نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۲، جلد ۲۰، خرداد - تیر ۱۴۰۵، ص. ۲۰۷-۱۸۹

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.2, Vol. 20, Jun.-Jul. 2026, p. 189-207

مقاله علمی-پژوهشی

ارزیابی ریسک‌های اقلیمی با رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره (BWM) و تحلیل اثرات در ابعاد عملکردی: مطالعه موردی استان خراسان

مجتبی گلدانی [۱]، عباسعلی قزل‌سوفلو [۲]، مرضیه محمدی آریا [۳*]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۸

چکیده

این مطالعه به تحلیل ریسک‌های تغییر اقلیم در مناطق خشک و نیمه‌خشک استان خراسان، ایران، می‌پردازد. در ابتدا، هفت ریسک اصلی اقلیمی شامل خشکسالی و کمبود آب، سیلاب‌های ناگهانی، موج‌های گرما، طوفان‌های گردوغبار، بیابان‌زایی، شورشدن خاک و آب، و ناترازی انرژی شناسایی شدند. سپس، با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره بهترین - بدترین (BWM) و نظر کارشناس در بهار و تابستان ۱۴۰۴، وزن و اولویت هر یک از این ریسک‌ها تعیین گردید. در مرحله بعد، پیامدهای هر ریسک در شش بُعد عملکردی شامل اقتصادی، اجتماعی، محیط زیستی، زیر ساختی، کشاورزی و دامپروری و سلامت ارزیابی شد. نتایج وزن‌دهی نشان داد که خشکسالی و کمبود آب با وزن ۰/۲۹۵ بالاترین اولویت را داراست و ناترازی انرژی با وزن ۰/۱۶۶ دومین ریسک مهم شناخته شد. موج گرما و شورشدن خاک نیز اهمیت قابل‌توجهی دارند و تهدیدهای رو به افزایشی را نشان می‌دهند. تحلیل نمرات ترکیبی در ابعاد مختلف نشان داد که خشکسالی و ناترازی انرژی بیشترین تأثیر را بر آسیب‌پذیری منطقه دارند. همچنین، وجود همبستگی‌های قابل‌توجه میان ریسک‌هایی مانند موج گرما و شورشدن خاک بر ضرورت مدیریت یکپارچه و چندبخشی تأکید می‌کند. در نهایت، یافته‌ها حاکی از آن است که سیاست‌های سازگاری باید بر مدیریت بهینه منابع آب و انرژی، افزایش تاب‌آوری زیر ساخت‌ها و احیای اکوسیستم‌ها تمرکز داشته باشند و مشارکت اجتماعی و آموزش نیز برای کاهش آسیب‌پذیری و افزایش آمادگی ضروری است. این پژوهش چارچوبی جامع و بومی برای تصمیم‌گیرندگان فراهم کرده و با معرفی ناترازی انرژی به‌عنوان ریسک کلیدی، بینش‌های نوینی برای سیاست‌های پایدار انرژی ارائه می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی چندبعدی تأثیر، روش بهترین - بدترین (BWM)، خشکسالی و کمبود آب، مخاطرات اقلیمی، ناترازی انرژی

مقدمه

در دهه‌های اخیر، روند صنعتی شدن سریع جوامع موجب افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی و در پی آن رشد انتشار گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژه دی‌اکسیدکربن، شده است. این روند عامل اصلی تغییرات اقلیمی محسوب می‌شود که میانگین دمای جهانی را حدود ۱٫۲۵ درجه سلسیوس افزایش داده است (Goldani, Etemadfard, et al., 2024). تغییر اقلیم با تأثیرگذاری بر چرخه هیدرولوژیکی، الگوهای بارش و فراوانی رویدادهای حدی، از جمله خشکسالی‌ها، سیلاب‌ها و امواج گرما، آثار گسترده‌ای بر نظام‌های طبیعی و انسانی برجای گذاشته است (Arnell & Gosling, 2016; Forzieri et al., 2016). این پدیده اکنون به یکی از مهم‌ترین چالش‌های قرن بیست و یکم در مسیر توسعه پایدار تبدیل شده است.

بر اساس گزارش هیئت بین‌الدولی تغییر اقلیم (IPCC[۴])، ریسک اقلیمی به‌عنوان «احتمال بروز پیامدهای نامطلوب ناشی از مخاطرات مرتبط با اقلیم» تعریف می شود؛ این ریسک حاصل برهم‌کنش سه مؤلفه اصلی شامل مخاطره[۵]، مواجهه[۶] و آسیب‌پذیری[۷] است (Change, 2022). به بیان دیگر، شدت تغییر اقلیم نه‌فقط به وقوع پدیده‌های فیزیکی بلکه به ظرفیت سازگاری اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی جوامع بستگی دارد. از سوی‌دیگر، مفهوم «ریسک‌های مرکب و آبشاری» به وضعیتی اشاره دارد که در آن یک مخاطره اولیه،

۱- کارشناس ارشد عمران محیط‌زیست، شرکت مهندسان مشاور معماری و شهرسازی آستان قدس رضوی، مشهد، ایران
۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران
۳- دکتری علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: saraaria2000@gmail.com)

DOI: 10.22034/idj.2025.547722.2632
4- Intergovernmental Panel on Climate Change
5- Hazard
6- Exposure
7- Vulnerability

مانند خشکسالی، زنجیره‌ای از پیامدهای ثانویه مانند بیابان‌زایی، طوفان‌های گردوغبار و ناترازی انرژی را فعال می‌کند (Le Houérou, 1996).

ایران با اقلیم عمدتاً خشک و نیمه‌خشک، به‌ویژه مناطق شمال شرقی آن مانند استان خراسان، به‌شدت در معرض اثرات هم‌زمان تغییر اقلیم قرار دارد (Azizi et al., 2022; Goldani, Etemadfard, et al., 2024; Mohammadnezhad et al., 2026). نوسانات بارش (Rezaee et al., 2024; Xu et al., 2021)، افزایش دما (Rezaee et al., 2026; Rezaee et al., 2025)، تبخیر بالا (Huang et al., 2016) و تخریب پوشش گیاهی موجب تشدید خشکسالی (Cook et al., 2018)، فرسایش خاک و طوفان‌های گردوغبار شده است (Le Houérou, 1996). ازسوی‌دیگر، افزایش تقاضای انرژی در اثر گرمایش و کاهش تولید نیروگاه‌های آبی پدیده‌ای به نام «ناترازی انرژی» را به وجود آورده که خود یکی از پیامدهای اقلیمی و درعین‌حال، تشدیدکننده آن است (Soltani et al., 2023). مجموعه این عوامل ساختار پیچیده‌ای از ریسک‌های متقابل و به‌هم‌پیوسته ایجاد کرده‌اند که آثار آن بر اقتصاد، سلامت، محیط‌زیست و امنیت غذایی منطقه نمایان است (Lawrence et al., 2020).

بیشتر مطالعات پیشین در ایران، ریسک‌های اقلیمی را به صورت منفرد تحلیل کرده‌اند، درحالی‌که در اقلیم‌های خشک، این ریسک‌ها ماهیتی سیستمی و هم‌افزا دارند (Babaeian et al., 2021; Eskandari Dameneh et al., 2021). رویکردهای سنتیِ تک‌بعدی در تحلیل ریسک نمی‌توانند روابط علّی و بازخوردی میان مؤلفه‌ها را آشکار کنند و ممکن است منجر به خطای سیاستی در طراحی مداخلات شوند. ازاین‌رو، اتخاذ رویکردی جامع و چندمعیاره برای شناسایی ریسک‌های کلیدی، درک تعاملات میان آن‌ها، و تعیین نقاط اهرمی مداخله ضروری است. چنین تحلیلی می‌تواند مبنای تدوین سیاست‌های سازگاری و کاهش آسیب‌پذیری در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند خراسان باشد (Lutta et al., 2024; Markanday et al., 2019). پژوهش‌های بین‌المللی نشان داده‌اند که تغییر اقلیم تأثیرات چندبعدی بر اقتصاد، جامعه، سلامت و محیط‌زیست دارد (Aria et al., 2025; Farajzadeh et al., 2022; Goldani, Danesh, et al., 2024; Loucks, 2021).

در ایران نیز مطالعاتی به اولویت‌بندی ریسک‌های اقلیمی با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره پرداخته‌اند (Bitarafan et al., 2023; Brodny & Tutak, 2023; Gholami et al., 2025; Golfam et al., 2019). روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM[1]) ابزارهای تحلیل نظام‌مند هستند که به تصمیم‌گیرندگان اجازه می‌دهند در مواجهه با مسائل پیچیده و چندبُعدی مانند تغییر اقلیم، فاکتورهای گوناگون اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و فناوری را به طور هم‌زمان در نظر بگیرند و گزینه‌های مختلف را بر اساس وزن و اهمیت نسبی هر معیار رتبه‌بندی کنند (Taherdoost & Madanchian, 2023). این تحقیقات بیانگر آسیب‌پذیری شدید مناطق خشک از منظر آب، خاک و پوشش گیاهی هستند. افزون بر آن، برخی مطالعات به افزایش روند بیابان‌زایی (Modarres et al., 2016) در ایران اشاره دارد. باوجود این، بررسی روابط علّی و ساختاری میان این ریسک‌ها در چارچوبی یکپارچه کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. در مطالعات تغییر اقلیم، این مدل‌ها نقش ویژه‌ای دارند، زیرا به تحلیلگران امکان می‌دهند تا اثرات متداخل ریسک‌های اقلیمی، اثرگذاری پروژه‌ها و ارزیابی سیاست‌های سازگاری یا کاهش را بر پایه معیارهای چندگانه‌ای نظیر هزینه، پذیرش اجتماعی، انتشار گازهای گلخانه‌ای، تاب‌آوری زیرساختی و ریسک‌های اقتصادی سنجش کنند (Cohen et al., 2019; Goldani, 2024).

باتوجه‌به شکاف دانشی موجود، هدف این پژوهش ارائه چارچوبی تحلیلی برای شناسایی و تحلیل ریسک‌های اقلیمی در استان خراسان است. این چارچوب بر پایه روش تصمیم‌گیری چندمعیاره بهترین – بدترین (BWM[2]) توسعه یافته و باهدف تعیین اهمیت نسبی ریسک‌ها و تحلیل اثرات آن‌ها در شش بُعد عملکردی شامل اقتصاد، جامعه، محیط‌زیست، زیر ساخت، کشاورزی و سلامت طراحی شده است. افزون بر این، پژوهش تلاش دارد زمینه‌ای برای سیاست‌گذاری مبتنی بر شواهد و طراحی اقدامات سازگاری بومی در مناطق خشک و نیمه‌خشک فراهم آورد تا تاب‌آوری منطقه‌ای در برابر تغییر اقلیم افزایش یابد.

مواد و روش

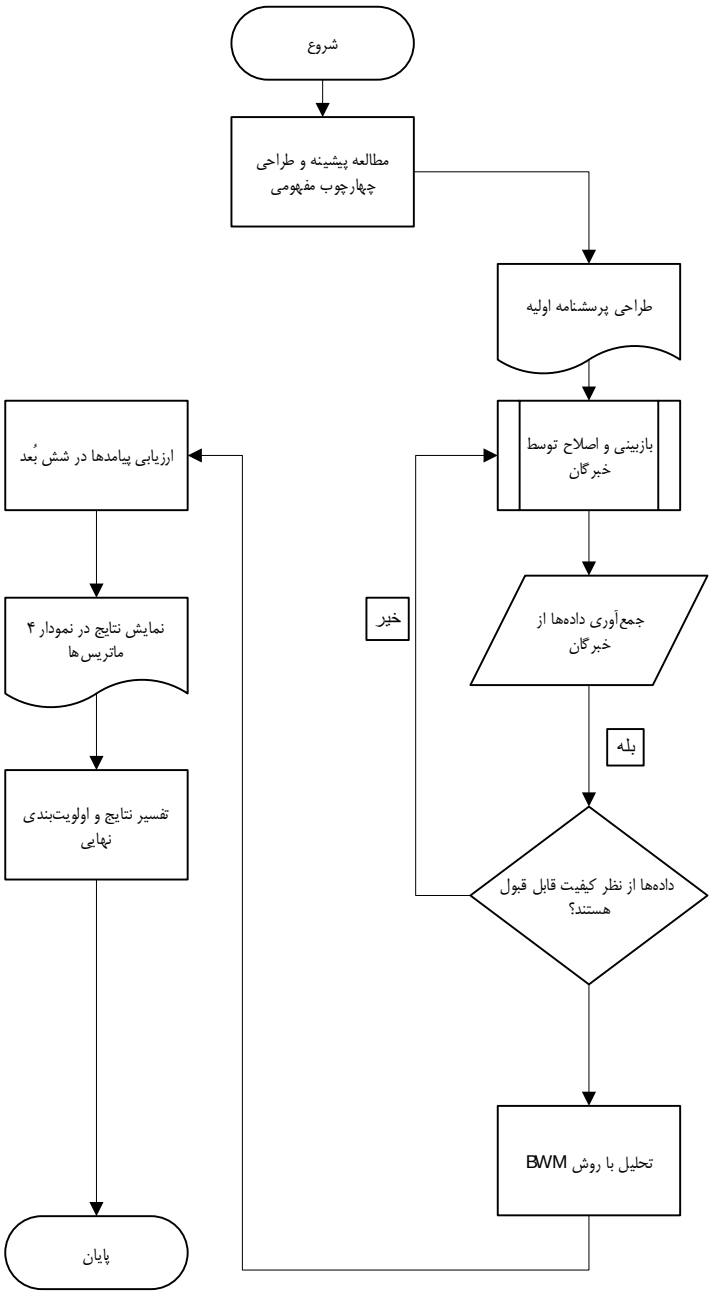
چارچوب مفهومی و شناسایی ریسک‌ها

در این پژوهش، در بهار و تابستان ۱۴۰۴، به‌منظور تحلیل جامع ریسک‌های ناشی از تغییر اقلیم در مناطق خشک و نیمه‌خشک، چارچوب مفهومی ترکیبی مبتنی بر مدل‌های شناخته‌شده تصمیم‌گیری چندمعیاره و تحلیل پیامدهای چندبعدی طراحی شد. این چارچوب شامل دو بخش اصلی است: بخش اول مربوط به شناسایی و اولویت‌بندی ریسک‌های اقلیمی با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مانند BWM است، و بخش دوم به ارزیابی اثرات این ریسک‌ها در شش بُعد عملکردی اقتصادی، اجتماعی، محیط‌زیستی، زیرساختی، کشاورزی و دامپروری و بهداشت و سلامت اختصاص دارد. این ساختار، برگرفته از ترکیب مدل‌های ارزیابی ریسک و روش‌های تحلیل چندبعدی عملکردی است که برای نخستین‌بار در زمینه

1 Multi-Criteria Decision Making

2 Best Worst Method

ریسک‌های اقلیمی مناطق خشک و نیمه‌خشک به کار گرفته شده است. با استفاده از نظرات خبرگان، شدت هر ریسک و پیامدهای چندبعدی آن به‌صورت عملکردی تحلیل شده تا چارچوبی جامع و کارآمد برای سیاست‌گذاری و مدیریت ریسک‌های اقلیمی ارائه شود.



شکل ۱- نمودار چرخشی اجرای تحقیق

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، برای شناسایی ریسک‌های اقلیمی، ابتدا بررسی اسناد بالادستی از جمله گزارش‌های IPCC، راهبرد های ملی ساز گاری با تغییر اقلیم، و م طال عات اقلیم‌شناسی منطقه‌ای و همچنین مرور پیشینه مطالعات داخلی و بین‌المللی صورت گرفت. در این مرحله، حدود ۱۵ ریسک اولیه شناسایی شد که با استفاده از نظر کارشناسان در حوزه‌های منابع آب، محیطزیست، اقلیم شناسی، کشاورزی و زیر ساخت، این ریسک‌ها پالایش و اولویت‌بندی شدند.

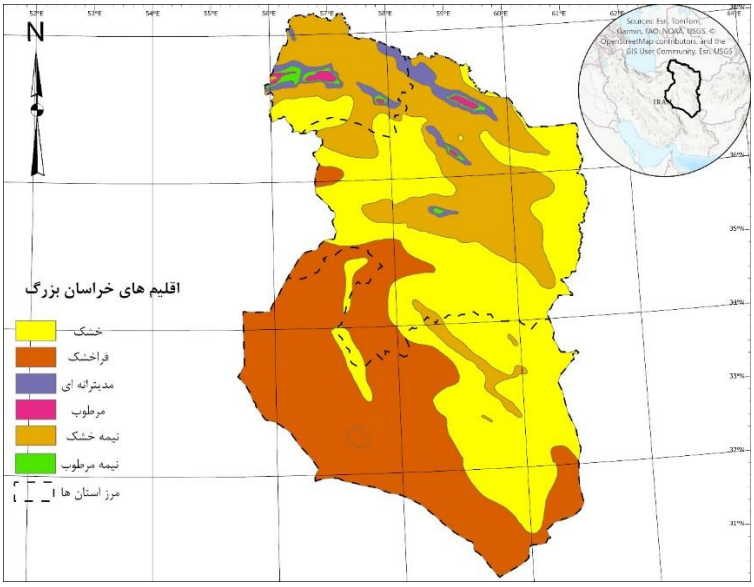
در نهایت، باتوجه به شدت وقوع، فراوانی، و اهمیت منطقه‌ای، هفت ریسک اصلی تغییر اقلیم برای ادامه تحلیل انتخاب شدند؛

خشکسالی و کمبود آب (R۱)، سیلاب‌های ناگهانی (R۲)، موج گرما و افزایش دما (R۳)، طوفان‌های شـــن و گردوغبار (R۴)، بیابان‌زایی، و فر سایش خاک (R۵)، شوری آب‌وخاک (R۶) و ناترازی انرژی (R۷). این ریـسک‌ها نه‌تنها از منظر وقوع اقلیمی دارای اهمیت ه ستند، بلکه در سال‌های اخیر به‌ویژه در مناطق خشک مانند استان خراسان، اثرات قابل‌توجهی بر زیرسـاخت‌ها، بخش کشـاورزی، منابع آب، و سـلامت انسانی بر جای گذاشته‌اند. از همین رو، در ادامه تحقیق، این ریسک‌ها در دو گام اولویت‌بندی با روش BWM و تحلیل پیامدها در شش بُعد ارزیابی شده‌اند.

.

منطقه موردمطالعه

منطقه موردمطالعه در این پژوهش، خراسان بزرگ در شمال شرق ایران ا ست که شامل سه ا ستان خرا سان ر ضوی، خرا سان شمالی و خراسـان جنوبی می‌گردد. این ناحیه به دلیل تنوع اقلیمی، شـرایط ژئو مورفولوژیک خاص، نقش اقتصـادی و زیسـت‌محیطی آن در کشـور، به‌عنوان نمونه‌ای شاخص برای برر سی ریسک‌های اقلیمی در مناطق خشک و نیمه‌خشک انتخاب شده است.



شکل ۲- نقشه اقلیم‌های خراسان بزرگ (خراسان رضوی، خراسان شمالی و خراسان جنوبی)

بر اسـاس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن، همان‌طور که در شـکل ۲ قابل رویت اسـت، بیش از ۹۸ درصـد وسـعت جغرافیای اسـتان‌های خراسـان در اقلیم فراخشـک، خشـک یا نیمه‌خشـک قرار دارد که با بارندگی سالانه پایین، تبخیر زیاد، و نوسانات شدید دمایی شناخته می شود. میانگین بارندگی سالانه در بخش‌های مختلف این ا ستان‌ها در اقلیم خشـک و نیمه‌خشـک بین ۲۰۰ تا ۲۵۰ میلی‌متر متغیر اسـت، درحالی‌که میانگین تبخیر سالانه از ۹۰۰ تا ۱۸۰۰ میلی‌متر فراتر است.

استان خراسان، به‌ویژه خراسان رضوی، به‌عنوان یکی از قطب‌های کشاورزی، منابع آب زیرزمینی و نیز گردشگری مذهبی، طی سال‌های اخیر با ریسـک‌های اقلیمی گوناگون و فزاینده‌ای مواجه بوده اسـت؛ از جمله: کاهش سـطح سـفره‌های آب زیرزمینی، افزایش دمای هوا، بی نظمی در بارش ها، افزایش ر خداد سـیلاب های ناگهانی، پد یده گردوغ بار، و کاهش عملکرد محصـولات کشـاورزی. همچنین، قرارگرفتن برخی از شـهرهای پرجمعیت این منطقه (مانند مشـهد، بیرجند و بجنورد) در نواحی آسـیب‌پذیر به سـیلاب یا خشـکسـالی، ضرورت مدیریت ریسک‌های اقلیمی را دوچندان کرده است.

ویژگی‌های طبیعی این منطقه در کنار اهمیت اقت صادی، اجتماعی و زیسـت‌محیطی آن، باعث شـد که اسـتان خراسـان به‌عنوان مطالعه موردی منا سبی برای تحلیل یکپارچه ریـسک‌های اقلیمی و پیامدهای چندبُعدی آن‌ها انتخاب گردد.

طراحی پرسش‌نامه

در این پژوهش، نمو نه‌گیری هدفمند از نوع خبره محور به کار گرفته شد. کارشناسان و خبرگانی که در حوزه‌های مرتبط با منابع آب، محیطزی ست، اقلیم شنا سی، ک شاورزی، زیر ساخت و سلامت دارای تخصص و تجربه بودند، به‌عنوان جامعه هدف انتخاب شدند. این افراد باتوجه‌به دانش تخ ص صی و سابقه کاری شان، به‌عنوان بهترین منبع برای ارزیابی ریسک‌های اقلیمی شناخته شدند. در مجموع، ۲۸ نفر از ا ساتید دا شگاه، کار شنا سان نهادهای دولتی و پژوه شگران به طور فعال در فرایند پرسش‌نامه شرکت کردند.

ارزیابی پیامدها در شش بُعد

ابعاد عملکردی مورداستفاده در این پژوهش شامل اقتصادی، اجتماعی، محیط‌زیستی، زیرساختی، کشاورزی و دامپروری، و بهداشت و سلامت، باهدف ارزیابی جامع پیامدهای ریسک‌های اقلیمی در سطوح مختلف توسعه انتخاب شده‌اند. انتخاب این شش بُعد مبتنی بر مرور نظام‌مند مطالعات پیشین در حوزه تحلیل ریسک (مانند گزارش‌های دفتر کاهش خطر بلایا سازمان ملل متحد[1] و مجمع بین دول تغییر اقلیم) و نیز مشورت با خبرگان دانشگاهی، مدیران و کارشناسان اجرایی در مراحل طراحی و اعتبارسنجی پرسش‌نامه انجام‌گرفته است. این ابعاد به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که ابعاد کلیدی آسیب‌پذیری در مناطق خشک و نیمه‌خشک را پوشش داده و پایه‌ای برای ارائه توصیه‌های سیاستی فراهم سازند.

پاسخ‌ها در این بخش بر اساس مقیاس لیکرت[2] پنج نقطه‌ای (از «خیلی کم=۱» تا «خیلی زیاد=۵») امتیازدهی شد. این داده‌ها برای تحلیل‌های آماری، محاسبه میانگین، همبستگی و شاخص پایایی (آلفای کرونباخ) به کار رفتند.

تعیین اولویت ریسک‌ها با روش BWM

در این بخش، از پاسخ‌دهندگان خواسته شد تا در هر یک از ابعاد شش‌گانه یک ریسک را به‌عنوان مهم‌ترین (Best) و یک ریسک دیگر را به‌عنوان کم‌اهمیت‌ترین (Worst) انتخاب کنند. سپس، با استفاده از مقایسه زوجی، اهمیت ریسک‌های دیگر را نسبت به بهترین و بدترین ریسک برآورد کنند. این اطلاعات به‌عنوان ورودی روش تصمیم‌گیری چندمعیاره BWM مورداستفاده قرار گرفت و از آن‌ها برای محاسبه وزن نسبی ریسک‌ها و ارزیابی سازگاری پاسخ‌ها استفاده شد (Rezaei, 2015).

روش تصمیم‌گیری چندمعیاره BWM

برای تعیین وزن نسبی ریسک‌های شناسایی شده تغییر اقلیم، از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره (BWM) استفاده شد. این روش که توسط رضائی در سال ۲۰۱۵ معرفی شده، به دلیل نیاز به مقایسه‌های محدودتر، دقت بالاتر، و نرخ ناسازگاری کمتر نسبت به روش‌های دیگر مانند AHP[3]، به‌ویژه در حوزه‌های ارزیابی ریسک و اولویت‌بندی گزینه‌ها بسیار موردتوجه قرار گرفته است. محاسبات این روش در نرم‌افزار Excel انجام شد. مراحل اجرای این روش به شرح زیر است:

تعیین مجموعه معیارها

n معیار (ریسک) مورد بررسی قرار گرفت:

$$C=\{c_1,c_2,...,c_n\} \quad (۱)$$

در این قسمت C۱ تا Cn متناظر ریسک اول تا هفتم ینی R تا R است.

انتخاب بهترین و بدترین معیار

کارشناس یک معیار را به‌عنوان بهترین (B) و یک معیار دیگر را به‌عنوان بدترین (W) مشخص می‌کند:

$$B\in C \quad , \quad W\in C \quad (۲)$$

در ادامه از خبره خواسته می‌شود تا نسبت بهترین (B) را نسبت به سایر ریسک‌های تغییر اقلیم را با اعداد ۱ تا ۹ تعیین کند:

$$a_B=[a_{B1},a_{B2},...,a_{Bn}], \quad a_{Bj}=\{1,2,...,9\} \quad (۳)$$

و در مرحله بعد همین مقایسه سایر ریسک‌ها با بدترین (W) انجام می‌شود:

$$a_W=[a_{W1},a_{W2},...,a_{Wn}], \quad a_{Wj}=\{1,2,...,9\} \quad (۴)$$

محاسبه وزن‌ها از طریق مدل بهینه‌سازی

به‌منظور به‌دست‌آوردن وزن هر ریسک لازم است تا معادله بهینه‌سازی زیر حل شود:

$$\left|\frac{W_B}{W_j}-a_{Bj}\right|\le\xi,\ for\ all\ j$$

$$\left|\frac{W_j}{W_W}-a_{jW}\right|\le\xi,\ for\ all\ j \quad (۵)$$

$$\sum_j W_j=1$$

$$W_j\ge 0,\ for\ all\ j$$

W_j: وزن هر ریسک

ξ: بیشترین میزان ناسازگاری بین مقایسه‌های انجام‌شده و وزن‌های محاسبه‌شده

شاخص سازگاری (CR[4])

پس از محاسبهٔ مقدار بهینهٔ ξ در مرحله قبل برای بررسی صحت پاسخ هر کارشناس، از **شاخص سازگاری (CR)** استفاده می‌شود:

$$Consistency\ Ratio=\frac{\xi}{CI\ (a_{BW})} \quad (۶)$$

1- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR)
2- Likert Scale
3- Analytic Hierarchy Process
4- Consistency Ratio

ξ: مقدار بهینه به‌دست‌آمده از مدل

$CI\ (a_{BW})$: مقدار سازگاری استاندارد برای مقایسه a_{BW} (اختلاف بین بهترین و بدترین)

مقدار قابل‌قبول برای CR در این پرسش‌نامه با توجه به پاسخ هر خبره از جدول ۱ انتخاب شده است. پاسخ‌هایی با مقدار بالاتر از این عدد به‌عنوان ناسازگار محسوب شده و در تحلیل نهایی حذف یا بازبینی شدند.

جدول ۱- مقدار سازگاری استاندارد بر اساس داده ورودی

	۳	٤	٥	٦	۷	۸	۹
۳	/۱۶۶۷ ۰	/۱۶۶۷ ۰	۰/۱۶۶۷	/۱۶۶۷ ۰	/۱۶۶۷ ۰	/۱۶۶۷ ۰	/۱۶۶۷ ۰
۴	/۱۱۲۱ ۰	/۱۵۲۹ ۰	۰/۱۸۹۸	/۲۲۰۶ ۰	/۲۵۲۷ ۰	/۲۵۷۷ ۰	/۲۶۸۳ ۰
۵	/۱۳۵۴ ۰	۰/۱۹۴	۰/۲۳۰۶	/۲۵۴۶ ۰	/۲۷۱۶ ۰	/۲۸۴۴ ۰	/۲۹۶۰ ۰
۶	/۱۳۳۰ ۰	/۱۹۹۰ ۰	۰/۲۶۴۳	/۳۰۴۴ ۰	/۳۱۴۴ ۰	/۳۲۲۱ ۰	/۳۲۶۲ ۰
۷	/۱۲۹۴ ۰	/۲۴۵۷ ۰	/۲۲۸۱۹ ۰	/۳۰۲۹ ۰	/۳۱۴۴ ۰	/۳۲۵۱ ۰	/۳۴۰۳ ۰
۸	/۱۳۰۹ ۰	/۲۵۲۴ ۰	۰/۲۹۵۸	/۳۱۵۴ ۰	/۳۴۰۸ ۰	/۳۶۲۰ ۰	/۳۶۵۷ ۰
۹	/۱۳۵۹ ۰	/۲۶۸۱ ۰	۰/۳۰۶۲	/۳۳۳۷ ۰	/۳۵۱۷ ۰	/۳۶۲۰ ۰	/۳۶۶۲ ۰

مزایای روش BWM در این پژوهش:

- کاهش تعداد مقایسه‌های زوجی در مقایسه با روش AHP
- امکان ارزیابی دقیق‌تر با داده‌های خبره محور
- ارائه شاخص کمی برای سنجش درجه ناسازگاری پاسخ‌ها
- مناسب برای تعداد معیارهای کم تا متوسط (در اینجا: ۷ ریسک اقلیمی)

تحلیل داده‌های پیامدها

برای هر یک از هفت ریسک اقلیمی، شش سؤال طراحی گردید که هر کدام پیامد آن ریسک را در یکی از ابعاد عملکردی مذکور می‌سنجید. پاسخ‌دهندگان از طیف لیکرت برای نمره‌دهی استفاده کردند. مراحل تحلیل این داده‌ها به شرح زیر است:

تحلیل توصیفی

برای هر ریسک در هر بُعد، میانگین و انحراف معیار نمرات محاسبه شد تا شدت ادراک‌شده اثر هر ریسک در بُعد مشخص گردد. به‌علاوه، نمره کلی هر ریسک در هر بُعد نیز محاسبه شد.

سنجش پایایی

با استفاده از آزمون آلفای کرونباخ[1]، میزان انسجام درونی سؤالات در هر بُعد عملکردی بررسی گردید. مقدار آلفای بالاتر از / به‌عنوان قابل‌قبول در نظر گرفته شد. این سنجش در مورد تمام ابعاد عملکردی احراز شد گردید.

تحلیل همبستگی

برای سنجش ارتباط بین ریسک‌ها در هر بُعد، ماتریس ضرایب همبستگی پیرسون[2] (r) محاسبه شد. این تحلیل نشان داد کدام ریسک‌ها در ادراک پاسخ‌دهندگان به‌صورت هم‌زمان اثرگذار هستند.

نمره ترکیبی اثرگذاری[3]

برای ادغام دو جنبهٔ "اهمیت" (وزن حاصل از BWM) و "شدت اثر" (میانگین نمرات پیامد)، از رابطه زیر استفاده شد:

$$Impact\ Score_{ij} = w_i \times x_{\bar{ij}} \qquad (۷)$$

که در آن $x_{\bar{ij}}$ میانگین نمره ریسک i در بُعد j ، w_i وزن نهایی ریسک i حاصل از روش BWM و $Impact\ Score_{ij}$ نمره ترکیبی اثرگذاری ریسک i در بُعد j است. این نمرات ترکیبی مبنایی برای تحلیل و مقایسه ریسک‌ها در ابعاد مختلف و همچنین اولویت‌بندی اقدامات سازگاری فراهم می‌کند.

تجمیع و اولویت‌بندی

در ادامه، برای هر ریسک اقلیمی مجموع موزون شده نمرات شش بُعد عملکردی به‌عنوان نمره نهایی اثرگذاری آن ریسک در منطقه مطالعه شده محاسبه شد (معادله ۸).

$$Total\ Impact\ Score_i = \sum_{i=1}^{6} (w_i \times x_{\bar{ij}}) \qquad (۸)$$

این مقدار مبنای اصلی برای اولویت‌بندی ریسک‌ها از منظر تأثیر عملکردی کل‌نگر محسوب می‌شود. همچنین، می‌توان نمرات کل ریسک‌ها در هر بُعد (ستونی) را نیز جمع بست تا مشخص شود که کدام بُعد عملکردی بیشتر از سایر ابعاد در برابر ریسک‌های اقلیمی آسیب‌پذیر است.

نتایج و بحث

بررسی کلّی‌نگر ریسک‌های اقلیمی

وزن‌دهی ریسک‌ها با استفاده از روش (BWM)

نتایج نشان داد ریسک «خشکسالی و کمبود آب» با وزن نهایی ۰/۲۹۵ بالاترین اولویت را به خود اختصاص داد (جدول ۲). اهمیت بالای این ریسک ناشی از گستردگی و شدت اثرات آن بر ابعاد مختلف زندگی و فعالیت‌های اقتصادی است. پس از آن، «ناترازی انرژی» با وزن ۰/۱۶۶ در رتبه دوم قرار گرفت که نشان‌دهنده اهمیت قابل‌توجه مسائل مرتبط با تأمین انرژی و تعادل آن در منطقه است. این یافته با

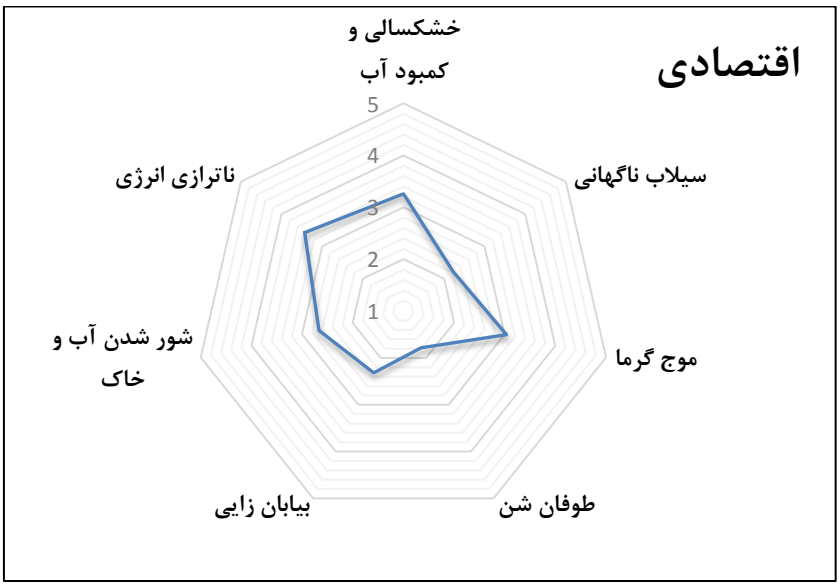
1- Cronbach's Alpha
2- Pearson correlation coefficient
3- Impact Score

مطالعات کوسانگایا[1] در سال ۲۰۲۱ و وارن[2] و همکاران در سال ۲۰۲۱ هم‌خوانی دارد که خشکسالی و کمبود آب را مهم‌ترین تهدید اقلیمی مناطق خشک معرفی کرده‌اند (Kusangaya et al., 2021; Warren et al., 2021).

جدول ۲ نشان می‌دهد که ریسک «موج گرما» با وزن ۰/۱۲۱ و «شورشدن آب‌وخاک» با وزن مشابه (۰/۱۲۱) در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند که بیانگر اهمیت روبه‌رشد این مخاطرات در سال‌های اخیر است. در نهایت، ریسک‌های «بیابان‌زایی» (۰/۱۱۱)، «سیلاب ناگهانی» (۰/۱۱۸) و «طوفان شن» (۰/۰۶۸) در رتبه‌های پایین‌تر جای گرفتند.

جدول ۲- اولویت‌بندی ریسک‌های تغییر اقلیم با روش BWM

رتبه	ریسک‌ها	وزن	نمره پیامد	شاخص نهایی
۱	خشکسالی و کمبود آب	۰/۲۹۵	۳/۸۸۹	**۱/۱۴۵**
۲	ناترازی انرژی	۰/۱۶۶	۴/۰۱۱	**۰/۶۶۶**
۳	موج گرما	۰/۱۲۱	۳/۷۱۳	**۰/۴۴۸**
۴	شورشدن آب‌وخاک	۰/۱۲۱	۳/۴۶۹	**۰/۴۲۱**
۵	بیابان‌زایی	۰/۱۱۱	۳/۵۴۶	**۰/۳۹۳**
۶	سیلاب ناگهانی	۰/۱۱۸	۳/۲۷۹	**۰/۳۸۸**
۷	طوفان شن	۰/۰۶۸	۳/۱۵۴	**۰/۲۱۵**



شکل ۳- میانگین موزون شده شدت تأثیر هر ریسک بر عملکرد بعد اقتصادی در استان خراسان

شاخص نهایی اثرگذاری ریسک‌ها[3]

شاخص نهایی هر ریسک از ترکیب وزن و میانگین نمره پیامد آن‌ها در شش بُعد عملکردی (اقتصادی، اجتماعی، محیط‌زیستی، زیرساختی، کشاورزی و دامپروری، بهداشت و سلامت) محاسبه شد. نتایج حاکی از آن است که «خشکسالی و کمبود آب» با شاخص نهایی ۱/۱۴۵ جدول ۲ بیشترین اولویت را دارا ست که نشان می‌دهد این ریسک نه‌تنها دارای اهمیت بالا بلکه پیامدهای شدیدی نیز دارد. ریسک «ناترازی انرژی» با شاخص ۰/۶۶۶ دومین ریسک با اولویت بالا شناخته شد. «موج گرما» با شاخص ۰/۴۴۸ و «شورشدن آب‌وخاک» با شاخص ۰/۴۲۱ نیز ریسک‌های مهمی هستند که نیاز به اقدامات ویژه دارند. ریسک‌های «بیابان‌زایی» (۰/۳۹۳)، «سیلاب ناگهانی» (۰/۳۸۸) و «طوفان شن» (۰/۲۱۵) به ترتیب در جایگاه‌های بعدی هستند که اولویت اقدامات برای مقابله با آن‌ها در مراحل بعدی قرار می‌گیرد.

1- Kusangaya
2- Warren
3- Composite Index

تحلیل ابعاد عملکردی ریسک‌ها

برای ارزیابی دقیق‌تر اثرات هر ریسک، میانگین تأثیر در هر یک از شش بُعد عملکردی به تفکیک محاسبه شد.

بعد اقتصادی

نتایج بررسی بعد اقتصادی نشان می‌دهد که ریسک‌های «ناترازی انرژی» و «خشکسالی و کمبود آب» با میانگین نمرات به ترتیب ۴/۲۱ و ۴/۱۱ بالاترین میزان نگرانی اقتصادی را ایجاد کرده‌اند. این دو ریسک بیشترین اهمیت و تأثیر اقتصادی را به خود اختصاص داده‌اند. در مقابل، ریسک «طوفان شن» با میانگین نمره ۳/۰۴ پایین‌ترین سطح اهمیت اقتصادی را داشته است (شکل ۳).

بررسی انحراف معیار از جدول ۳ نشان می‌دهد که اجماع بیشتری میان کارشناسان در مورد ریسک «ناترازی انرژی» وجود دارد (انحراف معیار ۰/۶۳)، درحالی‌که پراکندگی پاسخ‌ها در مورد «طوفان شن» (۱/۲۳) بیشتر است. از نظر وزن تأثیر (وزن × میانگین)، «ناترازی انرژی» و «خشکسالی و کمبود آب» به ترتیب با ۳/۴۳ و ۳/۲۶ بیشترین اهمیت اقتصادی را نشان داده و نیاز به اولویت‌بندی در سیاست‌های اقتصادی دارند.

جدول ۳- میانگین نمره، وزن و میانگین موزون شده تأثیر هر یک از ریسک‌های اقلیمی بر عملکرد اقتصادی

رتبه اهمیت	ریسک اقلیمی	میانگین وزنی	وزن	انحراف معیار	میانگین نمره
۱	ناترازی انرژی	۳/۴۳	۰/۱۶	۰/۶۳	**٤/۲۱**
۲	خشکسالی و کمبود آب	۳/۲۶	۰/۱۶	۰/۷۹	**٤/۱۱**
۳	موج گرما	۳/۰۳	۰/۱۵	۰/۷۹	**۳/۹٦**
۴	شورشدن آب‌وخاک	۲/۶۶	۰/۱۴	۰/۸۵	**۳/۷۱**
۵	بیابان‌زایی	۲/۳۲	۰/۱۳	۰/۸۴	**۳/٤٦**
۶	سیلاب ناگهانی	۲/۲۲	۰/۱۳	۱/۰۳	**۳/۳۹**
۷	طوفان شن	۱/۷۸	۰/۱۲	۱/۲۳	**۳/۰٤**

تحلیل ضرایب همبستگی بین ریسک‌ها در جدول ۴ نیز حاکی از آن است که «موج گرما» با «شورشدن آب‌وخاک» (۰/۶۹۵) و «ناترازی انرژی» (۰/۶۰۹) بالاترین همبستگی مثبت را دارد که نشان‌دهنده ارتباط قوی این ریسک ها با یکدیگر است. این همبستگی‌ها تأکید بر ضرورت اتخاذ رویکردهای ترکیبی و هم‌زمان برای مدیریت این ریسک‌ها دارند.

جدول ٤- ضرایب همبستگی بین ریسک‌های متخلف تغییر اقلیمی در عملکرد اقتصادی

	R۱	R۲	R۳	R٤	R٥	R٦	R۷
R۱	۱						
R۲	۰/۴۹۵	۱					
R۳	-۰/۱۷۲	۰/۲۴۴	۱				
R٤	۰/۱۱۱	۰/۱۳۹	-۰/۳۰۲	۱			
R٥	۰/۱۴۷	۰/۴۶۷	۰/۴۷۲	۰/۲۷۰	۱		
R٦	۰/۰۴۷	۰/۴۲۷	۰/۶۹۵	۰/۰۴۸	۰/۶۰۶	۱	
R۷	-۰/۰۴۸	۰/۰۳۷	۰/۶۰۹	-۰/۳۹۲	۰/۲۹۶	۰/۳۲۴	۱

R۱: خشکسالی و کمبود آب، R۲: سیلاب‌های ناگهانی، R۳: موج گرما و افزایش دما، R۴: طوفان‌های شن و گردوغبار،R۵: بیابان‌زایی، و فرسایش خاک، R۶: شوری آب‌وخاک، R۷: ناترازی انرژی

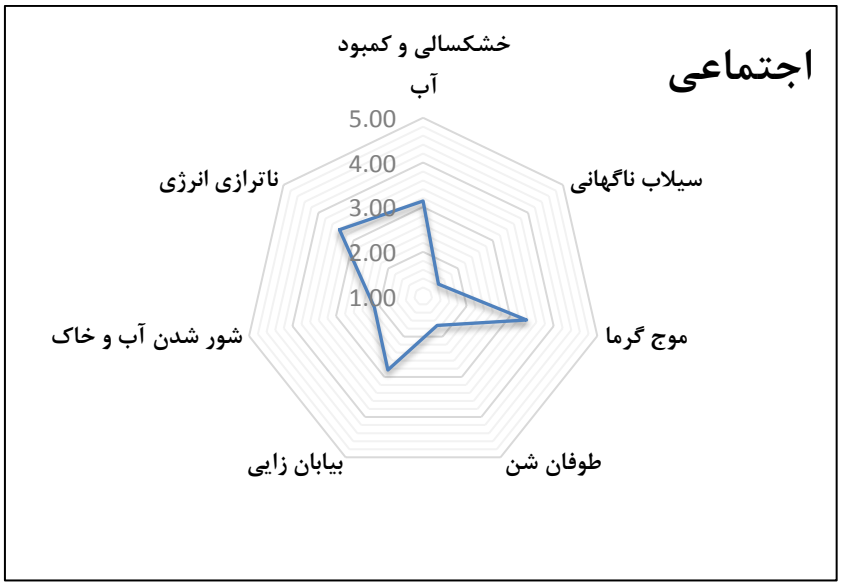
با نگاه کلی به بعد اقتصادی ریسک مشخص می‌کند که «خشکسالی و کمبود آب» و «ناترازی انرژی» مهم‌ترین ریسک‌های اقتصادی منطقه هستند و باید در اولویت برنامه‌ریزی و مدیریت منابع قرار گیرند. همچنین، ارتباط قوی بین «موج گرما» و «شورشدن آب‌وخاک» نیازمند رویکرد ترکیبی در سیاست‌گذاری اقتصادی است.

بعد اجتماعی

در بررسی اثرات اجتماعی ریسک‌های تغییر اقلیمی در منطقه، ابتدا میانگین نمرات هر ریسک در بعد اجتماعی مورد ارزیابی قرار گرفت. براین‌اساس، ریسک «ناترازی انرژی» با میانگین نمره (۴/۰۹۳) و ریسک «موج گرما» با میانگین (۴/۰۷۹) بیشترین نگرانی اجتماعی را در بین متخصصان و کارشناسان ایجاد کرده‌اند (شکل ۴). این نتایج نشان‌دهنده آن است که تأثیرات این دو ریسک بر کیفیت زندگی،

انسجام اجتماعی و رفاه عمومی بسیار قابل‌توجه است و نیاز به برنامه‌ریزی جامع و جدی‌تری در مدیریت این ریسک‌ها احساس می شود.

در نقطه مقابل، ریسک‌های «سیلاب ناگهانی» (میانگین ۲/۶۶۴) و «طوفان شن» (میانگین ۲/۹۱۴) به ترتیب پایین‌ترین نگرانی‌های اجتماعی را ایجاد کرده‌اند. دلیل پایین‌تر بودن میانگین این دو ریسک، احتمالاً ناشی از محدودیت جغرافیایی یا تجربه محدودتر جوامع محلی نسبت به این ریسک‌ها است (جدول ۵).



شکل ٤- میانگین موزون شده شدت تأثیر هر ریسک بر عملکرد بعد اجتماعی در استان خراسان

جدول ٥- میانگین نمره، وزن و میانگین موزون شده تأثیر هر یک از ریسک‌های اقلیمی بر عملکرد اجتماعی

رتبه اهمیت	ریسک اقلیمی	میانگین وزنی	وزن	انحراف معیار	میانگین نمره
۱	ناترازی انرژی	۳/۳۹۷	۰/۱۶۶	۰/۸۱	**٤/۰۹۳**
۲	موج گرما	۳/۳۷۴	۰/۱۶۵	۰/۶۷۷	**٤/۰۷۹**
۳	خشکسالی و کمبود آب	۳/۱۶۳	۰/۱۵۹	۰/۹۰۴	**۳/۹۳۲**
۴	بیابان‌زایی	۲/۸۳۰	۰/۱۵۲	۰/۷۷	**۳/۷٦۳**
۵	شورشدن آب‌وخاک	۲/۱۲۳	۰/۱۳۱	۱/۰۴۷	**۳/۲۳٦**
۶	طوفان شن	۱/۷۲۲	۰/۱۱۸	۱/۱۲۱	**۲/۹۱٤**
۷	سیلاب ناگهانی	۱/۴۴۰	۰/۱۰۸	۰/۹۴۳	**۲/٦٦٤**

در مرحله بعد، با محاسبه وزن تأثیر اجتماعی، مشخص شد که ریسک‌های «ناترازی انرژی» و «موج گرما» به ترتیب با وزن‌های تأثیر ۴/۰۹۳ و (۴/۰۷۹ در اولویت نخست مدیریت اجتماعی قرار دارند. همچنین، ریسک «خشکسالی و کمبود آب» با وزن تأثیر / در رتبه سوم اهمیت اجتماعی قرار گرفته است که بیانگر اهمیت بالای این ریسک در ایجاد فشار اجتماعی و اقتصادی همزمان است (جدول ۵).

نتایج تحلیل ضرایب همبستگی در جدول ۶ نیز اطلاعات تکمیلی ارزشمندی ارائه می‌کند. بیشترین ضرایب همبستگی در بعد اجتماعی مربوط به ریسک «خشکسالی و کمبود آب» با ریسک‌های «طوفان شن» (۰/۴۵۳) و «موج گرما» (۰/۴۴۶) است. این یافته نشان می‌دهد که تشدید خشکسالی مستقیماً می‌تواند موجب افزایش آسیب‌های اجتماعی ناشی از طوفان شن و موج گرما شود. همبستگی منفی‌بین «ناترازی انرژی» و «سیلاب ناگهانی» (۰/۳۶۷-) نیز حاکی از آن است که مناطق درگیر با مشکلات انرژی احتمالاً کمترین اثر اجتماعی را از سیلاب‌ها می‌بینند یا بالعکس. به طور خلاصه، ریسک‌های مرتبط با گرما و انرژی یعنی موج گرما و ناترازی انرژی بیشترین فشار را بر جامعه استان خراسان وارد می‌کنند و همراه با خشکسالی، سه اولویت اصلی در حوزه رفاه و امنیت اجتماعی به شمار می‌روند. سایر ریسک‌ها نظیر سیلاب ناگهانی و طوفان شن اثرات اجتماعی به‌مراتب کمتری دارند. همبستگی مثبت میان خشکسالی، موج گرما و طوفان شن نشان

می‌دهد تشـدید یکی معمولاً شـدت دیگری را نیز بالا می‌برد؛ بنابراین رویکردهای مدیریت اجتماعی باید یکپارچه و متمرکز بر کاهش فشـار گرما، تأمین پایدار انرژی و مدیریت منابع آب باشد.

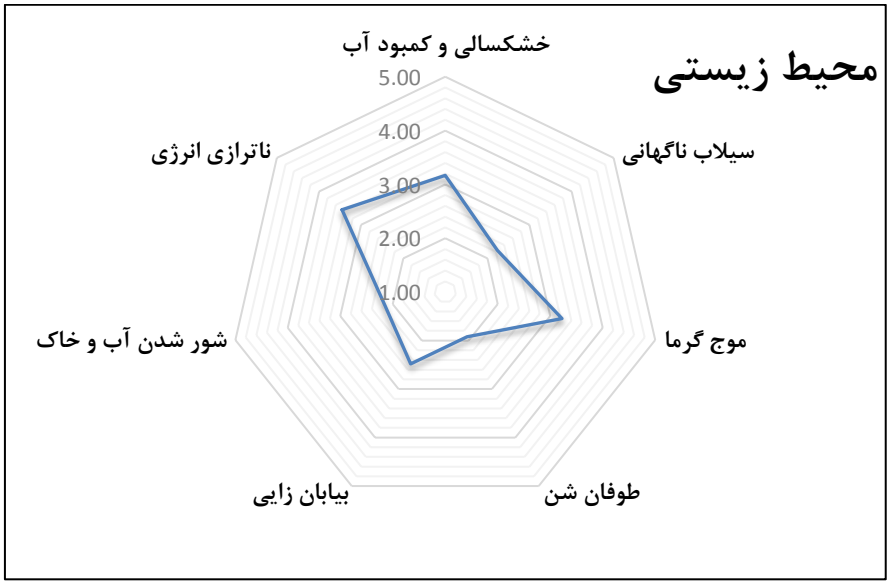
جدول ٦- ضرایب همبستگی بین ریسک‌های متخلف تغییر اقلیمی در عملکرد اجتماعی

	R۱	R۲	R۳	R٤	R٥	R٦	R۷
R۱	۱						
R۲	۰/۰۴	۱					
R۳	۰/۴۴۶	۰/۰۳۸	۱				
R٤	۰/۴۵۳	۰/۳۲۸	۰/۳۴۷	۱			
R٥	۰/۳۴۴	۰/۲۰۸	۰/۳۷۷	۰/۳۴۰	۱		
R٦	۰/۰۹۸	۰/۳۸۹	−۰/۰۳۱	۰/۲۴۴	۰/۳۳۶	۱	
R۷	۰/۱۸۴	−۰/۳۶۷	۰/۲۳۸	۰/۰۳۲	۰/۳۳۵	۰/۲۱۶	۱

R۱: خشکسالی و کمبود آب، R۲: سیلاب‌های ناگهانی، R۳: موج گرما و افزایش دما، R۴: طوفان‌های شن و گردوغبار،R۵: بیابان‌زایی، و فرسایش خاک، R۶: شوری آب‌وخاک، R۷: ناترازی انرژی

بعد محیط زیستی

در بُعد محیط‌زیستی (شکل ۵)، بررسی میانگین نمرات نشان می دهد ریسـک «ناترازی انرژی» با مقدار ۴/۲۲۱ بیشـترین فشـار را بر اکوسیستم‌های استان از افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی تا انتشار آلاینده‌ها وارد می‌کند. پس از آن، «موج گرما» (میانگین نمره ۴/۰۷۹) و «خشکسالی و کمبود آب» (میانگین نمره ۴/۰۴۳) دومین و سومین ریسک‌های بحرانی هستند و کاهش سطح سفره‌های زیرزمینی، اُفت پوشش گیاهی و نابودی زیستگاه‌ها را تشدید می‌کند.



شکل ۵- میانگین موزون شده شدت تأثیر هر ریسک بر عملکرد بعد محیط زیستی در استان خراسان

در سـوی دیگر طیف، «طوفان شـن» با میانگین ۳/۱۵۰ کمترین تهدید محیط‌زیستی ارزیابی شد که می‌تواند به دلیل محدودیت مکانی یا اثر گذاری مقطعی آن اسـت. این نتایج گویای آن اسـت که سـیاسـت‌های حفاظت محیط‌زیسـت در درجه نخسـت باید بر بهبود ترکیب انرژی، افزایش بازده مصرف و مدیریت پایدار منابع آب متمرکز باشـد. جدول ۷ (ضـرایب همبسـتگی) نتایج قابل‌توجهی آشـکار کرده است. ارتباط مثبت قوی بین «بیابان‌زایی» و «طوفان شن» (۰/۵۴) و نیز بین «شورشدن آب‌وخاک» با «طوفان شن» (۰/۵۰) دیده می‌شود؛ به این معنی که تخریب پوشش گیاهی و شوری خاک مستقیماً خطر بروز طوفان های گردوغبار را افزایش می‌دهد. همبسـتگی بالای «خشکسالی» و «موج گرما» (۰/۵۷) نیز مؤید آن است که دوره‌های داغ و خشـک معمولاً فشـار مضـاعفی بر منابع خاک و آب و خدمات اکوسیستمی وارد می‌کنند (جدول ۷). ضریب آلفای کرونباخ (۰/۵۸۸) مقدار متوسـطی اما پذیرفتنی برای مجموعه سـؤالات در بخش

محیط‌زیستی است.

جدول ۷- میانگین نمره، وزن و میانگین موزون شده تأثیر هر یک از ریسک‌های اقلیمی بر عملکرد محیط زیستی

رتبه اهمیت	ریسک اقلیمی	میانگین وزنی	وزن	انحراف معیار	میانگین نمره
۱	ناترازی انرژی	۳/۴۵۴	۰/۱۶۴	۰/۸۸۵	**٤/۲۲۱**
۲	موج گرما	۲/۲۲۴	۰/۱۵۸	۰/۶۷۷	**٤/۰۷۹**
۳	خشکسالی و کمبود آب	۳/۱۶۸	۰/۱۵۷	۰/۸۰۵	**٤/۰٤۳**
۴	بیابان‌زایی	۲/۴۸۲	۰/۱۳۹	۰/۹۷۳	**۳/۵۷۹**
۵	سیلاب ناگهانی	۲/۲۴۰	۰/۱۳۲	۱/۱۷۸	**۳/٤۰۰**
۶	شورشدن آب‌وخاک	۲/۱۴۷	۰/۱۲۹	۰/۸۳۷	**۳/۳۲۹**
۷	طوفان شن	۱/۹۲۳	۰/۱۲۲	۱/۰۲۴	**۳/۱۵۰**

جدول ۸- ضرایب همبستگی بین ریسک‌های متخلف تغییر اقلیمی در عملکرد محیط‌زیستی

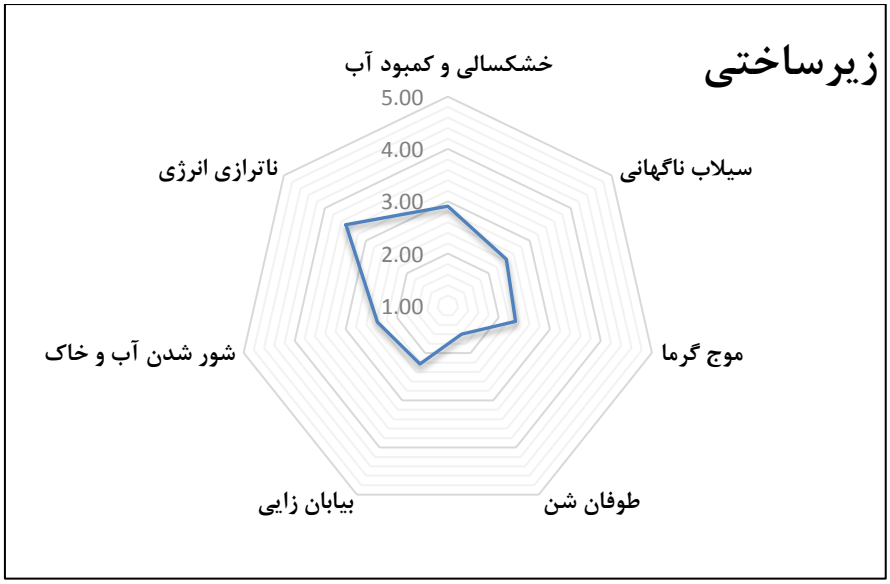
	R۱	R۲	R۳	R٤	R٥	R٦	R۷
R۱	۱						
R۲	-۰/۰۶۸	۱					
R۳	۰/۵۷۴	۰/۱۳۳	۱				
R٤	۰/۲۵۰	۰/۳۷۶	۰/۲۳۶	۱			
R٥	۰/۰۴۹	۰/۳۰۶	۰/۱۳۹	۰/۵۳۹	۱		
R٦	۰/۴۰۴	۰/۰۸۵	۰/۱۳۲	۰/۵۰۰	۰/۱۶۴	۱	
R۷	۰/۱۱۸	-۰/۰۹۷	۰/۲۵۰	-۰/۱۳۰	-۰/۲۵۱	-۰/۰۱۵	۱

R۱: خشکسالی و کمبود آب، R۲: سیلاب‌های ناگهانی، R۳: موج گرما و افزایش دما، R۴: طوفان‌های شن و گردوغبار،R۵: بیابان‌زایی، و فرسایش خاک، R۶: شوری آب‌وخاک، R۷: ناترازی انرژی

به طور خلاصه، ناترازی انرژی و خشکسالی مهم‌ترین تهدیدها برای پایداری زیست‌محیطی استان هستند و بیشترین تأثیر را بر تخریب زیستگاه‌ها و افت منابع طبیعی دارند. همچنین، ریسک‌های بیابان‌زایی، شوری خاک و طوفان گردوغبار با افزایش فر سایش خاک و آلودگی هوا، شرایط محیطی را وخیم‌تر می‌کنند. براین‌اساس، ارتقای بهره‌وری انرژی و آب، همراه با احیای پوشش گیاهی، باید در اولویت برنامه‌های محیط‌زیستی قرار گیرد.

زیرساختی

بررسی اثرات زیرساختی ریسک‌های اقلیمی در شکل ۶، میانگین نمرات در این بعد نشان می‌دهد که ریسک «ناترازی انرژی» با میانگین ۴/۰۹۳ و «خشکسالی و کمبود آب» با میانگین ۳/۷۳۹ بیشترین تهدید را برای زیرساخت‌های حیاتی منطقه دارند. این موضوع بیانگر نگرانی جدی متخصصان در زمینه آسیب‌پذیری زیرساخت‌های انرژی، آب، حمل‌ونقل و خدمات شهری در برابر این دو ریسک است. در مقابل، ریسک «طوفان شن» با میانگین ۲/۷۷۱ کمترین سطح تهدید زیرساختی را به خود اختصاص داده که می‌تواند ناشی از تمرکز جغرافیایی محدود آن یا میزان اثر کمتر آن بر زیر ساخت‌های گسترده باشد. بر اساس محاسبه میانگین وزنی، «ناترازی انرژی» با مقدار ۳/۴۸۹ و «خشکسالی و کمبود آب» با مقدار ۲/۹۰۷ دارای بالاترین اولویت در برنامه‌ریزی‌های تاب‌آوری زیرساختی هستند. این یافته‌ها نیاز به توسعه راهکارهای تاب‌آوری انرژی و منابع آب را برجسته می‌کند. همچنین ریسک‌هایی مانند «بیابان‌زایی» (۲/۲۲۹) و «شورشدن آب‌وخاک» (۲/۳۷۷) نیز تأثیر قابل‌توجهی داشته و نباید نادیده گرفته شوند (جدول ۹). در تحلیل ماتریس ضرایب همبستگی (جدول ۱۰) مشاهده می شود که روابط میان ریسک‌های اقلیمی عمدتاً در سطح ضعیف تا متوسط قرار دارند. بیشترین همبستگی مثبت مربوط به رابطه میان «طوفان‌های شن و گردوغبار» و «بیابان‌زایی و فرسایش خاک» است (۰/۵۶۰)، که بیانگر همراهی نسبتاً قابل توجه این دو ریسک در منطقه مورد مطالعه است. همچنین «موج گرما و افزایش دما» با «بیابان‌زایی و فرسایش خاک» همبستگی مثبت نسبتاً بالایی دارد (۰/۵۱۷)، و «سیلاب های ناگهانی» نیز با «طوفان های شن و گردوغبار» رابطه مثبت متوسطی نشان می‌دهند (۰/۴۹۵). «ناترازی انرژی» با «خشکسالی و کمبود آب» نیز دارای همبستگی مثبت متوسط است (۰/۴۲۲)، که می‌تواند نشان‌دهنده ارتباط میان فشارهای آبی و افزایش نیازهای انرژی در شرایط اقلیمی نامساعد باشد. در مقابل، برخی روابط منفی نیز مشاهده می شود؛ «خشکسالی و کمبود آب» با «سیلاب‌های ناگهانی» (-۰/۲۸۵). به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که ریسک‌های اقلیمی در منطقه به‌صورت کاملاً مستقل از یکدیگر عمل نمی‌کنند، اما شدت ارتباط میان آن‌ها متفاوت است و بیشتر روابط در سطح متوسط یا ضعیف قرار دارند.



شکل ٦- میانگین موزون شده شدت تأثیر هر ریسک بر عملکرد بعد زیرساختی در استان خراسان

جدول ۹ میانگین نمره، وزن و میانگین موزون شده تأثیر هر یک از ریسک‌های اقلیمی بر عملکرد زیرساختی

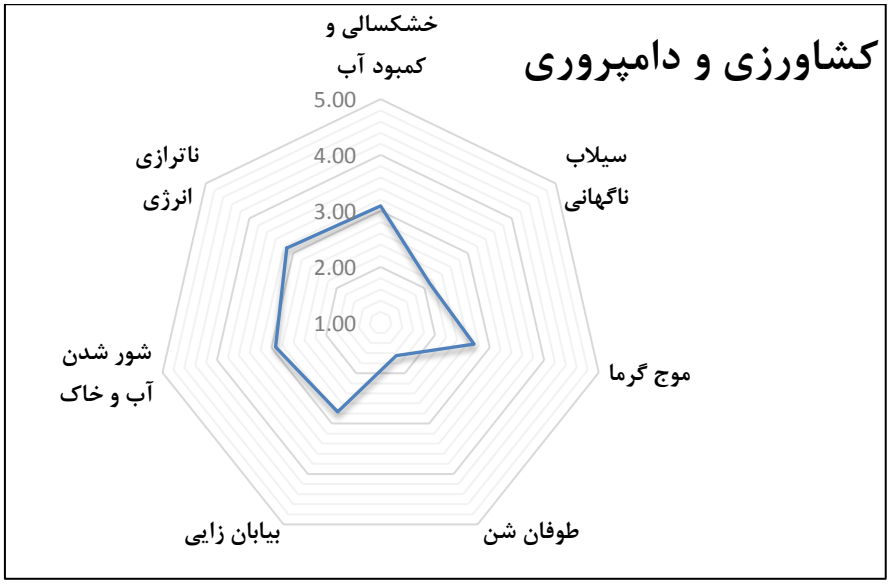
رتبه اهمیت	ریسک اقلیمی	میانگین وزنی	وزن	انحراف معیار	میانگین نمره
۱	ناترازی انرژی	۳/۴۸۹	۰/۱۷۰	۰/۸۱۰	**٤/۰۹۳**
۲	خشکسالی و کمبود آب	۲/۹۰۷	۰/۱۵۶	۰/۷۲۰	**۳/۷۳۹**
۳	سیلاب ناگهانی	۲/۴۲۸	۰/۱۴۲	۰/۶۹۶	**۳/٤۱٤**
۴	شورشدن آب‌وخاک	۲/۳۷۷	۰/۱۴۱	۰/۷۴۹	**۳/۳۷۹**
۵	موج گرما	۲/۳۲۷	۰/۱۳۹	۰/۹۶۰	**۳/۳٤۳**
۶	بیابان‌زایی	۲/۲۲۹	۰/۱۳۶	۰/۸۳۶	**۳/۲۷۱**
۷	طوفان شن	۱/۶۰۰	۰/۱۱۵	۱/۰۶۶	**۲/۷۷۱**

جدول ۱۰- ضرایب همبستگی بین ریسک‌های متخلف تغییر اقلیمی در عملکرد زیرساختی

	R۱	R۲	R۳	R٤	R٥	R٦	R۷
R۱	۱						
R۲	-۰/۲۸۵	۱					
R۳	۰/۱۶۶	۰/۲۴۶	۱				
R٤	-۰/۰۰۶	۰/۴۹۵	۰/۳۷۵	۱			
R٥	-۰/۳۳۲	۰/۳۵۵	۰/۵۱۷	۰/۵۶۰	۱		
R٦	۰/۲۹۹	-۰/۱۶۵	۰/۱۳۰	۰/۱۶۶	۰/۲۴۵	۱	
R۷	۰/۴۲۲	-۰/۲۱۳	۰/۲۲۲	۰/۱۳۵	۰/۳۱۰	۰/۲۱۸	۱

R۱: خشکسالی و کمبود آب، R۲: سیلاب‌های ناگهانی، R۳: موج گرما و افزایش دما، R۴: طوفان‌های شن و گردوغبار،R۵: بیابان‌زایی، و فرسایش خاک، R۶: شوری آب‌وخاک، R۷: ناترازی انرژی

به طور کلی در مورد اثر ریسک‌ها بر زیرساخت منطقه، نتایج نشان می‌دهد که به‌ویژه در حوزه انرژی و منابع آب، بیشترین آسیب را از دو ریسک اصلی «ناترازی انرژی» و «خشکسالی و کمبود آب» متحمل می‌شوند. این دو ریسک، هم از نظر میانگین نمره و هم در شاخص میانگین وزنی، در صدر قرار دارند و باید در اولویت اقدامات مدیریتی قرار بگیرند. علاوه بر این، هم‌پوشانی اثرات «بیابان‌زایی» و «شورشدن آب‌وخاک» تهدیدات مضاعفی برای پایداری فیزیکی زیرساخت ها ایجاد می‌کند؛ بنابراین، برنامه‌ریزی برای تاب‌آوری زیر ساخت‌ها باید به صورت یکپارچه و هماهنگ با راهبردهای مدیریت منابع انرژی، آب‌وخاک انجام گیرد تا از اختلالات گسترده در عملکرد زیرساخت‌های منطقه‌ای جلوگیری شود.



شکل ۷- میانگین موزون شده شدت تأثیر هر ریسک بر عملکرد بعد کشاورزی و دامپروری در استان خراسان

جدول ۱۱- میانگین نمره، وزن و میانگین موزون شده تأثیر هر یک از ریسک‌های اقلیمی بر عملکرد کشاورزی و دامپروری

رتبه اهمیت	ریسک اقلیمی	میانگین وزنی	وزن	انحراف معیار	میانگین نمره
۱	ناترازی انرژی	۴/۰۰۷	۰/۱۵۷	۰/۷۸۳	**۳/۱۴۷**
۲	خشکسالی و کمبود آب	۳/۹۷۱	۰/۱۵۶	۰/۷۵۸	**۳/۰۹۱**
۳	شورشدن آب‌وخاک	۳/۸۶۴	۰/۱۵۱	۰/۷۲۱	**۲/۹۲۶**
۴	بیابان‌زایی	۳/۷۵۷	۰/۱۴۷	۰/۸۵۸	**۲/۷۶۶**
۵	موج گرما	۳/۷۲۱	۰/۱۴۶	۰/۸۲۵	**۲/۷۱۴**
۶	سیلاب ناگهانی	۳/۲۹۳	۰/۱۲۹	۰/۹۹۱	**۲/۱۲۵**
۷	طوفان شن	۳/۹۰۰	۰/۱۱۴	۱/۰۴۸	**۱/۶۴۸**

یافته‌های م شابه در پژوهش‌های ر سول[1] و سیم سون[2] در سال ۲۰۱۶ نیز تأیید می‌کند که کمبود منابع آب و انرژی به طور هم‌زمان سبب آسیب‌پذیری شدید زیرساخت‌ها و امنیت غذایی می‌شود (Rasul & Sharma, 2016; Simpson & Jewitt, 2019).

کشاورزی و دامپروری

تحلیل پیامدهای اقلیمی در بخش کشاورزی و دامپروری در شکل ۷ ن شان می‌دهد که ریسک «ناترازی انرژی» با میانگین نمره ۳/۱۴۷ و میانگین وزنی ۴/۰۰۷ بیشترین نگرانی و اهمیت را از نظر کارشناسان این حوزه دارا ست. این مو ضوع بیانگر نقش حیاتی تأمین انرژی پایدار برای سامانه‌های آبیاری و سایر فعالیت‌های کشاورزی در مواجهه با تغییرات اقلیمی است. پس از آن، ریسک «خشکسالی و کمبود آب» با م یانگین ۳/۰۹۱ و م یانگین وزنی ۳/۹۷۱ جای گاه دوم را به خود اخت صاص داده که ن شان‌دهنده تأثیر گ سترده محدودیت منابع آبی بر تولیدات کشاورزی و دامپروری است.

ریسک‌های «شورشدن آب‌وخاک» (میانگین نمره ۲/۹۲۶، میانگین وزنی ۳/۸۶۴) و «بیابان‌زایی» (میانگین نمره ۲/۷۶۶، میانگین وزنی ۳/۷۵۷) نیز از اهمیت بالایی برخوردارند و اثرات تخریبی آن‌ها بر کیفیت خاک و کاهش بهره‌وری کشاورزی موردتوجه قرار گرفته است. در مقابل، «طوفان شن» با میانگین نمره ۱/۶۴۸ و میانگین وزنی ۳/۹ کمترین میزان نگرانی را در این بعد ایجاد کرده است که احتمالاً ناشی از پراکندگی مکانی و محدودیت جغرافیایی اثرات آن است (جدول ۱۱).

بررسی جدول ضرایب همبستگی (جدول ۱۲) میان ریسک‌ها نشان می‌دهد که بیشتر روابط میان ریسک‌های اقلیمی در سطح ضعیف تا متو سط قرار دارند، اما در برخی موارد همب ستگی‌های قابل

1- Rasul

2- Simpson

توجهی مشاهده می شود. بیشترین همبستگی مثبت مربوط به رابطه میان «بیابان‌زایی و فرسایش خاک» با «شوری آب‌وخاک» است (۰/۷۵۵)، که بیانگر پیوند قوی میان تخریب سرزمین و افت کیفیت منابع خاک و آب در منطقه است. همچنین «سیلاب‌های ناگهانی» با «طوفان‌های شن و گردوغبار» همبستگی مثبت متوسطی دارد (۰/۴۹۰)، و با «بیابان‌زایی و فرسایش خاک» (۰/۳۸۰)، «موج گرما و افزایش دما» (۰/۳۶۳)، و «شوری آب‌و خاک» (۰/۳۰۳) نیز ارتباط مثبت نشان می‌دهد. این نتایج بیان می‌کند که سیلاب‌های ناگهانی می‌توانند در کنار سایر فرآیندهای محیطی و اقلیمی، بخشی از الگوی کلی ناپایداری منطقه باشند. از سوی دیگر، «ناترازی انرژی» با «موج گرما و افزایش دما» همبستگی مثبت متوسطی دارد (۰/۳۲۱)، که نشان می‌دهد افزایش دما می‌تواند با افزایش فشار بر مصرف انرژی همراه باشد. در مقابل، برخی روابط منفی ضعیف نیز مشاهده می‌شود؛ از جمله رابطه میان «ناترازی انرژی» و «خشکسالی و کمبود آب» (۰/۲۱۶-)، و نیز میان ناترازی انرژی و سیلاب‌های ناگهانی (۰/۰۶۳-). همچنین رابطه میان خشکسالی و کمبود آب با سیلاب‌های ناگهانی تقریباً صفر است، که نشان می‌دهد این دو ریسک در این ماتریس رابطه خطی معناداری با یکدیگر نشان نمی‌دهند.

جدول ۱۲- ضرایب همبستگی بین ریسک‌های متخلف تغییر اقلیمی در عملکرد کشاورزی و دامپروری

	R۱	R۲	R۳	R٤	R٥	R٦	R۷
R۱	۱						
R۲	-۰/۰۰۱	۱					
R۳	۰/۲۵۶	۰/۳۶۳	۱				
R٤	۰/۰۷۷	۰/۴۹	۰/۱۷	۱			
R٥	۰/۱۹	۰/۳۸	۰/۱۹۱	۰/۳۳۲	۱		
R٦	۰/۲۳۳	۰/۳۰۳	۰/۲۷۹	۰/۰۶۷	۰/۷۵۵	۱	
R۷	-۰/۲۱۶	-۰/۰۶۳	۰/۳۲۱	۰/۰۷۹	۰/۰۸۸	۰/۰۳۷	۱

R۱: خشکسالی و کمبود آب، R۲: سیلاب‌های ناگهانی، R۳: موج گرما و افزایش دما، R۴: طوفان‌های شن و گردوغبار،R۵: بیابان‌زایی، و فرسایش خاک، R۶: شوری آب‌وخاک، R۷: ناترازی انرژی

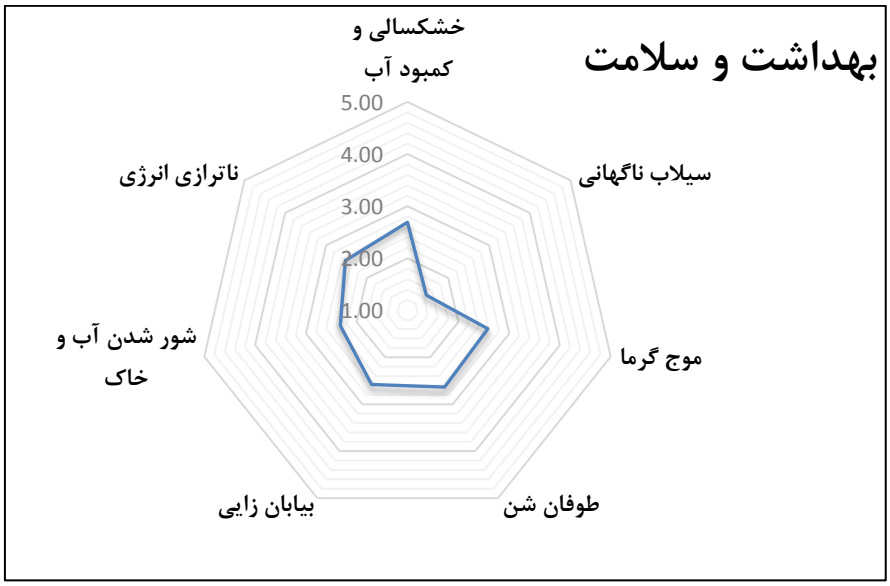
در مجموع، نتایج بیانگر این است که مدیریت بهینه منابع انرژی و آب در بخش کشاورزی، به‌ویژه در مقابله با خشکسالی، باید در اولویت برنامه‌های سازگاری اقلیمی قرار گیرد. همچنین حفاظت از کیفیت خاک از طریق مقابله با شوری و بیابان‌زایی، از جمله اقدامات ضروری برای حفظ پایداری کشاورزی و دامپروری در منطقه است.

بهداشت و سلامت

در بررسی تأثیرات ریسک‌های اقلیمی بر بعد بهداشت و سلامت در جدول ۱۳، میانگین نمرات نشان می‌دهد که ریسک «خشکسالی و کمبود آب» با میانگین ۲/۶۸۹ بیشترین نگرانی را در این حوزه ایجاد کرده است. این ریسک به دلیل اثرات مستقیم بر کیفیت و کمیت منابع آب، افزایش بیماری‌های مرتبط با آب و کاهش سلامت عمومی، به‌عنوان بحرانی‌ترین ریسک سلامت مطرح است. پس از آن، «طوفان شن» (۲/۶۳۵) و «موج گرما» (۲/۵۸۲) به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار دارند که نشان‌دهنده اثرات منفی این پدیده‌ها بر سلامت تنفسی، افزایش بیماری‌های قلبی و عروقی و فشارهای گرمایی بر جمعیت است.

کمترین میانگین تأثیر به بعد سلامت مربوط به «سیلاب ناگهانی» با میانگین ۱/۴۶۴ است که احتمالاً به دلیل وقوع محدودتر یا اثرگذاری کمتر در این زمینه است. وزن تأثیر نیز تأکید می‌کند که ریسک‌های خشکسالی، طوفان شن و موج گرما به ترتیب بیشترین اولویت را برای مدیریت اثرات بهداشتی دارند (شکل ۸).

بر اساس نتایج ماتریس همبستگی (جدول ۱۴) بیشترین همبستگی مثبت مربوط به رابطه میان «بیابان‌زایی و فرسایش خاک» با «ناترازی انرژی» است (۰/۶۶۰)، که نشان می‌دهد تشدید تخریب سرزمین می‌تواند با افزایش فشار بر سیستم انرژی و نیازهای مصرفی منطقه همراه باشد. پس از آن، خشکسالی و کمبود آب با ناترازی انرژی همبستگی نسبتاً بالایی دارد (۰/۶۰۶)، که می‌تواند بیانگر ارتباط میان تنش آبی، افزایش نیاز به پمپاژ، انتقال آب، آبیاری و مصرف انرژی در شرایط اقلیمی نامساعد باشد. همچنین «طوفان‌های شن و گردوغبار» با «بیابان‌زایی و فرسایش خاک» (۰/۵۹۴)، «سیلاب‌های ناگهانی» با «بیابان‌زایی و فرسایش خاک» (۰/۵۸۷)، و «بیابان‌زایی و فرسایش خاک» با «شوری آب‌وخاک» (۰/۵۵۹) همبستگی مثبت قابل توجهی نشان می‌دهند. این الگو نشان می‌دهد که ریسک‌های مرتبط با تخریب سرزمین، منابع آب‌وخاک و فشارهای انرژی به‌صورت جدا از هم عمل نمی‌کنند، بلکه در قالب یک مجموعه به‌هم‌پیوسته از تنش‌های محیطی و منطقه‌ای ظاهر می‌شوند. در مجموع، ماتریس همبستگی بیانگر آن است که ریسک‌های اقلیمی در منطقه مورد مطالعه عمدتاً با یکدیگر هم‌جهت هستند و قوی‌ترین پیوندها در میان ریسک‌های مرتبط با بیابان‌زایی، ناترازی انرژی، خشکسالی، سیلاب‌های ناگهانی و شوری آب‌وخاک مشاهده می‌شود.



شکل ۸- میانگین موزون شده شدت تأثیر هر ریسک بر عملکرد بعد بهداشت و سلامت در استان خراسان

جدول ۱۳ میانگین نمره، وزن و میانگین موزون شده تأثیر هر یک از ریسک‌های اقلیمی بر عملکرد بهداشت و سلامت

رتبه اهمیت	ریسک اقلیمی	میانگین وزنی	وزن	انحراف معیار	میانگین نمره
۱	خشکسالی و کمبود آب	۳/۵۴۳	۰/۱۵۲	۰/۷۶۲	**۲/٦۸۹**
۲	طوفان شن	۳/۵۰۷	۰/۱۵۰	۱/۰۱۴	**۲/٦۳۵**
۳	موج گرما	۳/۴۷۱	۰/۱۴۹	۰/۸۹۷	**۲/۵۸۲**
۴	بیابان‌زایی	۳/۴۷۱	۰/۱۴۹	۰/۹۳۷	**۲/۵۸۲**
۵	ناترازی انرژی	۳/۴۳۶	۰/۱۴۷	۱/۱۴۹	**۲/۵۲۹**
۶	شورشدن آب‌وخاک	۳/۲۹۳	۰/۱۴۱	۰/۷۸۳	**۲/۲۳۲**
۷	سیلاب ناگهانی	۲/۶۱۴	۰/۱۱۲	۱/۲۱۴	**۱/٤٦٤**

جدول ١٤- ضرایب همبستگی بین ریسک‌های متخلف تغییر اقلیمی در عملکرد بهداشت و سلامت

	R۱	R۲	R۳	R٤	R٥	R٦	R۷
R۱	۱						
R۲	۰/۳۱۲	۱					
R۳	۰/۳۶۷	۰/۵۱۱	۱				
R٤	-۰/۰۸۵	۰/۳۴۴	۰/۴۱۷	۱			
R٥	۰/۵۰۷	۰/۵۸۷	۰/۴۲۸	۰/۵۹۴	۱		
R٦	۰/۲۷۹	۰/۴۷۲	۰/۴۷۹	۰/۲۲۳	۰/۵۵۹	۱	
R۷	۰/۶۰۶	۰/۳۸۹	۰/۲۹۴	۰/۲۴۷	۰/۶۶	۰/۴۶۸	۱

R۱: خشکسالی و کمبود آب، R۲: سیلاب‌های ناگهانی، R۳: موج گرما و افزایش دما، R۴: طوفان‌های شن و گردوغبار،R۵: بیابان‌زایی، و فرسایش خاک، R۶: شوری آب‌وخاک، R۷: ناترازی انرژی

به‌طورکلی، نتایج بخش بهداشت و سلامت حاکی از آن است که خشکسالی و کمبود آب، موج گرما و طوفان شن، بیشترین تهدیدات سلامت را در منطقه ایجاد می‌کنند که نیازمند برنامه‌های فوری پیشگیری و سازگاری هستند. کنترل منابع آب، مدیریت گردوغبار و مقابله با تنش‌های حرارتی از اولویت‌های اصلی برای کاهش اثرات منفی اقلیم بر سلامت جامعه به شمار می‌آیند.

نتایج حاصل از ماتریس وزن - تأثیر جدول ۱۵ نشان‌دهنده شدت متفاوت تأثیرات ریسک‌های اقلیمی در شش بُعد اقتصادی، اجتماعی، محیط‌زیستی، زیرساختی، کشاورزی و دامپروری و بهداشت و سلامت است. طبق این ماتریس، «خشکسالی و کمبود آب» با میانگین وزنی

۳/۲۶ و «ناترازی انرژی» با میانگین وزنی ۳/۴۱ مهم‌ترین و مؤثرترین ریسک‌ها در ابعاد مختلف شناسایی شده‌اند. این دو ریسک به‌ویژه در ابعاد اقتصادی، اجتماعی، زیرساختی و کشاورزی بیشترین نمرات تأثیر را کسب کرده‌اند که بیانگر نقش محوری آن‌ها در افزایش آسیب‌پذیری مناطق خشک و نیمه‌خشک استان خراسان است. ازسوی‌دیگر، ریسک «طوفان شن» با میانگین وزنی ۱/۷۲ کمترین میزان تأثیرگذاری را در میان ریسک‌های بررسی شده دارد؛ بااین‌حال، تأثیر آن در بُعد بهداشت و سلامت همچنان قابل‌توجه است.

جدول ۱۵- رتبه‌بندی ریسک‌های تغییر اقلیم در ابعاد عملکردی مختلف

بعد / ریسک	اقتصادی	اجتماعی	محیط زیستی	زیرساختی	کشاورزی و دامپروری	بهداشت و سلامت
خشکسالی و کمبود آب	۳/۲۶	۳/۱۴	۳/۱۷	۲/۹۱	۳/۰۹	۲/۶۹
سیلاب ناگهانی	۲/۲۲	۱/۴۴	۲/۲۴	۲/۴۳	۲/۱۲	۱/۴۶
موج گرما	۳/۰۳	۳/۳۷	۳/۲۲	۲/۳۳	۲/۷۱	۲/۵۸
طوفان شن	۱/۷۸	۱/۷۲	۱/۹۲	۱/۶۰	۱/۶۵	۲/۶۴
بیابان‌زایی	۲/۳۲	۲/۸۳	۲/۴۸	۲/۲۳	۲/۷۷	۲/۵۸
شورشدن آب‌وخاک	۲/۶۶	۲/۱۲	۲/۱۵	۲/۳۸	۲/۹۳	۲/۳۲
ناترازی انرژی	۳/۴۳	۳/۴۰	۳/۴۵	۳/۴۹	۳/۱۵	۲/۵۳

R1: خشکسالی و کمبود آب، R2: سیلاب‌های ناگهانی، R3: موج گرما و افزایش دما، R4: طوفان‌های شن و گردوغبار، R5: بیابان‌زایی، و فرسایش خاک، R6: شوری آب‌وخاک، R7: ناترازی انرژی

نتایج همچنین بیانگر اهمیت بالای بُعد اقتصادی (میانگین ۲/۹۸) و زیرساختی (میانگین ۲/۸۴) در مجموع شش بُعد بررسی شده است. این یافته نشان می‌دهد که اثرات اقتصادی و فشار بر زیرساخت‌های حیاتی منطقه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و نیازمند اقدامات مدیریتی هدفمند هستند. ریسک‌های «بیابان‌زایی» (میانگین ۲/۴۰) و «شورشدن آب‌وخاک» (میانگین ۲/۴۳) به‌صورت متعادلی بر کلیه ابعاد اثرگذار بوده‌اند و این مسئله ضرورت اتخاذ رویکردهای جامع و هماهنگ برای مقابله با این دو ریسک را موردتأکید قرار می‌دهد. در نهایت، نتایج این ماتریس نشان‌دهنده لزوم اولویت‌بندی سیاست‌های ساز گاری اقلیمی مبتنی بر مدیریت جامع منابع آب و انرژی، مقاوم‌سازی زیرساخت‌ها، و برنامه‌ریزی مؤثر در جهت کاهش آسیب‌های ناشی از تغییر اقلیم و افزایش تاب‌آوری جوامع محلی است. این نتیجه با دیدگاه رویکرد نکسوس همسو است که بر ارتباط متقابل منابع آب – انرژی – غذا برای توسعه پایدار در مناطق خشک تأکید دارد (Rasul & Sharma, 2016).

به‌طورکلی نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که ریسک‌های اقلیمی در استان خراسان به‌صورت متفاوت و با شدت‌های متغیر بر ابعاد مختلف عملکردی تأثیرگذار هستند. به‌طورکلی، خشکسالی و کمبود آب و ناترازی انرژی به‌عنوان بحرانی‌ترین ریسک‌ها در تمامی ابعاد اقتصادی، اجتماعی، محیط‌زیستی، زیرساختی، کشاورزی و بهداشت، بیشترین وزن و تأثیر را دارند و اولویت اصلی مدیریت و برنامه‌ریزی های منطقه‌ای را تشکیل می‌دهند. همچنین، ریسک‌های موج گرما و شورشدن آب‌وخاک نیز بااهمیت قابل‌توجه، به‌ویژه در ابعاد اجتماعی، محیط‌زیستی و کشاورزی، نقش‌برجسته‌ای در افزایش آسیب‌پذیری‌ها ایفا می‌کنند. روابط همبستگی مثبت میان ریسک‌هایی همچون خشکسالی، موج گرما، بیابان‌زایی و طوفان شن، نشان‌دهنده تعامل و تشدید اثرات مخرب این عوامل بر یکدیگر و بر نظام‌های زیست‌محیطی و اجتماعی است. این موضوع ضرورت رویکردهای ترکیبی و جامع در مدیریت ریسک‌های اقلیمی را برجسته می‌کند. در نهایت، یافته‌ها تأکید می‌کنند که سیاست‌های مقاوم‌سازی باید با تمرکز بر بهبود کارایی مصرف منابع آب و انرژی، ارتقای تاب‌آوری زیرساخت‌ها، حفاظت و احیای پوشش گیاهی و کاهش مخاطرات بهداشتی طراحی شود تا تأثیرات منفی اقلیم به حداقل برسد و پایداری منطقه حفظ گردد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که در منطقه خشک و نیمه‌خشک خراسان، چهار ریسک خشکسالی و کمبود آب، ناترازی انرژی، موج گرما و شوری آب‌وخاک به‌عنوان اصلی‌ترین تهدیدات اقلیمی شناخته می‌شوند. این ریسک‌ها تأثیرات گسترده‌ای بر ابعاد اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی، کشاورزی، بهداشت و زیرساختی منطقه دارند. در میان آن‌ها، خشکسالی بیشترین شدت و اثرگذاری را داشته و مستقیماً بر پایداری منابع آب، امنیت غذایی و رفاه اجتماعی تأثیر گذاشته است. از سوی‌دیگر، ناترازی انرژی به‌عنوان پدیده‌ای نوظهور، بازتابی از فشار متقابل میان اقلیم و نظام انرژی کشور است و باید به‌عنوان یکی از اولویت‌های اصلی مدیریت اقلیمی در نظر گرفته شود. یافته‌ها نشان می‌دهد که بسیاری از ریسک‌های اقلیمی ماهیتی هم‌افزا دارند و اثرات آن‌ها از طریق زنجیره‌ای از پیامدهای متقابل تقویت می‌شود. برای مثال، خشکسالی می‌تواند با کاهش رطوبت خاک و پوشش گیاهی، فرایند بیابان‌زایی و بروز طوفان‌های گردوغبار را تشدید کند، درحالی

که افزایش دما و فشار انرژی نیز ظرفیت سازگاری را محدود می‌سازد. چنین الگویی بیانگر وجود «ریسک‌های مرکب و آبشاری» است که مدیریت مؤثر آن‌ها نیازمند هماهنگی میان‌بخشی و رویکردهای تلفیقی است. در این راستا، نتایج مطالعه تأکید می‌کند که اتخاذ چارچوب «نکسوس آب – انرژی – غذا» می‌تواند مبنایی کارآمد برای برنامه‌ریزی سازگاری در مناطق خشک فراهم آورد. این رویکرد، با تمرکز بر پیوندهای متقابل منابع، امکان بهینه‌سازی تخصیص آب و انرژی، ارتقای بهره‌وری کشاورزی و افزایش تاب‌آوری زیرساختی را فراهم می‌سازد. براین‌اساس، توصیه می‌شود سیاست‌گذاران منطقه‌ای در طراحی برنامه‌های اقلیم پایدار، سه محور کلیدی را دنبال کنند؛ ۱)توسعه سامانه‌های مدیریت آب با محوریت بازچرخانی و بهره‌وری بالا، ۲) اصلاح ساختار انرژی با تمرکز بر انرژی‌های تجدیدپذیر و کاهش ناترازی و ۳) تقویت مشارکت جوامع محلی و ذی‌نفعان در تصمیم‌سازی. در نهایت، پژوهش‌های آینده می‌توانند بر تحلیل اقتصادی و سیاستیِ کاهش ناترازی انرژی و سنجش تاب‌آوری چندبعدی مناطق خشک تمرکز یابند تا مبنای علمی مستحکمی برای برنامه‌ریزی اقلیمی و توسعه پایدار فراهم شود.

منابع

Aria, M.M., Vafadar, S., Sharafi, Y., & Ghezelsofloo, A.A. 2025. Predictive modeling of diazinon residual concentration in soils contaminated with potentially toxic elements: a comparative study of machine learning approaches. Biodegradation. 36(1): 11.

Azizi, A., Boshrabadi, H.M., & Mehrjerdi, M.Z. 2022. Impacts of climate change and water scarcity on farmers' irrigation decisions in north-khorasan province: major crops. J Agric Econ Dev. 35(4): 367-332.

Babaeian, F., Delavar, M., Morid, S., & Srinivasan, R. 2021. Robust climate change adaptation pathways in agricultural water management. Agricultural Water Management. 252: 106904.

Bitarafan, M., Amini Hosseini, K., & Hashemkhani Zolfani, S. 2023. Evaluating natural hazards in cities using a novel integrated MCDM approach (case study: Tehran city). Mathematics. 11(8): 1936.

Brodny, J., & Tutak, M. 2023. Assessing the energy and climate sustainability of European Union member states: an MCDM-based approach. Smart Cities. 6(1): 339-367.

Change, C. 2022. Mitigating Climate Change. Working Group III contribution to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.

Cohen, B., Blanco, H., Dubash, N.K., Dukkipati, S., Khosla, R., Scrieciu, S., Stewart, T., & Torres-Gunfaus, M. 2019. Multi-criteria decision analysis in policy-making for climate mitigation and development. Climate and Development. 11(3): 212-222.

Cook, B.I., Mankin, J.S., & Anchukaitis, K.J. 2018. Climate change and drought: From past to future. Current Climate Change Reports. 4(2): 164-179.

Eskandari Dameneh, H., Gholami, H., Telfer, M.W., Comino, J.R., Collins, A.L., & Jansen, J.D. 2021. Desertification of Iran in the early twenty-first century: assessment using climate and vegetation indices. Scientific Reports. 11(1): 20548.

Farajzadeh, Z., Ghorbanian, E., & Tarazkar, M.H. 2022. The shocks of climate change on economic growth in developing economies: Evidence from Iran. Journal of Cleaner Production. 372: 133687.

Gholami, H., Mohammadifar, A., Golzari, S., Torkamandi, R., Moayedi, E., Reshkooeiyeh, M.Z., Song, Y., & Zeeden, C. 2025. Mapping flood risk using a workflow including deep learning and MCDM–Application to southern Iran. Urban Climate. 59: 102272.

Goldani, M. 2024. Strengthening urban resilience through landscape architecture: A comprehensive review of strategies and best practices. Flower and Ornamental Plants. 9(2): 185-206.

Goldani, M., Danesh, S., & Shad, R. 2024. Investigating the Impact of PM10 on NDVI Changes Based on Satellite Image Processing in Khuzestan Province. Iranian Journal of Irrigation & Drainage. 18(3): 477-488.

Goldani, M., Etemadfard, H., & Rezaee, A. 2024. Spatial Assessment of Land Surface Temperature Trends in Different Climates of Khorasan Razavi Province Using Aqua Satellite Imagery (from 2003 to 2023). Ferdowsi Civil Engineering. 37(3): 1-12.

Golfam, P., Ashofteh, P.-S., Rajaee, T., & Chu, X. 2019. Prioritization of water allocation for adaptation to climate change using multi-criteria decision making (MCDM). Water Resources Management. 33(10): 3401-3416.

Huang, J., Ji, M., Xie, Y., Wang, S., He, Y., & Ran, J. 2016. Global semi-arid climate change over last 60 years. Climate Dynamics. 46(3): 1131-1150.

Kusangaya, S., Mazvimavi, D., Shekede, M.D., Masunga, B., Kunedzimwe, F., & Manatsa, D. 2021. Climate change impact on hydrological regimes and extreme events in southern Africa. In: Climate change and water resources in Africa: perspectives and solutions towards an imminent water crisis. pp. 87-129. Springer.

Lawrence, J., Blackett, P., & Cradock-Henry, N.A. 2020. Cascading climate change impacts and implications. Climate Risk Management. 29: 100234.

Le Houérou, H.N. 1996. Climate change, drought and desertification. Journal of arid Environments. 34(2): 133-185.

Loucks, D.P. 2021. Impacts of climate change on economies, ecosystems, energy, environments, and human equity: A systems perspective. In: The impacts of climate change. pp. 19-50. Elsevier.

Lutta, A., Kehbila, A., Mungo, C., Sunguti, E., Osano, P., & Kisang, O. 2024. Building climate-resilient value chains in arid and semi-arid regions: A VC-ARID approach for rangeland adaptation in Kenya. Environment, Development and Sustainability. 1-24.

Markanday, A., Galarraga, I., & Markandya, A. 2019. A critical review of cost-benefit analysis for climate change adaptation in cities. Climate Change Economics. 10(04): 1950014.

Modarres, R., Sarhadi, A., & Burn, D.H. 2016. Changes of extreme drought and flood events in Iran. Global and Planetary Change. 144: 67-81.

Mohammadnezhad, M., Rezaee, A., & Smilovic, M. 2026. Multi-timescale streamflow projections in human-regulated basins of southwest Iran using CWatM and explainable machine learning. Journal of Hydrology: Regional Studies. 66: 103534.

Rasul, G., & Sharma, B. 2016. The nexus approach to water–energy–food security: an option for adaptation to climate change. Climate policy. 16(6): 682-702.

Rezaee, A., Goodarzi, M.R., Alavizadeh, S.M., & Goldani, M. 2026. Machine learning insights into land surface temperature variability and prediction: a spatiotemporal approach with feature importance and uncertainty analysis. Environmental Monitoring and Assessment. 198(5): 480.

Rezaee, A., Goodarzi, M.R., Etemadfard, H., & Alavizadeh, M. 2025. A copula-based framework for assessing heat wave extremes and probability of occurrence in Iran: implications for climate change. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. 39(6): 2461-2477.

Rezaee, A., Mosaedi, A., Beheshti, A., & Zarrin, A. 2024. Using wavelet transform to analyze the dynamics of climatic variables; to assess the status of available water resources in Iran (1961–2020). Earth Science Informatics. 17(6): 5499-5519.

Rezaei, J. 2015. Best-worst multi-criteria decision-making method. Omega. 53: 49-57.

Simpson, G.B., & Jewitt, G.P. 2019. The development of the water-energy-food nexus as a framework for achieving resource security: a review. Frontiers in Environmental Science. 7: 8.

Soltani, S., Mosavi, S.H., Saghaian, S.H., Azhdari, S., Alamdarlo, H.N., & Khalilian, S. 2023. Climate change and energy use efficiency in arid and semiarid agricultural areas: A case study of Hamadan-Bahar plain in Iran. Energy. 268: 126553.

Taherdoost, H., & Madanchian, M. 2023. Multi-criteria decision making (MCDM) methods and concepts. Encyclopedia. 3(1): 77-87.

Warren, R., Price, J., & Jenkins, R. 2021. Climate change and terrestrial biodiversity. In: The impacts of climate change. pp. 85-114. Elsevier.

Xu, L., Zheng, C., & Ma, Y. 2021. Variations in precipitation extremes in the arid and semi-arid regions of China. International Journal of Climatology. 41(3): 1542-1554.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.2, Vol. 20, Jun.-Jul. 2026, p. 189-207

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۲، جلد ۲۰، خرداد - تیر ۱۴۰۵، ص. ۲۰۷-۱۸۹

Climate Change Risk Assessment Using the Best-Worst Method (BWM) and Multi-Dimensional Impact Analysis: A Case Study of Khorasan Province

M. Goldani[1], A. Ghezelsofloo [2], M. Mohammadi Aria*[3]
Recived: Sep.21, 2025 Accepted: Dec.19, 2025

Abstract

This study analyzes climate change risks in the arid and semi-arid regions of Khorasan Province, Iran. Initially, seven key climate risks were identified, including drought and water scarcity, flash floods, heatwaves, dust storms, desertification, soil and water salinity, and energy supply-demand imbalance. Next, using the Best-Worst Method (BWM) and the expert opinions of 28 specialists collected in the spring and summer of 2025, the weights and priorities of each risk were determined. Subsequently, the impacts of each risk were evaluated across six dimensions: economic, social, environmental, infrastructural, agriculture and livestock, and health. The weighting results indicated that drought and water scarcity hold the highest priority with a weight of 0.295, followed by energy imbalance with a weight of 0.166. Heatwaves and soil salinity also emerged as significantly important, indicating increasing threats. Composite score analysis across various dimensions demonstrated that drought and energy imbalance exert the greatest impact on regional vulnerability. Additionally, notable correlations among risks such as heatwaves and soil salinity underscore the necessity of integrated and multisectoral risk management approaches. Ultimately, findings suggest that adaptation policies should prioritize the optimal management of water and energy resources, enhancement of infrastructure resilience, and restoration of ecosystems, while also emphasizing the critical role of social participation and education to reduce vulnerability and enhance preparedness. This research provides a comprehensive and localized framework for decision-makers and introduces energy imbalance as a key risk, offering novel insights for sustainable energy policies.

Keywords: Best–Worst Method (BWM), Climate Change hazards, Drought and Water Scarcity, Energy Imbalance, Multidimensional Impact Assessment.

1- Master of Environmental Engineering, Astan Quds Razavi Consulting Engineers Company, Mashhad, Iran
2- Associate Professor at Department of Civil engineering, Islamic Azad university, Mashhad Branch, Iran
3- PhD, Department of Soil Science, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
(*- Corresponding Author Email: saraaria2000@gmail.com)