Vol 15, No. 4, Winter 2026

University of Tehran Press

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

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

Exploring the determinants of agricultural water productivity in Iran using the fuzzy Delphi method

Tahmine Dehghani[1] | Abdolmajid Liaghat[2]✉ | Bijan Nazari[3]

1. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: tahmine.dehghani@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: aliaghat@ut.ac.ir
3. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran; and Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. E-mail: binazari@ut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 2 August 2025
Received in revised form
10 October 2025
Accepted 10 November 2025
Published online 17 March 2026

Keywords:
Agricultural Water Management
Climate Resilience
Policies
Technologies

ABSTRACT

This study aims to identify and analyze the key factors influencing water productivity in agriculture through the application of the Fuzzy Delphi Method.Through a systematic literature review, 194 factors were extracted and categorized into three domains: climate change (43 factors, 22.1 Percent), policy (77 factors, 39.6 Percent), and technology (74 factors, 38.2 Percent). These factors were incorporated into a semi-structured questionnaire distributed to 18 experts. Applying a consensus threshold of 0.8 in the fuzzy Delphi model, the data were fuzzified, aggregated, and defuzzified. Findings revealed that 32 factors (16.5 Percent) were selected as consensus-based key determinants. Among them, 18 factors were from the policy domain (23.4 Percent), 10 from the technology domain (13.5 Percent), and 4 from the climate change domain (9.3 Percent). The highest defuzzified value corresponded to "hybrid seed production" (0.92), highlighting the significance of biotechnological innovations in enhancing water productivity. Other consensus-driven factors included "promotion of genetic improvement" (0.90), "establishment of national Based on the research findings, two controllable pillars—data-driven infrastructure and technological innovations—are recommended as the most effective factors for enhancing agricultural water productivity.

Cite this article: Dehghani, T., Liaghat, A., & Nazari, B. (2026). Exploring the determinants of agricultural water productivity in Iran using the fuzzy Delphi method. *Journal of Water and Irrigation Management*, 15 (4), 805-826. DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2025.399914.1249

© The Author(s).
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2025.399914.1249

دوره پانزدهم، شماره چهارم، زمستان ۱۴۰۴

انتشارات دانشگاه تهران

مدیریت آب و آبیاری

شاپا الکترونیکی: ۹۹۳۱-۲۳۸۲

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

شناسایی مؤلفه‌های کلیدی بهره‌وری آب کشاورزی در ایران با روش دلفی فازی

تهمینه دهقانی[۱] | عبدالمجید لیاقت[۲]✉ | بیژن نظری[۳]

۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: tahmine.dehghani@ut.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: aliaghat@ut.ac.ir

۳. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران؛ و دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران. رایانامه: binazari@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۲/۲۶

کلیدواژه‌ها:

تاب‌آوری اقلیمی

سیاست‌ها

فناوری‌ها

مدیریت آب کشاورزی

چکیده

پژوهش حاضر با هدف شناسایی و تحلیل مؤلفه‌های اثرگذار بر بهره‌وری مصرف آب در بخش کشاورزی با استفاده از تحلیل دلفی فازی طراحی شده است. در مرحله‌ی مرور نظام‌مند ادبیات، تعداد ۱۹۴ عامل استخراج شد، که در سه گروه تغییر اقلیم (۴۳ عامل، ۲۲/۱ درصد)، سیاست‌ها (۷۷ عامل، ۳۹/۶ درصد) و فناوری‌ها (۷۴ عامل، ۳۸/۲ درصد) دسته‌بندی شدند. این عوامل در قالب پرسشنامه نیمه‌ساختاریافته بین ۱۸ خبره متخصص توزیع گردید و با اعمال آستانه توافق ۰/۸ در مدل دلفی فازی، داده‌ها فازی‌سازی، تجمیع و دیفازی شدند. نتایج نشان داد که ۳۲ عامل (معادل ۱۶/۵ درصد) به‌عنوان عوامل کلیدی واجد اجماع انتخاب شدند. از میان آن‌ها، ۱۸ عامل از گروه سیاست‌ها (۲۳/۴ درصد از این گروه)، ۱۰ عامل از گروه فناوری (۱۳/۵ درصد از این گروه) و ۴ عامل از گروه تغییرات اقلیمی (۹/۳ درصد از این گروه) بودند. بالاترین مقدار دیفازی مربوط به «تولید بذرهای هیبرید» بود (۰/۹۲)، که جایگاه فناوری‌های زیستی را به‌عنوان ابزار کارآمد ارتقاء بهره‌وری آب نشان می‌دهد. براساس نتایج پژوهش، دو محور قابل‌کنترل: زیرساخت‌های داده‌محور و نوآوری‌های فناورانه به‌عنوان مؤثرترین عوامل در ارتقای بهره‌وری آب کشاورزی شناخته می‌شوند.

استناد: دهقانی، تهمینه؛ لیاقت، عبدالمجید و نظری، بیژن (۱۴۰۴). شناسایی مؤلفه‌های کلیدی بهره‌وری آب کشاورزی در ایران با روش دلفی فازی. *نشریه مدیریت آب و آبیاری*، ۱۵ (۴)، ۸۰۵-۸۲۶. DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2025.399914.1249

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

۱. مقدمه

بهره‌وری آب در بخش کشاورزی به‌عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی عملکرد نظام تولید، بیانگر میزان اثربخشی تبدیل منابع آبی به محصول نهایی است. این مؤلفه نه‌تنها نقش تعیین‌کننده‌ای در ارتقای امنیت غذایی و بهبود شاخص‌های اقتصادی کشاورزان ایفا می‌کند، بلکه عاملی بنیادین در پایداری بوم‌زیست و حفظ تاب‌آوری سامانه‌های تولیدی در مواجهه با چالش‌های تغییرات اقلیمی محسوب می‌شود (Mabhaudhi *et al*., 2025). کشاورزی از نظام‌های تولیدی حساس در برابر تغییرات اقلیمی است، زیرا نوسانات اقلیمی موجب دگرگونی در عوامل محیطی نظیر دما، الگوهای بارندگی و شدت باد می‌شود. این امر فرایندهای رشد گیاه، فراوانی رخدادهای اقلیمی شدید و الگوهای ظهور و گسترش آفات و بیماری‌های گیاهی را به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم تحت تأثیر قرار داده و مقدار عملکرد و کیفیت محصولات کشاورزی را کاهش می‌دهد (Yuan *et al*., 2024). در شرایط افزایش ناپایداری اقلیمی، ارتقای بهره‌وری آب کشاورزی مستلزم تدوین و اجرای سیاست‌های تطبیقی و بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته در مدیریت منابع است.

این رویکردها با بهینه‌سازی آب، ارتقای کارایی تولید و تحول فناورانه مزرعه، بهره‌وری و تاب‌آوری کشاورزی را در برابر تغییرات اقلیمی بهبود می‌بخشند (Shah *et al*., 2023). مقابله با چالش‌های ناشی از گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی، مستلزم بهره‌گیری از شیوه‌های نوین مدیریت منابع آب در کشاورزی است (Patle *et al*., 2020). استفاده از راهبردهای آبیاری هوشمند با قابلیت انطباق با شرایط متنوع اقلیمی، منجر به کاهش قابل‌توجه در مصرف منابع آب بخش کشاورزی می‌شود؛ در عین‌حال، این راه‌کارها موجب ارتقای بهره‌وری محصول و افزایش کارایی مصرف آب می‌گردند. اتخاذ چنین رویکردهایی برای دست‌یابی به آبیاری دقیق و مدیریت پایدار منابع آب در مواجهه با نوسانات اقلیمی، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر به‌شمار می‌آید (Li *et al*., 2024). با این‌حال، دست‌یابی به حداکثر بهره‌وری آب تنها وابسته به توسعه فناوری‌های نوین نیست، بلکه به تدوین و اجرای سیاست‌های دولت‌محور نیز وابسته است. سیاست‌هایی نظیر اصلاح نظام تخصیص منابع آبی، تعرفه‌گذاری و قیمت‌گذاری هدف‌مند و ارائه مشوق‌های مالی به کشاورزان، نقش مهمی در بهینه‌سازی الگوی کشت و استفاده مؤثر از سامانه‌های آبیاری ایفا می‌کنند. اثربخشی این سیاست‌ها مستلزم کنترل گسترش بی‌رویه اراضی آبی و حفظ منابع آب زیرزمینی خواهد بود (Zhou and Li, 2024; Zamani *et al*., 2020).

هم‌افزایی میان سیاست‌های دولتی هدف‌مند و نوآوری‌های فناورانه، زمینه‌ساز شکل‌گیری چارچوبی پایدار برای مواجهه با چالش‌های ناشی از تغییرات اقلیمی و تأمین امنیت غذایی در بلندمدت خواهد بود (Du *et al*., 2025). براساس گزارش ارائه‌شده توسط سازمان خواروبار و کشاورزی ملل متحد (FAO, 2017)، نظام بهره‌وری آب در کشاورزی را می‌توان چارچوبی چندبُعدی و یکپارچه دانست که دربرگیرنده مجموعه‌ای از سیاست‌های دولتی، فناوری‌های نوین آبیاری، ساختارهای نهادی، سازوکارهای مدیریتی و رفتار بهره‌برداران است. تعامل سازنده میان این عناصر، دست‌یابی به استفاده مؤثر، پایدار و کارآمد از منابع آبی را در فرایند تولید کشاورزی تسهیل می‌نماید. در این زمینه، اتخاذ رویکرد آینده‌نگر و ساختاری برای شناخت عوامل مهم که در شکل‌گیری و تحول این نظام تأثیرگذارند، ضرورتی انکارناپذیر در فرایند سیاست‌گذاری هوشمند محسوب می‌شود. تاکنون مطالعات محدودی با رویکردی منسجم به بررسی این عوامل پرداخته‌اند، درحالی‌که تحول در الگوهای مصرف آب نیازمند تحلیل عمیق تعاملات نهادی، فناوری‌های نوین، سیاست‌های دولتی و داده‌محوری تصمیمات است.

Ammann *et al*. (2022) با روش دلفی، دیدگاه‌های ۳۴ کارشناس را درباره پذیرش فناوری‌های کشاورزی دقیق در تولید سبزیجات در فضای باز سوئیس گردآوری کردند. نتایج این مطالعه نشان دادند که چالش‌های اقتصادی و کمبود آموزش تخصصی از موانع اصلی پذیرش این فناوری‌ها هستند. Jiang *et al*. (2023) در یک مطالعه با استفاده از داده‌های ۱۱۱۴ کشاورز در استان Hubei چین، عوامل مؤثر بر پذیرش فناوری‌های کشاورزی کم‌کربن را بررسی کردند. یافته‌های

پژوهش نشان دادند که تصمیم‌گیری کشاورزان برای پذیرش فناوری‌های کشاورزی کم‌کربن تحت تأثیر عوامل مختلفی همچون ویژگی‌های فردی، ظرفیت‌های خانوادگی، شرایط محیطی و سازوکارهای مدیریتی تولید قرار دارد. در این میان، عوامل مدیریتی نقش تعیین‌کننده‌تری در شکل‌گیری این تصمیم‌ها ایفا می‌کنند.

نتایج مطالعه Chavula *et al.* (2024) مرور داده‌های علمی و اعتبارسنجی از طریق روش دلفی، حاکی از آن است که هوش مصنوعی در کشاورزی هوشمند اقلیمی نقش مؤثری دارد، اما چالش‌هایی مانند هزینه بالا و زیرساخت ضعیف مانع پذیرش گسترده آن است. مطالعه Marques *et al.* (2023) با بهره‌گیری از روش دلفی، اولویت‌های پژوهشی مؤثر برای مدیریت تغییرات اقلیمی و سیاست‌گذاری در بولیوی و پاراگوئه را شناسایی کرد. این پژوهش با تمرکز بر اهداف توسعه پایدار (SDGs)[1]، خطوط پژوهشی کلیدی مانند تنوع ژنتیکی محصولات غذایی، فناوری سوخت‌های پاک و مدیریت منابع آب را به‌عنوان حوزه‌های با بیش‌ترین تأثیر بالقوه معرفی نمود. مطالعه‌ی Prutzer *et al.* (2023) روند تحول، محرک‌ها و موانع پذیرش فناوری‌های آبیاری هوشمند اقلیمی (CSI)[2] را در چهار کشور جنوب آسیا بررسی کرده است. این بررسی با تمرکز بر چارچوب نوآوری مسئولانه، چالش‌های اجتماعی و زیست‌محیطی مرتبط با CSI را تحلیل کرده و بر لزوم حکمرانی فراگیر و عادلانه در توسعه این فناوری‌ها تأکید دارد.

اگرچه مطالعات پیشین به‌صورت پراکنده به عوامل سیاسی، فناورانه و اقلیمی مؤثر بر ارتقای بهره‌وری آب کشاورزی پرداخته‌اند، اما نبود یک چارچوب تحلیلی که بتواند تعامل میان نوع فناوری، شرایط اقلیمی و سیاست‌های مدیریتی را به‌طور هم‌زمان بررسی کند، همچنان یک شکاف علمی مهم محسوب می‌شود. این تحلیل با بهره‌گیری از روش دلفی فازی، در پی شناسایی و تحلیل عوامل کلیدی مؤثر بر بهره‌وری آب کشاورزی است تا مبنایی علمی برای سیاست‌گذاری منطقه‌محور و تاب‌آور در مواجهه با چالش‌های آبی فراهم آورد.

۲. مواد و روش‌ها

روش دلفی شیوه‌ای برای جمع‌آوری نظر خبرگان و رسیدن به اجماع در موضوعات پیچیده است که با پرسشنامه‌های چندمرحله‌ای و ناشناس انجام می‌شود (Sablatzky, 2022). دلفی فازی نسخه پیشرفته‌ای از دلفی کلاسیک است که با بهره‌گیری از منطق فازی، به بررسی دقیق‌تر نظرات خبرگان در شرایط مبهم و همراه با عدم قطعیت می‌پردازد (De Hierro *et al.*, 2021). در این روش به‌جای استفاده از اعداد قطعی، از اعداد فازی مثلثی یا ذوزنقه‌ای استفاده می‌شود تا دامنه وسیع‌تری از دیدگاه‌ها را پوشش دهد (Alharbi and Khalifa, 2021). این روش در ارزیابی شاخص‌ها، تعیین معیارها و تصمیم‌گیری‌های پیچیده بسیار کاربردی و مؤثر است (De Hierro *et al.*, 2021). مراحل اجرای روش دلفی فازی به‌منظور غربالگری عوامل مطابق با شکل (۱) به‌صورت ساختاریافته طراحی می‌شود تا دیدگاه‌های خبرگان به‌صورت دقیق‌تری تحلیل گرد (Yin and Hanif, 2024).

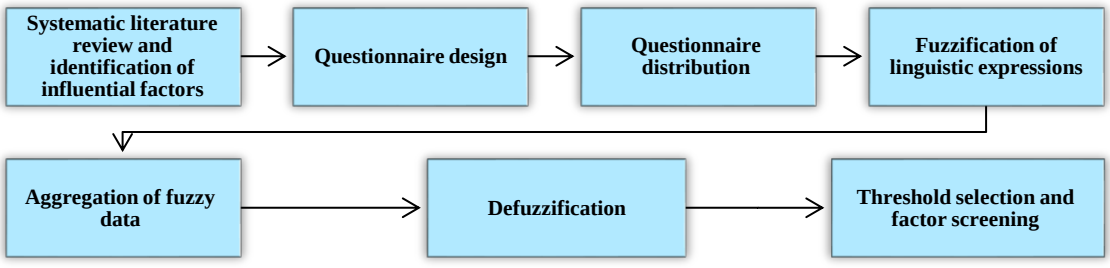


Figure 1. The fuzzy Delphi technique algorithm for screening purposes

۲. ۱. مرور نظام‌مند ادبیات و استخراج عوامل اثرگذار

به‌منظور غربالگری عوامل کلیدی مؤثر بر بهره‌وری آب کشاورزی، ابتدا یک مرور نظام‌مند ادبیات با هدف استخراج جامع عوامل و متغیرهای مطرح در متون علمی صورت گرفت. در این فرایند، با بررسی دقیق مقالات علمی، گزارش‌های تخصصی و منابع مرتبط، در مجموع ۱۹۴ عامل در سه دسته شامل تغییر اقلیم، سیاست‌ها و فناوری‌ها شناسایی و استخراج شد (جدول ۱ پیوست). از مجموع ۱۹۴ عامل شناسایی‌شده در مرحله مرور نظام‌مند ادبیات، ۴۳ عامل (۲۲/۱ درصد) در گروه تغییر اقلیم، ۷۷ عامل (۳۹/۶ درصد) در گروه سیاست‌ها و ۷۴ عامل (۳۸/۲ درصد) در گروه فناوری‌ها طبقه‌بندی شدند. در این مطالعه برای سهولت ارجاع به عوامل شناسایی‌شده از کدهای منحصر به فرد با ساختار «XX-Y-ZZ» استفاده شده است که بخش اول نشان‌دهنده گروه اصلی، بخش دوم عدد مربوط به‌شماره زیرگروه و بخش سوم شماره متوالی عامل در زیرگروه موردنظر را مشخص می‌کند.

کد «CL» نماینده گروه اصلی «تغییرات اقلیمی» است که شامل زیرگروه‌های «تغییرات آب‌وهوایی»، «تأثیرات آبی»، «رویدادهای شدید اقلیمی»، «تأثیرات مستقیم بر گیاهان» و «تأثیرات زیست‌محیطی» می‌باشد. کد «PO» معرف گروه «سیاست‌ها» است که زیرگروه‌های آن شامل «سیاست‌های حمایتی مالی»، «سیاست‌های مدیریتی و نظارتی»، «سیاست‌های توسعه‌ای و تحقیقاتی»، «سیاست‌های دیپلماسی و همکاری منطقه‌ای»، «سیاست‌های توسعه کشاورزی پایدار»، «سیاست‌های آموزشی و مشارکتی» می‌باشد. کد «TE» نمایانگر گروه «فناوری‌های نوین» است که زیرگروه‌های «روش‌های نوین در آبیاری»، «مدیریت منابع آب»، «مدیریت پایدار کشاورزی»، «آموزشی و مشارکتی»، «زیستی»، «پایش و سنجش» و «زیرساخت‌های مدیریت آب» را شامل می‌شود.

۲. ۲. طراحی پرسشنامه

طراحی پرسشنامه با طیف لیکرت شامل تدوین گویه‌هایی است که نگرش یا رفتار پاسخ‌دهنده را در قالب گزینه‌های ترتیبی (مانند کاملاً بااهمیت تا کاملاً بی‌اهمیت) می‌سنجد. این طیف امکان تحلیل شدت دیدگاه‌ها را فراهم کرده و با انتخاب تعداد مناسب گزینه‌ها (۵ یا ۷ درجه)، می‌توان داده‌های قابل اعتماد برای تحلیل آماری به‌دست آورد. در پیاده‌سازی الگوریتم دلفی فازی برای غربالگری شاخص‌ها، انتخاب طیف فازی مناسب جهت فازی‌سازی عبارت‌های کلامی خبرگان از اهمیت بالایی برخوردار است. طیف‌های نظیر طیف‌های هفت‌درجه‌ای یا نه‌درجه‌ای، که در آن هر سطح به یک عدد فازی مثلثی متناظر می‌شود، امکان مدل‌سازی دقیق عدم قطعیت و ابهام موجود در دیدگاه‌های خبرگان را فراهم می‌سازد (Habibi *et al.*, 2015). طیف لیکرت باید طوری طراحی شود که هم حساسیت سنجش را حفظ کند و هم دیدگاه پاسخ‌دهنده را بدون ابهام نشان دهد (Memmedova and Ertuna, 2023). شکل (۲) طیف لیکرت هفت گزینه‌ای را نشان می‌دهد.

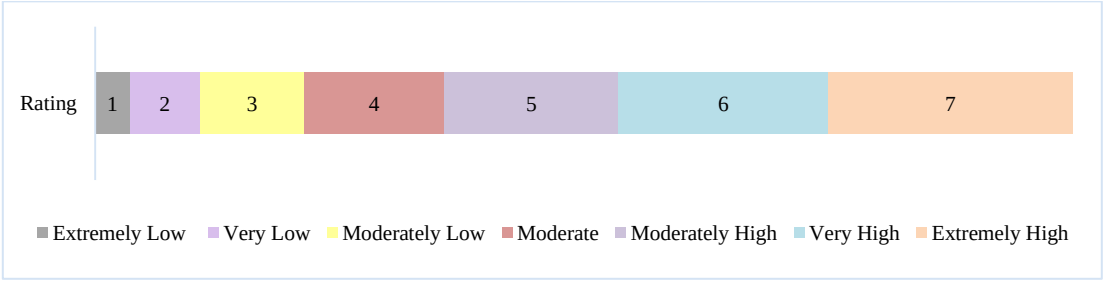


Figure 2. 7-Point Likert Scale

طیف لیکرت با وجود کاربرد گسترده برای سنجش متغیرها با اثرگذاری بالا، به‌دلیل ماهیت ترتیبی گزینه‌ها و استفاده از پرسشنامه‌های بسته[۵]، با مشکلاتی نظیر تحریف و کاهش دقت اطلاعات مواجه است (Memmedova and Ertuna, 2023). در این مطالعه، پرسشنامه‌ای نیمه‌ساختاریافته با طیف لیکرت هفت گزینه‌ای طراحی شد تا پاسخ‌دهندگان بتوانند عوامل تجربی مغفول را در قالب پیشنهادهای جدید بیان کنند و محدودیت‌های ساختارهای بسته کاهش یابد (جدول ۲ پیوست).

۲. ۳. توزیع پرسشنامه

توزیع پرسشنامه در مطالعات علمی می‌تواند به شیوه‌های متعددی همچون نمونه‌گیری تصادفی، خوشه‌ای، یا هدف‌مند صورت گیرد. با این‌حال، روش گلوله‌برفی به‌ویژه در پژوهش‌هایی با جامعه آماری تخصصی و پراکنده، یکی از کارآمدترین روش‌ها محسوب می‌شود. این روش با استفاده از زنجیره مشارکت‌کنندگان اولیه، نمونه را به‌صورت هدف‌مند گسترش داده و ضمن کاهش هزینه‌ها، دسترسی به پاسخ‌دهندگان واجد شرایط و اعتبار داده‌ها را افزایش می‌دهد (شکل ۳) (Gierczyk *et al*., 2024).

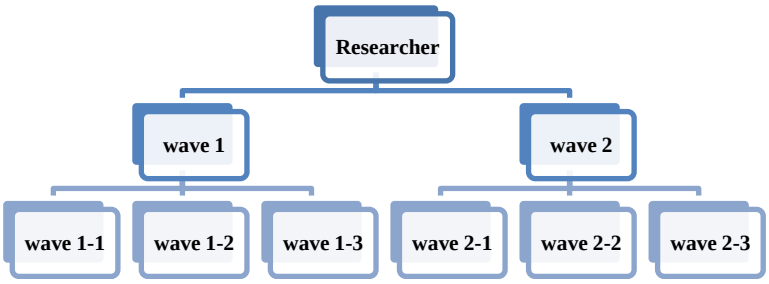


Figure 3. Snowball Sampling Method

۲. ۴. فازی‌سازی عبارات کلامی

پس از تعریف یا انتخاب طیف فازی مناسب و طراحی و توزیع پرسشنامه نظرات متخصصان گردآوری شده و فرایند فازی‌سازی روی داده‌های کلامی آن‌ها اعمال می‌گردد. تعیین ساختار هندسی و پارامترهای تابع عضویت، نظیر مرکز و عرض مثلث، عموماً بر مبنای دیدگاه‌های تخصصی خبرگان حوزه مربوطه یا تحلیل‌های مبتنی بر داده‌های تجربی صورت می‌گیرد، این نگرش موجب انطباق بیش‌تر مدل‌سازی فازی با واقعیت‌های موجود و ارتقای اعتبار نتایج پژوهش می‌شود (Biasetton *et al*., 2023). شکل (۴) نمونه نگاشت و چگونگی تبدیل گزینه‌های طیف لیکرت به اعداد فازی را نشان می‌دهد (جدول ۳ پیوست).

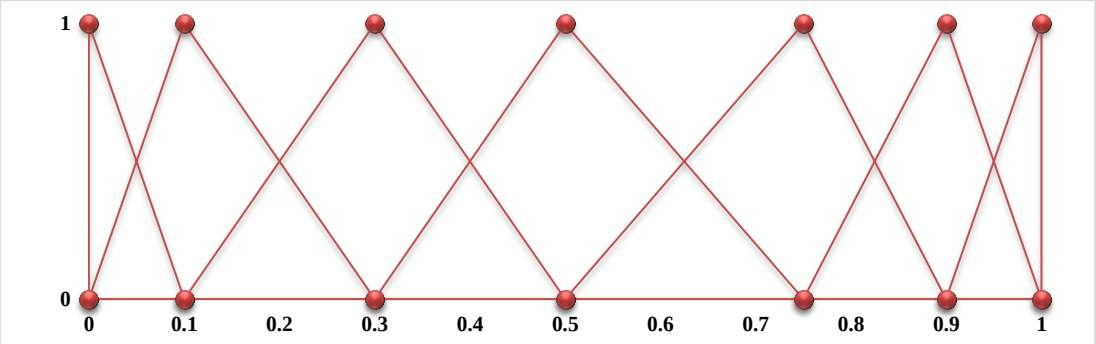


Figure 4. Fuzzy Modeling Using Triangular Membership Functions

هر عدد فازی مثلثی از سه مؤلفه ۱ (حداقل)، m (محتمل‌ترین) و u (حداکثر) تشکیل شده که به‌جای ارائه یک مقدار قطعی، طیفی از نظرات را منعکس می‌کند. این راهبرد امکان تحلیل دقیق‌تر تنوع دیدگاه‌ها را فراهم نموده و به تصمیم‌گیری مبتنی بر اجماع علمی در شرایط پیچیده کمک می‌نماید (Alharbi and Khalifa, 2021). اگر عدد فازی مثلثی با پارامترهای u, m, l باشد، آنگاه تابع عضویت مطابق شکل (۵) تعریف می‌شود.

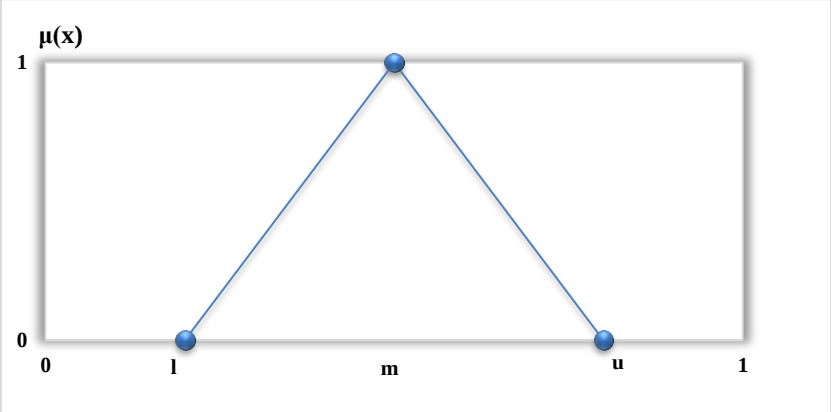


Figure 5. Membership Function of a Triangular Fuzzy Number

هنگامی‌که مقدار x در فاصله [l, m] قرار دارد، درجه عضویت با افزایش x به‌صورت یکنواخت افزایش یافته و در نقطه x = m به حداکثر مقدار خود یعنی ۱ می‌رسد. در مقابل، در بازه [m, u]، با افزایش مقدار x، درجه عضویت به‌صورت یکنواخت کاهش یافته و در x= u به صفر می‌رسد. بنابراین، تابع عضویت دارای دو بخش خطی افزایشی و کاهشی است که در رأس مثلث نقطه (m, 1) به هم متصل می‌شوند. در شرایط خاصی که مقادیر پایین، میانه و بالا برابر باشند (l = m = u)، عدد فازی مثلثی به یک مقدار قطعی[۷] تبدیل شده و عدم قطعیت از بین می‌رود. این ویژگی، گذار مستقیم از فضای فازی به فضای کلاسیک را فراهم می‌سازد (Habibi *et al.*, 2015). رابطه (۱) تابع عضویت عدد فازی مثلثی را نشان می‌دهد.

رابطه ۱)
$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } x < l \\ \frac{x-l}{m-l} & \text{if } l \le x \le m \\ \frac{u-x}{u-m} & \text{if } m \le x \le u \\ 0 & \text{if } x > u \end{cases}$$

درواقع در تحلیل دلفی فازی، عدد انتخابی پاسخ‌دهنده به‌جای یک مقدار قطعی، به‌صورت عدد فازی با دامنه‌ای از عدم‌قطعیت مدل‌سازی می‌شود. بنابراین در مدل‌سازی فازی طیف لیکرت، هر گزینه عددی مانند عدد ۱ به‌جای نمایش یک مقدار قطعی، به‌صورت عدد فازی مثلثی مانند (۰،۰،۰/۱) بیان می‌شود که بازتاب‌دهنده دامنه‌ای از دیدگاه فرد پاسخ‌دهنده در قالب حد پایین، مقدار مرکزی و حد بالاست. این بازه فازی میزان مخالفت یا توافق فرد را همراه با احتمال تردید، به‌صورت پیوسته و روان‌شناسانه نشان می‌دهد. این روش موجب می‌گردد که داده‌های پرسشنامه‌ای با واقع‌گرایی بیش‌تری تلفیق شده و در فرایند تحلیل تصمیم‌گیری، تفاوت‌های ظریف در ادراک افراد حفظ گردد.

۲. ۵. تجمیع داده‌های فازی

در فرایند تجمیع داده‌های فازی حاصل از دیدگاه‌های کارشناسان، مجموعه‌ای از روش‌های ترکیبی قابل بهره‌برداری است که هرکدام با توجه به ساختار محاسباتی و هدف تحلیلی خود، دارای مزایای مشخصی هستند. میانگین هندسی

فازی روشی متداول برای افزایش دقت در نمایش پراکندگی نظرات و کاهش سوگیری عددی است (Alcantud, 2023). اگر $\widetilde{F_1}$ و $\widetilde{F_2}$ اعداد فازی مربوط به نظر دو خبره باشند و l، m و u به‌ترتیب حد پایین، حد وسط و حد بالای یک عدد فازی مثلثی باشند، میانگین هندسی فازی آن‌ها ($\tilde{f}$) بصورت زیر تعریف می‌شود (Alharbi and Khalifa, 2021):

$$\widetilde{F_1} = (l_1, m_1, u_1) \quad \text{رابطه ۲)}$$

$$\widetilde{F_2} = (l_2, m_2, u_2) \quad \text{رابطه ۳)}$$

$$\tilde{f} = ((l_1 \otimes l_2)^{\frac{1}{2}}, (m_1 \otimes m_2)^{\frac{1}{2}}, (u_1 \otimes u_2)^{\frac{1}{2}}) \quad \text{رابطه ۴)}$$

۲. ۶. فازی‌زدایی

در مرحله بعد روی اعداد فازی، اعم از مثلثی یا ذوزنقه‌ای مرحله‌ی فازی‌زدایی اجرا می‌گردد که طی آن داده‌های فازی به مقادیر قطعی و قابل تفسیر تبدیل می‌شوند. این فرایند، نقشی تعیین‌کننده در رتبه‌بندی معیارها و اتخاذ تصمیم نهایی ایفا کرده و مبنایی برای تحلیل نهایی فراهم می‌سازد. میانگین وزنی مرکز ثقل[۸] یکی از متداول‌ترین روش‌هاست که مقدار قطعی را با توجه به مرکز ثقل عدد فازی محاسبه می‌کند (Hsu *et al*, 2010). در منابع مرجع مرتبط با منطق فازی، بر این نکته تأکید شده است که مؤلفه میانی در عدد فازی مثلثی (M) غالباً بیانگر مرکز گرایش یا محتمل‌ترین مقدار از منظر تصمیم‌گیرنده است. در فازی‌زدایی، استفاده از ضرایب بزرگ‌تر برای مؤلفه Mباعث تمرکز خروجی بر ترجیحات مرکزی و کاهش اثر دیدگاه‌های افراطی می‌شود. این الگو به‌ویژه در روش‌های مرکز ثقل اصلاح‌شده به‌کار گرفته می‌شود تا دقت و قابلیت تفسیر نتایج افزایش یابد. رابطه (۵) روش دیفازی‌کردن اعداد فازی را نشان می‌دهد. در این معادله F عدد دیفازی شده و $\tilde{f}$ تجمیع فازی می‌باشد (Wang and Zhang, 2022).

$$\tilde{f} = (L, M, U) \rightarrow F = \frac{L + M + U}{3} \text{ or } F = \frac{L + 2M + U}{4} \text{ or } F = \frac{L + 4M + U}{3} \quad \text{رابطه ۵)}$$

۲. ۷. انتخاب آستانه و غربال‌سازی عوامل

در کاربرد دلفی فازی برای غربالگری معیارها، اگر عامل جدیدی توسط خبرگان به پرسشنامه اضافه نشود، تنها یک راند کافی است تا عوامل اصلی انتخاب و عواملی که پایین‌تر از آستانه قرار دارند حذف شوند، زیرا در این نوع تحلیل، هدف تأیید و تلخیص عوامل براساس اجماع اولیه خبرگان است. از این‌رو، تعیین مقدار آستانه به‌عنوان یک معیار تصمیم‌گیری، نقش کلیدی در تسریع فرایند غربالگری ایفا می‌کند و امکان حذف گزینه‌های کم‌اهمیت را فراهم می‌سازد. مقدار آستانه معمولاً براساس میانگین یا میانه مقادیر دیفازی‌شده، درصد توافق خبرگان، یا نوع طیف فازی به‌کاررفته تعیین می‌شود. با این‌حال، این میزان در مطالعات مختلف ممکن است براساس دیدگاه و قضاوت پژوهش‌گر تغییر یابد (Habibi *et al*., 2015).

۳. نتایج و بحث

۳. ۱. جمع‌آوری و تحلیل پرسشنامه‌ها

جامعه نمونه این مطالعه مطابق با جدول (۱) متشکل از ۱۸ متخصص حوزه‌های مرتبط با مهندسی آب، هواشناسی کشاورزی و علوم خاک بوده است که با بهره‌گیری از روش دلفی فازی در فرایند اعتبارسنجی مشارکت داشته‌اند. از نظر جنسیت، ۷۷/۸ درصد شرکت‌کنندگان مرد و ۲۲/۲ درصد زن بودند. محدوده سنی پاسخ‌دهندگان بین ۲۶ تا ۶۷ سال بوده و میانگین سنی آنان ۴۸ سال برآورد شده است. سطح تحصیلات ۷۲ درصد از افراد در مقطع دکتری یا دانشجوی دکتری تخصصی و ۲۸ درصد در مقطع کارشناسی ارشد بوده است که نشان‌دهنده سطح بالای تخصص علمی در جامعه

موردبررسی است. بیش از نیمی از شرکت‌کنندگان دارای ۳۰ سال یا بیش‌تر سابقه‌ی فعالیت حرفه‌ای در حوزه مربوطه بوده‌اند و میانگین تجربه کاری آن‌ها حدود ۲۱ سال محاسبه شده است.

Table 1. Characteristics of the Research Sample

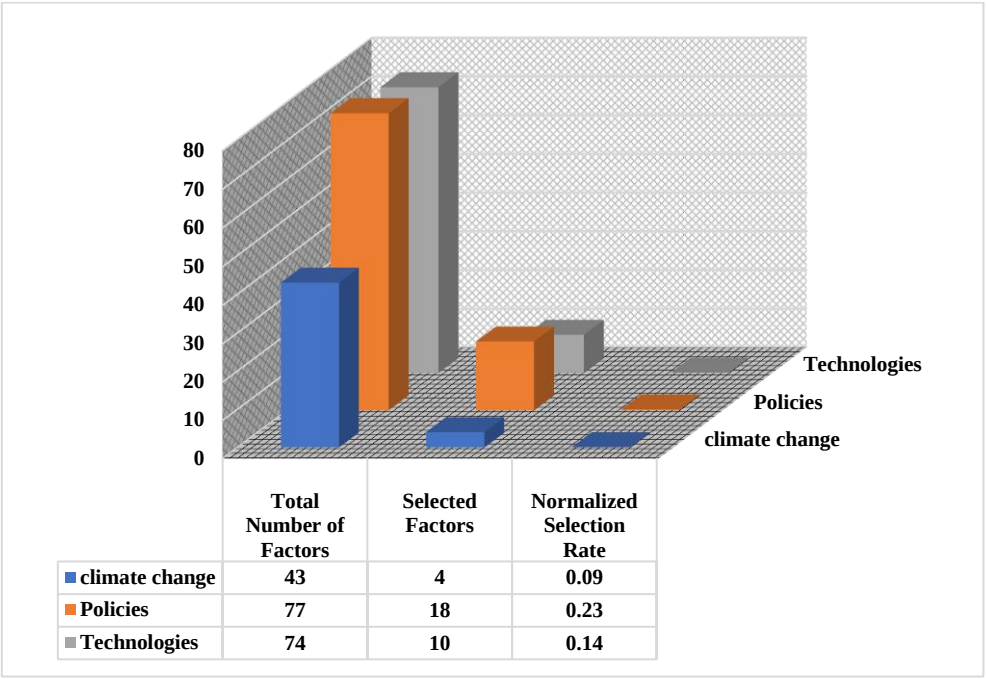
Respondent ID	Gender	Age	Field of Study	Education Level	Years of Experience in Relevant Field
wXjlh	♂	67	Irrigation and Drainage	PhD	42
DhNIW	♂	56	Irrigation and Drainage	PhD	35
H0jgX	♂	67	Irrigation and Drainage	PhD	30
kM5Eg	♂	61	Irrigation and Drainage	PhD	30
YIEho	♂	58	Water Resources Management	PhD	30
W1n5W	♂	65	Social Communication Sciences	Master's Degree	30
2nXGA	♂	41	Irrigation and Drainage	PhD	22
7Fvj6	♀	47	Soil Science	PhD	20
vkKXK	♂	42	Irrigation and Drainage	PhD	15
jEPpx	♂	40	Water Resources Management	PhD	15
vgirq	♂	34	Irrigation and Drainage	PhD	15
KUlP2	♀	33	Water Resources Management	PhD Candidate	14
deZSL	♀	33	Irrigation and Drainage	PhD Candidate	14
GsI9v	♂	46	Agricultural Meteorology	PhD	12
Pu4CG	♂	31	Irrigation and Drainage	PhD	10
jOoes	♂	30	Irrigation and Drainage	PhD Candidate	10
p7b8Y	♀	30	Water Resources Management	Master's Degree	10
kT8r0	♂	26	Irrigation and Drainage	PhD Candidate	8

۳. ۲. انتخاب مقدار آستانه

براساس رویه‌های مرسوم در تحلیل دلفی فازی، آستانه توافق برابر با ۰/۸ در نظر گرفته شد. تنها عواملی که امتیاز فازی آن‌ها برابر یا بیش‌تر از این آستانه بودند، به‌عنوان عوامل کلیدی انتخاب شدند. آستانه ۰/۸ به‌عنوان یک معیار نسبتاً سخت‌گیرانه، نشان‌دهنده سطح بالایی از توافق میان اعضای جامعه نمونه است، این امر باعث تضمین همگرایی نتایج و پرهیز از پذیرش عوامل با توافق ضعیف می‌شود که اهمیت آن در مطالعات تصمیم‌گیری پیچیده با تعداد زیاد عوامل دوچندان است. با توجه به تعداد عوامل استخراج‌شده از مرور ادبیات، انتخاب آستانه بالاتر مانع از پراکندگی بیش از حد عوامل منتخب می‌شود و در نتیجه مدل نهایی قابلیت تفسیر و کاربرد عملی بهتری خواهد داشت.

۳. ۳. شناسایی و اولویت‌بندی عوامل کلیدی

در نتیجه این غربالگری فازی، چهار عامل از گروه تغییر اقلیم (۱۲/۵ درصد از کل عوامل برگزیده)، ۱۸ عامل از گروه سیاست‌ها (۵۶/۲۵ درصد از کل عوامل برگزیده) و ۱۰ عامل از گروه فناوری‌ها (۳۱/۲۵ درصد از کل عوامل برگزیده) به‌عنوان عوامل نهایی و اثرگذار شناسایی شدند. برای ارزیابی تطبیقی سهم گروه‌های موضوعی مختلف (تغییر اقلیم، سیاست‌ها و فناوری‌ها) در فرایند غربالگری عوامل مؤثر بر بهره‌وری آب کشاورزی با بهره‌گیری از روش دلفی فازی، از شاخص «نرخ انتخاب نرمال‌شده» استفاده شده است. این شاخص با تقسیم تعداد عوامل منتخب هر گروه بر تعداد کل عوامل آن گروه محاسبه می‌شود تا اثرات سوگیرانه ناشی از تفاوت در حجم اولیه داده‌ها خنثی گردد. شکل (۶) نمایانگر توزیع ۳۲ عامل شناسایی‌شده در سه حوزه سیاست‌ها، فناوری و تغییر اقلیم است.



	Total Number of Factors	Selected Factors	Normalized Selection Rate
climate change	43	4	0.09
Policies	77	18	0.23
Technologies	74	10	0.14

Figure 6. Distribution of Factors Influencing Decision-Making

طبق شکل (۶) نرخ انتخاب نرمال‌شده برای گروه سیاست‌ها برابر با ۴/ ۲۳درصد، برای فناوری‌ها ۱۳/۵ درصد و برای تغییر اقلیم ۹/۳ درصد بوده است. بنابراین، انتخاب غالب عوامل سیاستی، تنها ناشی از تعداد بیش‌تر عوامل اولیه نبوده بلکه بیانگر اهمیت و اجماع بالای متخصصان در ارزیابی کیفی آن‌هاست. اگرچه فناوری‌ها از نظر تعداد عوامل منتخب در رتبه دوم قرار دارند، اما برخی از عوامل فناورانه دارای بالاترین مقادیر دیفازی بوده‌اند که نشان‌دهنده پتانسیل بالای مداخلات فناورانه در بهبود کارایی مصرف آب است.

نتایج پژوهش Smith *et al.* (2023) نشان می‌دهد که استفاده از فناوری‌های پیشرفته و سیاست‌گذاری هوشمند، کلید کاهش مصرف بی‌رویه آب و افزایش بهره‌وری در کشاورزی است. در مقابل، با وجود اهمیت تغییر اقلیم به‌عنوان یک متغیر کلان، تنها تعداد محدودی از عوامل این گروه توانسته‌اند به سطح اجماع بالا در میان خبرگان دست یابند، که این امر ممکن است ناشی از عدم امکان مداخله مستقیم در این حوزه یا ابهام در برآورد اثرات آن باشد. این تفاوت در نسبت گزینش نهایی، بیانگر آن است که سیاست‌ها، در مقایسه با دو گروه دیگر، از نگاه خبرگان نقش تعیین‌کننده‌تری در ارتقای بهره‌وری آب کشاورزی دارند. راهنمای سیاست‌های سازمان فائو در زمینه بهبود بهره‌وری آب، اهمیت اساسی سیاست‌های حمایتی و فناوری‌های محیط زیستی را که نقش مهمی در افزایش کارایی و پایداری مدیریت منابع آب دارند برجسته می‌کند (FAO, 2019). جدول (۲) عوامل برگزیده را به تفکیک سه حوزه ارائه می‌دهد.

شکل (۷) به‌منظور تحلیل مقایسه‌ای مقادیر دیفازی عوامل منتخب در سه حوزه سیاستی (PL)، اقلیمی (CL) و فناوری (TE) ارائه شده است.

۳. ۳. ۱. تغییراقلیم

با توجه به شکل (۷) گروه تغییر اقلیم دارای مقادیر دیفازی قابل‌توجهی است (بین ۰/۸۲ تا ۰/۸۷). انتخاب عوامل «تغییر کیفیت منابع آب زیرزمینی» (۰/۸۷) و «تغییر کیفیت منابع آب سطحی» (۰/۸۵) نشان‌دهنده تأثیرات گسترده تغییرات اقلیمی بر کیفیت

منابع آبی است. همزمان، «کاهش سطح آب‌های زیرزمینی» (۰/۸۵) نیز از دیدگاه خبرگان تأثیر بالایی بر بهره‌وری دارد. طبق پژوهش Akhavan *et al.* (2023)، تغییرات اقلیمی، از طریق کاهش منابع آب قابل‌استفاده، به‌طور مستقیم بر اولویت‌بندی الگوی کشت اثرگذارند. «وقوع موج‌های گرمای شدید» با مقدار دیفازی ۰/۸۲ بیانگر اهمیت رویدادهای حدی اقلیمی بر چرخه کشت و نیاز آبی محصولات است. نتایج پژوهش Dehghani *et al.* (2020a, b)، مؤید آن است که تغییرات اقلیمی از طریق بروز خشک‌سالی‌های هیدرولوژیکی و هواشناسی نقش مؤثری در کاهش کیفیت و کمیت منابع آبی ایفا می‌کنند. این یافته‌ها بر اهمیت موج‌های گرمای شدید و نقش آن در اختلالات چرخه کشت و نیاز آبی محصولات تأکید دارند.

Table 2. Key Agricultural Water Productivity Factors Identified via Fuzzy Delphi Method

Group	Sub Group	Factor	Code	Crisp Value
Climate change	Hydrological Impacts	Decline in groundwater levels	CL-2-02	0.85
		Change in surface water quality	CL-2-04	0.85
		Change in groundwater quality	CL-2-05	0.87
	Extreme Climatic Events	Occurrence of extreme heat waves	CL-3-04	0.82
Policies	Financial Support	Public support for modernization of traditional agricultural equipment	PO-1-03	0.80
		Incentivizing farmers to adopt crop pattern diversification	PO-1-10	0.81
		Guaranteed procurement of low-water-demand agricultural products	PO-1-11	0.80
		Tax exemptions for farmers utilizing water-saving cultivation methods	PO-1-12	0.86
	Managerial and Regulatory	Revision of agricultural water pricing tariffs	PO-2-08	0.84
		Development of regulatory frameworks for sustainable water resource exploitation	PO-2-09	0.83
		Allocation of water quotas for different crops based on water demand and climatic conditions	PO-2-10	0.87
		Installation of smart meters on agricultural wells	PO-2-13	0.86
		Development of information systems and online monitoring platforms for agricultural water resources	PO-2-17	0.82
		Public dissemination of data on water extraction, consumption, and status for independent researchers	PO-2-18	0.81
		Creation of a publicly accessible national database on agricultural water productivity	PO-2-19	0.87
		Delegation of water resource management to local entities with direct stakeholder participation	PO-2-23	0.83
	Developmental and Research	Continuous reporting of water productivity indicators at national and regional levels	PO-3-02	0.88
		Periodic evaluation of irrigation projects in terms of efficiency and effectiveness	PO-3-03	0.85
	Sustainable Agricultural Development	Promotion of genetic improvement and selection of water- and heat-resilient crop varieties	PO-5-02	0.90
		Empowerment of local communities in participatory water resource management	PO-5-03	0.81
		Training and equipping cooperatives for the implementation of sustainable irrigation projects	PO-5-04	0.85
	Educational and Participatory	Engagement of farmers in monitoring and evaluating water-related projects	PO-6-05	0.82
Technologies	Modern Irrigation Methods	Implementation of smart irrigation systems	TE-1-03	0.82
	Sustainable Agricultural Management	Transplanting cultivation to reduce irrigation period	TE-3-02	0.81
		Soil salinity management through soil amendment techniques	TE-3-03	0.81
		Fertigation technique	TE-3-06	0.83
	Educational and Participatory	Use of mass media to promote water-saving culture in agriculture	TE-4-02	0.81
	Biological	Utilizing Biotechnological Approaches to Enhance Plant Resistance to Environmental Stresses	TE-5-01	0.83
		Developing drought-resistant crop varieties	TE-5-02	0.90
		Using early-maturing cultivars to reduce the growth period	TE-5-05	0.88
		Producing high-performance hybrid seeds	TE-5-06	0.92
	Monitoring and Evaluation	Application of soil moisture sensors for irrigation scheduling	TE-6-05	0.81

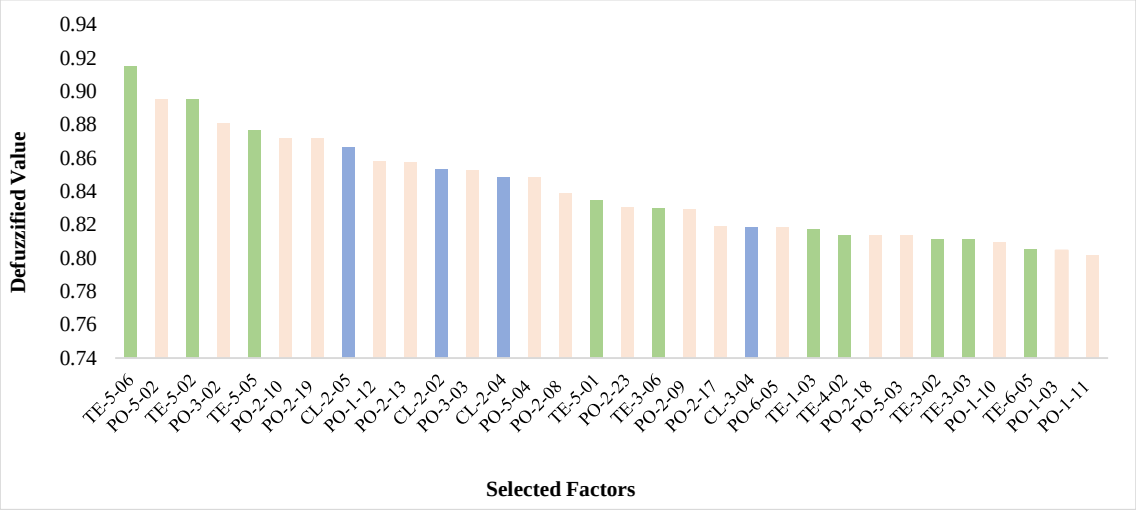


Figure 7. Distribution of Defuzzified Values Across Extracted Factors

Mahadevan *et al.* (2024) در پژوهشی نشان می‌دهند که افزایش دما منجر به تبخیر بیش‌تر، کاهش منابع آب زیرزمینی و افت کیفیت منابع سطحی می‌شود. طبق نتایج پژوهش Ahmadpari and Khaustov (2025a)، موج‌های گرمای شدید و تغییر الگوهای بارندگی، بهره‌وری کشاورزی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. Dehghani *et al.* (2024) در یک مطالعه، همبستگی بالای شاخص‌های رطوبتی با عملکرد محصول را نشان داده‌اند که بیانگر اثر مستقیم تغییرات اقلیمی بر محصولات زراعی است. نتایج مطالعه Basereh *et al.* (2023)، حاکی از آن است که رخدادهایی مانند شوری خاک و موج‌های گرمایی می‌توانند بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی محصولات را تحت‌تأثیر قرار دهند. Srivastav *et al.* (2021) در پژوهشی نشان می‌دهند که گرمایش زمین و تغییرات شدید آب‌وهوایی موجب کاهش کیفیت منابع آب، افت تولید محصولات کشاورزی و تهدید امنیت غذایی شده‌اند.

برای مقابله با این چالش‌ها، راه‌کارهایی مانند توسعه کشت محصولات مقاوم، مدیریت هوشمند منابع آب، استفاده از فناوری‌های نوین در آبیاری و مشارکت ذی‌نفعان پیشنهاد شده است. طبق نتایج این بررسی اتخاذ رویکردی جامع و چندبُعدی در سیاست‌گذاری و اقدامات فنی، کلید تاب‌آوری کشاورزی و منابع آب در برابر تغییر اقلیم است. در سطح ملی، برنامه‌هایی مانند «طرح ملی سازگاری با تغییر اقلیم» وزارت نیرو و «اصلاح الگوی کشت» وزارت جهاد کشاورزی، به‌طور مستقیم با چالش‌های ناشی از تغییر اقلیم مقابله می‌کنند. این برنامه‌ها شامل پایش افت سطح آب‌های زیرزمینی، توسعه کشت مقاوم به گرما و استفاده از فناوری‌های نوین آبیاری هستند (Islami *et al.*, 2024; Jafari *et al.*, 2023; Seventh Development Plan of Iran, 2023) که با نتایج این پژوهش هم‌راستا هستند.

۳. ۳. ۲. سیاست‌ها

سیاست‌ها بیش‌ترین تنوع و گستره موضوعی را در تحلیل دلفی فازی دارند. مقادیر دیفازی بین ۰/۸ تا ۰/۹ نشان از اجماع قوی خبرگان درباره اهمیت مداخله‌های سیاستی دارد. بالاترین مقدار دیفازی، ۰/۹، مربوط به «حمایت از اصلاح ژنتیکی گیاهان» است، که بیانگر جایگاه برجسته سیاست‌های تحقیقاتی و اهمیت زیست‌فناوری در افزایش مقاومت گیاهان به تنش‌های محیطی است. Najm *et al.* (2025) سیاست‌های تحقیقاتی مانند اصلاح ژنتیکی و مدیریتی نظیر سهمیه‌بندی آب را ابزارهای مؤثری برای افزایش تاب‌آوری اقلیمی دانسته‌اند. نتایج پژوهش ایشان نشان می‌دهد که

ترکیب سیاست‌های مالی، مدیریتی، پژوهشی و آموزشی می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در بهینه‌سازی مصرف آب کشاورزی ایفا کند. Inanloo *et al.* (2023)، در پژوهشی مهم‌ترین عوامل مؤثر بر بهره‌وری آب کشاورزی در استان قزوین را اقدامات زراعی- مدیریتی، زیرساخت‌های فنی، مدیریت آبیاری و برنامه‌های ترویجی معرفی کرد.

در مطالعه پیش‌رو نیز سیاست‌های مدیریتی از جمله «تعیین سهمیه‌بندی آب براساس اقلیم و نیاز آبی» (۰/۸۷) و «ایجاد پایگاه داده ملی برای بهره‌وری آب» (۰/۸۷) در سطح بالا ارزیابی شده‌اند. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که سیاست‌های حمایتی و مدیریتی در کشاورزی نقش مؤثری در افزایش بهره‌وری آب دارند. نتایج پژوهش Ebrahimi (2025) تأکید دارد که بازنگری در تعرفه‌های آب و توسعه سامانه‌های هوشمند پایش منابع آبی تأثیر قابل‌توجهی در کاهش مصرف و افزایش کارایی آب دارد. Gruère *et al.* (2025) در پژوهشی به بررسی راه‌کارهای اصلاح سیاست‌های آبی در کشاورزی پرداخته و شرایطی مانند مشارکت راهبردی ذی‌نفعان، هم‌راستایی نهادی و تنظیم مشوق‌های اقتصادی را برای موفقیت در این مسیر پیشنهاد می‌کنند. این مطالعه بر ضرورت حذف یارانه‌های مخرب، مدیریت برداشت آب زیرزمینی، مقابله با آلودگی‌های کشاورزی (استفاده بی‌رویه از کودهای شیمیایی، سموم دفع آفات و برداشت‌های ناپایدار از منابع طبیعی) تأکید دارد. Ahmadpari and Khaustov (2025b)، نقش عدالت اقلیمی و آموزش عمومی را در مواجهه با تغییرات منابع آبی و گرمایش شدید تبیین کرده‌اند.

در سطح ملی، سیاست‌هایی مانند «بازنگری در تعرفه‌های آب کشاورزی»، «توسعه سامانه‌های هوشمند پایش منابع آبی» و «تعیین سهمیه‌بندی آب براساس اقلیم» در برنامه‌های وزارت نیرو و وزارت جهاد کشاورزی گنجانده شده‌اند. برای نمونه، در قانون برنامه هفتم توسعه (۱۴۰۳–۱۴۰۷)، بر ضرورت ارتقاء بهره‌وری آب، حذف یارانه‌های مخرب و توسعه زیرساخت‌های داده‌محور تأکید شده است (Seventh Development Plan of Iran, 2023). هم‌چنین، پروژه‌های مشترک با فائو (به‌عنوان مثال در دشت قزوین)، شامل آموزش کشاورزان، توسعه آبیاری هوشمند و پایش بهره‌وری آب، مصداقی از اجرای سیاست‌های مدیریتی و پژوهشی در سطح عملیاتی هستند (FAO, 2021).

۳. ۳. ۳. فناوری‌ها

فناوری‌ها به‌ویژه در حوزه‌های زیست‌فناوری و آبیاری هوشمند، نقش بسیار مهمی در ارتقای بهره‌وری دارند. «حسگرهای رطوبت خاک» (۰/۸۱) در زیرگروه فناوری‌های پایشی و «آبیاری هوشمند» (۰/۸۲) در زیرگروه روش‌های نوین آبیاری قرار دارند، که از قابلیت‌های دقیق سنجش و زمان‌بندی آبیاری بهره‌مندند. طبق نتایج مطالعه Zahed Pouriganeh *et al.* (2025) کشاورزی هوشمند اقلیم با استفاده از حسگرهای رطوبت خاک، فناوری‌هایی چون IoT و هوش مصنوعی، موجب بهینه‌سازی مصرف آب، افزایش بهره‌وری محصولات و مقابله با آثار تغییرات اقلیمی می‌شود. طبق نتایج پژوهش Pourgholam *et al.* (2024)، صنعت کشاورزی با بهره‌گیری از اینترنت اشیا به سیستمی هوشمند، دقیق و داده‌محور تبدیل شده است که روش‌های سنتی را دگرگون کرده است. این فناوری با استفاده از حسگرهای بی‌سیم و دستگاه‌های ارتباطی، در مراحل مختلف کشاورزی مانند آبیاری، پایش محصول و تشخیص آفات نقش مؤثری ایفا می‌کند.

«تولید بذرهای هیبریدی» (۰/۹۲) و «تولید واریته‌های مقاوم به خشکی» (۰/۹) بالاترین مقادیر دیفازی کل عوامل را به خود اختصاص داده‌اند و مؤید ظرفیت بالای زیست‌فناوری در کاهش وابستگی به منابع آبی هستند. مطالعات انجام‌شده نشان داده‌اند که نوع هیبرید تأثیر چشم‌گیری بر شاخص‌های بهره‌وری آب دارد، به‌طوری‌که در شرایط آبیاری قطره‌ای، هیبریدهای مختلف از نظر عملکرد بیولوژیکی و عملکرد دانه تفاوت معنی‌داری داشته‌اند (Mirzaei *et al.*, 2020). «استفاده از ارقام زودرس» (۰/۸۸) و «روش‌های کودآبیاری» (۰/۸۳) نشان می‌دهند که راه‌کارهای فناورانه می‌توانند

چرخه رشد گیاهان و مصرف آب را به‌طور مستقیم تحت تأثیر قرار دهند. مطالعه Yin *et al.* (2025) به بررسی نقش سیاست‌ها و فناوری‌ها در بهبود مدیریت منابع آب و ارتقای بهره‌وری در بخش کشاورزی پرداخته است.

این مطالعه نشان می‌دهد که سیاست‌گذاری‌های مؤثر و به‌کارگیری فناوری‌های نوین برای دست‌یابی به کشاورزی پایدار در شرایط چالش‌برانگیز تغییرات اقلیمی ضروری هستند. نتایج مطالعه Hashemi *et al.* (2024) و Latifi *et al.* (2018)، نشان دادند که استفاده از فناوری‌های نوین آبیاری می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی مصرف آب کشاورزی را کاهش داده و پایداری را افزایش دهد، هم‌چنین بر نقش برجسته سیاست‌ها در ارتقای بهره‌وری آب و سهم قابل‌توجه فناوری‌ها تأکید دارند. در سال‌های اخیر، توجه به تقویت زیرساخت‌های فناورانه در کشاورزی ایران در اسناد بالادستی مانند «قانون ارتقای بهره‌وری آب کشاورزی»، «نقشه راه آب کشور» و «سند دانش‌بنیان امنیت غذایی» بازتاب یافته است. اگرچه طبق نتایج مطالعه Bazrafshan *et al.* (2022)، ایران در فناوری‌های هوشمند و نانو دز زمینه کشاورزی هنوز در مراحل ابتدایی است.

در مقایسه با کشورهای پیشرفته مانند چین و سوئیس، که توسعه فناوری‌های نوین آبیاری به‌طور مستقیم در اولویت سیاست‌های کشاورزی قرار گرفته است، در ایران تمرکز اولیه بر سیاست‌گذاری و تنظیم‌گری بوده است. این تفاوت را می‌توان به محدودیت‌های زیرساختی، وابستگی به منابع دولتی، و نیاز به هماهنگی نهادی در ایران نسبت داد (Nouri *et al.*, 2023). در چین، سرمایه‌گذاری گسترده در فناوری‌های هوشمند آبیاری با حمایت بخش خصوصی و دولت محلی انجام شده است (Xu *et al.*, 2024)، درحالی‌که در ایران، اجرای فناوری‌ها اغلب نیازمند تصویب و پشتیبانی از سوی نهادهای مرکزی مانند وزارت نیرو و وزارت جهاد کشاورزی است. هم‌چنین، در سوئیس، وجود زیرساخت‌های داده‌محور و نظام‌های مالکیت بهره‌بردارانه، امکان پذیرش سریع‌تر فناوری‌های نو را فراهم کرده است (Groher *et al.*, 2020). بنابراین، اولویت سیاست‌ها در ایران نه‌تنها ناشی از ملاحظات فنی بلکه حاصل شرایط نهادی و اقتصادی کشور است. به‌عبارت دیگر، دولت ابتدا باید سیاست‌ها و چارچوب‌های اجرایی را تنظیم کند تا زمینه برای ورود و پذیرش فناوری‌ها فراهم شود. این برخلاف کشورهای توسعه یافته است که زیرساخت‌ها و سرمایه‌گذاری‌های لازم از قبل وجود دارد و فناوری‌ها به‌طور مستقیم در اولویت قرار می‌گیرند.

۴. نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش با بهره‌گیری از یک رویکرد نظام‌مند و مبتنی بر روش دلفی فازی، نشان داد که بهره‌وری آب کشاورزی تحت تأثیر مجموعه‌ای گسترده از عوامل بین‌رشته‌ای قرار دارد که در سه حوزه اصلی تغییر اقلیم، سیاست‌ها و فناوری‌ها قابل طبقه‌بندی هستند. از میان ۱۹۴ عامل استخراج‌شده از مرور نظام‌مند ادبیات، تنها ۳۲ عامل با عبور از آستانه‌ی فازی ۰/۸ به‌عنوان عوامل کلیدی انتخاب شدند. این عوامل شامل ۱۸ عامل سیاستی (۵۶/۲۵ درصد)، ۱۰ عامل فناورانه (۳۱/۲۵ درصد) و چهار عامل اقلیمی (۱۲/۵ درصد) بودند که نشان‌دهنده اجماع بالای خبرگان بر نقش سیاست‌ها و فناوری‌ها در ارتقای بهره‌وری آب کشاورزی است. در حوزه سیاست‌ها، عواملی نظیر «حمایت از اصلاح ژنتیکی گیاهان» (۰/۹)، «تعیین و ارائه مستمر شاخص بهره‌وری آب در سطح ملی و منطقه‌ای» (۰/۸۸) بالاترین مقادیر دیفازی را کسب کرده‌اند.

این یافته‌ها بیانگر اهمیت سیاست‌های تحقیقاتی، مدیریتی و داده‌محور در بهینه‌سازی مصرف آب هستند. هم‌چنین، سیاست‌های آموزشی و مشارکتی نظیر «مشارکت‌دادن کشاورزان در پایش و ارزیابی شیوه‌ی آبیاری مزارع» نیز با مقدار دیفازی ۰/۸۲ مورد تأیید خبرگان قرار گرفته‌اند. وجود عواملی همچون «انتشار عمومی داده‌های برداشت، مصرف و

وضعیت منابع آب برای پژوهش‌گران مستقل» و «ایجاد پایگاه داده ملی برای بهره‌وری آب»، نشان‌دهنده جایگاه کلیدی شفافیت اطلاعات به‌عنوان زیرساخت تصمیم‌سازی علمی در این حوزه است. این شیوه به‌وضوح بیانگر نیاز به تعامل مؤثر میان نهادهای اجرایی و پژوهشی برای ارتقای بهره‌وری و تحقق اهداف توسعه پایدار است. هم‌چنین تأکید بر داده‌محوربودن سیاست‌گذاری‌ها، اهمیت استفاده نظام‌مند از اطلاعات برای طراحی و ارزیابی سناریوهای بهینه مصرف آب را برجسته می‌سازد.

در حوزه فناوری، فناوری‌های زیستی مانند «تولید بذرهای هیبرید با عملکرد بالا و نیاز آبی کم» (۰/۹۲) و «تولید واریته‌های مقاوم به خشکی» (۰/۹) بیش‌ترین اجماع را داشته‌اند. هم‌چنین، فناوری‌های آبیاری هوشمند، کودآبیاری و حسگرهای رطوبت خاک نیز به‌عنوان ابزارهای مؤثر در ارتقای بهره‌وری معرفی شده‌اند. این نتایج نشان می‌دهند که نوآوری‌های فناورانه، به‌ویژه در زمینه اصلاح نباتات و مدیریت دقیق منابع آب، نقش کلیدی در کاهش وابستگی به منابع آبی دارند. در مقابل، عوامل اقلیمی با وجود اهمیت بنیادین، به‌دلیل ماهیت غیرقابل کنترل، سهم کم‌تری در راه‌کارهای اجرایی دارند. عواملی مانند «تغییر کیفیت منابع آب زیرزمینی» (۰/۸۷)، «کاهش سطح آب‌های زیرزمینی» (۰/۸۵) و «وقوع موج‌های گرمای شدید» (۰/۸۲) از دیدگاه خبرگان تأثیر بالایی بر بهره‌وری دارند، اما به‌عنوان متغیرهای زمینه‌ای، بیش‌تر در تحلیل ریسک و تدوین راهبردهای سازگاری اقلیمی کاربرد دارند. بر این اساس، تمرکز بر سیاست‌ها و فناوری‌های قابل مداخله، در کنار تدوین راهبردهای بلندمدت اقلیمی، می‌تواند مسیر مؤثری برای ارتقاء بهره‌وری آب کشاورزی فراهم سازد. با توجه به یافته‌های تحلیل دلفی فازی، پیشنهادهای سیاستی زیر برای ارتقای بهره‌وری آب کشاورزی ارائه می‌شود:

۱. طراحی سیاست‌های حمایتی داده‌محور: ایجاد سازوکارهای تصمیم‌گیری مبتنی بر داده‌های عملکردی و اقلیمی (مانند تدوین پایگاه داده ملی بهره‌وری آب کشاورزی)، به‌منظور هدف‌گذاری دقیق در تخصیص منابع و ارزیابی اثربخشی مداخلات.

۲. توسعه آموزش مشارکتی کشاورزان: اجرای برنامه‌های آموزشی و ترویجی با مشارکت بهره‌برداران، به‌ویژه در زمینه مدیریت بهینه آب، فناوری‌های نوین آبیاری و سازگاری با تغییرات اقلیمی.

۳. اصلاح مقررات تخصیص آب کشاورزی: بازنگری در ضوابط و دستورالعمل‌های تخصیص آب با هدف افزایش انعطاف‌پذیری، عدالت منطقه‌ای و بهره‌وری اقتصادی منابع آبی (به‌عنوان مثال در مقررات جدید، شاخص‌هایی مانند ارزش افزوده محصول، میزان اشتغال‌زایی و پایداری زیست‌محیطی لحاظ شوند).

۴. سرمایه‌گذاری در فناوری‌های زیستی و هوشمند: حمایت مالی هدف‌مند از تولید بذرهای مقاوم به خشکی و توسعه سامانه‌های آبیاری هوشمند، به‌عنوان مؤلفه‌های راهبردی برای افزایش بهره‌وری و کاهش هدررفت آب.

۵. تقویت زیرساخت‌های پایش اقلیمی به‌منظور سازگاری با تغییرات اقلیمی: توسعه شبکه‌های سنجش و تحلیل داده‌های اقلیمی برای پیش‌بینی مخاطرات و برنامه‌ریزی سازگار با تغییرات آب‌وهوایی.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Sustainable Development Goals
2. Climate-smart irrigation
3. Resilient
4. Sustainable
5. Closed-ended Questionnaire
6. Semi-structured Questionnaire
7. Crisp value
8. Centroid/Center of Gravity

۶. تشکر و قدردانی

از استادان محترم دانشگاه تهران و همچنین کلیه دستگاه‌های اجرایی و پژوهشی که با مشارکت در تکمیل پرسشنامه‌ها، نقش مؤثری در پیشبرد این پژوهش داشته‌اند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌گردد.

۷. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۸. منابع

Ahmadpari, H., & Khaustov, V. (2025a). Agricultural drought monitoring using meteorological indices in Darreh Dozdan Basin, Iran. *Advances in Civil Engineering and Environmental Science, 2*(2), 72–84.

Ahmadpari, H., & Khaustov, V. (2025b). Analyzing meteorological and hydrological droughts in the Darreh Dozdan River Basin through drought indices. *Journal of Environmental Engineering and Water Resources*. (Articles in press). (In Persian).

Akhavan Gighlou, K., Kheiri, M., Ahmadpari, H., Abbasi, S., & Kalateh, F. (2023). Assessment of physical, economic, and virtual water productivity indices in agricultural products (Case study: Moghan irrigation and drainage network, Ardabil province). *Water and Soil Resources Management and Modeling, 3*(3), 277-295. (In Persian).

Alcantud, J. C. R. (2023). Multi-attribute group decision-making based on intuitionistic fuzzy aggregation operators defined by weighted geometric means. *Granular Computing*, 8(6), 1857-1866.

Alharbi, M. G., & Khalifa, H. A. E. W. (2021). Enhanced Fuzzy Delphi Method in Forecasting and Decision-Making. *Advances in fuzzy systems*, 2021(1), 2459573.

Ammann, J., Umstätter, C., & El Benni, N. (2022). The adoption of precision agriculture enabling technologies in Swiss outdoor vegetable production: a Delphi study. *Precision Agriculture, 23*(4), 1354–1374.

Basereh, F., Ahmadpari, H., & Sharifi, M. (2023). Assessment of physical, economic, and virtual water productivity indices in agricultural products (Case study: Dehloran County, Ilam Province). *Water and Soil Resources Management and Modeling, 4*(3), 1–18. (In Persian)

Bazrafshan, J., Khalili, A., Zand Parsa, Sh., Sepaskhah, A., Alizadeh, A., & Farhudi, J. (2022). *Documentary* analysis of emerging irrigation and agricultural water technologies worldwide and their localization potential in Iran. *Strategic Research Journal in Agricultural Sciences and Natural Resources*, 7(2), 139-158. (In Persian).

Biasetton, N., Disegna, M., Barzizza, E., & Salmaso, L. (2023). A new adaptive membership function with CUB uncertainty with application to cluster analysis of Likert-type data. *Expert Systems with Applications*, 213, 118893.

Chavula, P., Kayusi, F., Lungu, G., Mambwe, H., & Uwimbabazi, A. (2024). AI Application in Climate-Smart Agricultural Technologies: A Synthesis Study. *LatIA*, 2, 330-330.

De Hierro, A., Sánchez, M., Puente-Fernández, D., Montoya-Juárez, R., & Roldán, C. (2021). A fuzzy Delphi consensus methodology based on a fuzzy ranking. *Mathematics*, 9(18), 2323.

Dehghani, T., Ahmadpari, H., Aghelmirrezaei, F., & Godarzi, A. (2020a). Analysis of hydrological drought using streamflow drought index (Case study: Dez River Basin, Iran). In: Proceeding of *5th International Conference on Food Science, Organic Agriculture and Food Security*, Tbilisi, Georgia.

Dehghani, T., Ahmadpari, H., Aghelmirrezaei, F., & Godarzi, A. (2020b). Meteorological drought monitoring using several drought indices (Case study: Aligudarz county). In: Proceeding of *7th International Conference on Innovation in Science and Technology*, 88-99, Amsterdam, Nederland.

Dehghani, T., Liaghat, A., Rezaei Rad, H., & Ahmadpari, H. (2024). Estimating grain corn yield based on Landsat 8 satellite imagery (Case study: Shahid Beheshti agro-industry lands, Dezful). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage, 18*(3), 433-447. (In Persian)

Du, M., Lei, J., & Li, S. (2025). Navigating the path to food security in China: Challenges, policies, and future directions. *Foods, 14*(4), Article 644.

Ebrahimi, A. (2025). The impact of water tariffs in the agricultural sector on productivity and resource sustainability. *Iranian Water Resources Research, 21*(1), 72-87. (In Persian).

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). FAO empowers Iranian farmers to improve agriculture water productivity in Qazvin Province. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. https://www.fao.org/family-farming/detail/ar/c/1370591

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2017). *Water accounting and auditing–A sourcebook (FAO Water Reports No. 43).* Retrieved from https://www.fao.org/3/i8868en/I8868EN.pdf

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2019). *Policy guide to improve water use efficiency in small-scale agriculture: The case of Burkina Faso, Morocco and Uganda.* Retrieved from http://www.fao.org/3/ca7144en/CA7144EN.pdf

Gierczyk, M., Gromkowska-Melosik, A., Scott, S., & Parker, C. (2024). The snowball sampling strategy in the field of social sciences: Contexts and considerations. *Przegląd Badań Edukacyjnych, 43*(2), 87-104.

Groher, T., Heitkämper, K., Walter, A., Liebisch, F., & Umstätter, C. (2020). Status quo of adoption of precision agriculture enabling technologies in Swiss plant production. *Precision Agriculture*, 21(6), 1327-1350.

Gruère, G., & Le Boëdec, H. (2025). *Navigating pathways to reform water policies in agriculture*. OECD Publishing.

Habibi, A., Jahantigh, F., & Sarafrazi, A. (2015). Fuzzy Delphi technique for forecasting and screening items. *Asian Journal of Research in Business Economics and Management, 5*(2), 130-143.

Hashemi, S. Z., Darzi-Naftchali, A., Karandish, F., Ritzema, H., & Solaimani, K. (2024). Enhancing agricultural sustainability with water and crop management strategies in modern irrigation and drainage networks. *Agricultural Water Management, 305*, Article 109110.

Hsu, Y. L., Lee, C. H., & Kreng, V. B. (2010). The application of fuzzy Delphi method and fuzzy AHP in lubricant regenerative technology selection. *Expert Systems with Applications, 37*(1), 419-425.

Inanloo Tayfe Yaghmurlu, M., Nazari, B., & Sotoodehnia, A. (2023). Investigating the affecting components of water productivity by factor analysis approach (Case study: Qazvin Province). *Journal of Water and Soil Knowledge, University of Tabriz, 33*(3), 69-81. (In Persian)

Islami, A., Shirvanian, A., & Zareian, R. (2024). The impact of crop pattern reform on physical and economic irrigation water productivity of field crops in Fars Province: A case study of Qaderabad–Madarsoliman Plain. *Journal of Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 25(Spring), 17-37. (In Persian)

Islamic Consultative Assembly. (2023). The Seventh Five-Year Development Plan of the Islamic Republic of Iran (2024-2028). *Official Gazette of the Islamic Republic of Iran*, No. 23093. (In Persian)

Islamic Republic of Iran. (2010). Law on Increasing Productivity in Agriculture and Natural Resources. Islamic Consultative Assembly. Retrieved from https://rc.majlis.ir/fa/law/show/782387

Jafari, A. M., Nikooei, A., Ghadami Firouzabadi, A., Shanazi, K., & Bakhtiari, M. R. (2023). The impact of crop pattern reform policies on water resource conservation and wheat self-sufficiency: A case study of Kaboudarahang Plain. *New Approaches in Water and Environmental Engineering*, 2(2), 170-183. (In Persian).

Jiang, L., Tian, Y., Chen, N., & Luo, Y. (2023). An empirical exploration into the determinants of rice farmers' decisions to adopt low-carbon agricultural technologies in Hubei Province, China. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change,* 28(4), 15.

Latifi, S., Rahali, H., Yadavar, H., Sa'di, H., & Shahrastani, S. A. (2018). Identification and explanation of implementation stages of conservation agriculture development in Iran using fuzzy Delphi approach. *Iranian Journal of Biosystems Engineering, 49*(1), 107-120. (In Persian)

Li, M., Zhou, S., Shen, S., Wang, J., Yang, Y., Wu, Y., ... & Lei, Y. (2024). Climate-smart irrigation strategy can mitigate agricultural water consumption while ensuring food security under a changing climate. *Agricultural Water Management, 292*, Article 108663.

Mabhaudhi, T., Chimonyo, V. G., Senzanje, A., & Chivenge, P. P. (2025). *Enhancing Water and Food Security Through Improved Agricultural Water Productivity: New Knowledge, Innovations and Applications* (p. 391). Springer Nature.

Mahadevan, M., Noel, J. K., Umesh, M., Santhosh, A. S., & Suresh, S. (2024). Climate change impact on water resources, food production and agricultural practices. In *The Climate-Health-Sustainability Nexus: Understanding the Interconnected Impact on Populations and the Environment* (pp. 207-229).

Marques, J., Guilló, M., Bas, E., Ramazanova, M., & Albuquerque, H. (2023). Setting research priorities for effective climate change management and policymaking: A Delphi study in Bolivia and Paraguay. *Sustainability, 15*(20), Article 14993.

Memmedova, K., & Ertuna, B. (2023). Development of a fuzzy Likert scale to measure variables in social sciences. *Information Sciences, 654*, Article 119792.

Mirzaei, A., Ebrahimian, H., Nazi Qomshlo, A., & Raja, A. (2020). Evaluation of performance and water productivity in various corn hybrids under drip-tape irrigation system. *Iranian Journal of Water and Soil Research, 52*(1), 161–173. (In Persian)

Najm Abed Al-Nuaimi, S., Khairy Abdullah, S., Fadhel Eisa Muhsin, A., Salman Husein, B., Abdul Kareem Khazal, F., Amini, A., & Ahmadpari, H. (2025). International climate change law: Strategies for mitigation, adaptation, and accountability. *Water and Soil Management and Modelling,* 5(Special Issue: Climate Change and Effects on Water and Soil), 18-31.

Nouri, M., Homaee, 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.

Patle, G. T., Kumar, M., & Khanna, M. (2020). Climate-smart water technologies for sustainable agriculture: A review. *Journal of Water and Climate Change*, 11(4), 1455-1466.

Pourgholam Amiji, M., Haji Rad, A., Ahmadali, Kh., & Liaghat, A. (2024). Smart irrigation based on the Internet of Things (IoT). *Iranian Journal of Water and Soil Research, 55*(9), 1647-1678. (In Persian).

Prutzer, E., Patrick, A., Ishtiaque, A., Vij, S., Stock, R., & Gardezi, M. (2023). Climate-smart irrigation and responsible innovation in South Asia: A systematic mapping. *Ambio, 52*(12), 2009-2022.

Sablatzky, T. (2022). The Delphi method. *Hypothesis: Research Journal for Health Information Professionals, 34*(1).

Shah, W. U. H., Hao, G., Yasmeen, R., Yan, H., Shen, J., & Lu, Y. (2023). Role of China's agricultural water policy reforms and production technology heterogeneity on agriculture water usage efficiency and total factor productivity change. *Agricultural Water Management*, 287, 108429.

Smith, M. D., Sikka, A., Dirwai, T. L., & Mabhaudhi, T. (2023). Research and innovation in agricultural water management for a water-secure world. *Irrigation and Drainage*, 72(5), 1245-1259.

Srivastav, A. L., Dhyani, R., Ranjan, M., Madhav, S., & Sillanpää, M. (2021). Climate-resilient strategies for sustainable management of water resources and agriculture. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(31), 41576-41595.

Supreme Council of Cultural Revolution (2023) Knowledge-Based Food Security Document. (In Persian).

High Council of Water. (2023). National Water Roadmap. (In Persian).

Wang, M., & Zhang, K. (2022). Improving agricultural green supply chain management by a novel integrated fuzzy-delphi and grey-WINGS model. *Agriculture*, 12(10), 1512.

Xu, Q., Boelens, R., & Veldwisch, G. J. (2024). High-Efficiency Irrigation. *International Journal of the Commons*, *18*(1), 148-163.

Yin, T., & Hanif, H. (2024). Fuzzy Delphi method: A step-by-step guide to obtain expert consensus on MUETBot functionalities. *International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences, 14*(4), 1097-1104.

Yin, W., Yang, X., & Liu, W. (2025). Sustainable management and regulation of agricultural water resources in the context of global climate change. *Sustainability, 17*(6), Article 2760.

Yuan, X., Li, S., Chen, J., Yu, H., Yang, T., Wang, C., ... & Ao, X. (2024). Impacts of global climate change on agricultural production: A comprehensive review. *Agronomy, 14*(7), Article 1360.

Zamani, O., Azadi, H., Mortazavi, S., Balali, H., Moghaddam, S., & Jurík, Ľ. (2020). The impact of water-pricing policies on water productivity: Evidence of agriculture sector in Iran. *Agricultural Water Management, 245*, Article 106548.

Zhou, K., & Li, J. (2024). Impact of the comprehensive agricultural water use reform policy on food production: Quasinatural experimental evidence from China. *Agricultural Water Management*, 302, 108981.

پیوست‌ها

Table 1. Influential factors on agricultural water productivity identified through literature review

Row	Code	Factor
1	CL-1-01	Change in annual mean temperature
2	CL-1-02	Change in temperature pattern regimes during the crop growth period
3	CL-1-03	Change in diurnal temperature range
4	CL-1-04	Change in annual average precipitation
5	CL-1-05	Change in temporal and spatial precipitation distribution pattern
6	CL-1-06	Change in relative humidity
7	CL-1-07	Incidence of drought periods
8	CL-1-08	Occurrence of pluvial episodes (wet spells)
9	CL-1-09	Change in solar radiation intensity
10	CL-1-10	Variation in atmospheric pressure
11	CL-1-11	Changes in wind patterns
12	CL-2-01	Sea level rise
13	CL-2-02	Decline in groundwater levels
14	CL-2-03	Decline in river and lake volumes
15	CL-2-04	Change in surface water quality
16	CL-2-05	Change in groundwater quality
17	CL-2-06	Saltwater intrusion into aquifers
18	CL-2-07	Alteration in runoff timing
19	CL-3-01	Increase in intensity of flash floods
20	CL-3-02	Increase in frequency of flash floods
21	CL-3-03	Increase in occurrence of storms and tornadoes
22	CL-3-04	Occurrence of extreme heat waves
23	CL-3-05	Occurrence of sudden cold spells
24	CL-3-06	Occurrence of late-season frosts
25	CL-3-07	Hail precipitation
26	CL-4-01	Increase in plant transpiration
27	CL-4-02	Rise in atmospheric CO_2 concentration
28	CL-4-03	Accumulation of ground-level ozone
29	CL-4-04	Disruption in nutrient uptake dynamics
30	CL-4-05	Heightened susceptibility to pests and diseases
31	CL-5-01	Shifts in pollinator population distribution
32	CL-5-02	Alteration in biodiversity indices
33	CL-5-03	Change in soil pH levels
34	CL-5-04	Increase in soil salinity
35	CL-5-05	Acceleration of soil erosion
36	CL-5-06	Reduction of native vegetation cover
37	CL-5-07	Disturbance in soil microbial dynamics
38	CL-5-08	Proliferation of pathogenic fungi and bacteria
39	CL-5-09	Disruption in ecological cycles
40	CL-5-10	Decline in habitat quality
41	CL-5-11	Migration of invasive species
42	CL-5-12	Degradation of soil structure
43	CL-5-13	Soil pollution from acid rain
44	PO-1-01	Direct governmental subsidies for modern irrigation systems
45	PO-1-02	Partial funding for maintenance of irrigation infrastructure
46	PO-1-03	Public support for modernization of traditional agricultural equipment
47	PO-1-04	Financial assistance for irrigation equipment manufacturers
48	PO-1-05	Funding for supplementary irrigation implementation
49	PO-1-06	Establishment of farmer relief funds against drought
50	PO-1-07	Agricultural insurance for drought and natural disasters
51	PO-1-08	Allocation of resources for drought monitoring and early warning systems
52	PO-1-09	Rewarding exemplary farmers in water resource management
53	PO-1-10	Incentivizing farmers to adopt crop pattern diversification
54	PO-1-11	Guaranteed procurement of low-water-demand agricultural products
55	PO-1-12	Tax exemptions for farmers utilizing water-saving cultivation methods
56	PO-1-13	Financial support for smart agriculture pilot projects focused on water conservation
57	PO-1-14	Supporting the establishment of specialized water and agriculture advisory centers in rural areas
58	PO-1-15	Promoting the formation of specialized irrigation cooperatives in water-scarce regions
59	PO-1-16	Public funding or cost-sharing for agricultural wastewater recycling and treatment
60	PO-1-17	Governmental support for integrating renewable energy into irrigation systems
61	PO-2-01	Integrated water resource management
62	PO-2-02	Reforming water governance from provincial model to basin-oriented model
63	PO-2-03	Clarifying mandates and enabling performance evaluation of governmental agencies

Continued table 1. Influential factors on agricultural water productivity identified through literature review

Row	Code	Factor
64	PO-2-04	Elimination of overlapping authorities
65	PO-2-05	Legislation requiring continuous managerial accountability for decision-making outcomes
66	PO-2-06	Utilization of sustainability indicators for managerial performance assessment
67	PO-2-07	Formulation of a comprehensive law for water and soil resource protection
68	PO-2-08	Revision of agricultural water pricing tariffs
69	PO-2-09	Development of regulatory frameworks for sustainable water resource exploitation
70	PO-2-10	Allocation of water quotas for different crops based on water demand and climatic conditions
71	PO-2-11	Implementation of punitive measures against unauthorized agricultural water extraction
72	PO-2-12	Enforcement of regulations concerning unauthorized wells
73	PO-2-13	Installation of smart meters on agricultural wells
74	PO-2-14	Continuous monitoring of groundwater levels
75	PO-2-15	Establishment of non-governmental water management organizations involving farmers
76	PO-2-16	Inter-ministerial coordination for effective policy implementation
77	PO-2-17	Development of information systems and online monitoring platforms for agricultural water resources
78	PO-2-18	Public dissemination of data on water extraction, consumption, and status for independent researchers
79	PO-2-19	Creation of a publicly accessible national database on agricultural water productivity
80	PO-2-20	Utilization of remote sensing technologies for water resource exploitation assessment
81	PO-2-21	Implementation of water pricing policies based on usage efficiency
82	PO-2-22	Design of climate- and crop-specific smart water quota systems
83	PO-2-23	Delegation of water resource management to local entities with direct stakeholder participation
84	PO-3-01	Formulation of a national agricultural water productivity document with quantitative and qualitative targets and timelines
85	PO-3-02	Continuous reporting of water productivity indicators at national and regional levels
86	PO-3-03	Periodic evaluation of irrigation projects in terms of efficiency and effectiveness
87	PO-3-04	Water footprint analysis of agricultural products across different regions
88	PO-3-05	Calculation and analysis of virtual water content in agricultural products across regions
89	PO-3-06	Assessment of climatic and environmental impacts of cropping patterns on water resources
90	PO-3-07	Support for applied research in smart and low-consumption irrigation technologies
91	PO-3-08	Collaboration with academic and research institutions to develop predictive and decision-making models
92	PO-4-01	Establishment of international collaboration networks to exchange water management experiences
93	PO-4-02	Organization of joint regional and global conferences and workshops in the water sector
94	PO-4-03	Development of collaborative research projects with international universities and scientific centers
95	PO-4-04	Exchange of hydrological and climatic data with neighboring countries for crisis forecasting
96	PO-4-05	Development of water diplomacy to address transboundary water issues and shared rivers
97	PO-4-06	Participation in regional agreements for sustainable management of shared water resources
98	PO-4-07	Collaboration with global entities such as FAO, UNEP, and UNESCO in regional water projects
99	PO-4-08	Establishment of a regional water diplomacy secretariat for coordinating joint policies and actions
100	PO-4-09	Organization of water diplomacy workshops to enhance technical and public dialogue in the water sector
101	PO-5-01	Support for cultivation of drought-tolerant, native, and medicinal crops
102	PO-5-02	Promotion of genetic improvement and selection of water- and heat-resilient crop varieties
103	PO-5-03	Empowerment of local communities in participatory water resource management
104	PO-5-04	Training and equipping cooperatives for the implementation of sustainable irrigation projects
105	PO-5-05	Support for knowledge-based companies active in agriculture and water sectors
106	PO-5-06	Establishment of agricultural innovation centers in water-scarce regions
107	PO-5-07	Implementation of flexible policies to promote agricultural product exports and expand target markets
108	PO-5-08	Facilitation of public-private partnerships in agricultural water infrastructure development
109	PO-5-09	Creation of a single-window service system for agricultural investment
110	PO-5-10	Development of transportation, storage, and processing infrastructure for agricultural products
111	PO-5-11	Construction of agricultural innovation towns and smart greenhouses
112	PO-6-01	Provision of free consulting services for farmers on water and soil management
113	PO-6-02	Training in conflict resolution, negotiation, and effective communication for water resource management
114	PO-6-03	Design of educational programs for agricultural extension agents
115	PO-6-04	Development of training curricula for managers emphasizing sustainable development and intergenerational equity
116	PO-6-05	Engagement of farmers in monitoring and evaluating water-related projects
117	PO-6-06	Establishment of conflict resolution mechanisms for water-related disputes
118	PO-6-07	Implementation of national and local awareness-raising and educational campaigns
119	PO-6-08	Creation of water productivity assessment systems in farm units to promote transparency and healthy competition
120	PO-6-09	Formation of local stakeholder groups for participation in policymaking
121	TE-1-01	Deployment of surface drip irrigation
122	TE-1-02	Deployment of subsurface drip irrigation
123	TE-1-03	Implementation of smart irrigation systems
124	TE-1-04	Adoption of remote-controlled irrigation technologies
125	TE-1-05	Utilization of Internet of Things (IoT) for precision irrigation
126	TE-1-06	Integration of automated irrigation technologies
127	TE-1-07	Conventional sprinkler irrigation
128	TE-1-08	Center-pivot irrigation

Continued table 1. Influential factors on agricultural water productivity identified through literature review

Row	Code	Factor
129	TE-1-09	Linear move sprinkler irrigation
130	TE-1-10	Low-pressure irrigation
131	TE-1-11	Mist irrigation / Fogger-based irrigation
132	TE-1-12	Surge irrigation (intermittent flow surface irrigation)
133	TE-1-13	Laser-leveled surface irrigation
134	TE-1-14	Advanced managed border irrigation
135	TE-1-15	Controlled-flow furrow irrigation
136	TE-1-16	Drone-assisted precision irrigation for sloped terrains
137	TE-1-17	Hybrid irrigation systems (drip-sprinkler integration)
138	TE-1-18	Pressure management in irrigation networks
139	TE-1-19	Smart control valves in irrigation systems
140	TE-2-01	Big data analytics in agricultural water resource management
141	TE-2-02	Rainwater harvesting
142	TE-2-03	Utilization of non-conventional water sources (saline water, greywater)
143	TE-2-04	Aquifer management and artificial groundwater recharge
144	TE-3-01	Biofiltration-based agriculture (use of bioremediation filters for soil/water purification)
145	TE-3-02	Transplanting cultivation to reduce irrigation period
146	TE-3-03	Soil salinity management through soil amendment techniques
147	TE-3-04	Utilization of preliminarily treated municipal wastewater for restricted irrigation purposes in non-edible crop cultivation
148	TE-3-05	Utilization of treated municipal wastewater for irrigation in conventional agriculture
149	TE-3-06	Fertigation techniques
150	TE-3-07	Application of conservation tillage practices
151	TE-3-08	Soil structure improvement to enhance water retention capacity
152	TE-3-09	Use of slow-release fertilizers
153	TE-3-10	Application of biofertilizers to improve water uptake
154	TE-3-11	Incorporation of superabsorbent polymers in soil
155	TE-3-12	Enhancement of soil physical structure to optimize moisture retention in the rhizosphere
156	TE-3-13	Utilization of renewable energy sources to power irrigation systems
157	TE-3-14	Advanced filtration of agricultural drainage water
158	TE-3-15	Vertical farming
159	TE-3-16	Aeroponic farming
160	TE-3-17	Aquaponic farming
161	TE-3-18	Hydroponic farming
162	TE-4-01	Establishment of an online platform for knowledge and experience exchange among farmers
163	TE-4-02	Use of mass media to promote water-saving culture in agriculture
164	TE-5-01	Utilizing Biotechnological Approaches to Enhance Plant Resistance to Environmental Stresses
165	TE-5-02	Developing drought-resistant crop varieties
166	TE-5-03	Application of molecular markers in plant breeding
167	TE-5-04	Seed inoculation with plant growth-promoting bacteria
168	TE-5-05	Using early-maturing cultivars to reduce the growth period
169	TE-5-06	Producing high-performance hybrid seeds
170	TE-5-07	Tissue culture technology for propagation of drought-tolerant plants
171	TE-6-01	Analysis of climatic data for irrigation and nutrient management planning
172	TE-6-02	Use of nanomaterials in water pipe construction to reduce leakage
173	TE-6-03	Utilization of solar-powered pumps for irrigation
174	TE-6-04	Use of drones for precision spraying and fertilization
175	TE-6-05	Application of soil moisture sensors for irrigation scheduling
176	TE-6-06	Use of GPS systems for guiding agricultural machinery
177	TE-6-07	Use of farm management software
178	TE-6-08	Application of multifunctional sensors for monitoring plant and soil health
179	TE-6-09	Application of machine learning algorithms to forecast crop water requirements
180	TE-6-10	Big data analytics for agricultural water resource management
181	TE-6-11	Application of artificial intelligence for consumption pattern recognition and irrigation optimization
182	TE-6-12	Intelligent plant behavior modeling using remote sensing data
183	TE-6-13	Monitoring of plant health through computer vision algorithms
184	TE-6-14	Future-oriented and digital innovations in irrigated agriculture
185	TE-6-15	Drought management using drought indices
186	TE-6-16	Deployment of leak detection systems in irrigation networks
187	TE-6-17	Implementation of online monitoring systems for soil and water status tracking
188	TE-6-18	Use of modern surface and subsurface drainage methods for moisture control and waterlogging mitigation
189	TE-7-01	Construction of small-scale dams and water storage reservoirs
190	TE-7-02	Low-loss water conveyance pipelines
191	TE-7-03	Implementation of lined or concrete water conveyance canals
192	TE-7-04	Design of water distribution networks with minimal pressure loss and evaporation
193	TE-7-05	Design and deployment of high-efficiency pumping stations
194	TE-7-06	Development of GIS-based systems for water infrastructure management and maintenance

Table 2. Sample semi-structured Likert scale questionnaire used in the present study

Please indicate the importance of each factor affecting agricultural water productivity in Iran using a fuzzy Likert scale ranging from 1 (Extremely Low) to 7 (Extremely High).								
Code	**Factor**	**Extremely Low**	**Very Low**	**Moderately Low**	**Moderate**	**Moderately High**	**Very High**	**Extremely High**
CL-1-01	Change in annual mean temperature	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
CL-1-02	Change in temperature pattern regimes during the crop growth period	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
CL-1-03	Change in diurnal temperature range	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
CL-1-04	Change in annual average precipitation	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
CL-1-05	Change in temporal and spatial precipitation distribution pattern	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
CL-1-06	Change in relative humidity	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
CL-1-07	Incidence of drought periods	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
CL-1-08	Occurrence of pluvial episodes (wet spells)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
CL-1-09	Change in solar radiation intensity	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
CL-1-10	Variation in atmospheric pressure	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
CL-1-11	Changes in wind patterns	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
CL-1-12		☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
CL-1-13		☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
CL-1-14		☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Table 3. Linguistic Classification in the Form of Triangular Fuzzy Numbers

Linguistic Variable	Lower Bound	Middle Value	Upper Bound
Extremely Low	0	0	0.1
Very Low	0	0.1	0.3
Moderately Low	0.1	0.3	0.5
Moderate	0.3	0.5	0.75
Moderately High	0.5	0.75	0.9
Very High	0.75	0.9	1
Extremely High	0.9	1	1