مرتع و آبخیزداری، مجله منابع طبیعی ایران
دوره ۷۳، شماره ۱، بهار ۱۳۹۹
ص ۳۱-۱۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۳۰
تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۰۲/۱۸

ارزیابی پتانسیل تولید رواناب و رسوب با استفاده از باران‌ساز و مدل هیدرولوژیک در حوزۀ آبخیز کوزه‌تپراقی اردبیل

❖ **اباذر اسمعلی[*]؛** دانشیار آبخیزداری، دانشکدۀ کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

❖ **محمد گلشن[۲]؛** دکتری آبخیزداری، ادارۀ منابع طبیعی و آبخیزداری شهرستان آستارا، گیلان، ایران.

چکیده

حوزه‌های آبخیز یک محیط وسیع با شرایط متفاوت می‌باشند که شبیه‌سازی و مطالعۀ فرآیندهای تولید رواناب و رسوب در سطح این منطقه برای مدیریت و حفظ منابع بسیار مهم می‌باشد. حوزۀ آبخیز کوزه تپراقی با مساحت ۷۶۶ کیلومتر مربع در جنوب و بالادست حوزۀ آبخیز قره‌سو در استان اردبیل واقع شده است. از بین مدل‌های هیدرولوژیک با توجه به قابلیت‌های مدل SWAT، این مدل برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیک منطقه در سطح زیرحوضه استفاده شد. همچنین برای بررسی دقیق‌تر از دستگاه شبیه‌ساز باران در سطح واحد پاسخ هیدرولوژیک (HRU) استفاده شد و نتایج به‌دست آمده در سطح زیرحوضه تعمیم داده شدند. نتایج مدل هیدرولوژیک SWAT با نمایه‌های آماری R^2، NSE و RMSE ارزیابی شد به‌طوری‌که برای شبیه‌سازی رواناب در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی، این نمایه‌ها به‌ترتیب ۰/۸-۰/۷۴، ۰/۷۱-۰/۶۹ و ۰/۳۲-۰/۳۳ و برای شبیه‌سازی رسوب ۰/۷۵-۰/۶۶، ۰/۷۲-۰/۶۴ و ۳۹/۲۷-۲۶/۳۵ به‌دست آمدند. بررسی نتایج مطالعات حاصل از باران‌ساز مصنوعی نیز نشان داد که خاک‌های لومی منطقه واقع در ۸ نمونه HRU نقش زیادی در تولید رسوب منطقه دارند. مقدار حداکثر رواناب و رسوب تولیدی با استفاده از دستگاه شبیه‌ساز باران و مدل SWAT در زیرحوضه‌های ۱۳ و ۱ مشاهده شدند که نشان دهندۀ شرایط ضعیف و نامناسب در این زیرحوضه‌ها می‌باشند. مقایسۀ نتایج روش‌های مطالعاتی نشان داد که مدل SWAT از عملکرد بهتری برای شبیه سازی رواناب نسبت به دستگاه شبیه‌ساز باران برخوردار می‌باشد. همچنین مقدار رسوب شبیه سازی شده توسط این مدل بیشتر از مقدار رسوب محاسباتی توسط دستگاه شبیه‌ساز باران بوده و به مقادیر مشاهداتی نزدیک‌تر می‌باشد.

کلید واژگان: شبیه‌سازی، پلات، آب گل‌آلود، واسنجی، HRU

* نویسنده مسئول: شماره تماس: ۹۸۹۱۴۴۵۳۸۶۲۳+
Email: esmaliouri@uma.ac.ir

۱. مقدمه

با مطالعه و شناخت عوامل تأثیرگذار در ایجاد رواناب و رسوب می‌توان مدیریت بهتری برای حوزه‌های آبخیز ارائه نمود. فرآیند تولید رواناب و رسوب باتوجه به خصوصیات موجود در حوضه‌های مختلف دارای رفتارهای متفاوتی می‌باشند، به‌طوری‌که شناخت دقیق این فرآیند بسیار مشکل می‌باشد.

با افزایش سطح کشت، کوتاه شدن تناوب زراعی، شخم اراضی دارای شیب بیشتر، قطع درختان جنگلی و چرای بیش از حد، تعادل طبیعت به آسانی به‌هم می‌خورد که به‌دنبال آن سیلاب و فرسایش تشدیدی به‌وقوع می‌پیوندد. در حالت طبیعی فرسایش خاک با توجه به شرایط منطقه وجود دارد که با به‌هم خوردن تعادل این فرسایش تشدید می‌شود و برروی محیط زیست و پایداری اکولوژیک تأثیر می‌گذارد [۱۲]. فرسایش خاک شایع‌ترین شکل تخریب زمین می‌باشد و به‌عنوان تحدیدی بزرگ برای پایداری اکوسیستم‌های بزرگ مطرح شده است [۳، ۲۱]. در کشورهای در حال توسعه واقع در آسیا، آفریقا و آمریکای جنوبی به‌دلیل دخالت‌های انسانی سالانه سیلاب‌های بزرگی به وقوع می‌پیوندد و خسارات زیادی را ایجاد می‌کنند، در این مناطق شدت فرسایش خاک ۳۰ الی ۴۰ تن در هکتار در سال می‌باشد [۲۶]. در ایران نیز روند تغییرات محیطی به‌نحوی می‌باشند که سیلاب‌ها و فرسایش خاک را تشدید می‌کنند. میزان فرسایش در ایران ۳۰-۳۵ تن در هکتار می‌باشد که میانگین فرسایش در ایران حدود ۴/۳ برابر متوسط فرسایش در جهان است [۲۴]. به گزارش بانک جهانی، خسارت ناشی از سیل و فرسایش خاک در کشور ایران برای سال ۲۰۰۲ برابر با ۲۸۴۰ میلیون دلار برآورد شده که این رقم ۲/۵ درصد کل درآمد ناخالص ایران در این سال است [۲۹].

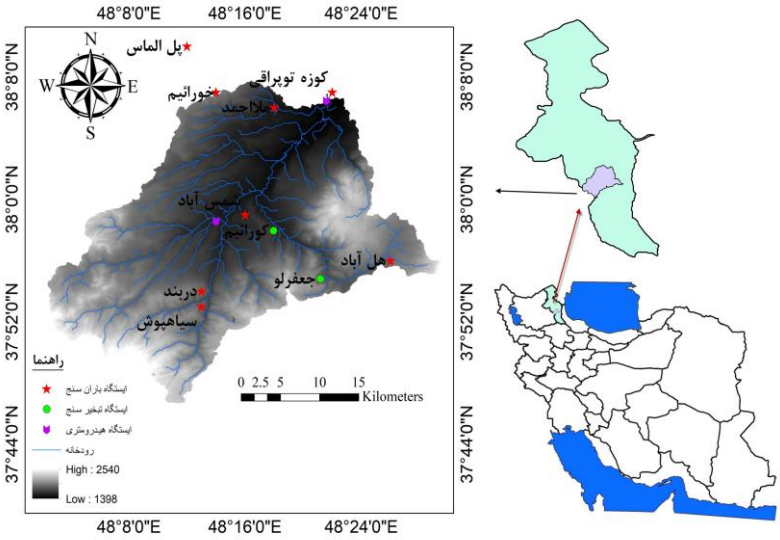
جلوگیری از خسارات سیل و فرسایش خاک نیاز به روش مناسب و بهینه در جلوگیری از حرکت سریع رواناب و حمل ذرات خاک دارد. تأمین این نیازمندی‌ها دشوار و پر هزینه می‌باشد، به‌همین جهت متخصصین آبخیزداری و هیدرولوژیست‌ها و متخصصین منابع آب برای ارائه راه حل مناسب و بهینه تلاش زیادی نموده‌اند و فرمول‌های و مدل‌های زیادی را عرضه کرده‌اند [۱۷]. شبیه‌سازی جریان رودخانه‌ها، پیش‌بینی رفتار هیدرولوژیک حوزه‌های آبخیز و درک درستی از مؤلفه‌های مختلف چرخهٔ هیدرولوژیک برای برنامه‌ریزی در جهت حفاظت از منابع آبی حائز اهمیت است. در این راستا مطالعات مختلفی در داخل و خارج کشور انجام شده است که برخی از این مطالعات در سطح پلات با استفاده از دستگاه باران‌ساز [۷، ۲۷،۱۸] و برخی پژوهش‌ها با بهره‌گیری از مدل هیدرولوژیک SWAT [۸، ۱۰، ۱۳، ۲۸] انجام شده است. در سال‌های اخیر نیز در برخی مطالعات از این روش‌ها به صورت هم‌زمان در یک منطقه استفاده شده است. در تحقیقی [۱۶] مدل‌های تجربی، SWAT و دستگاه شبیه ساز باران را برای بررسی پتانسیل تولید رسوب در حوزهٔ آبخیز حبله‌رود مورد استفاده قرار دادند. نتایج نشان داد که مقدار رسوب تخمینی به‌وسیلهٔ مدل SWAT بیشتر از دستگاه شبیه‌ساز باران و کمتر از روش‌های تجربی می‌باشد. همچنین در تحقیقی [۱۵] با استفاده از مدل SWAT و دستگاه شبیه‌ساز باران اقدام به اولویت‌بندی سازندهای حساس در حاشیهٔ جنوبی البرز مرکزی شده است. نتایج نشان‌دهندهٔ نزدیک بودن نتایج مدل SWAT به مطالعات صحرایی می‌باشد. در این تحقیق برای شناخت بهتر فرآیندهای هیدرولوژیک در منطقهٔ مطالعاتی به صورت هم‌زمان از دستگاه شبیه ساز باران در سطح پلات ۱×۱ متر به‌صورت مطالعات صحرایی و مدل هیدرولوژیک SWAT برای تعیین مقدار رواناب و رسوب استفاده شد.

۲. روش‌شناسی

۱.۲. معرفی منطقهٔ مورد مطالعه

حوزهٔ آبخیز کوزه‌تپراقی با مساحت ۷۶۷ کیلومتر مربع در بالادست ایستگاه هیدرومتری کوزه‌تپراقی در جنوب

غربی شـــهر اردبیـل بین محـدودهٔ "۴۸°۰۶'۰۲ تـا "۲۹°۴۸'۰۸ طول شـرقی و "۳۷°۴۶'۱۲ تا "۳۸°۱۵'۰۲ عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). بلندترین نقطهٔ ارتفاعی منطقه ۲۵۴۰ متر و پســـت‌ترین نقطه با ارتفاع حدود ۱۳۹۸ متر می‌باشد. مقدار متوسط بارندگی و درجه حرارت در این منطقه به‌ترتیب ۴۵۶ میلی‌متر و ۷/۷ درجهٔ ســـانتی‌گراد می‌باشـــند. تعداد روزهای یخبندان به‌طور متوســـط ۱۳۰ روز در ســـال می‌باشـــد. نوع اقلیم منطقه براساس طبقه‌بندی دومارتن و آمبرژه، اقلیم نیمه‌خشک-ســـرد کوهســـتانی می‌باشـــد. طول دورهٔ آماری برای ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری در جدول (۱) ارائه شده است.



شکل ۱. موقعیت منطقهٔ مورد مطالعه و ایستگاه‌های هواشناسی

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی واقع در منطقهٔ مطالعاتی

نام ایستگاه	نوع ایستگاه	طول جغرافیایی (Y)	عرض جغرافیایی (X)	ارتفاع (متر)	طول دوره (سال)
پل‌الماس	باران‌سنج	۳۸/۱۷	۴۸/۲	۱۳۴۰	۱۹۹۷-۲۰۱۴
خورائیم	باران‌سنج	۳۸/۱۱	۴۸/۲۳	۱۵۲۰	۲۰۰۰-۲۰۱۳
کوزه‌تپراقی	باران‌سنج	۳۸/۱۱	۴۸/۳۶	۱۳۵۰	۱۹۹۶-۲۰۱۴
ملاحمد	باران‌سنج	۳۸/۱۰	۴۸/۳۱	۱۴۸۹	۲۰۰۰-۲۰۱۳
شمس‌آباد	باران‌سنج	۳۷/۹۸	۴۸/۲۶	۱۴۹۰	۱۹۹۸-۲۰۱۴
هل‌آباد	باران‌سنج	۳۷/۹۳	۴۸/۴۳	۱۷۰۰	۲۰۰۱-۲۰۱۳
دربند	باران‌سنج	۳۷/۹	۴۸/۲۲	۱۷۵۷	۲۰۰۰-۲۰۱۳
سیاه‌پوش	باران‌سنج	۳۷/۸۸	۴۸/۲۲	۱۶۴۰	۲۰۰۲-۲۰۱۳
کورائیم	تبخیرسنج	۳۷/۹۶	۴۸/۲۹	۱۵۲۲	۱۹۹۸-۲۰۱۴
جعفرلو	تبخیرسنج	۳۷/۹۱	۴۸/۳۵	۱۷۳۱	۱۹۹۹-۲۰۱۴
کوزه‌تپراقی	هیدرومتری	۳۸/۱۱	۴۸/۳۶	۱۳۵۰	۲۰۰۰-۲۰۱۴
شمس‌آباد	هیدرومتری	۳۷/۹۸	۴۸/۲۶	۱۴۹۰	۲۰۰۰-۲۰۱۴

۲.۲. شبیه سازی رواناب و رسوب تولیدی با مدل هیدرولوژیک SWAT

مدل SWAT یک مدل هیدرولوژیکی است که توسط سازمان تحقیقات کشاورزی آمریکا توسعه داده شده است. این مدل در گروه مدل‌های مفهومی–نیمه توزیعی قرار دارد که در مقیاس‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد و دارای بازده محاسباتی مناسبی می‌باشد. فرآیندهای هیدرولوژیک اصلی که توسط مدل شبیه سازی می شوند شامل تبخیر و تعرق، رواناب سطحی، ذوب برف، نفوذ سطحی، نفوذ عمقی و جریان آب زیرزمینی و جریان‌های زیر سطحی می‌باشند [۲۳]. مدل SWAT یک برنامهٔ الحاقی به نرم افزار ArcMap به نام AVSWAT2009 را دارد. در واقع این نرم افزار نمایش گرافیکی مدل است که بعد از این که خروجی مدل شبیه‌سازی شد آن را به‌صورت یک گرافیک و یا جدول نشان می‌دهد. این مدل توانایی کمی کردن تأثیر نسبی اطلاعات ورودی (تغییر در روش های مدیریتی، آب و هوا، پوشش گیاهی و غیره) برروی متغیرهای هیدرولوژیک را دارد [۱۹].

۱.۲.۲. آنالیز حساسیت، واسنجی و اعتبار سنجی مدل SWAT

میزان کارایی یک مدل برای اهداف تعیین شده، از طریق آنالیز حساسیت، واسنجی و اعتبار سنجی بررسی می شود [۲۵]. روش‌های به‌کاربرده شده برای انجام آنالیز حساسیت به‌طورکلی در دو گروه آنالیزهای حساسیت موضعی[۱] و سراسری[۲] قرار می‌گیرند [۱۴]. آنالیز حساسیت موضعی که به روش OAT[۳] (یک فاکتور در یک زمان) شناخته شده است، واکنش شبیه‌سازی مدل را به تغییرات متوالی هر پارامتر مشخص می‌کند، در حالی‌که دیگر پارامترها بدون تغییر می‌باشند. براساس ویژگی‌های حوزهٔ آبخیز مورد مطالعه ۲۵ پارامتر اولیه برای شبیه‌سازی دبی جریان و ۲۰ پارامتر برای شبیه‌سازی دبی رسوب انتخاب شدند و ۴۵۰ بار اجرای مدل با الگوریتم SUFI2 انجام گرفت. این الگوریتم در چارچوب نرم افزار SWAT-CUP قابل اجرا است، که روشی برای واسنجی و آنالیز عدم قطعیت هم‌زمان مدل SWAT است [۲]. پس از اجرای مدل SWAT، فایل‌های نتایج شبیه سازی در مدل توسط نرم افزار SWAT-CUP دریافت و با انتخاب الگوریتم SUFI2 واسنجی و اعتبارسنجی مدل انجام شد. الگوریتم SUFI2 نسبت به الگوریتم‌های GLUE و Parasol از عمومیت بیشتری برخوردار می‌باشد [۲، ۱۴].

حساسیت پارامترها با استفاده از مقادیر t-state و p-value ارزیابی شدند. ضریب t-state حساسیت نسبی را بر پایهٔ تقریب خطی ارائه می‌دهد از این رو اطلاعاتی دربارهٔ حساسیت تابع هدف نسبت به پارامترهای مدل را فراهم می‌سازد. به‌طورکلی مقادیر مطلق t-state نشان دهندهٔ حساسیت بیشتر پارامتر می‌باشد. فاکتور p-value نیز برای تعیین معنی‌داری درجهٔ حساسیت پارامترها استفاده می‌شود. هرچه قدر که p-value به صفر نزدیکتر باشد معنی‌داری حساسیت پارامتر بیشتر می‌باشد [۲].

۲.۲.۲. ارزیابی کارایی مدل

به‌منظور تحلیل کیفیت نتایج مدل در دورهٔ واسنجی و اعتبارسنجی از ۳ نمایه آماری R2، ضریب NS و MSE استفاده شد. با توجه به طول دورهٔ آماری در ایستگاه‌های مطالعاتی دورهٔ زمانی ۲۰۱۰-۲۰۰۳ برای واسنجی و دورهٔ زمانی ۲۰۱۳-۲۰۱۱ برای اعتبارسنجی مدل انتخاب شدند. ضریب R2 (ضریب تبیین) نشان‌دهندهٔ تطابق بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه سازی شده با استفاده از روش تجزیه رگرسیونی است. مقدار آن بین صفر تا ۱ متغیر است. ضریب NS اختلاف نسبی مقادیر مشاهده‌ای و شبیه سازی شده را نشان می‌دهد و مقدار این فاکتور از منفی بی‌نهایت تا ۱ متغیر است. همچنین RMSE

[۱]-Local Sensitivity
[۲]-Global Sensitivity
[۳]-One At a Time

(مجموع ریشهٔ میانگین مربعات خطا) نشان‌دهندهٔ تفاوت میان مقدار پیش‌بینی شده و مقدار مشاهداتی می‌باشد. مقادیر شبیه‌سازی شده که دارای کمترین مقدار RMSE باشد از دقت بیشتری برخوردار است.

رابطهٔ ۱
$$R^2=\left\{\frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_{obs}-\overline{Q}_{obs})(Q_{sim}-\overline{Q}_{sim})}{\left[\sum_{i=1}^{n}(Q_{obs}-\overline{Q}_{obs})^2\right]^{0.5}\left[\sum_{i=1}^{n}(Q_{sim}-\overline{Q}_{sim})^2\right]^{0.5}}\right\}$$

رابطهٔ ۲
$$EN = 1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_{Obs}-Q_{Sim})^2}{\sum_{i=1}^{n}(Q_{Obs}-\overline{Q}_{Obs})^2}$$

رابطهٔ ۳
$$RMSE=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Q_{obs}-Q_{sim})^2}$$

۳.۲. تخمین رواناب و رسوب با استفاده از دستگاه شبیه‌ساز باران

ذرات ریز ایجاد شده در اثر برخورد قطرات باران، منافذ کوچک موجود در لایهٔ سطحی خاک را پر می‌کنند و باعث کاهش تخلخل خاک می‌شوند [۴]. پاسخ سطح خاک به بارندگی می‌تواند تأثیر مهمی بر فرآیندهای اکولوژیک و هیدرولوژیک داشته باشد [۴]. جهت شبیه‌سازی برخورد قطرات باران به سطح خاک از دستگاه شبیه‌ساز باران استفاده شد این دستگاه سیار و قابل نصب در مناطق صعب‌العبور می‌باشد. دستگاه باران‌ساز با تنظیم فشار هوا قابلیت ایجاد بارندگی با شدت‌های مختلف را دارد. با توجه به مطالعات قبلی [۱۵، ۱۶] جهت بررسی تولید رواناب و رسوب شدت بارندگی با دورهٔ بازگشت ۱۰ سال ایجاد شد که در منطقهٔ مطالعاتی معادل با ۰/۴ میلی‌متر بر دقیقه می‌باشد. دستگاه باران ساز دارای ۱۷۳ نازل می‌باشد و این نازل‌ها به‌صورتی در کنار هم بسته شده‌اند که با ردیف مقابل خود در یک امتداد قرار نگرفته‌اند که این امر باعث پراکندگی قطرات آب می شود. نمونهٔ نصب شدهٔ باران ساز در شکل زیر نشان داده شده است:

شکل ۲. نمونهٔ نصب دستگاه باران‌ساز در سطح واحد پاسخ هیدرولوژیک

در هر واحد HRU بعد از نصب دستگاه شبیه‌ساز باران، از خاک مجاور سطح پلات اقدام به نمونه‌برداری و تعیین مشخصات مربوط به بافت خاک و مواد آلی خاک شد. همچنین نمونه‌های آب گل‌آلود به‌دست آمده در بطری های ۱/۵ لیتری جمع‌آوری و کدگذاری شدند. نمونه‌های تهیه شده جهت بررسی به آزمایشگاه انتقال و با استفاده از کاغذ صافی مقدار رواناب و رسوب تعیین شدند. ابتدا وزن کاغذ صافی اندازه‌گیری و یادداشت شد، سپس نمونهٔ آب گل‌آلود از کاغذ صافی عبور داده شد که با قرائت ارتفاع رواناب در شیشه مدرج (بشر) مقدار رواناب یادداشت شد. همچنین برای تعیین مقدار رسوب، کاغذ صافی همراه با رسوب انباشته شده در آون با دمای ۱۰۵

درجهٔ سانتی‌گراد و در مدت زمان ۲۴ ساعت قرار داده شد. اختلاف وزن بین کاغذ همراه با رسوب خشک با وزن کاغذ خشک شده نشان‌دهندهٔ رسوب خروجی از سطح پلات یک متر مربعی می‌باشد. داده‌های به‌دست آمده به سیستم اطلاعات جغرافیای (GIS) انتقال و پراکنش رواناب و رسوب در سطح هر واحد کار تعیین شد.

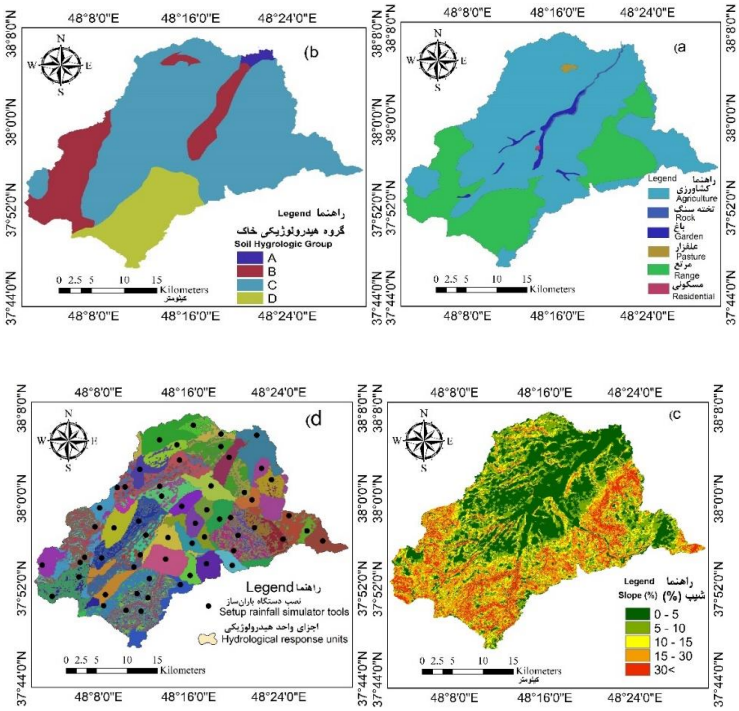
۳. نتایج

۱.۳. تعیین واحدهای پاسخ هیدرولوژیک

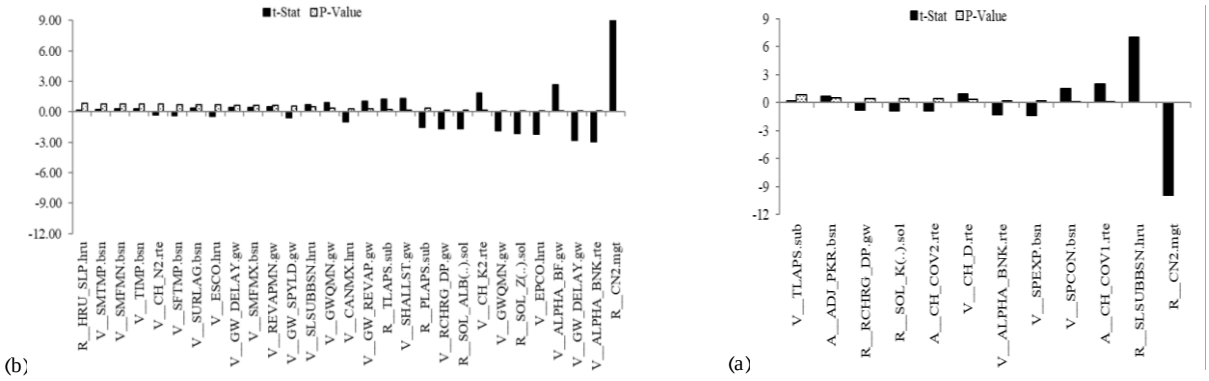
تعیین واحدهای پاسخ هیدرولوژیک (HRUs) برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیک بسیار مهم می‌باشد. برای این‌منظور نقشه‌های خاک‌شناسی، کاربری اراضی و شیب جزء ورودی‌های اصلی بیشتر مدل‌های هیدرولوژیک توزیعی می‌باشد. با تلفیق آن‌ها نقشه HRU به‌دست آمد (شکل ۳).

۲.۳. مدل هیدرولوژیک

در این تحقیق مدل SWAT برای ایستگاه هیدرومتری کوزه توپراقی واقع در خروجی حوزهٔ آبخیز برای دورهٔ زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ با گام زمانی ماهانه برای شبیه‌سازی رواناب و رسوب اجرا شد. جهت واسنجی پارامترهای مدل از الگوریتم SUFI2 استفاده شد. از بین پارامترهای ورودی به مدل حساس‌ترین پارامترها جهت شبیه‌سازی انتخاب شدند. در شکل (۳) نمودار مربوط به حساسیت پارامترهای مختلف نشان داده شده است. همچنین در جدول (۲) مقدار t-stat و p-value مربوط به حساس‌ترین پارامترها نشان داده شده است.



شکل ۳. نقشه‌های کاربری اراضی (a)، خاک (b)، شیب (c) و نقشه HRU همراه با موقعیت‌های نصب دستگاه باران‌ساز (d)



شکل ۴. حساسیت پارامترهای مختلف جهت شبیه‌سازی رواناب (a) و رسوب (b)

جدول ۲. مقادیر t-stat و p-value برای پارامترهای حساس در شبیه‌سازی رواناب و رسوب

پارامتر	حساسیت پارامترهای رواناب			پارامتر	حساسیت پارامترهای رسوب		
	توضیحات	t-stat	p-value		توضیحات	t-stat	p-value
CN2	شماره منحنی	۱۲/۳۵	۰/۰۰	CN2	شماره منحنی	-۹/۹۱	۰/۰۰
ALPHA_BNK	ضریب α آب پایه	۳/۲۴	۰/۰۲	CH_COV1	فاکتور پوشش کانال	۶/۰۰	۰/۰۰
GW_DELAY	زمان تأخیر آب زیر زمینی (روز)	-۲/۵۷	۰/۰۳	CH_N2	ضریب مانینگ	۲/۹۹	۰/۰۶
ALPHA-BF	ضریب α آب زیرزمینی	۲/۶۳	۰/۰۳	SPCON	پارامتر خطی برای روندیابی رسوبگذاری	۲/۵۰	۰/۱۵
V-EPCO	فاکتور جبران نگهداشت گیاهی	-۲/۱۱	۰/۰۳	SPEXP	پارامتر توانی برای روندیابی رسوبگذاری	-۲/۳۸	۰/۱۹
R__SOL-Z	عمق لایه‌های خاک (mm)	-۲/۰۲	۰/۰۶	SOL_K	هدایت هیدرولیکی (mm/hr)	-۲/۳۱	۰/۲۱

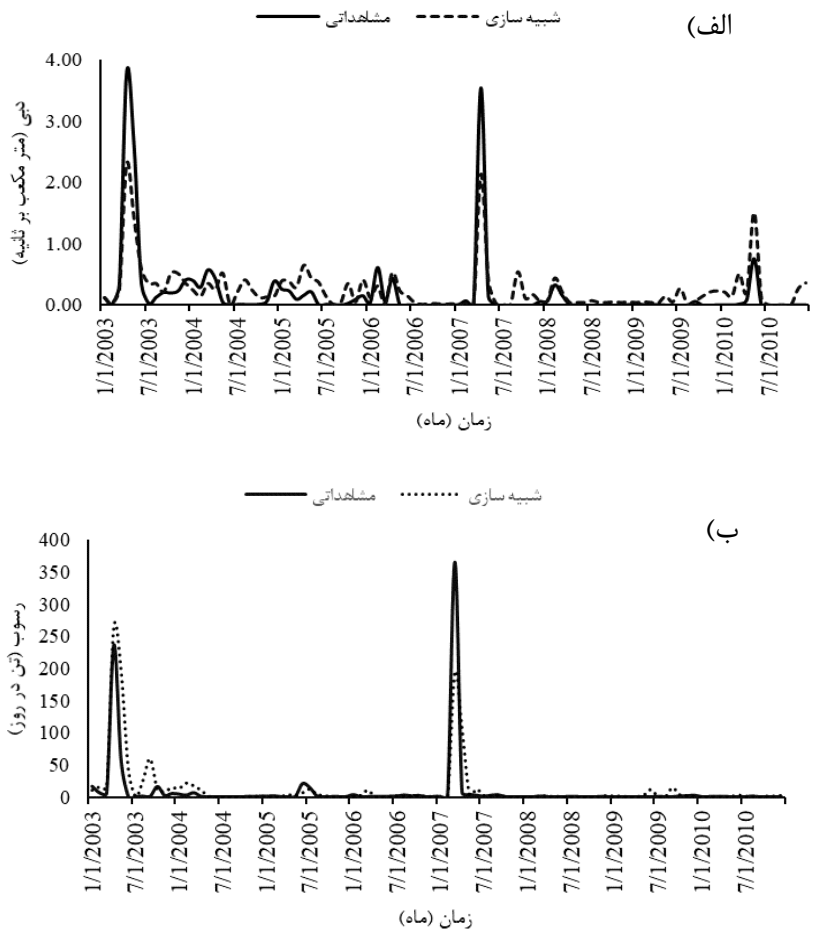
به‌منظور تعیین مقادیر بهینه برای هر پارامتر الگوریتم SUFI2 با تکرار ۲۰۰۰ بار انجام شد. پارامترهای حساس تعیین شده دارای بازهٔ مقادیر می‌باشند که در این تکرارها مقادیر مختلفی برای هر شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت و مناسبت‌ترین شبیه‌سازی به‌دست آمد. پارامترهای انتخاب شده برای مناسب‌ترین شبیه‌سازی به‌عنوان پارامترهای بهینه معرفی شدند (جدول ۳).

جدول ۳. مقادیر حداقل، حداکثر و بهینه‌سازی شده برای شبیه‌سازی رواناب و رسوب

پارامتر	واسنجی رواناب			پارامتر	واسنجی رسوب		
	بهینه	حداقل	حداکثر		بهینه	حداقل	حداکثر
CN2	۰/۱۴	-۰/۶	۰/۶	CN2	۰/۱۴	-۰/۶	۰/۶
ALPHA_BNK	۰/۲۶	۰	۰/۸۷	CH_COV1	۰/۵۸	۰	۱
GW_DELAY	۴۵	۰	۳۰۰	CH_N2	۰/۱۶	۰	۱
ALPHA_BF	۰/۴۴	۰	۰/۵۶	SPCON	۰/۰۰۹	۰/۰۱	۰/۰۰۰۱
EPCO	۰/۰۸	۰	۰/۴۸	SPEXP	۱/۲	۱	۱/۵
SOL_Z	۶۵۷	۰	۲۰۰۰	SOL_K	۸۵۰	۰	۲۰۰۰

بهترین شبیه‌سازی رواناب و رسوب به‌دست آمده برای ایستگاه هیدرومتری کوزه‌تپراقی واقع در خروجی حوزهٔ آبخیز کوزه‌تپراقی در دورهٔ واسنجی (۲۰۰۳-۲۰۱۰) در شکل (۵) نشان داده شده است. ارزیابی نتایج مدل با استفاده از نمایه‌های آماری در جدول (۴) آورده شده است. همچنین نقشهٔ رواناب و رسوب در سطح زیر حوضه در شکل (۶) نشان داده شده است.

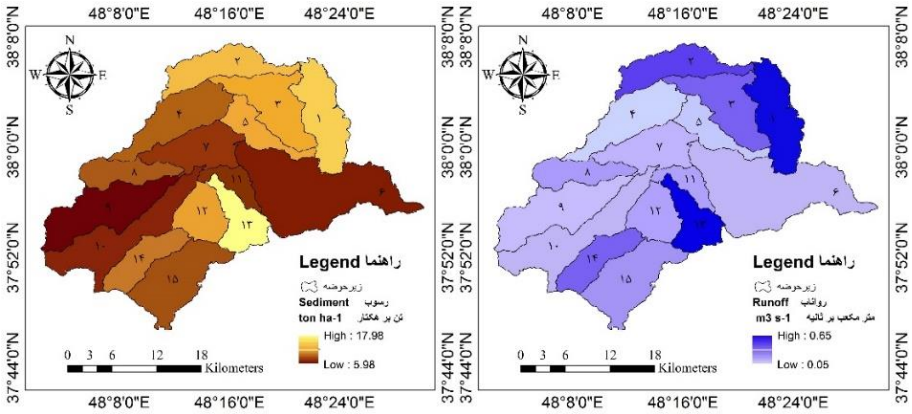
برای مدل‌های هیدرولوژیک لازم است که اعتبارسنجی مدل نیز انجام شود تا کاربر نسبت به نتایج مدل اعتماد داشته باشد. دورهٔ زمانی ۲۰۱۳-۲۰۱۱ برای اعتبارسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت که نمودار حاصل از دبی رواناب و رسوب شبیه سازی شده و مشاهداتی در شکل (۷) آورده شده است. همچنین در جدول (۵) نتایج عملکرد مدل در این دوره آورده شده است.



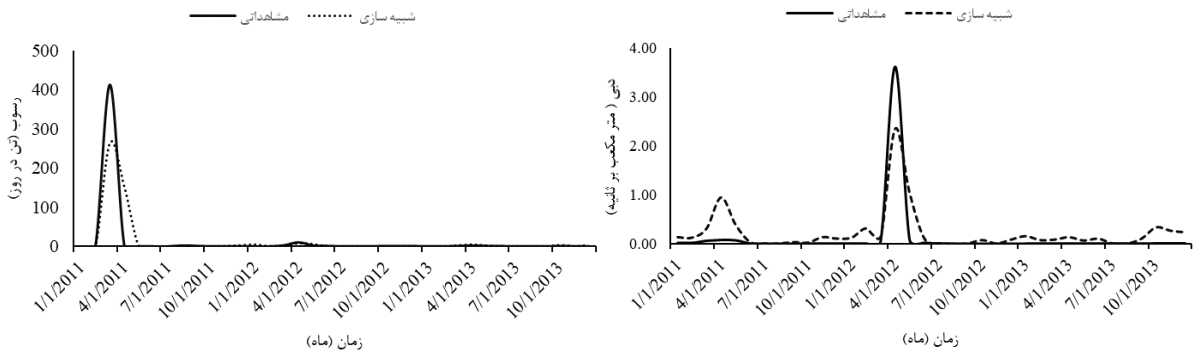
شکل ۵. نتایج واسنجی مدل برای دورهٔ زمانی ۲۰۱۰-۲۰۰۳: الف) شبیه‌سازی رواناب ب) شبیه‌سازی رسوب

جدول ۴. ارزیابی عملکرد مدل در دورهٔ واسنجی برای شبیه‌سازی رواناب و رسوب

دوره	نمایهٔ آماری رواناب			نمایهٔ آماری رسوب		
	R^2	NS	RMSE	R^2	NS	RMSE
واسنجی	۰/۸	۰/۷۱	۰/۳۲	۰/۷۵	۰/۷۲	۳۵/۲۷



شکل ۶. شبیه‌سازی تولید رواناب و رسوب از سطح هر زیرحوضه با مدل SWAT



شکل ۷. نتایج اعتبارسنجی مدل برای شبیه‌سازی رواناب و رسوب در دورهٔ زمانی ۲۰۱۳-۲۰۱۱

جدول ۵. ارزیابی عملکرد مدل در دورهٔ اعتبارسنجی برای شبیه‌سازی رواناب و رسوب

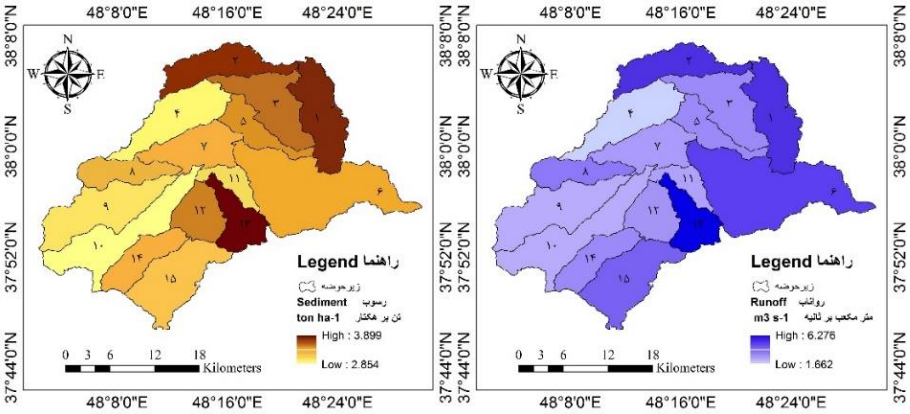
دوره	نمایهٔ آماری رواناب			نمایهٔ آماری رسوب		
	R^2	NS	RMSE	R^2	NS	RMSE
اعتبارسنجی	۰/۷٤	۰/٦۹	۰/۳۳	۰/٦٦	۰/٦٤	۲٦/۳۹

۳.۳. دستگاه شبیه‌ساز باران

جهت محاسبهٔ رواناب و رسوب با استفاده از مطالعات صحرایی در هر HRU دستگاه شبیه‌ساز باران با سه تکرار نصب و اجرا شد. با برداشت نمونه‌های آب گل‌آلود برای هر آزمایش مقدار رواناب و رسوب به‌دست آمد که با انتقال این داده‌ها به سطح HRUها مقدار این متغیرها به‌دست آمدند. با تعیین مقدار رواناب و رسوب در سطح هر HRU و ضریب وزنی مساحت هر HRU در زیرحوضه‌های مختلف مقدار رواناب و رسوب به ترتیب بر حسب متر مکعب بر ثانیه و تن بر هکتار محاسبه شدند (شکل ۸).

رواناب و رسوب اندازه‌گیری شده در هر زیرحوضه با استفاده از دستگاه شبیه‌ساز باران و مدل SWAT به‌ترتیب همبستگی ۰/۶۱ و ۰/۷۴ را نشان دادند که با نتایج مطالعات قبلی در حوزهٔ آبخیز حبله رود [۱۶] و حاشیهٔ جنوبی البرز مرکزی [۱۵] مطابقت دارند. در هر آزمایش علاوه بر مشخصات رواناب و رسوب مشخصات مربوط به محل نصب باران‌ساز شامل شیب، آستانه شروع

رواناب، زمان تخلیه رواناب، درصد رس، سیلت، شن و فاکتور فرسایش‌پذیری خاک نیز برآورد و همبستگی بین این مشخصات با مقدار رواناب و رسوب محاسبه شد که در جدول (۶) آورده شده‌است.



شکل ۸. اندازه‌گیری تولید رواناب و رسوب از سطح هر زیرحوضه با دستگاه باران‌ساز

جدول ۶. همبستگی بین پارامترهای مختلف در تولید رواناب و رسوب منطقه

	شیب	آستانه رواناب	تخلیه رواناب	دبی رواناب	دبی رسوب	رس	سیلت	شن	مواد آلی	کربن آلی	فاکتور (K)
شیب	۱	-۰.۰۳	۰.۰۵	۰.۰۵	۰.۱۱	۰.۰۷	۰.۰۸	-۰.۱۲	-۰.۰۱	۰.۰۳	۰.۱۳
آستانه رواناب	-۰.۰۳	۱	-۰.۰۱	-۰.۵۵	-۰.۲۲	-۰.۲۹	-۰.۳۱	۰.۴۷	-۰.۰۴	-۰.۱۰	-۰.۲۲
تخلیه رواناب	۰.۰۵	-۰.۰۱	۱	۰.۱۱	-۰.۱۰	۰.۴۸	-۰.۰۲	-۰.۳۹	۰.۱۳	-۰.۰۵	-۰.۰۳
دبی رواناب	۰.۰۵	-۰.۵۵	۰.۱۱	۱	-۰.۲۱	۰.۰۶	۰.۱۱	-۰.۱۳	۰.۰۶	۰.۰۲	-۰.۰۲
حجم رواناب	۰.۱۲	-۰.۵۴	۰.۰۲	۰.۹۴	-۰.۲۵	-۰.۰۱	۰.۱۶	-۰.۱۱	۰.۰۱	۰.۰۵	۰.۰۲
دبی رسوب	۰.۱۱	-۰.۲۲	-۰.۱۰	-۰.۲۱	۱	۰.۰۷	۰.۰۴	-۰.۰۸	-۰.۲۲	-۰.۲۷	۰.۰۴
حجم رسوب	۰.۱۲	-۰.۵۵	-۰.۰۸	۰.۶۶	۰.۳۴	-۰.۱۰	۰.۲۳	-۰.۰۹	-۰.۰۳	-۰.۰۲	۰.۱۱
رس	۰.۰۷	-۰.۲۹	۰.۴۸	۰.۰۶	۰.۰۷	۱	-۰.۱۹	-۰.۷۱	۰.۱۳	۰.۰۲	-۰.۲۳
سیلت	۰.۰۸	-۰.۳۱	-۰.۰۲	۰.۱۱	۰.۰۴	-۰.۱۹	۱	-۰.۵۶	۰.۳۵	۰.۵۲	۰.۶۸
شن	-۰.۱۲	۰.۴۷	-۰.۳۹	-۰.۱۳	-۰.۰۸	-۰.۷۱	-۰.۵۶	۱	-۰.۳۶	-۰.۳۹	-۰.۲۹
مواد آلی	-۰.۰۱	-۰.۰۴	۰.۱۳	۰.۰۶	-۰.۲۲	۰.۱۳	۰.۳۵	-۰.۳۶	۱	۰.۷۹	۰.۱۳
کربن آلی	۰.۰۳	-۰.۱۰	-۰.۰۵	۰.۰۲	-۰.۲۷	۰.۰۲	۰.۵۲	-۰.۳۹	۰.۷۹	۱	۰.۳۰
فاکتور (K)	۰.۱۳	-۰.۲۲	-۰.۰۳	-۰.۰۲	۰.۰۴	-۰.۲۳	۰.۶۸	-۰.۲۹	۰.۱۳	۰.۳۰	۱

۴. بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به بالا بودن تعداد پارامترهای مدل هیدرولوژیک SWAT از الگوریتم SUFI2 در برنامهٔ SWAT_CUP استفاده شد. این الگوریتم قابلیت تحلیل حساسیت پارامترها و بهینه‌سازی مقادیر بهینه برای پارامترهای ورودی در کمترین تکرار را دارد [۱۸]. مدل SWAT برای شبیه‌سازی رواناب سطحی از رابطهٔ SCS استفاده می‌کند که در این رابطه شمارهٔ منحنی و مقدار بارندگی برای محاسبهٔ رواناب به‌کار می‌روند از این رو تغییرات شماره منحنی تغییرات قابل‌توجهی در مقدار

رواناب ایجاد می‌کند. پارامتر شمارهٔ منحنی در بیشتر مطالعات نسبت به پارامترهای دیگر از حساسیت بالایی برای شبیه سازی رواناب برخوردار می‌باشد [۹، ۱۱، ۲۲]. پارامتر ALPHA_BNK نیز نشان دهندهٔ بالا بودن تأثیر ذخیرهٔ کناری رودخانه برای تحویل رواناب به خروجی حوضه می‌باشد که در برخی از مطالعات بالا بودن حساسیت این پارامتر بیان شده است [۱۳]. همچنین پارامترهای مربوط به آب‌زیرزمینی شامل زمان تأخیر انتقال آب از آخرین پروفیل لایهٔ خاک به سطح آب زیر زمینی (GW_DELAY) و ضریب α آب زیرزمینی (ALPHA_BF) از پارامترهای حساس دیگر می‌باشند. بالا بودن این پارامترها نشان دهندهٔ تأثیر بالای تغییرات آب زیرزمینی در جریان رودخانه می‌باشد. برای شبیه سازی رسوب نیز ۲۰ پارامتر اولیه انتخاب شدند که با تحلیل حساسیت پارامترها ۶ پارامتر حساس برای واسنجی انتخاب شدند. پارامتر شماره منحنی برای شبیه سازی رسوب نیز بیشترین حساسیت را نشان داد [۱۰، ۱۸، ۲۸]. پارمترهای فاکتور پوشش کانال (CH_COV1)، ضریب ماننینگ رودخانه (CH_N2) از پارامترهای حساس برای شبیه‌سازی رسوب در منطقه می‌باشند که نشان دهندهٔ تأثیر مشخصات کناره‌های رودخانه و کف بستر در تحویل رسوب می‌باشد. در مطالعات [۶ و ۳۰] نیز مشخصات کناره‌های رودخانه به‌عنوان عامل تأثیرگذار در تولید رسوب تعیین شده است.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی رواناب برای دورهٔ واسنجی نشان داد که مدل SWAT با ضریب R^2، NS و RMSE به‌ترتیب برابر با ۰/۸ و ۰/۷۱، ۰/۳۲ متر مکعب بر ثانیه از عملکرد بالایی برای شبیه‌سازی رواناب برخوردار می‌باشد. در بسیاری از تحقیقات عملکرد مدل SWAT برای شبیه سازی رواناب قابل قبول ارزیابی شده است [۸، ۱۰، ۲۲، ۲۵، ۲۸]. نتایج عملکرد مدل با نمایه‌های آماری برای شبیه سازی رواناب در دورهٔ اعتبار سنجی به‌ترتیب ۰/۷۴، ۰/۶۹ و ۰/۳۳ مترمکعب بر ثانیه به‌دست آمدند. نتایج اعتبار سنجی مدل با نتایج واسنجی مدل مطابق می‌باشد که نشان می‌دهد مدل می‌تواند برای منطقهٔ مطالعاتی استفاده شود. برای ارزیابی عملکرد مدل برای شبیه‌سازی رسوب نیز از نمایه‌های آماری ضریب تبیین، نش-ساتکلیف و ریشه مجموع مربعات خطا استفاده شد که برای دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی نتایج به‌دست آمده به‌ترتیب برابر با ۰/۷۵-۰/۶۶، ۰/۷۲- ۰/۶۴ و ۳۵/۲۷-۳۹-۲۶ تن در روز به‌دست آمد. نتایج بررسی عملکرد مدل برای شبیه‌سازی رسوب نیز نشان دهندهٔ عملکرد مناسب مدل برای شبیه‌سازی رسوب می‌باشد [۶، ۹، ۳۰، ۳۱].

با تلفیق نقشه‌های کاربری اراضی، خاک و شیب، نقشه واحدهای پاسخ هیدرولوژیک به‌دست آمد. این واحدها در مناطق پایین دست از وسعت بیشتری برخوردار بوده که نشان دهندهٔ همگنی خصوصیات در یک منطقهٔ وسیع می‌باشد در حالی‌که در مناطق بالادست وسعت واحدهای پاسخ هیدرولوژیک کمتر می‌باشد که نشان دهندهٔ بالا بودن تغییرات خصوصیات منطقه در این بخش‌ها می‌باشد. بنابراین لازم است برای داشتن شبیه‌سازی و مدیریت بهتر تعداد نمونه‌های بیشتری از این مناطق برداشت شود.

مقدار حداکثر رسوب معلق مربوط به بافت خاک لومی می‌باشد که در منابع مختلف بالا بودن بافت خاک لومی در تولید رسوب ذکر شده است [۶، ۱۲]. بررسی همبستگی بین مشخصات مختلف اندازه‌گیری شده و تولید رواناب و رسوب نشان داد که زمان تأخیر اولیه همبستگی منفی بالایی با مقدار رواناب و رسوب تولید شده دارد. به‌طوری‌که با افزایش زمان تأخیر مقدار رواناب و رسوب اندازه‌گیری شده در خروجی حوضه کاهش یافته است. بنابراین افزایش زمان تأخیر حوضه با استفاده از روش‌های مختلف می‌تواند راه حل مناسبی برای کاهش تلفات خاک منطقه باشد.

با استفاده از مدل SWAT رواناب خروجی از زیرحوضه‌های مطالعاتی بین ۰/۰۵ تا ۰/۶۵ مترمکعب بر ثانیه و رسوب تولیدی بین ۵/۹۸ تا ۱۷/۹۸ تن بر هکتار شبیه‌سازی شد. از طرف دیگر مقدار این متغیرها با استفاده از دستگاه شبیه ساز باران به‌ترتیب بین ۱/۶۶ تا

۶/۲۸ مترمکعب بر ثانیه و ۲/۸۵ تا ۳/۹ تن بر هکتار اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان می‌دهد که مقدار رواناب شبیه‌سازی شده با مدل SWAT کمتر از دستگاه شبیه‌ساز باران می‌باشد اما مقدار رسوب شبیه‌سازی شده بیشتر از دستگاه شبیه ساز باران می‌باشد که با مطالعات [۱۶] مطابقت دارد. مقدار رواناب و رسوب تولیدی از زیرحوضه‌های مختلف نشان می‌دهد که زیرحوضه‌های ۱۳ و ۱ دارای بیشترین پتانسیل برای تولید رواناب و رسوب می باشند که لزوم توجه و محافظت بیشتر از این زیرحوضه‌ها را نشان می‌دهند.

با توجه به بالا بودن قابلیت مدل SWAT در منطقه، این مدل می‌تواند برای اهداف مختلف مطالعاتی و بررسی سناریوهای مختلفی مدیریتی در منطقه استفاده شود. از طرف دیگر با توجه به این‌که دستگاه شبیه‌ساز باران در یک شرایط نزدیک به واقعیت اندازه‌گیری می‌شود از اهمیت بالایی در مطالعات رواناب و رسوب برخوردار می‌باشد.

References

[1] Aalami, M.T and Jhajharia, D. (2013). Trend analysis of groundwater using non-parametric methods (case study: Ardabil plain). Stochastic environmental research and risk assessment 27(2): 547-559.

[2] Abbaspour, K.C. (2007). SWAT-CUP, SWAT Calibration and Uncertainty Programs. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag: Duebendorf, Switzerland; pp 95.

[3] Assefa, E., Hans, R.B. 2015. Farmers' Perception of Land Degradation and Traditional Knowledge in Southern Ethiopia-Resilience and Stability. Land Degradation & Development. DOI: 10.1002/ldr.2364.

[4] Assouline, S. (2004). Rainfall-induced soil surface sealing: a critical review of observations, conceptual models, and solutions. Vadose Zone J. 3 (2): 570–591.

[5] Assouline, S., Thompson, S.E., Chen, L., Svoray, T., Sela, S., Katul, G.G. (2015). The dual role of soil crusts in desertification. J. Geophys. Res. Biogeosci. 120: 2108–2119

[6] Benedict, M., Khaldoon, A., Omondi, B. (2018). Uncertainty Analysis and Calibration of Swat Model for Estimating Impacts of Conservation Methods on Streamflow and Sediment Yield in Thika River Catchment, Kenya. International Journal of Hydrology Research 3(1): 1-11.

[7] Biddoccu, M., Ferraris, S., Opsi, F., Cavallo, E. (2016). Long-term monitoring of soil management effects on runoff and soil erosion in sloping vineyards in Alto Monferrato (North–West Italy). Soil and Tillage Research 155: 176-186.

[8] da Silva, R.M., Dantas, J.C., Beltrão, J.D.A., Santos, C.A. (2018). Hydrological simulation in a tropical humid basin in the Cerrado biome using the SWAT model. Hydrology Research 49(3): 908-923.

[9] Desta, H., Lemma, B. (2017). SWAT based hydrological assessment and characterization of Lake Ziway sub-watersheds, Ethiopia. Hydrology: Regional Studies 13: 122-137.

[10] Duru, U., Arabi, M., Wohl, E.E. (2018). Modeling stream flow and sediment yield using the SWAT model: a case study of Ankara River basin, Turkey. Physical Geography 39(3): 264-289.

[11] Emam, A.R., Kappas, M., Nguyen, L.H.K., Renchin, T. (2016). Hydrological modeling in an ungauged basin of Central Vietnam using SWAT model. Manuscript under review for journal Hydrol. Earth System 44: 1-33.

[12] Esmali, A. and Abdollahi, Kh. (2011). Watershed and soil conservation. University of Mohaghegh Ardabili publish, ۵۶۴ □.(□□ □□□□□□□)

[13] Golshan, M., Kavian, A., Rohani, H., Esmali, A. (2014). Multi–site Calibration of Runoff in Haraz Watershed using SWAT Model. Journal of soil and water research. 46(2): 293-303. (In Persion)

[14] Griensven, V.A., Meixner, T. (2006). Methods to quantify and identify the sources ofuncertainty for river basin water quality models, Journal of Water Science and Technology 53: 51-59.

[15] Habibi, A., Garibreza, M. (2018). Application of mathematical model to simulation and prioritization of sensitive formations in semi-arid climates. Geographical Space Journal, 18(64): 235-249.

[16] Habibi, A., ghodarzim M., peyrovan, H. (2018). Estimation of the sediment from geological alluvium with rain simulator in Hableh Rood basin. Watershed Management Science and Engineering, 12 (40): 59-68.

[17] Jalaleian, A., Mohammadi-Ghahsareh, A., Karimzadeh, H. (1994). Erosion and sediment, and its reasen in country watersheds and some case studies, Forth national soil and water conference, Esfahan university. (In Persion)

[18] Kavian, A., Gholami, L., Mohammadi, M., Spalevic, V., Soraki, M. F. (2018). Impact of Wheat Residue on Soil Erosion Processes. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca 46(2): 553-562.

[19] Kavianpour, M., Sadat-Mirsane, Z., Mirsane, S.A. (2008). Assessment unaccuracy value in simulated runoff using SWAT model. Eaith international river enginearing conference, Chamran university, Ahvaz, Iran. (In Persion)

[20] Kumar, A., Kumar, D. (2008). Predicting direct runoff from hilly watershed using geomorphology and stream-order-law ratios: case study. Journal of Hydrologic Engineering 13(7): 570-576.

[21] Lal, R. (2001). Soil degradation by erosion. Land Degrad. Dev. 12: 519–539

[22] Mohammadi, M., Kavian, A., Gholami, L. (2017). Simulation streamflow and Nitrat discharge in Talar watershed using SWAT model. Journal of Watershed Management Research, 8 (15): 45-60. (In Persion)

[23] Omani, N., Tajrishi, M., Abrishamchi, A. (2004). Simulation streamflow using SWAT model and GIS. Seventh river enginearing conference, Shahid Chamran University of Ahvaz, 8 pages. (In Persion)

[24] Omidvar, K. (2010). Introduction on watershed, vol 2, Yazd university publition. 292 Page. (In Persion)

[25] Osmani, H., Motamed Vaziri, B. Moeini, A. (2013). Flow simulation, calibration and validashion SWAT model (case study of upstream the Latyan dam). Journal of watershed engineering and management 5: 134-143.

[26] Pimentel D. Harvey C. Resosudarmo P. Sinclair K. Kurz D. McNair M. Crist S. Shpritz L. Fitton L. and Blair R. (1995). Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. Science 267:1117- 1121.

[27] Rastin, S., Habashi , H., Bardi-Sheikh, V., Mosavi, S.M. (2015). Effects of rainfall intensity changes via rainfall simulator in maneged area of Anjili-Mamraz. First development and promotion of agricultural sciences conference, Natural resource and enviromental, Iran. (In Persion)

[28] Rezazadeh, M.S., Bakhteiary, B., Abbaspour, K., Ahmadi, M.M. (2018). Simulation runoff, sediment and evapotransporation using management senarioes for reduce sedimet yield using SWAT model. Iran Watershed Science and Engineering, 12 (40): 41-51. (In Persion)

[29] Sadeghzadeh-Reihan, M., Yarahmadi, J. (2014). Assessment WEPP model in estimation erosion and sediment in the Marne lands of Khajeh region, Management system, 2 (1): 97-111. (In Persion)

[30] Shrestha, B., Babel, M.S., Maskey, S., Griensven, A.V., Uhlenbrook, S., Green, A., Akkharath, I. (2013). Impact of climate change on sediment yield in the Mekong River basin: a case study of the Nam Ou basin, Lao PDR. Hydrology and Earth System Sciences 17(1): 1-20.

[31] Swain, J.B., Patra, K.C. (2017). Streamflow estimation in ungauged catchments using regional flow duration curve: comparative study. Journal of Hydrologic Engineering 22(7): 1-12.