



Impact of Climate Changes on the Livestock and Poultry Industry in Iran: Provincial Risk Analysis of Heat and Aridity Stresses

Hadi Ramezani Etedali^{1*} and Sakine Koochi²

1) Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

2) PhD, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

*Corresponding author emails: ramezani@eng.ikiu.ac.ir

Abstract:

Background and Objectives: Climate changes, by intensifying heat stress and climatic aridity, pose significant challenges to the sustainability of the livestock and poultry industry in arid and semi-arid regions such as Iran. Dairy farms and poultry units, due to their dependence on water and feed resources and the high sensitivity of animals to elevated temperatures, are particularly vulnerable to these stresses. This study aims to assess the combined risk of heat stress and climatic aridity on dairy and poultry units across 31 provinces of Iran, utilizing the De Martonne Aridity Index (DMI) and the TOPSIS multi-criteria decision-making method, under CMIP6 climate scenarios, to provide valuable insights for policymaking and the development of adaptive strategies.

Methodology: The study utilized temperature and precipitation data from 31 synoptic stations for the baseline period (1997–2014) and downscaled outputs from the NEX-GDDP climate models (CNRM-CM6-1, CanESM5, GFDL-ESM4, HadGEM3-GC31-LL, MIROC6) under SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios for future periods (2025–2049, 2050–2074, 2075–2099). The De Martonne aridity index was calculated to assess climatic conditions, and the frequency of heat stress days was determined for dairy farms (temperatures above 26°C) and poultry farms (temperatures above 24°C). Provincial risk was ranked using the TOPSIS multi-criteria decision-making method, considering heat stress frequency, aridity index, and the number of production units. Model accuracy was evaluated using statistical metrics RMSE, MAE, MBE, and CC.

Findings: The results indicated that during the baseline period, southern provinces such as Khuzestan, Hormozgan, and Bushehr (with heat stress frequencies of 84.0%, 58.3%, and 51.9% in dairy farms, respectively) face high climatic risks, while northern provinces like Gilan and Ardabil experience the least stress. Poultry units, due to higher physiological sensitivity, face an average of 4.6 units higher heat stress compared to dairy farms. In future periods, particularly under the SSP5-8.5 scenario, the frequency of heat stress will significantly increase across most provinces, including northwestern mountainous regions. Poultry units exhibit greater sensitivity to climate change compared to dairy farms, with some provinces, such as Hormozgan, projected to experience heat stress exceeding 75% in the distant future. TOPSIS-based ranking revealed that Khuzestan, Bushehr, and Sistan and Baluchestan for dairy farms, and Isfahan, Yazd, and Khorasan Razavi for poultry units, consistently fall into high to critical risk categories across all periods.

Conclusions: This study demonstrates that climate change, particularly under the SSP5-8.5 scenario, significantly increases climatic risks in Iran's livestock and poultry industry, leading to reduced production, increased mortality, and decreased fertility in dairy and poultry units. The high concentration of production units in provinces like Khuzestan and Mazandaran, coupled with intensified heat stress and aridity, poses a serious threat to food security and economic sustainability in these sectors, highlighting the need for region-specific planning. It is recommended that adaptation strategies, such as developing heat-resistant breeds, improving cooling systems, and managing water resources, be prioritized by managers and policymakers. These findings can assist policymakers in formulating strategies to mitigate risks and enhance the resilience of the livestock and poultry industry.

Keywords: Heat stress, De Martonne index, livestock, poultry, TOPSIS



شاپا چاپی: ۷۴۸۰-۲۲۵۱
شاپا الکترونیکی: ۷۴۰۰-۲۲۵۰

نشریه حفاظت منابع آب و خاک

آدرس تارنما:

<https://wsrj.srbiau.ac.ir>

پست الکترونیک:

iauwsrj@srbiau.ac.ir
iauwsrj@gmail.com

سال پانزدهم

شماره ۲ (۵۸)

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۴/۱۰

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۶/۲۷

صفحات: ۵۵-۳۹

تأثیر تغییرات اقلیمی بر صنعت دام و طیور در ایران: تحلیل ریسک استانی تنش‌های گرمایی و خشکی

هادی رضانی اعتدالی^{۱*} و سکینه کوهی^۲

(۱) استاد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.
(۲) دکتری مهندسی منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.
* ایمیل نویسنده مسئول: ramezani@eng.ikiu.ac.ir

چکیده:

زمینه و هدف: تغییرات اقلیمی با تشدید تنش‌های گرمایی و خشکی، چالش‌های جدی برای پایداری صنعت دام و طیور در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران ایجاد نموده است. گاوداری‌ها و مرغداری‌ها به دلیل وابستگی به منابع آب و خوراک و حساسیت بالای حیوانات به دماهای بالا، در برابر این تنش‌ها به طور ویژه آسیب‌پذیر می‌باشند. این مطالعه با هدف ارزیابی ریسک هم‌زمان تنش‌های گرمایی و خشکی اقلیمی بر واحدهای گاوداری و مرغداری در ۳۱ استان ایران، با استفاده از شاخص خشکی دومارتن (DMI) و روش تصمیم‌گیری چندمعیاره TOPSIS، تحت سناریوهای اقلیمی CMIP6 انجام شده است تا اطلاعات ارزشمندی برای سیاست‌گذاری و توسعه راهکارهای تطبیقی فراهم آورد.

روش پژوهش: در این پژوهش، داده‌های دما و بارش از ۳۱ ایستگاه سینوپتیک در دوره پایه (۱۹۹۷-۲۰۱۴) و خروجی‌های ریزمقیاس‌شده مدل‌های اقلیمی (NEX-GDDP شامل: CanESM5، CNRM-CM6-1، HadGEM3، GFDL-ESM4) تحت سناریوهای اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 برای دوره‌های آینده (۲۰۲۵-۲۰۴۹، ۲۰۵۰-۲۰۷۴) مورد استفاده قرار گرفتند. شاخص خشکی دومارتن برای ارزیابی شرایط اقلیمی و فراوانی وقوع تنش گرمایی برای گاوداری‌ها (دمای بالای ۲۶ درجه سانتی‌گراد) و مرغداری‌ها (دمای بالای ۲۴ درجه سانتی‌گراد) محاسبه شد. سپس رتبه‌بندی ریسک استانی با روش TOPSIS و با در نظر گرفتن معیارهای فراوانی تنش گرمایی، شاخص خشکی و تعداد حیوانات در معرض خطر به انجام رسید. برای ارزیابی دقت مدل‌های اقلیمی، شاخص‌های آماری RMSE، MAE، MBE و CC استفاده شدند.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که در دوره پایه، استان‌های جنوبی مانند خوزستان، هرمزگان و بوشهر (به ترتیب با ۸۴/۰، ۸۸/۳ و ۵۱/۹ درصد فراوانی تنش گرمایی در گاوداری‌ها) در معرض ریسک بالای اقلیمی قرار دارند، در حالی که استان‌های شمالی مانند گیلان و اردبیل کمترین تنش را تجربه می‌کنند. همچنین مرغداری‌ها به دلیل حساسیت فیزیولوژیکی بالاتر، با میانگین ۴/۶ واحد تنش گرمایی بیشتر نسبت به گاوداری‌ها مواجه می‌باشند. در دوره‌های آینده، به‌ویژه تحت سناریوی SSP5-8.5، فراوانی تنش گرمایی در اکثر استان‌ها، حتی مناطق کوهستانی شمال غرب، افزایش چشمگیری خواهد داشت. براساس نتایج مرغداری‌ها نسبت به گاوداری‌ها حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات اقلیمی دارند، به‌طوری‌که در آینده دور، برخی استان‌ها مانند هرمزگان با تنش گرمایی بیش از ۷۵ درصد مواجه خواهند شد. رتبه‌بندی استان‌ها با استفاده از روش TOPSIS نشان داد که خوزستان، بوشهر و سیستان و بلوچستان در گاوداری‌ها و اصفهان، یزد و خراسان رضوی در مرغداری‌ها در تمام دوره‌ها در گروه‌های ریسک بالا و بحرانی قرار دارند.

نتایج: این مطالعه نشان داد که تغییرات اقلیمی، به‌ویژه تحت سناریوی SSP5-8.5، ریسک اقلیمی را در صنعت دام و طیور ایران به‌طور قابل‌توجهی افزایش خواهد داد؛ بنابراین، کاهش تولید، افزایش تلفات و افت باروری در گاوداری‌ها و مرغداری‌ها دور از انتظار نمی‌باشد. تمرکز بالای واحدهای تولیدی در برخی استان‌ها مانند خوزستان و مازندران، همراه با تشدید تنش‌های گرمایی و خشکی تهدیدی جدی برای امنیت غذایی و پایداری اقتصادی این بخش‌ها می‌باشد و ضرورت برنامه‌ریزی منطقه‌ای را در این زمینه برجسته می‌کند. پیشنهاد می‌شود که راهکارهای سازگاری مانند توسعه نژادهای مقاوم، بهبود سیستم‌های خنک‌کننده و مدیریت منابع آب در اولویت مدیران و برنامه‌ریزان قرار بگیرد. این یافته‌ها می‌توانند به سیاست‌گذاران در تدوین استراتژی‌های کاهش ریسک و تقویت تاب‌آوری صنعت دام و طیور کمک نماید.

کلید واژه‌ها: تنش گرمایی، شاخص دومارتن، دامداری، مرغداری، TOPSIS

مقدمه

تغییرات اقلیمی به عنوان یکی از جدی‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی قرن بیست و یکم، الگوهای آب‌وهوایی را در سراسر کره زمین دگرگون ساخته و پیامدهای عمیقی بر تمامی بخش‌های حیات، به ویژه امنیت غذایی و آب وارد می‌کند. گزارش ارزیابی ششم هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC AR6) با قطعیت بی‌سابقه‌ای تأیید می‌کند که فعالیت‌های انسانی، جو زمین را گرم کرده‌اند و این روند با شتابی نگران‌کننده ادامه دارد (IPCC, 2023). یکی از بارزترین مظاهر برای این تغییر، افزایش فراوانی، شدت و مدت رویدادهای حدی آب‌وهوایی، به ویژه موج‌های گرمایی و دوره‌های خشکی و خشکسالی می‌باشد. بخش کشاورزی و دامپروری، به‌عنوان یکی از حساس‌ترین بخش‌ها نسبت به نوسانات اقلیمی، در خط مقدم تأثیرپذیری از این پدیده قرار دارد. ایران با اقلیم خشک و نیمه‌خشک، وابستگی بالا به بخش کشاورزی و دامپروری و سهم چشمگیر این بخش‌ها در امنیت غذایی، به شدت در معرض تهدید ناشی از تغییرات اقلیمی قرار دارد. در این میان، واحدهای صنعتی پرورش دام، به‌ویژه گاوداری‌های شیری و مرغداری‌ها، به دلیل تراکم بالای جمعیت حیوانی، نیازهای فیزیولوژیکی خاص و وابستگی شدید به منابع آب و خوراک، آسیب‌پذیری قابل‌توجهی در برابر دو پدیده درهم‌تنیده شامل تنش گرمایی (Heat Stress) و خشکی اقلیمی (Climatic Aridity) از خود نشان می‌دهند. تنش گرمایی زمانی رخ می‌دهد که مجموع بار حرارتی محیط از توانایی حیوان برای دفع گرمای مازاد بدنش فراتر رود. گاوهای شیری به دلیل متابولیسم بالای مرتبط با تولید شیر و مرغ‌های گوشتی و تخم‌گذار به دلیل رشد سریع، تراکم بالای پر و ناتوانی در تعریق کافی، به‌طور ویژه‌ای نسبت به تنش گرمایی آسیب‌پذیر می‌باشند (Lara & Rostagno, 2013; West, 2003). به‌طوری‌که این پدیده می‌تواند باعث کاهش تولید شیر و گوشت، افزایش مرگ‌ومیر، کاهش باروری و افزایش حساسیت حیوانات نسبت به بیماری‌ها شود (Godde et al., 2021). از سوی دیگر، خشکی اقلیمی به‌عنوان دوره‌ای ممتد از کمبود بارش نسبت به شرایط نرمال که منجر به کمبود آب برای فعالیت‌های انسانی و محیط‌زیست می‌شود (Wilhite & Glantz, 1985)، تأثیرات خود را عمدتاً به‌صورت غیرمستقیم اما ویرانگر بر صنعت دام و طیور وارد می‌سازد. خشکی اقلیمی، که اغلب همراه با تنش گرمایی رخ می‌دهد، با کاهش کیفیت و کمیت مراتع، کمبود آب و افزایش خطر بیماری‌ها، سبب تشدید چالش‌های تولید می‌شود (Lpelc, 2019). علاوه‌براین، خشکی و خشکسالی سبب کاهش محصولات خوراکی مانند ذرت و سویا خواهد شد (IPCC, 2022) که این کاهش، مستقیماً بر

دسترسی به خوراک دام و طیور تأثیر گذاشته و هزینه‌های تولید را افزایش خواهد داد. در سطح ملی و منطقه‌ای، به‌ویژه در استان‌های مختلف ایران، آثار هم‌زمان گرما و خشکی اقلیمی می‌تواند امنیت غذایی و پایداری اقتصادی خانوارهای روستایی و صنعتی فعال در دامپروری و طیور را به خطر اندازد. از آنجا که این واحدها غالباً در مناطق گرم و خشک استقرار دارند، انتظار می‌رود شدت آسیب‌پذیری آنها در برابر امواج گرما و کمبود منابع آبی بیش از سایر بخش‌ها باشد. بنابراین، درک دقیق مواردی همچون آسیب‌پذیری واحدها در مقیاس‌های مختلف (ملی، منطقه‌ای، مزرعه‌ای)، برای توسعه و اجرای راهکارهای انطباقی (Adaptation) و تخفیفی (Mitigation) حیاتی می‌باشد.

مطالعاتی نیز در این زمینه بررسی تنش‌های گرمایی و خشکی وارد بر دامداری‌ها و مرغداری‌ها و تأثیرات این تنش‌ها به انجام رسیده است. به‌عنوان مثال، در تحقیقی که در نپال به انجام رسیده است، کاهش تعداد گاوها به افزایش روزهای گرم نسبت داده شده است (Ananta & Shrestha, 2017). در غرب آفریقا و چین، تولید شیر به دلیل وقوع دماهای بالای روزانه دچار رکود شده و پیش‌بینی شده است که تا پایان قرن، تولید شیر در مناطقی مانند ایالات متحده، بریتانیا و غرب آفریقا تا ۱۷ درصد کاهش یابد (IPCC, 2022). براساس مطالعات در صورت وقوع سناریوی گرمایش ۲ درجه سانتی‌گرادی در دما، تعداد دام‌ها تا سال ۲۰۵۰ بین ۷ تا ۱۰ درصد کاهش خواهد یافت که ضررهای اقتصادی در حدود ۱۰ تا ۱۳ میلیارد دلار در پی دارد (Reintjes, 2022). در واحدهای پرورش مرغ نیز تنش گرمایی می‌تواند منجر به کاهش مصرف خوراک، کاهش وزن، کاهش تولید تخم‌مرغ و کیفیت پایین‌تر گوشت و تخم‌مرغ شود (Nawaz et al., 2021). به‌طوری‌که در مطالعه‌ای نشان داده شده است کیفیت تخم‌مرغ تحت تنش گرمایی می‌تواند تا ۱۵/۸ درصد کاهش یابد (Song et al., 2013). علاوه‌بر این، مهاجرپور و همکاران (۱۳۹۷) با بررسی تأثیر تنش دما-رطوبت بر شیر تولیدی در یک گاوداری صنعتی در شهر مشهد نشان دادند که همبستگی معناداری بین شیر تولیدی روزانه و تغییرات دما-رطوبت وجود دارد. به‌طوری‌که افزایش درجه حرارت و رطوبت از آستانه‌ای مشخص در فصل تابستان از علل اصلی ایجاد تنش در تولید شیر می‌باشد. حاجاتی (۱۴۰۱) بیان نموده است که تنش گرمایی سبب کاهش مصرف خوراک، کاهش رشد، کیفیت پایین‌تر تخم مرغ، و ضریب تبدیل غذایی ضعیف‌تر در طیور می‌شود. همچنین سیدشیرینی و همکاران (۱۴۰۳) با بررسی تأثیر تنش گرمایی بر صفات تولید شیر، تولیدمثل در گاوهای شیری هلستاین ایران نشان دادند زمانی‌که شاخص دما-رطوبت از ۷۲ عبور نماید، صفات تولیدی و عملکردی در گاوها کاهش می‌یابد. علاوه‌بر این، اختلال در

تنش‌های گرمایی و خشکی اقلیمی بر واحدهای گاو‌داری و مرغداری با استفاده از ترکیب شاخص خشکی دومارتن (DMI: De Martonne) و روش تصمیم‌گیری چندمعیاره TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) می‌باشد. این رویکرد متمایز با شناسایی استان‌های پرریسک برای صنعت دامداری و طیور و گردآوری اطلاعات ارزشمندی را برای سیاست‌گذاری و توسعه راهکارهای تطبیقی فراهم می‌نماید، در نتیجه به کاهش آسیب‌پذیری این بخش نسبت به تغییرات اقلیمی کمک خواهد نمود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش، با تمرکز بر تحلیل تغییرات اقلیمی در گستره ایران، از داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک مراکز ۳۱ استان کشور به‌عنوان پایه اصلی مطالعه استفاده شده است. توزیع مکانی بهینه ایستگاه‌ها نشان‌دهنده پوشش حداکثری مناطق مختلف اقلیمی کشور است که شامل نواحی کوهستانی (مانند تبریز و همدان با ارتفاع بیش از ۱۵۰۰ متر)، معتدل خنثی (رشت و گرگان با میانگین بارش سالانه بیش از ۱۰۰۰ میلی‌متر)، خشک (یزد و کاشان با بارش کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر)، نیمه‌خشک (تهران و مشهد با بارش ۲۰۰-۳۰۰ میلی‌متر) و گرم و مرطوب (بندرعباس و چابهار با رطوبت نسبی بیش از ۶۰ درصد) می‌شود. داده‌های اقلیمی مورد استفاده شامل بارش و متوسط دما در گام زمانی روزانه طی دوره آماری ۱۸ ساله (۱۹۹۷ تا ۲۰۱۴) به عنوان داده‌های مشاهداتی (دوره پایه) می‌باشد. علاوه بر این، بررسی در دوره آینده برای سه دوره شامل آینده نزدیک (۲۰۲۵-۲۰۴۹)، آینده میانی (۲۰۷۴-۲۰۵۰) و آینده دور (۲۰۹۹-۲۰۷۵) به انجام رسیده است.

داده‌های اقلیمی

در این پژوهش از داده‌های بارش و دمای ۵ مدل گردش عمومی جو (GCM) از مجموعه اقلیمی NEX-GDDP تحت سناریوهای انتشار SSP2-4.5 (بیانگر شرایط حد وسط) و SSP5-8.5 (بیانگر مصرف بالای انرژی و سوخت فسیلی) استفاده شده است. مدل‌های GCM مورد استفاده عبارتند از: CNRM-CM6-1، CanESM5، GFDL-ESM4، MIROC6 و HadGEM3-GC31-LL. کدنویسی در سامانه گوگل ارث انجین (GEE: Google Earth Engine) دریافت شده است. این نکته لازم بذکر است که مجموعه اقلیمی NEX-GDDP به ارائه داده‌های ریزمقیاس شده اقلیمی شامل بارش، حداقل، حداکثر و متوسط دما، سرعت باد و رطوبت نسبی در مقیاس مکانی و زمانی ۰/۲۵ درجه و روزانه می‌پردازد. باتوجه به اهمیت ادغام خروجی مدل‌های

عملکردهای مختلف تولیدمثلی به دلیل تنش گرمایی می‌تواند منجر به نرخ کم لقاح در اولین تلقیح و در نتیجه افزایش فاصله زایش و روزهای باز به‌ویژه در طول فصل گرم شود.

تورنتون ۱ و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از شاخص دما-رطوبت و داده‌های مدل‌های اقلیمی CMIP6، تعداد روزهای تنش گرمایی شدید برای گونه‌های دام اهلی (گاو، گوسفند، بز، طیور، خوک) را در سطح جهانی برآورد کرده است. نتایج نشان می‌دهد که تا اواسط و پایان قرن، تعداد این روزها به‌ویژه در مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری افزایش چشم‌گیری خواهد داشت. کریمی و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهشی به بررسی تأثیرات احتمالی تغییرات اقلیمی بر کشاورزی ایران، از جمله دامداری و مرغداری، با استفاده از داده‌های اقلیمی و سناریوهای مختلف پرداختند. نتایج نشان داد که کاهش بارندگی و افزایش دما می‌تواند عملکرد محصولات کشاورزی و دسترسی به علوفه را کاهش دهد، که به‌طور غیرمستقیم بر تولید دام و طیور تأثیر می‌گذارد. نتایج نشان داد که تغییرات اقلیمی با تشدید خشکسالی و تنش گرمایی، چالش‌های جدی برای پایداری دامداری ایجاد می‌کند. تورنتون و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای با استفاده از مدل‌های اقلیمی CMIP6، تأثیرات تنش گرمایی بر تولید گاو را در سطح جهانی تا سال‌های ۲۰۴۵ و ۲۰۸۵ تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 بررسی کردند. نتایج نشان داد که در سناریوی انتشار بالای گازهای گلخانه‌ای (SSP5-8.5)، حدود ۴۸ درصد از جمعیت گاوهای جهان تا سال ۲۱۰۰ در معرض شرایط گرمایی خطرناک قرار خواهند گرفت، که می‌تواند زیان‌های اقتصادی در حدود ۳۹/۹۴ میلیارد دلار در سال ایجاد نماید. آتیا و همکاران (۲۰۲۴) تأثیرات تغییرات اقلیمی بر صنعت مرغداری را در سطح جهانی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که تنش گرمایی می‌تواند مصرف خوراک را تا ۲۸/۵۸ گرم، تولید تخم‌مرغ را تا ۲۸/۸۰ درصد، وزن تخم‌مرغ را تا ۳/۲۴ درصد و ضخامت پوسته تخم‌مرغ را تا ۲ درصد کاهش دهد. همچنین، نیاز آبی مرغ‌ها در شرایط تنش گرمایی تا سه برابر افزایش می‌یابد.

بررسی مطالعات گذشته حاکی از آن است که تغییرات اقلیمی یکی از مهم‌ترین موانع برای پایداری در صنعت دام و طیور می‌باشد. بنابراین، درک چگونگی تأثیر تغییرات آب و هوایی بر این بخش‌ها نه تنها یک ضرورت اقتصادی، بلکه یک الزام برای امنیت غذایی و پایداری منابع آب و خاک، به‌ویژه در کشورهای واقع در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، محسوب می‌شود. با این حال در بسیاری از مطالعات داخلی به جنبه‌های کلی از تغییرات اقلیمی پرداخته شده و کمتر به‌طور خاص به ارزیابی هم‌زمان تنش‌های گرمایی و خشکی اقلیمی وارد بر گاو‌داری‌ها و مرغداری‌ها در ایران توجه شده است. بنابراین، نوآوری پژوهش حاضر، تحلیل ریسک هم‌زمان

شناسایی وقوع تنش‌های گرمایی وارد بر دامداری‌ها یا مرغداری‌ها استفاده شده است.

شاخص خشکی مورد استفاده نیز شاخص دومارتن (DMI) است. شاخص DMI که توسط جغرافی‌دان فرانسوی امانوئل دومارتن در سال ۱۹۲۶ توسعه یافت (De Martonne, 1926)، به‌عنوان یکی از معیارهای کلاسیک و پرکاربرد در ارزیابی شدت خشکی اقلیمی با تأکید بر تعادل آب-گرما شناخته می‌شود. فرمول محاسباتی این شاخص به صورت $DMI = P / (T + 10)$ (تعریف می‌گردد که در آن P بارش سالانه (میلی‌متر) و T دمای متوسط سالانه (درجه سانتی‌گراد) است. طبقه‌بندی اقلیمی بر اساس DMI شامل ۷ گروه اصلی می‌شود (Rezaei et al., 2013): مقادیر کمتر از ۵ نشان‌دهنده اقلیم خیلی خشک، ۵ تا ۱۰ خشک، ۱۰-۲۰ نیمه‌خشک، ۲۰-۲۴ مدیترانه‌ای، ۲۴-۲۸ نیمه‌مرطوب، ۲۸-۳۵ مرطوب، و بیش از ۳۵ خیلی مرطوب تلقی می‌گردد. در این پژوهش، محاسبه DMI برای تمامی ایستگاه‌های سینوپتیک مراکز استان‌ها هم در دوره پایه (۱۹۹۷-۲۰۱۴) و هم در دوره‌های آینده (تحت سناریوهای اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5-8.5) انجام گرفته است. انتخاب این شاخص به دلایل متعددی صورت پذیرفته است: نخست، سادگی محاسباتی و نیاز نداشتن به داده‌های پیچیده (فقط بارش و دمای متوسط)؛ دوم، کارایی مناسب در شناسایی اقلیم‌های خشک تا خیلی مرطوب که منجر به کاربرده گسترده آن در تحقیقات مختلف در سراسر جهان شده است.

رتبه‌بندی ریسک اقلیمی استان‌ها با روش TOPSIS

در این مطالعه برای ارزیابی تنش گرمایی و خشکی و اولویت‌بندی ریسک استان‌های مختلف با توجه به مولفه‌های فراوانی وقوع تنش گرمایی، تنش خشکی و تعداد حیوانات موجود در هر استان از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره TOPSIS استفاده شده است. روش TOPSIS به دلیل سهولت محاسباتی، قابلیت استفاده همزمان از معیارهای کمی با مقیاس‌های متفاوت، و توانایی در مقایسه مستقیم گزینه‌ها با حالت ایده‌آل و ضدایده‌آل انتخاب شده است. این روش در مطالعات مدیریت ریسک اقلیمی و اولویت‌بندی مناطق مبتنی بر چند شاخص مورد استفاده گسترده قرار گرفته است (Hwang & Yoon, 2003; Kahraman et al., 1981). TOPSIS برخلاف سایر روش‌ها، نیازمند ارزیابی پیچیده وزن‌های نسبی توسط خبرگان نیست و امکان پردازش هم‌زمان چندین شاخص با واحدهای متفاوت را فراهم می‌نماید. لازم به‌ذکر است که رتبه‌بندی استان‌ها برای دوره پایه و آینده و تحت تأثیر سناریوهای اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 انجام شده است. روش TOPSIS یکی از روش‌های پرکاربرد در تصمیم‌گیری چندمعیاره است که

اقلیمی در کاهش عدم قطعیت نتایج (Mirakbari et al., 2018; Mohan & Bhaskaran, 2019; Ramezani Etedali et al., 2023)، در این پژوهش نیز ضرایب هر یک از ۵ مدل اقلیمی توسط الگوریتم بهینه‌سازی Evolutionary توسط تابع بهینه‌سازی Solver به انجام رسیده است. کمینه نمودن شاخص خطای RMSE بین خروجی اقلیمی حاصل از ادغام ۵ مدل و مقادیر مشاهداتی در دوره پایه به تفکیک برای بارش و دما، تابع هدف مورد استفاده برای بهینه‌سازی ضرایب مدل‌ها می‌باشد. سپس ضرایب بهینه تعیین‌شده در دوره پایه بدون تغییر به دوره‌های آینده (نزدیک، میانی و دور) تعمیم داده شده‌اند تا سازگاری زمانی در تحلیل روندها حفظ شود، به عبارتی ادغام وزنی خروجی مدل‌ها برای سال‌های ۲۰۲۵ تا ۲۰۹۹ بر مبنای کارایی همان مدل‌ها در بازه ۱۹۹۷-۲۰۱۴ انجام پذیرفته است که این امر از انتقال خطای سیستماتیک به سناریوهای آتی جلوگیری می‌کند.

تنش گرمایی و خشکی

همانطور که پیش‌تر نیز عنوان شد، تنش یا استرس گرمایی زمانی رخ می‌دهد که دمای محیط از منطقه آسایش حرارتی حیوان بالاتر رود بنابراین، حیوان نمی‌تواند گرمای درونی خود را دفع نماید (Armstrong, 1994). هنگامی که دمای هوا پایین است گاو گرمای بیشتری به محیط منتشر می‌کند در نتیجه حیوان تولید گرما را افزایش داده و برای جبران کاهش انرژی بدن غذای بیشتری مصرف خواهد نمود. دمای محیطی که در آن گاو‌ها راحت بوده و بیشترین تولید را خواهند داشت در محدوده ۵ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است و زمانی که دمای محیط از ۲۶ درجه سانتی‌گراد تجاوز نماید، تولید شیر کاهش خواهد یافت که ناشی از کاهش ماده خشک مصرفی توسط حیوان می‌باشد (Jurado et al., 1994). در گاوهای شیری، افزایش دمای محیطی بالاتر از ۲۵ درجه سانتی‌گراد باعث افزایش دمای بدن، افزایش نرخ تنفس و کاهش مصرف خوراک می‌شود، زیرا حیوان برای حفظ تعادل حرارتی، انرژی بیشتری صرف خنک‌سازی می‌کند (West, 2003; Bernabucci et al., 2010). در میان طیور و بویژه جوجه‌های گوشتی یا تخم‌گذار زمانی که دمای محیط از محدوده ۱۸ تا ۲۴ درجه سانتی‌گراد بالاتر رود، مصرف خوراک و هضم مواد غذایی توسط حیوان کاهش خواهد یافت (Farzbood, 2021; Freeman & Crapo, 1982). در طیور، محدودیت فیزیولوژیکی در دفع گرما از طریق تنفس منجر به افزایش تلفات و افت راندمان خوراک در دماهای بالاتر از ۲۴ درجه سانتی‌گراد می‌شود، در نتیجه بهره‌وری تولید تخم و گوشت کاهش خواهد یافت (Yahav, 2000; Lin et al., 2006). در این پژوهش از محدوده‌های دمایی فوق به‌عنوان مبنایی برای

که در آن، r_{ij} هر یک از اعضای ماتریس تصمیم X پس از نرمال‌سازی، v_{ij} هر یک از اعضای ماتریس تصمیم R پس از وزن‌دهی به شاخص‌ها، A^+ : حالت ایده‌آل از مقدار شاخص‌ها، A^- : حالت غیرایده‌آل از مقدار شاخص‌ها، مقادیر j نشان‌دهنده شاخص‌های مورد استفاده می‌باشد (۱) برای فراوانی تنش گرمایی، ۲ برای شاخص خشکی دومارتن، ۳ برای رأس گاو در دامداری‌ها / قطعه مرغ برای مرغداری‌ها، D^+ : فاصله اقلیدسی از حالت ایده‌آل، D^- : فاصله اقلیدسی از حالت غیرایده‌آل، C_i : شاخص نزدیکی نسبی.

شاخص‌های ارزیابی

در راستای ارزیابی دقت و قابلیت اطمینان خروجی‌های مدل‌های اقلیمی و داده‌های ادغام‌شده نسبت به مشاهدات دوره پایه (۱۹۹۷-۲۰۱۴)، از چهار شاخص آماری کلیدی بهره گرفته شده است که هر یک ابعاد متفاوتی از خطا و انطباق را پوشش می‌دهند. میانگین خطای مطلق (MAE: Mean Absolute Error) به‌عنوان معیاری پایه برای سنجش میانگین قدر مطلق اختلاف‌ها بین مقادیر مدلسازی و مشاهداتی محاسبه می‌گردد و به‌دلیل عدم حساسیت به جهت خطا، تخمینی پایدار از دقت کلی مدل را ارائه می‌دهد؛ این شاخص به‌ویژه برای پارامترهای با توزیع نرمال (مانند دما) مناسب است، چرا که با واحد اصلی متغیر هم‌مقیاس بوده و تفسیر آن مستقیم است. در مقابل، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE: Root Mean Square Error) با اعمال عملیات مربع‌سازی بر تفاضل‌ها، وزن بیشتری به خطاهای بزرگ داده و برای شناسایی ناکارآمدی مدل در شبیه‌سازی رویدادهای حدی (نظیر بارش‌های سنگین یا امواج گرمایی) کاربرد کلیدی خواهد داشت؛ میانگین اریبی (MBE: Mean Bias Error) که جهت‌دار بودن خطاها را آشکار می‌سازد، به‌طوری که مقادیر مثبت نشان‌دهنده تمایل مدل به بیش‌برآوردی و مقادیر منفی حاکی از کم‌برآوردی است؛ در نهایت، ضریب همبستگی (CC: Correlation Coefficient) قدرت رابطه خطی بین تغییرات زمانی/مکانی داده‌های مدل و مشاهدات را در دامنه‌ای از ۱+ (همبستگی کامل مثبت) تا ۱- (همبستگی کامل منفی) کمی‌سازی می‌نماید. محاسبات به تفکیک برای هر ایستگاه، هر متغیر (بارش، دمای هوا، شاخص خشکی دومارتن) انجام شده است. نحوه محاسبه هر یک از شاخص‌های فوق در جدول ۱ ارائه شده است.

برای رتبه‌بندی گزینه‌ها بر اساس چندین معیار مناسب می‌باشد. در این روش، که ابتدا توسط هوانگ و یون (۱۹۸۱) توسعه یافت (Hwang & Yoon, 1981)، گزینه‌ها بر اساس فاصله از یک حالت ایده‌آل (بهترین حالت) و یک حالت غیرایده‌آل (بدترین حالت) رتبه‌بندی می‌شود. مراحل اجرای روش به شرح زیر است:

۱- تشکیل ماتریس تصمیم به‌طوری که در ابتدا ماتریس تصمیم X براساس مقادیر خام شاخص‌ها با ابعاد $j \times i$ ($j=31$ و $j=3$) تهیه شد. ۳- به‌منظور حذف تأثیر مقیاس‌های متفاوت، نرمال‌سازی برداری ماتریس تصمیم با استفاده از رابطه ۱ انجام شده است. ۳- در این پژوهش، با هدف جلوگیری از تحمیل قضاوت ذهنی، و به دلیل اهمیت تقریباً یکسان سه شاخص (فراوانی تنش گرمایی، شاخص خشکی دومارتن و جمعیت دامی/طیور)، برای هر سه شاخص وزن برابر ($w=0.33$) در نظر گرفته شده است. این روش در مطالعات مشابه با هدف کاهش سوگیری وزنی و حفظ شفافیت تحلیلی استفاده شده است (Behzadian et al., 2012). ۴- تعیین حالت ایده‌آل (A^+) و غیرایده‌آل (A^-). در این تحقیق، برای فراوانی وقوع تنش گرمایی و همچنین تعداد حیوانات در معرض تنش‌ها مقدار حداقل و برای شاخص خشکی دومارتن مقدار حداکثر از ماتریس V به عنوان حالت ایده‌آل و مقادیر حداکثر از فراوانی وقوع تنش گرمایی و تعداد حیوانات همچنین مقدار حداقل از شاخص خشکی دومارتن از ماتریس V به عنوان حالت غیرایده‌آل در نظر گرفته شده است. ۵- در گام بعد، فاصله اقلیدسی هر عضو از ماتریس وزن‌دهی شده از حالت ایده‌آل و غیرایده‌آل محاسبه شده است. ۶- درنهایت، محاسبه شاخص نزدیکی نسبی و الویت‌بندی استان‌ها براساس مقدار شاخص نزدیکی نسبی، بدین‌ترتیب که استان‌های با مقادیر بالاتر شاخص C_i دارای شرایط مساعدتر در برابر تنش‌های اقلیمی در نظر گرفته می‌شوند.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{31} x_{ij}^2}} \quad (1)$$

$$v_{ij} = r_{ij} \times w \quad (2)$$

$$A^+ = (v_1^+, v_2^+, v_3^+) = (\min v_{i1}, \max v_{i2}, \min v_{i3}) \quad (3)$$

$$A^- = (v_1^-, v_2^-, v_3^-) = (\max v_{i1}, \min v_{i2}, \max v_{i3})$$

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^3 (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad (4)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^3 (v_{ij} - v_j^-)^2}$$

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^- + D_i^+} \quad (5)$$

چالش مدل‌های اقلیمی در مناطق با پیچیدگی توپوگرافی و سامانه‌های بارشی ویژه است. درمقابل، میانگین شاخص MAE پایین‌تر (۲۰۳ درجه سانتی‌گراد) و دامنه محدودتر (۰.۸ تا ۱۴.۴ درجه سانتی‌گراد) حاکی از عملکرد بهتر خروجی اقلیمی در تخمین دما می‌باشد. براساس نتایج تنها در ۶/۰ درصد از ایستگاه‌ها مقدار متوسط قدر مطلق خطای حاصل از ادغام مدل‌های اقلیمی بیش از ۸/۰ درجه سانتی‌گراد برآورد شده است. همچنین نتایج حاکی از آن است که متوسط قدرمطلق خطای خروجی مدل‌های اقلیمی در برآورد شاخص خشکی دومارتن معادل ۱۲/۵ و محدوده تغییرات شاخص MAE، ۱/۹ تا ۳۷/۴ برآورد شده است و در حدود ۱۶/۰ درصد از ایستگاه‌ها مقدار قدرمطلق خطا از ۲۰/۰ احد عبور می‌کند. براساس نتایج، مقدار خطای مدل‌های اقلیمی در ایستگاه‌های واقع در حاشیه دریای خزر و جنوب‌غرب کشور بیشتر می‌باشد.

بررسی تغییرات شاخص RMSE که حاکی از چگونگی عملکرد مدل در شبیه‌سازی رویدادهای حدی است نشان داد که خروجی مدل‌های اقلیمی علی‌رغم مقدار خطای بیشتر در شبیه‌سازی بارش‌های حداکثری، عملکردی قابل‌قبول در شناسایی وقایع حدی دما و شاخص خشکی دارد. به‌طوری‌که مقدار بیشینه شاخص خطای RMSE در شبیه‌سازی بارش در سطح ایستگاه‌های مورد مطالعه ۲۵/۷ میلی‌متر است، درحالی‌که مقدار بیشینه این شاخص در سطح ایستگاه‌ها برای تخمین متوسط دما و شاخص خشکی دومارتن به‌ترتیب به ۳/۲ درجه سانتی‌گراد و ۱۱/۹ محدود شده است. این نتایج با مطالعات قبلی در ایران و منطقه همخوانی دارد؛ به‌عنوان نمونه میراکبری و همکاران (۲۰۱۸) و موهان و بسکاران (۲۰۱۹) نشان داده‌اند که RMSE مدل‌های اقلیمی برای شبیه‌سازی بارش در ایران بین ۲۰ تا ۷۰ میلی‌متر متغیر است. بیشینه RMSE=94.7 میلی‌متر در شمال کشور (ایستگاه سینوپتیک گیلان) به‌وضوح ضعف مدل‌های اقلیمی را در شبیه‌سازی بارش‌های سنگین آشکار می‌سازد. در شاخص خشکی، اختلاف فاحش میانگین RMSE (۲۶.۶) با MAE (۱۲.۵) و مقدار

جدول ۱. شاخص‌های ارزیابی مورد استفاده در این پژوهش

شاخص آماری	معادله	مقدار بهینه
RMS E	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2}$	صفر
MAE	$\frac{\sum_{i=1}^N O_i - S_i }{N}$	صفر
MBE	$\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - S_i)}{N}$	صفر
CC	$CC = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})^2}}$	۱

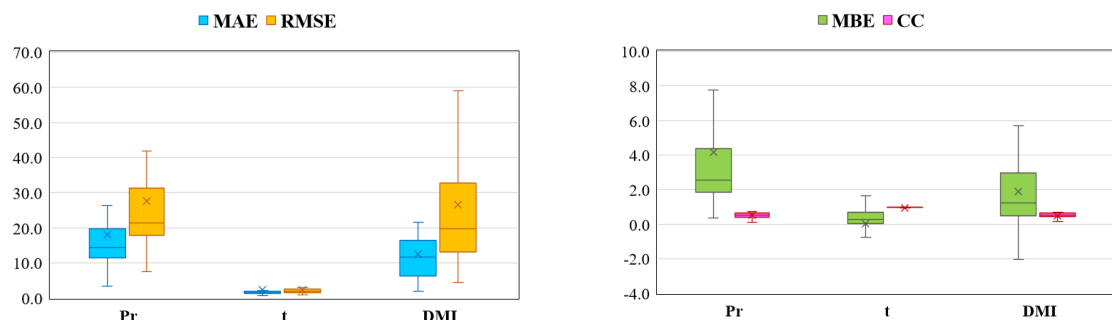
که در آن، S_i : مقادیر داده‌های اقلیمی، $\bar{S}$: متوسط داده‌های اقلیمی،

O_i : مقادیر مشاهداتی، $\bar{O}$: متوسط مقادیر مشاهداتی، N : تعداد داده‌ها.

نتایج و بحث

ارزیابی عملکرد خروجی مدل اقلیمی در دوره پایه

در ابتدا به ارزیابی کارایی خروجی حاصل از ادغام مدل‌های اقلیمی در تخمین بارش و دما و همچنین مقادیر شاخص خشکی دومارتن پرداخته شده است. همانطور که پیش‌تر نیز عنوان شد، در این مطالعه خروجی ۵ مدل اقلیمی بعد از بهینه‌سازی ضریب هر مدل در دوره پایه و مبتنی بر کمترین مقدار خطای RMSE نسبت به مقادیر مشاهداتی (به عنوان تابع هدف)، با یکدیگر ادغام شده است. بنابراین در شکل ۱ نمودار جعبه‌ای مربوط به مقدار شاخص‌های ارزیابی بین مقادیر بارش، دما و شاخص دومارتن به‌دست آمده از ادغام ۵ مدل اقلیمی در سطح ایستگاه‌های مورد مطالعه ارائه شده است. باتوجه به نتایج مقدار متوسط شاخص MAE در شبیه‌سازی بارش در حدود ۱۸/۰ میلی‌متر با دامنه تغییراتی معادل ۳/۵ تا ۷۰ میلی‌متر نشان‌دهنده نوسانات قابل‌توجه خروجی اقلیمی در سطح ایستگاه‌های مورد مطالعه می‌باشد، به‌طوری‌که در ۱۹/۰ درصد از ایستگاه‌های مورد مطالعه (عمدتاً در حاشیه دریای خزر و جنوب‌غرب) این شاخص از ۲۰ میلی‌متر فراتر رفته که بیانگر



شکل ۱. نمودار جعبه‌ای تغییرات شاخص‌های آماری در شبیه‌سازی بارش،

دما و شاخص خشکی مربوط به خروجی اقلیمی در دوره پایه در سطح ایستگاه‌های مورد مطالعه

تأثیر تغییرات اقلیمی بر صنایع دام و طیور

در این بخش از پژوهش، برای بررسی تأثیر میزان مواجهه گاو‌داری‌ها و مرغ‌داری‌ها با تنش گرمایی و خشکی اقلیمی، به بررسی پراکندگی تعداد گاو‌داری‌ها و مرغ‌داری‌ها در استان‌های مختلف کشور پرداخته شده است. لازم به ذکر است که تعداد این صنایع براساس جدیدترین اطلاعات مندرج در سالنامه آماری کشور منتشره در سال ۱۴۰۲ می‌باشد که توسط سازمان آمار در دسترس قرار دارد (<https://amar.org.ir/statistical-information>). در شکل ۲ تعداد واحدهای پرورش‌دهنده گاو و مرغ به تفکیک استان‌های مختلف ارائه شده است. با توجه به شکل ۲ مشخص است که الگوی توزیع جغرافیایی واحدهای پرورش گاو و مرغ در سطح استان‌های کشور از ناهمگونی قابل‌توجهی حکایت دارد. به‌طوری‌که در بخش گاو‌داری، استان‌های واقع در نوار شمالی و شمال‌غربی به‌وضوح قطب‌های اصلی را تشکیل می‌دهند. استان گیلان، آذربایجان غربی و آذربایجان شرقی به‌ترتیب رتبه‌های نخست تا سوم را در اختیار دارند و پس از آن‌ها خوزستان، مازندران، کردستان، گلستان و اردبیل را می‌توان از دیگر قطب‌های پرورش گاو دانست چنانکه تعداد گاو‌داری‌ها در این استان‌ها بیش از ۲۰۰۰۰ مورد گزارش شده است. این تمرکز فضایی به‌وضوح نشان‌دهنده تأثیرپذیری از شرایط اکولوژیک مساعد (اقلیم مرطوب، دسترسی به مراتع غنی و منابع آبی کافی) و زیرساخت‌های تاریخی توسعه دامداری در این مناطق می‌باشد. در مقابل، استان‌های مرکزی و جنوبی همچون تهران، قم، بوشهر، البرز، یزد، سمنان و ... با دارا بودن کمترین تعداد واحدها در رتبه سوم به‌وضوح تحت تأثیر محدودیت‌های اقلیمی و فشار فزاینده توسعه شهری بر اراضی کشاورزی قرار دارند. پس از استان‌های فوق، کرمان، لرستان، خراسان رضوی، کرمانشاه، اصفهان، زنجان، سیستان و بلوچستان، همدان، فارس و مرکزی با ۱۰۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ گاو‌داری در سطح استان در رتبه دوم قرار دارند. نکته قابل‌توجه حضور استان‌هایی مانند اصفهان (۱۶،۴۹۸ واحد) و خوزستان (۳۷،۳۳۷ واحد) به‌ترتیب در رده میانی و اول است که علی‌رغم قرارگیری در مناطق نیمه‌خشک، به‌لطف دسترسی به نهادهای کشاورزی و سیستم‌های آبیاری مدرن توانسته‌اند سهم قابل‌توجهی در صنعت گاو‌داری کشور ایفا نمایند.

بررسی تعداد واحدهای پرورش‌دهنده مرغ در استان‌های مختلف حاکی از آن است که در بخش مرغ‌داری‌ها، الگوی توزیع متفاوتی مشاهده می‌شود. استان مازندران با ۱،۹۱۶ واحد فعال به‌عنوان قطب بی‌رقابت صنعت طیور کشور ظاهر می‌شود که این امر مرهون زنجیره تأمین کامل نهاده‌ها، دسترسی به بازارهای مصرف کلان و سابقه طولانی در پرورش طیور است. پس از مازندران، استان‌های خراسان رضوی و اصفهان بیش از

بیشینه ۹۰،۴ واحد، نشانگر آن است که خطاهای بزرگ ناشی از هم‌افزایی خطاهای بارش و دما، به‌ویژه در شرایط خشکسالی شدید، چالشی اساسی در شبیه‌سازی این شاخص در حدود ۱۶ درصد از ایستگاه‌های مورد مطالعه (RMSE بیش از ۵۰/۰) محسوب می‌شود. این اتفاق ناشی از آن است که شاخص‌های ترکیبی حساس به خطاهای هم‌زمان در بارش و دما می‌باشند، بنابراین مدل‌ها خطای تجمعی بیشتری در محاسبه شاخص‌های خشکی خواهند داشت.

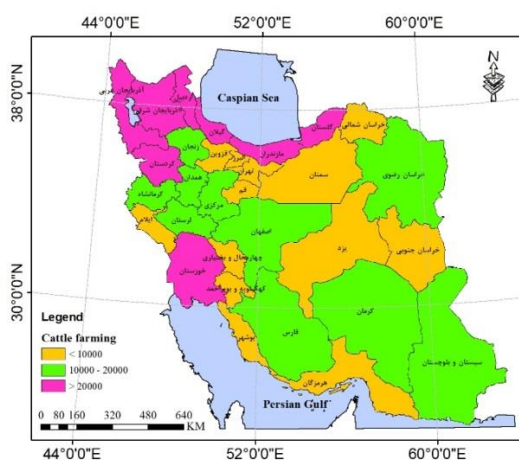
بررسی الگوی خطای سیستماتیک براساس شاخص آماری MBE نشان می‌دهد که خروجی اقلیمی به‌طور میانگین تمایل به بیش‌برآوردی در تخمین بارش دارد ($MBE=4.2$ mm) علاوه‌براین، در ۶۸ درصد از ایستگاه‌ها مقدار این شاخص آماری مثبت و در ایستگاه بوشهر به بیشترین مقدار می‌رسد ($MBE=25.7$ mm). در تخمین دما، میانگین MBE نزدیک به صفر (۰،۰۴ درجه سانتی‌گراد) بیانگر عدم سوگیری سیستماتیک کلی خروجی اقلیمی است. در تخمین شاخص خشکی، مقدار متوسط شاخص آریبی در سطح ایستگاه‌های مورد مطالعه ۱/۹ برآورد شده که قابل‌قبول ارزیابی می‌شود. تغییرات شاخص همبستگی برای دما حاکی از توانایی بالای مدل‌ها در بازتولید تغییرپذیری زمانی این متغیر است. در مقابل، همبستگی متوسط مقادیر بارش و شاخص خشکی به‌دست آمده از ادغام مدل‌های اقلیمی نسبت به مقادیر مشاهداتی بیانگر آن است که خروجی اقلیمی مدل‌ها در شبیه‌سازی الگوهای زمانی این متغیرها با چالش مواجه بوده است. به‌طورکلی می‌توان چنین عنوان نمود که علی‌رغم وجود برخی از خطاها بویژه در شبیه‌سازی بارش در تعدادی از ایستگاه‌های مورد مطالعه، ولی خروجی حاصل از ادغام مدل‌های اقلیمی می‌تواند در ایجاد درک مناسبی از روند تغییرات متغیرهای اقلیمی مفید واقع شود. در همین راستا، ارزیابی‌های منطقه‌ای CMIP6 در ایران و منطقه نیز حاکی از آن است که مدل‌ها معمولاً در بازتولید دما از مهارت بالاتری نسبت به بارش برخوردارند و در نواحی با توپوگرافی پیچیده (ساحل خزر، زاگرس، البرز) و برای بارش‌های سنگین دچار خطا و عدم‌پیوستگی زمانی می‌باشند (Azad et al., 2024). این اتفاق ناشی از اثرات پیچیده جریان‌های جوی محلی و دشواری پارامترسازی فرآیند جوی تأثیرگذار بر بارش می‌باشد، درحالی‌که برای دما، سیگنال گرمایشی جهانی قوی‌تر و کمی‌تر است. علاوه‌بر این، در دما روندها بلندمدت و نوسانات کوتاه‌مدت کمتر می‌باشد، درنتیجه مدل‌ها با دقت بهتری به بازتولید تغییرات دما می‌پردازند.

موجود تمرکز کرد، حال آنکه در مناطق مرکزی و جنوبی، توسعه نژادهای سازگار با اقلیم‌های گرم و ایجاد زنجیره‌های تأمین منطقه‌ای باید در اولویت قرار گیرد. همچنین، شکاف معنادار بین استان‌های پیشرو (مازندران در مرغداری و گیلان در گاوداری) با سایر مناطق، ضرورت توسعه مراکز دانش‌بنیان دامپروری و انتقال فناوری‌های نوین به استان‌های محروم‌تر را پررنگ می‌نماید.

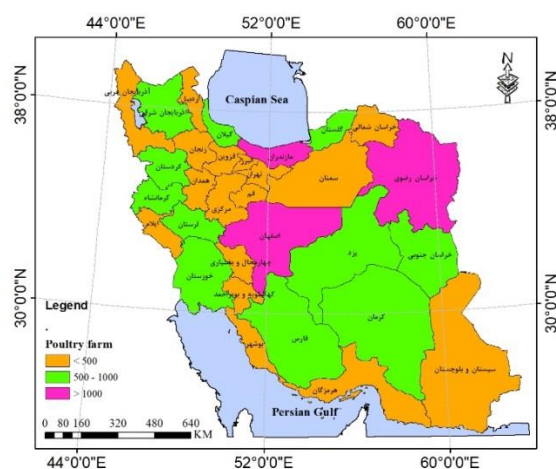
پس از ادغام خروجی مدل‌های اقلیمی در دوره پایه، مقادیر دما و بارش نیز مبتنی بر ضرایب هر مدل در دوره پایه، برای دوره‌های آینده نزدیک، میانی و دور محاسبه شده است. پس از تخمین دما برای دوره آینده، فراوانی وقوع تنش گرمایی وارد بر واحدهای گاوداری و مرغداری با توجه به محدوده ارائه شده توسط جوردادو ۵ و همکاران (1994) و فریمین ۶ و کرایو ۷ (1982) تحت سناریوهای اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 استخراج شد. در شکل ۳ فراوانی وقوع تنش‌های گرمایی وارد بر گاوداری‌ها و مرغداری‌ها تحت تأثیر سناریوهای اقلیمی به تفکیک هر استان ارائه شده است. با توجه به نتایج مشخص است که در دوره پایه، توزیع مکانی تنش گرمایی گاوداری‌ها از الگوی قطب‌های گرمایی مشخصی تبعیت می‌کند، چنانکه گاوداری‌های واقع در استان‌های جنوبی و مرکزی شامل خوزستان، هرمزگان، بوشهر و سیستان و بلوچستان به‌عنوان کانون‌های بحرانی از نظر وقوع تنش گرمایی شناسایی می‌شوند که حاکی از تأثیرپذیری شدید از اقلیم نیمه‌خشک و موقعیت جغرافیایی کم‌ارتفاع استان‌های مذکور است. در مقابل، گاوداری‌های واقع در استان‌های شمال غرب و مرتفع‌تر مانند آذربایجان غربی، اردبیل، زنجان، چهارمحال و بختیاری و همدان با فراوانی وقوع کمتر از ۱۰ درصد با حداقل تنش گرمایی مواجهند که مرهون شرایط ارتفاعی و اقلیم معتدل کوهستانی در این استان‌ها می‌باشد. بررسی تغییر در فراوانی وقوع تنش

۱۰۰۰ مرغداری از دیگر استان‌های پیشرو در زمینه فعالیت پرورش مرغ و مرغداری می‌باشند که نشان‌دهنده استقرار صنعت مرغداری در حوزه‌های با تراکم جمعیتی بالا و مراکز اصلی تولید غلات است. پس از استان‌های مذکور، استان‌های آذربایجان شرقی، گیلان، گلستان، کردستان، کرمانشاه، لرستان، خوزستان، فارس، یزد، کرمان، خراسان جنوبی با ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ مرغداری در سطح استان، در رتبه دوم فعالیت در زمینه پرورش مرغ قرار دارند. در مقابل، ۱۷ استان از ۳۱ استان (حدود ۵۴/۸ درصد) با کمتر از ۵۰۰ واحد پرورش‌دهنده مرغ در رتبه سوم قرار گرفته‌اند که عمدتاً یا تحت تأثیر محدودیت‌های اقلیمی برای تأمین نهاده‌های دان هستند یا از ضعف زنجیره تأمین رنج می‌برند. استثنای قابل‌توجه، استان‌های جنوبی مانند هرمزگان (۳۴۳ واحد) و بوشهر (۱۸۲ واحد) است که علی‌رغم قرارگیری در مناطق گرمسیری، به واسطه دسترسی به بنادر و تسهیلات صادراتی توانسته‌اند سهمی در این صنعت کسب نمایند.

نتایج حاکی از آن است که تنها ۸ استان (۲۵/۸ درصد) شامل مازندران، آذربایجان شرقی، اصفهان، خراسان رضوی، خوزستان، کردستان، گلستان و گیلان در هر دو بخش گاوداری و مرغداری رتبه بالاتر از متوسط را دارا هستند که نشان‌دهنده تمرکز فضایی فعالیت‌های دامپروری صنعتی در مناطق خاصی از کشور می‌باشد. در مقابل، ۱۱ استان (۳۵/۵ درصد) همچون البرز، ایلام، بوشهر، تهران، چهارمحال و بختیاری، خراسان شمالی، سمنان، قزوین، قم، کهگیلویه و بویراحمد و هرمزگان در هر دو بخش در رده‌های پایین قرار دارند که عمدتاً تحت سیطره کلان‌شهرها بوده یا با محدودیت‌های منابع آبی مواجه می‌باشند. این ناهمگونی فضایی لزوم تدوین سیاست‌های منطقه‌محور برای توسعه متوازن دامپروری را آشکار می‌سازد: در مناطق شمالی با توجه به پتانسیل موجود می‌توان بر افزایش بهره‌وری واحدهای



گاوداری



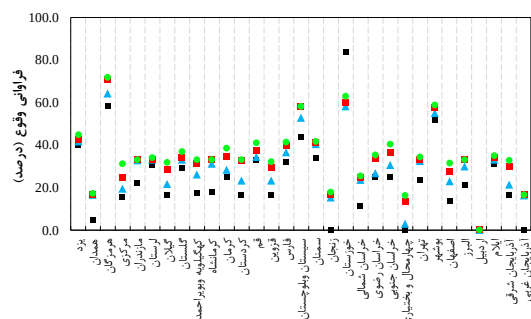
مرغداری

شکل ۲. تعداد گاوداری‌ها و مرغداری‌ها به تفکیک استان (سالنامه آماری کشور، ۱۴۰۲)

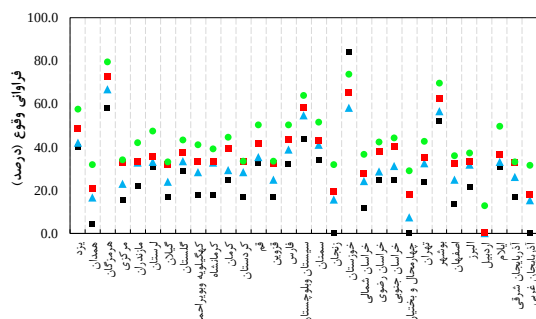
درصد در افق دور و تحت سناریوی اقلیمی SSP5-8.5 که نشانگر نفوذ گرمایش به اقلیم‌های معتدل کوهستانی است. همچنین استان‌های مرکزی مانند قم و سمنان نیز شاهد رشد ۱۷-۱۸ واحدی در فراوانی وقوع تنش گرمایی می‌باشند که تهدیدی برای پایداری دامپروری در این مناطق محسوب می‌شود.

مرغداری‌ها به دلیل وجود حساسیت فیزیولوژیکی بالاتر میان طیور، آسیب‌پذیری مضاعفی در دوره پایه نشان می‌دهند، چنانکه استان‌های خوزستان با ۸۷/۵ درصد، هرمزگان با ۶۳/۹ درصد، و بوشهر با ۵۶/۵ درصد نه تنها بالاترین سطوح تنش گرمایی را دارا هستند، بلکه فراوانی وقوع تنش گرمایی در مرغداری‌ها به طور میانگین ۴/۶ واحد بالاتر از گاوداری‌های استان است که می‌تواند ناشی از فقدان مکانیسم‌های کارآمد تنظیم حرارت در طیور می‌باشد. براساس نتایج مشخص است که تحت سناریوی اقلیمی SSP2-4.5 شتاب افزایش تنش گرمایی در مناطق شرقی و مرکزی بارز است، به عنوان مثال، در استان‌های خراسان رضوی، کرمان، و قم به ترتیب افزایشی در حدود ۱۵/۳، ۱۶/۳ و ۱۳/۷ واحدی در وقوع تنش گرمایی در آینده دور نسبت به دوره پایه مشاهده می‌شود حاکی از تبدیل این مناطق به کانون‌های نوظهور تنش گرمایی می‌باشد. علاوه بر این، گسترش وقوع تنش گرمایی برای مرغداری‌ها به

گرمایی وارد بر گاوداری‌ها در دوره‌های آینده و تحت تاثیر تغییرات اقلیمی حاکی از آن است که تحت تاثیر سناریوی اقلیمی SSP2-4.5 روند افزایشی در وقوع تنش گرمایی به ویژه در حوزه فلات مرکزی ایران تشدید خواهد شد، که نشان‌دهنده گسترش تدریجی ناحیه‌های پرخطر در سطح کشور می‌باشد. باتوجه به نتایج مشخص است که در اکثر استان‌ها، افزایش فراوانی وقوع تنش‌های گرمایی با حرکت از دوره پایه به سمت دوره‌های آینده تحت سناریوی اقلیمی SSP5-8.5 به مراتب شدیدتر از SSP2-4.5 است، که با پیش‌بینی‌های جهانی مبنی بر تشدید تغییرات اقلیمی در سناریوهای با انتشار بالا نیز همخوانی دارد. به عنوان مثال، در استان آذربایجان غربی، فراوانی وقوع تنش گرمایی برای گاوداری‌ها از ۰/۱۰ درصد در دوره پایه به ۱۶/۷ درصد در آینده دور تحت سناریوی SSP2-4.5 و به ۳۱/۷ درصد تحت سناریوی اقلیمی SSP5-8.5 می‌رسد. این روند افزایشی در اکثر استان‌ها مشاهده می‌شود، هرچند میزان افزایش در استان‌های مختلف متفاوت می‌باشد. پدیده نگران‌کننده، گسترش ناحیه‌های پرخطر به مناطق تاریخی ایمن است که در دوره پایه با حداقل وقوع تنش گرمایی مواجه بوده‌اند، به عنوان مثال، افزایش فراوانی وقوع تنش گرمایی در گاوداری‌ها در استان‌های آذربایجان غربی، اردبیل، چهارمحال و بختیاری و زنجان از ۰/۱۰ درصد به ۳۱/۷، ۱۳/۰، ۲۹/۰ و ۳۲/۰

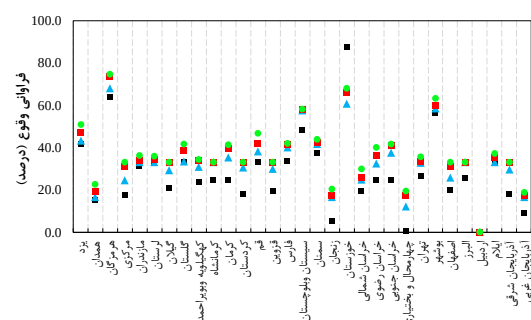


SSP2-4.5

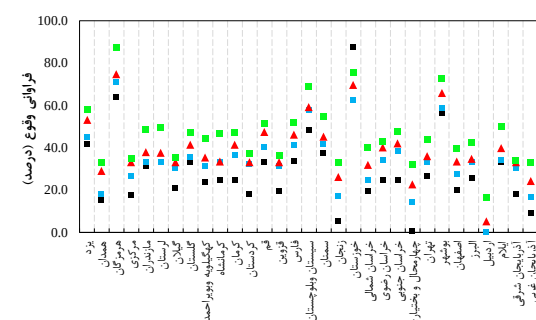


SSP5-8.5

گاوداری



SSP2-4.5



SSP5-8.5

مرغداری

■ Historical ▲ P1_2025-2049 ■ P2_2050-2074 ● P3_2075-2099

شکل ۳. تغییرات در فراوانی وقوع تنش گرمایی وارد بر گاوداری‌ها و مرغداری‌ها تحت تاثیر تغییرات اقلیمی به تفکیک استان

فراوانی وقوع تنش گرمایی بر گاوداری‌ها در دوره پایه برای بخش عمده‌ای از استان‌ها در طبقه رخداد کم (۱-۲۵ درصد) می‌باشد و تنها ۳ استان در طبقات بالاتر (بیش از ۵۰ درصد) متمرکز بوده است، حال آنکه مرغداری‌ها حتی در دوره پایه با توزیع نامساعدتری مواجه می‌باشند، به‌طوری‌که ۱۷ استان در طبقه کم، ۱۱ استان در طبقه متوسط و ۴ استان در گروه وقوع زیاد و خیلی زیاد تنش گرمایی قرار دارند. این الگو حاکی از حساسیت ذاتی بالاتر مرغداری‌ها نسبت به تنش گرمایی حتی در شرایط اقلیمی دوره پایه است که با مطالعات فیزیولوژی حیوانات سازگار است، چرا که طیور به دلیل ناتوانی در تعریق و متکی بودن بر تنفس سریع برای دفع گرما، مستعدتر به استرس گرمایی می‌باشند. بررسی تغییرات تحت سناریوی اقلیمی SSP2-4.5 و آینده نزدیک کاهش شدید در تعداد استان‌های کم‌تنش در هر دو بخش مشهود است: چنانکه گاوداری‌ها از ۲۰ به ۷ استان و مرغداری‌ها از ۱۷ به ۷ استان کاهش یافته است. درحالی‌که افزایش محسوس در تعداد استان‌های مواجه با تنش گرمایی با فراوانی وقوع متوسط (از ۸ به ۱۵ استان برای گاوداری‌ها و از ۱۱ به ۲۰ استان برای مرغداری‌ها) نشان‌دهنده گسترش جغرافیایی تنش گرمایی به مناطق سابقاً خنک‌تر است. همانطور که پیش‌تر نیز عنوان شد این گسترش به‌ویژه در استان‌های شمال غربی و کوهستانی که پیش از این جزء مناطق امن محسوب می‌شدند، مشاهده می‌شود. تحت سناریوی اقلیمی SSP5-8.5 و در دوره آینده دور فروپاشی مناطق امن به اوج خود می‌رسد: به‌طوری‌که برای گاوداری‌ها تنها ۱ استان در طبقه مربوط به فراوان وقوع کم تنش باقی می‌ماند درحالی‌که ۲۲ استان در طبقه متوسط و ۷ استان در طبقه زیاد قرار دارند و برای نخستین بار ۱ استان (هرمزگان) با وقوع تنش گرمایی در بیش از ۷۵ درصد از مواقع در کل دوره روبرو خواهد بود. در مرغداری‌ها با تنها ۱ استان کم‌تنش، ۲۲ استان با تنش متوسط، ۶ استان با تنش زیاد و ۲ استان با تنش خیلی زیاد که نشان‌دهنده غالب‌شدن شرایط تنش گرمایی در سطح ملی می‌باشد،

مناطق مرتفع شمال غرب از تأثیرات مهم سناریوی اقلیمی SSP5-8.5 به‌شمار می‌رود. براساس نتایج، مرغداری‌های استان اردبیل که در دوره پایه کاملاً عاری از تنش بودند، فراوانی وقوع تنش گرمایی در آینده دور برابر با ۱۶/۷ درصد برآورد شده است. همچنین استان مازندران به‌عنوان قطب ملی طیور با رسیدن به ۴۸/۳ درصد در آینده دور (افزایش ۱۶/۸ واحدی نسبت به پایه) تحت سناریوی اقلیمی SSP5-8.5، با تهدید جدی در امنیت پروتئین کشور روبروست. علاوه‌براین، افزایش وقوع تنش‌های گرمایی در آینده دوره نسبت به دوره پایه در مرغداری‌های استان‌های کوهستانی واقع در غرب کشور نیز وضعیت مشابهی دارند که نشانگر تغییر الگوی اقلیمی زاگرس می‌باشد.

به‌طور کلی، الگوی مکانی-زمانی تنش گرمایی در هر دو بخش گاوداری و مرغداری حاکی از وجود دو روند کلیدی می‌باشد: مورد اول قطبی‌شدن ریسک می‌باشد، چنانکه شکاف تنش گرمایی بین استان‌های جنوبی (میانگین ۷۴/۵ درصد تحت سناریوی اقلیمی SSP5-8.5) و شمال غربی (میانگین ۲۴/۳ درصد تحت سناریوی اقلیمی SSP5-8.5) به ۵۰/۲ واحد می‌رسد که نابرابری منطقه‌ای در تاب‌آوری صنعت دامپروری را تشدید می‌کند. مورد دوم، بحران‌سازی در مناطق تاریخی ایمن است که سابقاً پناهگاه‌های حرارتی محسوب می‌شدند. بنابراین، سه اولویت راهبردی را برای کاهش تأثیرات ناشی از وقوع تنش گرمایی می‌توان بیان نمود که عبارتند از: توسعه نژادهای مقاوم به‌ویژه برای مرغداری‌ها در جنوب کشور با تمرکز بر ژن‌های تحمل‌پذیر به دمای بالا، بکارگیری سیاست‌های منطقه‌محور و تدوین برنامه‌های سازگاری تفکیک‌شده براساس ریسک ویژه هر استان (مثلاً اولویت اصلاح نژادی در جنوب و بهینه‌سازی انرژی در مرکز) را می‌توان از دیگر اولویت‌های راهبردی بیان نمود. همچنین یکی دیگر از اولویت‌ها کاربرد فناوری‌های خنک‌کننده با بازده انرژی بالا می‌باشد.

در جدول ۲، تعداد استان‌های مواجه با سطوح مختلف از وقوع تنش گرمایی ارائه شده است. با توجه به نتایج، میزان

جدول ۲. تعداد استان‌های مواجه با طبقات مختلف از فراوانی وقوع تنش گرمایی

طبقات مختلف از فراوانی وقوع تنش گرمایی (%)	رخداد کم (۰-۲۵)	رخداد متوسط (۲۶-۵۰)	رخداد زیاد (۵۱-۷۵)	رخداد خیلی زیاد (۷۶-۱۰۰)	رخداد کم (۰-۲۵)	رخداد متوسط (۲۶-۵۰)	رخداد زیاد (۵۱-۷۵)	رخداد خیلی زیاد (۷۶-۱۰۰)
	گاوداری				مرغداری			
Historical	۲۰	۸	۲	۱	۱۷	۱۱	۲	۱
P1_SSP2	۷	۱۵	۴	۰	۷	۲۰	۴	۰
P2_SSP2	۷	۲۰	۴	۰	۵	۲۲	۴	۰
P3_SSP2	۵	۲۲	۴	۰	۵	۲۱	۵	۰
P1_SSP5	۱۰	۱۷	۴	۰	۶	۲۱	۴	۰
P2_SSP5	۵	۲۲	۴	۰	۳	۲۳	۵	۰
P3_SSP5	۱	۲۲	۷	۱	۱	۲۲	۶	۲

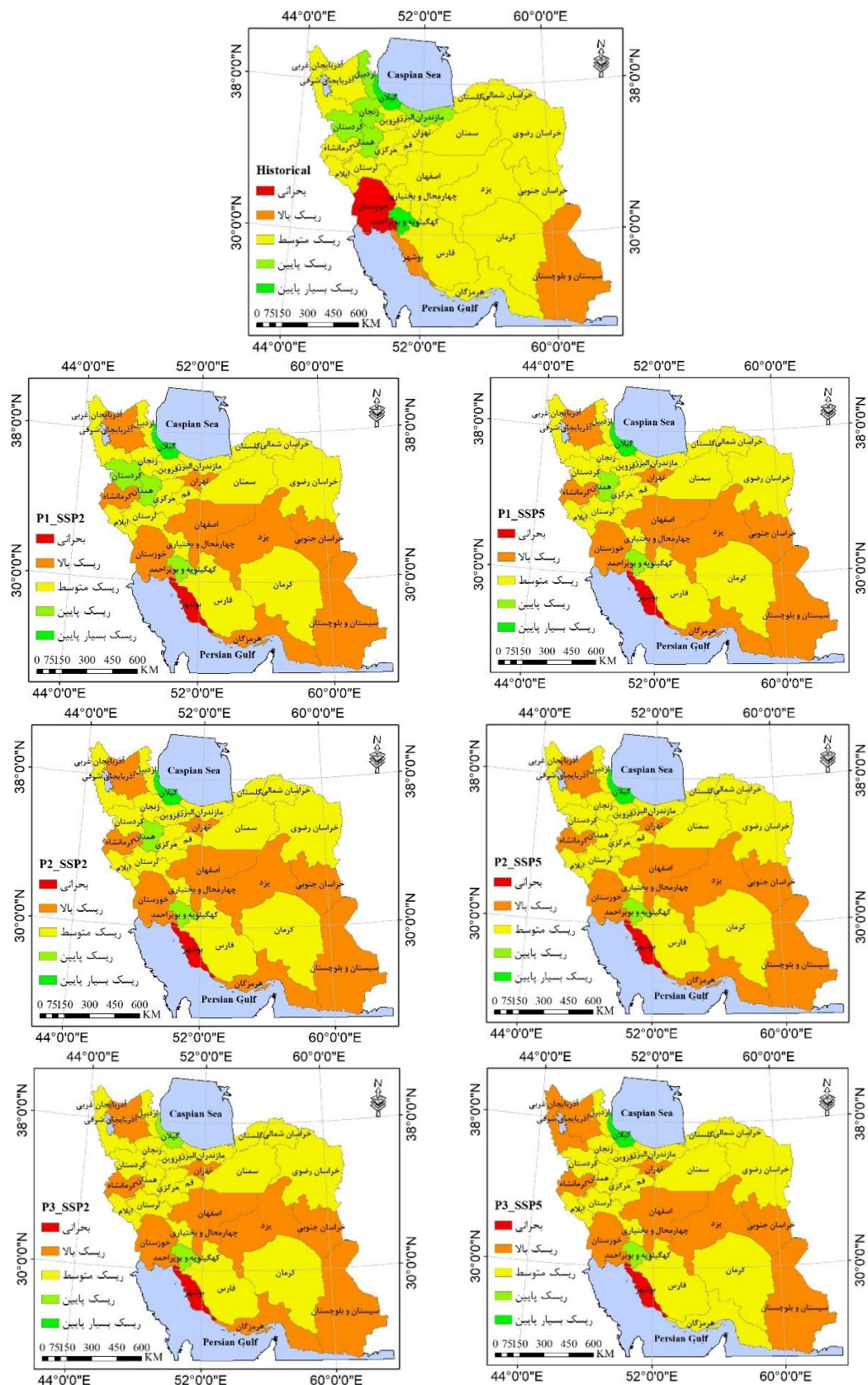
نماید. بنابراین، عدم اتخاذ تمهیدات تهویه‌ای و سازگاری، به‌خصوص برای دام‌های سنگین که نسبت به گرما بسیار حساس‌اند، می‌تواند موجب کاهش بهره‌وری، افزایش تلفات و بروز بیماری‌های دامی در استان‌های فوق شود. در مقابل، استان‌های شمالی و کوهستانی غرب شامل گیلان، اردبیل، کهگیلویه و بویراحمد و همدان از پایداری نسبی از نظر تنش‌های گرمایی و خشکی برخوردار می‌باشند. ویژگی مشترک این مناطق، اقلیم معتدل، دمای پایین‌تر، بارش مناسب و عموماً تراکم کمتر دامداری صنعتی است. گیلان تنها استانی است که سطح ریسک در آن تحت هر دو سناریوی اقلیمی در سطح پایین باقی مانده است که این ثبات می‌تواند ناشی از اثر تعدیل‌کنندگی رطوبت دریای خزر باشد. ثبات سطح ریسک در استان گیلان می‌تواند نشان‌دهنده پتانسیل بالای این منطقه برای توسعه پایدار واحدهای دامی با حداقل آسیب‌پذیری اقلیمی باشد. همچنین سطح ریسک در استان کهگیلویه و بویراحمد نیز به‌دلیل ارتفاع بالای ۱۵۰۰ متر و میانگین دمای پایین‌تر، در گروه پایین تثبیت شده است. با توجه به نتایج تحت سناریوی اقلیمی SSP5-8.5، مناطق مرکزی ایران تبدیل به کانون‌های جدید ریسک شده‌اند. استان قم نماد این تحول است، به‌طوری‌که میزان ریسک در آن از سطح متوسط به بالا جهش یافته است. بررسی داده‌ها نشان می‌دهد افزایش ۵۰ درصدی تنش گرمایی (از ۳۲/۹ به ۵۰/۳ درصد) و کاهش ۳۵ درصدی شاخص خشکی (از ۷/۴ به ۴/۴) طی ۵۰ سال آینده، علت اصلی این تغییر می‌باشد. این الگو در استان اصفهان نیز مشهود است، جایی که ترکیب تراکم ۱۶۴۹۸ واحدی گاوداری‌ها و کاهش ۴۸ درصدی در مقدار شاخص خشکی باعث شده است تا میزان ریسک در این استان حتی تحت سناریوی SSP2-4.5 در سطح بالا باشد. این موضوع، حساسیت بالای واحدهای دامی را در استان‌های فوق به سناریوهای اقلیمی، در حد پریسک نشان می‌دهد و لزوم تدوین سیاست‌های کاهشی و سازگاری را پررنگ می‌سازد.

در بررسی الگوی تغییرات ریسک مرکب وارد بر مرغداری‌ها در استان‌های مختلف کشور (شکل ۵) مشخص است که استان‌های مرکزی، شرقی و جنوبی کشور شامل اصفهان، یزد، خراسان رضوی، فارس، گلستان، مازندران و هرمزگان، بیشترین میزان ریسک را در کل دوره‌های آینده و تحت هر دو سناریوی اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 تجربه می‌کنند. این نتایج با نتایج ارائه شده در تحقیق Ansari Amoli و همکاران (۲۰۲۲) هم‌راستا می‌باشد. در پژوهش مذکور، با ترکیب لایه‌های خطر (مثلاً شدت خشکسالی)، آسیب‌پذیری و عناصر در معرض خطر (جمعیت/منابع/زراعت/دامداری) نقشه‌های ریسک خشکسالی مبتنی بر داده‌های سنجش از دور تهیه شد و نقاط جنوبی و برخی استان‌های مرکزی به‌عنوان کانون‌های بحرانی برجسته شد. این استان‌ها عمدتاً با افزایش تدریجی ریسک از سطح

این وضعیت بحرانی‌تر است. بنابراین شکندگی بیشتر سیستم مرغداری در برابر تغییرات اقلیمی، لزوم سرمایه‌گذاری در فناوری‌های سازگاری پیشرفته‌تر را نسبت به گاوداری‌ها پررنگ‌تر می‌سازد. براساس نتایج مشخص است که تحت سناریوی اقلیمی SSP2-4.5 حتی در آینده دور هیچ استانی با وقوع بیش از ۷۵ درصد تنش گرمایی مواجه نمی‌باشد، درحالی‌که تحت سناریوی SSP5-8.5 هم برای گاوداری‌ها و هم مرغداری‌ها استان‌هایی در طبقه مربوط به وقوع خیلی زیاد تنش گرمایی قرار دارند.

رتبه‌بندی استان‌ها از نظر ریسک تغییرات اقلیمی بر صنایع دام و طیور

در شکل ۴ رتبه‌بندی ریسک گاوداری‌ها در ۳۱ استان ایران را با استفاده از روش TOPSIS ارائه شده است. این رتبه‌بندی بر اساس سه معیار اصلی شامل تعداد رأس گاو موجود در گاوداری‌ها، فراوانی وقوع تنش گرمایی، و شاخص خشکی دومرتن در دوره پایه و دوره‌های آینده (نزدیک، میانی و دور) تحت سناریوهای اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 انجام شده است. تحلیل مکانی-زمانی الگوی ریسک گاوداری‌ها در سطح استان‌های کشور حاکی از آن است که تحت تأثیر تغییرات اقلیمی، به‌ویژه افزایش دما و تشدید خشکی، مناطق زیادی از کشور در معرض افزایش ریسک قرار دارند. این الگو بسته به شرایط اقلیمی و توزیع مکانی واحدهای گاوداری، دارای تنوع قابل‌توجهی در سطح کشور می‌باشد. براساس نتایج در دوره پایه، اکثریت قریب به اتفاق استان‌ها (۲۲ از ۳۱) در گروه ریسک متوسط قرار دارند، همچنین دو استان (بوشهر و سیستان و بلوچستان) در گروه ریسک بالا، ۱ استان (خوزستان) در گروه بحرانی، استان‌های اردبیل، زنجان، کردستان، گلستان، مازندران، همدان در گروه ریسک پایین، و دو استان کهگیلویه و بویراحمد و گیلان در گروه ریسک خیلی پایین قرار گرفته‌اند. این توزیع نشان‌دهنده شرایط نسبتاً مساعد برای گاوداری‌ها در اکثر مناطق ایران به غیر از مناطق گرم و خشکی همچون بوشهر، سیستان و بلوچستان و خوزستان است که با ریسک بالاتری مواجه می‌باشند. در این سه استان، تلفیق سه عامل کاهش شاخص خشکی دومرتن (به سمت تشدید خشکی)، افزایش تنش گرمایی و تراکم بالای دام، اکوسیستم دامپروری را در آستانه خطرات جدی قرار داده است. بوشهر به‌عنوان کانون بحران، در تمام سناریوها و دوره‌های آینده دارای وضعیت بحرانی می‌باشد که همسو با پیش‌بینی‌های IPCC درباره تشدید امواج گرمایی در خلیج فارس است. در خوزستان، اگرچه بهبود نسبی از شرایط بحرانی به شرایط دارای ریسک بالا مشاهده می‌شود، اما با توجه به وجود ۳۷۳۳۷ واحد گاوداری و ۳۰۶۹۱۵ رأس گاو، حتی افزایش اندکی در میزان تنش گرمایی می‌تواند منجر به خسارات قابل‌توجهی در این منطقه ایجاد

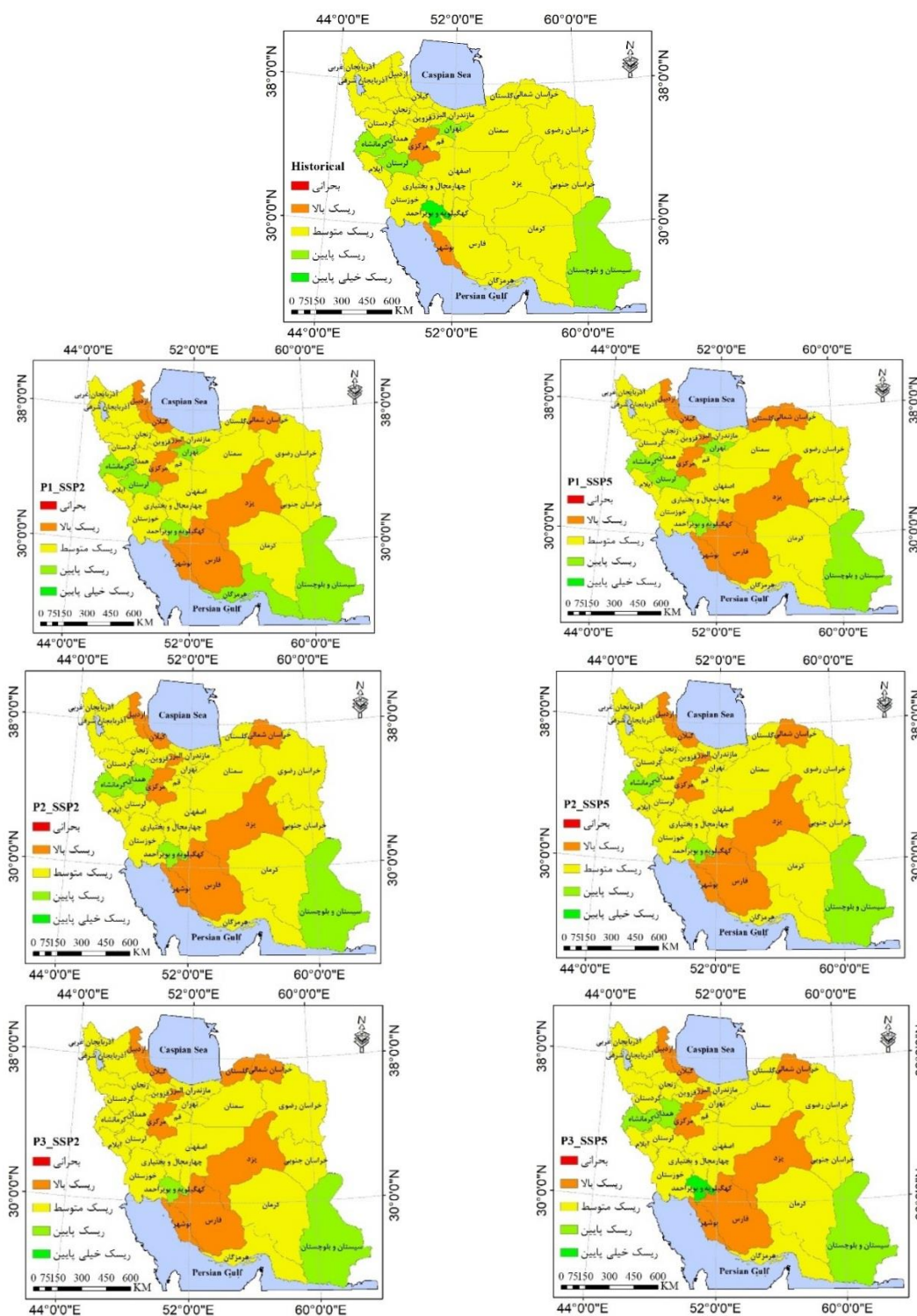


شکل ۴. تغییرات مکانی رتبه‌بندی ریسک گرمایی و خشکی وارد بر واحدهای گاوداری

براساس روش TOPSIS و تحت سناریوهای اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5-8.5

قرار گرفته است، که هشدار جدی برای اتخاذ راهبردهای سازگاری اقلیمی و بهینه‌سازی مدیریت انرژی در واحدهای مرغداری محسوب می‌شود. در مقابل، برخی از استان‌های شمالی، شمال‌غربی و زاگرس میانی مانند گیلان، اردبیل، آذربایجان شرقی و غربی، کهگیلویه و بویراحمد، زنجان و کردستان، عمدتاً در طبقات ریسک پایین یا متوسط قرار

متوسط در دوره پایه به سطح بالا در دوره‌های آینده (خصوصاً آینده میانی و دور) مواجه می‌باشند، که به‌طور مشخص ناشی از هم‌پوشانی سه عامل مهم است: افزایش فراوانی امواج گرمایی، شدت خشکی اقلیم، و تراکم بالای واحدهای مرغداری. به‌ویژه در استان‌هایی نظیر اصفهان و خراسان رضوی، در هر دو سناریو و در تمامی دوره‌های پیش‌بینی، سطح ریسک در بالاترین طبقه



شکل ۵. تغییرات مکانی رتبه‌بندی ریسک گرمایی و خشکی وارد بر واحدهای مرغداری
براساس روش TOPSIS و تحت سناریوهای اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5-8.5

ایران، با استفاده از شاخص خشکی دومارتن (DMI) و روش تصمیم‌گیری چندمعیاره TOPSIS، انجام شده است تا مبنایی برای سیاست‌گذاری و توسعه راهکارهای تطبیقی فراهم آورد. برای دستیابی به این هدف، از داده‌های اقلیمی مشاهداتی و مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) تحت سناریوهای انتشار SSP2-4.5 و SSP5-8.5 استفاده شد تا فراوانی وقوع تنش گرمایی و شاخص خشکی دومارتن در دوره‌های پایه و آینده مورد بررسی قرار بگیرد. علاوه بر این، با بهره‌گیری از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره TOPSIS، ریسک استان‌ها بر اساس معیارهایی چون فراوانی تنش گرمایی، شاخص خشکی و رأس گاو در دامداری‌ها/قطعه مرغ برای مرغداری‌ها، رتبه‌بندی شده است. نتایج نشان داد که در دوره پایه، استان‌های جنوبی و مرکزی مانند خوزستان، هرمزگان و بوشهر به دلیل فراوانی بالای تنش گرمایی و شاخص خشکی پایین، در معرض ریسک بیشتری قرار دارند، درحالی‌که استان‌های شمالی مانند گیلان و اردبیل از شرایط مساعدتری برخوردار می‌باشند. با این حال، در دوره‌های آینده، به‌ویژه تحت سناریوی SSP5-8.5، فراوانی تنش گرمایی در اکثر مناطق، حتی نواحی شمالی، به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد، این تغییرات منجر به کاهش تولید شیر و گوشت، افت کیفیت تخم‌مرغ، افزایش تلفات و کاهش باروری در دام و طیور می‌شود، که تهدیدی جدی برای امنیت غذایی و پایداری اقتصادی این بخش‌ها می‌باشد. یافته‌ها حاکی از آن است که مرغداری‌ها نسبت به گاوداری‌ها آسیب‌پذیری بیشتری در برابر تنش گرمایی دارند؛ به‌طوری‌که در آینده دور تحت سناریوی SSP5-8.5، تعداد استان‌های با تنش گرمایی خیلی زیاد برای مرغداری‌ها به دو استان می‌رسد، درحالی‌که برای گاوداری‌ها یک استان است. تحلیل ریسک با روش TOPSIS نشان داد که استان‌هایی مانند بوشهر، خوزستان و سیستان و بلوچستان در دوره پایه و آینده در گروه‌های ریسک بالا و بحرانی قرار دارند، در مقابل، استان‌های شمالی کماکان در گروه ریسک پایین باقی خواهند ماند. این نتایج بر اهمیت سیاست‌گذاری منطقه‌محور در صنعت دامداری و مرغداری تأکید دارد؛ برای مثال، در مناطق جنوبی توسعه نژادهای مقاوم به گرما و سیستم‌های خنک‌کننده، و در مناطق شمالی مدیریت منابع آبی و افزایش بهره‌وری توصیه می‌شود. همچنین نتایج این پژوهش می‌تواند مبنایی برای تخصیص منابع و سرمایه‌گذاری در فناوری‌ها در زمینه کاهش ریسک و سازگاری باشد. همچنین، با توجه به تشدید ریسک در آینده تحت سناریوهای انتشار بالا، اجرای سیاست‌های کاهش گازهای گلخانه‌ای و حرکت به سمت توسعه پایدار ضروری به نظر است. پیشنهاد می‌شود تحقیقات آینده بر توسعه مدل‌های دقیق‌تر برای پیش‌بینی اثرات اقتصادی و اجتماعی این تنش‌ها و ارزیابی

گرفته‌اند و در طول دوره‌های آینده نیز تغییر چشم‌گیری در الگوی ریسک آن‌ها مشاهده نمی‌شود. در این مناطق، کاهش شدت گرمایش، رطوبت نسبی بالاتر، و در برخی موارد، تعداد محدود واحدهای مرغداری، منجر به پایین نگه‌داشتن سطح آسیب‌پذیری شده است.

استان‌های با ریسک در حال تغییر و تشدید شونده شامل: تهران، زنجان، سیستان و بلوچستان، همدان و ایلام، روند افزایشی ملایمی در طبقه‌بندی ریسک از پایین به متوسط دارند، به‌ویژه تحت سناریوی بدبینانه SSP5-8.5، که می‌تواند بیانگر اثرگذاری بیشتر سناریوهای با انتشار بالا بر مناطق مرزی و فلات مرکزی کشور باشد. در استان تهران به‌رغم قرارگیری در گروه ریسک پایین در دوره پایه، در بازه‌های میانی و بلندمدت از آینده به سطح ریسک به متوسط ارتقا یافته است که با توجه به حجم بالای تولید مرغ در این استان، می‌تواند با پیامدهای اقتصادی قابل‌توجهی همراه باشد. همچنین مقایسه میان نتایج حاصل از کاربرد دو سناریوی اقلیمی نشان می‌دهد که با وجود هم‌راستایی عمومی در الگوی ریسک، تحت سناریوی SSP5-8.5 (سناریوی بدبینانه‌تر با افزایش دمای بیشتر)، برخی از استان‌ها مانند سیستان و بلوچستان، تهران و زنجان در طبقه‌بندی ریسک در سطح بالاتری نسبت به سناریوی SSP2-4.5 قرار دارند، به‌ویژه در آینده دور، این تفاوت بیشتر مشهود است که تأکیدی بر ضرورت اولویت‌دهی به سیاست‌های کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در برنامه‌ریزی‌های کلان ملی دارد. در مجموع براساس نتایج مشخص است که ریسک تنش‌های اقلیمی (گرمایی و خشکی) برای صنعت مرغداری کشور، با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی آینده، از توزیع جغرافیایی نامتوازی برخوردار است؛ به‌گونه‌ای که برخی استان‌ها در معرض تهدیدی جدی قرار دارند و نیازمند مداخلات مدیریتی، تجهیزاتی (نظیر سیستم‌های خنک‌کننده پیشرفته)، و اصلاح ساختار فضایی توزیع مرغداری‌ها می‌باشند، درحالی‌که برخی از استان‌ها دارای پتانسیل تبدیل شدن به مناطق پناه اقلیمی بوده و می‌توانند در آینده نقش پشتیبانی در تولید را ایفا نمایند.

نتیجه‌گیری

تغییرات اقلیمی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی و اقتصادی قرن حاضر، اثرات عمیقی بر صنعت دامپروری و طیور، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، بر جای گذاشته است. تنش‌های گرمایی و خشکی ناشی از تغییرات اقلیمی می‌توانند اثرات منفی قابل‌توجهی بر تولید، سلامت حیوانات و امنیت غذایی کشور داشته باشند. این پژوهش حاضر با هدف تحلیل ریسک هم‌زمان تنش‌های گرمایی و خشکی اقلیمی بر واحدهای گاوداری و مرغداری در ۳۱ استان

کارایی راهکارهای سازگاری در مقیاس‌های مختلف متمرکز شود تا تاب‌آوری صنعت دامداری و مرغداری در برابر تغییرات اقلیمی و در نتیجه افزایش امنیت غذایی تقویت شود. در نهایت، تلفیق این یافته‌ها با داده‌های اقتصادی و اجتماعی، مانند هزینه‌های اجرای راهبردهای تطبیقی و تأثیر آن‌ها بر معیشت بهره‌برداران، می‌تواند به تدوین سیاست‌های مؤثرتر برای مدیریت پایدار صنعت دام و طیور در برابر تغییرات اقلیمی کمک نماید

Reference:

- Ananta, K., & Shrestha, K. B. (2017). Effects of Climate Change on the Livestock Population in Mustang District, Nepal. *Asian Journal of Agriculture and Development*, 14(1), 37–49.
- Ansari Amoli A, Aghighi H, & Lopez-Baeza E. (2022). Drought Risk Evaluation in Iran by Using Geospatial Technologies. *Remote Sensing*. 14(13). <https://doi.org/10.3390/rs14133096>
- Armstrong, D. V. (1994). Heat stress interaction with shade and cooling. *Journal of Dairy Science*, 77(7), 2044–2050.
- Attia, Y. A., Aldhalmi, A. K., Youssef, I. M., Bovera, F., Tufarelli, V., Abd El-Hack, M. E., El-Kholy, K. H., & Shukry, M. (2024). Climate change and its effects on poultry industry and sustainability. *Discover Sustainability*, 5(397). <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00627-2>
- Azad, A., & Ahmadi, A. (2024). Assessment of CMIP6 models and multi-model averaging for temperature and precipitation over Iran. Scientific Reports. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-74789-4>.
- Behzadian, M., Kazemzadeh, R. B., Albadvi, A., & Aghdasi, M. (2012). A state-of the-art survey of TOPSIS applications. *Expert Systems with Applications*, 39(17), 13051–13069. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.05.056>
- De Martonne, E. (1926). Aerisme, et Indices d'aridite. *Comptes Rendus de L'Academy of Science*, 182, 1395–1398.
- Farzbood, P. (2021). Effects of managerial factors on performance and economic status of broiler chickens in Gonbad under heat stress conditions. Master's degree. Gorgan University. (In Persian)
- Freeman, B. A., & Crapo, J. D. (1982). Biology of disease: Free radicals and tissue injury. *Lab Invest*, 47, 412–426.
- Godde, C., Mason-D'Croz, D., Mayberry, D., Thornton, P. K., & Herrero, M. (2021). Risk of climate-related impacts on the livestock sector: A review of the evidence. *Global Food Security*, 28. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100488>
- Hajati, H., (2022). Heat stress in poultry houses and solutions to deal with it. *Journal of Fodder and Animal Feed*, 3(1), 64-74. (In Persian).
- Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). Multiple Attribute Decision Making. Springer Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>
- IPCC. (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>.
- IPCC. (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Jurado, J., Valonso, A., & Alenda, R. (1994). Selection response for growth in the Spanish merino flock. *Journal of Animal Science*, 72(6), 1433–1440. <https://doi.org/10.2527/1994.7261433x>
- Kahraman, C., Cebeci, U., & Ruan, D. (2003). Multi-criteria supplier selection using fuzzy AHP. *Logistics Information Management*, 16(6), 382–394.
- Karimi, V., Karami, E., & Keshavarz, M. (2018). Climate change and agriculture: Impacts and adaptive responses in Iran. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(1), 1–15. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61794-5](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61794-5)
- Lara, L., & Rostagno, M. (2013). Impact of Heat Stress on Poultry Production. *Animals (Basel)*, 3(2), 356–369. <https://doi.org/10.3390/ani3020356>
- Lin, H., Decuyper, E., & Buyse, J. (2006). Acute heat stress induces oxidative stress in broiler chickens. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A*, 144(1), 11–17.
- Lpelc, A. (2019). Climate Impacts on Animal Production. *USDA National Institute of Food and Agriculture*. <https://lplc.org/climate-impacts-on-animal-production/>
- Mirakbari, M., Mesbahzadeh, T., MohseniSaravi, M., Khosravi, H., & MortezaieFarizhendi, G. (2018). Performance of Series Model CMIP5 in Simulation and Projection of Climatic Variables of Rainfall, Temperature and Wind Speed (Case Study: Yazd). *Physical Geography Research Quarterly*, 50(3), 593–609. <https://doi.org/10.22059/JPHGR.2018.248177.1007156>
- Mohajerpour, M., Alizadeh, A., Mousavi Baigy, S. M., Naserian, A. A. and Shakeri, M. T. (2018). Determination of the Most Appropriate Temperature-Humidity Index on Daily Milk Production in a Large Industrial Farm in Mashhad. *Iranian Journal of Animal Science Research*, 9(4), 507-516. doi:

- 10.22067/ijasr.v9i4.57379. (In Persian).
- Mohan, S., & Bhaskaran, P. K. (2019). Evaluation of CMIP5 climate model projections for surface wind speed over the Indian Ocean region. *Climate Dynamics*, 53(9–10), 5415–5435. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04874-2>
- Nawaz, A., Amoah, K., Leng, Q., Zheng, J., Zhang, W., & Zhang, L. (2021). Poultry Response to Heat Stress: Its Physiological, Metabolic, and Genetic Implications on Meat Production and Quality Including Strategies to Improve Broiler Production in a Warming World. *Frontiers in Veterinary Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.699081>
- Ramezani Etedali, H., Koohi, S., & Partovi, Z. (2023). Evaluation of Ensemble Climate Model development methods based on CMIP5 to investigate the potential of water harvesting from air humidity. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54(11), 1609–1625. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.364087.669553>. (In Persian)
- Reintjes, E. (2022). Food Systems and Livestock Production Under Climate Change: The IPCC's Sixth Assessment. Sustainable Aquaculture Engagement: Phase 3 Progress Report. <https://www.fairr.org/policy/issue-briefings/food-systems-and-livestock-production-under-climate-change>
- Rezaei, M., Nohtani, M., Moghaddamnia, A., Abkar, A., & Rezaei, M. (2013). Performance Evaluation of Statistical Downscaling Model (SDSM) in Forecasting Precipitation in two Arid and Hyper arid Regions. *Journal of Water and Soil*, 28(4), 836–845. <https://doi.org/10.22067/JSW.V0I0.23119>. (In Persian)
- Seyedsharifi R, Ala Noshahr F, Seif Davati J, Hedayat Evrigh N. (2024). The Effect of Heat Stress on the Performance and Genetic Parameters of Milk Production, Reproduction, and Somatic Cell Scores in Iranian Holstein Cows. *Research Animal Production*, 15(3), 20-29. <https://doi.org/10.61186/rap.15.3.20>. (In Persian).
- Song, J., Jiao, L. F., Xiao, K., Luan, Z. S., Hu, C. H., Shi, B., & Zhan, X. A. (2013). Cello-oligosaccharide ameliorates heat stress-induced impairment of intestinal microflora, morphology and barrier integrity in broilers. *Animal Feed Science Technology*, 185, 175–181.
- Thornton, P., Nelson, G., Mayberry, D., & Herrero, M. (2021). Increases in extreme heat stress in domesticated livestock species during the twenty-first century. *Global Change Biology*, 27(22), 5762–5772.
- Thornton, P., Nelson, G., Mayberry, D., & Herrero, M. (2022). Impacts of heat stress on global cattle production during the 21st century: a modelling study. *Lancet Planetary Health*, 6(3), 192–201.
- West, J. (2003). Effects of heat-stress on production in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 86(6), 2131–2144. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73803-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73803-X)
- Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. *Water International*, 10(3), 111–120.
- Yahav, S. (2000). Acclimation to thermal stress in domestic fowl. *Poultry Science*, 79(8), 1197–1202.