Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 1, Vol. 15, Apr.-May. 2021, p. 188-198

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۱، جلد ۱۵، فروردین - اردیبهشت ۱۴۰۰، ص. ۱۹۸-۱۸۸

مقاله علمی-پژوهشی

بهینه‌سازی چندهدفه الگوی کشت مبتنی بر ردپای آب در استان‌های شرق کشور

علی عارفی‌نیا[۱]، خالد احمدالی[۲*]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۸/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۱۰

چکیده

افزایش بهره‌وری منابع به کمک بهینه‌سازی الگوی کشت محصولات زراعی، یک راهکار مناسب برای توسعه بخش کشاورزی است. در این تحقیق الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه (NSGAII) برای بهینه‌سازی الگوی کشت محصولات زراعی عمده شهرستان‌های استان‌های شرقی کشور شامل خراسان‌های شمالی، رضوی و جنوبی و استان سیستان‌وبلوچستان با اهداف حداکثر کردن ارزش اقتصادی ردپای آب و حداقل کردن ردپای آب آبی با استفاده از شاخص کمیسیون توسعه پایدار سازمان ملل (UN) در قالب چهار سناریو به کار گرفته‌شده است. نتایج نشان داد در برخی سناریوها امکان تحقق کامل اهداف در الگوی چندهدفه وجود ندارد، همچنین نتایج نشان داد در صورت اجرای الگوی کشت بهینه چنانچه منطقه موردمطالعه از منظر قید امنیت آبی به ترتیب در شرایط بحران متعادل، متوسط و شدید قرار داشته باشد، میزان تولید به ترتیب ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد میزان فعلی و به‌طور میانگین باعث صرفه‌جویی به ترتیب ۵۵، ۴۰ و ۳۰ درصدی منابع آبی منطقه می‌شود. اجرای این الگو در مناطق موردمطالعه افزایش میزان درآمد، کاهش مصرف آب و به‌تبع آن پایداری بیشتر محیطزیست را نیز در بردارد.

واژه‌های کلیدی: آب آبی، آب سبز، امنیت آبی، الگوی کشت بهینه، بهینه‌سازی چندهدفه، NSGA II

مقدمه

مدیریت نامناسب منابع آب در برخی مناطق، وضعیت را به سمت کم‌آبی سوق می‌دهد طوری که تا سال ۲۰۲۵ تقریباً دوسوم مردم جهان در شرایط تنش آبی قرار می‌گیرند (FAO, 2018). کمبود آب و تنش آبی در منطقه خاورمیانه تا سال ۲۰۵۰ افزایش خواهد یافت (FAO,2017). لذا در کشورهای موجود در این منطقه باید راهکارهای مناسب بکار گرفته شود تا بتوان ضمن برقراری امنیت غذایی، از به خطر افتادن امنیت منابع آبی نیز جلوگیری نمود و با بهره‌برداری مناسب از منابع آب، اهداف چندجانبه کاربران و دولتمردان تأمین شود و درعین‌حال پایداری محیطزیست تضمین شود (FAO, 2015). بخش کشاورزی، به‌عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده از میان مصارف جهانی آب (Pongkijvorasin, 2007) نقش مهمی در تعادل مقدار آب بین مصرف‌کننده‌های مختلف دارد (Gollehon and Quinby, 2004) از طرفی یکی از نخستین بخش‌هایی که خسارت ناشی از مدیریت نادرست منابع آب را نمایان می‌سازد، بخش کشاورزی است. می‌توان گفت که عدم مدیریت و برنامه‌ریزی صحیح در این بخش، نقش مستقیم و پررنگی در مسائل اجتماعی و اقتصادی داشته و خسارت‌های جبران‌ناپذیر را به بار می‌آورد که برای حل این معضل می‌توان از انواع روش‌های حل بهینه‌سازی نظیر برنامه‌ریزی غیرخطی در غالب ساختارهای مختلف اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی بهره جست (علیزاده و همکاران، ۱۳۹۱). از طرفی استفاده از شاخص‌های مختلف به‌عنوان یک ابزار سیاسی، از دهه ۱۹۲۰ میلادی آغازشده است و تا به امروز بیش از ۵۰ شاخص در زمینه‌ی توسعه پایدار ارائه و مورد استفاده قرارگرفته است. با افزایش سطح کمی و کیفی اطلاعات و ارتباطات جهانی، روش‌ها و شاخص‌های جامع‌تر و دقیق‌تری ارائه می‌گردد که ارزیابی وضعیت منابع آب در جهان نیز از این قاعده مستثنای نیست (Sullivan, 2002). شاخص ردپای آب به میزان مستقیم یا غیرمستقیم مصرف آب در تولید محصول یا خدمات اشاره دارد (Hoekstra, 2008). برآورد ردپای آب محصولات مختلف کشاورزی به‌عنوان شاخصی از حجم آب موردنیاز، می‌تواند در اخذ تصمیم در راستای جبران کمبود منابع آبی، تعیین سهم آب

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد منابع آب، گروه آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۲- استادیار گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: khahmadauli@ut.ac.ir)
DOR: 20.1001.1.20087942.1400.15.1.16.6

www.SID.ir

Archive of SID

آبی و آب سبز در تولید محصولات کشاورزی، تغییر در الگوی کشت، تغییر حجم صادرات و واردات محصولات با توجه به موضوع خودکفایی کشور مؤثر واقع گردد (عربی و نیکنیا، ۱۳۸۹). ردپای آب[1] (WF) به‌عنوان یک ابزار استراتژیک برای ارزیابی مصرف آب به سه بخش آب آبی، آب سبز و آب خاکستری تقسیم می‌شود (Van Oel et al, 2009). ردپای آب سبز به حجم آب حاصل از بارش و ردپای آب آبی به حجم آب آبیاری (شامل آب‌های سطحی و زیرزمینی) اشاره دارد. ردپای آب خاکستری حجمی از آب شیرین است که برای رقیق‌سازی کودهای شیمیایی که در تولید محصول استفاده می‌شوند به‌کاربرده می‌شود (Ababaei and Ramezani, 2017). تاکنون مطالعات زیادی در سراسر جهان در رابطه با شاخص ردپای آب در بررسی وضعیت منابع صورت گرفته است (Forin et al,2020؛ Mekonnen and Hoekstra, 2020؛ Kondash et al., 2018؛ Ewaid et al, 2019). با توجه به اینکه مفهوم ردپای آب در حال حاضر به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های سنجش بهره‌وری آب در مباحث مختلف موردتوجه پژوهشگران در صنعت آب قرارگرفته است، استفاده از این مفهوم با توجه به شرایط خاص سیاسی و اقلیمی کشور، به‌منظور انتخاب بهترین ترکیب کشت، ضمن خودکفایی نسبی در تولید محصولات کشاورزی، می‌تواند ابزاری بسیار سودمند در ذخیره آب کشور و رسیدن به امنیت آبی باشد. در مطالعه حاضر با توجه به مفهوم ردپای آب و همچنین با استفاده از شاخص امنیت آبی سازمان ملل (UN) به‌عنوان یکی از پرکاربردترین شاخص‌های امنیت آبی (Lawrence et al., 2002) به ارائه یک الگوی مدیریتی جهت کشت محصولات عمده زراعی شهرستان‌های استان‌های شرقی ایران با دو تابع هدف حداقل‌سازی مصرف آب آبی و حداکثر سازی ارزش اقتصادی ردپای آب پرداخته‌شده است.

منطقه موردمطالعه

منطقه مطالعاتی در این تحقیق، چهار استان شرقی ایران (خراسان شمالی، خراسان رضوی، خراسان جنوبی و سیستان-بلوچستان)، شامل ۵۶ شهرستان است. مساحت این منطقه حدوداً ۴۲۴۴۵۵ کیلومترمربع است که در طول‌های ۵۵ درجه و ۴۲ دقیقه تا ۶۳ درجه و ۲۸ دقیقه شرقی و عرض‌های ۲۵ درجه و ۶ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۳۳ دقیقه شمالی واقع‌شده است. میانگین دمای سالانه از شمال به جنوب منطقه مطالعاتی افزایش می‌یابد. متوسط درجه حرارت سالانه از ۱۲ درجه سانتی‌گراد در نواحی کوهستانی استان خراسان شمالی تا ۲۹ درجه سانتی‌گراد در نواحی ساحلی استان سیستان و بلوچستان متغیر است. میانگین بلندمدت بارش سالانه از بیش از ۴۰۰ میلی‌متر در عرض‌های شمالی تا کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر در عرض‌های جنوبی و حاشیه دریا متغیر است. بر اساس آمارنامه‌های وزارت جهاد کشاورزی، میانگین بلندمدت (از سال ۱۳۶۱ تا سال ۱۳۹۷) کل سطح زیر کشت محصولات آبی استان‌های موردمطالعه حدود ۹۶۹ هزار هکتار است و عمده‌ترین محصولات آبی چهار محصول گندم، جو، یونجه و ذرت با سطح زیر کشت ۶۴۶ هزار هکتار است که این مقدار بیش از ۶۶ درصد کل سطح زیر کشت محصولات آبی منطقه را شامل می‌شود. از طرفی کاهش چشمگیر بارش‌ها، افزایش مصرف آب، خشک‌سالی‌های پیاپی، حفر چاه‌های غیرمجاز و پدیده تغییر اقلیم موجب ایجاد شرایط بحران آبی در دشت‌ها این منطقه از کشور شده است، لذا لزوم یک مدیریت صحیح و آینده‌نگر در الگوی کشت غالب این منطقه ضروری است. میانگین بلندمدت (۱۰ ساله) سطح-تولید-عملکرد محصولات زراعی غالب استان‌های شرقی کشور و همچنین برای کل کشور در جدول (۱) آورده شده است.

داده‌های ورودی این تحقیق در منطقه موردمطالعه شامل داده‌های هواشناسی (میانگین بلندمدت) و زراعی موردنیاز در مدل ریاضی مسئله بهینه‌سازی الگوی کشت به ترتیب از سایت هواشناسی کل کشور

مواد و روش‌ها

روش ارائه‌شده در این مقاله شامل سه بخش است: برآورد ردپای آب و ارزش اقتصادی آن، بهینه‌سازی الگوی کشت و سناریوهای امنیت آبی. روندنمای روش‌های به‌کاررفته در این مطالعه در شکل ۱ نشان داده‌شده است.

برآورد ردپای آب و ارزش اقتصادی آن

میزان WF تولید هر محصول به مصرف آب (ازجمله آب آبی و سبز) در طول دوره رشد و عملکرد محصول بستگی دارد (Hoekstra et al., 2017). ردپای آب سبز و آبی تولید محصولات در این تحقیق در چارچوب روش هوکسترا و همکاران و رمضانی و همکاران مطابق روابط ۱ و ۲ محاسبه‌شده است (Hoekstra et al., 2011; Ramezani et al., 2019).

$$WF_{Green} = \frac{CWU_{Green}}{Y} = 10 \times \frac{ET_{Green}}{Y} \quad (۱)$$

$$WF_{Blue} = \frac{CWU_{Blue}}{Y} = 10 \times \frac{ET_{Blue}}{Y} \quad (۲)$$

1- Water footprint

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱- میانگین بلندمدت (۱۰ ساله) سطح-تولید-عملکرد محصولات زراعی عمده چهار استان شرقی کشور

استان	محصول	سطح (هکتار)	تولید (تن)	عملکرد (کیلوگرم در هکتار)
خراسان جنوبی	گندم	۲۹۸۳۶	۴۶۷۲۰	۱۵۶۶
	جو	۱۷۰۶۳	۳۰۸۵۴	۱۸۰۸
	یونجه	۳۴۰۹	۱۶۵۶۹	۴۸۶۰
	ذرت	۷۳۷	۲۰۲۶۰	۲۷۴۸۵
خراسان رضوی	گندم	۲۴۴۵۷۵	۴۲۸۶۲۷	۱۷۵۳
	جو	۱۲۳۰۱۹	۲۳۳۰۷۰	۱۸۹۵
	یونجه	۳۱۵۵۹	۲۴۹۸۶۷	۷۹۱۷
	ذرت	۱۸۰۱۷	۷۷۹۵۱۰	۴۳۲۶۵
خراسان شمالی	گندم	۴۵۹۲۷	۷۶۵۵۸	۱۶۶۷
	جو	۱۶۰۷۹	۳۱۹۹۸	۱۹۹۰
	یونجه	۱۰۵۰	۳۵۸۵	۳۴۱۳
	ذرت	۱۸۹۱	۸۱۲۰۶	۴۲۹۴۳
سیستان و بلوچستان	گندم	۷۹۸۳۶	۱۲۰۸۶۷	۱۵۱۴
	جو	۱۰۹۷۲	۱۹۲۶۱	۱۷۵۵
	یونجه	۱۷۰۹۳	۳۷۰۹۹۷	۲۱۷۰۵
	ذرت	۵۱۸۱	۴۴۰۷۳۱	۸۵۰۶۵
کل کشور	گندم	۲۴۶۷۰۰۰	۵۹۸۷۹۸۴	۲۴۲۷
	جو	۶۵۳۰۰۱	۱۶۷۴۹۹۲	۲۵۶۵
	یونجه	۵۳۱۳۰۲	۴۷۲۸۵۹۸	۸۹۰۰
	ذرت	۱۴۴۵۳۴	۷۴۰۸۹۹۰	۵۱۲۶۱

شکل ۱- روند نمای روش‌های به‌کاررفته در تحقیق

که در آن، WF_{Green} ردپای آب سبز (مترمکعب بر کیلوگرم)، WF_{Blue} ردپای آب آبی (مترمکعب بر کیلوگرم)، CWU_{Green} و CWU_{Blue} مصرف آب سبز و آبی هستند (مترمکعب بر هکتار)، ET_{Green} و ET_{Blue} تبخیر-تعرق آب سبز و آب آبی (میلی‌متر)، Y عملکرد محصول است (کیلوگرم بر هکتار) و ضریب ۱۰ برای تبدیل عمق آب (میلی‌متر) به حجم آب در واحد سطح (مترمکعب بر هکتار) است.

برای به دست آوردن ارزش ردپای آب از مفهوم ردپای اقتصادی آب مطابق روابط ۳ و ۴ استفاده‌شده است (Ababaei and Ramezani, 2014).

$$WF_{E(Green)} = \frac{WF_{Green}}{NB} \quad (۳)$$

www.SID.ir

Archive of SID

$$WF_{E(Blue)} = \frac{WF_{Blue}}{NB} \quad (۴)$$

که در آن $WF_{E(Green)}$ ردپای اقتصادی آب سبز برحسب مترمکعب بر میلیون ریال، $WF_{E(Blue)}$ ردپای اقتصادی آب آبی برحسب مترمکعب بر میلیون ریال و NB سود خالص برحسب میلیون ریال بر کیلوگرم است.

به‌منظور محاسبه تبخیر-تعرق آب سبز و آب آبی از روش هوکسترا و همکاران با استفاده از روابط ۵ و ۶ استفاده شد (Hoekstra et al., 2011):

$$ET_{Green} = \min(ET_c, P_e) \quad (۵)$$

$$ET_{Blue} = \max(0, ET_C - P_e) \quad (۶)$$

که در آن، ET_c مقدار تبخیر-تعرق گیاه در طول فصل رشد (میلی‌متر) و P_e بارش مؤثر در طول دوره رشد محصول (میلی‌متر) است.

مقدار ET_c با استفاده از رابطه ۷ محاسبه گردید (Allan et al, 1998):

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (۷)$$

که در آن، K_c ضریب گیاهی محصول بر اساس ضرایب گیاهی موجود در سند ملی آب کشور و ET_0 تبخیر-تعرق گیاه مرجع (میلی‌متر) است که مطابق با معادله FAO Penman-Monteith مطابق رابطه ۸ محاسبه‌شده است (Allan et al, 1998):

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (۸)$$

که در آن ET_0 تبخیر-تعرق گیاه مرجع (میلی‌متر)، R_n تشعشع خالص در سطح گیاه (مگا ژول بر مترمربع در روز)، G فلاکس حرارتی خاک (مگا ژول بر مترمربع در روز)، T میانگین دمای روزانه در ارتفاع دو متری (درجه سلسیوس)، U_2 سرعت باد در ارتفاع دو متری (متر بر ثانیه)، e_s فشار بخار اشباع (کیلو پاسکال)، e_a فشار بخار واقعی (کیلو پاسکال)، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع و دما (کیلو پاسکال بر درجه سلسیوس) و γ ثابت سایکرومتری (کیلو پاسکال بر درجه سلسیوس) است.

در این تحقیق در بخش اول به‌منظور محاسبه نیاز آبی محصولات موردمطالعه (صورت کسر ردپای آب)، ابتدا تبخیر و تعرق گیاه مرجع و همچنین بارش مؤثر در مختصات هر یک ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه موردمطالعه، با استفاده از نرم‌افزار CROPWAT 8.0 که توسط سازمان فائو به‌منظور محاسبه نیاز آبی گیاهان بر اساس روش فائو-پنمن-مونتیت ارائه‌شده است، استفاده گردید. علاوه بر یکسری اطلاعات شامل موقعیت جغرافیایی، ارتفاع ایستگاه موردنظر و دوره رشد محصولات (با استفاده از آمار موجود در سند ملی آب کشور) داده‌های مورداستفاده در این قسمت شامل میانگین بلندمدت (۲۰ ساله) داده‌های میانگین حداکثر دمای ماهانه، میانگین حداقل دمای ماهانه، میانگین رطوبت نسبی ماهانه، میانگین ماهانه سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین، مجموع ساعات آفتابی ماهانه و مجموع بارش ماهانه است.

در قسمت دوم به‌منظور محاسبه عملکرد محصولات موردمطالعه (مخرج کسر ردپای آب)، داده‌های مربوط به سطح زیر کشت و تولید محصولات از بانک اطلاعاتی وزارت جهاد کشاورزی با مراجعه حضوری دریافت گردید. سپس با استفاده از آزمون‌های آماری (توزیع نرمال) در سطح اطمینان ۹۵ درصد داده‌های پرت (شامل سال‌هایی که با دخالت بیش‌ازحد عوامل انسانی عملکرد نرمال منطقه بشدت تحت تأثیر قرارگرفته است) حذف گردید. در ادامه نیز میانگین بلندمدت (۲۰ ساله) عملکرد هر محصول، در شهرستان‌های مربوط به دشت‌هایی که ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه موردمطالعه به‌عنوان ایستگاه معرف آن‌ها بودند، به‌عنوان عملکرد شاخص آن ایستگاه در محاسبات مربوط به ردپای آب در نظر گرفته‌شده است.

بهینه‌سازی الگوی کشت

در این تحقیق با تابع هدف حداکثر نمودن ارزش اقتصادی ردپای آب کل محصولات و حداقل نمودن میزان مصرف آب آبی، اقدام به آمایش سطح زیر کشت گیاهان زراعی عمده در شرق کشور در مقیاس شهرستان شده است. به‌منظور پیاده کردن مدل آمایش الگوی کشت، از مدل‌های بهینه‌سازی تکاملی استفاده‌شده است. مدل‌های بهینه‌سازی ازجمله سیستم‌هایی هستند که به لحاظ بهینه کردن هم‌زمان چند پارامتر با اثرات متقابل آن‌ها ابزار مناسبی برای مدیریت فراهم می‌آورند. بهینه‌سازی درواقع تعیین مناسب‌ترین مقدار متغیرهای تصمیم و تأثیرگذار بر مسئله است که منجر به بهینه نمودن هدف موردنظر می‌شود. متغیر تصمیم در این تحقیق، سطح زیر کشت محصولات در هر شهرستان است. توابع هدف و قیدهای موردنظر در این تحقیق در روابط ۹ و ۱۴ آورده شده است.

$$f_1 = \max\left(\sum_{i=1}^{56}\sum_{j=1}^{9}\left(WF_{E(Green)(ij)} + WF_{E(Blue)(ij)}\right) \times Y_{ij} \times A_{ij}\right) \quad (۹)$$

$$f_2 = \min \sum_{i=1}^{56}\sum_{j=1}^{9}\left(WF_{Blue(ij)} \times Y_{ij} \times A_{ij}\right) \quad (۱۰)$$

Subject to:

$$\sum_{i=1}^{56}\sum_{j=1}^{9} WF_{Blue(ij)} \times Y_{ij} \times A_{ij} \le WS_i \quad (۱۱)$$

www.SID.ir

Archive of SID

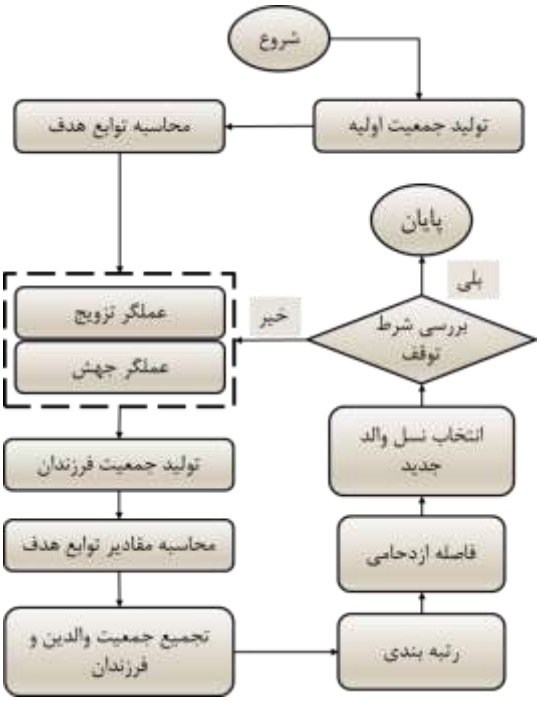
$$\sum_{i=1}^{56} Y_{ij} \times A_{ij} \geq Y_j^* \times A_j^* \quad (۱۲)$$

$$\sum_{i=1}^{56} A_{ij} \leq k(at_i) \quad (۱۳)$$

$$0 \leq A_{ij} \quad (۱۴)$$

که در آن، $WF_{E(Green)(ij)}$ ارزش اقتصادی ردپای آب سبز برحسب مترمکعب بر میلیون ریال، $WF_{E(Blue)(ij)}$ ارزش اقتصادی ردپای آب آبی برحسب مترمکعب بر میلیون ریال، $WF_{Blue(ij)}$ حجم ردپای آب آبی محصول j در شهرستان i، $WF_{Green(ij)}$ حجم ردپای آب سبز محصول j در شهرستان i، A_{ij} سطح زیر کشت محصول j در شهرستان i برحسب هکتار، Y_{ij} عملکرد محصول j در شهرستان i برحسب کیلوگرم بر هکتار، i شمارنده شهرستان، j شمارنده محصول، at_i سطح زیر کشت کل محصولات موردبررسی در شهرستان i ام برحسب هکتار، Y_{ij} عملکرد محصول j ام از شهرستان i ام برحسب کیلوگرم بر هکتار، k ضریب حد بالای مساحت، WS_i میزان آب قابل‌استفاده بر اساس شاخص امنیت آبی برحسب مترمکعب و $Y_j^* \times A_j^*$ میزان تولید محصول j در شرایط موجود است.

NSGAII که اولین بار توسط دب معرفی شد، یکی از پرکاربردترین الگوریتم‌های تکاملی در حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه است که مورداستفاده بسیاری از محققان قرارگرفته است (Deb, 1999). شکل ۲ روند نمای الگوریتم NSGAII را نشان می‌دهد.



شکل ۲- روند نمای NSGAII

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌گردد NSGAII ابتدا جمعیت اولیه تولید می‌شوند و به ازا آن‌ها مقادیر توابع هدف محاسبه و ارزیابی می‌گردند. سپس شمارنده نسل‌ها، اصلاح‌شده و پس از اعمال تزویج و جهش، جمعیت فرزندان تشکیل می‌شوند. در این مرحله مجدداً مقادیر تابع هدف مورد ارزیابی قرارگرفته و بر اساس نسل والد و فرزندان، جمعیتی ترکیبی حاصل و رتبه‌بندی می‌شود. سپس فاصله ازدحام برای صف‌های مختلف محاسبه‌شده، و بر اساس شاخص‌های رتبه و فاصله ازدحامی، نسل والد انتخاب می‌گردد. در صورت ارضا شدن شرط توقف، این روند متوقف و در غیر این صورت مجدداً، مرحله ارزیابی مقادیر تابع برای جمعیت والد انتخابی انجام می‌شود و این روند ادامه می‌یابد (Fallah-Mehdipour et al., 2012؛ Sarzaeim et al., 2016).

در این پژوهش برای حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه، از کد نویسی الگوریتم بهینه‌سازی NSGAII در محیط نرم‌افزار (MATLAB R2020A V9.6 X64 MATHWORKS) استفاده‌شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

سناریوهای امنیت آبی

طبق تعریف، امنیت آبی به‌عنوان شرایطی در نظر گرفته می‌شود که در آن به لحاظ کمیت و کیفیت آب برای یک زندگی سالم، رشد اقتصادی و حفاظت محیط‌زیست به مقدار کافی در دسترس است (Grey and Sadoff, 2007؛ Bakker, 2012). یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین شاخص‌ها به‌منظور بررسی امنیت آبی شاخص کمیسیون توسعه پایدار سازمان ملل (UN) است (Lawrence, 2002). که در این تحقیق به‌منظور در نظر گرفتن ملاحظات مربوط به امنیت آبی در منطقه موردمطالعه، از آن استفاده‌شده است. برای این منظور ابتدا میزان آب تجدید پذیر موجود در هر شهرستان برآورد شده و سپس میزان استفاده از آن مطابق چهار وضعیت مختلف این شاخص به‌عنوان چهار سناریو به‌صورت قید (رابطه ۱۱) در مدل آمایش الگوی کشت لحاظ شده است.

بنیاد کمیسیون توسعه پایدار سازمان ملل میزان درصد برداشت از منابع آب تجدید پذیر در هر کشور را به‌عنوان شاخص اندازه‌گیری بحران آب معرفی کرده است. بر اساس شاخص مذکور هرگاه میزان برداشت آب یک کشور بیشتر از ۴۰ درصد کل منابع آب تجدید پذیر آن باشد این کشور با بحران شدید آب (سناریو ۱) مواجه است و اگر این مقدار در حدفاصل ۲۰ تا ۴۰ درصد باشد بحران در وضعیت متوسط (سناریو ۲) و چنانچه این شاخص بین ۱۰ تا ۲۰ درصد باشد بحران در حد متعادل (سناریو ۳) و کمتر از ۱۰ درصد بدون بحران (سناریو ۴) تلقی می‌شود.

نتایج و بحث

پراکنش مکانی ردپای آب برای محصولات موردمطالعه در شکل ۳ نشان داده‌شده است. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، به‌طورکلی در میزان *WF*، روندی افزایش-کاهش-افزایش از جنوب تا شمال منطقه وجود دارد. از بین محصولات موردمطالعه کمترین میزان *WF* مربوط به ذرت در حدود ۰/۱۱ تا ۰/۳۵ مترمکعب بر کیلوگرم است درحالی‌که بالاترین میزان *WF* مربوط به یونجه در حدود ۰/۸۸ تا ۲/۸۵ کیلوگرم بر مترمکعب در شرق ایران است.

به‌طورکلی *WF* محصولات موردمطالعه در حدفاصل عرض جغرافیایی ۳۰ تا ۳۳ درجه دارای بیشترین مقدار است و هرچه از این محدوده به سمت شمال و جنوب حرکت کنیم *WF* کاهش می‌یابد. علت اصلی کاهش میزان *WF* در مناطق جنوبی، برای محصولات گندم و جو کاهش قابل‌توجه طول دوره رشد گیاه و برای دو محصول یونجه و ذرت افزایش قابل‌توجه محصول است.

روند کلی میزان *WF* گندم و جو به‌جز در ناحیه جنوب شرقی، در مابقی مناطق تقریباً مشابه یکدیگر است. همچنین تغییرات *WF* یونجه و ذرت نیز تقریباً روندی مشابه به هم دارند.

در این تحقیق متوسط جهانی میزان تبخیر برای محاسبه آب تجدید پذیر در نظر گرفته شد. نتایج برآورد آب تجدیدپذیر در مقیاس منطقه مطالعاتی در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- حجم آب تجدید پذیر در شرق کشور

استان	حجم آب تجدید پذیر (هزار مترمکعب)
خراسان جنوبی	۲۰۱۱۹۷۴
خراسان رضوی	۶۳۳۲۲۲۳
خراسان شمالی	۱۷۸۲۶۲۸
سیستان و بلوچستان	۷۵۴۴۱۹۲
کل منطقه	۱۷۶۷۱۰۲۴

بر اساس اطلاعات موجود در جدول ۲ مشاهده می‌گردد، استان‌های خراسان شمالی، خراسان جنوبی، خراسان رضوی و سیستان و بلوچستان به ترتیب ۱۰، ۱۲، ۳۵ و ۴۳ درصد از حجم کل آب تجدید پذیر منطقه مطالعاتی را به خود اختصاص داده‌اند.

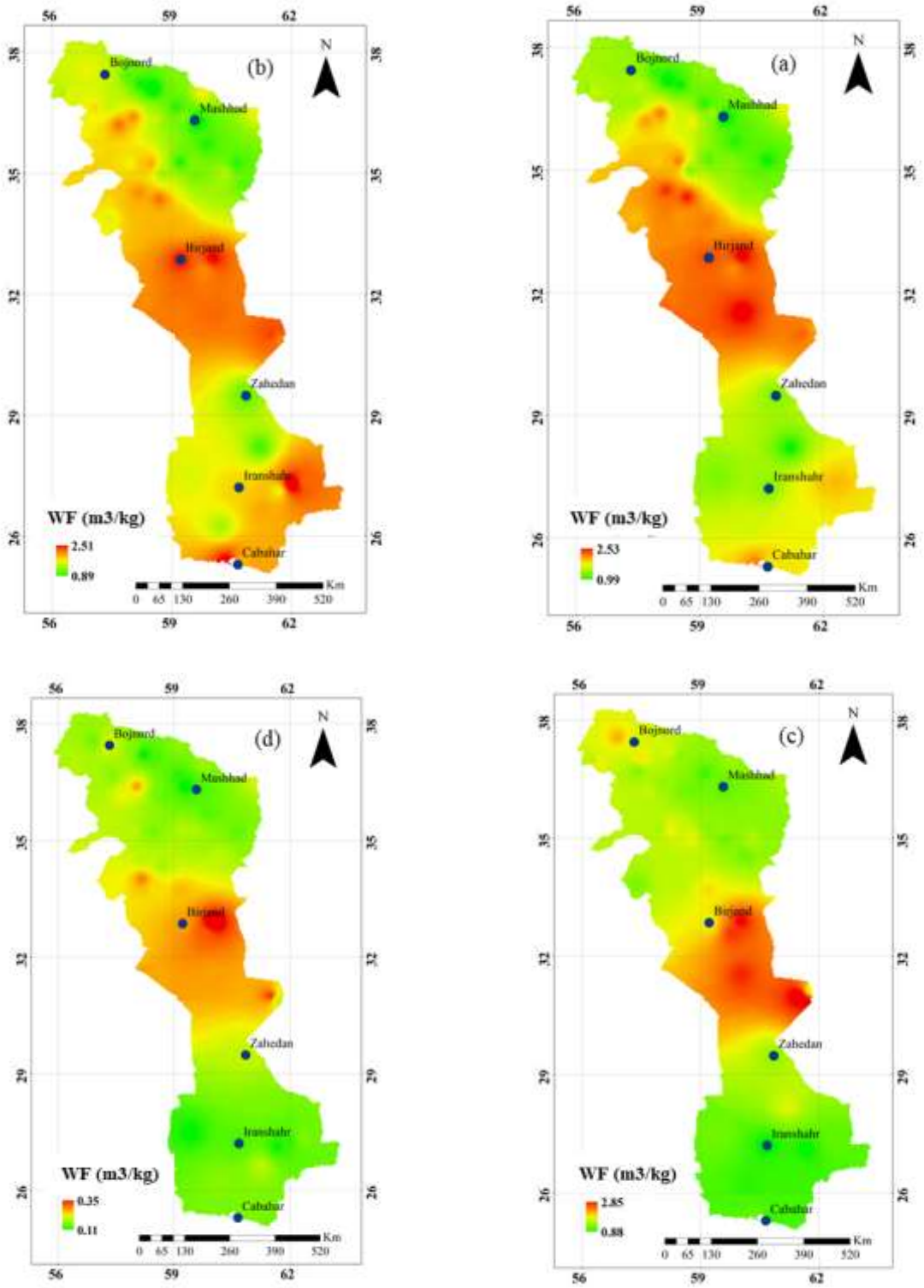
نتایج برآورد میزان برداشت آب تجدید پذیر توسط محصولات موردمطالعه نشان می‌دهد که در شرق ایران هم‌اکنون ۷۰ درصد کل آب تجدید پذیر صرفاً جهت تولید چهار محصول گندم، جو، یونجه و ذرت مورداستفاده قرار می‌گیرد، ازاین‌رو این منطقه بر اساس شاخص امنیت آبی سازمان ملل در وضعیت بحران شدید آبی قرار دارد.

مدل آمایش الگوی کشت این تحقیق مطابق روابط ۹ و ۱۰ برای چهار سناریو مختلف امنیت آبی در محیط نرم‌افزار MATLAB به‌کاررفته شد. جبهه‌های بهینه پارتو برای حداکثر نمودن ارزش اقتصادی ردپای آب کل محصولات و حداقل نمودن ردپای آب آبی در شکل ۳ نشان داده‌شده است.

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌گردد، تأثیر هم‌زمان سناریوهای مختلف امنیت آبی و مقادیر مختلف محدودیت‌های تولید می‌تواند مجموعه جواب به‌دست‌آمده را تا حد بسیار زیادی تحت تأثیر قرار دهد، یعنی به‌طورکلی میزان دسترسی به منابع آب در منطقه تأثیر بسزایی در میزان درآمد و تولید محصولات موردمطالعه دارد و این موضوع نشان از وابستگی شدید محصولات عمده زراعی شرق کشور به آب آبی دارد. شکل ۴ (الف) نشان می‌دهد درصورتی‌که منطقه موردمطالعه از منظر قید امنیت آبی در شرایط بدون بحران قرار گیرد، مسئله از منظر میزان تولید برای مقادیر بیشتر از ۲۵ درصد میزان فعلی دارای جواب موجه (شدنی) نیست، یعنی چنانچه ردپای آب آبی محصولات موردمطالعه تنها ۱۰ درصد میزان آب دسترس هر یک از ۵۶ شهرستان منطقه مطالعاتی را شامل شود، نمی‌توان بیش از ۲۵ درصد میزان فعلی از محصولات موردمطالعه تولید کرد.

www.SID.ir

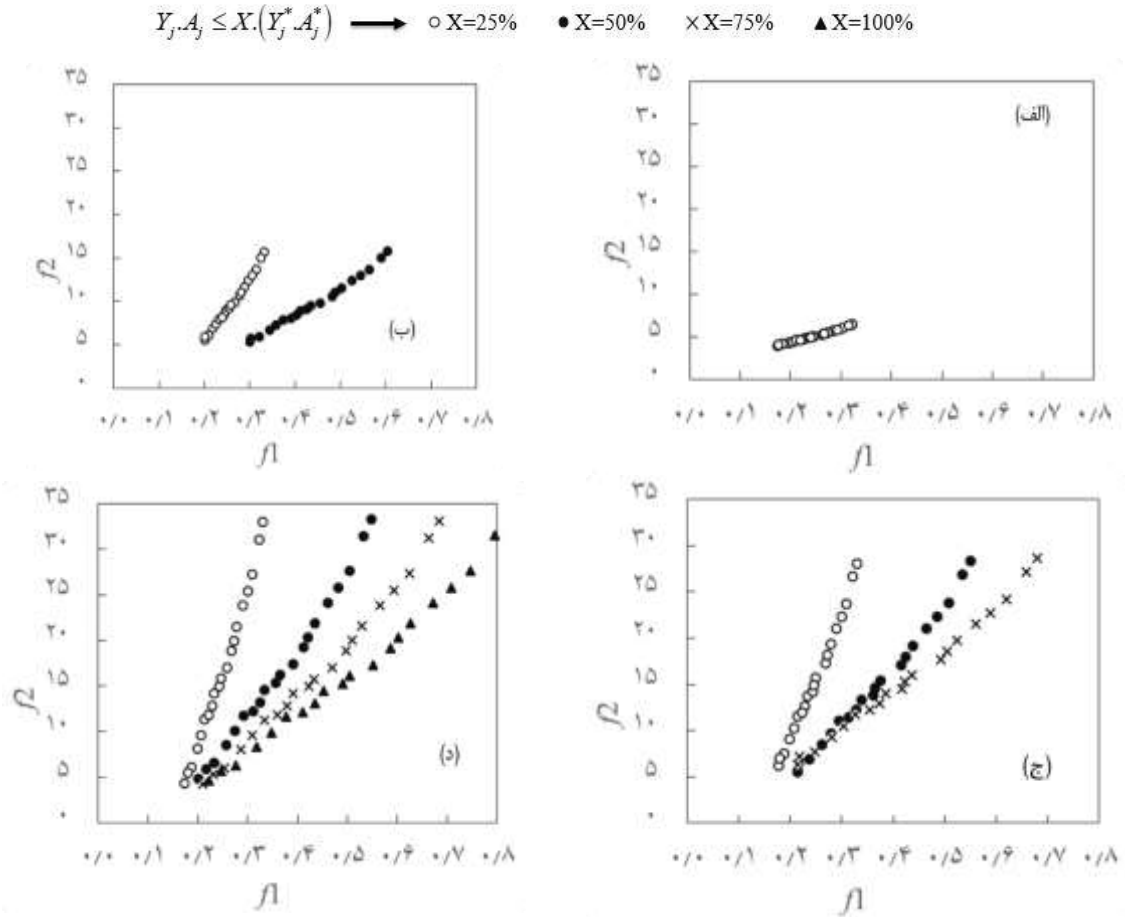
Archive of SID



شکل ۳- نقشه ردپای آب (a) گندم (b) جو (c) یونجه و (d) ذرت

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ٤- جبهه‌های پرتو: (الف) سناریو اول، (ب) سناریو دوم، (ج) سناریو سوم و (د) سناریو چهارم امنیت آبی

شکل ۴ (ب) نشان می‌دهد درصورتی‌که منطقه موردمطالعه از منظر قید امنیت آبی در شرایط بحران متعادل قرار گیرد، مسئله از منظر میزان تولید برای مقادیر بیشتر از ۵۰ درصد میزان فعلی دارای جواب موجه (شدنی) نیست، یعنی چنانچه ردپای آب آبی محصولات موردمطالعه بین ۱۰ تا ۲۰ درصد میزان آب قابل‌دسترس هر یک از ۵۶ شهرستان منطقه مطالعاتی را شامل شود، نمی‌توان بیش از ۵۰ درصد میزان فعلی از محصولات موردمطالعه تولید کرد. شکل ۴ (ج) نشان می‌دهد درصورتی‌که منطقه موردمطالعه از منظر قید امنیت آبی در شرایط بحران متوسط قرار گیرد، مسئله از منظر میزان تولید برای مقادیر بیشتر از ۷۵ درصد میزان فعلی دارای جواب موجه (شدنی) نیست، یعنی چنانچه ردپای آب آبی محصولات موردمطالعه تنها ۲۰ تا ۴۰ درصد میزان آب تجدیدپذیر هر یک از ۵۶ شهرستان منطقه مطالعاتی را شامل شود، نمی‌توان بیش از ۷۵ درصد میزان فعلی از محصولات موردمطالعه تولید کرد.

شکل ۴ (د) نشان می‌دهد درصورتی‌که منطقه موردمطالعه از منظر قید امنیت آبی در شرایط بحران شدید قرار گیرد، مسئله از منظر میزان تولید برای مقادیر فعلی از تولید محصولات موردمطالعه دارای جواب موجه (شدنی) است، یعنی چنانچه ردپای آب آبی محصولات موردمطالعه بیش از ۴۰ درصد میزان آب تجدید پذیر هر یک از ۵۶ شهرستان منطقه مطالعاتی را شامل شود، می‌توان میزان فعلی از محصولات موردمطالعه تولید کرد.

بهترین راه‌حل‌ها برای هر سناریو و در هر نمودار از شکل ۴ انتخاب‌شده و مقادیر آن‌ها در جدول ۳ ذکرشده است.

همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌گردد، تحت سناریو ۱، بهترین مقدار تابع هدف اول (ماکزیمم) و دوم (مینیمم) به ترتیب برابر ۶/۴۸ (10^9 میلیون ریال) و ۰/۱۷ (10^6 هزار مترمکعب) است. همچنین، تحت سناریو ۲ بهترین مقدار تابع هدف اول (ماکزیمم) و دوم (مینیمم) به ترتیب برابر ۱۵/۶۱ (10^9 میلیون ریال) و ۰/۱۸ (10^6 هزار مترمکعب) است. بر اساس اطلاعات جدول ۳، تحت سناریو ۳ بهترین مقدار تابع هدف اول (ماکزیمم) و دوم (مینیمم) به ترتیب برابر ۲۹/۱۰ (10^9 میلیون ریال) و ۰/۱۸ (10^6 هزار مترمکعب) است و تحت سناریو ۴ بهترین مقدار تابع هدف اول (ماکزیمم) و دوم (مینیمم) به ترتیب برابر ۳۲/۸۶ (10^9 میلیون ریال) و ۰/۱۷ (10^6 هزار مترمکعب) است.

www.SID.ir

Archive of SID

اطلاعات موجود در جدول ۳ نشان می‌دهد که، به‌طورکلی میزان تغییرات تابع هدف اول (حداکثر شدن ارزش اقتصادی ردپای آب) بین ۳/۹۶ تا ۳۳/۲۵ (10^9 میلیون ریال) متغیر است. درواقع این موضوع بیانگر این است که در صورت عدم وجود محدودیت‌های آبی و غذایی در شرق کشور کشاورزان این منطقه با کشت محصولی که ارزش قیمتی بالاتری در هر هکتار به دست می‌دهد، در سطح زیر کشت موجود بین همین مقادیر، درآمد بیشتری خواهند داشت. از طرفی دیگر به‌طورکلی میزان تغییرات تابع هدف اول (حداکثر شدن درآمد) بین ۰/۱۷ تا ۰/۸۲ (10^6 هزار مترمکعب) متغیر است، که بیانگر این است که بسته به میزان تولید ردپای آب آبی بین همین مقادیر متغیر است.

جدول ۳- بهترین مقادیر توابع هدف مرتبط با هر سناریو

سناریو	بهترین نقطه بر اساس	$Y_j.A_j \le X.(Y_j^*.A_j^*)$							
		٪۲۵X=		٪۵۰X=		٪۷۵X=		٪۱۰۰X=	
		f_2	f_1	f_2	f_1	f_2	f_1	f_2	f_1
۱۰<WS≤۰	f_2	۰/۳۲	۶/۴۸	-	-	-	-	-	-
	f_1	۰/۱۷	۳/۹۶	-	-	-	-	-	-
۲۰<WS≤۱۰	f_2	۰/۴۱	۱۵/۶۱	۰/۶۱	۱۵/۱۷	-	-	-	-
	f_1	۰/۱۸	۵/۶۸	۰/۲۹	۵/۰۲	-	-	-	-
۴۰<WS≤۲۰	f_2	۰/۳۳	۲۹/۱۰	۰/۵۵	۲۸/۸۸	۰/۶۸	۲۸/۸۲	-	-
	f_1	۰/۱۸	۵/۷۹	۰/۲۱	۵/۵۳	۰/۲۲	۵/۹۴	-	-
<WS≤AW۴۰	f_2	۰/۳۱	۳۲/۵۳	۰/۵۵	۳۲/۸۶	۰/۶۸	۳۲/۷۹	۰/۸۲	۳۳/۲۵
	f_1	۰/۱۷	۳/۹۶	۰/۲۱	۴/۸۹	۰/۲۲	۴/۱۹	۰/۲۳	۴/۰۵

به‌طورکلی بر اساس شکل ۴ و جدول ۳ مشاهده می‌گردد که در منطقه موردمطالعه تولید میزان کنونی (*A*Y*۱۰۰٪) از محصولات موردمطالعه باعث بروز بحران شدید آبی به لحاظ شاخص امنیت آبی سازمان ملل می‌گردد و تولید سه‌چهارم از میزان کنونی (*A*Y*۷۵٪) از محصولات موردمطالعه باعث بروز بحران متوسط آبی به لحاظ شاخص امنیت آبی سازمان ملل می‌شود. همچنین تولید نیمی از میزان کنونی (*A*Y*۵۰٪) از محصولات موردمطالعه باعث بروز بحران متعادل آبی به لحاظ شاخص امنیت آبی سازمان ملل و تولید یک‌چهارم از میزان کنونی (*A*Y*۲۵٪) از محصولات موردمطالعه باعث بروز شرایط بدون بحران آبی به لحاظ شاخص امنیت آبی سازمان ملل می‌گردد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

نتایج بهینه‌سازی الگوی کشت محصولات عمده زراعی استان‌های شرقی کشور شامل خراسان‌های شمالی، رضوی و جنوبی و استان سیستان و بلوچستان با دو هدف حداقل‌سازی مصرف آب آبی و حداکثر سازی ارزش اقتصادی ردپای آب نشان داد، برای تولید مقدار کنونی از محصولات موردمطالعه در این استان‌ها با اعمال الگوی بهینه می‌توان تا ۳۰ درصد در مصرف منابع آبی این استان‌ها صرفه‌جویی کرد. از طرفی نتایج نشان داد به ترتیب تولید بیش از ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد محصولات موردمطالعه بر اساس شاخص امنیت آبی سازمان ملل وضعیت منابع آبی منطقه را به ترتیب در وضعیت بحران متعادل، متوسط و شدید قرار می‌دهد. همچنین نتایج نشان می‌دهد چنانچه منطقه موردمطالعه از منظر شاخص امنیت آبی سازمان ملل به ترتیب در وضعیت بدون بحران، بحران متعادل، بحران متوسط و بحران شدید قرار داشته باشد حداکثر میزان ارزش اقتصادی تولیدشده توسط محصولات موردمطالعه در الگوی کشت بهینه به ترتیب برابر ۶/۴۸، ۱۵/۶۱، ۲۹/۱۰ و ۳۲/۸۶ (10^9 میلیون ریال) خواهد بود. با توجه به نتایج این تحقیق توصیه می‌شود در بهینه‌سازی‌های الگوی کشت و یا برنامه‌های کلان‌تر آمایش سرزمین کشاورزی که با توابع هدفی چون افزایش بهره‌وری مصرف آب، حفظ امنیت غذایی و ... انجام می‌گیرد، در کنار سایر قیود به مفهوم ردپای آب و شاخص‌های امنیت آبی نیز توجه گردد.

منابع

علیزاده، ا.، مجیدی، ن.، قربانی، م. و محمدیان، ف. ۱۳۹۱. بهینه‌سازی الگوی کشت باهدف تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی (مطالعه موردی دشت مشهد چناران). نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱(۶): ۶۸-۵۵.

عربی، ا.، و نیکنیا، ن. ۱۳۸۹. ردپای آب، شاخصی از تأثیر الگوی مصرف کشورها. پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد.

Ababaei, B. and Ramezani Etedali, HR. 2014. Estimation of water footprint components of Iran's

www.SID.ir

Archive of SID

Gollehon, N. and Quinby, W. 2004. Irrigation resources and water. USDA Economics ResearchService.URL:http://www.ers.usda.gov/publications/AREI/EIB 16/Chapter2/2.1/.

Grey, D. and Sadoff, C.W. 2007. Sink or swim? Water security for growth and development. Water Policy. 9 (6): 545-571.

Hoekstra, A. Y. and Chapagain, A. K. 2008. Globalization of water: Sharing the planets freshwater resources. Blakwell Publishing, Oxford, UK. DOI: 10.1002/9780470696224.

Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M., and Mekonnen, M.M., 2011. The Water Footprint Assessment Manual. Earthscan, London.

Kondash, A. J., Lauer, N. E. and Vengosh, A. 2018. The intensification of the water footprint of hydraulic fracturing. Science advances. 4(8): eaar5982.

Lawrence, P., Meigh, J. R. and Sullivan, C. A. 2003. The Water Poverty Index: An International Comparison, Keele Economic Research Papers 2003/18. Centre for Ecology and Hydrology (CEH), Wallingford, UK.

Mekonnen, M. M. and Hoekstra, A. Y. 2020. Sustainability of the blue water footprint of crops. Advances in Water Resources, 143: 103679.

Pongkijvorasin, S. 2007. Stock-to stock externalities resources in renewable resource economics: watersheds, conjunctive water use, and mud. Ph.D dissertation in economics. University of Hawai'i.

Ramezani Etedali, H., Ahmadaali, K., Gorgin, F. and Ababaei, B. 2019. Optimization of the cropping pattern of main cereals and improving water productivity: application of the water footprint concept. Irrigation and Drainage. 68(4): 765-777.

Sarzaeim, P., Bozorg-Haddad, O., Fallah-Mehdipour, E. and Loáiciga, H.A. 2016. Discussion of "Multiobjective management of water allocation to sustainable irrigation planning and optimalcropping pattern, Journal of Irrigation and Drainage, In Press.

Sullivan, C. 2002. Calculating a Water Poverty Index, World Development. 30(7): 1195- 1210.

Van Oel P.R., Mekonnen M.M. and Hoekstra A.Y. 2009. The external water footprint of the Netherlands: Geographically-explicit quantification and impact assessment. Ecological Economics. 69: 82-92.

wheat production: comparison of global and national scale estimates. Environmental Processes. 1(3): 193–205.

Ababaei B. and Ramezani Etedali, H. 2017. Water footprint assessment of main cereals in Iran. Agricultural Water Management. 179: 401- 411.

Allan, J. A. 1997. Virtual water: A long-term solution for water short Middle Eastern economies? Paper presented at the 1997 British Assoc. Festival of Sci., University of Leeds, UK.

Allan, J. A. 2003. Virtual water eliminates water wars? A case study from the Middle East. PP. 137-145. In: A. Y .Hoekstra (Ed.), Virtual Water Trade, Proc. of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade, Value of Water Research Report Series No. 12, IHE, Delft, The Netherlands.

Allen, R. G. 1998. Crop evapotranspiration. FAO irrigation and drainage paper. 56: 60-64.

Bakker, K. 2012. Water security: research challenges and opportunities. Science 337. (6097): 914-915.

Deb, K. 1999. Multi-Objective genetic algorithms: Problem difficulties and construction of test problem. Evolutionary Computation. 7(3), 205-230.

Ewaid, S. H., Abed, S. A. and Al-Ansari, N. 2019. Water Footprint of Wheat in Iraq. Water, 11(3): 535.

Fallah-Mehdipour, E., Bozorg-Haddad, O., Rezapour Tabari, M.M. and Mariño, M.A. 2012. Extraction of decision alternative in construction management projects: Application and adaptation of NSGA II and PSO. Journal of Expert Systems with Applications. 36: 2794-2803.

FAO. 2015. Towards a water critical perspectives for policy-makers. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Retrieved from http://www.fao.org/3/ai4560e.pdf.

FAO. 2017. Water for Sustainable Food and Agriculture: A report produced for the G20 Presidency of Germany.

FAO. 2018. Transforming food and agriculture to achieve the SDGs. Retrieved from http://www.fao.org/family farming/detail/en/c/1145621.

Forin, S., Mikosch, N., Berger, M. and Finkbeiner, M. 2020. Organizational water footprint: a methodological guidance. The International Journal of Life Cycle Assessment. 25(2): 403-422.

www.SID.ir

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 1, Vol. 15, Apr.-May. 2021, p. 188-198

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۱، جلد ۱۵، فروردین - اردیبهشت ۱۴۰۰، ص. ۱۹۸-۱۸۸

Multi-Objective Optimization of Cropping Pattern by Emphasizing on Water Footprint in the Eastern Provinces of Iran

A. Arefinia[1], Kh. Ahmadaali[2*]

Recived: Nov.09, 2020 Accepted: Dec.30, 2020

Abstract:

Increasing the water productivity by cropping pattern optimization is one of the best ways for development in agriculture. In this study, in order to maximize farmers' income and minimize blue water footprint of wheat, barley, alfalfa, and maize, the NSGA-II multi-objective optimization algorithm and United Nations commission on sustainable development's indicator has been used in four cropping pattern scenarios in the 56 cities of the eastern provinces of Iran. The results showed that in some scenarios it was not possible to fully achieve these goals in the multi-objective model. The results also showed that the production of 50, 75 and 100% of the current values causes a low, moderate and severe water stress in the study region, that on average, save 55, 40 and 30 % of the region's water resources, respectively. Implementation of this model in the study area would increase revenue, reduce water consumption and, consequently make more environmental sustainability.

Keywords: Blue water, Green water, Multi-objective optimization, NSGA II, Optimum cropping pattern, Water security,

1- M.Sc. Student, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
2- Assistant Professo, Department of Arid and Mountainous Regions Reclamation, Faculty of natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran
(*- Corresponding Author Email: khahmadauli@ut.ac.ir)

www.SID.ir