



Planning the Optimum Crop Pattern Considering Surface and Groundwater Resources Interaction by Coupling SWAT, MODFLOW and PSO

F. Akbari¹, M. Shourian^{2*}, and A. Moridi³

Abstract

In arid regions, excessive use without proper management put water resources under immense pressure and multiple stresses. Finding a good strategy for water resources management is essential to preserve sustainability in such regions. This study aimed at optimizing the water use for the agricultural crops in the Eshtehard watershed in Iran, where the aquifer is a strategic resource for irrigated agriculture and is facing intensive drawdown due to over extraction. A hydro-agronomic simulation-optimization approach is used for surface and groundwater modeling in which the agricultural production and water level variation are simulated by linking SWAT and MODFLOW and the optimal crops pattern is searched for by the PSO algorithm. The crops' area and their irrigation water consumption are the decision variables with the objective of maximizing the net benefit gained from the crops' yield while the groundwater drawdown is limited to a pre-defined stability level. Results showed that in the optimum state, irreparable damage to groundwater depletion is reduced. To this result, a part of area cultivated by winter wheat and cotton must be replaced by winter barley which results in reduction of the groundwater extraction for winter wheat, winter barley and cotton by 45%, 7%, and 10%, respectively. Also, after the application of these changes, the profit from winter wheat and cotton crops decreased by 35% and 13%, respectively, and that for barley increased by 49%, which generally increased the production profit of irrigation products by 4%.

Keywords: Watershed Management; Crop Pattern Plannig; Groundwater Stability; Hydro-Agronomic Modeling.

Received: December 21, 2020

Accepted: April 17, 2021

برنامه‌ریزی الگوی کشت بهینه کشاورزی با لحاظ اندركنش منابع آب سطحی و زیرزمینی با استفاده از ترکیب مدل‌های SWAT و MODFLOW و الگوریتم ازدحام دسته ذرات (PSO)

فاطمه اکبری^۱، مجتبی شوریان^{۲*} و علی مریدی^۳

چکیده

در کشورهای دارای اقلیم خشک نظیر ایران، منابع آب سطحی و زیرزمینی به علت استفاده بیش از حد و فاقد مدیریت بهم پیوسته تحت فشار و تنش قرار دارد. بررسی تعاملات بین آب سطحی و زیرزمینی و پیدا کردن یک استراتژی مناسب برای مدیریت منابع آب، برای حفظ و پایداری این منابع ضروری می‌باشد. هدف مطالعه حاضر، بهینه‌سازی تخصیص منابع آب به محصولات کشاورزی در دشت اشتهارد واقع در استان البرز است که در آن آبخوان، یک منبع مهم برای زراعت آبی می‌باشد و به علت برداشت بیش از حد از آبخوان، افت شدید سطح آب آبخوان به مسأله بحرانی در منطقه تبدیل شده است. به این منظور، با استفاده از یک رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی تعاملات آب سطحی و زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفته که در آن با استفاده از مدل‌های SWAT و MODFLOW به ترتیب حوضه آبریز و عملکرد محصولات کشاورزی و رفتار آبخوان و سطح آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده و الگوی کشت بهینه کشاورزی در دشت با استفاده از الگوریتم PSO به دست آمده است. متغیرهای تصمیم در مسأله بهینه‌سازی، سطح زیر کشت محصولات آبی و میزان آبیاری هر یک از محصولات است و تابع هدف مسأله، بیشینه‌سازی سود به دست آمده از تولیدات محصولات زراعی است. محدودیت اصلی حاکم بر مسأله نیز این است که سطح آب زیرزمینی از سطح پایداری آبخوان نیابستی پایین‌تر رود. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در شرایط بهینه، میزان افت سطح آب زیرزمینی کاهش یافته و آبخوان با بحران کمتری در طول دوره بهره‌برداری مواجه شده است. برای نیل به این هدف، در جواب بهینه بخشی از سطح زیر کشت گندم زمستانه و پنبه با جوی زمستانه جایگزین شده و مقدار آبیاری بهینه با کاهش ۴۵٪، ۷٪ و ۱۰٪ به ترتیب برای گندم زمستانه، جوی زمستانه و پنبه باعث کاهش برداشت آب از آبخوان شده است. پس از اعمال این تغییرات سود حاصل از عملکرد محصول گندم زمستانه و پنبه به ترتیب ۳۵٪ و ۱۳٪ کاهش و جو ۴۹٪ افزایش یافته که به طور کلی منجر به افزایش سود تولید محصولات آبیاری به میزان ۴٪ شده است.

کلمات کلیدی: مدیریت حوضه آبریز، برنامه‌ریزی الگوی کشت، پایداری آبخوان، مدل‌سازی آب و کشاورزی.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۱۰/۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱/۲۸

1- M.Sc. Graduate, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University.

2- Assistant Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University. Email: m_shourian@sbu.ac.ir

3- Assistant Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University.

*- Corresponding Author

Dor: [20.1001.1.17352347.1400.17.1.8.9](https://doi.org/10.1001.1.17352347.1400.17.1.8.9)

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی.

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی.

۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۴۰۰ امکانپذیر است.

سطحی و زیرزمینی بود و حفظ تعادل آب زیرزمینی به عنوان عامل محدود کننده بر روی مدل اعمال شد که مشکلات افت سطح آب زیرزمینی را کاهش دهد (Singh & Panda, 2012). در تحقیقی دیگر، از ترکیب مدل بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات و شبیه‌سازی آب زیرزمینی در MODFLOW به منظور مدیریت پایدار آبخوان دشت اردبیل استفاده شد. مدل بهینه، میزان تخصیص بهینه آب از آبخوان را برای هر ناحیه با در نظرگیری کنترل میزان افت آبخوان مشخص کرد (Najjarghabel et al., 2019). در مطالعه‌ای دیگر، از مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی با استفاده از مدل عددی Sutra و الگوریتم بهینه‌سازی فراکوشی جامعه مورچه‌ها برای آبخوان ساحلی دشت عجبشیر استفاده شده است. هدف این مسأله، حداکثر کردن برداشت از آبخوان به همراه عامل محدود کننده کنترل پیشروی آب شور (جلوگیری از بدتر شدن وضعیت شوری در نقاط کنترلی) بوده است (Mostafaei-avandari & Ketabchi, 2019). در مطالعه‌ای دیگر، با استفاده از مدل MODFLOW و الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچه‌گان، برنامه مدیریتی ۱۰ ساله برای آبخوان نمدان در استان فارس در نظر گرفته شد. در مدل تلفیقی شبیه‌سازی- بهینه‌سازی، سه شاخص پایداری، پرشدگی و احیا آبخوان برای مدیریت منابع آب زیرزمینی محدوده مورد مطالعه در نظر گرفته شد که منتج به افزایش ۳ تا ۱۰ متر تراز آبخوان شد (Saghi-jadid & Ketabchi, 2019).

بررسی سوابق مطالعاتی داخلی و خارجی نشان می‌دهد که شبیه‌سازی آب‌های سطحی و آب‌های زیرزمینی به صورت توأم و اعمال بهینه‌سازی بر آن برای مدیریت رفتار آبخوان، در مطالعات اندکی مورد بررسی قرار گرفته است، در حالی که یکی از مسائل بسیار مهم در کل دنیا در زمینه مهندسی و مدیریت آب می‌باشد. در این زمینه، در مطالعه جدیدی در سال ۲۰۲۰، مدل یکپارچه سطحی و زیرزمینی WEAP-MODFLOW توسعه داده شد که با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی NSGA-II، درصد تخصیص آبیاری بهینه از منبع آب سطحی و زیرزمینی در کشاورزی برای دشت لور در اندیشک، برای فصل تر و خشک با توجه به کنترل افت سطح آب زیرزمینی، تعیین شد (Zeinali et al., 2020). به این ترتیب، با مشارکت مستقیم اهداف و قیودات مدیریتی در فرآیند مدل‌سازی، مدل‌های ترکیبی شبیه‌سازی- بهینه‌سازی آب سطحی و آبخوان می‌تواند بهترین استراتژی مدیریت توأم آب سطحی و زیرزمینی را ارائه دهد و به میزان قابل ملاحظه‌ای باعث افزایش کارایی مدل‌های شبیه‌سازی شود. به عبارت دیگر، بر خلاف مدل‌های شبیه‌سازی، مدل‌های بهینه‌سازی با در نظر گرفتن تمامی قیود، یک تصمیم بهینه را برای بهره‌برداری از سیستم، تعیین و مشخص می‌سازند تا اهدافی را حداقل و حداکثر نمایند.

درک کامل از هیدرولوژی حوضه آبریز، برای مدیریت منابع آب مورد نیاز است. تعامل آب سطحی و زیرزمینی، اغلب یکی از چالش‌های مدل‌سازی بوده است. موضوع قابل اهمیت در خصوص منابع آب سطحی و زیرزمینی خصوصاً در مناطق نیمه خشک، توجه به مدیریت توأم این دو منبع است؛ چرا که مدیریت یا استفاده از هر منبع، اغلب بر روی مدیریت کمی و کیفی منبع دیگر تأثیر می‌گذارد (Bailey & Arabi, 2016). در طول سال‌های خشک و فصول کم آب، برداشت بیش از حد آب زیرزمینی، باعث افت سطح آب در آبخوان می‌شود. چرخه مورد نیاز برای بازگرداندن آب به آبخوان، نیازمند زمان طولانی است و آب زیرزمینی از دست رفته برای استفاده مجدد در آینده نزدیک، قادر به جایگزینی نمی‌باشد. به همین دلیل، امکان رخ دادن پدیده فرونشست زمین بالا رفته که از بین رفتن توانایی زمین‌های کشاورزی در تولید محصول، یکی از عواقب آن است. بنابراین، درک رفتار سیستم آبخوان، به ویژه در مناطق دارای آب محدود و در مناطق تحت فشارهای تغییر اقلیمی، ضروری است (Singh, 2014). در کنار عدم قطعیت‌های موجود در شرایط آب و هوا در آینده، با توجه به جمعیت روزافزون جهان، نیاز آبی و اثرات زیست محیطی، اجتماعی و اقتصادی، محدود کردن استفاده از منابع آب و ارائه راهکارهای بهینه برای مدیریت منابع آب ضروری شده است.

در دهه گذشته، دقت مدل‌های هیدرولوژیکی در مدل‌سازی آب سطحی و زیرزمینی، افزایش یافته است. بعضی از مدل‌ها که یک درک جامع و منسجم بر مدیریت همزمان از چرخه آب سطحی و آب زیرزمینی دارند شامل MODSIM-MODFLOW (Fredericks et al., 1998)، HSPF-MODFLOW (Ross et al., 2005)، ParFlow (Weill et al., 2011)، CATHY (Kollet & Maxwell, 2006)، GSFLOW (Wu et al., 2015) و WEAP-MODFLOW (Čerkasova et al., 2018) و مدل SWATMOD به عنوان نمونه جدیدی از شبیه‌سازی توأم آب سطحی و زیرزمینی است که از اتصال دو مدل SWAT و MODFLOW (Guzman et al., 2015; Bailey & Arabi, 2016) تهیه شده است. همچنین رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی توأم منابع آب سطحی و زیرزمینی و مدیریت مزارع آبی در برخی از تحقیقات در داخل و خارج از کشور مورد ارزیابی قرار گرفته است. در تحقیقی، از مدل برنامه‌ریزی خطی برای بهینه‌سازی تخصیص منابع آب به منظور به حداکثر رساندن بازده خالص سالانه از یک منطقه کشاورزی واقع در ایالت هاریانا هند استفاده شد. هدف مدل، ایجاد بازده بیشتر در عملکرد کشت منطقه بر اساس ایجاد کیفیت بهتر در آب آبیاری با ترکیب کردن دو منبع آب

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- محدوده مطالعاتی

دشت اشتهارد با مساحت ۲۴۵ کیلومتر مربع در حوضه آبریز دریاچه نمک در ایران واقع شده است. در این منطقه، تنها رودخانه شور جریان دارد که از غرب به شرق ادامه دارد و آب آن شور است و برای شرب و کشاورزی مناسب نیست. موقعیت حوضه در شکل ۱ نمایش داده شده است. ایستگاه هیدرومتری آصفالدوله که در نقطه خروجی از دشت اشتهارد واقع شده است به عنوان خروجی حوضه در نظر گرفته شده است. متوسط جریان سالانه در این ایستگاه ۰/۷۳۲ مترمکعب بر ثانیه است که معادل ۲۵ میلیون متر مکعب در سال است. متوسط دمای سالانه در حوضه ۱۴ درجه سانتی‌گراد و بارش سالانه ۲۱۴/۸ میلی‌متر است. کاربری اراضی غالب در حوضه بر اساس اطلاعات سازمان جهاد کشاورزی استان البرز شامل مرتع (۵۸٪)، زمین کشاورزی (۲۴٪)، زمین بایر و یا پوشش گیاهی ضعیف (۱۶٪) و اراضی شهری (۲٪) است. محصولات غالب آبی، گندم زمستانه، جوی زمستانه و پنبه است که تقویم زراعی محصولات در جدول ۱ نمایش داده شده است. بر اساس مطالعات بهنگام‌سازی طرح جامع آب کشور برای حوضه آبریز دریاچه نمک، تقریباً کل آب مصرفی در دشت اشتهارد از منابع آب زیرزمینی استفاده شده است که ۱٪ برای شرب، ۲٪ برای صنعت و ۹۷٪ برای اهداف کشاورزی استفاده می‌شود. با توجه به برداشت آب زیرزمینی برای آبیاری محصولات زراعی آبی و تأثیر جریان آب برگشتی در تغذیه آبخوان، برای شبیه‌سازی آب سطحی و آب زیرزمینی و تعامل آن‌ها در حوضه، مدلی با توانایی بالا مورد نیاز است. برای این منظور، از مدل SWAT و مدل شبیه‌سازی آبخوان MODFLOW استفاده گردیده است.

هدف اصلی از این مطالعه تحلیل مکانی-زمانی تعامل آب سطحی و زیرزمینی برای بررسی رفتار آبخوان بر اساس تغییر کاربری اراضی به همراه تغییر در میزان برداشت از آبخوان برای آبیاری است که بررسی به صورت همزمان این دو مشخصه، تفاوت این تحقیق با دیگر تحقیقات پیشین را ایجاد کرده است. در این راستا، یک مدل جامع در شبیه‌سازی جریان سطحی، مدیریت کشاورزی، برداشت از آبخوان و ارتفاع سطح آب زیرزمینی با در نظر گرفتن متغیرهای هواشناسی با دقت در سطح قابل قبولی مورد نیاز است. بر اساس مطالعات انجام شده، مدل‌های SWAT و MODFLOW به دلیل توانایی خود در محاسبات متغیرهای اصلی مورد نیاز مرتبط با هر دو منبع آب سطحی و زیرزمینی (Bailey et al., 2016; Ehtiat & Mousavi, 2018; Stefania et al., 2018) به ترتیب برای شبیه‌سازی آب سطحی و زیرزمینی و مدیریت منابع آب انتخاب شده است. به علت موقعیت مکانی متفاوت واحدهای محاسبه کننده در دو مدل، باید موقعیت مکانی مشترک بین زیرحوضه‌ها و واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (HRU) در مدل SWAT و سلول‌های MODFLOW ایجاد شود تا بتوان اتصال بین دو مدل را فراهم کرد. سپس الگوریتم PSO برای فرایند بهینه‌سازی به مدل SWAT-MODFLOW متصل گردیده تا الگوی کشت بهینه کشاورزی در دشت اشتهارد به دست آید. لازم به ذکر است که در این مطالعه از مدل در دسترس و متصل شده SWAT-MODFLOW (Bailey & Arabi, 2016) استفاده نشده است، زیرا این مدل از آبیاری خودکار استفاده می‌کند. بنابراین، مدل‌های سطحی و زیرزمینی به صورت مجزا ساخته شده و از طریق برنامه‌نویسی در محیط نرم‌افزار MATLAB به یکدیگر متصل گردیده است.

Table 1- Irrigation calendar for three dominant irrigated crops of wheat, barley, and cotton in the Eshtehard plain

جدول ۱- تقویم آبیاری سه کشت غالب آبی گندم، جو، پنبه در دشت اشتهارد

LULC	Calendar	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Act	Nov	Dec
WWHT	Plantting												
	Irrigation												
	Harvest												
WBAR	Plantting												
	Irrigation												
	Harvest												
COTP	Plantting												
	Irrigation												
	Harvest												

۲-۲- مدل شبیه‌سازی آب سطحی

تابش خورشیدی و سرعت باد)، داده‌های مدیریت زراعت آبی از گزارش کشاورزی مطالعات بهنگام‌سازی طرح جامع آب کشور برای حوزه آبریز دریاچه نمک (تاریخ کاشت گیاه، آبیاری، کود و شخم، برداشت) برای سه کشت آبی غالب گندم زمستانه، جو زمستانه و پنبه و برای واسنجی عملکرد محصول و رواناب در مدل به ترتیب از داده‌های عملکرد محصول منطقه دریافت شده از سازمان جهاد کشاورزی و داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری دریافت شده از مطالعات پایه شرکت مدیریت منابع آب در محدوده مورد مطالعه استفاده شده است. در شکل ۱ کاربری اراضی و مدل نهایی SWAT نمایش داده شده است.

مدل SWAT یک مدل حوزه مینا است که با استفاده از پارامترهای نیمه توزیعی وابسته به زمان، برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی و پیش‌بینی حساسیت عملیات مدیریت زمین در ارتباط با آب، رسوب و مواد مغذی استفاده می‌شود. در مدل SWAT حوزه آبریز دشت اشتهارد، از نقشه رقوم ارتفاعی با دقت ۳۰ متر گرفته شده از سایت 'USGS'، نقشه کاربری اراضی دریافت شده از سازمان جهاد کشاورزی استان البرز، نقشه خاک ایران و داده‌های هواشناسی از سازمان هواشناسی کشور (کمینه و بیشینه دما، بارش، رطوبت نسبی،

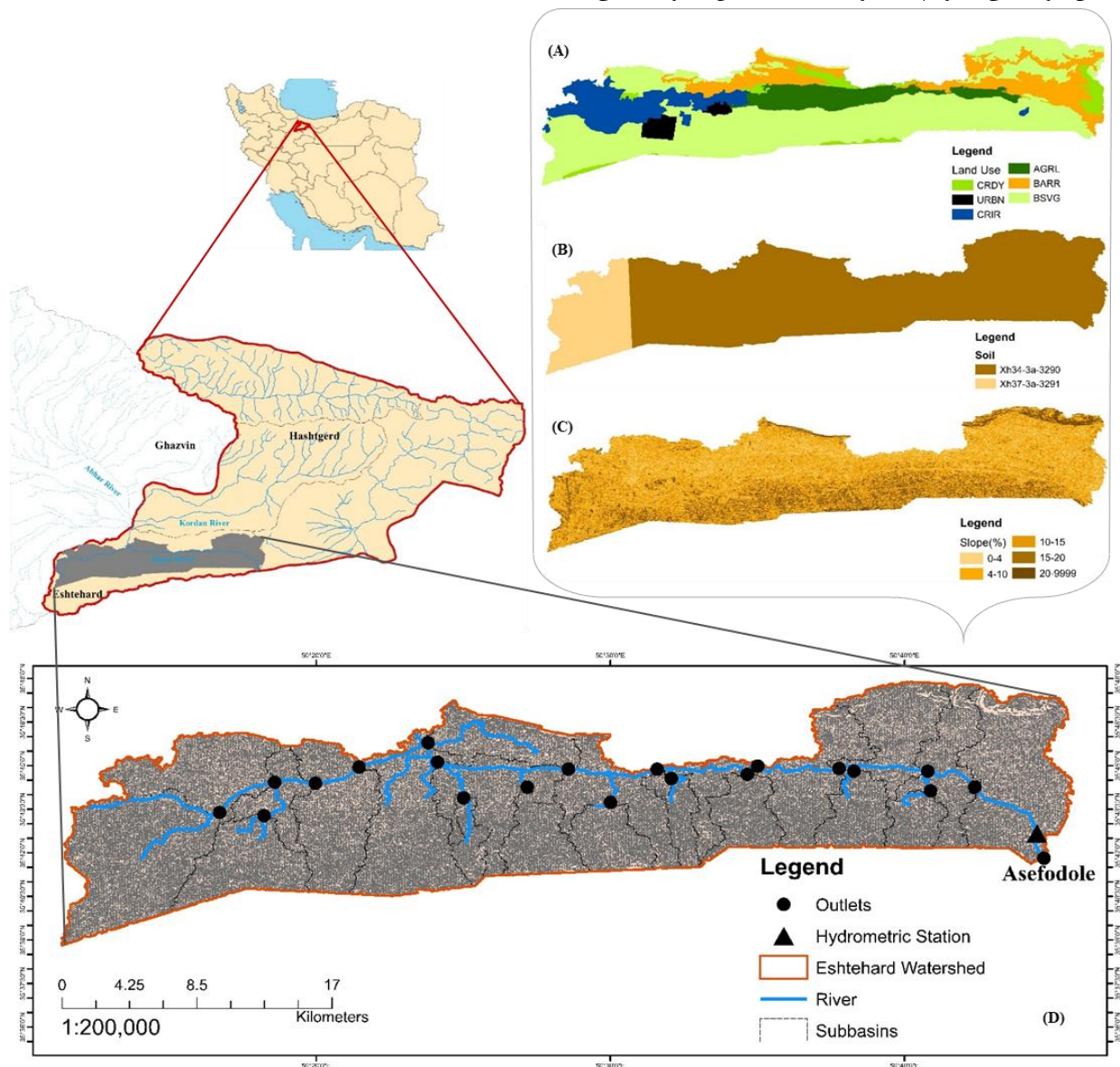


Fig. 1- Location of the Eshtehard plain and (A) Land use map (B) Soil map (C) Slope map and (D) SWAT representation of the Eshtehard watershed

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی دشت اشتهارد و (A) نقشه‌های کاربری اراضی، (B) نوع خاک، (C) شیب منطقه و (D) مدل نهایی

ایجاد شده در SWAT

تحقیقات منابع آب ایران، سال هفدهم، شماره ۱، بهار ۱۴۰۰

Volume 17, No. 1, Spring 2021 (IR-WRR)

حوضه آبریز به ۲۱ زیرحوضه تقسیم شده است که در مجموع دارای ۱۶۷ واحد پاسخ هیدرولوژیکی (HRU) است. هر HRU متشکل از کاربری اراضی، نوع خاک و طبقه شیب واحد است و محاسبات برای خروجی هر زیر حوضه با توجه به درصد مساحت HRU در زیر حوضه انجام می‌شود. به این ترتیب پارامترهای تعامل آب سطحی و زیرزمینی مانند تغذیه رودخانه توسط آب زیرزمینی یا نفوذ از رودخانه به آب زیرزمینی در سطح زیرحوضه قابل بررسی هستند. به همین دلیل، ارتفاع آبخوان در واحد HRU دارای موقعیت جغرافیایی مشخصی نیست (Bailey & Arabi, 2016). در این مطالعه، برآورد آبدهی رواناب سطحی و مقدار نفوذ آب به آبخوان عمیق، دو هدف اصلی در کالیبراسیون SWAT است تا از صحت داده‌های خروجی مدل SWAT برای استفاده به عنوان ورودی به مدل MODFLOW، بتوان اطمینان حاصل کرد. با توجه به اهمیت مقادیر عملکرد و آبیاری محصولات کشاورزی موجود در دشت اشتهارد، برآورد قابل قبولی از عملکرد محصولات زراعی هدف بعدی در کالیبراسیون SWAT است. نرم‌افزار SWAT-CUP (Abbaspour et al., 2007) برای کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل استفاده شده است که قادر به ارائه معیار آماری ارزیابی مدل به عنوان تابع چند هدفه است (Melaku & Wang, 2019). در این نرم‌افزار روش‌های گوناگونی برای تحلیل عدم قطعیت وجود دارد که شامل SUFI-2، GLUE، MCMC و ParaSol می‌باشد (Abbaspour et al., 2004). در این مطالعه از روش SUFI-2^۲ استفاده گردید. برای این منظور ابتدا حداکثر دامنه ممکن برای پارامترها در نظر گرفته شده و سپس با تکرار مراحل معینی، بازه اولیه در نظر گرفته شده برای پارامترها به میزانی کاهش می‌یابد که هر یک از شاخص‌های P-factor و R-factor به مقدار مناسبی برسند. شاخص P-factor برابر با درصدی از داده‌های مشاهداتی می‌باشد که در بازه احتمالاتی ۹۵ درصد شبیه‌سازی‌ها (95 PPU) قرار می‌گیرد (Sith et al., 2019). R-factor نیز برابر با میانگین اختلاف فاصله بین باند بالایی و باند پایینی بازه‌های عدم قطعیت تقسیم بر انحراف معیار داده‌های مشاهداتی می‌باشد. مدل SWAT به صورت ماهانه برای رواناب و سالانه برای عملکرد محصول با در نظرگیری ۳ سال (۱۹۹۷-۱۹۹۹) برای گرم کردن^۲ و آماده‌سازی شرایط اولیه کالیبراسیون و ۱۶ سال (۲۰۰۰-۲۰۱۵) برای کالیبراسیون، استفاده شد و در نهایت برای مدت پنج سال (۱۹۹۵-۱۹۹۹) صحت‌سنجی شده است.

۳-۲- مدل شبیه‌سازی آبخوان

سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده مدل MODFLOW را به عنوان یک کد مدل‌سازی عددی آبخوان توسعه داده است (McDonald &

منطقه مورد مطالعه در نرم‌افزار MODFLOW، بر اساس زیرحوضه‌های ایجاد شده در مدل SWAT به چندین چند ضلعی برای تعیین ضرایب هدایت هیدرولیکی و محدوده تغذیه آبخوان در منطقه، تقسیم شده است. برای هر بخش، از هر زیرحوضه میزان نفوذ حاصل از بارش و رودخانه و آب برگشتی کشاورزی به آبخوان در مدل SWAT محاسبه شده و به سلول‌های شبکه آبخوان وارد شده است که در شکل ۲ نمایش داده شده است. برای تنظیم پارامترهای مدل مانند K و مقدار نفوذ به آبخوان، روش آزمون و خطا استفاده شده است تا ارتفاع سطح آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده و مشاهده شده برای رسیدن به نتایج نزدیکتر به واقعیت، به خطای حداقل برسد.

۴-۲- الگوریتم بهینه‌سازی دسته ذرات

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO^۴) یک الگوریتم مبتنی بر جمعیت است. در PSO، هر ذره تلاش می‌کند به منظور بهبود مکان خود از بهترین موقعیت شخصی (Pbest) و از بهترین موقعیت دسته‌جمعی (Gbest) پیدا شده توسط کل دسته ازدحام، استفاده کند. اندازه گام و موقعیت هر ذره با فرمول زیر به روزرسانی می‌شود:

$$V_i^{t+1} = wV_i^t + c_1r_1^t(Pbest_i - X_i^t) + c_2r_2^t(Gbest_t - X_i^t) \quad (1)$$

$$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1} \quad (2)$$

که در آن، i تعداد جمعیت، w وزن اینرسی که همگرایی را در PSO کنترل می‌کند، r_1 و r_2 اعداد تصادفی یکنواخت در محدوده صفر تا یک، c_1 و c_2 ضرایب شتاب که برای محدود کردن سرعت بکار می‌رود، X_i^t موقعیت فعلی ذره i در تکرار t و V_i^t سرعت ذره است. در این مطالعه، ۲۰ ذره در نظر گرفته شده و برای c_1 ، c_2 و w بر اساس مطالعات قبلی، مقادیر ۲/۵، ۱/۵ و ۰/۹۸ استفاده شده است. همچنین، تکنیک کشش تابع برای اجتناب از گیرافتادگی در نقاط بهینه محلی انتخاب شده است (Mousavi & Shourian, 2010).

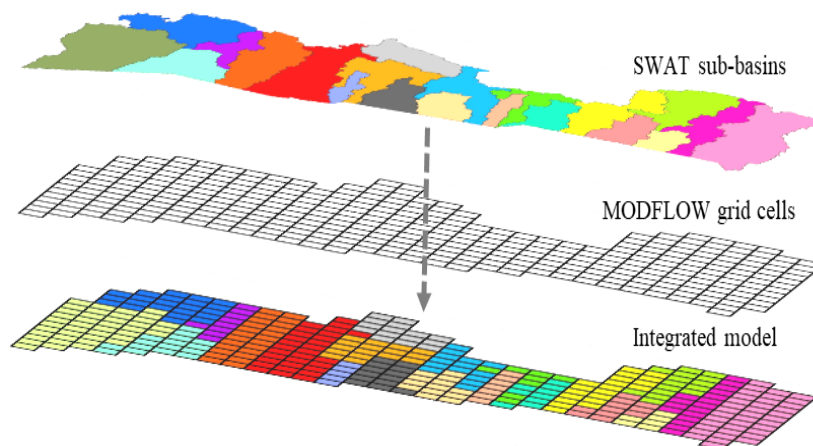


Fig. 2- SWAT sub-basins and MODFLOW grid cells integration process
 شکل ۲- فرایند ترکیب زیرحوضه‌های مدل SWAT و سلول‌های شبکه آبخوان در مدل MODFLOW

Swat.exe برای ایجاد فایل‌های خروجی برای استخراج عملکرد محصول و تغذیه آبخوان اجرا می‌شود و همچنین حجم کل آبیاری بهینه شده مورد استفاده برای تولید محصولات کشاورزی، محاسبه می‌شود. کل حجم آبیاری و تغذیه آبخوان در فایل‌های ورودی MODFLOW به ترتیب به عنوان حجم پمپاژ از چاه‌های کشاورزی و نرخ نفوذ جایگزین می‌شود و سپس modflow.exe برای ایجاد فایل‌های خروجی برای محاسبه سطح آب زیرزمینی در حالت ناپایدار اجرا می‌شود. درآمد خالص حاصل از فروش محصولات آبی و هزینه برق مورد نیاز برای پمپاژ آب از چاه‌ها به منظور محاسبه تابع هدف بهینه‌سازی محاسبه می‌شود. این فرایند همچنان ادامه می‌یابد تا بیشترین مقدار برای سود خالص حاصل از عملکرد محصولات آبی به گونه‌ای به دست آید که ارتفاع آب زیرزمینی از ارتفاع پایدار تعیین شده برای هر چاه کمتر نشود. باتوجه به بازه زمانی ۵ ساله برای اجرای مدل بهینه‌سازی و اینکه مقادیر هزینه و درآمد هر دو تحت تأثیر نرخ بهره یکسانی هستند، از محاسبه ارزش حاضر سود خالص صرف‌نظر شده است. تابع هدف و قیدهای مسئله برای PSO به شرح زیر تعریف شده است:

$$\text{Max } F = \sum_{c=1}^{nC} A_c \times Y_c \times P_c - \sum_{1}^{nW} (GE - H_w) \times \gamma_w \times Q_w \times EP \quad (3)$$

Subject to:

$$\sum_{1}^{nC} A_c = A_{\text{Max}} \quad (4)$$

$$H_w \geq H_w^{\text{Stab}} \quad (5)$$

در روابط فوق، F تابع هدف که متوسط سالانه سود خالص حاصل از عملکرد محصولات کشاورزی در دشت در دوره برنامه‌ریزی پنج ساله است، nC تعداد محصولات کشاورزی، A_c سطح زیر کشت هر

۲-۵- اتصال SWAT، MODFLOW و PSO

در ابتدا، مدل متصل شده SWAT-MODFLOW برای سال ۲۰۱۱ در حالت پایدار (با فرض ثابت بودن سطح ایستابی آبخوان نسبت به زمان) کالیبره شده است تا عملیات شبیه‌سازی و یکپارچه‌سازی آب سطحی و آب زیرزمینی را تضمین کند. برای این منظور، در شبیه‌سازی SWAT، مقادیر مختلف پارامترهای مرتبط با آبخوان که ضریب Nash-Sutcliffe بالای ۰/۶ را برای رواناب ارائه داده است، برای تعیین مقدار مناسب نفوذ به آبخوان انتخاب گردیدند. سپس مقادیر نفوذ، به عنوان ورودی به بسته نفوذ MODFLOW داده شده است. سپس از بسته PEST در MODFLOW برای تعیین بهترین مقادیر هدایت هیدرولیکی در حالت پایدار، استفاده شد که مقدار خطا را بین ارتفاع آب زیرزمینی مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در حالت پایدار به حداقل برساند. مقادیر نهایی پارامترهای آبخوان به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که باعث خطای کمتر برای برآورد رواناب و ارتفاع آب زیرزمینی در هر دو مدل SWAT و MODFLOW شده است و سپس مدل SWAT-MODFLOW برای حالت ناپایدار برای ۵ سال (۲۰۱۵-۲۰۱۱) اجرا شده است. فرایند کالیبراسیون دوگانه در جعبه‌های دارای خطچین مشکی در شکل ۳ نشان داده شده است.

پس از آماده‌سازی مدل‌های SWAT و MODFLOW، فرایند بهینه‌سازی با الگوریتم PSO آغاز شده است. در این فرایند ابتدا، مساحت سه کشت غالب آبی و مقادیر آبیاری هر یک، در فایل‌های ورودی SWAT تغییر می‌کند، که در آن، کل مساحت کشت آبی بهینه شده، نباید بیش از مجموع مساحت کشت آبی موجود باشد و محصولات آبی تنها می‌توانند به یکدیگر تبدیل شوند. سپس

پیزومتری اطراف هر چاه بهره‌برداری در نظر گرفته شد. فرایند بهینه‌سازی در جعبه‌های دارای حاشیه خط مشکی در شکل ۳ نشان داده شده است.

۳- نتایج

۳-۱- کالیبراسیون SWAT و MODFLOW

پارامترهای حساس مدل SWAT حوضه آبریز اشتهاارد به رواناب، تغذیه و عملکرد محصول با استفاده از نرم‌افزار SWAT_CUP و مشابه مطالعات دیگر بررسی شده است (Wei et al., 2018). پارامترهای حساس در جدول ۲ نشان داده شده است.

محصول، Y_c متوسط عملکرد محصول در واحد سطح (ton/ha) در هر سال، P_c قیمت خالص هر محصول پس از کسر هزینه‌های کاشت داشت و برداشت ($\$/\text{ton}$)، nW تعداد چاه‌های مورد استفاده برای آبیاری در دشت، GE ارتفاع سطح زمین، H_w سطح آب زیرزمینی محاسبه شده در هر چاه، γ_w وزن مخصوص آب، Q_w مقدار تخلیه آب با پمپاژ از هر چاه، EP قیمت واحد برق ($\$/\text{kW}$)، A_{Max} کل مساحت کشت آبی در دشت و H_w^{Stab} تراز آب زیرزمینی است که به عنوان تراز پایداری آبخوان در هر چاه تعریف شده است. با توجه به اینکه مقدار این تراز نه بایستی خیلی بالا باشد تا امکان برداشت بهینه از آبخوان فراهم شود و نه بایستی خیلی پایین باشد تا منجر به آسیب‌پذیری آبخوان گردد، H_w^{Stab} برابر با متوسط دراز مدت تراز آب در چاههای

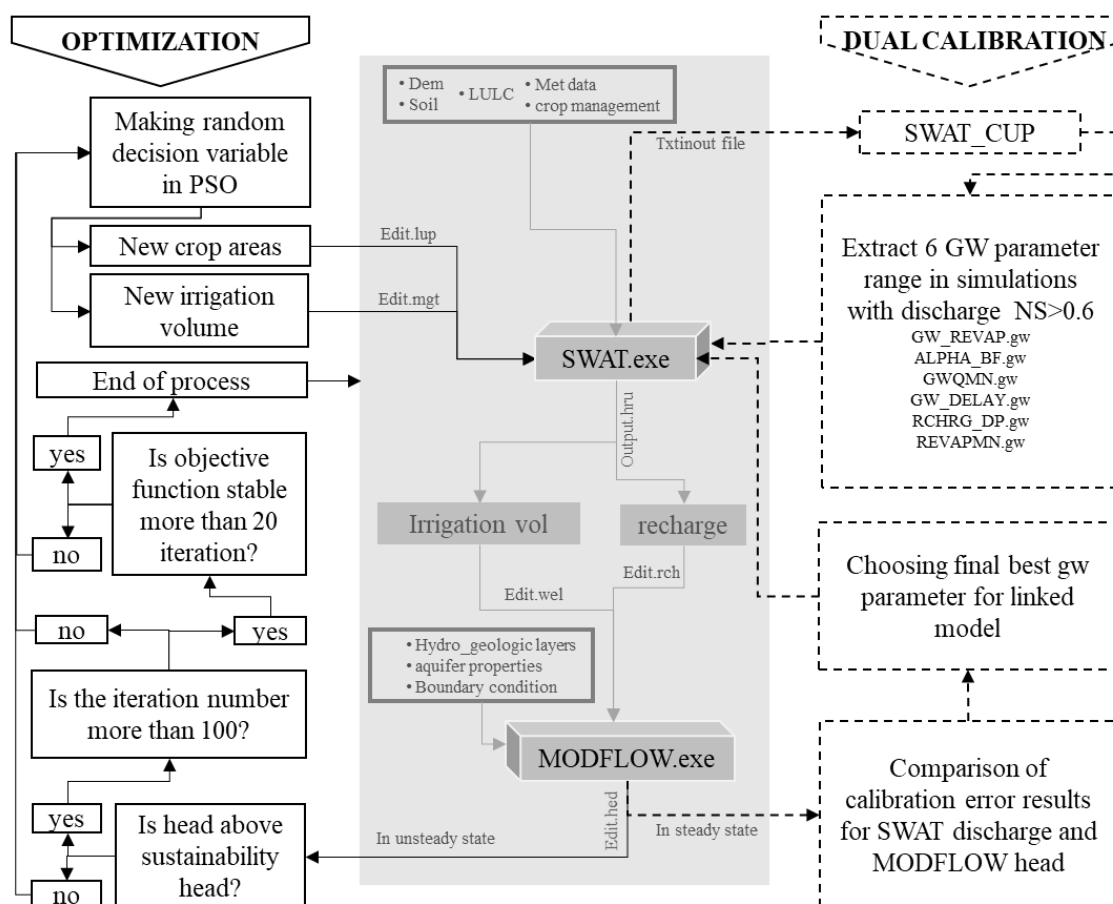


Fig. 3- Workflow of the PSO-SWAT-MODFLOW model: SWAT and MODFLOW linkage process in gray boxes, dual calibration process in right side in the dashed boxes and optimization process in left side in the black line boxes

شکل ۳- گردش کار مدل PSO-SWAT-MODFLOW، فرایند پیوند مدل SWAT و MODFLOW در جعبه خاکستری، کالیبراسیون دوگانه سمت راست در جعبه‌های دارای خطچین مشکی، فرایند بهینه‌سازی سمت چپ در جعبه‌های دارای خط مشکی

Table 2- SWAT's calibration parameters used for discharge and crops yield simulation and the best values for groundwater and surface water, soil and agricultural management

جدول ۲- پارامترهای مورد استفاده در SWAT برای کالیبراسیون رواناب و عملکرد محصولات و بهترین مقادیر به دست آمده در پاسخ به رفتار آب‌های زیرزمینی و سطحی، خاک و مدیریت کشاورزی

Parameter	Definition	Initial range	Final value		
Subsurface water response					
ALPHA_BF.gw	Baseflow alpha factor (days)	0-1	0.11		
GW_DELAY.gw	Groundwater delay (days)	0-500	31		
GWQMN.gw	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur (mm)	0-5000	4560		
GW_REVAP.gw	Groundwater "revap" coefficient	0.02-0.2	0.13		
REVAPMN.gw	Threshold depth of water in the shallow aquifer for "revap" to occur (mm)	0-500	166.66		
RCHRG_DP.gw	Deep aquifer percolation fraction	0-1	0.63		
Surface water response					
CN2.mgt	SCS runoff curve number	35-98	87		
CH_K2.rte	Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium	-0.1-500	102.65		
Soil properties					
SOL_AWC.sol	Available water capacity of the soil layer	0-1	0.18-0.18		
SOL_K.sol	Saturated hydraulic conductivity	0-2000	1880		
SOL_BD.sol	Moist bulk density	0.9-2.5	0.9		
SOL_ALB.sol	Moist soil albedo	0-0.25	0.1		
Plant management			WWHT	WBAR	COTP
WAVP	Rate of decline in radiation use efficiency per unit increase in vapor pressure deficit	0-50	20.975	40.275	47.575
ALAI_MIN	Minimum leaf area index for plant during dormant period	0-0.99	0.406	0.000	0.661
EXT_COEF	Light extinction coefficient	0-2	1.541	0.043	1.685
FRGRW1	Fraction of the plant growing season corresponding to the 1st. The point on the optimal leaf area development curve	0-1	0.684	0.499	0.567
BIO_E	Biomass/Energy Ratio	10-90	89.000	81.640	79.400
BLAI	Max leaf area index	0.5-10	9.368	2.053	6.917
HVSTI	Harvest index	0.01-1.25	0.084	0.266	0.178
LAIMX1	Fraction of the max. Leaf area index corresponding to the 1st. the point on the optimal leaf area development curve	0-1	0.322	0.404	0.332
LAIMX2	Fraction of the max. Leaf area index corresponding to the 2nd. the point on the optimal leaf area development curve	0-1	0.017	0.009	0.447
DLAI	The fraction of growing season when leaf area starts declining	0.15-1	0.853	0.232	0.220
T_OPT	Optimal temp for plant growth	11-38	13.552	33.828	26.863
T_BASE	Min temp plant growth	0-18	2.961	1.251	0.801

پارامترهای آبخوان در مدل SWAT، نتایج قابل قبولی برای ارتفاع آب در حالت پایدار در MODFLOW حاصل شده است (شکل ۵) که اعتماد بیشتری برای استفاده از مدل متصل شده فراهم کرده است. پس از کالیبراسیون، هدایت هیدرولیکی بین ۱ تا ۶۰ متر مکعب بر روز در حالت پایدار (۲۰۱۱) و آبدهی ویژه بین ۰/۱۵ تا ۰/۸۵ برای حالت ناپایدار برآورد شد (۲۰۱۱-۲۰۱۵). نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل آب زیرزمینی برای حالت پایدار و ناپایدار در جدول ۳ شرح داده شده است که مقادیر خطا در حالت ناپایدار به علت دوره زمانی طولانی‌تر، کمی افزایش یافته است و به طور کلی در هر دو حالت پایدار و ناپایدار، مقادیر خطا قابل قبول هستند.

مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی برای ایستگاه هیدرومتری آصف‌الدوله که در خروجی حوضه قرار دارد، برای دوره کالیبراسیون (ژانویه ۲۰۰۰ تا دسامبر ۲۰۱۵) و دوره صحت‌سنجی (ژانویه ۱۹۹۵ تا دسامبر ۱۹۹۹) در شکل ۴ نشان داده شده است. ضریب R^2 برای کالیبراسیون برابر ۰/۸۱ و برای صحت‌سنجی برابر ۰/۷۳ به دست آمده و ضریب R^2 برای کالیبراسیون برابر ۰/۸۵ و برای صحت‌سنجی برابر ۰/۷۹ حاصل شده است. همچنین ضرایب P-factor و R-factor پس از کالیبراسیون به ترتیب برابر ۰/۷۶ و ۰/۲۳ شده است.

پس از کالیبراسیون مدل متصل شده، با توجه به مقادیر کالیبره شده‌ی

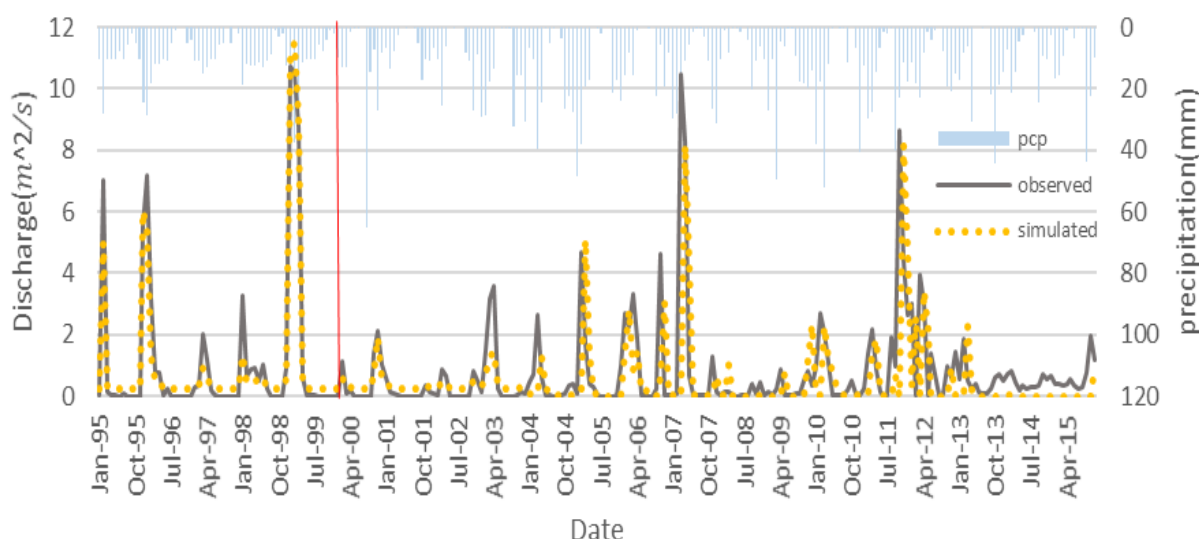


Fig. 4- Calibration and validation results for discharge at the Asefodoleh hydrometric station

شکل ۴- نتایج کالیبراسیون و صحت‌سنجی رواناب برای ایستگاه هیدرومتری آصف‌الدوله

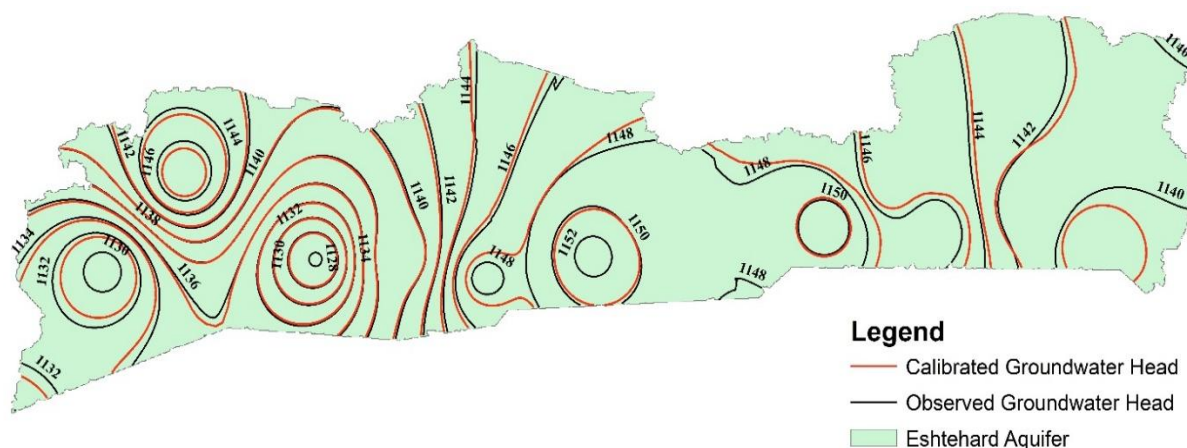


Fig. 5- Groundwater head calibration results for the steady state model

شکل ۵- نتیجه کالیبراسیون سطح آب زیرزمینی برای حالت پایدار پس از کالیبراسیون دوگانه

Table 3- Calibration and validation error for steady and unsteady state models

جدول ۳- میزان خطای محاسباتی در واسنجی و صحت‌سنجی مدل پایدار و ناپایدار

Groundwater State	Error	RMSE	MAE	ME
Steady state	Calibration	0.755	0.632	0.014
	Validation	0.901	0.768	0.156
Unsteady state	Calibration	1.309	1.015	0.370
	Validation	1.211	0.998	0.302

در نهایت سود حاصل از عملکرد محصول گندم زمستانه و پنبه به ترتیب ۳۵٪ و ۱۳٪ کاهش یافته و جو ۴۹٪ افزایش یافته که به طور کلی سود تولید محصولات آبیاری ۴٪ افزایش یافته است (شکل ۹).

با توجه به شکل (۱۰)، ارتفاع آب زیرزمینی قبل از بهینه‌سازی در پایان ۵ سال ۴/۲ متر کمتر از سال اول بوده، که این تفاوت پس از بهینه‌سازی با کاهش برداشت از آبخوان به ۲/۵ متر رسیده است. به طور متوسط، ارتفاع آب ۲/۴ متر در مدت ۵ سال (۲۰۱۵-۲۰۱۱) پس از بهینه‌سازی افزایش یافته است.

با توجه به شکل ۱۱ و اثر آب برگشتی کشاورزی و بارش، در نفوذ آب به آبخوان، میزان بارش در زمستان و پاییز بالاتر از فصول دیگر است، اما نفوذ آب در بهار بیشتر از فصول دیگر است، زیرا مقدار آب آبیاری در بهار بیشتر از سایر فصول است که باعث افزایش بیشتر آب برگشتی کشاورزی و نفوذ بیشتر شده است. همچنین، همانطور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، مقدار نفوذ آب به آبخوان در وضعیت بهینه، نسبت به وضعیت موجود در تمام فصول به دلیل کاهش مقدار آب آبیاری و در نتیجه کاهش آب برگشتی کشاورزی در حوضه، کاهش یافته است.

به دلیل کاهش میزان آبیاری در وضعیت بهینه، میزان آب بازگشتی کاهش یافته است. بنابراین مقدار تغذیه آبخوان در وضعیت بهینه کمتر از وضعیت موجود است که باعث کاهش حجم آب ورودی به آبخوان می‌شود اما این شرایط باعث افت آب در آبخوان نخواهد شد، زیرا با برداشت بهینه از آب زیرزمینی (شکل ۱۲)، حجم آب کمتری از آبخوان برداشت می‌شود که تأثیر آن بر کاهش افت آب در آبخوان بیشتر از تأثیر کاهش آب نفوذی به آبخوان بر افت سطح آب است.

۲-۳- نتایج مدل PSO-SWAT-MODFLOW

با اجرای فرآیند بهینه‌سازی، مقادیر بهینه برای آبیاری و سطح زیر کشت برای سه محصول کشاورزی آبی غالب گندم، جو و پنبه به ترتیب با رنگ‌های قهوه‌ای، نارنجی و سبز در شکل ۶ نمایش داده شده است. بر اساس شکل A-۶، مقدار کل آبیاری سالانه برای گندم زمستانه به میزان ۴۵ درصد کاهش یافته است. با توجه به کاهش ۴۷٪ میزان آبیاری در فصل بهار و نیاز آبی بالای گیاه، استرس آبی باعث کاهش عملکرد محصول تا ۱۴٪ شده است (شکل ۷). مقدار کل آبیاری سالانه برای جو زمستانه، ۷٪ در وضعیت بهینه کاهش یافته است (شکل B-۶) و عملکرد محصول ثابت باقی مانده است (شکل ۷) که می‌توان گفت مقدار آبیاری در وضعیت موجود ۷٪ بیشتر از نیاز آبی گیاه است. مقدار کل آبیاری سالانه برای پنبه به میزان ۱۰٪ کاهش یافته است (شکل C-۶) و عملکرد محصول ۷/۵٪ افزایش یافته است (شکل ۷). می‌توان گفت مقدار آبیاری پنبه در وضعیت موجود ۱۰٪ بالاتر از نیاز آبی گیاه است (Rafiee et al., 2017) که باعث محدودیت رشد ریشه و کاهش عملکرد محصول شده و با تنظیم نیاز آبی گیاه، عملکرد بهبود یافته است.

شکل ۸ نشان می‌دهد که پس از بهینه‌سازی، بخشی از اراضی کشاورزی گندم زمستانه و پنبه به جو زمستانه تبدیل شده است. به این ترتیب، اراضی کشاورزی گندم زمستانه و پنبه به ترتیب به میزان ۲۴٪ و ۱۹٪ کاهش یافت و اراضی کشت جو ۴۹٪ افزایش یافته است. با توجه به نتایج بعد از بهینه‌سازی، جو (۲۷۲ میلی‌متر)، با آبیاری‌ای به مقدار ۸۰ میلی‌متر بیشتر نسبت به گندم (۱۹۲ میلی‌متر)، در سال عملکردی تقریباً دو برابر می‌دهد که با کاهش مساحت گندم و افزایش جو می‌توان به سود بیشتری در فروش مجموع این دو محصول دست یافت. با توجه به مقادیر عملکرد محصول و سطح زیر کشت هر یک،

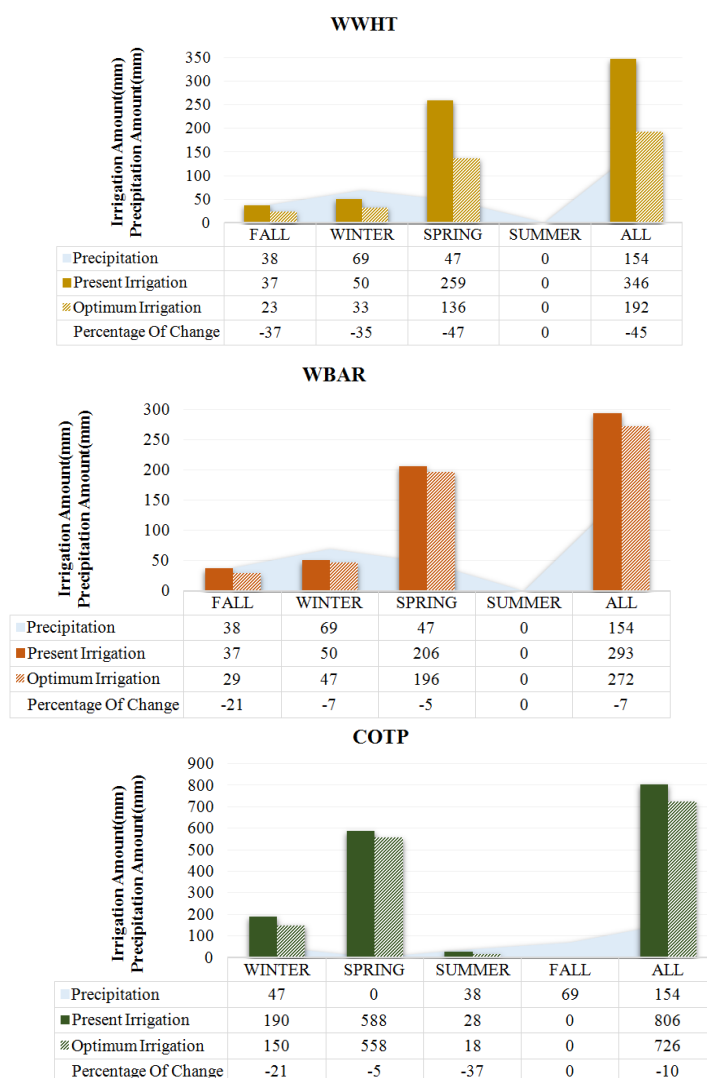


Fig. 6- Average annual irrigation amount in the present and optimum situations for (A) wheat, (B) barley and (C) cotton

شکل ۶- متوسط سالیانه مقادیر آبیاری در وضعیت موجود و بهینه به همراه بارش برای کشتهای (A) گندم، (B) جو و (C) پنبه

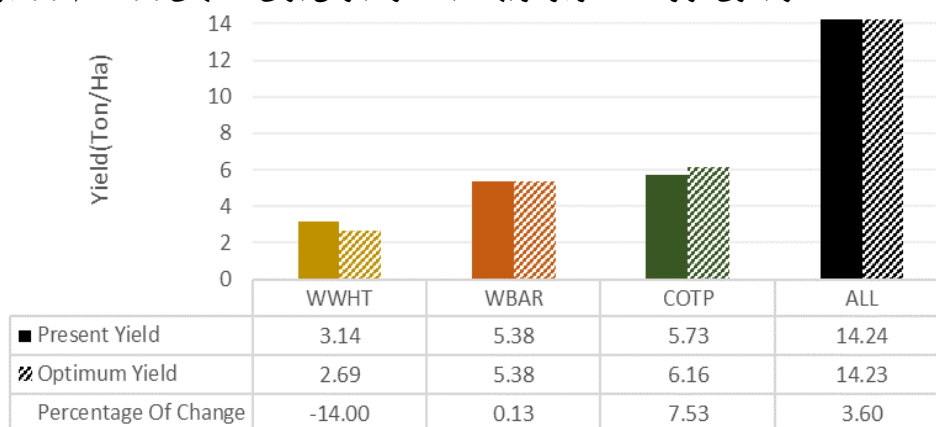


Fig. 7- Average annual crops' yield in the present and optimum situations

شکل ۷- متوسط سالیانه عملکرد محصولات کشت آبی در وضعیت موجود و بهینه

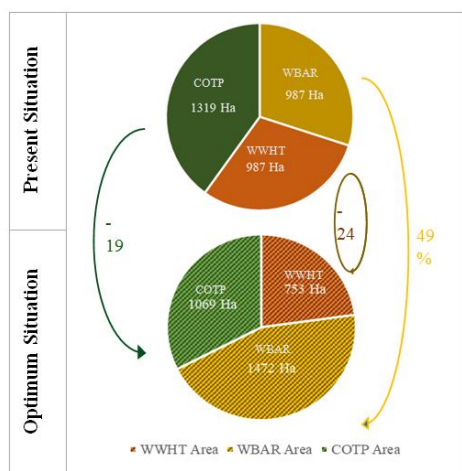


Fig. 8- Variation of the irrigated crops' area in the present and optimum situations
 شکل ۸- تغییرات سطح زیر کشت سه محصول آبی غالب در وضعیت موجود و بهینه

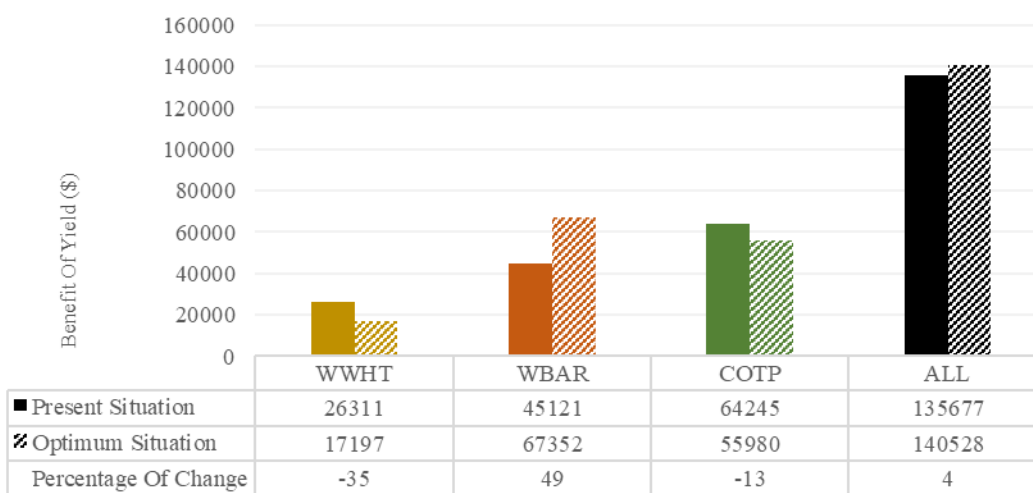


Fig. 9- Average annual net benefit obtained from the irrigated crops' yield in the present and optimum situations

شکل ۹- مقایسه متوسط سالیانه سود خالص حاصل از تولید محصولات کشاورزی آبی در وضعیت موجود و بهینه

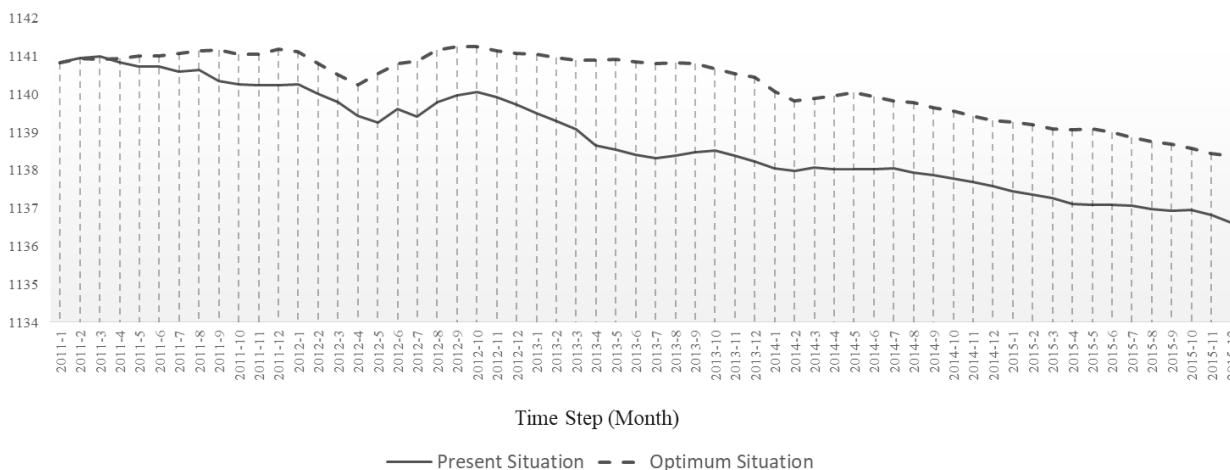


Fig. 10- Groundwater unit hydrograph in the present and optimum situations (2011-2015)

شکل ۱۰- هیدروگراف واحد آب زیرزمینی برای بازه ۵ ساله (۲۰۱۱-۲۰۱۵) در وضعیت موجود و بهینه

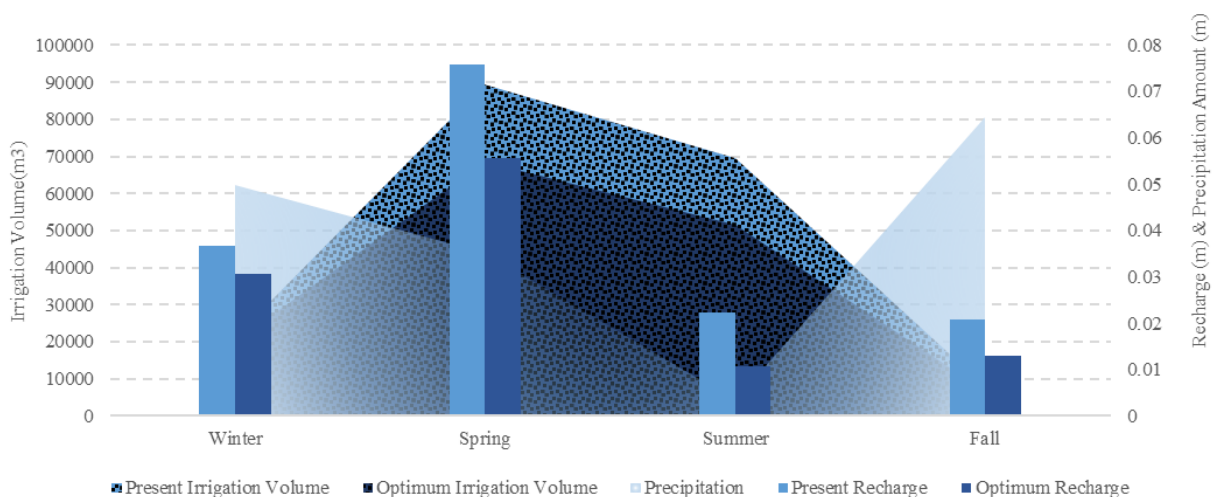


Fig. 11- Average seasonal variation of aquifer recharge considering precipitation and irrigation in the present and optimum situations

شکل ۱۱- مقایسه مقدار نفوذ فصلی در حالت وضع موجود و بهینه با توجه به حجم آبیاری و بارش فصلی

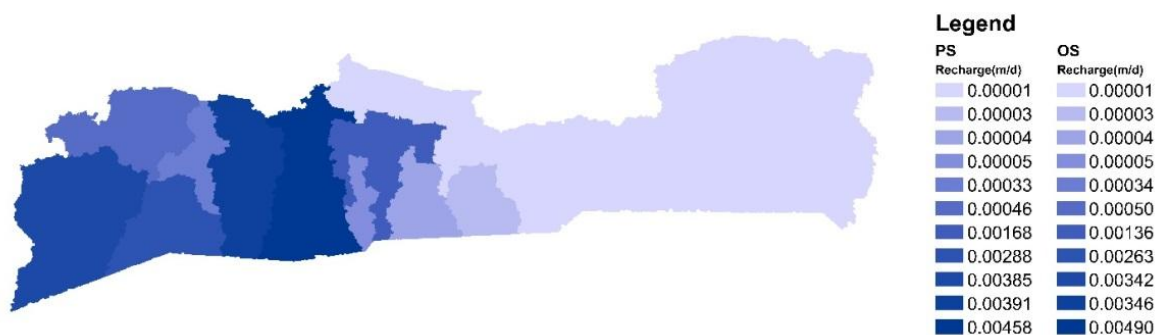


Fig. 12- Variation of the aquifer recharge in the present (PS) and optimum situations (OS)

شکل ۱۲- مقایسه تغذیه بین وضعیت موجود (PS) و بهینه (OS)

محصول به دست آورد، به طوری که ارتفاع آب زیرزمینی از ارتفاع پایداری تعیین شده، پایین تر نرود. نتایج نشان داد که در وضعیت بهینه در دشت اشتهارد با جایگزینی بخشی از گندم زمستانه و پنبه با جو زمستانه و کاهش مصرف آبیاری تا اندازه‌ای که عملکرد محصول بیش از حد کاهش نیابد، می‌تواند به طور قابل توجهی باعث کاهش افت آب زیرزمینی و بحران‌های آینده شود. پیاده‌سازی طرح‌های بهینه‌سازی الگوی کشت در واقعیت با مشکلات زیادی مواجه بوده و نیازمند در نظرگیری پارامترهای بیشتری از منطقه در فرایند مدل‌سازی است که لازمه آن صرف زمان کافی برای جمع‌آوری داده‌های کافی از منطقه و همچنین استفاده از مطالعات اجتماعی در رفتارسنجی کشاورزان می‌باشد. پس از طی این فرایند، با شرح وضعیت منابع آب و طرح‌های پیشنهادی به کشاورزان و ذی‌نفعان، می‌توان اعتماد آن‌ها را جلب نموده و با ایجاد طرح‌های تشویقی، میل به همراهی آن‌ها را جهت پیاده‌سازی الگوی کشت پیشنهادی افزایش داد.

۴- جمع‌بندی

در این مطالعه، تعامل بین آب سطحی و زیرزمینی و رفتار آبخوان با استفاده از مدل متصل شده SWAT-MODFLOW برای دشت اشتهارد ارزیابی شده است. سه محصول آبی غالب در دشت اشتهارد کشت می‌شود و نیاز آبی مورد نیاز محصولات از چاه‌های آب زیرزمینی تأمین می‌شود. بنابراین افت شدید سطح آب زیرزمینی باعث ایجاد ضررهای زیادی در دشت شده است. رویکرد بهینه با الگوریتم PSO برای کاهش افت آب زیرزمینی به کمک تغییر کاربری اراضی آبی و کاهش برداشت آب زیرزمینی برای مصرف آبیاری، استفاده شده است که در تحقیقات، به خصوص با استفاده از یک مدل متصل شده برای بررسی تعاملات آب سطحی و زیرزمینی به منظور شبیه‌سازی دقیق‌تر حوضه برای بهینه‌سازی، به ندرت انجام شده است. نتایج فرایند بهینه‌سازی بهترین راه حل را برای به حداکثر رساندن سود عملکرد

- aquifer, Iran). *Iran-Water Resources Research* 15(3):33–48 (In Persian)
- Mousavi S J & Shourian M (2010) Adaptive sequentially space-filling metamodeling applied in optimal water quantity allocation at basin scale. *Water Resources Research* 46(3):1–13
- Najjarghabel S, Zarghami M, Akhbari M, & Nadiri A (2019) Groundwater management in Ardabil plain using agent-based modeling. *Iran-Water Resources Research* 15(3):1–16 (In Persian)
- Rafiee V, Shourian M, & Attari J (2017) Optimum crop patterning by integrating SWAT and the harmony search optimization algorithm. *Iran-Water Resources Research* 13(3):73–88 (In Persian)
- Ross M, Geurink J, Said A, Aly A, & Tara P (2005) Evapotranspiration conceptualization in the HSPF-MODFLOW integrated models. *Journal of the American Water Resources Association* 41(5):1013–1025
- Bailey R, Records R M, Wible T C, & Arabi M (2016) Assessing regional-scale spatio-temporal patterns of groundwater-surface water interactions using a coupled SWAT-MODFLOW model. *Hydrological Processes* 30(23):4420–4433
- Saghi-jadid M & Ketabchi H (2019) Restoration management of groundwater resources using the combined model of numerical simulation-evolutionary ant colony optimization. *Iran-Water Resources Research* 15(2) (In Persian)
- Singh A (2014) Conjunctive use of water resources for sustainable irrigated agriculture. *Journal of Hydrology* 519(PB):1688–1697
- Singh A & Panda S N (2012) Development and application of an optimization model for the maximization of net agricultural return. *Agricultural Water Management* 115:267–275
- Sith R, Watanabe A, Nakamura T, & Yamamoto T (2019) Assessment of water quality and evaluation of best management practices in a small agricultural watershed adjacent to Coral Reef area in Japan. *Agricultural Water Management* 213(July 2017):659–673
- Stefania G A, Rotiroti M, Fumagalli L, Simonetto F, Capodaglio P, Zanotti C, & Bonomi T (2018) Modeling groundwater/surface-water interactions in an Alpine valley (the Aosta Plain, NW Italy): The effect of groundwater abstraction on surface-water resources. *Hydrogeology Journal* 26(1):147–162
- Wei X, Bailey R T, Records R M, Wible T C, & Arabi M (2018) Comprehensive simulation of nitrate transport in coupled surface-subsurface hydrologic
- 1- United State Geological Survey
2- Sequential Uncertainty Fitting
3- Warm-up
4- Particle Swarm Optimization
5- Nash-Sutcliffe
- ۵- مراجع
- Abbaspour K C, Johnson C A, & van Genuchten M T (2004) Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone Journal* 3(4):1340–1352
- Abbaspour K C, Yang J, Maximov I, Siber R, Bogner K, Mieleitner J, Zobrist J, & 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
- Čerkasova N, Umgiesser G, & Ertürk A (2018) Development of a hydrology and water quality model for a large transboundary river watershed to investigate the impacts of climate change – A SWAT application. *Ecological Engineering* 124 (August):99–115
- Fredericks B J W, Labadie J W, & Altenhofen J M (1998) Decision support system for conjunctive stream-aquifer management By Jeffrey W Fredericks; Member ASCE John W Labadie, 2 Member ASCE and Jon M Altenhofen, 3 Member ASCE 124(2):69–78
- Guzman J A, Moriasi D N, Gowda P H, Steiner J L, Starks P J, Arnold J G, & Srinivasan R (2015) A model integration framework for linking SWAT and MODFLOW. *Environmental Modelling and Software* 73:103–116
- Kollet S J, & Maxwell R M (2006) Integrated surface-groundwater flow modeling: A free-surface overland flow boundary condition in a parallel groundwater flow model. *Advances in Water Resources* 29(7):945–958
- McDonald M G & Harbaugh A W (2003) The history of MODFLOW. In *Ground Water* 41(2):280–283
- Melaku N D & Wang J (2019) A modified SWAT module for estimating groundwater table at Lethbridge and Barons, Alberta, Canada. *Journal of Hydrology* 575(May):420–431
- Mostafaei-avandari M & Ketabchi H (2019) Optimal extraction from coastal groundwater resources using parallel-processing based simulation-optimization decision model (Case Study of Ajabshir coastal

- nature water conflicts: A surrogate modeling approach. *Agricultural Water Management* 163:380–392
- Zeinali M, Azari A, & Heidari M M (2020) Multiobjective optimization for water resource management in low-flow areas based on a coupled surface water–groundwater model. *Journal of Water Resources Planning and Management* 146(5):04020020
- systems using the linked SWAT-MODFLOW-RT3D model. *Environmental Modelling and Software* 122: 104242
- Weill S, Mazzia A, Putti M, & Paniconi C (2011) Coupling water flow and solute transport into a physically-based surface-subsurface hydrological model. *Advances in Water Resources* 34(1):128–136
- Wu X, Zheng Y, Wu B, Tian Y, Han F, & Zheng C (2015) Optimizing conjunctive use of surface water and groundwater for irrigation to address human-