laboratory experimental evidence and implications for infiltration modeling,” Journal of Hydrology, vol. 523, pp. 79–85, 2015, doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.01.041.