

ارزیابی توان و دقت پایگاه‌های ERA5 و AgMERRA در شبیه‌سازی داده‌های بلندمدت دما و تشعشع برای استان‌های خراسان

مهدی سلطانی^{۱*}، محسن جهان^۲، فاطمه یعقوبی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد اگرواکولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، خراسان رضوی.

۲- استاد گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، خراسان رضوی.

۳- دکتری اگرواکولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، خراسان رضوی.

چکیده

این پژوهش دقت دو پایگاه‌داده بازتحلیل ERA5 و AgMERRA را در شبیه‌سازی داده‌های روزانه دمای حداقل، حداکثر و میانگین و تشعشع خورشیدی در استان‌های خراسان و در بازه‌های زمانی ۱۹۴۰-۲۰۲۲ برای ERA5 و ۱۹۸۰-۲۰۱۰ برای AgMERRA ارزیابی می‌کند. شاخص‌های آماری شامل ضریب همبستگی پیرسون (r)، جذر میانگین مربعات خطا ($RMSE$)، جذر میانگین مربعات خطای نرمال‌شده ($NRMSE$)؛ میانگین، $\%$ ، میانگین خطای اریبی (MBE) و شاخص توافق ویلموت (d) بود و نتایج نشان داد که به طور کلی شبیه‌سازی دما در هر دو پایگاه‌داده از دقت بالایی برخوردار است. در ERA5 میانگین r بین دماهای شبیه‌سازی شده و مشاهداتی برای دمای حداقل، حداکثر و میانگین به ترتیب حدود ۰/۹۷، ۰/۹۹ و ۰/۹۹ و در AgMERRA به ترتیب حدود ۰/۹۴، ۰/۹۸ و ۰/۹۸ بود. مقادیر $NRMSE$ برای سه پارامتر دمایی در سطح شهرستان‌ها در هر دو پایگاه‌داده عموماً در حدود ۵ تا ۷ درصد و d نیز عمدتاً در بازه ۰/۹۵ تا ۰/۹۹ قرار گرفت که بیانگر برازش مناسب داده‌های بازتحلیل با مشاهدات است. با توجه به تفاوت دوره زمانی پوشش داده‌شده توسط دو پایگاه‌داده، این نتایج بیش از آن که بر برتری یکی بر دیگری دلالت کند، کفایت هر دو را جهت شبیه‌سازی روزانه دما در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد؛ با این حال، روزآمد بودن و پوشش زمانی بلندمدت‌تر ERA5 آن را گزینه‌ای مناسب‌تر برای مطالعات بلندمدت اقلیمی و مدیریت آب و خاک می‌سازد. در مورد تشعشع خورشیدی، مقایسه با داده‌های ایستگاهی نشان داد که میانگین r و d در AgMERRA به ترتیب حدود ۰/۶۶ و ۰/۸۰ بوده $NRMSE$ هر دو پایگاه‌داده تقریباً ۱۴ تا ۱۶ درصد است. در مقایسه با تشعشع برآوردشده از معادله آنگستروم-پرسکات در ۹ شهرستان خراسان رضوی نیز هر دو پایگاه‌داده مقادیر r و d را حدود ۰/۹۲ تا ۰/۹۴ نشان دادند، که بیانگر امکان استفاده از آن‌ها به عنوان منابع کمکی برای برآورد تشعشع روزانه در شرایط کمبود داده‌های مشاهداتی است.

کلید واژه‌ها: ERA5، AgMERRA، خراسان، دمای هوا، تشعشع خورشیدی، ارزیابی.

مقدمه

بازتحلیلی دقیق از وضعیت جوی استفاده می‌کند. این داده‌ها شامل پارامترهای متعددی مانند دما، باد، فشار، تشعشع خورشیدی، رطوبت و بارش هستند و برای مطالعات اقلیمی، هواشناسی کشاورزی و پیش‌بینی‌های آب‌وهوایی کاربرد گسترده‌ای دارند (Hersbach et al., 2020).

AgMERRA یک پایگاه‌داده بازتحلیل است که به طور خاص برای کاربردهای کشاورزی و مدل‌سازی تأثیرات اقلیمی بر کشاورزی توسعه یافته است. این پایگاه‌داده توسط مرکز ملی تحقیقات جوی ایالات متحده (NCAR) و ناسا به عنوان نسخه‌ای بهبودیافته از داده‌های MERRA ارائه شده است. AgMERRA داده‌های جوی را با تفکیک مکانی حدود ۵۰ کیلومتر ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$) و تفکیک زمانی روزانه ارائه می‌دهد و به دلیل پردازش‌های انجام‌شده بر روی متغیرهای مرتبط با کشاورزی، در مدل‌سازی رشد گیاهان، تحلیل بهره‌وری زراعی و مطالعات مرتبط با تغییر اقلیم، مورد استفاده قرار می‌گیرد (Ruane et al., 2015).

در بسیاری از مطالعات حوزه کشاورزی، از داده‌های بازتحلیل آب و هوایی به‌عنوان منبعی معتبر استفاده شده است (Iizumi et al., 2024; Rolle et al., 2022; Viggiano et al., 2019; Zhang et al., 2021; Yeşilköy & Demir, 2024). باین‌حال، این داده‌ها ممکن است مقادیر را بیش‌برآورد یا کم‌برآورد کرده و منجر به ایجاد خطا در نتایج شوند. علاوه بر این، امکان دارد توافق یا همبستگی مناسبی با داده‌های مشاهداتی نداشته باشند؛ بنابراین، ارزیابی دقت و صحت این داده‌ها پیش از استفاده در تحلیل‌ها ضروری است (Katsepor et al., 2024; Kim & Lee, 2022; Van Wart et al., 2015). ارزیابی داده‌های دمایی و تشعشع خورشیدی ERA5 در مطالعات مختلف نتایج مثبتی را نشان داده است. به طور نمونه مطالعات نشان داده‌اند که داده‌های ERA5 برای ارائه برآوردهای معتبر دما در مناطق خاصی از استان قزوین به خوبی عمل کرده است (Koochi et al., 2023). همچنین نتایج مشابهی برای داده‌های دمایی ERA5، در سیستان و بلوچستان بدست آمده است (Mohammadi & Forozanfard, 2024). ارزیابی روند دمایی با استفاده از داده‌های ERA5 و ERA5-Land در ترکیه نشان داد که داده‌های ERA5 و ERA5-Land انطباق خوبی با داده‌های ایستگاهی دارند و توانسته‌اند روندهای دمایی را به‌درستی شبیه‌سازی کنند (Yilmaz, 2023). نتایج یک مطالعه نشان داد، داده‌های ERA5 به‌طور کلی برای تخمین تشعشع

درک تغییر اقلیم و اثرات آن بر کشاورزی نیازمند داده‌های گسترده و دقیق است. به‌منظور برآورد دقیق و قابل اطمینان عملکرد و میزان تغییرپذیری آن، دسترسی به داده‌های روزانه آب‌وهوایی با حداقل طول دوره ۱۰ تا ۲۰ سال ضروری است (Grassini et al., 2015; van Ittersum et al., 2013; van Wart et al., 2013). پایگاه‌های داده بازتحلیل ترکیبی از داده‌های مشاهداتی و مدل‌های عددی را ارائه می‌دهند و ابزارهای کلیدی برای تحلیل‌های اقلیمی-کشاورزی بلندمدت شامل ارزیابی تغییر اقلیم، مدیریت منابع طبیعی و بهینه‌سازی تولید محصولات کشاورزی محسوب می‌شوند. این داده‌ها امکان بررسی پارامترهای اقلیمی مانند دما، بارش، رطوبت خاک و شاخص‌های پوشش گیاهی را فراهم کرده و به پیش‌بینی روندهای آینده کمک می‌کنند (Freitas et al., 2024; Hersbach et al., 2020; Kalnay et al., 1996). همچنین داده‌های بازتحلیل امکان ارزیابی دقیق‌تر خشکسالی و مدیریت منابع آبی را فراهم کرده (van den Hurk et al., 2016) و به‌عنوان ورودی برای مدل‌های رشد محصول مانند DSSAT و WOFOST قابل استفاده‌اند (White et al., 2011). داده‌های بازتحلیل مانند ERA5، NCEP/NCAR و MERRA-2 به پژوهشگران این امکان را می‌دهند که با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی، تأثیر سناریوهای مختلف اقلیمی را بر رشد و عملکرد محصولات بررسی کنند (Trenberth et al., 2014). یکی دیگر از مزایای این پایگاه‌ها، امکان تحلیل تغییرات دمایی در مقیاس‌های محلی، منطقه‌ای و جهانی است. تغییرات دمایی یکی از عوامل اصلی تأثیرگذار بر زمان‌بندی رشد گیاهان، دوره گل‌دهی، میزان تبخیر-تعرق و وقوع پدیده‌هایی مانند موج‌های گرما است. داده‌های بازتحلیل به محققان این امکان را می‌دهند که تأثیر افزایش دما را بر محصولات زراعی مانند گندم، برنج و ذرت بررسی کرده و راهکارهایی برای کاهش اثرات منفی آن پیشنهاد دهند (Lobell et al., 2011).

ERA5 یک پایگاه‌داده بازتحلیل جهانی است که توسط مرکز پیش‌بینی‌های میان‌مدت جوی اروپا (ECMWF) توسعه یافته و تحت پروژه C3S ارائه شده است. این پایگاه‌داده جایگزین نسخه‌های قبلی خود مانند ERA-Interim شده و داده‌های جوی را با تفکیک مکانی حدود ۳۱ کیلومتر و تفکیک زمانی ساعتی ارائه می‌دهد. ERA5 از مدل‌های پیشرفته جذب داده و شبیه‌سازی‌های عددی برای ترکیب داده‌های مشاهداتی و ارائه

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، استان‌های خراسان، با محدوده جغرافیایی ۳۰ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۳۰ دقیقه عرض شمالی و ۵۵ درجه و ۳۵ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۲۵ دقیقه طول شرقی و مساحتی حدود ۲۹۴,۰۰۰ کیلومتر مربع است (شکل ۱). در این پژوهش، از داده‌های ۴۲ ایستگاه سینوپتیک واقع در استان‌های خراسان استفاده شد که جزئیات آن در جدول ۲ ارائه شده است. متغیرهای بررسی شده شامل دمای حداقل، دمای حداکثر، دمای میانگین و تشعشع خورشیدی بوده‌اند. داده‌های بازتحلیل هر دو پایگاه‌داده در قالب فرمت NetCDF جمع‌آوری شدند (جدول ۱). داده‌های ERA5 شامل دما و تشعشع خورشیدی با دقت مکانی ۰/۲۵ درجه، برای بازه زمانی ۱۹۴۰ تا ۲۰۲۲ و داده‌های AgMERRA شامل دما و تشعشع خورشیدی با دقت مکانی ۰/۵ درجه، برای بازه زمانی ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰ هستند. قدرت تفکیک زمانی پایگاه AgMERRA به صورت روزانه و ERA5 به صورت ساعتی می‌باشد، به همین دلیل، این داده‌ها، با انجام محاسبات لازم به داده‌های روزانه تبدیل شدند. در نهایت داده‌های دما و تشعشع خورشیدی شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهداتی، به صورت روزانه بررسی شدند.

با توجه به ناهمسانی (ولی همپوشانی) بازه‌های زمانی ارزیابی ERA5 و AgMERRA در برخی ایستگاه‌ها، مقایسه مستقیم شاخص‌ها ممکن است تحت تأثیر طول رکورد و تغییرات زمانی قرار گیرد؛ بنابراین نتایج باید با احتیاط تفسیر شوند. تحلیل بلندمدت ERA5 صرفاً به منظور سنجش قابلیت استفاده این پایگاه در دوره‌های طولانی گزارش شده است. هدف این پژوهش اثبات برتری یک پایگاه بر دیگری نیست بلکه تمرکز ما بر ارزیابی کاربرپسندی، پوشش زمانی و به‌روز بودن ERA5 در قیاس با AgMERRA است که بازه‌ای حدود ۳۰ سال دارد و به‌روزرسانی نمی‌شود.

داده‌های بازتحلیل برای نقاط شبکه‌ای نزدیک به ایستگاه‌های سینوپتیک با استفاده از نرم‌افزار R استخراج و با داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌ها مقایسه شدند. جهت ارزیابی دقت داده‌ها، از معیارهای آماری ضریب همبستگی پیرسون (r)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) به‌عنوان معیار خطای نسبی، میانگین خطای اریبی (MBE) و شاخص توافق ویلموت (d) استفاده شد.

خورشیدی در استان گلستان مناسب هستند و همبستگی‌های بالایی با داده‌های ایستگاه‌های زمینی نشان می‌دهند، اما دقت در مناطق مختلف متفاوت است (Khansalari et al., 2023). در مطالعه ای در اندونزی نشان داده شد که داده‌های تشعشع خورشیدی ERA5 در مقایسه با MERRA2 دقت بهتری دارند (Sianturi et al., 2020). همچنین مطالعات متعددی در رابطه با ارزیابی داده‌های دما و تشعشع خورشیدی AgMERRA در سطح استان‌های خراسان انجام شده است. از جمله آنها می‌توان به پژوهشی در خراسان شمالی اشاره کرد که در آن به بررسی قابلیت استفاده از داده‌های AgMERRA برای پر کردن خلاء داده‌های آب و هوایی در ایستگاه‌های سینوپتیک شمال خراسان پرداخته شده است. نتایج این مطالعه نشان داد که داده‌های شبیه‌سازی شده دمای حداکثر و حداقل و تشعشع خورشیدی تطابق خوبی با داده‌های مشاهداتی داشتند و برای استفاده در مطالعات کشاورزی و اقلیمی مناسب بودند (Farhadi et al., 2021). همچنین، در مطالعه‌ای مشابه در استان خراسان رضوی نشان داده شد که داده‌های AgMERRA به ویژه در مدل‌سازی مقادیر بلندمدت، با داده‌های مشاهداتی هم‌خوانی دارند (Yaghoubi et al., 2018). این پژوهش‌ها بر توانایی داده‌های AgMERRA برای تحلیل تأثیرات تغییر اقلیم بر تولیدات کشاورزی در مناطق کم‌داده، تأکید می‌کنند. با وجود پیشرفت‌ها در کاربرد داده‌های بازتحلیل در مطالعات اقلیمی و کشاورزی، در ایران و به‌ویژه استان‌های خراسان، هنوز ارزیابی و استفاده از داده‌های ERA5 و سایر پایگاه‌ها کمتر انجام شده است. داده‌های ERA5 امکان تحلیل دقیق‌تر روندهای اقلیمی در مقیاس‌های محلی و منطقه‌ای و در بازه‌های بلندمدت را فراهم می‌کند و می‌تواند برای شبیه‌سازی دما و تشعشع خورشیدی در استان‌های خراسان سودمند باشد؛ در نتیجه به بهبود پیش‌بینی تغییر اقلیم و مدیریت منابع کشاورزی کمک می‌کند، بخشی از کمبود مطالعاتی را پوشش می‌دهد و برای پژوهشگران و سیاستگذاران در سطح استانی و ملی کاربرد دارد. هدف این پژوهش اثبات برتری یک پایگاه بر دیگری نیست، بلکه ارزیابی بیطرفانه کارایی و کاربرپذیری ERA5 و AgMERRA است؛ با توجه به ناهمسانی بازه‌های زمانی، مقایسه مستقیم شاخص‌ها باید با احتیاط تفسیر شود و تحلیل بلندمدت ERA5 تنها برای سنجش قابلیت استفاده گزارش شده است.

در رابطه با شاخص‌های ارزیابی، r شدت و جهت رابطه خطی بین داده‌های بازتحلیل و مشاهدات را در بازه -1 تا $+1$ نشان می‌دهد و هرچه به $+1$ نزدیک‌تر باشد، همبستگی بهتر است. RMSE و نوع نرمال‌شده آن (NRMSE) بزرگی خطا را (به‌ترتیب به‌صورت مطلق و نسبی) اندازه می‌گیرند؛ NRMSE شاخصی بدون بُعد است که بر حسب درصد گزارش می‌شود و مقادیر کوچک‌تر هر دو شاخص بیانگر عملکرد بهتر داده‌های بازتحلیل است. MBE خطای جهت‌دار بین داده‌های بازتحلیل و مشاهدات را نشان می‌دهد؛ مقادیر مثبت حاکی از بیش‌برآورد و مقادیر منفی بیانگر کم‌برآورد بوده و مقادیر نزدیک صفر نشان‌دهنده نبود ارزیابی قابل توجه هستند. d نیز درجه توافق کلی بین مقادیر بازتحلیل و مشاهده‌شده را در بازه صفر تا یک بیان می‌کند و مقادیر نزدیک به یک به‌عنوان تطابق بسیار خوب تفسیر می‌شوند.

$$r = \frac{COV(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad 1$$

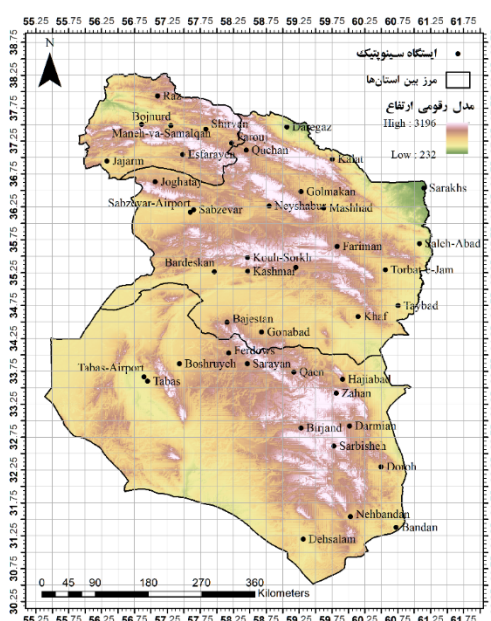
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad 2$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{O_{mean}} \times 100 \quad 3$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad 4$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - O_{mean}| + |O_i - O_{mean}|)^2} \quad 5$$

در این معادلات COV کوواریانس، σ_X انحراف معیار متغیر X ، σ_Y انحراف معیار متغیر Y ، P_i مقادیر پیش‌بینی‌شده، O_i مقادیر مشاهده‌شده، O_{mean} میانگین مقادیر مشاهده و n تعداد مشاهدات است.



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک و سلول‌های منظم $25^\circ \times 25^\circ$ درجه در منطقه مورد مطالعه

جدول ۱- مشخصات پایگاه‌های بازتحلیل

پایگاه داده	آدرس دریافت	دوره آماری	تفکیک مکانی	فرمت فایل
Dataset	Download link	Time period	Spatial resolution	File format
AgMERRA	Nasa Website	1980-2010	$0.5^\circ \times 0.5^\circ$	NetCDF
	https://data.giss.nasa.gov/impacts/agmipcf/agmerra/			
ERA5	Copernicus Website	1940-2022	$0.25^\circ \times 0.25^\circ$	NetCDF
	https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels			

جدول ۲- مشخصات و دوره آماری ایستگاه‌های سینوپتیک در منطقه مورد مطالعه

دوره آماری Time Period	ارتفاع (متر) Elevation (Meters)	عرض جغرافیایی (درجه اعشار) Latitude (Decimal Degrees)	طول جغرافیایی (درجه اعشار) Longitude (Decimal Degrees)	ایستگاه سینوپتیک Synoptic Station	دوره آماری Time Period	ارتفاع (متر) Elevation (Meters)	عرض جغرافیایی (درجه اعشار) Latitude (Decimal Degrees)	طول جغرافیایی (درجه اعشار) Longitude (Decimal Degrees)	ایستگاه سینوپتیک Synoptic Station
خراسان رضوی Razavi Khorasan					خراسان جنوبی South Khorasan				
2015-2023	1293	34.5	58.1592	بجستان Bajestan	1988-2023	879	33.8667	57.4333	بشرویه Boshruyeh
2012-2023	985	35.2667	57.9667	بردسکن Bardaskan	2020-2022	726	31.38	60.73	بندان Bandan
2015-2023	900.4	34.75	60.7597	تایباد Taybad	1955-2023	1491	32.8906	59.2831	بیرجند Birjand
1993-2023	950.4	35.2947	60.5647	تربت جام Torbat-e-Jam	2011-2023	1447	33.6333	59.9167	حاجی‌آباد Hajiabad
1959-2023	1451	35.3317	59.2058	تربت حیدریه Torbat-e- Heydariyeh	2020-2022	1169	32.3	60.5	درج Doroh
2017-2023	1335	36.6333	57.0667	جغتای Joghatay	2017-2023	1500	32.92	60.02	درمیان Darmian
2006-2023	998	34.5833	60.15	خواف Khaf	2011-2023	815	31.1997	59.3167	دهسلم Dehsalam
2008-2023	514	37.4667	59.0667	درگز Daregaz	2017-2023	1714	33.42	59.82	زهان Zahan
1954-2023	962	36.2072	57.6494	سبزوار Sabzevar	2011-2023	1405	33.8667	58.4667	سرایان Sarayan
2020-2023	938	36.1714	57.5994	سبزوار-فرودگاه Sabzevar- Airport	2011-2023	1846	32.6167	59.7833	سربیشه Sarbisheh
1984-2023	278	36.5372	61.1489	سرخس Sarakhsh	1960-2023	711	33.6031	56.9506	طبس Tabas
2022-2023	723	35.6931	61.0839	صالح‌آباد Saleh-Abad	2018-2023	690	33.6681	56.8975	طبس-فرودگاه Tabas- Airport
2006-2023	1472	35.65	59.8333	فریمان Fariman	1985-2023	1293	34.0306	58.1842	فردوس Ferdows
1984-2023	1287	37.1167	58.45	قوچان Quchan	1987-2023	1432	33.7406	59.1761	قائن Qaen
1986-2023	1109.7	35.2711	58.4733	کاشمر Kashmar	1986-2023	1188	31.5419	60.0347	نهبندان Nehbandan
2015-2023	890	36.9797	59.7597	کلات Kalat	خراسان شمالی North Khorasan				
2006-2023	1724	35.48	58.47	کوه‌سرخ Kouh-Sorkh	2006-2023	1216	37.05	57.4833	اسفراین Esfarayen
1987-2023	1176	36.4833	59.2833	گل‌مکان Golmakan	1977-2023	1065	37.4872	57.3033	بجنورد Bojnurd
1987-2023	1056	34.35	58.6833	گناباد Gonabad	2006-2023	984	36.95	56.3333	جاجرم Jajarm
1951-2023	999.2	36.2364	59.6311	مشهد Mashhad	2015-2023	1279	37.9394	57.1014	راز Raz
1991-2023	1213	36.2667	58.8	نیشابور Neyshabur	2015-2023	1051	37.4342	57.8372	شیروان Shirvan
					2015-2023	1196	37.2206	58.2267	فاروج Farouj
					2006-2023	890	37.5081	56.8603	مانه‌وسملقان Maneh-va- Samalqan

ERA5 عمدتاً بزرگ‌تر از ۰/۹۵ با میانگین ۰/۹۸ و برای AgMERRA غالباً بالاتر از ۰/۹۰ با میانگین ۰/۹۵ بود. در عین حال، NRMSE برای tmin در ERA5 معمولاً در حدود ۴ تا ۹ درصد (میانگین حدود ۵ درصد) و در AgMERRA در بازه‌ای حدود ۵ تا ۱۳ درصد (میانگین نزدیک ۷ درصد) به دست آمد (شکل‌های ۲ و ۳). ایستگاه‌هایی مانند مشهد، گناباد، کاشمر و فردوس در ERA5 و سبزوار، سرخس و تربت‌حیدریه در AgMERRA خطای نسبی کوچک‌تری داشتند، در حالی که در کلات، قوچان، بندان و سریشه در ERA5 و بجنورد، اسفراین، بیرجند و نهبندان در AgMERRA مقادیر NRMSE بزرگ‌تر مشاهده شد. بررسی MBE نشان داد که tmin در هر دو پایگاه‌داده عموماً با کم‌برآوردی همراه است؛ در ERA5 بیشتر ایستگاه‌ها اریبی نزدیک به صفر و تعداد کمی تا حدود ۲-۳ درجه سانتی‌گراد منفی داشتند (شکل ۳) و در AgMERRA کم‌برآوردی در برخی ایستگاه‌ها (مانند بجنورد، اسفراین، بیرجند و نهبندان) به حدود ۳ تا ۵ درجه سانتی‌گراد می‌رسید که در تحلیل رخدادهای حدی نظیر یخبندان می‌تواند قابل‌توجه باشد (شکل ۲).

برای دمای حداکثر روزانه (tmax)، تصویر کلی کمی پایدارتر است. مقادیر r در ERA5 تقریباً در همه ایستگاه‌ها بین ۰/۹۸ تا ۱/۰ و در AgMERRA در حدود ۰/۹۷ تا ۰/۹۸ قرار گرفت که نشان‌دهنده همبستگی بسیار بالا بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی است (جدول ۴). NRMSE برای tmax در ERA5 عمدتاً در محدوده ۳ تا ۷ درصد قرار داشت و تنها در چند ایستگاه مانند قوچان، بیرجند، کلات و برخی ایستگاه‌های با دوره کوتاه‌تر (مثل بندان و فرودگاه طبس) به حدود ۸-۹ درصد رسید (شکل ۵). در AgMERRA نیز بیشتر ایستگاه‌ها خطای نسبی ۴ تا ۸-۹ درصدی داشتند؛ سبزوار، سرخس، کاشمر و فردوس از کم‌خطاترین و بجنورد، اسفراین، بیرجند و بشرویه از پرخطاترین نقاط بودند (شکل ۴). d برای tmax در هر دو پایگاه معمولاً بزرگ‌تر از ۰/۹۷ و در بسیاری از ایستگاه‌ها نزدیک به ۰/۹۹ بود. با وجود این دقت بالا، الگوی MBE نشان می‌دهد که tmax در هر دو پایگاه‌داده تمایل غالب به کم‌برآوردی دارد؛ در ERA5 اریبی منفی در شهرهایی مانند

برای ارزیابی داده‌های تشعشع خورشیدی، دو پایگاه داده ERA5 و AgMERRA مورد بررسی قرار گرفتند. ابتدا، داده‌های این دو پایگاه با داده‌های مشاهداتی در ایستگاه‌هایی که داده‌های تشعشع خورشیدی در بازه زمانی مناسبی موجود بود، مقایسه شدند. سپس، داده‌های هر دو پایگاه با داده‌های محاسبه‌شده از رابطه تخمین تشعشع خورشیدی آنگستروم-پرسکات (معادله ۶) در ایستگاه‌هایی از خراسان رضوی که ضرایب آن قبلاً محاسبه شده بود (Fallah Ghalhari & Shakeri, 2016)، ارزیابی شدند. دلیل این انتخاب آن است که معمولاً ابزارهای اندازه‌گیری تشعشع خورشیدی در ایستگاه‌های سینوپتیک محدود بوده و داده‌های مربوط به این پارامتر، در بسیاری از مناطق کم است. در نتیجه، در بسیاری از مطالعات از معادلات تخمین تشعشع خورشیدی مانند رابطه آنگستروم-پرسکات استفاده می‌شود و ارزیابی این داده‌ها می‌تواند به افزایش دقت نتایج کمک کند.

معادله آنگستروم-پرسکات به طور گسترده برای تخمین تشعشع خورشیدی در مکان‌هایی که داده‌های مشاهداتی کافی در دسترس نیست، استفاده می‌شود و رابطه آن به شرح زیر است:

$$I = \alpha \times I_{clear} \times \left(\frac{G}{G_0}\right)^{\beta} \quad \text{معادله ۶}$$

در این رابطه، I تشعشع خورشیدی اندازه‌گیری شده، I_{clear} تشعشع خورشیدی برای شرایط آسمان صاف (بدون ابر)، G تابش خورشیدی واقعی در سطح زمین، G_0 تابش خورشیدی استاندارد در سطح زمین برای شرایط آسمان صاف و α و β ضرایب این معادله هستند که معمولاً از داده‌های مشاهداتی به دست می‌آیند و به شرایط محلی بستگی دارند.

نتایج و بحث

نتایج تحلیل داده‌های دمای حداقل روزانه (tmin) نشان داد که هر دو پایگاه‌داده ERA5 و AgMERRA تغییرات زمانی این متغیر را به خوبی و شبیه مشاهدات دنبال می‌کنند؛ به طوری که مقدار r در ERA5 برای بیشتر ایستگاه‌ها بین حدود ۰/۹۵ تا ۰/۹۸ و میانگین آن نزدیک به ۰/۹۷ و در AgMERRA در بازه‌ای حدود ۰/۹۱ تا ۰/۹۷ با میانگین نزدیک به ۰/۹۴ قرار گرفت (جدول ۳). مقادیر d نیز برای

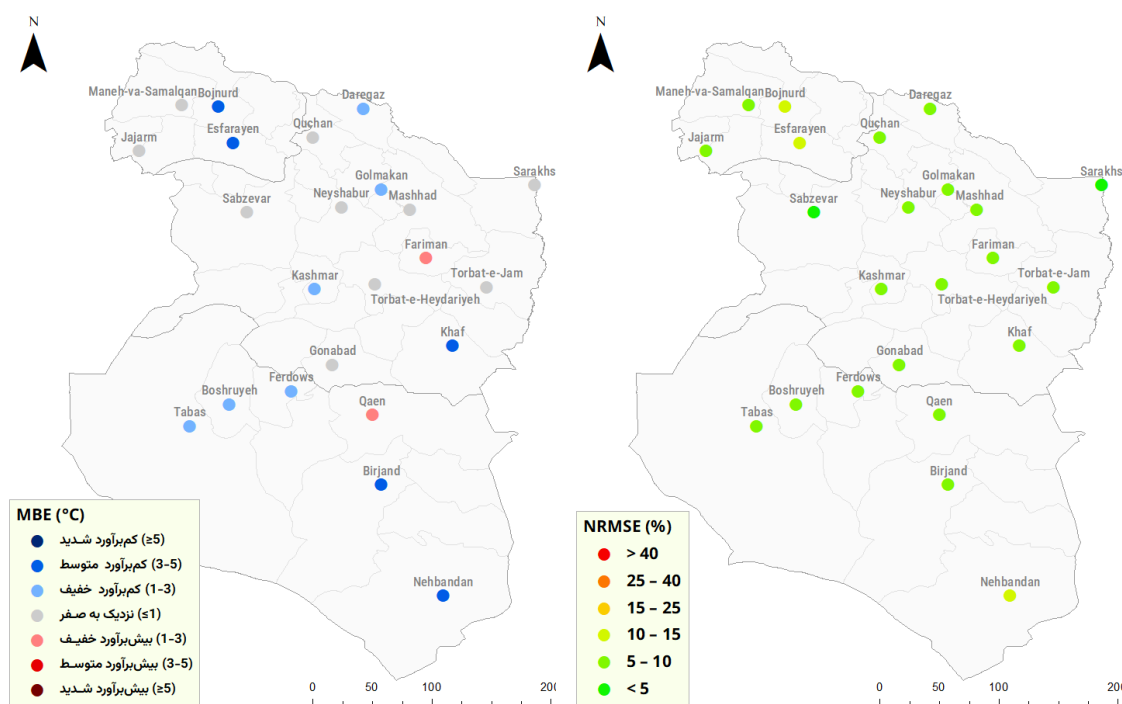
بجنورد، اسفراین، فاروج، گلستان، مشهد، نیشابور، بیرجند و طبس در حدود ۱- تا ۴- درجه سانتی‌گراد مشاهده شد (شکل ۵) و در AgMERRA نیز بجنورد، اسفراین، بیرجند و بشرویه حداکثر دما را چند درجه خنک‌تر از واقع برآورد کردند، در حالی که در ایستگاه‌هایی نظیر جاجرم، فریمان، گناباد، تربت‌حیدریه و قاین گرایش به بیش‌برآوردی ملایم (حدود ۱ تا ۲/۵ درجه سانتی‌گراد) دیده می‌شود (شکل ۴).

جدول ۳- مقایسه دمای حداقل روزانه پایگاه‌های مختلف با مقادیر مشاهداتی بر اساس میانگین استانی شاخص‌های آماری

Table 3 - Comparison of Daily Minimum Temperature from Different Datasets with Observed Values Based on Provincial Averages of Statistical Indices

Dataset	Region	r	RMSE (C°)	NRMSE (%)	MBE (C°)	d
AgMERRA	North Khorasan	0.95	4.21	9.53	-2.45	0.94
	Razavi Khorasan	0.94	3.24	6.45	-0.71	0.96
	South Khorasan	0.94	3.93	8.13	-1.78	0.95
	Total	0.94	3.59	7.43	-1.29	0.95
ERA5	North Khorasan	0.96	2.38	5.2	-0.48	0.98
	Razavi Khorasan	0.97	2.39	5.06	-0.18	0.98
	South Khorasan	0.97	2.6	5.84	-0.16	0.98
	Total	0.97	2.46	5.35	-0.22	0.98

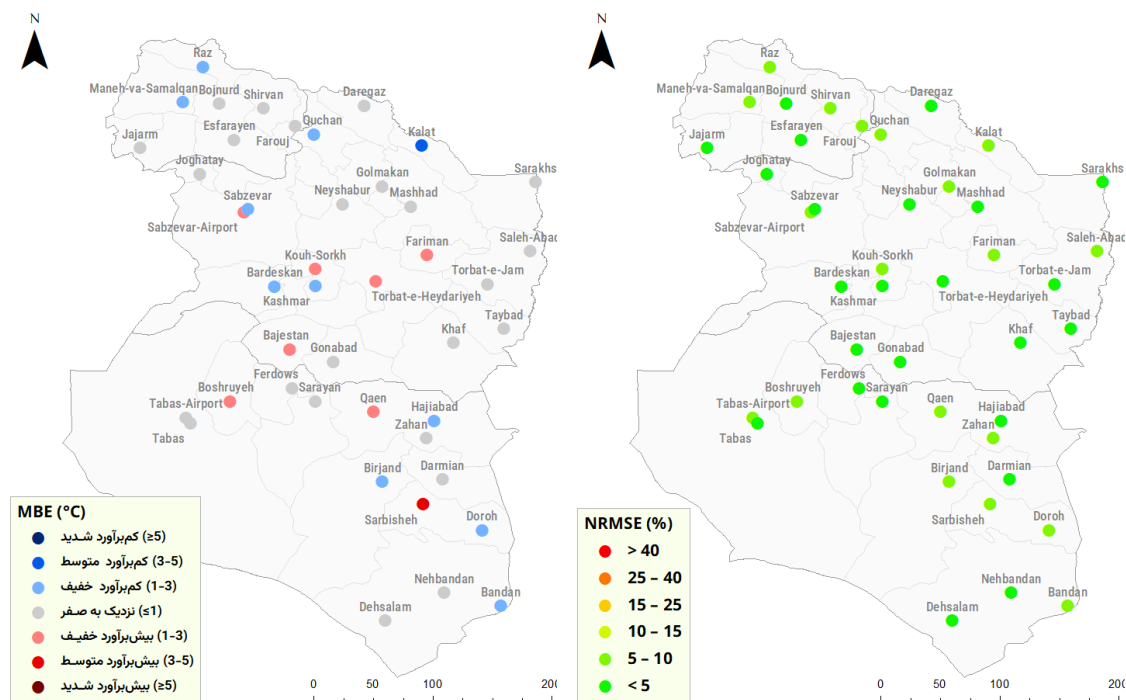
۳ ضریب همبستگی پیرسون، $RMSE$: جذر میانگین مربعات خطا، $NRMSE$: جذر میانگین مربعات خطای نرمال‌شده، MBE : میانگین خطای اریبی، d : شاخص توافقی ویلموت



شکل ۲- نقشه‌های نقطه‌ای عملکرد AgMERRA برای شبیه‌سازی دمای حداقل روزانه در استان‌های خراسان (رضوی، شمالی، جنوبی). راست:

$NRMSE$ (%) با طبقه‌بندی دستی مشترک (سبز = بهتر، قرمز = ضعیف‌تر). چپ: میانگین خطای اریبی (MBE , °C) با طیف رنگی واگرا قرمز-

خاکستری-آبی و طبقات مقارن حول صفر. دوره آماری نقاط یکسان نیست؛ جزئیات در جدول ۲ آمده است.



شکل ۳- نقشه‌های نقطه‌ای عملکرد ERA5 برای شبیه‌سازی دمای حداقل روزانه در استان‌های خراسان (رضوی، شمالی، جنوبی).
 راست: $NRMSE$ (%) با طبقه‌بندی دستی مشترک (سبز = بهتر، قرمز = ضعیف‌تر). چپ: میانگین خطای اریبی (MBE , °C) با طیف
 رنگی و اگر قرمز-خاکستری-آبی و طبقات مقارن حول صفر. دوره آماری نقاط یکسان نیست؛ جزئیات در جدول ۲ آمده است.

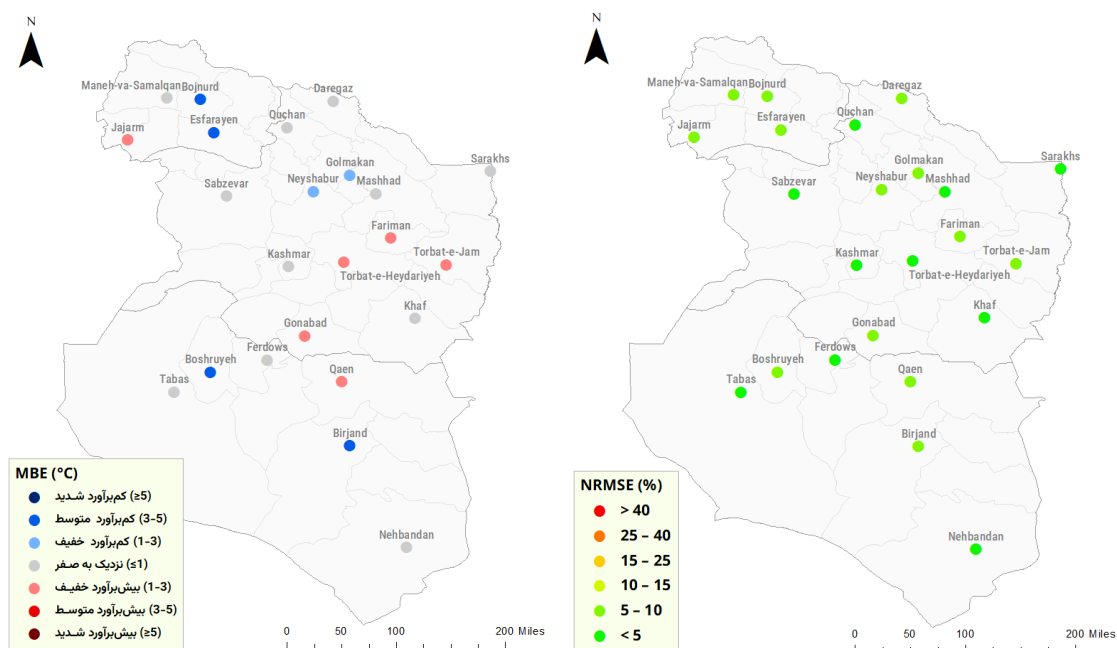
جدول ۴- مقایسه دمای حداکثر روزانه پایگاه‌های مختلف با مقادیر مشاهداتی بر اساس میانگین استانی شاخص‌های آماری

Table 4 - Comparison of Daily Maximum Temperature from Different Datasets with Observed Values Based on Provincial Averages of Statistical Indices

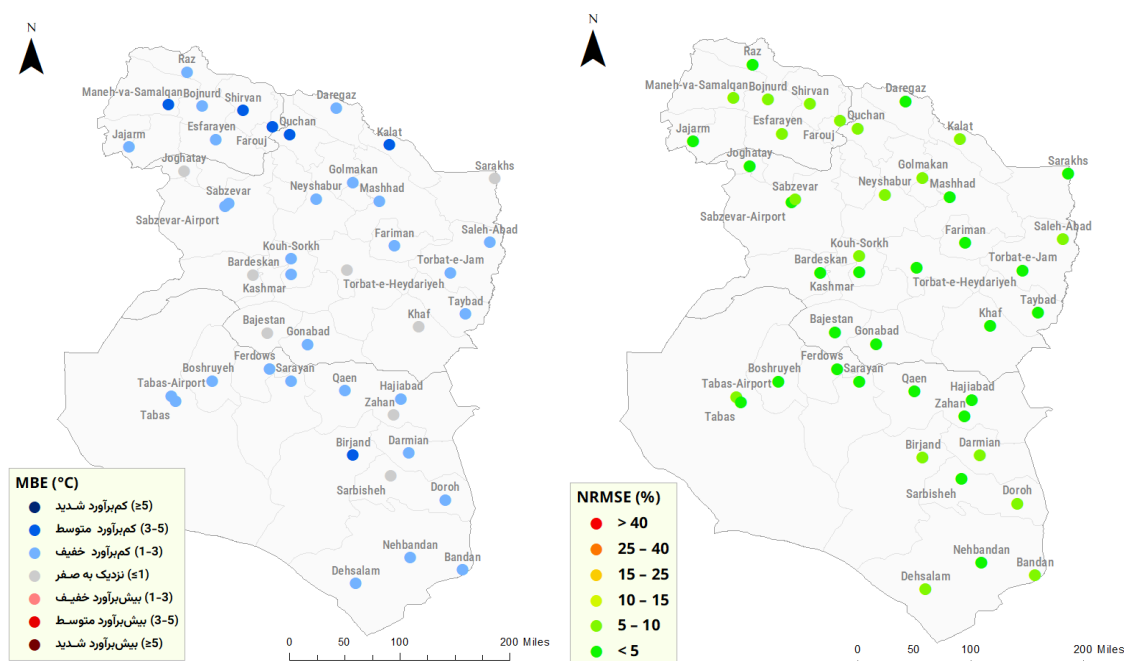
Dataset	Region	r	RMSE (C°)	NRMSE (%)	MBE (C°)	d
AgMERRA	North Khorasan	0.97	3.87	8.1	-1.65	0.97
	Razavi Khorasan	0.98	2.57	5	0.38	0.99
	South Khorasan	0.98	2.88	5.65	-1.24	0.98
	Total	0.98	2.88	5.71	-0.4	0.98
ERA5	North Khorasan	0.99	2.93	6.1	-2.34	0.98
	Razavi Khorasan	0.99	2.32	4.76	-1.62	0.99
	South Khorasan	0.99	2.3	5.02	-1.69	0.98
	Total	0.99	2.41	5.07	-1.76	0.98

r : ضریب همبستگی پیرسون، $RMSE$: جذر میانگین مربعات خطا، $NRMSE$: جذر میانگین مربعات خطای نرمال‌شده، MBE : میانگین

خطای اریبی، d : شاخص توافق ویلموت



شکل ۴- نقشه‌های نقطه‌ای عملکرد AgMERRA برای شبیه‌سازی دمای حداکثر روزانه در استان‌های خراسان (رضوی، شمالی، جنوبی). راست: $NRMSE$ (%) با طبقه‌بندی دستی مشترک (سبز = بهتر، قرمز = ضعیف‌تر). چپ: میانگین خطای اریبی (MBE , °C) با طیف رنگی واگرا قرمز-خاکستری-آبی و طبقات متقارن حول صفر. دوره آماری نقاط یکسان نیست؛ جزئیات در جدول ۲ آمده است.



شکل ۵- نقشه‌های نقطه‌ای عملکرد ERA5 برای شبیه‌سازی دمای حداکثر روزانه در استان‌های خراسان (رضوی، شمالی، جنوبی). راست: $NRMSE$ (%) با طبقه‌بندی دستی مشترک (سبز = بهتر، قرمز = ضعیف‌تر). چپ: میانگین خطای اریبی (MBE , °C) با طیف رنگی واگرا قرمز-خاکستری-آبی و طبقات متقارن حول صفر. دوره آماری نقاط یکسان نیست؛ جزئیات در جدول ۲ آمده است.

۰/۹۸ و در AgMERRA نیز بزرگ‌تر از ۰/۹۷ برآورد شد و d نیز برای ERA5 معمولاً در بازه ۰/۹۷ تا ۰/۱ و در AgMERRA در حدود ۰/۸۹ تا ۰/۹۹ قرار گرفت؛ بنابراین

دمای میانگین روزانه (t_m) که ترکیبی از t_{min} و t_{max} است، رفتاری میانی اما در برخی نقاط حساس‌تر نشان می‌دهد. مقادیر r برای t_m در ERA5 در تمامی ایستگاه‌ها بزرگ‌تر از

مقادیر NRMSE به حدود ۹ تا ۱۶ درصد رسید (شکل‌های ۶ و ۷). از نظر MBE نیز tm در هر دو پایگاه غالباً با اریبی منفی همراه است؛ در ERA5 بیشتر ایستگاه‌ها کم‌برآوردی در حدود ۱- تا ۳- درجه سانتی‌گراد (شکل ۷) و در AgMERRA بعضی ایستگاه‌ها کم‌برآوردی شدیدتر تا حدود ۴- تا ۷- درجه سانتی‌گراد نشان دادند (شکل ۶) که در محاسبه شاخص‌های حساس به میانگین دما (مانند درجه‌روز رشد) در صورت عدم تصحیح اریبی، می‌تواند باعث شود این شاخص‌ها کمتر از مقدار واقعی برآورد شوند.

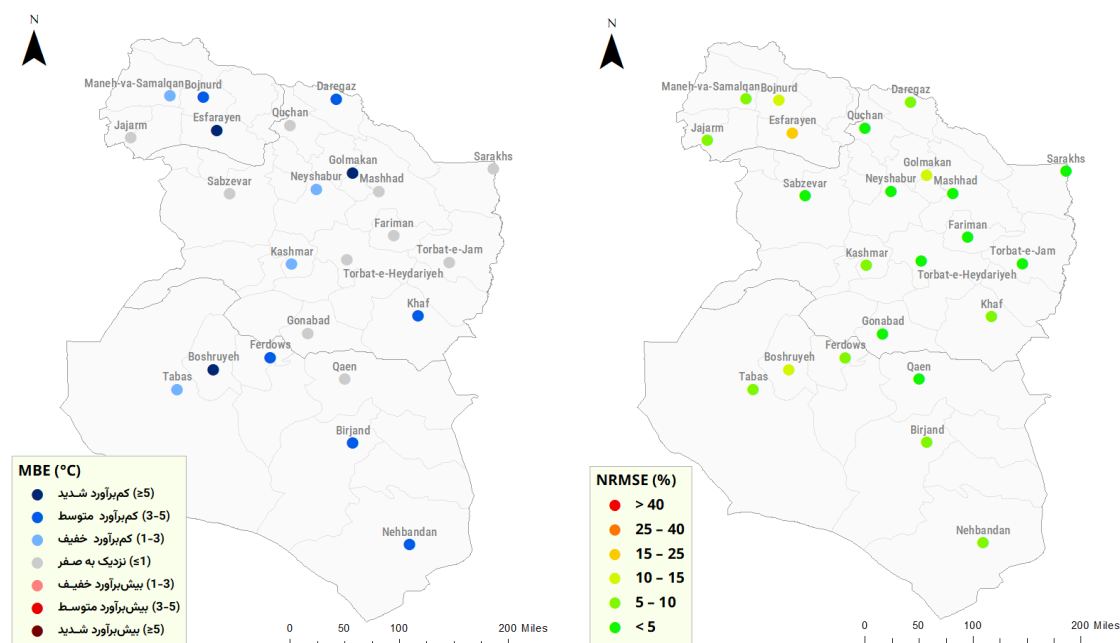
از نظر همبستگی و توافق کلی، هر دو پایگاه در شبیه‌سازی tm نیز عملکرد بسیار خوبی دارند (جدول ۵). در مقابل، NRMSE برای tm در ERA5 در حدود ۳ تا ۹ درصد و با میانگین ۵-۶ درصد و در AgMERRA در بازه‌ای وسیع‌تر، از حدود ۳ تا ۱۶ درصد (میانگین حدود ۷-۸ درصد) قرار گرفت؛ در این میان، شهرهایی مانند مشهد، سرخس، کوهسرخ، بجستان و تربت‌حیدریه در ERA5 و مشهد، سبزوار، قوچان و تربت‌حیدریه در AgMERRA کمترین خطا را داشتند، در حالی که در اسفراین، گل‌مکان، بجنورد، درگز، خواف، بیرجند، بشرویه و نهبندان در AgMERRA

جدول ۵- مقایسه دمای میانگین روزانه پایگاه‌های مختلف با مقادیر مشاهداتی بر اساس میانگین استانی شاخص‌های آماری

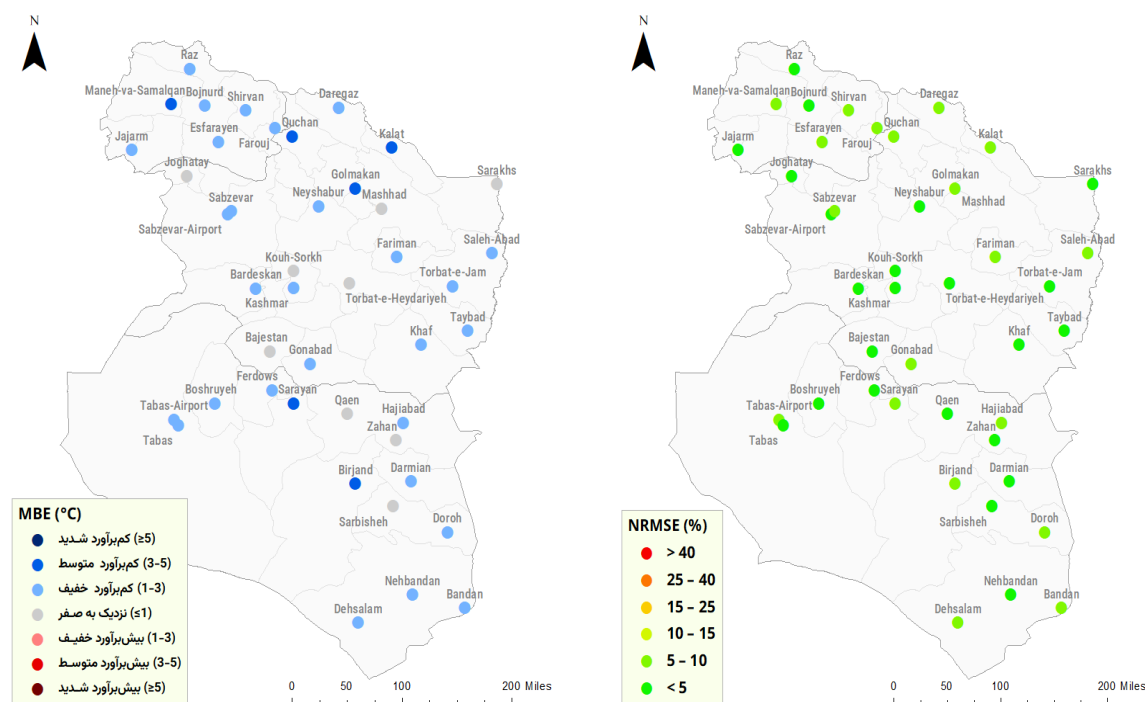
Dataset	Region	r	RMSE (C°)	NRMSE (%)	MBE (C°)	d
AgMERRA	North Khorasan	0.98	4.49	9.82	-3.71	0.94
	Razavi Khorasan	0.98	2.74	5.33	-1.57	0.98
	South Khorasan	0.98	3.87	7.75	-3.16	0.96
	Total	0.98	3.34	6.74	-2.36	0.97
ERA5	North Khorasan	0.99	2.57	5.5	-1.96	0.98
	Razavi Khorasan	0.99	2.33	4.74	-1.65	0.98
	South Khorasan	0.99	2.39	5.34	-1.73	0.98
	Total	0.99	2.39	5.07	-1.73	0.98

* ضریب همبستگی پیرسون، RMSE؛ جذر میانگین مربعات خطا، NRMSE؛ جذر میانگین مربعات خطای نرمال‌شده، MBE؛ میانگین

خطای اریبی، d؛ شاخص توافق ویلموت



شکل ۶- نقشه‌های نقطه‌ای عملکرد AgMERRA برای شبیه‌سازی دمای میانگین روزانه در استان‌های خراسان (رضوی، شمالی، جنوبی). راست: NRMSE (%). با طبقه‌بندی دستی مشترک (سبز = بهتر، قرمز = ضعیف‌تر). چپ: میانگین خطای اریبی (MBE, °C) با طیف رنگی و اگر قرمز-خاکستری-آبی و طبقات مقارن حول صفر. دوره آماری نقاط یکسان نیست؛ جزئیات در جدول ۲ آمده است.



شکل ۷- نقشه‌های نقطه‌ای عملکرد ERA5 برای شبیه‌سازی دمای میانگین روزانه در استان‌های خراسان (رضوی، شمالی، جنوبی). راست: NRMSE (%) با طبقه‌بندی دستی مشترک (سبز = بهتر، قرمز = ضعیف‌تر). چپ: میانگین خطای اریبی ($MBE, ^\circ C$) با طیف رنگی واگرا قرمز-خاکستری-آبی و طبقات مقارن حول صفر. دوره آماری نقاط یکسان نیست؛ جزئیات در جدول ۲ آمده است.

محلی را کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌کنند. از طرف دیگر، در ایستگاه‌های واقع در نواحی خشک و بیابانی جنوب و جنوب‌غرب منطقه (مانند بیرجند، نهبندان، طبس و حوالی آن‌ها) که دامنه‌ی نوسان روزانه‌ی دما بسیار زیاد و سطح زمین دارای پوشش گیاهی فقیر و آلوده‌های متفاوت است، AgMERRA در بسیاری موارد t_{min} و t_m را چند درجه خنک‌تر از مشاهدات شبیه‌سازی کرده و ERA5 نیز گرایش ملایم به کم‌برآوردی دما نشان داده است. علت اقلیمی این رفتار را می‌توان در ترکیب اثرات گرمایش شدید روزانه، سرمایش تشعشعی قوی شبانه، تفاوت‌های کوچک اما مهم ارتفاع و شیب بین ایستگاه و سلول شبکه‌ای و همچنین کم‌بودن ایستگاه‌های سینوپتیک مورد استفاده در فرایند بازتحلیل در این نواحی دانست؛ عواملی که باعث می‌شوند مدل، میدان دما را هموارتر از شرایط واقعی بیابانی بازنمایی کند. در نواحی کوهپایه‌ای شمالی و شمال‌غربی (خراسان شمالی و نیمه‌ی شمالی خراسان رضوی) نیز وجود ناهمواری‌های رشته‌کوه‌های کپه‌داغ و آلاداغ و تغییرات سریع ارتفاع در مقیاس چند کیلومتر، باعث افزایش خطای نسبی در برخی ایستگاه‌ها شده است. در مجموع، از منظر اقلیمی

از دید اقلیمی، الگوی فضایی دقت دو پایگاه‌داده در سه استان خراسان تا حد زیادی با ویژگی‌های جغرافیایی و ناهمگونی‌های اقلیمی منطقه سازگار است. در ایستگاه‌های واقع در دشت‌های باز و نسبتاً همگن (مانند مشهد، سبزوار، کاشمر، گل‌مکان و فردوس) که تغییرات دما بیشتر تحت تأثیر سامانه‌های جوی بزرگ‌مقیاس و گرادیان‌های ناحیه‌ای دما است و نقش ناهمگونی‌های خردمقیاس توپوگرافی کمتر است، هر دو پایگاه‌داده به‌ویژه ERA5 توانسته‌اند تغییرات روزانه‌ی دما را با r بالا، NRMSE چند درصدی و اریبی محدود بازتولید کنند. در مقابل، در ایستگاه‌هایی که در نواحی کوهستانی، حاشیه دره‌ها یا گذرگاه‌های باد (مانند قوچان، نیشابور، کلات، سرایان و بخشی از ایستگاه‌های خراسان جنوبی) قرار دارند، ناهمگونی توپوگرافی و شرایط محلی دما و رطوبت باعث افزایش اختلاف دمای ایستگاه با سلول شبکه‌ای بازتحلیل و افزایش خطای نسبی t_{min} و t_m در این نقاط شود. این موضوع به‌ویژه برای t_{min} قابل توجه است؛ زیرا مدل‌های بازتحلیل به‌دلیل تفکیک مکانی نسبتاً درشت و هموارسازی میدان دما، معمولاً نوسانات شدید شبانه و افت دمای ناشی از سرمایش تشعشعی در دره‌ها و فرورفتگی‌های

عین حال، روزآمد بودن و پوشش زمانی بلندمدت تر ERA5، همراه با پایداری نسبی شاخص‌ها، این پایگاه را گزینه‌ای مناسب‌تر برای مطالعات بلندمدت اقلیمی و کاربردهای مرتبط با آب و خاک در منطقه می‌سازد، در حالی که در کاربردهای بسیار حساس به مقدار مطلق دما یا رخداد‌های حدی، توجه به ناهمگونی فضایی اریبی و استفاده از روش‌های تصحیح خطا، به‌ویژه در برخی ایستگاه‌های AgMERRA و ERA5، توصیه می‌شود.

در مرحله بعد، تشعشع خورشیدی روزانه ERA5 در ۲۴ ایستگاه و AgMERRA در چهار ایستگاه بجنورد، مشهد، بیرجند و طبس با داده‌های مشاهداتی ارزیابی شد. میانگین r در ERA5 حدود ۰/۸۶ (با دامنه ۰/۴۷ تا ۰/۹۸) و در AgMERRA حدود ۰/۶۷ (بین ۰/۵۴ تا ۰/۷۶) به‌دست آمد که نشان‌دهنده هم‌بستگی قوی‌تر ERA5 با مشاهدات است، هرچند AgMERRA نیز به‌ویژه در بجنورد و مشهد r قابل قبولی دارد. میانگین RMSE برای ERA5 و AgMERRA به‌ترتیب حدود ۲/۵ و ۲/۶ و میانگین NRMSE آن‌ها به‌ترتیب حدود ۱۵/۵ و ۱۳/۹ درصد برآورد شد (جدول ۶)؛ بنابراین، با وجود هم‌بستگی ضعیف‌تر AgMERRA، بزرگی خطای نسبی آن در این چهار ایستگاه در همان مرتبه ERA5 و اندکی کوچک‌تر است. باید توجه داشت که به‌دلیل محدود بودن تعداد ایستگاه‌های دارای داده AgMERRA (فقط چهار ایستگاه)، نتایج به‌دست‌آمده از این پایگاه بیشتر جنبه مقدماتی دارد و امک آن تعمیم فضایی آن در سطح سه استان خراسان محدود است. در ارزیابی فضایی ERA5، در ۱۸ ایستگاه از ۲۴ ایستگاه مقدار r بزرگ‌تر از ۰/۸۳ بود و تنها چند ایستگاه مانند قوچان، نیشابور، گناباد، بجنورد، بیرجند و طبس هم‌بستگی متوسط تا ضعیف‌تری (r بین ۰/۴۷ تا ۰/۷۵) نشان دادند. بهترین عملکرد در ایستگاه‌هایی مانند تایباد، سبزوار، بردسکن، شیروان و خواف مشاهده شد که در آن‌ها r در حدود ۰/۹۶ تا ۰/۹۸ و NRMSE کمتر از ۷ درصد بود؛ در مقابل، ایستگاه‌هایی نظیر بجستان، نیشابور، قوچان و نهبندان دارای NRMSE نسبتاً بالایی (حدود ۳۰ تا ۵۵ درصد) بودند که نشان‌دهنده ناهمگونی فضایی دقت ERA5 و ضرورت کالیبراسیون محلی در این نقاط است (شکل ۹). میانگین d برای ERA5 و AgMERRA به‌ترتیب حدود ۰/۸۷ و ۰/۸۰

تفاوت دقت ERA5 و AgMERRA در ایستگاه‌های مختلف بیشتر بازتاب تفاوت رژیم‌های حرارتی و توپوگرافی منطقه است تا رفتار غیرمنتظره‌ی خود پایگاه‌داده‌ها؛ به‌گونه‌ای که در مناطق دشت و کویر با ساختار حرارتی همگن‌تر، هر دو پایگاه‌داده (به‌ویژه ERA5) عملکرد بسیار خوبی برای t_{max} و عملکرد قابل قبول برای t_{min} و t_m دارند، در حالی که در نواحی کوهستانی، دره‌ها و حاشیه‌ی بیابان‌ها، اثرات خرداقلیمی و پیچیدگی میدان دما باعث افزایش اریبی و NRMSE می‌شود. بنابراین نتایج آماری این پژوهش، از منظر اقلیمی نیز منطقی بوده و نشان می‌دهد که استفاده از داده‌های بازتحلیل برای کاربردهای اقلیمی و هیدرولوژیک در منطقه، به‌ویژه در ایستگاه‌های با توپوگرافی پیچیده یا اقلیم بسیار خشک، باید همراه با در نظر گرفتن این ناهمگونی فضایی و در صورت امکان، تصحیح اریبی محلی باشد.

مطالعاتی در زمینه ارزیابی پایگاه‌داده AgMERRA برای داده‌های دما در سطح استان‌های خراسان رضوی و شمالی انجام شده است که همگی نتایج این پژوهش را تأیید می‌کنند (Farhadi et al., 2021; Yaghoubi et al., 2018). همچنین ارزیابی‌های سراسری اخیر از مجموعه‌های ERA5 و دیگر داده‌های بازتحلیل در ایران نشان داده‌اند که ERA5 در اکثر نواحی و اقلیم‌ها دقیق‌ترین برآورد دمای هوا را ارائه می‌دهد و خطاهای آن عمدتاً در مناطق کوهستانی و ساحلی پیچیده افزایش می‌یابد، در حالی که به‌طور کلی دقت دما در این پایگاه‌داده‌ها بالاتر از بارش گزارش شده است (Javanshiri et al., 2023; Heydari et al., 2023; Mohammadi Ghaleni and Sharafi, 2022; Rahimi et al., 2023). با در نظر گرفتن این‌که دوره ارزیابی ERA5 در این مطالعه طولانی‌تر (۱۹۴۰ تا ۲۰۲۲) و دوره AgMERRA محدود به ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰ است، مقایسه مستقیم مقادیر شاخص‌ها صرفاً به‌صورت تقریبی معنا دارد؛ با این وجود، مجموعه نتایج دما در این پژوهش و مطالعات پیشین نشان می‌دهد که هر دو پایگاه‌داده برای شبیه‌سازی روزانه t_{min} ، t_m و t_{max} در مقیاس ایستگاهی سه استان خراسان از دقت قابل قبولی برخوردارند و در صورت نیاز، با روش‌های تصحیح آماری می‌توان دقت آن‌ها را به‌طور محسوسی بهبود داد (Kamali et al., 2025; Lashkari et al., 2015; Karami and SalmanMahiny, 2022).

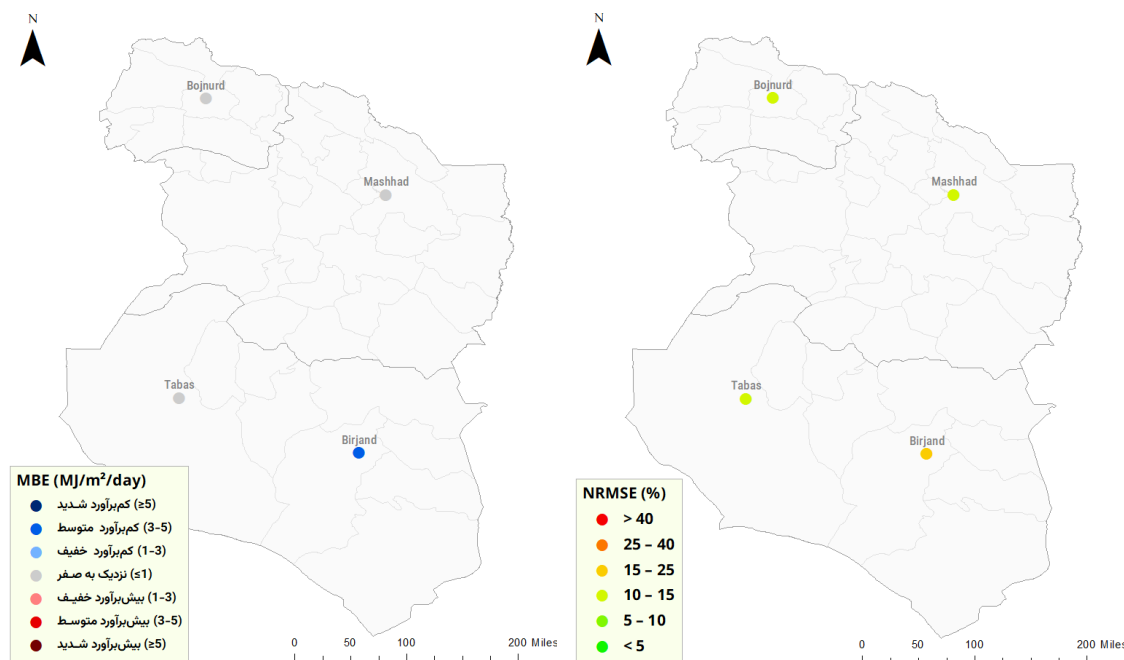
توانایی مناسبی برای بازتولید تغییرات روزانه تشعشع خورشیدی دارد و AgMERRA نیز، با وجود پوشش فضایی محدود، کارایی متوسط تا قابل قبولی در چهار ایستگاه موجود دارد، اما برای تحلیل‌های فضایی دقیق و کاربردهای حساس به دقت تابش، استفاده از آن‌ها همراه با تصحیح خطا و توجه به ناهمگونی فضایی خطا ضروری است.

و میانگین MBE هر دو پایگاه نزدیک صفر و اندکی منفی (در حدود -0.3 تا -0.9) به دست آمد که حاکی از نبود سوگیری سیستماتیک بزرگ در مقیاس منطقه‌ای است (شکل‌های ۸ و ۹)، هرچند در برخی ایستگاه‌ها (مانند بجستان و نهبندان در ERA5 و بیرجند در AgMERRA) اریبی منفی چند واحدی مشاهده شد. در مجموع، نتایج این مرحله نشان می‌دهد که ERA5 در بیشتر شهرستان‌های سه استان خراسان

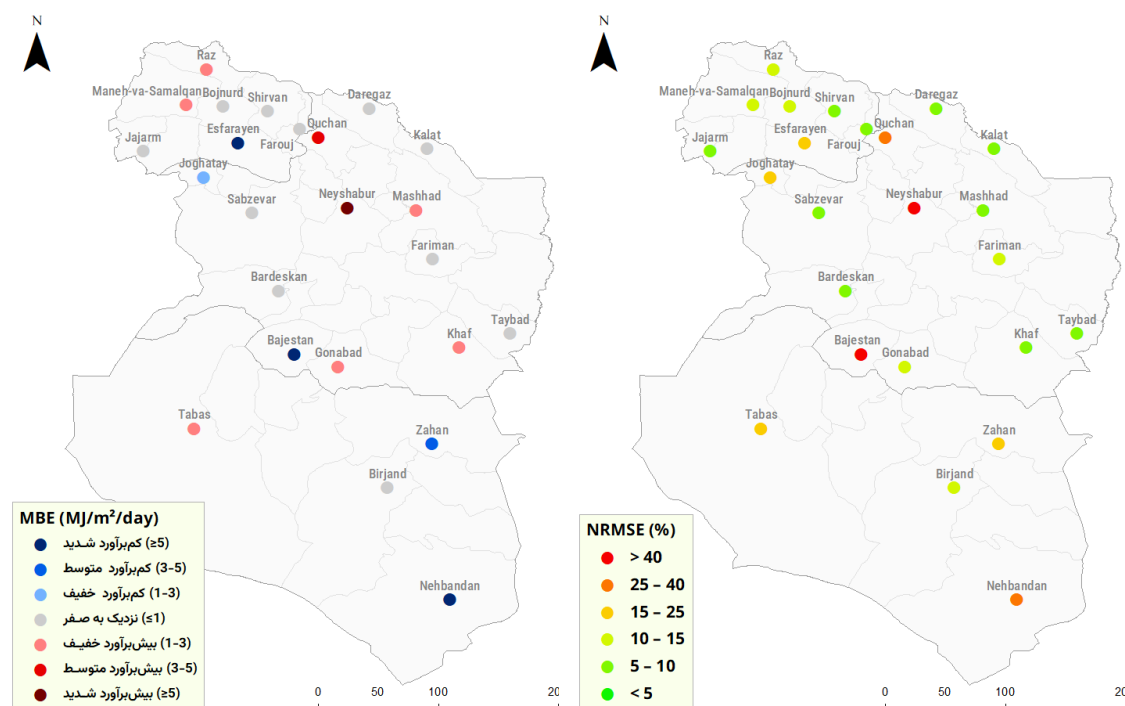
جدول ۶- مقایسه تشعشع خورشیدی روزانه پایگاه‌های مختلف با مقادیر مشاهداتی بر اساس میانگین استانی شاخص‌های آماری

Dataset	Region	r	RMSE (MJ/m ² /day)	NRMSE (%)	MBE (MJ/m ² /day)	d
AgMERRA	North Khorasan	0.7	5.4	13	-0.47	0.84
	Razavi Khorasan	0.76	5.28	11.7	-0.51	0.87
	South Khorasan	0.6	7.10	15.5	-1.24	0.75
	Total	0.66	6.22	13.92	-0.86	0.80
ERA5	North Khorasan	0.91	4.18	11.41	0.1	0.92
	Razavi Khorasan	0.85	4.94	17	0.41	0.86
	South Khorasan	0.82	7.80	17.85	-3.58	0.79
	Total	0.86	5.19	15.51	-0.35	0.87

۳- ضریب همبستگی پیرسون، RMSE؛ جذر میانگین مربعات خطا، NRMSE؛ جذر میانگین مربعات خطای نرمال‌شده، MBE؛ میانگین خطای اریبی، d؛ شاخص توافق ویلموت



شکل ۸- نقشه‌های نقطه‌ای عملکرد AgMERRA برای شبیه‌سازی تشعشع خورشیدی روزانه در استان‌های خراسان (رضوی، شمالی، جنوبی). راست: NRMSE (%) با طبقه‌بندی دستی مشترک (سبز = بهتر، قرمز = ضعیف‌تر). چپ: میانگین خطای اریبی (MBE, MJ/m²/day) با طیف رنگی واگرا قرمز-خاکستری-آبی و طبقات متقارن حول صفر. دوره آماری نقاط یکسان نیست؛ جزئیات در جدول ۲ آمده است.



شکل ۹- نقشه‌های نقطه‌ای عملکرد ERA5 برای شبیه‌سازی تشعشع خورشیدی روزانه در استان‌های خراسان (رضوی، شمالی، جنوبی). راست: $NRMSE$ (%) با طبقه‌بندی دستی مشترک (سبز = بهتر، قرمز = ضعیف‌تر). چپ: میانگین خطای اریبی ($MBE, MJ/m^2/day$) با طیف رنگی واگرا قرمز-خاکستری-آبی و طبقات متقارن حول صفر. دوره آماری نقاط یکسان نیست؛ جزئیات در جدول ۲ آمده است.

RMSE و $NRMSE$ آن به ترتیب حدود ۳/۹ و ۱۱/۹ درصد، در برابر مقادیر حدود ۴/۶ و ۱۴ درصد برای AgMERRA بود و میانگین d نیز برای ERA5 حدود ۰/۹۴ و برای AgMERRA حدود ۰/۹۲ محاسبه شد (جدول ۷). بررسی MBE نیز حاکی از آن است که ERA5 در مقیاس این ایستگاه تقریباً بدون سوگیری سیستماتیک (میانگین حدود ۰/۱-) عمل می‌کند، در حالی که AgMERRA در اغلب ایستگاه‌ها تشعشع روزانه را به‌طور میانگین حدود ۲ تا ۳ واحد کمتر از مقادیر آنگستروم-پرسکات برآورد می‌کند (MBE میانگین حدود ۲/۲-) (جدول ۸ و ۹).

به‌طور کلی، نتایج هر دو مرحله ارزیابی نشان داد که ERA5 در بیشتر ایستگاه‌های سه استان خراسان برای شبیه‌سازی تشعشع خورشیدی روزانه، به‌ویژه از نظر هم‌بستگی زمانی و بزرگی خطا در سطح قابل‌قبولی عمل می‌کند، هرچند در برخی ایستگاه‌ها مانند بجستان، نیشابور، قوچان، نهبندان و چند نقطه دیگر خطای نسبی بالاتر و نیاز به کالیبراسیون محلی مشاهده شد. AgMERRA نیز با وجود تعداد محدود ایستگاه‌های در دسترس (۴ ایستگاه در مقایسه با مشاهدات و

در مرحله دوم، برای غلبه بر محدودیت تعداد ایستگاه‌های دارای داده تشعشع مشاهداتی (عدم وجود اندازه‌گیری با پیرانومتر) و همچنین محدودیت طول دوره برخی ایستگاه‌ها، تشعشع خورشیدی روزانه دو پایگاه‌داده در ۹ ایستگاه سینوپتیک استان خراسان رضوی (گلمکان، گناباد، کاشمر، مشهد، نیشابور، سبزوار، سرخس، تربت‌حیدریه و تربت‌جام) با مقادیر محاسبه‌شده بر اساس معادله آنگستروم-پرسکات (با ضرایب کالیبره‌شده برای استان خراسان رضوی) مقایسه شد. با توجه به این‌که داده‌های به‌دست آمده از معادله آنگستروم-پرسکات همانند دو پایگاه‌داده بازتحلیل ماهیت مدل‌مبنی دارد، مقایسه بین دو مدل بیشتر به‌عنوان یک آزمون سازگاری در نظر گرفته می‌شود تا اعتبارسنجی کامل. در این ارزیابی، میانگین r برای هر دو پایگاه‌داده تقریباً یکسان و در حدود ۰/۹۳ به‌دست آمد (دامنه ۰/۸۹ تا ۰/۹۵ برای ERA5 و ۰/۹۰ تا ۰/۹۴ برای AgMERRA) که نشان‌دهنده توانایی مناسب هر دو پایگاه‌داده در بازنمایی نوسانات زمانی تشعشع است. با این حال، مقایسه شاخص‌های خطا نشان می‌دهد ERA5 از نظر تطابق مقداری عملکرد بهتری دارد؛ به‌طوری‌که میانگین

قرار گیرند، با این تفاوت که ERA5 به دلیل خطای نسبی کوچک‌تر، نبود اریبی قابل توجه و پوشش زمانی و فضایی گسترده‌تر، گزینه مناسب‌تری برای مطالعات اقلیمی و کاربردهای آب و خاک است، در حالی که استفاده از AgMERRA (و تا حدی ERA5 در ایستگاه‌های با خطای بالا) ترجیحاً همراه با تصحیح اریبی و کالیبراسیون محلی توصیه می‌شود.

۹ ایستگاه در مقایسه با آنگستروم-پرسکات)، در حد متوسط تا قابل قبول عمل کرده و به‌ویژه در مقایسه با مقادیر آنگستروم-پرسکات هم‌بستگی مناسبی نشان داد، اما در اغلب ایستگاه‌ها دچار کم‌برآوردی سیستماتیک تشعشع است و پوشش فضایی آن در منطقه بسیار محدود است. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که هر دو پایگاه داده می‌توانند در شرایط کمبود داده، به عنوان منبع کمکی برای برآورد تشعشع خورشیدی روزانه در سطح استان‌های خراسان مورد استفاده

جدول ۷- مقایسه تشعشع خورشیدی روزانه پایگاه‌های مختلف با مقادیر محاسبه شده آنگستروم - پرسکات بر اساس میانگین

استانی شاخص‌های آماری

Dataset	Region	r	RMSE (MJ/m ² /day)	NRMSE (%)	MBE (MJ/m ² /day)	d
AgMERRA	Razavi Khorasan	0.93	4.56	14	-2.18	0.92
ERA5	Razavi Khorasan	0.93	3.87	11.93	-0.14	0.94

۴ ضریب همبستگی پیرسون، RMSE؛ جذر میانگین مربعات خطا، NRMSE؛ جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده، MBE؛ میانگین

خطای اریبی، d؛ شاخص توافق ویلموت

جدول ۸- مقایسه تشعشع خورشیدی روزانه AgMERRA با مقادیر محاسبه شده آنگستروم - پرسکات متناظر در مناطق مورد مطالعه

	Site ایستگاه	days تعداد روزها	Start from شروع دوره	End at پایان دوره	r	RMSE (MJ/m ² /day)	NRMSE (%)	MBE (MJ/m ² /day)	d
Razavi Khorasan	Golmakan	7544	1987/01/01	2010/12/31	0.91	4.57	13.5	-1.73	0.92
	Gonabad	8216	1987/02/07	2010/12/31	0.92	4.87	14	-2.58	0.9
	Kashmar	8719	1986/04/01	2010/12/31	0.93	4.58	14.3	-2.84	0.91
	Mashhad	11158	1980/01/01	2010/12/31	0.92	3.45	12.5	1.1	0.95
	Neyshabur	6801	1991/03/12	2010/12/31	0.94	4.46	13.7	-2.51	0.92
	Sabzevar	10482	1981/10/08	2010/12/31	0.9	4.87	14	-1.83	0.91
	Sarakhs	9737	1984/04/02	2010/12/31	0.94	4.74	14.4	-2.82	0.92
	Torbat-e-Heydariyeh	10520	1981/10/12	2010/12/31	0.94	4.66	14.6	-3.13	0.91
	Torbat-e-Jam	6292	1993/01/01	2010/12/31	0.94	4.83	15	-3.26	0.92

۴ ضریب همبستگی پیرسون، RMSE؛ جذر میانگین مربعات خطا، NRMSE؛ جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده، MBE؛ میانگین خطای

اریبی، d؛ شاخص توافق ویلموت

جدول ۹- مقایسه تشعشع خورشیدی روزانه ERA5 با مقادیر محاسبه شده از آنگستروم - پرسکات متناظر در مناطق مورد مطالعه

	Site ایستگاه	days تعداد روزها	Start from شروع دوره	End at پایان دوره	r	RMSE (MJ/m ² /day)	NRMSE (%)	MBE (MJ/m ² /day)	d
Razavi Khorasan	Golmakan	8640	1987/01/01	2013/12/31	0.91	4.29	12.7	0.35	0.93
	Gonabad	12599	1987/02/07	2022/12/31	0.92	3.86	11.1	-0.56	0.94
	Kashmar	13097	1986/04/01	2022/12/31	0.94	3.43	10.7	-0.8	0.95
	Mashhad	22925	1958/12/03	2022/12/31	0.93	4.28	15.5	3.11	0.92
	Neyshabur	11160	1991/03/12	2022/12/31	0.92	3.9	11.9	-0.34	0.94
	Sabzevar	18345	1967/03/01	2022/12/31	0.89	4.5	12.9	-0.13	0.92
	Sarakhs	14117	1984/04/02	2022/12/31	0.94	3.71	11.3	-0.86	0.95
	Torbat-e-Heydariyeh	17815	1969/03/03	2022/12/31	0.94	3.32	10.4	-1	0.96
	Torbat-e-Jam	10672	1993/01/01	2022/12/31	0.95	3.51	10.9	-1.02	0.95

۴ ضریب همبستگی پیرسون، RMSE؛ جذر میانگین مربعات خطا، NRMSE؛ جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده، MBE؛ میانگین خطای

اریبی، d؛ شاخص توافق ویلموت

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد که هر دو پایگاه‌داده ERA5 و AgMERRA در شبیه‌سازی دمای حداقل، حداکثر و میانگین روزانه در ایستگاه‌های سه استان خراسان، همبستگی بالا و خطای نسبی چند درصدی دارند، هرچند هر دو پایگاه‌داده، به‌ویژه در t_{min} و t_{max} ، دچار کم‌برآوردی دما در برخی ایستگاه‌های کوهستانی و بیابانی هستند. برای تشعشع خورشیدی نیز ERA5 در اکثر ایستگاه‌ها، و AgMERRA در تعداد محدودی ایستگاه، عملکردی از قابل‌قبول تا خوب نشان دادند، اما ناهمگونی فضایی خطا و گرایش به کم‌برآوردی تشعشع، ضرورت کالیبراسیون محلی را برجسته می‌کند. با توجه به پوشش زمانی بلندمدت‌تر (۱۹۴۰ تا ۲۰۲۲)، قدرت تفکیک مکانی بالاتر و تداوم به‌روزرسانی، ERA5 گزینه مناسب‌تری برای مطالعات بلندمدت اقلیمی، پایش تغییرات دما و تشعشع، و کاربردهای مرتبط با آب و خاک و برنامه‌ریزی کشاورزی در منطقه خراسان است؛ در حالی که AgMERRA، به‌ویژه در مطالعاتی که پیش‌تر بر مبنای آن انجام شده‌اند، همچنان می‌تواند به‌عنوان منبع مکمل، ترجیحاً همراه با تصحیح اریبی، مورد استفاده قرار گیرد. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، متغیرهای دیگری مانند بارش، باد و تبخیر-تعرق نیز برای هر دو پایگاه به‌خصوص ERA5 ارزیابی شده و کارایی روش‌های تصحیح آماری اریبی و ریزمقیاس‌نمایی فضایی در بهبود دقت آن‌ها بررسی شود.

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.

منابع

- Possibility of using AgMERRA Networked Dataset in North Khorasan Province. Iranian Journal of Field Crops Research, 19(2), 201-217. <https://doi.org/10.22067/jcsc.2021.69532.1044>.
- Freitas, A. A. d., Carvalho, V. S. B., and Reboita, M. S. (2024). Extreme precipitation events during the wet season of the South America monsoon: A historical analysis over three major Brazilian watersheds. Climate, 12(11), 188. <https://doi.org/10.3390/cli12110188>.
- Grassini, P., van Bussel, L. G. J., Van Wart, J., Wolf, J., Claessens, L., Yang, H., Boogaard, H., de Groot, H., van Ittersum, M. K. and Cassman, K. G. (2015). How good is good enough? Data requirements for reliable crop yield simulations and yield-gap analysis. Field Crops Res., 177, 49-63. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.03.004>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M.,...Jean-Noël, T. (2020). The ERA5 global reanalysis. Q. J. R. Meteorol. Soc., 146(730), 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.
- Heydari, A., Zarrin, A. and Dadashi-Roudbari, A. (2023). Investigating the performance of the deterministic and probabilistic versions (multi-member ensemble) of the ERA5 dataset in estimating Iran's temperature. Researches in Earth Sciences, 14(4), 1-20. <https://doi.org/10.48308/esrj.2023.103874>.
- Iizumi, T., Takimoto, T., Masaki, Y., Maruyama, A., Kayaba, N., Takaya, Y. and Masutomi, Y. (2024). A hybrid reanalysis-forecast meteorological forcing data for advancing climate adaptation in agriculture. Sci. Data, 11(1), 849. <https://doi.org/10.1038/s41597-024-03702-5>
- Javanshiri, Z., Asadi Oskouei, E., Flamarzi, Y. and Abasi, F. (2023). Accuracy assessment of CFS-v2, MERRA-2, ERA-5 temperature over the different regions of Iran. Iranian Journal of Geophysics, 17(4), 1-24. <https://doi.org/10.30499/ijg.2022.360882.1452> (In Persian with English Summary)
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Leetmaa, A., Reynolds, R., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K. C., Ropelewski, C.,...Joseph, D. (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. Bull. Am. Meteorol. Soc., 77(3), 437-471.
- Fallah Ghalhari, Q., and Shakeri, F. (2016). Calibration of Angstrom- Prescott Coefficients for Selected Stations of Khorasan-e Razavi Province. Water and Soil Science, 26(3-2), 229-241. (In Persian with English Summary)
- Farhadi, M., Jahan, M. and Bannayan Aval, M. (2021). Investigation of Validity and

- Datasets Accuracy to Precipitation, Temperature and Potential Evapotranspiration in Different Climates across Iran. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 16(5), 879-890.
20. Rahimi, H., Asgari, J. and Nafisi, V. (2023). The effect of data sources on calculating mean temperature and integrated water vapor in Iran. *Meteorological Applications*, 30(6), e2167. <https://doi.org/10.1002/met.2167>
 21. Rolle, M., Tamea, S. and Claps, P. (2022). Climate-driven trends in agricultural water requirement: an ERA5-based assessment at daily scale over 50 years. *Environ. Res. Lett.*, 17(4), 044017. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac57e4>.
 22. Ruane, A. C., Goldberg, R. and Chrysanthacopoulos, J. (2015). Climate forcing datasets for agricultural modeling: Merged products for gap-filling and historical climate series estimation. *Agric. For. Meteorol.*, 200, 233-248. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.09.016>
 23. Sianturi, Y., Marjuki, & Sartika, K. (2020, 2020). (Evaluation of ERA5 and MERRA2 reanalyses to estimate solar irradiance using ground observations over Indonesia region international energy conference astechnova 2019.
 24. Sianturi, Y., Marjuki and Sartika, K. (2020). Evaluation of ERA5 and MERRA2 reanalyses to estimate solar irradiance using ground observations over Indonesia region. *AIP Conference Proceedings*. 2223. 020002. <https://doi.org/10.1063/5.0000854>.
 25. Trenberth, K. E., Dai, A., van der Schrier, G., Jones, P. D., Barichivich, J., Briffa, K. R. and Sheffield, J. (2014). Global warming and changes in drought. *Nat. Clim. Chang.*, 4(1), 17-22. <https://doi.org/10.1038/nclimate2067>
 26. van den Hurk, B., Kim, H., Krinner, G., Seneviratne, S. I., Derksen, C., Oki, T., Douville, H., Colin, J., Ducharne, A., Cheruy, F., Viovy, N., Puma, M. J., Wada, Y., Li, W., Jia, B., Alessandri, A., Lawrence, D. M., Weedon, G. P., Ellis, R.,...Sheffield, J. (2016). LS3MIP (v1.0) contribution to CMIP6: the Land Surface, Snow and Soil moisture Model Intercomparison Project – aims, setup and expected outcome. *Geosci. Model Dev.*, 9(8), 2809-2832. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-2809-2016>
 27. van Ittersum, M. K., Cassman, K. G., Grassini, P., Wolf, J., Tittonell, P. and Hochman, Z. (2013). Yield gap analysis with local to global relevance—A review. *Field Crops Res.*, 143, [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077%3C0437:TNYRP%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077%3C0437:TNYRP%3E2.0.CO;2)
 10. Kamali, S., Ghahreman, N. and Bannayan, M. (2025). Evaluation of quantile mapping correction methods on AgMERRA and ERA5 precipitation and air temperature reanalysis data in Khorasan Razavi Province. *Journal of Agricultural Meteorology*, 13(1), 3-21. <https://doi.org/10.22125/agmj.2025.481865.1175>.
 11. Karami, R. and SalmanMahiny, A. (2022). Applicability Assessment of AgMERRA Database in time of data scarcity in Synoptic Stations of Sistan Plain. *Climate Change Research*, 3(9), 71-86. <https://doi.org/10.30488/ccr.2022.337827.1076>.
 12. Katsepor, J. T., Greve, K., Yamba, E. I. and Amoah, E. G. (2024). Comparative analysis of satellite and reanalysis data with ground-based observations in Northern Ghana. *Meteorol. Appl.*, 31(4). <https://doi.org/10.1002/met.2226>
 13. Khansalari, S., Kordjazi, M., Majidi, O., Mollaraazi, A. and Saadatabadi, A. (2023). Searching suitable areas for installing solar panels in Golestan province using observation, ERA5 and GEOS-5 data. *Iranian Journal of Geophysics*, 17(1), 163-184. <https://doi.org/10.30499/ijg.2022.341806.1425>.
 14. Kim, M., and Lee, E. (2022). Validation and comparison of climate reanalysis data in the East Asian monsoon region. *Atmosphere (Basel)*, 13(10), 1589. <https://doi.org/10.3390/atmos13101589>
 15. Koochi, S., Bahmanabadi, B., Partovi, Z., Safari, F., Khajevand Sas, M. and Etedali, R. (2023). Evaluation of ERA5 Reanalysis Dataset for Simulation of Climatic Variables and Water Harvesting from Humidity (Case Study: Qazvin Province). *jwss*, 27(4), 153-167. <http://dx.doi.org/10.47176/jwss.27.4.50623>
 16. Lashkari, A., Bannayan Aval, M., Koocheki, A., Alizadeh, A., Choi, Y. S. and Park, S. (2016). Applicability of AgMERRA forcing dataset for gap-filling of in-situ meteorological observation, Case Study: Mashhad Plain. *Water and Soil*, 29(6), 1749-1758. <https://doi.org/10.22067/jsw.v29i6.41686>
 17. Lobell, D. B., Schlenker, W. and Costa-Roberts, J. (2011). Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, 333(6042), 616-620. <https://doi.org/10.1126/science.1204531>
 18. Mohammadi, M. and Forozanfard, M. (2024). Evaluating ERA5 Reanalysis for Climate Trend Analysis in Sistan and Baluchestan, Iran. *Climate Change Research*, 5(19), 37-54. <https://doi.org/10.30488/ccr.2024.458748.1218>.
 19. Mohammadi Ghaleni, M. and Sharafi, S. (2022). Evaluation of CRU TS4.05 and ERA5

32. Yaghoubi, F., Bannayan Aval, M. and Asadi, G. A. (2018). Evaluation of Grided AgMERRA Weather Data for Simulation of Water Requirement and Yield of Rainfed Wheat in Khorasan Razavi Province. *Water and Soil*, 32(2), 415-431. <https://doi.org/10.22067/jsw.v32i2.68948>
33. Yeşilköy, S. and Demir, I. (2024). Crop yield prediction based on reanalysis and crop phenology data in the agroclimatic zones. *Theor. Appl. Climatol.*, 155(7), 7035-7048. <https://doi.org/10.1007/s00704-024-05046-x>
34. Yilmaz, M. (2023). Accuracy assessment of temperature trends from ERA5 and ERA5-Land. *Sci. Total Environ.*, 856(Pt 2), 159182. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159182>
35. Zhang, R., Li, L., Zhang, Y., Huang, F., Li, J., Liu, W., Mao, T., Xiong, Z. and Shangguan, W. (2021). Assessment of agricultural drought using soil water deficit index based on ERA5-Land soil moisture data in four southern provinces of China. *Agriculture*, 11(5), 411. <https://doi.org/10.3390/agriculture11050411>
- 4-17. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009>
28. Van Wart, J., Grassini, P., Yang, H., Claessens, L., Jarvis, A. and Cassman, K. G. (2015). Creating long-term weather data from thin air for crop simulation modeling. *Agric. For. Meteorol.*, 209-210, 49-58. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.02.020>
29. van Wart, J., Kersebaum, K. C., Peng, S., Milner, M. and Cassman, K. G. (2013). Estimating crop yield potential at regional to national scales. *Field Crops Res.*, 143, 34-43. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.11.018>
30. Viggiano, M., Busetto, L., Cimini, D., Di Paola, F., Gerald, E., Raghetti, L., Ricciardelli, E. and Romano, F. (2019). A new spatial modeling and interpolation approach for high-resolution temperature maps combining reanalysis data and ground measurements. *Agric. For. Meteorol.*, 276-277(107590), 107590. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.05.021>
31. White, J. W., Hoogenboom, G., Kimball, B. A. and Wall, G. W. (2011). Methodologies for simulating impacts of climate change on crop production. *Field Crops Res.*, 124(3), 357-368. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.07.001>