University of Tehran Press

Journal of Water and Irrigation Management **Online ISSN: 2382-9931**

Homepage: https://jwim.ut.ac.ir/

Assessment of Water, Food, and Energy Productivity Indices Using the WA+ Water Accounting Framework and a Nexus Approach

Seyyed Ali Moasheri[1] | Saman Javadi[2]✉ | Mahmoud Mashal[3] | Hamid Kardan Moghadam[4] | Behzad Azadegan[5]

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology, University of Tehran, Iran. E-mail: s.a.moasheri@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology, University of Tehran, Iran. E-mail: javadis@ut.ac.ir
3. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology, University of Tehran, Iran. E-mail: mmashal@ut.ac.ir
4. Water Research Institute, Ministry of Energy Water Research Institute, Tehran, Iran. E-mail: hkardan@ut.ac.ir
5. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology, University of Tehran, Iran. E-mail: bazad@ut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 27 April 2023
Received in revised form
17 June 2023
Accepted 17 June 2023
Published online 12 October 2023

Keywords:
Groundwater
NEXUS
Plasjan plain
Water accounting

ABSTRACT

With the aim of increasing water, food and energy productivity, this study was carried out in two stages to develop and validate a tool for evaluating agricultural management strategies in relation to the link between water, food and energy security (NEXUS). In the first part, using the WA+ water accounting framework, with the aim of analyzing the parameters of hydro climatology, the four worksheets of basic resources, evaporation and transpiration, harvesting of water resources and productivity of the Plasjan watershed were calculated and management scenarios were determined to increase productivity, and in the second part, management scenarios with The NEXUS approach were evaluated and prioritized. The results of WA+ showed that in the Plasjan basin, the high volume of evaporation and transpiration was useless. In the second part of this research, among the 4 main scenarios (48 sub-scenarios) introduced to improve productivity, the scenarios of cultivar change and irrigation treatment, change of cultivated area and rainfed cultivation with supplementary irrigation had a positive effect on water, food and energy productivity index. After prioritizing the influential sub-scenarios with the TOPSIS multi-criteria decision-making model, the sub-scenario of wheat variety 6 with full irrigation treatment had the most positive effect on water, food and energy productivity and was identified as an indicator scenario for evaluating productivity in agricultural management.

Cite this article: Moasheri, S. A., Javadi, S., Mashal, M., Kardan Moghadam, H., & Azadegan, B. (2023). Assessment of Water, Food, and Energy Productivity Indices Using the WA+ Water Accounting Framework and a Nexus Approach. *Journal of Water and Irrigation Management*, 13 (3), 715-733. DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2023.357988.1069

© The Author(s).
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2023.357988.1069

انتشارات دانشگاه تهران

مدیریت آب و آبیاری

شاپا الکترونیکی: ۹۹۳۱-۲۳۸۲

Homepage: https://jwim.ut.ac.ir/

بررسی شاخص‌های بهره‌وری آب، غذا و انرژی با استفاده از چارچوب حسابداری آب +WA و رویکرد پیوندی

سید علی معاشری[۱] | سامان جوادی[۲]✉ | محمود مشعل[۳] | حمید کاردان مقدم[۴] | بهزاد آزادگان[۵]

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: s.a.moasheri@ut.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: javadis@ut.ac.ir

۳. گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mmashal@ut.ac.ir

۴. مؤسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو، تهران، ایران. رایانامه: hkardan@ut.ac.ir

۵. گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: bazad@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۳/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۷/۲۰

کلیدواژه‌ها:

آب زیرزمینی

حسابداری آب

دشت پلاسجان

نکسوس

چکیده

این مطالعه با هدف افزایش بهره‌وری آب، غذا و انرژی اقدام به توسعه و اعتبارسنجی ابزاری برای ارزیابی استراتژی‌های مدیریتی کشاورزی در رابطه با پیوند امنیت آب، غذا و انرژی در دو مرحله انجام شد. در بخش اول با استفاده از چارچوب حسابداری آب +WA، با هدف آنالیز پارامترهای هیدروکلیماتولوژی اقدام به محاسبه کاربرگ‌های چهارگانه منابع پایه، تبخیر و تعرق، برداشت منابع آب و بهره‌وری حوضه آبریز پلاسجان و تعیین سناریوهای مدیریتی جهت افزایش بهره‌وری شد و در بخش دوم سناریوهای مدیریتی با رویکرد پیوندی موردارزیابی و اولویت‌بندی قرار گرفت. نتایج +WA نشان داد که در حوضه پلاسجان حجم بالای تبخیروتعرق غیرمفید بود. در بخش دوم این پژوهش، بین چهار سناریوی اصلی (۴۸ زیرسناریو) معرفی شده جهت بهبود بهره‌وری، سناریوهای تغییر رقم و تیمار آبیاری، تغییر سطح زیرکشت و کشت دیم با آبیاری تکمیلی دارای تأثیر مثبت در شاخص بهره‌وری آب، غذا و انرژی بودند. پس از اولویت‌بندی زیرسناریوهای تأثیرگذار با مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره TOPSIS، زیرسناریو رقم شش گندم با تیمار آبیاری کامل بیش‌ترین تأثیر مثبت در بهره‌وری آب، غذا و انرژی را داشته و به‌عنوان سناریو شاخص برای ارزیابی بهره‌وری در مدیریت کشاورزی شناسایی شد.

استناد: معاشری، سید علی؛ جوادی، سامان؛ مشعل، محمود؛ کاردان مقدم، حمید؛ آزادگان، بهزاد (۱۴۰۲). بررسی شاخص‌های بهره‌وری آب، غذا و انرژی با استفاده از چارچوب حسابداری آب +WA و رویکرد پیوندی. *نشریه مدیریت آب و آبیاری*، ۱۳ (۳)، ۷۱۵-۷۳۳.

DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2023.357988.1069

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

CC BY NC

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر با توجه به تنش‌های اقلیمی و افزایش جمعیت، مدیریت بخش آب با چالش‌های متعددی مواجه است (Cosgrove and Loucks, 2015). براساس برنامه جهانی ارزیابی آب (WWAP, 2015) پیش‌بینی می‌شود که میزان تقاضای آب تا سال ۲۰۵۰ تا ۵۵ درصد افزایش یابد، که تقاضای غذا و انرژی، فعالیت‌های اقتصادی- صنعتی و درگیری‌های آبی بر این اساس افزایش می‌یابد. با افزایش چالش مدیریت آب، استفاده از چارچوب‌ها، ساختارها و مدل‌های برنامه‌ریزی منابع آب به بخشی ضروری از این حوزه تبدیل خواهد شد. یکی از چارچوب‌ها و ساختارها در راستای مدیریت و توسعه پایدار، استفاده از رویکرد پیوندی آب، غذا و انرژی است. رویکرد پیوندی آب، غذا و انرژی، ارتباطات پیچیده و پویای میان آن‌ها را تشریح می‌کند. این رویکرد از تصمیم‌گیری‌های مؤثر در تخصیص منابع محدود، بطور پایدار پشتیبانی می‌کند (El-Gafy, 2017). برنامه‌ریزی و مدیریت در جهت توسعه بخش‌های آب، غذا و انرژی بدون توجه به پیوند این عناصر نه‌تنها منجر به توسعه پایدار نمی‌شود بلکه می‌تواند سبب تشدید بحران در منابع هر سه بخش شود (Bizikova *et al*., 2013). بهبود بهره‌وری استفاده منابع از مزایای رویکرد پیوندی می‌باشد که منجر به کاهش و حذف اثرات نامطلوب سیاست‌های توسعه‌ای تک‌بخشی می‌شود (Hanlon *et al*., 2013). افزایش بهره‌وری آب به معنای استفاده از حجم آب کم‌تر برای تولید مقدار ثابتی از محصولات یا استفاده از همان مقدار حجم آب، اما تولید بیش‌تر است. افزایش بهره‌وری آب با بهبود امنیت غذایی و معیشت همراه بوده است (Cook *et al*., 2009;Kai *et al*., 2011). بنابراین بهبود بهره‌وری کشاورزی در اراضی موجود با استفاده از همین مقدار آب ضروری خواهد بود. بررسی ابعاد رویکرد پیوندی آب، غذا و انرژی نشان می‌دهد شناسایی منابع و مصارف آب جهت تحلیل و ارزیابی این موضوع بسیار دارای اهمیت است. یک چارچوب جدید در بحث عرضه و تقاضای آب برای مدیریت یکپارچه منابع آب، حسابداری آب است (Karimi *et al*., 2013). چارچوب حسابداری آب، رویکردهای مختلفی با عنوان نظام حسابداری آب با اهداف و منشأهای مختلف توسعه داده شده است (Chalmers *et al*., 2012). رویکرد پیوندی روش جدیدی برای نشان دادن چالش‌های به هم پیوسته موجود در سه بخش آب، غذا و انرژی با درنظرگرفتن سیاست‌های مرتبط با هر بخش در جهت توسعه پایدار می‌باشد (Stein *et al*., 2014; Stein *et al*., 2011). مبنای رویکرد پیوندی درنظرگرفتن ارتباط بین بخشی برای جلوگیری از انتقال مشکلات از یک بخش به بخش دیگر می‌باشد (Halbe *et al*., 2015). رویکرد پیوندی با برقراری تعادل میان اهداف، منافع و نیازهای سه بخش آب، غذا، انرژی به‌دنبال ارائه استراتژی‌های توسعه پایدار و افزایش بهره‌وری در جهت امنیت منابع است. این رویکرد منجر به بهبود امنیت منابع، کاهش تضاد میان بخشی، افزایش منافع و افزایش بهره‌وری در جهت توسعه پایدار خواهد شد. موضوع جدیدی که در رویکرد پیوندی وجود دارد این است که بخش‌های مختلف آب، غذا، انرژی اهمیت یکسانی دارند و در هر بخش عناصر و ذی‌نفعان متعددی وجود دارند که اهداف و منافع آن‌ها باید در تصمیم‌گیری‌ها لحاظ گردد. رویکرد پیوندی با مشارکت تمامی عناصر می‌تواند سیاست‌های بخش‌های مختلف را در تصمیم‌گیری‌ها لحاظ نماید (Stein *et al*., 2014). پیوند آب- غذا- انرژی از کنفرانس پیوند بن در سال ۲۰۱۱ مورد توجه جوامع بین‌المللی قرار گرفته است (Salam *et al*., 2017). پیوند منابع آب، انرژی و غذا بسیار پیچیده است، چراکه اثرات هر یک از این بخش‌ها باعث پیامدهای مستقیم و غیرمستقیم بر بخش‌های دیگر خواهد شد. طی مطالعه‌ای در حوضه آبریز پلاسجان با استفاده از چارچوب حسابداری آب +WA، ارزیابی از پارامترهای ورودی حوضه موردبررسی قرار گرفت (Rahimzadeh *et al*., 2020). نتایج این مطالعه نشان داد که حجم جریان ورودی به منطقه اعم از بارش و جریان انتقالی ۵۴۸/۸ میلیون مترمکعب است که حجم ۴۶۵/۵ میلیون مترمکعب صرف تبخیر و تعرق می‌گردد. بررسی جریان‌های خروجی از حوضه که عملاً جریان سد زاینده‌رود را تأمین می‌کند نشان داد که حجم حدود ۴۱/۹ میلیون مترمکعب آب وارد دریاچه سد می‌شود. بررسی میزان تبخیر، تعرق و برگاب در حوضه نشان داد که حجم ۲۶۴/۳ میلیون

مترمکعب از تبخیر و تعرق به‌صورت مفید و حجم ۲۰۱/۱ میلیون مترمکعب به‌صورت غیرمفید ناشی از تبخیر از خاک و برگاب مصرف می‌شود. هم‌چنین نتایج نشان داد که بیش‌ترین میزان بهره‌وری آب در اراضی مدیریت‌شده (MWU) و به میزان ۱/۲۸ کیلوگرم در هکتار است. هم‌چنین در این مطالعه ارزیابی کاربرگ‌ها با استفاده از نشانگرهای موجود نشان داد که کل آب موجود در حوضه به مصرف نرسیده است و حوضه پتانسیل استفاده بیش‌تر از آب موجود را با استفاده از تمهیدات مدیریتی مناسب دارد. میزان اب قابل بهره‌برداری کم‌تر از ۵۰ درصد حجم منابع آبی منطقه است و نشان‌دهنده این ست که حجم بیش‌تری از منابع آبی استفاده نشده است. با این توضیحات نگرش بهره‌وری اهمیت پیدا می‌کند و این دیدگاه مستلزم دیدِ همه‌جانبه در بخش‌های مختلف آب، غذا و انرژی می‌باشد.

توسعه اقتصادی– اجتماعی، رشد جمعیت و تغییر اقلیم چالش‌های عمده‌ای را برای پایداری و امنیت غذایی که یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های جوامع است، ایجاد کرده‌اند (Vorosmarty *et al*., 2000; Gleik, 2008). در این راستا، منابع آب تحت فشار واقع شده‌اند. در این رابطه، توجه به دو حقیقت مصارف بالای بخش کشاورزی و بهره‌وری پایین آب در بخش کشاورزی بسیار ضروری است (Yong, 2005). از این‌رو، مفهوم بهره‌وری آب با توجه به این‌که امکان افزایش عرضه آب در بسیاری از نقاط دنیا وجود ندارد، به‌شدت توصیه می‌شود. تصور می‌شود که حتی بهبود اندکی در بهره‌وری آب کشاورزی می‌تواند تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر بودجه جهانی و منطقه‌ای آب داشته باشد. چنین فرایندی یعنی ارتقای بهره‌وری آب، امکان تولید کشاورزی بیش‌تر با همین مقدار آب را میسر می‌سازد.

با توجه به چارچوب حسابداری آب و رویکرد پیوندی[1] آب، غذا و انرژی هدف افزایش بهره‌وری آب در بخش کشاورزی بسیار دارای اهمیت بوده که این هدف می‌باید در راستای اجرای طرح تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی در قالب سند سازگاری با کم‌آبی مورد تحلیل قرار گیرد. بر این اساس سیستم حسابداری آب WA+ با درنظرگرفتن ابعاد پایداری منابع و مصارف تدوین و میزان بیلان هیدروکلیماتولوژی حوضه آبریز پلاسجان با استفاده از چهار کاربرگ تعیین گردید. پس از آن ارزیابی وضعیت بیلان منابع و مصارف آب و اجزای بیلان با استفاده از نشانگرها تعیین شده و متناسب با نتایج کاربرگ‌های حسابداری آب و نشانگرهای مربوطه به هر کاربرگ، راه‌کارها و سناریوهای مختلف به‌منظور برون‌رفت از وضعیت کمی فعلی حوضه آبریز پلاسجان و افزایش بهره‌وری توسط خبرگان و کارشناسان متخصص بخش کشاورزی معرفی شد. در نهایت با استفاده از رویکرد پیوندی در سه شاخص بهره‌وری آب، غذا و انرژی سناریوهای مطرح‌شده موردارزیابی قرارگرفته و تغییرات این شاخص‌ها پس از اعمال سناریوهای مدیریتی تعیین شده است. در نهایت سناریوها با استفاده از مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره اولویت‌بندی گردید.

۲– مواد و روش‌ها

۲– ۱– روش تحقیق

حوضه آبریز پلاسجان که در شکل (۱) نمایش داده شده است با مساحت ۱۸۵۴ کیلومترمربع بین طول جغرافیایی ۵۰ درجه تا ۵۰ درجه و ۴۳ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۱۵ دقیقهشمالی قرار دارد. بررسی وضعیت منابع آب در این حوضه طی سال آبی ۹۷–۱۳۹۶ نشان می‌دهد که ۲۱۸ میلیون مترمکعب آب مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد که از این حجم ۱۷۷ میلیون مترمکعب از منابع آب زیرزمینی و ۴۱ میلیون مترمکعب از منابع آب سطحی برداشت می‌شود (رحیم‌زاده و همکاران، ۱۴۰۱). برداشت از منابع آب سطحی این منطقه با توجه به انتقال آب از طریق تونل چشمه لنگان (انتقالی حوضه آبریز کارون) در مسیر رودخانه از طریق موتور پمپ با حجمی حدود ۴۱ میلیون مترمکعب در سال بهره‌برداری می‌شود.

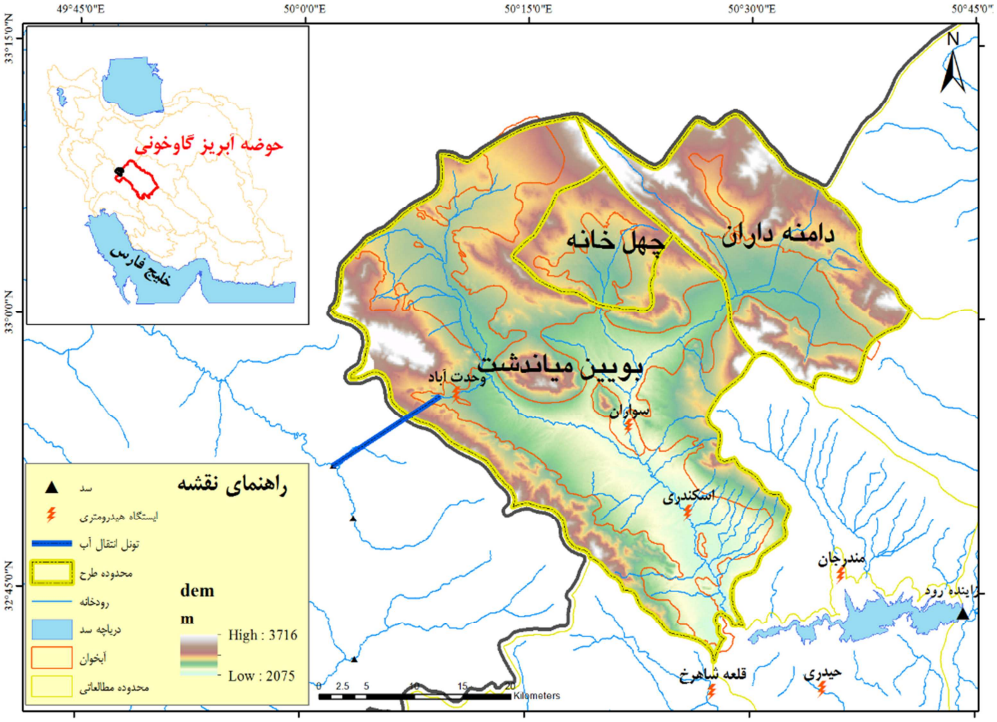

Figure 1. Studied area (Rahimzadeh *et al*., 2019)

به‌منظور بهبود بهره‌وری وضعیت موجود از دیدگاه رویکرد پیوندی آب، غذا و انرژی مورد پژوهش قرار گرفت. برای ارزیابی اثر هرکدام از زیرسناریوها سه شاخص بهره‌وری آب[۲]، شاخص بهره‌وری غذا[۳] و شاخص بهره‌وری انرژی[۴] تحلیل گردید. لذا با توجه به هدف پژوهش، مراحل انجام پژوهش در شش گام تدوین می‌شود. در گام اول با توجه به هدف پژوهش منطقه موردمطالعه انتخاب می‌شود. که در این مطالعه با توجه به شرایط مدیریتی منابع آب، افت شدید سطح آب زیرزمینی و کسری شدید مخزن و در دسترس‌بودن داده‌های سنجش از دور در منطقه موردمطالعه، حوضه پلاسجان انتخاب شد. در گام دوم اقدام به جمع‌آوری اطلاعات پرداخته می‌شود، از جمله میزان مصرف آب مدیریت‌شده (MWU)، کاربری اراضی بهبودیافته (MLU)، کاربری اراضی بهره‌برداری‌شده (UWU)، کاربری اراضی حفاظت‌شده (CLU)، میزان تبخیر و تعرق و زیست‌توده در منطقه، میزان بارش منطقه و هم‌چنین میزان منابع و مصارف آب در منطقه. در گام سوم با توجه به هدف پژوهش از چهار کاربرگ منابع پایه، تبخیر و تعرق، بهره‌وری و آب برداشت‌شده اقدام به تدوین چارچوب سیستم حسابداری آب (WA+) می‌شود. در گام چهارم با توجه به نشانگرهای مطرح، برای هر کاربرگ نشانگرهای مربوطه به سیستم حسابداری آب محاسبه و ساختار تدوین‌شده سیستم حسابداری آب (WA+) موردارزیابی قرار می‌گیرد. با توجه به وضعیت موجود و مشکلات مدیریت منابع آبی منطقه، با توجه به نظر خبرگان در گام پنجم اقدام به طرح سناریوهای مدیریتی می‌شود. در نهایت در گام ششم با توجه به شاخص‌های پیوندی آب، غذا و انرژی تأثیرات اجرای هر یک از سناریوهای تخصیص منابع آب موردارزیابی قرار می‌گیرد و بدین ترتیب با ارزیابی پیوندی سناریوهای تخصیص منابع آب، راه‌کارهای افزایش بهره‌وری آب و زمین با رویکرد حسابداری آب WA+ و با ارتباطات پیوندی بین بخش‌های آب، غذا و انرژی اولویت‌بندی می‌شود. در شکل (۲) مراحل پژوهش ارائه شده است.

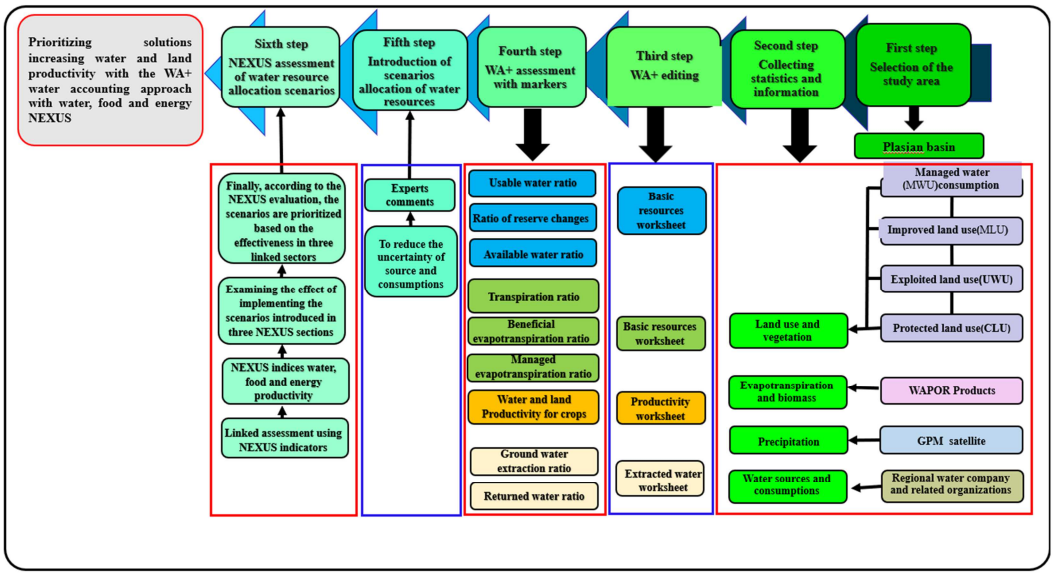

Figure 2. Using the NEXUS approach in evaluating water, food energy productivity indicators using the WA+ water accounting system

۲– ۲– سناریوهای مدیریتی

با نگرش به وضعیت فعلی منابع و مصارف آب در منطقه موردمطالعه، به‌منظور ارتقا و اثربخشی مثبت در بهره‌وری از دیدگاه پیوندی، چهار سناریو اصلی، آبیاری تکمیلی محصولات آبی و دیم[۵] با تنوع بارش مختلف (SR1)، تغییردرتیمار آبیاری۶ و ارقام کشت گندم به‌عنوان محصول غالب (SR2)، تغییر سطح زیرکشت محصولات (SR3) و سناریوی متناسب با سازگاری با کم‌آبی با مجموع ۴۸ زیرسناریو در جدول (۱) تعریف شد.

Table 1. Defined scenarios and sub-scenarios

Sub-scenario code	Sub-scenario	Scenario	Sub-scenario code	Sub-scenario	Scenario
S.atd1	Intense Deficit irrigation		Scp22	10% addiction in Alfalfa cultivation area	
S.atd2	Medium deficit irrigation	S1	Scp23	20% addiction in Alfalfa cultivation area	
S.atd3	Mild deficit irrigation		Scp24	30% addiction in Alfalfa cultivation area	
Scp1	10% reduction in fodder corn cultivation area		Scp25	10% addiction in Barley cultivation area	
Scp2	20% reduction in fodder corn cultivation area		Scp26	20% addiction in Barley cultivation area	S2
Scp3	30% reduction in fodder corn cultivation area		Scp27	30% addiction in Barley cultivation area	
Scp4	10% reduction in canola cultivation area		Scp28	10% addiction in Wheat cultivation area	
Scp5	20% reduction in canola cultivation area		Scp29	20% addiction in Wheat cultivation area	
Scp6	30% reduction in canola cultivation area		Scp30	30% addiction in Wheat cultivation area	
Scp7	10% reduction in Alfalfa cultivation area		SR1	Supplemental irrigation with rain 448mm	
Scp8	20% reduction in Alfalfa cultivation area		SR2	Supplemental irrigation with rain 339mm	S3
Scp9	30% reduction in Alfalfa cultivation area		SR3	Supplemental irrigation with rain 193mm	
Scp10	10% reduction in Barley cultivation area		Sc1t1	Wheat cultivar1 and full irrigation	
Scp11	20% reduction in Barley cultivation area		Sc1t2	Wheat cultivar1 and deficit irrigation	
Scp12	30% reduction in Barley cultivation area	S2	Sc2t1	Wheat cultivar2 and full irrigation	
Scp13	10% reduction in Wheat cultivation area		Sc2t2	Wheat cultivar2 and deficit irrigation	
Scp14	20% reduction in Wheat cultivation area		Sc3t1	Wheat cultivar3 and full irrigation	
Scp15	30% reduction in Wheat cultivation area		Sc3t2	Wheat cultivar3 and deficit irrigation	S4
Scp16	10% addition in fodder corn cultivation area		Sc4t1	Wheat cultivar4 and full irrigation	
Spc17	20% addition in fodder corn cultivation area		Sc4t2	Wheat cultivar4 and deficit irrigation	
Spc18	30% addition in fodder corn cultivation area		Sc5t1	Wheat cultivar5 and full irrigation	
Spc19	10% addiction in canola cultivation area		Sc5t2	Wheat cultivar5 and deficit irrigation	
Spc20	20% addiction in canola cultivation area		Sc6t1	Wheat cultivar6 and full irrigation	
Spc21	30% addiction in canola cultivation area		Sc6t2	Wheat cultivar6 and deficit irrigation	

۲-۲-۱- سناریوی سازگاری با کم‌آبی (S1)

رویکرد ناگزیر و غیرقابل‌اجتناب برنامه‌ریزان کشور در رویارویی با کمبود منابع آب سطحی و برداشت بیش از حد مجاز از آبخوان‌ها که نتیجه تخریب کمی و کیفی منابع آب را در پی داشته است، اجرای طرح تعادل‌بخشی منابع آب بوده است. براساس طرح تعادل‌بخشی وزارت نیرو، به‌منظور تعادل‌بخشی سفره‌های آب زیرزمینی، میزان کاهش مصرف از آبخوان بر مبنای سال آبی ۸۶-۱۳۸۵ با اقداماتی چون انسداد چاه‌های غیرمجاز، نصب کنتور هوشمند و استقرار اکیپ‌های گشت و بازرسی مشخص شده است. نگرش اطلاعات و راهبردهای این طرح مهم، آب قابل برنامه‌ریزی در چند سناریوی آبی توسط شرکت آب منطقه‌ای استان مبتنی بر ابلاغیه آب قابل برنامه‌ریزی وزارت نیرو در اختیار طرح الگوی کشت استان اصفهان قرار گرفت و منطبق با اطلاعات طرح تعادل‌بخشی آبخوان، به تفکیک منابع آب زیرزمینی و سطحی در دشت‌های موردمطالعه، به‌عنوان یک قید در مجموعه محدودیت آب آبیاری در نظر گرفته شد تا اطمینان حاصل شود که میزان آب کشاورزی مصرفی برنامه الگوی کشت ارائه‌شده توسط الگوی برنامه‌ریزی مطالعه جاری، از ظرفیت قابل‌تحمل مصرف آب در بخش کشاورزی مطابق اطلاعات طرح تعادل‌بخشی سفره‌های آب زیرزمینی در دشت‌های موردنظر، بیش‌تر نشود.

میزان مصرف آب با توجه به نوع محصول و سطح زیر کشت در وضعیت فعلی و با توجه به سناریوهای کاهش مصرف آب (سناریوهای کلان سازگاری با کم‌آبی استان اصفهان) معادل ۵۹، ۴۶ و ۱۹ درصد کاهش آب قابل استفاده نسبت به وضعیت فعلی (حالت نرمال) و براساس سناریوی آب قابل برنامه‌ریزی در مطالعات الگوی کشت استان اصفهان-برنامه سازگاری بخش کشاورزی استان اصفهان با شرایط کم‌آبی تا افق ۱۴۰۲ (Agricultural Statistics, 2019)، سه سناریوی کاهش مصرف آب در بخش کشاورزی در منطقه موردمطالعه به شرح جدول (۲) تعریف شده است.

Table 2. Resources and consumption management scenarios in line with implementation of the drought adaptation program

Sub-scenario	Water consumption (million cubic meters/Year)					Cultivation area(ha)				
	Fodder corn	Canola	Alfalfa	Barley	Wheat	Fodder corn	Canola	Alfalfa	Barley	Wheat
Current	12.96	0.07	31.08	5.22	8.98	1200	14	3000	700	2350
S. atd1	5.31	0.03	12.74	2.14	3.68	1200	14	3000	700	2350
S. atd2	6.99	0.04	16.78	2.82	4.85	1200	14	3000	700	2350
S. atd3	10.49	0.06	25.17	4.23	7.27	1200	14	3000	700	2350

۲-۲-۲- سناریوی تغییر سطح زیرکشت محصولات (S2)

با توجه به تعریف راه‌کار افزایش بهره‌وری که عملاً راه‌کار تلفیقی درنظرگرفته شده است، ۳۰ سناریو برمبنای شش حالت افزایش ۱۰، ۲۰ و۳۰ درصدی سطح زیرکشت و یا کاهش ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصدی سطح زیرکشت نسبت به وضعیت فعلی برای هریک از محصولات تعریف شد که در جدول (۲) تحت عنوان SR2 نشان داده شده است.

۲-۲-۳- سناریوی آبیاری تکمیلی محصول گندم با تنوع بارش مختلف (S3)

با توجه به خشکسالی‌ها و محدودیت منابع آب سطحی در سال‌های اخیر، بررسی واکنش حوضه آبریز در شرایط خشکسالی از اهمیت زیادی برخوردار است. لذا برنامه‌ریزی آبیاری و مقایسه عملکرد محصول گندم طی سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۰ در شرایط متفاوت ریزش باران معرفی شد. در این پژو هش ارقام محصول گندم را که به‌صورت تکمیلی آبیاری شدند تا آب موردنیاز آن‌ها تأمین شود. زیرسناریوها در جدول (۳) آمده است.

۲– ۲– ۴– سناریوی تغییر در تیمار آبیاری و ارقام کشت گندم(S4)

کم‌آبیاری نوعی گزینه مدیریتی است که در شرایط عدم موازنه مقدار آب و زمین برای افزایش بهره‌وری آب استفاده می‌شود (Journal of Water Productivity and Improvement Methods, 2016). به‌طور طبیعی در کم‌آبیاری بخشی از آب با روش‌های مختلف صرفه‌جویی می‌شود، به‌طوری‌که در عملکرد صدمات قابل‌توجهی ندارد. آب صرفه‌جویی‌شده در شرایط کم‌آبیاری را هم می‌توان برای افزایش تولید با افزایش سطح زیر کشت استفاده کرد به‌ویژه در شرایطی که تولید مواد غذایی و امنیت آن هدف اصلی است و هم می‌توان به‌عنوان روشی برای کاهش برداشت از منابع آبی تلقی کرد. به‌ویژه در شرایطی که وضعیت منابع آبی بحرانی است. نتایج راهبرد اول برای برنامه‌های کوتاه‌مدت و نتایج راهبرد دوم برای برنامه‌های طولانی‌مدت مؤثر خو اهند بود.

۲– ۳– ارزیابی پیوندی سناریوهای بهره‌وری آب، غذا و انرژی

با توجه به سناریوهای معرفی‌شده در گام قبل، به‌منظور ارزیابی پیوندی، از شاخص‌های پیوندی مرتبط با سه بخش آب، غذا و انرژی استفاده خواهد شد. روش کار بدین صورت می‌باشد که میزان شاخص‌های پیوندی قبل و بعد از اجرای سناریوهای محاسبه‌شده و تغییرات شاخص‌ها برای هر سناریو موردارزیابی قرار می‌گیرد. براین اساس سه شاخص بهره‌وری آب، بهره‌وری انرژی و بهره‌وری غذا مبتنی بر آمار و اطلاعات موجود در منطقه محاسبه می‌شود.

– شاخص بهره‌وری آب: در پژوهش El-Gafy (2017) شاخص بهره‌وری آب ($W_{pro.t}$, ton/m^3) به‌صورت رابطه (۱) ارائه گردیده است:

رابطه ۱) $$W_{pro.t} = Y_{c.t}/w_{c.t}$$

که در آن، Yc, t عملکرد محصول c در دوره زمانی t می‌باشد و Wc,t میزان آب مصرف‌شده برای تولید محصول c در زمان t می‌باشد.

– شاخص بهره‌وری انرژی: در پژوهش El-Gafy (2017) شاخص بهره‌وری انرژی (Epro,t, ton/J) به‌صورت رابطه (۲) ارائه گردیده است:

رابطه ۲) $$E_{pro.t} = Y_{c.t}/E_{c.t}$$

که در آن، Yc,t عملکرد محصول c می‌باشد و Ec,t میزان انرژی مصرف‌شده (ژول/کیلوگرم) برای تولید محصول c در زمان t می‌باشد.

– شاخص بهره‌وری غذا: این شاخص به‌منظور تحلیل بهتر پیوند آب– انرژی– غذا در این پژوهش ارائه گردیده است و به‌صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود:

رابطه ۳) $$F_{pro.t} = Y_{c.t}/Y_{TOTAL}$$

که در آن، Yc,t قدر مطلق اختلاف میان غذای تأمین‌شده و تقاضا برای غذا (براساس گزیده نتایج سرشماری عمومی نفوس و مسکن ۱۳۹۵– استان اصفهان) و Y_{TOTAL} کل غذای تأمین‌شده در محدوده موردنظر است.

پارامترهای این مدل عبارتند از میزان بهره‌برداری از منابع آب (سطحی و زیرزمینی)، میزان انرژی استحصال منابع آب، میزان تولید و مصرف آب نامتعارف در منطقه، مصارف آب در بخش‌های شرب، کشاورزی و صنعت، جریان انرژی در نظام تولید محصولات کشاورزی منطقه است.

۲-۴- محاسبه شاخص‌های مربوط به انرژی

الگوی مصرف انرژی در بوم‌نظام‌های کشاورزی می‌تواند تحت تأثیر عواملی نظیر نوع نظام زراعی، الگوی کشت، سطح فناوری، جمعیت شاغل در کشاورزی، دانش کشاورزان، نوع و مقدار مصرف کودهای شیمیایی و میزان عملکرد محصول قرار گیرد (Mohammadzadeh *et al*., 2017). یکی از رویکردهای مناسب در جهت افزایش بهره‌وری انرژی ارزیابی و آگاهی از جریان انرژی در نظام‌های تولید محصولات کشاورزی است (Rajabi *et al*., 2012). پژوهش‌گران مختلف (Beheshti Tabar *et al*., 2010; Mousavi-Avval *et al*., 2011a; Azizi and Heidari, 2013;Sahabi *et al*., 2013; Mondani *et al*., 2015; Sahabi *et al*., 2016) با بررسی مطالعات مختلف در زمینه انرژی و شاخص‌های آن نشان می‌دهند که شاخص‌های انرژی در فرایند تولید محصولات کشاورزی در مناطق مختلف بسیار متفاوت است، اما در بیش‌تر این مطالعات، الکتریسیته موردنیاز موتور پمپ‌های آب، کودهای شیمیایی و سوخت‌های فسیلی بیش‌ترین سهم را در انرژی ورودی نظام تولید محصولات زراعی و باغی داشته است. در بیش‌تر مطالعات انجام‌گرفته، تنها یک یا چند محصول موردمطالعه قرارگرفته است، بنابراین این امکان وجود ندارد که محصولات یک منطقه از نظر شاخص‌های کارایی مصرف انرژی با یکدیگر موردمقایسه قرار بگیرند. بدین منظور در مطالعه حاضر شاخص‌های انرژی محصول عمده حوضه آبریز پلاسجان موردمطالعه قرار گرفت.

داده‌های مربوط به عملکرد از آمارنامه سالیانه سازمان جهاد کشاورزی استان اصفهان موجود در وب‌سایت جهاد کشاورزی استان اصفهان و مصرف نهاده‌ها در محصول غالب منطقه موردمطالعه (Vafabakhsh and Mohammadzadeh, 2019) و اعلام نظر کارشناسان خبره کشاورزی شرکت آب منطقه‌ای و جهاد کشاورزی استان تعیین شده است. طی بررسی و مطالعه جریان انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در نظام‌های تولید محصولات زراعی و باغی در دشت شریف‌آباد استان قم، با استفاده از پرسشنامه و مصاحبه حضوری با ۱۸۳ کشاورز، شاخص‌های انرژی ورودی، انرژی خروجی، انرژی خالص، انرژی مخصوص، کارایی مصرف انرژی، بهره‌وری انرژی، اشکال مختلف انرژی را محاسبه کردند. (Vafabakhsh and Mohammadzadeh, 2019). در این پژوهش، معادل انرژی ورودی و خروجی در نظام‌های تولید محصولات از منابع مختلف جمع‌آوری شده است، که در محاسبات مطالعه حاضر نیز به آن‌ها استناد شده است. برای محاسبه شاخص‌های انرژی در محصولات موردمطالعه، انرژی‌های مصرفی شامل بذر، کود آفت‌کش‌ها، ماشین‌آلات، آب نیروی انسانی و غیره که طی عملیات زراعی مورداستفاده قرار می‌گیرند به‌همراه عملکرد محصول، به‌عبارتی با توجه به نظر خبرگان بخش کشاورزی به ازای تولید هر کیلوگرم از محصولات، میزان بذر، کود، آفت‌کش‌ها به‌ازای هر سال و هم‌چنین به‌ازای هر هکتار مساحت زیر کشت هر یک از محصولات میزان نیروی انسانی، ماشین‌آلات مورداستفاده، سوخت مورداستفاده ماشین‌آلات و غیره به‌ازای هر سال و هم‌چنین معادل انرژی‌های مطرح‌شده، معادل انرژی کل برای هر سناریو محاسبه گردید (Vafabakhsh and Mohammadzadeh, 2019).

به‌منظور قابل مقایسه‌شدن شاخص‌های موردبررسی، تمامی ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم تولید محصولات چندساله به‌صورت میانگین سالانه بیان شده است.

شاخص‌های انرژی طبق روابط (۴) تا (۷) محاسبه گردید (Pimentel, 1980; Herrhz *et al*., 1995; Hatirli *et al*., 2006).

رابطه ۴) $$\text{کارایی مصرف انرژی} = \frac{\text{انرژی ورودی (مگاژول در هکتار)}}{\text{انرژی خروجی (مگاژول در هکتار)}}$$

رابطه ۵) $$\text{بهره‌وری انرژی} = \frac{\text{عملکرد محصول (کیلوگرم در هکتار)}}{\text{انرژی ورودی (مگاژول در هکتار)}}$$

رابطه ۶) انرژی خالص = انرژی ورودی (مگاژول در هکتار) – انرژی خروجی (مگاژول در هکتار)

رابطه ۷) کارایی مصرف انرژی = $\frac{\text{انرژی ورودی (مگاژول در هکتار)}}{\text{عملکرد محصول (کیلوگرم در هکتار)}}$

۳– نتایج و بحث

۳– ۱– محاسبه شاخص بهره‌وری آب و غذا و انرژی

با توجه به شاخص‌های بهره‌وری معرفی‌شده در گام قبلی، به‌منظور ارزیابی پیوندی، مقادیر هر یک از این شاخص‌ها محاسبه شد (جدول ۳). روش کار بدین صورت می‌باشد که میزان هر سه شاخص بهره‌وری در وضعیت فعلی و هم‌چنین پس از اعمال هر یک از زیرسناریوها محاسبه شده و در نتیجه تغییرات شاخص‌ها برای هر سناریو را می‌توان مورد ارزیابی قرار داد. بر این اساس سه شاخص بهره‌وری آب، بهره‌وری انرژی و بهره‌وری غذا مبتنی بر آمار و اطلاعات موجود در منطقه محاسبه شد.

۳– ۲– محاسبه شاخص‌های مربوط به انرژی

با استفاده از آمار نامه جهاد کشاورزی (Agricultural Statistics, 2019) و نظر کارشناسان خبره کشاورزی در منطقه به‌دست آمد. در مطالعه حاضر مقادیر ورودی، خروجی و انرژی معادل برای تولید محصولات موردمطالعه طبق دسته‌بندی‌های مذکور در منطقه موردمطالعه محاسبه شده است.

برای محاسبه شاخص‌های انرژی در محصولات موردمطالعه، انرژی نهاده‌های مصرفی شامل بذر، کود، آفت‌کش‌ها، ماشین‌آلات، آب، نیروی انسانی و غیره که طی عملیات زراعی مورداستفاده قرار می‌گیرند به‌همراه عملکرد محصول مطابق معادل انرژی آن‌ها که در جدول (۴) نشان داده شده است، محاسبه گردید. به‌منظور قابل مقایسه‌شدن شاخص‌های موردبررسی، تمامی ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم تولید محصولات چندساله به‌صورت میانگین سالانه بیان شده است.

انرژی‌های ورودی در سیستم‌های زراعی را می‌توان به دو شکل مستقیم و غیرمستقیم یا تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر تقسیم‌بندی کرد. براساس این تقسیم‌بندی‌ها، انرژی مستقیم شامل نیروی انسانی، سوخت دیزلی، آب آبیاری و الکتریسیته و انرژی غیرمستقیم شامل بذر، کودهای شیمیایی، کود حیوانی، آفت‌کش‌ها و ماشین‌آلات می‌باشد (Yilmaz *et al*., 2005). هم‌چنین، نیروی انسانی، بذر، آب آبیاری و کود دامی به‌عنوان انرژی تجدیدپذیر و الکتریسیته، کودهای شیمیایی، سوخت دیزلی، آفت‌کش‌ها و ماشین‌آلات جزو انرژی تجدیدناپذیر به‌شمار می‌روند (Yilmaz *et al*., 2005). در مطالعه حاضر، انرژی ورودی برای محصولات موردمطالعه طبق دسته‌بندی‌های مذکور محاسبه گردید.

بررسی شکل‌های مختلف انرژی ورودی نشان داد که در نظام تولید محصولات موردمطالعه، سهم انرژی مستقیم بیش از انرژی غیرمستقیم و سهم انرژی تجدیدناپذیر بیش از انرژی تجدیدپذیر بود. این نتیجه با یافته‌های پژوهش‌گران دیگر نیز مطابقت دارد (Ghasemi Mobtaker *et al*., 2010; Zangeneh *et al*., 2010; Azizi and Heidari, 2013; Khoshnevisan *et al*., 2013). محدودبودن انرژی‌های تجدیدناپذیر از یک‌سو و مشکلات محیط‌زیستی ناشی از مصرف این شکل از انرژی، ضرورت کاهش استفاده از انرژی‌های تجدیدناپذیر و جایگزینی آن‌ها با منابع انرژی تجدیدپذیر را چندین برابر می‌کند. جایگزینی کودهای شیمیایی با کودهای دامی، کود سبز، کودهای زیستی، استفاده از سیستم‌های بدون خاک‌ورزی یا کم‌خاک‌ورزی، مدیریت مصرف آب که با مصرف الکتریسیته یا سوخت‌های فسیلی برای پمپاژ آب آبیاری در ارتباط می‌باشد از جمله مواردی است که می‌تواند در فرایند تولید محصولات زراعی به کاهش سهم انرژی‌های تجدیدناپذیر از کل انرژی ورودی کمک کند.

Table 3. Water, food and energy productivity indices

Scenario	Sub-scenario code	Energy productivity index (Kg/J)	Food productivity index	Water productivity index
Current Situation		28.097	0.873	8.537
S1	S.atd1	11.520	0.575	8.537
	S.atd2	15.173	0.665	8.537
	S.atd3	22.759	0.798	8.537
S2	Scp1	26.716	0.808	8.537
	Scp2	25.292	0.745	8.537
	Scp3	23.825	0.682	8.537
	Scp4	28.100	0.871	8.537
	Scp5	28.102	0.871	8.537
	Scp6	28.105	0.871	8.537
	Scp7	28.979	0.845	8.537
	Scp8	29.971	0.819	8.537
	Scp9	31.096	0.793	8.537
	Scp10	28.195	0.869	8.537
	Scp11	28.293	0.867	8.537
	Scp12	28.393	0.864	8.537
	Scp13	28.538	0.863	8.537
	Scp14	29.001	0.855	8.537
	Scp15	29.487	0.847	8.537
	Scp16	29.440	0.934	8.537
	Scp17	30.744	0.997	8.537
	Scp18	32.012	1.061	8.537
	Scp19	28.095	0.871	8.537
	Scp20	28.090	0.872	8.537
	Scp21	28.095	0.871	8.537
	Scp22	27.309	0.898	8.537
	Scp23	26.601	0.924	8.537
	Scp24	25.960	0.950	8.537
	Scp25	28.001	0.874	8.537
	Scp26	27.906	0.876	8.537
	Scp27	27.812	0.879	8.537
	Scp28	27.677	0.880	8.537
	Scp29	27.275	0.888	8.537
	Scp30	26.891	0.896	8.537
S3	Sr1	33.400	0.895	8.666
	Sr2	28.411	0.877	8.947
	Sr3	31.062	0.883	8.321
S4	Sc1t1	33.797	0.872	11.723
	Sc1t2	33.354	0.859	16.593
	Sc2t1	34.178	0.883	11.839
	Sc2t2	33.679	0.868	18.976
	Sc3t1	34.018	0.878	11.553
	Sc3t2	33.707	0.869	19.431
	Sc4t1	33.845	0.873	11.750
	Sc4t2	33.651	0.868	18.247
	Sc5t1	34.025	0.879	11.966
	Sc5t2	33.714	0.869	21.057
	Sc6t1	34.011	0.878	11.990
	Sc6t2	33.568	0.865	17.923

Table 4. Energy index in the current situation in the production system of studied products in Plasjan region

Energy index	Unit	Wheat	Barley	Canola	Alfalfa	Fodder corn
Output energy	MJ. ha-1	123430	114652.1	51805.2	218561.4	171810
Pure energy	MJ. ha-1	77171.758	75044.916	12992.855	123384.33	111143.99
Energy efficiency	-	2.67	2.89	7.33	2.30	2.83
Special energy	MJ. ha-1	11.564	9.902	17.530	9.517	1.0111
Energy efficiency	MJ. ha-1	0.086	0.101	0.057	0.105	0.989
Forms of energy						
Direct energy	MJ. ha-1	30424	25192.86	26366.6	79165.6	45272.18
Indirect energy	MJ. ha-1	15834.242	14414.324	12445.745	16011.47	15393.83
Renewable energy	MJ. ha-1	9913.5	9707.04	5920.16	24402.2	12315.43
Non-renewable energy	MJ. ha-1	36344.742	29900.144	32892.185	70774.87	48350.58

۳- ۳- ارزیابی چرخه پیوندی آب، غذا و انرژی

پس از معرفی سناریوها و زیرسناریوهای اصلاحی مدیریتی، این زیرسناریوها موردارزیابی چرخه پیوندی آب، غذا و انرژی قرار گرفت. در نهایت از بین ۴۸ زیرسناریوی تعریف‌شده، ۱۰ زیرسناریو از چهار سناریو اصلی مطرح شده جهت افزایش بهره‌وری در سه شاخص آب، غذا و انرژی با در یکسان درنظرگرفتن تأثیرگذاری مثبت آن‌ها در این سه شاخص، انتخاب شدند و با استفاده از روش TOPSIS رتبه‌بندی گردید. روش TOPSIS برای رتبه‌بندی سناریوها به شرح زیر عمل می‌کند.

تعیین معیارها: در این مرحله، معیارهای مورداستفاده برای ارزیابی سناریوها مشخص می‌شوند. این معیارها باید قابل اندازه‌گیری و ارزیابی باشند. مثال‌هایی از معیارها می‌توانند شامل سودآوری، پایداری مالی، ریسک، اثرات زیست‌محیطی و غیره باشند. نرمال‌سازی ماتریس ارزیابی: برای هر سناریو، مقادیر معیارها در ماتریس ارزیابی نرمال‌شده قرار می‌گیرند. این مرحله برای قراردادن مقادیر مختلف معیارها در مقیاس یکسان و قابل مقایسه است. متداول‌ترین روش‌های نرمال‌سازی شامل استفاده از مقیاس زدگی (Min/Max) یا مقیاس‌بندی نرمال است.

ساخت ماتریس ایده‌آل: برای هر معیار، دو راه‌حل ایده‌آل (حالت برتر و حالت پایین) تعیین می‌شود. در حالت برتر، سناریو با مقادیر بیش‌ترین مطلوبیت برای هر معیار در نظر گرفته می‌شود. در حالت پایین، سناریو با مقادیر کم‌ترین مطلوبیت برای هر معیار در نظر گرفته می‌شود. این ماتریس ایده‌آل به‌عنوان مقیاس برای ارزیابی سناریوها در مراحل بعدی استفاده می‌شود.

محاسبه فاصله از راه‌حل ایده‌آل: برای هر سناریو، فاصله اقلیدسی آن با راه‌حل‌های ایده‌آل محاسبه می‌شود. این فاصله نشان می‌دهد که سناریو در چه میزان به راه‌حل ایده‌آل نزدیک است.

محاسبه شاخص تمیزی (Closeness index): در این مرحله، شاخص تمیزی برای هر سناریو محاسبه می‌شود. شاخص تمیزی نشان می‌دهد که هر سناریو چقدر بهتر یا نزدیک‌تر به راه‌حل ایده‌آل است. این شاخص برای هر سناریو براساس فاصله آن از راه‌حل‌های ایده‌آل محاسبه می‌شود.

رتبه‌بندی سناریوها: با محاسبه شاخص تمیزی برای هر سناریو، سناریوها براساس مقدار شاخص تمیزی به‌صورت نزولی رتبه‌بندی می‌شوند. سناریویی که شاخص تمیزی بیش‌تری داشته باشد، رتبه بالاتری دریافت می‌کند.

در این روش سناریویی که دارای امتیاز بالاتری باشد در رتبه اول قرارمی‌گیرد. در جدول (۵) امتیاز و رتبه‌بندی نهایی در این روش ارائه گردیده است. در بین چهار سناریو مطرح‌شده، سناریو سازگاری با کم‌آبی در جایگاه ۱۰ زیرسناریوی منتخب از لحاظ تأثیرگذاری مثبت از جنبه هر سه شاخص بهره‌وری آب، غذا و انرژی قرار نگرفت، زیرا با وجود تأثیر مثبت بهره‌وری آب در دو بخش بهره‌وری غذا و انرژی تأثیر اجرای آن منفی بوده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با توجه به این روش، سناریوی تغییر ارقام گندم با آبیاری کامل بیش‌ترین یا به‌عبارتی مثبت‌ترین تأثیر را در بین چهار سناریوی مطرح‌شده داشت (شکل ۳). با توجه به شرایط محیطی منطقه پیشنهاد استفاده از ارقام مناسب محصول گندم، نه‌تنها منجر به افزایش بهره‌وری آب می‌شود، بلکه دو شاخص بهره‌وری آب و انرژی نیز افزایش یافته است، زیرا با مصرف همان میزان آب و انرژی، افزایش عملکرد محصول را در همان سطح زیرکشت خواهیم‌داشت. باید یادآور شد که این اولویت‌بندی بر مبنای یکسان درنظرگرفتن وزن سه شاخص بهره‌وری آب، غذا و انرژی می‌باشد. در شکل (۴) مقایسه عملکرد اجرای سناریوهای افزایش بهره‌وری با رویکرد پیوندی نشان داده شده‌است. همان‌طورکه پیش‌تر بیان شد زیرسناریوهای تغییر ارقام گندم با آبیاری کامل بیش‌ترین تأثیر مثبت را بر شاخص‌های پیوندی داشته‌است.

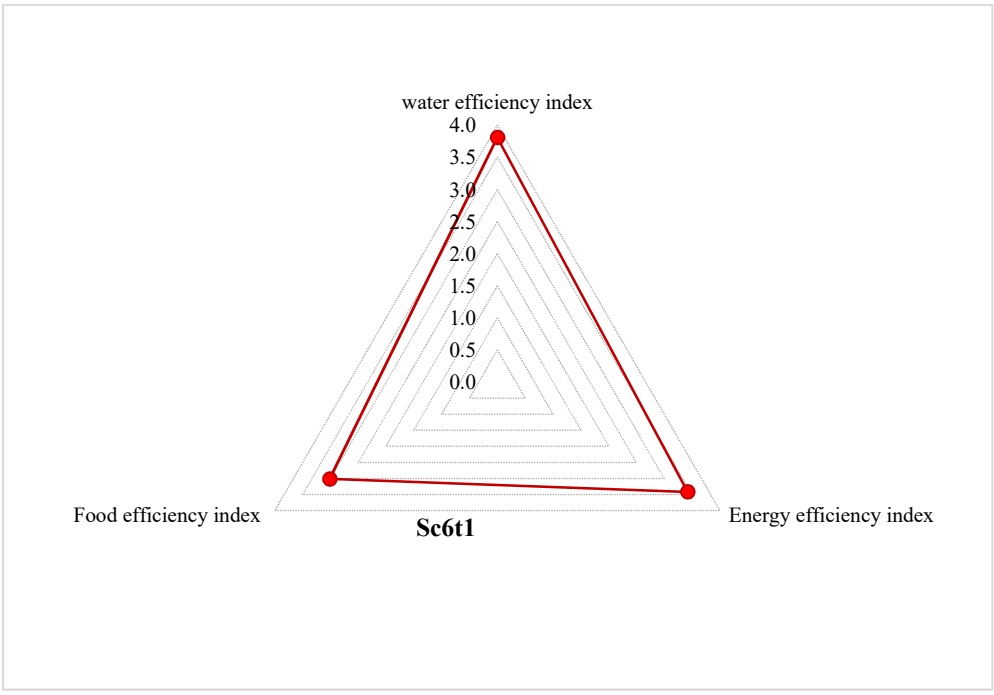

Figure 3. Radar graph of productivity increase scenarios with a NEXUSNEXUS approach

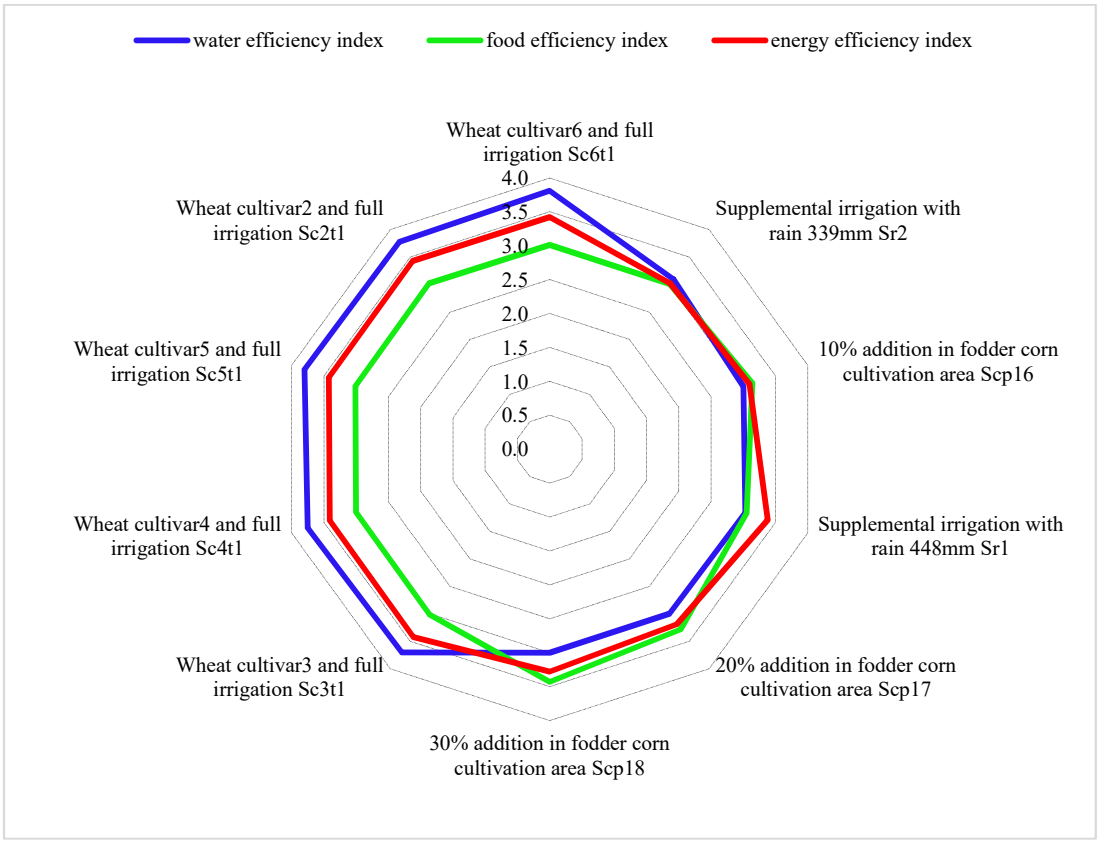

Figure 4. Comparing the performance of scenarios with a positive effect on increasing productivity with a NEXUS approach

براساس درجه اهمیت هریک از شاخص‌ها می‌توان اولویت‌بندی سناریوهای مطرح را تعیین نمود.

Table 5. Prioritization of selected subscenarios with TOPSIS method

Energy efficiency index	Food efficiency index	Water efficiency index	Subscenario code	Scenario description	Subscenarios prioritization
3.809	3.013	3.421	Sc6t1	Wheat cultivar6 and full irrigation	1
3.773	3.024	3.433	Sc2t1	Wheat cultivar2 and full irrigation	2
3.803	3.014	3.422	Sc5t1	Wheat cultivar5 and full irrigation	3
3.753	3.002	3.409	Sc4t1	Wheat cultivar4 and full irrigation	4
3.707	3.013	3.421	Sc3t1	Wheat cultivar3 and full irrigation	5
3.000	3.431	3.279	Scp18	30% addition in fodder corn cultivation area	6
3.000	3.286	3.188	Scp17	20% addition in fodder corn cultivation area	7
3.030	3.051	3.377	Sr1	Supplemental irrigation with rain 448mm	8
3.000	3.142	3.096	Scp16	10% addition in fodder corn cultivation area	9
3.096	3.010	3.022	Sr2	Supplemental irrigation with rain 339mm	10

نتایج به‌دست‌آمده با روش TOPSIS نشان می‌دهد که زیرسناریوی Sc6t1 با مقدار شاخص بهره‌وری آب ۳/۴۲۱، شاخص بهره‌وری غذای ۳/۰۱۳ و شاخص بهره‌وری انرژی ۳/۸۰۹ به‌عنوان اولویت اول برای افزایش بهره‌وری انتخاب می‌گردد.

۴- نتیجه‌گیری

ترکیب شاخص‌های معرف آب، انرژی مصرفی و غذای تولیدی یکی از رویکردهای مدیریتی در شرایط عدم توازن بین منابع و مصارف است که دراین مطالعه با ترکیب دو رویکرد حسابداری آب +WA و NEXUS مورد آنالیز قرار گرفت. بر این اساس با توجه به بیلان آبی در منطقه پلاسجان، ارزیابی از وضعیت تأمین آب با تدوین مجموعه سناریوهای مدیریتی اعمال گردید. ارزیابی سناریوهای مدیریتی با یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره امکان تحلیل دقیق‌تری در انتخاب با افزایش بهره‌وری با رویکرد پیوندی فراهم آورد. به‌عبارتی، با استفاده از رویکرد پیوندی می‌توان اثرات سناریوهای مختلف افزایش بهره‌وری را هم‌زمان در بخش‌های آب، غذا و انرژی موردارزیابی قرار داد. براساس ارزیابی منابع و مصارف آب و هم‌چنین میزان مصرف انرژی معادل برای تولیدات کشاورزی در منطقه موردمطالعه، با توجه به شرایط محیطی منطقه پیشنهاد استفاده از ارقام مناسب محصول گندم، نه تنها سبب افزایش قابل‌ملاحظه بهره‌وری در بخش آب می‌شود بلکه در بخش تولید محصول و انرژی معادل مصرفی نیز سبب افزایش بهره‌وری غذا و انرژی شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که زیرسناریوی Sc6t1 با مقدار شاخص بهره‌وری آب ۳/۴۲۱، شاخص بهره‌وری غذای ۳/۰۱۳ و شاخص بهره‌وری انرژی ۳/۸۰۹ به‌عنوان اولویت اول با روش TOPSIS برگزیده شد.

نتایج این پژوهش نشان داد که درنظرگرفتن رویکرد پیوندی در چارچوب حسابداری آب، به‌عنوان روشی کارآمد برای ارزیابی سیستم تأمین و توزیع آب در بخش کشاورزی است و می‌تواند رویکرد مدیریتی مناسبی را در اختیار متولیان بخش آب قرار دهد.

۵- پی‌نوشت‌ها

1. Nexus Approach
2. Water productivity index
3. Food productivity index
4. Energy productivity index
5. Supplementary irrigation for irrigated and rainfed crops
6. Irrigation regime

۶- تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافعی توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷- منابع

Agricultural Statistics. (2019). Agricultural Statistics Crop Year 2016-2017, Volume one: Crops Products, Ministry of Agriculture Jihad, Deputy of Planning and Economics, ICT Center. (In Persian)

Agricultural Statistics. (2020). Agricultural Statistics Crop Year 2016-2017, Volume one: Crops Products, Ministry of Agriculture Jihad, Deputy of Planning and Economics, ICT Center. (In Persian)

Acaroglu, M. (1998). Energy from biomass, and applications. University of Selcuk, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Turkey. 43 pp.

Journal of Water Productivity and Improvement Methods. (2016). Ministry of Agriculture Jihad. (In Persian)

Alexandratos, N., & Bruinsma, J. (2012). World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision (No. 12-03, p. 4). Rome, FAO: ESA Working paper.

Aquastat. (2010). FAO Aquastat China Country ProVle. fao.org/nr/water/aquastat/countries regions/Iran/index.stm. Rost, S., Gerten, D., Bondeau, A., Lucht, W., Rohwer, J., & Schaphoı, S. (2008). Agricultural green and blue water consumption and its influence on the global water system. *Water Resources Research*, 44.

Azizi, K., & Heidari, S. (2013). A comparative study on energy balance and economical indices in irrigated and dry land barley production systems. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 10, 1019-1028.

Beheshti Tabar, I., Keyhani, A., & Rafiee, S. (2010). Energy balance in Iran's agronomy (1990-2006). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 849-855.

Bizikova, L., Roy, D., Henry, D., Venema, D., & McCandless, M. (2013). The Water–Energy–Food Security Nexus: Towards a practical planning and decision-support framework for landscape investment and risk management. The International Institute for Sustainable Development (IISD), Report. http://www.iisd.org/library/water-energyfood-security-nexus-towards-practical-planning-anddecision-support-framework. Accessed 04 Dec 2014.

Cai, X., Molden, D., Mainuddin, M., Sharma, B., Ahmad, M., & Karimi, P. (2011). Producing more food with less water in a changing world: assessment of water productivity in 10 major river basins. *Water International*. 36, 42-62. doi:10.1080/02508060.2011.542403.

Canakci, M., Topakci, M., Akinci, I., & Ozmerzi, A. (2005). Energy use pattern of some field crops and vegetable production: Case study for Antalya Region, Turkey. *Energy Conversion and Management*, 46, 655-666.

Chalmers, K., Godfrey, J., & Potter, B. (2012). Discipline-Informed Approaches to Water Accounting. *Australian Accounting Review*, 22(3), 275-285.

Chapagain, A. K., & Hoekstra, A. Y. (2011). The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives. *Ecological Economics*, 70(4), 749-758.

Choudhury, I., & Bhattacharya, B. (2018). An assessment of satellite-based agricultural water productivity over the Indian region. *International Journal of Remote Sensing*, 39, 2294-2311.

Cook, S.E., Fisher, M.J., Andersson, M.S., Rubiano, J., & Giordano, M. (2009b). Water, food and livelihoods in river basins. *Water International*, 34, 13-29.

Cosgrove, W.J., & Loucks, D.P. (2015). Water management: Current and future challenges and research directions. *Water Resour. Res*, 66, 17.

Dalin, C., Hanasaki, N., Qiu, H., Mauzerall, D. L., & Rodriguez-Iturbe, I. (2014). Water resources transfer through Chinese interprovincial and foreign food trade. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 111(27), 9774-9779.

De, D., Singh, R., & Chandra, H. (2001). Technological impact on energy consumption in rainfed soybean cultivation in Madhya Pradesh. *Applied Energy*, 70, 193-213.

D'Odorico, P., Carr, J., Laio, F., & Ridol, L. (2012). Spatial organization and drivers of the virtual water trade: a community-structure analysis. Environ. Res. Lett.

Dublin Statement. (1992). The Dublin statement and report of the conference. International conference on water and the environment: development issues for the 21st century, 26-31 January 1992, Dublin, Ireland. Fom: http://www.un-documents.net/h2o-dub.htm.

El-Gafy, I. (2017). Water–food–energy nexus index: analysis of water-energy-food nexus of crop's production system applying the indicators approach. *Applied Water Science*, 7, 2857-2868.

El-Gafy, I. (2017). Water–food–energy nexus index: analysis of water–energy–food nexus of crop's production system applying the indicators approach. *Applied Water Science*, 7, 2857-2868.

Fliervoet, J. M., Geerling, G. W., Mostert, E., & Smits, A. J. M. (2016). Analyzing Collaborative Governance Through Social Network Analysis: A Case Study of River Management Along the Waal River in The Netherlands. *Environmental Management*, 57, 355-367.

Ghasemi Mobtaker, H., Akram, A., & Keyhani, A. (2010). Investigation of energy consumption of perennial Alfalfa Production-Case study: Hamedan province. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 8, 379-381.

Gleik, P. H. (2008). Can California's Water Problems Be Solved. Ecology L.Currents, 35, 71.

Godfray, H.C.J., Beddington, J.R., Crute, I.R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J.F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S.M., & Toulmin, C. (2010) Food security: the challenge of feeding 9 billion people. *Science*, 327, 812-818.

Halbe, J., Pahl-Wostl, C., Lange, M.A., & Velonis, C. (2015). Governance of transitions towards sustainable development–the water–energy–food nexus in Cyprus. *Water International*, 40, (5-6), 877-894.

Hanlon, P., Madel, R., Olson-Sawyer, K., Rabin, K., & Rose, J. (2013). Food, water and energy: know the nexus. GRACE Communications Foundation, Water and Energy Programs, New York.

Hatirli, S.A., Ozkan, B., & Fert, C. (2006). Energy inputs and crop yield relationship in greenhouse tomato production. *Renewable Energy*, 31, 427-438.

Herrhz, J.L., Girth, V.S., & Cerisola, C. (1995). Long-term energy use and economic evaluation of three tillage systems for cereal and legume production in central Spain. *Soil and Tillage Research*, 35, 183-198.

Hoekstra, A. Y., & Chapagain, A. K. (2007). Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern. *Water Resource Manage,* 21, 35-48.

Karimi, P., Bastiaanssen, W. G. M., Molden, D., & Cheema, M. J. M. (2013): Basin-wide water accounting using remote sensing data: the case of transboundary Indus Basin, Hydro/. *Earth Syst. Sci*., 17, 2473-2486, doi: 10.5194/hess-17-2473-2013.

Khoshnevisan, B., Rafiee, S., Omid, M., Yousefi, M., & Movahedi, M. (2013). Modeling of energy consumption and GHG (greenhouse gas) emissions in wheat production in Esfahan province of Iran using artificial neural networks. *Energy*, 52, 333-338.

Kijne, J.W., Barker, R., & Molden, D. (eds) (2003). Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement. Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture Series 1. CAB International, Wallingford, UK in association with International Water Management Institute (IWMI), Colombo.

Kitani, O. (1999). CIGR Handbook of Agricultural Engineering. American Society of Agricultural Engineers, United States of America.

Kivi, Z.R., Javadi, S., Karimi, N., Shahdany, S.M.H., & Moghaddam, H.K. (2022). Performance evaluation and verification of groundwater balance using WA+ as a new water accounting system. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(8), 580.

Klimes, M., Michel, D., Yaari, E., & Restiani, P. (2015). Water diplomacy: the intersect of science, policy and practice. *J. Hydrol*.

Li, F., Lozier, M.S., Danabasoglu, G., Holliday, N.P., Kwon, Y.O., Romanou, A., Yeager, S.G., & Zhang, R. (2019). Local and downstream relationships between Labrador Sea Water volume and North Atlantic meridional overturning circulation variability. *J. Clim*., 32 (13), 3883-3898.

Mandal, K., Saha, K., Ghosh, P., Hati, K., & Bandyopadhyay, K. (2002). Bioenergy and economic analysis of soybeanbased crop production systems in central India. *Biomass and Bioenergy*, 23, 337-345.

McDonnell, R.A. (2008). Challenges for integrated water resources management: how do we provide the knowledge to support truly integrated thinking? *Int. J. Water Resour. Dev*., 24, 131-143.

Mohammadi, A., Rafiee, S., Jafari, A., Keyhani, A., Mousavi-Avval, S.H., & Nonhebel, S. (2014). Energy use efficiency and greenhouse gas emissions of farming systems in north Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 724-733.

Mohammadzadeh, A., Damghani, A.M., Vafabakhsh, J., & Deihimfard, R. (2017). Assessing energy efficiencies, economy, and global warming potential (GWP) effects of major crop production systems in Iran: a case study in East Azerbaijan province. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 16971-16984.

Mohammadzadeh, A., Mahdavi Damghani, A., Vafabakhsh, J., & Deihimfard, R. (2018). Ecological–economic efficiency for alfalfa (*Medicago sativa* L.) and corn silage (*Zea mays* L.) production systems: Maragheh– Bonab plain, east Azerbaijan province. *Journal of Agroecology*, 10, 875-895. (In Persian with English Summary).

Molden, D. (1997). Accounting for water use and productivity. International Irrigation Management Institute, Colombo, Sri Lanka.

Molden, D., & Oweis, T.Y. (2007). Pathways for increasing agricultural water productivity. In Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture, ed. D. Molden, 279-310. London: Earthscan and International Water Management Institute.

Molden, D., Oweis, T., Steduto, P., Bindraban, P., Hanjra, M.A., & Kijne, J. (2010). Improving agricultural water productivity: between optimism and caution. *Agricultural Water Management*, 97, 528-535. doi: 10.1016/j.agwat.2009.03.023.

Mondani, F., Khoramivafa, M., Aleagha, S., & Ghobadi, R. (2015). Assessment of energy flow in irrigated and dry-land wheat farms under different climatic conditions in Kermanshah province. *Journal of Agroecology*, 5, 75-88. (In Persian with English Summary).

Mousavi-Avval, S.H., Rafiee, S., Jafari, A., & Mohammadi, A. (2011a). Energy flow modeling and sensitivity analysis of inputs for canola production in Iran. *Journal of Cleaner Production*, 19, 1464-1470.

Mousavi-Avval, S.H., Rafiee, S., Jafari, A., & Mohammadi, A. (2011b). Improving energy use efficiency of canola production using data envelopment analysis (DEA) approach. *Energy*, 36, 2765-2772.

Nagy, C.N. (1999). Energy coefficients for agriculture inputs in western Canada. Canadian Agricultural Energy End-Use Data Analysis Centre (CAEEDAC). University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada.

Pimentel, D. 1980. Handbook of energy utilization in agriculture. CRC Press, Boca Raton, FL.

Rahimzadeh, Z., Javadi, S., Karimi, N., Hashemi Shahdani, S. M., & Kardan Moghadam, H. (2019). Using the WA+ Accounting Framework in Assessing Evapotranspiration and Water Productivity (Case Study: Plasjan Watershed). *Journal of Water and Soil Research in Iran*, 5(52), 2008-479X. (In Persian)

Rahimzadeh, Z., Javadi, S., Karimi, N., Hashemi Shahdani, S. M., & Kardan Moghadam, H. (2020). The WA+ Water Accounting Approach in Analyzing Water Resources and Water Use Balance (Case Study: Plasjan Watershed). *Journal of Water and Irrigation Management*, 12(1), 188-199. (In Persian)

Rajabi, M.H., Soltani, A., Vahidnia, B., Zeinali, E., & Soltani, E. (2012). Evaluation of fuel consumption in wheat fields in Gorgan. *Environmental Science*, 9, 143-164.

Ray, D.K., Ramankutty, N., Mueller, N.D., West, P.C., & Foley, J.A. (2013). Yield trends are insufficient to double global crop production by 2050. *PLOS ONE*, 8 (6), 1-8.

Reichert, P., Langhans, S.D., Lienert, J., & Schuwirth, N. (2015). The conceptual foundation of environmental decision support. *J. Environ. Manag*., 154, 316-332,

Rost, S., Gerten, D., Bondeau, A., Lucht, W., Rohwer, J., & Schaphoı, S. (2008). Agricultural green and blue water consumption and it's in^uence on the global water system. *Water Resources Research*, 44.

Sahabi, H., Feizi, H., & Amirmoradi, S. (2013). Which crop production system is more efficient in energy use: wheat or barley? *Environment, development and sustainability*, 15, 711-721.

Sahabi, H., Feizi, H., & Karbasi, A. (2016). Is saffron more energy and economic efficient than wheat in crop rotation systems in northeast Iran? *Sustainable Production and Consumption*, 5, 29-35.

Salam, P. A., Pandey, V. P., Shrestha, S., & Anal, A. K. (2017). The need for the nexus approach," in Water-Energy-Food Nexus: Principles and Practices, eds P. Abdul Salam, S. Shrestha, V. Prasad Pandey, and A. K. Anal (Washington, DC: John Wiley and Sons, Inc), 1-10.

Shafiei, M., Majidi, M., Jodoui, A., Salmaniha, S., & Pashtavan, H. (2019). An Introduction to the National Symposium on Unresolved Issues of Water Balance in the Country: The Necessity of Collaboration and Synergy in Addressing the Most Important Component of Iran's Water Resources Management. *Water and Sustainable Development*, 6(2), 83-86. (In Persian)

Stein, C., Ernstson, H., & Barron, J. (2011). A social network approach to analyzing water governance: The case of the Mkindo catchment, Tanzania. *Physics and Chemistry of the Earth Parts A/B/C*, 36, 1085-1092.

Stein, C., Barron, J., & Moss, T. (2014). Governance of the nexus:from buzz words to a strategic action perspective. Nexus Network Think Piece Series, Paper 003.

Scheierling, S. M., Treguer, D. O., Booker, J. F., & Decker, E. (2014). How to assess agricultural water productivity? Looking for water in the agricultural productivity and efficiency literature.

Seekell, D., D'Odorico, P., & Pace, M. (2011). Virtual water transfers unlikely to redress inequality in global water use. *Environ Res Lett*, 6, 455-468.

Shroder, J.F., Eqrar, N., Waizy, H., Ahmadi, H., & Weihs, B.J. (2022). Review of the Geology of Afghanistan and its water resources. *International Geology Review*, 64(7), 1009-1031.

Stafford-Smith, M., Griggs, D., Gaffney, O., Ullah, F., Reyers, B., Kanie, N., Stigson, B., Shrivastava, P., Leach, M., & O'Connell, D. (2017). Integration: the key to implementing the Sustainable Development Goals Sustain. *Sci*., 12, 911-919.

Tsatsarelis, C., & Koundouras, D. (1994). Energetics of baled alfalfa hay production in northern Greece. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 49, 123-130.

Tsatsarelis, C., & Koundouras, D. (1994). Energetics of baled alfalfa hay production in northern Greece. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 49, 123-130.

United Nations Statistics Division. (2012). System of environmental-economic accounting for water, UNSD Pub., N.Y.

United Nations. (2008). System of National Accounts 2008. UN, New York.

United Nations. (2013). World Population Prospects: The 2012 Revision, Key Findings and Advance Tables. Department of Economic and Social Affairs, ESA/P/WP.227. New York: United Nations.

Vafabakhsh, J., & Mohammadzadeh, A. (2019). Energy flow and GHG emissions in major field and horticultural crop production systems (Case study: Sharif Abad plain). *Journal of Agroecology*, 11(2), 365-382. (In Persian)

Vorosmarty, C. J., Green, P., Salisbury, J., & Lammers, R. B. (2000). Global water resources: Vulnerability from climate change and population growth. *Science*, 289(5477), 284-288.

World Bank. (2014). The World Bank Annual Report 2014. Washington, DC. © World Bank. https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/20093 License: CC BY-NC-ND 3.0 IGO.

WWAP, U.W.W.A. (2015). The United Nations World Water Development Report 2015: Water for A Sustainable World. UNESCO Publishing (2015).

Young, R.A. (2005). Determining the economic value of water, concepts and methods, Washington, resources for the future, Discussion paper, 101, 27-35.

Yilmaz, I., Akcaoz, H., & Ozkan, B. (2005). An analysis of energy use and input costs for cotton production in Turkey. *Renewable Energy*, 30, 145-155.

Zangeneh, M., Omid, M., & Akram, A. (2010). A comparative study on energy use and cost analysis of potato production under different farming technologies in Hamadan province of Iran. *Energy*, 35, 2927-2933. (In Persian)