تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۰، شماره ۵، مهر ۱۳۹۸ (ص ۱۲۹۱-۱۲۹۷) DOI: 10.22059/ijswr.2018.260324.667949

Extraction of Wheat Irrigation Operation Curve using Simulation-Optimization Approach

AHMAD KHAZAI POOL[1], ALI MORIDI[2*], JAFAR YAZDI[3]

1. PhD student Water Resources Management, school of civil, Water and the environment, Campus of Engineering, Shahid abbaspoor, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran.
2. Assistant Professor, Department of water resources management, school of civil, Water and the environment, Campus of Engineering, Shahid abbaspoor, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran.
3. Assistant Professor, Department of water resources management, school of civil, Water and the environment, Campus of Engineering, Shahid abbaspoor, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran.

(Received: June. 20, 2018- Revised: Oct. 28, 2018- Accepted: Nov. 3, 2018)

ABSTRACT

As agriculture consumes the most parts of water resources, management and control in this sector plays a significant role in water resources management. In this study, simulation-optimization approach was applied using soil and water assessment tool (SWAT) in combination with non-dominated sorting differential evolution (NSDE) algorithm to find the best operation curve for wheat irrigation in Mahabad basin. The wheat production in 2011 to 2013 was considered for SWAT calibration and validation. According to the hedging rule, a two-objective function was used to increase the crop yield and reduce the irrigation volume. The optimum results showed by reducing the annual irrigation rate from 200 mm to about 100 mm, the wheat production will be 2.114 ton/ha which is equal to the current irrigation pattern yield. This approach could maximize the economic cost by introducing the best irrigation pattern and consequently reduce the groundwater recharge and surface run-off 34% and 13%, respectively.

Keywords: simulation, irrigation, yield, optimization, SWAT.

* Corresponding Author's Email: a_moridi@mail.sbu.ac.ir

استخراج منحنی فرمان آبیاری محصول گندم با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی

احمد خزائی پول[۱]، علی مریدی[۲*]، جعفر یزدی[۳]

۱. دانشجوی دکتری گروه مدیریت منابع آب، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

۲. استادیار گروه مدیریت منابع آب، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

۳. استادیار گروه مدیریت منابع آب، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۳/۳۰- تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۸/۶- تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۸/۱۲)

چکیده

با توجه به اینکه کشاورزی از جمله بخش‌های پرمصرف منابع آب است، مدیریت و کنترل در این بخش می‌تواند سهم بسزایی در مدیریت منابع آب داشته باشد. در این مطالعه رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی با استفاده از ابزار ارزیابی خاک و آب (SWAT) در ترکیب با الگوریتم بهینه‌سازی تفاضلی غیر غالب (NSDE) به‌منظور پیدا کردن بهترین منحنی فرمان برای آبیاری محصول گندم در حوضه مهاباد به کار گرفته شد. عملکرد محصول گندم در سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۳ برای واسنجی و صحت‌سنجی SWAT در نظر گرفته شد. بر مبنای قانون جیره‌بندی، تابعی دو هدفه بکار گرفته شد که یکی از اهداف آن تولید محصول بیشتر و دیگری حجم آبیاری کمتر بود. نتایج بهینه نشان دادند که با کاهش میزان آبیاری سالانه از ۲۰۰ میلی‌متر به حدود ۱۰۰ میلی‌متر می‌توان تولیدی برابر ۲/۱۱۴ تن در هکتار داشت که این عدد برابر میزان تولید محصول الگوی فعلی آبیاری است. این رویکرد با معرفی بهترین الگوی آبیاری، حداکثر صرفه اقتصادی را ارائه نموده و نشان داد که میزان تغذیه آب زیرزمینی و رواناب سطحی نیز به ترتیب به اندازه ۳۴ درصد و ۱۶ درصد کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری، بهینه‌سازی، شبیه‌سازی، عملکرد محصول، SWAT.

مقدمه

در میان منابع مختلف جهان، آب از مهم‌ترین و ارزشمندترین منابع است که از آن در زمینه‌های گوناگونی نظیر شرب، کشاورزی و صنعت استفاده می‌شود (Maurer, 2010). بخش کشاورزی آبی، به عنوان یکی از بخش‌های پرمصرف آب با این چالش مواجه است که تولید بیشتر همراه با مصرف آب کمتر باشد. این مسئله زمانی اهمیت می‌یابد که اثر تغییر اقلیم در کشورهایی که هم‌اکنون با کمبود آب مواجه‌اند، به‌عنوان عامل تشدید کننده کمبود آب نقش ایفا می‌کند (Allen *et al*., 2002; Reder *et al*., 2016). در ایران، کشاورزی ۹۰ درصد حجم آب تجدیدپذیر را سالانه به خود اختصاص می‌دهد. بنابراین کمبود عرضه آن به عنوان مهم‌ترین عامل محدودیت‌های کاهش فعالیت‌های کشاورزی (Rijsberman, 2006)، تأثیر بسزایی را در امر اشتغال و به تبع آن اقتصاد ایفا می‌نماید. متأسفانه به علت مدیریت نامناسب، صرفه اقتصادی حاصل از آن پایین است. در نواحی اطراف دریاچه ارومیه که از سال ۱۹۹۵ میلادی با خشکی مواجه است (Ahmadzadeh *et al*., 2016) و نیاز مبرمی به تأمین حقابه برای احیا دریاچه دارد، فعالیت‌های کشاورزی در حال توسعه است. در این راستا راهکاری باید مورد توجه قرار گیرد که در عین تولید محصول بیشتر، مصرف آب کمتری را در پی داشته باشد. بنابراین برای حل این مسئله باید میزان تولید محصولات آبی را بالاتر برده و سیستم مدیریتی آبیاری را کاراتر نمود (Kijne *et al*., 2003). بدین منظور پارامترهای الگوی کشت و آبیاری که از ارزش زیادی برخوردار هستند (Madani *et al*., 2016)، می‌توانند مورد مطالعه قرار گیرند.

برای ارزیابی هم‌زمان میزان مصرف آب و تولید محصول لازم است کلیه‌ی متغیرهای مؤثر در آن به‌صورت هم‌زمان شبیه-سازی شود. بررسی سوابق مطالعاتی نشان می‌دهد که ابزار ارزیابی خاک و آب[۱] (Arnold *et al*., 1998) با دلایلی از جمله دسترسی رایگان، قابلیت شبیه‌سازی هم‌زمان متغیرهای بیلان آب و عملکرد محصول مخصوصاً در حوضه‌های پیچیده، می‌تواند گزینه مناسبی برای این امر باشد. این مدل یک مدل مفهومی فیزیک- مبنا[۲] است (Devia *et al*., 2015) و برای شبیه‌سازی جریان سطحی، جریان بازگشتی، تبخیر و تعرق، رسوب، محصولات کشاورزی و آبیاری، آب زیرزمینی و انتقال آب طراحی شده است (Fadil *et al*., 2011; Gassman *et al*., 2007). این مدل نیمه توزیعی بوده

* نویسنده مسئول: a_moridi@sbu.ac.ir

1. SWAT
2. physically based

و هر زیر حوضه را به واحدهای هیدرولوژیکی تقسیم می‌نماید (Neitsch *et al*., 2011). گام زمانی مدل‌سازی در آن به‌صورت روزانه بوده و قادر است تا دوره بلندمدتی را شبیه‌سازی نماید (Golmohammadi *et al*., 2014). علاوه بر کاربردهایی که در زمینه مدل‌سازی جریان (Du *et al*., 2019; Lin *et al*., 2015; Thavhana *et al*., 2018)، رسوب (Vigiak *et al*., 2017; Yesuf *et al*., 2015)، پوشش برف (Grusson *et al*., 2015) داشته است، محققانی در سال‌های اخیر در زمینه مدل‌سازی تبخیر و تعرق و عملکرد محصول از آن استفاده نموده‌اند. Immerzeel *et al*. (2008) از این مدل برای شبیه‌سازی تبخیر و تعرق و عملکرد محصولات نیشکر، ذرت دانه‌ای و گندم زمستانه در یکی از حوضه‌های جنوب هند استفاده نمودند. Faramarzi *et al*. (2010) آب آبی و سبز حوضه‌های ایران را در این مدل شبیه‌سازی نموده و سپس به شبیه‌سازی عملکرد محصول گندم پرداختند. Bhuvaneswari *et al*. (2013) به شبیه‌سازی محصول برنج در یکی از حوضه‌های کشور هند پرداخته و نهایتاً اثرات سه الگوی مختلف آب و هوایی ال نینو[1]، لا نینیا[2] و نرمال را بر تولید محصول مورد بررسی قرار دادند. تحقیق دیگری توسط Garg *et al*. (2012) بر روی عملکرد و تبخیر و تعرق محصولات نیشکر، ذرت خوشه‌ای و ارزن در حوضه Bhima کشور هند صورت پذیرفت و سپس به کمک آن به تولید نقشه مکانی بهره‌وری آب پرداختند. Vaghefi *et al*. (2015) با کمک مدل SWAT به شبیه‌سازی تبخیر و تعرق و عملکرد محصولات حوضه کرخه در ایران پرداخته و سپس با کمک ترکیب آن با مدل تخصیص MODSIM به بررسی سناریوهای تغییر اقلیم و تغییر الگوی کشت در این حوضه پرداختند. Ahmadzadeh *et al*. (2016) درصدد برآمدند تا با کمک این مدل به مطالعه اثر نوع آبیاری با لحاظ نمودن دو حالت آبیاری غرقابی و آبیاری تحت‌فشار بر تولید محصول و راندمان مزرعه و حوضه بپردازند. در اکثر این مطالعات توانمندی مدل برای شبیه‌سازی تبخیر و تعرق و عملکرد محصول مورد تائید قرار گرفته است. اخیراً معدودی از محققان یک گام فراتر رفته و برای رسیدن به یک الگوی مناسب با بیشترین راندمان و کمترین هزینه، از مدل SWAT در ترکیب با الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده نمودند. Rafiee and Shourian (2016) در دشت آزادگان از حوضه کرخه در کشور ایران سعی کردند تا ابتدا تبخیر و تعرق و عملکرد محصولات مختلف را شبیه‌سازی نموده و سپس به کمک ترکیب این مدل با الگوریتم جستجوی هارمونی[3]، بهترین الگوی کشت را با توجه به میزان آب و زمین کشاورزی در دسترس برای حداکثر نمودن سود حاصل به دست آورند. در مطالعه‌ای دیگر در حوضه کرخه Fereidoon and Koch (2018) از ترکیب SWAT-LINGO-MODSIM بهره جسته و با کمک الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات[4] بهترین الگوی کشت برای آینده را در پنج دشت از این حوضه تحت شرایط تغییر اقلیم ارائه نمودند.

با توجه به تحقیقات انجام شده، در راستای بهینه‌سازی به کمک مدل SWAT در راستای تولید محصول، مطالعات کمی صورت پذیرفته و همین تعداد اندک نیز معطوف به یافتن الگوی کشت بهینه بوده‌اند. قطعاً این راهکار یکی از اقدامات مؤثر سازگاری در مواجهه با مسئله بحران آب مخصوصاً در شرایط آینده است. اما راهکارهای دیگری نیز وجود دارد که بایستی مورد توجه قرار گیرد و از جمله آن‌ها می‌توان قوانین جیره‌بندی را برشمرد. این راهکار می‌تواند کمک نماید تا با داشتن حجم مشخص آب در دسترس، به گونه‌ای آن را در طی ماه‌های مختلف تخصیص داد تا میزان تولید محصول به حداکثر میزان لازم برسد. رودخانه مهاباد که پس از تأمین نیاز آب زمین‌های کشاورزی در پایین‌دست، نیاز تالاب کانی برازان را تأمین می‌نماید و در نهایت به دریاچه ارومیه می‌ریزد، مثالی است که می‌توان با برنامه‌ریزی صحیح، تعامل مناسبی را بین اجزای نامبرده برای تداوم حیات برقرار نمود.

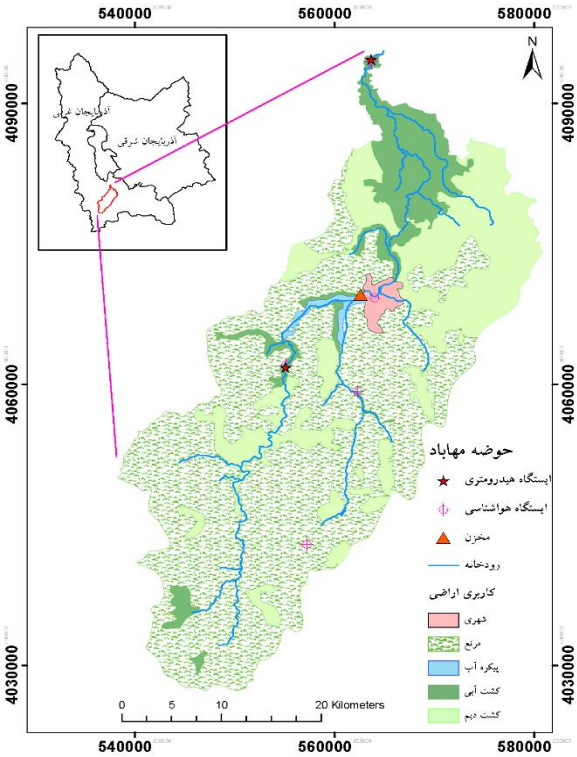
در این پژوهش ابتدا به کمک مدل SWAT میزان جریان و پس از آن تبخیر و تعرق و عملکرد محصول گندم شبیه‌سازی شده، سپس فرایند ترکیب آن با مدل بهینه‌ساز تشریح شده است و نمودار پرتو با دو هدف کمترین میزان برداشت آب برای آبیاری و بیشترین تولید محصول به دست آمده است.

داده‌ها و روش‌شناسی

منطقه مورد مطالعه

شکل ۱ موقعیت دشت مهاباد واقع در استان آذربایجان غربی و حوضه آبریز دریاچه ارومیه را نشان می‌دهد که پژوهش حاضر بر روی آن صورت پذیرفته است. در این منطقه دو ایستگاه هیدرومتری کوتر و گردیعقوب و همچنین مخزن سد مهاباد وجود دارد که مختصات و سال آماری آن‌ها در جدول (۱) آمده است. برای مدل‌سازی، منطقه به ۳۴ زیر حوضه و ۵۱۲ واحد هیدرولوژیکی تقسیم‌بندی شده است. در هر واحد هیدرولوژیکی میزان شیب، نوع کاربری اراضی و مشخصات خاک یکسان است که این واحدها، کوچک‌ترین واحد محاسباتی مدل SWAT را تشکیل می‌دهند.

1. El Niño
2. La Niña
3. harmony search
4. PSO



شکل ۱. موقعیت حوضه آبریز مهاباد

جدول ۱. موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه مهاباد مورد استفاده برای واسنجی و صحت‌سنجی جریان

نام ایستگاه	سال شروع آمار (میلادی)	سال پایان آمار (میلادی)	طول جغرافیایی (درجه- دقیقه- ثانیه)	عرض جغرافیایی (درجه- دقیقه- ثانیه)
کوتر	۱۹۷۲	۲۰۱۳	۴۵-۳۷-۰۰	۳۶-۴۲-۰۰
سد مهاباد	۱۹۷۱	۲۰۱۷	۴۵-۴۲-۰۰	۳۶-۴۵-۰۰
گردیعقوب	۱۹۸۹	۲۰۱۳	۴۵-۴۲-۰۰	۳۷-۰۰-۰۰

اطلاعات مورد نیاز و انجام شبیه‌سازی

اطلاعات هواشناسی مورد نیاز مدل از ایستگاه‌های موجود در منطقه استخراج شد. همچنین برای لایه رقومی کاربری اراضی، نقشه‌های پوشش گیاهی سازمان جهاد کشاورزی شهرستان مهاباد مورد استفاده قرار گرفته است. به همین ترتیب لایه خاک حوضه آبخیز به منظور تشکیل واحدهای هیدرولوژیکی و سایر شبیه-سازی‌های مرتبط، از نقشه خاک سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO–UNESCO global soil map) با اندازه سلولی ۵ کیلومتری استخراج گردیده است. سری زمانی ایستگاه‌های هیدرومتری و نیز سری زمانی ورودی به مخزن برای واسنجی و صحت‌سنجی مورد استفاده قرار گرفته شده است.

جدول ۲. اطلاعات استفاده شده و منبع دریافت آن‌ها

نوع اطلاعات	منبع دریافت	نوع اطلاعات	منبع دریافت
نقشه رقوم ارتفاعی (DEM) ۳۰ متری	سایت USGS https://earthexplorer.usgs.gov/	اطلاعات بارش و جریان	شرکت مدیریت منابع آب ایران
نقشه کاربری اراضی با دقت ۱۰۰۰ متر	وزارت جهاد کشاورزی (۲۰۰۷)	عملکرد محصول	وزارت جهاد کشاورزی
نقشه خاک با دقت ۱۰۰۰ متر	FAO Digital Soil Map of the World (1995)	تقویم آبیاری	نرم‌افزار NETWAT
اطلاعات دما	سازمان هواشناسی کل کشور		

برای شبیه‌سازی جریان، سال‌های ۱۹۹۷ تا ۱۹۹۹ میلادی برای گرم کردن[1]، سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۳ برای واسنجی و سال-های ۱۹۸۹ تا ۱۹۹۶ برای صحت‌سنجی مدل به‌صورت ماهانه در نظر گرفته شدند. در این منطقه به‌طور متوسط به میزان ۱۳۶۴۰ هکتار اراضی زراعی آبی وجود دارد که حدود ۲۸ درصد آن (۳۹۰۶ هکتار) را گندم آبی تشکیل داده است. سال ۲۰۱۳ برای واسنجی، سال ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲ برای صحت سنجی تبخیر- تعرق و عملکرد محصول گندم بکار گرفته شدند (جدول ۳). مطابق جدول در منطقه مهاباد برای کشت گندم آبی از ۱۰۰ کیلوگرم کود فسفاته و ۱۲۰ کیلوگرم کود اوره در هر هکتار استفاده می-شود (بر اساس اطلاعات جهاد کشاورزی شهرستان مهاباد). دوره آبیاری در این منطقه ده روز است. پارامترهای بکارگرفته شده برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی محصول و همچنین میزان عملکرد آن در جدول آورده شده‌اند.

جدول ۳. تقسیم‌بندی دوره زمانی برای شبیه‌سازی (دوره زمانی به میلادی بیان شده است)

فرایند شبیه‌سازی	دوره گرم کردن	دوره واسنجی	دوره صحت سنجی
جریان (ماهانه)	۱۹۹۷-۱۹۹۹	۲۰۰۰-۲۰۱۳	۱۹۸۹-۱۹۹۶
عملکرد گندم (سالانه)	-	۲۰۱۱-۲۰۱۲	۲۰۱۳

جدول ۴. مشخصات کشت گندم در منطقه مهاباد (بر اساس اطلاعات مستخرج از نرم‌افزار NETWAT برای دشت مهاباد و اطلاعات جهاد کشاورزی)

نام محصول	سطح زیر کشت (هکتار)	تاریخ کاشت	تاریخ برداشت	دوره آبیاری (روز)	نیاز کل خالص آبیاری (میلی‌متر)	کود دهی سالیانه (کیلوگرم بر هکتار)	
						فسفاته	اوره
گندم	۳۹۰۶	۱ آبان	۱۰ تیر	۱۰	۲۷۳	۱۰۰	۱۲۰

جدول ۵. مقدار نهایی پارامترهای بکار گرفته شده برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی و عملکرد محصول

نام پارامتر	BLAI	HVSTI	DLAI	FRGRW1	LAIMX1	FRGRW2	LAIMX2	T_{BASE}	T_{OPT}	EXT_COEF	BIO_E
مقدار نهایی	۴	۰/۴	۰/۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۴۵	۰/۹۵	۰	۱۸	۰/۶۵	۳۰

طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۳ میلادی به طور متوسط ورودی به مخزن سد مهاباد برابر ۹۷/۷ میلیون مترمکعب در سال، خروجی از آن برابر ۹۶/۸ میلیون مترمکعب در سال بوده است. برای شبیه‌سازی خروجی، مقادیر خروجی مشاهداتی به‌صورت ماهانه در قالب فایل ResMonthly.txt به مدل وارد شدند. کل میزان مصارف آن در سال برابر ۸۵ میلیون مترمکعب بوده که از این میزان ۶۷/۷ میلیون مترمکعب یعنی ۸۰ درصد از کل مصارف به کشاورزی در پایین‌دست مخزن مهاباد تخصیص یافته است.

الگوریتم بهینه‌سازی

الگوریتم تکامل تفاضلی[2] یک نسخه بهبود یافته از الگوریتم ژنتیک برای حل مسائل بهینه‌سازی است که توسط Stom and Price (1995) ارائه شده است. این الگوریتم دارای اپراتورهای مشابه الگوریتم ژنتیک است، اما عملکرد آن به جای تزویج[3] بیشتر بر جهش[4] استوار است. در اینجا، از الگوریتم تکامل تفاضلی توسعه-یافته برای حل مسائل چند هدفه استفاده شده که در آن از معیار غیرغالب[5] مورد استفاده در NSGAII در چارچوب الگوریتم تفاضلی، بهره گرفته شده است.

توابع هدف و قیود مسئله بهینه‌سازی

این مسئله به صورت تابع دو هدفه تعریف شده است که هدف اول بیشینه شدن میزان عملکرد محصول گندم است. هدف دوم کمینه نمودن میزان آبیاری است که در رابطه ۱ دیده می‌شود:

$$f1: \quad z1 = \max(YLD)$$
$$f2: \quad z2 = \min(IRR) \qquad \text{(رابطه ۱)}$$

در معادله فوق YLD عبارت است از متوسط سالیانه تولید محصول گندم بر حسب تن بر هکتار، IRR عبارت است از متوسط سالیانه میزان آبیاری بر حسب میلی‌متر بر هکتار است که به گیاه داده می‌شود. متغیر تصمیم در این مسئله منحنی فرمان آبیاری[6] است. میزان آبیاری تابع منحنی فرمان بوده که البته مدل SWAT بر اساس آب در دسترس به تأمین آبیاری می‌پردازد. اگر میزان آب در دسترس کمتر از آب تعیین شده در منحنی فرمان آبیاری

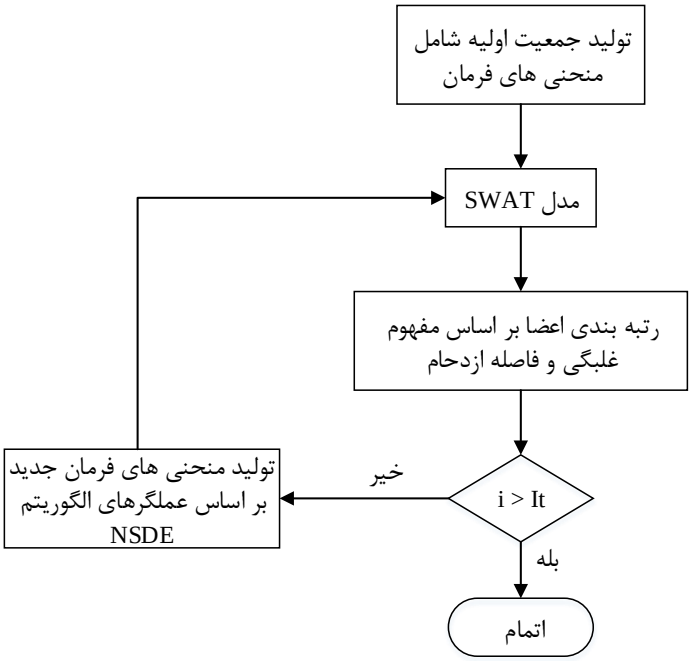
1. Warm up
2. Differential Evolution Algorithm
3. crossover
4. mutation
5. Non-dominance
6. Irrigation operation

باشد، مدل تنها آب در دسترس را عرضه می‌دارد. منبع مورد نظر اعم از مخزن، رودخانه، آبخوان عمیق یا کم‌عمق و یا منبع خارج از حوضه می‌باشد که البته در این مسئله، منبع تأمین آب از رودخانه می‌باشد. همچنین مطابق معادله (رابطه۲) میزان عملکرد محصول تابع میزان آبیاری، میزان و نوع کود مورد استفاده، میزان بارش، دما، جنس و تعداد لایه‌های خاک و ... است.

(رابطه۲)

$$YLD = f\left(IRR, SOL_layer, SOL_type, T, Fert, \ldots\right)$$

در معادله فوق IRR برابر میزان آبیاری، SOL_layer برابر لایه‌های خاک، Fert نوع و میزان کود، T دما می‌باشد.



شکل ۲. فلوچارت مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی

در این مسئله الگوریتم بهینه‌سازی NSDE با در نظر گرفتن ۱۰۰ عضو، جمعیت اولیه خود را تشکیل می‌دهد که هر یک از این عضوها عبارت‌اند از منحنی فرمان آبیاری برای ۱۴ سال که شامل سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۳ میلادی در منطقه مهاباد می‌باشد. سپس هر یک از این اعضا وارد مدل SWAT می‌شود که در فایل-های ورودی مدیریتی مربوط به واحدهای هیدرولوژیکی گندم قرار می‌گیرند. مدل SWAT اجرا شده و مقادیر عملکرد محصول و میزان آبیاری محاسبه شده که مقادیر متوسط آن‌ها در طول ۱۴ سال با واحدهای به ترتیب تن در هکتار و میلی‌متر در هکتار به عنوان خروجی به مدل بهینه‌ساز داده می‌شود. این روند تا ۱۰۰ مرحله و تا رسیدن به همگرایی نتایج ادامه می‌یابد. در هر مرحله نتایج با نتایج مرحله قبل سنجیده شده و جواب‌های قوی و مناسب بر اساس مفهوم غلبگی و ازدحام جایگزین جواب‌های ضعیف می‌شوند. بدین طریق در هر مرحله ۱۰۰ عضو برتر نگه داشته شده و بقیه کنار گذاشته می‌شوند. در مرحله نهایی بهترین نتایج باقی می‌مانند که جواب‌های نهایی مسئله را تشکیل می-دهند (شکل ۲).

نتایج و بحث

واسنجی و صحت سنجی مدل SWAT

نتایج حاصل از واسنجی و صحت سنجی جریان با استفاده از نرم‌افزار SWAT-CUP به کمک الگوریتم SUFI2 (Abbaspour, 2008) در ایستگاه‌های مورد سنجش در جدول ۳ ارائه شده است.

مطابق جدول ۳ مقادیر ضریب نش در مرحله واسنجی برای ایستگاه کوتر، ورودی مخزن سد مهاباد و نیز ایستگاه گردیعقوب به ترتیب برابر ۰/۵۶، ۰/۵۴ و ۰/۴۵ به دست آمد. مقادیر متناظر آن‌ها برای مرحله صحت‌سنجی عبارت‌اند از: ۰/۴۳، ۰/۴۶ و در نهایت ۰/۳۹. همچنین پارامتر p_factor بیانگر درصد قرارگیری داده‌های مشاهداتی در بین باند عدم قطعیت که هر چه به عدد یک نزدیک‌تر باشد ایده‌آل تر بوده و پارامتر r_factor برابر پهنای باند عدم قطعیت است که در حالت مطلوب میزان آن هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد بهتر است. همچنین روابط ضریب نش ساتکلیف و ضریب تعیین در زیر ارائه شده است:

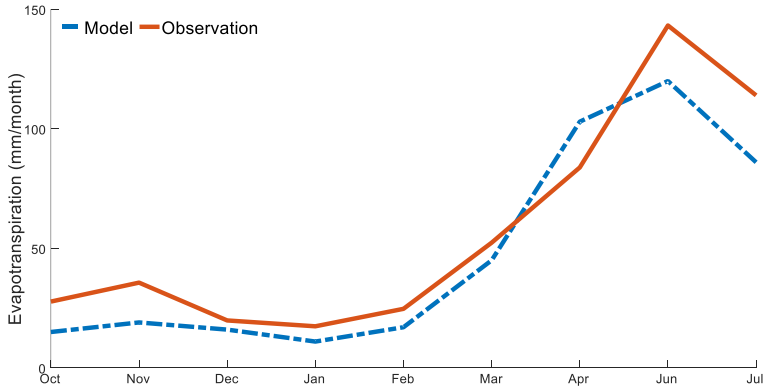
$$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{T}\left(Q_o^t - Q_m^t\right)^2}{\sum_{t=1}^{T}\left(Q_O^t - \overline{Q}_O\right)^2} \quad \text{(رابطه ۳)}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{T}\left(Q_o^t - \hat{Q}^t\right)^2}{\sum_{t=1}^{T}\left(Q_O^t - \overline{Q}_O\right)^2} \quad \text{(رابطه۴)}$$

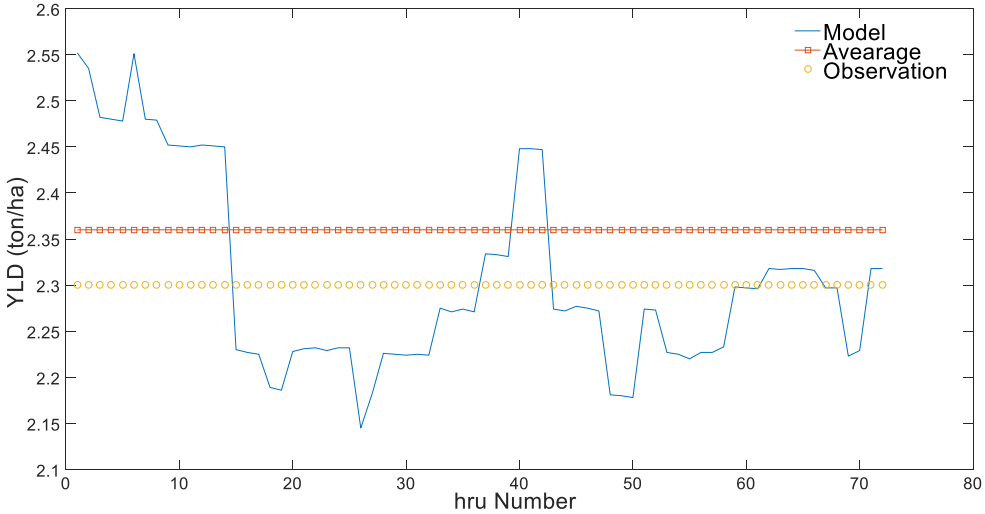
در این رابطه $\overline{Q}_O$ متوسط مقادیر مشاهداتی، Q_O^t مقدار مشاهداتی در زمان t، Q_m^t مقدار برآورد شده توسط مدل و $\hat{Q}^t$ مقدار پیش‌بینی شده توسط معادله بهترین خط رگرسیون بین مقادیر مشاهده‌ای و مدل شده در زمان t است.

جدول ۳. نتایج واسنجی و صحت سنجی جریان در حوضه مهاباد

نام ایستگاه	واسنجی (سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۳ میلادی)				صحت سنجی (سال ۱۹۹۲-۱۹۹۹)	
	p_factor	r_factor	NS	R^2	NS	R^2
کوتر	۰/۷۲	۰/۴۷	۰/۶۸	۰/۶۹	۰/۶۴	۰/۶۷
مخزن مهاباد	۰/۷	۰/۴۳	۰/۷۱	۰/۷۵	۰/۶۵	۰/۶۹
گردیعقوب	۰/۵۴	۰/۵۳	۰/۵۵	۰/۵۸	۰/۴۴	۰/۴۵



شکل ۳. مقایسه میزان تبخیر و تعرق شبیه‌سازی شده و مشاهداتی (برگرفته از نرم‌افزار NETWAT برای دشت مهاباد) برای سال ۲۰۱۳



شکل ۴. میزان تولید گندم در واحدهای هیدرولوژیکی مختلف (خط آبی رنگ) در مقایسه با متوسط گندم تولید شده (خط با مربعات توخالی قهوه‌ای رنگ) و همچنین مقدار مشاهداتی (دایره‌های توخالی زرد رنگ) گندم در سال ۲۰۱۳ میلادی

برای شبیه‌سازی عملکرد محصول، سال‌های ۲۰۱۱ الی ۲۰۱۳ میلادی که از نظر تولید محصول گندم دارای مقادیر مشاهداتی برابری بودند، در نظر گرفته شدند که در این میان سال ۲۰۱۳ برای واسنجی و سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲ میلادی برای صحت‌سنجی مورد استفاده قرار گرفتند. نمودار تبخیر و تعرق واقعی گندم برآورد شده مدل برای سال ۲۰۱۳ میلادی در شکل ۳ نشان داده شده است که با مقادیر مشاهداتی برگرفته از سند ملی آب مقایسه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود مدل توانسته است به‌خوبی میزان تبخیر- تعرق را شبیه‌سازی نماید. همچنین در شکل ۴ نتایج عملکرد محصول گندم در واحدهای

هیدرولوژیکی مختلف نشان داده شده است (خط آبی رنگ). مطابق با شکل، تولید گندم بین ۲/۱۵ الی ۲/۵۵ تن بر هکتار است. میزان متوسط عملکرد محصول حاصل از مدل که با کمک وزن‌دهی از طریق مساحت هر یک از واحدهای هیدرولوژیکی به دست آمده است برابر ۲/۳۶ تن بر هکتار است (خط قهوه‌ای رنگ با مربعات توخالی) که به مقدار مشاهداتی متناظر (دایره‌های توخالی زردرنگ) برابر ۲/۳ بسیار نزدیک است. لازم به ذکر است که محور افقی شکل، هر یک از واحدهای هیدرولوژیکی مختص به گندم را نشان می‌دهد که تعداد آن‌ها به ۷۲ عدد می‌رسد.

در بخش واسنجی عملکرد محصول، سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲ میلادی هر یک به ترتیب با تولید ۲/۱۳ و ۲/۲۲ تن بر هکتار گندم نشان دادند که مدل SWAT به‌خوبی توانسته است در این بخش کارایی قابل قبولی را از خود به نمایش بگذارد.

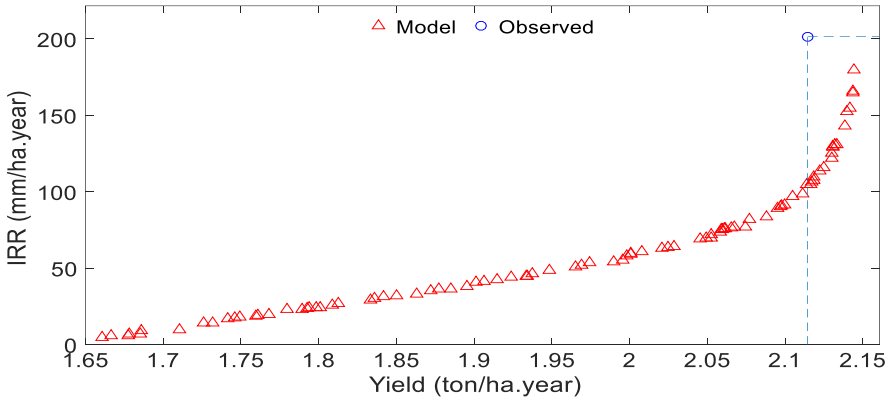
نتایج مدل بهینه‌سازی- شبیه‌سازی (NSDE-SWAT)

پس از انجام واسنجی و صحت سنجی، مدل برای چهارده سال اجرا گردید و الگوهای مختلف آبیاری به عنوان ورودی به مدل داده شد. با توجه به زمان‌بر بودن انجام آنالیز حساسیت روش بهینه‌سازی به دلیل زیاد بودن تعداد متغیرهای تصمیم، عملاً این کار مقدور نبوده و پارامترهای مدل بهینه‌سازی بر اساس مقادیر توصیه شده در سابقه تحقیق الگوریتم NSDE (Reddy and Kumar, 2006; Yazdi and Moridi, 2018; Yazdi *et al.*, 2017) انتخاب شده است. این مقادیر درجدول ۴ ارائه شده‌اند:

جدول ۴. مقادیر پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی مورد استفاده در این تحقیق

پارامتر	ضریب مقیاس (β)	احتمال تقاطع (P_c)	اندازه جمعیت (n_pop)	مقدار تکرار (max It)
مقدار	۰/۵	۰/۷	۱۰۰	۱۰۰

با به‌کارگیری این پارامترها نمودار پرتو استخراج گردید. در شکل ۵ نتایج حاصل از بهینه‌سازی با اهداف تولید متوسط سالانه محصول گندم (تن در هکتار) و میزان متوسط کل آبیاری سالانه (میلی‌متر در هکتار) به ازای الگوهای مختلف آبیاری نشان داده شده است که با وضعیت موجود منطقه مقایسه شده است. مطابق با اطلاعات جهاد کشاورزی، نیاز واقعی تبخیر و تعرق گندم آبی در شهرستان مهاباد برابر ۳۸۲ میلی‌متر است که به‌طور متوسط ۱۰۹ میلی‌متر آن از طریق بارش در منطقه تأمین می‌گردد. درصورتی که مابقی نیاز گندم آبی کاملاً تأمین شود، میزان عملکرد به بیش از ۴ تن بر هکتار خواهد رسید. در شرایط منطقه با توجه به توان آبدهی حوضه، میزان تولید محصول برابر ۲/۱۱۴ تن در هکتار است که حاصل از آبیاری ۲۰۱/۵ میلی‌متری در پای گیاه است.

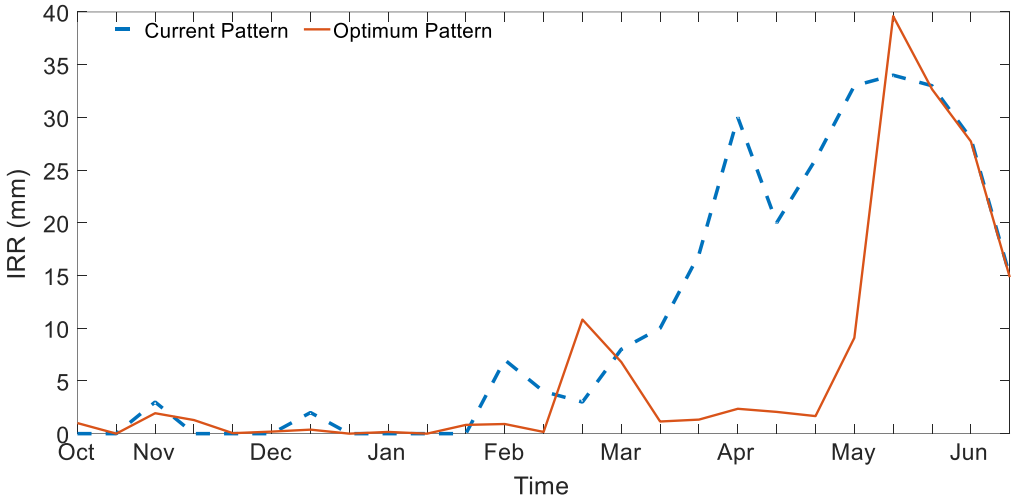


شکل ۵. نمودار پرتو با اهداف متوسط سالانه عملکرد محصول گندم (تن در هکتار) و متوسط سالانه میزان آبیاری (میلی‌متر در هکتار) حاصل از روش NSDE (مثلث‌های قرمز رنگ) و مقایسه آن با وضعیت موجود (دایره آبی رنگ)

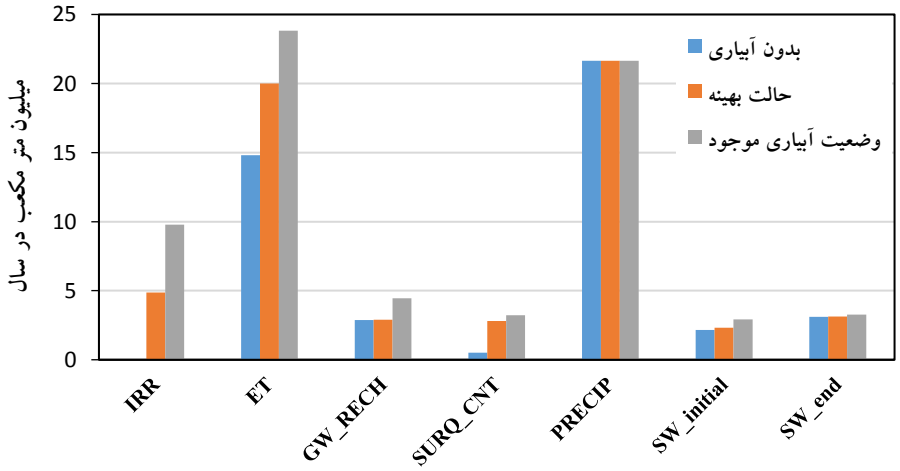
شکل ۶ مقایسه‌ای بین الگوی آبیاری در روش مرسوم (نقطه آبی رنگ دایره‌ای در شکل ۵) و الگوی آبیاری بهینه به کمک روش NSDE (نقطه‌ای از نمودار پرتو که روی محور افقی دارای مقداری برابر با نقطه مشاهداتی است) را به نمایش می‌گذارد. در این الگو در قیاس با الگوی آبیاری جاری، آب تخصیصی دهه سوم ماه دسامبر و فوریه تقریباً صفر شده است. در دهه اول ماه مارس میزان آب تخصیصی افزایش یافته، در دهه دوم آب حاصل از مدل بهینه و الگوی جاری تقریباً برابر بوده است. دهه سوم ماه مارس تا دهه اول ماه می آب تخصیص یافته توسط مدل بهینه در برابر آب تخصیص یافته به روش سنتی بسیار ناچیز است و عمده کاهش مصرف آب در همین محدوده زمانی توسط مدل بهینه صورت گرفته است. در دهه دوم می آب تخصیص یافته توسط مدل بهینه تقریباً تا نزدیک ۱۰ میلی‌متر افزایش یافته اما هنوز با میزان الگوی روش سنتی تفاوت قابل توجهی دارد. مدل بهینه در

دهه سوم ماه می میزان آب قابل توجهی را تخصیص می‌دهد که میزان آن بیشتر از آب تخصیصی روش مرسوم بوده و به عدد ۴۰ میلی‌متر می‌رسد. پس از آن اعداد پیشنهادی مدل بهینه در انطباق کامل با میزان تخصیص یافته در روش سنتی است. در روش الگوی آبیاری بهینه علیرغم اینکه تولید محصول برابر با روش مرسوم است (سالیانه ۲/۱۱۴ تن در هکتار)، تنها ۱۰۴/۵ میلی‌متر آب مصرف شده که به اندازه ۴۸٪ از روش سنتی کمتر است. با توجه به مساحت ۳۹۰۰ هکتاری اراضی تخصیص یافته به محصول گندم آبی در منطقه، سالانه می‌توان به طور متوسط معادل ۳/۸ میلیون مترمکعب آب کمتری به کشت گندم تخصیص داد.

مقایسه بین مؤلفه‌های بیلان هیدرولوژیکی دو الگوی آبیاری نشان داده شده در شکل ۶، در قیاس با حالت بدون آبیاری در شکل ۷ نشان داده شده است. هر دو حالت وضعیت آبیاری موجود و حالت بهینه آبیاری، میزان تولید محصول برابری دارند. در حالت آبیاری بهینه میزان آبیاری از ده میلیون مترمکعب در سال به پنج میلیون مترمکعب در سال کاهش یافته است. این میزان باعث شده است تا میزان تبخیر و تعرق به اندازه چهار میلیون مترمکعب کاهش یابد. میزان کاهش آبیاری در الگوی کشت بهینه البته سبب گردیده است تا میزان تغذیه آب زیرزمینی از ۴/۴۵ میلیون مترمکعب در سال به عدد ۲/۹۱ میلیون مترمکعب کاهش یافته و نیز تشکیل رواناب سطحی از میزان ۳/۲۳ به عدد ۲/۸ میلیون مترمکعب در سال تنزل یابد. میزان تغییر در رطوبت خاک بسیار اندک بوده است.



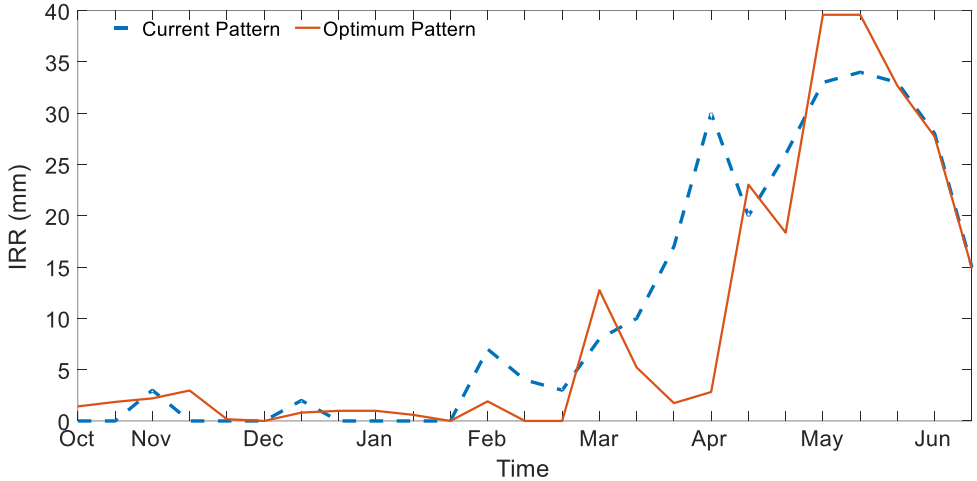
شکل ۶: مقایسه الگوی آبیاری موجود و الگوی آبیاری بهینه در شرایط تولید محصول برابر (نقطه بهینه: آبیاری ۱۰۴/۵ میلی‌متر، عملکرد ۲/۱۱۴ تن بر هکتار؛ الگوی جاری: آبیاری ۲۰۱/۵ میلی‌متر، عملکرد ۲/۱۱۴ تن بر هکتار)



شکل ۷: مؤلفه‌های بیلان هیدرولوژیکی تحت شرایط آبیاری مختلف (IRR: آبیاری، ET: تبخیر و تعرق، GW_RECH: تغذیه آب زیرزمینی، SURQ_CNT: رواناب سطحی، PRECIP: بارش، SW_initial: رطوبت اولیه خاک، SW_end: رطوبت خاک نهایی)

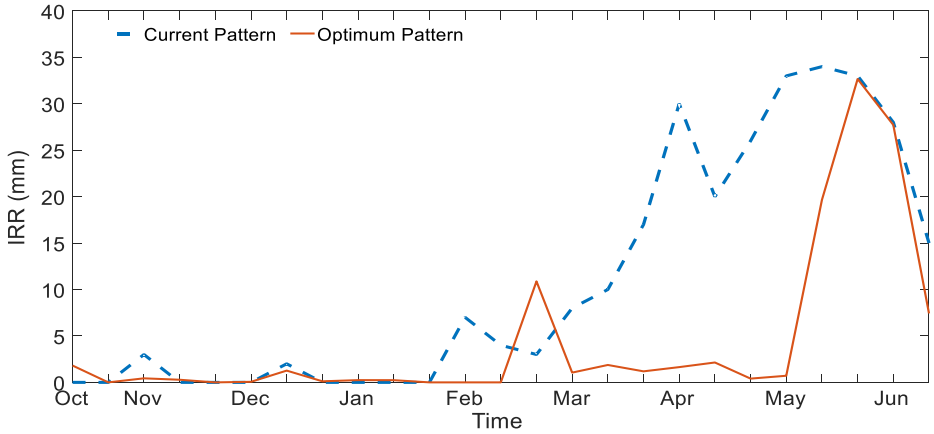
در حالت بدون آبیاری میزان تبخیر و تعرق سبز با توجه به میزان نزولات جوی برابر ۱۵ میلیون مترمکعب در سال بوده است که میزان عملکرد کمتر معادل ۱/۳۴ تن در هکتار داشته است. در این حالت بخش قابل توجهی از آب مازاد بارش سبب تغذیه آب زیرزمینی شده و سهم تشکیل رواناب سطحی بسیار ناچیز است.

شکل ۸ حالتی را نمایش می‌دهد که در آن مدل بهینه بیشترین میزان عملکرد محصول را ارائه می‌دهد. در این حالت علیرغم اینکه ۲۲/۳ میلی‌متر در هکتار نسبت به الگوی آبیاری جاری منطقه، به آب کمتری نیاز دارد، میزان تولید محصول گندم به میزان ۳۱ کیلوگرم در هکتار افزایش می‌یابد. تفاوت عمده‌ای که در این الگوی آبیاری جدید حاصل شده است این است که در دهه سوم ماه آوریل و ده‌های اول و دوم ماه می نیز میزان آبیاری به‌صورت قابل توجهی افزایش یافته است. علاوه بر آن نسبت به حالت قبل در ماه نوامبر نیز میزان آبیاری مقدار بیشتری را به خود اختصاص داده است. این الگو نسبت به الگوی نشان داده شده در شکل ۶ به میزان ۷۵/۳ میلی‌متر آب بیشتری را به خود اختصاص داده است.



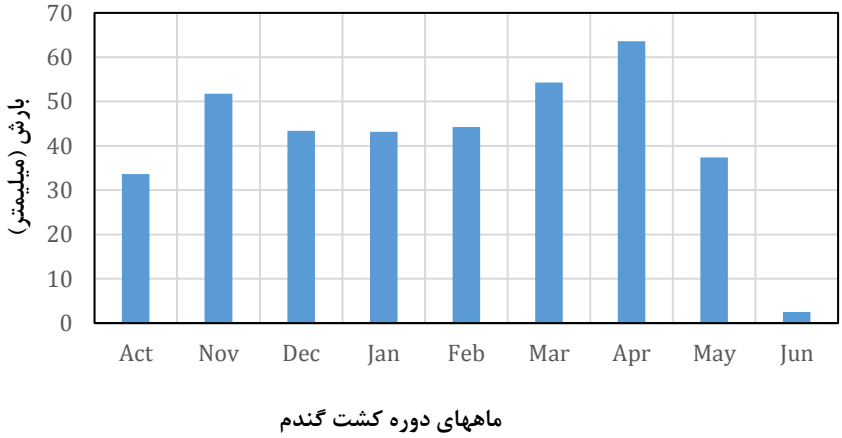
شکل ۸: مقایسه الگوی آبیاری موجود و الگوی آبیاری بهینه در شرایط بیشترین تولید محصول (نقطه بهینه: آبیاری ۱۷۹/۸ میلی‌متر، عملکرد ۲/۱۴۵ تن بر هکتار؛ الگوی جاری: آبیاری ۲۰۱/۵ میلی‌متر، عملکرد ۲/۱۱۴ تن بر هکتار)

در حالت دیگر شرایط کم آبیاری در نظر گرفته شده است (شکل ۹). مدل بهینه برای این حالت علاوه بر اینکه در برخی از تاریخ‌ها مقادیر اندکی را در نظر گرفته، در دهه اول ماه مارس و سپس در دهه سوم ماه می آبیاری را تخصیص داده است. در ماه ژوئن نیز نتایج توصیه شده توسط مدل تقریباً در انطباق مناسبی با آنچه در روش سنتی اتفاق می‌افتد قرار دارد. در این حالت میزان آب تخصیص یافته به گیاه تنها حدود یک‌سوم آب مورد نیاز گیاه در روش آبدهی به شیوه مرسوم است. با این وجود میزان عملکرد تنها به اندازه ۶۹ کیلوگرم در هکتار کاهش یافته و عملکرد محصول برابر ۲/۰۴۵ تن در هکتار در سال شده است.



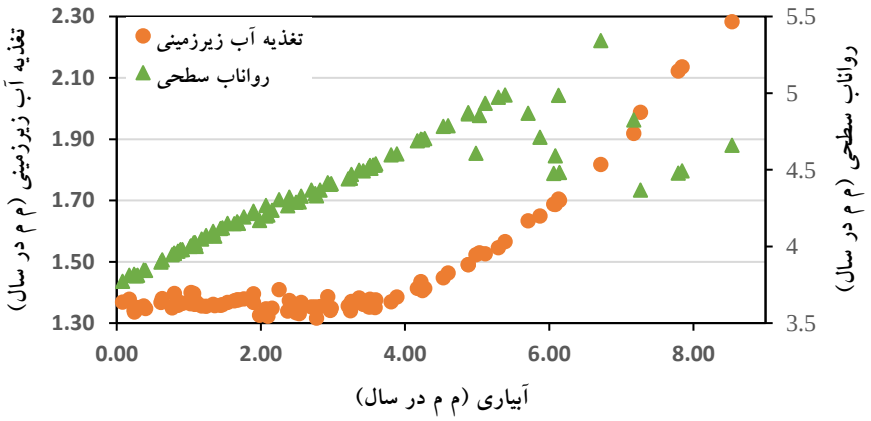
شکل ۹: مقایسه الگوی آبیاری موجود و الگوی آبیاری بهینه در شرایط کم آبیاری (تقریباً یک‌سوم آبیاری موجود) (نقطه بهینه: آبیاری ۶۹ میلی‌متر، ۲/۰۴۵ تن بر هکتار؛ الگوی جاری: آبیاری ۲۰۱/۵ میلی‌متر، عملکرد ۲/۱۱۴ تن بر هکتار)

از مقایسه الگوی آبیاری بهینه در حالت‌های مختلف دیده می‌شود که هم در حالت بیشترین آبیاری (شکل ۸)، هم در حالت آبیاری با شرایط تولید محصول برابر (شکل ۸) و هم در حالت کم آبیاری (شکل ۹)، تأکید مدل بهینه بر آبیاری در دهه اول یا دوم مارس هست. همچنین آبیاری در دهه دوم ماه می به بعد از اهمیت بسزایی در تولید محصول برخوردار است.



شکل ۱۰. متوسط بارش تجمعی ماهیانه ایستگاه سینوپتیک مهاباد مطابق با دوره کشت گندم طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۳ میلادی

شکل ۱۰ متوسط بارش تجمعی ماهانه ایستگاه سینوپتیک مهاباد برای سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۳ میلادی را نمایش می‌دهد. در هر سه حالت آبیاری در شرایط تولید محصول برابر با الگوی آبیاری رایج، پر آبیاری و کم آبیاری، عمده آبیاری مدل بهینه بر ماه‌های پایانی رشد گندم متمرکز شده است. چراکه در این دوران گندم مراحل بلوغ خود را طی نموده و نیاز آبی آن بالا است. حداکثر میزان بارندگی در ماه آوریل رخ داده است که در این ماه مدل بهینه، آب بسیار کمی را در حالت کم آبیاری (شکل ۹) و آبیاری متوسط (شکل ۶) برای محصول گندم در نظر گرفته است. در مقایسه با بارش بیش از ۶۰ میلی‌متر در ماه آوریل، در ماه مارس حدود ۵۵ میلی‌متر آب از طریق بارش در اختیار گیاه قرار می‌گیرد که برای این ماه مدل مقداری را برای آبیاری لحاظ می‌نماید. همچنین در ماه می میزان بارش نسبت به ماه آوریل نزدیک به ۲۵ میلی‌متر بارش کمتری را در اختیار گذاشته است. لذا عمده تمرکز مدل بهینه برای تخصیص آبیاری با هدف افزایش تولید متوجه این ماه است. ماه ژوئن اگرچه با تولید ۲/۵ میلی‌متر بارش، کمترین میزان بارش را داراست، نسبت به ماه می به آبیاری کمتری نیاز دارد. این امر با توجه به قرارگیری محصول در ماه پایانی عمر خود و با توجه به نزدیک شدن به مرحله برداشت قابل توجیه است. در حالت پرآبیاری (شکل ۸) اگرچه مدل بهینه میزان آبیاری را به اندازه ۷۵ میلی‌متر نسبت به حالت آبیاری متوسط (شکل ۶) افزایش می‌دهد، اما با توجه به همزمانی این افزایش با ماه آوریل که در آن بارش قابل توجهی صورت پذیرفته است، افزایش چشمگیری در میزان عملکرد مشاهده نمی‌گردد.



شکل ۱۱: بررسی تأثیر حجم آبیاری گندم آبی بر تولید رواناب سطحی و تغذیه آب زیرزمینی (کلیه واحدها براساس میلیون مترمکعب در سال می‌باشد)

در شکل ۱۱ میزان آبیاری، تغذیه آب زیرزمینی و رواناب سطحی که به رود اصلی اضافه می‌گردد، با هم مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. محور سمت راست تغییرات رواناب سطحی را نشان داده که با افزایش آبیاری از صفر تا ۱۰ میلیون مترمکعب، میزان آن از ۳/۵ تا ۵/۵ میلیون مترمکعب در سال عمدتاً به‌صورت خطی افزایش می‌یابد. همچنین میزان تغذیه در ابتدا تقریباً ثابت و پس از آن با افزایش میزان آبیاری روندی افزایشی را در پیش می‌گیرد. این در شرایطی است که میزان آبیاری در حالت بهینه که محصولی برابر با الگوی آبیاری وضع موجود را تولید نماید، برابر ۵ میلیون مترمکعب در سال است.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی برای تعیین منحنی فرمان آبیاری با اهداف حداکثرسازی تولید محصول گندم و تخصیص کمترین میزان حجم آبیاری در حوضه مهاباد، بکار گرفته شد. نتایج نشان داد که با نصف نمودن میزان آبیاری می‌توان میزان تولید محصول را حفظ نمود. همچنین با یک‌سوم نمودن میزان آبیاری (۶۹ میلی‌متر در هکتار) میزان تولید محصول به ۲/۰۴۵ تن در هکتار می‌رسد که تنها به اندازه ۶۹ کیلوگرم در هکتار کاهش خواهد یافت. با توجه به بارش مناسب منطقه، نتایج نشان دادند که عمده تأثیر آبیاری در دو ماه انتهایی دوره کشت گندم یعنی ماه‌های می و ژوئن است که در این ماه‌ها از میزان بارش کاسته می‌شود. همچنین محصول گندم در ماه مارس نیز نیازمند آبیاری است. با مصرف آب کمتر اما با توزیع زمانی مناسب آن می‌توان محصول برابر با حالت آبیاری مرسوم تولید نمود. همچنین تأثیر رویکرد مدیریت بهینه بر مؤلفه‌های بیلان آبی نشان دادند که به‌کارگیری الگوی آبیاری بهینه اثر کاهشی بر اجزای بیلان دارد. برای مثال برای حالتی که عملکرد، محصولی برابر با حالت الگوی آبیاری موجود ارائه می‌دهد، میزان تغذیه آب زیرزمینی و رواناب سطحی به ترتیب به اندازه ۳۴/۷ و ۱۳/۴ درصد کاهش می‌یابند.

REFERENCES

Abbaspour, C. K. (2008). SWAT Calibrating and Uncertainty Programs. *A User Manual. Eawag Zurich, Switzerland*.

Ahmadzadeh, H., Morid, S., Delavar, M., & Srinivasan, R. (2016). Using the SWAT model to assess the impacts of changing irrigation from surface to pressurized systems on water productivity and water saving in the Zarrineh Rud catchment. *Agricultural water management*, 175, 15-28.

Allen, M. R., & Ingram, W. J. (2002). Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle. *Nature*, 419(6) 903, 224

Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73-89.

Bhuvaneswari, K., Geethalakshmi, V., Lakshmanan, A., Srinivasan, R., & Sekhar, N. U. (2013). The impact of El Nino/Southern oscillation on hydrology and rice productivity in the Cauvery Basin, India: application of the soil and water assessment tool. *Weather and Climate Extremes*, 2, 39-47.

Devia, G. K., Ganasri, B., & Dwarakish, G. (2015). A review on hydrological models. *Aquatic Procedia*, 4, 1001-1007.

Du, F.-h., Tao, L., Chen, X.-m., & Yao, H.-x. (2019). Runoff Simulation Using SWAT Model in the Middle Reaches of the Dagu River Basin. In *Sustainable Development of Water Resources and Hydraulic Engineering in China* (pp. 115-126): Springer.

Fadil, A., Rhinane, H., Kaoukaya, A., Kharchaf, Y., & Bachir, O. A. (2011). Hydrologic modeling of the Bouregreg watershed (Morocco) using GIS and SWAT model. *Journal of Geographic Information System*, 3(04), 279.

Faramarzi, M., Yang, H., Schulin, R., & Abbaspour, K. C. (2010). Modeling wheat yield and crop water productivity in Iran: Implications of agricultural water management for wheat production. *Agricultural water management*, 97(11), 1861-1875.

Fereidoon, M., & Koch, M. (2018). SWAT-MODSIM-PSO optimization of multi-crop planning in the Karkheh River Basin, Iran, under the impacts of climate change. *Science of the Total Environment,630, 502-516*.

Garg, K. K., Bharati, L., Gaur, A., George, B., Acharya, S., Jella, K., & Narasimhan, B. (2012). Spatial mapping of agricultural water productivity using the SWAT model in Upper Bhima Catchment, India. *Irrigation and Drainage*, 61(1), 60-79.

Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H., & Arnold, J. G. (2007). The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. *Transactions of the ASABE*, 50(4), 1211-1250.

Golmohammadi, G., Prasher, S., Madani, A., & Rudra, R. (2014). Evaluating three hydrological distributed watershed models: MIKE-SHE, APEX, SWAT. *Hydrology*, 1(1), 20-39.

Grusson, Y., Sun, X., Gascoin, S., Sauvage, S., Raghavan, S., Anctil, F., & Sáchez-Pérez, J.-M. (2015). Assessing the capability of the SWAT model to simulate snow, snow melt and streamflow dynamics over an alpine watershed. *Journal of Hydrology*, 531, 574-588.

Immerzeel, W., Gaur, A., & Zwart, S. J. (2008). Integrating remote sensing and a process-based hydrological model to evaluate water use and

productivity in a south Indian catchment. *Agricultural water management*, 95(1), 11-24.

Kijne, J. W., Barker, R., & Molden, D. J. (2003). Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement (Vol. 1): Cabi.

Lin, B., Chen, X., Yao, H., Chen, Y., Liu, M., Gao, L., & James, A. (2015). Analyses of landuse change impacts on catchment runoff using different time indicators based on SWAT model. *Ecological Indicators*, 58, 55-63.

Madani, K., AghaKouchak, A., & Mirchi, A. (2016). Iran's socio-economic drought: challenges of a water-bankrupt nation. *Iranian Studies*, 49(6), 997-1016.

Maurer, E. P. (2010). The utility of daily large-scale climate data in the assessment of climate change impacts on daily streamflow in California.

Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). *Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009*. Retrieved from

Rafiee, V., & Shourian, M. (2016). Optimum multicrop-pattern planning by coupling SWAT and the harmony search algorithm. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(12), 04016063.

Reddy, M. J., & Kumar, D. N. (2006). Optimal reservoir operation using multi-objective evolutionary algorithm. *Water Resources Management*, 20(6),861-878.

Reder, A., Rianna, G., Vezzoli, R., & Mercogliano, P. (2016). Assessment of possible impacts of climate change on the hydrological regimes of different regions in China. *Advances in Climate Change Research*, 7(3), 169-184.

Rijsberman, F. R. (2006). Water scarcity: fact or fiction? *Agricultural water management*, 80(1-3), 5-22.

Stom, R., & Price, K. (1995). DE-a Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization Over Continuous Space. *International Computer Science Institute, Technical report TR-95-012*, 1-12.

Thavhana, M., Savage, M., & Moeletsi, M. (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*.

Vaghefi, S. A., Mousavi, S., Abbaspour, K., Srinivasan, R., & Arnold, J. (2015). Integration of hydrologic and water allocation models in basin-scale water resources management considering crop pattern and climate change: Karkheh River Basin in Iran. *Regional environmental change*, 15(3), 475-484.

Vigiak, O., Malagó, A., Bouraoui, F., Vanmaercke, M., Obreja, F., Poesen, J., . . . Grošelj, S. (2017). Modelling sediment fluxes in the Danube River Basin with SWAT. *Science of the Total Environment*, 599, 992-1012.

Yazdi, J., & Moridi, A. (2018). Multi-Objective Differential Evolution for Design of Cascade Hydropower Reservoir Systems. *Water Resources Management*, 32(14), 4779-4791.

Yazdi, J., Yoo, D., & Kim, J. (2017). Comparative study of multi-objective evolutionary algorithms for hydraulic rehabilitation of urban drainage networks. *Urban Water Journal*, 14(5), 483-492.

Yesuf, H. M., Assen, M., Alamirew, T., & Melesse, A. M. (2015). Modeling of sediment yield in Maybar gauged watershed using SWAT, northeast Ethiopia. *Catena*, 127, 191-205.