تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال سیزدهم، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۶
Volume 13, No. 3, Fall 2017 (IR-WRR)
۷۳-۸۸

برنامه‌ریزی الگوی کشت بهینه محصولات کشاورزی با استفاده از ترکیب مدل شبیه‌سازی SWAT و الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی هارمونی

وحید رفیعی[۱]، مجتبی شوریان[۲*] و جلال عطاری[۳]

چکیده

تعیین الگوی کشت بهینه محصولات کشاورزی و برنامه‌ریزی تخصیص آبیاری در شرایط کم آبی حاکم بر حوضه‌های آبریز کشور از اهمیت بسزایی برخوردار است. در این تحقیق با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی، یک مدل مبتنی بر تلفیق شبیه‌سازی روابط آب- خاک- گیاه و بهینه‌سازی تخصیص آبیاری و الگوی کشت محصولات کشاورزی ارائه شده است. بدین منظور، با استفاده از ترکیب مدل شبیه‌سازی SWAT و الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی هارمونی (Harmony Search) و توسعه مدل HS-SWAT، مسأله بهینه‌سازی الگوی کشت محصولات کشاورزی در دشت آزادگان در حوضه آبریز کرخه تحلیل شده است. مسأله در قالب دو سناریو حل گردیده که در سناریوی اول الگوی کشت بهینه با تابع هدف بیشینه سود خالص سالانه و قیود محدودیت حجم آب مصرفی و حداکثر زمین قابل کشت تعیین شده و در سناریوی دوم مسأله تخصیص بهینه آبیاری برای الگوی کشت فعلی مورد استفاده در دشت مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا، تأثیر تغییر الگوی کشت بر مؤلفه‌های بیلان آبی دشت از جمله میزان رواناب خروجی، نفوذ عمقی، میزان ذخیره آب در خاک و تبخیر- تعرق نیز بررسی شده است. با توجه به محدودیت‌های آب مصرفی و سطح اراضی قابل کشت اعمال شده در مدل، سود خالص سالانه به ترتیب در سناریوهای اول و دوم ۳۱۴٪ و ۲۳٪ نسبت به سناریو پایه (شرایط فعلی) افزایش نشان می‌دهد. همچنین حجم آب مصرفی در سناریو اول ۲۸٪ و در سناریو دوم ۴۹٪ نسبت به شرایط کنونی کاهش نشان می‌دهد. بر این اساس، پیاده‌سازی رویکرد مورد استفاده در این تحقیق در برنامه‌ریزی الگوی کشت محصولات کشاورزی می‌تواند ضمن افزایش سود ناشی از تولید محصولات منجر به کاهش میزان آب مصرفی در شرایط فعلی حاکم بر منابع آب کشور گردد.

کلمات کلیدی: الگوی کشت بهینه، برنامه‌ریزی تخصیص آبیاری، SWAT، الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی هارمونی.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۶/۱۳
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۶/۱/۱۵

۱- دانش آموخته 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 اسفند ۱۳۹۶ امکانپذیر است.

Optimum Crop Patterning by Integrating SWAT and the Harmony Search Optimization Algorithm

V. Rafiee [1], M. Shourian [2] and J. Attari[3]*

Abstract

This study suggests a structure which is based on developing a mathematical model for simulation of complex relationships among water, soil, plant, and climate along with the optimization of irrigation allocation and crop pattern planning. SWAT model was employed to bear the task of simulation and HS algorithm took care of the optimization of the water usage and crop pattern. Also, two scenarios were aimed to investigate this approach. In the first scenario (base), the crop pattern was the variable of the model while in the second one it was predefined as the existing situation in the target plain. The objective function of the coupled model was to maximize the net profit subject to the total available land and water constraints. Results obtained by the developed model showed that the net profit gained in the plain has a potential of increase up to 213% and 23% in the first and second scenario, respectively. The water consumption decreased 28% and 48% respectively for the first and second scenarios comparing to the present situation of the plain. Accordingly, the performance of the HS-SWAT model indicated its capability for solving the optimum crop pattern and irrigation planning problems.

***Keywords*:** Water Allocation Planning, Crop Pattern, SWAT, Harmony Search Algorithm.

Received: September 3, 2016
Accepted: April 4, 2017

1- M.Sc. Graduate, Department of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
2- Assistant Professor, Department of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: m_shourian@sbu.ac.ir
3- Assistant Professor, Department of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
*- Corresponding Author

Archive of SID
www.SID.ir

۱- مقدمه

محدودیت منابع آب موجود از یک سو و اهمیت تأمین نیاز غذایی به ویژه در کشورهای خشک و نیمه‌خشک نظیر ایران از سوی دیگر، لزوم توجه به مبحث مصرف بهینه آب در کنار الگوی مناسب کشت محصولات کشاورزی را بیش از پیش ضروری ساخته است. با توجه به اینکه سهم عمده‌ای از مصرف آب در کشور به بخش کشاورزی تعلق داشته و از طرف دیگر پراکنش نامناسب مکانی و زمانی بارندگی و شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک حاکم که منجر به وابستگی تولید محصولات کشاورزی به زراعت آبی گردیده، اهمیت برنامه‌ریزی بهینه الگوی کشت و تخصیص آب آبیاری را بیش از پیش نمایان نموده است. واضح است که مصرف بهینه آب در بخش کشاورزی منجر به برطرف شدن بخش عمده‌ای از مشکلات و محدودیتهای منابع آب در کشور خواهد شد. در این راستا، استفاده از مدل‌های پشتیبان در تصمیم‌گیری برای شبیه‌سازی رفتار آب، خاک و گیاه و برآورد میزان تولید محصولات کشاورزی و یا بهینه‌سازی الگوی کشت گیاهان و برنامه‌ریزی آبیاری در سالهای اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته است. مدلهای شبیه‌سازی- بهینه‌سازی بسیاری به منظور برنامه‌ریزی و مدیریت آبیاری در بخش کشاورزی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Lu et al., 2012). معمولاً از مدل‌های شبیه‌سازی برای پیدا کردن پاسخ بردارهای حل استفاده می‌شود. مدل‌های بهینه‌سازی نیز با در نظرگیری شرایط مسأله و ایجاد بردارهای حل، سعی در پیدا کردن بهترین پاسخ در میان بردارهای تولید شده دارند. با این حال پیدا کردن بهترین بردار حل با تکیه بر تکنیکهای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی به صورت جداگانه محتمل نمی‌باشد. بنابراین ترکیب مدلهای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی با یکدیگر برای حل مسائل پیچیده برنامه‌ریزی منابع آب ضروری می‌باشد (Singh and Panda, 2013). از مدل‌های شبیه‌سازی- بهینه‌سازی برای حل مسائل مختلف در دنیای واقعی استفاده شده است. Singh (2014) کاربردهای مدل‌های شبیه‌سازی- بهینه‌سازی در مسائل مدیریت و برنامه‌ریزی بهره‌برداری تلفیقی از منابع آبی را مرور کرد. Ashraf Vaghefi et al. (2015) مدلی ترکیبی برای مدیریت آبیاری ارائه دادند. ایشان مدل‌های شبیه‌سازی SWAT و MODSIM را با هم ترکیب کردند تا بتوانند اندرکنش بین الگوهای مختلف کشت و تغییرات اقلیمی را تحلیل نمایند. در این تلفیق نیاز خالص آبیاری، تولید محصولات و ورودی به مخزن توسط مدل SWAT شبیه‌سازی شده و تولید نیروی برق‌آبی و برنامه‌ریزی آبیاری توسط MODSIM صورت گرفته و نهایتاً مدلی بدست آمده که تلفات آب را به حداقل می‌رساند. همچنین در تحقیقی دیگر، Garcia-Vila and Fereres (2012) با ترکیب مدل Aqua-Crop و یک الگوریتم بهینه‌سازی اقتصادی، یک مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی ارائه کردند که هدف از آن رسیدن به تصمیمات درست مدیریتی در خصوص استفاده مؤثر و کارا از آب در بخش کشاورزی و تعیین الگوی کشت برای رسیدن به حداکثر سود ممکن بود.

در این تحقیق از الگوریتم فراکاوشی[1] جستجوی هارمونی[2] به منظور بهینه‌سازی الگوی کشت کشاورزی بهره گرفته شده است. الگوریتم‌های فراکاوشی به الگوریتم‌هایی گفته می‌شود که اولاً به یک شکل خاص از مسائل بهینه‌سازی محدود نمی‌شوند و ثانیاً با جستجو هوشمند همراه با حرکت تصادفی در فضای جستجوی مسأله، سعی در بهبود جواب‌های بدست آمده از تکرارهای پیشین دارند. این الگوریتم‌ها به عنوان ابزاری مفید برای حل مسائل پیچیده بهینه‌سازی امروزه مورد استفاده قرار می‌گیرند. از جمله الگوریتم‌های فراکاوشی پرکاربرد می‌توان به الگوریتم ژنتیک، تبرید شبیه‌سازی شده، کلونی مورچگان و دسته ذرات اشاره کرد. طبق مطالعات صورت گرفته (Geem et al., 2007) الگوریتم جستجوی هارمونی مزایای بسیاری نسبت به الگوریتم ژنتیک دارد. در این الگوریتم معادلات و محاسبات ریاضی کمتر و ساده‌تری نسبت به الگوریتم ژنتیک مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین در حالی که الگوریتم ژنتیک تنها دو بردار از والدین را برای تولید نسل جدید در نظر می‌گیرد، در الگوریتم جستجوی هارمونی تمام بردارهای موجود برای تولید بردارهای جدید استفاده می‌شوند. Geem et al. (2006) مقایسه‌ای در زمینه طراحی بهینه شبکه توزیع آب بین الگوریتم‌های جستجوی هارمونی و ژنتیک انجام دادند که الگوریتم جستجوی هارمونی در مقایسه با الگوریتم ژنتیک در این مورد عملکرد بهتری از خود نشان داد. در تحقیق دیگری Geem and Cho (2011) با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی بهره‌برداری بهینه از یک سیستم چند مخزنه برای تولید نیروی برق آبی را مورد بررسی قرار دادند. Cisty (2008) برای واسنجی خودکار یک مدل شبیه‌سازی آبیاری از الگوریتم جستجوی هارمونی استفاده نمود. Ayvaz (2009) با تلفیق مدل شبیه‌سازی MODFLOW و الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی هارمونی به مدلی تلفیقی دست یافت که تابع هدف آن را بیشینه کردن حجم پمپاژ آب آبخوان در کنار حداقل‌سازی هزینه پمپاژ در نظر گرفت.

در تحقیق حاضر، با استفاده از یک رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی که در آن مدل شبیه‌سازی SWAT و الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی هارمونی ترکیب شده، مسأله تخصیص بهینه آب آبیاری و تعیین الگوی کشت کشاورزی در دشت آزادگان مورد بررسی قرار گرفته است. مدل SWAT مدلی نیمه توزیعی بوده که قادر به شبیه‌سازی روابط آب،

Archive of SID
www.SID.ir

خاک، اقلیم و گیاه است. این مدل توانایی شبیه‌سازی یک حوضه آبریز در مقیاس‌های مختلف و با مدیریتهای متنوع را دارا می‌باشد. همچنین از الگوریتم جستجوی هارمونی به منظور تخصیص آب آبیاری در بخش کشاورزی بهره گرفته شده است. بدین منظور تابع هدف مدل مشتمل بر سود و هزینه سیستم تعریف شده که سود آن شامل فروش محصولات تولیدی و هزینه آن دربرگیرنده هزینه‌های تولید و آب مصرفی است. متغیرهای تصمیم مسأله میزان آب تخصیص یافته به الگوی کشت در هر دوره آبیاری و سطح زیر کشت محصولات کشاورزی می‌باشند. بر اساس بررسی‌های انجام شده بر روی سوابق تحقیق، نوآوریهای تحقیق حاضر را می‌توان استفاده از یک رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی کارآمد با ترکیب مدل نیمه توزیعی SWAT برای محاسبه میزان تبخیر- تعرق گیاهان و تولید محصولات کشاورزی و یک الگوریتم فراکاوشی جهت بهینه‌سازی آب آبیاری و سطح زیر کشت به همراه استفاده توأم از داده‌های تبخیر- تعرق و تولید محصولات کشاورزی برای واسنجی مدل و استفاده از الگوریتم نوین جستجوی هارمونی برای حل این مسأله بهینه‌سازی نام برد.

۲- مواد و روشها

۲-۱- مدل شبیه‌سازی SWAT

مدل SWAT مدلی جامع برای شبیه‌سازی فرآیندهای مختلف درون حوضه می‌باشد و در مرکز تحقیقات کشاورزی آمریکا توسعه داده شده است. هدف اصلی در این مدل، پیش‌بینی اثر اقدامات مدیریتی روی کمیت و کیفیت آب در حوضه‌های مختلف و پیچیده، با شرایط متنوع خاک و پوشش گیاهی در دراز مدت است. قابل ذکر است که از این مدل می‌توان در مقیاس‌های کوچک، بزرگ و حتی قاره‌ای برای شبیه‌سازی متغیرهای مورد نظر استفاده کرد (Gassman et al., 2007). مدل SWAT مدلی نیمه توزیعی[۳] بوده و به جای استفاده از روابط رگرسیونی در برقراری ارتباط بین ورودی و خروجی، فرآیندهای فیزیکی مربوط به حرکت آب، رسوب، رشد گیاه، سیکل مواد غذایی در خاک و غیره را با استفاده از ورودی‌هایی مانند داده های اقلیمی، خصوصیات خاک، توپوگرافی و نوع پوشش اراضی، شبیه‌سازی می‌نماید. مدل SWAT قادر به شبیه‌سازی فرآیندهای گوناگون در سطح حوضه می‌باشد و برای شبیه‌سازی، ابتدا حوضه مورد نظر را به چند زیر حوضه تقسیم می‌کند. این روش در مواردی که حوضه از چندین نوع کاربری اراضی و خاک تشکیل شده باشد، مفید می‌باشد. هر زیر حوضه نیز بسته به میزان تنوع به چند قسمت دیگر به نام واحد هیدرولوژیکی یکسان HRU[۴] تقسیم می‌شوند. این واحدها قسمت های درون هر زیر حوضه هستند که دارای نوع خاک، کاربری اراضی و شیب یکسانی هستند (Faramarzi et al., 2010). در این تحقیق نیز از مدل SWAT برای شبیه‌سازی روابط آب-خاک- گیاه- اقلیم در مقیاس مزرعه‌ای استفاده شده است.

۲-۲- الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی هارمونی

به منظور توضیح الگوریتم جستجوی هارمونی (Geem et al., 2001) لازم است تا روند ایجاد یک قطعه موسیقی ایده‌آل توسط یک موسیقی دان حرفه‌ای بررسی شود. زمانی که یک موسیقی دان در تلاش برای آفرینش یک قطعه موسیقی است، دو گزینه را در پیش روی خود دارد: مورد اول نواختن یک نغمه و موسیقی معروف دقیقاً به همان ترتیبی که در ذهن موسیقی دان است. دوم نواختن قطعه موسیقی شبیه به یک موسیقی معروف ولی با تغییر دادن جزئی آن چیزی که وجود دارد و در نهایت ایجاد یک قطعه موسیقی کاملا جدید با نت های متفاوت. عملکرد الگوریتم جستجوی هارمونی نیز مشابه عملکرد موسیقی دان برای تولید موسیقی دلنواز است. برای واضح‌تر شدن این موضوع اجزا و مراحل الگوریتم جستجوی هارمونی را به صورت قدم به قدم مورد بررسی قرار داده می‌شود ولی پیش از توضیح مراحل بهینه‌سازی لازم است تا تعریفی از پارامترهای این الگوریتم ارائه شود. در معادلات این الگوریتم، N تعداد متغیرهای تصمیم، X متغیر تصمیم، HM[۵] حافظه هارمونی یا ماتریس پاسخها،HMS[۶] ابعاد ماتریس پاسخ، HMCR[۷] احتمال انتخاب متغیر از حافظه هارمونی، PAR[۸] احتمال اعمال تغییر گام (تغییر مقدار متغیر) و BW[۹] دامنه تغییرات متغیرهای تصمیم که بستگی به اندازه متغیر داشته و بین ۱۰٪ تا ۳۰٪ قدر مطلق اندازه متغیر تصمیم در نظر گرفته می‌شود. مراحل بهینه‌سازی در الگوریتم جستجوی هارمونی به شرح زیر می‌باشد:

۱- آماده‌سازی الگوریتم: پیش از شروع عملیات بهینه‌سازی لازم است تعداد متغیرهای تصمیم (N)، بازه تغییرات متغیرهای تصمیم، تعداد پاسخهایی که باید ذخیره شود یا همان تعداد ردیفهای ماتریس حافظه (HMS)، تابع هدف و پارامترهای آن و PAR، HMCR، BW مقداردهی اولیه شوند.

۲- ایجاد ماتریس حافظه یا ماتریس بردارهای پاسخ ها: در ابتدای بهینه‌سازی لازم است که این ماتریس با بردارهای پاسخهای تصادفی و به تعداد HMS پر شود. بدین معنی که در ابتدای بهینه‌سازی به تعداد HMS بردار پاسخ تصادفی ایجاد شده و هر بردار پاسخ ایجاد شده با استفاده از تابع هدف f(x) برازش داده می‌شود تا ارزش هر بردار پاسخ بدست آورده شود.

Archive of SID
www.SID.ir

$$HM=\begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_{N-1}^1 & x_N^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_{N-1}^2 & x_N^2 \\ & & \vdots & & \\ x_1^{HMS-1} & x_2^{HMS-1} & \dots & x_{N-1}^{HMS-1} & x_N^{HMS-1} \\ x_1^{HMS} & x_2^{HMS} & \dots & x_{N-1}^{HMS} & x_N^{HMS} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} f(x^1) \\ f(x^2) \\ \cdot \\ \cdot \\ f(x^{HMS-1}) \\ f(x^{HMS}) \end{bmatrix} \quad (۱)$$

۳- بهبود بردارهای پاسخ: در این مرحله مقادیر بردارها در HM با استفاده از عملگرهای الگوریتم بهبود می‌یابد. برای ایجاد تغییر در مقدار متغیر i ام از بردار j ام، ابتدا یک عدد تصادفی بین صفر و یک تولید می‌شود. این عدد تصادفی با HMCR مقایسه می‌شود؛ اگر کوچکتر از آن باشد مقدار متغیر ردیف i ام و ستون j ام از ماتریس HM انتخاب می‌شود. چنانچه بزرگتر باشد یک مقدار تصادفی برای آن انتخاب می‌شود. چنانچه از ماتریس حافظه یک مقدار انتخاب شده باشد، عدد تصادفی دیگری تولید می‌گردد و با PAR مقایسه می‌شود، در صورتی که عدد تصادفی کوچکتر از PAR باشد، مقدار متغیر با استفاده از معادله (۲) بروزرسانی می‌شود.

$$X_{new}=X_{old}+bw\times\varepsilon \quad (۲)$$

که در آن X_{old} مقدار متغیر ذخیره شده در HM و X_{new} مقدار جدید متغیر و ε عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در محدوده [۱ -۱] می‌باشد.

۴- بروزرسانی ماتریس حافظه: هارمونی تولید شده در گام سوم بعد از برازش با تابع هدف، با بدترین هارمونی (بردار پاسخ) موجود در HM مقایسه می‌گردد. در صورت بهتر بودن از بدترین هارمونی موجود در HM، هارمونی جدید جایگزین هارمونی قبلی می‌شود.

۵- شرط توقف: در صورت عدم بهبود در ماتریس حافظه بعد از یک تعداد تکرار مشخص، الگوریتم بهینه‌سازی متوقف می‌شود. ولی در صورت بهبود، دو مرحله ۳ و ۴ تکرار می‌شود و الگوریتم به مرور به مقدار بهینه نزدیکتر شده و جوابهای مسأله بهبود می‌یابد.

برای بهبود کارایی الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی هارمونی، تغییراتی در این الگوریتم اعمال شده است که بعنوان نمونه می‌توان به Mahdavi et al. (2007) اشاره نمود که به جای پارامترهای ثابت PAR و BW از پارامترهای متغیر استفاده کرده است. معادلات (۳) تا (۵) نحوه تغییر این پارامترها را نشان می‌دهد.

$$PAR(iter)=PAR_{min}+\frac{PAR_{max}-PAR_{min}}{maxiter}\times iter \quad (۳)$$

$$BW(iter)=BW_{max}\times\exp(c\times iter) \quad (۴)$$

$$c=\frac{Ln\left(\frac{BW_{min}}{BW_{max}}\right)}{maxiter} \quad (۵)$$

که در آنها، PAR_{max} حداکثر احتمال عملگر تغییر گام، PAR_{min}حداقل احتمال عملگر تغییر گام، BW_{max}:حداکثر پهنای باند، BW_{min}:حداقل پهنای باند، maxiter: تعداد کل تکرارهای الگوریتم و iter: شماره تکراری است که الگوریتم در آن قرار دارد. در این روش مقدار PAR (احتماال تغییر در متغیرهای ماتریس حافظه) در ابتدای الگوریتم کم ولی اندازه تغییر متغیر انتخابی زیاد است. هر چقدر الگوریتم پیش می‌رود مقدار iter/maxiter به عدد ۱ نزدیک تر شده و در انتهای الگوریتم مقدار PAR زیاد شده و به حداکثر مقدار خود می‌رسد. در این حالت اندازه تغییر در متغیر انتخابی کم می‌شود. در واقع در ابتدا مقدار تغییر در متغیر انتخاب شده زیاد بوده ولی احتمال انجام آن کم است. با پیشروی الگوریتم و مشخص شدن فضای مسأله که جواب بهینه در آن قرار دارد، مقدار تغییر در متغیر انتخاب شده کم ولی احتمال انجام آن زیاد است. شکل ۱ روندنمای الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی هارمونی را نشان می‌دهد.

۲-۳- منطقه مطالعاتی

از نظر تقسیمات کشوری، دشت آزادگان در حوضه آبریز کرخه در استان خوزستان و در جنوب غرب ایران قرار دارد. این منطقه دارای وسعت ۲۸۰۰۰ هکتار است که ۲۱۰۰۰ هکتار از آن قابل کشت است و از جمله مناطق مهم کشاورزی در جنوب کرخه به شمار می‌رود. شکل ۲ موقعیت حوضه آبریز کرخه را در نقشه ایران و موقعیت دشت آزادگان، ایستگاه سینوپتیک حمیدیه و سد کرخه را در حوضه آبریز کرخه نشان می‌دهد. عمده‌ترین محصولات کشاورزی در این دشت شامل گندم، جو، خیار، گوجه فرنگی، ذرت، برنج و لوبیا است. زمان کاشت و برداشت این محصولات بر اساس سند ملی آب ایران (National Water Document, 2000) تنظیم شده که در جدول ۱ ارائه شده است. قیمت آب به طور میانگین برای سال‌های ۸۲-۸۵ برابر ۶۶۴ ریال بوده که به همراه قیمت فروش محصولات از گزارش وزارت نیرو در مورد وضع کرخه در همان سال استخراج شد. شکل ۳ نیز متوسط بارش ماهانه را برای سالهای شبیه‌سازی (۱۹۹۸ تا ۲۰۰۴) نشان می‌دهد.

۲-۴- شبیه‌سازی و واسنجی مدل SWAT در دشت آزادگان

با ورود اطلاعات مورد نیاز برای دشت آزادگان، مدل شبیه‌سازی تبخیر- تعرق و میزان تولید محصولات کشاورزی منطقه تهیه شده است. اولین گام به منظور اطمینان از صحت عملکرد مدل، واسنجی پارامترهای مهم و مؤثر در محاسبات می‌باشد. مدل SWAT را در هر منطقه بر اساس اطلاعات اندازه‌گیری شده مرتبط با نتایج قابل استخراج از مدل می‌توان واسنجی کرد.

Archive of SID
www.SID.ir

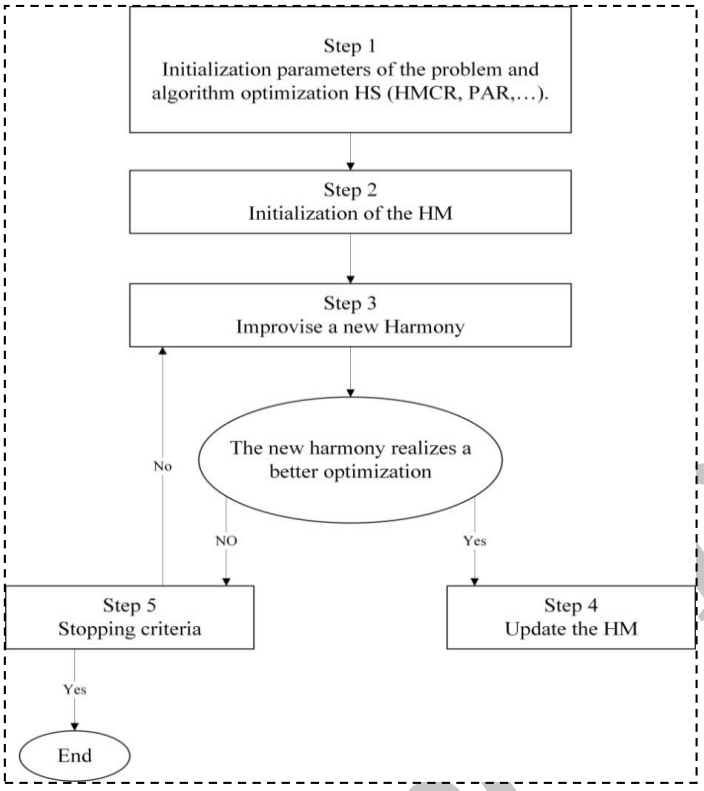

Fig. 1- Harmony Search algorithm

شکل ۱- روندنمای الگوریتم جستجوی هارمونی

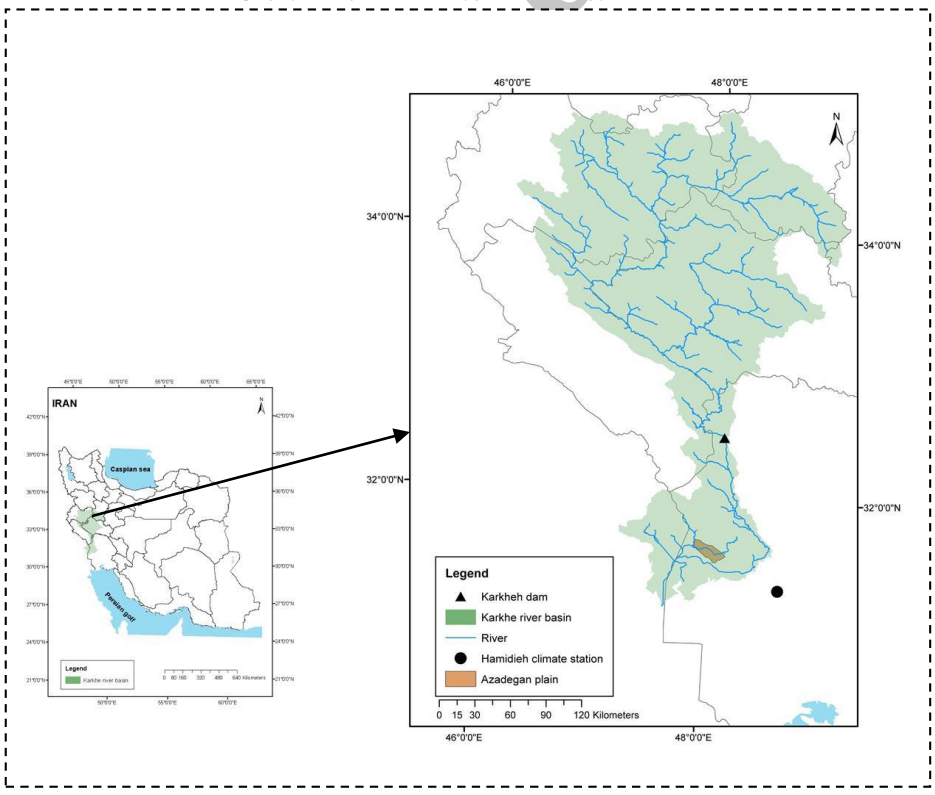

Fig. 2- Location of the Azadegan plain, Hamidieh weather station and Karkheh dam, Khuzestan Province, Iran

شکل ۲- موقعیت حوضه آبریز کرخه، دشت آزادگان، ایستگاه هواشناسی حمیدیه و سد کرخه

www.SID.ir

Table 1. Characteristics of agricultural crops in the Azadegan plain (IWPC, 2010)
جدول ۱- مشخصات محصولات کشاورزی در دشت ازادگان (IWPC, 2010)

Crop	Planting (date)	Harvest and Kill (date)	Crop Season Length (day)	Market Price (Rials/Kg)
Wheat	1-Dec	20-May	170	2066
Barley	1-Dec	10-May	160	1844
Tomato	1-Dec	20-Apr	140	1758
Corn	20-Jul	20-Nov	120	1928
Rice	10-Jul	20-Nov	130	6333
Cucumber	10-Feb	10-Jun	120	1534
Bean	20-Jul	20-Nov	120	3423

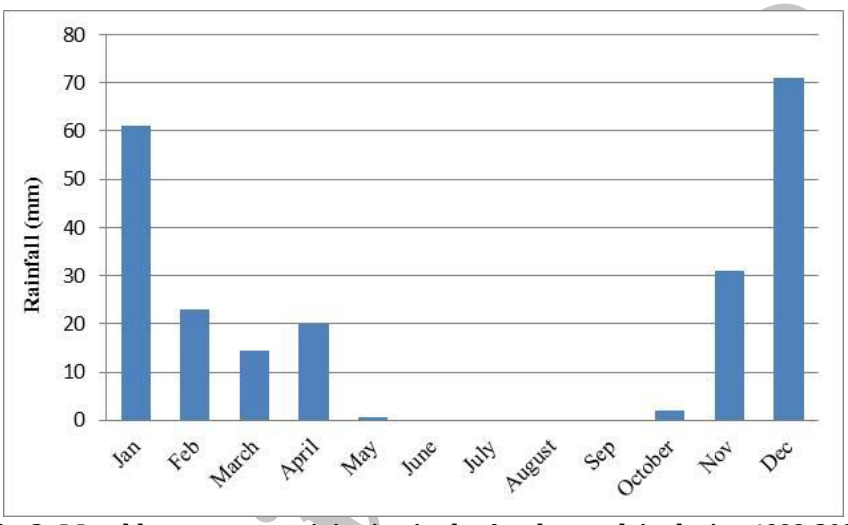

Fig. 3- Monthly average precipitation in the Azadegan plain during 1998-2004
شکل ۳- متوسط بارش ماهانه در دشت آزادگان حد فاصل سالهای ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۴

در این تحقیق با توجه به نقش مهم تولید محصولات و میزان تبخیر- تعرق واقعی محصولات، واسنجی مدل بر اساس مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی برای این دو متغیر انجام شده است. قابل ذکر است که در دشت آزادگان ایستگاهی برای اندازه‌گیری رواناب رودخانه وجود نداشته و لذا امکان واسنجی مدل بر اساس رواناب سطحی فراهم نمی‌باشد.

با این وجود، سوابق تحقیق نشان می‌دهند که مدل SWAT برای حوضه‌های بدون ایستگاه اندازه‌گیری رواناب نیز نتایج قابل قبولی را نشان می‌دهد. در ابتدا جهت واسنجی میزان محصول و تبخیر- تعرق واقعی محصولات، لازم است تا پارامترهای تأثیر گذار بر آنها حساسیت‌سنجی شده و مهمترین پارامترها انتخاب شوند. در بین پارامترهای گیاهی تعریف شده در مدل SWAT برخی از پارامترها از اهمیت و تغییر پذیری بیشتری برخوردار هستند که بایستی مقادیر آنها مطابق با واقعیات منطقه مطالعاتی تنظیم شود. مقادیر این پارامترها برای هر محصول منحصر به فرد است. انتخاب این پارامترها در وهله اول براساس تحلیل حساسیت موجود در SWAT-CUP و الگوریتم SUFI-2 انجام شده است. واسنجی برای یک به یک محصولات به صورت جداگانه و بر اساس مقادیر ارائه شده تبخیر- تعرق ماهانه از سند ملی آب و تولید محصول گزارش شده در گزارش وزارت نیرو (۱۳۹۱) تعیین شدند. تابع هدف برای واسنجی مدل SWAT در این تحقیق ریشه میانگین مربع خطا[۱۰] تعریف شده که با توجه به واسنجی مدل برای تبخیر- تعرق واقعی و تولید محصول مطابق معادله (۶) تعریف می‌شود.

(۶)

$$RMSE = W_1\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(ET_i^{Obs.}-ET_i^{Sim.}\right)^2} + W_2\sqrt{\left(Y^{Obs.}-Y^{Sim.}\right)^2}$$

که در آن $Y^{Obs.}$ و $Y^{Sim.}$ به ترتیب میزان محصول مشاهده شده و شبیه‌سازی شده می‌باشند. $ET_i^{Obs.}$ و $ET_i^{Sim.}$ به ترتیب برابر میزان تبخیر- تعرق واقعی ماهانه شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده می‌باشد.

www.SID.ir

n تعداد ماههای شبیه‌سازی مربوط به محصول مورد نظر می‌باشد. ضرایب W_1 و W_2 به ترتیب وزن متغیرهای تبخیر- تعرق و میزان محصولات می‌باشند. با استفاده از سعی و خطا، مقادیر W_1 برابر ۱ و W_2 برابر ۲۵ در نظر گرفته شد. مقادیر نهایی پارامترهای تأثیر گذار بر تولید محصول و تبخیر- تعرق واقعی محصولات بعد از واسنجی در جدول ۲ ارائه شده است.

در جدول ۲، BIO_E: بهره‌وری استفاده از تابش و یا نسبت زیست توده[11] به انرژی، BLAI: حداکثر پتانسیل شاخص سطح برگ[12]، DLAI: کسری از فصل رشد که سطح برگ شروع به کاهش می‌کند، FRGRW1: کسری از فصل رشد گیاه و یا کسری از تعداد کل واحدها گرمایی پتانسیل متناظر با نقطه اول توسعه مطلوب سطح برگ، FRGRW2: کسری از فصل رشد گیاه و یا کسری از تعداد کل واحدها گرمایی پتانسیل متناظر با نقطه دوم توسعه سطح برگ مطلوب، HEAT_UNITS: تعداد کل واحدهای گرمایی که گیاه برای رسیدن به بلوغ نیاز دارد، HVSTI: شاخص برداشت، LAIMX1: کسری از حداکثر شاخص سطح برگ مربوط به نقطه اول بر روی منحنی توسعه مطلوب سطح برگ و LAIMX2: کسری از حداکثر شاخص سطح برگ مربوط به نقطه دوم بر روی منحنی توسعه مطلوب سطح برگ می‌باشد. با انجام عملیات واسنجی، مقادیر محاسباتی و اندازه‌گیری شده متغیرهای میزان محصولات و همچنین تبخیر- تعرق واقعی گیاهان با یکدیگر مقایسه شده‌اند. شکل ۴ میزان محصول تولیدی قابل برداشت در انتهای دوره رشد گیاهان مورد نظر را در حالت شبیه‌سازی شده بهمراه مقادیر اندازه‌گیری شده آنها در گزارش وزارت نیرو (۱۳۹۱) را نشان می‌دهد.

همانگونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود نتایج محاسبه شده توسط مدل همخوانی قابل قبولی با مقادیر مشاهداتی دارد. در شکلهای ۵ و ۶ تغییرات تبخیر- تعرق شبیه‌سازی شده و مشاهداتی (سند ملی آب) برای محصولات خیار و جو به عنوان نمونه نشان داده شده است. برای سایر محصولات نیز مشابه این نتایج بدست آمده و مقایسه گردیده که از ارائه آنها صرف نظر گردیده است.

Table 2. Values of parameters obtained in SWAT's calibration procedure

جدول ۲- مقدار پارامترهای واسنجی شده تاثیر گذار بر میزان تولید محصولات در مدل SWAT

Parameter	Barley	Bean	Corn	Cucumber	Rice	Tomato	Wheat
BIO_E	35.00	22.08	39.00	60.80	4.25	83.88	34.85
BLAI	5.50	6.01	6.11	4.21	5.70	7.30	3.51
DLAI	0.50	0.88	0.98	0.35	0.99	0.41	0.81
EXT_COEF	0.20	0.40	0.60	1.09	0.57	1.40	0.34
FRGRW1	0.09	0.07	0.06	0.07	0.08	0.09	0.06
FRGRW2	0.400	0.625	0.597	0.410	0.212	0.399	0.735
HEAT_UNITS	2598.0	2803.8	2793.6	1189.6	2224.7	1065.3	2466.2
HVSTI	0.400	0.457	0.832	0.804	0.727	0.834	0.732
LAIMX1	0.000	0.265	0.061	0.263	0.207	0.267	0.316
LAIMX2	0.80	0.80	0.60	0.98	0.83	0.65	0.69

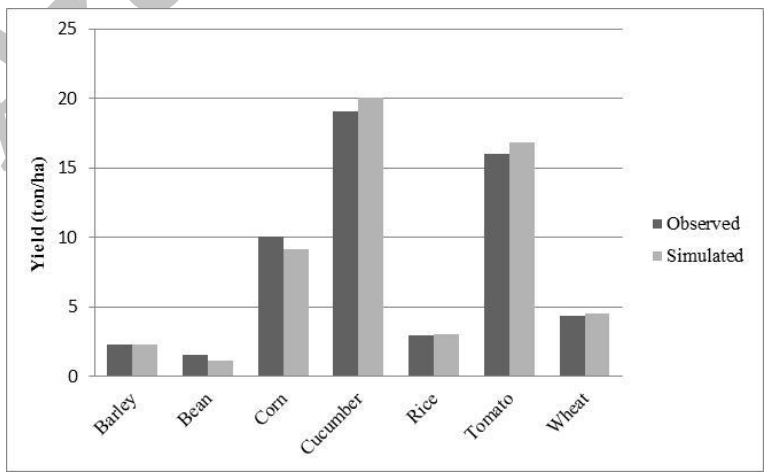

Fig. 4- Comparison between simulated and observed yield of the crops

شکل ۴- مقایسه میزان تولید محصولات مشاهداتی و محاسباتی

Archive of SID
www.SID.ir

همانطور که در شکلهای ۵ و ۶ مشخص است، در فرایند واسنجی سعی بر آن است که روند تبخیر- تعرق مشاهداتی و شبیه‌سازی در طول دوره رشد گیاه به هم نزدیک شوند. نتایج واسنجی بیانگر عملکرد قابل قبول مدل SWAT در شبیه‌سازی رفتار سیستم تحت مطالعه می‌باشد. لذا می‌توان گفت که مدل تهیه شده برای دشت آزادگان با دقت قابل قبولی قادر به شبیه‌سازی رفتار واقعی سیستم بوده و نتایج بدست آمده از آن قابلیت تلفیق با الگوریتم جستجوی هارمونی با هدف برنامه‌ریزی الگوی کشت بهینه را دارا می‌باشد.

۲-۵- ترکیب مدل SWAT و الگوریتم جستجوی هارمونی و توسعه مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی HS-SWAT

در مدل SWAT کوچکترین قسمتی که می‌توان مدیریت مربوط به زمین و آب را به مدل اعمال کرد HRU نام دارد. اختصاص آب به هر HRU از طریق پنج روش می‌تواند اعمال شود: رودخانه، مخزن، آبخوان زیر سطحی، آبخوان عمیق و یا یک منبع خارج از سیستم.

در این تحقیق، سد کرخه به عنوان یک منبع خارجی به منظور تأمین آب مورد نیاز آبیاری دشت آزادگان در نظر گرفته است. همچنین با توجه به مقادیر آبیاری پیشنهادی سند ملی آب برای دوره‌های ۱۰ روزه برای گیاهان، برنامه آبیاری در مدل SWAT تعریف شده است. راندمان آبیاری از دیگر عوامل مهم در برنامه‌ریزی منابع آب است. این راندمان شامل راندمان‌های توزیع و انتقال می‌باشد که در مجموع برابر ۵۰٪ (IWPC, 2010) به مدل اعمال شده است.

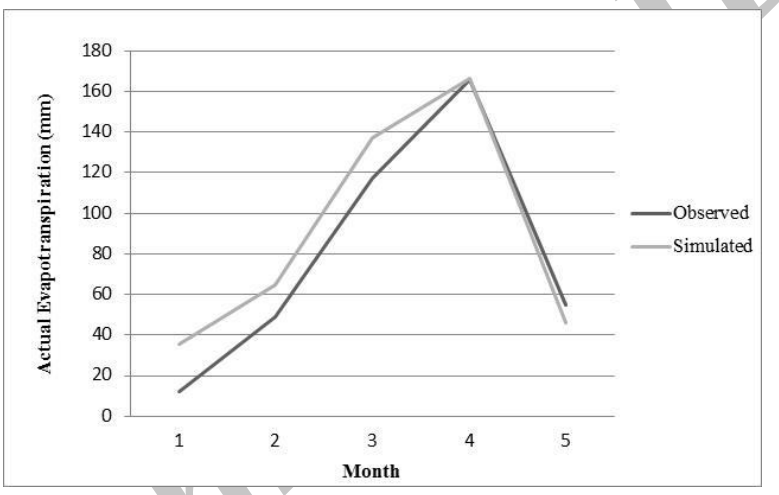

Fig. 5- Cucumber's observed and simulated actual evapotranspiration during the growth period

شکل ۵- روند تغییرات تبخیر- تعرق شبیه‌سازی و مشاهداتی در طول دوره رشد خیار

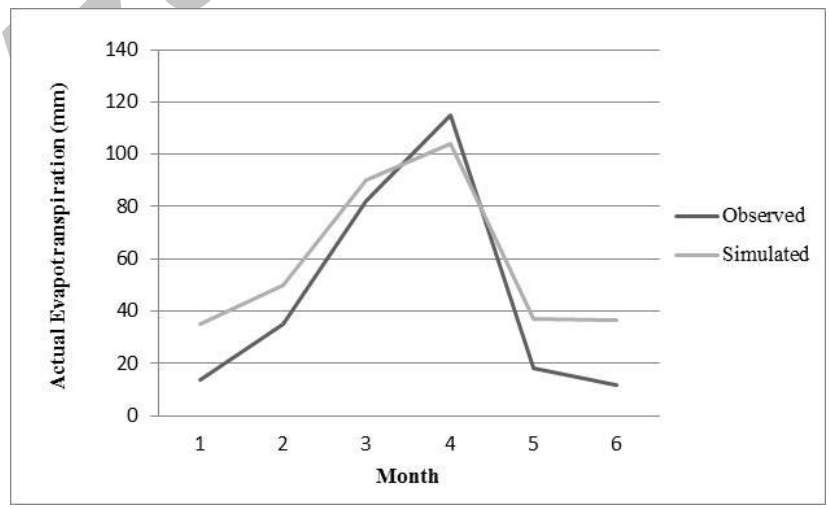

Fig. 6- Barley's observed and simulated actual evapotranspiration during the growth period

شکل ۶- روند تغییرات تبخیر- تعرق شبیه‌سازی و مشاهداتی در طول دوره رشد جو

www.SID.ir

مدل SWAT تهیه شده با گام زمانی ماهانه و برای دوره هفت ساله حد فاصل سالهای ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۴ با درنظرگیری سه سال اولیه برای warm-up اجرا گردیده است. مقادیر تخصیص آب ماهانه با توزیع خطی در گامهای زمانی آبیاری ۱۰ روزه توزیع شده است.

نحوه اندرکنش مدل SWAT و الگوریتم جستجوی هارمونی به این صورت است که به ازای تعداد دوره‌های آبیاری مورد نیاز هر محصول، متغیرهای تصمیم در الگوریتم HS تعریف شده که تعداد کل آن برای تعداد محصول ضرب در دوره‌های آبیاری است. در هر بار تکرار الگوریتم، مقادیر آبیاری تولید شده در فایلهای با پسوند mgt. که مربوط به مدیریت زمین و آب (برنامه آبیاری، برنامه کاشت، برنامه برداشت، برنامه کوددهی و غیره...) در SWAT می‌باشند، جایگزین می‌شوند. مدل SWAT به ازای مقادیر جدید متغیرها، اجرا شده و رشد و محصول گیاهان با توجه به مقادیر جدید آب آبیاری شبیه‌سازی می‌شود. در هر تکرار با توجه به حجم آب مصرفی و قیمت آب، هزینه تولید محصولات حساب می‌گردد (سایر هزینه‌ها شامل کاشت، داشت، برداشت، کوددهی، سم‌پاشی و غیره برای واحد سطح محصولات یک مقدار ثابت یکسان فرض شده است). سود ناشی از تولید محصولات نیز با توجه به قیمت هر محصول و میزان تولید متوسط سالانه محصولات محاسبه می‌گردد. مقدار تابع هدف الگوریتم HS از تفاضل هزینه و سود تولید محصولات در هر تکرار از الگوریتم بدست می‌آید. با انجام محاسبات الگوریتم بر روی مقادیر متغیرهای تصمیم، مقادیر جدید آب آبیاری گیاهان محاسبه شده و روند فوق تا رسیدن به شرط توقف الگوریتم ادامه پیدا می‌کند. شکل ۷ روند کلی حل مسأله تحت مطالعه توسط مدل توسعه یافته HS-SWAT را نشان می‌دهد.

تابع هدف مدل HS-SWAT بیشینه‌سازی سود خالص متوسط سالانه که شامل هزینه آب مصرفی و سود تولید محصولات می‌باشد، در نظر گرفته شده است. قیود مدل نیز حداکثر میزان آب در دسترس در سال و حداکثر زمین قابل کشت می‌باشند که از تابع جریمه در تابع هدف برای کنترل این محدودیتها کمک گرفته شده است.

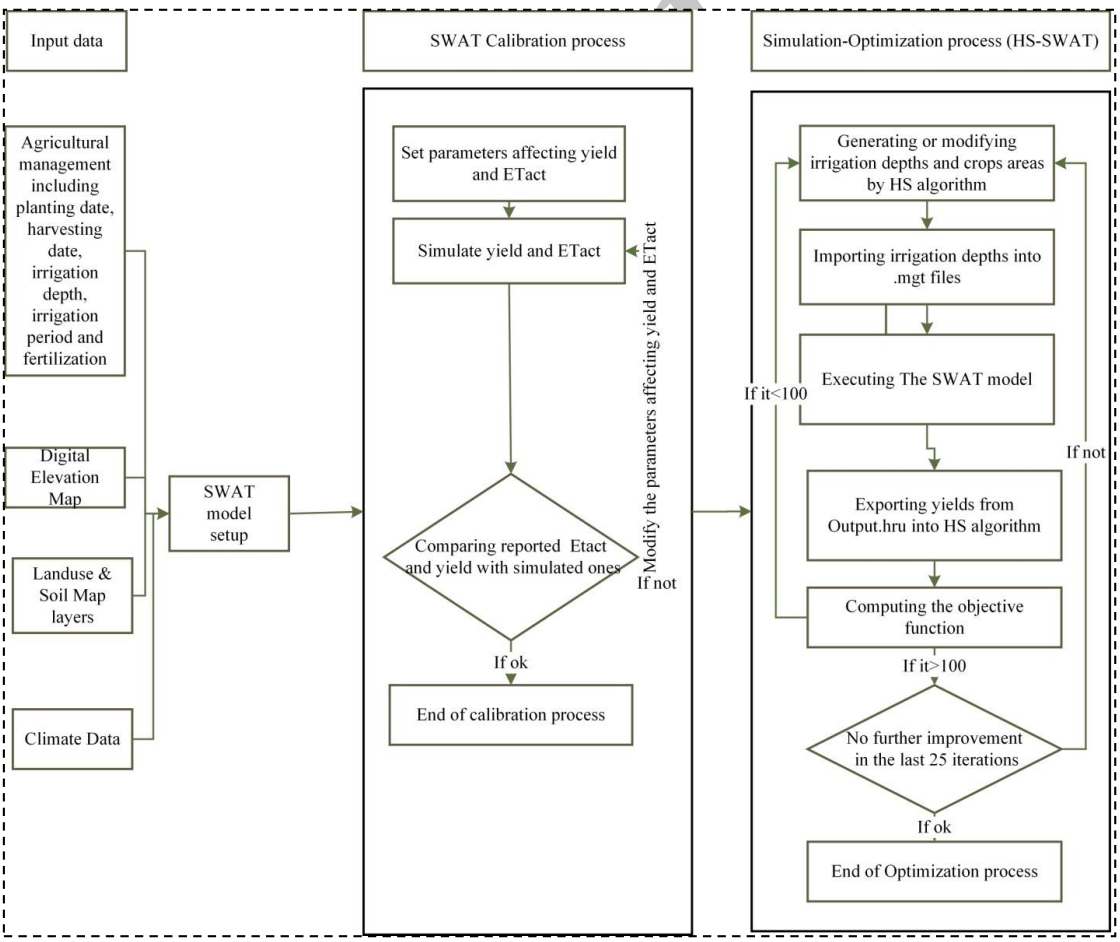

Fig. 7- The HS-SWAT flow diagram

شکل ۷- روندنمای عملکرد مدل HS-SWAT

www.SID.ir

بر اساس توضیحات فوق و داده‌های مسأله فرمول‌بندی مدل در ادامه شرح داده شده است. آب تخصیص یافته از مخزن سد کرخه به دشت آزادگان برابر ۱۵۰ میلیون متر مکعب در سال می‌باشد. همچنین حداکثر عمق آبیاری به ۹۰ میلی‌متر محدود شده است. حداکثر زمین قابل کشت ۲۱۰۰۰ هکتار می‌باشد. ۹۴ متغیر عمق آبیاری و ۷ متغیر مربوط به مساحت زیر کشت محصولات (به ازای هر محصول یک متغیر) در الگوریتم HS تعریف شده است. بهای هر متر مکعب آب نیز برابر ۶۶۴ ریال تعریف شده است. تابع هدف مدل حداکثرسازی سود خالص حاصل از تولید محصولات منهای هزینه آب مصرفی مطابق معادله (۷) است. معادله (۸) نشان دهنده ورودی و خروجی مدل شبیه‌سازی می‌باشد. قیود حداکثر آب در دسترس و حداکثر زمین قابل کشت به ترتیب مطابق معادله‌های (۹) و (۱۰) می‌باشند.

$$\text{Max NB} = [\sum_{i=1}^{nc} A_i.B_i.C_i - \sum_{i=1}^{nc}\sum_{j=1}^{T_i} A_i.WA_i^j.WP] \quad (۷)$$

$$C_i = f(WA_i^j) \quad (۸)$$

$$\sum_{i=1}^{nc} A_i \le 21000 \text{ ha} \quad (۹)$$

$$\sum_{i=1}^{nc}\sum_{j=1}^{T_i} A_i.WA_i^j \le 150 \text{ MCM} \quad (۱۰)$$

روش ارضاء قیود به صورت تعریف آن‌ها در قالب تابع جریمه در تابع هدف است. تابع جریمه حداکثر آب در دسترس در صورتیکه آب مصرفی محصولات بیشتر از آب تخصیص یافته باشد از معادله (۱۱) و تابع جریمه حداکثر زمین قابل کشت نیز در صورتیکه سطح زیر کشت از حداکثر سطح موجود بیشتر شود از معادله (۱۲) محاسبه می‌شود.

(۱۱)

$$\text{Water Penalty} = \alpha((\sum_{i=1}^{nc}\sum_{j=1}^{T_i} A_i.WA_i^j/\text{Available Water}) - 1)$$

$$\text{Penalty} = \beta((\sum_{i=1}^{nc} A_i/\text{Total Area}) - 1)\ \text{Area} \quad (۱۲)$$

در این حالت تابع هدف مطابق با معادله (۱۳) محاسبه می‌شود.

(۱۳)

$$\text{Max NB} = [\sum_{i=1}^{nc} A_i.B_i.C_i - \sum_{i=1}^{nc}\sum_{i=1}^{T_i} A_i.WA_i^j.WP] - \text{Water Penalty} - \text{Area Penalty}$$

در معادله‌های فوق پارامترهای بکار رفته عبارتند از: NB سود خالص سالانه بر حسب ریال، T_i طول دوره رشد گیاه i، nc تعداد محصولات زیر کشت، A_i سطح زیر کشت گیاه i بر حسب هکتار، B_i قیمت فروش واحد محصول i بر حسب ریال بر تن، C_i میزان تولید سالانه محصول i بر حسب تن بر هکتار، WA_i^j آب اختصاص داده شده به محصول i در دوره آبیاری (هر ماه) j بر حسب متر مکعب، WP بهای هر متر مکعب آب، β ضریب تابع جریمه مربوط به زمین قابل کشت که مقدار آن با سعی و خطا برابر ۱۰۰ انتخاب شده است، α ضریب تابع جریمه مربوط به مصرف آب که مقدار آن نیز برابر ۱۰۰ انتخاب گردیده است.

۳- نتایج

در این تحقیق سه سناریو تعریف و مورد بررسی قرار گرفته است که به تفکیک به بررسی نتایج آنها پرداخته می‌شود.

۳-۱- سناریوی پایه: شبیه‌سازی وضع موجود الگوی کشت در دشت آزادگان

سناریوی پایه به منظور برآورد تابع هدف مدل در دوره شبیه‌سازی (۱۹۹۸ تا ۲۰۰۴) و با بهره‌گیری از نیاز آبی خالص ارائه شده در سند ملی آب که بعنوان یکی از معدود مراجع رسمی برآورد نیاز آبی گیاهان در کشور در دسترس می‌باشد، تعریف شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی سناریوی پایه (وضع موجود) در جدول ۳ ارائه شده است.

سود خالص سالانه در سناریوی پایه با احتساب هزینه آبیاری برابر است با ۱۸۲/۳ میلیارد ریال و میزان کل مصرف آب با در نظر گرفتن راندمان ۵۰٪ در حدود ۱۵۸ میلیون متر مکعب بدست آمده است (جدول ۳). بر این اساس، نتایج سناریوی پایه برای مقایسه نتایج مدل در سناریوهای بهینه‌سازی که در ادامه ارائه خواهد شد مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

Table 3. Results obtained for simulation of the Azadegan plain in the present situation (base scenario)
جدول ۳- نتایج حاصل از شبیه‌سازی وضع موجود دشت آزادگان در مدل SWAT (سناریوی پایه)

Crop	Yield (kg/ha)	Net irrigation depth (mm)	Area (ha)	Annual water consumption (m^3)
Barley	2302	252	3351	16889040
Bean	1162	493	1938	19108680
Corn	7077	506	2934	24227280
Cucumber	20078	380	2634	20018400
Rice	2982	848	1915	32478400
Tomato	16816	170	1437	4885800
Wheat	4577	274	7331	40173880
Sum	-	2923	21000	157781480

Archive of SID
www.SID.ir

۳-۲- سناریوی اول: تعیین الگوی کشت و آب آبیاری بهینه

به منظور بررسی عملکرد مدل ترکیبی HS-SWAT، مسأله تعیین الگوی کشت بهینه با هدف حداکثرسازی سود خالص حاصل از عملکرد سیستم تحت قیود حداکثر آب تخصیص یافته و حداکثر زمین قابل کشت در سناریوی اول حل گردیده است. تعیین سطح بهینه کشت هر یک از محصولات و میزان آب آبیاری گیاهان متغیرهای تصمیم مسأله هستند که مدل در پی یافتن آنها می‌باشد. با اجرای مدل HS-SWAT در این سناریو، بهترین جواب حاصل از مدل طی ۱۰ بار اجرا که در تمامی موارد با دقت قابل قبولی به یک جواب همگرا شده است، در جدول ۴ ارائه شده است.

بر اساس نتایج بدست آمده در سناریوی اول مشاهده می‌شود که در صورت آزاد گذاشتن انتخاب سطح زیر کشت گیاهان و عدم درنظرگیری حداقل کشت محصولات استراتژیک مورد نیاز، جواب بهینه مسأله در شرایط زیر کشت بردن کل زمین موجود تحت گیاه خیار حاصل می‌شود. در این شرایط سود خالص سالانه برابر ۵۷۱ میلیارد ریال و مقدار آب مصرفی در حدود ۱۱۳ میلیون متر مکعب بدست آمده است. بر این اساس سود خالص سیستم در مقایسه با سناریوی پایه به میزان ۳۱۴٪ افزایش و حجم آب مصرفی به میزان ۲۸٪ کاهش یافته است. همچنین مشاهده می‌شود که قیود حداکثر آب و زمین در دسترس نیز توسط مدل رعایت شده است.

۳-۳- سناریوی دوم: برنامه‌ریزی آبیاری بهینه در شرایط الگوی کشت وضع موجود

در سناریوی دوم، مدل در شرایط لحاظ سطوح زیر کشت مطابق با الگوی وضع موجود در دشت آزادگان اجرا گردیده است. هدف از اجرای این سناریو تعیین میزان آب آبیاری بهینه گیاهان با هدف حداکثر سازی سود خالص سیستم می‌باشد. به بیان دیگر، در این شرایط بر خلاف سناریوی اول که در آن مدل دارای حداکثر درجه آزادی ممکن بود، مقید به رعایت الگوی کشت وضع موجود شده و مقادیر آب آبیاری متغیرهای تصمیم هستند. این شرایط به واقعیت نیز نزدیکتر است. زیرا ایراد اصلی وارد بر جواب‌های بهینه مسائل الگوی کشت کشاورزی، عدم انطباق آنها بر شرایط واقعی و فیزیکی مسأله است. تغییر الگوی کشت حاکم بر یک منطقه که طی سالهای متمادی توسط کشاورزان منطقه و بر اساس واقعیت حاکم بر سیستم مورد استفاده قرار گرفته به سمت الگوی کشت بهینه امری زمانبر و در برخی موارد بسیار مشکل و یا حتی غیر ممکن است. اما برنامه‌ریزی آبیاری بهینه در شرایط الگوی کشت موجود بیانگر میزان اتلاف احتمالی آب در سیستم در وضع موجود می‌باشد. با اجرای مدل HS-SWAT در سناریوی دوم، بهترین جواب حاصل از ۱۰ بار اجرای مدل در جدول ۵ گزارش شده است.

در این سناریو سود خالص بهینه برابر با ۲۲۱/۶ میلیارد ریال و حجم آب مصرفی نیز در حدود ۸۱ میلیون متر مکعب بدست آمده است. در نتیجه نسبت به سناریوی پایه سود خالص به میزان ۲۳٪ افزایش و میزان آب مصرفی ۴۹٪ کاهش پیدا کرده است. در حقیقت علت افزایش سود خالص سیستم در سناریوی دوم کاهش میزان آب مصرفی بوده است.

لذا می‌توان بیان کرد که در حال حاضر حجمی در حدود ۷۷ میلیون متر مکعب آب در دشت آزادگان هدر می‌رود در حالی که می‌توان با ذخیره این آب و برنامه‌ریزی بهینه آبیاری در دشت با حجم بدست آمده سود خالص حاصل از تولید محصولات را به میزان ۲۳٪ نیز افزایش داد. این نتایج بیانگر لزوم بازنگری و اصلاح وضعیت مصارف آبی در بخش کشاورزی در کشور با توجه به شرایط بحرانی کم آبی حاکم می‌باشد.

Table 4. Results obtained by the HS-SWAT model in the first scenario

جدول ۴- نتایج حاصل از اجرای مدل HS-SWAT در سناریوی اول

Crop	Yield (kg/ha)	Net irrigation depth (mm)	Area (ha)	Annual water consumption (m^3)
Barley	-	-	-	-
Bean	-	-	-	-
Corn	-	-	-	-
Cucumber	20078	269	21000	112980000
Rice	-	-	-	-
Tomato	-	-	-	-
Wheat	-	-	-	-
Wheat	-	-	-	-

Archive of SID
www.SID.ir

Table 5. Results obtained by the HS-SWAT model in the second scenario
جدول ۵- نتایج حاصل از اجرای مدل HS-SWAT در سناریوی دوم

Crop	Yield (kg/ha)	Net irrigation depth (mm)	Area (ha)	Annual water consumption (m3)
Barley	2227	84.2	3351	5640986
Bean	911	225.3	1938	8733457
Corn	6862	299.5	2394	14338217
Cucumber	19982	268.5	2634	14145702
Rice	2899	447.2	1915	17129238
Tomato	17160	94.0	1437	2702322
Wheat	4626	124.6	7331	18270054
Sum	-	1543.3	21000	80959977

میـــزان آب اختصاص یافته به گیاهان حاصل از اجرای مـــدل HS-SWAT در سناریوی دوم و عمق آبیاری پیشنهادی در سند ملی آب و میزان محصول در این حالات در شکلهای ۸ و ۹ با یکدیگر مقایسه شده است.

در شکل ۱۰ اجزای بیلان آبی دشت آزادگان در سناریوهای پایه و دوم با یکدیگر مقایسه شده است. میزان بارش در هر دو سناریو یکسان بوده در حالی که در سناریوی دوم مقدار آب آبیاری ۴۹٪ کاهش پیدا کرده است. همچنین نفوذ عمقی نیز در سناریو دوم به صفر رسیده است که نشان دهنده اعمال آبیاری بیش از حد مورد نیاز در سناریوی پایه است. درواقع میزان آب آبیاری که توسط سند ملی آب برای الگوی کشت دشت آزادگان در نظر گرفته شده بیش از نیاز واقعی گیاهان می‌باشد. این موضوع بیانگر لزوم بازنگری و اصلاح سند ملی آب بعنوان مرجع رسمی برآورد نیاز آبی گیاهان در کشور می‌باشد. همچنین رواناب سطحی در سناریوی پایه در حدود دو برابر سناریوی دوم بدست آمده است.

۳-۴- تحلیل حساسیت

هدف از تحلیل حساسیت بررسی تأثیر پارامترهایی است که بر روی نتایج مدل دارای عدم قطعیت می‌باشد. با تحلیل حساسیت بر روی این پارامترها می‌توان اثر تغییرات آنها بر جواب‌های بهینه بدست آمده را سنجیده و در صورت نیاز یک دامنه جواب بهینه یا مطلوب برای متغیرهای تصمیم مسأله بجای یک جواب منفرد ارائه نمود. در مسأله حاضر، تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای عمق آبیاری (میزان آب اختصاص یافته از سد) و عمق بارش در دشت انجام شده است.

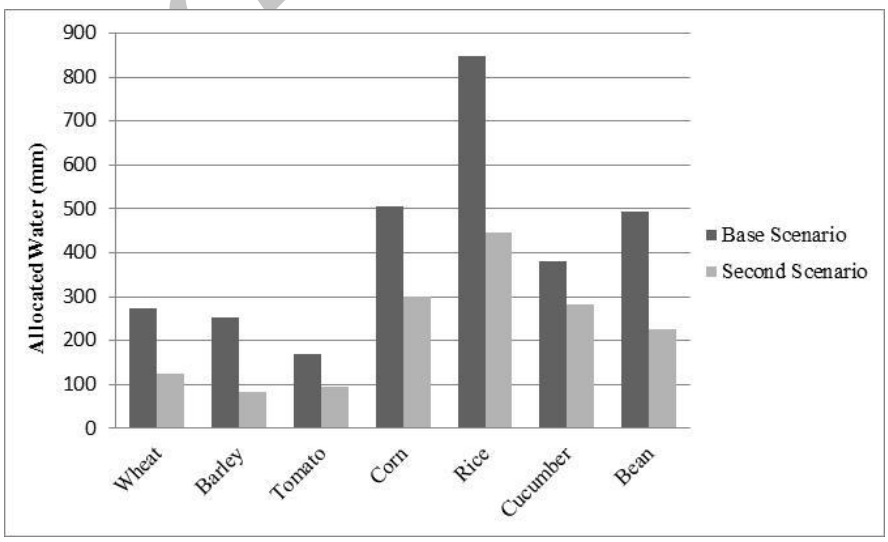

Fig. 8- Comparison of the crops irrigation in the base and second scenarios
شکل ۸- مقایسه میزان آب آبیاری گیاهان در سناریوی پایه و سناریوی دوم

Archive of SID
www.SID.ir

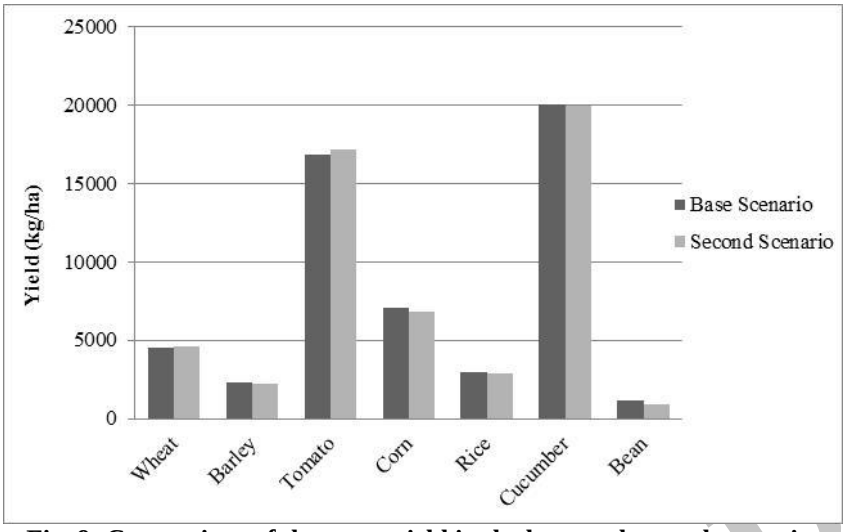

Fig. 9- Comparison of the crops yield in the base and second scenarios

شکل ۹- مقایسه میزان تولید محصول در سناریوی پایه و سناریوی دوم

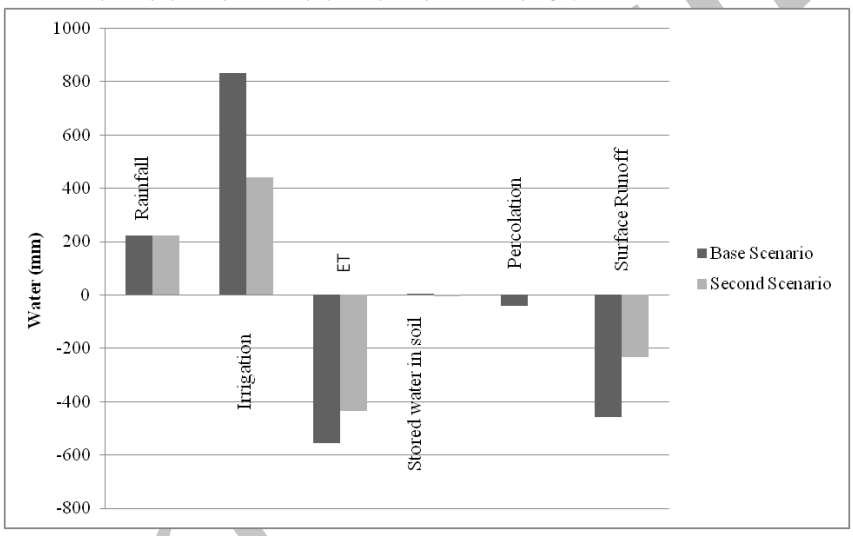

Fig. 10- Comparison of the water balance components in the base and second scenarios

شکل ۱۰- مقایسه متوسط اجزای اصلی بیلان آبی سالانه در سناریوی پایه و سناریوی دوم

دلیل انتخاب این پارامترها امکان تغییر آنها در شرایط آتی مختلف و به بیان دیگر عدم قطعیت در مقادیر در نظر گرفته شده برای آنها در شرایط پیشین حل مسأله با مدل HS-SWAT و لزوم بررسی تأثیر آنها بر جواب‌های مدل بوده است. در حالت اول، به منظور بررسی تأثیر میزان عمق آبیاری که در شرایط پیشین از حداکثر حجم اختصاص یافته ۱۵۰ میلیون از سد کرخه به دشت آزادگان بدست آمده بود، عمق آب آبیاری در دو حالت افزایشی و دو حالت کاهشی نسبت به شرایط بهینه در نظر گرفته شد. این حالتها شامل افزایش و کاهش عمق آب آبیاری گیاهان به میزان ۱۰٪ و ۲۰٪ در هر حالت نسبت به جواب بهینه بدست آمده در سناریوی دوم می‌باشد. نتایج حاصل از اجرای مدل HS-SWAT در هر یک از این حالات برای گیاه گندم به عنوان نمونه در جدول ۶ نشان داده شده است.

با توجه به جدول ۶ مشاهده می‌شود که در شرایط افزایش یا کاهش میزان آب آبیاری نسبت به جواب بهینه بدست آمده در سناریوی دوم، مقدار تابع هدف بدست آمده کاهش یافته و از حدود ۷۷/۴ میلیارد ریال به ۶۹/۶ میلیارد ریال در شرایط ۲۰٪ کاهش آب آبیاری و ۷۳/۶ میلیارد ریال در شرایط ۲۰٪ افزایش عمق آب آبیاری رسیده است.

نکته قابل توجه اینست که با افزایش آب آبیاری، متوسط تنش آبی وارد شده به محصول گندم در دوره رشد به ۰/۵ روز کاهش پیدا کرده اما میزان محصول تولیدی توسط گیاه نسبت به شرایط بهینه نیز در حدود ۳٪ کاهش یافته است. لازم به ذکر است که آبیاری سنگین و بیش از حد برخی از محصولات مانند جو و گندم موجب ورس یا خوابیدگی گیاه می‌شود و در نتیجه می‌تواند میزان تولید محصول را کاهش دهد.

www.SID.ir

Table 6. Results of the sensitivity analysis on wheat's irrigation depth
جدول ۶- نتایج تحلیل حساسیت بر روی عمق آب آبیاری (میزان آب مورد استفاده) برای گیاه گندم

Variation Coefficient	Water allocated (MCM)	Average water stress (day)	Yield (kg/ha)	Annual net profit (10^3 Rials)
1.2	161.0	0.5	4,491	73,588,447
1.1	147.6	0.5	4,490	73,934,184
1	134.2	3.9	4,670	77,420,702
0.9	120.8	6.9	4,534	75,411,814
0.8	107.3	9.2	4,179	69,626,242

از طرفی اعمال تغییر در عمق آب آبیاری که توسط مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی تولید شده نیز نشان خواهد داد که آیا الگوریتم به نقطه بهینه رسیده است یا خیر. بر این اساس این تغییرات بر روی نتایج بدست آمده از سناریو دوم مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن مطابق با شکل ۱۱ می‌باشد.

همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود با کم شدن آبیاری میزان سود نهایی به شدت کاهش پیدا کرده است و همچنین با افزایش آن این سود تا حدی کم شده است. همچنین تأثیر تغییرات عمق آب آبیاری بر متوسط محصول تولیدی در هکتار در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

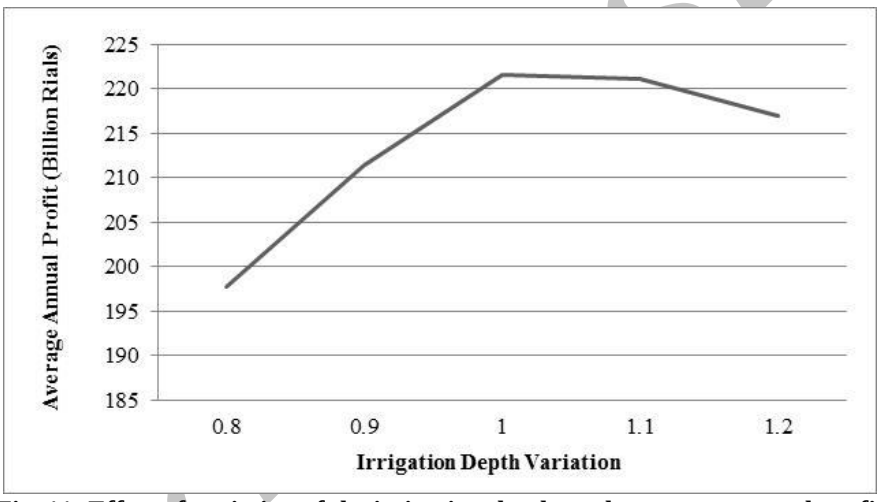

Fig. 11- Effect of variation of the irrigation depth on the average annual profit
شکل ۱۱- تأثیر تغییر عمق آب آبیاری بر میانگین سود سالانه تولید محصولات

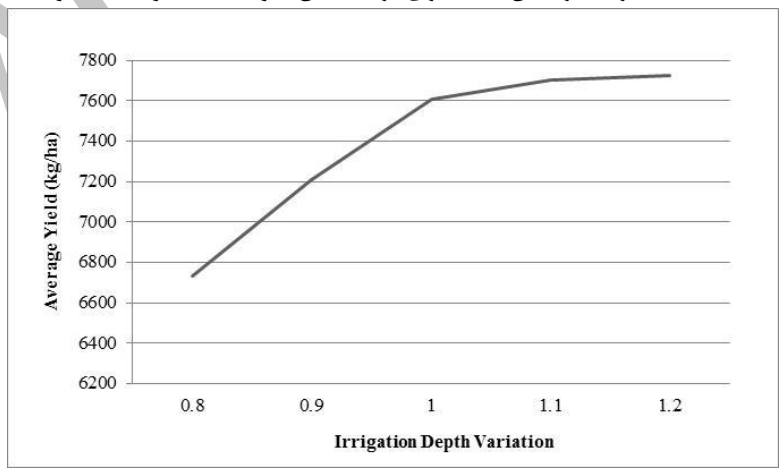

Fig. 12- Effect of variation of the irrigation depth on the average crops yield
شکل ۱۲- تأثیر تغییر عمق آب آبیاری بر متوسط محصول تولیدی

www.SID.ir

با افزایش آب آبیاری تأثیر قابل توجهی در میزان محصول تولیدی ایجاد نمی‌شود و مقدار سود حاصله از این افزایش تولید در مقابل هزینه آب آبیاری، به مراتب کمتر می‌باشد. در مرحله دوم تحلیل حساسیت، عمق بارش در دشت آزادگان بعنوان پارامتر مسأله در نظر گرفته شد. عمق بارش یکی از ورودی‌های تأثیرگذار بر نتایج مدل است و همچنین بخشی از نیاز آبی گیاهان را تأمین می‌کند. از این رو تغییرات میزان بارش بر روی خروجی مدل در سناریو دوم شبیه‌سازی- بهینه‌سازی اعمال شد که نتایج آن مطابق با شکل ۱۳ می‌باشد.

شکل ۱۳ نشان می‌دهد با افزایش بارش تا ۱۰٪، میانگین سود سالانه ابتدا روند صعودی و سپس با افزایش بارش تا ۲۰٪، روند نزولی طی می‌کند. لازم به یادآوری است که میانگین بارش از ابتدای اردیبهشت تا انتهای مهر کمتر از ۱۰ میلی‌متر می‌باشد. بنابراین عملاً افزایش بارش تا ۲۰٪ نیز نمی‌تواند تأثیر زیادی بر محصولات ذرت، برنج و لوبیا که در این ماه‌های کم آب کشت می‌شوند بگذارد. همچنین با توجه با ثابت بودن الگوی آبیاری، افزایش بارش سبب کاهش تولید محصولات در گندم و جو می‌شود. از طرفی، شکل ۱۳ نشان می‌دهد که با کاهش بارش تا ۲۰٪ میانگین سود سالانه در حدود ۱۰٪ کاهش پیدا می‌کند.

۵- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر با استفاده از قابلیتهای رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی، برنامه‌ریزی آبیاری و الگوی کشت بهینه محصولات کشاورزی در سطح یک دشت پیگیری شده است. بدین منظور مدل SWAT برای شبیه‌سازی فرایند ارتباط آب، خاک و رشد گیاهان در کنار الگوریتم جستجوی هارمونی برای تخصیص بهینه منابع آب و تعیین سطوح زیر کشت ترکیب شده و مدل ترکیبی HS-SWAT توسعه یافته است. واسنجی رشد گیاهان که یکی از اقدامات مهم به منظور نزدیک کردن مدل به شرایط واقعی منطقه مطالعاتی مورد نظر بود توسط بسته نرم افزاری SWAT-CUP و الگوریتم SUFI2 انجام شد. توان شبیه‌سازی بالا در مدل SWAT و تنوع خروجی‌های آن، این قابلیت را ایجاد کرد که اولاً متغیرهای مورد نیاز برای شبیه‌سازی رشد گیاهان در مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی دیده شوند، دوماً شاخصهای هیدرولوژیکی اعم از تبخیر- تعرق واقعی، نفوذ عمقی، رواناب تولیدی در خروجی‌های مدل مورد بررسی قرار گرفته و تأثیر تغییر مقدار آب آبیاری بر این شاخصها مشخص شوند. کارایی این مدل ترکیبی در برنامه‌ریزی تخصیص منابع آب مورد نیاز و تعیین سطح زیر کشت محصولات کشاورزی در دو سناریو مورد بررسی قرار گرفت. در سناریو اول هدف پیدا کردن بیشترین سود ممکن حاصل از کشاورزی بود و در سناریو دوم تخصیص بهینه منابع آب موجود به یک الگوی کشت که در آن منطقه در حال بهره‌برداری می‌باشد مد نظر قرار گرفت. در هر دو سناریو مقدار حداکثر آب مصرفی به یک مقدار ثابت محدود شد. نتایج بدست آمده حاکی از آن بود که مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی HS-SWAT قابلیت حل مسأله با تعداد زیاد متغیر تصمیم (۱۰۱ متغیر) را به خوبی دارد.

در سناریوی اول که صرفاً به منظور پیدا کردن بهترین الگوی کشت برای رسیدن به بیشترین سود بود همان طور که انتظار می‌رفت محصولی که بیشترین سود را داشت انتخاب شد و تمام زمین قابل کشت را به آن اختصاص داده شد. در سناریوی دوم که برای تخصیص منابع آب موجود بین یک الگوی کشت ثابت بود میزان تخصیص آب آبیاری را به کمترین میزان ممکن رساند که بیشترین تولید محصول را بتوان از هر گیاه دریافت کرد.

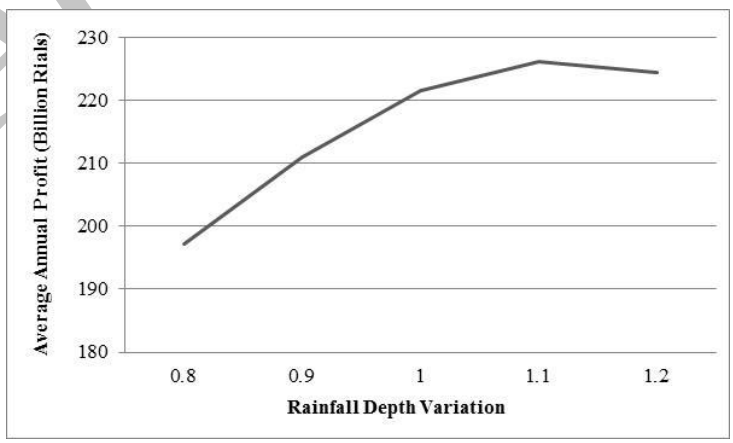

Fig. 13- Effect of variation of the rainfall depth on the average annual profit

شکل ۱۳- تأثیر تغییرات عمق بارش بر متوسط سود سالانه تولید محصولات

Archive of SID
www.SID.ir

بر این اساس می‌توان اظهار کرد که از مدل HS-SWAT می‌توان به منظور برنامه‌ریزی صحیح و کارآمد برای کشاورزی و مدیریت منابع آب در شرایط مختلف استفاده کرد. یکی از قابلیتهای مدل توسعه یافته در تحقیق حاضر امکان در نظرگیری اثرات تغییر اقلیم است که می‌تواند در مطالعات آتی مد نظر قرار گیرد.

پی‌نوشت‌ها

1-Meta-Heuristic
2-Harmony Search Algorithm
3-Semi-Distributed Models
4-Hydrologic Response Unit
5-Harmony Memory
6-Harmony Memory Size
7-Harmony Memory Consideration Rate
8-Pitch Adjustment Rate
9-Band Width
10-Route Mean Square Error (RMSE)
11-Biomass
12-Leaf Area Index

۶- مراجع

Ashraf Vaghefi S, Mousavi SJ, Abbaspour KC, Srinivasan R, Arnold JR (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 15:475-484

Ayvaz MT (2009) Application of harmony search algorithm to the solution of groundwater management models. Advance Water Resources 32(6):916–924

Cisty M (2008) Automated calibration of the simulation model of irrigation projects by harmony search optimization. Water Land Development 12(1):3–13

Faramarzi M, Yang H, Schulin R, Abbaspour KC (2010) Modeling wheat yield and crop water productivity in Iran: Implications of agricultural water management for wheat production. Agriculture and Water Management 97(11):1861–1875

Garcia-Vila M, Fereres E (2012) Combining the simulation crop model AquaCrop with an economic model for the optimization of irrigation management at farm level. European Journal of Agronomy 36:21–31

Gassman PW, Reyes MR, Green CH, Arnold JG (2007) The soil and water assessment tool: Historical development, applications, and future research directions. Transactions of the ASABE 50(4):1211–1250

Geem ZW, Kim JH, Loganathan GV (2001) A new heuristic optimization algorithm:harmony search. Simulation 76(2):60-68

Geem ZW (2006) Optimal cost design of water distribution networks using harmony search. Engineering Optimization 38(3):316–323

Geem ZW (2007) Optimal scheduling of multiple dam system using harmony search algorithm. Lecture Notes in Computer Science 4507:316–323

Geem ZW, Cho YH (2011) Optimal design of water distribution networks using parameter-setting-free harmony search for two major parameters. Water Resources Planning and Management 137(4):377–380

Iran Water and Power Resources Development Company IWPC (2010) Systems approach to Karkheh River Basin water resources projects. IWPC Research Development (in Persian)

Lu HW, Huang GH, He L (2012) Simulation-based Inexact Rough-Interval Programming for agricultural irrigation management: a case study in the Yongxin Country, China. Water Resources Management 26:4163–4182

Mahdavi M, Fesanghary M, Damangir E (2007) An improved harmony search algorithm for solving optimization problems. Applied Mathematics and Computation 188:1567–1579

National Water Document (2000) Crops Net Water Requirement. Iran Meteorological Department. Ministary of Agriculture (in Persian)

Singh A (2014) Simulation and optimization modeling for the management of groundwater resources. II: Combined applications. Irrigation and Drainage Engineering 140(4):04014002

Singh A, Panda SN (2013) Optimization and simulation modeling for managing the problems of water resources. Water Resources Management 27(9):3421–3431

Archive of SID
www.SID.ir