

ارزیابی تأثیر سیاست‌های حفاظت آب بر تخصیص بهینه منابع با لحاظ هدف‌های اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و تغذیه‌ای

مصطفی مردانی نجف‌آبادی، عباس عبدشاهی، عباس میرزایی، حسن آزر^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۲

چکیده

حفاظت از منابع آب برای تضمین تأمین پایدار آب برای نسل‌های آینده و حفظ بوم‌سامانه‌های طبیعی ضروری است. همچنین، مدیریت بهینه منابع آب می‌تواند به کاهش بحران‌های آب کمک کند. در این پژوهش، به منظور تخصیص بهینه منابع در منطقه دشت حمیدیه از الگوریتم NSGA-II استفاده شد. در این راستا، در آغاز با بهینه‌سازی الگوهای زراعی، وضعیت بهینه مجموعه‌ای از هدف‌های اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و تغذیه‌ای تعیین شده و پس از آن اثرگذاری‌های سیاست‌های حفاظت آب ارزیابی شد. داده‌های مورد نیاز از طریق تکمیل ۱۷۰ پرسشنامه از کشاورزان منطقه در سال ۱۴۰۱ گردآوری شد. نتایج ارزیابی سیاست‌های حفاظت از آب نشان داد که افزایش کارایی آبیاری ضمن بهبود بازده برنامه‌ای و کاهش مصرف آب، افزایش انرژی تولید شده به ازای هر واحد محصول را نیز به دنبال دارد و از این حیث، می‌تواند تناسب زیادی با تأمین همزمان انواع هدف‌های ذکر شده داشته باشد. این در حالی است که پیش‌فرض کم آبیاری به‌رغم کاهش میزان مصرف آب و کاهش نهاده‌های شیمیایی، منجر به کاهش میانگین بازده برنامه‌ای در سطح منطقه می‌شود. کاهش بازده برنامه‌ای، کاهش میانگین مصرف آب و تغییرپذیری‌های ناهمگون دیگر نهاده‌های مورد استفاده، از اثرگذاری‌های کاهش سطح زیرکشت برنج در منطقه‌های مورد بررسی خواهد بود. همچنین نتایج نشان داد که افزایش سطح زیر کشت محصول کنگد، به‌رغم بهبود بازده برنامه‌ای کشاورزان به افزایش مصرف آب و برخی از نهاده‌های آلوده‌کننده محیط‌زیست منجر خواهد شد. با توجه به نتایج به دست آمده از ارزیابی اتخاذ سیاست‌های حفاظت از آب، پیشنهاد و تأکید می‌شود که راهکارهای بهبود کارایی آبیاری در واحدهای کشاورزی در اولویت قرار گیرد.

طبقه‌بندی JEL: C44، C61، P28، Q18

واژه‌های کلیدی: الگوی کشت، الگوریتم ژنتیک، مدل‌سازی چند هدفه، کم آبیاری

^۱ به ترتیب: دانشیاران و استادیار گروه اقتصاد کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاثانی، ایران. دکتری اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، ایران.

مقدمه

استفاده رقابتی از منابع آب در کشاورزی و دیگر بخش‌ها، کمبود آب را در بسیاری از نقاط جهان تشدید کرده است. عامل‌هایی مانند رشد جمعیت، شهرنشینی، تغییر رژیم غذایی و تغییرپذیری‌های اقلیم، فشار بر منابع آب را در بسیاری از منطقه‌های کم‌آب تشدید کرده‌اند (Tuninetti et al., 2022). ادامه این روند، ضمن نبود تعادل بین عرضه و تقاضای آب، به یک محدودیت عمده برای دستیابی به توسعه اجتماعی - اقتصادی به‌ویژه در منطقه‌های خشک و نیمه‌خشک تبدیل شده است (Liu et al., 2023). محققان باور دارند که به دلیل تداوم رشد تقاضای آب، مدیریت منابع آب از طریق تقویت زیرساخت‌های فنی و رویکردهای مهندسی به منظور بهبود سمت عرضه به نتیجه مطلوب منجر نخواهد شد؛ بلکه سیاست‌های مدیریت تقاضا دارای سودمندی بالاتری است (Zetland, 2014; Mardani Najafabadi et al., 2022). بر این مبنا، مدیریت تقاضا به عنوان اصولی‌ترین راهکار برای کنترل مصرف‌های آب و مدیریت منابع آب برای تعادل بخشی مطرح می‌باشد (Aljanabi et al., 2018).

در حال حاضر، نزدیک به ۷۰ درصد آب‌های شیرین در سراسر جهان برای استفاده در بخش کشاورزی برداشت می‌شوند (Prakash Khedun et al., 2014). در کشورهایی که وابستگی زیادی به تولید کشاورزی دارند، این مسئله جدی‌تر خواهد بود. برای مثال، سهم آب برداشت شده در بخش کشاورزی برای کشورهای خاورمیانه ۸۴ درصد گزارش شده است (Wang et al., 2024). این در حالی است که پایین بودن کارایی آبیاری در بخش کشاورزی به‌ویژه در منطقه‌های کم‌آب، معیشت کشاورزان و دستیابی به امنیت غذایی را به مخاطره انداخته است (Boazar et al., 2020; Mirzaei et al., 2022a). با توجه به سهم بالای مصرف آب در بخش کشاورزی، بهره‌وری پایین استفاده از آب و وجود خشکسالی‌های متناوب در منطقه‌های خشک و نیمه‌خشک، برنامه‌ریزی برای استفاده بهینه از منابع آب در بخش کشاورزی پرهیز ناپذیر است. انتظار می‌رود با اصلاح سیاست‌ها و رویکردهای مدیریتی و اجرای سیاست‌های حفاظت از منابع آب در راستای بهبود وضعیت معیشت کشاورزان، افزون بر پایداری منابع آب، افزایش کارایی اقتصادی مصرف آب نیز محقق شود (Hadiyan et al., 2020). یکی از راهکارهای تحقق این هدف‌ها، بهینه‌سازی الگوی کشت منطقه‌ای و مدیریت منابع آب به منظور تعدیل شدت کمبود آب در منطقه‌های مختلف است

ارزیابی تأثیر سیاست های...۱۴۹

(Chouchane et al., 2020). در این راستا، بهینه‌سازی الگوی کشت باید به طور جامع، حفاظت از منابع آب، تولید غذا و برتری‌های اقتصادی را در نظر بگیرد (Ren et al., 2021). با توجه به ادبیات موجود، راهکارها و سیاست‌های متنوعی برای حفاظت از منابع آب در قالب بهینه‌سازی الگوهای زراعی ارزیابی شده است. برای مثال، اصلاح و جایگزینی الگوی کشت رایج در منطقه‌های با یک الگوی کشت که کارایی فیزیکی و اقتصادی مصرف آب را افزایش دهد، به‌عنوان راهبرد تطبیقی کشاورزان در زمینه مدیریت تقاضای آب مطرح می‌باشد که در پژوهش‌های مختلفی به ارزیابی این راهبرد پرداخته شده است (Marzban et al., 2021). از سوی دیگر، کنترل سطح زیرکشت محصول‌های آب‌بر نیز می‌تواند راهبرد مناسبی برای مدیریت منابع آب تلقی شود (Rezaei et al., 2016; Yazdani et al., 2016; Zaman et al., 2016). البته ممکن است کشاورزان با کاهش سطح زیر کشت محصول‌های آب‌بر به سمت محصول‌های آب‌بر دیگری تمایل پیدا کنند (Mirzaei & Zibaei, 2021). توسعه سامانه‌های آبیاری آباندوز نیز از اساسی‌ترین راهکارهای مورد استفاده در مدیریت منابع آب برای بهبود کارایی اقتصادی مصرف آب مطرح شده است (Huang et al., 2018). افزون بر این، افزایش کارایی انتقال و آبیاری از طریق پوشش نهرها و کانال‌های اصلی انتقال آب، ایجاد شبکه‌های آبیاری پیشرفته و توسعه سامانه‌های آبیاری آباندوز می‌تواند صورت گیرد (Kalbali et al., 2021). کم آبیاری یکی دیگر از روش‌های حفاظت از آب است که می‌تواند محصول‌ها را در یک مرحله یا در کل مراحل رشد، بدون کاهش معنی‌دار در عملکرد محصول، به سطحی از تنش آبی برساند. بر این مبناء، بیشینه شدن عملکرد ناخالص و افزایش کارایی مصرف آب از برتری‌های اتخاذ راهبرد کم آبیاری برشمرده می‌شود (Attia et al., 2021). یکی دیگر از ابزارهای مدیریت تقاضای آب قیمت‌گذاری آب می‌باشد که به عنوان ابزاری برای کاهش تقاضای آب مورد توافق صاحب‌نظران است (Zamani et al., 2021). انتظار می‌رود که سیاست‌های قیمت‌گذاری آب به بهبود بهره‌وری و تولید محصول‌های با ارزش بالاتر منجر شود (Sapino et al., 2020).

پژوهش‌های بسیاری بهینه‌سازی الگوی کشت منطقه‌ای را با هدف‌های بهینه‌سازی جامع و روش‌های متنوع بررسی کرده‌اند. از نظر هدف‌های بهینه‌سازی، بیشینه تولید محصول یا منافع اقتصادی محصول، کمینه مصرف آب آبیاری و کمینه‌سازی مصرف نهاده‌های شیمیایی از هدف‌های سنتی

این پژوهش‌ها بوده‌اند (Varade & Patel, 2019; Mirzaei et al., 2022b; Mardani, 2023). از منظر روش‌شناختی، روش‌های موجود شامل برنامه‌ریزی خطی^۱ (Najafabadi et al., 2023)، برنامه‌ریزی فازی^۲ (Wang et al., 2021)، و بهینه‌سازی مسئله‌های چندهدفه^۳ (Mirzaei & Zibaei, 2021) می‌باشد. این روش‌های کلاسیک که راهکارهای قطعی هستند، به محض رسیدن به نخستین نقطه بهینه موضعی متوقف می‌شوند و توانایی خروج از این نقطه و حرکت به نقطه‌ی بهینه‌تر را ندارند. افزون بر این، در این مدل‌ها، پیچیدگی محاسباتی برای حل مشکلات دنیای واقعی با افزایش اندازه مسئله افزایش می‌یابد (Sedghamiz et al., 2018). در دهه‌های اخیر الگوریتم‌های تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک^۴ (Deb et al., 2002)، الگوریتم کلونی مورچه‌ها^۵ (Shikh et al., 2015) و الگوریتم ازدحام ذرات^۶ (Jain et al., 2021) توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده‌اند. در این روش‌ها، مسئله بهینه‌سازی چند هدفه، در واقع به صورت چند هدفه حل می‌شود و از آن جایی که در مسئله‌های چند هدفه به علت وجود چندین تابع هدف، نمی‌توان برتری دو پاسخ را نسبت به یکدیگر بطور مستقیم مشخص کرد، پاسخ‌ها در چنین روش‌هایی با رویکرد رابطه غالب پارتو^۷ باهم مقایسه می‌شوند. این رویکرد به جای آن که یک تک پاسخ بهینه را به دست بدهد، منجر به دستیابی به مجموعه‌ای از پاسخ‌های بهینه می‌شود که نسبت به هم غالب نیستند. به این پاسخ‌ها، پاسخ‌های بهینه غیر غالب^۸ یا راه‌حل‌های مرز پارتو^۹ می‌گویند (Sudaryanto & Yortsos, 2000). استدلال می‌شود که از آن جا که الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی از رویکردهای مبتنی بر جمعیت استفاده می‌کنند، قادرند با دقت قابل قبولی کل مرز پارتو^{۱۰} را تنها با یک بار اجرای الگوریتم به دست دهد (Verma et al., 2021). به عبارت دیگر، این روش‌ها

¹ Linear Programming

² Fuzzy Programming

³ Multi-Objective Problems

⁴ Genetic Algorithm

⁵ Ant Colony Algorithm

⁶ Particle Swarm Algorithm

⁷ Pareto dominance relation

⁸ Non-dominated solutions

⁹ Pareto optimal solutions

¹⁰ Pareto front

ارزیابی تأثیر سیاست های... ۱۵۱

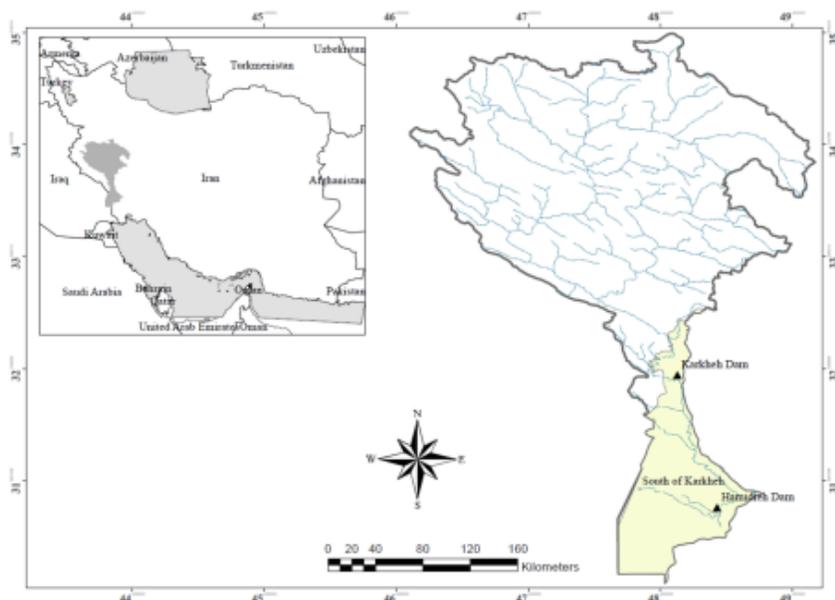
مجموعه‌ای از نقطه‌ها را در فضای تصمیم در نظر گرفته و در جهت‌های مختلف برای پیدا کردن پاسخ بهینه مدل حرکت می‌کنند (Zheng et al., 2022). ذکر این نکته ضروری است که به‌رغم وجود مجموعه‌ای از پاسخ‌های بهینه غیرغالب، در عمل یک پاسخ بهینه بر مبنای اولویت‌بندی مجموعه پاسخ‌های بهینه پارتو انتخاب می‌شود.

استفاده از مدل‌های مذکور برای مدیریت منابع آب در رویایی با خشکسالی متداول است. از سوی دیگر، حوضه‌های آبریز ایران به دلیل واقع شدن در منطقه‌های خشک و نیمه خشک جهان، همواره به‌صورت متناوب دچار خشکسالی بوده که در سال‌های اخیر به شدت آن افزوده شده است. میزان بارندگی کمتر از یک سوم میانگین جهانی و تبخیر بیش از سه برابر میانگین جهانی همراه با توزیع نامناسب بارندگی در ایران برنامه‌ریزی در برای تخصیص بهینه آب کشاورزی را به یک مسئله حیاتی تبدیل کرده است (Hadizadeh et al., 2018). افزون بر این، بخش کشاورزی در ایران بیش از ۹۰ درصد مصرف منابع آبی را به خود اختصاص می‌دهد و کارایی آبیاری در ایران کمتر از ۳۵ درصد برآورد شده است (Boazar et al., 2020). در این راستا، با تشدید کم‌آبی در ایران، برنامه‌ریزی برای صرفه‌جویی و افزایش بهره‌وری آب به‌ویژه در بخش کشاورزی به یکی از موارد الزام‌آور در سیاست‌های ملی تبدیل شده است. اما از دید محققان، سوء مدیریت و نداشتن برنامه‌ریزی جامع برای مدیریت صحیح منابع آب آبیاری کشاورزی به بهبود شرایط موجود منجر نشده است (Mirzaei et al., 2022b). بنابراین، توجه به راهبردهای بهینه و اتخاذ سیاست‌های حفاظت از منابع آب می‌تواند به پایداری منابع و بهبود کارایی اقتصادی مصرف آب مساعدت نماید.

با توجه به مطالب گفته شده، در پژوهش حاضر به بهینه‌سازی الگوهای زراعی با لحاظ مجموعه‌ای از هدف‌های اقتصادی، محیط‌زیستی، اجتماعی و تغذیه‌ای پرداخته شده است. بر این مبنای هشت هدف شامل بیشینه‌سازی سود ناخالص کل، کمینه‌سازی مصرف آب آبیاری، کمینه‌سازی مصرف نهاده‌های شیمیایی (سم و کودهای شیمیایی)، بیشینه‌سازی استفاده از نیروی کار و انرژی تولید شده به ازای هر واحد محصول همراه با بیشینه‌سازی استفاده از کود حیوانی و کاهش ساعات استفاده از ماشین‌ها و ادوات مدنظر قرار گرفت. در این بررسی برای بهینه‌سازی الگوهای زراعی در دشت حمیدیه از الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیر غالب نوع II (NSGAI) استفاده شد. در ادامه اثرگذاری‌ها سیاست‌های حفاظت از آب شامل افزایش کارایی آبیاری، کم‌آبیاری، افزایش قیمت آب،

کنترل سطح زیر کشت برنج به عنوان یک محصول آب‌بر و همچنین افزایش سطح زیر کشت کنجد بر شرایط بهینه ارزیابی شد.

کرخه بزرگترین حوضه آبریز ایران بعد از کارون و دز است که در مرز غربی کشور واقع شده و دارای موقعیت راهبردی می‌باشد (شکل ۱). این حوضه دارای ۵ زیر حوضه کشکان، قره‌سو، گاماسیاب، سیمره و کرخه جنوبی است. محدوده زیر حوضه کرخه جنوبی از سد کرخه آغاز شده و تا تالاب هورالعظیم ادامه پیدا می‌کند. در حال حاضر حمیدیه، دشت آزادگان، کوثر و دوسلق از جمله مهم‌ترین ناحیه‌ها کشاورزی زیر حوضه کرخه جنوبی را تشکیل می‌دهند. میزان آب سطحی در دسترس کشاورزان از طریق شبکه آبیاری حمیدیه بیش از ۱۸۸ میلیون متر مکعب برآورد می‌شود که در فصل‌های مختلف در سطح دشت توزیع می‌شود. از این جهت، میزان رهاسازی آب با توجه به وضعیت دشت و شرایط اقلیمی در هر سال متفاوت است. نتایج پژوهش‌های گوناگون بیانگر رخداد تغییر اقلیم در حوضه آبریز کرخه و تأثیر آن بر منابع آب این حوضه و به‌ویژه کرخه جنوبی در افق ۱۰۰ ساله است (Ghobadi et al., 2019). همچنین، با توجه به مشکلاتی مانند نبود پوشش بتنی کانال‌های آبیاری، انجام نشدن عملیات تعمیر و نگهداری شبکه‌ها و نبود استفاده بهره‌برداران از روش‌های نوین آبیاری، کارایی آبیاری در حوضه کرخه جنوبی بسیار پایین می‌باشد (Iran Water & Power Resources Development Company, 2015). میزان بارندگی در این زیر حوضه در بسیاری از سال‌ها کمتر از ۱۵۰ میلی‌متر گزارش شده است (Heidarzadeh et al., 2019). از سویی بیشتر بارش‌های آن در زمستان بوده و در تابستان میزان بارندگی نزدیک به صفر است. به عبارتی این حوضه به دلیل خشکسالی و الگوی نامنظم بارش در دهه‌های اخیر به شدت با کمبود آب مواجه شده است (Choubin et al., 2019). بنابراین، تخصیص بهینه آب مصرفی در این منطقه با لحاظ هدف‌های اقتصادی و دیگر هدف‌های از جمله حفاظت از منابع آب می‌تواند در بهبود وضعیت معیشتی و زیست‌محیطی راهگشا باشد.



شکل ۱- نقشه حوضه کرخه جنوبی
Figure 1 - South Karkheh basin map

مواد و روش‌ها

ایده الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیر غالب^۱ (NSGA) به منظور بهینه‌سازی مسئله‌های چند هدفه توسط Srinivas & Deb (1994) معرفی شد. NSGA یک روش بهینه‌سازی است که بر مبنای اصول الگوریتم ژنتیک عمل می‌کند. این الگوریتم با استفاده از مفهوم ژنتیک و تکامل، به دنبال یافتن بهترین راه‌حل‌ها در مسئله‌های بهینه‌سازی می‌گردد. این الگوریتم قادر است به صورت همزمان چندین هدف را بهینه‌سازی نموده و بهترین راه‌حل‌ها را در فضای چندبعدی پیدا کند. الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیر غالب نوع II^۲ (NSGA-II) رویکردی توسعه یافته از الگوریتم اصلی NSGA است و از یک رویکرد مرتب‌سازی غیر غالب برای شناسایی بهترین راه‌حل‌ها در یک جمعیت استفاده می‌کند. از جمله برتری‌های عمده روش NSGA-II در مقایسه با NSGA می‌توان

¹ Non-dominated Sorting Genetic Algorithm

² Non-dominated sorting genetic algorithm-type II (NSGA-II)

به پیچیدگی محاسباتی کمتر و اجرای سریعتر این الگوریتم، توانایی بالا در همگرایی، ایجاد پراکندگی مناسب در پاسخ‌های مرز پارتو، حل پذیری بالاتر در مواجهه با مسئله‌های مقید و دارا بودن ویژگی نخبه‌گرایی^۱ اشاره کرد. کاربرد NSGAI در حوزه مدیریت و تخصیص بهینه الگوهای زراعی نیز با نتایج مطلوبی همراه بوده است (Hojjati et al., 2018; Sato & Sato, 2022; (Huang et al., 2023; Chen et al., 2023).

در این بررسی به منظور بهینه‌سازی الگوهای زراعی با هدف بهبود شرایط اقتصادی، محیط‌زیستی، اجتماعی و تغذیه‌ای از الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیر غالب نوع II استفاده شد. در این الگوریتم مجموعه‌ای از پاسخ‌های بهینه کارای پارتو استخراج شد. در ادامه، اثرگذاری‌ها اتخاذ سیاست‌های حفاظت از آب بر مقدارهای بهینه‌ی به دست آمده از اجرای الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیر غالب نوع II، ارزیابی شد.

مدل‌سازی چند هدفه الگوی کشت کشاورزی

ساختار بنیادی مدل پیشنهادی در این تحقیق بر مبنای نتایج تحقیقات اخیر در مدل‌سازی الگوی کشت است (Mardani Najafabadi & Ashktorab, 2023; Mardani Najafabadi & Shirzadi Laskookalayeh, 2023). با توجه به تعداد زیاد مجموعه‌ها، متغیرها و فراسنجه‌های به کار رفته در بررسی، نمادها و تعاریف هر یک از این اجزاء در جدول (۱) خلاصه شده است.

جدول (۱) فهرست نمادهای مورد استفاده در مدل برای تعریف مجموعه‌ها، متغیرها و فراسنجه‌ها

Table (1) List of symbols used in the model to define sets, variables and parameters

شرح	نماد	شرح	نماد
نیروی کار تخصیص داده شده به ازای محصول i Labour allocated per crop i	$Labour_i$	سود ناخالص کل در الگو (متغیر تابع هدف) Total gross profit in the pattern (objective variable)	Obj GM
انرژی تولید شده به ازای محصول i Energy produced per crop i	$Energy_i$	آب آبیاری کل در الگو (متغیر تابع هدف) Total irrigation water in the pattern (objective variable)	Obj Water

¹ Elitism

ادامه جدول (۱) فهرست نمادهای مورد استفاده در مدل برای تعریف مجموعه‌ها، متغیرها و فراسنجه‌ها

Table (1) List of symbols used in the model to define sets, variables and parameters

شرح	نماد	شرح	نماد
کود حیوانی تخصیص داده شده به ازای محصول i Manure allocated to crop i	$Manure_i$	کل مصرف سم‌های شیمیایی در الگو (متغیر تابع هدف) Total pesticide consumption in the pattern	Obj Pes
زمان کارکرد ماشین تخصیص داده شده به محصول i Machinery allocated to crop i	$Mashin_i$	کل مصرف کود شیمیایی در الگو (متغیر تابع هدف) Total fertilizer consumption in the pattern	Obj Fertilize
زمین تخصیص داده شده به محصول i Land allocated to crop i	$Land_i$	کل نیروی کار مورد استفاده در الگو (متغیر تابع هدف) Total labour used in the pattern	Obj Labour
مقدار زمین قابل کشت Amount of arable land	$LandRHS$	کل انرژی تولید شده در الگو (متغیر تابع هدف) Total energy produced in the pattern	Obj Energy
میانگین عملکرد محصول i Average yield of crop i	$Yeild_i$	کل کود حیوانی مورد استفاده در الگو (متغیر تابع هدف) Total manure used in the pattern	Obj Manure
کل انرژی تولید شده حاصل از کشت محصول i Total energy produced from crop i	$TotalEnergy\ production_i$	کل زمان استفاده از ماشین‌ها و ادوات در الگو (متغیر تابع هدف) Total hours of machinery use in the pattern	Obj Mashin
جمعیت منطقه‌های مورد بررسی Population of the studied areas	POP	سود ناخالص کل به ازای محصول i Total gross profit per crop i	Net Benefit $_i$
میزان انرژی محصول i در مقدار معینی از واحد وزن The amount of energy of product i in a certain amount of unit weight	Cal_i	آب تخصیص داده شده به محصول i Water allocated to crop i	$Water_i$

ادامه جدول (۱) فهرست نمادهای مورد استفاده در مدل برای تعریف مجموعه‌ها، متغیرها و فراسنجه‌ها
Table (1) List of symbols used in the model to define sets, variables and parameters

شرح	نماد	شرح	نماد
کمینه انرژی مورد نیاز ساکنین Water allocated per crop i	$EnergyReq_i$	سم‌های شیمیایی تخصیص داده شده به محصول i Pesticides allocated to crop i	Pes_i
مقدار انرژی که هر فرد سالانه به آن نیاز دارد Annual energy requirement per person	$EnergyReq$	کود شیمیایی تخصیص داده شده به محصول i Fertilizers allocated to crop i	$Fertilize_i$
مقدار در دسترس نهاده از نوع k Available input value of type k	$InputRHS_k$	میزان استفاده نهاده از نوع k برای محصول i The rate of use of input type k for product i	$Input_{ik}$
کارایی آبیاری Irrigation efficiency	$WaterEff$	نیاز خالص آبی محصول i Net water requirement of crop i	$WaterReq_i$
		مقدار آب در دسترس Amount of available water	$WaterRHS$

Source: research findings

منبع: یافته‌های تحقیق

از آن‌جا که در این بررسی بیش از یک هدف دنبال شده، شکل جبری این هدف‌ها در رابطه‌های ۱ تا ۸ آمده است. اولین هدف، بیشینه‌سازی سود ناخالص (اقتصادی) است که جزئیات محاسباتی آن در محدودیت‌های اقتصادی معرفی خواهد شد؛ هدف دوم کمینه‌سازی مصرف آب آبیاری (زیست‌محیطی)، هدف سوم کمینه‌سازی مقدار سم مصرفی (زیست محیطی)، هدف چهارم کمینه‌سازی استفاده از کود شیمیایی (زیست‌محیطی)، هدف پنجم بیشینه‌سازی استفاده از نیروی کار (اجتماعی)، هدف ششم بیشینه نمودن کشت محصول‌های با انرژی بالا (امنیت غذایی)، هدف هفتم بیشینه نمودن استفاده از کود حیوانی (زیست محیطی) و هدف آخر کمینه‌سازی استفاده از ماشین‌ها و ادوات (اقتصادی و زیست محیطی) می‌باشد.

$$\text{Max: Obj GM} = \text{Net Benefit}_i \quad (1)$$

$$\text{Max: Obj Water} = \sum_{i=1}^I \text{Water}_i \quad (2)$$

ارزیابی تأثیر سیاست های... ۱۵۷

$$\text{Min: Obj Pes} = \sum_{i=1}^I Pes_i \quad (۳)$$

$$\text{Min: Obj Fertilize} = \sum_{i=1}^I Fertilize_i \quad (۴)$$

$$\text{Max: Obj Labour} = \sum_{i=1}^I Labour_i \quad (۵)$$

$$\text{Max: Obj Energy} = \sum_{i=1}^I Energy_i \quad (۶)$$

$$\text{Max: Obj Manure} = \sum_{i=1}^I Manure_i \quad (۷)$$

$$\text{Min: Obj Mashin} = \sum_{i=1}^I Mashin_i \quad (۸)$$

پس از بررسی هدفهای متفاوت در الگوی کشت، بیان محدودیت‌های مدل ضروری است. بر این مبنا:

گستره کل زمین تخصیص داده شده به محصول‌ها نباید از کل زمین قابل کشت برای هر منطقه بیشتر باشد.

$$\sum_{i=1}^I Land_i \leq LandRHS \quad (۹)$$

میزان استفاده از نهاده‌های تولید شامل ماشین‌ها، کودشیمیایی، کود حیوانی، نیروی کار و سم‌های شیمیایی نباید از مقدار قابل دسترس این نهاده‌ها بیشتر باشد. معادله ۱۰ این مهم را نشان می‌دهد.

$$\sum_{i=1}^I Land_i Input_{ik} \leq InputRHS_k \quad \forall k \quad (۱۰)$$

میزان آب آبیاری ناخالص مورد نیاز برای کشت محصول‌ها نباید از میزان آب قابل برنامه‌ریزی (در دسترس) بیشتر باشد معادله (۱۱).

$$\sum_{i=1}^I (WaterReq_i / WaterEff) Land_i \leq WaterRHS \quad (11)$$

در معادله ۱۱ با تغییر در فراسنجه $WaterEff$ پیش فرض‌های مربوط به کارایی پیاده‌سازی خواهد شد.

میزان انرژی تولید شده از کشت محصولات کشاورزی، باید کمینه میزان انرژی مورد نیاز هر منطقه را برای ساکنان آن تأمین نماید. به عبارت دیگر، مجموعه محدودیت‌های مربوط به بحث امنیت غذایی در معادله‌های (۱۲) تا (۱۴) اعمال شده است.

$$EnergyReq_Min = POPEnergyReq \quad (12)$$

$$TotalEnergy\ production_i = Cal_i Yield_i Land_i \quad \forall i \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^I TotalEnergy\ production_i \geq EnergyReq_Min \quad (14)$$

ذکر این نکته ضروری است که مسئله‌ی کارایی آبیاری با توجه به نیاز خالص آبی گیاهان مدنظر قرار گرفته است. همچنین، در این بررسی، محدودیت تناوب زراعی نیز لحاظ شده است.

الگوریتم NSGAI

الگوریتم ژنتیک نخستین بار توسط Holland (1975) مطرح شده و منشا آن نیز نظریه تکامل داروین می‌باشد. همان‌گونه که در تئوری تکامل داروین موجودات زنده در گذر زمان به سمت تکامل پیش می‌روند، در الگوریتم ژنتیک نیز جمعیت پاسخ‌ها از نسلی به نسل دیگر بهبود می‌یابند. در نظریه داروین، آنچه که باعث تکامل موجودات می‌گردد در عملگرهای انتخاب طبیعی، تولید مثل، جهش و همزیستی خلاصه می‌شود. در الگوریتم ژنتیک نیز اعمال عملگرهای تولید مثل یا تقاطع^۱ و جهش^۲ روی جمعیت پاسخ‌ها، باعث ایجاد فرزندان یا پاسخ‌های جدیدی^۳ می‌شوند و سپس پاسخ‌های بهتر از میان فرزندان یا پاسخ‌های جدید و پاسخ‌های قدیمی توسط عملگر انتخاب^۴ برگزیده شده و به نسل بعدی منتقل می‌شوند و درنهایت، تکرار این عملیات منجر به همگرایی جمعیت به

¹ Crossover

² Mutation

³ offspring

⁴ Selection

ارزیابی تأثیر سیاست های... ۱۵۹

سمت پاسخ بهینه می‌گردد. مقایسه مقدار تابع هدف، مبنای انتخاب پاسخ‌های برتر و انتقال آنان به نسل‌های بعدی است. می‌توان گفت تنها تفاوت الگوریتم ژنتیک تک هدفه با نسخه چند هدفه خود، در نحوه مقایسه تابع هدف و راهبرد مدیریت جمعیت می‌باشد. (Fonseca & Fleming (1993 اولین افرادی بودند که مفهوم پارتو غالب^۱ را در مرتب‌سازی اعضای جمعیت پاسخ‌ها، در الگوریتم ژنتیک پیاده‌سازی کردند. بعدها (Deb (1992 اصلاح‌هایی بر الگوریتم NSGA اعمال کرد و از این طریق نسخه جدید و قدرتمندتری از NSGA را با عنوان NSGAI^{II} توسعه داد. در بررسی حاضر از این روش برای حل مسئله چندهدفه در محیط نرم‌افزار Matlab R2022b استفاده شد.

در این بررسی، سیاست‌های حفاظت از آب شامل افزایش کارایی آبیاری، کم‌آبیاری، قیمت‌گذاری آب، کنترل سطح زیر کشت محصول‌های آبربر و افزایش سطح زیر کشت محصول کنجد می‌باشد. در ادامه به چگونگی لحاظ این سیاست‌ها در عمل پرداخته می‌شود. در این راستا، سیاست‌های حفاظتی مورد بررسی در پژوهش حاضر برگرفته از وضعیت موجود سطح حوضه آبریز کرخه جنوبی و راهکارهای برنامه ششم توسعه ایران برای رویارویی با کم‌آبی است که عبارتند از:

۱) راهبرد افزایش کارایی آبیاری (پیش‌فرض ۱) از طریق استفاده از کانال‌های بتنی، پوشش انهار و شبکه آبیاری و یا تغییر تکنولوژی آبیاری و استفاده از سامانه‌های آبیاری مدرن می‌باشد که افزایش کارایی مصرف آب از جمله اولویت‌های اصلی برنامه ششم توسعه برای رویارویی با کم‌آبی در کشور است. در این راستا، کارایی آبیاری در منطقه مورد بررسی ۴۵ درصد محاسبه شده است. بر این مبنای توجه به داده‌های شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران (Iran Water & Power Resources Development Company, 2015)، امکان بهبود کارایی آبیاری تا ۲۰ درصد در این منطقه وجود دارد. بنابراین، پیش‌فرض بهبود کارایی آبیاری به میزان ۲۰ درصد در منطقه دشت حمیدیه انتخاب شد.

۲) راهبرد کم‌آبیاری (پیش‌فرض ۲) شامل کاهش آبیاری محصول‌های گندم، گوجه فرنگی و ذرت دانه‌ای می‌باشد. میانگین مصرف آب این محصول‌ها در سطح منطقه بالاتر از حد نرمال مصارف آب در منطقه‌های با شرایط آب و هوایی مشابه با این منطقه در ایران می‌باشد. در این راستا، کاهش

¹ Pareto dominance

آبیاری ۱۵ درصدی این محصول‌ها (با توجه به اختلاف مصرف آب این منطقه با میانگین دیگر منطقه‌های با شرایط آب و هوایی تقریباً مشابه) در مرحله‌ی غیر حساس رشد آن‌ها اعمال شده است. ۳) میانگین قیمت هر متر مکعب آب در منطقه مورد بررسی، معادل ۱۸۷/۸ ریال محاسبه شد. با توجه به پایین بودن قیمت این نهاد در بخش کشاورزی، افزایش دو برابری در قیمت هر متر مکعب آب (پیش‌فرض ۳) در بسیاری از پژوهش‌ها مورد توجه قرار گرفته است (Asaadi et al., 2019). در این بررسی نیز افزایش دو برابری قیمت آب مورد ارزیابی قرار گرفت.

۴) با توجه به کاهش بارندگی در چند سال اخیر و استفاده بی‌رویه از منابع آبی جلوگیری از کاشت محصول‌های با مصرف و نیاز آب بالا به ویژه برنج در دستور کار سازمان جهاد کشاورزی قرار گرفته است. لذا، در این پژوهش کاهش سطح زیرکشت محصول‌های کشاورزی از طریق حذف محصول برنج به عنوان سیاست مدیریت تقاضای آب بخش کشاورزی مورد بررسی قرار گرفت. در واقع، راهبرد اصلاح و تغییر الگوی کشت که شامل راهبرد کاهش سطح زیر کشت محصول‌های آب‌بر در منطقه شامل محصول برنج (پیش‌فرض ۴) است، ارزیابی شد. از آنجایی که در منطقه مورد بررسی برنج جزو محصول‌های اصلی و عمده است. بنابراین، میانگین سهم برنج از کل سطح زیر کشت منطقه (معادل ۱۶ درصد) به عنوان پیش‌فرض کاهش سطح زیر کشت این محصول انتخاب شد.

۵) میزان انرژی تولید شده به ازای هر کیلوگرم برای محصول کنجد نسبت به دیگر محصول‌ها به میزان قابل توجهی بالاتر است. همچنین، میزان استفاده از نهاده‌های شیمیایی و ماشین‌ها و ادوات در تولید این محصول نسبت به دیگر محصول‌ها پایین‌تر است. بنابراین، به نظر می‌رسد افزایش سطح زیر کشت این محصول به ایجاد مزیت نسبی منجر شود. این در حالی است که در برخی از منطقه‌های کشور ترویج و توسعه کشت این محصول در دستور کار قرار گرفته است. بر این مبنا، افزایش کشت محصول کنجد (پیش‌فرض ۵) در سطح حوضه به میزان ۱۰ درصد به عنوان یک پیش‌فرض به مدل اضافه شد.

روش نمونه‌گیری و گردآوری داده‌ها

برای اجرای الگوریتم NSGAI، آمار و اطلاعات مربوط به سطح زیرکشت، قیمت و عملکرد محصول‌ها، هزینه‌ی بهره‌برداری از آب آبیاری، هزینه‌ی استحصال آب آبیاری، هزینه‌ی نهاده‌های کشاورزی و هزینه‌ی کل تولید با مصاحبه حضوری و تکمیل ۱۷۰ پرسشنامه از کشاورزان دشت

ارزیابی تأثیر سیاست های... ۱۶۱

حمیدیه برای سال ۱۴۰۱ که با روش نمونه‌گیری خوشه‌ای چندمرحله‌ای انتخاب شده بودند، به دست آمد.

نتایج و بحث

نتایج به دست آمده از الگوی کشت بهینه با هدف تأمین مجموعه‌ای از هدف‌های متضاد، با استفاده از روش NSGAI در جدول (۲) آمده است. در واقع، الگوی بهینه با لحاظ هشت هدف گفته شده با الگوی موجود مقایسه می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود در الگوی پایه، گندم و برنج دو محصول عمده زراعی در منطقه حمیدیه می‌باشند. در واقع، عمده زمین‌های زراعی در منطقه حمیدیه زیر کشت گندم (حدود ۷۰ درصد) و برنج (حدود ۲۵ درصد) می‌روند. کمترین سطح زیر کشت نیز به ترتیب متعلق به محصول‌های ذرت دانه‌ای و لوبیا است. سطح زیر کشت بهینه محصول‌ها به منظور دستیابی به هدف‌های هشت‌گانه تغییرپذیری‌های قابل توجهی را نشان می‌دهد. به عنوان یک نتیجه کلی، در الگوی بهینه، سطح زیر کشت دو محصول عمده‌ی گندم و برنج کاهش و سطح زیر کشت دیگر محصول‌ها افزایش یافته است. داده‌های پایه نشان می‌دهد که در بین محصول‌های کشت شده در منطقه، بازده برنامه‌ای (بیشینه‌سازی) برنج در رتبه سوم قرار دارد. اما، میزان مصرف آب و مصرف کود شیمیایی (کمینه‌سازی) برای این محصول از دیگر محصول‌ها بالاتر است. بنابراین، با توجه به وجود تضاد بین هدف‌های مدنظر در نهایت سطح زیر کشت برنج در الگوی بهینه کاهش یافته است. کاهش سطح زیر کشت محصول گندم را نیز می‌توان به قابل توجه بودن مصرف کود شیمیایی، استفاده از ماشین‌ها و ادوات و مصرف آب در فرآیند تولید این محصول نسبت داد. به عبارت دیگر، با کمینه‌سازی هدف‌های ذکر شده، سطح زیر کشت بهینه گندم نسبت به شرایط کنونی کمتر خواهد بود. افزون بر این، در الگوی بهینه بیشترین افزایش سطح زیر کشت به ترتیب مربوط به محصول‌های گوجه فرنگی، باقلا، ذرت دانه‌ای و کلزا بوده است. در این راستا، با اعمال محدودیت‌های موجود انتظار می‌رود سطح زیر کشت گوجه‌فرنگی در منطقه حمیدیه در حالت بهینه به بیش از ۱۷ برابر افزایش یابد. مهم‌ترین دلیل رشد قابل توجه سطح زیر کشت گوجه فرنگی در حالت بهینه را می‌توان به بالاتر بودن بازده برنامه‌ای این محصول در قیاس با دیگر محصول‌ها نسبت داد. در واقع، بازده برنامه‌ای این محصول نزدیک ۴۰۰ میلیون ریال در هر هکتار است که از این حیث در رتبه اول قرار دارد. میزان مصرف آب در هر هکتار برای محصول باقلا نیز از دیگر محصول‌ها

کمتر است و از لحاظ استفاده از ماشین‌ها و ادوات نیز در وضعیت مطلوبی قرار دارد؛ بنابراین، وضعیت مناسب باقلا از نظر کمینه‌سازی این هدف‌ها منجر به افزایش سطح زیرکشت این محصول در الگوی بهینه شده است. افزایش سطح زیرکشت محصول‌های ذرت دانه‌ای و کلزا نیز نزدیک بوده است. جدول (۲) نتایج الگوی کشت کنونی و بهینه با لحاظ هدف‌های هشت‌گانه در منطقه حمیدیه (واحد: هکتار)

Table (2) The results of the current and optimal cropping pattern in terms of the eight objectives in Hamidiyeh region (unit: hectare)

تغییر (درصد) Change (Percent)	بهینه Optimal	پایه Current	محصول‌ها Crop
-64.5	3445	9701	گندم Weath
460	2307	412	جو Barley
1614.8	2555	149	گوجه فرنگی Tomato
1018.4	425	38	کلزا Canola
1313	1541	109	باقلا Broad bean
165.4	77	29	لوبیا Bean
-51.5	1722	3580	برنج Rice
70	146	86	کنجد Sesame
127	174	76	خیار سبز Cucumber
1157	176	14	ذرت دانه‌ای Corn
-11.4	12568	14194	کل سطح زیر کشت Total cultivated area

Source: research findings

منبع: یافته‌های تحقیق

ارزیابی تأثیر سیاست های...۱۶۳

در جدول (۳) مقادارهای تعریف شده برای فراسنجه‌های الگوریتم NSGAI به منظور بهینه‌سازی الگوهای زراعی و ارزیابی اثرگذاری‌ها سیاست‌های حفاظت از آب ارائه شده است.

جدول (۳) مقادارهای تعریف شده برای آیتم‌های الگوریتم NSGAI

Table (3) Defined values for NSGAI algorithm items

مقدارهای تعریف شده برای هر آیتم Values defined for each item	فراسنجه‌های الگوریتم NSGAI NSGAI algorithm items
50	جمعیت اولیه Primary population
500	تعداد تکرار Number of iteration
0.7	نسبت تقاطع Intersection ratio
0.2	نسبت جهش Mutation ratio
0.02	احتمال جهش Mutation probability

Source: research findings

منبع: یافته‌های تحقیق

نتایج بهینه‌سازی چندهدفه حاصل از اجرای الگوریتم NSGAI برای دشت حمیدیه در جدول (۴) ارائه شده است. بر این مبنا، با دستیابی به هدف‌های مورد نظر، میزان مصرف آب، سم‌های شیمیایی و نیروی کار کاهش می‌یابد. کاهش بیش از ۱۶ درصدی مصرف آب در هر هکتار می‌تواند به پایداری منابع آب مساعدت قابل توجهی داشته باشد. با توجه به اثرگذاری‌ها منفی مصرف سم‌های شیمیایی بر سلامت محصول‌ها کاهش مصرف این نهاده در شرایط بهینه نیز قابل توجه است. افزون بر این، به‌رغم در نظر گرفتن بیشینه سطح اشتغال به منظور تأمین منافع اجتماعی در الگوی بهینه، میزان استفاده از نیروی کار کاهش خواهد بود. این نتیجه را می‌توان به وجود بیکاری پنهان و نبود تخصیص بهینه نیروی کار در فرآیند تولید محصول‌های کشاورزی در منطقه مورد بررسی مرتبط دانست. از سویی، میزان میانگین بازده برنامه‌ای کشت محصول‌ها در منطقه در هر هکتار به نسبت نه چندان قابل توجهی (۲ درصد) افزایش خواهد یافت. با این حال، افزایش میزان انرژی تولید شده ناشی از کشت محصول‌ها و گسترش استفاده از کود حیوانی با هدف‌های پایداری سازگار است. البته،

نتایج الگوی بهینه نشان می‌دهد که میزان استفاده از کود شیمیایی و ماشین‌ها و ادوات افزایشی خواهد بود.

جدول (۴) پاسخ بهینه مقدارهای تابع هدف حاصل از اجرای الگوریتم در منطقه حمیدیه

Table (4) The optimal solution of the objective function values resulting from the implementation of the algorithm in Hamidiyeh region

تغییر (درصد) Chnge (Percent)	بهینه Optimal	پایه Current	واحد Unit	محصول‌ها Crop
2	160	156.7	میلیون ریال Million rials	بازده برنامه‌ای Gross margin
-16.6	8745	10489	مترمکعب Cubic meter	آب آبیاری Irrigation Water
-10	1.8	5	لیتر Liter	سم‌های شیمیایی Pesticides
5.6	350	332	کیلوگرم kg	کود شیمیایی Fertilizer
-9.1	10.9	12	نفر-روز کار Man-day Power	نیروی کار Labor
1.6	3122	3072	کالری در هر کیلوگرم Calories per kg	انرژی تولید شده Produced energy
38.9	538	420	کیلوگرم kg	کود حیوانی Manure
11.6	15.4	13.8	ساعت Hour	ماشین‌ها و ادوات Machinery

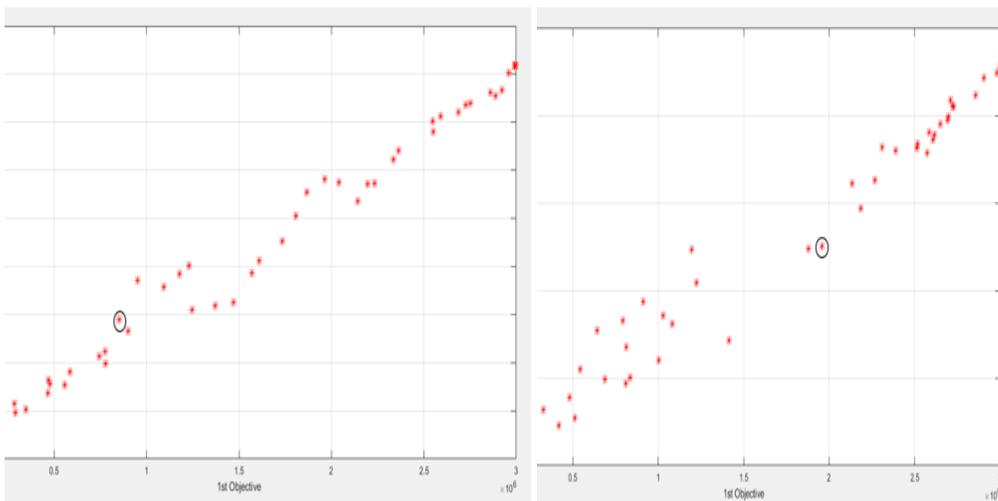
Source: research findings

منبع: یافته‌های تحقیق

برای دستیابی به پاسخ بهینه مرزی، مقدارهای تابع‌های هدف به ازای هر یک از پاسخ‌های نهایی الگوریتم بررسی گردید. به دلیل آن که مسئله دارای هشت تابع هدف است، پاسخ‌های بهینه در این مسئله دارای فضای هشت بعدی می‌باشند. از آنجا که نمایش فضای هشت بعدی ناممکن است، در شکل (۳) مقدارهای تابع‌های بیشینه‌سازی و کمینه‌سازی با هم مقایسه می‌شوند. در اینجا ۵۰ پاسخ بهینه پارتو به منظور دستیابی به هدف‌های مورد نظر استخراج شده است. این نقطه‌ها مرز کارای پارتو را شامل می‌شوند. به عبارت دیگر، با حل مسئله از طریق الگوریتم پیشنهادی، از میان ۵۰

ارزیابی تأثیر سیاست های...۱۶۵

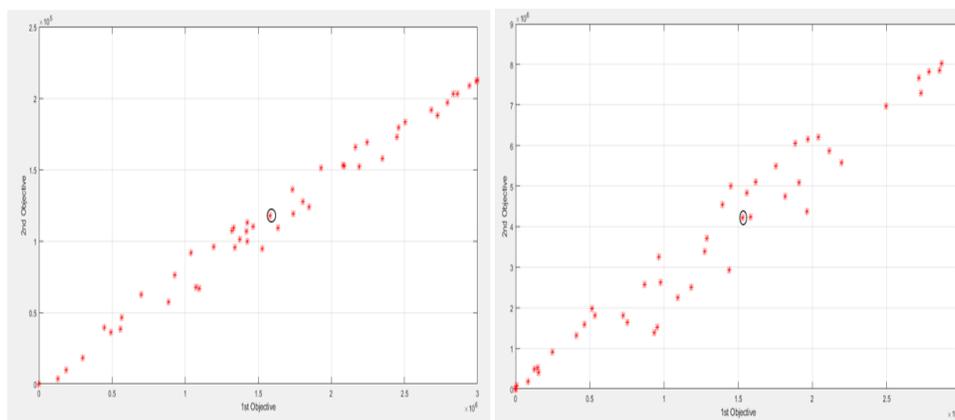
پاسخ نهایی که شامل جبهه پاسخ های متفاوت بود، یک پاسخ بهینه به عنوان تأمین کننده هر یک از هدف های برگزیده شد. همانطور که در نمودارهای ارائه شده مشخص است نقطه ها پاسخ همگرایی خوبی دارند. پس از بررسی مقادیرهای و نمودارهای تابع های هدف به ازای همه نقطه ها بهینه ترین پاسخ ممکن در هر یک از نمودارها تعیین شده است (دایره مشکی).



الف) مقایسه مقدارهای تابع های هدف اول (بازده برنامه ای: محور افقی) و هدف دوم (مصرف آب: محور عمودی)
ب) مقایسه مقدارهای تابع های هدف اول (بازده برنامه ای: محور افقی) و هدف سوم (مصرف سم های شیمیایی: محور عمودی)

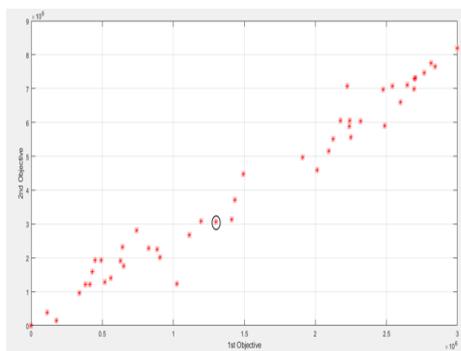
A) Comparison of the values of the first objective function (Gross margin: horizontal axis) and the second objective function (water consumption: vertical axis)

b) Comparison of the values of the functions of the first objective (Gross margin: horizontal axis) and the third objective (use of chemical pesticides: vertical axis)

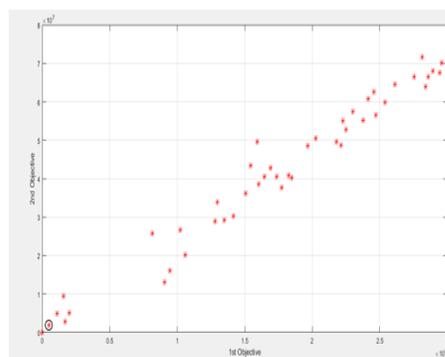


- ج) مقایسه مقادیر تابع‌های هدف اول (بازده برنامه‌ای: محور افقی) و هدف چهارم (مصرف کود شیمیایی: محور عمودی)
- د) مقایسه مقادیر تابع‌های هدف اول (بازده برنامه‌ای: محور افقی) و هدف پنجم (استفاده از نیروی کار: محور عمودی)
- c) Comparison of the values of the functions of the first objective (Gross margin: horizontal axis) and the fourth objective (chemical fertilizer consumption: vertical axis)
- d) Comparison of the values of the first objective function (Gross margin: horizontal axis) and the fifth objective (use of labor force: vertical axis)

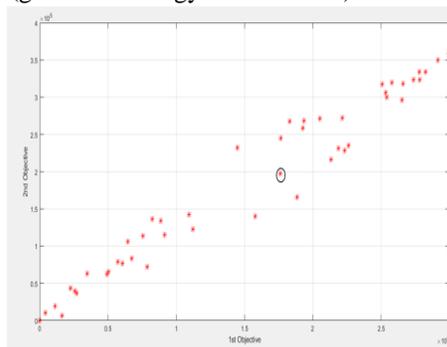
ارزیابی تأثیر سیاست های...۱۶۷



و) مقایسه مقادیر تابع های هدف اول (بازده برنامه ای: محور افقی) و هدف هفتم (استفاده از کود حیوانی: محور عمودی)
 f) Comparing the values of the functions of the first objective (Gross margin: horizontal axis) and the seventh objective (use of manure: vertical axis)



ه) مقایسه مقادیر تابع های هدف اول (بازده برنامه ای: محور افقی) و هدف ششم (انرژی تولید شده: محور عمودی)
 e) Comparing the values of the first objective functions (Gross margin: horizontal axis) and the sixth objective (generated energy: vertical axis)



ی) مقایسه مقادیر تابع های هدف اول (بازده برنامه ای: محور افقی) و هدف هشتم (استفاده از ماشین ها و ادوات: محور عمودی)

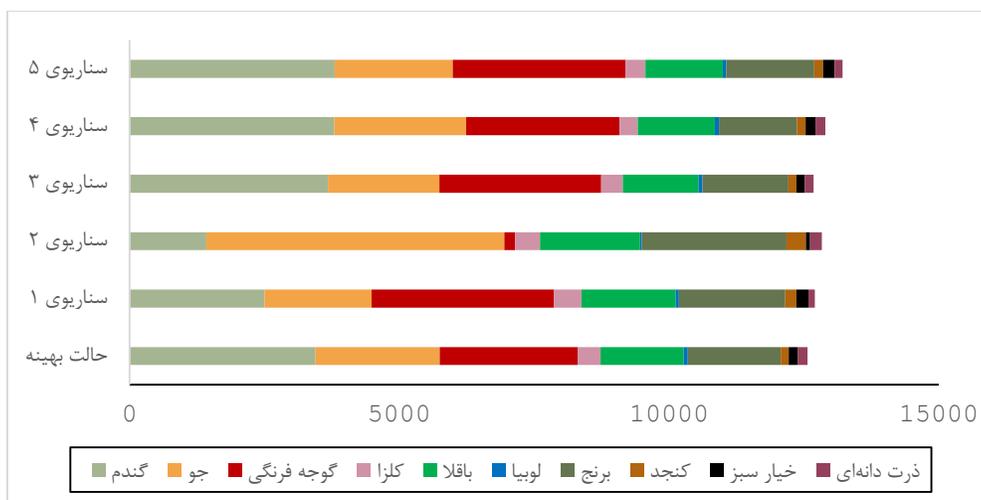
j) Comparing the values of the functions of the first objective (Gross margin: horizontal axis) and the eighth objective (use of machinery: vertical axis)

شکل (۲) راه حل های نهایی حاصل از اجرای الگوریتم

Figure (2) The final solutions resulting from the implementation of the algorithm

همانگونه که قبلاً توضیح داده شد اثرگذاری‌ها سیاست‌های حفاظت از آب بر مقدارهای متغیرهای هدف در حالت بهینه ارزیابی شده است. بر این مبنا، تغییرپذیری‌های هر یک از هدف‌های هشت‌گانه با بکارگیری پیش‌فرض‌های حفاظت از آب ارائه شده است. تغییرپذیری‌های سطح زیر کشت بهینه مزارع در منطقه حمیدیه با اتخاذ سیاست‌های حفاظتی مختلف در شکل (۳) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با اتخاذ سیاست حفاظت از آب از نوع افزایش کارایی آبیاری (پیش‌فرض ۱)، سهم محصول‌های گندم، جو، لوبیا و ذرت دانه‌ای در الگوی کشت بهینه کاهش می‌یابد. افزایش قابل توجه سهم کنجد و گوجه فرنگی در این پیش‌فرض نسبت به شرایط پایه نیز قابل مشاهده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که افزایش سطح زیر کشت دیگر محصولات در نتیجه‌ی اعمال این پیش‌فرض چندان قابل ملاحظه نیست. با اعمال پیش‌فرض ۲، سهم محصول‌های جو و کنجد به میزان بیشتری از دیگر محصولات افزایش می‌یابد. کاهش سطح زیر کشت گندم، گوجه فرنگی، لوبیا و خیار سبز نسبت به حالت بهینه نیز از نتایج اتخاذ این پیش‌فرض حفاظت از آب است. بنابراین، با اعمال پیش‌فرض کم آبیاری سهم محصول‌های کم‌آب در الگوی کشت به طور محسوسی افزایش می‌یابد. تغییرپذیری‌های سطح زیر کشت بهینه در نتیجه اعمال پیش‌فرض افزایش قیمت آب (پیش‌فرض ۳) ناچیز است و این سیاست از کارایی لازم در این زمینه برخوردار نیست. کاهش سطح زیر کشت محصول برنج نیز با کاهش سطح زیر کشت کلزا و باقلا و افزایش سطح زیر کشت محصول‌های گندم، گوجه فرنگی، ذرت دانه‌ای و ... نسبت به شرایط بهینه همراه خواهد بود. در این راستا، می‌توان گفت که با کاهش سطح زیر کشت محصول پربازده برنج، سطح زیر کشت دیگر محصولات‌های پربازده دیگر افزایش می‌یابد. با اتخاذ پیش‌فرض افزایش سطح زیر کشت کنجد (پیش‌فرض ۵)، سطح زیر کشت گوجه فرنگی و خیار سبز نسبت به دیگر محصولات بیشتر افزایش می‌یابد. در واقع، به نظر می‌رسد با گسترش سطح زیر کشت کنجد تمایل کشاورزان به کشت محصول‌های با بازده بالاتر همراه با این محصول افزایش می‌یابد. افزون بر این، کاهش سطح زیر کشت دیگر محصولات‌ها همچون ذرت دانه‌ای، لوبیا و کلزا در اثر اتخاذ سیاست افزایش سطح زیر کشت محصول کنجد چندان قابل توجه نیست.

ارزیابی تأثیر سیاست های...۱۶۹



شکل (۴) تغییرپذیری سطح زیر کشت بهینه با اتخاذ سیاست های حفاظتی در منطقه حمیدیه (واحد: هکتار)

Figure (4) Changes in the optimal cropping pattern with the adoption of conservation policies in Hamidiyeh region (Unit: Hectare)

نتایج تأثیر اتخاذ پیش فرض های مختلف حفاظت از آب بر وضعیت متغیرهای هدف در حالت بهینه در منطقه حمیدیه در جدول (۵) ارائه شده است. بر این مبنای، با افزایش کارایی آبیاری میزان بازده برنامه های نسبت به حالت بهینه ۱۲/۶ درصد افزایش می یابد. کاهش ۲۸ درصدی میزان مصرف آب در هر هکتار از اثرگذاری ها قابل توجه سیاست افزایش کارایی آبیاری بر پایداری منابع آب در منطقه حمیدیه حکایت دارد. رشد بازده برنامه ای به دلیل افزایش سطح زیر کشت محصول های با بازده بالا مانند گوجه فرنگی و خیار سبز بوده است. کاهش سطح زیر کشت گندم و جو به عنوان محصول های عمده در این منطقه نیز در کاهش میانگین مصرف آب نقش قابل توجهی داشته است. این در حالی است که با افزایش کارایی آبیاری میزان استفاده از نهاده های شیمیایی و ماشین ها و ادوات نسبت به حالت بهینه افزایش می یابد. در واقع، به رغم مساعدت قابل توجه کارایی آبیاری به معیشت کشاورزان و کاهش مصرف آب برخی از هدف های مغایر با حفظ پایداری محیط زیست تأمین نمی شود. این امر به دلیل افزایش سطح زیر کشت محصول هایی مانند گوجه فرنگی و برنج است که طبیعتاً مصرف کود شیمیایی و ماشین ها و ادوات بیشتری را نسبت به محصول هایی مانند گندم که

سطح آنها کاهش یافته، دارند. حصول این نتیجه با توجه به اینکه در این پژوهش از یک برنامه‌ریزی چند هدفه که وظیفه ایجاد مصالحه بین هدف‌های مختلف را دارد، منطقی به نظر می‌رسد. این نکته از این منظر اهمیت دارد که در ایجاد مصالحه یک رابطه الکلنگی^۱ بین متغیرهای اصلی مدل ایجاد می‌شود. در این رابطه ممکن است برای بهبود شرایط برخی از هدف‌ها، برخی دیگر دچار پسرفت شوند. البته افزایش استفاده از نیروی کار و کود حیوانی و همچنین میزان انرژی تولید شده از نتایج مثبت سیاست افزایش کارایی آبیاری نسبت به شرایط بهینه است. افزایش میزان انرژی تولید شده محصول‌ها را می‌توان به افزایش سطح زیر کشت محصول‌های با ارزش غذایی بالا مانند کلزا و کنجد مرتبط دانست. نتایج پژوهش (Mirzaei & Zibaei, 2021) نشان داد که راهبرد بهبود کارایی آبیاری با افزایش بازده برنامه‌ای در مزارع نماینده در حوضه هلیل رود در ایران با وجود تغییر اقلیم همراه است. همچنین، با اعمال این راهبرد سهم محصول‌های آب بر مانند مرکبات و یونجه در الگوی کشت در شرایط تغییر اقلیم افزایش می‌یابد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که با بهبود کارایی آبیاری، می‌توان ضمن کشت محصول‌های پر آب، سود ناخالص کشاورزان را نیز بهبود داد. Kalbali et al. (2021) نیز دریافتند که پیش‌فرض افزایش کارایی آبیاری با افزایش امکان سطح زیر کشت محصول‌ها و بهبود درآمد ناخالص بخش کشاورزی می‌تواند آثار منفی تغییر اقلیم را در حوضه قره‌سو در استان گلستان تعدیل نماید.

¹ Trade-off

جدول ۵- اثر اتخاذ پیش‌فرض‌های حفاظت آب بر متغیرهای هدف در منطقه حمیدیه

Table 5- The effect of adopting water conservation scenarios on target variables in Hamidiyeh region

پیش‌فرض ۵ Scenario 5	پیش‌فرض ۴ Scenario 4	پیش‌فرض ۳ Scenario 3	پیش‌فرض ۲ Scenario 2	پیش‌فرض ۱ Scenario 1	بهینه Optimal	واحد Unit	محصول‌ها Crop
169.6 (6%)	145.7 (-8.9%)	150 (-6.2%)	140.2 (-12.4%)	180 (12.6%)	160	میلیون ریال Million rials	بازده برنامه‌ای Gross Margin
8946 (2.3%)	7590 (-13.2%)	8150 (-6.9%)	7096 (-18.8%)	6289 (-28%)	8745	مترمکعب Cubic meter	آب آبیاری Irrigation Water
186 (3.5%)	1.7 (-1.6%)	1.5 (-15.6%)	1.6 (-7.2%)	2.2 (25.3)	1.8	لیتر Liter	سم‌های شیمیایی Pesticides
367 (4.8%)	342 (-2.2%)	298 (-14.8%)	293 (-16.4%)	420 (20.1%)	350.6	کیلوگرم kg	کود شیمیایی Fertilizer
11.2 (2.8%)	11.6 (7.2%)	9.5 (-12.6%)	7.6 (-29.8%)	12.6 (15.6)	10.9	نفر-روز کار Man-day Power	نیروی کار Labor
3394 (8.7%)	3188 (2.1%)	2844 (-8.9%)	3726 (19.3%)	3586 (14.8%)	3122	کالری در هر کیلوگرم Calories per kg	انرژی تولید شده Prodused energy
671 (15%)	605 (3.8%)	520 (-10.8%)	621 (6.5%)	756 (30%)	583	کیلوگرم kg	کود حیوانی Manure
15.1 (-1.6%)	16.6 (7.3%)	13.4 (-12.8%)	16.3 (6.3%)	17.9 (16.2%)	15.4	ساعت Hour	ماشین‌ها و ادوات Machinery

Source: research findings

مأخذ: یافته‌های تحقیق

اعمال پیش‌فرض دوم مبنی بر کم آبیاری برای محصول‌های گندم، گوجه فرنگی و ذرت دانه‌ای بر بازده برنامه‌ای بهینه تأثیر منفی دارد. به طوری که انتظار می‌رود این سیاست منجر به کاهش میانگین بازده برنامه‌ای هر هکتار از زمین‌های کشاورزی به میزان ۱۲/۴ درصد شود. با اعمال این سیاست میانگین مصرف آب در منطقه مورد بررسی بیش از ۱۸ درصد کاهش می‌یابد. کاهش میانگین مصرف آب را می‌تواند ناشی از کاهش قابل توجه سطح زیر کشت محصول‌های آب‌بر مانند گوجه فرنگی و گندم باشد. کاهش قابل توجه مصرف کود و سم‌های شیمیایی در کنار افزایش استفاده از ماشین‌ها و ادوات از دیگر نتایج اعمال سیاست کم آبیاری است. کاهش مصرف کود شیمیایی به دلیل کاهش سطح زیر کشت محصول‌های دارای مصرف بالای این نهاد مانند گندم، گوجه فرنگی و خیار سبز است. این در حالی است که افزایش سطح زیر کشت محصول‌های کنجد و جو به میزان حدود ۲/۵ برابر در نتیجه اعمال پیش‌فرض کم آبیاری منجر به افزایش میزان انرژی تولید شده توسط محصول‌ها شده است. کاهش استفاده از نیروی کار به دلیل کاهش سطح زیر کشت محصول‌هایی که در آنها از نیروی کار زیاد استفاده می‌شود نیز در جدول (۵) مشخص است. در این راستا با کاهش سطح زیر کشت محصول‌های گوجه فرنگی و خیار سبز میانگین استفاده از نیروی کار نزدیک به ۳۰ درصد کاهش می‌یابد. نتایج بسیاری از پژوهش‌ها نشان داد که اجرای سیاست‌های محدودیت بر منابع آب باعث توسعه کشت محصول‌های با نیاز آبی کمتر شده است (Yazdani et al., 2016; Mirzaei et al., 2016). همچنین، Asaadi et al., (2021) نشان دادند که با اعمال سناریوهای مختلف کم آبیاری در مراحل از رشد که عملکرد محصول دارای حساسیت کمتری نسبت به تنش آبی بود، الگوی کشت به نفع محصول‌هایی که درآمد بیشتر و مصرف آب کمتری دارند؛ تغییر خواهد کرد. با توجه به جدول (۵) مشاهده می‌شود که اثرگذاری‌ها پیش‌فرض افزایش دو برابری قیمت آب بر متغیرهای تابع هدف مانند بازده برنامه‌ای و مصرف آب نسبت به دو سیاست بهبود کارایی آبیاری و اعمال کم آبیاری کمتر است. در این راستا، اعمال سیاست افزایش قیمت آب، میانگین بازده برنامه‌ای منطقه حدود ۶ درصد کاهش می‌یابد که این کاهش بازده با کاهش مصرف آب به نزدیک ۷ درصد نیز منجر خواهد شد. کاهش میانگین مصرف هر یک از نهاده‌های شیمیایی (کود و سم‌ها) به میزان ۱۵ درصد نیز از اثرگذاری‌ها مثبت این سیاست بر افزایش کیفیت محیط‌زیست و تأمین غذای سالم حکایت دارد. ذکر این نکته ضروری است که با افزایش قیمت آب سطح زیر کشت اکثر محصول‌های موجود در منطقه کاهش می‌یابد که این موضوع به کاهش

ارزیابی تأثیر سیاست های... ۱۷۳

انرژی تولید شده توسط محصول ها و همچنین کاهش استفاده از نیروی کار و ماشین ها و ادوات می شود. بنابراین، با افزایش قیمت آب به رغم نبود تأثیر قابل توجه بر بازده برنامه‌ای در مجموع میزان استفاده از نهاده‌ها در مزرعه کاهش می‌یابد. با کاهش سطح زیر کشت برنج به میزان میانگین سهم این محصول از کل محصول‌های منطقه مشاهده می‌شود که بازده برنامه‌ای و مصرف آب کاهش می‌یابد. کاهش در میزان مصرف آب در نتیجه کاهش سطح زیر کشت محصول برنج نسبت به سیاست افزایش قیمت آب بیشتر است. این موضوع نشان می‌دهد که هزینه استفاده از آب هم اکنون در سطح پایینی قرار دارد. به طوری که سیاست دو برابر کردن قیمت این نهاده اثرگذاری‌ها کمتری نسبت به اثرگذاری‌ها دیگر سیاست‌های دیگر در منطقه بر میزان مصرف نهاده‌ها و معیشت کشاورزان خواهد داشت. میزان تغییرپذیری‌های در متغیرهای هدف در اثر اعمال سیاست کاهش سطح زیر کشت برنج به عنوان یک محصول آب‌بر نیز چندان قابل توجه نیست؛ در هر صورت، کاهش استفاده از سم‌ها و کودهای شیمیایی از نتایج قابل ذکر در این زمینه است. نتایج پژوهش‌های همسو در این زمینه نیز نشان می‌دهد که افزایش قیمت آب منجر به افزایش هزینه تولید و کاهش بازده برنامه‌ای مزرعه شده است (Gharaghani et al., 2009). نتایج پژوهش (Asaadi et al., 2019) نشان داد که تقاضای آب در بخش کشاورزی ایران دارای کشش پایینی است و استفاده از ابزارهای اقتصادی مانند قیمت آب برای دستیابی به هدف‌های پایداری کافی نیست. (Oulmane et al., 2019) نیز انتظار داشتند افزایش قیمت آب منجر به کاهش تقاضا برای آب آبیاری در الجزایر شود. با این حال، این کاهش تنها با قیمت‌های بسیار بالا اتفاق افتاد.

همچنین نتایج نشان می‌دهد که کاهش سطح زیر کشت برنج به افزایش انرژی تولید شده توسط محصول‌ها و همچنین افزایش همزمان استفاده از نیروی کار و ماشین‌ها و ادوات و کود حیوانی منجر می‌شود که البته این تغییرپذیری‌های از نظر عددی چندان بزرگ نیست. (Kalbali et al., 2021) بیان کردند که همچنین تغییر روش کاشت برنج از روش غرقابی به روش بذر خشک، می‌تواند در بهبود سود ناخالص و کاهش میزان آب مصرفی بسیار مؤثر باشد. با اعمال پیش‌فرض پنجم مبنی بر افزایش سطح زیر کشت کنجد به عنوان یک محصول با مقدارهای بالای تولید انرژی مشاهده می‌شود که در مجموع میانگین بازده برنامه‌ای منطقه افزایش می‌یابد. اما این افزایش بازده با افزایش مصرف استفاده از اکثر نهاده‌های مزرعه‌ای و خارج مزرعه همراه خواهد بود. البته میزان افزایش مصرف نهاده‌ها در نتیجه اعمال این سیاست چندان قابل توجه

نیست. به نظر می‌رسد با افزایش سطح زیر کشت کنجد بتوان به بهبود معیشت کشاورزان و میزان انرژی تولید شده از هر محصول دست یافت. این در حالی است که نتیجه پژوهش Mirzaei & Zibaei (2021) نشان داد که با افزایش سطح زیر کشت کنجد در حوضه هلیل رود در ایران، بازده برنامه‌ای کشاورزان کاهش یافته است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از یک چارچوب جامع و کل‌نگر به بهینه‌سازی الگوهای زراعی و مدیریت بهینه منابع آب پرداخته شد. در این راستا، مجموعه‌ای از هدف‌های اقتصادی، محیط‌زیستی، اجتماعی و تغذیه‌ای در نظر گرفته شد. در واقع، این پژوهش یک رویکرد بهینه‌سازی چند هدفه را پیشنهاد می‌کند که الگوریتم NSGA-II و اثربخشی آن را با کاربرد در تعیین الگوی کشت بهینه و سیاست‌های حفاظت از آب پیگیری کرده است. دستاورد مهم این پژوهش، توسعه چارچوبی است که با وجود متناقض بودن تابع‌های هدف، بهینه‌سازی همزمان انجام می‌دهد و به مدیران و کاربران این امکان را می‌دهد که یک راه‌حل را از میان چندین راه‌حل بهینه برگزینند. به عبارت دیگر، چارچوب پیشنهادی در پژوهش حاضر، نوعی سیستم حامی تصمیم‌گیری است که به ذینفعان کمک می‌کند تا با مشخص کردن اولویت‌ها، نتایج را مشاهده کند و بهترین تصمیم را بگیرد. بنابراین، نتایج پژوهش حاضر می‌تواند چارچوبی جامع و کارآمد برای مدیریت پایدار منابع آب و کاهش اثرگذاری‌ها زیست‌محیطی همراه با تأمین منافع اجتماعی در راستای هدف‌های توسعه پایدار فراهم کند. بر این مبنا پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی و برای منطقه‌های مختلف با استفاده از این چارچوب موضوع مدیریت پایدار منابع تحت سیاست‌های متفاوت در بخش کشاورزی پیگیری شود. همچنین، ادبیات موجود نشان می‌دهد که تحقیقات بیشتری برای گنجاندن اولویت تصمیم‌گیرندگان و مدیران (عامل انسان) در فرآیند بهینه‌سازی چند هدفه برای تولید مناسب‌ترین راه‌حل از مجموعه راه‌حل‌های بهینه پارتو مورد نیاز است که پیشنهاد می‌شود این موضوع در پژوهش‌های آتی پیگیری شود.

نتایج کلی پژوهش حاضر نشان داد که با لحاظ هدف‌های هشت‌گانه بین الگوی کشت بهینه و الگوی کشت کنونی اختلاف زیادی وجود دارد. به طوری که با حل مدل بهینه‌سازی و تحت لحاظ هدف‌ها و محدودیت‌های موجود، مشخص شد که در شرایط بهینه می‌بایستی سطح زیر کشت بسیاری از محصولات به میزان قابل توجهی افزایش یابد. بنابراین، آگاهی بهره‌برداران،

ارزیابی تأثیر سیاست های... ۱۷۵

ذینفعان و مدیران از این شرایط ضروری است. همچنین، با توجه به وجود هدف‌های متضاد تغییرپذیری‌های شاخص‌های مختلف در شرایط بهینه در یک راستا نیست. در این راستا، با لحاظ شرایط بهینه، تغییرپذیری‌های مصرف نهاده‌ها و شاخص‌هایی همچون بازده برنامه‌ای و میزان انرژی تولید شده به ازای هر واحد محصول تغییرپذیری‌های عمده‌ای را نشان می‌دهند. با توجه به یافته‌ها، با افزایش کارایی آبیاری از طریق استفاده از روش‌های نوین آبیاری می‌توان به تخصیص بهینه منابع و معیشت پایدار کشاورزان دست یافت. در این زمینه، حمایت‌های مالی و فنی دولت‌ها برای گسترش این فناوری‌ها ضروری است.

منبع‌ها

- Aljanabi, A. A., Mays, L. W., & Fox, P. (2018). Optimization Model for Agricultural Reclaimed Water Allocation Using Mixed-Integer Nonlinear Programming. *Water*, **10(10)**, 1291.
- Asaadi, M. A., Mortazavi, S. A., Zamani, O., Najafi, G. H., Yusaf, T., & Hoseini, S. S. (2019). The Impacts of Water Pricing and Non-Pricing Policies on Sustainable Water Resources Management: A Case of Ghorveh Plain at Kurdistan Province, Iran. *Energies*, *12(14)*, 2667.
- Attia, A., El-Hendawy, S., Al-Suhaibani, N., Alotaibi, M., Tahir, M. U., & Kamal, K. Y. (2021). Evaluating deficit irrigation scheduling strategies to improve yield and water productivity of maize in arid environment using simulation. *Agricultural Water Management*, *249*, 106812.
- Boazar, M., Abdesahi, A., & Yazdanpanah, M. (2020). Changing rice cropping patterns among farmers as a preventive policy to protect water resources. *Journal of Environmental Planning and Management*, *63(14)*, 2484-2500.
- Chen, F., Cui, N., Jiang, S., Wang, Z., Li, H., Lv, M., Wang, Y., Gong, D., & Zhao, L. (2023). Multi-objective deficit drip irrigation optimization of citrus yield, fruit quality and water use efficiency using NSGA-II in seasonal arid area of Southwest China. *Agricultural Water Management*, *287*, 108440.
- Choubin, B., Solaimani, K., Rezanezhad, F., Roshan, M. H., Malekian, A., & Shamshirband, S. (2019). Streamflow regionalization using a similarity approach in ungauged basins: Application of the geo-environmental signatures in the Karkheh River Basin, Iran. *Catena*, *182*, 104128.

- Chouchane, H., Krol, M. S., & Hoekstra, A. Y. (2020). Changing global cropping patterns to minimize national blue water scarcity. *Hydrology and earth system sciences*, 24(6), 3015-3031.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. A. M. T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 6(2), 182-197.
- Fonseca, C. M., & Fleming, P. J. (1993). Genetic algorithms for multi objective optimization: formulation discussion and generalization. In *Icga 93*, 416-423.
- Gharaghani, F., Boostani, F., & Soltani, G. (2009). Assessing the impact of reducing irrigation water and increasing its price on cropping pattern by positive mathematical programming model: A case study of Eghlid in Fars Province.
- Ghobadi Y., Pradhan B., Shafri H.Z.M., and Kabiri K. 2015. Assessment of spatial relationship between land surface temperature and landuse/cover retrieval from multi-temporal remote sensing data in South Karkheh Subbasin, Iran. *Arabian Journal of Geosciences* 8(1): 525-537.
- Hadiyan, P. P., Moeini, R., & Ehsanzadeh, E. (2020). Application of static and dynamic artificial neural networks for forecasting inflow discharges, case study: Sefidroud Dam reservoir. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 27, 100401.
- Heidarzadeh, M., Mirghasemi, A. A., Niroomand, H., & Eslamin, F. (2019). Construction and performance of the Karkheh dam complementary cut-off wall: an innovative engineering solution. *International Journal of Civil Engineering*, 17(6), 859-869.
- Hojjati, A., Monadi, M., Faridhosseini, A., & Mohammadi, M. (2018). Application and comparison of NSGA-II and MOPSO in multi-objective optimization of water resources systems. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 66(3), 323-329.
- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. MIT press.
- Huang, H., Xie, P., Duan, Y., Wu, P., & Zhuo, L. (2023). Cropping pattern optimization considering water shadow price and virtual water flows: A case study of Yellow River Basin in China. *Agricultural Water Management*, 284, 108339.
- Huang, S., Wortmann, M., Duethmann, D., Menz, C., Shi, F., Zhao, C., Su, B., & Krysanova, V. (2018). Adaptation strategies of agriculture and

- water management to climate change in the Upper Tarim River basin, NW China. *Agricultural Water Management*, 203, 207-224.
- Iran Water & Power Resources Development Company. (2015). *Systematic Studies of Karkheh River Basin*. Water Resources Planning Studies, Volume 5. Unpublished. (In Persian)
- Jain, S., Ramesh, D., & Bhattacharya, D. (2021). A multi-objective algorithm for crop pattern optimization in agriculture. *Applied Soft Computing*, 112, 107772.
- Kalbali, E., Ziaee, S., Mardani Najafabadi, M., & Zakerinia, M. (2021). Approaches to adapting to impacts of climate change in northern Iran: The application of a Hydrogy-Economics model. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124067.
- Liu, H., Liu, N., Zhang, D., Zhu, J., & Zhu, Y. (2023). Incorporating economy and water demand rate uncertainty into decision-making for agricultural water allocation during droughts. *Water Supply*, 23(10), 4252-4262.
- Mardani Najafabadi, M., & Ashktorab, N. (2023). Mathematical programming approaches for modeling a sustainable cropping pattern under uncertainty: a case study in Southern Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 25(9), 9731-9755.
- Mardani Najafabadi, M., & Shirzadi Laskookalayeh, S. (2023). Solving Cropping Pattern Optimization Problems Using Robust Positive Mathematical Programming. In A. J. Kulkarni & A. H. Gandomi (Eds.), *Handbook of Formal Optimization* (pp. 1-26). Springer Nature Singapore .
- Mardani Najafabadi, M., Magazzino, C., Valente, D., Mirzaei, A., & Petrosillo, I. (2023). A new interval meta-goal programming for sustainable planning of agricultural water-land use nexus. *Ecological Modelling*, 484, 110471.
- Mardani Najafabadi, M., Mirzaei, A., Azarm, H., & Nikmehr, S. (2022). Managing Water Supply and Demand to Achieve Economic and Environmental Objectives: Application of Mathematical Programming and ANFIS Models. *Water Resources Management*, 36(9), 3007-3027.
- Marzban, Z., Asgharipour, M. R., Ghanbari, A., Ramroudi, M., & Seyedabadi, E. (2021). Evaluation of environmental consequences affecting human health in the current and optimal cropping patterns in the eastern Lorestan Province, Iran. *Environ Sci Pollut Res Int*, 28(5), 6146-6161.

- Mirzaei, A., & Zibaei, M. (2021). Water Conflict Management between Agriculture and Wetland under Climate Change: Application of Economic-Hydrological-Behavioral Modelling. *Water Resources Management*, 35(1), 1-21.
- Mirzaei, A., Abdeshahi, A., Azarm, H., & Naghavi, S. (2022b). New design of water-energy-food-environment nexus for sustainable agricultural management. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 36(7), 1861-1874.
- Mirzaei, A., Azarm, H., & Naghavi, S. (2022a). Optimization of cropping pattern under seasonal fluctuations of surface water using multistage stochastic programming. *Water Supply*, 22(6), 5716-5728.
- Mirzaei, K., & Ahmadpour Borazjani, M. (2016). Effects of irrigation water quotation on cropping pattern and farmers' gross margin in Amol region. *Iran-Water Resources Research*, 12(3), 166-179.
- Oulmane, A., Frijia, A., & Brabez, F. (2019). Modelling farmers' responses to irrigation water policies in Algeria: an economic assessment of volumetric irrigation prices and quotas in the Jijel–Taher irrigated perimeter. *Irrigation and drainage*, 68(3), 507-519.
- Prakash Khedun, C., Sanchez Flores, R., Rughoonundun, H., & Kaiser, R. A. (2014). World Water Supply and Use: Challenges for the Future. In N. K. Van Alfen (Ed.), *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems* (pp. 450-465). Academic Press. 8
- Rasikh, Z. U. R., Joolaie, R., Keramatzadeh, A., & Mirkarimi, S. (2024). Optimizing the Cropping Pattern in Nangarhar Province Based on the Perspective of Sustainable Agricultural Development: Fuzzy Goal Programming Approach. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 1-11.
- Ren, D., Yang, H., Zhou, L., Yang, Y., Liu, W., Hao, X., & Pan, P. (2021). The Land-Water-Food-Environment nexus in the context of China's soybean import. *Advances in Water Resources*, 151, 103892.
- Rezaei Zaman, M., Morid, S., & Delavar, M. (2016). Evaluating climate adaptation strategies on agricultural production in the Siminehrud catchment and inflow into Lake Urmia, Iran using SWAT within an OECD framework. *Agricultural Systems*, 147, 98-110.
- Sapino, F., Pérez-Blanco, C. D., Gutiérrez-Martín, C., & Frontuto, V. (2020). An ensemble experiment of mathematical programming models to assess socio-economic effects of agricultural water pricing reform in

- the Piedmont Region, Italy. *Journal of Environmental Management*, 267, 110645.
- Sato, Y., & Sato, M. (2022). Using Dominated Solutions at Edges to the Diversity and the Uniformity of Non-dominated Solution Distributions in NSGA-II. *SN Computer Science*, 3(6), 432.
- Sedghamiz, A., Nikoo, M. R., Heidarpour, M., & Sadegh, M. (2018). Developing a non-cooperative optimization model for water and crop area allocation based on leader-follower game. *Journal of hydrology*, 567, 51-59.
- Shaikh, I. A., Wayayok, A., & Lee, T. S. (2015). Preference index-based allocation of optimized cropping area at the Mirpurkhas subdivision: Jamrao irrigation scheme in Sindh, Pakistan. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 141(12), 04015021.
- Srinivas, N., & Deb, K. (1994). Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. *Evolutionary computation*, 2(3), 221-248.
- Sudaryanto, B., & Yortsos, Y. C. (2000). Optimization of fluid front dynamics in porous media using rate control. I. Equal mobility fluids. *Physics of Fluids*, 12(7), 1656-1670.
- Tuninetti, M., Ridolfi, L., & Laio, F. (2022). Compliance with EAT–Lancet dietary guidelines would reduce global water footprint but increase it for 40% of the world population. *Nature Food*, 3(2), 143-151.
- Varade, S., & Patel, J. N. (2019). Optimization of groundwater resource for balanced cropping pattern. *Water Policy*, 21(3), 643-657.
- Verma, S., Pant, M., & Snasel, V. (2021). A Comprehensive Review on NSGA-II for Multi-Objective Combinatorial Optimization Problems. *IEEE Access*, 9, 57757-57791.
- Wang, G., Kumar, S., Huang, Z., & Liu, R. (2024). Water resource management and policy evaluation in Middle Eastern countries: Achieving sustainable development goal 6. *Desalination and Water Treatment*, 320, 100829 .
- Wang, S., Fu, G., Ma, X., Xu, L., & Yang, F. (2021). Exploring the optimal crop planting structure to balance water saving, food security and incomes under the spatiotemporal heterogeneity of the agricultural climate. *Journal of Environmental Management*, 295, 113130.
- Yazdani, S., Mahmoodi, A., Yavari, G., Nazari, M., & Mirzaei, M. (2016). Analysis of the Economic Effects of Nonprice Policy Reduced Water

- Supply in Qazvin Plain. Quarterly Journal of Economic Growth and Development Research, 6(23 (2)), 98-89.
- Zamani, O., Azadi, H., Mortazavi, S. A., Balali, H., Moghaddam, S. M., & Jurik, L. (2021). The impact of water-pricing policies on water productivity: Evidence of agriculture sector in Iran. Agricultural Water Management, 245, 106548.
- Zetland, D. (2014). Living with Water Scarcity. Aguanomics Press, Vancouver.
- Zheng, W., Liu, Y., & Doerr, B. (2022). A First Mathematical Runtime Analysis of the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II). Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 36(9), 10408-10416.



The Effect of Water Conservation Policies on Optimal Resource Allocation with Regard to Economic, Environmental, Social, and Nutritional Objectives

Mostafa Mardani Najafabadi, Abas Abdeshahi, Abbas Mirzaei, Hassan Azarm

Received: 15 Sept.2024

Accepted: 11 Jan.2025

Extended Abstract

Introduction

Competition for water resources in agriculture and other sectors has exacerbated global water scarcity. Factors such as population growth, urbanisation, dietary changes and climate change have increased pressure on water resources. Researchers argue that demand management policies are more effective than supply-side solutions for managing water resources. Various strategies, such as optimising cropping patterns, have been evaluated to improve water use efficiency. Changing cropping patterns to improve physical and economic water efficiency is a key adaptation strategy for farmers. In the present study, the optimization of cropping patterns was considered with a set of economic, environmental, social and nutritional objectives in mind. Accordingly, eight objectives were considered, including maximizing gross margin, minimizing irrigation water consumption, minimizing chemical input consumption (pesticides and chemical fertilizers), maximizing labor and energy use per unit of product, along with maximizing the use of animal manure and reducing the hours of use of machinery. Next, the effects of water conservation policies, including increasing irrigation efficiency, irrigation deficit, increasing water prices, controlling the area under rice cultivation as a water-intensive crop, and increasing the area under sesame cultivation on the optimal conditions were evaluated.

Materials and Method

In the present study, the Non-dominated sorting genetic algorithm-type II (NSGA-II) was used for optimal resource allocation in the Hamidiyeh plain region. A set of Pareto-efficient optimal solutions was extracted from this algorithm. Next, the effects of adopting water conservation policies on the optimal values obtained from the implementation of the NSGA-II were evaluated. To implement the NSGA-II algorithm, statistics and information related to the cultivated area, price and yield of crops, cost of irrigation water utilization, cost of irrigation water extraction, cost of agricultural inputs, and

total production cost were obtained through face-to-face interviews and completion of questionnaires from 170 farmers of the Hamidieh Plain for the year 2022, who were selected using a multi-stage cluster sampling method.

Results and discussion

The results showed significant differences between the optimal cropping pattern and the current cropping pattern in the region due to conflicting goals. The evaluation of water conservation policies indicated that increasing irrigation efficiency not only improves gross margin and reduces water consumption but also increases the energy produced per crop, making this policy highly compatible with achieving the mentioned goals simultaneously. In contrast, the deficit irrigation scenario, despite reducing water consumption and chemical inputs, leads to a decrease in the average gross margin in the studied area. Additionally, the results showed that the impact of doubling water prices is less effective than increasing irrigation efficiency and implementing deficit irrigation policies. However, increasing water prices still reduces gross margin and the area under cultivation for most crops. Reducing the area under rice cultivation results in decreased gross margin, reduced average water consumption, and heterogeneous changes in other inputs used. Furthermore, increasing the area under sesame cultivation, while aiding in improving farmers' gross margin, leads to increased water consumption and some environmentally polluting inputs.

Suggestion

The important achievement of this research is the development of a framework that performs simultaneous optimization despite the contradictory objective functions and allows managers and users to choose a solution from several optimal solutions. In other words, the framework proposed in the present study is a type of decision support system that helps stakeholders to identify priorities, view the results, and make the best decision. Based on the results of evaluating water conservation policies, it is recommended that improving irrigation efficiency in agricultural units be prioritized.

JEL Classification: C44, C61, P28, Q18

Keywords: Cropping Pattern, GeneticAlgorithm, Multi-Objective Modeling, Deficit irrigation