

Research Article

Spatiotemporal Analysis of Irrigated and Dryland Wheat Yield Variations in Khorasan Razavi Province

Mahdi Soltani, Mohsen Jahan, Fatemeh Yaghoubi

Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

Introduction

Wheat is the most important strategic crop both globally and nationally. It is one of the most critical staple crops in Iran, playing a vital role in food security and economic stability. However, its production is highly sensitive to climatic fluctuations, including temperature changes, precipitation variability, and extreme weather events. In semi-arid and arid regions such as Khorasan Razavi province, where agriculture is heavily dependent on climatic conditions, understanding yield trends and their underlying drivers is crucial for optimizing production and ensuring sustainability. This study aims to analyze the spatiotemporal variations in irrigated and rainfed wheat yield in Khorasan Razavi over an 11-year period (2011–2021) across 29 counties and identify key climatic and management-related factors influencing these changes. The findings provide essential insights into the spatial and temporal patterns of yield fluctuations and help inform adaptive strategies for mitigating agroclimatic risks.

Materials and Methods

The study was conducted in Khorasan Razavi province, located in northeastern Iran, covering 29 counties with diverse climatic and agronomic conditions. The data for this study were obtained from the Agricultural Jihad Organization's website, including annual yield records for irrigated and rainfed wheat. To model the yield trends, polynomial functions were employed. Linear, quadratic, and cubic regression models were applied, and the best-fitting model was selected using the Akaike Information Criterion (AIC). Based on yield trends, counties were classified into four classes: (1) Increasing, where yield has shown a significant and consistent upward trend; (2) Stagnating, where yield has remained relatively stable with no substantial increase or decrease; (3) Never Improved, where no significant improvement in yield was observed throughout the study period; and (4) Collapsed, where a sharp decline in yield occurred. The spatial distribution of yield variations was also analyzed to identify regional patterns.

Results and Discussion

The results of the study showed that in Khorasan Razavi province, the average irrigated wheat yield increased by about 1000 kilograms per hectare (kg ha^{-1}) over an 11-year period. However, this increase was not uniformly distributed across all counties; in half of the counties, an improvement in yield was observed, while in the other half, stagnation or no improvement in yield was observed. Furthermore, only one county experienced a significant decrease in yield. Regarding rainfed wheat, the average yield over the 11-year period increased by about 800 kilograms per hectare (kg ha^{-1}), indicating the product's sensitivity to environmental and management factors in different regions of the province. Spatial analysis revealed that the pattern of wheat yield changes across the province was heterogeneous; central counties such as Torbat Heydarieh, Fariman, and Nishapur experienced yield improvements, while areas like Khushab and some northern and southern counties faced decreases, stagnation, or no improvement in yield. Temporal variation charts showed that both types of wheat (irrigated and rainfed) were influenced by long-term climatic and management changes. Overall, management practices in the province have led to yield improvements, but in some counties, climatic changes and severe weather fluctuations, especially in the final year of the study, neutralized the positive effects of agricultural management, resulting in stagnation or no improvement in wheat yield. This study investigates the variations in precipitation and temperature over the agricultural years 2011 to 2021, with precipitation ranging from 60 to 430 mm and mean temperature varying between 10°C and 22.5°C . Significant fluctuations in both factors are highlighted, particularly the severe drought in 2020-2021 (the final year of the study), which had a notable impact on agricultural productivity. This suggests that even with improved farming techniques, climate adaptation measures

including changes in sowing date, drought-resistant cultivars, soil moisture conservation techniques, and enhanced irrigation systems are necessary to sustain long-term productivity. Also, several counties classified as Collapsed, Stagnating or Never Improved may require additional investment in agricultural extension services, farmer training, and climate-smart agricultural practices to bridge the yield gap.

Conclusion

The results emphasize the need for adaptive management strategies to enhance wheat yield stability in Khorasan Razavi. Although agronomic improvements have led to yield increases in many areas, the effects of climate fluctuations remain a major challenge. Policymakers and agricultural planners should prioritize climate adaptation measures, such as changes in sowing date, improved irrigation techniques, using drought-resistant crop varieties, and precision agriculture, to mitigate climate-related yield losses and ensure sustainable wheat production in the region.

Keywords: Agrometeorology, Temperature, Regression models, Agronomical management, Climate variability

مقاله پژوهشی

تجزیه و تحلیل تغییرات مکانی - زمانی عملکرد گندم آبی و دیم در استان خراسان رضوی

مهدی سلطانی، محسن جهان، فاطمه یعقوبی

گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

ایمیل: jahan@um.ac.ir

چکیده

مقابله با چالش‌های ناشی از تغییرات اقلیمی و تأمین امنیت غذایی، مستلزم درک دقیق از روند تغییرات عملکرد محصولات استراتژیک کشاورزی است. این پژوهش روند تغییرات عملکرد گندم آبی و دیم را در استان خراسان رضوی طی یک دوره ۱۱ ساله (۱۳۹۰-۱۴۰۰) در ۲۹ شهرستان بررسی و عوامل مؤثر بر این تغییرات تحلیل شد. برای مدل‌سازی تغییرات عملکرد از رگرسیون چندجمله‌ای متعامد در سه سطح خطی، درجه دوم و درجه سوم استفاده شد. همچنین، به منظور انتخاب مدل بهینه، معیار AIC به کار گرفته شد. روند عملکرد در شهرستان‌های مختلف به چهار دسته بهبود، رکود، سقوط و عدم بهبود طبقه‌بندی شد. نتایج پژوهش نشان داد که عملکرد گندم آبی در استان طی ۱۱ سال، به‌طور میانگین ۱۰۰۰ کیلوگرم در هکتار افزایش یافت. در نیمی از شهرستان‌ها بهبود، در نیمی دیگر رکود یا عدم بهبود، و در یک شهرستان کاهش عملکرد مشاهده شد. در مورد گندم دیم نیز میانگین عملکرد طی دوره ۱۱ ساله، حدود ۵۰۰ کیلوگرم در هکتار افزایش یافت. تحلیل مکانی نشان داد که تغییرات عملکرد گندم در استان ناهمگن است؛ شهرستان‌های مرکزی و غربی شاهد بهبود عملکرد بوده‌اند، در حالی که مناطق شمالی و جنوبی عمدتاً رکود یا عدم بهبود عملکرد را شاهد بوده‌اند. نمودارهای تغییرات زمانی نشان داد که هر دو نوع گندم (آبی و دیم) تحت تأثیر تغییرات بلندمدت آب‌وهوایی و مدیریتی قرار گرفته‌اند. به‌طور کلی، مدیریت زراعی عملکرد را بهبود داده، اما در برخی مناطق، تغییرات اقلیمی اثرات مثبت آن را خنثی کرده است. این یافته‌ها بر ضرورت توسعه استراتژی‌های مدیریتی مؤثر شامل تغییر در تاریخ کاشت، بهینه‌سازی روش‌های زراعی، و ارتقای روش‌های سازگاری با تغییرات اقلیمی تأکید دارند.

واژه‌های کلیدی: هواشناسی کشاورزی، دما، مدل‌های رگرسیونی، مدیریت زراعی، تغییرپذیری اقلیمی

مقدمه

امنیت غذایی به عنوان یکی از ارکان توسعه پایدار، به تضمین دسترسی پایدار و فراگیر به غذای کافی، سالم و باکیفیت در هر زمان و مکانی وابسته است (Godfray et al., 2010). تغییرات اقلیمی و نوسانات آب و هوایی به عنوان تهدیدهای جدی برای امنیت غذایی جهانی، تأثیرات گسترده‌ای بر تولیدات کشاورزی داشته است (IPCC, 2014)، به طوری که مطالعات اخیر نشان داده‌اند که عملکرد بسیاری از محصولات کشاورزی، از جمله گندم، در بسیاری از مناطق جهان بواسطه تغییرات اقلیمی، دچار رکود شده یا کاهش یافته است (Brisson et al., 2010; Finger, 2010). مناطق خشک و نیمه خشک جهان که حدود ۴۱ درصد از سطح زمین را پوشش می‌دهند و میزبان بیش از دو میلیارد نفر از جوامع انسانی هستند، به دلیل محدودیت‌های منابع آبی، تبخیر بالا و تنوع اقلیمی بالا، به شدت به تغییرات اقلیمی حساس هستند (FAO, 2021). استان خراسان رضوی که به عنوان منطقه‌ای خشک و نیمه خشک محسوب می‌شود، با توجه به شرایط خاص اقلیمی، منابع آبی محدود و خاک فرسایش یافته، با چالش‌های بیشتری در مدیریت پایدار کشاورزی مواجه است (Rouhani & Kahansal, 2021). مطالعات نشان داده‌اند که حتی تغییرات کوچک در میانگین دما و بارندگی می‌تواند الگوهای کاشت، داشت و برداشت را در این مناطق تغییر داده و موجب کاهش تولیدات کشاورزی و افزایش ناپایداری آن‌ها شود (Lobell et al., 2011). همچنین پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهند که تا سال ۲۱۰۰ میلادی، مناطق شمال شرقی ایران دچار خشکی بیشتری خواهند شد (Heydari & Taran, 2025). این یافته‌ها ضرورت اتخاذ اقدامات سازگارکننده با تغییرات اقلیمی در شمال شرقی ایران را برجسته می‌سازند.

گندم به عنوان یک محصول کلیدی و مهم در پایداری امنیت غذایی جهان سهم بسزایی دارد. با افزایش جمعیت و رشد تقاضای جهانی برای مواد غذایی، انتظار می‌رود تولید این محصول، با تغییرات اقلیمی سازگار شده و بهره‌وری آن افزایش یابد (Tilman et al., 2011). نتایج یک مطالعه نشان داد هر درجه افزایش دما می‌تواند باعث کاهش قابل توجهی در عملکرد گندم، به ویژه در مناطق گرمسیر و نیمه‌گرمسیری شود. این اثرات به ویژه در مراحل حساس رشد گندم مانند گل‌دهی و پرشدن دانه برجسته‌تر هستند (Lobell et al., 2011). همچنین تغییرات اقلیمی بر بارش‌های فصلی و خشکسالی‌ها تأثیر گذار است و موجب بارش‌های نامنظم و خشکسالی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت می‌شود که در نتیجه می‌تواند عملکرد گندم را به ویژه در مراحل رشدی بحرانی، کاهش دهند (Challinor et al., 2014). برخی مطالعات صورت گرفته درباره تأثیر تغییرات اقلیمی بر گندم در محیط‌های خشک و نیمه‌خشک تأکید کرده‌اند که افزایش دما ممکن است منجر به کاهش ۱۰ تا ۵۰ درصدی در عملکرد گندم شود (Hussain et al., 2018). این اثرات در محیط‌های خشک به دلیل کمبود رطوبت شدیدتر است. به عنوان مثال، طی مطالعه‌ای در پاکستان پیش‌بینی شد که افزایش دما تا ۳/۸۴ درجه سانتی‌گراد در نیمه‌قرن جاری می‌تواند به کاهش ۲۳/۵ درصدی در عملکرد گندم در مناطق نیمه‌خشک منجر شود (Hussain et al., 2021). برخی پژوهش‌ها نشان دادند که افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن می‌تواند اثرات منفی دمای بالا را جبران کرده و عملکرد گندم را در شرایط نیمه‌خشک بهبود بخشد (Bouras et al., 2019; Deihimfard et al., 2018). با این حال به نظر می‌رسد که تا سال ۲۰۵۰، افزایش میانگین دمای هوا به میزان سه درجه سانتی‌گراد، حتی با در نظر گرفتن تأثیر تعدیل‌کننده‌ی غلظت دی‌اکسید کربن، موجب کاهش عملکرد گندم آبی در مناطق مختلف بین ۱۴ تا ۲۱ درصد خواهد شد (Koochaki & Nasiri-Mahallati, 2008).

در سطح منطقه‌ای، مطالعات انجام گرفته در استان خراسان رضوی نیز تغییرات اقلیمی را بر عملکرد گندم تأثیرگذار می‌دانند. طی پژوهشی نشان داده شد که نوسانات دما و بارش به شدت بر عملکرد گندم دیم در خراسان رضوی تأثیر می‌گذارد (Farajzadeh-Asl et al., 2009). همچنین، در مناطقی مانند تربت حیدریه، افزایش دما و کاهش طول دوره رشد ممکن است به کاهش ۴/۱ درصدی در عملکرد گندم آبی منجر شود، در حالی که در برخی دیگر از مناطق، اثرات متقابل این تغییرات همراه با افزایش غلظت CO₂ ممکن است عملکرد را تا ۱۲/۹ درصد افزایش دهد (Zeinali, 2018). (Mobarakeh et al., 2018).

تحلیل داده‌های مکانی-زمانی در مطالعات کشاورزی ابزاری قدرتمند برای درک الگوهای مکانی و تغییرات زمانی عملکرد محصولات است. این تحلیل‌ها به پژوهشگران کمک می‌کند تا ارتباط بین عوامل محیطی مانند دما، بارش و خاک با عملکرد محصولات کشاورزی را به صورت دقیق بررسی کنند (Goodchild et al., 2000). در مطالعات اخیر از تحلیل مکانی-زمانی به طور گسترده برای پیش‌بینی عملکرد محصولات، شناسایی

مناطق بحرانی و تحلیل تأثیرات تغییرات اقلیمی بر کشاورزی استفاده شده است. این رویکرد به سیاست‌گذاران و مدیران کمک می‌کند تا برنامه‌ریزی‌های بهتری برای مدیریت منابع و توسعه پایدار کشاورزی داشته باشند (Bivand et al., 2008). مطالعات انجام‌شده در مناطق مختلف جهان نشان می‌دهند که تغییرات مکانی-زمانی عملکرد محصولات کشاورزی به شدت وابسته به نوع محصول، شرایط اقلیمی منطقه و فناوری‌های کشاورزی مورد استفاده است. برای مثال، در مناطقی که سیستم‌های آبیاری پیشرفته وجود دارد، اثرات منفی کاهش بارش کمتر مشاهده شده است (Hatfield et al., 2011).

پژوهش حاضر با هدف تحلیل مکانی-زمانی تغییرات عملکرد گندم آبی و دیم در سطح ۲۹ شهرستان استان خراسان رضوی در بازه زمانی ۱۱ ساله (۱۳۹۰-۱۴۰۰) انجام گرفت. نتایج این گونه تحلیل، درک بهتر تغییرات عملکرد گندم و ارتباط آن با عوامل محیطی و مدیریتی را ممکن می‌سازد.

مواد و روش‌ها

استان خراسان رضوی در شمال شرق ایران واقع شده (شکل ۱)، و یکی از مهم‌ترین قطب‌های کشاورزی کشور به شمار می‌رود. این استان با مساحت حدود ۱۱۸۸۵۱ کیلومتر مربع، از شمال با استان خراسان شمالی و ترکمنستان، از شرق با افغانستان، و از جنوب و غرب با استان‌های خراسان جنوبی و سمنان هم‌مرز است. این استان دارای اقلیم متنوعی است که از نیمه‌خشک تا بیابانی متغیر است. این تنوع اقلیمی تأثیر مستقیمی بر عملکرد محصولات کشاورزی، به‌ویژه گندم دارد. میانگین دمای استان خراسان رضوی در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ برابر با ۱۶/۴ درجه سانتی‌گراد بوده که نسبت به بلندمدت، ۱/۱ درجه افزایش داشته است. بارش استان، در همین سال زراعی بین ۶۶/۸ تا ۲۷۶ میلی‌متر متغیر بوده است به طوری که کمترین میزان بارش از شهرستان بردسکن و بیشترین بارندگی از شهرستان درگز گزارش شده است. همچنین میانگین بارش ۱۴۶/۷ بوده در حالی که در بلند مدت، ۲۰۹/۱ میلی‌متر ثبت شده است (KRM0, 2022).

با توجه به اینکه برخی شهرستان‌های استان در سال‌های اخیر در تقسیم بندی‌های اخیر کشوری، به عنوان شهرستان شناخته شده‌اند، ممکن است دوره مطالعه شامل سال‌هایی باشد که این شهرستان‌ها هنوز بخشی از شهرستان مرجع بوده‌اند. شهرستان‌های جدید شامل زبرخان، ششتمد و گلپهار هستند که به ترتیب از شهرستان‌های نیشابور، سبزوار و چناران تفکیک شده‌اند. از این رو، برای حفظ یکپارچگی داده‌ها، سطح زیر کشت و تولید گندم آبی و دیم در سال‌های پس از تأسیس این شهرستان‌ها، با داده‌های شهرستان مرجع تجمع شد تا روند تغییرات در طول دوره مطالعه بدون گسستگی حفظ شود. در نتیجه، عملکرد شهرستان مرجع برای این سال‌ها بر اساس مجموع سطح زیر کشت و تولید (ادغام‌شده) مجدداً محاسبه شد. در این مطالعه، روند تغییرات عملکرد گندم آبی و دیم در شهرستان‌های استان خراسان رضوی طی دوره ۱۱ ساله (۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰)، بر اساس داده‌های استخراج‌شده از وب سایت جهاد کشاورزی استان و سالنامه‌های آماری رسمی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. همچنین، داده‌های دما و بارش ایستگاه‌های هواشناسی استان (۱۹ ایستگاه) طی همین دوره از پایگاه داده سازمان هواشناسی کشور (IRIMO) دریافت شد. با توجه به اینکه برخی شهرستان‌ها فاقد ایستگاه سینوپتیک بودند، نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به آن‌ها برای تحلیل داده‌ها در نظر گرفته شد. به منظور تسهیل در تحلیل، این داده‌ها بر اساس سال زراعی تجمع و پردازش شدند.

برای مدل‌سازی روند عملکرد از چندجمله‌ای‌های متعامد^۱ به عنوان یک روش بهینه برای مدل‌سازی تغییرات زمانی استفاده شد. چندجمله‌ای‌های متعامد، برخلاف چندجمله‌ای‌های معمولی، وابستگی کمتری به ضرایب مدل دارند که این امر باعث پایداری بیشتر مدل، کاهش هم‌خطی^۲ و بهبود دقت پیش‌بینی می‌شود (Draper, 2002; Montgomery et al., 2021). در مطالعات قبلی، استفاده از چندجمله‌ای‌های متعامد در تحلیل روند تغییرات محیطی و کشاورزی موجب کاهش خطای برازش و بهبود تفسیر و تبیین ضرایب شده است (Vargas et al., 2015; Zhang et al., 2003). در این مطالعه، روند تغییرات عملکرد گندم آبی و دیم در شهرستان‌های استان خراسان رضوی، طی دوره ۱۱ ساله (۱۳۹۰-۱۴۰۰)، از

¹ Orthogonal Polynomials

² Multicollinearity

چندجمله‌ای‌های متعامد به عنوان یک روش بهینه جهت کاهش هم‌خطی در مدل‌های رگرسیونی استفاده شد. چندجمله‌ای‌های متعامد در این مطالعه با استفاده از تابع poly در نرم‌افزار R محاسبه شدند (R Core Team, 2025; Venables & Ripley, 2013). این تابع چندجمله‌ای‌هایی را تولید می‌کند که به صورت استاندارد شده و متعامد هستند و باعث کاهش همبستگی بین متغیرهای توضیحی می‌شوند. ضرایب در تابع poly به صورت عددی بهینه‌سازی شده‌اند، در حالی که استفاده مستقیم از x ، x^2 ، x^3 در معادلات چندجمله‌ای ساده، ممکن است باعث ایجاد هم‌خطی شدید بین متغیرها شده و در نتیجه منجر به ناپایداری عددی و کاهش دقت برآورد ضرایب شود. بر این اساس، جهت شبیه‌سازی تغییرات عملکرد برای هر شهرستان، از مدل‌های رگرسیونی مبتنی بر توابع چندجمله‌ای خطی (معادله ۱)، درجه دو (معادله ۲) و درجه سه (معادله ۳) استفاده شده است.

$$y = \beta_1 P_1(x) + \beta_0 \quad \text{معادله ۱}$$

$$y = \beta_2 P_2(x) + \beta_1 P_1(x) + \beta_0 \quad \text{معادله ۲}$$

$$y = \beta_3 P_3(x) + \beta_2 P_2(x) + \beta_1 P_1(x) + \beta_0 \quad \text{معادله ۳}$$

در این معادلات $P_n(x)$ چندجمله‌ای‌های متعامد تولیدشده از مرتبه n توسط تابع $\text{poly}(x, n)$ در R هستند که بر اساس متغیر x (سال) تعریف شده‌اند. این چندجمله‌ای‌ها معمولاً بر اساس توزیع مقیاس‌بندی شده داده‌ها تعریف می‌شوند و میانگین صفر و واریانس یک دارند. β_0 عرض از مبدا، β_1 ، β_2 و β_3 ضرایب رگرسیونی هستند که نشان‌دهنده اهمیت روندهای خطی، درجه دو و درجه سه در توصیف و تفسیر تغییرات عملکرد گندم می‌باشند.

برای تحلیل روند تغییرات عملکرد گندم در منطقه مورد مطالعه، مدل‌های مختلف رگرسیونی بر اساس داده‌های تاریخی عملکرد گندم آبی و دیم انتخاب و بر اساس ضریب مدل‌ها طبقه‌بندی شدند که شامل بهبود عملکرد^۱، رکود عملکرد^۲، سقوط عملکرد^۳ و عدم بهبود^۴ می‌باشد (Chen, 2018). روش تشخیص نوع روند به صورت زیر بوده است:

مدل‌های خطی: اگر ضریب شیب (β_1) مثبت باشد، روند عملکرد بهبود در نظر گرفته شد. اگر این مقدار صفر باشد، روند عملکرد رکود تعریف شد و در صورت منفی بودن، روند عملکرد سقوط بوده است.

مدل‌های درجه دوم: در این مدل‌ها، ضریب درجه دوم (β_2) تعیین‌کننده شکل روند است. اگر β_2 مثبت باشد، منحنی به شکل U خواهد بود. در این حالت، روند عملکرد با مقایسه مقدار آن در یک‌سوم پایانی داده‌ها نسبت به یک‌سوم ابتدایی تعیین می‌شود. اگر عملکرد در بخش پایانی افزایش یافته باشد، روند بهبود محسوب می‌شود؛ در غیر این صورت، رکود عملکرد ثبت خواهد شد. اگر β_2 منفی باشد، منحنی به شکل $\cap$ است. در این وضعیت، اگر عملکرد در یک سوم پایانی کاهش یافته باشد، روند به عنوان سقوط عملکرد در نظر گرفته می‌شود؛ اما در صورت عدم کاهش، رکود عملکرد محسوب خواهد شد.

مدل‌های درجه سوم: در این مدل‌ها ضریب درجه سوم (β_3) و الگوی کلی منحنی مورد توجه قرار گرفت. اگر β_3 مثبت باشد، اوج عملکرد در نیمه دوم داده‌ها رخ داده و در صورتی که عملکرد در یک‌سوم پایانی بهبود یافته باشد، روند بهبود عملکرد محسوب شد. در غیر این صورت، رکود عملکرد در نظر گرفته شد. اگر β_3 منفی باشد، اوج عملکرد در نیمه اول داده‌ها رخ داده و در صورت کاهش عملکرد در یک‌سوم پایانی، روند سقوط عملکرد ثبت شد؛ در غیر این صورت، رکود عملکرد تعریف شد.

¹ Increasing

² Stagnating

³ Collapsed

⁴ Never Improved

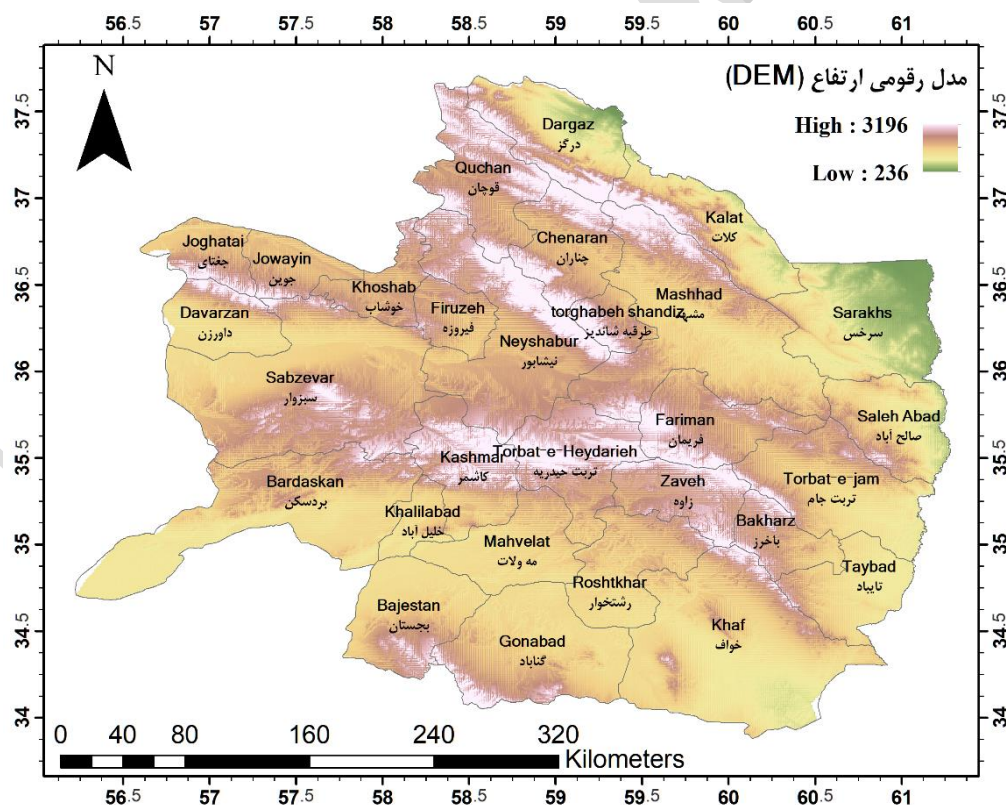
در مواردی که مدل تنها شامل عرض از مبدا بود، روند "عدم بهبود" ثبت شد. جهت انتخاب بهترین مدل، از معیار آکاییک^۱ (AIC) استفاده گردید. این معیار برای مدل‌های مختلف آماری، از جمله مدل‌های رگرسیونی و مدل‌های پیش‌بینی، به کار می‌رود و یکی از ابزارهای قدرتمند در مقایسه بین مدل‌های مختلف (دارای پارامترهای مختلف) و انتخاب مدل بهینه بر اساس داده‌های موجود محسوب می‌شود. معادله (۴) نحوه محاسبه این معیار را نشان می‌دهد:

$$AIC = 2k - 2Ln(L) \quad \text{معادله ۴}$$

در این معادله k تعداد پارامترهای مدل و L حداکثر مقدار تابع درست‌نمایی^۲ است که نشان‌دهنده کیفیت برازش مدل می‌باشد و میزان تطابق مدل با داده‌ها را نشان می‌دهد.

برای مقایسه مدل‌ها، معمولاً AIC مدل‌های مختلف محاسبه می‌شود و مدلی که کمترین مقدار AIC را داشته باشد، انتخاب می‌شود. با این حال، اگر اختلاف AIC بین دو مدل کمتر از ۲ باشد، تفاوت معنی‌داری در کیفیت مدل‌ها وجود ندارد و اگر بیشتر از ۱۰ باشد، مدل با AIC کمتر به طور معناداری بهتر است (Akaike, 1974). در این مطالعه، مقدار AIC با استفاده از تابع AIC در نرم‌افزار R محاسبه شد.

جهت تجزیه و تحلیل‌های آماری و فضایی در این پژوهش، از نرم‌افزار R برای تحلیل داده‌ها و مدل‌سازی، و از نرم‌افزار ArcGIS برای تحلیل‌های مکانی و نمایش الگوهای مکانی (جغرافیایی) استفاده شد.



شکل ۱ - موقعیت جغرافیایی شهرستان‌های استان خراسان رضوی به همراه مدل رقومی ارتفاع
Geographical position of Counties of Khorasan Razavi Province with Digital Elevation Model (DEM)

¹ Akaike Information Criterion

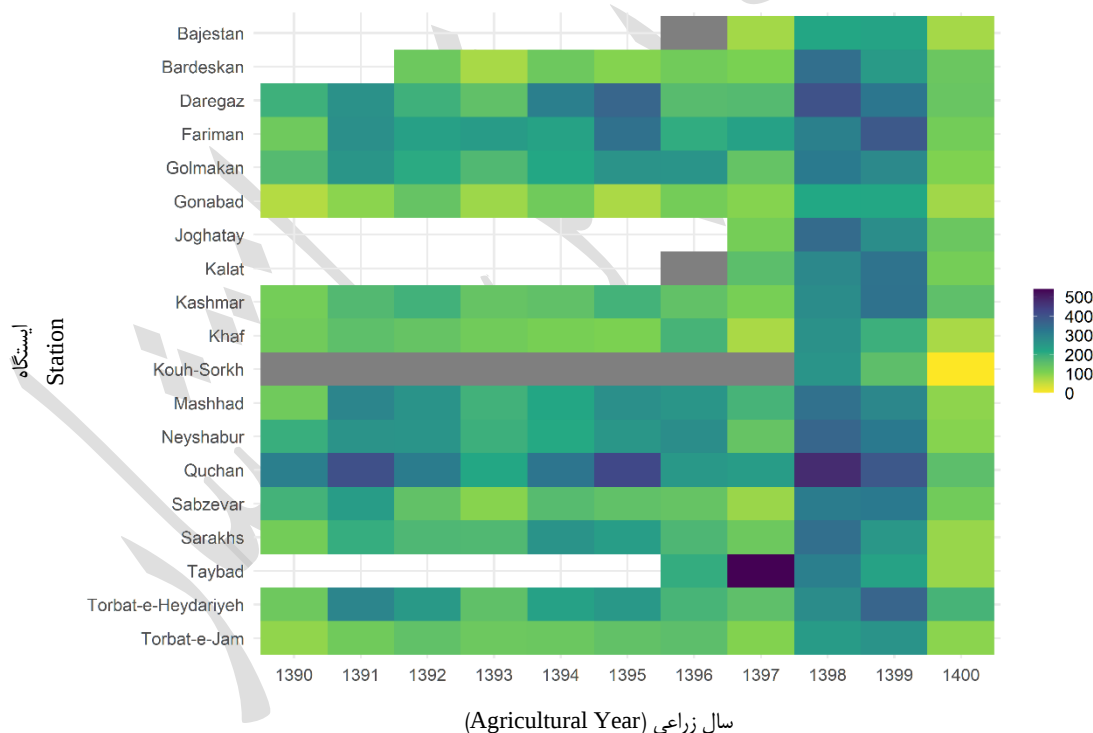
² Maximum Likelihood

نتایج و بحث

تغییرات بارش و دما

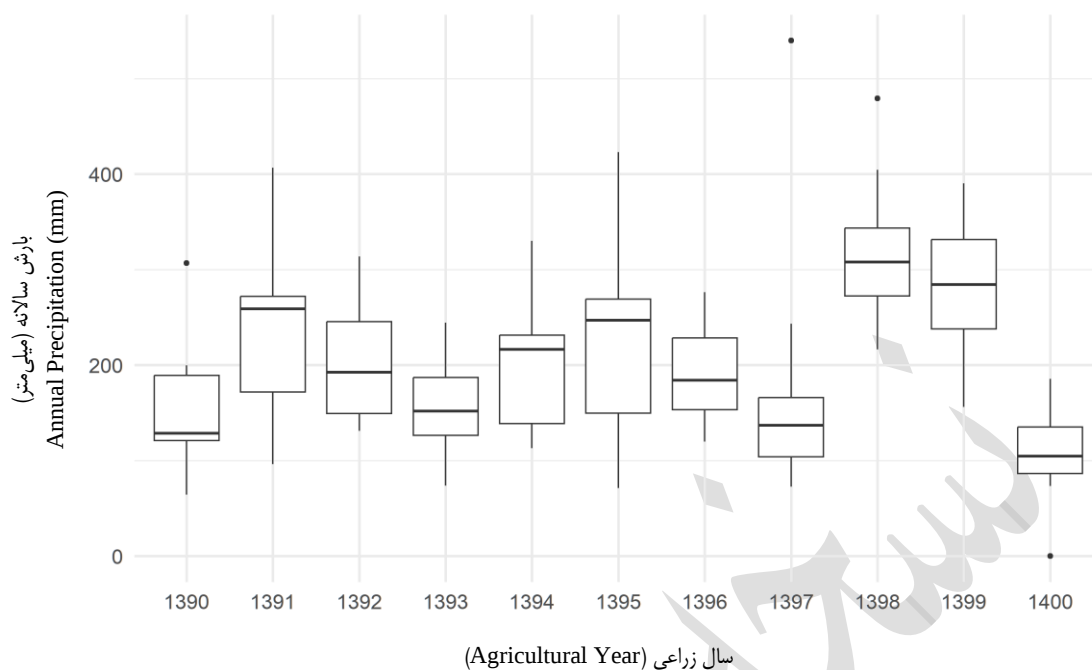
تغییرات بارش در بازه زمانی مطالعه (سال‌های زراعی ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰) شامل نقشه حرارتی تغییرات بارش سالانه به تفکیک هر ایستگاه (شکل ۲) و نمودار جعبه‌ای تغییرات سالانه در سطح استان بر اساس داده‌های ایستگاهی (شکل ۳) ارائه شده است. همچنین، تغییرپذیری دمای میانگین نیز مشابه بارش، در شکل ۴ و شکل ۵ نمایش داده شده است. بررسی داده‌ها نشان می‌دهد که مقدار بارش در سطح استان در این دوره بین ۶۰ تا ۴۳۰ میلی‌متر متغیر بوده است. در اکثر ایستگاه‌ها، به‌ویژه در نیمه دوم دوره مطالعه، نوسانات بارشی شدیدی مشاهده می‌شود. به‌طور خاص، در سال زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰، افت قابل‌توجه بارش در بیشتر ایستگاه‌ها رخ داده که منجر به خشکسالی شدید در سطح استان و در نتیجه کاهش تولید و عملکرد بسیاری از محصولات کشاورزی شد.

در خصوص تغییرات دمای میانگین، مقدار آن در سطح استان بین ۱۰ تا ۲۲/۵ درجه سانتی‌گراد متغیر بوده است. میانگین دمای استان در برخی سال‌ها نوسانات قابل‌توجهی داشته است؛ به‌عنوان مثال، در سال زراعی ۱۳۹۱-۱۳۹۲، دمای میانگین استان ۲/۵ درجه سانتی‌گراد نسبت به سال قبل افزایش یافت. همچنین، در سال زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰، بالاترین مقدار دمای میانگین در سطح استان با حدود ۱۸ درجه سانتی‌گراد ثبت شده که بالاترین مقدار در دوره مطالعه محسوب می‌شود. این افزایش دما، همراه با کاهش بارش، شدت خشکسالی را در سال پایانی مطالعه افزایش داده و تأثیر چشمگیری بر کاهش عملکرد و تولید محصولات کشاورزی، به‌ویژه گندم داشته است.

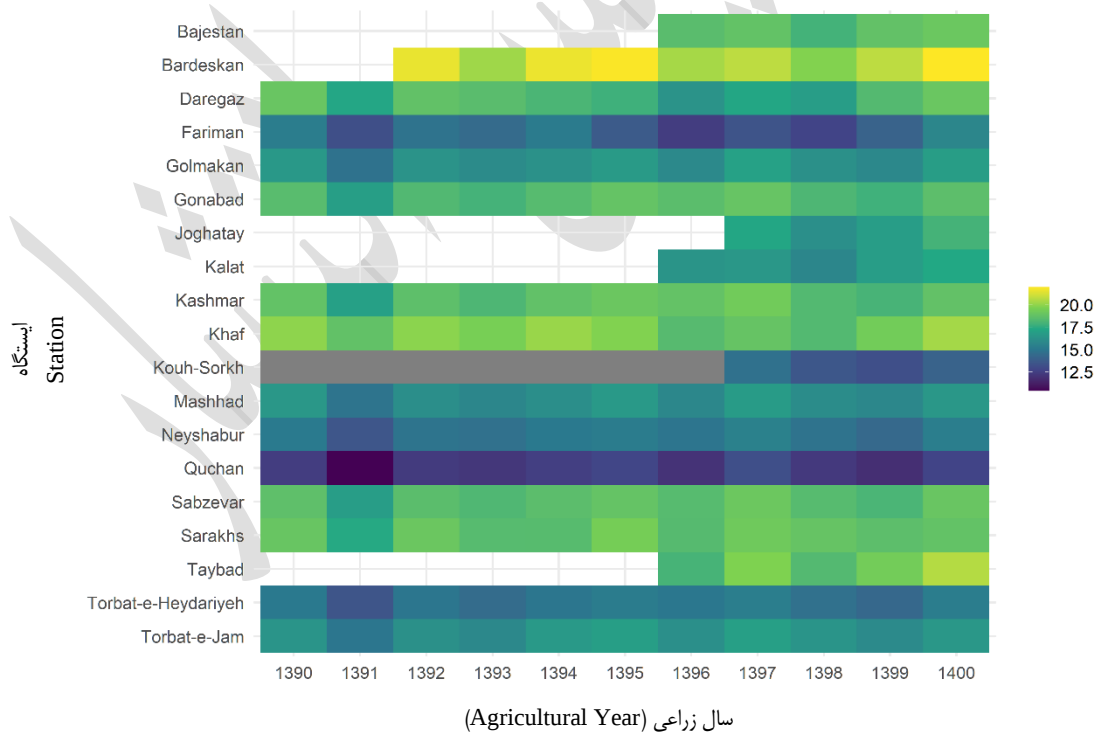


شکل ۲- نقشه حرارتی تغییرات بارش سالانه برای ایستگاه‌های سینوپتیک در استان خراسان رضوی در بازه زمانی ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰.

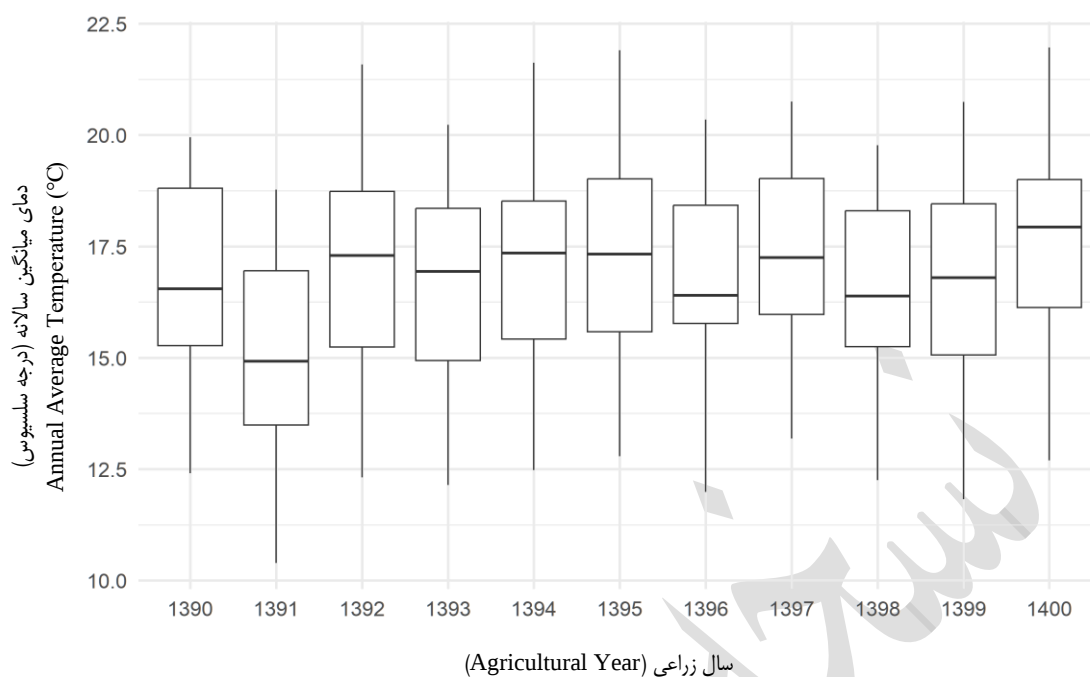
Figure 2- The heatmap of annual precipitation variations across synoptic stations in Khorasan Razavi during 2011-2021.



شکل ۳- نمودار جعبه ای بارش سالانه ایستگاه‌های مختلف در استان خراسان رضوی در بازه زمانی ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰.
Figure 3-Box plot of annual precipitation across synoptic stations in Khorasn Razavi province 2011–2021.



شکل ۴- نقشه حرارتی تغییرات دمای میانگین سالانه برای ایستگاه‌های سینوپتیک در استان خراسان رضوی در بازه زمانی ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰.
Figure 6- The heatmap of annual average temperature variations across synoptic stations in Khorasan Razavi during 2011–2021.



شکل ۵- نمودار جعبه ای دماهای میانگین سالانه ایستگاه‌های سینوپتیک در استان خراسان رضوی در بازه زمانی ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰.

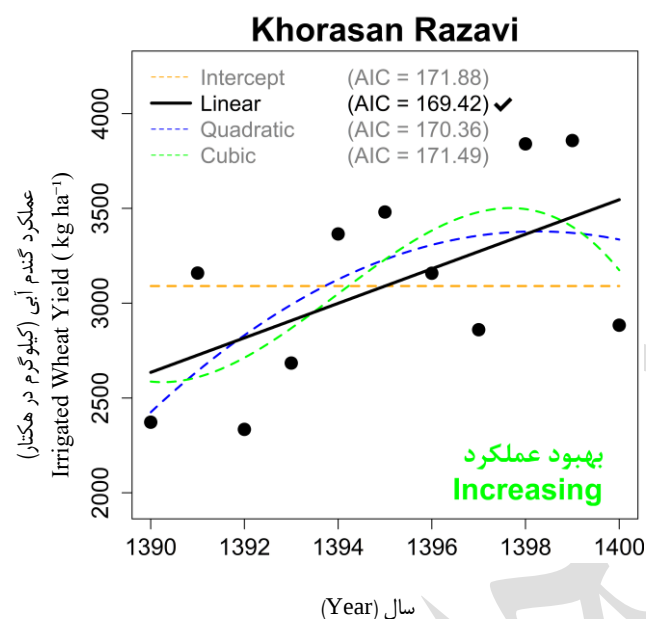
Figure 5- Box plot of the annual average temperatures across synoptic stations in Khorasn Razavi province during 2011–2021.

عملکرد گندم آبی

نتایج حاصل از تحلیل عملکرد گندم آبی در ۲۹ شهرستان استان خراسان رضوی طی بازه زمانی از ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰ نشان داد که میانگین عملکرد استان روندی افزایشی داشته و حدوداً یک تن در هکتار بهبود یافته است (شکل ۶). همچنین میانگین ۱۱ ساله عملکرد گندم آبی در سطح استان طی همین بازه زمانی، ۳۰۹۰ کیلوگرم در هکتار محاسبه شد. بیشترین عملکرد گندم آبی مربوط به سال زراعی ۱۳۹۹-۱۳۹۸ به میزان ۳۸۵۷ کیلوگرم در هکتار و کمترین عملکرد آن مربوط به سال زراعی ۱۳۹۰-۱۳۸۹ به میزان ۲۳۷۲ کیلوگرم در هکتار بود. بررسی نمودارهای رگرسیونی عملکرد گندم آبی در سطح شهرستان‌ها نشان می‌دهد که حدود نیمی از شهرستان‌های استان (۱۴ شهرستان) روند بهبود عملکرد را شاهد بودند، در حالی که پنج شهرستان در وضعیت رکود، نه شهرستان در وضعیت عدم بهبود، و یک شهرستان در شرایط سقوط عملکرد قرار دارند. علاوه بر این، تغییرات سالانه عملکرد در شهرستان‌ها از الگوی ثابت و منظمی پیروی نمی‌کند (شکل ۷)، که این امر می‌تواند ناشی از تأثیرات متنوع عوامل محیطی، اقلیمی و مدیریتی باشد.

در بسیاری از شهرستان‌ها، نقش مدیریت زراعی و سیاست‌های حمایتی در تعیین روند کلی عملکرد گندم برجسته است. تقریباً نیمی از شهرستان‌ها در طول دوره مطالعه، بهبود عملکردی پایدار و پیوسته را شاهد بودند (شکل ۷). این موضوع بیانگر تأثیر مثبت مدیریت بهینه زراعی، از جمله انتخاب ارقام مناسب، انتخاب تاریخ کاشت مناسب، به‌کارگیری روش‌های نوین کشاورزی، بهبود نهاده‌ها، و تطبیق با شرایط اقلیمی متغیر در افزایش عملکرد گندم در این مناطق است. با این وجود، همان‌طور که قبلاً اشاره شد، میزان بارش به‌ویژه در نیمه دوم دوره مطالعه نوسانات قابل‌توجهی داشت (شکل ۳). به‌خصوص در سال پایانی دوره (سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹)، کاهش شدید بارش و افزایش دمای میانگین در سطح استان منجر به وقوع خشکسالی در استان شد. وقوع خشکسالی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت به‌ویژه در مراحل رشدی بحرانی، می‌تواند عملکرد گندم را کاهش دهند (Challinor et al., 2014). علاوه بر این، تحلیل تغییرات بارش به تفکیک ایستگاه‌ها، بیانگر شدت تغییرات بارندگی در نیمه دوم دوره مطالعه است (شکل ۲). این تغییرات اقلیمی و به‌ویژه کاهش بارش در سال انتهایی مطالعه، به وضوح بر کاهش، رکود و عدم بهبود عملکرد در بسیاری از شهرستان‌های استان، تأثیرگذار بوده است.

در بررسی روند تغییرات عملکرد گندم آبی، الگوی نزدیکی مقادیر AIC در مدل‌های مختلف به‌طور مکرر مشاهده شد، به طوری که اختلاف بین مقادیر AIC در بسیاری از مناطق کمتر از ۲ می‌باشد و می‌توان گفت که این تفاوت آماری ناچیز تلقی می‌شود (Burnham et al., 2011). این موضوع نشان می‌دهد که الگو یا مدل تغییرات عملکرد در بسیاری از شهرستان‌ها تفاوت چندانی نداشته و بنابراین تفاوت بین مدل‌های ساده و پیچیده در توضیح این روندها اندک است. در چنین شرایطی، به‌منظور حفظ دقت و سادگی تحلیل، در تمام موارد، کمترین مقدار AIC به‌عنوان معیار انتخاب مدل بهینه در نظر گرفته شد.

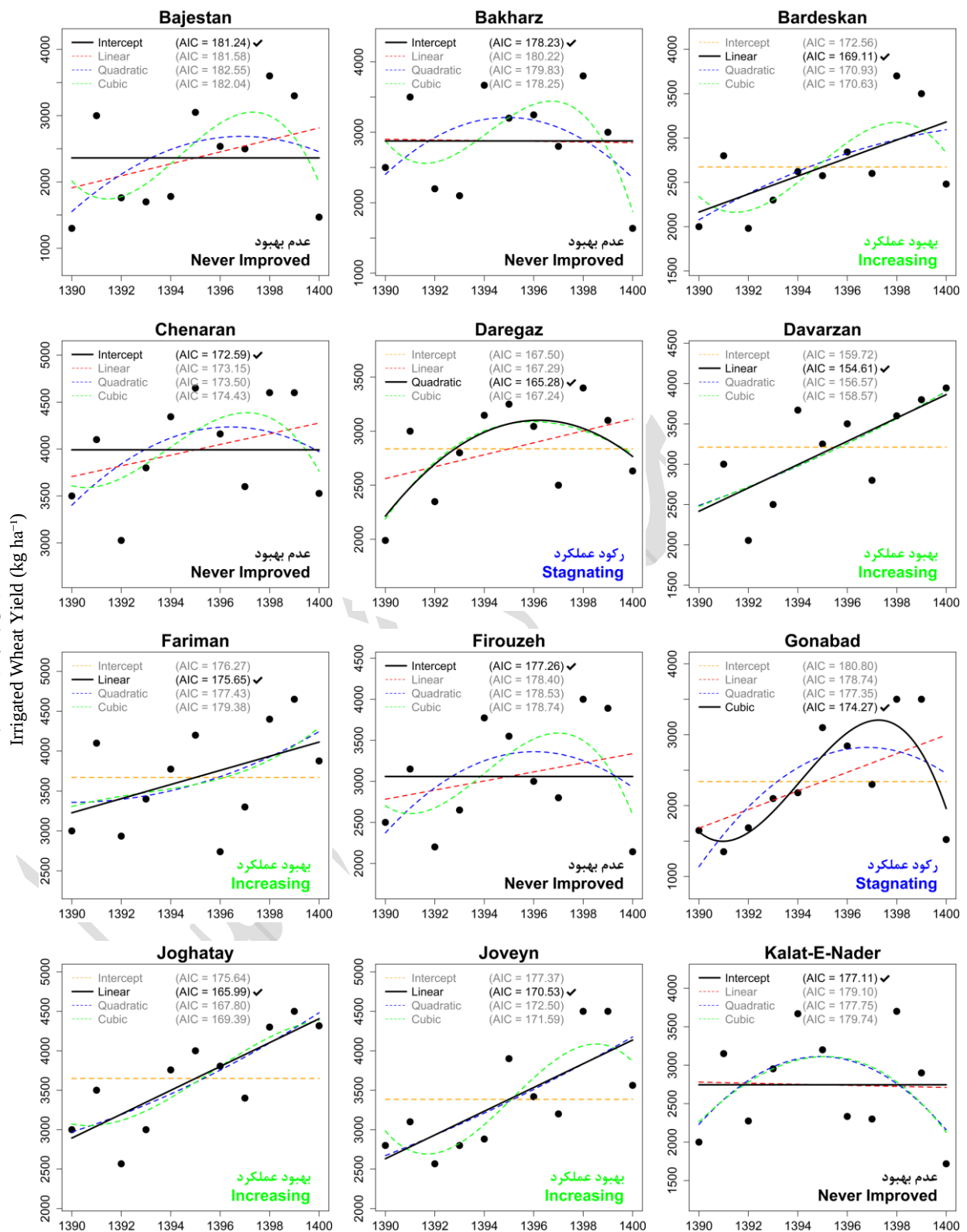


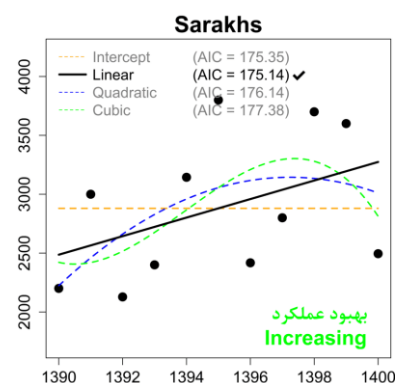
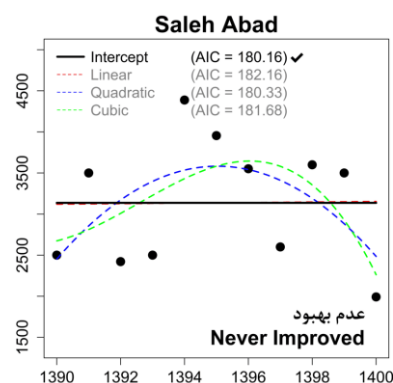
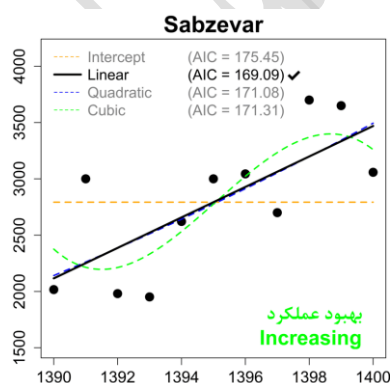
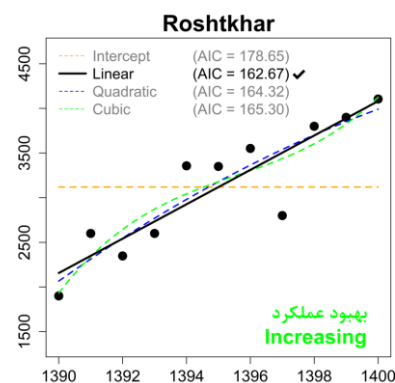
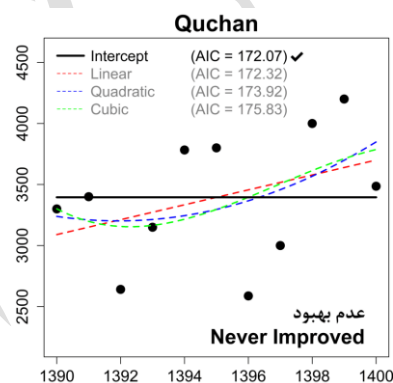
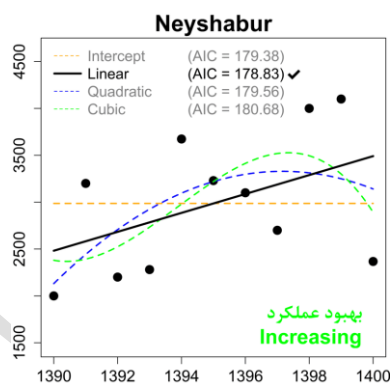
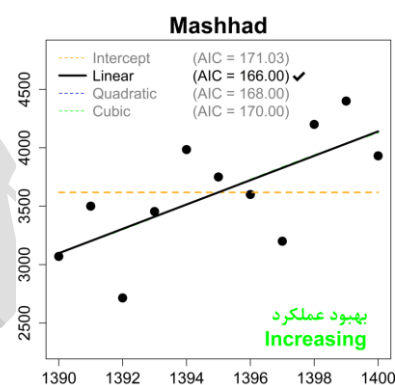
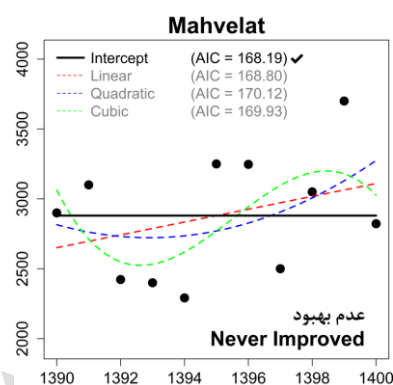
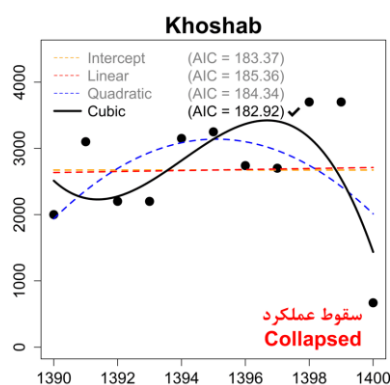
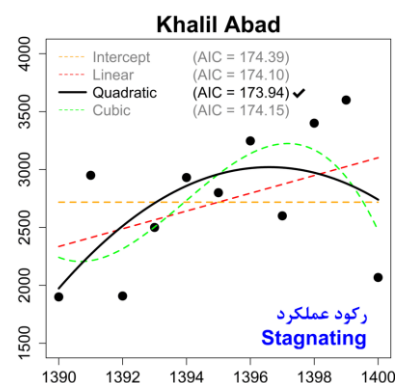
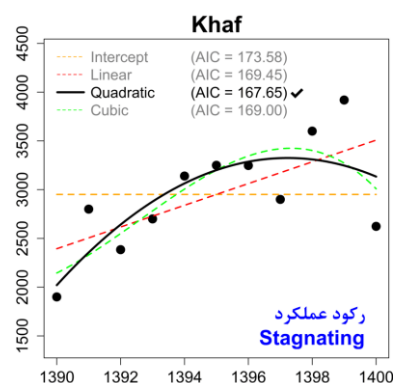
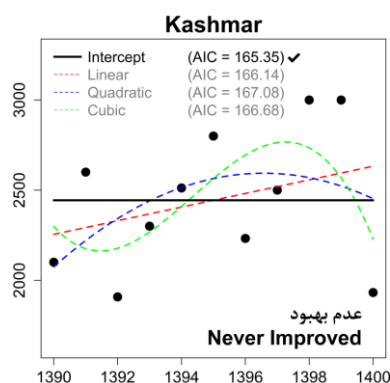
شکل ۶- روند تغییرات میانگین عملکرد گندم آبی طی ۱۱ سال در استان خراسان رضوی در بازه زمانی ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰.

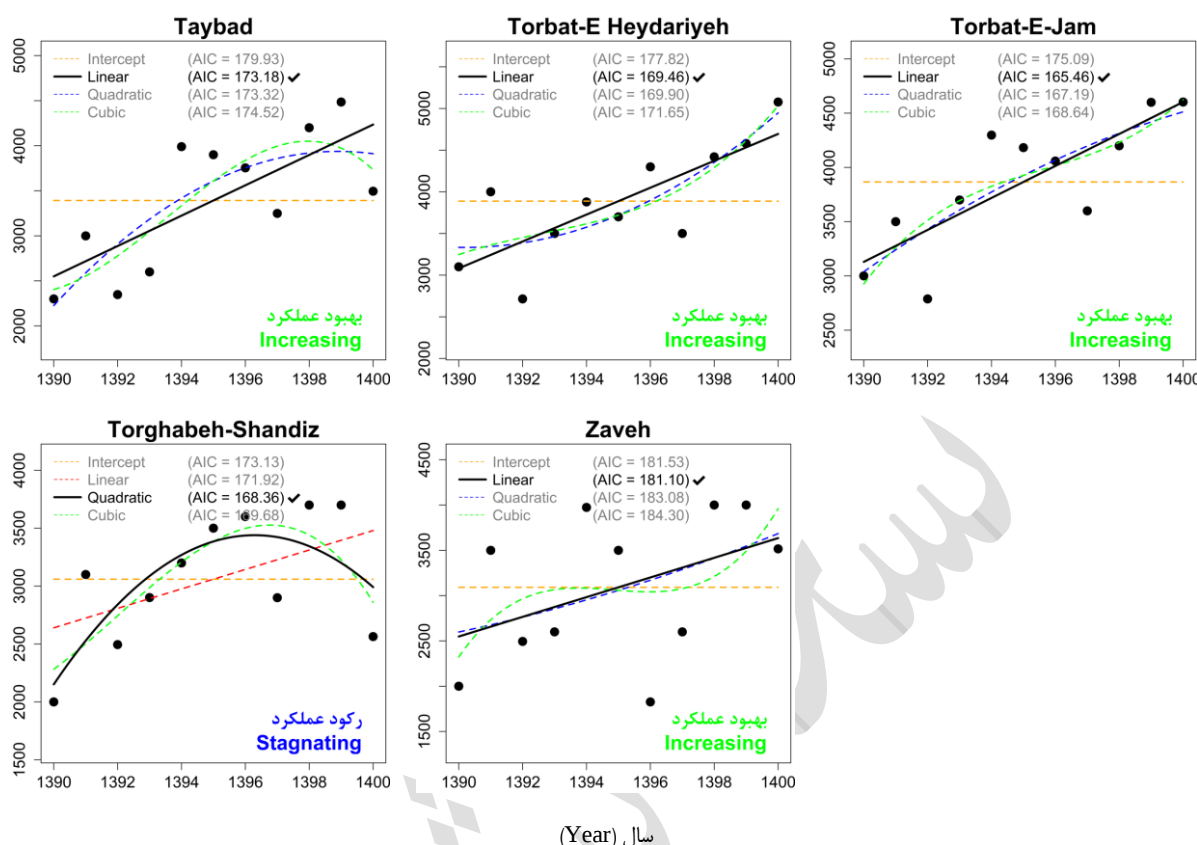
Figure 6 – The trend of variations in the average yield of irrigated wheat in Khorasan Razavi province during 2011–2021.

نمودارهای زمانی عملکرد نشان داد که شهرستان‌های رشتخوار و تربت حیدریه با حدود ۲ تن افزایش (به ترتیب از ۲/۱ به ۴/۱ تن در هکتار و از ۳/۱ به ۵/۱ تن در هکتار) در طول بازه زمانی مطالعه، بیشترین بهبود عملکرد را داشتند. همچنین، شهرستان تربت حیدریه، بالاترین عملکرد (۵/۱ تن در هکتار) را در میان سایر شهرستان‌ها در سال انتهایی مطالعه به خود اختصاص داد. از سوی دیگر، شهرستان خوشاب با حدود ۲ تن در هکتار کاهش در طول بازه زمانی مطالعه، بیشترین سقوط عملکرد را در مقایسه با دیگر مناطق شاهد بود؛ به طوری که عملکرد از ۲/۷ تن در هکتار به حدود ۰/۷ تن در هکتار کاهش یافت. شهرستان‌هایی که بهبود عملکرد را شاهد بودند شامل بردسکن، داورزن، فریمان، جغتای، جوین، مشهد، نیشابور، رشتخوار، سبزوار، سرخس، تایباد، تربت حیدریه، تربت جام و زاهد بودند. نکته قابل توجه درباره تمامی این شهرستان‌ها این است که مدل انتخاب شده برای تحلیل روند عملکرد در همه آن‌ها مدل خطی بود، که نشان‌دهنده شیب ثابت بهبود عملکرد در این مناطق است. این روند می‌تواند بیانگر تداوم اجرای سیاست‌های حمایتی، بهره‌گیری از ارقام سازگار، بکارگیری روش‌های پیشرفته مدیریت زراعی، بهبود دسترسی به نهاده‌های کشاورزی و استفاده از فناوری‌های مدرن در این شهرستان‌ها باشد. شهرستان‌های بجستان، باخرز، چناران، فیروزه، کلات، کاشمر، مهاباد، قوچان و صالح آباد در وضعیت عدم بهبود و شهرستان‌های درگز، گناباد، خواف خلیل آباد و طرقبه-شاندیز در وضعیت رکود عملکرد قرار داشتند. این موضوع نشان‌دهنده ثبات یا نبود تغییرات معنادار در عملکرد گندم طی سال‌های مطالعه است. در بسیاری از این شهرستان‌ها، نمودارهای روند عملکرد (شکل ۷)، نوسانات قابل توجهی را نشان داد که این موضوع تأثیر عوامل اقلیمی شامل تغییرات دمایی و نوسانات بارندگی به‌ویژه در سال انتهایی مطالعه را برجسته می‌سازد (شکل ۲). از میان شهرستان‌های استان، تنها شهرستان خوشاب در وضعیت سقوط عملکرد قرار داشت، عملکرد این شهرستان در سال انتهایی مطالعه افت چشمگیری داشته به طوری که از ۳/۷ تن در هکتار در سال زراعی ۱۳۹۸-۱۳۹۹ به ۰/۷ تن در هکتار در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ کاهش عملکرد داشت. یک دلیل این کاهش، خشکسالی در سال انتهایی مطالعه است؛ اما با توجه به شدت افت عملکرد در این شهرستان، احتمال تأثیر سایر عوامل مانند سیلاب یا تگرگ نیز وجود دارد و نیاز به بررسی دقیق‌تر دارد. به طور کلی در بسیاری از شهرستان‌ها افت عملکرد در سال انتهایی مطالعه (سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹) نسبت به سال‌های قبل دیده می‌شود. دلیل این موضوع همان‌طور که اشاره شد، خشکسالی سال انتهایی در بسیاری از شهرستان‌های استان می‌باشد. این موضوع، به وضوح در روند تغییرات عملکرد شهرستان‌هایی مانند بجستان، باخرز، چناران، فیروزه، کلات، کاشمر، خلیل آباد، نیشابور، صالح آباد، سرخس و گناباد نیز دیده شد.

عملکرد گندم آبی (کیلوگرم در هکتار)







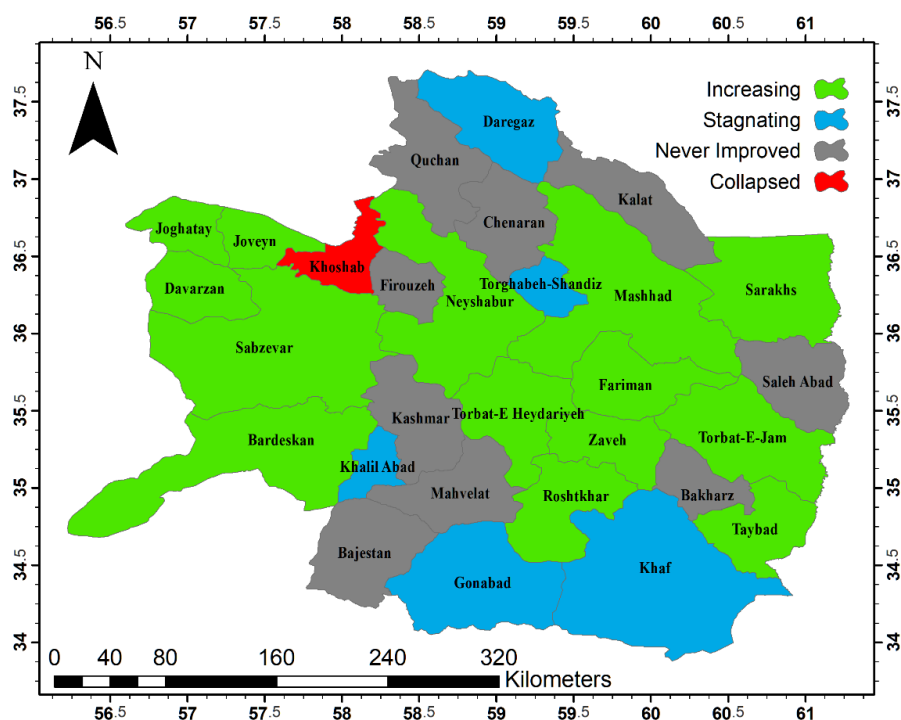
شکل ۷- روند تغییرات عملکرد و ثبات عملکرد گندم آبی در استان خراسان رضوی در بازه زمانی ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰.

Figure 7- The trend of variations and stability of irrigated wheat yield across 29 studied counties in Khorasan Razavi province during 2011–2021.

نقشه مکانی تغییرات عملکرد گندم آبی در استان خراسان رضوی (شکل ۸) نشان می‌دهد که روند بهبود عملکرد عمدتاً در شهرستان‌های مرکزی استان متمرکز است، درحالی‌که شهرستان‌های جنوبی و شمالی استان عمدتاً روند رکود یا عدم بهبود عملکرد را شاهد بودند. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، این مسئله به نوسانات متغیرهای اقلیمی در این مناطق به خصوص در سال انتهایی مطالعه مرتبط است. به طور دقیق‌تر در بخش‌های جنوبی و شمالی استان مانند شهرستان‌های گناباد، بجستان و خواف (جنوب استان) و شهرستان‌های کلات، قوچان و درگز (شمال استان)، با توجه به بهبود مدیریت زراعی و بهبود بارش‌ها تا قبل از سال زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰، روند کلی عملکرد به صورت خطی و مثبت با شیب ثابت بوده، ولی کاهش شدید بارش (شکل ۳) و افزایش نسبی دما (شکل ۵) در سال زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰، موجب وقوع خشکسالی و تنش آبی و در نتیجه کاهش شدید عملکرد شده به طوری که روند مثبت مدیریت زراعی و بارش‌های سال‌های قبل را خنثی کرده است. به‌عنوان مثال، برای شهرستان گناباد در سال‌های زراعی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ و ۱۳۹۸-۱۳۹۹ به ترتیب ۲۱۶ و ۲۱۸ میلی‌متر بارش ثبت شده است که در سال زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ به ۸۰ میلی‌متر کاهش یافته است. علاوه بر این، با توجه به این که اکثر شهرستان‌های استان کاهش بارندگی و افزایش نسبی دما را در سال انتهایی مطالعه شاهد بودند، با این حال کاهش عملکرد برای شهرستان‌های مرکزی نسبت به جنوبی و شمالی کمتر بوده است. این موضوع حاکی از آن است که تفاوت در سطح دسترسی به فناوری‌های نوین کشاورزی، نهاده‌های مورد نیاز، و برنامه‌های حمایتی می‌تواند بر روند عملکرد در این شهرستان‌ها تأثیرگذار باشد. برای مثال، Jahan et al., (2023) ضمن تحلیل عوامل مؤثر بر تغییرات عملکرد گندم آبی در استان خراسان شمالی، گزارش کردند که ۳۶ درصد از تغییرات عملکرد گندم آبی استان خراسان شمالی در فاصله سال‌های ۲۰۰۹-۱۹۸۰ توسط عوامل محیطی (دما و بارندگی) و ۳۷ درصد آن توسط عوامل مدیریتی توضیح داده می‌شود. این موضوع نشان دهنده نقش و اهمیت عوامل مدیریتی در تخفیف و سازگاری با تغییرات اقلیمی در کوتاه‌مدت و بلندمدت می‌باشد.

یافته‌های این پژوهش با نتایج مطالعه (Koocheki & Nasiri Mahalati, 2019) که بیان نمودند میانگین خلاء عملکرد گندم آبی در استان خراسان رضوی تا پیش از سال ۱۳۹۰ حدود ۴ تن در هکتار (معادل ۵۷ درصد از عملکرد پتانسیل) بوده است، اما از سال ۱۳۹۰ به بعد، این خلاء روند کاهشی داشته، به‌طوری‌که در سال ۱۳۹۳ میزان خلاء قابل مهار آن به ۴۸ تا ۵۰ درصد عملکرد پتانسیل رسیده است، همخوانی داشت. این کاهش علاوه بر نشان دادن پیشرفت در کنترل خلاء عملکرد، بیانگر وجود ظرفیتی قابل‌توجه برای افزایش عملکرد از طریق بهینه‌سازی مدیریت زراعی در استان نیز می‌باشد. با این حال، بررسی روند تغییرات عملکرد گندم آبی نشان می‌دهد که میانگین عملکرد از ۲/۴ تن در هکتار در سال ۱۳۹۰ به ۳/۹ تن در هکتار در سال ۱۳۹۹ افزایش یافته، اما در سال ۱۴۰۰ مجدداً به ۲/۹ تن در هکتار کاهش یافته است (شکل ۶). این روند نشان‌دهنده بهبود نسبی عملکرد طی دهه گذشته است، اما کاهش عملکرد در سال ۱۴۰۰ نسبت به سال ۱۳۹۹ همان‌طور که اشاره شد، نشان‌دهنده تأثیر عواملی همچون نوسانات اقلیمی، کاهش بارندگی، تنش‌های گرمایی و محدودیت منابع آبی است. این نوسانات همچنین نشان می‌دهد که باوجود اجرای روش‌های مدیریتی بهینه، چالش‌های اقلیمی و محیطی همچنان بر پایداری تولید گندم در استان تأثیرگذار هستند. نتایج مطالعاتی که در سطح استان خراسان رضوی برای گندم، طی سال‌های ۱۳۷۲ تا ۱۳۸۸ انجام شد، نشان داد که ۴۰ تا ۷۷ درصد از تغییرات عملکرد گندم را می‌توان با متغیرهای اقلیمی توجیه کرد (Pooya Nasab et al., 2018). بنابراین، علاوه بر بهبود مدیریت زراعی و استفاده از فناوری‌های نوین کشاورزی، اتخاذ راهبردهای مؤثر برای افزایش تاب‌آوری نظام‌های زراعی در برابر تغییرات آب‌وهوایی و کاهش وابستگی به منابع آبی ضروری به نظر می‌رسد. از سوی دیگر، با توجه به خلاء عملکرد قابل‌توجهی که در مطالعات پیشین گزارش شده است، میزان رشد ثبت‌شده در این دوره چشمگیر نبوده و حاکی از آن است که ظرفیت‌های بالقوه برای افزایش بهره‌وری هنوز به‌طور کامل محقق نشده‌اند.

با این حال، باید توجه داشت که داده‌های ارائه شده توسط وب‌سایت‌های جهاد کشاورزی و آمارنامه‌های رسمی، تحت تأثیر مرزهای جغرافیایی و اداری قرار دارند. به عنوان مثال، در برخی موارد مشاهده می‌شود که شهرستانی دارای رکود یا کاهش عملکرد بوده، درحالی‌که شهرستان‌های هم‌جوار بهبود عملکرد داشته‌اند. نمونه بارز این مسئله در شهرستان باخرز دیده می‌شود که درحالی‌که سه شهرستان اطراف آن (تایباد، تربت‌جام، زاره) روند بهبود عملکرد داشته‌اند، این شهرستان کاهش عملکرد را شاهد بود. همچنین، شهرستان خوشاب، علی‌رغم اینکه شهرستان‌های جوبین، سبزوار و نیشابور بهبود عملکرد داشته‌اند، دچار سقوط چشمگیر عملکرد شده است. این الگو در شهرستان طرقبه‌شاندیز نیز مشاهده می‌شود، به‌طوری‌که این شهرستان رکود عملکرد داشته، درحالی‌که دو شهرستان هم‌جوار آن (نیشابور و مشهد) بهبود عملکرد داشته‌اند. از آنجا که مرزهای اداری شهرستان‌ها لزوماً با مرزهای اقلیمی همخوانی ندارند، اراضی مرزی این شهرستان‌ها ممکن است شرایط دمایی و بارشی بسیار مشابهی با شهرستان‌های مجاور داشته باشند، اما داده‌های عملکردی به‌طور جداگانه و بر اساس مرزهای اداری ثبت شده است. این موضوع نشان می‌دهد که تأثیر متغیرهای هواشناسی بر عملکرد گندم آبی ممکن است به‌طور کامل منعکس نشده باشد و تفاوت‌های مشاهده‌شده در عملکرد، علاوه بر عوامل اقلیمی، می‌تواند ناشی از روش‌های جمع‌آوری و گزارش‌دهی داده‌ها نیز باشد.



شکل ۸- نقشه مکانی تغییرات عملکرد گندم آبی در ۲۹ شهرستان استان خراسان رضوی در بازه زمانی ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰.

Figure 8- The map of spatial variations of irrigated wheat yield across 29 studied counties in Khorasan Razavi province during 2011–2021.

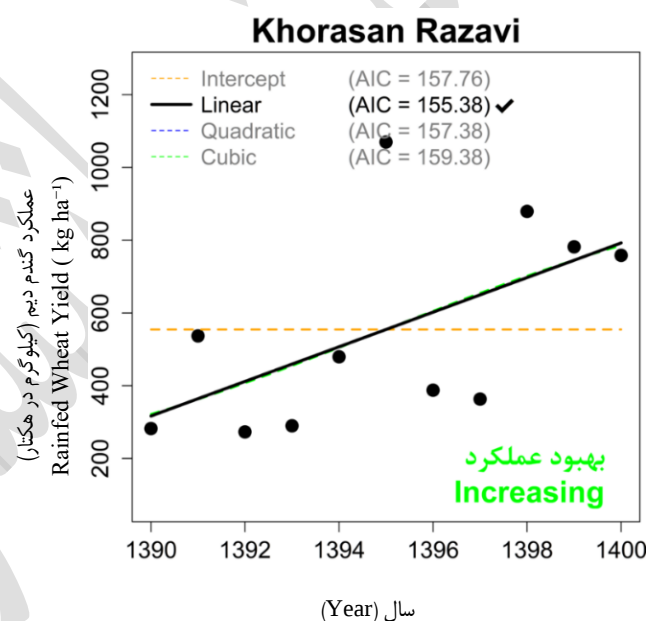
عملکرد گندم دیم

بررسی و تحلیل عملکرد گندم دیم برای شهرستان‌های استان خراسان رضوی نشان می‌دهد که عملکرد میانگین استان تغییرات متفاوتی را در بازه زمانی مطالعه شاهد بوده است، ولی به طور کلی، شیب خط رگرسیونی میانگین عملکرد در سطح استان نشان‌دهنده بهبود عملکرد به میزان ۵۰۰ کیلوگرم در هکتار می‌باشد (شکل ۹). همچنین بیشترین عملکرد میانگین گندم دیم در سطح استان، مربوط به سال زراعی ۱۳۹۴-۱۳۹۵ به میزان ۱۰۷۰ کیلوگرم در هکتار و کمترین آن، مربوط به سال زراعی ۱۳۹۱-۱۳۹۲ به میزان ۲۷۳ کیلوگرم در هکتار بود (شکل ۹). عملکرد میانگین استانی گندم دیم از سال زراعی ۱۳۹۴-۱۳۹۵ به بعد تقریباً دو برابر افزایش یافت، به‌طوری‌که پیش از این سال، عملکرد میانگین ۳۷۲ کیلوگرم در هکتار بود، درحالی‌که پس از آن به ۷۰۶ کیلوگرم در هکتار رسید (داده‌های مربوط به این تغییر پردازش شدند اما در این مطالعه ارائه نشدند).

رسم نمودارهای تغییرات عملکرد در سطح شهرستان‌ها، نشان داد که برخی شهرستان‌ها روند افزایشی داشتند، به ویژه در نیمه دوم مطالعه که روند بهبود عملکرد چشمگیری مشاهده شده است (شکل ۱۰). مطابق با این نمودارها، تغییرات عملکرد گندم دیم در سطح استان از الگوی مشخص و پایداری تبعیت نمی‌کند. با توجه به اقلیم خشک و نیمه‌خشک حاکم بر استان، این نوسانات عمدتاً می‌تواند ناشی از تغییرات اقلیمی، به‌ویژه نوسانات دما و بارش باشد، که تأثیر مستقیم بر رشد و عملکرد گندم دیم دارد (شکل ۲ و شکل ۴). این موضوع در مطالعات متعدد مورد تأیید قرار گرفته و بر اهمیت مدیریت ریسک‌های اقلیمی و به‌کارگیری راهکارهای سازگار با تغییرات آب‌وهوایی تأکید شده است (Farajzadeh et al., 2011). بررسی مدل‌های روند عملکرد (شکل ۱۰) نشان می‌دهد که از میان شهرستان‌های مورد مطالعه، ده شهرستان (چناران، فریمان، جغتای، جوین، کاشمر، نیشابور، سرخس، تربت حیدریه، طرقبه-شاندیز و زاول) در وضعیت بهبود عملکرد، یک شهرستان (خوشاب) در وضعیت رکود، و هشت شهرستان (باخرز، درگز، فیروزه، کلات، مشهد، قوچان، صالح آباد و تربت جام) در وضعیت عدم بهبود قرار دارند. همچنین، در ده شهرستان (بجستان، بردسکن،

داورزن، گناباد، خواف، خلیل آباد، مهولات و رشتخوار)، داده‌های کافی درباره گندم دیم در دسترس نبود. این امر نشان می‌دهد که کشت گندم دیم در این مناطق یا چندان رایج نیست یا در برخی سال‌ها به صورت محدود انجام می‌شود. بنابراین، این شهرستان‌ها در پردازش و تحلیل نهایی جهت بررسی روند و میانگین‌گیری لحاظ نشدند. لازم به ذکر است که در بین شهرستان‌های مورد بررسی، هیچ موردی با وضعیت سقوط عملکرد مشاهده نشد.

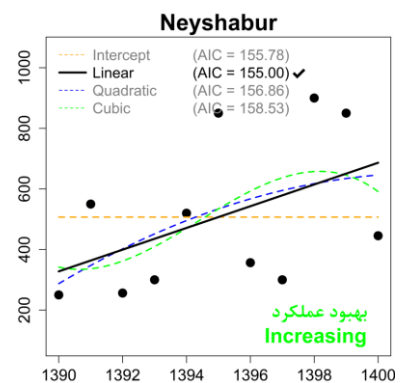
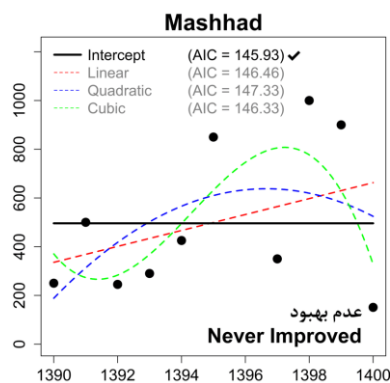
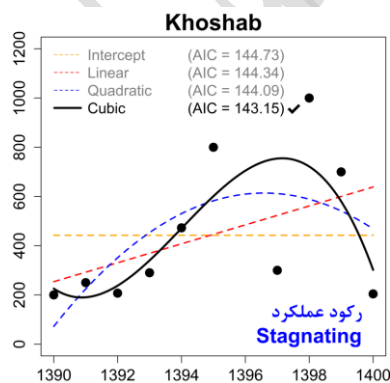
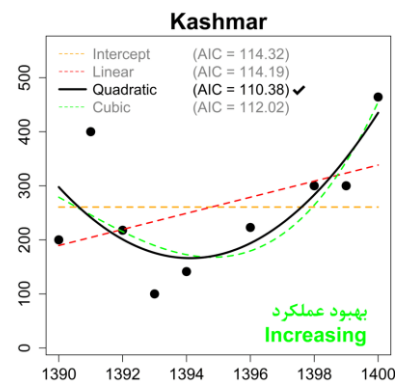
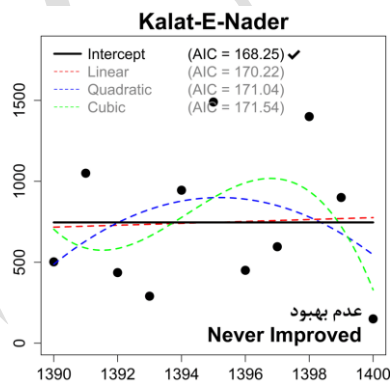
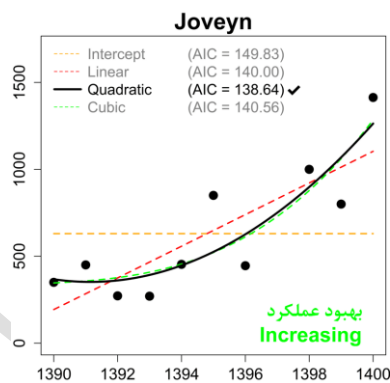
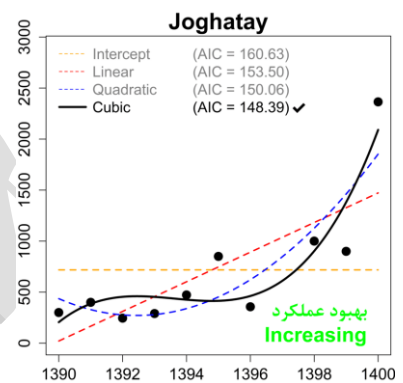
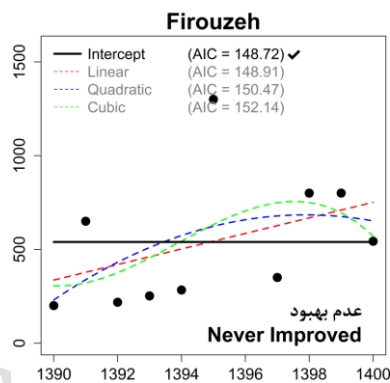
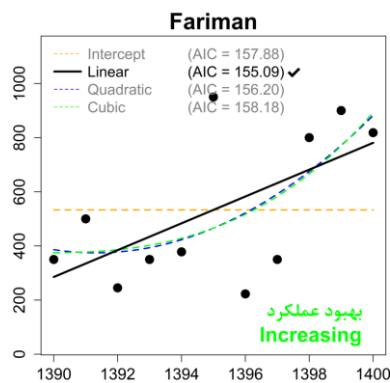
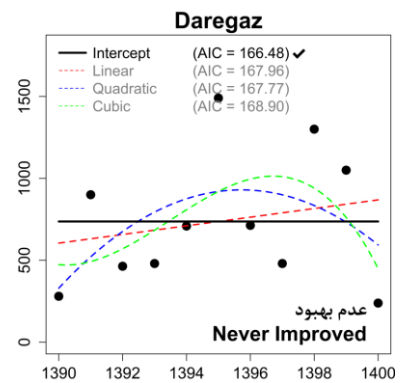
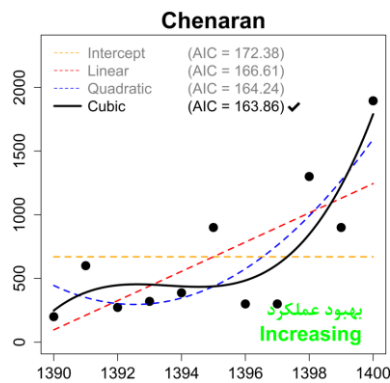
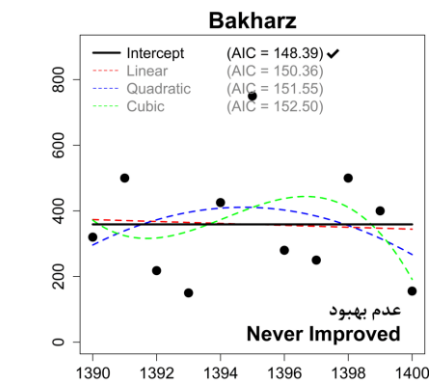
نمودارهای تغییرات زمانی عملکرد نشان می‌دهد که بسیاری از شهرستان‌ها طی سال‌های زراعی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ و ۱۳۹۸-۱۳۹۹ رشد چشمگیری در عملکرد گندم دیم شاهد بودند (شکل ۱۰). همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، این افزایش عمدتاً به دلیل افزایش بارش در سطح استان طی این سال‌ها بوده است (شکل ۳). با این حال، در سال زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ (سال انتهایی مطالعه)، کاهش شدید بارش موجب افت عملکرد در بسیاری از شهرستان‌ها شد (شکل ۲). با وجود این، برخی شهرستان‌ها مانند سرخس، جغتای، چناران و جوبین از این روند تبعیت نکردند و علی‌رغم کاهش بارش، بهبود عملکرد چشمگیری در سال زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ ثبت کردند، به طوری که عملکرد گندم دیم در این شهرستان‌ها نسبت به سال‌های ابتدایی مطالعه به ترتیب ۲/۱، ۲، ۱/۷ و ۱ تن در هکتار افزایش یافت. این الگوی متفاوت در شهرستان‌های جوبین، جغتای، سبزوار و داورزن که همگی در غرب استان قرار دارند، برای گندم آبی نیز مشاهده شد. بنابراین، رفتار متفاوت تغییرات عملکرد در این شهرستان‌ها طی سال انتهایی مطالعه ممکن است ناشی از بهبود مدیریت زراعی و استفاده از بذره‌های مقاوم‌تر به خشکی باشد. اظهار نظر قطعی در این خصوص، نیازمند دسترسی به داده‌های مدیریتی جامع و بررسی بیشتر می‌باشد.

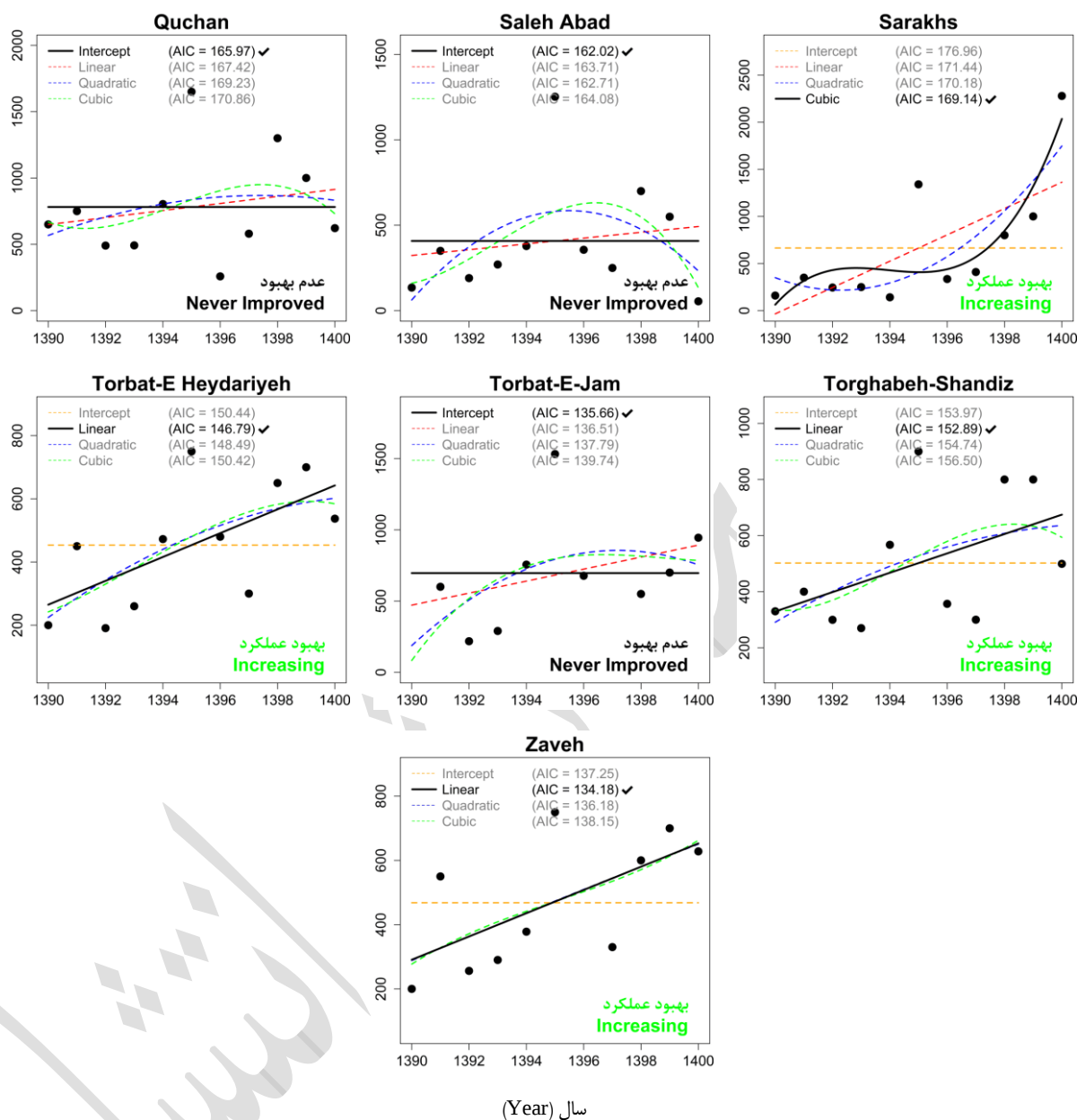


شکل ۹- روند تغییرات میانگین عملکرد گندم دیم در استان خراسان رضوی در بازه زمانی ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰.

Figure 9 – The trend of variations in the average yield of rainfed wheat in Khorasan Razavi province during 2011–2021.

عملکرد گندم دیم (کیلوگرم در هکتار)





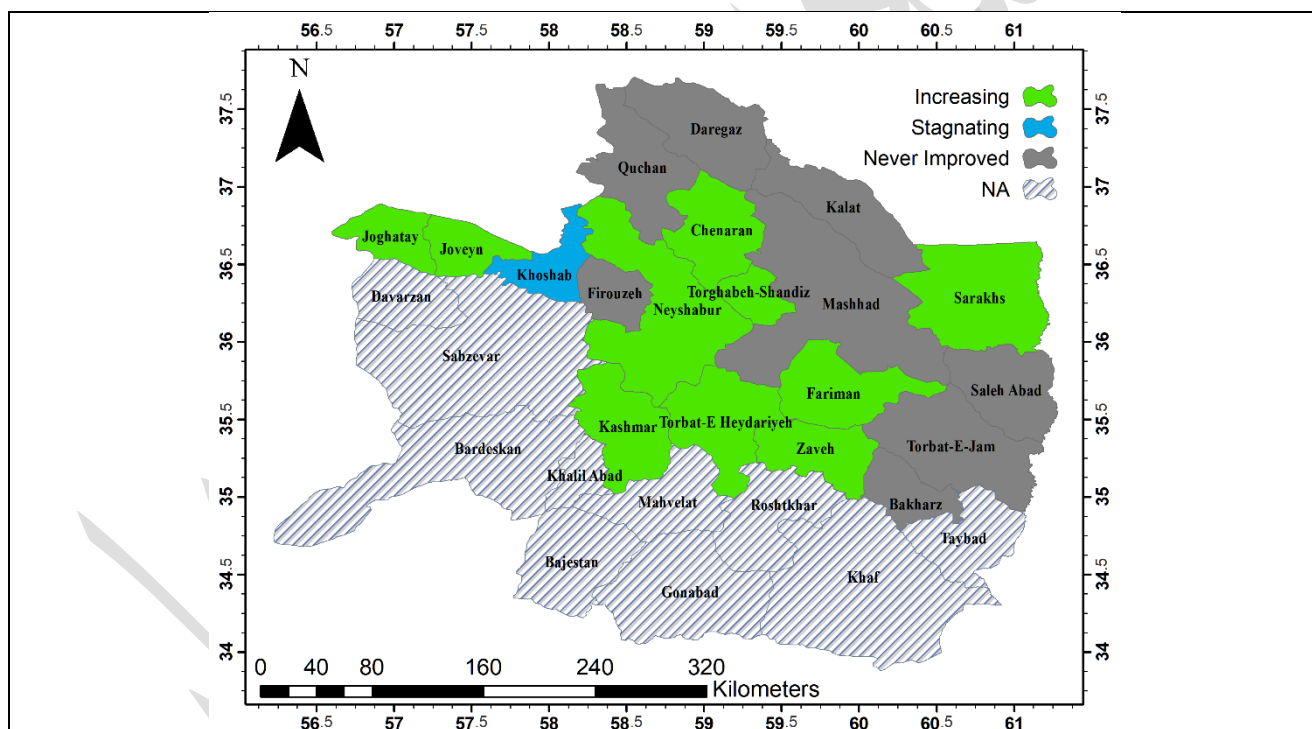
شکل ۱۰- روند تغییرات عملکرد و ثبات عملکرد گندم دیم برای ۱۹ شهرستان در استان خراسان رضوی در بازه زمانی ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰.

Figure 10- The trend of variations and stability of rainfed wheat yield across 19 counties in Khorasan Razavi province during 2011–2021.

تحلیل مکانی عملکرد گندم دیم در منطقه مورد مطالعه (شکل ۱۱) نشان می‌دهد که کشت دیم گندم در نواحی جنوبی و قسمتی از غرب استان یا چندان رواج ندارد و یا تنها در برخی سال‌های محدود از دوره مطالعه انجام شده است، به همین دلیل شهرستان‌های این نواحی در تحلیل نهایی لحاظ نشدند. همچنین، بهبود عملکرد عمدتاً در شهرستان‌های مرکزی استان مانند فریمان، تربت‌حیدریه و زاوه، قسمت‌های کوچکی از غرب استان شامل شهرستان‌های جوین و جغتای و شهرستان سرخس در شرق استان مشاهده شد، درحالی‌که مناطق شمالی و شرقی عمدتاً در وضعیت عدم بهبود قرار داشتند. با وجود بهبود عملکرد در شهرستان‌های مرکزی، این بهبود با شیب ملایمی همراه بوده است، به‌طوری‌که عملکرد گندم دیم در سال انتهایی مطالعه در بازه ۴۰۰ تا ۶۰۰ کیلوگرم در هکتار قرار دارد (شکل ۱۰).

طی مطالعه‌ای میانگین عملکرد پتانسیل گندم دیم در نواحی اقلیمی استان خراسان رضوی بین ۲ تا ۲/۸ تن در هکتار برآورد شد (Koocheki & Nasiri Mahalati, 2019). باین حال، در سال ۱۴۰۰، با توجه به محاسبات انجام شده در این مطالعه، میانگین عملکرد واقعی گندم دیم در سطح استان (۱۹ شهرستان)، به ۷۵۸ کیلوگرم در هکتار رسید (داده‌ها نشان داده نشده‌اند). این اختلاف قابل توجه نشان می‌دهد که با وجود بهبود عملکرد در سطح استان، همچنان فاصله چشمگیری با پتانسیل برآورد شده وجود دارد. به طور کلی، بررسی عملکرد گندم دیم در استان خراسان رضوی نشان می‌دهد که تغییرات عملکرد گندم دیم عمدتاً تحت تأثیر شرایط محیطی و مدیریتی قرار دارند. با توجه به تغییرات اقلیمی و وقوع خشکسالی‌های مکرر، لازم است که مدیریت زراعی بهینه، به کارگیری روش‌های نوین کشاورزی، و بهبود دسترسی به منابع آب و نهاده‌های کشاورزی مورد توجه بیشتری قرار گیرد تا نوسانات عملکردی کاهش یابد و پایداری تولید گندم دیم در این استان تضمین شود.

لازم به ذکر است که مشابه گندم آبی، داده‌های ارائه شده در مورد عملکرد گندم دیم نیز ممکن است تحت تأثیر مرزهای اداری شهرستان‌ها قرار گرفته باشد. به عنوان مثال، شهرستان خوشاب درحالی که در مجاورت شهرستان‌های نیشابور و جوین با بهبود عملکرد قرار دارد، خود در وضعیت رکود عملکرد بوده است. از آنجا که این شهرستان‌ها از نظر شرایط اقلیمی و میزان بارندگی تفاوت چشمگیری با یکدیگر ندارند، این مسئله می‌تواند نشان‌دهنده تأثیر نحوه گردآوری و گزارش داده‌ها بر نتایج تحلیل باشد.



شکل ۱۱- نقشه مکانی تغییرات عملکرد گندم دیم در ۱۹ شهرستان استان خراسان رضوی در بازه زمانی ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰.

Figure 11- The map of spatial variations of rainfed wheat yield across 19 counties in Khorasan Razavi province during 2011–2021.

نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که میانگین عملکرد گندم آبی در استان خراسان رضوی طی دوره مورد مطالعه حدود یک تن در هکتار افزایش یافته است، اما این بهبود در سراسر استان یکنواخت نبوده است. چهارده شهرستان بهبود عملکرد داشته‌اند، پنج شهرستان دچار رکود شده‌اند، نه شهرستان تغییری نداشته‌اند و یک شهرستان کاهش عملکرد را شاهد بود. تحلیل‌های رگرسیونی نشان داد که تغییرات عملکرد الگوی ثابتی ندارد و تحت تأثیر

عوامل اقلیمی و مدیریتی است. به‌ویژه، شهرستان‌هایی مانند رشت‌خوار، تربت حیدریه و جغتای بهبود قابل‌توجهی داشته‌اند، در حالی که خوشاب کاهش چشمگیری را شاهد بوده است.

در گندم دیم، میانگین عملکرد استان طی دوره مطالعه حدود ۵۰۰ کیلوگرم در هکتار افزایش داشته است. شهرستان‌هایی مانند جغتای، جوین، سرخس و چناران بهبود عملکرد داشته‌اند، اما درگز و کلات با کاهش چشمگیر، به‌ویژه در سال‌های پایانی، مواجه شده‌اند که عمدتاً ناشی از خشکسالی و نوسانات بارندگی بوده است. همچنین، کشت دیم در مناطق جنوبی و غربی استان محدود یا فصلی بوده است.

با توجه به این نتایج، توصیه می‌شود سیاست‌های حمایتی برای بهبود مدیریت زراعی، افزایش بهره‌وری، توسعه فناوری‌های نوین کشاورزی، بهینه‌سازی روش‌های آبیاری و زیرساخت‌های کشاورزی در مناطق با رکود یا کاهش عملکرد اجرا شود. همچنین، به‌کارگیری استراتژی‌های سازگاری با تغییرات اقلیمی، مانند استفاده از ارقام مقاوم به خشکی، اصلاح تقویم زراعی و مدیریت منابع آب، ضروری است.

سپاسگزاری

هزینه انجام این پژوهش توسط معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه فردوسی مشهد در قالب طرح شماره ۳/۵۹۰۶۳ مصوب ۱۴۰۱/۱۱/۱۲ تأمین شده است، که بدین وسیله قدردانی می‌شود.

References

- Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 19(6), 716-723. <https://doi.org/10.1109/tac.1974.1100705>
- Bivand, R., Pebesma, E., & Gómez-Rubio, V. (2008). *Applied spatial data analysis with R*. Springer Science+ Business Media .
- Bouras, E., Jarlan, L., Khabba, S., Er-Raki, S., Dezetter, A., Sghir, F., & Trambalay, Y. (2019). Assessing the impact of global climate changes on irrigated wheat yields and water requirements in a semi-arid environment of Morocco. *Sci. Rep.*, 9(1), 19142. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55251-2>
- Brisson, N., Gate, P., Gouache, D., Charmet, G., Oury, F.-X., & Huard, F. (2010). Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France. *Field Crops Research*, 119(1), 201-212. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.07.012>
- Burnham, K. P., Anderson, D. R., & Huyvaert, K. P. (2011). AIC model selection and multimodel inference in behavioral ecology: some background, observations, and comparisons. *Behav. Ecol. Sociobiol.*, 65(1), 23-35. <https://doi.org/10.1007/s00265-010-1029-6>
- Challinor, A. J., Watson, J., Lobell, D. B., Howden, S. M., Smith, D. R., & Chhetri, N. (2014). A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. *4*(4), 287-291. <https://doi.org/10.1038/nclimate2153>
- Chen, H. (2018). The spatial patterns in long-term temporal trends of three major crops' yields in Japan. *Plant Prod. Sci.*, 21(3), 177-185. <https://doi.org/10.1080/1343943x.2018.1459752>
- Deihimfard, R., Eyni-Nargeseh, H., & Mokhtassi-Bidgoli, A. (2018). Effect of future climate change on wheat yield and water use efficiency under semi-arid conditions as predicted by APSIM-wheat model. *Int. J. Plant Prod.*, 12(2), 115-125. <https://doi.org/10.1007/s42106-018-0012-4>
- Draper, N. R. (2002). Applied regression analysis bibliography update 2000-2001. *Commun. Stat. Theory Methods*, 31(11), 2051-2075. <https://doi.org/10.1081/sta-120015017>
- FAO, F., Agriculture, Organization. (2021). *The State of Food and Agriculture 2021*. <https://www.fao.org/>
- Farajzadeh-Asl, S., Kashki, M., & Shayan, M. (2009). Analysis of Rain-Fed Wheat Yield Product Variability Using Climate Change Approach (Case Study Area: Khorasan Razavi Province). *The Journal of Spatial Planning and Geomatics*, 13(2), 227-257. (in Persian with English abstract). <http://hsmasp.modares.ac.ir/article-21-3068-fa.html>
- Farajzadeh, M., Khoorani, A., Bazgeer, S., & Zeaeian, P. (2011). Modeling and predicting of rainfed wheat yield in attention to phenological phases of plant growth (a case study for Kurdistan province). *Physical Geography Research*, 43(76), 21-34. (in Persian with English abstract .)
- Finger, R. (2010). Evidence of slowing yield growth – The example of Swiss cereal yields. *Food Policy*, 35(2), 175-182. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2009.11.004>

- Godfray, H. C. J., Beddington, J. R., Crute, I. R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J. F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S. M., & Toulmin, C. (2010). Food security: the challenge of feeding 9 billion people. *Science*, 327(5967), 812-818. <https://doi.org/10.1126/science.1185383>
- Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2000). *Geographical Information Systems: Principles, techniques, management and applications*. | Wiley .
- Hatfield, J. L., Boote, K. J., Kimball, B. A., Ziska, L. H., Izaurralde, R. C., Ort, D., Thomson, A. M., & Wolfe, D. (2011). Climate impacts on agriculture: Implications for crop production. *Agron. J.*, 103(2), 351-370. <https://doi.org/10.2134/agronj2010.0303>
- Heydari, N., & Taran, F. (2025). Effect of climate change on wheat yield and water productivity in Iran and the world. *Iran. J. Energy Environ.*, 16(2), 253-269. <https://doi.org/10.5829/ijee.2025.16.02.08>
- Hussain, J., Khaliq, T., Ahmad, A., Akhter, J., & Asseng, S. (2018). Wheat responses to climate change and its adaptations: A focus on arid and semi-arid environment. *Int. J. Environ. Res.*, 12(1), 117-126. <https://doi.org/10.1007/s41742-018-0074-2>
- Hussain, J., Khaliq, T., Rahman, M. H. u., Ullah, A., Ahmed, I., Srivastava, A. K., Gaiser, T., & Ahmad, A. (2021). Effect of temperature on sowing dates of wheat under arid and semi-arid climatic regions and impact quantification of climate change through mechanistic modeling with evidence from field. *Atmosphere (Basel)*, 12(7), 927. <https://doi.org/10.3390/atmos12070927>
- IPCC, I. P. o. C. C. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report* (IPCC, Issue. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- Koochaki, A., & Nasiri-Mahallati, M. (2008). The impact of climate change along with increased carbon dioxide concentration on wheat yield in Iran and evaluation of adaptation strategies. *Iranian Journal of Crop Research*, 6(11), 139-153. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/gsc.v6i1.1185>
- Koocheki, A., & Nasiri Mahalati, M. (2019). Yield Monitoring for Wheat and Sugar beet in Khorasan Province: 2-Estimation of Yield Gap. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 17(1), 15-38. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/gsc.v17i1.62557>
- KRMO. (2022). *Annual Meteorological Report 2022* (O. Khorasan Razavi Meteorological, Ed.). Khorasan Razavi Meteorological Office .
- Lobell, D. B., Schlenker, W., & Costa-Roberts, J. (2011). Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, 333(6042), 616-620. <https://doi.org/10.1126/science.1204531>
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2021). *Introduction to linear regression analysis* (6 ed.). John Wiley & Sons .
- Pooya Nasab, K., Bannayan Aval, M., Ghorbani, R., Sanjani, S., & Yaghoubi, F. (2018). Temporal and Spatial Variation of Wheat and Bean Yields, Case Study: Khorasan-e Razavi province. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 16(2), 263-282. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/gsc.v16i2.44536>
- R Core Team. (2025). The R project for statistical computing. <https://www.r-project.org/>
- Rouhani, H. G. M., & Kahansal, M. (2021). Analysis of the effective factors on dimensions of sustainable agricultural development in Khorasan Razavi province, using seemingly unrelated regression equations. *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*, 52(1), 33-52. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijaedr.2021.308780.668977>
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., & Befort, B. L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 108(50), 20260-20264. <https://doi.org/10.1073/pnas.1116437108>
- Vargas, M., Glaz, B., Alvarado, G., Pietragalla, J., Morgounov, A., Zelenskiy, Y., & Crossa, J. (2015). Analysis and interpretation of interactions in agricultural research. *Agron. J.*, 107(2), 748-762. <https://doi.org/10.2134/agronj13.0405>
- Venables, W. N., & Ripley, B. D. (2013). *Modern applied statistics with S* (4 ed.). Springer .
- Zeinali Mobarakeh, Z., Deihimfard, R., & Kambouzia, J. (2018). Modelling the Impacts of Climate Change on Irrigated Wheat Yield Under Water Limited Conditions in Khorasan Razavi Province. *JOURNAL OF AGRICULTURAL SCIENCE AND SUSTAINABLE PRODUCTION*, 28(3), 155-169. (in Persian with English abstract) .
- Zhang, F., Shen, J., Li, R., Rengel, Z., & Tang, C. (2003). Orthogonal polynomial models to describe yield response of rice to nitrogen and phosphorus at different levels of soil fertility. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 65, 243-251 .