هیدروژئومورفولوژی، شماره‌ی ۲۵، سال هفتم، زمستان ۱۳۹۹، صص ۱۱۸-۱۰۱
Hydrogeomorphology, Vol. 7, No. 25, Winter 2021, pp (101-118)

عملکرد مؤلفه‌های زمین‌ساختی و لیتولوژیکی در بیلان آبی حوضه‌ی آبریز رودک

علیرضا حبیبی[1*]، حمیدرضا معصومی[2]

۱- دکتری ژئومورفولوژی و استادیار پژوهشکده‌ی حفاظت خاک و آبخیزداری کشور
۲- گروه زمین‌شناسی، واحد بندرعباس، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس، ایران

وصول مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۱۵ تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۱۶

چکیده

یکی از مهم‌ترین متغیرهای هیدرولوژیکی در حوضه‌ی آبریز شناخت دبی جریان پایه است. در این تحقیق از مدل جامع حوضه‌ی آبریز SWAT و مؤلفه‌های زمین‌شناختی برای شناخت بیلان آبی استفاده شده است. در این مدل با ورود نقشه‌های طبقات ارتفاعی، کاربری اراضی و خاک‌شناسی از اطلاعات هواشناسی برای شبیه‌سازی یک دوره‌ی بلندمدت سی‌ساله (۲۰۱۱-۱۹۸۱) استفاده شد. سپس در محیط SWAT-CUP اقدام به واسنجی مدل برای یک دوره‌ی ۸ ساله (۲۰۰۷-۲۰۰۰) و صحت‌سنجی سه ساله (۲۰۱۰-۲۰۰۸) شد. برای ارزیابی مدل، از معیارهای آماری ضریب تعیین وزنی و ضریب کارایی ناش-ساتکلیف استفاده شر. شاخص ناش-ساتکلیف برای تخمین دبی جریان در مرحله‌ی واسنجی ۰/۶ و صحت‌سنجی ۰/۵۱ بوده که نشان از دقت قابل پذیرش مدل بین داده‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی دارد. براساس بیلان آبی محاسبه شده، بیش از ۷۲ درصد بارش تبخیر گردیده و رواناب سطحی حوضه ۳/۷ درصد است. جریان زیر قشری در جهت شیب، به سمت خروجی حوضه، برابر با ۲۰/۲۷ درصد و ۱/۹۳ درصد از بارش وارد سفره‌های مشترک آب زیرزمینی شده و تنها ۰/۱۲ درصد به عمق نفوذ می‌کند. به منظور بررسی اثر عوامل زمین‌ساختی و لیتولوژیکی، از مؤلفه‌های شکستگی‌ها، جهت شیب لایه‌ها و لیتولوژی کلی واحدهای سنگی استفاده شد. هم راستا بودن شیب لایه‌بندی با جهت مسیر رودخانه زهکش‌کننده‌ی حوضه و وجود گسل لتیان در مسیر زهکش، تأثیر بسزایی در خروجی رودخانه دارد. همچنین براساس ساختار لیتولوژیکی، پس از نفوذ بارش در لایه‌های سنگی، گسل‌ها آب را به صورت جریان زیر قشری منتقل می‌کنند. بخش اندکی از جریان، به سفره‌ی عمیق منتقل می‌شود. لذا می‌توان بیان کرد که جریان زیرقشری تامین‌کننده‌ی آب در حوضه‌ی رودک است.

کلمات کلیدی: بیلان آبی، مؤلفه‌های زمین‌شناختی، جریان زیرقشری، حوضه‌ی رودک، شمال شرق تهران

* نویسنده‌ی مسئول: **E-mail**: habibi1354@yahoo.com

۱- مقدمه

اهمیت مدیریت بهره‌برداری منابع آب در حوضه‌های آبریز با توجه به وضعیت بحرانی برداشت آب‌های زیرزمینی و لزوم توجه بیشتر به آب‌های سطحی در اقلیم خشک و نیمه‌خشک قابل چشم‌پوشی نیست. آگاهی از وضعیت بیلان آبی در سطح حوضه‌های آبریز ، یکی از راهکارهای مؤثر در مدیریت بهینه‌ی منابع آب است. برای این منظور استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی جامع و ارزان قیمت می‌تواند راهگشای خوبی برای برنامه‌ریزان مدیریت آب، در تخمین بیلان آب حوضه‌های آبریز باشد. مدل، نمادی از واقعیت است که مهم‌ترین ویژگی‌های دنیای واقعی را به صورتی ساده و کلی بیان می‌کند. مدل ها ابزاری عملی هستند که می‌توان به کمک آن‌ها به درکی از واقعیت، البته نه کل واقعیت، بلکه بخش مفید و قابل فهم آن دست یافت (رفاهی،۲۰۱۰: ۶۷۱). مدل‌های هیدرولوژی با هدف درک بهتر از رفتارهای هیدرولوژیکی و نحوه تغییر رفتارها و اثرات آن و سنتز داده‌های هیدرولوژیکی به منظور طراحی منابع آب، کنترل سیل، تعدیل جریان آب و در کل، برنامه ریزی و پیش بینی جریان ارائه می‌شوند. مدل ARC-SWAT[1]، مدلی در مقیاس حوضه آبخیز برای پیش‌بینی تأثیر روش‌های مختلف مدیریت اراضی بر مقادیر آب، رسوب و مواد شیمیایی-کشاورزی در سطح حوضه‌های آبریز پیچیده و بزرگ با خاک، کاربری اراضی و شرایط مختلف مدیریتی در دراز مدت طراحی شده است. در این زمینه وان‌لیو و گاربرش[2] (۲۰۰۳: ۴۱۳-۴۲۶) پیش‌بینی شدت جریان در مدل ARC-SWAT و مدل HSPF را در هشت حوضه‌ی ایالت اوکلاهامای آمریکا با یکدیگر مقایسه کردند. ایشان دریافتند که این مدل در رابطه با پیش‌بینی شدت جریان، نتایج قابل اعتمادی است. بورا و برا[3] (۲۰۰۴: ۷۸۹-۸۰۳) و نیتچه و همکاران[4] (۲۰۰۵: ۴۹۴)، پس از مقایسه‌ی مدل ARC-SWATبا چندین مدل دیگر نتیجه گرفتند که این مدل نتایج امیدوارکننده‌تری در شبیه‌سازی پیوسته حوضه‌های آبریز بدست می‌دهد. رستمیان و همکاران[5] (۲۰۰۸: ۹۷۷-۹۸۸) مدل ARC-SWATرا برای شبیه‌سازی رواناب و رسوب دو حوضه‌ی آبخیز در شمال حوضه‌ی کارون مورد استفاده قرار دادند. آنها برای واسنجی و آنالیز حساسیت مدل از برنامه‌ی SUFI-2 استفاده کردند. در این بررسی مقادیر رواناب برآورد شده کاملاً به مقادیر مشاهده شده شبیه بودند. عباسپور[6] (۲۰۰۸: ۹۵)، با بهره‌گیری از فایل‌های خروجی مدل SWAT-ARC چهار برنامه به نام‌های SUFI2، ParaSol ، GLUE و MCMC را به مدل مذکور ملحق کرد و دریافت که بکارگیری آنها در یافتن محدوده‌های پارامترهای جریان، رسوب به منظور واسنجی مدل بسیار مؤثر می‌باشد. فرامرزی و همکاران[7] (۲۰۰۹: ۴۸۶-۵۰۱) مهم‌ترین اطلاعات در برنامه‌ریزی‌های بلند مدت ملی منابع قابل تجدید آب در ایران، را بررسی کرده و از برنامه‌ی SUFI2 مدل ARC-SWAT برای واسنجی

1- ARC_SWAT
2- Van Liew and Garbrecht
3- Borah and Bera
4- Neitch et al.
5- Rostamian et al.
6- Abbaspour
7- Faramarzi et al.

و اعتبارسنجی مدل هیدرولوژیکی ایران استفاده کرده‌اند. اپلد و همکاران[1] (۲۰۱۵: ۸۲۵-۸۴۳) با استفاده از مدل SWAT-ARC به مدلسازی کیفیت آب زیرزمینی در یک حوضه‌ی آبخیر کشور اسپانیا پرداخته و نتیجه گرفتند که مدل قادر به شبیه‌سازی صحیح روند کیفی آب می باشد. ابونادا و همکاران[2] (۲۰۲۱) آسیب‌پذیری آبخوان ساحلی جنوب غربی فلسطین را با استفاده از مدل با استفاده از مدل ARC-SWAT بررسی نموده و نتایج را با سایر مدل‌ها مقایسه کرده‌اند. حسینی[3] (۲۰۱۶: ۳۷-۵۵) در پژوهش خود جریان رودخانه‌ی قره‌سو در استان کرمانشاه را با استفاده از مدل ارزیابی ARC-SWAT شبیه‌سازی کرد. براساس نتایج این تحقیق استفاده از مدل واسنجی شده برای شبیه‌سازی جریان ماهانه به منظور بررسی اثرات اقدامات مختلف مدیریتی و یا تغییرات محیطی بر دبی جریان توصیه شده. حبیبی و همکاران[4] (۲۰۱۶: ۲۷۵)، در حوضه‌ی حبله رود اقدام به شبیه‌سازی رواناب و رسوب نموده و ارتباط معنی‌داری بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی جریان با مقدار مشاهده‌ای بدست آورده‌اند. نادری و همکاران[5] (۲۰۱۸: ۶۱-۷۹) بررسی تأثیر تغییرکاربری اراضی و اقلیم بر رواناب حوضه‌ی آبریز با استفاده از مدلSWAT در حوضه‌ی گرین پرداخته و نتیجه‌گیری کردند که کاهش میزان رواناب در حوضه‌ی گرین براثر تغییر اقلیم، بیشتر از کاهش تحت اثر تغییر کاربری اراضی است. قضاوی و همکاران[6] (۲۰۱۸: ۵۴-۷۹) به بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی آینده بر تغییرات دبی رودخانه‌ی هروچای اردبیل با استفاده از مدل‌های SWAT و LARS-WG پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل SWAT طی دوره‌ی واسنجی و اعتبارسنجی دارای عملکرد قابل قبولی بوده است.

سد لتیان به عنوان یکی از منابع اصلی آب مصرفی تهران، از طریق رودخانه جاجرود آبگیری می شود. حوضه‌ی آبریز رودک یکی از حوضه‌های تحت جریان این رود بوده و با توجه به فاصله‌ی اندک به دریاچه‌ی سد به لحاظ شرایط زمین‌ساختی و لیتولوژیکی از اهمیت بالایی برخوردار است. بخشی از جریان جاجرود تحت در این حوضه تحت تأثیر گلسش به جریان زیرزمینی منتقل می‌شود. لیکن این عملکرد از نظر کمی تاکنون ناشناخته مانده است. تحقیق حاضر با مشاهده اولیه میدانی و طرح یک سوال شکل گرفته که، واحدهای سنگی با نفوذپذیری بالا، همراه با عملکرد گسل‌ها چه حجمی از رواناب را به سفره‌های آب زیرزمینی انتقال می‌دهند. لذا با توجه به شرایط زمین‌شناختی و وقوع کمبود آب در مخزن سد لتیان، حوضه رودک، به عنوان منطقه‌ی مطالعه انتخاب گردید. در این تحقیق از مدل پایه‌ی فیزیوگرافی SWAT و عملیات میدانی و مطالعات زمین‌شناسی شامل زمین ساخت و سنگ‌شناسی جهت پاسخ به سوال تحقیق استفاده شده است.

1- Epelde et al.
2- Abunada et al.
3- Hoseini
4- Habibi et al.
5- Naderi et al.
6- Ghazavi et al.

۱-۱- محدوده‌ی مورد مطالعه

حوضه‌ی آبریز رودک از نظر تقسیمات زمین‌ساختی، جزء ایالت لرزه زمین‌ساختی البرز- آذربایجان است. ایالت لرزه زمین‌ساختی البرز- آذربایجان، پهنه‌ای زلزله‌خیز است که رشته‌کوه البرز، بخش شرقی این ایالت را در برمی‌گیرد (کره‌ای و کیانی[1]، ۱۹۹۴: ۱-۹۷). مساحت این حوضه بیش از ۴۲۰/۴۱ کیلومتر مربع و بلندترین نقطه ارتفاعی آن ۴۳۴۶ متر و حداقل ارتفاع آن کمتر از ۱۷۱۳ متر از سطح دریا است. حوضه‌ی آبخیز رودک به لحاظ اقلیم، در منطقه سردسیر با بارش برف واقع شده است. حداکثر بارش حوضه بیش از ۸۰۰ میلی متر و دمای حداکثر و حداقل حوضه به ترتیب ۲۷ و ۶ درجه سلسیوس است. حداکثر دبی مشاهده شده سالیانه در ایستگاه‌های گرمابدره و آهار ۹۷ و ۷۳/۵ مترمکعب برثانیه است (شکل ۱). به لحاظ هیدرولوژیکی، این حوضه یکی از زیرحوضه‌های حوضه‌ی آبریز جاجرود است که شاخه‌ی شرقی رودخانه‌ی جاجرود در آن جریان دارد. این رود از ارتفاعات کلون بستک سرچشمه می‌گیرد و پس از عبور از دربندسر، شمشک، میگون و فشم با شاخه‌ی دیگری که از به هم پیوستن شاخه‌های فرعی آنیکا، لالان و روته بوجود آمده، متصل گردیده و بـه نام جاجرود خوانده می‌شود. رود آهار از سمت جنوب و امامه از سمت شمال به آن متصل شده و رود به سمت مشرق جریان می‌یابد (آراء و همکاران[2]، ۲۰۱۲: ۳-۵۲).

شکل(۱): موقعیت مکانی و DEM ارتفاعی حوضه‌ی رودک
Fig (1): The study area and elevation DEM

1- Koreae and Kiani
2- Ara et al.

۲-مواد و روش

۲-۱- تئوری و ارزیابی مدل ARC-SWAT

در این تحقیق از مدل ARC-SWAT برای شبیه سازی رواناب منطقه استفاده شده است. به منظور کالیبره کردن و صحت‌سنجی نتایج مدل، از پیوست ARC-SWAT [1] بهره گرفته شد. کلیه‌ی نمودارها و جداول نتایج خروجی این مدل می‌باشند. مدل ARC-SWAT دارای رابط گرافیکی قدرتمند در نرم‌افزارهای GIS می‌باشد، به طوری که اغلب داده‌ها را از این طریق دریافت می‌کند و امکان استفاده از آن در نرم‌افزار ArcGIS وجود دارد. مدل ARC-SWAT در شبیه‌سازی چرخه‌ی هیدرولوژیک از معادله بیلان آب استفاده می‌کند، فرآیندهای هیدرولوژیک که شبیه‌سازی می‌شوند شامل تبخیر و تعرق، رواناب سطحی، ذوب برف، نفوذ سطحی، نفوذ عمقی و جریان آب زیرزمینی و جریان‌های زیرسطحی هستند.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^{t}(R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \qquad (۱)$$

SWt: مقدار نهایی آب در خاک (میلی‌متر).

SW0: مقدار اولیه آب در خاک در روز I ام (میلی‌متر).

Rday: مقدار بارندگی در روز I ام (میلی متر).

Qsurf: مقدار رواناب سطحی در روز I ام (میلی‌متر).

Ea: مقدار تبخیر و تعرق در روز I ام (میلی‌متر).

Wseep: مقدار آبی که به پروفیل خاک (منطقه غیر اشباع خاک) در روز I ام وارد می شود (میلی متر).

Qgw: مقدار جریان برگشتی در روز I ام (میلی متر).

در این مدل، حوضه به تعدادی زیرحوضه و زیرحوضه‌ها به تعدادی واحد واکنش هیدرولوژیک، (HRU) تقسیم می‌شوند. این واحدها تا حد امکان مشابه هستند و دارای ترکیبات یکسانی از خاک، توپوگرافی و پوشش گیاهی می‌باشند. در مدل بر حسب شرایط و مشخصات حوضه، مسیرهای مختلفی جهت حرکت آب در حوضه پیش‌بینی شده است. ابتدا با توجه به دمای هوا، سایر داده‌های ورودی تنظیم کننده میزان بارش و ذوب برف، مقدار ذوب برف و تبخیر و تعرق محاسبه می‌شود. مجموع باران، برف ذوب شده و آب آبیاری کشاورزی، رواناب سطحی یا نفوذ را تشکیل می‌دهند (حسینی و همکاران[2]، ۲۰۱۳: ۲۴۶ و حسینی[3]، ۲۰۱۰: ۲۲۶).

1- Swat Cup
2- Hosseini et al.
3- Hosseini

فرایند ارزیابی کارایی مدل نه تنها در جریان توسعه‌ی مدل و فرایند واسنجی، بلکه در زمان ارائه نتایج به سایر محققین نیز از اهمیت اساسی برخوردار است. شاخص‌های مختلفی برای این منظور ارائه شده است. بدین منظور برای ارزیابی کمی عملکرد مدل در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی، از شاخص‌های آماری ضریب تبیین R2 و نش- ساتکلیف (NS) به عنوان مهم‌ترین معیار در این تحقیق استفاده گردید.

الف) ضریب همبستگی (R2):

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(P_i - \bar{P})}} \quad (۲)$$

که در آن، n تعداد مشاهدات، O_i و P_i مقادیر متناظر مشاهده شده و پیش‌بینی شده و $\bar{O}$ و $\bar{P}$ نیز میانگین ریاضی مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده هستند. ضریب همبستگی نشان می‌دهد که خط رگرسیون بین مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده شده تا چه میزان به حداکثر مقدار هماهنگی بین این دو سری مقدار نزدیک است و از صفر تا یک تغییر می‌کند.

ب) ضریب نش-ساتکلیف[1] (NS):

توابع هدف مختلفی برای بهینه‌سازی مدل در این نرم افزار وجود دارد. در این تحقیق مقادیر بهینه‌ی پارامترهای حساس مدل با استفاده از رابطه‌ی نش ساتکلیف محاسبه شده‌اند. تابع هدف ناش- ساتکلیف از مهم‌ترین توابع بوده که توسط بسیاری از محققین در مدلسازی حوضه‌های آبریز استفاده شده است. رابطه‌ی NS به قرار زیر است.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2} \quad (۳)$$

که در آن، O مقدار دبی اندازه‌گیری شده و P مقدار دبی شبیه‌سازی شده است. مقدار NS از منفی بی‌نهایت تا یک متغیر است و نشان می‌دهد که خط رگرسیون بین مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده تا چه مقدار به خط رگرسیون با شیب یک (خط با شیب ۱:۱) هماهنگی دارد. تاکنون هیچ معیار خاصی به‌طور دقیق در مورد مقادیر مناسب برای این پارامتر ارائه نشده است. اما به‌طور کلی اگر شاخص نش-ساتکلیف بیشتر از ۰/۷۵ باشد، مدل عالی و کامل، و اگر بین ۰/۷۵ تا ۰/۳۶ باشد، رضایت‌بخش و اگر کمتر از ۰/۳۶ باشد، غیرقابل قبول فرض می‌شود (نش و ساتکلیف، ۱۹۷۰: ۲۸۲-۲۹۰).

1- Nash and Sutcliffe

براساس مؤلفه‌های زمین‌شناختی مانند شکستگی‌ها، گسل‌ها و ماهیت سنگ‌شناسی، ارتباط بارش و نفوذ با آنها بررسی گردیده است. با استفاده از داده‌های میدانی، تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌ی زمین‌شناسی، مؤلفه‌های زمین شناختی مطالعه شد. در این زمینه با توجه به مشخصات لیتولوژیکی (نفوذپذیری ذاتی و لیتولوژی) و زمین ساختی (گسل‌ها و شکستگی‌های مهم) غلبه جریان آب رو به پایین و تغذیه‌ی سفره‌ی آب زیرزمینی بر سایر پارامترهای مؤثر در رواناب متصور است. به منظور بررسی بیلان آبی، ابتدا DEM با دقت مکانی ۳۰ متر به محیط مدل فراخوانده شد. سپس زیرحوضه‌ها و آبراهه با معرفی ایستگاه هیدرومتری رودک به عنوان خروجی حوضه تفکیک گردید. در مرحله‌ی بعد با استفاده از نقشه‌های خاک (مروج و همکاران[1]، ۲۰۱۲: ۱۳۶)، کاربری اراضی سال ۲۰۱۰ (علی‌زاده و همکاران[2]، ۲۰۱۶: ۸۹-۹۸) و طبقات شیب، واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (HRU) تعریف شدند. حاصل کار این مرحله، تشکیل ۲۷ واحد پاسخ هیدرولوژی بود که در شکل ۲ نشان داده شده است.

داده‌های هواشناسی شامل داده‌های بارش روزانه و دمای حداقل و حداکثر روزانه ایستگاه‌های باران سنجی آهار، فشم ، گرمابدر و شمال تهران (سازمان هواشناسی کشور[3]، ۲۰۱۱) وارد مدل شدند. مشخصات ایستگاه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. سپس از مدل فیزیوگرافی بر پایه نقشه‌های شیب، خاک و کاربری اراضی و داده بارش و دما برای اجرای مدل SWAT استفاده گردید و بیلان آبی حوضه به دست آمد.

جدول (۱): مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده در منطقه‌ی تحقیق

Table (1): Meteorological stations used in the research

ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (متر)	ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (متر)
رودک	۵۱° ۳۳′	۳۳° ۵۱′	۱۷۱۰	شمال تهران (سینوپتیک)	۵۱° ۳۷′	۳۵° ۴۷′	۱۵۴۸
امامه	۵۱° ۳۴′	۳۵° ۵۴′	۲۲۴۸	آهار	۵۱° ۲۸′	۳۵° ۵۶′	۲۱۰۰
گلوکان	۵۱° ۳۲′	۳۵° ۵۲′	۱۸۹۵	فشم	۵۱° ۳۳′	۳۵° ۵۵′	۲۱۷۴
شمشک	۵۱° ۳۰′	۳۶° ۰۰′	۲۷۰۰	گرمابدر	۵۱° ۳۷′	۳۵° ۵۹′	۲۵۱۲

۲-۲- مؤلفه‌های زمین‌شناسی منطقه‌ی مورد مطالعه

باتوجه به اهمیت منطقه‌ی سدلتیان از نظر تأمین آب شهر تـهران، مطالعات مـتعددی در مورد مؤلفه‌های زمین‌شناختی آن انجام شده که می‌توان به تحقیقات گورابی و کیا رستمی[4] (۲۰۲۰: ۱-۱۹)، گورابی و کیارستمی (۲۰۱۵: ۴۶۵-۴۷۹) و قلی‌پور و مرادی[5] (۲۰۱۱) اشاره نمود. وجود گسل‌های متعدد رانده تا معکوس با مؤلفه‌ی

1- Moravej et al.
2- Alizadeh et al.
3- IRIMO
4- Gourabi and Kiarostami
5- Gholipour and Moradi

امتداد لغز چپگرد مانند گسل مشا-فشم و گسل نردبانی- پلکانی شمال تهران و چند گسل فرعی دیگر مانند گسل لشگرک، گرمابدر و تلو ویژگی‌های خاصی را به این حوضه داده که از جمله آنها می‌توان به جدایی قطعات سنگی بزرگ و کوچک از دیواره‌های پرشیب دامنه‌ها، دره‌های عمیق و ارتفاعات بلند، شکنندگی سنگ‌ها در اثر دخالت سیستم‌های گسلی و تأثیرگذاری شان بر الگوهای آبراهه‌ای، نبودهای رسوبی بر روی برخی از برجستگی‌های قدیمی در فاصله‌های بسیار کوتاه جانبی، تغییرات شدید رخساره‌ها و ضخامت سازندها و یا قطع شدگی آنها اشاره کرد (آراء و همکاران، ۲۰۱۲: ۳-۵۲).

زمین‌شناسی این منطقه توسط محققان مختلفی مورد بررسی قرار گرفته و تعداد زیادی از مقاطع تیپ سازندها در آن واقع شده است. سازندهای پالئوزوییک زاگون، میلا و مبارک قدیمی‌ترین سازند دارای رخنمون در منطقه‌ی مورد مطالعه هستند. همچنین سازندهای الیکا، شمشک و تیزکوه مزوزوییک و کرج و قرمز بالایی، مربوط به سنوزوییک و نهشته‌های عهد حاضر سایر رخنمون‌های سنگی و رسوبی در منطقه‌ی مورد بررسی را تشکیل می‌دهند. واحدهای سنگی منطقه براساس داده‌های میدانی و مطالعات سنجش از دور با نرم‌افزار Arc GIS و برپایه تصویر ماهواره‌ای Landsat 8 سال ۲۰۱۹ تفکیک شده است (شکل۳).

شکل (۲): موقعیت ایستگاه و زیرحوضه‌های ایجاد شده در مدل ARC_SWAT

Fig (2): Location of stations and created sub-basins in the ARC_SWAT model

شکل (۳): نقشه‌ی زمین‌شناسی حوضه‌ی رودک

Fig (3): Geological map of Roodak basin

از دیدگاه لیتولوژی، واحدهای سنگی و رسوبی معرفی شده به ترتیب از قدیم به جدید دارای شرایط زیر هستند:

- سیلتستون میکادار قرمز و ماسه سنگ سازند زاگون (Cz)
- سنگ آهک و آهک دولومیتی، ماسه سنگ و شیل سازند میلا (Com)
- سنگ آهک فسیل دار تیره رنگ و شیل سازند مبارک (Cm)
- سنگ آهک االیتی، آهک شیلی نازک لایه و سنگ آهک دولومیتی و دولومیت ضخیم لایه سازند الیکا (Tre)
- ماسه سنگ و شیل خاکستری سازند شمشک (TRjs)
- کنگلومرا، ماسه سنگ و شیل با افق‌های زغالدار سازند شمشک (Jk)

- سنگ آهک خاکستری روشن توده‌ای سازند لار (Jl)
- آهک توده‌ای روشن اربیتولین دار سازند تیزکوه (Ktzl)
- کنگلومرای قرمز پلی ژنیک و ماسه سنگ (E1c)
- توف سبز کرج (Etu)
- توف با میان لایه‌های شیل سازند کرج (Eksh)
- شیل سبز تیره با میان لایه‌های توف سازند کرج (Esh)
- لایه‌های توف سبز و شیل توفی سازند کرج (Ek)
- مارن قرمز، مارن ژیپس دار، ماسه سنگ و کنگلومرا سازند قرمز فوقانی (Mur)
- رسوبات ماسه‌ای و ماسه بادی عهد حاضر (Qsd)

گسل‌های اصلی منطقه مطالعه گسل مشا- فشم و گسل لتیان هستند. گسل مشا- فشم با شاخه‌های فرعی آن اصلی‌ترین کنترل‌کننده‌ی فعالیت‌های تکتونیکی منطقه است. شاخه اصلی این گسل به‌صورت راندگی از بخش میانی حوضه عبور کرده و سازندهای مربوط به پالئوزوییک و مزوزوییک را روی سازندهای جوان‌تر رانده است. به علاوه شاخه‌های فرعی آن با عملکردهای نرمال و معکوس موجب بهم ریختگی در ساختارهای زمین‌شناسی منطقه شده‌اند. اغلب این گسله‌ها راستایی در امتداد گسل اصلی (غرب، شمالغرب – شرق، جنوب شرق) دارند. بخش شمال غربی گسل لتیان دیگر شکستگی تکتونیکی مهم حوضه‌ی رودک بوده و در قسمت‌های منتهی به خروجی حوضه عملکرد دارد. در این بخش، رود امامه در راستای عملکرد گسل لتیان جریان دارد.

۳-یافته‌ها و بحث

پس از اجرای مدل ARC-SWAT ، خروجی های مدل شامل مؤلفه های رواناب، جریان زیرسطحی، آب زیرزمینی و غیره به صورت فایل متنی حاوی اطلاعات به دست آمد و توسط نرم‌افزار SWAT-CUP آنالیز حساسیت و صحت سنجی انجام شد. با استفاده از نتایج آنالیز حساسیت مدل، از بین ۱۷ پارامتر، تعداد نه پارامتر به عنوان پارامترهای حساس شناسایی شدند (شکل ۴). با اجرای الگوریتم SUFI2 مقادیر بهینه پارامترهای حساس مدل تعیین شد که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است.

شکل (۴): شناسایی پارامترهای حساس مدل از بین۱۷ پارامتر انتخابی
Fig (4): Identification of model parameters from 17 selected parameters

با توجه به زیاد بودن تعداد پارامترهای مدل، برای انجام موفق و سریع‌تر مرحله‌ی واسنجی، از تحلیل حساسیت با روش یک پارامتر در هر بار مدل، برای شناسایی پارامترهای مهم‌تر و حساس‌تر استفاده شد. واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل با استفاده از الگوریتم SUFI2 در محیط نرم-افزار SWAT-CUP و از داده‌های جریان رودخانه مربوط به سال‌های ۲۰۱۱-۱۹۸۱ استفاده شده است. پس از شبیه سازی با استفاده از مقادیر تعیین شده برای پارامترها در مرحله واسنجی برای سال‌های (۲۰۰۷ -۲۰۰۰) و بر اساس آمار سال‌های (۲۰۱۱-۲۰۰۸) اعتبار سنجی صورت گرفت. نتایج با شاخص‌های ضریب تعیین (R2)، ضریب تعیین وزنی (bR2)، نش- ساتکلیف (NS) و ریشه‌ی میانگین مربعات خطا (RMSE) ارزیابی گردید.

هیدروگراف شبیه‌سازی شده و هیدروگراف مشاهداتی ماهانه در دوره‌ی صحت‌سنجی در شکل ۵ و ۶ و نتایج شاخص‌های ارزیابی مدل در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین، نتایج شاخص‌های ارزیابی مدل در دوره‌ی صحت‌سنجی در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول (۲): پارامترهای حساس و مقدار بهینه‌ی پارامترهای مدل
Table (2): Sensitive and the optimal value of model parameters

نام پارامتر	علامت اختصاری پارامتر	حداقل	حداکثر	مقدار بهینه
درجه حرارت ذوب برف	V__SMTMP.bsn	-۲/۶۱۰۷۸۰	۳۱۲۴۰۸۳	۱/۴۳۷۷۱۹
ضریب آلفا جریان پایه	V__ALPHA_BNK.rte	-۰/۰۵۲۳۴۲	۰/۱۸۸۷۵۰	۰/۰۶۶۸۷۸
دمای بارش برف	V__SFTMP.bsn	-۲/۰۴۸۱۷۸	-۰/۲۷۸۸۹۴	-۱/۲۶۱۷۳۱
هدایت الکتریکی اشباع خاک	R__SOL_K (...).sol	۰/۸۵۲۹۸۸	۱/۷۲۹۲۴۶	۱/۳۷۱۲۹۵
عامل تاخیر دمای برف	V__TIMP.bsn	-۰/۵۷۱۸۱۳	-۰/۰۶۲۸۹۸	-۰/۲۲۹۵۶۸
هدایت هیدرولیکی کانال	V__CH_K2.rte	۶۰/۸۱۲۱۰۳	۹۱/۴۰۹۳۰۲	۶۱/۹۲۸۹۰۲
چگالی توده خاک	R__SOL_BD (.).sol	۰/۲۸۹۸۲۶	۰/۸۰۵۳۳۸	۰/۴۲۹۲۷۲
ضریب مانینگ در کانال اصلی	V__CH_N2.rte	۰/۰۳۹۵۲۷	۰/۱۲۰۲۸۱	۰/۱۱۰۲۲۷
ضریب تبخیر از سفره زیرزمینی	V__GW_REVAP.gw	۰/۱۴۱۴۷۵	۰/۰۵۹۸۶۵	۰/۱۲۰۱۳۴

جدول (۳): ارزیابی کارایی مدل در مرحله‌ی واسنجی
Table (3): Evaluation of model efficiency in the calibration stage

معیار ارزیابی	مشخصه	مقدار
ضریب نش_ ساتکلیف	NS	۰/۶(رضایت بخش)
ضریب تعیین	R2	۰/۶۳
ضریب تعیین وزنی	bR2	۰/۴۵۹۱
میانگین مربعات خطا	MSE	۲/۷

جدول (۴): ارزیابی کارایی مدل در مرحله‌ی صحت‌سنجی
Table (4): Evaluation of model efficiency in the validation stage

معیار ارزیابی	مشخصه	مقدار
ضریب نش_ ساتکلیف	NS	۰/۵۱ (رضایت‌بخش)
ضریب تعیین	R2	۰/۵۵
ضریب تعیین وزنی	bR2	۰/۴۴۶۳
میانگین مربعات خطا	MSE	۲/۹

شکل (۵): مقایسه‌ی هیدروگراف‌های شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی در دوره‌ی واسنجی (۲۰۰۷-۲۰۰۰)

Fig (5): Comparison of simulated and observational hydrographs in the calibration period (2000-2007)

شکل (۶): مقایسه‌ی هیدروگراف‌های شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی در دوره‌ی صحت‌سنجی (۲۰۱۰-۲۰۰۸)

Fig (6): Comparison of simulated and observational hydrographs in the validation period (2008-2010)

شاخص نش- ساتکلیف پرکاربردترین شاخص برای ارزیابی نتایج در شبیه سازی‌های جریان پیوسته است. همان گونه که شاخص ناش- ساتکلیف در جدول‌های ۳ و ۴ آمد، مقادیر این پارامتر در دوره‌ی واسنجی و صحت سنجی به ترتیب معادل۰/۶و ۰/۵۱ بوده که رضایت بخشی مدل را نشان می‌دهد. درباره‌ی شاخص‌های ضریب تبیین (R2) و ضریب تعیین وزنی (bR2) در مرحله‌ی واسنجی و صحت‌سنجی ۰/۶۳، ۰/۵۵و۰/۴۵۹۱، ۰/۴۴۶۳ است. لذا مدل همبستگی خوبی بین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی را نشان می‌دهد. میانگین مقادیر اجزای بیلان آبی حوضه‌ی رودک براساس نتایج شبیه‌سازی مدل ارائه شده است. سهم رواناب سطحی، جریان جانبی و جریان آب زیرزمینی در مقدار جریان ماهانه رودخانه‌ی رودک در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول (۵): مقادیر اجزای بیلان آبی حوضه‌ی رودک
Table (5): Water balance components of Roodak basin

متغیر	مقدار (میلی متر)	درصد نسبت به بارش
بارش	۵۸۵/۶۷	۱۰۰
تبخیر و تعرق	۴۲۷	۷۲/۷۵
آب موجود در خاک	۱۰/۴۴	۱/۷۸
جریان سطحی	۱۸/۴۹	۳/۱۵
جریان زیر قشری	۱۱۸/۷۲	۲۰/۲۷
جریان آب زیرزمینی	۱۱/۳۵	۱/۹۳
نفوذ عمقی	۰/۶۸	۰/۱۲

نتایج نشان داد که مقدار بارش حدود ۵۸۵ میلی متر بوده که حدود ۷۲ درصد آن بصورت تبخیر و تعرق از سطح حوضه خارج می شود. ۳ درصد از مجموع بارش بصورت جریان سطحی به سمت خروجی حوضه (دریاچه سد لتیان) جاری شده است. در مجموع ۲ درصد از بارش، به سفره های آب زیر زمینی انتقال یافته است. باتوجه به نفوذپذیری ذاتی و شکستگی های واحدهای سنگی و عملکرد گسل لتیان در محدوده‌ی خروجی حوضه، این حجم از انتقال بارش به عمق بسیار ناچیز می‌باشد. لیکن نتایج نشان داد که بخش عمده‌ی جریان به صورت زیر قشری، تأمین انتقال‌دهنده‌ی آب به دریاچه‌ی سد است.

براساس داده‌های زمین‌شناختی، شامل اطلاعات گسل‌ها و شکستگی‌ها و سنگ‌شناسی منطقه، نواحی بالادست حوضه واجد افق‌های سنگی با ماهیت نفوذپذیری ذاتی نسبتاً بالایی به لحاظ شرایط فیزیکی و انحلالی هستند. این واحدهای سنگی مجموعه سنگ‌های آهکی و ماسه سنگی سازندهای پالئوزوییک و مزوزوییک را شامل می‌شوند. لذا با توجه به نفوذپذیری ذاتی (لیتولوژیکی) و ثانویه (ناشی از فرایندهای زمین ساختی) در این نواحی

توان متصور جهت جریان رو به پایین آب بالا است. در نواحی میانی و پایین دست با توجه به سنگ‌شناسی غالب توف و مارن، نفوذپذیری ذاتی واحدهای سنگی نسبتاً پایین می‌باشد. لیکن بواسطه عملکرد گسترده شکستگی‌های تکتونیکی، فرایند انتقال آب‌های سطحی به عمق تسریع می‌گردد. در مقابل اثر پرشدگی‌های ثانویه در سطوح شکستگی این فرایند انتقال را به اعماق زیاد مختل کرده و وقوع جریان زیرقشری را محتمل می‌نماید.

۴- نتیجه‌گیری

به طور کلی مقادیر همه شاخص‌های ارزیابی و نتایج مطالعات زمین شناختی، بیانگر دقت قابل قبول مدل در شبیه سازی جریان رودخانه رودک هستند. با اجرای مدل ARC-SWAT در حوضه رودک امکان شبیه‌سازی جریان ماهانه دوره مورد پژوهش در این حوضه فراهم شد. مقایسه‌ی آماری این مدل‌سازی، نتایج قابل قبولی را شان داده است. به طوری که مقایسه‌ی آماری هیدروگراف‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی به کار رفته در پژوهش، با معیار نش_ ساتکلیف همبستگی حدود ۶۰ درصدی هیدروگراف‌ها را نشان می‌دهد. این مطالعه اطلاعات مفیدی را در مورد جریان رودخانه و بیلان آبی حوضه‌ی رودک فراهم نموده و به برنامه‌ریزی دقیق‌تر پروژه‌های منابع آب کمک می‌کند. پتانسیل تبخیر و تعرق (PET) درحوضه برابر با ۱۰۲۵/۴ میلی‌متر می‌باشد. آب کل حوضه شامل رواناب سطحی، آب زیرزمینی و جریان جانبی معادل ۲۴۷/۸۹ میلی‌متر بوده که به تفکیک در جدول (۵) ارائه شده است. براساس تنش دمایی و آبی محاسبه شده در خروجی SWAT-CHECK محصولات کشاورزی با توجه به کاربری منطقه شاهد ۱۲۹ و ۸۰ روز می‌باشد. بنابراین می‌توان چنین استنباط نمود که مدل ARC-SWAT با توجه به نتایج حاصل از شبیه سازی، در حوضه رودک کارایی قابل قبولی دارد. لذا نتیجه گرفته می‌شود که مدل ARC-SWAT قابلیت شبیه‌سازی جریان رودخانه را رودک با دقت قابل قبولی دارد.

شواهد زمین‌شناسی در منطقه دلالت بر نفوذپذیری بالا در نواحی بالادست و نفوذپذیری کم در نواحی پایین دست در سازندهای منطقه را دارد. لیکن نتایج اجرای مدل SWAT نشان داد که بارش بیشتر به صورت جریان زیر قشری در جهت شیب رودخانه‌ی امامه در جریان می‌باشد. این مهم ناشی از عملکرد گسل لتیان در انتقال آب سطحی به صورت جریان زیر قشری است. همچنین براساس داده‌های ایستگاهی، آب ورودی به رودخانه (از منابع مختلف) در زمستان و بهار بیشترین مقدار را دارد و در اواخر تابستان به کمترین میزان می‌رسد. لذا در همه ماه‌های سال، آب زیرقشری به صورت جریان پایه بخش قابل ملاحظه‌ای از آب رودخانه را تأمین می‌کند. رواناب سطحی از اواسط پاییز تا اوایل بهار سهم زیادی در جریان رودخانه دارد.

جریان جانبی در همه‌ی ماه‌های سال سهم بسیار کمی از جریان رودخانه را شامل می‌شود. مقایسه‌ی نتایج حاصل شده با نتایج پژوهش‌های مشابه نشان داد که دقت شبیه‌سازی این تحقیق در مقایسه با کارهای سایر محققان از جمله حسینی (۲۰۱۰: ۲۲۶) و حبیبی و همکاران (۲۰۱۶: ۲۷۵) قابل قبول و کاملاً منطبق می‌باشد. از نتایج حاصل از اجرای این مطالعه می‌توان برای پیش‌بینی اثرات برنامه‌ریزی‌های مدیریتی و تغییر اقلیم ناشی از بارش در منطقه به صورت بررسی تأثیر تغییرات کاربری‌ها با سناریوهای مختلف استفاده کرد.

۵- منابع

Abbaspour, K. C., (2008). User Manual for SWAT-CUP2, SWAT Calibration and Uncertainty Analysis Programs.Swis Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, Duebendorf, Switzerland.95PP.

Abunada, Z. Kishawi, Y. Alslaibi, T. M. Kaheil, N. Mittelstet, A. (2021). The application of SWAT-GIS tool to improve the recharge factor in the DRASTIC framework: Case study. *Journal of Hydrology*. Vol 592, 125613 doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125613.

Alizadeh, M. Mirzaee Mohammadabadi, R. and Kia, H. (2016). Preparation of land use map using Landsat 8 satellite images (Jajroud Watershed). *Geography and Environmental Sustainability*. 6:89-98. (In Persian).

Ara, H. Yamani, M. and Shayan, S, Y. (2012). Management-Behavioral Analysis of Chaotic and Normal Landforms in Jajroud Watershed. *Geography and Environmental Planning*. 23(2): 3-52. (In Persian).

Borah, D.K., and Bera, M. (2004). Watershed-scale hydrologic and nonpoint source Pollution models: review of applications. Trans. ASAE 47:3.789-803.

Epelde, A. M. Cerro, I. Sánchez-Pérez, J. M. Sauvage, S. Srinivasan, R. Antigüedad I. (2015). Application of the SWAT model to assess the impact of changes in agricultural management practices on water quality. *Hydrological Science Journal*. 60(5). 825-843.

Faramarzi. M, Abbaspour K.C, Schulin. H. (2009). Modelling blue and green water resources availability in Iran. *Hydrological Processes*, 23(3): 486–501.

Ghazavi, R. Nadimi, M. Omidvar, A. and Eemani, R. (2018). Investigating the impact of future climate change in Ardabil Herochai River using SWAT and LARS-WG models. *Hydrogeomorphology*. 15(4): 54-79. (In Persian).

Gholipour, S. and Moradi, M. (2011). Geological study and structural analysis of Lavasanat region (northeast of Tehran), the first national geological conference of Iran, Shiraz. (In Persian).

Gourabi, A. and Kiarostami, F. (2020). The effect of new tectonically movements on the shape of the basin (Case study of Roudak catchment). *Quantitative Geomorphological Research*. 9(1): 1-12. (In Persian).

Gourabi, A. and Kiarostami, F. (2015). Tectonic assessment of watershed using geomorphological features in the form of TecDEM model (Case study: Rudak catchment in northeast of Tehran). *Natural Geography Research*. 47(3): 465-479. (In Persian).

Habibi, A. Saffari, A. Karam, A. and Peyrovan, H. (2016). Investigation and simulation of runoff and sediment in semi-arid climate of Iran (Case study: Hablehroud Watershed), PhD thesis Kharazmi University. 275 pages. (In Persian).

Hoseini, M. (2016). Simulation of water balance in Qarahsu watershed, Kermanshah province using SWAT model, *Water Resources Engineering*. 9(30): 37-55. (In Persian).

Hoseini, M. Ghafoori, A. and Makarian, Z. (2013). Investigation of modeling of groundwater potential of waterways leading to the southern borders and Persian Gulf. Tehran: Soil Conservation and Watershed Management Research Institute Publications. 246 pages. (In Persian).

Hosseini, M. (2010). Effect of land use changes on water balance and suspended sediment yield of Taleghan Catchment, Iran. PhD Thesis, University Putra Malaysia, 226 pages.

IRIMO. (2011). Meteorological statistical data of Ahar, Fasham, Garmabdar and north of Tehran stations. (In Persian).

Koreae, M. and Kiani, Y. (1994). Seismicity of the Iranian plateau with a special focus on Tehran. GSI. 1-97. (In Persian).

Moravej, K. Karimian Eghbal, M. and Mahmoudi, S. (2012). Preparation of digital soil map using geomorphometric analyzes in a part of Jajroud river watershed. Ph.D thesis. Trabiat Modares University. 136 pages. (In Persian).

Naderi, M. Ildoromi, A. Nouri, H. Aghabeigi Amin, S. and Zeinivand, H. (2018). Investigating the Impact of Land Use and Climate Change on Watershed Runoff Using SWAT Model (Case Study: Green Basin). *Hydrogeomorphology*. 16(5): 61-79. (In Persian).

Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part 1, discussion of principals. Journal of Hydrology, 10(3): 282-290.

Neitch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry and J.R. Williams. (2005). Soil and water assessment tool Documentation, user's manual, Temple, Texas, USA, 494 pages.

Refahi, H, G. (2010). Water erosion and its control. Seventh edition. Tehran: University of Tehran Press. 671 pages. (In Persian).

Rostamian, R. Jaleh A. Afyuni, M. Mousavi, S.F. (2008). Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran. *Hydrological Sciences*. 53 .P:977-988.

Van Liew M.W., Garbrecht J., (2003). Hydrologic simulation of the Little Washita River experimental watershed using SWAT, *Journal of the American Water Resources Association* 39:413-426.