Archive of SID

نشریه حفاظت منابع آب و خاک، سال دهم، شماره چهار، تابستان ۱۴۰۰

ISSN 2251-7480

شبیه‌سازی کمی منابع آب سطحی و زیرزمینی دشت بهشهر- بندرگز با استفاده از مدل SWAT

بهروز محسنی[۱]، کاکا شاهدی[۲]، محمود حبیب‌نژاد روشن[۳]، عبداله درزی نفت‌چالی[٤]

۱) دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع‌طبیعی ساری، ایران.

۲*) دانشیار گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع‌طبیعی ساری، ایران.

*نویسنده مسئول مکاتبات: k.shahedi@sanru.ac.ir

۳) استاد گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع‌طبیعی ساری، ایران.

٤) دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع‌طبیعی ساری، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱٤۰۰/۰٤/۱۲

چکیده:

مدیریت بهینه منابع آب در حوضه‌های دارای کاربری‌های متنوع، مستلزم پیش‌بینی مناسب واکنش منابع آب با استفاده از مدل‌های کارآمد می‌باشد. در این تحقیق از مدل SWAT برای شبیه‌سازی منابع آب سطحی و زیرزمینی در دشت بهشهر- بندرگز استفاده شد. پس از تحلیل حساسیت، واسنجی و صحت‌سنجی داده‌های جریان، در دوره‌های ۲۰۱۳-۲۰۰۷ و ۲۰۱۷-۲۰۱۴ انجام شد. شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی از طریق شبیه‌سازی میزان تغذیه در هر واحد پاسخ هیدرولوژیک (HRU) صورت گرفت. نتایج تحلیل حساسیت، ۱۴ پارامتر صعود از آبخوان کم‌عمق، زمان تأخیر انتقال آب از آخرین پروفیل لایه خاک به سطح آب زیرزمینی، عمق اولیه آب در آبخوان کم‌عمق و عمیق، نفوذ به آبخوان عمیق، ضریب آلفا جریان پایه، ظرفیت آب قابل‌دسترس خاک، شماره منحنی رواناب، متوسط بیشترین شیب، ضریب جبران تبخیر خاک، عامل حفاظت فرسایش خـــاک، ضریب زبری مانینگ، عرض نوار صافی و فاکتور جبران تبخیر خاک را به‌عنوان حساس‌ترین پارامترها نشان داد. به‌منظور ارزیابی مدل از معیارهای عملکردی ضرایب نش- ساتکلیف (NS) و همبستگی (R^2) استفاده شد. این ضرایب به‌ترتیب در مرحله واسنجی ۰/۵۶ تا ۰/۹۳ و ۰/۷۴ تا ۱/۰۰ و در مرحله صحت‌سنجی ۰/۵۶ تا ۰/۸۴ و ۰/۶۶ تا ۰/۹۲ برآورد شدند که بیانگر دقت قابل‌قبول مدل در شبیه‌سازی جریان بود. در مقایسه تغییرات تراز مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده، ضرایب NS (۰/۸۱) و R^2 (۰/۹۱) حاکی از کارآیی مدل در شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی بود. براساس نتایج بیلان آب، از مجموع آب ورودی به دشت، بخش اعظم آن (۶۰٪) صرف تبخیر- تعرق، ۱۸ درصد سهم رواناب سطحی و بخش اندکی (۲۲٪) به نفوذ اختصاص یافت.

کلید واژه‌ها: تحلیل حساسیت؛ بیلانِ آب؛ واحد پاسخ هیدرولوژیکی؛ نفوذ

مقدمه

رشد جمعیت به‌همراه مصرف‌گرایی، توسعه زمین‌های کشاورزی و گسترش مناطق شهری و محدودیت منابع آب سطحی، منجر به برداشت فزاینده آب از سفره‌های آب زیرزمینی شده است (کریمی‌راد و همکاران، ۱۳۹۸).

علاوه بر این، افزایش مصرف آب باعث کاهش کیفیت آب‌های قابل استحصال شده است (فلاح و همکاران، ۱۳۹۱). برآوردها حاکی از آن است که برای تأمین نیاز غذایی جهان در سال ۲۰۵۰، میزان تولیدات کشاورزی باید حدود ۷۰ درصد افزایش یابد (Wu and Ma, 2015)؛

www.SID.ir

Archive of SID

که این به‌معنی افزایش ۵۳ درصدی مصرف منابع آب بخش کشاورزی در سطح جهان است (De Fraiture and Wichelns, 2010؛ Velasco-Muñoz *et al.*, 2019). این در حالی است که اراضی کشاورزی به‌عنوان تأمین‌کننده اصلی مواد غذایی، با مصرف بیش از ۷۰ درصد منابع آب برداشت‌شده در شرایط فعلی، مصرف‌کننده اصلی منابع آب در سطح جهان محسوب می‌شوند (Damkjaer and Taylor, 2017; Wang *et al.*, 2019). در سطح کشورمان نیز اراضی کشاورزی به‌لحاظ وضعیت منابع آب، از شرایط مشابه فوق‌الذکر برخوردار هستند. تولید مواد غذایی کشور به میزان ۷٤/۵ میلیون تُن در سال ۱۳۸۷، براساس برنامه-ریزی‌های توسعه‌ای در افق ۱٤۰٤ باید تا حدود ۱۹۰ میلیون تُن افزایش یابد (وزارت جهاد کشاورزی، ۱۳۹۲) که برای نیل به آن، دو برابر مقدار آب استحصالی در سال ۱۳۸۷ (۸٦ میلیارد مترمکعب)، بایستی آب تولید گردد (AQUASTAT- FAO, 2008). اگرچه زمین کشاورزی برای افزایش تولید مواد غذایی وجود دارد، لکن در صورت عدم ارتقای بهره‌وری آب، منابع آبِ موجود، برای این مقدار افزایش کفایت نمی‌کند (ناصری و همکاران، ۱۳۹٦). با توجه به کمبود منابع آب تجدیدپذیر در سال-های اخیر، توسعه کشاورزی عمدتاً بر منابع آبِ محدود و آسیب‌پذیر زیرزمینی متکی بوده است (Elangovan and Selva kumar, 2018). میزان اتکای بخش کشاورزی به منابع آب زیرزمینی به‌طور متوسط در دنیا ٤۲/۱ درصد، در خاورمیانه ٦۹/۲۵ درصد و در ایران ٦۲/۷۷ درصد است (AQUASTAT- FAO, 2020). مقایسه این مقادیر نشان-دهنده وابستگی بیش از حد بخش کشاورزی کشور به آب‌های زیرزمینی در مقایسه با کشورهای دیگر و حتی منطقه خاورمیانه است.

یکی از مناطق کشور که در طی ۱۵ تا ۲۰ سال اخیر، به‌دلیل مشکلات ناشی از برداشت بیش از حد آب زیرزمینی به‌عنوان منطقه ممنوعه معرفی شد، دشت بهشهر- بندرگز می‌باشد که وابستگی آن به منابع آب زیرزمینی، ۸۳/٥٤ درصد می‌باشد. دوره آماری ۱۹ساله (۱۳۹۰-۱۳۷۲) این دشت، بیانگر افت ۱/۸٤ متری سطح آب زیرزمینی می‌باشد که متوسط سالانه آن برابر ۰/۱٦ متر است (شرکت سهامی آب منطقه‌ای مازندران، ۱۳۹۹). بطور کلی صنعت آب در ایران با سه مشکل اساسی توزیع نامناسب مکانی، زمانی و خشکسالی‌های پی در پی مواجه است. با نگاهی به عدم‌تعادل عرضه و تقاضا و قرارگرفتن آب در یک وضعیت بحرانی، شاهد این موضوع هستیم که از آبِ موجود (آب‌های سطحی و زیرزمینی) بهره‌برداری مناسب انجام نمی‌گیرد. بنابراین، پُرواضح است که فشار ناشی از نیازهای روزافزون آب از یک‌طرف و محدودیت منابع آب موجود از طرف دیگر، ما را واردار به اِعمال مدیریت علمی،تعادل‌بخشی و احیاء منابع آب خواهد کرد (علی‌پور و همکاران، ۱۳۹۵). براین اساس، احیای منابع آب زیرزمینی ضرورت پیدا می‌کند.

از مهمترین عوامل احیاء می‌توان به توازن بین تغذیه و تخلیه منابع سطحی و زیرزمینی اشاره کرد. با توجه به نبود برنامه‌های پایش کافی و با کیفیت، استفاده از قابلیت مدل‌های عددی در شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی، دارای اهمیت است. چنانچه قابلیت‌ها و کارایی این مدل‌ها برای مناطقی با شرایط متنوع به‌لحاظ خاک، توپوگرافی و کاربری اراضی مورد تائید قرار گیرد، می‌توان از آن‌ها به-عنوان ابزاری برای مدیریت منابع آب و خاک استفاده کرد. برخی از مدل‌های رایج برای مدیریت آبخیز عبارتند از؛ SWAT (Arnold *et al.*, 1998)، MODFLOW (Harbaugh, 2005)، MicroFEM (Diodato, 2000)، GSFLOW (Markstrom *et al.*, 2008)، HEC-HMS (US Army Corps of Engineers, 2015)، SWAT-MODFLOW (Bailey *et al.*, 2016; Guzman *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2008). از بین مدل‌های مذکور، SWAT به‌عنوان یکی از پرکاربردترین آن‌ها و مدلی جامع در زمینه مطالعات آب و خاک است که می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های کلان برای اراضی وسیع مورد استفاده قرار

www.SID.ir

Archive of SID

گیرد. این مدل یک پنجره ارتباطی پیشرفته است که امکان تلفیق مجموعه‌ای از مدل‌ها و داده‌های GIS را در روندیابی جریان آب سطحی و زیرزمینی فراهم می‌سازد و از نظر محاسباتی نیز بسیار کارآمد است.

در سال‌های اخیر، تحقیقات متعدد و مختلفی از جمله کارآیی و دقت مدل در شبیه‌سازی جریان رودخانه، مؤلفه‌های بیلان آب (تغذیه و تبخیر- تعرق) و غیره با استفاده از مدل SWAT انجام شده است. در تحقیقی، عملکرد مدل SWAT در واسنجی و صحت‌سنجی مؤلفه‌های هیدرولوژیک مورد بررسی قرار گرفت. این عملکرد براساس ضرایب تعیین (R^2) و نش- ساتکلیف، بیانگر تناسب مدل SWAT در شبیه‌سازی جریان رواناب بود (Ghoraba, 2015؛ ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۷). استفاده از مدل SWAT برای شبیه‌سازی اجزاء معادله بیلان آب در حوزه آبخیز سملقان ایران نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مطالعات نشان داد که مدل SWAT می‌تواند در مناطق نیمه‌خشک، برای سیاستگذاری مدیریت آب و استراتژی توسعه پایدار مدیریت آب، کارآیی مناسبی داشته باشد (Nasiri *et al*, 2020).

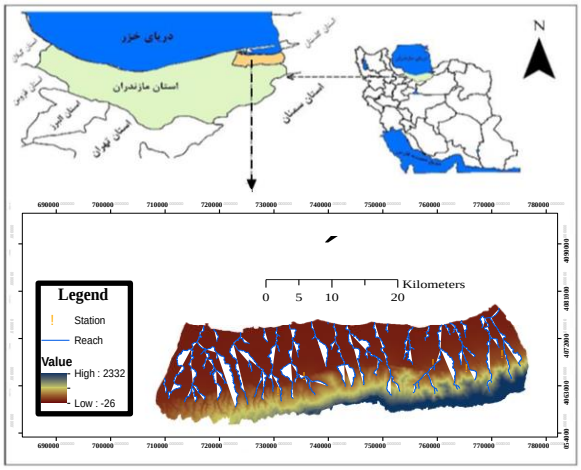
بیلان آب نیز در تحقیقات مختلف، توسط مدل SWAT مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از تبخیر- تعرق در یک حوضه آبیاری در جنوب‌شرقی استرالیا، پارامتر تغذیه تخمین زده شد (Githui *et al*, 2012). این مدل قادر به شبیه‌سازی جریان تخلیه‌ای ماهانه مشاهده‌ای و توزیع مکانی تبخیر- تعرق بود. نتایج بیانگر این بود که میزان تغذیه برای پوشش زمین‌های آبیاری همانند مراتع چندساله، بیشتر از زمین‌های غیرآبیاری است. در حوضه‌ای در استرالیا و در مقیاس هر زیرحوضه، از مدل SWAT به‌منظور برآورد میزان تغذیه آب زیرزمینی استفاده شد. نتایج حاصل از این تحقیق بیانگر تأثیر بالای تغییرات آب و هوا نسبت به کاربری اراضی روی مقادیر تغذیه بود (Sun and Cornish, 2005). در تحقیقی دیگر، کارایی مدل SWAT در برآورد تغذیه آبخوان دشت سیلاخور در استان لرستان بررسی شد. مقایسه نتایج تغذیه حاصل از مدل SWAT با هیدروگراف نوسانات تراز ایستابی (آوریل ۲۰۰۶ تا دسامبر ۲۰۰۹) و تعیین ضریب همبستگی ۰/۷۲ نشان داد که مدل در برآورد مقادیر تغذیه عملکرد مناسبی دارد (کوچک‌زاده و نصیری‌صالح، ۱۳۹۲). مقدار تغذیه آب زیرزمینی تحت شرایط اقلیمی متغیر توسط مدل‌های SWAT و Hydrus در غربِ ژاپن بررسی شد (Jin *et al*, 2015). نتایج آن‌ها نشان داد که میانگین سالانه تغذیه آب زیرزمینی حدود ۳۳ درصد کل بارش‌ها را شامل می‌شود. همچنین در مقایسه با نوسانات سالانه بارش، نوسانات بیشتری در مقدار رواناب و تغذیه آب زیرزمینی صورت می‌گیرد. برای تخمین تغذیه آب زیرزمینی در حوضه آبریز دشت رزن- قهاوند قزوین از ابزار ارزیابی آب و خاک (مدل SWAT) استفاده شد (Rafiei Emam *et al*, 2015). با استفاده از الگوریتم SUFI2 و براساس دبی ماهانه رودخانه و عملکرد سالانه محصول، مدل واسنجی‌شد. نتایج بیانگر این بود که با تعیین ضریب نش- ساتکلیف ۰/۵۳ تا ۰/۶۳ برای واسنجی و ۰/۴۲ تا ۰/۷۲ برای صحت‌سنجی، مدل رضایت‌بخش بوده است. بیلان آب در حوضه آبریز متوسط‌مقیاس کِن، واقع در هند مرکزی نیز با استفاده از مدل SWAT شبیه‌سازی شد. نتایج بیلان برآوردشده، ۴۴/۶ درصد از بارش سالانه را به تبخیر- تعرق اختصاص داده است و سهم رواناب و نفوذ به آبخوان عمیق به‌ترتیب ۳۴/۷ و ۱۹/۵ درصد بود (Himanshu *et al*., 2017). با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT، مدیریت آبخیز رودخانه Watarak گُجرات مورد بررسی قرار گرفت (Chunn *et al*, 2019 ؛ Jasodani and Lodha, 2020). نتایج این تحقیقات نیز نشان داد که مدل SWAT، برای پیش‌بینی اثرات روش‌های مدیریت اراضی/ اقدامات حفاظت بر اجزای بیلان آب در منطقه، از کارآیی قابل‌قبولی برخوردار است.

طبق پژوهش‌های انجام‌شده با اهداف مختلف شبیه‌سازی آب‌های سطحی و زیرزمینی برای حفاظت آب و

www.SID.ir

Archive of SID

خاک در مناطق مختلف، در مورد احیاء و پایداری آب زیرزمینی در یک دشت ممنوعه، تمرکز خاصی صورت نگرفته است. بنابراین، ارتقای پایداری منابع آب زیرزمینی، در راستای افزایش بهره‌وری بخشی از بارندگی که می‌تواند مستقیماً در فرایند تولید محصولات کشاورزی استفاده شود، مستلزم اتخاذ سیاست‌های مناسب می‌باشد (Birhanu *et al.*, 2019). از جمله مناطقی‌که به‌دلیل مشکلات ناشی از برداشت بیش از حد آب زیرزمینی، ناپایدار شده و در ردیف دشت‌های ممنوعه کشور قرار گرفت، دشت بهشهر- بندرگز در استان مازندران می‌باشد. آمار و گزارش‌های موجود از وضعیت برداشت منابع آب زیرزمینی و افت تراز سطح ایستابی در دشت مورد مطالعه بیانگر این است که روند فعلی پایداری مطلوب نیست و این مهم در آینده‌ای نه چندان دور به یک بحران تبدیل خواهد شد.



شکل ۱. موقعیت دشت بهشهر- بندرگز در کشور و استان مازندران

آنچه نتایج سوابق تحقیقات پیشین نشان می‌دهد این است که تابحال در ایران پیش‌بینی مناسب واکنش منابع آب سطحی و زیرزمینی با استفاده از مدل‌های کارآمدی چون SWAT در یک دشت ممنوعه برای تعیین مقادیر کمی مؤلفه‌های بیلان آب صورت نپذیرفت. در این راستا، ضرورت نگرشی نو برای افزایش تغذیه آبخوان و کاهش برداشت آب زیرزمینی دشت ممنوعه جهت سنجش وضعیت پایداری منابع آب در دشت بهشهر- بندرگز احساس می‌شد. این نگرش براساس تحلیل و تعیین مؤثرترین پارامترهای مؤثر بر منابع آب سطحی و زیرزمینی توسط الگوریتم SUFI-2 مدل SWAT و خروجی‌های حاصل از آن انجام شد. هدف از این تحقیق ضمن بررسی دقت مدل SWAT در سنجش پایداری، شبیه‌سازی مؤلفه‌های بیلان آب سطحی و زیرزمینی می‌باشد. همچنین مؤلفه‌های تأثیرگذار در بررسی پایداری منابع آب و مقدار هر یک از مؤلفه‌ها در منطقه مورد مطالعه مشخص شدند.

مواد و روش‌ها

دشت بهشهر- بندرگز در محدوده طول‌های جغرافیایی ′۱۹ ۵۳ تا ′۰۵ ٥٤ شرقی و عرض‌های ′۳۷ ۳٦ تا ′٥٦ ۳٦ شمالی، در شرقی‌ترین بخش استان مازندران قرار دارد. وسعت این منطقه حدود ۹۷۰/۵۹ کیلومترمربع است. پایین‌ترین و بالاترین نقطه ارتفاعی محدوده به‌ترتیب ۲٦- و ۲۳۳۲ متر از سطح دریای آزاد قرار دارد (شکل ۱). بارندگی و تبخیر سالانه دشت به‌ترتیب ٤۸۳ و ۱۱٤٥ میلی‌متر و دمای متوسط سالانه نیز ۱۷/۳۹ درجه سانتی‌گراد می‌باشد (شرکت سهامی آب منطقه‌ای مازندران، ۱۳۹۹). کاربری اراضی در منطقه شامل مناطق مسکونی (۱/۳٦ درصد)، مرتع- علفزار (۰/۳٤ درصد)، اراضی کشاورزی دیم (۲۲/۷۱ درصد)، جنگل‌های انبوه (٥۱/٥٤ درصد)، اراضی کشاورزی آبی- باغات (۲۲/۳۷ درصد) و پهنه‌های آبی (۱/٦۸ درصد) می‌باشد. گندم، جو، برنج، باقلا و کُلزا از محصولات اصلی تحت کشت در منطقه می‌باشند. در اراضی ساحلی نیز گیاهانی شورپسند عمدتاً از خانواده سالیکورنیا و گیاهان دیگر از جمله قمیش و جگن به‌وفور یافت می‌شوند (صالح و همکاران، ۱۳۹٥). مقدار کل آب زیرزمینی مصرفی (چاه و قنات) موجود در منطقه، ۱٥۰/۳۳ میلیون مترمکعب می‌باشد که بخش کشاورزی با ۱۲۰/۸۹ میلیون مترمکعب در سال، بیشترین مصرف را به‌خود اختصاص داده است. با توجه

www.SID.ir

Archive of SID

به متوسط افت ۰/۱۶ متری سطح آبخوان (تا پایان سال ۹۸)، کسری حجم مخزن سفره‌های دشت نیز برابر با ۱/۴۲ میلیون مترمکعب در سال می‌باشد (شرکت سهامی آب منطقه‌ای مازندران، ۱۳۹۹).

تشریح مدل SWAT

مدل SWAT (ابزار ارزیابی آب و خاک) که در ایالات متحده برای ارزیابی اثرات کشاورزی حفاظتی بر فرآیندهای هیدرولوژیکی و کیفیت آب در مقیاس حوضه آبریز در سال ۱۹۹۸ ارایه شد، یک مدل فیزیک- پایه و جامع‌نیمه‌توزیعی است و به‌طور گسترده برای پیش‌بینی تأثیر مدیریت اراضی روی آب، رسوب و مواد شیمیایی کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Neitsch *et al.*, 2011; Arnold *et al.*, 2012). در مدل SWAT، حوضه آبریز به چندین زیرحوزه تقسیم می‌گردد. استفاده از زیرحوزه‌ها در شبیه‌سازی، بخصوص برای مناطقی با خصوصیات خاک و کاربری اراضی پیچیده که می‌تواند منجر به ناهمگنی در خصوصیات هیدرولوژیکی حوضه گردد، بسیار مفید است. سپس این زیرحوزه‌ها به واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (HRUs[1]) تقسیم می‌گردند که این واحدها دارای خصوصیات خاک، کاربری اراضی و مدیریت یکسان هستند (ذهبیون و همکاران، ۱۳۸۹).

محاسبات مربوط به شبیه‌سازی در این واحدها انجام می‌شود و سپس به کل حوضه تعمیم می‌یابد. در مدل SWAT، رواناب سطحی با استفاده از روش‌های شماره منحنی (CN) اصلاح‌شده سازمان حفاظت خاک آمریکا و نفوذ گرین- آمپت و روندیابی جریان با استفاده از دو روش ذخیره متغیر و ماسکینگهام قابل محاسبه می‌باشد. فرآیندهای هیدرولوژیکی که در این مدل می‌توانند شبیه‌سازی شوند شامل؛ تبخیر- تعرق، رواناب سطحی، ذوب برف، نفوذِ سطحی، نفوذِ عمقی، جریان زیرسطحی و جریان آب زیرزمینی هستند. این مدل به‌منظور شبیه‌سازی چرخه هیدرولوژیک از معادله بیلان آب (رابطه ۱) به‌شرح ذیل استفاده می‌کند:

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

که در آن؛ SW_t محتوای نهایی آبِ خاک (میلی‌متر)، SW_o محتوای اولیه آب (میلی‌متر)، R_{day} مقدار بارش در روز iام (میلی‌متر)، Q_{surf} مقدار رواناب سطحی در روز iام (میلی‌متر)، E_a مقدار تبخیر- تعرق در روز iام (میلی‌متر)، W_{seep} مقدار آب ورودی به پروفیل خاک (منطقه غیراشباع) در روز iام (میلی‌متر) و Q_{gw} مقدار جریان برگشتی در روز iام (میلی‌متر) می‌باشد.

تغذیه آب زیرزمینی

تغذیه آب زیرزمینی بسیار پیچیده بوده و به پارامترهای آب زیرزمینی (هدایت هیدرولیکی)، پارامترهای خاک، ویژگی‌های کاربری اراضی/پوشش و پارامترهای اقلیمی وابسته است (Rafiei Emam *et al.*, 2015). اساس محاسبه تغذیه آب زیرزمینی در مدل SWAT، HRUهایی هستند که از نظر هیدرولوژیکی همگن می‌باشند. مدل SWAT به‌لحاظ مفهومی از طریق سه بخش مهم، بین آب‌های سطحی و زیرزمینی ارتباط برقرار می‌کند. در بخش پروفیل خاک؛ تبخیر- تعرق، رواناب سطحی، جریان جانبی و نفوذ به خاک را معیار قرار می‌دهد. در بخش دوم یعنی آبخوان کم‌عمق؛ پارامترهایی چون نفوذ عمقی[2]، جریان آب زیرزمینی و ضریب نفوذ به آب زیرزمینی عمیق را درنظر می‌گیرد. در بخش آخر (آبخوان عمیق) نیز تغذیه به آبخوان را لحاظ می‌کند. آب نفوذیافته در پروفیل خاک ممکن است به‌عنوان تغذیه آب زیرزمینی یا تلفات جریان جانبی یا تبخیر- تعرق تراوش کند. در آبخوان کم‌عمق، آب می‌تواند از طریق منطقه غیراشباع توسط فعالیت موئینگی برگشت داده شود تا کمبود آب برای تبخیر- تعرق گیاه را

[1]. Hydrologic Response Units

[2]. percolation

www.SID.ir

Archive of SID

جبران کند (REVAP)، یا ممکن است به‌عنوان جریان آب زیرزمینی/انحرافی[1]، نیز حرکت کند؛ مابقی، به تغذیه آبخوان عمیق و آب زیرزمینی تبدیل می‌شوند. در این مطالعه، تغذیه آب زیرزمینی، به‌میزان آب نافذ از ناحیه ریشه به آبخوان عمیق اشاره دارد. به‌عبارت دیگر، تغذیه آبخوان عمیق بخشی از تغذیه آب زیرزمینی کل است (رابطه ۲):

$$W_{deep}=\beta_{deep}.W_{rchrg} \quad (۲)$$

که در آن؛ W_{deep} مقدار تغذیه آبخوان عمیق (میلی‌متر)، β_{deep} ضریب نفوذ آبخوان و W_{rchrg} مقدار تغذیه آب زیرزمینی کل می‌باشد که از رابطه ۳، به‌شرح ذیل محاسبه می‌شود:

$$W_{rchrg,\,i}=\left(1-\exp\left[\frac{-1}{\delta_{gw}}\right]\right).W_{seep}+\exp\left(\frac{-1}{\delta_{gw}}\right).W_{rchrg,\,i-1} \quad (۳)$$

که در آن؛ $W_{rchrg,\,i}$ مقدار تغذیه در روز iام (میلی‌متر)، δ_{gw} زمان تأخیر یا زمان زهکشی مربوط به ساختار لایه بالایی خاک (days)، W_{seep} مقدار کل آب خروجی پایین پروفیل خاک در روز iام (میلی‌متر) و $W_{rchrg,\,i-1}$ مقدار تغذیه ورودی به آبخوان در روز i-1ام (میلی‌متر) می‌باشد. مقدار W_{seep} نیز از رابطه ٤، به‌شرح زیر به‌دست می‌آید:

$$W_{seep}=W_{perc,ly=n}+W_{crk,\,btm} \quad (٤)$$

که در آن؛ $W_{perc,ly=n}$ مقدار آب نفوذیافته خروجی از پایین‌ترین لایه (n) در پروفیل خاک در روز iام (میلی‌متر) و $W_{crk,\,btm}$ مقدار جریان آب عبوری از مرز پایین‌تر پروفیل خاک به‌دلیل جریان انحرافی در روز iام (میلی‌متر) می‌باشد.

با توجه به اینکه در این مطالعه مدل SWAT در سطح HRU، پارامتر تغذیه را به‌عنوان خروجی مدل‌سازی ارائه می‌دهد، بنابراین براساس میزان آبدهی ویژه آبخوان، شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی انجام گرفت و سپس با نوسانات سطح آب زیرزمینی مشاهده‌ای مقایسه شد.

داده‌های ورودی به مدل

در این تحقیق که از نسخه ۲۰۱۲ مدل SWAT استفاده شد، اطلاعات موردنیاز شامل داده‌های هواشناسی (بارندگی روزانه، حداقل و حداکثر دمای روزانه، تابش خورشیدی روزانه، سرعت باد و رطوبت نسبی) می‌باشند. این داده‌ها از یک ایستگاه سینوپتیک، ٤ ایستگاه باران‌سنجی و ۳ ایستگاه تبخیرسنجی برای یک دوره ۱۳ساله (۲۰۰۵-۲۰۱۷) تهیه شد. برای تولید و تکمیل داده‌های هواشناسی از weather generator استفاده شد. داده‌های دبی منطقه مورد مطالعه، از شرکت آب منطقه‌ای مازندران و گلستان برای ۵ ایستگاه هیدرومتری وطنا، باغو، نوکنده، خلیل‌شهر و اَل‌تپه برای دوره مشترک آماری (۲۰۰۵-۲۰۱۷) آماده‌سازی شد. نقشه مدل رقومی ارتفاعی (DEM)، با تفکیک مکانی ۳۰ متر از نقشه توپوگرافی منطقه استخراج شد. بعد از تحلیل نقشه جهانی خاک در GIS، نقشه خاک منطقه مورد مطالعه نیز تهیه گردید. لایه شیب براساس توپوگرافی و خصوصیات فیزیوگرافی منطقه مورد مطالعه و براساس روش سرویس حفاظت خاک آمریکا (SCS) در ۵ کلاس (۰-۵ درصد، ۵-۱۰ درصد، ۱۰-۲۰ درصد، ۲۰-٤۰ درصد و بیشتر از ٤۰ درصد) تولید شد. در نهایت نقشه کاربری اراضی، با توجه به گزارش تلفیق شرکت آب منطقه‌ای مازندران، تصاویر ماهواره‌ای لندست (۲۰۱۷) و تطبیق آن با عملیات صحرایی، آماده‌سازی شد.

مراحل اجرای مدل SWAT

گام اول برای اجرای مدل SWAT، ایجاد واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی یعنی HRUs است که اساس محاسبه پارامترهای نفوذ و پایداری آب زیرزمینی را در این مطالعه تشکیل می‌دهد. بواسطه ادغام نقشه زیرحوزه‌های ایجاد‌شده در منطقه مورد مطالعه (از طریق ترسیم مرز آبخیز با کمک نقشه DEM و سیستم شبکه جریان)، نقشه خاک، کاربری اراضی و شیب، HRUها تولید می‌شوند. یک مدل

[1]. bypass

www.SID.ir

Archive of SID

با استفاده از HRUهای غالب (انواع غالب خاک و کاربری اراضی) ساخته می‌شود. در گام دوم با تعریف حدآستانه ۲۰- ۱۰- ۲۰٪ (کاربری اراضی، خاک و شیب)، HRUهای مختلف ساخته شد. در نهایت براساس نقشه‌های ورودی به مدل، تعداد ۱۳۵ زیرحوزه و ۲۷۴۹ واحد پاسخ هیدرولوژیکی (HRUs) در منطقه مورد مطالعه تولید شدند. با توجه به نوع داده ورودی موجود (اطلاعات حداقل و حداکثر دما)، برای برآورد تبخیر- تعرق مرجع روزانه که داده‌های ساعات آفتابی، رطوبت نسبی و سرعت باد در دسترس نبود از روش هارگریوز استفاده شد (Hargreaves and Samani, 1985). برای روندیابی آب از طریق شبکه کانال نیز از روش ذخیره متغیر استفاده شد. روند بارندگی روزانه/شماره منحنی (CN)، روش به‌کار گرفته شده برای بارش- رواناب در این مدل می‌باشد.

حساسیت‌سنجی، واسنجی و صحت‌سنجی مدل

در مدل‌های هیدرولوژیکی، پارامترهای فیزیکی زیادی در حال اندرکنش هستند و اندازه‌گیری دقیق آن‌ها در آبخیزهای بزرگ امکان‌پذیر نیست یا نیازمند صرف زمان و هزینه زیاد است. جهت نیل به این هدف، بررسی کارآیی مدل پیش از استفاده آن از طریق واسنجی، صحت‌سنجی و تحلیل حساسیت ضروری است. گام اول در بررسی کارآیی مدل، انجام تحلیل حساسیت برای تعیین پارامترهای حساس در اجرای مدل به‌منظور واسنجی است. هدف از تحلیل حساسیت، تعیین ورودی‌هایی است که مشارکت بیشتری در تغییر خروجی دارند و اینکه کدام پارامتر همبستگی بیشتری با خروجی دارد. روش‌های مورد استفاده برای انجام تحلیل حساسیت در حالت کلی به دو گروه "تحلیل‌های سراسری و موضعی" طبقه‌بندی می‌شوند. روش تحلیل سراسری قادر بوده تا تحلیل حساسیت را برای کل دامنه پارامترهای مدل اجرا کرده و در این روش تمام پارامترهای تحت بررسی که بطور همزمان تغییر داده می‌شوند، واکنش‌ها و اثرات آن‌ها روی خروجی مدل ارزیابی می‌گردد. در مقابل، تحلیل موضعی که به‌روش "یک (فاکتور) در یک زمان (OAT)" نیز شناخته می‌شود در حقیقت واکنش شبیه‌سازی مدل را به تغییرات پیوسته هر پارامتر در شرایط ثابت‌بودن سایر پارامترها مورد بررسی قرار می‌دهد (امینی و همکاران، ۱۳۹۷). در این تحقیق، با توجه به تعدد پارامترهای مدل، جهت انجام موفق و سریعتر مرحله واسنجی، از تحلیل حساسیت موضعی برای شناسایی پارامترهای حساس و مهم‌تر در مدل استفاده شد و نتایج حاصل با استفاده از آزمون t- test مورد ارزیابی قرار گرفت. این ارزیابی به دامنه پارامترها وابسته است. در ادامه برای واسنجی دقیق، تحلیل عدم‌قطعیت و صحت‌سنجی مدل SWAT در دشت بهشهر- بندرگز، از نرم‌افزار SWATCUP و روش SUFI-2 استفاده شد (Abbaspour *et al.*, 2007). SUFI-2 یک الگوریتم نیمه‌خودکار مدل‌سازی معکوس است. این الگوریتم برای ارزیابی عدم‌قطعیت، دو معیار P- factor و R- factor را محاسبه می‌کند (Abbaspour *et al.*, 2015 Arnold *et al.*, 2012;). در این تحقیق، واسنجی و صحت‌سنجی مدل SWAT در دو بخش آب‌های سطحی و زیرزمینی انجام شد. در ابتدا براساس داده‌های مشاهده‌ای دبی ماهانه در ایستگاه‌های هیدرومتری منتخب دشت بهشهر- بندرگز اقدام شد (جدول ۱).

سپس برای بررسی تغییرات تراز آب زیرزمینی از اطلاعات چاه‌های موجود در منطقه مورد مطالعه بهره گرفته شد. در شبیه‌سازی، از داده‌های مشاهده‌ای سال‌های ۲۰۰۷-۲۰۱۳ جهت واسنجی و ۲۰۱۷-۲۰۱٤ نیز جهت صحت‌سنجی مدل استفاده شد. به‌منظور تطابق و سازش مدل با شرایط محیطی موجود در منطقه، دو سال اول شبیه‌سازی (۲۰۰۵-۲۰۰٦) برای گرم‌کردن[1] مدل لحاظ گردید. پس از واسنجی، صحت مدل با استفاده از پارامترهای به‌دست آمده و مقادیر مشاهده‌ای که در مرحله واسنجی مورد استفاده قرار نگرفته است، سنجیده شد. در صورت شبیه‌سازی قابل‌قبول، مدل برای کاربرد آماده خواهد بود.

[1]. warm-up

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری منتخب در منطقه مورد مطالعه

نام ایستگاه	شماره ایستگاه	مختصات جغرافیایی (utm)		ارتفاع ایستگاه (متر)	سال تأسیس
		طول	عرض		
باغو	۳۶	۷۷۲۴۳۱/۵	۴۰۶۹۱۰۸	۲۶	۱۳۸۲
وطنا	۴۸	۷۶۵۸۴۴/۷	۴۰۶۶۲۶۲	۱۰۰	۱۳۴۸
نوکنده	۸۸	۷۵۹۷۲۱/۲	۴۰۶۷۲۵۱	۱۵	۱۳۵۵
آل‌تپه	۹۰	۷۳۱۲۹۶/۸	۴۰۶۱۹۲۱	۱۱۰	۱۳۸۰
خلیل‌شهر	۱۳۱	۷۳۶۰۲۱/۸	۴۰۶۴۷۵۸	۵۴	۱۳۵۰

تراز آب زیرزمینی

Finch (1998) نشان داد که متغیرهای مربوط به اجزای خاک (مثلاً ظرفیت آب)، مهمترین پارامترهای سطح زمین برای تخمین تغذیه آب زیرزمینی هستند. تحقیقات مختلفی در مورد تخمین تغذیه آب زیرزمینی و همچنین روند سطح آب در مناطق مختلف وجود دارد. از طرفی نیز بین روش‌های مختلف تخمین تغذیه آب زیرزمینی اختلافات اساسی وجود دارد. با این‌حال، از روش عددی همچون مدل SWAT به‌طور گسترده برای این منظور استفاده می‌شود (Barthel *et al.*, 2012). اکثر محققان به جهت این‌که بخش اعظم آب به سطح سفره‌های زیرزمینی کم‌عمق نفوذ می‌کند، بر برآورد تغذیه آب زیرزمینی کم‌عمق متمرکز شده‌اند.

مدل SWAT تغییرات مکانی حجم و عمق آب زیرزمینی را در HRUهای هر زیرحوزه بدون درنظر گرفتن رفتارهای متقابل هر زیرحوزه شبیه‌سازی می‌کند. با این‌حال، در زیرحوزه‌های مختلف که مرزهای آبخوان با مرز زیرحوزه‌ها مطابقت ندارد، درنظر گرفتن تعاملات و تبادلات بین آبخوان‌ها ضروری است (Delavar *et al.*, 2020). این تبادلات با درنظر گرفتن میزان تغییرات تراز آب زیرزمینی چاه‌های موجود در منطقه بررسی شدند. با توجه به اینکه مدل SWAT به‌تنهایی قادر به شبیه‌سازی مؤلفه‌های آب زیرزمینی نمی‌باشد؛ بنابراین با استفاده از پارامترهای خروجی‌های مدل اقدام به شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی شد. بعد از اجرای مدل، تعداد ۲۷۴۹ واحد پاسخ هیدرولوژیک (HRUs) در محدوده آبخوان دشت بهشهر- بندرگز، تولید شد. مقدار پارامتر تغذیه آب زیرزمینی (RCHG_GW) در هر HRU توسط مدل محاسبه و برای دوره موردنظر استخراج شد. با تقسیم‌نمودن این مقدار بر آبدهی ویژه دشت مورد مطالعه (۰/۰۲۶)، تغییرات تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شد. درنهایت، در بازه زمانی مشابه با دبی رودخانه، از طریق ترسیم نمودارهای مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده براساس معیارهای ارزیابی که در ادامه ذکر می‌شوند کارآیی مدل مورد سنجش قرار گرفت.

معیارهای ارزیابی عملکرد مدل SWAT

جهت ارزیابی کارآیی و دقت مدل SWAT، از چهار آماره ضریب تعیین (R^2)، ضریب کارآیی نش- ساتکلیف (NS)، P-factor و R-factor استفاده شد (Oeurng *et al.*, 2011).

$$R^2=\left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i-S_i)(S_i-\bar{S})}{\left(\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{Q})^2\right)^{0.5}\left(\sum_{i=1}^{n}(S_i-\bar{S})^2\right)^{0.5}}\right]^2 \quad (۵)$$

$$NS=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i-S_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O})^2} \quad (۶)$$

که در آن‌ها؛ O_i مقدار مشاهده‌ای، S_i مقدار شبیه‌سازی‌شده، $\bar{O}$ میانگین مقدار مشاهده‌ای، $\bar{S}$ میانگین مقدار شبیه‌سازی‌شده و n تعداد مشاهدات می‌باشد. مقادیر عددی ضریب NS از منفی بی‌نهایت تا ۱ (مقدار بهینه) متغیر بوده و هرچه به عدد ۱ نزدیکتر باشد بیانگر آن است که مدل

www.SID.ir

Archive of SID

SWAT در منطقه مورد مطالعه برآورد بهتری داشته و کارآیی لازم را داراست. عموماً اگر شاخص نش- ساتکلیف بیشتر از ۰/۷۵ باشد؛ کارایی مدل عالی، اگر بین ۰/۷۵- ۰/۳٦ باشد رضایت‌بخش و اگر کمتر از ۰/۳٦ باشد کارآیی مدل غیرقابل‌قبول فرض می‌شود (نش- ساتکلیف، ۱۹۷۰). ضریب رگرسیون (R^2) نیز که از ۰ تا ۱ تغییر می‌کند، شاخص قدرتمندی برای بیان رابطه مناسب بین مقادیر شبیه-سازی و مشاهده‌ای است (نصیری و همکاران، ۱۳۹۹). این شاخص به‌تنهایی نمی‌تواند تطابق داده‌های محاسباتی و مشاهداتی را نشان دهد. اگر همراه با R^2، معادله خط رگرسیون (y=bx+a) بین داده‌های شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌ای نیز مدنظر قرار گیرد، تطابق این مقادیر بهتر نشان داده خواهدشد. مقادیر پیشنهادی NS در مطالعات هیدرولوژیک و فرآیندهای مربوط به انتقال آلاینده‌ها در مقیاس ماهانه، باید از ۰/۵ بزرگتر باشد تا بتوان نتایج مدل را قابل‌قبول فرض کرد که همین معیار نیز معمولاً برای ضریب همبستگی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Moriasi *et al*, 2007). علاوه بر این‌دو، از معیارهای دیگری بنام P و R- فاکتور استفاده شد. به‌لحاظ تئوری، مقادیر P -factor و R -factor، به‌ترتیب در بازه ۰ تا ۱ و ۰ تا بی‌نهایت تغییر می‌کنند. P -factor معادل ۱ و R -factor برابر با ۰، بیانگر تطابق کامل مقادیر پیش‌بینی‌شده و مشاهده‌ای است. هرچه فاکتورهای حاصله، از اعداد ۰ و ۱ فاصله داشته باشند دقت شبیه‌سازی کمتر می‌باشد.

نتایج و بحث

در این تحقیق، کاربرد عملی مدل SWAT در مطالعه رواناب، تراز آب زیرزمینی و بیلان آب مورد ارزیابی قرار گرفت. ارزیابی مدل SWAT؛ تجزیه و تحلیل حساسیت برای شناسایی پارامترها در مدل، واسنجی دبی و تغییرات تراز به‌صورت ماهانه و سالانه را شامل شد.

تجزیه- تحلیل حساسیت پارامترهای مدل SWAT

مدل SWAT یک مدل مفهومی جامع- نیمه‌توزیعی است و به پارامترهای مختلفی بستگی دارد که در مقیاس مکانی و زمانی بسیار متفاوت هستند. تجزیه- تحلیل حساسیت برای شناسایی پارامترهای مدل که بر خروجی مدل تأثیر اساسی دارند، مفید است. این امر به‌نوبه خود فقط با درنظر گرفتن پارامترهای حساس برای واسنجی، در واسنجی مدل مفید است که می‌تواند مدت زمان اجرای مدل را برای دستیابی به نتایج مناسب کاهش دهد. در نتیجه اجرای مدل و بواسطه انتخاب پارامترهای موردنظر، نتایج تجزیه- تحلیل حساسیت این پارامترها همراه با مقادیر بهینه آن‌ها در جدول شماره ۲ ارائه شد. به‌طور کلی، ۱٤ پارامتر حساس برای واسنجی مدل درنظر گرفته شد.

براساس نتایج تحلیل حساسیت، پارامترهای ضریب تعیین نفوذ به سفره آب زیرزمینی عمیق یا صعود موئینگی از سفره آب کم‌عمق (GW_REVAP)، زمان تأخیر انتقال آب از آخرین پروفیل لایه خاک به سطح آب زیرزمینی (روز) (GW_DELAY)، عمق اولیه آب در آبخوان کم‌عمق (SHALLST)، عمق اولیه آب در آبخوان عمیق (DEEPST)، مقدار نفوذ به آبخوان عمیق (RCHRG_DP)، ضریب آلفا جریان پایه (ALPHA_BF)، ظرفیت آب قابل‌دسترس خاک (SOL_AWC)، شماره منحنی رواناب SCS (CN)، متوسط بیشترین شیب (HRU_SLP)، ضریب تبخیر خاک (ESCO)، عامل حفاظت معادله جهانی فرسایش خاک (USLE_P)، ضریب‌زبری مانینگ (OV_N)، عرض نوار صافی (FILTERW) و فاکتور جبران تبخیر خاک (EPCO) حساس‌ترین پارامترهای بیلان بودند. کمترین مقدار P-value و بیشترین مقدار t- stat بیانگر حساسیت بالای پارامترهاست. براین اساس، ترتیب حساسیت پارامترها در جدول ۲ ارائه شده است. مطابق جدول ۲، مشاهده می‌شود که پارامترهای مؤثر بر منابع آب زیرزمینی (فاکتور جبران تبخیر خاک، ظرفیت آب قابل-دسترس خاک، مقدار نفوذ به آبخوان عمیق و زمان تأخیر انتقال آب از آخرین پروفیل لایه خاک به سطح آب زیرزمینی) از بیشترین حساسیت و شماره منحنی رواناب، از

www.SID.ir

Archive of SID

کمترین حساسیت در بین پارامترهای مذکور برخوردار هستند.

ارزیابی مدل SWAT در شبیه‌سازی

در مطالعه حاضر، مدل SWAT با استفاده از رواناب مشاهده‌ای و همچنین تغییرات تراز آب زیرزمینی به‌صورت ماهانه و سالانه برای دشت بهشهر- بندرگز ارزیابی شد. در گام اول، عملکرد مدل SWAT برای رواناب جریان در دوره زمانی ماهانه مورد بررسی قرار گرفت. تناسب مدل واسنجی‌شده در طول دوره واسنجی و صحت‌سنجی با استفاده از پارامترهای آماری که قبلاً بین خروجی‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده مدل شرح داده شد، ارزیابی گردید. دبی ماهانه مشاهده‌ای در برابر رواناب کل شبیه‌سازی‌شده، برای کلیه ایستگاه‌ها در شکل ۲ الی ٦ نشان داده شد. برای بررسی عملکرد مدل از ضرایب آماری مختلف (NS، R^2، P- factor و R- factor) استفاده شد. مقدار این ضرایب نیز برای کلیه ایستگاه‌ها در جدول ۳ خلاصه شد.

جدول ۲. نتایج تحلیل حساسیت پارامترها همراه با مقادیر بهینه ماهانه

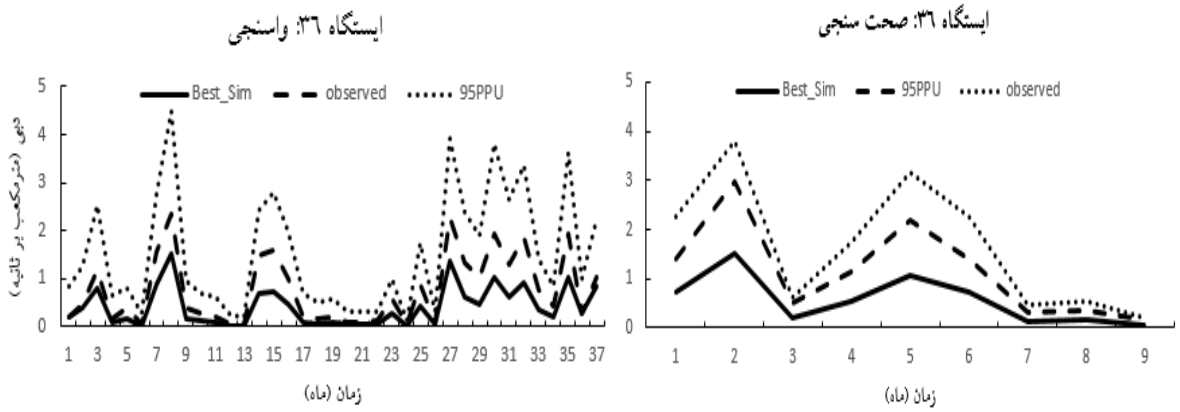
نام پارامتر	محدوده بهینه		مقدار بهینه	t- stat	p- value	ترتیب حساسیت
v__EPCO.hru	۱	۰	۰/۹۸	۲/۹۹	۰/۰۱	۱
Sol SOL_AWC._r	۰/۵۳	-۰/۰۳	۰/۲۹	۲/۰۵	۰/۰٦	۲
gw RCHRG_DP._v	۱	۰	۰/۰۲	۱/٦٦	۰/۱۲	۳
bsn DELAY._GW_v	۲۸٤/۰۵	-۱۸۲/۰۵	۲۵٦/۰۸	۱/۱۸	۰/۲٦	٤
hru _HRU_SLP._r	۰/۲	۰/۰۵	۰/۱٤	۱/۱۲	۰/۲۸	۵
mgt v__USLE_P.	۱	۰	۰/۹	۱/۰٤	۰/۳۲	٦
v__OV_N.hru	۰/٦۸	۰/۰۱	۰/۱۳	۰/۹۹	۰/۹۲	۷
v__ALPHA_BF.gw	۱	۰	۰/۱٤	۰/۲۷	۰/۷۸	۸
v__GW_REVAP.gw	۰/۲	۰	۰/۰۱	-۰/۱۱	۰/۹	۹
v__FILTERW.mgt	۱۰۰	۰	۲	-۰/۲۵	۰/۸۰	۱۰
hru ESCO._v	۱/۱۱	۰/۹۳	۱/۰٤	-۰/۳۸	۰/۷۰	۱۱
v__DEEPST.gw	۲٤۱۳/۱۵	۵۸٦/۸٤	۱۳۵۳/۹	-۱/۲۹	۰/۲۲	۱۲
r__SHALLST.gw	۵۰۰۰	۰	۱۰۰	-۱/۹٤	۰/۰۸	۱۳
mgt CN2._r	۰/۱۲۳	-۰/۲٤۳	-۰/۰۱	-۵/۵۰	۰/٦۲	۱٤

جدول ۳. نتایج مقایسه آماری دبی ماهانه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده در دوره واسنجی و صحت‌سنجی

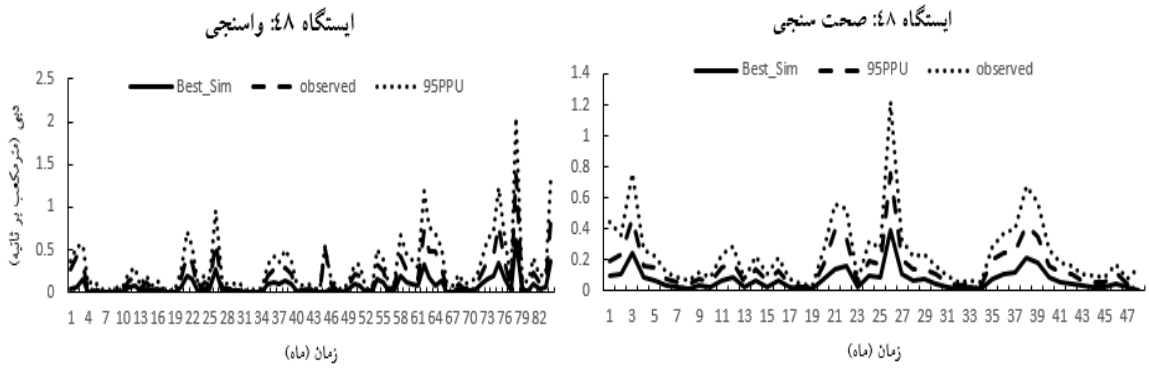
ایستگاه هیدرومتری	واسنجی				صحت‌سنجی	
	آماره‌ها				آماره‌ها	
	NS	R^2	P-factor	R-factor	NS	R^2
۳٦	۰/۵٦	۰/۷۵	۰/۷۳	۲/۳۸	۰/۵٦	۰/۷۷
٤۸	۰/٦۷	۰/۷٤	۰/۹۰	۰/۸۱	۰/۸٤	۰/۹۲
۸۸	۰/۸۳	۰/۸٤	۰/٦۹	۱/۱۲	۰/٦۵	۰/٦٦
۹۰	۰/۹۳	۱	۰/۹۵	۱/٤۰	۰/۷۳	۰/۷۳
۱۳۱	۰/۷	۰/۸٤	۰/۹٤	۰/۸۲	۰/۷٤	۰/۷٦

www.SID.ir

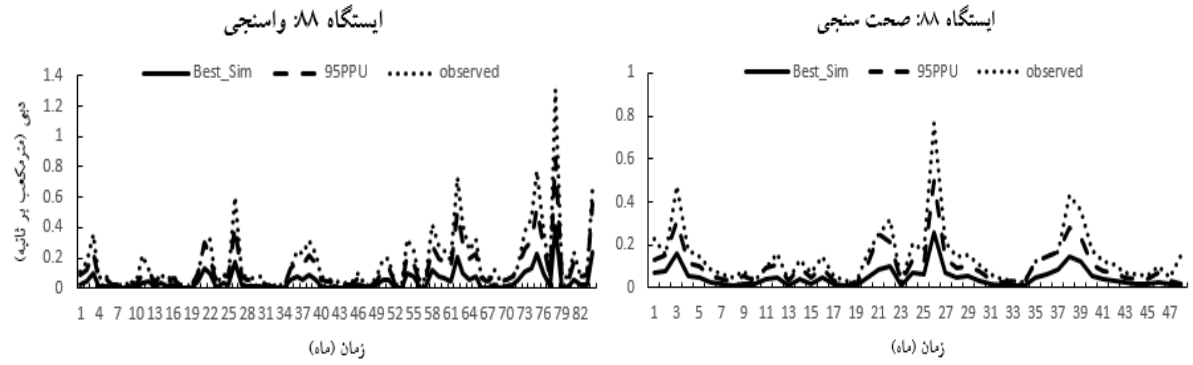
Archive of SID



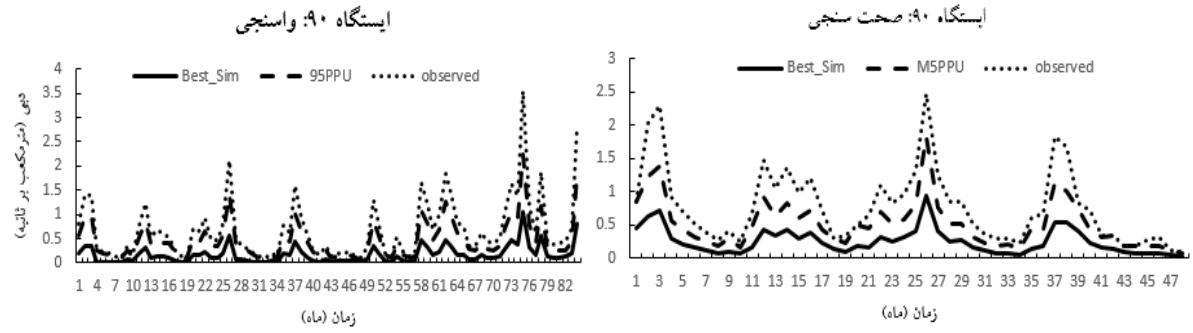
شکل ۲. نتایج واسنجی و صحت‌سنجی ایستگاه شماره ۳۶



شکل ۳. نتایج واسنجی و صحت‌سنجی ایستگاه شماره ٤٨



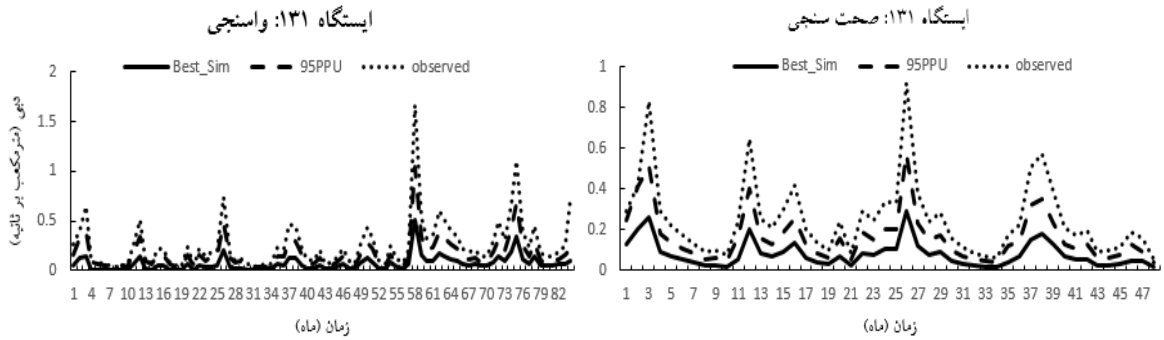
شکل ٤. نتایج واسنجی و صحت‌سنجی ایستگاه شماره ۸۸



شکل ۵. نتایج واسنجی و صحت‌سنجی ایستگاه شماره ۹۰

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ٦. نتایج واسنجی و صحت‌سنجی ایستگاه شماره ۱۳۱

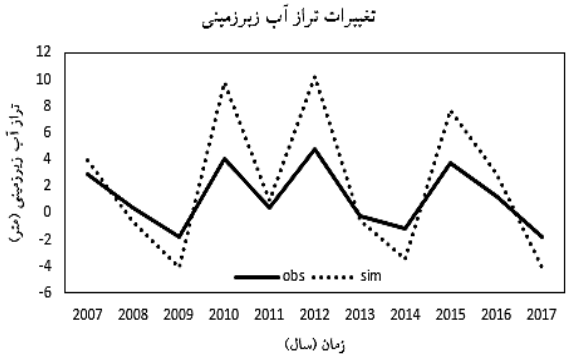
مطابق آنچه موریاسی و همکارانش (۲۰۰۷) پیشنهاد کردند (NS>50 و R^2>50)، نتایج حاصل از معیارهای ارزیابی مدل، حاکی از دقت و کارآیی بالای مدل SWAT در دشت مورد مطالعه می‌باشد. با توجه به وابستگی مدل SWAT به مدل‌های مختلف تجربی و نیمه‌تجربی مانند MUSLE و SCS- CN که مدل رواناب اوج را با دقت کمتری ارزیابی می‌کند، برخی از مقادیر اوج‌های رواناب توسط مدل SWAT به‌خوبی شبیه‌سازی نشدند. به‌عبارت دیگر، به‌جز در چند ماه که جریان حداکثر اتفاق افتاد و مدل در شبیه‌سازی این جریان‌ها به‌علت کم‌برآوردی موفق نبود؛ در اکثر ماه‌ها زمان اوج رواناب را به‌خوبی شبیه-سازی کرد. برآوردِ کم مقدار دبی که می‌تواند به‌دلیل افزایش برداشت از آب سطحی در بالادست منطقه باشد، در ایستگاه شماره ۳٦ باعث شده مقدار ضریب NS به ۰/۵ نزدیک شود؛ اما این موضوع سبب رد کارایی مدل نشد. این عدم‌انطباق بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌ای را می‌توان به ماهیت پیچیده فرآیندهای غالب هیدرولوژیکی در منطقه و فعالیت‌های تخریبی عوامل انسانی در چرخه هیدرولوژیکی دشت نسبت داد. از جمله این عوامل که در بهم‌خوردن این چرخه می‌توانند مؤثر باشند، عبارتند از برداشت‌های بی‌رویه و پنهان از منابع آب سطحی و زیرزمینی، عدم تخصیص منطقی منابع آبی به بهره‌برداران و کشاورزان منطقه، مشخص‌نبودن مقادیر دقیق آب برگشتی و غیره. همچنین، با توجه به مقدار محاسبه‌ای P-factor در تمامی ایستگاه‌ها، این مقدار بیشتر از ۰/٦ به‌دست آمد. این موضوع بیانگر آن است که بیش از ۷۵ درصد داده‌های مشاهده‌ای در باند عدم‌قطعیت ۹۵ درصد قرار گرفتند و مدل، واسنجی بسیار خوبی را مطابق این شاخص داشت. شاخص R- factor نیز که ارائه‌دهنده پهنای باند عدم‌قطعیت در واسنجی است؛ مقدار آن نسبتاً زیاد به‌دست آمد. به‌جهت اینکه مقدار این پارامتر نزدیک ۱ و گاهاً بیشتر از ۱ می‌باشد، بیانگر واسنجی مطلوب با استفاده از این شاخص است. این موضوع در تأیید یافته‌های دیگر محققین می‌باشد (Qiu *et al*, 2012; Abbaspour *et al*, 2007) و براتی و همکاران، ۱۳۹۹). براساس شاخص R^2 به‌عنوان دیگر معیار ارزیابی، نتایج حاکی از همبستگی قابل‌قبولی بین داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده است. مقدار دبی اوج مشاهده‌ای و شبیه-سازی‌شده نیز خیلی به‌یکدیگر نزدیک بود و در اکثر موارد کمتر از مقدار مشاهده‌ای برآورد شد. این موضوع با نتایج دیگر یافته‌ها مطابقت دارد (ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۷؛ نصیری و همکاران، ۱۳۹۹؛ عثمانی وهمکاران، ۱۳۹۲؛ Tibebe and Bewket, 2010). همچنین، در اکثر ماه‌ها ملاحظه شد که مقدار شبیه‌سازی‌شده کمتر از مقادیر مشاهده‌ای (کم‌برآورد) است و این امر می‌تواند به‌دلیل درنظر گرفتن میزان نفوذ در ماه‌های سرد سال باشد. این موضوع نیز در تطابق با یافته‌های اکبری و همکاران (۱۳۹۲) و ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۷) است. پس از تعیین محدوده بهینه برای پارامترهای مدل در مرحله واسنجی، بار دیگر الگوریتم sufi-2 با استفاده از همان ١٤

www.SID.ir

Archive of SID

پارامتر و در محدوده بهینه با یکبار شبیه‌سازی داده‌های مشاهده‌ای دبی، در دوره ۲۰۱٤-۲۰۱۷ توسط SWAT-CUP اقدام به صحت‌سنجی مدل شد. بررسی شاخص‌های آماری NS و R^2 در مرحله صحت‌سنجی نیز نشان داد که تطابق خوبی بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی وجود دارد. بطوری‌که ضریب R^2 بسیار بالا در هر ایستگاه، بیانگر آن بود که بین داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده همبستگی نسبتاً زیادی وجود دارد. یعنی شکل هیدورگراف در نقاط افزایش و کاهش دبی نسبتاً خوب برآورد شدند. در این تحقیق، ارزیابی ماهانه رواناب جریان، پاسخ نسبتاً خوبی از مدل را نشان داد.

در گام دوم شبیه‌سازی، پس از تطبیق مدل در منطقه با داده‌های دبی، اقدام به واسنجی و صحت‌سنجی تراز آب زیرزمینی به‌منظور بررسی دقت مدل SWAT در دشت بهشهر- بندرگز شد. در این‌مرحله با اطلاعات تراز آب زیرزمینی حاصل از تعداد ۸ چاه مشاهده‌ای، تغییرات تراز محاسبه شد (شکل ۳).

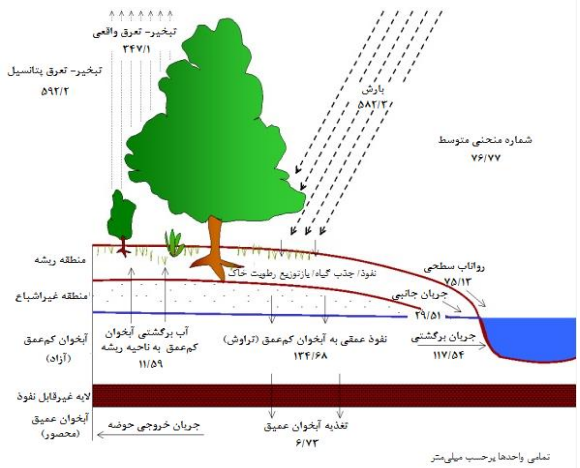


شکل ۳. تغییرات سالانه تراز آب زیرزمینی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده دشت بهشهر- بندر گز

روند شبیه‌سازی آبدهی رودخانه و تراز آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه، نه تنها منجر به تعریف پارامترهای مدل شد، بلکه بیانگر میزان تغذیه نیز می‌باشد. براساس آنچه در روش تحقیق ذکر شد، مجموعه داده‌ها از ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۷ برای مقایسه نتایج شبیه‌سازی در HRUهای تولید شده توسط مدل جهت محاسبه تغذیه (RCHG_GW) استفاده شد. با توجه به شاخص‌های ارزیابی (NS =0.81 و R^2=0.91) بین تغییرات تراز مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده، نتایج حاکی از وجود یک رابطه نسبتاً معنی‌دار بین آن‌هاست. این موضوع در تأیید تحقیقات دیگر محققین (کوچک‌زاده و نصیری‌صالح، ۱۳۹۲؛ Sun and Cornish, 2005 و Rafiei Emam *et al*, 2015) می‌باشد. برخی دیگر از محققین نیز اشاره کردند که ET برای شبیه‌سازی بهتر اجزای بیلان آب مانند تغذیه آب زیرزمینی مفید است (Immerzeel and Droogers, 2008). ضمناً با توجه به افت ۱/۸٤ متری آب زیرزمینی در دشت مورد مطالعه، مدل این مقدار را نیز حدود ۲/۳ برآورد کرده است که بیانگر دقت قابل‌قبول مدل SWAT در شبیه‌سازی کمی آب زیرزمینی است.

بیلان آبِ دشت بهشهر- بندرگز

برای ۱۳۵ زیرحوزه منطقه مورد مطالعه، میانگین بیلان آب برای کل دوره شبیه‌سازی (۲۰۰۷-۲۰۱۷) توسط مدل SWAT انجام شد (شکل ٤ و جدول ٤).



شکل ٤. متوسط مقادیر محاسبه‌ای اجزای بیلان آب توسط مدل SWAT طی دوره ۲۰۱۷-۲۰۰۵

متوسط مقادیر اجزای بیلان آب دشت بهشهر- بندرگز براساس نتایج شبیه‌سازی مدل SWAT طی دوره زمانی ۲۰۰۷-۲۰۱۷ در شکل فوق ارائه شد.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ٤. متوسط ماهانه مهمترین مؤلفه‌های بیلان آب توسط مدل SWAT در دشت بهشهر- بندرگز

ماه‌های شبیه‌سازی	بارش متوسط*	رواناب سطحی	جریان جانبی	تبخیر- تعرق واقعی	عملکرد خالص آب
ژانویه	٥١/٨٢	٦/٨٨	٣/٠٦	١٣/٠٨	٢٥/٤١
فوریه	٦٨/١٩	١٠/٥٢	٤/٦٠	١٦/٣٢	٣٣/٨٦
مارس	٦٩/٤٧	١٠/٨٢	٤/٥٠	٢٥/١٣	٤١/٥٣
آوریل	٣٠/٣٤	٢/٦٨	٢/١٥	٢٥/٥٣	٢٩/٣٠
می	١٨/٧٩	٠/٩٢	٠/٨٨	٤٠/١٣	١٨/١٥
ژوئن	٢٧/٢١	٦/١٠	٠/٨٠	٦٠/٦٥	١٣/٣٨
جولای	٢٣/٦٨	١/١٦	٠/٧١	٥٢/٣٥	٣/٥٤
آگوست	٢٨/٢٠	٠/٨٦	٠/٨٦	٣٠/١١	٢/٣٤
سپتامبر	٦٠/٤٣	٦/٠١	١/٥٦	٢٧/٢٨	٧/٩٢
اکتبر	٧٤/٤٨	١٠/٠٧	٣/٠٧	٢٦/٦٦	١٣/٧٧
نوامبر	٧١/٧٣	٩/٠٢	٣/٥٢	١٦/٥٩	١٦/٢٠
دسامبر	٥٧/٣١	٩/٩٧	٣/٧٧	١٣/٠٥	٢٣/٢٨

در این تحقیق مشخص شد که تبخیر و تعرق، مؤلفه غالب است و حدود ٦٠٪ از بارش متوسط سالانه در منطقه را تشکیل می‌دهد. همچنین، سهم رواناب جریان (رواناب سطحی+ جریان جانبی) و تغذیه به آبخوان عمیق به‌ترتیب ۱۸ و ۲۲ درصد است و پس از ورود به لایه آبدار زیرزمینی، جریان پایه را تشکیل می‌دهد. جدول ٤ نشان می‌دهد که از متوسط بارندگی سالانه (۵۸۳/۲ میلی‌متر)، حدود ۱۲/۹۰ درصد آن درمنطقه مورد مطالعه به‌عنوان رواناب سطحی جریان دارد. از تجزیه- تحلیل متوسط سالانه بیلان آب در سال‌های شبیه‌سازی مشخص شد که تقریباً همه سال‌ها، به‌استثنای سال ۲۰۱۳ و ۲۰۱۵، بیش از ۱۰٪ بارش سالانه را به‌عنوان رواناب سطحی جریان می‌دهند. این امر به معنای نیاز به اجرای روش‌های مدیریتی مناسب برای کاهش حجم رواناب با افزایش بهره‌وری آبِ آبخیز است. همچنین میزان تبخیر- تعرق ماهانه در ماه‌های خشک بیشتر از میزان بارندگی کل در آن ماه است. این امر نیز به‌دلیل این واقعیت است که تبخیر- تعرق یک فرآیند دائمی است که در صورت وجود یا عدم بارش، در طول شبانه‌روز رخ می‌دهد. آب برای تبخیر- تعرق از رطوبت خاک حاصل می‌شود. در عین حال، مدل SWAT مدلی پیوسته است که تغییر در رطوبت خاک را لحاظ می‌کند، که درنظر گرفتن محتوای رطوبت خاک روز قبلی را نیز تسهیل می‌کند. بنابراین، در طول روزِ بدون بارش، تبخیر- تعرق انجام و محتوای رطوبتِ خاک کاهش می‌یابد. براین اساس، ممکن است که در یک ماه خاص میزان بارش کمتر از تبخیر- تعرق باشد. با این‌حال، تبخیر- تعرق سالانه کمتر از میزان بارش است. نتایج خروجی حاصل از SWATCheck، بیانگر دقت و کارآیی مناسب مدل SWAT در شبیه‌سازی کمی منابع آب سطحی و زیرزمینی دشت بهشهر- بندرگز می‌باشد.

نتیجه‌گیری

براساس نتایج مدل‌سازی SWAT، تجزیه- تحلیل حساسیت نشان داد که پارامترهای ضریب تعیین نفوذ به سفره آب زیرزمینی عمیق یا صعود موئینگی از سفره آب کم‌عمق (GW_REVAP)، زمان تأخیر انتقال آب از آخرین پروفیل لایه خاک به سطح آب زیرزمینی (روز) (GW_DELAY)، عمق اولیه آب در آبخوان کم‌عمق (SHALLST)، عمق اولیه آب در آبخوان عمیق (DEEPST)، مقدار نفوذ به آبخوان عمیق (RCHRG_ DP)، ضریب آلفا جریان پایه (ALPHA_BF)، ظرفیت آب قابل‌دسترس خاک (SOL_AWC)، شماره منحنی رواناب SCS (CN)، متوسط بیشترین شیب (HRU_SLP)، ضریب تبخیر

www.SID.ir

Archive of SID

خاک (ESCO)، عامل حفاظت معادله جهانی فرسایش خاک (USLE_P)، ضریب زبری مانینگ (OV_N)، عرض نوار صافی (FILTERW) و فاکتور جبران تبخیر خاک (EPCO) حساسترین پارامترها برای کاربرد مدل SWAT در دشت بهشهر- بندرگز بودند. در شبیه‌سازی ماهانه جریان و تراز آب زیرزمینی، نتایج قابل قبول بود. همچنین مطالعه بیلان آب دشت نشان داد که مؤلفه تبخیر- تعرق، غالب‌تر است و حدود ٦٠٪ از میزان بارشِ سالانه متوسط در منطقه را تشکیل می‌دهد. به‌همین ترتیب، رواناب جریان (رواناب سطحی+ جریان جانبی) ٪۱۸ و تغذیه به آبخوان عمیق ۲۲٪ است. با توجه به نتایج واسنجی و صحت‌سنجی، نتیجه‌گیری می‌شود که مدل SWAT به‌طور دقیق قادر به شبیه‌سازی کمی منابع آب سطحی و زیرزمینی در دشت مورد مطالعه است. در بررسی مؤلفه‌های بیلان آب نیز کمترین سهم بیلان، مربوط به رواناب جریان است که بایستی بر این اساس، میزان نفوذ به آبخوان و حجم برداشتی از منابع زیرزمینی مدیریت و کنترل گردد. بنابراین استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT، به‌دلیل شبیه‌سازی گسترده و پیچیده با استراتژی‌های مختلف مدیریتی بدون صرف زمان و هزینه زیاد در مقایسه با دیگر شیوه‌های مدیریتی، می‌تواند جزء راهکارهای ممکن برای مدیریت پایدار منابع آب در سطح دشت‌های ممنوعه محسوب شود. در این راستا، نتایج این تحقیق را می‌توان برای تدوین سیاست‌های تصمیم‌گیری به‌منظور استفاده بهینه از منابع آب در قالب تدوین و طراحی سناریوهای مختلف مدیریتی به‌کار برد. ضمناً برآورد زمانی و مکانی تغذیه آب زیرزمینی می‌تواند اطلاعات دقیقی را برای تصمیم‌گیرندگان و ذینفعان فراهم کند تا تغذیه آب‌های زیرزمینی را برای توسعه پایدار تنظیم کنند.

منابع مورد استفاده

ابراهیمی، پ.، سلیمی‌کوچی، س. و محسنی‌ساروی، م. ۱۳۹۷. واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب (مطالعه موردی؛ آبخیز نکا). نشریه علمی- پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۰ (۳): ۲۷۹-۲٦٦.

اکبری، ح. ۱۳۸۹. شبیه‌سازی جریان روزانه چهل‌چای استان گلستان با استفاده از مدل SWAT. پایان‌نامه کارشناسی ارشد گروه آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع‌طبیعی گرگان، ۱۲۰ ص.

امینی، م.ا.، ترکان، غ.، اسلامیان، س.س.، زارعیان، م.ج. و بسالت‌پور، ع.ا. ۱۳۹۷. ارزیابی مدل هیدرولوژیک SWAT در شبیه‌سازی بیلان آب در حوضه‌های آبریز مناطق نیمه‌خشک (مطالعه موردی: حوضه آبریز زاینده‌رود). نشریه علمی آب و خاک، ۳۲ (۵): ۱۰۲۹-۸٤۹

براتی ف.، حسینی، م.، صارمی، ع. و مختاری، ۱. ۱۳۹۹. شبیه‌سازی بیلان هیدرولوژیک آبخیز اسکندری با استفاده از مدل SWAT و الگوریتم SUFI2. نشریه علمی- پژوهشی علوم و مهندسی آبخیزدری ایران، ٤ (٤٨): ۹۰-۱۰۰.

ذهبیون، ب.، گودرزی، م.ر. و مساح‌بوانی، ع. ۱۳۸۹. کاربرد مدل SWAT در تخمین رواناب حوضه در دوره‌های آتی تحت تأثیر تغییر اقلیم. پژوهش‌های اقلیم شناسی، ۱ (۳-٤): ٤٥-٦۰.

رضاپور، آ. و حسینی، س.م. ۱۳۹۸. تعیین شاخص‌های مرتبط با صفحه‌های منابع مصارف و برداشت در چارچوب حسابداری آب با استفاده از مدل SWAT (مطالعه موردی: حوضه آبریز فریزی). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۰۹ ص.

شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان مازندران. ۱۳۹۹. ارزیابی منابع آب، گزارش بیلان منابع آب دشت بهشهر- بندرگز، ۹۵ ص.

صالح، ا.، کاویان، ع.، جعفریان، ز. و احمدی، ر. ۱۳۹۵. برآورد سرعت نفوذ نهایی خاک با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی فازی، روش نرو- فازی و نظام استنتاج فازی (دشت بهشهر- گلوگاه). مجله تحقیقات کاربردی خاک، ٤ (۲): ٤۷-٥۹.

عارفی‌اصل، ا.، نجفی‌نژاد، ع.، کیانی، ف. و سلمان‌ماهینی، ع. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی رواناب و رسوب با استفاده از مدل SWAT در آبخیز چهل-چای استان گلستان. نشریه مرتع و آبخیزداری، ٦٦ (۳): ٤۳۳-٤٤٦.

www.SID.ir

Archive of SID

عثمانی، ه.، معتمدوزیری، ب. و معینی، ا. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی دبی، واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT (مطالعه موردی: حوضه بالادست سد لتیان تهران). مهندسی و مدیریت آبخیز، ۵ (۲): ۱۴۳-۱۳٤.

علی‌پور، ا.، حسنی، خ. و لگزیان، ر. ۱۳۹۵. بررسی طرح احیاء و تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی- دشت ممنوعه نیشابور. دومین کنگره ملی آبیاری و زهکشی ایران، ٤-۲ شهریور، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۱ ص.

فلاح، س.، قبادی‌نیا، م.، شکرگزار دارابی، م. و قربانی جلگهکی، ش. ۱۳۹۱. بررسی پایداری منابع آب زیرزمینی جلگه داراب فارس. مجله پژوهش آب در کشاورزی، ۲٦ (۲): ۱٦۱-۱۷۲.

کاویان، ع.، بهرامی، م. و روحانی، ح. ۱۳۹۳. ارزیابی کارآیی مدل SWAT در تخمین رواناب سطحی آبخیز کچیک استان گلستان. پژوهش-های آبخیزداری، ۲۷ (۲): ۲۲-۳۲.

کریمی‌راد، ا.، ابراهیمی، ک. و عراقی‌نژاد، ش. ۱۳۹۸. ارزیابی پایداری توسعه آب زیرزمینی در سفره چندلایه (مطالعه موردی؛ آبخوان استان گلستان). نشریه علمی- پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، ۳٦ (۹): ۱٤٦-۱۳۳.

کوچک‌زاده، م.ح. و نصیری‌صالح، ف. ۱۳۹۲. ارزیابی کارایی مدل عددی SWAT در برآورد تغذیه منابع آب زیرزمینی (مطالعه موردی؛ آبخوان دشت سیلاخور استان لرستان). دوازدهمین همایش ملی آبیاری و کاهش تبخیر، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۸ ص.

ناصری، ا.، عباسی، ف. و اکبری، م. ۱۳۹٦. برآورد آب مصرفی در بخش کشاورزی به روش بیلان آب. مجله تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی، ٦۸ (۱۸): ۱۷-۳۲.

نصیری، ش.، انصاری، ح. و ضیائی، ع.ن. ۱۳۹۹. شبیه‌سازی جریان رودخانه حوضه آبریز سملقان با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT. مجله مهندسی منابع آب، ۱۳ (۲): ۳۹-٥٦.

وزارت جهاد کشاورزی. ۱۳۹۲. آمارنامه زراعی و باغی سال ۱۳۸۷، انتشارات معاونت برنامه‌ریزی و اقتصادی، مرکز فناوری اطلاعات و ارتباطات، جلد اول و سوم، ۱۰۳ ص.

Abbaspour, K.C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H. and Klove, B. 2015. Continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. Journal of Hydrology, 524: 33–752.

Abbaspour, K.C., Yang. J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J. and Srinivasan, R. 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. Journal of Hydrology, 333 (2-4): 413–430.

AQUASTAT, FAO. 2020. <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/water_res/index.stm>.

Arnold, J.G., Moriasi, D.N., Gassman, P.W., Abbaspour, K.C., White, M.J., Srinivasan, R., Santhi, C., van Harmel, R.D., Van Griensven, A., Van Liew, M.W., Kannan, N. and Jha, M.K. 2012. SWAT: model use, calibration, and validation. Trans. ASABE, 55 (4): 1491–1508.

Bailey, R.T., Wible, T.C., Arabi, M., Records, R.M. and Ditty, J. 2016. Assessing regional-scale spatio-temporal patterns of groundwater–surface water interactions using a coupled SWAT-MODFLOW model. Hydrology. Process, 30: 4420–4433.

Barthel, R., Reichenau, T.G., Krimly, T.D., Schneider, K. and Mauser, W. 2012. Integrated modeling of global change impacts on agriculture and groundwater resources. Water Resour Manag, 26:1929–1951. Doi: 10.1007/s11269-012-0001-9.

Birhanu, B.Z., Traoré, K., Gumma, M.K., Badolo, F., Tabo, R. and Whitbread, A.M. 2019. A watershed approach to managing rainfed agriculture in the semiarid region of southern Mali: integrated research on water and land use. Environment, Development and Sustainability, 21: 2459–2485.

Damkjaer, S. and Taylor, R. 2017. The measurement of water scarcity: Defining a meaningful indicator. Ambio, 46: 513–531.

De Fraiture, C. and Wichelns, D. 2010. Satisfying future water demands for agriculture. Agricultural Water Management, 97: 502–511.

Delavar, M., Morid, S., Morid, R., Farokhnia, A., Babaeian, F., Srinivasan, R. and Karimi, P. 2020. Basin-wide water accounting based on modified SWAT model and WA+ framework for better policy making. Journal of Hydrology, 585: 124762, 16 pp.

Elangovan, K. and Selva kumar, P. 2018. Site Selection for Rainwater Harvesting Structures Using GIS for the Augmentation of Groundwater. Journal of Ecology & Natural Resources, 2: 1-5.

www.SID.ir

Archive of SID

Finch, J.W. 1998. Estimating direct groundwater recharge using a simple water balance model—sensitivity to land surface parameters. J Hydrol, 211:112–125.

Ghoraba, S.M. 2015. Hydrological modeling of the Simly Dam watershed (Pakistan) using GIS and SWAT model. Alexandria Engineering Journal, 54(3): 583–594.

Githui, F., Selle, B. and Thayalakumaran, T. 2012. Recharge estimation using remotely sensed evapotranspiration in an irrigated catchment in southeast Australia. Hydrol Process, 26(9): 1379–1389.

Guzha, A.C. and Hardy, T.B. 2010. Application of the Distributed Hydrological Model, TOPNET, to the big darby Creek watershed, Ohio, USA, Water Resour Manage, 24: 979-1003.

Guzman, J.A., Moriasi, D.N., Gowda, P.H., Steiner, J.L., Starks, P.J., Arnold, J.G. and Srinivasan, R. 2015. A model integration framework for linking SWAT and MODFLOW. Environmental Modelling and Software, 73: 103-116.

Harbaug, A.W. 2005. MODFLOW-2005. The U.S. Geological Survey modular groundwater model-the ground-water flow process. USGS Techniques and Methods: 6-A16.

Hargreaves, G. and Samani, Z.A. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. Appl Eng Agric, 1: 96–99.

Harmel, R.D., Van Griensven, A., Van Liew, M.W., Kannan, N. and Jha, M.K. 2012. SWAT: model use, calibration, and validation. Trans. ASABE, 55 (4): 1491–1508.

Himanshu, S.k., Pandey, A. and Shrestha, P. 2017. Application of SWAT in an Indian river basin for modeling runoff, sediment and water balance. Environmental Earth Sciences, 76(3): 1-18.

Immerzeel, W.W. and Droogers, P. 2008. Calibration of a distributed hydrological model based on satellite evapotranspiration. J Hydrol, 349:411–424

Jasodani, K.P. and Lodha, P.P. 2020. SWAT Hydrological Model for Watershed Management in Watrak River Basin. Gedrag and Organizate Review, 33(2): 1552-1558.

Jin, G., Shimizu, Y., Onodera, S., Saito, M. and Matsumori, K. 2015. Evaluation of drought impact on groundwater recharge rate using SWAT and Hydrus models on an agricultural island in western Japan. International Association of Hydrological Sciences, 371: 143–148.

Kim, N.W., Chung, I.M., Won, Y.S. and Arnold, J.G. 2008. Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model. J. Hydrol, 356: 1–16.

Markstrom, S.L., Niswonger, R.G., Regan, R.S., Prudi, D.E. and Barlow, P.M. 2008. GSFLOW-Coupled Ground-water and Surface-water FLOW Model Based on the Integration of the Precipitation-runoff Modeling System (PRMS) and the Modular Ground-water Flow Model (MODFLOW-2005). U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-D1, 240 pp.

Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D. And Veith, T.L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE, 50 (3): 885-900.

Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. 1970. River flow forecasting though conceptual models. Part 1-A discussion of principles. Journal of hydrology, 10: 282-290.

Nasiri, Sh., Ansari, H. and Ziaei, A.N. 2020. Simulation of water balance equation components using SWAT model in Samalqan Watershed (Iran) Arabian Journal of Geosciences, 421 (13): 1-15.

Neitsch, S.L., Arnold J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R. and King, K.W. 2011. Soil and water assessment tool. Theoretical documentation. TWRI TR-191. Texas Water Resources Institute, College Station, Texas.

Oeurng, C., Sauvage, S. and Sanchez-Perez, J. 2011. Assessment of hydrology, sediment and particulate organic carbon yield in a large agricultural catchment using the SWAT model. J Hydrol, 401:145–153

Qiu, L.J., Zheng. F.L. and Yin, R.S.2012. SWAT-based runoff and sediment simulation in a small watershed, the loessial hilly-gullied region of China: capabilities and challenges. Int J Sediment Res, 27(2):226–234.

Rafiei Emam, A., Kappas, M., Akhavan, S., Hosseini, S.Z. and Abbaspour, K.C. 2015. Estimation of groundwater recharge and its relation to land degradation: case study of a semi-arid river basin in Iran Environment Earth Science, 74: 6791–6803.

Sun, H. and Cornish, P.S. 2005. Estimating shallow groundwater recharge in the headwaters of the Liverpool Plains using SWAT. Hydrol Process, 19(3): 795–807.

Tibebe, D. and Bewket, W. 2010. Surface runoff and soil erosion estimation using the SWAT mode in the Kelata watershed, Ethiopia. Land Degradation and Development Wiley Library, 22(6): 551-564.

Velasco-Muñoz, J.F., Aznar-Sánchez, J.A., Batlles-delaFuente, A. and Fidelibus, M.D. 2019. Rainwater Harvesting for Agricultural Irrigation: An Analysis of Global Research. Water, 11(7): 1-18.

Wang, O., Ma, Z., Ma, Q., Liu, M., Yuan, X., Mu, R., Zuo, J., Zhang, J. and Wang, S.H. 2019. Comprehensive evaluation and optimization of agricultural system: An emergy approach. Ecological Indicators, 107: 1-8.

Wu, W. and Ma, B. 2015. Integrated nutrient management (INM) for sustaining crop productivity and reducing environmental impact: A review. Science of the Total Environment, 512: 415–427.

www.SID.ir

Archive of SID

ISSN 2251-7480

Quantitative simulation of surface water and groundwater resources in Behshahr - Bandar-e-Gaz Plain using SWAT model

Behrooz Mohseni[1], Kaka Shahedi[2]*, Mahmoud Habibnejhad-Roshan[3] and Abdullah Darzi-Naftchali[4]

1) Ph.D Student of Watershed management Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.
2*) Associate Professor, Department of Watershed management, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.
* Corresponding Author Email: k.shahedi@sanru.ac.ir.
3) Professor, Department of Watershed management, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.
4) Associate Professor, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.

Received: 22-01-2021 Accepted: 03-07-2021

Abstract

Optimal management of water resources in a plain with land uses requires proper prediction of water resources response using efficient models. In this research, Soil and Water Assessment Tools (SWAT) model was used to simulate surface and groundwater resources in Behshahr - Bandar-e-Gaz Plain. After analysis the sensitivity, calibration and validation of the model was performed based on river flow data of 2007- 2013 and 2014- 2017, respectively. Groundwater table simulation was done by simulating the recharge rate per hydrological response unit (HRU). The results of sensitivity analysis showed that the parameters GW_REVAP, GW_DELAY, SHALLST, DEEPST, RCHRG_ DP, ALPHA_BF, SOL_AWC, CN, HRU_SLP, ESCO, USLE_P, OV_N, FILTERW and EPCO were the most sensitive parameters. In order to evaluate of the model, the performance criteria of Nash- Sutcliffe (NS) and Correlation coefficient (R^2) were used. In the calibration stage, these coefficients ranged from 0.56 to 0.93 and 0.74 to 1.00, respectively, and in the validation process were in the range of 0.56 to 0.84 and 0.66 to 0.92, respectively, indicating the acceptable accuracy of the model in river flow simulation. Comparing the observed and simulated water table depths, NS (0.81) and R^2 (0.91) coefficients indicated the capability of the model to simulate groundwater level. According to the results of the water balance analysis, the most of the total water input to the plain, it's 60% was used for evapotranspiration and it's small parts as 18% and 22% allocetaed to surface runoff and infiltration, respectively.

Keywords: Sensitivity Analysis, Water Balance, HRU, Infiltration.

www.SID.ir