



Publisher: Agricultural Research, Education and Extension Organization

Journal of Water Research in Agriculture

<https://wra.areeo.ac.ir/>

Foresight of Agricultural Water Productivity in Iran by 2040 Using Cross-Impact Matrix Analysis

T. Dehghani, B. Nazari* , and A. Liaghat

PhD Candidate in Irrigation and Drainage, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. tahmine.dehghani@ut.ac.ir

Associate Prof., Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj; Faculty Member at Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. binazari@ut.ac.ir

Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. aliaghat@ut.ac.ir

Article Info

Research Article

Received: October 05, 2025

Accepted: December 07, 2025

Keywords: Water
Policymaking, Water rationing,
Smart meter for wells, Water
users equipment

Corresponding author's email:
binazari@ut.ac.ir

Abstract

Given the growing challenges in water resource utilization, foresight in agricultural water productivity is considered a strategic necessity for enhancing resilience and food security in Iran. This study aimed to design forward-looking scenarios for improving agricultural water productivity by 2040, using the Cross-Impact Balance (CIB) method and ScenarioWizard 5.2 software. The initial matrix included 13 driving variables, each defined in three states, resulting in the extraction of nine coherent scenarios. Scenarios 1, 4, and 7 (pessimistic) contained the highest number of strongly consistent assumptions, indicating their logical coherence. In contrast, scenarios 3, 6, and 9 (optimistic), with total impact scores of 405, 408, and 381 respectively, demonstrated the greatest potential for strategic intervention and are thus considered more promising options for desirable foresight planning. Evaluation of the scenarios revealed that moderate options (second state) received the highest impact scores. For example, policy variable B2, titled “Modernization of 30–60% of farmland equipment with government support,” scored 69.4%, reflecting the system’s preference for realistic pathways and avoidance of extreme or minimal choices. Nevertheless, some optimistic states (third state) also showed significant presence in technological domains. For instance, variables D3 (“Empowerment of 50–80% of agricultural cooperatives and Water Users’ Association (WUA)”), F3 (“Water rationing with periodic control”), and G3 (“Smart meter coverage for 60–90% of wells”) accounted for approximately 38% of the total impact score. Therefore, in areas related to technology, data-driven management, and farmer participation, the system tends to favor innovative and transformative actions. Based on the findings of this study, it is recommended that agricultural water policy focus on a combination of realistic and innovative measures, such as empowering local communities through the adoption of transformative technologies.

Cite this article: Dehghani, T., Nazari, B. and Liaghat, A., 2025. Foresight of Agricultural Water Productivity in Iran by 2040 Using Cross-Impact Matrix Analysis. *Journal of Water Research in Agriculture*, 39 (3), pp.279-301.



DOI: <https://doi.org/10.22092/jwra.2025.370891.1096>



نشریه پژوهش آب در کشاورزی

<https://wra.areeo.ac.ir/>

آینده‌نگاری بهره‌وری آب کشاورزی ایران در افق سال ۱۴۲۰ با استفاده از ماتریس اثرات متقابل

تهمینه دهقانی، بیژن نظری* و عبدالمجید لیاقت

دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

tahmine.dehghani@ut.ac.ir

دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران؛ عضو هیئت علمی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین،

binazari@ut.ac.ir ایران.

استاد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

aliaghat@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
مقاله پژوهشی	
دریافت: ۱۴۰۴/۷/۱۳	
پذیرش: ۱۴۰۴/۹/۱۶	
واژه‌های کلیدی:	
سیاست‌گذاری آب، سهمیه‌بندی آب، پوشش چاه‌ها با کنتور هوشمند، نوسازی تجهیزات آبیاری	با توجه به چالش‌های فزاینده در بهره‌برداری از منابع آب، آینده‌نگاری بهره‌وری آب کشاورزی ضرورتی راهبردی در مسیر تاب‌آوری و امنیت غذایی کشور ایران محسوب می‌شود. این پژوهش با هدف طراحی سناریوهای آینده‌نگر در زمینه ارتقای بهره‌وری آب کشاورزی در افق سال ۱۴۲۰ در ایران، از روش تعادل اثرات متقابل (CIB) و نرم‌افزار ScenarioWizard 5.2 بهره گرفته است. ماتریس اولیه شامل ۱۳ متغیر محرک با سه حالت برای هر متغیر طراحی شد، که در نهایت تعداد نه سناریوی منسجم استخراج گردید. سناریوهای یک، چهار و هفت (بدبینانه) بیشترین تعداد فرضیات با استحکام بالا را داشتند، که نشان‌دهنده‌ی انسجام منطقی این سناریوها است. در مقابل، سناریوهای سه، شش و نه (خوش‌بینانه) با امتیاز کل تأثیرگذاری به ترتیب ۴۰۵، ۴۰۸ و ۳۸۱، بیشترین ظرفیت مداخله‌پذیری را نشان دادند و از این‌رو در مسیر آینده‌نگاری مطلوب، گزینه‌های راهبردی تری تلقی می‌شوند. در ارزیابی سناریوهای مختلف، مشخص شد که گزینه‌های میانه (حالت دوم) بیشترین امتیاز تأثیر را کسب کرده‌اند. از جمله متغیرهای سیاستی مانند B2 با عنوان «نوسازی ۳۰٪ تا ۶۰٪ تجهیزات اراضی با حمایت دولت» با امتیاز ۶۹/۴٪، نشان‌دهنده‌ی ترجیح سامانه به مسیرهای واقع‌گرایانه و پرهیز از انتخاب‌های افراطی یا حداقلی است. با این حال، برخی حالت‌های خوش‌بینانه (حالت سوم) نیز در حوزه‌های فناورانه حضور قابل توجهی در سناریوها دارند. برای نمونه، متغیرهای D3 «توان‌افزایی ۵۰٪ تا ۸۰٪ تعاونی‌های کشاورزی و آب‌بران»، F3 «سهمیه‌بندی آب با کنترل دوره‌ای»، و G3 «پوشش ۶۰٪ تا ۹۰٪ چاه‌ها با کنتور هوشمند» حدود ۳۸٪ از امتیاز تأثیر را به خود اختصاص داده‌اند. لذا، در زمینه‌های مرتبط با فناوری، داده‌محوری و مشارکت کشاورزان، سامانه به اقدامات نوآورانه و تحول‌گرا تمایل دارد. با توجه به نتایج این مطالعه، پیشنهاد می‌شود سیاست‌گذاری آب کشاورزی بر ترکیب اقدامات واقع‌گرایانه و نوآورانه مانند توانمندسازی جوامع محلی با به‌کارگیری فناوری‌های تحول‌گرا متمرکز شود.

استناد: دهقانی، تهمینه، نظری، بیژن، و لیاقت عبدالمجید، ۱۴۰۴. آینده‌نگاری بهره‌وری آب کشاورزی ایران در افق سال ۱۴۲۰ با استفاده از ماتریس اثرات متقابل. نشریه پژوهش آب در کشاورزی، ۳۹(۳)، صص ۲۷۹-۳۰۱.



DOI: <https://doi.org/10.22092/jwra.2025.370891.1096>

مقدمه

بهره‌وری آب کشاورزی به‌عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی در مدیریت پایدار منابع آب، نقشی تعیین‌کننده در امنیت غذایی و تاب‌آوری نظام کشاورزی در برابر تغییرات اقلیمی دارد (رادمهر و همکاران، ۲۰۲۴؛ اخوان گیگلو و همکاران، ۱۴۰۲). بر اساس پیش‌بینی‌ها، رشد جمعیت و توسعه اقتصادی در سه دهه‌ی آینده موجب افزایش ۳۰ تا ۵۰ درصدی تقاضا برای منابع حیاتی آب، انرژی و غذا خواهد شد (رادمهر و همکاران، ۲۰۲۱) که این روند بحران کمبود منابع را تشدید می‌کند. در این میان، توان منابع طبیعی برای پاسخ‌گویی به نیازهای فزاینده‌ی بشر با محدودیت‌های جدی مواجه است؛ به‌ویژه در اثر چالش‌های زیست‌محیطی نوظهور مانند کاهش بهره‌وری آب، افت بازدهی انرژی و تشدید آثار مخرب زیست‌محیطی ناشی از شیوه‌های رایج تولید کشاورزی (اوکوروگبونا و همکاران، ۲۰۱۸).

نتایج مطالعه تولید و همکاران (۲۰۲۲) نشان می‌دهد که سامانه‌های هوشمند مانند حسگرهای رطوبت خاک، تبخیر و تعرق و باران توانسته‌اند بدون افت محسوس در رشد و کیفیت محصول، به‌ترتیب ۲۰ تا ۹۲ درصد، ۲۰ تا ۷۱ درصد و ۷ تا ۵۰ درصد در مصرف آب صرفه‌جویی کنند. همچنین، سامانه‌های مبتنی بر حسگرهای نوری عملکرد دقیق‌تری در ارزیابی تغییرات خاک و گیاه نسبت به اندازه‌گیری‌های میدانی داشته‌اند. در مقابل، روش متعارف آبیاری با کمبود کنترل‌شده، عملکرد محصول را تا کمتر از ۲۵ درصد کاهش می‌دهند، درحالی‌که صرفه‌جویی در مصرف آب تا سقف ۱۳ درصد حاصل می‌شود. استفاده از اینترنت اشیا^۱ و سامانه‌های داده‌محور، امکان مدیریت بهینه منابع آب را فراهم می‌کند و پایداری کشاورزی را در شرایط کم‌آبی و تغییرات اقلیمی تقویت می‌نماید (سنکاری و همکاران، ۲۰۲۴). همچنین توسعه کشاورزی مقاوم به تغییرات اقلیمی^۲ (CRA) و کشاورزی هوشمند اقلیمی^۳ (CSA) با تأکید بر مدیریت دقیق منابع آب، استفاده از

ارقام مقاوم به خشکی و به‌کارگیری فناوری‌های نوین، تاب‌آوری کشاورزی را در برابر شوک‌های اقلیمی افزایش می‌دهد و به تحقق امنیت غذایی کمک می‌کند (سریواستاو و همکاران، ۲۰۲۱).

تحلیل‌ها نشان می‌دهد که ارتقای مدیریت منابع آب کشاورزی مستلزم توجه به سه اقدام اساسی است: ۱- ایجاد پایگاه‌های داده‌ی جامع و بهره‌گیری از سامانه‌های آماری دقیق، نقش تعیین‌کننده‌ای در ارتقای سیاست‌گذاری و مدیریت منابع آب کشاورزی ایفا می‌کند؛ زیرا این زیرساخت‌ها امکان تصمیم‌گیری مبتنی بر داده و شناسایی هدفمند چالش‌های کلیدی را برای سیاست‌گذاران فراهم می‌سازند (داگوستینو و همکاران، ۲۰۲۰؛ بابائیان و همکاران، ۲۰۲۳). ۲- مشارکت مؤثر کشاورزان در مدیریت منابع آب، از طریق شکل‌گیری شبکه‌های محلی، راه‌اندازی تعاونی‌های آب‌بران و ارائه آموزش‌های تخصصی، نقش بسزایی در ارتقای کارایی سامانه‌های آبیاری و بهینه‌سازی بهره‌وری آب ایفا می‌کند (کیمبوا و همکاران، ۲۰۲۵). ۳- توانمندسازی جوامع محلی از طریق آموزش و تجهیز هدفمند، همراه با تقویت سرمایه‌های اجتماعی در میان گروه‌های کشاورزی، زمینه‌ساز پذیرش فناوری‌های نوین و اجرای مؤثر سیاست‌های حفاظتی^۴ است؛ امری که در نهایت به ارتقای تاب‌آوری و پایداری نظام‌های کشاورزی منجر می‌شود (لوبل و فولتون، ۲۰۰۸).

نتایج مطالعه اسفندیاری و همکاران (۲۰۲۴) بر اثربخشی بالاتر سیاست‌های حمایتی نظیر ترغیب به اصلاح الگوی کشت، ارائه آموزش‌های پیوسته و مشارکت فعال کشاورزان در فرآیندهای تصمیم‌گیری، نسبت به رویکردهای صرفاً تحمیلی یا مبتنی بر جریمه تأکید می‌کند؛ چرا که این اقدامات با تقویت انگیزه و پذیرش داوطلبانه، زمینه‌ساز اجرای پایدار و موفق سیاست‌های بخش کشاورزی می‌شوند. بررسی تجارب بین‌المللی نشان می‌دهد که تحقق موفقیت در سیاست‌های مدیریت آب کشاورزی، مستلزم شکل‌گیری همکاری‌های بین‌بخشی، ارتقای

^۳ -Climate-Smart Agriculture

^۴ -Conservation Policies

^۱ -Internet of Things

^۲ -Climate-Resilient Agriculture

شفافیت نهادی و توانمندسازی ظرفیت‌های محلی است (داگوستینو و همکاران، ۲۰۲۰). در مواجهه با تحولات فناورانه، تغییرات اقلیمی و ظهور رویکردهای نوین مدیریتی، طراحی آینده‌ی مطلوب ارتقای بهره‌وری آب کشاورزی مستلزم در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها و تعاملات چندسطحی است. در این مسیر، بهره‌گیری از ابزارهای سناریونویسی ساختاری مانند ماتریس توازن اثرات متقابل^۱ (CIB)، به‌ویژه در حوزه منابع آب کشاورزی، زمینه‌ای نو برای تحلیل هم‌زمان عوامل مؤثر و تدوین سناریوهای منسجم و قابل اتکا فراهم می‌سازد.

آینده‌نگاری این امکان را فراهم می‌سازد که با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها، تعاملات پیچیده و سناریوهای متنوع، چارچوبی تحلیلی برای تصمیم‌گیری‌های بلندمدت فراهم گردد. در این راستا، روش‌هایی مانند CIB و نرم‌افزار ScenarioWizard ابزارهایی مؤثر برای شناسایی سناریوهای سازگار و ارزیابی پیکره‌بندی‌های سیاستی در شرایط پیچیده و چندعاملی به‌شمار می‌روند. رویکردی که با تجمیع عوامل کلیدی، امکان تولید سناریوهای متنوع و شناسایی مسیرهای پژوهشی نو را فراهم می‌سازد (براونر و ووگل، ۲۰۲۵). مطالعه‌ی کمپفنز و همکاران (۲۰۲۵) با تمرکز بر شهر Pully در سوئیس، چارچوبی تحلیلی برای شناسایی نقاط مداخله و حلقه‌های بازخورد در گذار انرژی^۲ از نظام‌های انرژی مبتنی بر سوخت‌های فسیلی به سمت منابع پایدار و کم‌کربن نظیر انرژی خورشیدی، بادی، زیست‌توده و سایر فناوری‌های پاک ارائه کرده است. این پژوهش با بهره‌گیری از روش تحلیل توازن اثرات متقابل (CIB)، نشان می‌دهد که مداخلات هدفمند در شبکه‌های اجتماعی و نهادی، نقش کلیدی در شکل‌گیری مسیرهای مطلوب گذار ایفا می‌کنند و می‌توانند به تحولات غیرخطی و پایدار در سامانه‌های انرژی منجر شوند.

شکری و همکاران (۲۰۲۴) با بهره‌گیری از روش MICMAC به تحلیل متغیرهای کلیدی در حکمرانی هوش مصنوعی پرداختند. این پژوهش با مرور منابع علمی

و سیاستی، شاخص‌هایی مانند شفافیت، اخلاق، مدیریت خطر و پایداری را به‌عنوان عوامل محرک شناسایی کرد. در این مطالعه، سناریوهای راهبردی طراحی‌شده بر اساس ماتریس اثرات متقابل، بر ضرورت بازنگری مستمر سیاست‌ها و همکاری چندبخشی تأکید دارند. همچنین یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهند که حکمرانی مؤثر بر AI^۳ نیازمند رویکردی پویا و جامع است که هم نوآوری را حمایت کند و هم منافع عمومی را حفظ نماید. مطالعه‌ی سعدآبادی و رحیمی راد (۲۰۲۵) با هدف طراحی سناریوهای حکمرانی مشارکتی در توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر^۴ در ایران، از روش CIB برای تحلیل تعاملات میان بازیگران و موانع بهره‌گرفته است. این پژوهش با ترکیب تحلیل شبکه اجتماعی و دلفی فازی، ۱۱ سناریوی متمایز برای بهبود ساختار حکمرانی انرژی ارائه کرده است. یافته‌ها بر نقش مشارکت ذی‌نفعان، کاهش یارانه‌های سوخت فسیلی و جذب سرمایه‌گذاری خصوصی تأکید دارند. نتایج این پژوهش، مسیرهایی عملی برای گذار انرژی در اقتصادهای نفت‌محور با حکمرانی ضعیف پیشنهاد می‌دهد.

با توجه به مقادیر نامطلوب بهره‌وری آب کشاورزی در ایران در مقایسه با میانگین جهانی (نوری و همکاران، ۲۰۲۳)، تشدید اثرات تغییرات اقلیمی و محدودیت‌های نهادی در ایران، بهره‌گیری از رویکردهای سناریونویسی ساختاری مانند CIB می‌تواند افق‌های تازه‌ای برای تحلیل و سیاست‌گذاری فراهم سازد. به‌ویژه در زمینه ارتقای بهره‌وری آب کشاورزی، استفاده از این روش در چارچوبی منسجم و داده‌محور، گامی نو در پاسخ به نیازهای تحلیلی و برنامه‌ریزی آینده‌نگر به‌شمار می‌آید. پیچیدگی‌های روزافزون در مدیریت منابع آب کشاورزی ایجاب می‌کند که از ابزارهای سناریونویسی داده‌محور بهره گرفته شود تا بتوان مسیرهای مطلوب و راهکارهای تطبیقی را شناسایی کرد. در این چارچوب، روش ماتریس اثرات متقابل (CIB) و نرم‌افزار ScenarioWizard امکان تحلیل

^۳ -Artificial Intelligence

^۴ -Renewable Energies

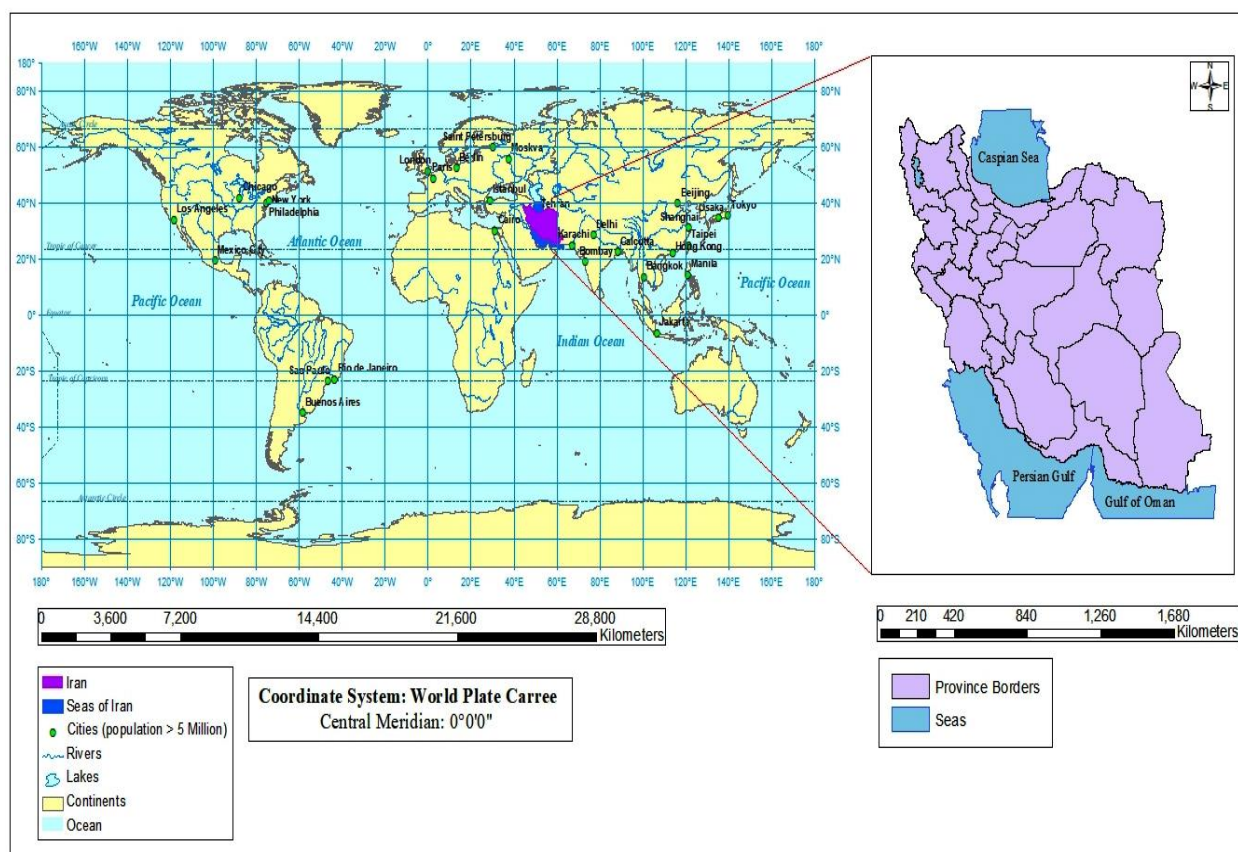
^۱ -Cross-Impact Balance

^۲ -Energy Transition

منطقه مطالعاتی

ایران کشوری پهناور در جنوب‌غربی آسیا و منطقه خاورمیانه است که با مساحتی حدود ۱,۶۴۸,۰۰۰ کیلومتر مربع، دارای تنوع جغرافیایی و اقلیمی قابل توجهی است. این تنوع اقلیمی تأثیر مستقیمی بر منابع آب و کشاورزی دارد و موجب شده است که بخش عمده‌ای از کشور با کم‌آبی و خشک‌سالی‌های مکرر مواجه باشد (عمادالدین و همکاران، ۲۰۱۹). شکل ۱ موقعیت کشور ایران در جهان را نشان می‌دهد.

ساختاری روابط میان عوامل کلیدی و طراحی سناریوهای منسجم را فراهم می‌سازند. مقاله‌ی حاضر با هدف پاسخ به این نیاز و طراحی آینده مطلوب در این زمینه، به بررسی و تحلیل سناریوهای محتمل آینده در افق سال ۱۴۲۰ پرداخته است.



شکل ۱- موقعیت کشور ایران در جهان

است. در گام بعد، ماتریس تحلیل ساختاری^۱ با استفاده از فهرست متغیرهای شناسایی شده برای سال ۱۴۲۰ تشکیل شد. سپس با بهره‌گیری از نرم‌افزار MICMAC، میزان اثرگذاری و اثرپذیری هر متغیر مورد بحث قرار گرفت. هدف این مرحله، شناسایی متغیرهای محرک با اثرگذاری زیاد و اثرپذیری کم به‌عنوان پیشران‌های اصلی آینده است

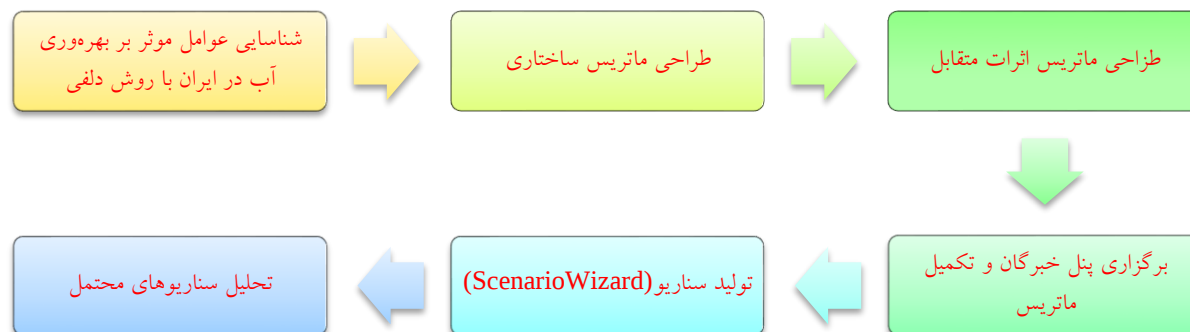
مواد و روش‌ها

فرآیند تحلیل سناریو با شناسایی متغیرهای کلیدی آغاز شد که بر پایه منابع معتبر و نظرات خبرگان از طریق مرور ادبیات، پرسشنامه و روش دلفی انجام گرفت (انگ و همکاران، ۲۰۲۳). هدف این مرحله، استخراج مجموعه‌ای از متغیرهای مؤثر بر بهره‌وری آب کشاورزی

^۱ -Structural Analysis Matrix

که روابط متقابل متغیرها را به صورت کمی برای سناریوسازی آماده کرد (شوایتزر، ۲۰۲۰). شکل ۲، مراحل انجام پژوهش را نشان می دهد.

(براتی و همکاران، ۲۰۱۹). در نهایت، فراماتریس^۱ اثرات متقابل با تمرکز بر متغیرهای کلیدی منتخب تهیه شد؛ این ماتریس پس از پنل خبرگان توسط گروه تحقیق تکمیل شد



شکل ۲- مراحل اجرای پژوهش

تعاملات به صورت کیفی در ماتریس اثرات متقابل ترسیم شده و جهت گیری سامانه به سوی تعادل و انسجام را نشان می دهند (کوسو و گاسنر، ۲۰۰۸).

تشکیل ساختار تحلیل^۴

در نخستین گام از تحلیل CIB، چارچوب مفهومی پژوهش با تعریف توصیف گرهای^۵ و تعیین حالت های ممکن^۶ برای هر یک شکل می گیرد (کوسو و همکاران، ۲۰۲۳). جدول ۱، نمایی از ساختار تحلیل این پژوهش را ارائه می دهد.

روش CIB و نرم افزار ScenarioWizard نخستین بار در فاصله سال های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۱ توسعه یافتند که در مراکز پژوهشی معتبر مانند ZIRN^۲ و ZIRIUS^۳ دانشگاه اشتوتگارت به روزرسانی شده و در تحلیل سناریوهای میان رشته ای مورد استفاده قرار می گیرند (کوسو و همکاران، ۲۰۲۴). CIB روشی کیفی برای تحلیل روابط پیچیده میان عوامل است که با بهره گیری از دانش غیرکمی، رفتار سامانه را به صورت منسجم تصویرسازی می کند. هدف اصلی در تحلیل CIB، تولید وضعیت های منسجم و محتمل سامانه بر اساس تعاملات تقویت کننده بین توصیف گرهای کلیدی است (کوسو، ۲۰۱۵). این

4 -Analysis Structure
5 -Descriptor
6 -Assumption

1 -Hypermatrix
2 -Zentrum für Interdisziplinäre Risiko- und Nachhaltigkeitsforschung
3 -Zentrum für Interdisziplinäre Risiko- und Innovationsforschung der Universität Stuttgart

جدول ۱- ساختار تحلیل ارتقای بهره‌وری آب کشاورزی

متغیر محرک	کد	فرضیه ۱	کد	فرضیه ۲	کد	فرضیه ۳	کد
وقوع موج‌های گرمای شدید	A	افزایش شدید (بیش از ۶۰٪)	A ₁	افزایش متوسط (۳۰ تا ۶۰٪)	A ₂	افزایش ملایم (۰ تا ۳۰٪)	A ₃
حمایت دولت از نوسازی تجهیزات سنتی	B	پوشش محدود (کمتر از ۳۰٪ اراضی)	B ₁	حمایت متوسط (پوشش ۳۰-۶۰٪)	B ₂	حمایت گسترده (بیش از ۶۰٪) + خدمات فنی	B ₃
توانمندسازی جوامع محلی در مدیریت منابع آب	C	اقدام حداقلی دولت	C ₁	اقدام محدود دولت	C ₂	اقدام مؤثر دولت	C ₃
آموزش و تجهیز تعاونی‌ها برای آبیاری پایدار	D	پوشش حداقلی (کمتر از ۲۰٪)	D ₁	پوشش محدود (۲۰ تا ۵۰٪)	D ₂	پوشش گسترده (۵۰ تا ۸۰٪)	D ₃
مشوق‌های مالیاتی برای روش‌های کم‌آب‌بر در کشاورزی	E	بدون اقدام یا محدود (۵ تا ۱۰٪)	E ₁	اقدام متوسط (۱۵ تا ۲۵٪)	E ₂	اقدام گسترده (بیش از ۲۵٪)	E ₃
سهمیه‌بندی آب بر اساس اقلیم	F	بدون سهمیه	F ₁	سهمیه کنترل نشده	F ₂	سهمیه اجباری با پایش دوره‌ای	F ₃
نصب کنتورهای هوشمند برداشت آب در چاه‌ها	G	پوشش کم (کمتر از ۲۰ درصد)	G ₁	پوشش متوسط (۲۰ تا ۶۰ درصد)	G ₂	پوشش بالا (۶۰ تا ۹۰٪)	G ₃
ایجاد پایگاه داده ملی بهره‌وری آب کشاورزی	H	بدون پایگاه داده ملی	H ₁	نسخه اولیه با دسترسی محدود	H ₂	دسترسی پژوهشگران به داده‌های به‌روز	H ₃
ارائه شاخص‌های ملی و منطقه‌ای بهره‌وری آب	I	بدون گزارش‌دهی منظم	I ₁	گزارش سالانه در سطح ملی	I ₂	داشبورد آنلاین بر اساس محصول و منطقه	I ₃
استقرار سامانه‌های برخط پایش منابع آب	J	پایش محدود در نقاط نمونه	J ₁	سامانه هوشمند منطقه‌ای	J ₂	سامانه ملی یکپارچه با سنجش از دور	J ₃
انتشار عمومی داده‌های منابع آب	K	دسترسی محدود و غیرعمومی	K ₁	دسترسی به داده‌های عمومی بدون داده خام	K ₂	دسترسی کامل به داده‌ها و مستندات	K ₃
واگذاری مدیریت منابع آب به نهادهای محلی	L	مدیریت متمرکز	L ₁	واگذاری آزمایشی در مناطق منتخب	L ₂	مدیریت محلی	L ₃
مشارکت دادن کشاورزان در پایش آبیاری	M	بدون مشارکت	M ₁	مشارکت محدود داوطلبانه در مزارع نمونه	M ₂	هم‌پایش گسترده با مشوق‌ها و ابزارهای میدانی	M ₃

آماده‌سازی ماتریس اثرات متقابل

داده‌های این ماتریس در بازه ۳- تا ۳+ (از محدودکننده شدید یا تقویت کننده قوی) تنظیم شده و در قالب فراماتریس شامل نام کامل و حالت توصیف‌گرها در ستون‌ها و نسخه‌های اختصاری آن‌ها در ردیف بالا ارائه می‌شود (ناویر و همکاران، ۲۰۲۳). برای تشکیل ماتریس

اثرات متقابل، از یک پنل خبره استفاده شد. با توجه به ماهیت تخصصی موضوع این مطالعه و لزوم اشراف به مراحل پیشین پژوهش برای تکمیل ماتریس اثرات متقابل، تعداد اعضای پنل سه نفر در نظر گرفته شد. این تصمیم مبتنی بر راهنمای روش‌شناختی لینستون و توروف (۱۹۷۵) و توصیه حسن و همکاران (۲۰۰۰) بود که بیان می‌دارد در

پرکردن مستقل ماتریس، تجمیع نتایج و برگزاری جلسات بحث برای رفع اختلاف نظر(ها) به کار گرفته شد. جدول ۲، بخشی از داده‌های گردآوری شده از پنل خبرگان را در قالب بخشی از این ماتریس ارائه می‌کند.

مواردی که کارشناسان باید بر تمام اجزای پژوهش اشراف داشته باشند، پنل‌های کوچک‌تر از چهار تا پنج نفر نیز می‌توانند کافی باشند. در مطالعه حاضر اعضای پنل دارای تخصص مکمل در ابعاد مختلف مسئله بودند. برای افزایش اعتبار و رسیدن به اجماع، فرآیند چندمرحله‌ای (شامل

جدول ۲- بخشی از ماتریس اثرات متقابل برگرفته از پنل خبرگان

	A	A	A	B	B	B	C	C	C	D	D	D	E	E	E	F	F	F
	A ₁	A ₂	A ₃	B ₁	B ₂	B ₃	C ₁	C ₂	C ₃	D ₁	D ₂	D ₃	E ₁	E ₂	E ₃	F ₁	F ₂	F ₃
A																		
A ₁				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
A ₂				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
A ₃				3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1
B																		
B ₁	1	1	1				3	-2	-3	3	-2	-3	3	-2	-3	3	-2	-3
B ₂	0	0	0				-1	2	-1	-1	2	-1	-1	2	-1	-1	2	-1
B ₃	-1	-1	-1				-3	-2	3	-3	-2	3	-3	-2	3	-3	-2	3
C																		
C ₁	1	1	1	2	-1	-2				2	-1	-2	2	-1	-2	2	-1	-2
C ₂	0	0	0	-1	2	-1				-1	2	-1	-1	2	-1	-1	2	-1
C ₃	-1	-1	-1	-2	1	3				-2	1	3	-2	1	3	-2	1	3
D																		
D ₁	1	1	1	2	-1	-2	2	-1	-2				2	-1	-2	2	-1	-2
D ₂	0	0	0	-1	2	-1	-1	2	-1				-1	2	-1	-1	2	-1
D ₃	-1	-1	-1	-2	1	3	-2	1	3				-2	1	3	-2	1	3

ماتریس و مستقل از سناریوها تعیین می‌کند (کوسو و گاسنر، ۲۰۰۸). در نمودار اختصاصی، موقعیت توصیف‌گرها بسته به ترکیب سناریو تغییر می‌کند و نشان می‌دهد نقش هر عامل به زمینه و تعامل با سایر عوامل وابسته است (وایمر-یهله، ۲۰۲۳). برای مثال، توصیف‌گری که در نمودار عمومی فعال بوده، ممکن است در سناریوی خاص منفعل ظاهر شود و یا برعکس.

توازن اثرات^۲ متقابل یک سناریو و استحکام فرضیات سناریو^۳

در یک سناریو با نماد u ، برای هر توصیف‌گر که با شاخص i مشخص می‌شود و دارای حالات یک تا N است، یک وضعیت u_i انتخاب می‌شود. برای محاسبه مجموع اثرات سناریوی u بر سناریوی v ، از مفهوم ضرب داخلی^۴ (رابطه ۱) استفاده می‌شود (وایمر-یهله، ۲۰۰۹). ضرب داخلی برابر است با مجموع امتیازهای اثر (TIS)^۵ متقاطع بین وضعیت‌های متناظر توصیف‌گرهای دو

نمودار فعال-منفعل^۱ عمومی و اختصاصی

نمودار فعال-منفعل عمومی یکی از ابزارهای تحلیلی بنیادین در چارچوب روش CIB محسوب می‌شود که به منظور ارزیابی نقش نسبی توصیف‌گرها در ساختار سامانه و سنجش شدت تأثیرات ساختاری میان آن‌ها به کار گرفته می‌شود. در چارچوب تحلیل تأثیرات متقابل، برای سنجش شدت تأثیر توصیف‌گر A بر توصیف‌گر B ، ابتدا کلیه مقادیر عددی ثبت شده در بخش مربوط به قضاوت‌های $A \rightarrow B$ استخراج می‌گردد (کوسو و گاسنر، ۲۰۰۸). با محاسبه میانگین قدر مطلق مقادیر، شاخص کمی تأثیر هر عامل بر دیگری به دست می‌آید؛ سپس با تعیین مجموع تأثیرگذاری و تأثیرپذیری توصیف‌گرها، موقعیت آن‌ها در شبکه اثرات متقابل به صورت نمودار دوبعدی نمایش داده می‌شود (وایمر-یهله، ۲۰۲۳).

نمودار اختصاصی فعال-منفعل مجموع تأثیرات مثبت هر عامل را نسبت به سایر عوامل نشان می‌دهد؛ در حالی که نمودار عمومی نقش هر توصیف‌گر را بر پایه کل

4 -Inner product
5 -Total impact score

1 -Active-Passive Diagram/System grid
2 -Impact balance
3 -Firmness of scenario assumptions

سناریوی u و v که به‌عنوان یک شاخص جهانی^۱ برای سنجش میزان انسجام و معقول بودن سناریو به‌کار می‌رود. رابطه (۱) نشان‌دهنده ضرب داخلی بین دو سناریوی u و v است (کمپ-بندیکت و همکاران، ۲۰۱۹):

$$\langle u | v \rangle \equiv \sum_{i,j=1}^N C_{ij}(u_i, v_j) \quad (1)$$

در رابطه (۱)، u و v بردارهای وضعیت‌های انتخاب‌شده برای سناریوهای u و v ، شامل N توصیف‌گر و هر $C_{ij}(u_i, v_j)$ یک سلول قضاوت^۲ یا امتیاز اثر متقابل است. سلول قضاوت میزان تأثیر توصیف‌گر i در وضعیت u_i بر توصیف‌گر j در وضعیت v_j را نشان می‌دهد. این مقدار بیانگر درجه‌ای است که در آن، وضعیت u_i در سناریوی u موجب تقویت یا تضعیف وضعیت v_j در سناریوی v می‌شود. رابطه (۱) نشان می‌دهد سناریوی u تا چه حد با سناریوی v هم‌راستا، تقویت‌کننده یا مخالف است. ضرب داخلی یک سناریو با خودش، معیار سنجش انسجام درونی آن سناریو محسوب می‌شود. جمع‌های جزئی^۳ نسبت به شاخص i در معادله (۱)، امتیازهای اثر $\theta_{jr}(u)$ را تشکیل می‌دهند، که در آن $r = v_j$ است (کمپ-بندیکت و همکاران، ۲۰۱۹):

$$\theta_{jr}(u) \equiv \sum_{i=1}^N C_{ij}(u_i, r) \quad (2)$$

$\theta_{jr}(u)$ اثر تجمیعی سایر اجزای سناریوی u بر یک وضعیت خاص r از توصیف‌گر j را محاسبه می‌کند. اگر هیچیک از حالت‌های جایگزین تأثیر بیشتری نسبت به حالت انتخاب‌شده نداشته باشند، آن حالت «سازگار» است و اصل انسجام^۴ رعایت شده است؛ در غیر این‌صورت، به‌عنوان «ناسازگار» شناخته‌شده و در فرم تحلیل با زمینه قرمز مشخص می‌گردد (وایمر-یهله، ۲۰۱۳). این امتیاز بر پایه فرم توازن تأثیرات محاسبه می‌شود که در آن میزان تأثیر هر حالت از سایر اجزای سناریو ارزیابی می‌گردد؛ بنابراین در روش CIB، سناریوهای منسجم یا سازگار باید شرط زیر را محقق کنند (وایمر-یهله، ۲۰۰۹):

$$K_0 = \{u: \theta_{ir}(u) \geq \theta_{ir'}(u), \forall i \in [1, N], r' \neq r = u_i\} \quad (3)$$

یعنی برای هر توصیف‌گر i وضعیت انتخاب‌شده r باید بیشترین امتیاز اثر تجمیعی را نسبت به سایر وضعیت‌های ممکن r' داشته باشد. این شرط تعیین می‌کند که آیا سناریوی u از نظر ساختاری منسجم است و می‌تواند در مجموعه سناریوهای معتبر K_0 قرار گیرد. اگر فرضیات انتخاب‌شده با سایر بخش‌های سناریو در تناقض باشند، این ناسازگاری‌ها در فرم توازن تأثیرات نمایان می‌شوند. در صورت عدم وجود تضاد، سناریو منسجم و قابل اتکا خواهد بود (وایمر-یهله، ۲۰۰۹). در واقع هر سناریوی منسجم مجموعه‌ای از مفروضاتی است که به‌طور متقابل یکدیگر را تقویت می‌کنند. با اعمال جمع روی شاخص j و استفاده از تعریف ضرب داخلی در معادله (۱)، هر سناریوی منسجم u در مجموعه K_0 باید شرط زیر را برآورده کند (بیشاپ و همکاران، ۲۰۰۷).

$$\langle u | u \rangle \geq \langle u | v \rangle, \forall v \neq u \quad (4)$$

به این معنا که اثر درونی سناریوی u (اثر آن بر خودش) باید بزرگ‌تر یا مساوی با اثر آن بر هر سناریوی v باشد. این شرط نشان می‌دهد که سناریوی u نه‌تنها منسجم است، بلکه از نظر تأثیرگذاری نیز پایدار و تقویت‌کننده است.

در روش CIB برای هر توصیف‌گر، میزان انسجام^۵ به‌صورت مستقل محاسبه می‌شود. این مقدار برابر است با تفاوت میان امتیاز اثر وضعیت انتخاب‌شده آن توصیف‌گر و بیشترین امتیاز اثر در میان سایر وضعیت‌های ممکن همان توصیف‌گر (رابطه ۲). انسجام کلی یک سناریو بر اساس ضعیف‌ترین توصیف‌گر آن سنجیده می‌شود (کمپ-بندیکت و همکاران، ۲۰۱۹)؛ به‌عبارت دیگر، انسجام سناریو برابر است با کمترین مقدار انسجام در میان تمام توصیف‌گرهای موجود در آن سناریو (رابطه ۳). اگر این مقدار منفی باشد، سناریو ناسازگار در نظر گرفته می‌شود؛ و اگر صفر یا مثبت باشد، سناریو منسجم است (کوسو و همکاران، ۲۰۲۲).

4 -Principle of consistency
5 -Consistency measure

1 -Global measure
2 -Judgement cell
3 -Partial sums

بررسی آمار سوگیری^۱

آمار سوگیری نشان می‌دهد که برخی حالت‌های یک توصیف‌گر در سناریوهای مختلف به‌طور مکرر بیشترین امتیاز تأثیر را کسب می‌کنند، در حالی‌که سایر حالت‌ها کمتر دیده می‌شوند. این سوگیری ناشی از نحوه تخصیص قضاوت‌ها در ماتریس است، نه تعاملات واقعی سامانه (کوسو و همکاران، ۲۰۲۲). در موارد شدید، ممکن است یک حالت به‌طور کامل حذف و ممنوع^۲ شود. همچنین چون چند حالت می‌توانند هم‌زمان بیشترین امتیاز را داشته باشند، مجموع سطری آمار سوگیری ممکن است از ۱۰۰ درصد فراتر رود (وایمر-یهله، ۲۰۲۳).

A وقوع موج‌های گرمای شدید

B حمایت دولت از نوسازی تجهیزات سنتی

C توانمندسازی جوامع محلی در مدیریت منابع آب

D آموزش و تجهیز تعاونی‌ها برای آبیاری پایدار
E مشوق‌های مالیاتی برای روش‌های کم‌آب‌بر در کشاورزی

F سهمیه‌بندی آب بر اساس اقلیم

G نصب کنتورهای هوشمند برداشت آب در چاه‌ها

H ایجاد پایگاه داده ملی بهره‌وری آب کشاورزی

I ارائه شاخص‌های ملی و منطقه‌ای بهره‌وری آب

J استقرار سامانه‌های برخط پایش منابع آب

K انتشار عمومی داده‌های منابع آب

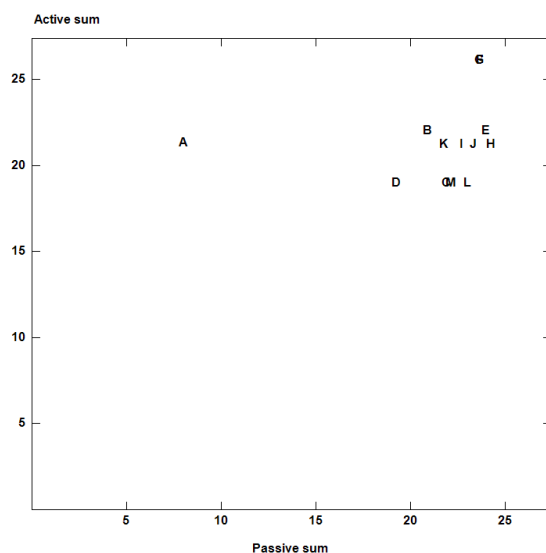
L واگذاری مدیریت منابع آب به نهادهای محلی

M مشارکت دادن کشاورزان در پایش آبیاری

نتایج و بحث

نمودار فعال-منفعل^۳ عمومی

نمودار فعال-منفعل ارائه‌شده در شکل ۳ نمایشی تحلیلی از موقعیت نسبی ۱۳ اقدام یا عامل کلیدی مرتبط با مدیریت منابع آب کشاورزی و بهره‌وری آب در یک سامانه سناریویی را به تصویر می‌کشد. هر عنصر با یک حرف مشخص شده و موقعیت آن در صفحه مختصاتی بر اساس مجموع تأثیرگذاری (محور عمودی) و مجموع تأثیرپذیری (محور افقی) تعیین شده است.



شکل ۳- نمودار فعال-منفعل عمومی نظام بهره‌وری آب کشاورزی

سطح کلان رخ می‌دهند و در بازه زمانی ۱۵ ساله تحلیل، امکان مداخله یا مدیریت مستقیم بر آن‌ها محدود است، این متغیر بیشتر به‌عنوان یک عامل زمینه‌ای^۴ در نظر گرفته می‌شود، یعنی ورودی‌ای که شرایط کلی سامانه را شکل می‌دهد، بی‌آنکه خود در تعاملات درون‌سامانه‌ای کاملاً قابل کنترل باشد. چنین متغیری معمولاً به‌عنوان یک محرک کلیدی در شکل‌گیری پویایی‌های سامانه شناخته می‌شود. موج‌های گرما می‌توانند به‌طور مستقیم بر بهره‌وری

قرارگیری متغیر A «وقوع موج‌های گرما»، در ناحیه بالا چپ نمودار فعال-منفعل نشان‌دهنده جایگاه راهبردی و اثرگذار آن در ساختار تحلیلی سامانه است. این موقعیت حاکی از آن است که این عامل تأثیر قابل‌توجهی بر سایر توصیف‌گرها دارد، اما خود به‌طور مستقیم تحت تأثیر آن‌ها قرار نمی‌گیرد. بااین‌حال، این استقلال نسبی نه به‌معنای مصونیت از تأثیرات، بلکه ناشی از ماهیت بیرونی و کلان‌مقیاس این پدیده است. از آنجاکه موج‌های گرما در

3 -Active-Passive Diagram

4 -Contextual

1 -Bias statistics

2 -Forbidden states

کشاورزی، الگوهای مصرف آب و نیاز به سیاست‌های سازگارکننده تأثیر بگذارند (لسک و همکاران، ۲۰۲۲). این پدیده همچنین الگوهای مصرف آب را تغییر می‌دهد و نیاز به استفاده از فناوری‌های نوین آبیاری و مدیریت منابع آب را افزایش می‌دهند (کریمی و همکاران، ۲۰۱۸).

بخش بالا-راست نمودار که بیشترین تراکم متغیرها را دارد، شامل اقداماتی است که هم تأثیرگذار و هم تأثیرپذیرند. برای مثال، مواردی مانند «نصب کنتورهای هوشمند -G»، «ایجاد پایگاه داده ملی بهره‌وری آب -H» و «توسعه سامانه‌های پایش منابع آب -J» در این ناحیه قرار گرفته‌اند. این موقعیت نشان می‌دهد که این اقدامات در تعاملات نقش دوگانه دارند و با رفتارهای پیچیده و پویایی‌های چندلایه در سامانه مرتبط‌اند. نتایج مطالعات گوپتا و همکاران (۲۰۲۰) و سیرموس و همکاران (۲۰۲۳) تأکید می‌کند که نصب کنتورهای هوشمند و سامانه‌های پایش برخلاف جمع‌آوری داده‌های دقیق و سریع، امکان مدیریت بهینه منابع آب، کاهش برداشت بی‌رویه و افزایش بهره‌وری را فراهم می‌کنند و در عین حال، خود تحت تأثیر سیاست‌ها، فناوری‌های جدید و رفتار بهره‌برداران قرار دارند. همچنین ایجاد پایگاه داده ملی بهره‌وری آب کشاورزی و توسعه سامانه‌های پایش منابع آب نیز با فراهم کردن زیرساخت داده‌ای و اطلاعاتی، تصمیم‌گیری‌های

مدیریتی را بهبود می‌بخشد و به‌طور متقابل از تغییرات سیاستی، پیشرفت‌های فناورانه و نیازهای منطقه‌ای تأثیر می‌پذیرند (گارسیا و همکاران، ۲۰۲۰؛ گوپتا و همکاران، ۲۰۲۰).

بررسی توازن تأثیرات در یک سناریوی ناسازگار

شکل ۴، فرم توازن تأثیر سناریوی $Z = [A_1 B_2 C_1 D_2 E_1 F_1 G_2 H_1 I_1 J_1 K_1 L_1]$ را نشان می‌دهد. مجموع ردیف‌های برجسته‌شده، ترازهای اثر سناریو را تشکیل می‌دهد که در ردیف «تراز»^۱ نمایش داده می‌شود. در فرم محاسبه توازن تأثیرات، توازن‌های تأثیر ناسازگار با پس‌زمینه قرمز در ردیف سوم مشخص شده‌اند. اعداد مثبت در ردیف توازن تأثیرات نشان‌دهنده آن است که مجموع تأثیر آن حالت، بیشترین مقدار در میان سایر حالات توصیف‌گر بوده و بنابراین با معیار «انسجام قوی» مطابقت دارد. عدد صفر به معنای مجموع تأثیر حالت انتخاب‌شده کمتر از مقدار بیشینه اما همچنان مثبت است؛ در این حالت، فرضیه مورد نظر واجد شرط «انسجام ضعیف» است. اعداد منفی بیانگر مجموع تأثیر منفی است و نشان می‌دهد که حالت مربوطه فاقد هر دو نوع انسجام بوده و از پشتیبانی ساختاری برخوردار نیست (وایمر-پهله، ۲۰۲۳).

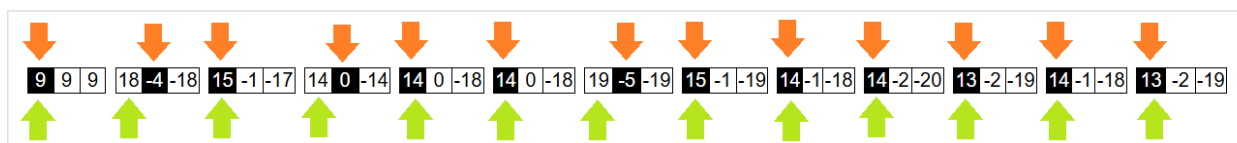
Impact balances

Selection:																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		</
------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	----

شکل ۴- فرم محاسبه توازن تأثیرات یک سناریو

شناسایی شده‌اند. این توصیف‌گرها شامل فرض‌های «نوسازی در ۳۰-۶۰ درصد اراضی»، «تجهیز محدود تعاونی‌ها در ۲۰-۵۰ درصد اراضی» و «نصب کنتور هوشمند در ۲۰-۶۰ درصد چاه‌ها» هستند که در تضاد با سایر اجزای سناریو قرار دارند و از سوی آن‌ها پشتیبانی نمی‌شوند.

در شکل ۵، سناریوی ناسازگار [A₁ B₂ C₁ D₂ E₁ F₁ G₂ H₁ I₁ J₁ K₁ L₁ M₁] نمایش داده شده است. در این شکل، اعداد نمایانگر تراز اثر تمام فرضیه‌ها و فلش‌های نارنجی و سبز به ترتیب بیانگر فرضیات این سناریو و بیشترین مقدار تراز اثر می‌باشند. در این سناریو، توصیف‌گرهای B₂ و D₂ به‌عنوان فرض‌های ناسازگار



شکل ۵- سناریو ناسازگار [A₁ B₂ C₁ D₂ E₁ F₁ G₂ H₁ I₁ J₁ K₁ L₁]

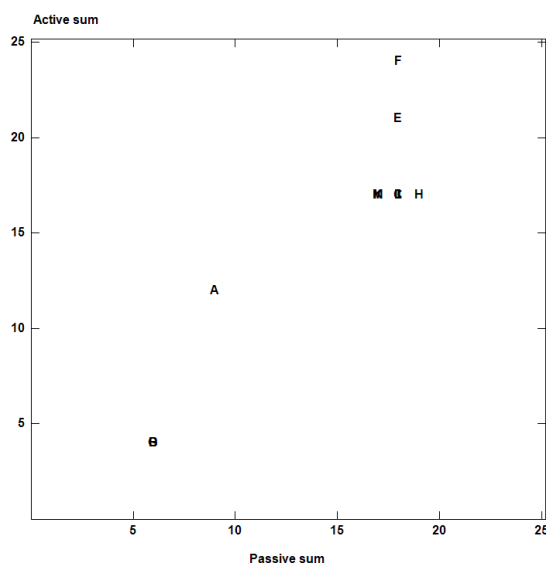
کنتورهای هوشمند و بهره‌گیری از سامانه‌های پایش و کنترل لحظه‌ای در چاه‌ها، مدیریت مؤثر منابع آب زیرزمینی و کاهش هدررفت را ممکن می‌سازد (بوعلی و همکاران، ۲۰۲۱؛ ات-طیعی و همکاران، ۲۰۲۴). با این حال، تحقق موفقیت‌آمیز این فناوری‌ها نیازمند حمایت دولتی، آموزش هدفمند و مشارکت فعال تعاونی‌هاست؛ در غیر این صورت، فقدان پشتیبانی کافی یا ضعف در پوشش آموزشی

بررسی‌ها نشان می‌دهد که به‌روزرسانی سامانه‌های سنتی آبیاری با بهره‌گیری از فناوری‌های هوشمند نظیر اینترنت اشیا، کنترل‌کننده‌های فازی و زیرساخت‌های ابری، می‌تواند موجب افزایش بهره‌وری مصرف آب و انرژی شود و در عین حال میزان استفاده از منابع را کاهش دهد (کریشان و همکاران، ۲۰۲۰؛ ات-طیعی و همکاران، ۲۰۲۴؛ عبیدین و همکاران، ۲۰۲۲). نصب

و تجهیز تعاونی‌ها می‌تواند به‌عنوان عوامل ناسازگار، مانعی جدی در مسیر اجرای مؤثر این سناریوها باشد (قاضی و همکاران، ۲۰۲۲؛ ات-طیپی و همکاران، ۲۰۲۴). طبق نتایج پژوهش علی و همکاران (۲۰۲۵) دستیابی کامل به مزایای نوسازی آبیاری و کشاورزی هوشمند مستلزم سیاست‌های حمایتی، آموزش گسترده و تعامل مؤثر میان دولت، تعاونی‌ها و کشاورزان است.

نمودار فعال-منفعل اختصاصی شکل ۶، موقعیت توصیف‌گرهای سناریوی $[A_1 B_2 C_1 D_2 E_1 F_1 G_2 H_1 I_1 J_1 K_1 L_1 M]$ را در فضای تأثیرگذاری و تأثیرپذیری نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، مشخص می‌شود که هر توصیف‌گر تا چه اندازه بر سایر اجزا تأثیر می‌گذارد و تا چه حد از آن‌ها تأثیر می‌پذیرد. در نمودار فعال-منفعل اختصاصی سناریوی مورد نظر، متغیر A (وقوع موج‌های گرما) در میانه نمودار و متمایل به لبه چپ قرار گرفته است. این موقعیت نشان می‌دهد که اگرچه موج‌های گرما نقش محرک دارند، اما شدت تأثیر آن‌ها در این سناریوی خاص نسبت به ساختار عمومی تحلیل تعدیل شده و در تعامل با سایر متغیرها به‌صورت غیرمستقیم عمل می‌کنند. قرارگیری متغیر

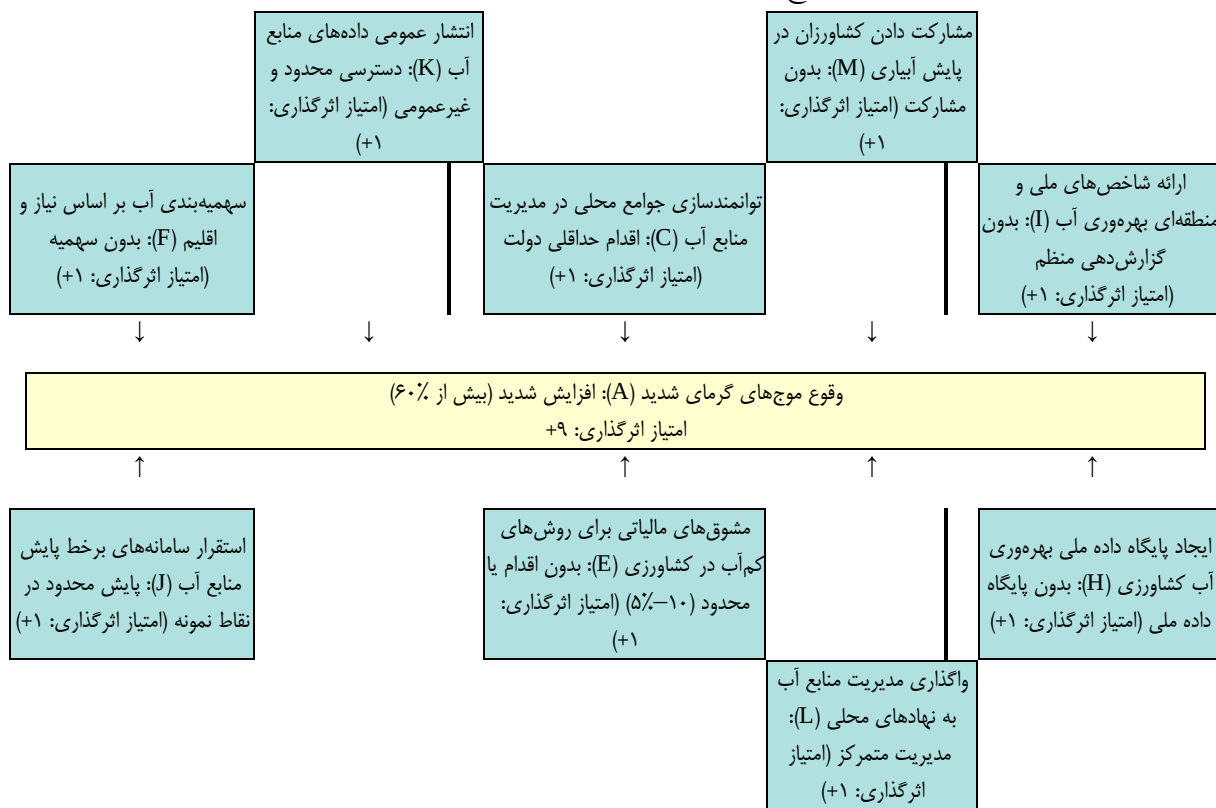
B (حمایت دولتی برای نوسازی تجهیزات سنتی مزارع) در ناحیه پایین-چپ نمودار فعال-منفعل نشان‌دهنده کاهش نقش راهبردی آن نسبت به ساختار عمومی تحلیل است. این موقعیت بیانگر آن است که متغیر B در این سناریو خاص، هم اثرگذاری محدودی بر سایر توصیف‌گرها دارد و هم خود کمتر تحت تأثیر عوامل دیگر قرار می‌گیرد. در حالی که در نمودار فعال-منفعل عمومی، همین متغیر در ناحیه بالا-راست قرار داشت و به‌عنوان یک عامل دوجبهی با ظرفیت مداخله و پاسخ‌گویی بالا شناخته می‌شد، انتقال آن به ناحیه پایین‌چپ در ساختار سناریویی فعلی نشان می‌دهد که نقش سیاست‌های حمایتی در این مسیر این آینده خاص، تضعیف‌شده یا وابسته به سایر متغیرهای کلیدی مانند متغیرهای اقلیمی، فناوری‌های نوین یا مشارکت محلی است. این جابه‌جایی تحلیلی نشان‌دهنده آن است که در برخی پیکربندی‌های آینده، سیاست‌گذاری بدون پشتیبانی نظام‌مند و هماهنگی با سایر عوامل، نمی‌تواند نقش محرک ایفا کند و بیشتر به‌عنوان یک متغیر حاشیه‌ای و کم‌اثر در پویایی درونی سامانه، ایفای نقش می‌کند.



- A وقوع موج‌های گرمای شدید
- B حمایت دولت از نوسازی تجهیزات سنتی
- C توانمندسازی جوامع محلی در مدیریت منابع آب
- D آموزش و تجهیز تعاونی‌ها برای آبیاری پایدار
- E مشوق‌های مالیاتی برای روش‌های کم‌آب‌بر در کشاورزی
- F سهمیه‌بندی آب بر اساس اقلیم
- G نصب کنتورهای هوشمند برداشت آب در چاه‌ها
- H ایجاد پایگاه داده ملی بهره‌وری آب کشاورزی
- I ارائه شاخص‌های ملی و منطقه‌ای بهره‌وری آب
- J استقرار سامانه‌های برخط پایش منابع آب
- K انتشار عمومی داده‌های منابع آب
- L واگذاری مدیریت منابع آب به نهادهای محلی
- M مشارکت دادن کشاورزان در پایش آبیاری

شکل ۶- نمودار فعال-منفعل اختصاصی سناریوی $[A_1 B_2 C_1 D_2 E_1 F_1 G_2 H_1 I_1 J_1 K_1 L_1 M]$

گویرت و همکاران (۲۰۱۶) تأکید می‌کند که نبود چنین مشارکتی می‌تواند به مقاومت در برابر سیاست‌ها منجر شود، زیرا در این شرایط سیاست‌ها بدون درک مشترک از ساختار سامانه و بدون اجماع میان ذینفعان طراحی می‌شوند. در بررسی این سناریو، شکل ۷ نشان می‌دهد که ضعف در حکمرانی (C_1, L_1, M_1)، نبود شفافیت اطلاعاتی (K_1, I_1)، مشارکت کم ذینفعان (C_1, L_1, M_1) و فقدان زیرساخت‌های نظارتی و انگیزشی (J_1, H_1, E_1)، همگی به تشدید وقوع موج‌های گرمای شدید منجر شده‌اند. امتیاز +۹ برای فرض A_1 بیانگر آن است که این عنصر تحت تأثیر سایر عناصر ناکارآمد قرار دارد و در چنین ساختاری، سناریو از نظر اقلیمی بسیار آسیب‌پذیر خواهد بود.

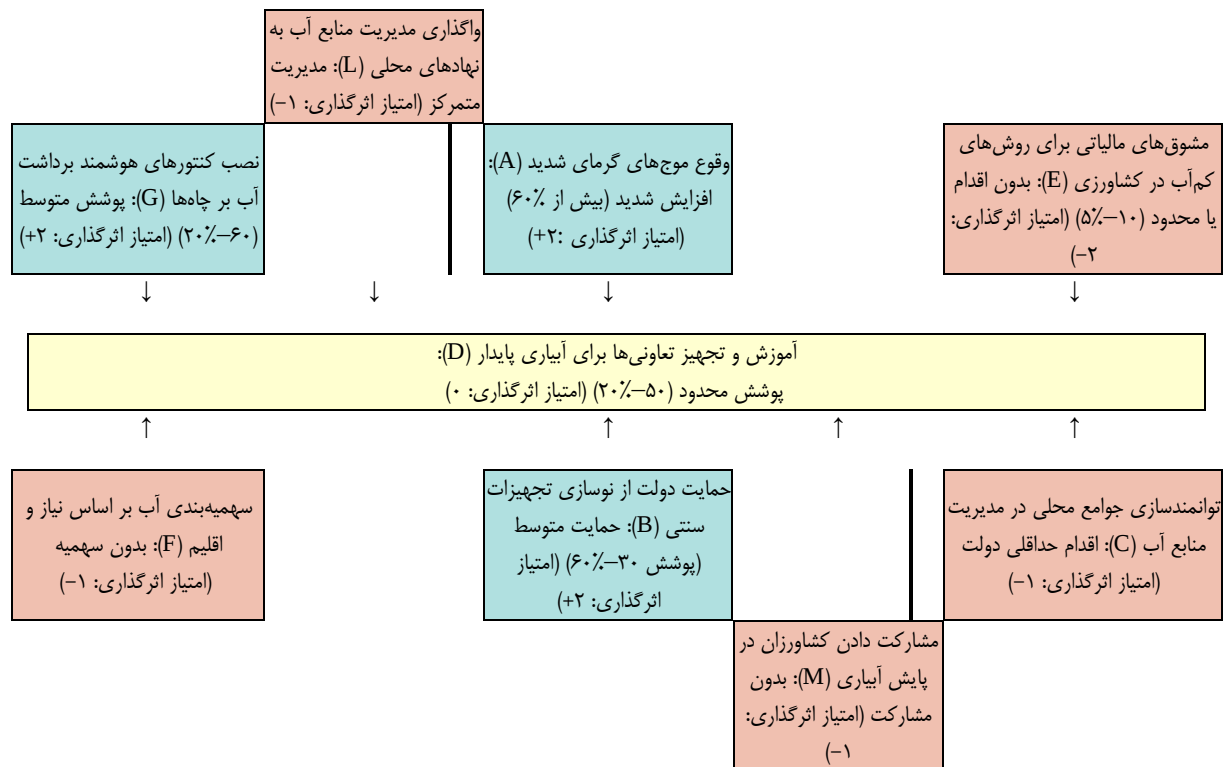


شکل ۷- نمای کلی سناریو $[A_1 B_2 C_1 D_2 E_1 F_1 G_2 H_1 I_1 J_1 K_1 L_1]$ ، تأثیرات وارد بر عنصر A_1 در سناریو

نشان‌دهنده یک نقطه تعادل شکننده باشد که با تغییر جزئی در سیاست‌ها یا مشارکت، به سمت سازگاری یا ناسازگاری حرکت کند.

مطالعات نشان می‌دهند که اگر سیاست‌گذاری بدون حمایت ساختاری و بدون هماهنگی با سایر اجزای سامانه انجام شود، نه تنها اثربخشی لازم را ندارد، بلکه نمی‌تواند نقش محرک و پیش‌برنده در پویایی نظام ایفا کند. نبود انسجام و هم‌راستایی میان سیاست‌ها و نهادهای مرتبط، از جمله چالش‌های بنیادین در مسیر اجرای موفق سیاست‌ها به‌شمار می‌رود و می‌تواند موجب کاهش نفوذ آن‌ها در ساختار اجرایی گردد (ترین و همکاران، ۲۰۲۱؛ پیترز، ۲۰۱۸؛ ترین و همکاران، ۲۰۱۹). مقاومت سامانه‌ها در برابر سیاست‌های جدید^۱ اغلب ناشی از عدم توجه به ساختارهای درونی و نبود هم‌راستایی میان اجزای مختلف است (اتکینسون و همکاران، ۲۰۱۵). نتایج مطالعه دی

با توجه به شکل ۸ در همین سناریو، عنصر D_2 تحت تأثیر هم‌زمان عوامل تقویت‌کننده و تضعیف‌کننده قرار گرفته است. امتیاز نهایی صفر نشان می‌دهد که شرایط موجود نه به‌طور کامل از آموزش و تجهیز تعاونی‌ها حمایت می‌کند و نه مانع آن می‌شود. این وضعیت می‌تواند



شکل ۸- نمای کلی سناریوی [A₁ B₂ C₁ D₂ E₁ F₁ G₂ H₁ I₁ J₁ K₁ L₁], تأثیرات وارد بر عنصر D₂ در سناریو

تابلوی سناریوهای قوی^۱

در پژوهش حاضر (با ۱۳ توصیف‌گر دارای تعامل)، بیش از یک و نیم میلیون پیکره‌بندی ممکن وجود دارد (۳^{۱۳} = ۱،۵۹۴،۳۲۳). بررسی تمامی این پیکره‌بندی‌ها با استفاده از روش ارائه‌شده در روابط (۱) تا (۴) نشان می‌دهد که تعداد ۵،۵۲۵ سناریو با سطح سازگاری ضعیف و تنها تعداد نه پیکره‌بندی فاقد ناسازگاری درونی هستند.

سناریوهای ارائه شده در شکل ۹، همگی از نوع سناریوهای منسجم با سازگاری قوی هستند. عدد صفر در ستون Co نشان می‌دهد هیچ‌یک از حالات انتخاب‌شده در هر سناریو ناسازگار نیستند؛ یا به عبارتی، هیچ حالت جایگزینی وجود ندارد که تأثیر بیشتری داشته باشد. همچنین، سناریوهای سه، شش و نه دارای بالاترین امتیاز کل تأثیر با مقادیر به ترتیب ۴۰۵، ۴۰۸ و ۳۸۱ هستند.

No.	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	Co	TIS
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	311
2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	289
3	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	405
4	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	311
5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	289
6	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	408
7	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	335
8	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	289
9	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	381

Co: Consistency value

TIS: Total impact score

شکل ۹- سناریوهای منسجم با سازگاری قوی

با کمترین مداخله سیاسی و نهادی، سناریوی دو، پنج و هشت با شرایط میانه و مداخلات متوسط و سناریوی سه، شش و نه با شرایط پیشرفته و سیاست‌های حمایتی گسترده. این سه سناریو پایه، چارچوبی برای تحلیل خطر، تاب‌آوری و اثربخشی سیاست‌ها فراهم می‌کنند.

در محور افقی تابلوی سناریو (جدول ۳)، نه سناریوی کاملاً سازگار تعریف شده‌اند که هر کدام ترکیبی خاص از حالت‌های متغیرها را نشان می‌دهند. سناریوهای یک تا نه نمایانگر سه وضعیت پایه (قرمز، زرد و سبز) در شرایط اقلیمی متفاوت هستند: سناریوی یک، چهار و هفت

جدول ۳- تابلوی سناریوهای قوی

سناریو ۹	سناریو ۸	سناریو ۷	سناریو ۶	سناریو ۵	سناریو ۴	سناریو ۳	سناریو ۲	سناریو ۱
A ₃			A ₂			A ₁		
B ₃	B ₂	B ₁	B ₃	B ₂	B ₁	B ₃	B ₂	B ₁
C ₃	C ₁	C ₁	C ₃	C ₂	C ₁	C ₃	C ₂	C ₁
D ₃	D ₂	D ₁	D ₃	D ₂	D ₁	D ₃	D ₂	D ₁
E ₃	E ₂	E ₁	E ₃	E ₂	E ₁	E ₃	E ₂	E ₁
F ₃	F ₂	F ₁	F ₃	F ₂	F ₁	F ₃	F ₂	F ₁
G ₃	G ₂	G ₁	G ₃	G ₂	G ₁	G ₃	G ₂	G ₁
H ₃	H ₂	H ₁	H ₃	H ₂	H ₁	H ₃	H ₂	H ₁
I ₃	I ₂	I ₁	I ₃	I ₂	I ₁	I ₃	I ₂	I ₁
J ₃	J ₂	J ₁	J ₃	J ₂	J ₁	J ₃	J ₂	J ₁
K ₃	K ₂	K ₁	K ₃	K ₂	K ₁	K ₃	K ₂	K ₁
L ₃	L ₂	L ₁	L ₃	L ₂	L ₁	L ₃	L ₂	L ₁
M ₃	M ₂	M ₁	M ₃	M ₂	M ₁	M ₃	M ₂	M ₁

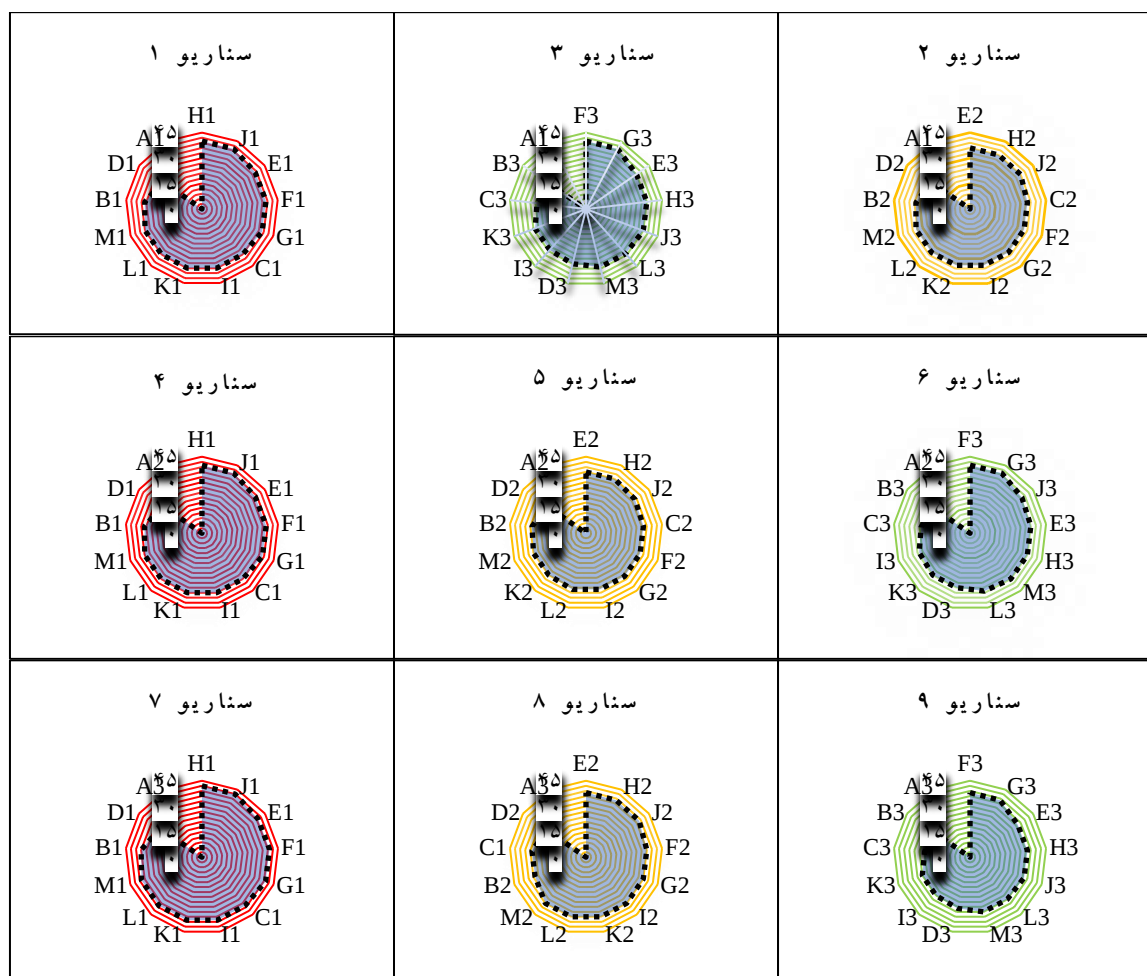
نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهند که هم‌راستایی سیاست‌ها با ساختارهای مدیریتی و اقلیمی، به‌ویژه در سناریوهای منسجم، اثربخشی تصمیم‌گیری و اجرای سیاست‌ها را افزایش می‌دهد (دومبروفسکی و همکاران، ۲۰۲۲؛ آلبرشت و همکاران، ۲۰۲۵). نتایج مطالعه آلبرشت و همکاران (۲۰۲۵) بیانگر آن است که انسجام سیاستی میان حوزه‌های آب و محیط‌زیست، شرط تحقق بهره‌برداری پایدار است. سناریوهای واقع‌گرایانه و تحول‌گرا که بر ترکیب سیاست‌های هم‌راستا و مشارکت ذینفعان تأکید دارند، می‌توانند به کاهش مصرف آب و حفظ منابع زیرزمینی در بخش کشاورزی منجر شوند (سودا و همکاران، ۲۰۲۴؛ جیبات و همکاران، ۲۰۲۴). نتایج مطالعه دومبروفسکی و همکاران (۲۰۲۲) نبود انسجام سیاستی و کارکردی را مانع هماهنگی مؤثر در مدیریت منابع آب می‌داند و وجود ساختارهای هم‌راستا و نهادهای هماهنگ‌کننده را در اثربخشی اجرای سیاست‌ها مؤثر معرفی می‌کند.

تحلیل سناریوهای قوی بر اساس استحکام فرضیات سناریو^۱

شکل ۱۰، میزان استحکام فرضیه‌ها در سناریوهای منسجم را نمایش می‌دهد. مطابق این شکل، در سناریوهای منسجم طراحی‌شده، مقدار سازگاری صفر برای حالت‌های توصیف‌گر A (وقوع موج‌های گرمای شدید) ناشی از عدم دریافت پشتیبانی مؤثر از سایر فرضیه‌های انتخاب‌شده در همان سناریو است. این بی‌پشتوانگی

ساختاری نشان می‌دهد که فرضیه مذکور در منطق درونی سناریو جایگاه فعالی ندارد و در برابر اختلالات یا تغییرات اقلیمی، می‌تواند به‌عنوان نقطه‌ضعف در انسجام سناریو عمل کند. ضعف در هم‌راستایی می‌تواند سناریوها را در برابر اختلالات غیرمنتظره در این مؤلفه آسیب‌پذیر ساخته و پایداری آن را تحت تأثیر قرار دهد. نتایج مطالعات لهوتکا و همکاران (۲۰۱۸) و دوسیو و همکاران (۲۰۱۸) نشان می‌دهند که وقوع و شدت موج‌های گرمای شدید در سناریوهای آینده اقلیمی به‌طور قابل توجهی افزایش خواهد یافت و این پدیده می‌تواند پایداری سناریوها را با عدم قطعیت و آسیب‌پذیری مواجه کند.

در سناریوهای یک، چهار و هفت، فرضیه‌های H_1, J_1, E_1, F_1 و G_1 دارای مقدار سازگاری بالا (بین ۳۸ تا ۴۲) هستند. این سطح از هم‌راستایی نشان می‌دهد که سیاست‌هایی نظیر «نبود پایگاه داده ملی بهره‌وری آب»، «پایش برخط منابع آب به‌صورت محدود»، «عدم سهمیه‌بندی آب بر اساس نیاز آبی و اقلیم» و «پوشش پایین چاه‌ها با کتورهای هوشمند» با سایر اجزای سناریو هم‌راستا بوده‌اند. چنین انسجامی در ساختار سناریو با نتایج مطالعه ژائو و همکاران (۲۰۲۵) همخوانی دارد که بر نقش هماهنگی میان سیاست‌ها و ساختارهای مدیریتی در افزایش اثربخشی تصمیم‌گیری تأکید دارد. این وضعیت با یافته‌های مطالعات بنسون و لورنزونی (۲۰۱۷) و جیبات و همکاران (۲۰۲۴) هم‌راستا است که نبود انسجام و شفافیت در نقش‌ها و مشارکت ناکافی ذی‌نفعان را از عوامل کاهش اثربخشی سیاست‌ها و بروز مشکلاتی مانند برداشت بی‌رویه و افت کیفیت منابع آب می‌دانند.



شکل ۱۰- مقدار استحکام فرضیه‌ها در سناریوهای قوی

هم‌خوانی دارد که نشان می‌دهد ترکیب سیاست‌های مکمل در قالب سناریوهای منسجم می‌تواند به مدیریت مؤثرتر منابع آب در مناطق کشاورزی منجر شود.

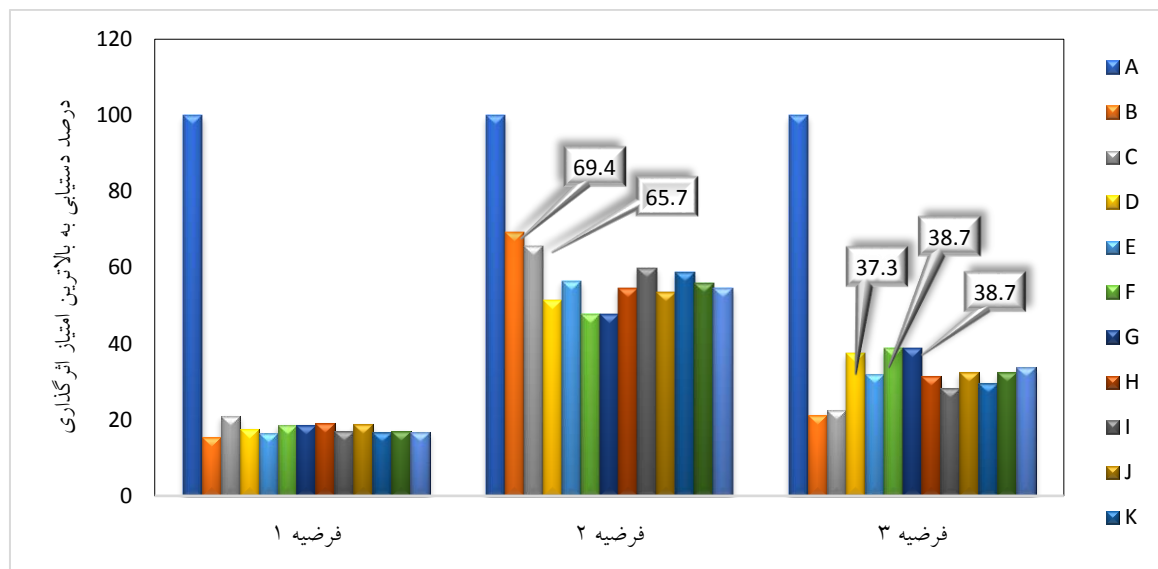
بررسی آمار سوگیری

شکل ۱۱، الگوی تمایل هر فرضیه (حالت توصیف‌گر) را برای کسب بیشترین امتیاز تأثیر در فضای سناریوهای ممکن نمایش می‌دهد. حالت متغیر اقلیمی A (وقوع موج‌های گرمای شدید) در هر سه حالت خود با مقدار ۱۰۰ درصد حضور دارد. به این معنا که در تمامی ترکیب‌های ممکن، هر حالت در جایگاه خود موفق به کسب بیشترین امتیاز شده است. در واقع، متغیر A که به «وقوع موج‌های گرمای شدید» اشاره دارد، یک متغیر کلان اقلیمی است که منشأ آن خارج از سامانه تحلیل‌شده قرار

در سناریوهای دو، پنج و هشت، فرضیه‌هایی مانند E_2 , H_2 , J_2 , C_2 و F_2 با مقدار سازگاری کمتر (۳۴ تا ۳۸) دیده می‌شوند. این سناریوها از نظر منطقی قابل قبول‌اند، اما استحکام آن‌ها نسبت به سناریوهای اول کمتر است. آن‌ها می‌توانند مسیرهای واقع‌گرایانه‌تری را ترسیم کنند، به‌ویژه در شرایطی که منابع یا ظرفیت اجرایی محدود باشد. این یافته با نتایج پژوهش ماکاندا و همکاران (۲۰۲۲) هم‌خوانی دارد که نشان می‌دهد رویکردهای مشارکتی و ترکیبی، حتی در سطح متوسط، نسبت به سیاست‌های منفرد و متمرکز، نتایج پایدارتری به همراه دارند. در مقابل، سناریوهای سه، شش و نه که شامل فرضیه‌هایی با سازگاری پایین‌تر (۲۴ تا ۳۳) هستند، بیشتر بیانگر حالت‌های تحول‌گرا و نیازمند اصلاحات نهادی و ساختاری عمیق‌ترند. این یافته‌ها با نتایج پژوهش اسدی و همکاران (۲۰۱۹)

دارد. این متغیر تحت تأثیر عوامل جهانی مانند تغییرات اقلیمی، الگوهای جوی و پدیده‌های فرامنطقه‌ای شکل می‌گیرد و از درون سامانه مورد بررسی (مدیریت منابع آب بخش کشاورزی در کشور) به‌طور مستقیم قابل کنترل یا تنظیم نیست. از همین رو، در ماتریس تأثیرات متقابل، این متغیر به‌عنوان یک عامل تأثیرگذار منفعل مدل‌سازی شده

است؛ یعنی خودش بر سایر مؤلفه‌ها اثر می‌گذارد، اما از آن‌ها تأثیر معناداری دریافت نمی‌کند. این منطق باعث شده که در سناریوهای تصادفی، همواره بیشترین امتیاز تأثیر را کسب کند (سوگیری ۱۰۰ درصد)، اما چون در تعاملات درونی سامانه‌ای پشتیبانی نمی‌شود، مقدار سازگاری‌اش صفر باقی مانده است.



شکل ۱۱- سوگیری حالات توصیف‌گرها

تمام حالت‌های دوم به‌عنوان مثال در متغیرهای سیاستی و نهادی مانند B (حمایت دولتی برای نوسازی تجهیزات سستی) و C (توانمندسازی جوامع محلی در مدیریت منابع آب) به‌ترتیب ۶۹/۴ درصد و ۶۵/۷ درصد به امتیاز تأثیر حداکثری دست یافته‌اند. این الگو نشان‌دهنده تمایل ساختار سناریویی به مسیرهای میانه، واقع‌گرایانه و قابل‌اجرایی است که از افراط در سیاست‌گذاری یا رویکردهای حداقلی فاصله گرفته‌اند. اگرچه حالات دوم در تمام عوامل غالب هستند، اما سهم حالت سوم (خوش‌بینانه) نیز قابل‌توجه است. برای نمونه، در متغیرهای F (سهیمه‌بندی آب بر اساس اقلیم) و G (نصب کتورهای هوشمند)، حالت سوم با سهم ۳۸/۷ درصد حضور دارد که نشان‌دهنده گرایش سناریوها به اقدامات نوآورانه و تحول‌محور است. این گرایش به‌ویژه در متغیرهایی مرتبط با فناوری، داده‌محوری و مشارکت کشاورزان مشهودتر است و می‌تواند بیانگر نقش کلیدی این عوامل در

آینده‌نگری و ارتقای بهره‌وری آب در بخش کشاورزی باشد (آرماس و وارگاس و همکاران، ۲۰۲۳). نتایج مطالعه اینگلد و توسون (۲۰۲۰) نیز تأکید می‌کند که استفاده از ابزارهای نوین مانند سامانه‌های پایش برخط و پایگاه‌های داده ملی، به بهبود تصمیم‌گیری و شفافیت کمک می‌کند و واگذاری مدیریت به نهادهای محلی و مشارکت کشاورزان، موجب افزایش پذیرش و کارایی سیاست‌ها می‌شود.

نتیجه‌گیری

در ارزیابی سناریوهای ارتقای بهره‌وری آب کشاورزی ایران تا سال ۱۴۲۰، سناریوهای یک، چهار و هفت (حالت بدبینانه) به‌دلیل انسجام منطقی و فرضیات واقع‌بینانه، برای تحلیل‌های اجرایی و تصمیم‌سازی کوتاه‌مدت مناسب‌تر تشخیص داده شدند. در مقابل، سناریوهای سه، شش و نه (حالت خوشبینانه) با وجود برخی ناسازگاری‌های درونی، به‌دلیل تأکید بر تحولات

آب باشد. علیرغم ارائه چارچوب سناریوهای منسجم در ارتقای بهره‌وری آب کشاورزی در سال ۱۴۲۰، روش پژوهش با محدودیت‌هایی نیز همراه است. این ابزار با تمرکز بر اقدامات از پیش تعریف‌شده، ظرفیت محدودی برای مدل‌سازی سامانه‌های پویا و چندلایه دارد. در نتیجه، امکان تحلیل جامع تعاملات پیچیده و پوشش کامل عدم قطعیت‌ها را فراهم نمی‌سازد؛ به‌ویژه آنکه در این پژوهش، صرفاً محرک‌های اقلیمی، سیاستی و فناورانه مدنظر قرار گرفته‌اند، در حالی که تحولات اقتصادی در سطح جهانی، تغییرات اجتماعی و مخاطرات طبیعی نیز از جمله عوامل مداخله‌گر مهمی هستند که می‌توانند پیکربندی‌های سناریویی و مسیرهای سیاست‌گذاری را به‌طور معناداری تحت تأثیر قرار دهند.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید نویسندگان مقاله است.

ساختاری و اثرگذاری در سطح کلان، ظرفیت بالاتری برای جهت‌دهی به سیاست‌های بلندمدت و آرمان‌محور دارند. بر این اساس، پیشنهاد می‌شود سیاست‌گذاران بخش کشاورزی به‌منظور ساخت آینده‌ی مطلوب ارتقای بهره‌وری، رویکردی ترکیبی و مرحله‌ای اتخاذ کنند که در آن:

- در کوتاه‌مدت، بر اقدامات اجرایی مانند نوسازی تجهیزات آبیاری، آموزش بهره‌برداران و توانمندسازی جوامع محلی تمرکز شود؛
 - و در بلندمدت، زیرساخت‌های نوآورانه مانند سامانه‌های پایش برخط، کنتورهای هوشمند و سیاست‌های تشویقی برای تغییر الگوی کشت توسعه یابد.
- همچنین، برای افزایش تاب‌آوری در برابر پدیده‌هایی مانند موج‌های گرما، اجرای برنامه‌های منطقه‌محور نظیر آموزش زمان‌بندی آبیاری و ایجاد سامانه‌های هشدار اقلیمی با مشارکت سازمان هواشناسی و نهادهای آب‌بر، ضروری است. این رویکرد می‌تواند هم‌زمان هم قابلیت مداخله‌پذیری سناریوها را افزایش دهد و هم زمینه‌ساز گذار تدریجی به مدیریت هوشمند منابع

فهرست منابع

۱. اخوان گیگلو، کرامت، خیری، میلاد، احمدپری، هدیه، عباسی، سلیم، و کلاته، فرهود، ۱۴۰۲. بررسی محتوای آب مجازی و شاخص‌های بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب در محصولات زراعی (مطالعه موردی: شبکه آبیاری دشت مغان، استان اردبیل). *فصلنامه مدیریت و مدل‌سازی منابع آب و خاک*، ۳(۳)، ۲۹۵-۲۷۷.
2. Albrecht, E., Belinskij, A., and Heikkilä, E. 2025. Policy coherence for ecosystem-based management: Implementing EU water and marine policies in the Archipelago Sea. *Marine Policy*, 171, 106427. doi: 10.1016/j.marpol.2024.106427
3. Ali, A., Hussain, T., and Zahid, A. 2025. Smart irrigation technologies and prospects for enhancing water use efficiency for sustainable agriculture. *AgriEngineering*, 7(4), 106. doi: 10.3390/agriengineering7040106
4. Ang, K., Sankaran, S., and Hase, S. 2023. Delphi Method: A democratic dialectical, consensus seeking open systems approach. *Journal of Systems Thinking*, 3(1), 1-15. doi: 10.54120/jost.0000014
5. Armas Vargas, F., Nava, L. F., Gómez Reyes, E., Olea-Olea, S., Rojas Serna, C., Sandoval Solís, S., and Meza-Rodríguez, D. 2023. Water and environmental resources: A multi-criteria assessment of management approaches. *Water*, 15(16), 2991. doi: 10.3390/w15162991
6. Asaadi, M. A., Mortazavi, S. A., Zamani, O., Najafi, G. H., Yusaf, T., and Hoseini, S. S. 2019. The impacts of water pricing and non-pricing policies on sustainable water resources management: A case of Ghorveh plain at Kurdistan province, Iran. *Energies*, 12(14), 2667. doi: 10.3390/en12142667

7. Atkinson, J. A., Wells, R., Page, A., Dominello, A., Haines, M., and Wilson, A. 2015. Applications of system dynamics modelling to support health policy. *Public Health Research and Practice*, 25(3). doi: 10.17061/phrp2531531
8. Babaeian, F., Delavar, M., Morid, S., and Jamshidi, S. 2023. Designing climate change dynamic adaptive policy pathways for agricultural water management using a socio-hydrological modeling approach. *Journal of Hydrology*, 627, 130398. doi: 10.1016/j.jhydrol.2023.130398
9. Barati, A. A., Azadi, H., Dehghani Pour, M., Lebailly, P., and Qafari, M. 2019. Determining key agricultural strategic factors using AHP-MICMAC. *Sustainability*, 11(14), 3947. doi: 10.3390/su11143947
10. Benson, D., and Lorenzoni, I. 2017. Climate change adaptation, flood risks and policy coherence in integrated water resources management in England. *Regional Environmental Change*, 17(7), 1921-1932. doi: 10.1007/s10113-016-0959-6
11. Bishop, P., Hines, A., and Collins, T. 2007. The current state of scenario development: an overview of techniques. *Foresight*, 9(1), 5-25. doi: 10.1108/14636680710727516
12. Bouali, E. T., Abid, M. R., Boufounas, E. M., Hamed, T. A., and Benhaddou, D. 2021. Renewable energy integration into cloud and IoT-based smart agriculture. *IEEE access*, 10, 1175-1191.
13. Brauner, S., and Vögele, S. 2025. Stakeholder-driven consequence modeling employing cross-impact balance scenario analysis. *Futures and Foresight Science*, 7(3), e70019. doi: 10.1002/ffo2.70019
14. Campfens, J. K., Duygan, M., and Binder, C. R. 2025. Initiating social tipping dynamics in energy transitions: A novel analytical approach for exploring feedback loops and intervention points. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 56, 100973. doi: 10.1016/j.eist.2025.100973
15. D'agostino, D., Borg, M., Hallett, S. H., Sakrabani, R. S., Thompson, A., Papadimitriou, L., and Knox, J. W. 2020. Multi-stakeholder analysis to improve agricultural water management policy and practice in Malta. *Agricultural water management*, 229, 105920. doi: 10.1016/j.agwat.2019.105920
16. De Gooyert, V., Rouwette, E., Van Kranenburg, H., Freeman, E., and van Breen, H. 2016. Sustainability transition dynamics: Towards overcoming policy resistance. *Technological Forecasting and Social Change*, 111, 135-145. doi: 10.1016/j.techfore.2016.06.019
17. Dombrowsky, I., Lenschow, A., Meergans, F., Schütze, N., Lukat, E., Stein, U., and Yousefi, A. 2022. Effects of policy and functional (in) coherence on coordination—A comparative analysis of cross-sectoral water management problems. *Environmental Science and Policy*, 131, 118-127. doi: 10.1016/j.envsci.2022.01.019
18. Dosio, A., Mentaschi, L., Fischer, E. M., and Wyser, K. 2018. Extreme heat waves under 1.5 C and 2 C global warming. *Environmental research letters*, 13(5), 054006. doi: 10.1088/1748-9326/aab827
19. Emadodin, I., Reinsch, T., and Taube, F. 2019. Drought and desertification in Iran. *Hydrology*, 6(3), 66. doi: doi.org/10.3390/hydrology6030066
20. Esfandiari Bahraseman, S., Firoozzare, A., Jamali Jaghdani, T., and Dourandish, A. 2024. Intervention strategies for the safe use of semi-treated wastewater by Iranian farmers: An approach for safe food production in the circular economy. *NJAS: Impact in Agricultural and Life Sciences*, 96(1), 2335376. doi: 10.1080/27685241.2024.2335376
21. Et-Taibi, B., Abid, M. R., Boufounas, E. M., Morchid, A., Bourhnane, S., Hamed, T. A., and Benhaddou, D. 2024. Enhancing water management in smart agriculture: A cloud and IoT-Based smart irrigation system. *Results in Engineering*, 22, 102283. doi: 10.1016/j.rineng.2024.102283
22. García, L., Parra, L., Jimenez, J. M., Lloret, J., and Lorenz, P. 2020. IoT-based smart irrigation systems: An overview on the recent trends on sensors and IoT systems for irrigation in precision agriculture. *Sensors*, 20(4), 1042. doi: 10.3390/s20041042
23. Gupta, A. D., Pandey, P., Feijóo, A., Yaseen, Z. M., and Bokde, N. D. 2020. Smart water technology for efficient water resource management: A review. *Energies*, 13(23), 6268. doi: doi.org/10.3390/en13236268

24. Hasson, F., Keeney, S., & McKenna, H. 2000. Research guidelines for the Delphi survey technique. *Journal of advanced nursing*, 32(4), 1008-1015.
doi.org/10.1046/j.1365-2648.2000.t01-1-01567.x
25. Ingold, K., and Tosun, J. 2020. Special issue "Public policy analysis of integrated water resource management". *Water*, 12(9), 2321. **doi.org/10.3390/w12092321**
26. Jibat, E., Senbeta, F., Zeleke, T., and Hagos, F. 2024. Understanding water governance in the Central Rift Valley of Ethiopia: Governance framework, coherence and practices. *Environmental Management*, 74(3), 505-517.
doi: 10.1007/s00267-024-01966-6
27. Karimi, V., Karami, E., and Keshavarz, M. 2018. Climate change and agriculture: Impacts and adaptive responses in Iran. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(1), 1-15.
doi: 10.1016/S2095-3119(17)61794-5
28. Kemp-Benedict, E., Carlsen, H., and Kartha, S. 2019. Large-scale scenarios as 'boundary conditions': a cross-impact balance simulated annealing (CIBSA) approach. *Technological Forecasting and Social Change*, 143, 55-63. **doi: 10.1016/j.techfore.2019.03.006**
29. Kimbowa, G., Wanyama, J., Mukaya, M., Otim, D., Awio, T., and Mugisha, M. 2025. Learning from farmers' knowledge on participatory irrigation management using Q-methodology. *Irrigation and Drainage*, 74(1), 342-361. **doi: 10.1002/ird.2991**
30. Kosow, H. 2015. New outlooks in traceability and consistency of integrated scenarios. *European Journal of Futures Research*, 3(1), 16.
doi: 10.1007/s40309-015-0077-6
31. Kosow, H., and Gaßner, R. 2008. *Methods of future and scenario analysis: overview, assessment, and selection criteria* (Vol. 39, p. 133). DEU.
32. Kosow, H., Weimer-Jehle, W., León, C. D., and Minn, F. 2022. Designing synergetic and sustainable policy mixes-a methodology to address conflictive environmental issues. *Environmental Science and Policy*, 130, 36-46. **doi: 10.1016/j.envsci.2022.01.007**
33. Kosow, H., Brauner, S., Hölzlberger, F., Moschner, J., Vögele, S., Weimer-Jehle, W., and Rübhelke, D. 2023. Future water conflicts in Germany: serious gaming for policy design under future uncertainty. In *6th International Conference on Public Policy ICPP6*.
34. Kosow, H., Brauner, S., Brumme, A., Hauser, W., Hölzlberger, F., Moschner, J., and Weimer-Jehle, W. 2024. Uncharted water conflicts ahead: mapping the scenario space for Germany in the year 2050. *Frontiers in Water*, 6, 1492336.
doi: 10.3389/frwa.2024.1492336
35. Krishnan, R. S., Julie, E. G., Robinson, Y. H., Raja, S., Kumar, R., Thong, P. H., and Son, L. H. 2020. Fuzzy logic based smart irrigation system using internet of things. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119902. **doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119902**
36. Lesk, C., Anderson, W., Rigden, A., Coast, O., Jägermeyr, J., McDermid, S., and Konar, M. 2022. Compound heat and moisture extreme impacts on global crop yields under climate change. *Nature Reviews Earth and Environment*, 3(12), 872-889.
doi: 10.1038/s43017-022-00368-8
37. Lhotka, O., Kyselý, J., and Farda, A. 2018. Climate change scenarios of heat waves in Central Europe and their uncertainties. *Theoretical and applied climatology*, 131(3), 1043-1054. **doi: 10.1007/s00704-016-2031-3**
38. Linstone, H. A., & Turoff, M. (Eds.). 1975. The delphi method (Vol. 1975, pp. 3-12). Reading, MA: Addison-Wesley.
39. Lubell, M., and Fulton, A. 2008. Local policy networks and agricultural watershed management. *Journal of Public Administration Research and Theory*, 18(4), 673-696.
doi: 10.1093/jopart/mum031
40. Makanda, K., Nzama, S., and Kanyerere, T. 2022. Assessing the role of water resources protection practice for sustainable water resources management: A review. *Water*, 14(19), 3153. **doi: 10.3390/w14193153**
41. Nawir, D., Bakri, M. D., and Syarif, I. A. 2023. Central government role in road infrastructure development and economic growth in the form of future study: the case of Indonesia. *City, Territory and Architecture*, 10(1), 12. **doi: 10.1186/s40410-022-00188-9**

42. Nouri, M., Homaei, M., Pereira, L. S., & Bybordi, M. 2023. Water management dilemma in the agricultural sector of Iran: A review focusing on water governance. *Agricultural Water Management*, 288, 108480. doi:10.1016/j.agwat.2023.108480
43. Obaideen, K., Yousef, B. A., AlMallahi, M. N., Tan, Y. C., Mahmoud, M., Jaber, H., and Ramadan, M. 2022. An overview of smart irrigation systems using IoT. *Energy Nexus*, 7, 100124. doi: 10.1016/j.nexus.2022.100124
44. Okorogbona, A. O., Denner, F. D., Managa, L. R., Khosa, T. B., Maduwa, K., Adebola, P. O., and Macevele, S. 2018. Water quality impacts on agricultural productivity and environment. In *Sustainable Agriculture Reviews* 27 (pp. 1-35). Cham: Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-75190-0_1
45. Peters, B. G. 2018. The challenge of policy coordination. *Policy Design and Practice*, 1(1), 1-11. doi: 10.1080/25741292.2018.1437946
46. Qazi, S., Khawaja, B. A., and Farooq, Q. U. 2022. IoT-equipped and AI-enabled next generation smart agriculture: A critical review, current challenges and future trends. *Ieee Access*, 10, 21219-21235. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3152544
47. Radmehr, R., Brorsen, B. W., and Shayanmehr, S. 2024. Adapting to climate change in arid agricultural systems: An optimization model for water-energy-food nexus sustainability. *Agricultural Water Management*, 303, 109052. doi: 10.1016/j.agwat.2024.109052
48. 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. *Agricultural Water Management*, 245, 106588. doi: 10.1016/j.agwat.2020.106588
49. Sadabadi, A. A., and Rahimirad, Z. 2025. Identifying scenarios for renewable energy development in Iran: the role of collaborative governance. *Climate Policy*, 1-16. doi: 10.1080/14693062.2025.2477772
50. Sankari, M., Sarayu, P. S., Kamatchi, K. S., and Saraswathi, P. A. 2024, December. Smart drip irrigation using IoT enabled water management in agriculture. In *2024 4th International Conference on Ubiquitous Computing and Intelligent Information Systems (ICUIS)* (pp. 1774-1780). IEEE. doi: 10.1109/ICUIS64676.2024.10866965
51. Schweizer, V. J. 2020. Reflections on cross-impact balances, a systematic method constructing global socio-technical scenarios for climate change research. *Climatic Change*, 162(4), 1705-1722. doi: 10.1007/s10584-019-02615-2
52. Shokri, A., Rezaeian, A., and Keramati, M. A. 2024. Futurology of artificial intelligence governance in a smart government for achieving a sustainable and efficient structure for utilizing advanced technologies. *Management Strategies and Engineering Sciences*, 6(2), 90-103. doi: 10.61838/msesj.6.2.11
53. Srivastav, A. L., Dhyani, R., Ranjan, M., Madhav, S., and Sillanpää, M. 2021. Climate-resilient strategies for sustainable management of water resources and agriculture. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(31), 41576-41595. doi: 10.1007/s11356-021-14332-4
54. Suda, A. O., Sušnik, J., Masia, S., and Jewitt, G. 2024. Policy coherence assessment of water, energy, and food resources policies in the Tana River Basin, Kenya. *Environmental Science and Policy*, 159, 103816. doi: 10.1016/j.envsci.2024.103816
55. Syrmos, E., Sidiropoulos, V., Bechtsis, D., Stergiopoulos, F., Aivazidou, E., Vrakas, D., and Vlahavas, I. (2023). An intelligent modular water monitoring iot system for real-time quantitative and qualitative measurements. *Sustainability*, 15(3), 2127. doi: 10.3390/su15032127
56. Touil, S., Richa, A., Fizir, M., Argente Garcia, J. E., and Skarmeta Gomez, A. F. 2022. A review on smart irrigation management strategies and their effect on water savings and crop yield. *Irrigation and Drainage*, 71(5), 1396-1416. doi: 10.1002/ird.2735
57. Trein, P., Meyer, I., and Maggetti, M. 2019. The integration and coordination of public policies: A systematic comparative review. *Journal of Comparative Policy Analysis: Research and Practice*, 21(4), 332-349. doi: 10.1080/13876988.2018.1496667

58. Trein, P., Biesbroek, R., Bolognesi, T., Cejudo, G. M., Duffy, R., Hustedt, T., and Meyer, I. 2021. Policy coordination and integration: A research agenda. *Public Administration Review*, 81(5), 973-977. **doi: 10.1111/puar.13180**
59. Weimer-Jehle, W. 2009. Properties of cross-impact balance analysis. *arXiv preprint arXiv:0912.5352*. **doi: 10.48550/arXiv.0912.5352**
60. Weimer-Jehle, W. 2013. ScenarioWizard 4.1-Constructing consistent scenarios using cross-impact balance analysis. *Stuttgart Research Center for Interdisciplinary Risk and Innovation Studies. Germany: University of Stuttgart Stuttgart*.
61. Weimer-Jehle, W. 2023. Cross-Impact Balances (CIB) for Scenario Analysis. *Cham, Switzerland: Springer*. **doi: 10.1007/978-3-031-27230-1**
62. Zhao, Y. L., Sun, H. J., Ding, J., Pang, J. W., Lu, M. Y., Ren, N. Q., and Yang, S. S. 2025. A quantitative assessment framework for water-related policies in large river basins. *Environmental Science and Ecotechnology*, 24, 100537. **doi: 10.1016/j.es.2025.100537**