

ارزیابی ارایه یک مدل پیشنهادی چند هدفه با رویکرد همبست آب- انرژی- غذا برای بهبود بهره‌وری آب و انرژی

حسین بدیع برزین، سید مهدی حسینی*، محمود هاشمی تبار، مصطفی مردانی نجف آبادی^۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۲

چکیده

با توجه به شرایط خشکسالی و نیز رشد روزافزون جمعیت و افزایش تقاضا برای غذا، امروزه بیش از پیش نیاز به بهبود بهره‌وری آب و انرژی می‌باشد، در سال‌های اخیر، منطقه‌های کم‌آب برای دستیابی به توسعه اقتصادی پایدار با چالش‌های زیادی روبرو شده‌اند. توسعه اقتصادی پایدار در بخش کشاورزی با توجه به مفهوم همبست آب-انرژی-غذا (WEFN) امکان پذیر است. با استفاده از همبست آب-انرژی-غذا معیارهای مصرف، بهره‌وری فیزیکی و بهره‌وری اقتصادی منابع آب و انرژی تعیین می‌شود. این پژوهش در محدوده مورد مطالعه دشت سیستان برای سال زراعی ۱۳۹۷-۹۸ انجام گرفته است. با توجه به اینکه در زمینه بهره‌وری آب و انرژی با استفاده از رویکرد همبست WEFN با در نظر گرفتن هدف‌ها و محدودیت‌های متفاوت، تاکنون بررسی و ارزیابی لازم در این حوضه انجام نشده است. بنابراین پژوهش حاضر با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی چند هدفه به تعیین میزان بهره‌وری اقتصادی و فیزیکی مصرف آب و انرژی در این حوضه پرداخته است. کد نویسی و حل مدل با استفاده از نرم افزار GAMS انجام شده است. بنا بر نتایج مدل اجرای همبست آب-انرژی-غذا منجر به بهبود بهره‌وری در میزان مصرف آب آبیاری در حوضه مورد مطالعه به مقدار ۱۱/۳۷ درصد شده است. با توجه به نتایج مدل، میزان بهره‌وری اقتصادی برای مصرف انرژی نهاده‌ها، محصول‌های راهبردی برای تامین امنیت غذایی و انتشار گازهای گلخانه‌ای CO₂ به ترتیب ۴۱/۳، ۱۴/۱۰ و ۱۶/۰۲ درصد به دست آمد. همچنین نتایج مدل پیشنهادی نشان داد که میزان بهره‌وری فیزیکی مصرف آب در دشت سیستان از مقدار ۱۸۸۸۹۹/۵ کیلوگرم بر متر مکعب به مقدار ۲۱۱۴۸۷/۵ کیلوگرم بر متر مکعب افزایش پیدا کرده است. بنابراین اجرای رویکرد همبست WEFN در منطقه مورد مطالعه منجر به بهبود بهره‌وری اقتصادی و فیزیکی مصرف آب و انرژی شده است.

طبقه‌بندی JEL: O13, C61, C02.

واژه‌های کلیدی: همبست آب-انرژی-غذا، برنامه‌ریزی غیرخطی چند هدفه، بهره‌وری اقتصادی و فیزیکی، دشت سیستان.

^۱ به ترتیب: دانشجوی دکتری دانشگاه سیستان و بلوچستان، استادیار (نویسنده مسئول) گروه اقتصاد کشاورزی دانشگاه سیستان و بلوچستان، استادیار گروه اقتصاد کشاورزی دانشگاه سیستان و بلوچستان، دانشیار گروه اقتصاد کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاتانی، ایران

مقدمه

در سال‌های اخیر، افزایش تقاضا برای محصولات کشاورزی ناشی از رشد جمعیت، توسعه اقتصادی و شهرنشینی منجر به افزایش مصرف آب و انرژی برای تولید غذا شده است (Karabulut et al., 2016; Radmehr et al., 2021).

آب-انرژی - غذا (WEFN)^۱ هر سه با هم پیوندی ناگسستنی داشته و برای توسعه زندگی انسان و امرار معاش حیاتی هستند. برای تولید مواد غذایی به آب و انرژی نیاز است، برای استخراج (سد سازی، پمپاژ)، ایجاد آبراهه، گردآوری، پالایش، توزیع و تحویل آب نیز انرژی لازم است و از سوی دیگر، آب برای تولید برق، تولید و فرآوری سوخت‌های فسیلی، تصفیه پسماندها دارای اهمیت زیادی است (Zeng et al., 2019; Li et al., 2019). بخش کشاورزی حدود ۹۰ درصد از مصرف آب شیرین و حدود ۳۰ درصد از مصرف انرژی در سراسر جهان را تشکیل می‌دهد (FAO, 2011). از سوی دیگر، آبیاری کشاورزی حدود ۴۰ درصد غذای جهان را تامین می‌کند (Li et al., 2019). با توجه به اینکه یکی از بخش‌هایی که آب-انرژی - غذا با هم ارتباط بسیار نزدیکی دارند، کشاورزی است. بنابراین تخصیص بهینه آب، انرژی و منابع زمین با توجه به هدف‌های در نظر گرفته می‌تواند باعث بهبود سود اقتصادی و همچنین منجر به کاهش در میزان انتشار گازهای گلخانه ای CO₂ شود (Hassas et al., 2021; Li et al., 2019). با توجه به پایین بودن ارزش اقتصادی کاربرد آب در بخش کشاورزی در مقایسه با دیگر بخش‌ها، برای مدیریت منابع آب بر مبنای همبست آب-انرژی-غذا لازم است در بخش کشاورزی الگوی کشت تغییر پیدا کند (Lui et al., 2018).

با توجه به اینکه کشورهای خاورمیانه به همراه کشور ایران به لحاظ شرایط اقلیمی دارای آب و هوای خشک تا نیمه خشک مسئله و چالش‌های هستند، به همین دلیل در تامین و توزیع آب در بخش‌های مختلف به‌ویژه بخش کشاورزی با مشکلات زیادی روبه‌رو هستند (Mardani et al., 2021; Ghafari Moghadam et al., 2019). امروزه بهره‌برداری بیش از حد از منابع کشاورزی، استفاده بیش از حد از نهاده‌های کشاورزی، برداشت بیش از حد از آب‌های زیرزمینی به طور فزاینده‌ای به مشکلات چالشی تبدیل شده است، بنابراین، این مسئله به طور قابل توجهی باعث به چالش کشاندن توسعه کشاورزی پایدار می‌شود (Brauman et al., 2013, Hashemi et al.,)

¹ Water Food Energy Nexues

ارزیابی ارائه یک مدل پیشنهادی...۳

(Kumar et al., 2012, 2018) با توجه به ارتباط بین بخش‌های آب، انرژی و کشاورزی و هدف-های مختلف این بخش‌ها (Chen et al., 2017; Yu et al., 2020)، استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چند هدفه و چند معیاره ضروری است. زیرا در نظر گرفتن تنها هدف یک بخش از سه بخش آب، انرژی و غذا ممکن است منجر به نتایج گمراه‌کننده شود (Bizikova et al., 2013). بنابراین، ارائه یک شاخص ترکیبی با گنجاندن همه معیارهای مربوط به آب-انرژی-غذا می‌تواند به عنوان ابزاری جامع برای بررسی جنبه‌ها و نگرانی‌های مربوط به هر سه بخش استفاده شود (Mirzaei et al., 2023) از جمله موثرترین راهکارهای رویارویی با بحران آب و افزایش کمی و کیفی تولیدها در بخش کشاورزی افزایش (بازده) آبیاری و مهم‌تر از آن بهبود بهره‌وری مصرف آب می‌باشد (Mirzaei et al., 2023). از این رو بهره‌وری مصرف آب کشاورزی یکی از مهم‌ترین موضوع‌هایی است که در سال‌های اخیر مورد توجه مجامع علمی مرتبط با آبیاری و کشاورزی قرار گرفته است. عصاره اصلی و ساختار بنیادی مفهوم بهره‌وری آب کشاورزی استفاده بهینه و بهنگام از آب به همراه افزایش تولید محصول‌های کشاورزی است (Baghbanian et al., 2020). بنابراین هدف اصلی بهره‌وری آب کشاورزی در جهان یعنی افزایش محصول‌های کشاورزی با میزان مصرف آب کمتر می‌باشد (Ghafari Moghadam et al., 2021). اهمیت روز افزون منابع انرژی در شکل‌گیری و رشد فرآیندهای اقتصادی و همچنین ضرورت بهره‌برداری از این منابع بر پایه ملاحظه‌های زیست‌محیطی و توسعه پایدار اقتصادی و اجتماعی، موضوع صرفه‌جویی در مصرف انرژی را به عنوان مسئله مهم در همه‌ی زیرساخت‌های اقتصاد اعم از صنعت، خدمات و کشاورزی جهان مطرح می‌کند (Abdollahpour and Zaree, 2011). در این میان بخش کشاورزی به عنوان مصرف‌کننده و تولیدکننده انرژی دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشد (Ghorbani et al., 2011)

الگوهای برنامه‌ریزی ریاضی با توجه به قابلیت منحصر به فردی که در مرتبط ساختن اجزاء اقتصادی با جنبه‌های بیوفیزیک و (بوم‌شناسی) دارند امروزه یکی از ابزار رایج و کارآمد در تحلیل مسئله‌های پیچیده اقتصاد کشاورزی می‌باشند (Buysse et al., 2007). مفهوم رابطه WEFN در بررسی‌های گذشته، به طور عمده در مقیاس‌های مختلف مانند سطح کشور (Jin et al., 2019; Liu et al., 2018; Xu et al., 2019; Wang et al., 2018)، سطح استان یا مقیاس حوضه رودخانه (Liu et al., 2019; Chen et al., 2018; Si et al., 2019) مطرح شده است. به دلیل پیچیدگی رابطه بین مؤلفه‌های آب-انرژی-غذا لازم است که در فرآیند تصمیم‌گیری به طور همزمان این سه مؤلفه در

نظر گرفته شوند. یکی از روش‌های پرطرفدار و مناسب برای برنامه‌ریزی بر مبنای این رویکرد، استفاده از روش و فن برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه است.

در زمینه مدل‌های همبست WEFN و همچنین اجرای این الگو، برای میزان بهره‌وری آب و انرژی بررسی و ارزیابی‌های در داخل و خارج انجام شده که به اختصار به چند مورد پرداخته می‌شود.

Ahani et al (2023) یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چند هدفه شامل (بیشینه کردن سود ناخالص، کالری در محصولات کشاورزی و کمینه‌سازی انتشار گازهای گلخانه‌ای، مصرف آب، مصرف انرژی، و میزان مصرف کودها و سم‌های شیمیایی) را با استفاده از رویکرد همبست آب- غذا - انرژی برای تولید محصول‌های زراعی در دشت مشهد پیاده کردند. نتایج آنان نشان داد که میزان مصرف آب، انرژی و سطح زیر کشت محصول‌ها در همه منطقه‌های بررسی شده کاهش یافته است. دلیل این امر کاهش شدید آب قابل برنامه‌ریزی به دلیل بحرانی بودن این دشت از منظر کمبود منابع آب بیان شده است.

در پژوهشی Safavi and Ehteshami (2022) با استفاده از رویکرد همبست منابع آب، انرژی و غذا و میزان پایداری اجتماعی و محیط‌زیستی آن برای شهرستان ورامین به بررسی و ارزیابی پرداختند، نتایج آنان نشان داد مدیریت تلفیقی عرضه و تقاضا برای توسعه توامان صنعت و کشاورزی نسبت به بهره‌گیری به شیوه مجزا بهتر توانسته هدف‌های توسعه را در پایدارترین حالت محقق نماید.

Monem et al (2019) روشی به منظور تجزیه و تحلیل و ارزیابی کمی رابطه همبست آب- انرژی- غذا در زنجیره تولید محصول در شبکه‌های آبیاری نکوآباد در ایران پرداختند. بنابراین با استفاده از دو روش پیشنهادی و با توجه به مصرف آب و انرژی، دو شاخص بهره‌وری آب و بهره‌وری انرژی پیشنهاد شده است. نتایج آنان نشان داد که با در نظر گرفتن شاخص بهره‌وری نرمال شده آب مصرفی کاهش درآورد رودخانه منجر به بهبود بهره‌وری آب به میزان ۵۴/۰ درصد برای شبکه آبیاری شده است، همچنین نتایج آنان نشان داد که انسداد چاه‌های غیرمجاز منجر به بهبود بهره‌وری انرژی به مقدار ۴۹/۰ درصد شده است.

Radmehr et al. (2021) از مدل بهینه‌سازی چندهدفه با هدف به بیشینه رساندن سودمندی‌های بخش کشاورزی، شهری و صنعتی و به کمینه رساندن منابع آب زیرزمینی با محدودیت منابع آب و انرژی استفاده کردند و مجموعه‌ای از راه حل‌های بهینه پارتو را استخراج کردند.

ارزیابی ارائه یک مدل پیشنهادی... ۵

همچنین با استفاده از روش های تصمیم گیری چند معیاره و معیارهای مربوط به WEFN ، بهترین راه حل را انتخاب و الگوی کشت مناسب را پیشنهاد و تاکید کردند.

Li et al (2019) . مدل برنامه ریزی چند هدفه (بیشینه سازی سود و کمینه سازی انتشار گازهای گلخانه ای CO₂) را با استفاده رویکرد همبست آب-انرژی-غذا در حوضه رودخانه گوادیانا (پرتغال و اسپانیا) به کار گرفتند. نتایج آنان نشان داد که مدلسازی همبست آب-انرژی-غذا در منطقه هایی که با کمبود منابع روبه رو هستند قابل انجام است.

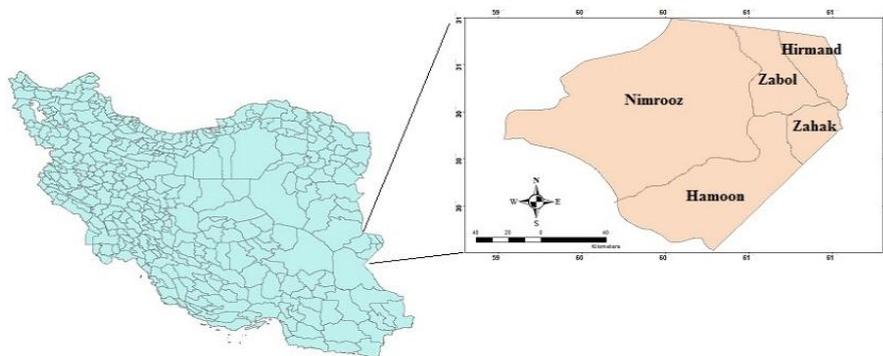
Mirzaei et al (2023) بر مبنای یک مدل همبست آب-انرژی-غذا به بررسی بهره‌وری اقتصادی و فیزیکی آب و انرژی با استفاده از تصمیم گیری چند هدفه (MCDM) در کشور ایران پرداختند. نتایج آنان نشان داد که الگوی مبتنی بر WEFN منجر به افزایش بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب به مقدار ۲۰۰ و ۱۸ درصد و افزایش بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی انرژی به میزان ۱۵۶ و ۶۷ درصد نسبت به الگوی پایه شده است.

Yao et al (2021) بر مبنای یک مدل همبست آب-انرژی-غذا در شرایط نبود اطمینان با توجه به (فراسنجه) محافظه کارانه به بررسی بهره‌وری آب آبیاری در (سیستم) همبست آب-غذا-زمین در کشور چین پرداختند. نتایج آنان نشان داد که میانگین بهره‌وری آب آبیاری از ۱/۵۸ کیلوگرم بر متر مکعب در سال ۲۰۱۳، بوسیله مدل پیشنهادی آنان به میزان ۱/۶۰ کیلوگرم متر مکعب افزایش یافته است. در واقع مدل پیشنهادی آنان به طور قابل توجهی بهره‌وری آب آبیاری را به مقدار ۵/۲۵ درصد بهبود بخشید است.

با توجه به اینکه در زمینه بهره‌وری فیزیکی و بهره‌وری اقتصادی آب و انرژی بررسی و ارزیابی هایی مانند (Mirzaei et al., 2023; Radmehr et al., 2021) در کشور انجام گرفته و نتایج مطلوبی هم به دست آمده است اما این پژوهش با چند هدفها و محدودیت‌های متفاوت از بررسی‌های انجام شده در حوضه مورد نظر را مورد بررسی و ارزیابی کرده است. بنابراین، این پژوهش با یک رویه جدید بر مبنای یک مدل چند هدفه به باز تخصیص بهینه منابع تولید کشاورزی برای تدوین برنامه زراعی بهینه پرداخته است. به این امید که اطلاعات سودمندی برای تدوین (راهبردهای) مناسب برای بهره‌وری اقتصادی و فیزیکی آب و انرژی و کاهش ای محیط-زیستی در محدوده مورد نظر دشت سیستان فراهم آورد.

دشت سیستان که منطقه مورد مطالعه در این تحقیق است (شکل ۱)، دارای بیش از ۱۳۵ هزار هکتار اراضی قابل کشت می‌باشد. از این سطح، سالانه بر حسب میزان آب تخصیصی تنها در

حدود ۵۰ تا ۷۰ درصد زیرکشت محصول‌های زراعی و باغی قرار می‌گیرد. این منطقه از مشرق و شمال به کشور افغانستان و از جنوب به شهرستان نصرت آباد استان سیستان و بلوچستان و از مغرب به شهرستان نهبندان در استان خراسان جنوبی و کویر لوت محدود است. در حدود ۱۵۰۰۰۰ هکتار از زمین‌های این دشت دارای توان بالقوه (پتانسیل) کشاورزی بوده و می‌تواند در چرخه تولید زراعی قرار گیرد. به لحاظ شرایط اقلیمی، آب و هوای حاکم بر دشت سیستان در همه طبقه‌بندی‌های اقلیمی صورت گرفته از نوع گرم و خشک است. میانگین دمای سالانه ۲۱ درجه سانتی‌گراد، میانگین رطوبت نسبی ۳۸ درصد و میانگین بارندگی در دشت سیستان حدود ۵۸ میلی‌متر در سال (یعنی حدود ۲۵ درصد بارندگی در کشور و حدود ۷ درصد متوسط بارندگی جهانی) است که این مقدار بارش تأثیر چندانی در بهبود وضعیت کشاورزی دشت سیستان ندارد. این در حالی است که، میزان تبخیر و تعرق سالانه در دشت سیستان ۸۰ برابر میزان بارندگی (یعنی بین ۴۵۰۰ تا ۵۰۰۰ میلی‌متر) در این منطقه برآورد شده است. مهم‌ترین عامل مشخصه آب و هوایی سیستان بادهای ۱۲۰ روزه سیستان است که از اواسط خرداد ماه آغاز به وزیدن می‌کند و تا اوایل مهرماه ادامه دارد و جهت آن از شمال غربی به جنوب شرقی است و سرعت آن گاه تا بالای ۱۰۰ کیلومتر در ساعت نیز می‌رسد. از پیامدهای زیانبار آن می‌توان به انتقال شن و ماسه و تشدید فرسایش و افزایش میزان تبخیر اشاره کرد (Report, 2018).



شکل (۱) محدوده مورد مطالعه دشت سیستان
figure (1) Sistan plain study area

بنا بر گزارش‌های سازمان جهاد کشاورزی استان سیستان و بلوچستان، دشت سیستان دارای ۱۳۵ هزار هکتار اراضی قابل کشت است که از این سطح، سالانه بر حسب میزان آب تخصیصی تنها در حدود ۵۰ تا ۷۰ درصد زیرکشت محصول‌های زراعی و باغی قرار می‌گیرد. نوسان‌های به

ارزیابی ارائه یک مدل پیشنهادی...۷

وجود آمده در آورد رودخانه هیرمند و نداشتن منابع آب مطمئن علت اصلی کاهش سطح زیرکشت محصولات زراعی در این منطقه است (Jihad Agriculture, 2018). عمده‌ترین محصولات زراعی در دشت سیستان گندم، جو، یونجه، پیاز، خربزه و هندوانه می‌باشند. علاوه بر محصولات های یادشده محصولات های دیگری مانند عدس و ماش و... در مساحت کم زیرکشت می‌روند. مجموع سطح زیرکشت محصولات های زراعی و باغی و گلخانه‌ای در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول (۱) مجموع سطح زیرکشت محصولات های زراعی و باغی دشت سیستان در سال پایه (۹۸-۱۳۹۷)
Table (1) The total cultivated area of agricultural and horticultural crops in the Sistan plain in the base year (2017-2018)

درصدی از کل استان Percent of total province	سطح زیرکشت (هکتار) Cultivation area (ha)		نوع محصول های بر حسب کشت Crop type
	دشت سیستان Sistan plain	استان سیستان و بلوچستان Sistan and Baluchistan province	
۲۶/۲	۶۱۶۴۲	۱۷۱۳۰۸	محصول های زراعی Agricultural crops
۱/۵۶	۱۰۵۸	۶۷۹۵۲	محصول های باغی Horticultural crops
۲۶/۷	۶۳	۲۳۶	محصول های گلخانه‌ای Greenhouse crops
۲۶/۲	۶۲۷۶۳	۲۳۹۴۹۶	مجموع Total

منبع: سازمان جهاد کشاورزی استان سیستان و بلوچستان، ۹۸-۱۳۹۷

Source: Agricultural Organization of Sistan and Baluchistan Province (2018-2019)

مواد و روش ها

در این بخش توسعه مدل بهینه‌سازی مدیریت همبست آب- انرژی - غذا (WEFN) در چند بخش اقتصادی- محیط‌زیستی بنابر نتایج بررسی های (Li et al., 2019) توصیف می‌شود. این مدل توانایی مدل‌سازی تعامل های و بر همکنش سه سامانه آب- انرژی - غذا از جمله عرضه- تقاضا آب، عرضه- تقاضای انرژی، تقاضای زمین، عملکرد محصولات های، تخصیص آب و انرژی را دارد. در ادبیات علمی بهینه‌سازی بسته به شرایط تصمیم‌گیری به یکی از روش های چند معیاری^۱، چند هدفی، هدف های متقابل^۲ و چند خصلتی^۳ طبقه‌بندی می‌شود (Mardani et al., 2019). مدل

1 Multi criteria
 2 Cross-purposes
 3 Multiple traits

فرضی مورد بررسی، شامل عمده اراضی زیر پوشش محصول‌های زراعی (گندم، جو، یونجه، پیاز، خربزه و هندوانه) دشت سیستان (زابلی، زهک، هیرمند و هامون) می‌باشد. در این مدل آب مورد نیاز برای آبیاری از منابع آب‌های سطحی (نداشتن آب‌های زیرزمینی) تامین می‌شود. در فرآیند تولید محصول‌های منابع آب (سطحی) و انرژی مورد نیاز است. در فرآیند تولید مواد غذایی، آبیاری محصول‌های کشاورزی و مصرف کودها و سم‌های شیمیایی نیز گازهای گلخانه‌ای به ویژه CO_2 منتشر می‌شود. بنابراین در این پژوهش سعی می‌شود بر مبنای یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی با استفاده از (روش و فن) برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه (MOP)^۱ برای همبست آب-انرژی-غذا معرفی شود، که توانایی پردازش تصمیم‌گیری‌های مدیریتی را داشته باشد. در این مدل افزون بر بررسی جنبه اقتصادی، کنترل گازهای گلخانه‌ای CO_2 به بررسی میزان بهره‌وری اقتصادی و فیزیکی (مصرف آب آبیاری، مصرف انرژی نهاده‌ها و میزان تولید محصول‌های اساسی و راهبردی منطقه) پرداخته شده است.

داده‌های مورد نیاز پژوهش، از طریق بررسی نشریه‌ها و گزارش‌های، سالنامه‌های آماری کشاورزی سال ۹۸-۹۷ و مصاحبه با کارشناسان هر شهرستان و از طریق شرکت‌های مهندسی مشاور (به دلیل تکمیل بودن اطلاعات) مربوطه گردآوری شد.

ساختار اصلی برنامه‌ریزی ریاضی در زمینه تعیین بهره‌وری اقتصادی و فیزیکی و همچنین الگوی کشت محصول‌های زراعی با رویکرد همبست آب-غذا-انرژی، مبتنی بر نتایج بررسی‌های (Li et al., 2019; Ahani et al., 2023; Yao et al., 2019; Mirzaei et al., 2023) می‌باشد. هدف‌ها در مدل پیشنهادی شامل: بیشینه‌سازی سود ناخالص و بهبود کالری محصول‌های اساسی منطقه و کمینه‌سازی شامل (انتشار گازهای گلخانه‌ای CO_2 ، میزان مصرف آب آبیاری و میزان مصرف انرژی نهاده‌ها) می‌باشند. محدودیت‌های مدل شامل آب، زمین، و انرژی بوده که در پی آن بررسی می‌گردد. لازم است پیش از تشریح مدل پیشنهادی، به منظور درک درست مدل و جلوگیری از سردرگمی خوانندگان، در آغاز به معرفی نمادهای استفاده شده در مدل پرداخته شود تا در هنگام بررسی مدل، با مراجعه به این نام‌گذاری، بتوانند به راحتی به درک دقیق‌تر و بهتر هدف‌ها و محدودیت‌های مدل پیشنهادی رسید. نمادها و تعریف‌های هر کدام از این اجزاء در جدول ۲ ارائه شده است.

¹ Multi Objective Programming

ارزیابی ارائه یک مدل پیشنهادی... ۹

جدول (۲) فهرست نمادهای مورد استفاده در مدل برای تعریف مجموعه‌ها، متغیرها و فراسنجه

Table (2) List of symbols used in the model to define sets, variables and parameters

شرح Description	اندیس Index	شرح Description	اندیس Index
هزینه‌های کشاورزان (میلیون ریال) Farmers' costs (million IRR)	C_V	مجموعه منطقه‌ها Regions set	{زابل، زهک، هیرمند و هامون} $I \in \{ \dots \}$
قیمت محصول‌های زراعی هر منطقه (ریال / کیلوگرم) price of crop k (IRR /kg)	$Price_{P_{ik}}$	مجموعه محصول‌های زراعی Crops set	{گندم، جو، یونجه، پیاز، خربزه و هندوانه} $K \in \{ \dots \}$
عملکرد محصول‌های هر منطقه (کیلوگرم / هکتار) Yeild of crop k in subarea i (kg/ha)	$Yield_{P_{ik}}$	مجموعه نهاده‌ها به کار رفته inputs used set	$J \in \{ 1, \dots, Y \}$
درآمد کشاورزان (میلیون ریال) Farmers' revenues (million IRR)	R_V	تعداد نیروی کار (نفر روز ساعت) Number of workers (persons, days, hours)	$labor_{ik}$
میزان انرژی تولید شده حاصل از مصرف یک واحد وزنی از محصولات زراعی (کالری) Energy generated from the consumption of one unit weight of crops (Coleri)	en_k	هدف کمینه‌سازی انتشار گازهای گلخانه‌ای The goal of minimizing greenhouse gas emissions	$min(CO2)_V_{ik}$
هزینه انرژی برای پمپاژ آب‌های سطحی (ریال) Energy cost for pumping surface water (IRR)	ECW_V	هدف کمینه‌سازی مصرف آب The goal of minimizing water consumption	$min\ water_V_{ik}$
نیاز آبی محصول‌های منطقه (متر مکعب / هکتار) Surface irrigation quota of crop k in subarea i (m ³ /ha)	IQ_{ik}^{sur}	هدف کمینه‌سازی مصرف انرژی The goal of minimizing Energy consumption	$Min: Ene_V_{ik}$
هزینه برق (ریال / کیلووات ساعت) Energy cost (kWh/IRR)	EC	هدف بیشینه‌سازی تولید کالری از مواد غذایی The goal of maximize calorie production from food	$maxCal_V_{ik}$
ضریب انتشار کربن در استفاده از کودها (کیلوگرم CO ₂ / کیلوگرم) Carbon emission factor for fertilizer (kgCO ₂ /kg)	CEF	هدف بیشینه‌سازی سود ناخالص کشاورزان The goal is to maximize the gross profit of farmers	$maxProfit_V_{ik}$

ادامه جدول (۲) فهرست نمادهای مورد استفاده در مدل برای تعریف مجموعه‌ها، متغیرها و فراسنجه

Table (2) List of symbols used in the model to define sets, variables and parameters

شرح Description	اندیس Index	شرح Description	اندیس Index
ضریب انتشار کربن در استفاده از سوخت دیزل (کیلوگرم CO ₂ /کیلوگرم) Carbon emission factor for diesel of agricultural machinery (kgCO ₂ /kg)	<i>CED</i>	هزینه آب آبیاری برای تولید محصول‌های زراعی (میلیون ریال) Cost of irrigation water for crop production (million IRR)	<i>WCF_v</i>
ضریب انتشار کربن در استفاده از رول‌های نایلونی کشاورزی (کیلوگرم CO ₂ /کیلوگرم) Carbon emission factor for agricultural film (kgCO ₂ /kg)	<i>CEAF</i>	سطح زیرکشت تخصیص یافته برای تولید محصول‌های زراعی (هکتار) The area under cultivation allocated for the production of crops (ha)	<i>A_V_{ik}</i>
آلودگی محیط‌زیست آب (کیلو-گرم) Water environmental pollution (kg)	<i>WEP_v</i>	ضریب انتشار کربن در استفاده از سم‌های شیمیایی (کیلوگرم CO ₂ /کیلوگرم) Carbon emission factor for pesticide (kgCO ₂ /kg)	<i>CEP</i>
ضریب انتشار کربن برای آبیاری (کیلوگرم CO ₂ /هکتار) Carbon emission factor for irrigation (kgCO ₂ /ha)	<i>CEI</i>	حجم رواناب (میلیون متر مکعب) Runoff volume (million m ³)	<i>Q</i>
نرخ انحراف آب از رودخانه The ratio of water diversion from rivers	<i>r</i>	ضریب بهره‌برداری از آب‌های سطحی Surface water utilization coefficient	<i>η</i>
کل برق مصرفی برای پمپاژ آب (کیلو وات. ساعت) The amount of energy allocated to water resources in each area (kWh)	<i>EWA</i>	مقدار برق تخصیص داده شده به آب‌های سطحی برای محصول‌های زراعی هر منطقه (کیلو وات. ساعت) Energy availability for water for subarea <i>i</i> (kW·h)	<i>EW_v(i)</i>
ضریب انتشار کربن در استفاده از شخم کیلوگرم CO ₂ / هکتار Carbon emission factor for plough (kgCO ₂ /ha)	<i>CEPL</i>	میزان آب در دسترس برای هر منطقه (میلیون متر مکعب) Surface water availability for subarea <i>i</i> (million m ³)	<i>SWA_v(i)</i>
ضریب شدت آلودگی برای <i>COD_{cr}</i> (کیلوگرم / هکتار) Pollution emission intensity for <i>COD_{cr}</i> (kg/ha)	<i>PEI^{COD_{cr}}</i>	بار (هد) پمپ برای آبیاری سطحی (متر) Hydraulic head related to surface water (m)	<i>HI^{sur}</i>

ارزیابی ارائه یک مدل پیشنهادی... ۱۱

ادامه جدول (۲) فهرست نمادهای مورد استفاده در مدل برای تعریف مجموعه‌ها، متغیرها و فراسنجه

Table (2) List of symbols used in the model to define sets, variables and parameters

شرح Description	اندیس Index	شرح Description	اندیس Index
شدت انتشار آلودگی برای کل فسفر (کیلوگرم / هکتار) Pollution emission intensity for total phosphorus (kg/ha)	PEI^{TP}	ضریب شدت آلودگی برای $NH_3 - N$ (کیلوگرم / هکتار) Pollution emission intensity for $NH_3 - N$ (kg/ha)	PEI^{NH_3-N}
میزان کارکرد ماشین‌ها و ادوات کشاورزی برای تولید محصول-های (ساعت) The rate of operation of agricultural machinery to produce products (hours) حد پایین در دسترس بودن زمین برای محصول k در زیرمنطقه i (هکتار) The lower limit of land availability for crop k in subarea i (ha)	$mashin_{ik}$	شدت انتشار آلودگی برای کل نیتروژن (کیلوگرم / هکتار) Pollution emission intensity for total nitrogen (kg/ha)	PEI^{TN}
شستشوی فسفر برای هر منطقه (کیلوگرم / هکتار) Phosphorus leaching in subarea i (kg/ha)	LP_{i_p}	قیمت آب سطحی برای هر منطقه (ریال / متر مکعب) Surface water price (IRR /m3)	$WP_i^{wat(su)}$
شستشوی نیتروژن برای هر منطقه (کیلوگرم / هکتار) Nitrogen leaching in subarea i (kg/ha)	LN_{i_p}	ضریب انتشار آلودگی برای کل نیتروژن (کیلوگرم / هکتار) Superscript for total nitrogen (kg/ha)	TN
مقدار کاربرد کودهای شیمیایی به ازای هر واحد برای محصول‌های زراعی k در هر منطقه i (کیلوگرم / هکتار) Amount of chemical fertilizer used per unit of crops k in subarea i (kg/ha)	F_{ik}	ضریب کارایی آب سطحی Efficiency for surface water abstraction	μ^{sur}

ادامه جدول (۲) فهرست نمادهای مورد استفاده در مدل برای تعریف مجموعه‌ها، متغیرها و فراسنجه

Table (2) List of symbols used in the model to define sets, variables and parameters

شرح Description	اندیس Index	شرح Description	اندیس Index
مقدار کاربرد سم‌های دفع آفات به ازای هر واحد محصول‌های زراعی k در منطقه i (کیلوگرم / هکتار) The amount of pesticides used per unit of crops k in subarea i (kg/ha)	P_{ik}	حد بالا در دسترس بودن زمین برای محصول k در زیرمنطقه i (هکتار) The upper limit of land availability for crop k in subarea i (ha)	$A_{P_{ik}}^{max}$
مقدار کاربرد رول‌های نایلونی کشاورزی در هر منطقه (کیلوگرم / هکتار) Agricultural film utilization in subarea i (kg/ha)	Af_{P_i}	هزینه انرژی برای تولید محصول - های زراعی (میلیون ریال / هکتار) Energy cost for food (million IRR/ha)	ECF_V
انرژی کارگر در هکتار (مگاژول بر هکتار) Labor energy per hectare (MJ/hectare)	E_l	بازده استفاده از آب سطحی برای زمین‌های کشاورزی Surface water use efficiency for agricultural land	etasur_pf
مقدار کاربرد سوخت دیزل به ازای هر واحد محصول‌های زراعی k در منطقه i (کیلوگرم / هکتار) Amount of diesel fuel used per unit of crops k in subarea i (kg/ha)	AM_{ik}	میزان آلودگی فضا (کیلوگرم) Atmosphere effect (kg)	AE_v
انرژی سم مصرفی در هکتار بر حسب (مگاژول بر هکتار) Poison energy consumed per hectare in terms of (megajoules per hectare)	E_p	هزینه های به کار رفته در تولید محصول‌های (میلیون ریال بر هکتار) Costs used in the production of products (million IRR/ha)	$cost_{P_{kij}}$
هم ارز انرژی کود نیتروژن (کیلوگرم / هکتار) The energy equivalent of Nitrogen fertilizer (kg/ha)	eqf_N	هم ارز انرژی نیروی کار (نفر روز ساعت) The energy equivalent of labor (person day hour)	$eqlabor$
هم ارز انرژی کود فسفر (کیلوگرم / هکتار) The energy equivalent of phosphorus fertilizer (kg/ha)	eqf_{P205}	هم ارز انرژی دیزل (لیتر / هکتار) The energy equivalent of diesel (Liter /ha)	$eqdizel$

ارزیابی ارائه یک مدل پیشنهادی... ۱۳

ادامه جدول (۲) فهرست نمادهای مورد استفاده در مدل برای تعریف مجموعه‌ها، متغیرها و فراسنجه

Table (2) List of symbols used in the model to define sets, variables and parameters

شرح Description	اندیس Index	شرح Description	اندیس Index
هم ارز انرژی کود پتاس (کیلوگرم/هکتار) The energy equivalent of potassium fertilizer (kg)	eqf_{k20}	هم ارز انرژی ماشین‌ها و واردات (ساعت) The energy equivalent of machinery (hour)	$eqmach$
هم ارز انرژی آب آبیاری (متر مکعب/هکتار) The energy equivalent of irrigation (m ³ /ha)	$eqwat$	هم ارز انرژی سم‌های شیمیایی (کیلوگرم/هکتار) The energy equivalent of chemical pesticides (kg/ha)	$eqpoi$
میزان کود نیتروژن استفاده شده برای محصول‌های زراعی (کیلوگرم/هکتار) The amount of nitrogen fertilizer used for crops (kg/ha)	$fertilaz_N_ik$	میزان بذر استفاده شده برای محصول‌های زراعی (کیلوگرم/هکتار) The amount of seed used for crops (kg/ha)	$Seed_ik$
میزان کود پتاس استفاده شده برای محصول‌های زراعی (کیلوگرم/هکتار) The amount of potash fertilizer used for crops (kg/ha)	$fert_{k20_ik}$	میزان کود فسفر استفاده شده برای محصول‌های زراعی (کیلوگرم/هکتار) The amount of phosphorus fertilizer used for crops (kg/ha)	$fert_{p205_ik}$

منبع: یافته‌های پژوهش. (P: نماد فراسنجه و V: نماد متغیر است).

Source: Research Findings. (P: parameter symbol and V: variable symbol).

با توجه به اینکه در رویکرد همبست آب- غذا- انرژی ابعاد مختلف اقتصادی، اجتماعی و محیط زیستی بررسی می‌شود، بنابراین مدل‌سازی این پژوهش با توجه به سه سامانه آب- غذا- انرژی و جنبه‌های مختلف آن، هدف‌های متفاوتی را نیز شامل می‌شود. به‌علت انعطاف در مدل استفاده شده به‌راحتی می‌توان هدف‌های متفاوت را از جنبه‌های مختلف بررسی کرد. لذا در این پژوهش 5 هدف شامل: پیشینه‌سازی سود ناخالص و پیشینه‌سازی تولید کالری در محصول‌های اساسی و راهبردی منطقه و هدف‌های کمینه‌سازی شامل: انتشار گازهای گلخانه‌ای، میزان مصرف آب آبیاری و میزان مصرف انرژی نهاده‌ها انرژی دنبال شده و شکل جبری این هدف‌ها در معادله‌های زیر بیان شده است. هدف اول پیشینه‌سازی سود ناخالص سامانه بوده که این هدف شامل مجموع درآمدهایی است که از تولید محصول‌های کشاورزی بعد از کسر مجموع هزینه‌ها شامل هزینه‌های آب و انرژی برای تولید مواد غذایی و هزینه آب برای محصول‌ها به دست می‌آید.

هدف دوم بهبود میزان کالری محصول‌های راهبردی در کشاورزی بوده که با توجه به شرایط منطقه برای حفظ امنیت غذایی و محیط‌زیست باید محصول‌های که از نظر راهبردی دارای میزان کالری بیشتر و ارزش غذایی بالاتری هستند جایگزین شوند. هدف سوم کاهش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای CO₂ بوده که به منظور حفاظت از محیط‌زیست و توسعه پایدار کشاورزی، کاهش میزان آلاینده‌های محیط‌زیستی در بخش کشاورزی الزامی است. در طول رشد محصول‌ها، گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های آب تولید می‌شود که بر جو و محیط آب تأثیر می‌گذارد، بنابراین، هدف از گذاری‌های منفی محیط‌زیستی به کمینه رساندن انتشار CO₂ و آلودگی محیط‌زیست آب است. هدف چهارم کاهش میزان آب‌آبیاری برای محصول‌های کشاورزی منطقه مدنظر بوده که با توجه به شرایط منطقه و خشکسالی‌های سال‌های اخیر و نبود آب‌های زیرزمینی، این هدف به دنبال کاهش در میزان هدر رفت و تلفات آب‌آبیاری و دست‌کم استفاده از آب‌های سطحی می‌باشد. برای به‌دست آوردن این هدف مجموع آب‌های سطحی را بر ضریب بهره‌برداری از آب‌های سطحی تقسیم می‌کنیم. هدف پنجم کاهش میزان مصرف انرژی کل نهاده‌ها شامل انرژی (ماشین‌ها و ادوات، دیزل، کودها، سم‌ها و غیره) در بخش کشاورزی منطقه مورد نظر بوده تا تولید محصولات کشاورزی محقق شود. روش محاسبه این هدف توضیح داده شده است.

$$obj Profit_V = \max(R_V - C_V) \quad (1)$$

$$R_V = \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K Price_{P_{ik}} \cdot Yield_{P_{ik}} * A_{V_{ik}} \quad (2)$$

$$C_V = ECW_V + ECF_V + WCF_v \quad (3)$$

$$ECW_V = EC \cdot \left[\frac{HI^{sur}}{102 * 3.6 * \mu^{sur}} \left(\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K IQ_{ik}^{sur} * A_{V_{ik}} \right) \right] \quad (4)$$

$$ECF_V = \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K A_{V_{ik}} * \sum_{j=1}^J (cost_{P_{kij}}) \quad (5)$$

$$WCF_v = \sum_{i=1}^I WP_i^{wat(su)} \left(\sum_{k=1}^K Q_{ik}^{wat(su)} * A_{V_{ik}} \right) \quad (6)$$

$$Max: Obj Coleri_V = \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K (en_k * Yield_{P_{ik}} * A_{V_{ik}}) \quad (7)$$

$$Min: Obj CO2_V = \min\{AE_v + WEP_v\} \quad (8)$$

ارزیابی ارائه یک مدل پیشنهادی... ۱۵

انتشار CO₂ به طور عمده با کاربرد آفت کش ها، کودها و ماشین های کشاورزی، فیلم های کشاورزی و شخم بوسیله گاوآهن ناشی می شود. بنابراین، AE را می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$AE_v = \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K [(CEF \cdot F_{ik_i} + CEP \cdot P_{ik} + CED \cdot AM_{ik} + CEAF \cdot AF_i) * A_{V_{ik}} + (CEPL + CEI) \cdot A_{V_{ik}}] \quad (9)$$

آلودگی محیط آب کاهش غلظت آلاینده در زهکشی سطحی (به طور عمده شامل COD_{cr}، NH₃-N و TP) را در نظر می گیرد. افزون بر این، شستشوی نیتروژن و فسفر نیز در نظر گرفته شده است. بنابراین، WEP را می توان بیان کرد

$$WEP_v = \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K [(PEI^{COD_{cr}} + PEI^{NH_3-N} + PEI^{TP} + PEI^{TN}) * A_{V_{ik}} + (LN_{i-p} + LP_{i-p}) * A_{V_{ik}}] \quad (10)$$

$$obj Water_V = \min\{W\} \quad (11)$$

$$W = \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K [(IQ_{ik}^{wat(su)} * A_{V_{ik}}) / \eta] \quad (12)$$

داده های مصرف انرژی در تولید محصول های مختلف را می توان از طریق معادل انرژی ورودی های تولید مصرف محاسبه کرد. انرژی در کشاورزی می تواند به انرژی مستقیم و نامستقیم و انرژی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر تقسیم بندی شود. انرژی مستقیم شامل انرژی های نیروی کار، سوخت و آب، انرژی نامستقیم شامل انرژی های بذر، کودهای شیمیایی، کود دامی، سم های و ماشین ها و ادوات کشاورزی می باشد. در این پژوهش برای محاسبه انرژی در تولید محصول های کشاورزی منطقه از نهاده های نیروی کار، ماشین ها و ادوات کشاورزی، دیزل، کود، سم های شیمیایی و بذر استفاده شده است. برای محاسبه مقدار انرژی مصرفی در انجام عملیات مختلف یا محتوای انرژی موجود در نهاده ها از هم ارزها و فرمول های استخراج شده از منبع های مختلف استفاده شده است، که به اختصار به چند مورد از آنها اشاره شود و در نهایت یک تابع هدف برای مجموع انرژی نهاده ها در تولید محصول های کشاورزی در نظر گرفته می شود.

محاسبه انرژی نیروی کار:

برای محاسبه انرژی نیروی انسانی در آغاز شمار کارگر مورد نیاز برای هر عملیات مشخص می‌شود، آنگاه زمان انجام عملیات توسط هر کارگر تعیین می‌شود و پس از آن از طریق جدول (۷) هم ارز انرژی نیروی کار را در شمار نفرها ضرب کرده و انرژی مصرفی بر حسب ساعت حساب می‌شود، سپس با محاسبه شمار ساعت‌های کاری هر نفر در نهایت انرژی مصرفی برای نیروی کار به صورت ذیل محاسبه می‌شود (Jadidi et al, 2011).

$$E_l = labor_{ik} * eqlabor \quad (13)$$

که در آن:

E_l : انرژی کارگر در هکتار بر حسب (مگاژول بر هکتار)

$labor_{ik}$: شمار کارگر در هکتار

$eqlabor$: انرژی موجود به ازای هر کارگر (هم ارز انرژی نیروی کار)

انرژی سم‌های شیمیایی: میزان انرژی مصرفی برای سم‌های شیمیایی از رابطه زیر بدست می‌آید

$$E_p = P_{ik} * eqpoi \quad (14)$$

که در آن:

E_p : انرژی سم‌های مصرفی در هکتار بر حسب (مگاژول بر هکتار)

P_{ik} : مقدار مصرف سم‌ها در هکتار (کیلوگرم بر هکتار)

$eqpoi$: انرژی موجود در هر واحد سم (هم ارز انرژی سم)

انرژی بذر: میزان انرژی بذر از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$E_s = Seed_{ik} * eqseed \quad (15)$$

E_s : انرژی بذر در هکتار بر حسب (مگاژول بر هکتار)

$Seed_{ik}$: میزان بذر مصرفی در هکتار (کیلوگرم بر هکتار)

$eqseed$: انرژی موجود در هر کیلو بذر (هم ارز انرژی بذر)

با توجه به توضیح‌های گفته شده انرژی کل نهاده‌ها در تولید محصول‌های کشاورزی به صورت رابطه زیر می‌باشد:

$$Obj Energy_V = \min\{E\} \quad (16)$$

ارزیابی ارائه یک مدل پیشنهادی... ۱۷

$$E = \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \left[(eqlabor * labor_{ik} + eqmach * mashin_{ik} + eqdizel * AM_{ik} + eqf_N * fertilaz_N_{ik} + eqf_{P205} * fert_{P205-ik} + eqf_{K20} * fert_{K20-ik} + eqpoi * P_{ik} + eqwat * IQ_{ik}^{wat(su)} + eqseed * Seed_{ik}) * A_{Vik} \right] \quad (17)$$

تابع هدفها مشروط به محدودیت‌هایی است که در ادامه بیان خواهد شد. در هر منطقه آب‌های سطحی اختصاص یافته برای همه‌ی محصول‌های زراعی نباید از بیشترین مقدار منابع آب سطحی مربوط به پروژه‌های مختلف تأمین آب مانند پروژه انتقال آب، پروژه ذخیره آب و پروژه برداشت آب بزرگ‌تر باشد (Li et al., 2019). این محدودیت به صورت رابطه زیر می‌باشد.

$$\sum_{k=1}^{k_1} (IQ_{ik}^{wat(su)} \cdot A_{Vik}) / etasur_{pf} \leq SWA_v(i) \quad (18)$$

$$\sum_{i=1}^I SWA_v(i) \leq (1 - r) * Q \quad (19)$$

در نظام‌های متداول کشاورزی آبی، انرژی به طور عمده برای برداشت آب‌های سطحی، پمپاژ و زهکشی آب‌های زیرزمینی استفاده می‌شود و برق مصرفی نباید بیشتر از مقدار مجاز برای هر زیرمنطقه و کل انرژی در دسترس باشد. (البته در منطقه مورد بررسی آب‌های زیرزمینی وجود ندارد و این پژوهش بر مبنای آب‌های سطحی در نظر گرفته شده است این محدودیت را می‌توان به صورت زیر بیان کرد: (Li et al., 2019).

$$\left[\frac{HI^{sur}}{\mu^{sur}} * \sum_{k=1}^{k_1} (IQ_{ik}^{wat(su)} \cdot A_{Vik}) \right] \leq EW_i \quad \forall_i \quad (20)$$

$$EW_v(i) \leq EWA \quad (21)$$

میزان بیشینه و کمینه زمین قابل کشت برای همه محصول‌های به صورت رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$A_{P_{ik}}^{min} \leq A_{Vik} \leq A_{P_{ik}}^{max} \quad \forall_i, k \quad (22)$$

در نهایت مجموعه غیر منفی متغیرهای مدل به صورت رابطه زیر می باشد.

$$\begin{aligned} SwA_{V_{ik}} &\geq 0 & \forall i, k \\ A_{V_{ik}} &\geq 0 & \forall i, k \\ Ew_{V_{ik}} &\geq 0 & \forall i, k \\ Calory_{V_{ik}} &\geq 0 & \forall i, k \\ Profit_{V_{ik}} &\geq 0 & \forall i, k \end{aligned} \quad (23)$$

معیارهای بهره وری فیزیکی آب و انرژی (Wp و Ep) برای محصول‌های مختلف (c) از نسبت عملکرد محصول (Y) به مقدار مصرف آب و انرژی (E و W) آن محصول در واحد سطح به دست می آید (Mirzaei et al., 2023).

$$Wp_c = \frac{Y_c}{W_c} \quad (24)$$

$$Ep_c = \frac{Y_c}{E_c} \quad (25)$$

معیارهای بهره وری اقتصادی آب و انرژی (Wep و Eep) نیز از نسبت حاشیه ناخالص (GM) محصول به مصرف آب و انرژی آن محصول در واحد سطح به دست آمد.

$$Wep_c = \frac{GM_c}{W_c} \quad (26)$$

$$Eep_c = \frac{GM_c}{E_c} \quad (27)$$

نتایج و بحث

در جدول ۳ فهرست داده‌های اولیه برای اجرای پژوهش ارائه شده است. بنا بر نتایج به دست آمده از جدول یاد شده، عمده محصول‌های زراعی بررسی شده در این مطالعه شامل: گندم، جو، یونجه پیاز، خربزه، و هندوانه می باشد. عملکرد محصول‌های زراعی نشان داد که خربزه و هندوانه با ۱۹ تن بیشترین و جو با ۲/۶ تن کمترین میزان عملکرد را به خود اختصاص داده است. در بین محصول‌های مورد بررسی، محصول جو کمترین میزان مصرف سم‌ها (علف‌کش، حشره-کش و قارچ‌کش) را داراست. از نظر میزان کالری در هکتار محصول جو با ۳۸۹۰ کیلو در هکتار بیشترین و محصول هندوانه با ۲۰۰ کیلو در هکتار کمترین میزان کالری را دارا می باشند. به لحاظ هزینه-های مصرفی نهاده‌ها (کود، سم، ماشین‌ها و ادوات کشاورزی، نیروی کار و زمین) گندم و جو کمترین میزان هزینه نسبت به دیگر محصول‌های را داشته‌اند. برابر جدول محصول یونجه با ۱۲۱۰۰ متر مکعب در هکتار بیشترین نیاز آبی و محصول جو و گندم به ترتیب ۳۲۴۰ و ۳۵۲۰ متر مکعب در هکتار کمترین مقدار نیاز آبی را دارا می باشند. فهرست برخی متغیرهای پیشنهادی مهم در رویکرد همبست آب-انرژی-غذا در جدول ۴ ارائه شده است.

ارزیابی ارائه یک مدل پیشنهادی... ۱۹

جدول (۳) فهرست داده‌های اولیه محصولات زراعی

Table(3) List of basic crop data

میزان مصرف	انرژی نهاده‌ها (مگاژول بر هکتار) The amount of energy consumption of inputs (MJ/ha)	تولید کالری محصول- ها(کیلو) Calories (Kilo)	سم‌های شیمیایی (کیلوگرمبر هکتار) Pesticide (t/ha)	عملکرد (تن بر هکتار) Yield (t/ha)	نیاز ناخالص آبی (متر مکعب بر هکتار) Gross water requirement (MCM/ha)	سطح زیر کشت (هکتار) Cultivation area (ha)	محصول‌ها Crops
23	74206.84	3500	0.0015	3.25	3520	25800	گندم Wheat
21	108426.24	3890	0.0012	2.6	3240	1920	جو Barley
29	126905.4	230	0.002	5.6	12100	1001.9	یونجه Alfalfa
37	125932.12	400	0.0022	15	7460	190.5	پیاز Onion
28	129644.46	350	0.0015	19	8000	4469.2	خربزه Melon
31	131296	200	0.0015	19	8200	2353.8	هندوانه Watermelon

منبع: سازمان جهاد کشاورزی استان سیستان و بلوچستان، ۱۳۹۸-۱۳۹۷.

Source: Agricultural Organization of Sistan and Baluchistan Province (2018-2019)

جدول (۴) متغیرهای پیشنهادی مهم در رویکرد پیوند آب-انرژی-غذا

Table (4) Important proposed variables in the water-energy-food nexus approach

هامون Hamun	هیرمند Hirmand	زهک Zahak	زابل Zabol	متغیرها Variable
11999.8	10222.3	13513.3	9641.6	جاری Current سطح زیر کشت تخصیص یافته به
10628.16	8544.113	13274.04	9080.978	بهینه Optimal (MOP) محصول‌های هر منطقه (هکتار) Cultivation area allocated to crops
-11.43	-16.41	-1.770	-5.814	درصد تغییرها Percentage change in each region (ha)

ادامه جدول (۴) متغیرهای پیشنهادی مهم در رویکرد پیوند آب-انرژی-غذا

Table (4) Important proposed variables in the water-energy-food nexus approach

هامون Hamun	هیرمند Hirmand	زهک Zahak	زابل Zabol	متغیرها Variable
0.00369	0.00318	0.00418	0.00296	جاری Current میزان انتشار گازهای گلخانه ای CO ₂
0.00366	0.00317	0.00416	0.00295	بهینه Optimal (MOP) درصد تغییرها Percentage change (میلیون تن) Emission of greenhouse gase (million tons)
-0.50	-0.37	-0.22	-0.180	
118.78	89.31	155.09	93.98	جاری Current میزان تولید کالری از مواد غذایی (میلیون کالری بر هکتار)
150.66	103.38	206.31	104.84	بهینه Optimal (MOP) درصد تغییرها Percentage change Calories production from food (million calories per hectare)
26.84	15.75	33.03	11.55	
665991.4	639214.4	791358.8	543901	جاری Current سود هر منطقه (میلیون ریال)
790972.9	608546	970656	542555.9	بهینه Optimal (MOP) درصد تغییرها Percentage change Profit in each region (million IRR)
18.76	-4.797	22.656	-0.247	
61.4347	72.72838	72.70691	54.75099	جاری Current میزان آب تخصیص یافته به هر منطقه (میلیون متر مکعب)
67.30763	61.51362	84.70933	46.94681	بهینه Optimal (MOP) درصد تغییرها Percentage change Water allocation to each region (million m ³)
12.81	-15.42	16.50794	-14.25	

ارزیابی ارائه یک مدل پیشنهادی... ۲۱

ادامه جدول (۴) متغیرهای پیشنهادی مهم در رویکرد پیوند آب-انرژی-غذا

Table (4) Important proposed variables in the water-energy-food nexus approach

هامون Hamun	هیرمند Hirmand	زهک Zahak	زابل Zabol	متغیرها Variable
368.539	318.365	417.579	295.832	جاری Current انرژی تخصیص یافته به هر منطقه (میلیون مگاژول بر هکتار)
367.684	317.175	416.648	295.298	بهینه Optimal (MOP) Energy consumption for crops in each region (million MJ/ha)
-0.232	-0.374	-0.223	-0.181	درصد تغییرها Percentage change)
0.001386	0.001197	0.001563	0.001118	جاری Current میزان کاربرد کود نیترژن برای هر منطقه (میلیون تن بر هکتار)
0.001686	0.001225	0.001979	0.00113	بهینه Optimal (MOP) Nitrogen fertilizer application in each region (million t/ha)
21.65	2.39	26.63	1.048	درصد تغییرها Percentage change
0.000764	0.000654	0.000862	0.000615	جاری Current میزان کاربرد کود فسفر برای هر منطقه (میلیون تن بر هکتار)
0.000931	0.000672	0.001095	0.000624	بهینه Optimal (MOP) Phosphorus fertilizer application in each region (million t/ha)
21.85011	2.796229	27.0374	1.506	درصد تغییرها Percentage change
0.000764	0.000654	0.000862	0.000615	جاری Current میزان کاربرد کود پتاس برای هر منطقه (میلیون تن بر هکتار)
0.000931	0.000672	0.001095	0.000624	بهینه Optimal (MOP) Potassium fertilizer application in each region (million t/ha)
21.850	2.796	27.037	1.506	درصد تغییرها Percentage change

ادامه جدول (۴) متغیرهای پیشنهادی مهم در رویکرد پیوند آب-انرژی-غذا

Table (4) Important proposed variables in the water-energy-food nexus approach

هامون Hamun	هیرمند Hirmand	زهک Zahak	زابل Zabol	متغیرها Variable
0.05925	0.100084	0.075569	0.05847	جاری Current تولید کل هر منطقه (میلیون تن) Total production in each region (million t/ha)
0.058598	0.075964	0.073145	0.040759	بهینه Optimal (MOP) درصد تغییرها Percentage change
-1.09	-24.10	-3.207	-30.29	
1029943	1312414	1446598	1004600	جاری Current هزینه های تولید (میلیون ریال) Production costs (million IRR)
1147033	1155183	1697532	867196.9	بهینه Optimal (MOP) درصد تغییرها Percentage change
11.36	-11.98	17.34	-13.6	

Source: Research findings

منبع یافته های تحقیق.

سطح زیرکشت کل محصول های کشاورزی در دشت سیستان به میزان ۸/۴ درصد کاهش یافته است همسو با نتایج این تحقیق در بررسی های (Xu et al., 2022; Hang et al., 2016) نیز سطح زیر کشت روند کاهشی داشته است. نتاج به دست آمده از این پژوهش در مدل پیشنهادی نشان داد که میزان آب تخصیص داده شده برای محصول های کشاورزی در دشت سیستان به میزان ۰/۴۳ درصد کاهش پیدا کرده است. بررسی های گوناگونی نیز این کاهش میزان مصرف را در مدیریت منابع آب آبیاری گزارش داده اند بررسی های (Tian et al., 2018; Yu et al., 2020). علیرغم کاهش سطح زیر کشت و کاهش میزان تولید محصول های کشاورزی در دشت سیستان، با اجرای مدل پیشنهادی درآمد کشاورزان از مقدار ۲۶۴۰۴۶۶ میلیون ریال به ۲۹۱۲۷۳۱ میلیون ریال تغییر پیدا کرده است (افزایش ۱۰/۳ درصدی)، همسو با این نتیجه، بررسی های گوناگونی این پیامد را برای باز تخصیص منابع های تولید کشاورزی تجربه کرده اند، به عنوان مثال بررسی (Shirzadi Laskookalayeh et al., 2021) گویای کاهش سطح زیر کشت محصولات به میزان ۲۷ درصد، کاهش آب آبیاری ۴/۹ درصد و افزایش سود ناخالص به میزان ۳۵ درصد را گزارش

ارزیابی ارائه یک مدل پیشنهادی... ۲۳

کرده است. نتایج به دست آمده از مدل پیشنهادی با افزایش تولید محصولات راهبردی مانند گندم و جو، افزون بر تامین امنیت غذایی، میزان کالری حاصل از مصرف مواد غذایی را تحت تاثیر قرار داده است (افزایش ۲۳/۶ درصدی). همچنین، میزان مصرف نهاده انرژی در بخش کشاورزی به میزان ۰/۲۵ درصد در منطقه مورد بررسی کاهش یافته است. همسو با این نتیجه در بررسی Cansino-Loeza et al., در سال (2022) میزان امنیت غذایی محصولات کشاورزی ۲۶ درصد افزایش داشته است و یا در بررسی Karamian et al., در سال (2023) میزان استفاده از نهاده‌های انرژی در بخش کشاورزی ۱۲/۷ درصد کاهش یافته است.

بهره‌وری اقتصادی و فیزیکی بعضی از متغیرهای مهم مورد استفاده در مدل همبست آب و انرژی و غذا در هر منطقه در حالت MOP در جدول‌های زیر ارائه شده است. برای به دست آوردن بهره‌وری اقتصادی، همانطور که در قسمت مواد و روش توضیح داده شد، سود ناخالص هر منطقه بر متغیر مدنظر در مدل تقسیم شد. برای مثال بهره‌وری اقتصادی آب در مدل از تقسیم سود ناخالص هر منطقه بر میزان آب مصرف شده در هر منطقه به دست آمد. بنابراین در بهره‌وری اقتصادی ارزش محصول تولید شده یا میزان سود مدنظر قرار می‌گیرد. به عبارتی، بهره‌بردار به ازای مقدار آبی که مصرف می‌کند، چقدر درآمد کسب می‌کند.

بهره‌وری فیزیکی مصرف آب عبارت است از مقدار محصول تولید شده به ازای واحد حجم آب مصرفی است که بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب بیان می‌شود.

درصد تغییرهای میزان بهره‌وری اقتصادی در محدوده مورد مطالعه دشت سیستان (شهرستان-های زابل، زهک، هیرمند و هامون) بر مبنای هدف‌های چندگانه رویکرد همبست آب-غذا-انرژی نیز در جدول ۵ ارائه شده است. اطلاعات جدول مبنی بر تغییرهای بهره‌وری اقتصادی متغیرهای مهم رویکرد مدل پیشنهادی WEFN در حالت چندهدفه نسبت به حالت جاری می‌باشد. بنابر نتایج جدول، میزان بهره‌وری اقتصادی انرژی نهاده‌ها شامل (انرژی نیروی کار، انرژی دیزل، انرژی ماشین‌ها و ادوات کشاورزی و...)، در شهرستان‌های زابل، زهک، هیرمند و هامون در حالت جاری به ترتیب، (۰/۱۱۵، ۰/۱۵۵، ۰/۱۲۸ و ۰/۱۱۹) میلیون ریال بر مگاژول بوده و در حالت چند هدفه (MOP) این مقادیر در شهرهای یاد شده به ترتیب (۰/۱۲۷، ۰/۱۸۵، ۰/۱۲۹ و ۰/۱۲۹) میلیون ریال بر مگاژول تغییر پیدا کرده است نتایج درصد بهره‌وری اقتصادی میزان مصرف انرژی نهاده‌ها در شهرستان‌ها نشان می‌دهد که این میزان در حالت چند هدفه نسبت به حالت جاری افزایش پیدا کرده است. بنابراین میزان مصرف انرژی نهاده‌ها در مجموع

دشت سیستان ۱۰/۲۵ درصد افزایش داشته است. برابر جدول میزان بهره‌وری اقتصادی برای آب آبیاری در شهرهای یاد شده در حالت جاری مقدار (۰/۰۴۸۲، ۰/۰۵۹۹، ۰/۰۵۳۰ و ۰/۰۵۳۸) میلیون ریال بر متر مکعب بوده و پس از اعمال رویکرد همبست آب و انرژی و غذا در حالت چند هدفه در شهرهای یاد شده به مقدار (۰/۰۵۲۰، ۰/۰۶۳۹، ۰/۰۶۰۰ و ۰/۰۵۳۸) میلیون ریال بر متر مکعب تغییر پیدا کرده است. نتایج نشان می‌دهد که بهره‌وری اقتصادی میزان مصرف آب-آبیاری در شهرستان‌های مذکور (۷/۹۸، ۱۶/۷، ۱۳/۲۱ و ۵/۹۱) درصد افزایش داشته است. علت این امر تغییر در الگوی کشت محصول‌های زراعی می‌باشد. با توجه به شرایط اقلیمی منطقه و خشکسالی‌های پی در پی برای بالارفتن (بازده) آبیاری رویکرد مدل به سمت محصول‌هایی مانند گندم و جو سوق داده شده است، در واقع این محصول‌های به میزان مصرف آب و انرژی کمتری نیاز دارند. با توجه به جدول درصد میزان تغییر در بهره‌وری اقتصادی در کالری محصول‌های راهبردی کشاورزی مورد بررسی قرار گرفت نتایج نشان می‌دهد که این میزان تغییر در شهرهای یاد شده به ترتیب (۴۶/۲۱، ۲۴/۵۴، ۸/۹۹ و ۰/۹۹) درصد بدست آمد. بنا بر نتایج بیشترین درصد تغییر در کالری محصول‌های اساسی در شهرستان زابل و کمترین درصد تغییر در شهرستان هامون بوده است. علت این امر به زیرکشت بردن محصول گندم و جو بدلیل حفظ امنیت غذایی می‌باشد. همچنین نتایج میزان بهره‌وری اقتصادی انتشار گازهای گلخانه‌ای CO₂ در شهرستان‌ها نشان می‌دهد که این میزان تغییر در شهرستان زهک نسبت به دیگر شهرها بیشتر بوده است. نتایج میزان انتشار CO₂ نشان داد که با توجه به اینکه برای توسعه کشاورزی (پیشرفته) و پایدار هر چه این میزان انتشار کاهش بیشتری داشته باشد، باعث پایداری در کشاورزی و کاهش در آلاینده‌های محیط‌زیستی می‌شود. بنابراین رویکرد مدل به سمت محصول‌هایی نظیر گندم و جو سوق داده شده است، علت این امر این است که کشاورزان کودها و سم‌های شیمیایی کمتری برای این محصول‌ها نسبت به دیگر محصول‌ها استفاده می‌کنند، در نهایت این رویه باعث کاهش در آلاینده‌های محیط‌زیستی به عنوان یک عامل توسعه پایدار کشاورزی می‌شود.

ارزیابی ارائه یک مدل پیشنهادی... ۲۵

جدول (۵) بهره وری اقتصادی برخی از متغیرهای مهم در رویکرد پیشنهادی WEFN

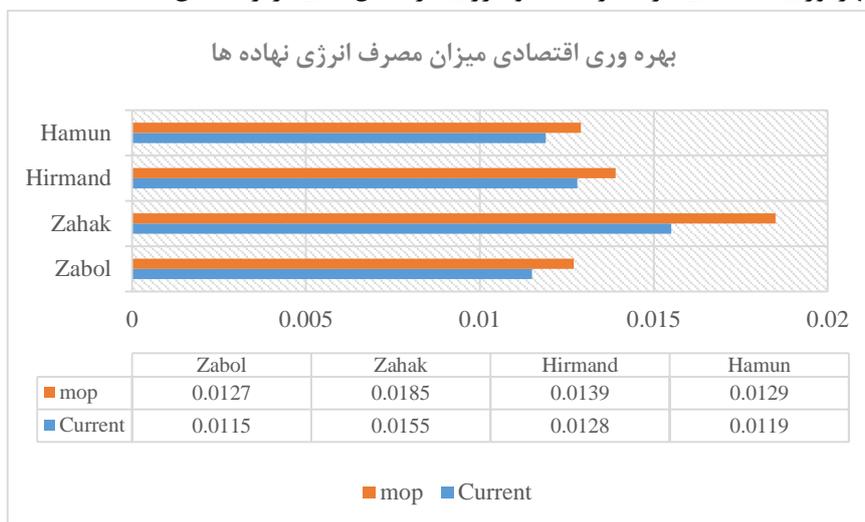
Table (5) Economic productivity of some important variables in the proposed approach of WEFN

مجموع Total	هامون Hamun	هیرمند Hirmand	زهک Zahak	زابل Zabol	حالت های مدل Model states	متغیرها Variable
0.0517	0.0119	0.0128	0.0155	0.0115	جاری Current	بهره وری اقتصادی مصرف انرژی
0.0570	0.0129	0.0139	0.0185	0.0127	چند هدفه Optimal	(میلیون ریال به ازای هر مگاژول) Economic efficiency of energy consumption (million rials per megajoule)
39.48	8.40	8.59	19.39	10.417	درصد تغییر Percentage change	
0.2118	0.0508	0.0530	0.0599	0.0482	جاری Current	بهره وری اقتصادی میزان مصرف آبیاری
0.2357	0.0538	0.0600	0.0639	0.0520	چند هدفه Optimal	(میلیون ریال بر متر مکعب) Economic efficiency of water irrigation (million IRR /m3)
43.80	5.91	13.21	16.70	7.88	درصد تغییر Percentage change	
0.4369	0.1009	0.1112	0.1222	0.1025	جاری Current	بهره وری اقتصادی میزان کالری محصول های
0.4999	0.1019	0.1212	0.1522	0.1245	چند هدفه Optimal	(میلیون ریال به ازای هر کیلوگرم کالری) Economic efficiency of caloric products (million Rials per kilo calorie)
55.98	0.99	8.99	24.54	21.46	درصد تغییر Percentage change	
0.756	0.179	0.182	0.208	0.188	جاری Current	بهره وری اقتصادی میزان انتشار گازهای گلخانه ای
0.877	0.189	0.192	0.288	0.209	چند هدفه Optimal	(میلیون ریال به ازای هر کیلوگرم CO ₂) Economic efficiency of greenhouse gases (million rials per kilogram of CO ₂)
60.88	5.58	5.50	38.55	11.24	درصد تغییر Percentage change	

Source: Research findings

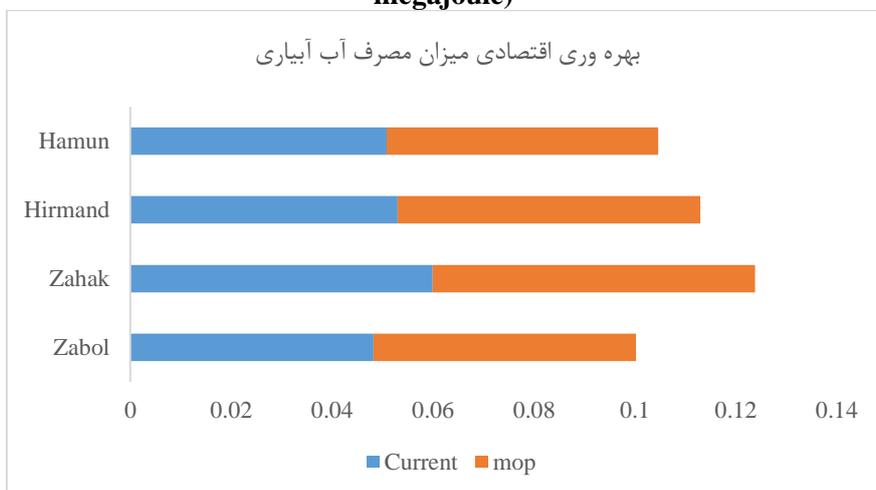
منبع: یافته‌های پژوهش

میزان بهره‌وری اقتصادی در مصرف آب و انرژی در شکل‌های زیر نمایش داده شده است:



شکل (۲) میزان بهره‌وری اقتصادی مصرف انرژی نهاده‌ها با اجرای رویکرد پیشنهادی WEFN (میلیون ریال به ازای هر مگاژول)

Figure (2) The amount of economic efficiency of energy consumption of inputs by implementing the proposed approach of WEFN (million rials per megajoule)



شکل (۳) میزان بهره‌وری اقتصادی مصرف آب آبیاری با اجرای رویکرد پیشنهادی WEFN (میلیون ریال بر متر مکعب)

Figure (3) The amount of economic efficiency of irrigation water consumption by implementing the proposed approach of WEFN (million IRR /m³)

ارزیابی ارائه یک مدل پیشنهادی... ۲۷

درصد بهره‌وری فیزیکی برخی از متغیرهای مهم در مدل پیشنهادی در جدول ۶ نشان داده شده است. بنا بر نتایج جدول درصد میزان تغییر در بهره‌وری فیزیکی در مصرف انرژی نهاده‌ها پس از رویکرد مدل (شرایط MOP) در شهرستان‌های زابل، زهک، هیرمند و هامون به ترتیب، (۱۰/۴۲، ۵/۵۳، ۱۷/۹۷ و ۱۸/۷۲) درصد به دست آمد، نتایج نشان داد که این میزان تغییر در شهرستان هامون نسبت به دیگر شهرها بیشتر بوده است. همچنین با توجه به جدول میزان تغییر در بهره‌وری فیزیکی مصرف آب آبیاری در شهرهای یادشده به ترتیب، (۱۲/۷۳، ۱۰/۵۲، ۱۲/۸۶ و ۱۱/۷۶) درصد به دست آمد نتایج نشان داد که شهرستان‌های هیرمند و زهک به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار تغییر را داشته‌اند.

جدول (۶) بهره‌وری فیزیکی برخی از متغیرهای مهم در رویکرد پیشنهادی WEFN

Table (6) Physical productivity is some of the important variables in the approach proposed by WEFN

مجموع Total	هامون Hamun	هیرمند Hirmand	زهک Zahak	زابل Zabol	حالت‌های مدل Model states	متغیرها Variable
675275.1	160285.7	161387.72	180805.92	172795.72	جاری Current	بهره‌وری فیزیکی
762275.1	190285.7	190387.7	190805.9	190795.7	چند هدفه Optimal	مصرف انرژی (میلیون کیلوگرم برمگاژول)
52.63	18.72	17.97	5.53	10.42	درصد تغییر Percentage change	Physical efficiency is the amount of energy (million kg / MJ)
188899.5	46999	46650	48100.5	47150	جاری Current	بهره‌وری فیزیکی
211487.5	52525	52650	53162.5	53150	چند هدفه Optimal	میزان مصرف آبیاری (کیلوگرم بر متر مکعب)
47.87	11.76	12.86	10.52	12.73	درصد تغییر Percentage change	Physical efficiency l of water irrigation (million kg / M ³)

ادامه جدول (۶) بهره وری فیزیکی برخی از متغیرهای مهم در رویکرد پیشنهادی WEFN
Table (6) Physical productivity is some of the important variables in the approach proposed by WEFN

مجموع Total	هامون Hamun	هیرمند Hirmand	زهک Zahak	زابل Zabol	حالت های مدل Model states	متغیرها Variable
156.89	37.36	39.78	42.52	37.227	جاری Current	بهره وری فیزیکی میزان کالری محصول های (میلیون کیلوگرم بر کالری)
174.89	40.36	43.78	46.52	44.23	چند هدفه Optimal	Physical efficiency l of caloric products (million kg /Calories)
46.30	8.03	10.05	9.41	18.80	درصد تغییر Percentage change	
48.35	11.61	12.41	13.60	10.73	جاری Current	بهره وری فیزیکی میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای (میلیون کیلوگرم بر کیلوگرم CO ₂)
52.35	12.61	13.41	14.60	11.73	چند هدفه Optimal	Physical efficiency l of greenhouse gases (million kg/kg CO ₂)
33.35	8.611	8.061	7.352	9.322	درصد تغییر Percentage change	

Source: Research findings

منبع: یافته‌های پژوهش

جدول (۷) معادل انرژی برای نهاده‌های ورودی در تولید محصول های کشاورزی
Table (7) Energy equivalent for inputs in the production of agricultural products

منبع	معادل انرژی (مگاژول به ازای هر واحد)	واحد	گزینه ها
(Yilmaz et al., 2005; Mohammadi et al., 2008)	1.96	ساعت	نیروی انسانی
(Erdal et al., 2005)	62.7	ساعت	ماشین‌ها و ادوات کشاورزی
(Mohammadi et al., 2008)	56.31	لیتر	سوخت دیزلی

ارزیابی ارائه یک مدل پیشنهادی... ۲۹

ادامه جدول (۷) معادل انرژی برای نهاده‌های ورودی در تولید محصول های کشاورزی

Table (7) Energy equivalent for inputs in the production of agricultural products

منبع	معادل انرژی (مگاژول به ازای هر واحد)	واحد	گزینه ها
(Mohammadi and Omid, 2010)	66.14	کیلوگرم	کود شیمیایی نیتروژن
(Mohammadi and Omid, 2010)	12.44	کیلوگرم	کود شیمیایی پتاس
(Mohammadi and Omid, 2010)	11.15	کیلوگرم	کود شیمیایی فسفر
(Gundogmus., 2006)	238	کیلوگرم	علف کش
(Gundogmus., 2006)	92	کیلوگرم	سم کش
(Gundogmus., 2006)	199	کیلوگرم	حشره کش
(Mohammadi et al., 2008)	1.02	متر مکعب	آب آبیاری
(Ghorbani et al, 2011)	20.1	کیلوگرم	بذر گندم
(Moranker et al., 2010)	14.7	کیلوگرم	بذر جو
(Moranker et al., 2010)	14.9	کیلوگرم	بذر یونجه
(Moranker et al, 2010)	14.1	کیلوگرم	بذر پیاز
(Ghorbani et al, 2011)	1.25	کیلوگرم	بذر خربزه
(Ghorbani et al, 2011)	1.04	کیلوگرم	بذر هندوانه
(Ghorbani et al, 2011)	3.6	کیلو وات ساعت	برق

با توجه به اینکه محصول های زراعی نقش تعیین کننده‌ای در امنیت غذایی جامعه های بشری به عهده دارند، بنابراین در آینده اراضی زراعی بیش از دیگر منابع محدود کننده تولید غذا در جهان خواهد بود در نتیجه افزایش بهره‌برداری از آن‌ها دارای اهمیت ویژه‌ای است (Tichenor et al., 2019). لذا بهینه‌سازی مدل برنامه‌ریزی ریاضی با در نظر گرفتن همبست آب-انرژی-غذا از یک سو باعث بهبود اقتصادی و از سوئی دیگر باعث بهینه‌سازی در کاهش هزینه‌ها و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای CO₂ می‌شود. بنابراین در محدوده مورد مطالعه لازم است برای بهره‌وری اقتصادی و فیزیکی و همچنین کاهش گذاری‌های محیط‌زیستی، سطح زیرکشت بیشتری به گندم و جو، اختصاص داده شود. نتایج بررسی های انجام شده (Ahani et al., 2023; West., 2019). در این پژوهش، الگوی جاری برای منطقه مورد بررسی نه تنها بهره‌وری اقتصادی آب را سرلوحه خود قرار داده، بلکه به میزان بهره‌وری اقتصادی (مصرف انرژی و تولید کالری در محصولات راهبردی و اساسی) در منطقه مورد مطالعه پرداخته است. بنابراین در این پژوهش اجرای رویکرد یکپارچه WEFN، باعث افزایش در میزان بهره‌وری اقتصادی آب، انرژی می‌شود. ثمره این

الگو، دستیابی به هدف های توسعه پایدار در بهره‌برداری بهینه از منبع های و عامل های تولید به صورت پیوسته و پایدار است. همسو با نتایج به دست آمده از این پژوهش میزان بهره‌وری اقتصادی بر مبنای مدل همبست آب-انرژی-غذا برای میزان مصرف آب و انرژی به ترتیب در دشت سیستان (۱۱/۳۷ و ۱۰/۲۵) درصد و میزان بهره‌وری فیزیکی برای مصرف آب و انرژی به ترتیب (۱۱/۹۵ و ۱۲/۸) درصد به دست آمد، در بررسی Mirzaei et al که در سال (2023) در ایران انجام گرفت، میزان بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب به مقدار ۲۰۰ و ۱۸ درصد و بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی انرژی به میزان ۱۵۶ و ۶۷ درصد نسبت به الگوی پایه افزایش داشته است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

توسعه اقتصادی پایدار در بخش کشاورزی بدون توجه به مصرف پایدار منابعی مانند آب و انرژی در این بخش محقق نخواهد شد. در این راستا الگوی تخصیص منابع بر مبنای WEFN می‌تواند دستیابی به توسعه اقتصادی پایدار در بخش کشاورزی را ممکن سازد. در عین حال، اجرای الگوی مبتنی بر WEFN می‌تواند با چالش‌های زیادی برای کشاورزان روبه‌رو باشد. بنابراین در این پژوهش تحلیل پیاده‌سازی الگوی مبتنی بر WEFN در بخش کشاورزی تجزیه و تحلیل شد. بدین منظور این الگو برای منطقه مورد مطالعه دشت سیستان شامل شهرستان های (زابل، زهک، هیرمند و هامون) اجرا گردید. هدف از پژوهش ارزیابی پیشنهاد یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه با رویکرد همبست آب-انرژی-غذا برای بهبود بهره‌وری اقتصادی و فیزیکی میزان مصرف آب و انرژی می‌باشد. نتایج مدل پیشنهادی WEFN نشان داد، که میزان بهره‌وری اقتصادی (آب‌آبیاری و انرژی) با کاهش در میزان مصرف آب آبیاری افزایش داشته است. بنابراین اجرای همبست آب-انرژی-غذا برای منطقه های گرم و خشک به‌ویژه برای منطقه سیستان که با معضل کمبود آب رو به رو می‌باشد، می‌تواند بهبود در بهره‌وری مصرف آب و انرژی را به همراه داشته باشد. بنابراین اگر مدیریت همه جانبه در بخش کشاورزی منطقه با این رویکرد انجام گیرد باعث بهبود بهره‌وری اقتصادی در میزان مصرف آب آبیاری به میزان ۱۱/۳۷ درصد و میزان مصرف انرژی نهاده‌های کشاورزی به مقدار ۱۰/۲۵ درصد شود. نتایج گویای عملکرد موفق همبست آب-انرژی-غذا برای حفظ امنیت غذایی و بهبود بهره‌وری در این منطقه می‌باشد. همچنین استفاده از الگوی مبتنی بر WEFN در بخش کشاورزی توسط کشاورزان مستلزم تشویق کشاورزان برای کاهش مصرف منابع آب از طریق گزینه‌های سیاست دولت است برای مثال سیاست اعطای تسهیلات با نرخ‌های سود متفاوت برای گسترش استفاده از فناوری‌های نوین

ارزیابی ارائه یک مدل پیشنهادی... ۳۱

آبیاری، می‌تواند در این منطقه سودمند واقع شود. با توجه به اقلیم و نوسان‌های منطقه و شرایط خاصی که با وجود کم‌آب شدن رودخانه هیرمند و همچنین مسئله‌های سیاسی که در زمینه مسئله آب حکمفرماست ضرورت دارد شرایط عدم‌حتمیت بررسی گردد. منتها (واسنجی) کردن مدل با این حجم گسترده از داده و معادله نیازمند صرف زمان و هزینه زیادی نیز می‌باشد. اضافه شدن یک مدل عدم‌حتمیت به روز و مناسب به مدل یاد شده به یقین باعث افزایش زمان مدلسازی و به روز شدن نتایج به دست آمده می‌شود. لذا این پژوهش با توجه به شرایطی که برای الگوی کشت مهیا بود از رویکرد همبست آب-انرژی-غذا با چندین محدودیت کاربردی در منطقه بررسی، تجزیه و تحلیل شد. انتظار می‌رود، در بررسی‌های آینده شرایط عدم‌حتمیت در مدل توسعه داده شده این پژوهش پرداخته شود. بنابراین به کمک رویکرد همبست WEFN می‌توان امنیت همه جانبه منابع آب-انرژی-غذا را که توأم با دسترسی پایدار و عادلانه به منابع است را ارتقا بخشید.

در نهایت با توجه به نتایج به دست آمده از مطالعه پیشنهادی‌های زیر ارائه شده است:

- با توجه به نتایج مدل برای بالا بردن بهره‌وری اقتصادی تعیین و انتخاب محصول‌های مورد کشت در هر منطقه می‌تواند به‌عنوان یک رویکرد پایدار در مدیریت مطرح شود. بنابراین ضرورت دارد اجرای همبست WEFN با توجه به نتایج مدل نخست اینکه منجر به بهبود بازده آبیاری شود، دوم اینکه حفاظت از محیط‌زیست نیز منجر به کاهش در آلاینده‌های محیط‌زیستی شود. این امر می‌تواند وضعیت مطلوبی را به لحاظ اقتصادی برای کشاورزان منطقه فراهم کند.

- برای بهره‌وری اقتصادی می‌بایستی از روش‌های نوین آبیاری و متناسب با منطقه سیستان و آبیاری محصول‌ها و افزایش بازده آبیاری استفاده شود و به منظور استفاده و گسترش روش‌های جدید آبیاری تمهیدها و تسهیلات لازم برای کشاورزان در نظر گرفته شود. البته باید به تناقض بازده آبیاری توجه شود بررسی‌های (Mardani and Ashktorab; 2022) در بیشتر مواردی که بازده آبیاری در عمل افزایش پیدا کرده است آب ذخیره شده مازاد به افزایش سطح زیرکشت منجر شده است، برای جلوگیری از این تناقض ضروری است اعطای تسهیلات بانکی برای روش‌های آبیاری نوین با تاکید بر کاهش مصرف آب بر حسب مقدار تولید محصول باشد.

- Abdollahpour, S. and Zaree, S., 2011. Evaluation of wheat energy balance under rainfed farming in Kermanshah. *Sustainable Agricultural Science*. 2, 97-106.
- Ahani, E., Ziaee, S., Mohammadi, H., Mardani Najafabadi, M., & Mirzaei, A. (2023). Presenting the Structure of a Multi-Objective Mathematical Programming Model with Water-Food-Energy Nexus Approach for Crop Production. *Journal Of Agricultural Economics and Development*, doi: 10.22067/jead.2022.77691.1147
- Baghbanian, m., Emamvardi, Gh., Gaderzade, H., Damankeshideh, M., Amin Rashti, N. 2020. Investigating virtual water and agricultural water productivity indicators in major crops, a case study: Saqzastan city, Kurdistan. *ranian Journal of Irrigation and Drainage*, p. 1046-1054.
- Bizikova, L., Roy, D., Swanson, D., Venema, H. D., and McCandless, M. (2013). *The water-energy-food security nexus: Towards a practical planning and decision-support framework for landscape investment and risk management*. Winnipeg: International Institute for Sustainable Development.
- Brauman, K.A., Siebert, S., Foley, J.A., 2013. Improvements in crop water productivity increase water sustainability and food security-a global analysis. *Environ. Res. Lett.* 8, 24–30.
- Buysse, J., Van Huylenbroeck, G., Lauwers, L., 2007. Normative, Positive and Econometric Mathematical Programming as Tools for Incorporation of Multifunctionality in Agricultural Policy Modelling. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 120: 70-81.
- Cansino-Loeza, B., Munguía-López, A. d. C., & Ponce-Ortega, J. M. (2022). A water-energy-food security nexus framework based on optimal resource allocation. *Environmental Science & Policy*, 133, 1-16.
- Chen, J.F., Yu, X.Y., Qiu, L., Deng, M.H., Dong, R., 2018. Study on vulnerability and coordination of water-energy-food system in Northwest China. *Sustainability* 10, 3712.
- Chen, Y., He, L., Guan, Y., Lu, H., and Li, J. (2017). Life cycle assessment of greenhouse gas emissions and water-energy optimization for shale gas supply chain planning based on multi-level approach: Case study in Barnett, Marcellus, Fayetteville, and Haynesville shales. *Energy Convers. Manag.* 134, 382–398.
- Esteve, P., Varela-Ortega, C., Blanco-Gutiérrez, I., Downing, T.E., 2015. A hydro-economic model for the assessment of climate change impacts and adaptation in irrigated agriculture. *Ecological Economics*, 120: 49-58.
- FAO (2011). Water is key to food security. Retrieved from; <http://www.fao.org/news/story/it/item/86991/icode/> (Accessed February 21, 2020).
- Ghafari Moghadam, Z., moradi, E., hashemi tabar, M., Sardar Shahraki, A. (2021). 'An Analysis of the Water Crisis under Different Scenarios in the Agriculture Sector of Sistan Region: The Approach of Future Studies', *Journal of Water Research in Agriculture*, 35(2), pp. 201-216.

ارزیابی ارائه یک مدل پیشنهادی...۳۳

- Ghorbani, R., F. Mondani, S. H. Amirmoradi, H. Feizi, S. Khorramdel, M. Teimouri, S. Sanjani, S. Anvarkhah, and H. Aghel. 2011. A case study of energy use and economical analysis of irrigated and dry-land wheat production systems. *Applied Energy*, 88:283–288.
- Gundogmus, E. 2006. Energy use on organic farming: A comparative analysis on organic versus conventional apricot production on small holdings in turkey. *Energy Conversion and Management*, 47:3351-3359.
- Hang, M. Y. L. P. and Martinez-Hernandez, E. and Leach, M. and Yang, A. (2016), "Designing integrated local production systems: a study on the food-energy-water nexus", *Journal of Cleaner Production*, No. 135, pp. 1065-1084.
- Hashemy, S.M., Firoozfar, A., Maestre, J.M., Mallakpour, I., Taghvaeian, S., Karimi, P., 2018. Operational performance improvements in irrigation canals to overcome groundwater overexploitation. *Agric. Water Manag.* 204, 234–246.
- Hassas, M.A.; Kalantari, Mohammadi-Ivatloo, B.; Safari, A. 2021. Sustainable Management of the Electrical-Energy–Water–Food Nexus Using Robust Optimization. *Sustainability*.
- Jadidi; M. R. , Homayounifar; M., Sabouhi Sabuni, M.; Kheradmand, V. 2011. "Determination of Energy Use Efficiency and Productivity in Tomato Production". *Journal of Agricultural Economics and Development*, 24, 3. doi: 10.22067/jead2.v1389i3.7734
- Jahad Organization of Sistan and Baluchistan Province, 2018.
- Jin, L., Chang, Y.H., Ju, X.W., Xu, F., 2019. A study on the sustainable development of water, energy, and food in China. *Environ. Res. Public Health* 16, 3688.
- Karabulut, A., Egoh, B. N., Lanzanova, D., Grizzetti, B., Bidoglio, G., Pagliero, L., et al. (2016). Mapping water provisioning services to support the ecosystem–water–food–energy nexus in the Danube River basin. *Ecosyst. Serv.* 17, 278–292.
- Karamian, F., Mirakzadeh, A. A., & Azari, A. (2023). Application of multi-objective genetic algorithm for optimal combination of resources to achieve sustainable agriculture based on the water-energy-food nexus framework. *Science of The Total Environment*, 860, 160419.
- Kumar, M.D., Sivamohan, M.V.K., Narayanamoorthy, A., 2012. The food security challenge of the food-land-water nexus in India. *Food Secur.* 4, 539–556.
- Li, M., Fu, Q., Singh, V. P., Ji, Y., Liu, D., Zhang, C., & Li, T. (2019) . An optimal modelling approach for managing agricultural water-Tenergy-food nexus under uncertainty. *Science of the Total Environment* 651(2019)1416-1434.
- Li, M., Fu, Q., Singh, V.P., Liu, D., Li, T.X., 2019. Stochastic multi-objective modeling for optimization of water-food-energy nexus of irrigated agriculture. *Adv. Water Resour.* 127, 209–224.
- Liu, C., Zhang, Z.Y., Liu, S.Y., Liu, Q.Y., Feng, B.P., Tanzer, J., 2019. Evaluating agricultural sustainability based on the water–energy–food nexus in the Chenmengquan irrigation district of China. *Sustainability*. 11, 5350.

- Liu, J., Mao, G., Hoekstra, A.Y., Wang, H., Wang, J., Zheng, C., van Vliet, M.T.H., Wu, M., Ruddell, B., Yan, J., 2018. Managing the energy-water-food nexus for sustainable development. *Appl. Energy* 210 (15), 377–381.
- Mardani Najafabadi MM, Ziaee S, Nikouei A and Borazjani, MA. 2019. Mathematical programming model (MMP) for optimization of regional cropping patterns decisions: A case study. *Agricultural Systems*, 173: 218-232.
- Mardani, M., & Ashktorab, N. (2022). Mathematical programming approaches for modeling a sustainable cropping pattern under uncertainty: a case study in Southern Iran. *Environment, Development and Sustainability*.
- Mirzaei, A., Ashktorab, N., and Noshad, M. (2023). Evaluation of the policy options to adopt a water-energy-food nexus pattern by farmers: Application of optimization and agent-based models. *Front. Environ. Sci.* 11:1139565. doi: 10.3389/fenvs.2023.1139565
- Mohammadi, A., A. Tabatabaeefar, S. H. Shahin, S. H. Rafiee, and A. Keyhani. 2008. Energy use and economical analysis of potato production in Iran a case study: Ardabil province. *Energy Conversion and Management*, 49:3566-3570
- Mohammadi, A., and Omid, M. 2010. Economical analysis and relation between energy inputs and yield of greenhouse cucumber production in Iran. *Applied Energy*, 87:191-196.
- Monem, M.J., Delavar, M., & Hosseini, S.M. (2019). Application and evaluation of water, food and energy (NEXUS) in irrigation Networks management: case study of Zayandehrud irrigation Network, *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 1(14): 275-285.
- Radmehr, R., Ghorbani, M., and Ziaei, A. N. (2021). Quantifying and managing the water-energy-food nexus in dry regions food insecurity: New methods and evidence. *Agric. Water Manag.* 245, 106588. doi:10.1016/j.agwat.2020.106588
- Safavid, A. and Ehteshami, M. 2022. Modeling the correlation approach of water, energy and food and evaluating its social and environmental sustainability (Case study: Varamin city). *Scientific Journal of Hydroelectric Dam and Power Plant*, Year 8, Number 28, Pages 101-80.
- Shirzadi Laskookalayeh, S., Mardani Najafabadi, M., & Shahnazari, A. (2022). Investigating the effects of management of irrigation water distribution on farmers' gross profit under uncertainty: A new positive mathematical programming model. *Journal of Cleaner Production*, 351, 131277.
- Si, Y., Li, X., Yin, D.Q., Li, T.J., Cai, X.M., Wei, J.H., Wang, G.Q., 2019. Revealing the water-energy-food nexus in the Upper Yellow River Basin through multi-objective optimization for reservoir system. *Sci. Total Environ.* 682, 1–18.
- Tian, H., Lu, C., Pan, S., Yang, J., Miao, R., Ren, W., Yu, Q., Fu, B., Jin, F.-F., Lu, Y., Melillo, J., Ouyang, Z., Palm, C., & Reilly, J. (2018). Optimizing resource use efficiencies in the food–energy–water nexus for sustainable agriculture: from conceptual model to decision support system. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 33, 104-113.

ارزیابی ارائه یک مدل پیشنهادی...۳۵

- Tichenor NE, van Zanten HH, de Boer IJ, Peters CJ, McCarthy, AC and Griffin TS. 2017. Land use efficiency of beef systems in the Northeastern USA from a food supply perspective. *Agricultural Systems*, 156: 34-42.
- Wang, Q., Li, S.Q., He, G., Li, R.R., Wang, X.F., 2018. Evaluating sustainability of water-energy-food (WEFN) nexus using an improved matter-element extension model: a case study of China. *J. Cleaner Prod.* 202, 1097–1106.
- West J. 2019. Multi-criteria evolutionary algorithm optimization for horticulture crop management. *Agricultural Systems*, 173: 469-481.
- Xu, S.S., He, W.J., Shen, J.Q., Degefu, D.M., Yuan, L., Kong, Y., 2019. Coupling and coordination degrees of the core water–energy–food nexus in China. *Environ. Res. Public Health* 16.1648.
- Xu, Y., Tan, J., Wang, X., Li, W., He, X., Hu, X., & Fan, Y. (2022). Synergetic management of water-energy-food nexus system and GHG emissions under multiple uncertainties: An inexact fractional fuzzy chance constraint programming method. *Agricultural Water Management*, 262, 107323.
- Yao, L., Li, Y., and Chen, X. A robust water-food-land nexus optimization model for sustainable agricultural development in the Yangtze River Basin. *Agricultural Water Management*. 256 (2021) 107103. 2021.
- Yilmaz, I., H. Akcaoz, and B. Ozkan. 2005. An analysis of energy use and input costs for cotton production in Turkey. *Renewable Energy*, 30:145–155.
- Yu, L., Xiao, Y., Zeng, X. T., Li, Y. P., & Fan, Y. R. (2020). Planning water-energy-food nexus system management under multi-level and uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 251, 119658.
- Zeng, X.T., Zhao, J.Y., Wang, D.Q., Kong, X.M., Zhu, Y., Liu, Z.P., Dai, W., Huang, G.H., 2019. Scenario analysis of a sustainable water-food nexus optimization with consideration of population-economy regulation in Beijing-Tianjin-Hebei region. *J. Clean. Prod.* 228, 927–940.



A proposed multi-objective model with a water-energy-food nexus approach to improve water and energy efficiency

Hossein badihbarzin, Seyed Mahdi hoseini^{}, Mahmood Hashemitabar, Mostafa Mardani Najafabadi¹*

Received: 3 March.2023

Accepted: 16 Sep.2023

Extended Abstract

Introduction

Due to the drought conditions and due to population growth and increased demand for food, today more than ever there is a need to improve water and energy efficiency. Water-Energy-Food (WEFN) all three are inextricably linked and are vital for the development of human life and livelihood. Due to the fact that the countries of the Middle East, along with the country of Iran, have dry to semi-arid climates in terms of climatic conditions, there are problems and challenges, for this reason, they face many problems in the supply and distribution of water in various sectors, especially in the agricultural sector. The agricultural sector accounts for about 90% of fresh water consumption and about 30% of energy consumption worldwide. On the other hand, agricultural irrigation supplies about 40% of the world's food. Considering that one of the sectors where water-energy-food are closely related is agriculture. Therefore, the optimal allocation of water, energy and land resources according to the intended goals can improve economic profit and also lead to a reduction in the amount of CO₂ greenhouse gas emissions. The increasing importance of energy resources in the formation and growth of economic processes, as well as the need to use these resources based on environmental considerations and sustainable economic and social development, considers the issue of energy consumption as an important issue. Main infrastructures of the economy, including industry and services

¹Respectively Ph.D. Candidate of Agricultural Economics, University of Sistan and Baluchestan.

Assistant Professors, Department of Agricultural Economics, University of Sistan and Baluchestan.
Associate Professor, Department of Agricultural Economics, Faculty of Agricultural Engineering and Rural Development, Khuzestan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Molathani, Iran
Email: shseyedmahdi46@gmail.com

and presents the world's agriculture. Therefore, the agricultural sector is of special importance as a consumer and producer of energy. Considering that no study has been conducted in basin sistan the field of water and energy efficiency using the correlation approach. Therefore, the current research has determined the amount of economic and physical productivity (water and energy consumption) in this basin using a multi-objective planning mode.

Materials and Method

This model has the ability to model interactions and interactions of three water-energy-food systems, including water supply-demand, energy supply-demand, land demand, crop performance, water and energy allocation. The hypothetical model under investigation includes most of the lands covered by crops (wheat, barley, alfalfa, onions, melons and watermelons) of the Sistan Plain (Zabol, Zehak, Hirmand and Hamoon). In this model, the water needed for irrigation comes from sources Surface water (not having underground water) is supplied. Therefore, in this research, it is tried to introduce multi-objective mathematical programming (MOP) based on a mathematical planning model using (method and technique) for water-energy-food correlation, which has the ability to process management decisions. In this model, in addition to examining the economic aspect of CO₂ greenhouse gas control, the amount of economic and physical productivity (irrigation water consumption, energy consumption of inputs, and the amount of production of basic and strategic products of the region) has been investigated. The present research was conducted in the study area of Sistan Plain for the crop year 2017-2018. Therefore, the modeling of this research, considering the three water-food-energy systems and its different aspects, includes different goals. These goals include maximizing gross profit and maximizing calorie production in the basic and strategic products of the region. And the minimization goals include: emission of greenhouse gases, the amount of irrigation water consumption and the amount of energy consumption of energy inputs are determined.

Results and discussion

According to the results of the implementation of the water-energy-food correlation model, it has led to an improvement in the efficiency of irrigation water consumption in the study area by 11.37%. According to the results of the model of economic productivity for energy consumption of inputs, strategic products to provide food security and CO₂ greenhouse gas emission, respectively (14.3, 14. 1 and 16.02) percent were obtained. Also, the results of the proposed model showed that the physical productivity of water

consumption in Sistan Plain has increased from 188899.5 kg/m³ to 211487.5 kg/m³. Therefore, the implementation of the WEFN correlation approach in the study area has led to the improvement of the economic and physical efficiency of water and energy consumption. The results of the proposed WEFN model showed that the economic productivity (irrigation water and energy) has increased with the decrease in irrigation water consumption. Therefore, the implementation of water-energy-food correlation for hot and dry regions, especially for the Sistan region, which is facing the problem of water shortage, can improve the efficiency of water and energy consumption. Therefore, if all-round management in the agricultural sector of the region is carried out with this approach, it will improve economic efficiency in the amount of irrigation water consumption by 11.37% and the amount of energy consumption of agricultural inputs by 10.25%. The results show the successful performance of water-energy-food nexus to maintain food security and improve productivity in this region.

Suggestion

According to the results of the model to increase the economic productivity, the determination and selection of cultivated products in each region can be considered as a sustainable approach in management. Therefore, it is necessary to implement the WEFN correlation according to the results of the first model to lead to the improvement of irrigation efficiency, and secondly, to protect the environment and lead to a reduction in environmental pollutants. This can provide a favorable economic situation for the farmers of the region. For economic productivity, modern irrigation methods should be used and suitable for the Sistan region and crop irrigation and irrigation efficiency should be increased, and in order to use and expand new irrigation methods, necessary arrangements and facilities should be considered for farmers.

JEL classification: C02, C61, O13

Keywords: water-energy-food correlation, multi-objective nonlinear planning, economic and physical productivity, Sistan plain