

برآورد و ارزیابی مولفه‌های بیلان آب با واسنجی مدل SWAT مطالعه موردی: دشت مهاباد

امید رجا^۱، مسعود پارسی نژاد^{۲*} و مسعود تجریشی^۳

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، ^۲ دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران و ^۳ استاد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۰۶

چکیده

مدل SWAT، به‌عنوان یک مدل جامع شبیه‌سازی آب سطحی در برآورد مولفه‌های بیلان آب با قابلیت امکان بررسی سناریوهای مختلف مدیریتی بر منابع آب پذیرفته شده است. در اغلب مطالعات، مدل SWAT بر اساس دقت در برآورد رواناب سطحی و مقایسه آن با اندازه‌گیری‌های میدانی در ایستگاه‌های هیدرومتری واسنجی می‌شود. هدف از انجام این مطالعه، استفاده از مدل واسنجی شده SWAT در برآورد برخی مولفه‌های بیلان آب شامل نفوذ عمقی، نشت جانبی، جریان برگشتی از آبخوان به رودخانه در دشت مهاباد است. ارزیابی مولفه‌های بیلان آب در منطقه غیراشباع و اثربخشی آن در بیلان آب آبخوان در مدیریت بهره‌برداری از منابع آب تلفیقی، مهم است. بررسی‌ها نشان داد، مدل واسنجی شده SWAT قادر به برآورد تفاوت میزان نفوذ عمقی در سال تر نسبت به سال نرمال و تفاوت نفوذ در سال تر نسبت به سال خشک تحت تاثیر افزایش سطح بارندگی بوده است، به‌طوری‌که نتایج نشان داد مقدار نفوذ عمقی در سال تر نسبت به سال‌های نرمال و خشک به ترتیب حدود ۲۳ و ۴۳ درصد افزایش یافته است. به‌طور متوسط میزان نفوذ عمقی برابر با ۱۵۷/۸۶ میلی‌متر (۱۷/۱ درصد) برآورد شده است. در عین حال، مدل قادر به برآورد تفاوت میزان نفوذ در پهنه‌های مختلف دشت و در فصول مختلف سال با توجه به نوع کاربری و الگوی مدیریتی اراضی بوده است. میزان جریان جانبی نیز در سال تر نسبت به سال خشک افزایش یافته است، به‌طوری‌که میزان این مولفه دو برابر شده است. در این مطالعه، میزان متوسط جریان برگشتی از آبخوان به رودخانه نیز به میزان ۱۴/۱ درصد (۱۲۹/۶ میلی‌متر) برآورد شد. بررسی‌ها نشان داد، وجود سطح آب زیرزمینی کم‌عمق، سهم قابل توجهی در ایجاد جریان‌ات سطحی برگشتی از آبخوان به رودخانه دارد. به‌طور کلی، نتایج نشان داد تغذیه ناشی از بارندگی و آب آبیاری از منطقه غیراشباع به‌عنوان یکی از مهمترین مولفه‌های ورودی مدل‌های آب زیرزمینی مانند MODFLOW در مناطق خشک و نیمه خشک است. میزان تغذیه در برآورد دقیق‌تر نوسانات سطح ایستابی حائز اهمیت است. با توجه به این‌که مدل MODFLOW به‌خوبی قابلیت برآورد فرایندهای تغذیه و جریان جانبی در منطقه غیراشباع را ندارد، لذا استفاده هم‌زمان از مدل‌های شبیه‌سازی SWAT و MODFLOW در برآورد مولفه‌های بیلان آب منطقه غیراشباع و تلفیق آن با مدل زیرزمینی در مطالعات و مدیریت بهره‌برداری از منابع آب تلفیقی اهمیت دارد.

واژه‌های کلیدی: تبخیر و تعرق، تغذیه، جریان برگشتی، رواناب، MODFLOW

مقدمه

یکی از پیش‌نیازهای ضروری در راستای مدیریت پایدار منابع آب، شناخت و درک مفهوم بیلان آب در سطح حوزه‌های آبخیز است. بارش، تبخیر و تعرق، رواناب سطحی، جریان آب زیرزمینی و جریان جانبی شامل جریان‌ات برگشتی، از مهمترین عناصر بیلان آب هستند. تعیین مولفه‌های بیلان آب در سال‌های آبی و دوره‌های زمانی متفاوت حائز اهمیت بوده است و با بررسی آن می‌توان اندازه و درجه تاثیر هر یک از این مولفه‌ها در بیلان آب یک سامانه هیدروژیکی را شناسایی و بررسی کرد (Amini و همکاران، 2019). در این راستا، استفاده از یک مدل جامع، یکپارچه و گسترده برای بررسی مسایل پیچیده و آگاهی دقیق از رفتار هیدرولوژیک هر محدوده مشخص می‌تواند در شبیه‌سازی بهتر مولفه‌های بیلان آب کمک شایانی کند. این مدل باید بتواند بر اساس آمار و اطلاعات موجود، مولفه‌های بیلان منطقه مورد نظر را (Pisinaras و همکاران، 2010؛ Adeogun و همکاران، 2014)، با در نظر گرفتن کمیت تاثیر آبیاری و تغییرات عمده کاربری زمین بر منابع آب سطحی و زیرزمینی، شبیه‌سازی کند. برای انجام این کار، باید از مدل‌های شبیه‌سازی عددی کاربردی که از نظر زمانی جامع و قابل انجام در مقیاس‌های کوچک و بزرگ هستند، استفاده شود. مدل SWAT^۱ نمونه‌ای از مدل‌های هیدرولوژیکی جامع با مبنای فیزیکی و نیمه توزیعی است که به‌وسیله USDA-ARS^۲ برای مطالعه و برنامه‌ریزی پایدار و موثر از طریق شبیه‌سازی جریان آب، انتقال مواد مغذی و رسوب در مقیاس حوضه‌ای توسعه یافته است (Arnold و همکاران، 1998). این مدل به شبیه‌سازی در مقیاس بزرگ و همچنین پایش فرایندهای مرتبط با چرخه آب بر اساس ویژگی‌های حوزه‌های آبخیز و شرایط اقلیمی آن می‌پردازد (Neitsch و همکاران، 2005؛ Neitsch و همکاران، 2011). از مدل SWAT به‌طور گسترده در مطالعات هیدرولوژیک برای مطالعه و برنامه‌ریزی پایدار و موثر در مدیریت‌های جامع حوزه‌های آبخیز در سطح پروژه‌های بزرگ ملی با توجه به کاربری زمین و

شیوه‌های مدیریت کشاورزی استفاده شده است (Arnold و همکاران، 1998؛ Neitsch و همکاران، 2005؛ Gassman و همکاران، 2007؛ Abbaspour و همکاران، 2007؛ Akhavana و همکاران، 2010).

برخی از مطالعات، اشاره به شبیه‌سازی رضایت‌بخش و قابل قبول جریان‌ات سطحی به‌وسیله مدل SWAT و استفاده از روش SUFI2^۲ در نرم‌افزار SWAT-CUP برای واسنجی و تحلیل عدم قطعیت دارد (Naserabadi و همکاران، 2016؛ Ebrahimi و همکاران، 2018؛ Thavhana و همکاران، 2018؛ Rezaei Moghadam و همکاران، 2019؛ Berihun و همکاران، 2020؛ Kanishka و Eldho، 2020). در برخی از مطالعات دیگر نیز به بررسی و ارزیابی توانایی مدل SWAT در برآورد مولفه‌های بیلان آب و تاثیر سناریوهای مدیریتی کمی و کیفی بر منابع آب پرداخته شده است. به‌طور مثال، Gosain و همکاران (2005) و Jayakrishnan و همکاران (2005)، توانایی مدل SWAT را در شبیه‌سازی و تاثیر سناریوهای مدیریتی کمی و کیفی بر روی منابع آب در حوضه رودخانه پلارو در هندوستان و ایالات متحده مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد، مدل SWAT به مدیران بخش آب که نیاز به مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب تحت سناریوهای مختلف دارند، کمک شایانی می‌کند.

در مطالعه دیگر، Faramarzi و همکاران (2009) با استفاده از مدل SWAT اجزای بیلان آب را در مقیاس زیرحوضه و در مقیاس زمانی ماهانه در ایران شبیه‌سازی و بررسی کردند که نتایج برآورد بیلان آب برای بیشتر رودخانه‌های کشور قابل قبول بود. همچنین، Hosseini و همکاران (2017) مولفه‌های بیلان آب را با استفاده از مدل SWAT در حوضه‌های منتخب شش استان جنوب غرب کشور منتهی به خلیج فارس شامل استان‌های ایلام (حوضه گلگل)، بوشهر (حوضه باغان)، خوزستان (حوضه مرغاب)، فارس (حوضه شکستیان)، کهگیلویه و بویراحمد (حوضه تنگ بریم) و استان هرمزگان (حوضه درآگاه) برآورد کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که در کلیه زیرحوضه‌ها، تبخیر و تعرق واقعی از ۴۶ تا ۹۶

^۲ Uncertainty in Sequential Uncertainty Fitting (SUFI-2)

^۱ Soil and Water Assessment Tool

^۲ US Department of Agriculture, Agricultural Research Service

(2019) در حوضه تروپیکال در کشور تانزانیا، Anand و همکاران (2018) در حوضه گانا در کشور هند، Jolejolea و همکاران (2018) در حوضه رودخانه یونگسان در کره جنوبی و Ghodousi و همکاران (2014) در حوزه آبخیز آچی‌چای، به ارزیابی و شبیه‌سازی اثرات تغییرات کاربری اراضی بر مولفه‌های بیلان آب پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد، مدل واسنجی و اعتبارسنجی شده SWAT علاوه بر این‌که یک ابزار مناسب برای شبیه‌سازی رواناب است، قادر است به‌خوبی تاثیر تغییرات زمانی و مکانی کاربری اراضی بر جریان‌ات سطحی و سایر مولفه‌های هیدرولوژیکی را بررسی کند.

در بیشتر مطالعات، واسنجی مدل SWAT بر اساس مقادیر رواناب و جریان‌ات سطحی انجام شده و دیگر پارامترهای موثر نظیر تبخیر و تعرق و عملکرد گیاه در واسنجی مدل کمتر مورد توجه قرار گرفته است. Alizadeh و همکاران (2013)، در حوضه نیشابور و Ahmadzadeh و همکاران (2014) در حوضه زربینه‌رود نشان دادند، واسنجی مدل SWAT بر اساس تبخیر و تعرق و عملکرد محصولات می‌تواند بر دقت نتایج مدل بیفزاید. در مطالعه Ahmadzadeh و همکاران (2014)، مقادیر تبخیر و تعرق واقعی و عملکرد محصولات کشاورزی عمده در سال‌های پرباران بر اساس سند ملی آب واسنجی شد و نتایج ضریب همبستگی بیشتر از ۰/۸ را نشان داد.

همچنین، نتایج مطالعه Farokhnia و همکاران (2018) و Wei و Baiely (2019) با استفاده از مدل SWAT، حاکی از دقت مناسب مدل در شبیه‌سازی سایر مولفه‌های هیدرولوژیکی همچون تبخیر و تعرق و نیز برآورد عملکرد محصولات بود. در این راستا، Eini و همکاران (2020) برآورد و تدقیق مولفه‌های بیلان آبی حوضه کارستی دریاچه مهارلو را با استفاده از مدل‌های توسعه‌یافته SWAT-ML^۲ و SWAT-CF^۳ بررسی کردند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد، مدل به‌خوبی قادر به برآورد رواناب سطحی، رواناب پایه، عملکرد محصولات کشاورزی و تبخیر و تعرق واقعی است.

درصد، جریان زیرزمینی از دو تا نه درصد، جریان سطحی از ۰/۴ تا ۴۲ درصد و جریان زیرسطحی از یک تا ۱۳ درصد، متغیر است. تغییرات حاصل نشان می‌دهد که عوامل فیزیکی مانند توپوگرافی، آب و هوا، خاک و کاربری اراضی می‌تواند مولفه‌های بیلان را تحت تاثیر قرار دهد و به‌طور کلی، نتایج حاکی از پیش‌بینی قابل قبول این مدل در بیلان آب بود.

در مطالعه‌ای، Amini و همکاران (2019) به شبیه‌سازی و برآورد مولفه‌های بیلان آب در حوزه آبخیز زاینده‌رود با استفاده از مدل SWAT پرداختند. نتایج نشان داد، مدل به‌خوبی قادر به برآورد مولفه‌های بیلان بوده است، به‌طوری‌که از کل بارش سالانه ورودی به حوضه، حدود ۶۶ درصد به‌صورت تبخیر و تعرق از حوضه خارج می‌شود که دارای بیشترین سهم در میان اجزای بیلان آب است. همچنین، رواناب سطحی با ۱۵ درصد، جریان آب زیرزمینی با ۱۳/۷ درصد، جریان جانبی با ۱/۵ درصد و تغذیه آبخوان عمیق با ۰/۸ درصد به‌ترتیب سایر بخش‌های بیلان آب را در این حوضه تشکیل می‌دهند. Farokhnia و همکاران (2018) نیز به بررسی و شبیه‌سازی افت تراز دریاچه ارومیه و ارزیابی اثربخشی راهکارهای مطرح در احیای آن، با استفاده از مدل SWAT-LU^۱ پرداختند. در این مطالعه، اثر کمی عوامل موثر بر تغییر بیلان آبی دریاچه را در دو دسته کلی، تغییرات اقلیمی و دخالت‌های انسانی ارزیابی کردند. نتایج این تحلیل‌ها نشان داد که در دوره ۲۲ ساله منتهی به سال ۱۳۸۸، اثر تجمعی تغییرات اقلیمی و انسانی در کاهش جریان ورودی به دریاچه ارومیه تقریباً برابر بوده است، اما به‌دلیل تشدید تغییرات اقلیمی در نیمه دوم این دوره، اثر عوامل اقلیمی بر کاهش حجم آب دریاچه بیشتر بوده است.

برخی از مطالعات مانند Mo و همکاران (2020) در حوضه لانگتن در کشور چین، Patil و Nataraja (2020) در حوضه هیرانکشی، de Oliveira Serrão و همکاران (2020) در مناطق آمازون و سرادو برزیل، Rezaei moghadam و همکاران (2019) در حوزه آبخیز لنبران چای در استان آذربایجان شرقی، Näschen و همکاران

^۳ SWAT-Crack Flow

^۱ SWAT-Urmia Lake

^۲ SWAT-Maharlu Lake

است. با توجه به این که مدل های آب زیرزمینی به خوبی قادر به شبیه سازی و برآورد فرایندهای تغذیه در ناحیه غیراشباع نیستند، لذا از این نتایج می توان برای شبیه سازی دقیق تر سطح ایستایی با استفاده از مدل های آب زیرزمینی و مدیریت بهره برداری از منابع آب تلفیقی بهره برد.

مواد و روش ها

منطقه مورد مطالعه: محدوده مطالعاتی حوضه مهاباد- چای یکی از مناطق مرتفع واقع در شمال غربی ایران و جنوب غربی حوزه آبخیز دریاچه ارومیه است و از نظر وسعت، هشتمین زیرحوضه با مساحتی برابر با ۱۵۱۶ کیلومتر مربع است که حدود ۲/۹ درصد از مساحت کل حوزه آبخیز دریاچه ارومیه را در بر می گیرد (Dastjerdi و همکاران، 2019).

از سازه های مهم در این محدوده، می توان به سد مهاباد و شبکه آبیاری و زهکشی مهاباد در پایین دست آن اشاره کرد. دشت مهاباد جزئی از حوضه مهابادچای، با وسعت ۲۷۵ کیلومتر مربع در موقعیت طول جغرافیایی ۴۵ درجه و ۴۳ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۴۶ دقیقه شمالی در جنوب غربی دریاچه ارومیه قرار گرفته و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۳۸۵ متر است.

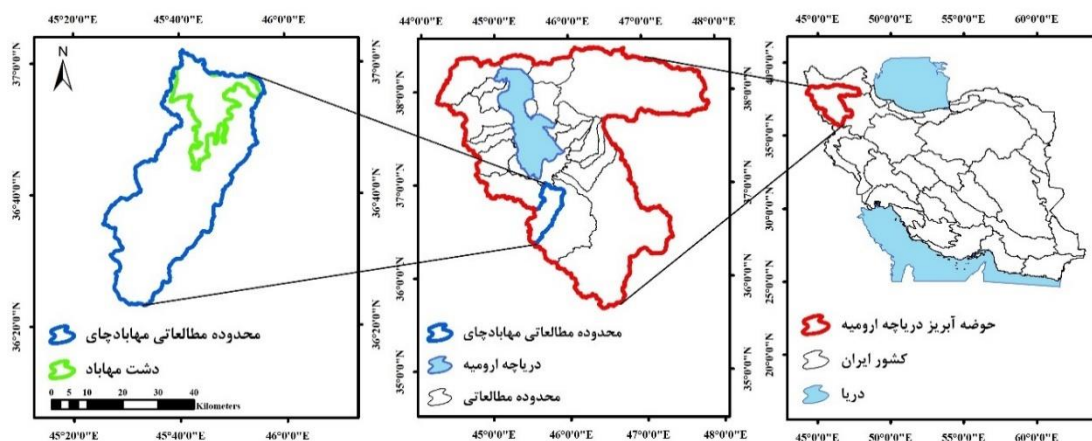
اقلیم منطقه بر اساس روش های دومارتن و آمبرژه، نیمه خشک تعیین شد و متوسط بارندگی سالانه بر اساس آمار بارندگی ایستگاه سینوپتیک مهاباد در طول دوره آماری ۱۳۹۸-۱۳۶۸، ۴۰۲ میلی متر گزارش شده است. مقادیر بارش در طی فصل های پاییز، زمستان، بهار و تابستان مطابق با آمار درازمدت برابر با ۳۰/۱، ۳۷/۱، ۳۱/۲ و ۱/۶ درصد است. متوسط بیشینه و کمینه ماهانه دما با میزان ۳۳/۷ و ۲/۲- درجه سانتی گراد به ترتیب در ماه های مرداد و بهمن اتفاق افتاده است. موقعیت محدوده مطالعاتی مهابادچای و دشت مهاباد در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه و کشور در شکل ۱، نشان داده شده است.

به طور کلی نتایج مطالعات مختلف نشان داد، این مدل ها در برآورد بیلان آب از کارایی مناسبی برخوردار بوده است و می توانند در حوزه های آبخیز مشابه مورد استفاده قرار گیرند.

در زمینه استفاده از مدل SWAT در بررسی های مربوط به برآورد مولفه های بیلان و تحلیل سناریوهای مختلف مدیریتی در حوزه های آبخیز، مطالعات گسترده ای انجام گرفته است. اما به دلیل ناکافی بودن و دقت پایین اطلاعات مکانی از جمله نوع خاک، نوع کاربری اراضی، همچنین پراکندگی و تعداد ایستگاه های هواشناسی مورد استفاده برای واسنجی و اجرای مدل، لزوم مطالعات دقیق تر در این زمینه به نظر می رسد. بررسی مطالعات مختلف نشان داده است که مدل SWAT به عنوان یک مدل جامع شبیه سازی آب سطحی است که در برآورد مولفه های بیلان آب و تاثیر سناریوهای مدیریتی کمی و کیفی بر منابع آب پذیرفته شده است.

بررسی ها نشان می دهد، واسنجی مدل SWAT عموماً بر اساس داده های دبی رودخانه ایستگاه های هیدرومتری انجام شده است. واسنجی مدل هیدرولوژیکی در یک منطقه تحت آبیاری فقط با جریان رودخانه نمی تواند دارای دقت مناسبی برای برآورد مولفه های بیلان آب سطحی باشد. به همین دلیل، واسنجی چندمنظوره برای افزایش دقت مکانی مدل توصیه شده است (Abbaspour و همکاران، 2007; Abbaspour, 2009).

در مطالعه ای، Raja و همکاران (2021) کارایی مدل SWAT بر اساس واسنجی چندمنظوره رواناب، تبخیر و تعرق و عملکرد محصولات در دشت مهاباد بررسی کردند. نتایج نشان داد، مدل به خوبی توانسته است رواناب، تبخیر و تعرق و عملکرد محصولات گندم، جو، ذرت، چغندر قند، یونجه، سیب و انگور به عنوان محصولات غالب منطقه دشت مهاباد را برآورد کند. در ادامه، هدف از این مطالعه برآورد مولفه های بیلان آب شامل نفوذ عمقی، جریان جانبی و جریان برگشتی از آبخوان به رودخانه در سه سال آبی خشک، نرمال و تر در دشت مهاباد به وسیله مدل واسنجی شده SWAT



شکل ۱- موقعیت محدود مطالعاتی مهبادچای و دشت مهباد

که در آن، مولفه‌های مختلف در روز t شامل SW_t ، مقدار نهایی آب در خاک (میلی‌متر)، SW_0 مقدار اولیه آب در خاک (میلی‌متر)، R_{day} مقدار بارندگی (میلی‌متر)، Q_{surf} مقدار رواناب سطحی (میلی‌متر)، E_a مقدار تبخیر و تعرق (میلی‌متر)، W_{seep} مقدار آب ورودی به پروفیل خاک در منطقه غیراشباع (میلی‌متر) و Q_{gw} مقدار آب جریان برگشتی (میلی‌متر) است.

مدل SWAT، از روش‌های شماره منحنی اصلاح‌شده سازمان حفاظت خاک آمریکا (USDA Soil Green Conservation Service، 1972) و گرین-امپت (Ampt، 1911) برای تخمین رواناب سطحی تحت کاربری‌های مختلف اراضی و خاک‌های متنوع استفاده می‌کند. همچنین، روندیابی جریان در این مدل با استفاده از دو روش متغیر و ماسکینگهام (Muskingum) برای تخمین رواناب سطحی ناشی از بارندگی انجام می‌شود (Neitsch و همکاران، 2005؛ Amini و همکاران، 2019).

در مدل SWAT، تبخیر از خاک و پوشش گیاهی به‌طور مجزا محاسبه می‌شود. تبخیر و تعرق گیاه مرجع با توجه به اطلاعات موجود می‌تواند به سه روش پنمن-مانتیث (Monteith، 1965)، پریستلی-تایلور (Priestley و Taylor، 1972) و روش هارگریوز-سامانی (Hargreaves و Samani، 1982) محاسبه شود (Neitsch و همکاران، 2005). با تعیین تبخیر و تعرق پتانسیل، SWAT قادر به محاسبه تبخیر و تعرق واقعی است. ابتدا، این مدل تبخیر ناشی از آب بارندگی بر

تئوری مدل SWAT. SWAT مدلی نیمه توزیعی و پیوسته در زمان است که به‌وسیله USDA-ARS برای شبیه‌سازی جریان آب، انتقال مواد مغذی و رسوب در مقیاس حوضه‌ای توسعه‌یافته است (Arnold و همکاران، 1998) و به‌طور گسترده در مطالعات هیدرولوژیک در حوزه‌های آبخیز با توجه به کاربری اراضی و شیوه‌های مدیریت کشاورزی کاربرد دارد (Arnold و همکاران، 1998؛ Neitsch و همکاران، 2005؛ Gassman و همکاران، 2007؛ Srinivasan و همکاران، 2010؛ Nair و همکاران، 2011؛ Dowlatabadi و Zomorodian، 2016). مدل SWAT فرایندهای سطحی در مقیاس حوضه را در قالب زیرحوضه‌های یکسان از لحاظ کاربری اراضی، خاک و توپوگرافی (شیب) تحت عنوان واحدهای واکنش هیدرولوژیک^۱ (HRU) تقسیم کرده است و محاسبه توازن توزیع آب، مواد مغذی و رسوب را در این مقیاس انجام می‌دهد (Neitsch و همکاران، 2009). نهایتاً، خروجی مدل بر اساس درصد سطح HRU در زیرحوضه تا خروجی حوضه توسعه می‌یابد. در این مدل، بر اساس مشخصات حوضه، مسیرهای مختلفی برای حرکت آب در حوضه پیش‌بینی شده است. مجموعه ورودی به حوضه شامل باران، برف ذوب‌شده و آب آبیاری، نهایتاً به‌صورت رواناب سطحی یا نفوذ تخلیه می‌شود. چرخه هیدرولوژیک در مدل SWAT بر اساس معادله بیلان آب استوار است.

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

^۱ Hydrologic Response Unit

دقت مکانی نقشه رقومی ارتفاع^۳ (DEM) بر دقت تقسیم حوضه به زیرحوضه‌های مختلف تاثیر می‌گذارد. در واقع، دقت نقشه DEM به‌طور قابل ملاحظه‌ای پیش‌بینی جریان آب سطحی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در این مطالعه از نقشه DEM^۴، STRM^۴ با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر استفاده شد. بررسی منابع و سوابق مطالعات خاکشناسی موجود، از طریق جمع‌آوری داده‌ها و گزارش‌های خاک از سازمان‌های آب منطقه‌ای، جهاد کشاورزی و مهندسين مشاور فرازآب انجام شد. با توجه به این‌که در مدل SWAT خصوصیات فیزیکی تعداد معینی خاک با مشخصات معلوم تعریف شده است، لذا برای تکمیل داده‌های ورودی مطابق با خصوصیات خاک‌های منطقه به مدل SWAT، اطلاعات لازم با استفاده از RETC^۵ و عملکرد انتقال پذیری، استخراج و به مدل تعریف شد (Wösten و همکاران، 2001). به‌طورکلی نقشه خاک دارای بافت رسی (۷/۵ درصد)، لوم رسی (۱۶/۷ درصد)، لوم (۳۴/۲ درصد)، لوم رسی شنی (۲۴/۶ درصد)، لوم شنی (۱۰/۴ درصد)، رسی سیلنتی (۴/۶ درصد) و لوم رسی سیلنتی (۱/۹ درصد) بود.

از نقشه کاربری اراضی مستخرج از گزارش ستاد احیا دریاچه ارومیه برای سال ۱۳۹۸ که دارای ۱۷ طبقه اصلی با مقیاس ۳۰ متر در ۳۰ متر بود، در مدل SWAT استفاده شد (Water Engineering Research Institute، 2019). گندم، جو، ذرت، چغندر، یونجه، سیب و انگور از عمده محصولات تحت کشت در منطقه به شمار می‌آیند که در فرایند اعمال مدیریت‌ها و داده‌های مدیریتی آن‌ها شامل کاشت و برداشت، مراحل شخم‌زنی، کوددهی، آبیاری و غیره، به مدل معرفی شدند.

برای جمع‌آوری اطلاعات آب و هوایی مورد نیاز، پس از بررسی آمار و اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی و باران‌سنجی منطقه، ایستگاه سینوپتیک مهاباد، ایستگاه کلیماتولوژی مهاباد، دو ایستگاه باران‌سنجی هواشناسی، شش ایستگاه باران‌سنجی معمولی وزارت نیرو و داده‌های چهار نقطه باز تحلیل شده پایگاه داده CFSR

روی سطح پوشش گیاهی را محاسبه و سپس مقدار تبخیر واقعی را بر اساس بیشینه میزان تعرق و تبخیر از سطح خاک با استفاده از روشی مشابه روش Ritchie (1972) برآورد می‌کند. تعرق به‌عنوان یک تابع خطی از ET^۱ پتانسیل و شاخص سطح برگ^۲ (LAI) شبیه سازی می‌شود. همچنین، تبخیر واقعی از سطح خاک با استفاده از توابع نمایی بین عمق خاک و مقدار آب تخمین زده می‌شود.

در مدل SWAT پتانسیل عملکرد گیاه برای گیاهان مختلف محاسبه می‌شود. وقتی عمل برداشت انجام می‌شود، قسمتی از زیست‌توده به‌عنوان عملکرد از هر HRU تحت عنوان شاخص برداشت نامیده می‌شود که این شاخص بین صفر تا یک است. در نهایت، عملکرد واقعی گیاه در شرایط غیر ایده‌آل تحت تاثیر تنش‌های آبی، دما، میزان نیتروژن و فسفر مصرفی محاسبه می‌شود.

داده‌های مورد استفاده در مدل: هدف از انجام این مطالعه برآورد مولفه‌های بیلان آب شامل نفوذ عمقی، جریان جانبی و جریان برگشتی از آبخوان به رودخانه و تغذیه آب زیرزمینی در سال‌های آبی متفاوت در دشت مهاباد بود. با توجه به توانایی قابل قبول مدل SWAT در برآورد مولفه‌های بیلان آب، از آن برای دستیابی به این مهم استفاده شد. یک روش گام به گام برای تهیه مدل مفهومی SWAT برای دشت مهاباد در شکل ۲، نشان داده شده است. اطلاعات مورد نیاز برای مدل‌سازی آب سطحی با مدل SWAT و رابط گرافیکی ArcSWAT در نرم‌افزار ArcGIS 10.2، شامل منابع آب ورودی و خروجی، مرزهای فیزیکی، نقشه رقومی ارتفاع، نقشه کاربری اراضی، نقشه نوع خاک، داده‌های مدیریت کاشت (محصولات عمده، کاشت و برداشت، مراحل شخم‌زنی، کوددهی، آبیاری و غیره)، داده‌های هیدرومتری و اقلیمی از ایستگاه‌های باران‌سنجی، تبخیرسنجی و سینوپتیک بود. نحوه تهیه داده‌ها، اجرای مدل و فرایند واسنجی و اعتبارسنجی مدل و در نهایت، استخراج مولفه‌های بیلان در بخش‌های بعدی به‌طور کامل تشریح شده است.

^۴ Shuttle Radar Topography Mission

^۵ RETention Curve

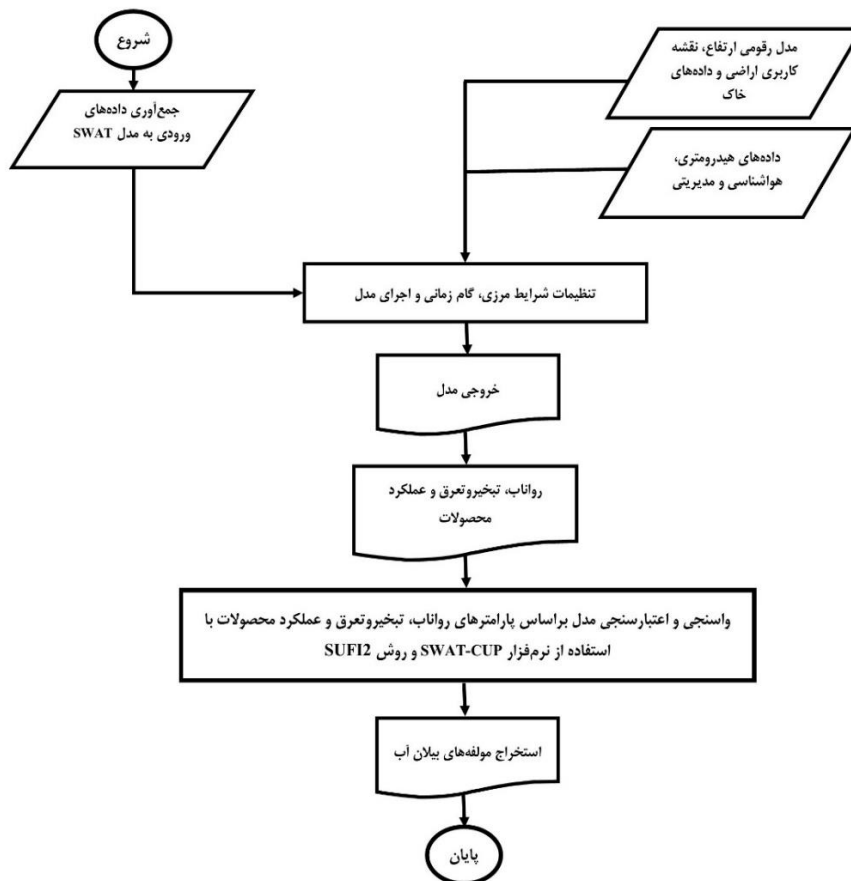
^۱ Evapotranspiration

^۲ Leaf Area Index

^۳ Digital Elevation Model

به‌عنوان مدل مولد آب و هوا در SWAT برای تولید داده‌های هواشناسی یا بازسازی داده‌های مفقوده استفاده شد.

(Climate Forecast System Reanalysis)، انتخاب شدند. اطلاعات باز تحلیل شده این پایگاه داده شامل بارندگی، دما، رطوبت نسبی، سرعت باد و تابش خورشیدی بود. همچنین، از ایستگاه سینوپتیک مهاباد



شکل ۲- مدل مفهومی آب سطحی (SWAT) برای دشت مهاباد

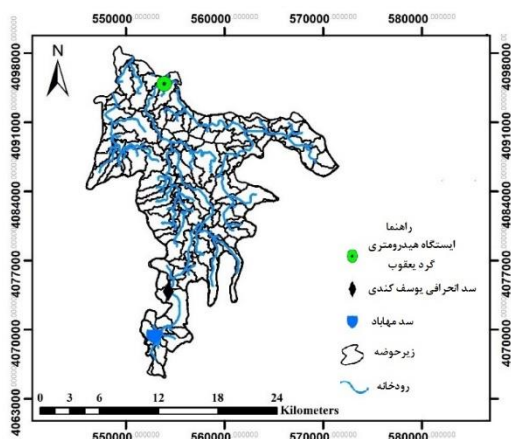
هیدرولوژیکی^۱ (HRUها)، مرزهای زیرحوضه‌ها به‌منظور اعمال سناریوهای مدیریتی تا حد امکان متناسب با نقاط تحویل آب در سطح شبکه آبیاری مهاباد تطبیق داده شد. موقعیت ایستگاه هیدرومتری گردیعقوب، سد مهاباد و زیرحوضه‌های تشکیل شده در شکل ۳، نشان داده شده است.

برنامه آبیاری در مدل متناسب با زمان‌بندی و دفعات وقایع آبیاری و بر اساس نیاز آبی کشت با استفاده از دو منبع آب سطحی و زیرزمینی تعریف شد. همچنین، بیلان آب ورودی و خروجی سد با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده از سازمان آب منطقه‌ای به مدل معرفی شد. بخشی از جریان آب خروجی از سد

رودخانه مهاباد به‌عنوان اصلی‌ترین رودخانه در دشت مهاباد به طول ۲۶ کیلومتر در جهت جنوب به شمال در این محدوده جریان دارد (Dastjerdi و همکاران، ۲۰۱۹). سد مهاباد کنترل‌کننده اصلی جریان سرشاخه‌های رودخانه محدوده مطالعاتی مهابادچای در یک کیلومتری جنوب غربی شهر مهاباد و حوزه آبخیز دریاچه ارومیه واقع شده است. شبکه رودخانه مورد استفاده در فرایند مدل‌سازی در شکل ۳، نشان داده شده است. همچنین، در این مطالعه از ایستگاه هیدرومتری گردیعقوب واقع در پایین‌دست دشت برای پایش جریان خروجی از دشت استفاده شد. لازم به ذکر است در تعیین زیرحوضه‌ها و زیر واحدهای

^۱ Hydrologic response unit

تفکیک مکانی مناسب (۳۰ متر)، شیب و نقشه‌های خاک و کاربری اراضی منطقه به ترتیب به تعداد ۱۱۷ زیرحوضه (شکل ۳) و ۳۷۱۴ HRU در سطح دشت مهاباد تشکیل شد. در این مطالعه، در ابتدا شبکه رودخانه موجود در سطح دشت بر اساس اطلاعات جمع‌آوری شده در نرم‌افزار Google Earth بر اساس عوارض طبیعی و سپس نقشه رقومی ارتفاع بر اساس نقشه شبکه رودخانه، اصلاح شد.



شکل ۳- موقعیت ایستگاه هیدرومتری گردیعقوب، سد مهاباد، سد انحرافی یوسف کندی، شبکه رودخانه‌ها و زیرحوضه‌ها

هر کدام از واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (HRU) از نظر ویژگی‌های هیدرولوژیکی (نوع کاربری، گروه هیدرولوژیکی خاک و طبقه شیب) مشابه یکدیگرند و مبنای محاسبات مدل را تشکیل می‌دهند. همچنین، داده‌های هواشناسی روزانه شامل داده‌های بارندگی، دمای کمینه و بیشینه دما، سرعت باد و رطوبت نسبی به مدل تعریف شد. در پیکره‌بندی مدل، موقعیت ایستگاه هیدرومتری گردیعقوب واقع بر رودخانه مهاباد و در نقطه خروجی دشت به مدل معرفی و داده‌های مدیریتی نیز برای محصولات غالب زراعی و باغی منطقه با تغییر در پرونده‌های مدیریتی (*mgt) برای هر زیرحوضه و HRU در مدل اعمال شد. از روش ذخیره متغیر برای روندیابی جریان و نیز از روش پنمن-مانتیث فائو برای محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع در مدل استفاده شد.

واسنجی و اعتبارسنجی مدل: به منظور واسنجی و تحلیل عدم قطعیت خروجی‌های مدل SWAT از روش

برای تامین آب آبیاری شبکه پایین‌دست دشت مصرف می‌شود و بخشی دیگر به منظور تامین حبابه محیط زیستی به دریاچه ارومیه رهاسازی می‌شود. میزان تخصیص آب آبیاری از منبع آب سطحی (از سد مهاباد) بر اساس موقعیت نقاط تحویل آب شبکه مهاباد و تطبیق آن با اراضی آبی زیرحوضه‌ها و HRUها در مدل مشخص شد. همچنین، تامین آب آبیاری از منابع زیرزمینی در سطح زیرحوضه‌ها و HRUها نیز بر اساس داده‌های برداشت از آبخوان و نیاز آبیاری محصولات تحت کشت محاسبه شد.

به منظور محاسبه عمق آب آبیاری از منابع آب زیرزمینی، در ابتدا نقشه موقعیت چاه‌های کشاورزی بر روی نقشه زیرحوضه‌های مستخرج از مدل SWAT منطبق شد. با مشخص شدن تعداد چاه‌های واقع در هر زیرحوضه و آمار برداشت از چاه‌ها، حجم کل تامین شده در هر زیرحوضه محاسبه شد. در نهایت، مقدار آبیاری در هر زیرحوضه از تقسیم کل آب تخصیصی بر مساحت زیرحوضه برآورد شد. همچنین، مقدار آبیاری در هر دور بر اساس نیاز آبیاری هر محصول به طور جداگانه محاسبه شد. به طور کلی، با توجه به این‌که عملیات آبیاری در حوضه به طور سنتی و در فواصل زمانی خاص (دور آبیاری) انجام می‌شود و همچنین با در نظر گرفتن این‌که در این تحقیق شبیه‌سازی شرایط موجود در منطقه مد نظر است، لذا برنامه‌ریزی آبیاری بر اساس تنظیم زمان‌بندی رهاسازی آب در شبکه آبیاری صورت گرفت. راندمان آبیاری مورد نظر یکی از عوامل اثرگذار در میزان آب برداشتی از منبع آبیاری است. در این مطالعه، راندمان کل آبیاری برای دفعات آبیاری که از منابع سطحی (شبکه آبیاری) تامین می‌شود، برابر با ۴۰ درصد و برای دفعات آبیاری از منابع زیرزمینی ۵۰ درصد در نظر گرفته شد. فرض بر این است که در آبیاری با منابع زیرزمینی، تلفات انتقال آب قابل اغماض است. بنابراین، به طور متوسط راندمان آبیاری در دشت برابر با ۴۵ درصد در نظر گرفته شد. این برآوردها با مقادیر گزارش شده راندمان آبیاری سطحی ۴۰ تا ۴۵ درصد در دشت مهاباد قابل مقایسه است (Sedighi hamidi, 2018).

اجرای مدل: پس از ورود اطلاعات مورد نیاز به مدل SWAT 2012، بر اساس نقشه رقومی ارتفاع با قدرت

متغیر خود نیز بر مقدار عملکرد گیاهان موثر است. در نتیجه، با واسنجی عملکرد محصول، تبخیر و تعرق واقعی نیز واسنجی می‌شود. بنابراین، به دلیل رابطه مستقیم بین تبخیر و تعرق و عملکرد گیاه (Jensen، 1968) از داده‌های عملکرد محصولات گندم، جو، چغندر قند، ذرت، یونجه، سیب و انگور که جز محصولات غالب منطقه است نیز، به منظور افزایش دقت نتایج استفاده شد. مهمترین دلیل دستیابی به این نتایج، در نظر گرفتن جریان پایه از کل جریان، مدیریت گیاهی، اعمال برداشت تلفیقی از منابع آب بر اساس الگوی تامین نیاز آبیاری محصولات و جریانات برگشتی شامل نفوذ عمقی و نشت از آبخوان به رودخانه در محدوده بود.

هدف از انجام این مطالعه، برآورد دیگر مولفه‌های بیلان آب شامل نفوذ عمقی، جریان جانبی، جریان برگشتی از آبخوان به رودخانه و تغذیه با استفاده از مدل واسنجی شده SWAT بود. تغذیه یکی از مهمترین مولفه‌های ورودی مدل آب زیرزمینی مانند MODFLOW^۲ است و عدم قطعیت در برآورد این مولفه در سال‌های آبی و فصول مختلف سال تاثیر زیادی در شبیه‌سازی نوسانات سطح ایستابی با استفاده از مدل‌های آب زیرزمینی دارد. در نتیجه، تا زمانی که نرخ دقیق تغذیه به عنوان ورودی مدل جریان آب زیرزمینی برآورد نشود، نمی‌توان با اطمینان رفتار طولانی مدت یک آبخوان و تاثیرات برداشت از آب‌های زیرزمینی را تحت سناریوهای مختلف مدیریتی تخمین زد. با توجه به این که مدل‌های آب زیرزمینی به خوبی قادر به برآورد مولفه‌های بیلان آب در منطقه غیراشباع از قبیل نفوذ عمقی و جریان جانبی نیستند (Kim و همکاران، 2008؛ Dowlatabadi و Zomorodian، 2016؛ Bailey و همکاران، 2019؛ Wei و همکاران، 2016؛ Saadatpour و همکاران، 2019)، لذا در صورت برآورد قابل قبول این مقادیر به وسیله مدل SWAT می‌توان از نتایج آن در تلفیق با مدل آب زیرزمینی MODFLOW در شبیه‌سازی و برآورد دقیق تر نوسانات سطح ایستابی استفاده کرد (Raja و همکاران، 2022a).

SUFI2^۱ در نرم‌افزار SWAT-CUP استفاده (Abbaspour و همکاران، 2007) و تحلیل حساسیت از روش تحلیل موضعی انجام شد و نتایج حاصل مورد ارزیابی قرار گرفت (Abbaspour، 2009؛ White و Chaubey، 2005). دامنه نهایی پارامترهای حساس تعیین شده در آخرین مرحله واسنجی به مدل SWAT اعمال شد. به طور کلی، واسنجی چندمنظوره برای افزایش دقت مکانی مدل توصیه شده است (Abbaspour و همکاران، 2007). در مطالعه Raja و همکاران (2021)، علاوه بر واسنجی، بر اساس مقادیر دبی رودخانه، به دلیل رابطه مستقیم بین تبخیر و تعرق و عملکرد گیاه از داده‌های تبخیر و تعرق و عملکرد محصولات غالب زراعی و باغی شامل گندم، جو، ذرت، چغندر قند، یونجه، سیب و انگور، در فرایند واسنجی مدل استفاده شد.

مدل SWAT از اول مهر ۱۳۸۵ (۲۳ سپتامبر ۲۰۰۶) تا ۳۱ شهریور سال ۱۳۹۸ (۲۲ سپتامبر ۲۰۱۹) به صورت روزانه اجرا شد. سه سال آبی ۱۳۸۶-۱۳۸۵ تا ۱۳۸۸-۱۳۸۷ دوره گرم کردن^۲ در نظر گرفته شد. واسنجی و اعتبارسنجی مدل بر اساس داده‌های ایستگاه هیدرومتری گردی‌عقوب و داده‌های عملکرد و تبخیر و تعرق محصولات به ترتیب به مدت شش سال آبی از اول مهر ۱۳۸۸ (۲۳ سپتامبر ۲۰۰۹) تا ۳۱ شهریور ۱۳۹۴ (۲۲ سپتامبر ۲۰۱۵) و چهار سال آبی از اول مهر ۱۳۹۴ (۲۳ سپتامبر ۲۰۱۵) تا ۳۱ شهریور ۱۳۹۸ (۲۲ سپتامبر ۲۰۱۹) انجام شد.

در مطالعه Raja و همکاران (2021)، نتایج حاکی از کارایی قابل قبول مدل SWAT در برآورد رواناب، تبخیر و تعرق و عملکرد محصولات گندم، جو، ذرت، چغندر قند، یونجه، سیب و انگور، در دشت مهاباد بود. به طور کلی، واسنجی مدل هیدرولوژیکی مانند SWAT در یک منطقه تحت آبیاری تنها با جریان رودخانه نمی‌تواند دارای دقت مناسبی برای برآورد مولفه‌های بیلان آب سطحی باشد (Abbaspour و همکاران، 2007). پارامترهای گیاهی به طور مستقیم بر میزان تبخیر و تعرق واقعی محصولات تاثیر گذاشته و این

^۱ Sequential Uncertainty Fitting Algorithm

^۲ Warm-up

^۲ Modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model

همچنین، بررسی‌ها نشان می‌دهد مقادیر بارندگی برای سه سال مذکور به ترتیب ۱۸۲، ۳۹۰ و ۵۰۶ میلی‌متر است که صحت تعیین سال‌های معرف را تایید می‌کند. مقادیر حجم آب آبیاری و مولفه‌های بیلان در نرم‌افزار SWAT-CHECK و در پرونده‌های خروجی مدل برای سه سال آبی مورد نظر در جدول ۱، ارائه شده است.

به‌طور کلی، در سه سال آبی ۹۶-۱۳۹۵ تا ۹۸-۱۳۹۷ به‌طور متوسط به میزان ۱۵۵/۶ میلیون مترمکعب آبیاری در منطقه انجام و در مدل وارد شد. بر اساس آمار و اطلاعات جمع‌آوری شده از ستاد احیا دریاچه ارومیه، شرکت مدیریت منابع آب ایران و آب منطقه‌ای آذربایجان غربی، از این میزان به‌طور متوسط در سه سال آبی مذکور، ۶۱/۱ درصد از آب سطحی (۹۴/۶۷ میلیون مترمکعب) و ۳۸/۹ درصد از آب زیرزمینی (۶۰/۲۰ میلیون مترمکعب) به مدل وارد شد. لازم به ذکر است، سال‌های ابتدایی دوره شبیه‌سازی نسبت سال‌های پایانی، میزان آب سطحی و زیرزمینی تخصیص یافته برای مصارف کشاورزی به ترتیب کاهش و افزایش یافت.

میزان متوسط مولفه‌های برآورد شده به‌وسیله مدل SWAT در سه سال آبی نیز در شکل ۴، نشان داده شده است. به‌طور کلی، بر اساس نتایج مولفه‌های بیلان برآورد شده به‌وسیله مدل، مقدار متوسط تبخیر و تعرق واقعی در کل دشت در سه سال آبی برابر با ۴۰۴/۷۰ میلی‌متر در سال (۴۳/۹ درصد) است. آب نفوذ یافته در خاک در مدل SWAT به روش‌های مختلف جریان می‌یابد. این آب در ابتدا ممکن است تبخیر شده یا از طریق ریشه گیاهان جذب و صرف تعرق شود، در صورتی که مقدار آب نفوذ یافته مازاد بر تبخیر و تعرق باشد، تحت نیروی ثقل به لایه‌های زیرین خاک جریان می‌یابد.

از طرفی، برآورد سایر مولفه‌های بیلان مانند جریان جانبی و جریان برگشتی از آبخوان به رودخانه حائز اهمیت است. جریان جانبی عمدتاً در خاک‌های با هدایت هیدرولیکی بالا و در لایه سطحی خاک در آبخوان کم عمق رخ می‌دهد. میزان جریان جانبی بر اساس هدایت هیدرولیکی، شیب و رطوبت خاک برآورد می‌شود و در تشکیل جریان‌ات سطحی دخیل است. همچنین، میزان جریان برگشتی از آبخوان به رودخانه از دیگر مولفه‌های بیلان است که به‌وسیله مدل SWAT برآورد می‌شود و این مولفه در بررسی اندرکنش بین منابع آب سطحی و زیرزمینی تاثیرگذار است. لذا، برآورد قابل قبول این مقادیر به‌وسیله مدل SWAT و مقایسه آن با اندازه‌گیری‌های میدانی می‌تواند در بررسی علل وقوع چنین شرایطی و موقعیت‌های رصد نشد در تلفیق با مدل آب زیرزمینی MODFLOW از طریق بررسی وضعیت سطح ایستابی و اندرکنش بین آبخوان و رودخانه در موقعیت‌های مختلف دشت، مورد ارزیابی قرار گیرد (Raja و همکاران، 2022b). بنابراین، در صورت برآورد قابل قبول مولفه‌های بیلان به‌خصوص در ناحیه غیراشباع به‌وسیله مدل SWAT می‌توان از نتایج آن در تقویت شبیه‌سازی سطح ایستابی با استفاده از مدل‌های آب زیرزمینی و اعمال سناریوهای مدیریتی و بهره‌برداری از منابع آب تلفیقی بهره برد.

نتایج و بحث

مولفه‌های بیلان آب: بعد از واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT، در این مطالعه، استخراج نتایج مولفه‌های بیلان آب شامل نفوذ عمقی، جریان جانبی، جریان برگشتی از آبخوان به رودخانه در سه سال آبی تر، نرمال و خشک مد نظر قرار گرفت. بررسی چندین شاخص خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژی از قبیل SPI^1 ، $SPEI^2$ ، SDI^2 نشان داد، سه سال آبی ۹۶-۱۳۹۵، ۹۷-۱۳۹۶ و ۹۸-۱۳۹۷ به ترتیب معرف سال‌های آبی خشک، نرمال و تر در طول دوره شبیه‌سازی هستند.

^۲ Streamflow Drought Index

^۱ Standardised Precipitation Index

^۲ Standardized Precipitation Evapotranspiration Index

جدول ۱- مولفه‌های بیلان در وضع موجود، میلی‌متر (میلیون مترمکعب)

سال آبی	بارندگی	آب آبیاری	تبخیر و تعرق	نفوذ عمقی	رواناب سطحی	جریان جانبی	رطوبت خاک	جریان برگشتی از آبخوان به رودخانه
۱۳۹۵-۹۶	۱۸۲/۰۰ (۵۰/۱۲)	۵۵۳/۰ (۱۵۲/۰۰)	۳۵۱/۰۰ (۹۶/۶۵)	۱۱۶/۷۰ (۳۲/۱۳)	۷۹/۵۰ (۲۱/۸۹)	۱/۲۰ (۰/۳۳)	۸۸/۴۰ (۲۴/۳۲)	۹۸/۲۰ (۲۷/۰۴)
۱۳۹۶-۹۷	۳۹۰/۰۰ (۱۰۷/۴۰)	۵۶۰/۰۰ (۱۵۴/۰۰)	۴۱۰/۰۰ (۱۱۲/۹۰)	۱۵۲/۳۰ (۴۱/۹۴)	۱۲۲/۴۰ (۳۳/۷۱)	۲/۶۰ (۰/۷۲)	۱۳۰/۳۰ (۳۵/۸۸)	۱۳۲/۴۰ (۳۶/۴۶)
۱۳۹۷-۹۸	۵۰۶/۰۰ (۱۳۹/۳۴)	۵۷۵/۰۰ (۱۵۸/۰)	۴۵۳/۰۰ (۱۲۴/۷۴)	۲۰۴/۶۰ (۵۶/۳۴)	۱۵۴/۸۰ (۴۲/۶۳)	۳/۱۰ (۰/۸۵)	۱۰۶/۲۰ (۲۹/۲۵)	۱۵۸/۳۰ (۴۰/۵۹)
میانگین	۳۵۹/۳۰ (۹۸/۹۵)	۵۶۳/۰ (۱۵۵/۶۰)	۴۰۴/۷۰ (۱۱۱/۴۳)	۱۵۷/۸۶ (۴۳/۴۷)	۱۱۸/۹۰ (۳۲/۷۴)	۲/۳۰ (۰/۶۳)	۱۰۸/۳۰ (۲۹/۸۲)	۱۲۹/۶۳ (۳۴/۹۷)

جمع‌آوری و وارد شده به مدل، میزان تخصیص جریان سطحی برای آبیاری برای سه سال آبی مذکور تقریباً مشابه و بین ۹۰ تا ۹۶ میلیون مترمکعب متغیر بوده است. اما میزان برداشت از آب زیرزمینی برای تامین آبیاری کمی افزایش یافته است.

در مجموع، کل آبیاری وارد شده به مدل در سال تر به میزان کمی (شش میلیون مترمکعب) نسبت به سال خشک بیشتر بوده است (جدول ۱)، اما بارندگی در سال تر به مراتب بیشتر از سال‌های نرمال و خشک بوده است. با این حال، تلفات ناشی از آبیاری اثربخشی بیشتری در برآورد نفوذ عمقی نسبت به بارندگی در هر سه سال آبی داشته است. البته افزایش چشمگیر بارندگی در سال تر منجر به افزایش قابل توجه نفوذ عمقی نسبت به سال‌های آبی نرمال و خشک شده است. بررسی مطالعات Aliyari و همکاران (2019) در حوضه بزرگ پلات جنوبی^۱ در منطقه کلرادو^۲ نشان داد، میزان تلفات نفوذ عمقی آب آبیاری پمپاژ شده از آب زیرزمینی برابر با ۱۵۰ میلی‌متر است. در مطالعه دیگر، Wei و Bailey (2019) در دره رودخانه آرکانزاس^۳ با سطح آب زیرزمینی بین دو تا ۲۰ متر در آبخوان کم‌عمق آب زیرزمینی نشان دادند، در شرایط موجود ۱۴۳ میلی‌متر در اثر نفوذ عمقی در جهت تغذیه آب زیرزمینی ناشی از آب آبیاری و بارندگی اتفاق می‌افتد.

بر اساس نتایج مدل، متوسط میزان رواناب سطحی در سه سال آبی برابر با ۱۱۸/۹ میلی‌متر (۱۲/۹ درصد)

مدل SWAT، فقط قادر به شبیه‌سازی جریان آب در خاک‌های اشباع است. در این مدل آب در شرایط اشباع به دو طریق جریان می‌یابد، در صورتی که هدایت هیدرولیکی لایه‌های فوقانی خاک نسبتاً زیاد بوده و لایه‌ای با نفوذپذیری ناچیز تا عمق دو متری وجود داشته باشد، آب در امتداد شیب در زیر سطح خاک و به موازات رواناب سطحی به حرکت درآمده و تحت عنوان جریان جانبی وارد رودخانه می‌شود. در غیر این صورت، آب به نفوذ عمقی ادامه داده تا به آبخوان برسد. برای وقوع نفوذ عمقی، دو شرط مقدار آب مازاد بر ظرفیت زراعی و غیراشباع بودن لایه زیرین خاک لازم است. بر اساس شرایط تعریف شده، آب مازاد می‌تواند صرف تغذیه آبخوان شده و یا به صورت جریان برگشتی به رودخانه وارد شود. در مدل SWAT، نفوذ عمقی برای هر لایه خاک و با توجه به شرایط فیزیکی آن محاسبه می‌شود.

به‌طور متوسط، میزان نفوذ عمقی در سه سال آبی برابر با ۱۵۷/۸۶ میلی‌متر (۱۷/۱ درصد) برآورد شده است، به‌طوری‌که بررسی‌ها نشان داد مقدار نفوذ عمقی در سال تر نسبت به سال‌های نرمال و خشک به ترتیب حدود ۲۳ و ۴۳ درصد افزایش یافته است (جدول ۱). به‌طور کلی، در سالیان اخیر با کاهش تخصیص آب سطحی به مصرف کشاورزی، میزان مصرف آب زیرزمینی در بخش کشاورزی برای تامین آب آبیاری افزایش یافته است، به طوری‌که بر اساس داده‌های

^۳ Lower Arkansas River Valley^۱ South Platte River Basin^۲ Colorado

Wei و همکاران (2018)، در دره رودخانه بزرگ آرکانزاس در جنوب شرقی کلرادو نشان داد، وجود سطح آب زیرزمینی کم عمق در منطقه منجر به تشکیل ۸۰ تا ۱۰۰ میلی متر جریانات برگشتی از آبخوان به رودخانه شده است. همچنین، Molina-Navarro و همکاران (2019) در حوضه اودریک^۱ در شمال دانمارک نشان دادند میزان جریانات سطحی نه تنها با کاهش میزان بارندگی کاهش می یابد، بلکه کاهش میزان جریانات برگشتی از آبخوان کم عمق و عمیق آب زیرزمینی عامل بسیار مهمی در تشکیل جریانات سطحی در رودخانه بوده است.

جریان جانبی عمدتاً در خاک های با هدایت هیدرولیکی بالا و در لایه سطحی خاک با وجود یک لایه نفوذناپذیر یا نیمه نفوذناپذیر در آبخوان کم عمق (در عمق صفر تا دو متری خاک) رخ می دهد. در چنین شرایطی، آب به صورت عمودی در خاک تا زمان رسیدن به یک لایه نفوذناپذیر نفوذ می کند. سپس، آب در بالای لایه نفوذناپذیر به صورت اشباع تجمع پیدا می کند. این ناحیه اشباع از آب به عنوان منبعی برای جریان جانبی زیرسطحی تبدیل می شود. به عبارت دیگر، جریان جانبی زیرسطحی، میزان جریانی است که در زیر لایه سطحی خاک اما در بالاتر از لایه نفوذناپذیر تجمع و جریان پیدا می کند. از یک مدل ذخیره سازی سینماتیک^۲ برای شبیه سازی و تخمین جریان جانبی زیر سطحی استفاده می شود (Moore و Sloan، 1983؛ Sloan و همکاران، 1984). مدل SWAT جریان جانبی را تحت یک مقطع دو بعدی بر اساس هدایت هیدرولیکی، شیب و رطوبت خاک برآورد می کند. نتایج نشان می دهد، با افزایش نفوذ عمقی میزان جریان جانبی نیز در سال تر نسبت به سال خشک افزایش یافته است، به طوری که میزان این مولفه نیز دو برابر شده است. گرچه میزان آن نسبت به سایر مولفه ها بسیار کم است.

یکی از مولفه هایی که تاثیر زیادی بر بیلان منابع آب دارد، میزان آب برگشتی است. در واقع آب برگشتی برابر با مقدار آبی است که کشاورزان در پایین دست دوباره مصرف کرده یا در آنها به سمت پایین دست و

به دست آمده است. میزان جریان رواناب سطحی در سال تر نسبت به سال خشک به میزان ۴۸/۶۴ درصد افزایش یافته است. الگو و مقدار رواناب سطحی به میزان بارندگی و نیز تلفات رواناب ناشی از آبیاری بستگی دارد. میزان بارندگی در سال ۹۸-۱۳۹۷ نسبت به سال ۹۶-۱۳۹۵ به میزان ۲۷۸ درصد افزایش یافته است (جدول ۱). همچنین، الگوی بارش ها به گونه ای است که مقادیر بارش در طی فصل های پاییز، زمستان، بهار و تابستان برابر با ۳۰/۱، ۳۷/۱، ۳۱/۲ و ۱/۶ درصد است. بنابراین، بیشتر بارش ها در خارج از فصل رشد محصولات بوده که سهم کمتری از آن صرف تبخیر و تعرق شده است و در نتیجه عوامل تولید رواناب از جمله پوشش گیاهی منجر به تشکیل رواناب بیشتری شده است. به نظر می رسد، این عامل نقش بسیار مهمی در برآورد مولفه رواناب سطحی داشته است.

نتایج نشان داد، میزان جریانات برگشتی از آبخوان به رودخانه نیز در یک منطقه با سطح آب زیرزمینی کم عمق مانند دشت مهاباد عامل بسیار مهمی در ایجاد جریانات سطحی در رودخانه است. به طور کلی، میزان مولفه جریان برگشتی از آبخوان به رودخانه به طور متوسط در سه سال آبی برابر با ۱۲۹/۶ میلی متر (۱۴/۱ درصد) برآورد شده است. در این مطالعه میزان جریان برگشتی از آبخوان به رودخانه در سال تر نسبت به سال خشک به میزان ۳۷/۹ درصد افزایش یافته است. به دلیل افزایش نفوذ عمقی در سال تر نسبت به سال های نرمال و خشک، خیز سطح ایستابی قابل توجهی اتفاق می افتد. در نتیجه، تقویت شیب هیدرولیکی بین آبخوان و رودخانه منجر به افزایش نشت و جریان برگشتی از آبخوان به رودخانه و در نهایت، افزایش حجم جریانات سطحی شده است.

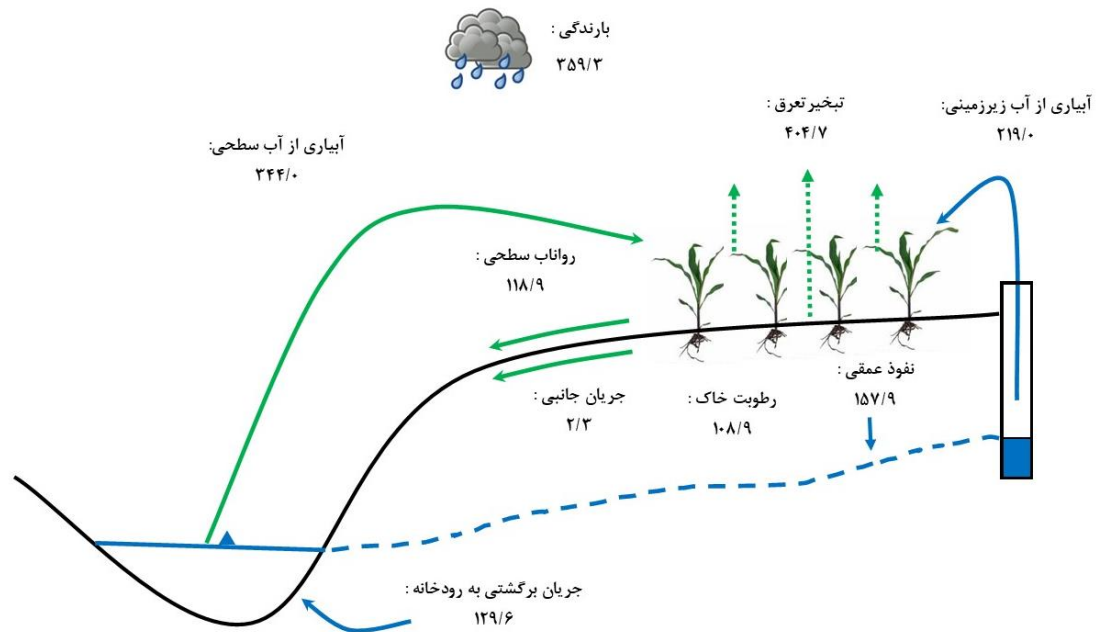
مطالعه Aliyari و همکاران (2019) نیز نشان داد، وجود آبخوان کم عمق آب زیرزمینی، جریان پایه ای برای رودخانه از طریق جریانات برگشتی ناشی از تلفات نفوذ عمقی آب آبیاری پمپاژ شده از آب زیرزمینی ایجاد می کند، به طوری که میزان جریانات برگشتی از آبخوان به رودخانه ۱۷۳ میلی متر در سطح کل منطقه برآورد شد. در مطالعات دیگر مانند Wei و Bailey (2019) و

^۲ Kinematic storage

^۱ The Odderbæk catchment

جریان برگشتی به‌طور متوسط در سه سال آبی برابر با ۴۰۸/۷ میلی‌متر در سطح دشت (۱۱۲/۵۴ میلیون مترمکعب) است.

خروجی دشت جریان می‌یابد. میزان آب برگشتی برابر با مجموع مولفه‌های آب نفوذ یافته (نفوذ عمقی)، رواناب سطحی، جریان جانبی و جریان برگشتی از آبخوان به رودخانه است. نتایج نشان می‌دهد که میزان



شکل ۴- مولفه‌های بیلان برآورد شده به‌وسیله مدل SWAT (میلی‌متر)

طرفی، داده‌های حجم آب محیط زیستی رهاسازی شده از سد به پایین‌دست به‌عنوان حقایق دریاچه و داده ورودی به مدل، وارد شد. در واقع از سد فقط رهاسازی جریانات محیط زیستی به رودخانه تعریف شده است. در مطالعه Raja و همکاران (2021)، نتایج نشان داد مدل به خوبی توانسته است تغییرات جریانات سطحی در سال‌های آبی مختلف را برآورد کند، به‌طوری‌که با اندازه‌گیری‌های میدانی (مقادیر متفاوت رواناب در سال‌های آبی مختلف در ایستگاه گردیعقوب) تطابق دارد. همچنین، تفاوت بین داده‌های میدانی حجم رهاسازی محیط زیستی در بالادست و مقادیر اندازه‌گیری شده در ایستگاه گردیعقوب بین سال‌های آبی مختلف مقایسه شد. نتایج بررسی تفاوت بین حجم آب رهاسازی شده از سد مهاباد تا ایستگاه گردیعقوب در سه سال آبی نشان داد، میزان آبدهی در ایستگاه گردیعقوب از ۶۰ میلیون مترمکعب در سال خشک تا ۹۰ میلیون مترمکعب در سال تر افزایش یافته است.

بررسی نشان داده است، ساده‌ترین راه محاسبه میزان نشت دو جانبه بین آبخوان و رودخانه (تغذیه یا زهکش)، اندازه‌گیری آبدهی آب رودخانه در دو نقطه به فاصله معین در مسیر آن است. بدین‌صورت که تفاوت آبدهی بین این دو نقطه مقدار تغذیه و زهکشی را معلوم می‌کند. کاهش آبدهی در نقطه پایین‌دست نسبت به میزان آن در بالادست نشانه تغذیه و افزایش آبدهی در نقطه پایین‌دست، مشخص‌کننده زهکشی است. بر اساس آمار و اطلاعات شرکت مدیریت منابع آب ایران، سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان غربی و ستاد احیای دریاچه ارومیه، داده‌های میدانی شامل میزان آب رهاسازی شده از سد مهاباد (تخصیص آب کشاورزی و نیاز محیط زیستی) در بالادست دشت و میزان آبدهی در ایستگاه آب‌سنجی گردیعقوب در خروجی دشت اندازه‌گیری شده است.

در نحوه تعریف داده‌های ورودی به مدل SWAT، اگر منبع تامین آب آبیاری از جریانات سطحی باشد، سد به‌عنوان منبع آب در مدل تعریف شده است. از

۱۱، ۲۳/۷ و ۶۰/۸۵ درصد تغذیه به آبخوان اتفاق افتاده است. میزان تغذیه در سطح منطقه در فصل‌های پاییز و زمستان غالباً ناشی از بارندگی است. این امر با توجه الگوی بارندگی در سال آبی خشک به ترتیب در فصول پاییز، زمستان، بهار و تابستان به میزان ۳۳/۸، ۴۰/۹، ۲۴/۸ و ۰/۵ درصد، در سال آبی نرمال به میزان ۲۱/۱، ۵۲/۹، ۲۶/۰ و ۰ درصد، در سال آبی تر به میزان ۳۳/۴، ۴۷/۶، ۱۹/۰ و ۰ درصد، و به‌طور متوسط در سه سال آبی به میزان ۲۹/۴، ۴۷/۲، ۲۳/۳ و ۰/۲ درصد قابل قبول است.

در اواخر ماه آبان، بعضاً آبیاری پاییزه به‌طور سنتی برای ذخیره آب در خاک و نیز آبیاری اولیه کشت گندم و جو برای استفاده در فصل رشد انجام می‌شود. بنابراین، بخشی از مقادیر تغذیه به آبخوان در فصل پاییز را می‌توان علاوه بر مقادیر بارندگی به آن نسبت داد. بررسی تطبیق کاربری اراضی در سطح HRU‌های با کشت گندم و جو نیز نشان می‌دهد، تغذیه صورت گرفته در ماه آبان ناشی از تلفات نفوذ عمقی آبیاری بوده است. عمده تغذیه آب زیرزمینی در فصل زمستان در سه سال آبی ناشی از بارندگی است، زیرا در این فصل آبیاری معمولاً انجام نمی‌شود. همچنین، بخشی از تغذیه به آبخوان در فصل بهار علاوه بر تلفات ناشی از نفوذ عمقی آبیاری با بارندگی‌های بهاره (۲۳/۳ درصد) ارتباط دارد. عمده تغذیه آب زیرزمینی (بیش از ۵۰ درصد) در فصل تابستان در هر سه سال آبی به‌خصوص در سال خشک برآورد شده است. به‌طور کلی، میزان بارندگی در فصل تابستان بسیار ناچیز (حدود صفر) است. لذا، بیشترین تغذیه آب زیرزمینی در این فصل در همه سال‌ها ناشی از تلفات نفوذ عمقی آبیاری است. با این حال، بررسی‌ها نشان داد میزان تغذیه آب زیرزمینی در سال تر به دلیل بارندگی قابل توجه نسبت به سال‌های آبی نرمال و خشک بیشتر است.

به‌طور کلی، میزان تغذیه آبخوان در کلیه سال‌ها در دو فصل پاییز و زمستان پایین بوده است. سپس، به‌مراتب افزایش یافته و در نهایت، در دو فصل بهار و تابستان به اوج خود می‌رسد که متناسب با الگوی آبیاری در منطقه است. نتایج مطالعه Mosase و همکاران (2019) نیز در خصوص بررسی وضعیت توزیع تغذیه فصلی آب زیرزمینی در سطح حوضه بزرگ

از طرفی، مدل نیز به‌خوبی توانسته است این برآوردها را انجام دهد. نتایج مدل نشان داد، افزایش آبدهی در خروجی دشت فقط مرتبط به اختلاف رهاسازی نبوده است و ناشی از جریانات برگشتی بوده است، به‌طوری که مدل علاوه بر حجم رهاسازی، میزان جریان برگشتی را از طریق مجموع میزان رواناب سطحی به رودخانه و جریان برگشتی از آبخوان به رودخانه بین ۶۰ تا ۹۵ میلیون مترمکعب در سال برآورد کرده است که صحت نتایج مدل را نشان می‌دهد.

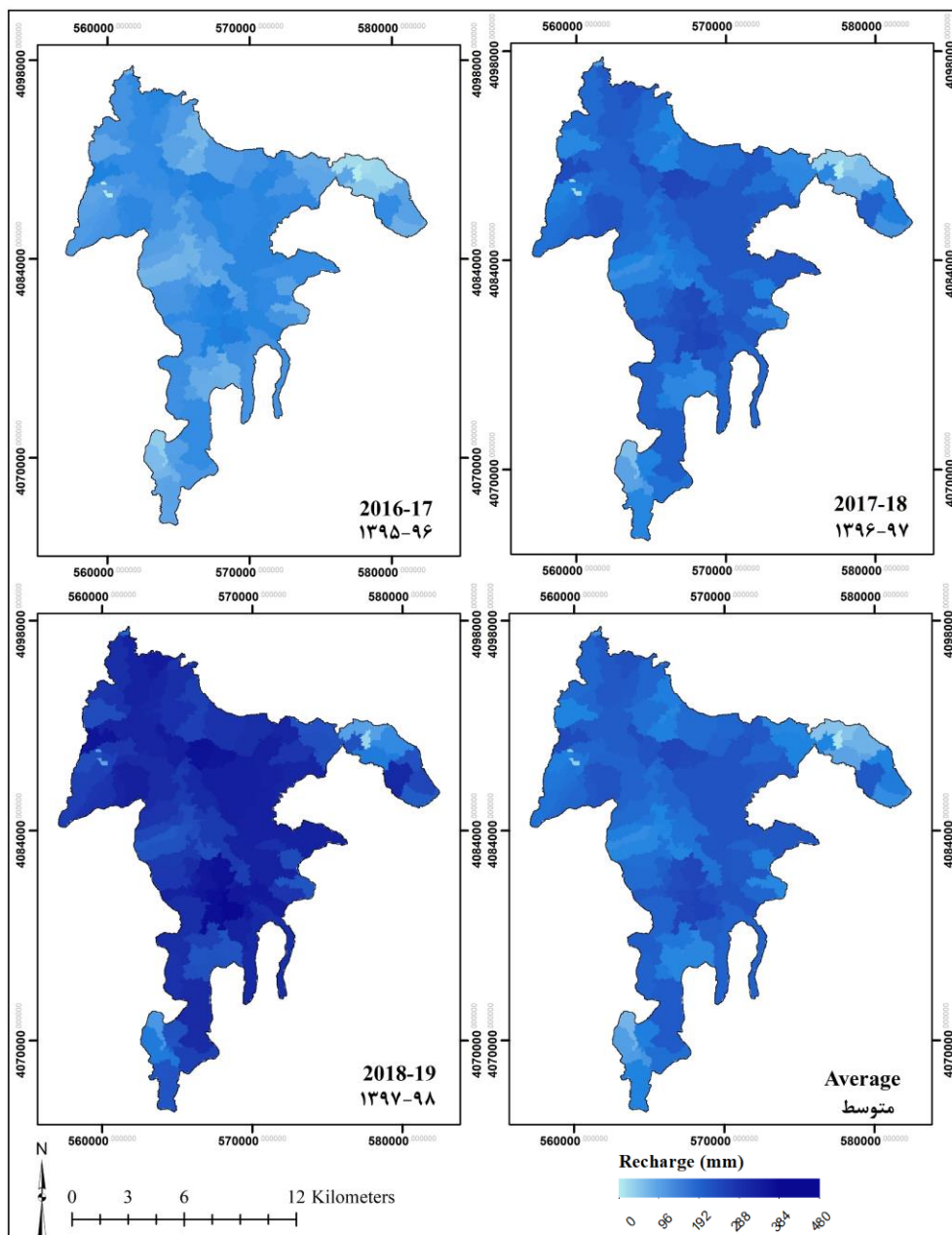
مقادیر تغذیه: درک فرایندهای تغذیه آب زیرزمینی برای توسعه منابع آب در مناطق نیمه خشک و خشک مهم است. تغذیه آب زیرزمینی ناشی از بارندگی و نفوذ عمقی آب آبیاری از منطقه غیراشباع به‌عنوان یکی از مهمترین مولفه‌های ورودی مدل‌های آب زیرزمینی مانند MODFLOW در برآورد دقیق‌تر نوسانات سطح ایستابی است، اما مدل MODFLOW به‌خوبی قادر به برآورد فرایندهای تغذیه و جریان جانبی در منطقه غیراشباع نیست؛ لذا استفاده هم‌زمان از نتایج مدل SWAT در برآورد مولفه‌های بیلان آب در مناطق غیراشباع و تلفیق آن با مدل آب زیرزمینی مانند MODFLOW در مطالعات بهره‌برداری از منابع آب تلفیقی بسیار مهم است.

توزیع مکانی سالانه تغذیه آب‌های زیرزمینی در سطح زیرحوضه‌های تشکیل‌شده به‌وسیله مدل برای سه سال آبی خشک، نرمال و تر در دشت مهاباد در شکل ۵، نشان داده شده است. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که متوسط تغذیه سالانه از صفر تا ۲۵۲ میلی‌متر در سال آبی خشک، از صفر تا ۳۵۹ میلی‌متر در سال آبی نرمال، از ۵۱ تا ۴۸۰ میلی‌متر در سال آبی تر و در نهایت، به‌طور متوسط در این سه سال از ۱۷ تا ۳۶۳ میلی‌متر متغیر است.

به‌طور کلی، تجزیه و تحلیل الگوی زمانی تغذیه آب زیرزمینی نشان داد، تفاوت متمایزی در مقادیر تغذیه بین فصول و سال‌های آبی وجود دارد. نتایج نشان داد، میزان تغذیه در سال آبی خشک در فصل‌های پاییز، زمستان، بهار و تابستان به ترتیب ۴/۵، ۳/۷، ۱۷/۶ و ۷۴/۲ درصد، در سال آبی نرمال ۴/۳، ۱۷/۲، ۲۳/۳ و ۵۵/۲ درصد، در سال آبی تر ۶/۰، ۱۲/۳، ۳۰/۳ و ۵۱/۵ درصد و به‌طور متوسط در سه سال آبی مذکور ۴/۴۵،

بیش از ۹۱ درصد از اراضی تحت کشت دیم است. بنابراین، الگوی تغذیه در این منطقه بیشتر از الگوی بارندگی نسبت به تلفات نفوذ عمقی ناشی از آب آبیاری پیروی می‌کند. به‌طور کلی، بررسی‌ها نشان می‌دهد مدل به خوبی قادر است میزان تغذیه آب زیرزمینی را تحت شرایط بارندگی یا آبیاری برآورد کند.

رودخانه‌های لیمپوپو (Limpopo River Basin) واقع در قاره آفریقا نشان داد، بیشترین تغذیه آب زیرزمینی در ماه‌های تابستان و به دنبال آن در فصل‌های پاییز، بهار و زمستان اتفاق افتاده است. الگوی تغذیه فصلی در این منطقه با الگوی بارندگی (بیش از ۹۵ درصد بارندگی در ماه‌های آوریل تا اکتبر) مطابقت دارد. در این منطقه



شکل ۵- مقادیر تغذیه آب زیرزمینی به‌دست آمده از مدل SWAT در سطح زیرحوضه‌های تشکیل شده در سه سال آبی خشک (۱۳۹۵-۹۶)، نرمال (۱۳۹۶-۹۷) و تر (۱۳۹۷-۹۸)

به‌مراتب افزایش یافته و در نهایت، در دو فصل بهار و تابستان به اوج خود می‌رسد که متناسب با الگوی

به‌طور کلی، میزان تغذیه آبخوان در کلیه سال‌ها در دو فصل پاییز و زمستان پایین بوده است. سپس،

تغذیه در سطح کاربری شهری (صفر) و بیشترین میزان تغذیه (۵۳۰ میلی‌متر) در سطح کاربری جنگل اتفاق افتاده است (Mosase و همکاران، 2019).

بررسی نتایج این مطالعه حاکی از آن است که تغذیه در منطقه در هر سه سال آبی وابستگی زیادی به میزان آب آبیاری دارد، به طوری که نفوذ و در نتیجه تغذیه ناشی از نزولات جوی به دلیل توزیع بارش نامتوازن و کم سالانه و همچنین وقایع کم بارندگی و بعضاً با شدت و مقادیر زیاد در مقایسه با مقادیر نفوذ عمقی حاصل از آب آبیاری کمتر است. با این حال، میزان تغذیه آب زیرزمینی در سال تر به دلیل بارندگی قابل توجه نسبت به سال‌های آبی نرمال و خشک افزایش یافته است. در مطالعه‌ای بیان شده است، تغذیه تحت تاثیر تلفات نفوذ عمقی حاصل از آب آبیاری، خصوصیات خاک، وضعیت توپوگرافی و خصوصیات زمین‌شناسی یک منطقه قرار دارد (Xu و Beekman، 2003).

نتیجه‌گیری

هدف از انجام این مطالعه، برآورد مولفه‌های بیلان آب شامل نفوذ عمقی، نشت جانبی، جریان برگشتی از آبخوان به رودخانه و تغذیه در همین منطقه در سه سال آبی خشک (۹۶-۱۳۹۵)، نرمال (۹۷-۱۳۹۶) و تر (۹۸-۱۳۹۷) با استفاده از مدل واسنجی شده SWAT بود. تعیین مولفه‌های بیلان آب منطقه غیراشباع و به طور مشخص برآورد تغذیه آب زیرزمینی و تلفیق آن با مدل آب زیرزمینی در مطالعات بهره‌برداري از منابع آب تلفیقی حائز اهمیت است.

نتایج مولفه‌های بیلان برآورد شده به وسیله مدل نشان داد، تبخیر و تعرق واقعی در کل دشت به طور متوسط در سه سال آبی به میزان $404/70$ میلی‌متر در سال (۴۳/۹ درصد) به عنوان مهمترین و اصلی‌ترین مولفه خروجی در محدوده بیلان است. بررسی‌ها نشان داد، مدل واسنجی شده SWAT توانسته است تفاوت میزان نفوذ عمقی در سال تر نسبت به سال نرمال و تفاوت نفوذ در سال تر نسبت به سال خشک تحت تاثیر افزایش بارندگی را برآورد کند. بارندگی در سال تر به مراتب بیشتر از سال‌های نرمال و خشک بوده است. با

آبیاری در منطقه است. نتایج مطالعه Mosase و همکاران (2019) نیز در خصوص بررسی وضعیت توزیع تغذیه فصلی آب زیرزمینی در سطح حوضه بزرگ رودخانه‌ای لیمپوپو^۱ واقع در قاره آفریقا نشان داد، بیشترین تغذیه آب زیرزمینی در ماه‌های تابستان و به دنبال آن در فصل‌های پاییز، بهار و زمستان اتفاق افتاده است. الگوی تغذیه فصلی در این منطقه با الگوی بارندگی (بیش از ۹۵ درصد بارندگی در ماه‌های آوریل تا اکتبر) مطابقت دارد. در این منطقه بیش از ۹۱ درصد از اراضی تحت کشت دیم است. بنابراین، الگوی تغذیه در این منطقه بیشتر از الگوی بارندگی نسبت به تلفات نفوذ عمقی ناشی از آب آبیاری پیروی می‌کند. به طور کلی، بررسی‌ها نشان می‌دهد مدل به خوبی قادر است میزان تغذیه آب زیرزمینی را تحت شرایط بارندگی یا آبیاری برآورد کند.

نتایج نشان داد، الگوی توزیع مکانی تغذیه در زیرحوضه‌ها و HRUها متفاوت است. این امر عمدتاً به دلیل اختلاف در مقدار کل آب تخصیص یافته در هر زیرحوضه و HRUها بر اساس کاربری اراضی موجود در آن‌ها است. بررسی تطبیق کاربری اراضی در زیرحوضه و HRUها نشان می‌دهد، کمترین میزان تغذیه غالباً در کاربری ساختمان و بیشترین مقادیر تغذیه به آبخوان در اراضی کشاورزی تحت آبیاری (زراعی و باغی) اتفاق افتاده است. به طور مثال، کمترین میزان تغذیه (صفر) در زیرحوضه ۱۱۰ واقع در قسمت جنوب دشت، به دلیل وجود کاربری ساختمان (شهر مهاباد) است. بالاترین میزان تغذیه (۴۱۰ میلی‌متر) در زیرحوضه ۸۱ واقع در قسمت مرکزی دشت، به دلیل وجود کاربری اراضی غالب یونجه و سیب و میزان آبیاری بالا در آن است.

به طور کلی، گرچه به طور قاطع نمی‌توان الگوی مکانی مشخصی را برای تغذیه در سطح همه کاربری اراضی و در کل سطح دشت اذعان داشت، اما شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که مقدار قابل توجهی تغذیه در سطح اراضی زراعی و باغی و در مرکز و خروجی دشت (واقع در شمال غربی) و نیز در زیرحوضه‌های واقع در امتداد کانال اصلی رودخانه وجود دارد. در مطالعه‌ای نیز نشان داده شد، کمترین میزان

^۱ Limpopo River Basin

هیدرولوژیکی و متعاقباً الگوی آبیاری متفاوت در هر کدام از آن‌ها قابل درک است. همچنین، نتایج الگوی زمانی تغذیه آب زیرزمینی نشان داد، تفاوت متمایزی بین فصول و سال‌های آبی وجود دارد، به طوری که میزان تغذیه در سال آبی تر نسبت به سال‌های نرمال و خشک بیشتر بود. از طرف دیگر، میزان تغذیه آب زیرزمینی در ماه‌های تابستان و بهار بیشتر از ماه‌های پاییز و زمستان بود.

نتایج حاکی از قابلیت قابل قبول مدل در برآورد میزان تغذیه آب زیرزمینی تحت شرایط بارندگی یا آبیاری بود. به طور کلی، واسنجی چندمنظوره مدل SWAT بر اساس دبی رودخانه، تبخیر و تعرق و عملکرد گیاه منجر به افزایش دقت مدل‌سازی شد، به طوری که مدل به خوبی توانست مولفه‌های بیلان آب را از طریق تفکیک رطوبت خاک در منطقه غیراشباع به تغذیه آبخوان و سایر مولفه‌های بیلان شبیه‌سازی کند. تغذیه، یکی از مهمترین مولفه‌های ورودی مدل آب زیرزمینی مانند MODFLOW است. با توجه به این که مدل MODFLOW در برآورد فرایندهای تغذیه و جریان جانبی در منطقه غیراشباع دارای محدودیت است، لذا استفاده از مدل شبیه‌سازی SWAT در برآورد مولفه‌های بیلان آب منطقه غیراشباع و تلفیق آن با مدل آب زیرزمینی MODFLOW در شبیه‌سازی و برآورد دقیق‌تر نوسانات سطح ایستابی و نیز مطالعات بهره‌برداری از منابع آب تلفیقی اهمیت زیادی دارد. همچنین، مدل واسنجی شده می‌تواند برای اعمال سناریوهای مختلف مدیریتی در منطقه مورد استفاده قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

موفین از مدیریت و کارشناسان ستاد احیای دریاچه ارومیه که امکان دسترسی به اطلاعات مورد نیاز تنظیم این مقاله را فراهم آوردند، قدردانی نموده و سپاس‌گزاری می‌کنند.

این حال، تلفات ناشی از آبیاری اثربخشی بیشتری در برآورد نفوذ عمقی نسبت به بارندگی در هر سه سال آبی داشته است که این می‌تواند به دلیل الگوی متمرکز دفعات آبیاری در بازه زمانی محدود در مقایسه با بارندگی پراکنده باشد. البته افزایش چشمگیر بارندگی در سال تر منجر به افزایش قابل توجه نفوذ عمقی نسبت به سال‌های آبی نرمال و خشک شده است، به طوری که بررسی‌ها نشان داد مقدار نفوذ عمقی در سال تر نسبت به سال‌های نرمال و خشک به ترتیب حدود ۲۳ و ۴۳ درصد افزایش یافته است. دلیل این امر را می‌توان به افزایش چشمگیر بارندگی (۲۷۸ درصد) در سال تر نسبت به سال خشک نسبت داد. همچنین، نتایج نشان داد میزان رواناب سطحی در سال تر نسبت به سال خشک به میزان ۴۸/۶۴ درصد افزایش یافته است.

الگو و مقدار رواناب سطحی به میزان بارندگی و نیز تلفات رواناب ناشی از آبیاری بستگی دارد. نتایج نشان داد، میزان جریانات برگشتی از آبخوان به رودخانه نیز عامل بسیار مهمی در ایجاد جریانات سطحی در رودخانه بوده است. زیرا بررسی‌ها نشان داد وجود سطح آب زیرزمینی کم عمق، سهم قابل توجهی در ایجاد جریانات سطحی برگشتی از آبخوان به رودخانه دارد. نتایج حاکی از افزایش ۳۷/۹ درصدی جریان برگشتی از آبخوان به رودخانه در سال تر نسبت به سال خشک بود. در نهایت، میزان جریان جانبی نیز در سال تر نسبت به سال خشک افزایش یافته است، به طوری که میزان این مولفه دو برابر شده است. با این حال مقدار آن در مقایسه با سایر مولفه‌های بیلان بسیار کم است.

بررسی‌ها نشان داد، مدل به خوبی قادر به برآورد تفاوت میزان نفوذ در پهنه‌های مختلف دشت و در فصول مختلف سال با توجه به نوع کاربری و الگوی مدیریتی اراضی بوده است. بررسی الگوی زمانی و مکانی تغذیه آب زیرزمینی نیز نشان داد، توزیع مکانی تغذیه در زیرحوضه‌ها و HRUها متفاوت است. این امر با توجه به کاربری اراضی متفاوت در زیرحوضه‌ها و زیر واحدهای

منابع مورد استفاده

1. Abbaspour, K.C. 2009. User manual for SWAT-CUP SWAT calibration and uncertainty analysis programs. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, Dübendorf, Switzerland, 105 pages.
2. Abbaspour, K.C., J. Yang, I. Maximov, R. Siber, K. Bogner, J. Mieleitner and J. Zobrist. 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur Watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, 333: 413– 430.
3. Adeogun, A.G., B.F. Sule and A.W. Salami. 2014. Validation of SWAT Model for prediction of water yield and water balance, case study of upstream catchment of Jebba Dam in Nigeria. *International Journal Computer Math Science*, 8(2): 264-270.
4. Ahmadzadeh, H., S. Morid and M. Delavar. 2014. Assessment of changes in agricultural crop yields and inflows to Lake Urmia in Zarrinehrud River Basin due to changing irrigation systems from surface to pressure using SWAT Model. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 8(1): 1-15 (in Persian).
5. Akhavana, S., J. Abedi-Koupaia, S.F. Mousavia, S.S. Eslamiana and K.C. Abbaspour. 2010. Application of SWAT Model to investigate nitrate leaching in Hamadan–Bahar Watershed, Iran. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 139(4): 675-688.
6. Aliyari, F., R.T. Bailey, A. Tasdighi, A. Dozier, M. Arabi and K. Zeiler. 2019. Coupled SWAT-MODFLOW Model for large-scale mixed agro-urban river basins. *Environmental Modelling and Software*, 115: 200-210.
7. Alizadeh, A., K. Izady, K. Davari, A.N. Ziaei, S. Akhavan and Z. Hamidi. 2013. Estimation of actual evapotranspiration at the basin year scale using SWAT. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 2(7): 258-243 (in Persian).
8. Amini, M.A., G.H. Torkan, S.S. Eslamian, M.J. Zareian and A.A. Besalatpour. 2019. Assessment of SWAT hydrological model in catchments' water balance simulation located in semi-arid regions, case study: Zayandeh-Rud River Basin. *Journal of Water and Soil*, 32(5): 849-863 (in Persian).
9. Anand, J., A.K. Gosain and R. Khosa. 2018. Prediction of land use changes based on land change modeler and attribution of changes in the water balance of Ganga Basin to land use change using the SWAT Model. *Science of the Total Environment*, 644: 503-519.
10. Arnold, J.G., R. Srinivasan, R.S. Muttiah and J.R. Williams. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment, Part 1. model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34: 73– 89.
11. Bailey, R.T., T.C. Wible, M. Arabi, R.M. Records and J. Ditty. 2016. Assessing regional-scale spatio-temporal patterns of groundwater–surface water interactions using a coupled SWAT-MODFLOW Model. *Hydrological Process*, 30: 4420–4433.
12. Berihun, M.L., A. Tsunekawa, N. Haregeweyn, Y.T. Dile, M. Tsubo, A.A. Fenta, D.T. Meshesha, K. Ebabu, D. Sultan and R. Srinivasan. 2020. Evaluating runoff and sediment responses to soil and water conservation practices by employing alternative modeling approaches. *Science of the Total Environment*, 747: 141118.
13. Dastjerdi, E., B. Mojaradi and H. Alizadeh. 2019. GIS-based identification and preparation of suitable climatological data sources for simulation using semi-distributed hydrological models. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(7): 1781-1791 (in Persian).
14. de Oliveira Serrão, E.A., M.T. Silva, T.R. Ferreira, V.D.P.R. da Silva, F.D.S. de Sousa, A.M.M. de Lima, L.C.P. de Ataíde and R.T.S. Wanzeler. 2020. Land use change scenarios and their effects on hydropower energy in the Amazon. *Science of the Total Environment*, 744: 140981.
15. Dowlatabadi, S. and S.A. Zomorodian. 2016. Conjunctive simulation of surface water and groundwater using SWAT and MODFLOW in Firoozabad Watershed. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(1): 485-496.
16. Ebrahimi, P., J. Salimi Kochi and M. Mohseni Saravi. 2018. Calibration and validation of SWAT model in runoff simulation, case study: Neka Watershed. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 10(3): 266-279 (in Persian).
17. Eini, M.R., S. Javadi, M. Delavar, P.W. Gassman and B. Jarihani. 2020. Development of alternative SWAT-based models for simulating water budget components and streamflow for a karstic-influenced watershed. *Catena*, 195: 104801.
18. Faramarzi, M., K.C. Abbaspour, R. Schulin and H. Yang. 2009. Modelling blue and green water resources availability in Iran. *Hydrological Processes*, 23(3): 486-501.
19. Farokhnia, A., S. Morid, M. Delavar and K. Abbaspour. 2018. Development of SWAT-LU Model for simulation of Urmia Lake water level decrease and assessment of the proposed actions for its restoration (role of anthropogenic and climatic factors on hydrological change of the basin and lake). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 12(5): 1041-1058 (in Persian).

20. Gassman, P.W., M.R. Reyes, C.H. Green and J.G. Arnold. 2007. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(4): 1211-1250.
21. Ghodousi, M., M. Delavar and S. Morid. 2014. Impact of land use changes on hydrology of Ajichai Basin and its input to Urmia Lake. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 45(2): 123-133 (in Persian).
22. Gosain, A.K., S. Rao, R. Srinivasan and N. Gopal Reddy. 2005. Return-flow assessment for irrigation command in the Palleru River Basin using SWAT Model. *Hydrological Processes*, 19(3): 673-682.
23. Green, W.H. and G.A. Ampt. 1911. Studies on soil physics 1: the flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Science*, 4(1): 1-24.
24. Hargreaves, G.H. and Z.A. Samani. 1982. Estimating potential evapotranspiration. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 108(3): 225-230.
25. Hosseini, M., M. Ghafouri, Z. Tabatabaei and M.R. Mokarian. 2017. Estimation of water balance in watersheds led to west-south frontiers and Persian Gulf by semi distributed SWAT Model. *Journal of Hydrology and Soil Science*, 20(4): 183-194 (in Persian).
26. Jayakrishnan, R., R. Srinivasan, C. Santhi and J.G. Arnold. 2005. Advances in the application of the SWAT Model for water resources management. *Hydrological Processes*, 19: 749-762.
27. Jensen, M.C. 1968. The performance of mutual funds in the period 1945-1964. *The Journal of Finance*, 23(2): 389-416.
28. Jolejolea, M.E., B.J. Kimb, D.J. Jeonb, M. Cayetanoa and J.H. Kimb. 2018. Scenario study of the effect of different land use to a sub-basin in Yeongsan River Basin using SWAT Model. *Desalination and Water Treatment*, 120: 198-204.
29. Kanishka, G. and T.I. Eldho. 2020. Streamflow estimation in ungauged basins using watershed classification and regionalization techniques. *Journal of Earth System Science*, 129(1): 1-18.
30. Kim, N.W., I.M. Chung, Y.S. Won and J.G. Arnold. 2008. Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW Model. *Journal of Hydrology*, 356(1-2): 1-16.
31. Mo, G., Y. Zhang, Y. Huang, C. Mo and Q. Yang. 2020. Evaluation and hydrological impact of land-use changes in the Longtan Basin. *Journal of Earth System Science*, 129(1): 1-11.
32. Molina-Navarro, E., R.T. Bailey, H.E. Andersen, H. Thodsen, A. Nielsen, S. Park, J.S. Jensen, J.B. Jensen and D. Trolle. 2019. Comparison of abstraction scenarios simulated by SWAT and SWAT-MODFLOW. *Hydrology Sciences Journal*, 64(4): 434-454.
33. Monteith, J.L. 1965. Evaporation and environment in the state and movement of water in living organisms. *Proceedings of the Society for Experimental Biology*, Symposium No. 19, Cambridge University Press, Cambridge.
34. Mosase, E., L. Ahiablame, S. Park and R. Bailey. 2019. Modelling potential groundwater recharge in the Limpopo River Basin with SWAT-MODFLOW. *Groundwater for Sustainable Development*, 9: 100260.
35. Nair, S.S., K.W. King, J.D. Witter, B.L. Sohngen and N.R. Fausey. 2011. Importance of crop yield in calibrating watershed water quality simulation tools. *Journal of the American Water Resource Association (JAWRA)*, 47(6): 1285-1297.
36. Näschen, K., B. Diekkrüger, M. Evers, B. Höllermann, S. Steinbach and F. Thonfeld. 2019. The impact of Land Use/Land Cover Change (LULCC) on water resources in a tropical catchment in Tanzania under different climate change scenarios. *Sustainability*, 11(24): 7083.
37. Naserabadi, F., A. Esmali Ouri, H. Akbari and R. Rostamian. 2016. River flow simulation using SWAT Model, case study: Ghareh Su River in Ardabil Province, Iran. *Journal of Watershed Management Research*, 7(13): 50-59 (in Persian).
38. Neitsch, S., J. Arnold, J. Kiniry and J. Williams. 2011. Soil and water assessment tool: theoretical documentation. Texas Water Resource Institute, USA, 150 pages.
39. Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry and J.R. Williams. 2005. Soil and water assessment tool theoretical documentation, Temple, Texas, USA, 415 pages.
40. Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, J.R. Williams and K.W. King. 2009. Soil and water assessment tool theoretical documentation. Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, US Department of Agriculture, 385 pages.
41. Patil, N.S. and M. Nataraja. 2020. Effect of land use land cover changes on runoff using hydrological model: a case study in Hiranyakeshi Watershed. *Modeling Earth Systems and Environment*, 1-13.
42. Pinaras, V., C. Petalas, G.D. Gikas, A. Gemitzi and V.A. Tsihrintzis. 2010. Hydrological and water quality modeling in a medium-sized basin using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT). *Desalination*, 250(1): 274-286.
43. Priestley, C.H.B. and R.J. Taylor. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100: 81-92.

44. Raja, O., M. Parsinejad and M. Tajrishi. 2021. Multipurpose calibration of SWAT Model in estimating runoff, evapotranspiration, and crop yield, a case study: Mahabad Plain. *Iran Water Resources Research*, 17(4): 11-34 (in Persian).
45. Raja, O., M. Parsinejad and M. Tajrishi. 2022. Evaluation of interaction between aquifer and river using integrated SWAT-MODFLOW-NWT Model, case study: Mahabad Plain. *The Journal of Irrigation Sciences and Engineering (JISE)*, Online Published (in Persian).
46. Raja, O., M. Parsinejad and M. Tajrishi. 2022. Simulation of groundwater balance using integrated surface and groundwater SWAT-MODFLOW-NWT Model, case study: Mahabad Plain. *Journal of Water and Soil*, 36(1): 31-52 (in Persian).
47. Rezaei Moghaddam, M.H., M.A. Hejazi and A. Behbody. 2019. Estimation of runoff catchment in East Azerbaijan Province: comparative application of calibration methods and uncertainty analysis of SWAT Model. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 8(31): 59-75 (in Persian).
48. Ritchie, J.T. 1972. A model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Research*, 8: 1204-1213.
49. Saadatpour, A., A. Alizadeh, A.N. Ziaei and A. Izady. 2019. integrated surface and groundwater flow modeling in Neishaboor Watershed with SWAT-MODFLOW. *Journal of Water and Soil*, 33(4): 521-536 (in Persian).
50. Sedighi Hamidi, P. 2018. Investigating the effect of expansion of pressurized irrigation systems on water resources of Urmia Lake Basin (Mahabad sub-basin). MSc Thesis, Urmia University, 131 pages (in Persian).
51. Sloan, P.G. and I.D. Moore. 1984. Modeling subsurface stormflow on steeply sloping forested watersheds. *Water Resources Research*, 20(12): 1815-1822.
52. Sloan, P.G., I.D. Moore, G.B. Coltharp and J.D. Eigel. 1983. Modeling surface and subsurface stormflow on steeply-sloping forested watersheds. *Water Resources Research*, 20(12): 1815-1822.
53. Srinivasan, R., X. Zhang and J. Arnold. 2010. SWAT ungauged: hydrological budget and crop yield predictions in the upper Mississippi River Basin. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 53(5): 1533-1546.
54. Thavhana, M.P., M.J. Savage and M.E. Moeletsi. 2018. SWAT Model uncertainty analysis, calibration and validation for runoff simulation in the Luvuvhu River Catchment, South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 105: 115-124.
55. USDA, Soil Conservation Service. 1972. *National Engineering Handbook Section 4: Hydrology, Chapters 4-10*, the Service, 75 pages.
56. Water Engineering Research Institute. 2019. Collaborative land cover mapping of the Lake Urmia Basin, Iran. Tarbiat Modares University, 61 pages.
57. Wei, X. and R.T. Bailey. 2019. Assessment of system responses in intensively irrigated stream-aquifer systems using SWAT-MODFLOW. *Water*, 11(8): 1576.
58. Wei, X., R.T. Bailey and A. Tasdighi. 2018. Using the SWAT Model in intensively managed irrigated watersheds: model modification and application. *Journal of Hydrologic Engineering*, 23: 04018044.
59. White, K.L. and I. Chaubey. 2005. Sensitivity analysis, calibration and validation for a multisite and multivariable SWAT Model. *Journal of the American Water Resources Association*, 41(5): 1077-1089.
60. Wösten, J.H.M., Y.A. Pachepsky and W.J. Rawls. 2001. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology*, 251(3-4): 123-150.
61. Xu, Y. and H.E. Beekman. 2003. Groundwater recharge estimation in Southern Africa. *The UNESCO Intergovernmental Hydrological Programme (IHP)*, Paris, 207 pages.

Estimation and evaluation of water balance components by calibrated SWAT Model, case study: Mahabad Plain

Omid Raja¹, Masoud Parsinejad^{2*}, Masoud Tajrishi²

¹ PhD candidate, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran, ² Associate Professor Respectively, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran and ³ Professor, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

Received: 26 March 2022

Accepted: 01 August 2022

Abstract

The SWAT Model has been accepted as a comprehensive surface water simulation model in estimating water balance components with the ability to study different management scenarios on water resources. In most studies, the SWAT Model is calibrated based on the accuracy of surface runoff estimation, and its comparison with field measurements in hydrometric stations. In a previous study, the performance of the SWAT Model in estimating runoff, evapotranspiration, and yield of wheat, barley, corn, sugar beet, alfalfa, apple, and grape crops in the Mahabad Plain was satisfactory and acceptable. The purpose of the present study was to use the SWAT calibrated model in estimating other components of water balance including deep percolation, lateral flow, return flow from the aquifer to the river in the same area. Assessing the components of water balance in the unsaturated zone, and its effectiveness in aquifer balance is important in managing the utilization of integrated water resources. The results showed that the calibrated model was able to estimate the difference between the deep percolation in the wetted year compared to normal years, and the difference in the infiltration in the wet year compared to the dry year under the influence of increasing rainfall. The results showed that the amount of deep percolation in the wetted year compared to normal and dry years has increased by about 23% and 43%, respectively. The average depth percolation is estimated 157.86 mm (17.1%). At the same time, the model has been able to estimate the difference in the amount of infiltration in different areas of the plain, and in different seasons of the year according to the type of land use and land management patterns. The amount of lateral flow has also increased in the wetted year compared to the dry year, so that the amount of this component has doubled. In this study, the average return flow from the aquifer to the river was estimated to be 20.9% (129.6 mm). Surveys have shown that the presence of shallow groundwater level has a significant role in creating surface return flow from the aquifer to the river. In general, the results showed that recharge due to rainfall and irrigation water from unsaturated zone is one of the most important input components of groundwater models such as MODFLOW in arid and semi-arid regions. The amount of recharge is important in more accurately estimating water level fluctuations. Given that the MODFLOW Model is not well able to estimate the recharge processes and lateral flow in the unsaturated zone. Therefore, the simultaneous use of SWAT and MODFLOW models in estimating the water balance components of the unsaturated zone and combining it with the groundwater model is important in studies and management of operation of integrated water resources.

Keywords: Evapotranspiration, MODFLOW, Recharge, Return flow, Run off

* Corresponding author: parsinejad@ut.ac.ir