


Evaluation of ERA5 reanalysis data in convective parameters estimation of vertical wind shear and lifted index using radiosonde data in Iran

Pegahfar, N.¹ 

1. Atmospheric Science Research Center, Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science, Tehran, Iran.

Corresponding Author E-mail: pegahfar@inio.ac.ir

(Received: 6 Feb 2024, Revised: 8 April 2024, Accepted: 21 May 2024, Published online: 5 Oct 2024)

Summary

The variety of produced variables at the surface and atmospheric pressure levels, appropriate resolution, and global coverage of the ERA5 reanalysis data have led its consideration both in numerous climate research studies and for predicting atmospheric parameters. The initial step in using reanalysis data involves its verification using observational data. Despite the scattered nature of measuring stations, observational data remains a practical dataset for this purpose, particularly in investigating thunderstorms. In this research, we have verified the accuracy of ERA5 reanalysis data in estimating of two convective parameters: the Lifted Index (LI) and Vertical Wind Shear (VWSH). To achieve this, we analyzed radiosonde data from nine stations across Iran (including Tabriz, Mashhad, Tehran, Kermanshah, Isfahan, Ahvaz, Kerman, Shiraz and Zahedan stations) in the period of 1990-2020. Statistical indicators were employed for comparison between the reanalysis data and observational data. Several constraints were applied to the data. For instance, both temperature and dew point profiles should be measured simultaneously. Profiles that terminated below the 6 km above the ground or provided data at fewer than 10 pressure levels were excluded. Additionally, some constraints were utilized to quality control wind and temperature gradients. Specifically: (I) Profiles were removed if the lapse rate in the mid-troposphere exceeded 9 K/km, (II) Profiles were excluded if the lapse rate in the low-troposphere exceeded 11 K/km, (III) Profiles were discarded if VWSH-1000 exceeded 35 m/s, (IV) Profiles were omitted if VWSH-3000 exceeded 45 m/s and (V) Profiles were removed if VWSH-6000 exceeded 70 m/s.

The VWSH was calculated across three layers at altitudes of 1000, 3000 and 6000 meters from the surface. Investigations were conducted on daily, monthly, seasonal and long-term time scales. On a monthly scale, the minimum (maximum) root mean square errors (RMSE) for VWSH-1000, VWSH-3000, and VWSH-6000 were approximately 3 (8.5), 3.36 (9.84), and 4 (20) m/s, respectively. The results showed that the ERA5 reanalysis data consistently underestimated the value of VWSH-1000 across all stations (except Ahvaz station in recent years). The estimation of VWSH-3000 and VWSH-6000 parameters exhibited both overestimation and underestimation in different months. Notably, the highest error in ERA5 data for VWSH-6000 occurred during January. Across most stations, the largest errors were observed during cold months (particularly for the VWSH-6000 parameter), while the smallest errors occurred during warm months. In conclusion, the results suggest that as the height of the investigated layer increases, the performance of ERA5 in generating the considered VWSH parameters at the stations improves, especially in recent years.

A comparison between reanalysis-LI and observational-LI indicatedes that the highest (lowest) error occurs during warm (cold) months of the year. Throughout the study period, the reanalysis data produced an error of at least 10 K (at Zahedan station) and up to 15 K (at Tehran station) in LI estimation. Except for Ahvaz station, LI was consistently underestimated across all stations. The monthly mean of reanalysis-LI reflected more unstable conditions, whereas the observed values indicated a more stable atmosphere. Consequently, reanalysis-LI may not be a suitable metric for distinguishing stability and instability in the considered stations. However, in Mashhad and Tehran stations, there were consistencies between the trend of annual average values from reanalysis and observational data. In other stations, this agreement becomes evident in recent years. However, in some stations, the annual average value of reanalysis LI has overcome the observations, while in others, it is the opposite.

Keywords: ERA5 reanalysis data, vertical wind shear, lifted index, radiosonde.

ارزیابی داده‌های بازتحلیل ERA5 در برآورد پارامترهای همرفتی با استفاده از داده‌های رادیوگمانه در ایران

نفسه پگاهفر^۱

۱. پژوهشکده علوم جوی، پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، تهران، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: pegahfar@inio.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۷، بازنگری: ۱۴۰۳/۱/۲۰، پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۳/۱، انتشار آنلاین: ۱۴۰۳/۷/۱۴)

چکیده

در این تحقیق داده‌های ERA5 در برآورد دو دسته پارامتر همرفتی شامل شاخص بالابری (Lifted Index) LI و چینش قائم بردار باد در سه لایه WWSH (Vertical Wind Shear) در ایستگاه‌های جو بالا در ایران در بازه ۱۹۹۰-۲۰۲۰ به کمک شاخص‌های آماری ارزیابی شد. در مقیاس ماهانه، کمینه (بیشینه) مقدار RMSE برای WWSH-1000، WWSH-3000 و WWSH-6000 به ترتیب حدود ۳ (۸/۵)، ۳/۳۶ (۹/۸۴) و ۴ (۲۰) متر بر ثانیه بود. داده‌های بازتحلیل مقدار WWSH-1000 را در تمامی ایستگاه‌ها (به جز ایستگاه اهواز) فرورآورد کرد. برآورد پارامترهای WWSH-3000 و WWSH-6000 با فراب‌آورد/فرورآورد در ماه‌های مختلف در ایستگاه‌ها همراه بود. در اغلب ایستگاه‌ها بیشترین (کمترین) خطا در ماه‌های سرد (گرم) رخ داد. روند تغییرات هر سه پارامتر WWSH نشان داد که با افزایش ارتفاع لایه، عملکرد ERA5 در برآورد پارامتر چینش در ایستگاه‌ها به‌ویژه در سال‌های اخیر بهبود یافته است. داده‌های بازتحلیل شاخص LI را با بیشترین (کمترین) خطا در ماه‌های گرم (سرد) سال تولید کرد. در کل بازه مورد مطالعه برای هر ایستگاه، داده‌های بازتحلیل حداقل ۱۰ کلون (در ایستگاه زاهدان) و حداکثر ۱۵ کلون (در ایستگاه تهران) در برآورد LI خطا داشت. به غیر از ایستگاه اهواز، در تمامی ایستگاه‌ها LI فرورآورد شد. میانگین ماهانه LI بازتحلیل بیشتر حاوی شرایط ناپایدار بود در حالی که مقادیر مشاهداتی بر پایدار بودن جو دلالت داشت. با این حال در ایستگاه‌های مشهد و تهران میان روند مقادیر میانگین سالانه بازتحلیل و مشاهداتی همخوانی وجود داشت، در حالی که در سایر ایستگاه‌ها این همخوانی در سال‌های آخر به‌وضوح دیده شد.

واژه‌های کلیدی: داده‌های بازتحلیل ERA5، چینش قائم باد، شاخص بالابری، رادیوگمانه.

۱. مقدمه

هواشناسی به‌ویژه ایستگاه‌های جو بالا جهت تأمین داده مشاهداتی (زرنگی و همکاران، ۲۰۱۶) و محدودیت‌های استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور (فلوک و همکاران، ۲۰۲۱) موجب شده تا از پارامترهای همرفتی برای تعیین شرایط مطلوب برای وقوع توفان‌های همرفتی شدید استفاده شود (بروکس و همکاران، ۲۰۰۳؛ تازارک و همکاران، ۲۰۲۰). در این بین استفاده از داده‌های بازتحلیل با توجه به تفکیک زمانی-مکانی مناسب و دسترس‌پذیری آن موجب شده تا به‌عنوان یکی از مطلوب‌ترین مجموعه داده‌ها باشد. اما پیش از این که بتوان از آن برای تحلیل و حتی شرایط اولیه مدل‌سازی استفاده کرد نیاز است تا صحت آن ارزیابی شود. از این‌رو، درستی سنجی داده‌های

خسارت‌های توفان‌های تندی بر بخش‌های متنوع جامعه انسانی بر کسی پوشیده نیست. لذا دست‌یابی به دانش کارآمد برای شناخت عمیق این پدیده و پیش‌بینی به‌هنگام آن از اولویت‌های بسیاری از تحقیق‌ها بوده است. همچنین بررسی توزیع مکانی-زمانی پارامترهای همرفتی نه تنها در خلال دوره‌های اقلیمی گذشته بلکه با استفاده از بروندهای مدل‌های عددی نیز جزء اهداف بسیاری از تحقیقات بوده است (تازارک و همکاران، ۲۰۱۸؛ بروکس و همکاران، ۲۰۱۹؛ تازارک و همکاران، ۲۰۲۱؛ پیلگویی و همکاران، ۲۰۲۲). با این حال تفکیک نسبتاً پایین شبیه‌سازی‌های مدل‌ها با پارامترسازی همرفت (پرین و همکاران، ۲۰۱۵)، پراکندگی مکانی ایستگاه‌های

(۲۰۱۲) نشان دادند که سرعت باد در ترازهای ۵۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکال، به‌همراه ارتفاع ژئوپتانسیلی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و یا دمای نقطه شبنم از سطح زمین تا تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال برای تشخیص مد همرفت در توفان اطلاعات مفیدی فراهم می‌کنند. همچنین تازارک و همکاران (۲۰۱۷) و رودریگوس و بش (۲۰۲۱) نشان دادند که چینش قائم باد از سطح زمین تا ۶ کیلومتری در تشخیص و پیش‌بینی نوع توفان همرفتی مفید است. در مبحث ارزیابی داده‌های بازتحلیل در برآورد انواع چینش می‌توان به تحقیقات تازارک و همکاران (۲۰۲۱) اشاره کرد که فروربرآورد داده‌های ERA5 را برای محاسبه چینش بویژه در تراز پایین در منطقه اروپا و شمال آمریکا ثبت کردند. همچنین وارگا و بروئر (۲۰۲۲) برای منطقه اروپای شرقی و مرکزی دقت داده‌های ERA5 برای برآورد چینش در ترازهای پایین، میانی و بالای جو معتبر معرفی کردند.

یکی دیگر از پارامترهای همرفتی شاخص بالابری (lifted index, LI) است. این پارامتر به پارامتر انرژی پتانسیل دسترس‌پذیر همرفتی (CAPE) مرتبط است و از آنجایی که محاسبه LI نسبت به CAPE ساده‌تر است، لذا این شاخص برای بیان وضعیت پایداری جو هم در اقلیم حاضر و هم در شرایط اقلیمی آتی مناسب‌تر است (پوسیک و همکاران، ۲۰۱۷). البته پوسیک و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از شبیه‌سازی برای منطقه اروپا شاخص LI را حتی در شرایط جوی پایدار به‌جای CAPE پیشنهاد کردند و آن را پیش‌نشانگر دقیقی برای بررسی توفان تندی در مطالعات اقلیمی به‌شمار آوردند. آنها نشان دادند که اهمیت این ویژگی در تحقیقاتی که مبتنی بر مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای استوار شده‌اند بیشتر نمایان است، زیرا این مدل‌ها از تفکیک قائم محدودتری برخوردار هستند. طبق یافته‌های وارگا و بروئر (۲۰۲۲) درستی سنجی شاخص LI از مجموعه بازتحلیل نسل پنجم داده‌های ERA5 برای منطقه اروپا با ضریب همبستگی ۰/۹۵ همراه بوده است. حتی در شبیه‌سازی با تفکیک‌های متفاوت ۵۰ و ۱۰ کیلومتری با کاربست مدل WRF، شاخص LI همبستگی

بازتحلیل گام اولیه تحقیقاتی بسیاری از پژوهش‌ها بوده است. به‌طور نمونه، جنسینی و همکاران (۲۰۱۴) نشان دادند که در ایالات متحده آمریکا، پارامتر همرفتی چینش قائم باد توده‌ای مستخرج از داده‌های بازتحلیل NCEP-NCAR به‌خوبی با داده‌های مشاهداتی راديوگمانه سازگار بوده است. همچنین آلن و کارولی (۲۰۱۴)، پیستوتنیک و همکاران (۲۰۱۶) و تازارک و همکاران (۲۰۱۸) اعتبار داده‌های بازتحلیل ECMWF را برای پارامترهای همرفتی در استرالیا و اروپا ثبت کردند. در ادامه لی و همکاران (۲۰۲۰) و تازارک و همکاران (۲۰۲۱) عملکرد مناسب نسخه هیبریدی داده‌های نسل پنجم مرکز اروپایی پیش‌بینی میان‌مدت وضع هوا (fifth generation of ECMWF, ERA5) را برای نمایش صحیح محیط‌های مستعد همرفتی در عرض‌های میانی ارزیابی کردند. یکی دیگر از دلایلی که لزوم درستی سنجی داده‌های بازتحلیل را شدت می‌بخشد، استفاده از این داده‌ها به‌منظور درستی‌سنجی بروندادهای مدل‌های اقلیمی است (پیستوتنیک و همکاران، ۲۰۱۶؛ گلآزر و همکاران، ۲۰۲۱).

قابل توجه است که استفاده از پارامترهای محیطی مناسب برای بررسی پدیده همرفت دارای پیشینه اقلیمی است (راسموسن و بلانچارد، ۱۹۹۸). یکی از این پارامترها که برای تشخیص توفان‌های تندی بسیار شدید از شدید است، پارامتر چینش قائم باد است (بروکس و همکاران، ۲۰۰۳). این یافته توسط کراون و همکاران (۲۰۰۴) و تراپ و همکاران (۲۰۰۷) برای ایالات متحده آمریکا، توسط آلن و همکاران (۲۰۱۱) برای استرالیا و توسط تازارک و همکاران (۲۰۱۷، ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱) برای اروپا نیز اثبات شده است. همچنین تامسون و همکاران (۲۰۰۷) و کوفر و همکاران (۲۰۱۹ و ۲۰۲۰) و کونینگلیو و پارکر (۲۰۲۰) نشان دادند که چینش به‌ویژه در لایه‌های زیرین جو برای بررسی توفان‌های تندی که پیچند تولید می‌کنند از اهمیت بالایی برخوردار است. در این راستا داده‌های ترازهای فشاری می‌توانند اطلاعات مؤثری در اختیار محققان قرار دهند. به‌طور نمونه، گرامز و همکاران

بیش از ۰/۸ را با داده‌های بازتحلیل ERA5 نشان داده است. از آنجایی که برای محاسبه این پارامتر تنها از داده‌های یک تراز استفاده می‌شود، مسلماً خطای کمی در محاسبه آن وارد می‌شود (وارگا و بروئر، ۲۰۲۲). آنها نشان دادند که ضریب همبستگی میان داده‌های ERA5 و مشاهداتی برای شاخص LI به مقدار ۰/۲ بیش از پارامتر CAPE است و با این که این ضریب همبستگی دارای تغییرپذیری ماهیانه است، اما نسبت به CAPE، متغیر دقیق‌تری برای بررسی توفان‌های همرفتی است. همچنین پیلگویی و همکاران (۲۰۲۲) نیز سیگنال روند (signal trend) میان داده‌های مشاهداتی و بازتحلیل برای LI نسبت به روند مخلوط (mixed trend) را در منطقه اروپا دقیق‌تر از ایالات متحده آمریکا معرفی کردند.

واضح است که ماهیت هموردایی موجود در برخی از پارامترهای همرفتی ترکیبی موجب افزایش خطا نسبت به پارامترهای منفرد شده است و اثر ترکیبی آنها می‌تواند ویژگی‌های مطلوب و نامطلوبی تولید کند (دوسول و شولتز، ۲۰۰۶) که نیاز به بررسی دارد. لذا برای قدم نهادن در این حیطة ابتدا بایستی روشن شود که پارامترهای همرفتی به دست آمده از داده‌های بازتحلیل در مقایسه با داده‌های مشاهداتی چقدر معتبر هستند تا بتوان از آنها برای دستیابی به اقلیم‌شناسی همرفتی استفاده کرد. در ایران نیز اهمیت پارامترهای همرفتی در درک ماهیت و پیش‌بینی مخاطرات جوی مورد توجه هواشناسان ایرانی نیز بوده است (به‌طور نمونه، صادقی حسینی و رضائیان، ۱۳۸۵؛ مجرد و همکاران، ۱۳۹۶؛ قویدل رحیمی و همکاران، ۱۳۹۷؛ صالح و همکاران، ۲۰۲۳؛ طهماسبی‌پاشا و همکاران، ۱۴۰۰). مجرد و همکاران (۱۳۹۶) اعتبار داده‌های بازتحلیل Interim-ERA را برای دو شاخص CAPE و VWSH بررسی کردند و دریافتند که داده‌های بازتحلیل شاخص VWSH را با تقریب مناسبی برای ایران برآورد کرده‌اند در حالی که برای شاخص CAPE فرابآورد تولید کرده‌اند. همچنین پگاه‌فر (۱۴۰۲) نشان داد که از میان انواع پارامتر همرفتی CAPE (اعم از CAPE، SB-CAPE، ML-CAPE و MU-CAPE)

همچنین انواع پارامتر همرفتی بازدارنده همرفت (اعم از CIN، SB-CIN، ML-CIN و MU-CIN)، پارامترهای ML-CAPE و ML-CIN در ایستگاه‌های بیشتری توانسته‌اند کمترین خطا و بالاترین همبستگی در میان مقادیر محاسبه شده حاصل از داده‌های مشاهداتی و بازتحلیل را تولید کنند. در این پژوهش سعی شده تا اعتبار داده‌های ERA5 برای برآورد دو دسته پارامتر همرفتی، که یکی نقش تقویت‌کننده و دیگری نقش بازدارنده دارد، در منطقه ایستگاه‌های جو بالا در ایران با استفاده از داده‌های مشاهداتی تمامی ایستگاه‌های رادیوگمانه ارزیابی شود.

۲. روش کار

در این بخش داده‌های مورد استفاده، پارامترهای ارزیابی شده و شاخص‌های آماری به کار رفته به ترتیب بیان خواهد شد.

۲-۱. داده‌ها

داده‌های به کار رفته در این تحقیق شامل دو دسته داده اعم از داده‌های بازتحلیل و داده‌های مشاهداتی حاصل از رادیوگمانه است که تفصیل هر یک در ذیل آمده است.

۲-۱-۱. داده‌های بازتحلیل

در این تحقیق از داده‌های بازتحلیل ERA5 (به آدرس <https://cds.climate.copernicus.eu/>) با تفکیک ۰/۲۵ درجه در راستای طول و عرض جغرافیایی در بازه زمانی ۳۱ ساله (از ابتدای ۱۹۹۰ تا انتهای ۲۰۲۰) استفاده شد. کمیت‌های مورد استفاده عبارت بودند از دما، دمای نقطه شبنم و بردار باد در سطوح فشاری. همچنین از تقریب نزدیک‌ترین نقطه شبکه‌ای جغرافیایی (همانند وارگا و بروئر، ۲۰۲۲) برای استخراج اطلاعات در مکان هر ایستگاه استفاده شده است.

۲-۱-۲. داده‌های رادیوگمانه

در بازه زمانی سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰، داده‌های رادیوگمانه از داده‌های گمانه‌زنی دانشگاه وایومینگ (به

نیز مولفه‌های افقی بردار باد را نشان می‌دهند. در این تحقیق همانند پیلگوج و همکاران (۲۰۲۲)، VWSH در سه لایه مجزا (۱) از سطح زمین تا ۱۰۰۰ متری سطح زمین (VWSH-1000)، (۲) از سطح زمین تا ۳ کیلومتری سطح زمین (VWSH-3000) و (۳) از سطح زمین تا ۶ کیلومتری سطح زمین (VWSH-6000) محاسبه شده است. از آنجایی که چینش می‌تواند در لایه‌های مختلف جوی شکل بگیرد این سه لایه انتخاب شد تا هم شامل اولین اندازه‌گیری (تا ۱۰۰۰ متری از سطح زمین) و هم بالاترین اندازه‌گیری (تا ارتفاع ۶۰۰۰ متری از سطح زمین) را شامل شده باشد تا بتواند انواع همرفت با شدت‌های متفاوت را در بر بگیرد. گیاکوم و کای (۱۹۹۰) نشان دادند که چینش قائم شدید باد همانند سامانه‌های جبهه‌ای در در عرض‌های میانی به‌طور مکرر در وردسپهر زیرین (۷۰۰-۸۰۰ هکتوپاسکال) و وردسپهر زیرین (۲۰۰-۳۰۰ هکتوپاسکال) و با بسامد ثانویه در وردسپهر میانی (۳۰۰-۷۰۰ هکتوپاسکال) شکل می‌گیرد. طبق یافته‌های چن و همکاران (۲۰۱۵) افزایش چینش در وردسپهر زیرین به سامانه همرفتی شبه‌خطی (quasi-line) سامان‌یافته بیشتری منجر می‌شود و چینش قوی در وردسپهر میانی منجر به تولید تاوایی بزرگ، شکل‌گیری میان‌چرخند شده که در نهایت توفان قوی منفردی شکل می‌گیرد که ساختار آن به سمت ساختار فوق سلولی (supercell) پیش می‌رود.

آدرس (<https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>)
برای ساعت‌های UTC ۰۰:۰۰ و ۱۲:۰۰ برای ۹ ایستگاه جو بالا در کشور ایران استخراج شد. مشخصات طول و عرض جغرافیایی و تعداد داده‌های برداشت شده در کل دوره در جدول ۱ آورده شده است. قابل توجه است که تنوع اقلیمی ایستگاه‌های مورد مطالعه، فصل‌پذیری پدیده‌ها در هر منطقه و عدم وجود تحقیق جامعی از زمان واقعی پدیده‌های توفان تندر (همچون پیچند، نگرگ بزرگ و بادهای جستی شدید) در هر ایستگاه موجب شد تا هر دو زمان UTC ۰۰:۰۰ و UTC ۱۲:۰۰ برای بررسی مورد آزمون قرار گیرد.

۲-۲. پارامترهای همرفتی

در این تحقیق از پارامتر همرفتی چینش قائم بردار باد (Vertical wind shear, VWSH) و شاخص LI بررسی شده است که در ادامه به تفصیل بیان شده است.

۲-۲-۱. چینش قائم بردار باد

برای محاسبه چینش قائم باد، مؤلفه‌های افقی بردار باد از دو تراز مختلف به ترتیب از یکدیگر کسر شده و سپس تندی باد به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$VWSH = \sqrt{(u_{up} - u_{down})^2 + (v_{up} - v_{down})^2} \quad (1)$$

که در آن up و down به ترتیب تراز بالا و پایین و u و v

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های جو بالا.

ردیف	نام ایستگاه	شناسه ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	تعداد کل داده
۱	شیراز	۴۰۸۴۸	۵۲/۵۸	۲۹/۵۳	۸۴۸۹
۲	زاهدان	۴۰۸۵۶	۶۰/۸۸	۲۹/۴۶	۴۴۲۷
۳	اصفهان	۴۰۸۰۰	۵۱/۷۱	۳۲/۴۶	۸۱۴۸
۴	کرمانشاه	۴۰۷۶۶	۴۷/۱۱	۳۴/۲۶	۱۳۵۳۵
۵	کرمان	۴۰۸۴۱	۵۶/۹۶	۳۰/۲۵	۸۸۶۱
۶	اهواز	۴۰۸۱۱	۴۸/۶۷	۳۱/۳۳	۴۹۶۵
۷	تبریز	۴۰۷۰۶	۴۶/۲۸	۳۸/۰۸	۹۲۲۴
۸	تهران	۴۰۷۵۴	۵۱/۳۵	۳۵/۶۸	۱۸۳۸۶
۹	مشهد	۴۰۷۴۵	۵۹/۶۳	۳۶/۲۶	۱۳۲۰۵

- در ادامه گرادیان‌های دما و باد بررسی شدند و با استناد به پیلگوج و همکاران (۲۰۲۰) و وارگا و بروئر (۲۰۲۲) قیده‌های ذیل بر داده‌های مشاهداتی اعمال شد و گمانه‌زنی‌هایی که شامل موارد زیر بودند نیز حذف شدند: الف) چنانچه آهنگ کاهش دما در وردسپهر میانی بیش از ۹ کلوین در هر کیلومتر باشد، ب) چنانچه آهنگ کاهش دما در وردسپهر پایین بیش از ۱۱ کلوین در هر کیلومتر باشد، ج) چنانچه مقدار VWSH-1000 بیش از ۳۵ متربرثانیه به دست آمده باشد، د) چنانچه مقدار VWSH-3000 بیش از ۴۵ متر برثانیه به دست آمده باشد و ه) چنانچه مقدار VWSH-6000 بیش از ۷۰ متربرثانیه به دست آمده باشد.

تعداد گمانه‌زنی‌های کنترل کیفی شده در هر ایستگاه به‌همراه تعداد داده بعد از اعمال قیده‌های عمومی و اختصاصی برای هر پارامتر در جدول ۲ نشان داده شده است. با این حال لازم به ذکر است که مواردی همچون تغییر کیفیت اندازه‌گیری‌ها به‌ویژه رطوبت، استفاده از اطلاعات در نزدیک‌ترین نقطه شبکه‌ای به مکان ایستگاه، تغییر نمایش لایه مرزی و افزایش تعداد تراز در راستای قائم در داده‌های ERA5 نسبت به گمانه‌زنی‌های مشاهداتی جزء محدودیت‌های این نوع تحقیق‌ها به‌شمار می‌آید.

۲-۴. شاخص‌های آماری

شاخص‌های آماری استفاده شده در این تحقیق عبارت‌اند از خطای متوسط (Mean Error, ME)، ریشه میانگین مربع خطا (Root Mean Square Error, RMSE) و همبستگی (Correlation, R) که روابط استفاده شده برای محاسبه آنها در ذیل آورده شده است (همانند پگاه‌فر، ۱۴۰۲):

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - O_i)}{n} \quad (۳)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2}{n}} \quad (۴)$$

و

$$R = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{O_i - \bar{O}}{\sigma_O} \right) * \left(\frac{M_i - \bar{M}}{\sigma_M} \right) \right) \quad (۵)$$

۲-۲-۲. LI

این شاخص با تفریق دمای هوا (T) در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال از دمای بسته هوا (T_p) در این تراز به صورت

$$LI = T_{500} - T_{p500} \quad (۲)$$

محاسبه می‌شود (تیاگی و همکاران، ۲۰۱۱). برای محاسبه دمای بسته هوا در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال از نیمرخ صعود بی‌درروی خشک تا تراز میعان بالابری (lifted condensation level, LCL) و سپس صعود بی‌درروی مرطوب استفاده می‌شود. از این پارامتر برای تعیین میزان پایداری جو طبق دسته‌بندی زیر استفاده می‌شود (گالوی، ۱۹۵۶): ۱. شرایط بسیار پایدار ($LI \geq 6$)، ۲. شرایط پایدار به‌گونه‌ای که وقوع توفان تندری ناممکن است ($1 \leq LI \leq 6$)، ۳. تاحدودی ناپایدار به‌طوری‌که وقوع توفان تندری با استفاده از سازوکار بالابری همانند جبهه سرد و گرمایش روزه‌نگام ممکن است ($-2 < LI < 0$)، ۴. شرایط ناپایدار، احتمال توفان تندری و در برخی موارد پتانسیل رخداد توفان تندری شدید وجود دارد ($LI \ll -2$)، ۵. شرایط بسیار ناپایدار، احتمال رخداد توفان‌های تندری بسیار شدید با استفاده از سازوکار بالابری ممکن است ($LI < -6$).

۲-۳. کنترل کیفی داده‌ها

به‌منظور حذف نیمرخ‌های ناقص و مقادیر غیرواقعی یا نامعتبر از مجموعه داده، در ابتدا تعدادی قید بر کل داده‌ها و سپس تعدادی قید بعد از محاسبه پارامترهای همرفتی اعمال شد که به ترتیب عبارت‌اند از:

- حذف اندازه‌گیری‌های ناقص از مجموعه داده. به‌طور نمونه تاریخ‌هایی که در آن نیمرخ قائم دما اندازه‌گیری شده ولی نیمرخ قائم دمای نقطه شبنم اندازه‌گیری نشده بود، حذف شدند.

- حذف گمانه‌زنی‌های ناقص، گمانه‌زنی‌هایی که تا قبل از رسیدن به ارتفاع ۶ کیلومتری از سطح زمین متوقف شده بودند و یا در کمتر از ۱۰ تراز فشاری مقادیر اندازه‌گیری را ثبت کرده بودند، کنار گذاشته شدند.

پارامتر VWSH-1000 در مقیاس‌های ماهانه، فصلی و سالانه نشان داده شده است. برای هر ایستگاه کمترین و بیشترین مقادیر قدرمطلق خطای ماهانه و فصلی به رنگ قرمز مشخص شده است. فرورآورد این پارامتر در تمامی ایستگاه‌ها توسط داده‌های ERA5 مشهود است. تنها در ایستگاه اهواز در فصل زمستان فرورآورد نتایج مدل مشاهده شد. در این ایستگاه مقادیر فرورآورد نیز نسبت با سایر ایستگاه‌ها کمتر بوده است. بررسی اجمالی نشان داد که داده‌های بازتحلیل ERA5 مقدار VWSH-1000 را در تمامی ایستگاه‌ها با فرورآورد برآورد کرده‌اند و این خطا گاه تا ۷ متر بر ثانیه افزایش یافته است. تفاوت میان کمترین و بیشترین مقدار ME در مقیاس فصلی از حدود ۱ متر بر ثانیه در ایستگاه اهواز تا ۲ متر بر ثانیه تغییر کرده است. در مقیاس فصلی بیشترین خطا در برآورد VWSH-1000 در فصل زمستان بوده است. میانگین سالانه ME نیز نشان می‌دهد که داده‌های ERA5 پارامتر VWSH را حداقل با ۳/۹۱- متر بر ثانیه و حداکثر تا ۵/۷۹- متر بر ثانیه فرورآورد کرده‌اند. در مقیاس فصلی بیشترین خطا در برآورد VWSH-1000 در فصل زمستان و کمترین خطاها در JJA و SON روی داده است.

که O و M به ترتیب مقادیر مشاهداتی و ERA5، زیرنویس i معرف رویداد مطالعاتی و n تعداد رویداد مورد استفاده در هر ایستگاه است.

۳. نتایج

نتیجه درستی‌سنجی داده‌های ERA5 برای تمامی ایستگاه‌ها و پارامترهای ذکر شده با استفاده از سه شاخص آماری RMSE، ME و R در ذیل آمده است.

۳-۱. پارامتر VWSH-1000

در جدول ۳ مقدار RMSE میان پارامتر VWSH-1000 حاصل از داده‌های مشاهداتی و داده‌های بازتحلیل برای هر ایستگاه در مقیاس‌های زمانی ماهانه، فصلی و سالانه نشان داده شده است. همان‌طور که این جدول نشان می‌دهد، کمیته مقدار RMSE در مقیاس ماهانه حدود ۳ متر بر ثانیه و حداکثر تا حدود ۸/۵ متر بر ثانیه بوده است. در اغلب ایستگاه‌ها در ماه‌های سرد بیشترین خطا و در ماه‌های گرم کمترین خطا رخ داده است. به‌منظور تشخیص‌آرایی در خطای برآورد شده نتایج محاسبه ME در جدول ۴ نشان داده شده است. در جدول ۴ نتایج محاسبه شاخص آماری ME برای

جدول ۲. تعداد داده بعد از استخراج داده‌های همزمان میان مجموعه داده مشاهداتی و بازتحلیل ERA5 به‌همراه اعمال قیده‌های عمومی و تعداد داده بعد از اعمال قیده‌های اختصاصی برای هر پارامتر همرفتی در تمامی ایستگاه‌ها.

ردیف	نام ایستگاه	تعداد داده بعد از استخراج داده‌های همزمان و اعمال قیده‌های عمومی		
		VWSH-1000	VWSH-3000	VWSH-6000
۱	تبریز	۵۲۹۱	۵۲۷۰	۵۲۳۸
۲	مشهد	۸۶۴۳	۸۶۰۴	۸۵۸۴
۳	تهران	۱۱۱۰۱	۱۱۰۸۷	۱۱۰۶۱
۴	کرمانشاه	۹۳۳۱	۹۲۸۶	۹۲۲۶
۵	اصفهان	۷۳۳۶	۷۳۲۶	۷۲۹۸
۶	اهواز	۵۲۶۲	۵۲۴۵	۵۲۳۴
۷	کرمان	۶۲۰۱	۶۱۶۹	۶۱۰۳
۸	شیراز	۶۸۲۵	۶۷۹۲	۶۷۴۷
۹	زاهدان	۷۷۱۲	۷۷۰۹	۷۶۹۹

جدول ۳. مقدار RMSE برای پارامتر VWSH-1000 (m/s) میان داده‌های مشاهداتی و بازتحلیل ERA5.

نام ایستگاه									ماهانه	فصلی	سالانه
زاهدان	شیراز	کرمان	اهواز	اصفهان	کرمانشاه	تهران	مشهد	تبریز			
۶/۱۱	۵/۹۷	۶/۳۶	۴/۵۰	۵/۸۵	۵/۶۹	۵/۳۹	۵/۶۸	۸/۳۴	۱		
۵/۹۴	۵/۹۲	۶/۴۸	۴/۰۷	۵/۳۳	۵/۹۰	۵/۴۳	۵/۸۲	۷/۰۴	۲		
۶/۱۴	۵/۷۲	۵/۵۷	۴/۱۸	۵/۱۴	۶/۲۸	۵/۳۴	۵/۶۴	۷/۴۱	۳		
۵/۷۱	۵/۶۵	۵/۵۳	۳/۱۶	۵/۳۱	۵/۸۴	۵/۵۰	۵/۱۵	۷/۶۶	۴		
۴/۹۷	۵/۴۸	۴/۸۸	۴/۴۰	۴/۸۰	۵/۵۸	۵/۱۴	۵/۰۳	۶/۷۹	۵		
۵/۴۰	۵/۰۱	۴/۲۲	۳/۵۳	۴/۴۳	۴/۲۳	۵/۵۳	۵/۴۱	۵/۹۷	۶		
۵/۴۰	۵/۱۲	۴/۶۱	۳/۳۳	۴/۸۲	۴/۰۸	۵/۸۲	۵/۴۳	۵/۵۴	۷		
۵/۴۷	۵/۴۶	۳/۹۵	۳/۰۲	۴/۴۰	۴/۲۲	۵/۲۲	۵/۰۲	۶/۱۶	۸		
۵/۷۸	۴/۴۹	۳/۹۶	۲/۹۷	۴/۳۰	۴/۷۰	۴/۷۱	۴/۰۴	۶/۶۴	۹		
۵/۳۶	۴/۵۱	۴/۷۶	۳/۳۴	۴/۱۰	۴/۹۶	۴/۳۹	۳/۷۰	۶/۸۳	۱۰		
۵/۴۴	۵/۳۳	۵/۸۵	۳/۸۷	۴/۸۵	۵/۳۵	۴/۸۸	۴/۸۳	۷/۰۷	۱۱		
۵/۲۳	۵/۸۳	۵/۲۲	۳/۹۳	۵/۵۶	۵/۹۵	۵/۴۲	۵/۴۴	۸/۴۸	۱۲		
۵/۷۴	۵/۹۰	۶/۰۰	۴/۱۸	۵/۵۹	۵/۸۵	۵/۴۱	۵/۶۴	۸/۰۶	DJF		
۵/۶۴	۵/۶۲	۵/۳۱	۳/۹۷	۵/۰۵	۵/۸۷	۵/۳۲	۵/۲۶	۷/۲۵	MAM		
۵/۴۳	۵/۲۱	۴/۲۶	۳/۳۱	۴/۵۵	۴/۱۸	۵/۵۲	۵/۲۸	۵/۹۱	JJA		
۵/۵۲	۴/۷۸	۴/۹۰	۳/۴۲	۴/۴۳	۵/۰۰	۴/۶۵	۴/۱۸	۶/۸۳	SON		
۵/۵۹	۵/۴۱	۵/۱۳	۳/۷۴	۴/۹۴	۵/۲۲	۵/۲۳	۵/۰۸	۶/۹۶			

جدول ۴. مقدار ME برای پارامتر VWSH-1000 (m/s) میان داده‌های مشاهداتی و بازتحلیل ERA5.

نام ایستگاه									ماهانه	فصلی	سالانه
زاهدان	شیراز	کرمان	اهواز	اصفهان	کرمانشاه	تهران	مشهد	تبریز			
-۴/۴۵	-۴/۷۰	-۴/۷۵	۰/۱۷	-۴/۶۵	-۴/۸۱	-۴/۴۹	-۴/۴۳	-۷/۱۱	۱		
-۴/۴۸	-۴/۷۷	-۴/۷۵	۰/۰۳	-۴/۴۱	-۴/۹۹	-۴/۴۴	-۴/۶۲	-۶/۰۷	۲		
-۴/۷۸	-۴/۸۱	-۴/۲۶	-۰/۴۴	-۴/۳۸	-۵/۰۵	-۴/۳۸	-۴/۵۹	-۶/۱۶	۳		
-۴/۴۷	-۴/۷۴	-۴/۲۲	-۰/۴۶	-۴/۴۲	-۴/۸۴	-۴/۴۸	-۴/۰۴	-۶/۳۴	۴		
-۴/۲۱	-۴/۶۳	-۳/۸۸	-۱/۱۳	-۴/۱۵	-۴/۴۶	-۴/۳۴	-۳/۹۶	-۵/۶۱	۵		
-۴/۳۸	-۴/۲۳	-۳/۴۱	-۰/۴۵	-۳/۷۷	-۳/۵۰	-۴/۵۲	-۴/۳۹	-۵/۰۷	۶		
-۴/۴۹	-۴/۳۸	-۳/۷۶	-۰/۴۴	-۴/۱۶	-۳/۴۶	-۴/۸۶	-۴/۷۰	-۴/۵۸	۷		
-۴/۶۱	-۴/۵۸	-۳/۳۵	-۰/۳۶	-۳/۸۵	-۳/۶۰	-۴/۴۳	-۴/۱۵	-۵/۱۵	۸		
-۴/۶۹	-۳/۹۲	-۳/۲۳	-۱/۲۲	-۳/۵۹	-۳/۸۸	-۳/۸۹	-۳/۲۶	-۵/۵۰	۹		
-۴/۴۹	-۳/۹۳	-۳/۴۷	-۱/۴۵	-۳/۵۸	-۴/۰۶	-۳/۶۹	-۲/۹۹	-۵/۶۳	۱۰		
-۴/۳۶	-۴/۳۶	-۴/۰۸	-۰/۱۰	-۴/۱۳	-۴/۴۲	-۳/۹۹	-۳/۸۰	-۵/۹۹	۱۱		
-۴/۱۶	-۴/۴۴	-۴/۱۷	۰/۲۵	-۴/۵۴	-۴/۸۵	-۴/۴۳	-۴/۳۲	-۷/۴۲	۱۲		
-۴/۳۵	-۴/۶۳	-۴/۵۳	۰/۱۵	-۴/۵۴	-۴/۸۸	-۴/۴۶	-۴/۴۵	-۶/۹۴	DJF		
-۴/۴۹	-۴/۷۲	-۴/۱۱	-۰/۷۱	-۴/۳۰	-۴/۷۵	-۴/۴۰	-۴/۱۸	-۶/۰۰	MAM		
-۴/۴۹	-۴/۴۰	-۳/۵۰	-۰/۳۹	-۳/۹۲	-۳/۵۲	-۴/۵۹	-۴/۴۰	-۴/۹۵	JJA		
-۴/۵۱	-۴/۰۶	-۳/۵۸	-۰/۹۱	-۳/۷۷	-۴/۱۱	-۳/۸۵	-۳/۳۳	-۵/۶۸	SON		
-۴/۴۶	-۴/۴۷	-۳/۹۱	-۰/۴۵	-۴/۱۴	-۴/۲۷	-۴/۳۱	-۴/۰۶	-۵/۷۹			

مقدار در ایستگاه مشهد به مقدار حدود ۵ متربرثانیه روی داده است. برای تشخیص فراب‌آورد یا فروبر‌آورد شدن پارامتر VWSH-3000 توسط داده‌های بازتحلیل جدول ۶ تهیه شد.

جدول ۶ نشان می‌دهد که در ایستگاه‌های تبریز، مشهد، تهران، کرمانشاه، اصفهان و کرمان در تمام ماه‌ها بازتحلیل پارامتر VWSH-3000 را با فروبر‌آورد تولید کرده است. در ایستگاه شیراز به غیر از فصل تابستان استفاده از داده‌های بازتحلیل برای محاسبه VWSH-3000 منجر به فروبر‌آورد شده است. در ایستگاه زاهدان به غیر از ماه‌های می، اکتبر و نوامبر در سایر ماه‌ها داده‌های ERA5 مقدار VWSH-3000 را فراب‌آورد کرده‌اند. در ایستگاه اهواز در کلیه ماه‌ها VWSH-3000 فراب‌آورد شده است. با استفاده از کل داده‌های در دسترس در هر ایستگاه تا حدود ۵ متربرثانیه فروبر‌آورد توسط داده‌های بازتحلیل به دست آمده است، در حالی که در ایستگاه اهواز تا ۲ متربرثانیه فراب‌آورد تولید شده است.

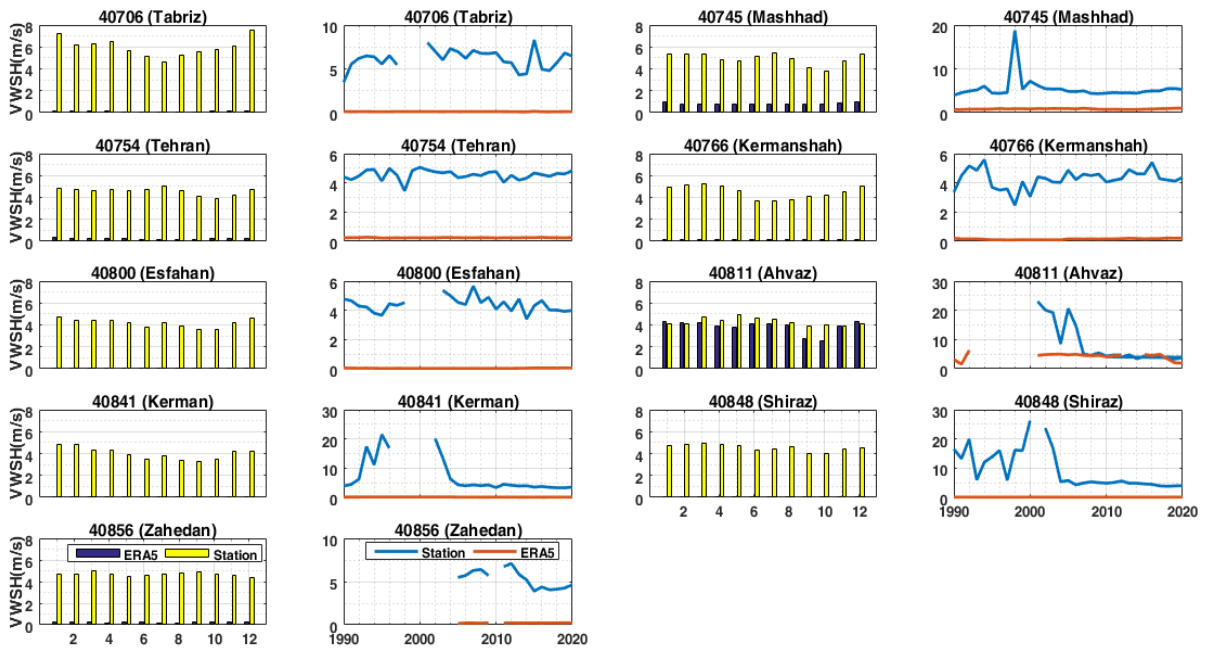
همبستگی میان پارامتر VWSH-3000 حاصل از داده‌های مشاهداتی و بازتحلیل در ایستگاه‌های تبریز، مشهد، تهران، کرمانشاه، اصفهان، اهواز، کرمان، شیراز و زاهدان به ترتیب ۰/۸، ۰/۸، ۰/۷، ۰/۶، ۰/۳، ۰/۶، ۰/۵، ۰/۵ و ۰/۴ بوده است. تمایز میان میانگین ماهانه مقادیر VWSH-3000 برآورد شده توسط داده‌های بازتحلیل و مشاهداتی به صورت نمودارهای میله‌ای برای هر ایستگاه در شکل ۲ نشان داده شده است. نسبت به شکل ۱، کاهش اختلاف میان مقادیر مشاهداتی و بازتحلیل چشمگیر است. همچنین سری زمانی مقادیر مشاهداتی و بازتحلیل VWSH-3000 نیز در این شکل برای هر ایستگاه نشان داده شده است. همان‌طور که شکل ۲ نشان می‌دهد در ایستگاه‌های تهران، تبریز، کرمانشاه و مشهد همخوانی مناسبی میان سری زمانی VWSH-3000 مشاهداتی و بازتحلیل رؤیت می‌شود. در ایستگاه‌های کرمان، شیراز، اهواز و اصفهان همخوانی میان روندها در انتهای دوره مطالعاتی بیشتر شده است. شکل ۲ نشان می‌دهد که داده‌های بازتحلیل در برآورد VWSH-3000 در ابتدای دوره مطالعاتی در برخی

همبستگی میان پارامتر VWSH-1000 حاصل از داده‌های مشاهداتی و بازتحلیل در ایستگاه‌های تبریز، مشهد، تهران، کرمانشاه، اصفهان، اهواز، کرمان، شیراز و زاهدان به ترتیب ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵، ۰/۳، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۳، ۰/۲ و ۰/۱ بوده است. به منظور نشان دادن تفاوت مقادیر میانگین ماهانه پارامتر VWSH-1000 مشاهداتی و بازتحلیل، نمودارهای میله‌ای مقادیر میانگین ماهانه در شکل ۱ برای هر ایستگاه نشان داده شده است. به غیر از ایستگاه اهواز در سایر ایستگاه‌ها فروبر‌آورد چشمگیر این پارامتر توسط داده‌های بازتحلیل مشهود است. سری زمانی مقدار پارامتر VWSH-1000 حاصل از داده‌های بازتحلیل و مشاهداتی به تفکیک ایستگاهی نیز در بازه ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ در شکل ۱ نشان داده شده است. داده‌های بازتحلیل ERA5 به غیر از ایستگاه اهواز در سایر ایستگاه‌ها مقدار کمتر از ۱ متر بر ثانیه را برآورد کرده‌اند. این در حالی است که مقادیر مشاهداتی در برخی از ایستگاه‌ها تا بیش از ۲۰ متر بر ثانیه داده به ثبت رسیده است.

۳-۲. پارامتر VWSH-3000

در جدول ۵ کمترین و بیشترین مقدار برای هر ایستگاه با رنگ قرمز مشخص شده است. مقدار RMSE برای پارامتر VWSH-3000 برای ایستگاه‌های مختلف در ماه‌های مختلف نشان می‌دهد که بزرگ‌ترین خطا در برآورد VWSH-3000 در ایستگاه کرمان به مقدار ۹/۸۴ متربرثانیه در ماه ژانویه و کمترین مقدار خطا در ایستگاه اهواز در ماه سپتامبر برابر ۳/۳۶ متربرثانیه روی داده است. طبق جدول ۵ در مقیاس فصلی، اغلب ایستگاه‌ها بیشترین خطا در ماه‌های سرد (DJF) رخ داده است. در تمامی ایستگاه‌ها به غیر از ایستگاه مشهد کمترین خطا در ماه‌های گرم (JJA) روی داده است. جدول ۵ نشان می‌دهد که داده‌های بازتحلیل در برآورد VWSH-3000 در مقیاس ماهانه و فصلی تا ۹ متر برثانیه خطا تولید می‌کنند. در کل بیشینه مقدار RMSE برای پارامتر VWSH-3000 در ایستگاه کرمان به مقدار حدود ۷ متربرثانیه و کمترین

ایستگاه‌ها ضعیف عمل کرده است.



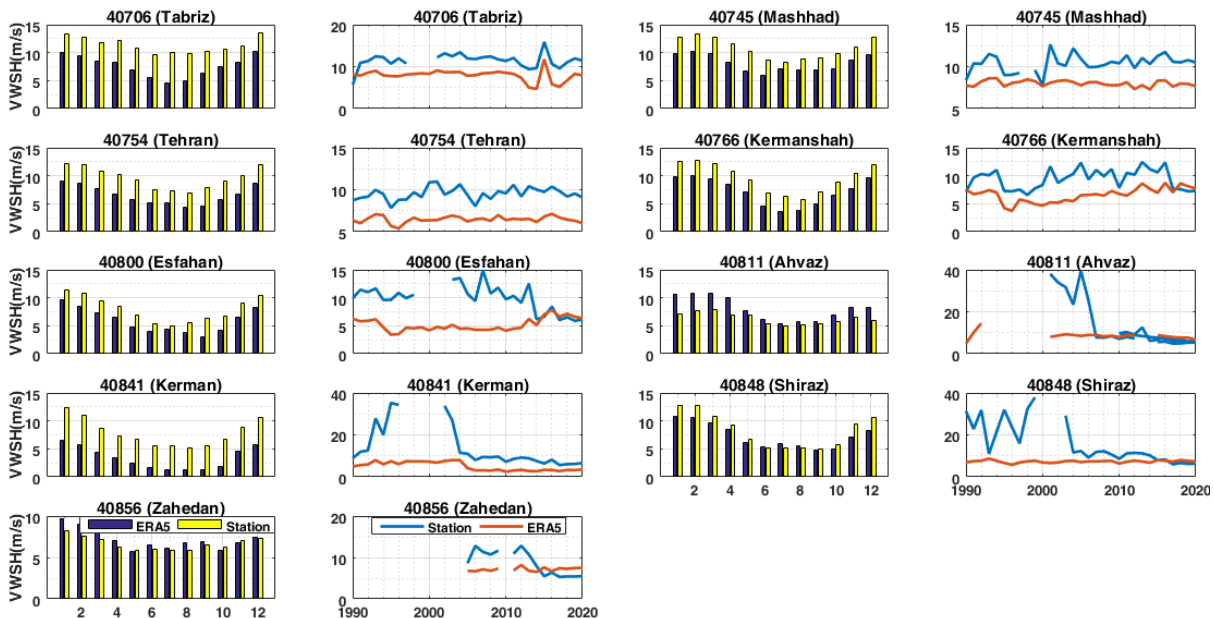
شکل ۱. نمودار میله‌ای ماهانه و سری زمانی پارامتر WWSH-1000 برای نه ایستگاه جو بالا. نمودار میله‌ای در بازه زمانی که هر دو نوع داده مشاهداتی و بازتحلیل ERA5 در دسترس بوده‌اند ترسیم شده است، در حالی که برای ترسیم سری زمانی کل داده‌های در دسترس ERA5 و مشاهداتی به‌طور مستقل استفاده شده است.

جدول ۵. مقدار RMSE برای پارامتر WWSH-3000 (m/s) میان داده‌های مشاهداتی و بازتحلیل ERA5.

نام ایستگاه										ماهانه
زاهدان	شیراز	کرمان	اهواز	اصفهان	کرمانشاه	تهران	مشهد	تبریز		
۸/۵۶	۷/۵۰	۹/۸۴	۷/۱۶	۹/۰۰	۶/۵۳	۵/۲۸	۵/۲۰	۵/۶۰	۱	
۷/۵۱	۹/۳۱	۹/۲۰	۷/۵۵	۹/۰۹	۷/۱۱	۵/۶۷	۵/۰۰	۵/۵۱	۲	
۶/۸۳	۷/۸۴	۷/۵۳	۷/۰۶	۷/۸۱	۶/۵۰	۵/۴۹	۵/۸۴	۵/۴۴	۳	
۵/۸۹	۷/۱۵	۶/۸۷	۶/۲۳	۷/۲۷	۶/۰۶	۵/۶۵	۵/۲۲	۶/۴۲	۴	
۴/۵۲	۵/۱۵	۶/۵۴	۶/۰۱	۵/۵۷	۵/۷۰	۵/۵۹	۶/۰۱	۶/۵۲	۵	
۵/۲۶	۴/۷۳	۵/۸۳	۵/۰۴	۴/۵۳	۴/۸۸	۴/۷۲	۵/۶۹	۶/۱۸	۶	
۴/۷۳	۴/۴۵	۶/۱۲	۳/۷۹	۴/۲۹	۴/۷۱	۴/۹۲	۴/۳۹	۷/۴۱	۷	
۴/۹۷	۴/۲۶	۵/۰۳	۳/۸۴	۴/۸۸	۴/۳۶	۵/۲۴	۴/۹۷	۶/۷۱	۸	
۵/۲۳	۳/۹۸	۵/۷۹	۳/۳۶	۵/۶۶	۵/۳۰	۵/۰۱	۴/۴۲	۵/۸۱	۹	
۴/۵۱	۴/۲۱	۶/۷۸	۳/۹۹	۵/۲۹	۴/۹۴	۵/۱۷	۴/۱۹	۵/۴۱	۱۰	
۵/۸۴	۶/۹۶	۶/۸۲	۶/۹۹	۶/۴۹	۵/۵۸	۵/۴۳	۴/۳۸	۴/۶۲	۱۱	
۶/۵۹	۸/۰۴	۸/۰۸	۶/۳۰	۷/۷۶	۶/۱۹	۵/۵۱	۴/۶۶	۵/۴۶	۱۲	
۷/۵۶	۸/۹۵	۹/۰۳	۷/۰۲	۸/۵۸	۶/۵۸	۵/۴۹	۴/۹۵	۵/۵۲	DJF	
۵/۸۵	۶/۷۷	۶/۹۶	۶/۴۱	۶/۸۱	۶/۰۵	۵/۵۸	۵/۷۲	۶/۲۰	MAM	
۴/۹۹	۴/۴۸	۵/۶۷	۴/۳۰	۴/۵۶	۴/۶۶	۴/۹۶	۵/۰۶	۶/۷۷	JJA	
۵/۲۱	۵/۱۶	۶/۴۹	۵/۰۷	۵/۸۳	۵/۲۶	۵/۲۰	۴/۳۳	۵/۳۷	SON	
۶/۰۲	۶/۶۳	۷/۰۷	۵/۸۰	۶/۶۸	۵/۶۲	۵/۳۱	۵/۰۳	۶/۰۳	کل	

جدول ۶. مقدار ME برای پارامتر VWSH-3000 میان داده‌های مشاهداتی و بازتحلیل ERA5

نام ایستگاه									
زاهدان	شیراز	کرمان	اهواز	اصفهان	کرمانشاه	تهران	مشهد	تبریز	
۱/۵۶	-۱/۹۴	-۵/۷۸	۳/۶۲	-۱/۷۵	-۲/۶۳	-۳/۱۷	-۳/۰۵	-۳/۳۶	۱
۱/۵۲	-۲/۳۰	-۵/۳۲	۲/۹۶	-۲/۳۸	-۲/۷۲	-۳/۲۳	-۳/۱۶	-۳/۲۳	۲
۱/۳۹	-۱/۱۶	-۴/۳۹	۲/۸۰	-۲/۰۵	-۲/۶۸	-۳/۰۳	-۳/۰۴	-۳/۱۹	۳
۰/۶۹	-۰/۸۱	-۳/۹۸	۳/۱۲	-۱/۹۹	-۲/۲۴	-۳/۴۸	-۳/۳۹	-۴/۰۲	۴
-۰/۱۳	-۰/۶۰	-۴/۱۹	۰/۶۷	-۲/۲۰	-۲/۱۴	-۳/۵۱	-۳/۶۱	-۳/۸۶	۵
۰/۴۸	۰/۱۶	-۴/۰۶	۰/۶۹	-۱/۴۱	-۲/۴۴	-۲/۵۲	-۲/۷۰	-۴/۱۴	۶
۰/۳۵	۰/۷۰	-۴/۳۰	۰/۴۱	-۰/۷۰	-۲/۷۸	-۲/۰۶	-۱/۲۵	-۵/۵۱	۷
۰/۸۴	۰/۴۱	-۳/۷۶	۰/۶۳	-۱/۸۰	-۲/۰۳	-۲/۶۰	-۲/۰۱	-۴/۹۰	۸
۰/۳۸	-۰/۲۱	-۴/۲۳	۰/۳۳	-۳/۳۸	-۲/۲۷	-۳/۱۹	-۲/۳۰	-۳/۸۷	۹
-۰/۳۹	-۰/۷۹	-۴/۹۳	۱/۰۹	-۲/۵۲	-۲/۳۳	-۳/۳۲	-۲/۶۲	-۳/۲۳	۱۰
-۰/۲۴	-۲/۴۱	-۴/۴۰	۱/۶۸	-۲/۶۲	-۲/۵۸	-۳/۳۱	-۲/۳۹	-۲/۹۳	۱۱
۰/۰۲	-۲/۳۶	-۴/۷۹	-۲/۳۴	-۲/۱۱	-۲/۲۸	-۳/۴۳	-۳/۰۴	-۳/۳۹	۱۲
۰/۹۵	-۲/۲۰	-۵/۲۸	۳/۰۰	-۲/۰۷	-۲/۵۲	-۳/۲۸	-۳/۰۸	-۳/۳۳	DJF
۰/۶۷	-۰/۸۵	-۴/۱۸	۲/۰۹	-۲/۰۹	-۲/۳۳	-۳/۳۶	-۳/۳۷	-۳/۷۲	MAM
۰/۵۶	۰/۴۲	-۴/۰۳	۰/۵۸	-۱/۲۹	-۲/۴۲	-۲/۴۰	-۲/۰۱	-۴/۸۳	JJA
-۰/۱۰	-۱/۱۰	-۴/۵۴	۱/۰۵	-۲/۷۹	-۲/۳۹	-۳/۲۷	-۲/۴۴	-۳/۳۹	SON
۰/۵۳	-۰/۹۵	-۴/۴۸	۱/۶۸	-۲/۰۹	-۲/۴۱	-۳/۰۸	-۲/۷۰	-۳/۸۷	کل



شکل ۲. نمودار میله‌ای ماهانه و سری زمانی پارامتر VWSH-3000 برای نه ایستگاه جو بالا. نمودار میله‌ای در بازه زمانی که هر دو نوع داده مشاهداتی و بازتحلیل ERA5 در دسترس بوده‌اند، ترسیم شده است؛ در حالی که برای ترسیم سری زمانی کل داده‌های در دسترس ERA5 و مشاهداتی به‌طور مستقل استفاده شده است.

۳-۳. پارامتر WWSH-6000

جدول ۷ نشان می‌دهد که کمینه و بیشینه مقدار خطا در برآورد ماهانه WWSH-6000 توسط داده‌های بازتحلیل به ترتیب حدود ۴ و ۲۰ متر بر ثانیه است. در مقادیر ماهانه در ایستگاه‌های تهران، مشهد و تبریز بیشینه خطای کوچک‌تری نسبت به سایر ایستگاه‌ها مشاهده می‌شود. در مقیاس سالانه نیز خطای برآورد WWSH-6000 توسط داده‌های بازتحلیل از مقدار حدودی ۵ تا ۱۲ متر بر ثانیه متغیر بوده است. برای تعیین آریبی میزان خطای برآورد شده جدول ۸ تهیه شد. طبق جدول ۸ داده‌های بازتحلیل همچنان در ایستگاه‌های تبریز، تهران، مشهد، کرمانشاه و کرمان مقادیر ماهانه WWSH-6000 را فروبرآورد کرده‌اند، درحالی‌که در ایستگاه‌های اهواز و زاهدان فرابراورد و در ایستگاه‌های اصفهان و شیراز هم فرابراورد و هم فروبرآورد مشاهده می‌شود. همچنان بزرگترین خطاها به ماه‌های سرد سال و کمترین خطاها به ماه‌های گرم سال محدود بوده است. همبستگی میان پارامتر WWSH-6000 حاصل از داده‌های مشاهداتی و بازتحلیل در ایستگاه‌های تبریز، مشهد، تهران،

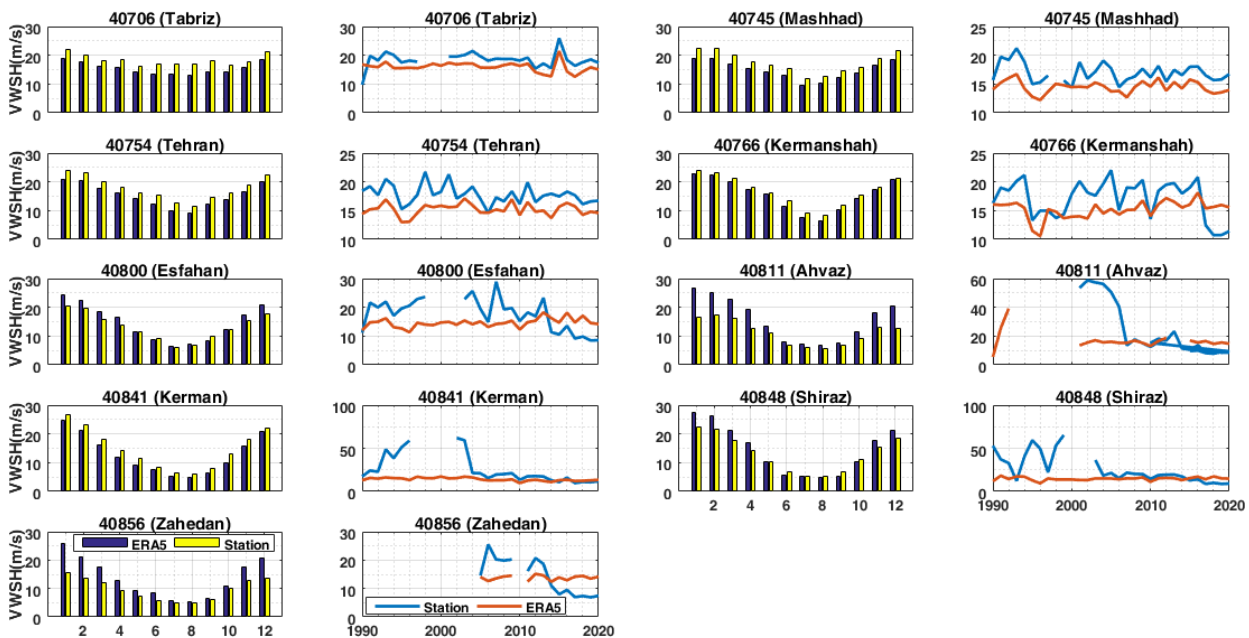
کرمانشاه، اصفهان، اهواز، کرمان، شیراز و زاهدان به ترتیب ۰/۹، ۰/۹، ۰/۹، ۰/۷، ۰/۵، ۰/۶، ۰/۶، ۰/۵ و ۰/۴ بوده است. در شکل ۳ نمودار میله‌ای مقادیر ماهانه WWSH-6000 مشاهداتی و بازتحلیل برای ایستگاه‌های مختلف به همراه سری زمانی آنها به تصویر کشیده شده است. همانند شکل ۲ در ایستگاه‌های تبریز مشهد، تهران و کرمانشاه مشابهت سری‌های زمانی با برتری مقادیر مشاهداتی نسبت به بازتحلیل مشاهده می‌شود. در ایستگاه‌های اصفهان، اهواز، کرمان، شیراز و زاهدان در انتهای دوره مورد مطالعه مقادیر بازتحلیل نسبت به مشاهداتی بیشتر شده و فرابراورد روی داده استدر حالی‌که در همین ایستگاه‌ها در ابتدای دوره فروبرآورد روی داده است. از آنجایی‌که در برخی ایستگاه‌ها روند داده‌های بازتحلیل نسبت به روند داده‌های مشاهداتی در کل دوره مورد بررسی رفتار ثابتی نداشته (به‌طور نمونه در ابتدای دوره فرابراورد و در انتهای دوره فروبرآورد داشته‌اند و یا برعکس)، از این‌رو میانگین ماهانه که در کل دوره محاسبه شده با روند ترسیمی همخوان به نظر نمی‌رسد.

جدول ۷. مقدار RMSE برای پارامتر WWSH-6000 (m/s) میان داده‌های مشاهداتی و بازتحلیل ERA5

نام ایستگاه									
تهران	مشهد	تبریز	کرمانشاه	اصفهان	اهواز	کرمان	شیراز	زاهدان	
۶/۳۹	۶/۴۳	۷/۵۶	۱۰/۸۳	۱۶/۳۲	۱۷/۴۴	۱۶/۱۲	۱۸/۳۹	۱۹/۶۷	۱
۶/۲۵	۶/۶۹	۶/۰۳	۱۰/۵۸	۱۴/۶۲	۱۵/۶۶	۱۴/۵۹	۱۶/۶۴	۱۶/۳۳	۲
۶/۰۸	۷/۱۵	۶/۸۵	۸/۶۹	۱۲/۰۳	۱۳/۴۶	۱۲/۱۶	۱۳/۶۲	۱۳/۲۸	۳
۵/۳۹	۶/۰۲	۶/۷۸	۸/۴۹	۱۲/۴۵	۱۲/۳۹	۱۱/۱۲	۱۱/۸۶	۱۰/۱۹	۴
۵/۸۷	۵/۱۵	۵/۷۵	۷/۶۹	۷/۷۸	۹/۹۳	۸/۹۲	۷/۱۷	۶/۵۳	۵
۶/۷۵	۴/۹۹	۷/۷۹	۷/۴۸	۶/۶۹	۶/۹۶	۶/۳۴	۶/۵۶	۶/۲۱	۶
۷/۲۵	۵/۵۴	۶/۹۳	۵/۷۱	۴/۵۳	۵/۳۲	۶/۲۸	۵/۴۶	۳/۸۳	۷
۵/۳۲	۴/۸۳	۶/۴۵	۵/۵۰	۵/۱۲	۵/۲۱	۴/۷۵	۴/۲۴	۳/۸۸	۸
۴/۸۸	۳/۸۸	۶/۲۹	۵/۹۱	۵/۸۴	۴/۱۴	۵/۲۳	۵/۳۲	۴/۷۹	۹
۵/۲۵	۴/۰۵	۵/۴۹	۶/۵۸	۸/۱۷	۶/۷۷	۸/۷۶	۷/۷۴	۷/۶۰	۱۰
۵/۹۰	۴/۴۰	۴/۹۹	۷/۵۷	۱۰/۵۹	۱۲/۵۱	۱۰/۲۶	۱۱/۳۲	۱۲/۶۴	۱۱
۵/۹۱	۵/۲۴	۵/۳۰	۹/۳۴	۱۳/۱۴	۱۳/۶۶	۱۳/۳۹	۱۳/۸۹	۱۵/۴۳	۱۲
۶/۱۷	۶/۱۱	۶/۳۲	۱۰/۲۳	۱۴/۶۷	۱۵/۷۳	۱۴/۶۹	۱۶/۳۸	۱۷/۲۱	DJF
۵/۷۹	۶/۱۰	۷/۲۱	۸/۲۴	۱۰/۶۶	۱۱/۸۷	۱۰/۷۱	۱۱/۱۲	۱۰/۴۵	MAM
۶/۴۸	۵/۱۱	۷/۰۷	۶/۳۲	۵/۵۸	۵/۹۳	۵/۸۴	۵/۴۸	۴/۷۵	JJA
۵/۳۳	۴/۱۱	۵/۶۸	۶/۶۹	۸/۵۶	۸/۶۲	۸/۳۵	۸/۴۱	۸/۹۹	SON
۵/۹۴	۵/۳۶	۶/۶۰	۷/۸۶	۱۰/۵۷	۱۱/۱۶	۱۰/۲۴	۱۱/۲۰	۱۱/۴۱	سالانه

جدول ۸. مقدار ME برای پارامتر VWSH-6000 (m/s) میان داده‌های مشاهداتی و بازتحلیل ERA5

نام ایستگاه									ماهانه	فصلی	سالانه
زاهدان	شیراز	کرمان	اهواز	اصفهان	کرمانشاه	تهران	مشهد	تبریز			
۱۰/۳۷	۴/۸۵	-۱/۹۰	۱۰/۲۴	۳/۶۴	-۱/۱۳	-۲/۷۶	-۳/۵۶	-۳/۰۶	۱		
۷/۷۵	۴/۵۱	-۱/۹۲	۷/۵۹	۲/۹۵	-۱/۰۳	-۲/۶۰	-۳/۴۶	-۲/۴۲	۲		
۵/۴۸	۳/۵۱	-۱/۸۴	۶/۶۷	۲/۶۶	-۱/۱۵	-۱/۹۹	-۳/۰۵	-۲/۱۳	۳		
۳/۵۲	۲/۸۹	-۲/۶۰	۶/۶۷	۲/۷۴	-۰/۷۵	-۱/۸۷	-۲/۳۲	-۲/۸۶	۴		
۱/۹۴	۰/۲۳	-۲/۵۶	۲/۶۷	-۰/۰۷	-۰/۵۳	-۲/۰۷	-۲/۰۸	-۲/۲۰	۵		
۲/۷۰	-۱/۱۵	-۰/۷۹	۱/۳۲	-۰/۰۸	-۱/۸۰	-۳/۱۲	-۲/۴۳	-۳/۲۸	۶		
۰/۶۸	۰/۰۳	-۱/۲۲	۱/۱۶	۰/۴۰	-۱/۴۸	-۲/۵۷	-۲/۳۲	-۳/۶۰	۷		
۰/۶۹	-۰/۳۸	-۱/۴۸	۰/۹۸	۰/۲۵	-۱/۹۸	-۲/۴۳	-۲/۲۶	-۳/۹۶	۸		
۰/۳۳	-۱/۵۷	-۱/۵۱	۰/۹۳	-۱/۳۵	-۱/۶۷	-۲/۴۸	-۲/۲۴	-۳/۵۶	۹		
۰/۶۶	-۰/۶۰	-۲/۹۸	۲/۰۸	۰/۱۱	-۱/۰۸	-۲/۱۹	-۱/۹۷	-۲/۲۸	۱۰		
۴/۷۸	۲/۲۹	-۲/۲۰	۵/۳۸	۱/۸۸	-۱/۰۴	-۲/۴۲	-۲/۲۷	-۱/۹۶	۱۱		
۷/۱۳	۳/۰۵	-۱/۱۳	۷/۷۶	۲/۹۷	۰/۳۴	-۲/۳۷	-۳/۱۹	-۲/۷۱	۱۲		
۸/۴۰	۴/۱۱	-۱/۶۲	۸/۵۹	۳/۱۹	-۰/۸۱	-۲/۵۷	-۳/۴۰	-۲/۷۴	DJF		
۳/۶۹	۲/۱۵	-۲/۳۵	۵/۱۵	۱/۵۷	-۰/۷۹	-۱/۹۸	-۲/۴۶	-۲/۳۹	MAM		
۱/۳۴	-۰/۵۱	-۱/۱۶	۱/۱۶	۰/۱۸	-۱/۷۵	-۲/۷۱	-۲/۳۳	-۳/۶۲	JJA		
۱/۹۳	-۰/۰۳	-۲/۲۷	۲/۸۳	۰/۳۱	-۱/۲۶	-۲/۳۶	-۲/۱۵	-۲/۶۸	SON		
۳/۹۲	۱/۵۱	-۱/۸۷	۴/۴۳	۱/۳۶	-۱/۱۸	-۲/۴۰	-۲/۵۴	-۲/۸۹			



شکل ۳. نمودار میله‌ای ماهانه و سری زمانی پارامتر VWSH-6000 برای نه ایستگاه جو بالا. نمودار میله‌ای در بازه زمانی که هر دو نوع داده مشاهداتی و بازتحلیل ERA5 در دسترس بوده‌اند ترسیم شده است، در حالی که برای ترسیم سری زمانی، کل داده‌های در دسترس ERA5 و مشاهداتی هر یک به‌طور جداگانه استفاده شده است.

۳-۴. شاخص LI

با توجه به قیدهای عمومی و اختصاصی اعمال شده بر مجموعه داده برای محاسبه شاخص LI در برخی ماه‌ها برای برخی ایستگاه‌ها امکان محاسبه شاخص LI وجود نداشت (جدول ۹). همان‌طور که جدول ۹ نشان می‌دهد بیشینه مقدار RMSE بین مقادیر LI مشاهداتی و بازتحلیل در ماه‌های گرم سال (بهار و تابستان) روی داده است. در این بین ایستگاه تهران در ماه ژوئن تا ۳۰ کلوین خطا مشاهده می‌شود. کمترین مقدار فصلی RMSE بین LI بازتحلیل و مشاهداتی در ایستگاه اصفهان حدود ۱۳ کلوین در MAM روی داده است و بیشترین مقدار نیز برای ایستگاه تهران در JJA به مقدار حدود ۲۴ کلوین مشاهده می‌شود. در کل بازه مورد مطالعه برای هر ایستگاه

داده‌های بازتحلیل حداقل ۱۰ کلوین (در ایستگاه زاهدان) و حداکثر ۱۵ کلوین (در ایستگاه تهران) در برآورد LI خطا تولید کرده است. برای روشن‌شدن آریبی خطای تولید شده در محاسبه LI جدول ۱۰ تهیه شد. همان‌طور که جدول ۱۰ نشان می‌دهد به غیر از یک مورد در ایستگاه اهواز در تمامی ایستگاه‌ها LI بازتحلیل با فروبرآورد تولید شده است. بیشینه مقدار خطا در ماه‌های آوریل تا ژوئیه است. در مقیاس فصلی نیز بیشینه خطا در فصل بهار و زمستان رخ داده است. بیشینه مقدار فروبرآورد در برآورد LI در مقیاس فصلی تا حدود ۲۲- کلوین در ایستگاه تهران رسیده است. در کل دوره مورد بررسی نیز در ایستگاه کرمان تا ۱۱- کلوین فروبرآورد روی داده است.

جدول ۹. مقدار RMSE برای شاخص LI (K) میان داده‌های مشاهداتی و بازتحلیل ERA5. بیشینه مقدار RMSE برای هر ایستگاه با رنگ قرمز نشان داده است.

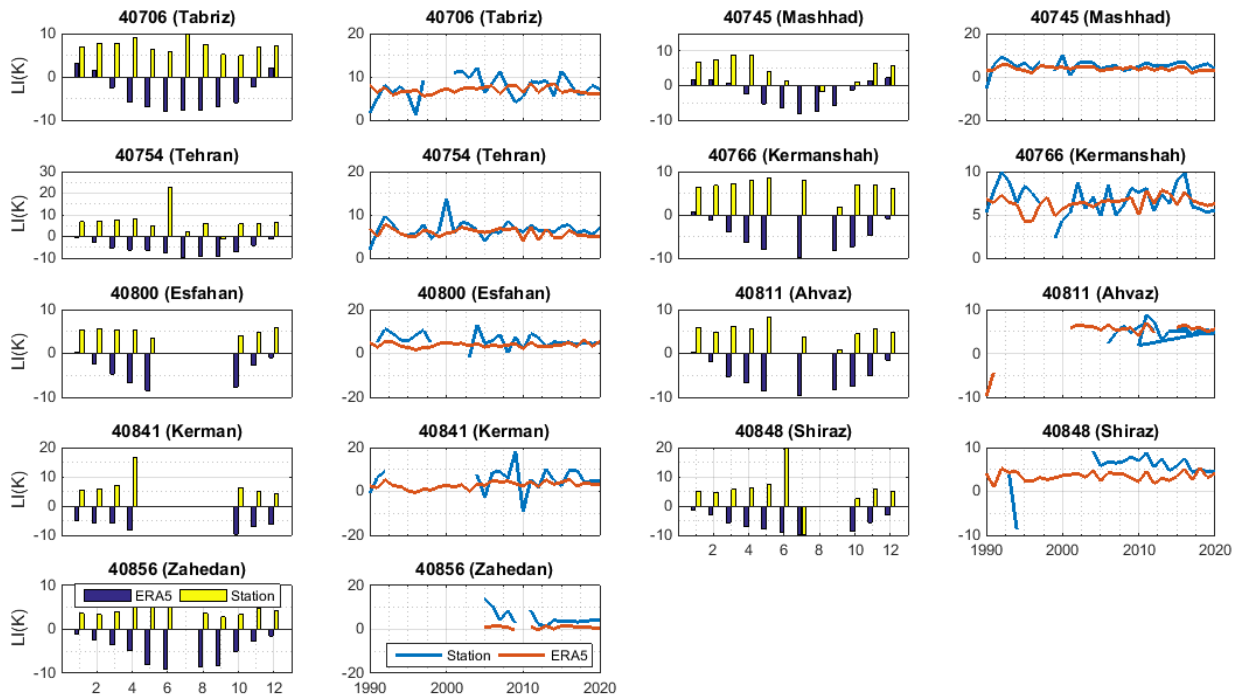
نام ایستگاه										ماهانه	
زاهدان	شیراز	کرمان	اهواز	اصفهان	کرمانشاه	تهران	مشهد	تبریز			
۹/۱۷	۱۱/۴۰	۱۳/۷۶	۱۰/۹۳	۱۰/۵۳	۱۲/۹۹	۱۳/۹۹	۱۳/۱۰	۱۲/۷۰	۱		
۹/۶۳	۱۱/۸۶	۱۶/۴۷	۱۲/۲۴	۱۲/۰۷	۱۳/۴۷	۱۵/۷۷	۱۴/۹۱	۱۲/۷۲	۲		
۱۰/۶۵	۱۳/۹۵	۱۶/۱۳	۱۴/۳۶	۱۲/۵۳	۱۵/۵۲	۱۷/۶۸	۱۵/۳۰	۱۴/۹۴	۳		
۱۱/۷۹	۱۴/۹۵	۲۶/۱۷	۱۴/۷۸	۱۴/۰۴	۱۷/۳۰	۱۷/۹۴	۱۶/۰۵	۱۹/۰۱	۴		
۱۷/۲۴	۱۷/۰۵		۱۹/۰۴	۱۴/۰۳	۱۹/۳۱	۱۵/۵۴	۱۴/۴۲	۱۷/۴۵	۵		
۱۴/۳۰	۲۸/۸۰					۳۰/۵۵	۱۱/۶۲	۱۶/۶۵	۶		
	۰/۰۲		۱۳/۳۷		۱۷/۷۵	۱۱/۷۶	۱۱/۹۳	۲۰/۰۵	۷		
۱۲/۷۵						۱۵/۶۰	۹/۲۱	۱۸/۴۴	۸		
۱۲/۰۵			۱۰/۷۲		۱۶/۶۴	۹/۵۳	۹/۹۶	۱۵/۳۲	۹		
۱۰/۹۳	۱۲/۴۰	۱۶/۱۹	۱۵/۱۳	۱۲/۷۳	۱۶/۸۶	۱۶/۶۸	۱۰/۵۶	۱۵/۱۶	۱۰		
۱۱/۳۷	۱۳/۶۹	۱۴/۷۴	۱۳/۹۰	۱۲/۲۴	۱۵/۵۳	۱۵/۳۸	۱۲/۶۰	۱۵/۳۶	۱۱		
۹/۸۱	۱۱/۲۷	۱۳/۵۰	۱۰/۷۶	۱۱/۷۳	۱۲/۵۷	۱۴/۰۳	۱۲/۶۸	۱۲/۸۳	۱۲		
۹/۵۵	۱۱/۴۸	۱۴/۳۴	۱۱/۲۷	۱۱/۴۲	۱۲/۹۶	۱۴/۵۲	۱۳/۴۸	۱۲/۷۶	DJF		
۱۱/۱۲	۱۴/۲۸	۱۸/۱۹	۱۴/۶۵	۱۲/۹۲	۱۶/۵۸	۱۷/۶۰	۱۵/۳۹	۱۶/۹۴	MAM		
۱۳/۰۸	۲۰/۳۷		۱۳/۳۷		۱۷/۷۵	۲۳/۸۹	۱۰/۶۵	۱۸/۵۶	JJA		
۱۱/۳۱	۱۳/۵۹	۱۴/۹۱	۱۳/۹۸	۱۲/۳۴	۱۵/۸۳	۱۵/۶۱	۱۱/۵۳	۱۵/۳۰	SON		
۱۰/۳۳	۱۲/۵۱	۱۴/۸۰	۱۲/۴۹	۱۱/۸۶	۱۴/۵۶	۱۵/۴۳	۱۳/۳۸	۱۵/۳۱		سالانه	

جدول ۱۰. مقدار ME برای شاخص LI (K) میان داده‌های مشاهداتی و بازتحلیل ERA5. بیشینه مقدار مطلق ME در مقیاس‌های ماهانه، فصلی و سالانه با رنگ قرمز مشخص شده است.

نام ایستگاه										
زاهدان	شیراز	کرمان	اهواز	اصفهان	کرمانشاه	تهران	مشهد	تبریز		
-۴/۸۲	-۶/۶۵	-۱۰/۵۲	-۵/۷۰	-۵/۱۲	-۵/۶۷	-۷/۶۰	-۵/۰۶	-۳/۸۰	۱	ماهانه
-۵/۸۲	-۷/۷۰	-۱۱/۸۶	-۶/۶۶	-۷/۹۰	-۷/۹۲	-۹/۷۱	-۵/۸۸	-۶/۲۳	۲	
-۷/۶۵	-۱۱/۳۶	-۱۲/۹۳	-۱۱/۴۹	-۱۰/۰۹	-۱۱/۰۶	-۱۲/۸۲	-۷/۹۳	-۱۰/۲۴	۳	
-۹/۸۳	-۱۳/۳۱	-۲۴/۸۴	-۱۲/۲۵	-۱۲/۰۶	-۱۴/۳۰	-۱۴/۳۴	-۱۱/۲۴	-۱۴/۹۶	۴	
-۱۴/۷۸	-۱۵/۲۷	-	-۱۶/۹۰	-۱۲/۰۱	-۱۶/۶۱	-۱۱/۱۴	-۹/۴۴	-۱۳/۲۷	۵	
-۱۴/۱۴	-۲۸/۸۰	-	-	-	-	-۳۰/۴۱	-۷/۸۳	-۱۳/۶۶	۶	
-	۰/۰۲	-	-۱۳/۳۷	-	-۱۷/۷۵	-۱۱/۷۶	-۷/۸۰	-۱۷/۶۳	۷	
-۱۲/۱۱	-	-	-	-	-	-۱۵/۳۰	-۵/۷۴	-۱۵/۰۷	۸	
-۱۱/۲۳	-	-	-۹/۰۱	-	-۱۰/۱۸	-۸/۳۴	-۵/۶۸	-۱۱/۹۶	۹	
-۸/۴۳	-۱۱/۲۰	-۱۶/۰۲	-۱۲/۰۲	-۱۱/۶۴	-۱۴/۳۵	-۱۲/۹۷	-۲/۳۶	-۱۰/۸۷	۱۰	
-۷/۶۰	-۱۱/۳۹	-۱۲/۲۵	-۱۰/۸۳	-۷/۶۴	-۱۱/۵۳	-۹/۹۶	-۴/۹۷	-۹/۳۴	۱۱	
-۵/۶۸	-۸/۲۴	-۱۰/۷۵	-۶/۳۸	-۶/۹۳	-۶/۸۷	-۷/۸۹	-۳/۴۸	-۵/۲۴	۱۲	
-۵/۴۲	-۷/۵۲	-۱۰/۹۳	-۶/۲۱	-۶/۵۵	-۶/۷۳	-۸/۲۹	-۴/۷۰	-۵/۰۳	DJF	فصلی
-۸/۳۷	-۱۱/۹۳	-۱۴/۹۲	-۱۱/۸۹	-۱۰/۵۸	-۱۲/۷۵	-۱۳/۰۵	-۹/۳۸	-۱۲/۴۸	MAM	
-۱۲/۵۲	-۱۴/۳۹	-	-۱۷/۳۷	-	-۱۷/۷۵	-۲۲/۲۶	-۶/۸۶	-۱۵/۵۱	JJA	
-۸/۱۵	-۱۱/۳۷	-۱۲/۶۸	-۱۰/۹۳	-۸/۵۱	-۱۲/۱۰	-۱۰/۵۶	-۴/۱۴	-۱۰/۳۴	SON	
-۶/۶۶	-۹/۱۲	-۱۱/۵۵	-۸/۱۴	-۷/۶۰	-۹/۳۷	-۹/۷۵	-۵/۸۷	-۹/۵۵		سالانه

و ناپایداری جو اشاره می‌کند، در شکل ۴ میزان میانگین ماهانه LI مشاهداتی و بازتحلیل برای هر ایستگاه به تفکیک نشان داده شده است. شکل ۴ نشان می‌دهد که میانگین ماهانه LI بازتحلیل بیشتر حاوی شرایط ناپایدار بوده است در حالی که میانگین ماهانه LI مشاهداتی بر پایدار بودن جو دلالت دارد. این نشان می‌دهد که در منطقه مورد مطالعه LI بازتحلیل نمی‌تواند برای تمیز پایداری و ناپایداری جو کمیت مناسبی باشد. در ایستگاه‌های مشهد و تهران میان روند مقادیر میانگین سالانه بازتحلیل و مشاهداتی همخوانی دیده می‌شود. در سایر ایستگاه‌ها این همخوانی در سال‌های آخر به وضوح دیده می‌شود، هرچند که در برخی ایستگاه‌ها مقدار میانگین سالانه LI بازتحلیل بر مشاهداتی غلبه کرده است و در برخی دیگر برعکس.

همبستگی میان شاخص LI حاصل از داده‌های مشاهداتی و بازتحلیل در ایستگاه‌های تبریز، مشهد، تهران، کرمانشاه، اصفهان، اهواز، کرمان، شیراز و زاهدان به ترتیب تا ۰/۳، ۰/۳، ۰/۹، ۰/۷، ۰/۷، ۰/۷، ۰/۷، ۰/۷ و ۰/۸ بوده است. البته قابل توجه است که در برخی موارد میان مقادیر ماهانه در برخی ایستگاه‌ها همبستگی منفی نیز مشاهده شده که کوچک‌ترین مقدار همبستگی منفی در ایستگاه‌های تبریز، مشهد، تهران، کرمانشاه، اصفهان، اهواز، کرمان، شیراز و زاهدان به ترتیب ۰/۳، -۰/۲، -۰/۲، -۰/۲، -۰/۷، -۰/۷، -۰/۷، -۰/۲، -۰/۲، -۰/۵، -۰/۱ و -۰/۲ به دست آمد که دلیل آن عدم توانایی داده‌های بازتحلیل در تولید وضعیت پایداری جو در برخی ماه‌ها بوده است. از آنجایی که شاخص LI می‌تواند دارای مقادیر مثبت و منفی باشد که هر یک به طور جداگانه به ترتیب به پایداری



شکل ۴: نمودار میله‌ای ماهانه و سری زمانی شاخص LI برای نه ایستگاه جو بالا. نمودار میله‌ای در بازه زمانی که هر دو نوع داده مشاهداتی و ERA5 در دسترس بوده‌اند ترسیم شده است، در حالی که برای ترسیم سری زمانی، کل داده‌های در دسترس ERA5 و مشاهداتی به‌طور مستقل استفاده شده است.

۴. جمع‌بندی

با این‌که استفاده از پارامترسازی همرفت در مدل‌های تولیدکننده داده‌های بازتحلیل به‌منظور تفکیک افقی همراه با تقریب‌هایی است که در تولید نمایه قائم دما و رطوبت و پارامترهای همرفتی منجر به تولید خطا می‌شود، اما استفاده از داده‌های بازتحلیل به‌دلیل دسترسی و تفکیک زمانی مکانی مناسب بسیار مورد توجه واقع شده است. در این تحلیل عملکرد داده‌های بازتحلیل ERA5 در برآورد سه پارامتر چینش بردار باد (VWSH-1000)، برآورد سه پارامتر چینش بردار باد (VWSH-1000)، LI در ایستگاه‌های (VWSH-6000 و VWSH-3000) و در بازه زمانی ۱۹۹۰-۲۰۲۰ ارزیابی شد. نتایج حاصل شد در ذیل فهرست شده است:

(الف) داده‌های بازتحلیل ERA5 مقدار VWSH-1000 را در تمامی ایستگاه‌ها با فرورآورد تولید کرده و در مقیاس ماهانه این خطا گاه تا ۷ متر بر ثانیه افزایش یافته است. تفاوت میان کمترین و بیشترین مقدار ME در مقیاس فصلی از حدود ۱ متر بر ثانیه در ایستگاه اهواز تا ۲ متر بر ثانیه تغییر کرده است. در مقیاس فصلی بیشترین خطا در

برآورد VWSH-1000 در فصل زمستان بوده است. میانگین سالانه ME نیز نشان می‌دهد که داده‌های ERA5 پارامتر VWSH-1000 را حداقل با ۳/۹۱- متر بر ثانیه و حداکثر تا ۵/۷۹- متر بر ثانیه فرورآورد کرده‌اند.

(ب) بیشینه مقدار فرورآورد پارامتر VWSH-3000 در هر ایستگاه در مقیاس ماهانه صرفاً به ماه‌های سرد سال معطوف نشده است. برآورد پارامتر VWSH-3000 در ایستگاه‌های مختلف توسط داده‌های بازتحلیل هم با فراب‌آورد و هم با فرورآورد همراه بوده است و بیشترین مقدار فراب‌آورد حدود ۴ متر بر ثانیه در ایستگاه اهواز در ماه ژانویه و بیشترین مقدار فرورآورد در ایستگاه کرمان با مقدار حدودی ۶ متر بر ثانیه در ماه ژانویه بوده است. همچنین در ایستگاه‌های تهران، تبریز، کرمانشاه و مشهد همخوانی مناسبی میان سری زمانی VWSH-3000 مشاهداتی و بازتحلیل به‌دست آمد. این در حالی است که در سایر ایستگاه‌ها (کرمان، شیراز، اهواز و اصفهان) همخوانی میان روندها در انتهای دوره مطالعاتی بیشتر بود.

این عدم دقت در برآورد پارامترهای ترمودینامیکی و چینش تراز پایین (فروبرآورد) با استفاده از داده‌های بازتحلیل ERA5 در منطقه اروپا و شمال آمریکا نیز به ثبت رسیده است (تازارک و همکاران، ۲۰۲۱ ب). البته وارگا و بروئر (۲۰۲۲) برای منطقه اروپای شرقی و مرکزی نیز نشان دادند که داده‌های ERA5 شاخص LI را با 0.7 - کلونین فروبرآورد و همبستگی 0.97 تولید کرده‌اند. آنها همچنین به خطای 0.9 ، 0.7 - و 0.3 - و همبستگی 0.79 ، 0.89 و 0.95 به ترتیب برای VWSH-1000، VWSH-3000 و VWSH-6000 دست یافتند. لازم به ذکر است که منطقه جغرافیایی ایستگاه مورد مطالعه اعم از ساحلی، کوهستانی و دشتی نیز بر نتایج تاثیر گذار است که با توجه به کمبود تعداد ایستگاه‌های جو بالا در ایران اظهار نظر در این مورد با استفاده از دسته‌بندی ایستگاه‌ها ممکن نبود.

مراجع

پگاه‌فر، ن. (۱۴۰۲). ارزیابی عملکرد داده‌های ERA5 در برآورد انواع مختلف CAPE و CIN در ایستگاه‌های جو بالا در ایران. *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۱۵(۱)، ۲۳۱-۲۴۹.

صادقی حسینی، س. ع. و رضائیان، م. (۱۳۸۵). بررسی تعدادی از شاخص‌های ناپایداری و پتانسیل بارورسازی ابرهای همرفتی منطقه اصفهان. *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۳۲(۲)، ۸۳-۹۸.

طهماسبی‌پاشا، ا.؛ میرزایی، م. و محب‌الحجه، ع. (۱۴۰۰)، ارتباط شاخص‌های همرفتی و دورپیوندی در منطقه غرب آسیا، *مجله ژئوفیزیک ایران*، ۱۵(۳)، ۱-۲۶.

قوبدل رحیمی، ی.؛ عباسی، ا. و فرج‌زاده، م. (۱۳۹۷)، واکاوی دینامیک و ترمودینامیک شدیدترین چرخند حاره‌ای مؤثر بر سواحل جنوبی ایران. *نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۱۵(۱)، ۹۷-۱۱۲.

مجرد، ف.؛ کوشکی، س.؛ معصوم‌پور، ج. و میری، م. (۱۳۹۶). تحلیل شاخص‌های ناپایداری توفان‌های تندری در ایران با استفاده از داده‌های بازتحلیل. *نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۴(۳۳-۴۸).

(ج) مقدار خطا در برآورد ماهانه (سالانه) VWSH-6000 توسط داده‌های بازتحلیل از ۴ تا ۲۰ (از مقدار حدودی ۵ تا ۱۲) متربرثانیه متغیر بوده است. در مقیاس سالانه نیز خطای برآورد VWSH-6000 توسط داده‌های بازتحلیل متربرثانیه متغیر بوده است. داده‌های بازتحلیل در برآورد VWSH-6000 در برخی ایستگاه‌ها (اعم از تبریز، تهران، مشهد، کرمانشاه و کرمان) فروبرآورد و در برخی (اعم از اهواز و زاهدان) فرابرآورد و در برخی دیگر (اعم از اصفهان و شیراز) هم فرابرآورد و هم فروبرآورد تولید کرده‌اند. مشاهده می‌شود. همچنان بزرگترین خطاها به ماه‌های سرد سال و کمترین خطاها به ماه‌های گرم سال محدود بوده است. سری زمانی میانگین سالانه در برخی ایستگاه‌ها سازگاری قابل قبولی میان مقادیر مشاهداتی و بازتحلیل نشان می‌دهد در حالی که در برخی ایستگاه‌ها این مشابهت فقط به انتهای دوره مربوط می‌شود.

(د) بیشینه مقدار RMSE بین مقادیر LI مشاهداتی و بازتحلیل در ماه‌های گرم سال (بهار و تابستان) مشاهده شد که از ۳۰ کلونین در ایستگاه تهران در ماه ژوئن تا حدود ۱۳ کلونین در ایستگاه اصفهان متغیر بوده است. به غیر از یک مورد در ایستگاه اهواز در تمامی ایستگاه‌ها LI بازتحلیل با فروبرآورد تولید شده است. بیشینه مقدار فروبرآورد در برآورد LI در مقیاس فصلی تا حدود ۲۲- کلونین در ایستگاه تهران رسیده است. در کل دوره مورد بررسی نیز در ایستگاه کرمان تا ۱۱- کلونین فروبرآورد روی داده است. با در نظر گرفتن علامت LI تولید شده می‌توان نتیجه گرفت که LI بازتحلیل نمی‌تواند برای تمیز پایداری و ناپایداری کمیت مناسبی باشد.

در کل می‌توان نتیجه گرفت که بازتحلیل ERA5 برای برآورد پارامترهای چینشی که با استفاده از داده‌های ترازهای بالاتر جوی محاسبه می‌شوند دقیق‌تر عمل کرده (مشابه با وارگا و بروئر، ۲۰۲۲) و برای برآورد پارامترهای چینشی که بر اساس اطلاعات از ترازهای ابتدایی جو محاسبه می‌شوند دقت کافی را نداشته است. در مورد شاخص ترمودینامیکی LI نیز باید گفت که ERA5 در برآورد وضعیت پایداری جو دقیق عمل نکرده است. البته

- Allen, J.T., & Karoly, D.J. (2014). A climatology of Australian severe thunderstorm environments 1979–2011: Inter-annual variability and ENSO influence. *International Journal of Climatology*, 34, 81–97.
- Brooks, H. E., Doswell III, C. A., Zhang, X., Chernokulsky, A. A., Tochimoto, E., Hanstrum, B., de Lima Nascimento, E., Sills, D.M., Antonescu, B. & Barrett, B. (2019). A century of progress in severe convective storm research and forecasting. *Meteorological Monographs*, 59, 18-1.
- Brooks, H. E., Lee, J. W., & Craven, J. P. (2003). The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data. *Atmospheric Research*, 67, 73-94.
- Chen, Q., Fan, J., Hagos, S., Gustafson Jr, W. I., & Berg, L. K. (2015). Roles of wind shear at different vertical levels: Cloud system organization and properties. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(13), 6551-6574.
- Coffer, B. E., Parker, M. D., Thompson, R. L., Smith, B. T., & Jewell, R. E. (2019). Using near-ground storm relative helicity in supercell tornado forecasting. *Weather and Forecasting*, 34(5), 1417-1435.
- Coffer, B. E., Taszarek, M., & Parker, M. D. (2020). Near-ground wind profiles of tornadic and nontornadic environments in the United States and Europe from ERA5 reanalyses. *Weather and Forecasting*, 35(6), 2621-2638.
- Coniglio, M. C., & Parker, M. D. (2020). Insights into supercells and their environments from three decades of targeted radiosonde observations. *Monthly Weather Review*, 148(12), 4893-4915.
- Craven, J. P., Brooks, H. E., & Hart, J. A. (2004). Baseline climatology of sounding derived parameters associated with deep, moist convection. *Natl. Wea. Dig*, 28(1), 13-24.
- Czernercki, B., Taszarek, M., Kolendowicz, L., & Konarski, J. (2016). Relationship between human observations of thunderstorms and the PERUN lightning detection network in Poland. *Atmospheric research*, 167, 118-128.
- Doswell III, C. A., & Schultz, D. M. (2006). On the use of indices and parameters in forecasting severe storms. *E-Journal of Severe Storms Meteorology*, 1(3), 1-22.
- Fluck, E., Kunz, M., Geissbuehler, P., & Ritz, S. P. (2021). Radar-based assessment of hail frequency in Europe. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(2), 683-701.
- Galway, J. G. (1956). The lifted index as a predictor of latent instability. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 37(10), 528-529.
- Gensini, V.A., Mote, T.L., & Brooks, H.E. (2014). Severe-thunderstorm reanalysis environments and collocated radiosonde observations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53, 742–751.
- Glazer, R. H., Torres-Alavez, J. A., Coppola, E., Giorgi, F., Das, S., Ashfaq, M., & Sines, T. (2021). Projected changes to severe thunderstorm environments as a result of twenty-first century warming from RegCM CORDEX-CORE simulations. *Climate Dynamics*, 57, 1595-1613.
- Grams, J. S., Thompson, R. L., Snively, D. V., Prentice, J. A., Hodges, G. M., & Reames, L. J. (2012). A climatology and comparison of parameters for significant tornado events in the United States. *Weather and forecasting*, 27(1), 106-123.
- Gyakum, J. R., & Cai, M. (1990). An observational study of strong vertical wind shear over North America during the 1983/84 cold season. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 29(9), 902-915.
- Li, F., Chavas, D. R., Reed, K. A., & Dawson II, D. T. (2020). Climatology of severe local storm environments and synoptic-scale features over North America in ERA5 reanalysis and CAM6 simulation. *Journal of Climate*, 33(19), 8339-8365.
- Pilguy, N., Taszarek, M., Allen, J. T., & Hoogewind, K. A. (2022). Are trends in convective parameters over the United States and Europe consistent between reanalyses and observations?. *Journal of Climate*, 35(12), 3605-3626.
- Pistotnik, G., Groenemeijer, P., & Sausen, R. (2016). Validation of convective parameters in MPI-ESM decadal hindcasts (1971–2012) against ERA-Interim reanalyses. *Meteorology*, 25, 753–766.
- Prein, A.F., Langhans, W., Fosser, G., Ferrone, A., Ban, N., Goergen, K., Keller, M., Tölle, M., Gutjahr, O., Feser, F., & Brisson, E. (2015). A review on regional convection-permitting climate modeling: Demonstrations, prospects, and challenges. *Reviews of geophysics*, 53(2), 323-361.
- Púčik, T., Groenemeijer, P., Rädler, A.T., Tijssen, L., Nikulin, G., Prein, A.F., van Meijgaard, E., Fealy, R., Jacob, D., & Teichmann, C. (2017). Future changes in European severe convection environments in a regional climate model ensemble. *Journal of Climate*, 30(17), 6771-6794.
- Rasmussen, E. N., & Blanchard, D. O. (1998). A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters. *Weather and forecasting*, 13(4), 1148-1164.
- Rodríguez, O., & Bech, J. (2021). Tornadic environments in the Iberian Peninsula and the Balearic Islands based on ERA5 reanalysis.

- International Journal of Climatology*, 41, E1959-E1979.
- Saleh, N., Gharaylou, M., Farahani, M. M., & Alizadeh, O. (2023). Performance of lightning potential index, lightning threat index, and the product of CAPE and precipitation in the WRF model. *Earth and Space Science*, 10(9), e2023EA003104.
- Taszarek, M., Brooks, H.E., & Czernecki, B. (2017). Sounding-derived parameters associated with convective hazards in Europe. *Monthly Weather Review*, 145, 1511–1528.
- Taszarek, M., Brooks, H.E., Czernecki, B., Szuster, P., & Fortuniak, K. (2018). Climatological aspects of convective parameters over Europe: A comparison of ERA-Interim and sounding data. *Journal of Climate*, 31(11), pp.4281-4308.
- Taszarek, M., Allen, J. T., Púčik, T., Hoogewind, K. A., & Brooks, H. E. (2020). Severe convective storms across Europe and the United States. Part II: ERA5 environments associated with lightning, large hail, severe wind, and tornadoes. *Journal of Climate*, 33(23), 10263-10286.
- Taszarek, M., Allen, J. T., Marchio, M., & Brooks, H. E. (2021a). Global climatology and trends in convective environments from ERA5 and rawinsonde data. *NPJ climate and atmospheric science*, 4(1), 35.
- Taszarek, M., Pilguy, N., Allen, J. T., Gensini, V., Brooks, H. E., & Szuster, P. (2021b). Comparison of convective parameters derived from ERA5 and MERRA-2 with rawinsonde data over Europe and North America. *Journal of Climate*, 34(8), 3211-3237.
- Thompson, R. L., Mead, C. M., & Edwards, R. (2007). Effective storm-relative helicity and bulk shear in supercell thunderstorm environments. *Weather and forecasting*, 22(1), 102-115.
- Thompson, R. L., Smith, B. T., Grams, J. S., Dean, A. R., & Broyles, C. (2012). Convective modes for significant severe thunderstorms in the contiguous United States. Part II: Supercell and QLCS tornado environments. *Weather and forecasting*, 27(5), 1136-1154.
- Tyagi, B., Naresh Krishna, V., & Satyanarayana, A. N. V. (2011). Study of thermodynamic indices in forecasting pre-monsoon thunderstorms over Kolkata during STORM pilot phase 2006–2008. *Natural hazards*, 56, 681-698.
- Trapp, R. J., Halvorson, B. A., & Diffenbaugh, N. S. (2007). Telescoping, multimodel approaches to evaluate extreme convective weather under future climates. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D20).
- Varga, Á. J., & Breuer, H. (2022). Evaluation of convective parameters derived from pressure level and native ERA5 data and different resolution WRF climate simulations over Central Europe. *Climate Dynamics*, 58(5-6), 1569-1585.