

بررسی نقش موسمی هند در بی‌هنجاری بارش مرداد ماه ۱۴۰۱ در نیمه جنوبی ایران

میثم پورنقدی^۱، فرهنگ احمدی گیوی^{۲*}، علیرضا محب‌الحجه^۲، محمد میرزائی^۳

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد هواشناسی، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ استاد، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۳ دانشیار، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۴، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۰

چکیده

یکی از اصلی‌ترین عوامل مؤثر بر بارش‌های سنگین تابستانی در آسیا، موسمی هند است که تغییرات شدت و موقعیت آن می‌تواند سبب دگرگونی الگوهای بارش در مناطق مجاور شود. در تابستان ۱۴۰۱، بخش‌های گسترده‌ای از ایران دچار بارش‌های سنگین و سیلاب‌های ویرانگر شد. هم‌زمان با وقوع سیلاب در ایران، کشور هند نیز فصل موسمی کم‌سابقه‌ای را تجربه کرد. این پژوهش با رویکردی کلان‌مقیاس به بررسی سازوکارهای دینامیکی مؤثر بر این رخداد پرداخته است. برای این منظور، داده‌های بازتحلیل NCEP/NCAR برای بررسی میدان‌های گردش جو، داده‌های ERA5 برای محاسبه شاخص موسمی هند (IMI) و داده‌های ماهانه بارش ماهواره‌ای GPM برای تحلیل بارش ایران به کار رفت. بی‌هنجاری‌های ارتفاع ژئوپتانسیلی، باد افقی و انتگرال قائم همگرایی شار رطوبت در جولای ۲۰۲۲ محاسبه شد. برای بررسی پیوند زمانی بین موسمی و بارش، ضریب همبستگی پیرسون بین شاخص IMI و بارش ماهانه در بیست نقطه دارای بیشینه بی‌هنجاری مثبت بارش در جنوب ایران، در دو فاز هم‌زمان و با تأخیر محاسبه گردید. نتایج نشان می‌دهد شاخص IMI در جولای ۲۰۲۲ بیش از دو انحراف معیار بالاتر از میانگین بوده و در عرض‌های پایین‌تر از ۳۰ درجه شمالی ضرایب همبستگی بارش و IMI بالاتر از ۰/۴ و در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار است. در مقابل، در عرض‌های بالاتر این رابطه تضعیف می‌شود. الگوی بی‌هنجاری‌های رطوبتی نیز بیانگر انتقال رطوبت از خلیج بنگال و دریای عرب به سوی جنوب ایران و افزایش همگرایی در این نواحی است. یافته‌ها تأکید می‌کند که فاز بسیار قوی موسمی هند در تابستان ۱۴۰۱ عامل اصلی تشدید بارش‌های فرین ایران بوده است.

کلمات کلیدی: بارش فرین ایران، ساختار سه‌بعدی گردش جو، موسمی هند، بی‌هنجاری کمیت‌های هواشناختی،

جولای ۲۰۲۲.

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی بر نقش بارش‌های فرین در بروز پدیده‌های مخربی چون سیلاب‌های ناگهانی، رانش زمین و آب‌گرفتگی شهری تأکید کرده‌اند (باسکر و همکاران، ۲۰۲۵). این مطالعات نشان می‌دهند که پیامدهای محلی بارش‌های شدید می‌تواند بسیار گسترده و ویرانگر باشد. به گفته تیل و وینتر (۲۰۲۴)، سیلاب‌های خسارت‌بار معمولاً در پی بارش‌های سنگین و وجود رطوبت پیشین در خاک رخ می‌دهند، هرچند تفاوت‌های مکانی می‌تواند در برخی مناطق موجب بروز استثناهایی شود. از سوی دیگر، تغییر در زمان‌بندی رویدادهای بارش فرین می‌تواند موجب جابه‌جایی فصلی میان دوره‌های تر و خشک شود و در نتیجه، توالی سیلاب‌ها و خشکسالی‌ها را دگرگون سازد (لی و همکاران، ۲۰۲۱). در این میان، کشور ایران نیز در سال‌های اخیر با نمونه‌های متعددی از این پدیده‌های حادی روبه‌رو بوده است.

سیلاب مردادماه ۱۴۰۱ که ۲۶ استان کشور را دچار آب‌گرفتگی کرد، متأسفانه منجر به جان‌باختن ۸۲ نفر از هموطنان و خسارات متعدد در بخش‌های مختلف زیربنایی شد که میزان آن حدود سه هزار میلیارد تومان برآورد شد (وزارت کشور، ۱۴۰۱). بارش کل کشور در این ماه، نسبت به میانگین بلندمدت زمان مشابه، ۱۰/۹ میلی‌متر (۳۳۴/۸ درصد) افزایش داشت (سازمان هواشناسی کشور، ۱۴۰۱). از طرفی دیگر بنا به گزارش اداره هواشناسی هند (India Meteorological Department; IMD) در سال ۲۰۲۴، با در نظر گرفتن تغییرات بارش ماه به ماه در کل کشور هند، فصل موسمی ۲۰۲۲ بسیار منحصربه‌فرد بود و تفاوت‌های قابل توجهی بین ماه‌ها وجود داشت. بارش در کل کشور هند در ماه‌های جون، جولای، اگوست و سپتامبر به ترتیب ۹۲٪، ۱۱۷٪، ۱۰۴٪ و ۱۰۸٪ مقدار میانگین دوره بلندمدت بود.

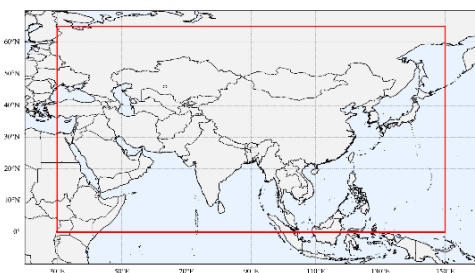
تاکنون پژوهش‌های گوناگونی برای بررسی بارش‌های فرین تابستانی در ایران انجام شده است. نجارسلیقه (۱۳۷۷)، علیجانی و همکاران (۱۳۹۰)، آب‌خرابات و همکاران (۱۳۹۵)، خوش‌اخلاق و همکاران (۱۳۹۸) و آرمش و همکاران (۱۳۹۸) به بررسی بارش فرین تابستانه جنوب شرق ایران پرداختند. نتایج کلی این پژوهش‌ها بیانگر نقش موسمی هند در وقوع این بارش‌هاست. همچنین عربی (۱۳۸۵) با مطالعه همدیدی بارندگی ۲۱ تا ۲۶ تیر ۱۳۷۸ ایران نشان داد که گسترش و نفوذ کم‌فشار موسمی از سمت جنوب و جنوب‌شرق و سامانه‌های پرفشار مهاجر از طرف شمال باعث وقوع بارندگی در این دوره شده است. خدّام و همکاران (۱۳۹۴) در پژوهش خود چهار شاخص همرفتی و دینامیکی را به منظور بررسی تغییرات موسمی هند محاسبه کرده و همبستگی بین این شاخص‌ها و کمیت‌های هواشناختی در بخش مرکزی و شرقی ایران را آزمودند. آنها نشان دادند که افزایش شدت موسمی هند با افزایش ارتفاع ژئوپتانسیلی در سطوح بالای جو، افزایش حرکات نزولی و تقویت جریان‌های شرقی روی ایران همراه بوده است. جلالی و همکاران (۱۳۹۶) بیان کردند که عامل اصلی وقوع بارش‌های تابستانه در سواحل دریای خزر، نفوذ سامانه پرفشار و در پی آن شکل‌گیری جریانات خنک و مرطوب شمالی در سواحل جنوبی دریای خزر و همچنین وقوع همرفت گسترده در منطقه می‌باشد. رضایی و پژوه (۲۰۲۵) به بررسی ارتباط بین روند بلندمدت روزهای بارانی گسترده تابستانی ایران با موسمی هند پرداختند. نتایج پژوهش آنها بیانگر آن است که افزایش تابش طول موج بلند بیرون‌رونده از جو زمین (Outgoing Longwave Radiation: OLR) در خلیج بنگال افزایش میزان بارش و تعداد روزهای بارانی گسترده در ایران را به همراه دارد. به علاوه یافته‌های آنها، افزایش بارش‌های موسمی در ایران به دلیل گرم شدن زمین را رد می‌کند.

موسمی هند ارائه دهد و به درک بهتر نقش آن در تقویت رطوبت و تشکیل سامانه‌های بارش‌زا در ایران بیانجامد. پژوهش حاضر با نگاهی کلان‌مقیاس به تبیین پیوند میان بی‌هنجاری‌های موسمی هند و گردش جوئی منطقه‌ای در مرداد ماه ۱۴۰۱ می‌پردازد. از این‌رو، این مطالعه گامی در راستای درک بهتر برهم‌کنش میان سامانه موسمی هند و الگوهای گردش جوئی مؤثر بر بارش‌های تابستانه ایران به شمار می‌رود. در این مقاله، داده‌ها و روش کار در بخش ۲ شرح داده می‌شود. در بخش ۳، ابتدا بی‌هنجاری‌های گردش جوئی و شدت موسمی هند در جولای ۲۰۲۲ بررسی می‌شود و سپس رابطه آماری و همبستگی میان شاخص موسمی هند (IMI) و بارش‌های ایران مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در نهایت جمع‌بندی مطالب در بخش ۴ آمده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

محدوده جغرافیایی این پژوهش شامل عرض‌های ۶۵-۰ درجه شمالی و ۱۵۰-۳۰ درجه شرقی است (شکل ۱). برای بررسی اجزای موسمی تابستانی آسیا در ترازهای زیرین جو، بخشی از نیمکره جنوبی نیز به محدوده فوق اضافه شده است.



شکل ۱. محدوده جغرافیایی پژوهش حاضر.

داده‌ها

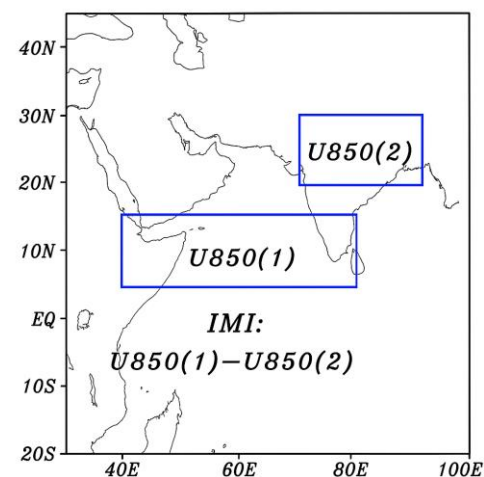
به منظور بررسی ساختار گردش جوئی از داده‌های بازتحلیل NCEP/NCAR با تفکیک افقی $2/5^\circ \times 2/5^\circ$ در بازه زمانی ۲۰۲۲-۱۹۹۳ استفاده شده است.

در تابستان ۲۰۲۲ بخش‌هایی از پاکستان دچار سیلاب‌های موسمی شد. پژوهش‌های انجام شده در این زمینه حاکی از آن است که بادهای شرقی بی‌هنجار بر فراز شمال هند که ناشی از بی‌هنجاری‌های دمای سطح آب در اقیانوس‌های آرام و هند هستند (هونگ و همکاران، ۲۰۲۳؛ هی و همکاران، ۲۰۲۳؛ ما و همکاران، ۲۰۲۳) به همراه بادهای جنوبی بی‌هنجار از دریای عرب به سوی پاکستان (هونگ و همکاران، ۲۰۲۳؛ ناندیتا و همکاران، ۲۰۲۳) منجر به تشدید همگرایی رطوبت و بارش‌های شدید در پاکستان شدند (آتو و همکاران، ۲۰۲۳).

نتایج پژوهش قصابی و همکاران (۲۰۲۳) در مورد بررسی نفوذ بی‌سابقه موسمی هند در مرداد ۱۴۰۱ به ایران بیانگر تضعیف سامانه کم‌فشار بر فراز هند و تقویت آن بر مرکز ایران، چرخش نصف‌النهاری جریان جت سومالی و انتقال رطوبت از دریای عرب توسط بادهای جنوبی و شرقی به نیمه جنوبی ایران است. حاجی‌محمدی (۱۴۰۱) نیز نشان داد شاخص موسمی هند (Indian Monsoon Index; IMI) در ماه‌های جولای و اگوست ۲۰۲۲ به شدت نسبت به میانگین بلندمدت خود بی‌هنجار بوده است. وی تشکیل یک چاهه انرژی در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال بر روی جنوب آسیا و مناطق جنوبی ایران و یک چشمه انرژی بسیار عظیم در تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال در مناطق یاد شده را از سازوکارهای اصلی موسمی تابستانه می‌داند که منجر به وقوع بارش‌های شدید نیمه جنوبی ایران در تابستان ۱۴۰۱ شده است.

با توجه به وقوع بارش‌های فرین مرداد ماه ۱۴۰۱ و هم‌زمانی آن با یکی از قوی‌ترین موسمی‌های چهار دهه اخیر، بررسی سازوکارهای دینامیکی و همدیدی مؤثر بر این رخداد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تحلیل الگوهای همدیدی در ترازهای مختلف جوئی می‌تواند تصویری جامع از ساختار سه‌بعدی گردش جوئی مرتبط با

یک منطقه وسیع شامل خلیج بنگال، هند و دریای عرب شرقی است، بلکه همبستگی بالایی نیز با شاخص بارش موسمی سرتاسر هند (All-India Monsoon Rainfall; AIMR) دارد. برای دوره ۵۰ ساله از ۱۹۴۸ تا ۱۹۹۷، ضریب همبستگی این دو شاخص ۰/۷۲ می‌باشد (ونگ و همکاران، ۲۰۰۱). از این‌رو، IMI معرف واقع‌بینانه تغییرپذیری بارش بزرگ‌مقیاس موسمی تابستانی هند است (ونگ و همکاران، ۲۰۰۹).



شکل ۲. تعریف شاخص موسمی هند (IMI). مستطیل‌ها معرف محدوده باد مداری در محاسبه شاخص هستند.

در ادامه کار، با استفاده از روش استانداردسازی نمره- Z (Z -score)، شاخص استانداردشده موسمی برای هر یک از سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۲ جداگانه محاسبه شده و مقادیر آنها به صورت سری زمانی تهیه شد. سال‌هایی که در آن مقدار شاخص استانداردشده بالاتر (پایین‌تر) از ۱ (-) باشد به عنوان سال موسمی قوی (ضعیف) و سال‌هایی که مقدار شاخص بین ۱ و -۱ است به عنوان سال موسمی نرمال تعیین شده است.

برای بررسی ارتباط میان شدت موسمی هند و بارش تابستانی ایران، ۲۰ نقطه دارای بیشینه بی‌هنجاری مثبت بارش در جولای ۲۰۲۲ در نیمه جنوبی ایران مشخص شد. بازه ۱۹۹۸ تا ۲۰۲۲ به‌عنوان دوره مشترک ERA5 و GPM انتخاب شد و ضریب همبستگی پیرسون (r) بین

مجموعه داده‌های بازتحلیل جوّی ERA5 با تفکیک افقی $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ در دوره ۱۹۸۰-۲۰۲۲ برای محاسبه شاخص موسمی به کار رفته است. به‌منظور تحلیل بارش ایران، از داده‌های ماهانه GPM دارای تفکیک افقی $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ (۱۰ کیلومتر \times ۱۰ کیلومتر) که از سال ۱۹۹۸ در دسترس می‌باشد، استفاده شده است.

روش پژوهش

برای بررسی چگونگی ساختار سه‌بعدی گردش جوّ در ماه جولای ۲۰۲۲، بی‌هنجاری‌های ارتفاع ژئوپتانسیلی و خطوط جریان در ترازهای ۸۵۰، ۵۰۰ و ۲۰۰ هکتوپاسکال در جولای ۲۰۲۲ نسبت به میانگین بلندمدت ۱۹۹۳-۲۰۲۲ محاسبه و ترسیم شد. با استفاده از مؤلفه‌های افقی سرعت باد و رطوبت ویژه، بی‌هنجاری انتگرال همگرایی شار رطوبت و بردار شار رطوبت بین ترازهای ۱۰۰۰ تا ۵۰۰ هکتوپاسکال در جولای ۲۰۲۲ با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد تا الگوهای انتقال و تمرکز رطوبت در دوره رخداد موسمی مشخص شود.

$$\text{VIMFC} = -\frac{1}{g} \int_{500}^{1000} q \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) dp \quad (1)$$

در رابطه فوق، g شتاب گرانی، p فشار، q رطوبت ویژه و u و v مؤلفه‌های افقی سرعت باد هستند.

در ارزیابی قدرت موسمی در جولای ۲۰۲۲، از شاخص موسمی هند (IMI) بهره گرفته شده است. شاخص دینامیکی موسمی هند براساس اختلاف سرعت بادهای غربی در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال بین دو منطقه، یکی در جنوب (بین ۱۵-۵ درجه شمالی و ۸۰-۴۰ درجه شرقی) و دیگری در شمال (بین ۳۰-۲۰ درجه شمالی و ۹۰-۷۰ درجه شرقی) تعریف می‌شود (شکل ۲). این شاخص هم شدت موسمی غربی حاره‌ای و هم بی‌هنجاری تاوایی وردسپهر زیرین مرتبط با ناوه موسمی را نشان می‌دهد. به‌علاوه، این شاخص نه تنها به‌خوبی نشان‌دهنده بی‌هنجاری‌های بارش متوسط‌گیری شده در

شاخص IMI و بارش ماهانه در نقاط یادشده در دو حالت هم‌زمان (lag 0) و با تأخیر یک‌ماهه (lag +1) محاسبه شد تا نقش زمانی موسمی هند در تغییرات بارش ایران ارزیابی شود.

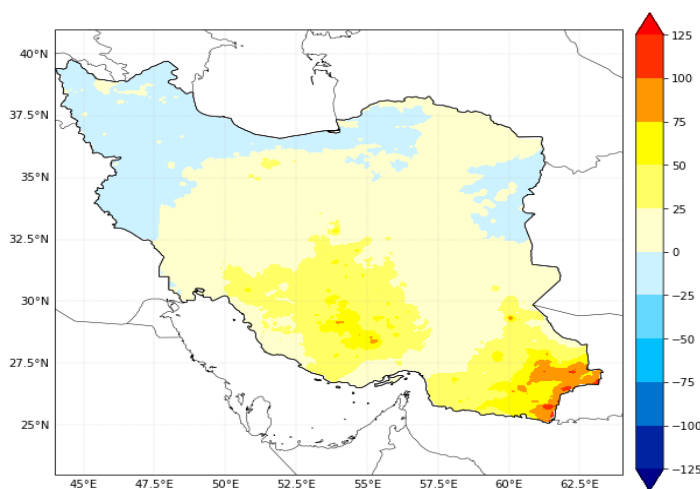
بحث و نتایج

بی‌هنجاری بارش در جولای ۲۰۲۲

برای بررسی الگوی کلی بارش‌های تابستان ۲۰۲۲، نقشه بی‌هنجاری بارش ماه جولای نسبت به میانگین بلندمدت دوره ۱۹۹۸-۲۰۲۲ ترسیم شد (شکل ۳). الگوی مکانی بی‌هنجاری‌ها نشان می‌دهد که در این ماه غیر از مناطق شمال و شمال‌غرب ایران، بیشتر پهنه کشور با

بی‌هنجاری مثبت بارش نسبت به میانگین مواجه شده‌است. بیشینه بی‌هنجاری مثبت در نقاطی از استان‌های سیستان و بلوچستان و فارس مشاهده می‌شود به طوری که در برخی نقاط، میزان بارش بیش از ۱۰۰ میلی‌متر بالاتر از میانگین اقلیمی بوده است.

الگوی بی‌هنجاری بارش، شواهد اولیه‌ای از گسترش شمال‌سوی سامانه موسمی به نیمه جنوبی ایران را فراهم می‌کند. در بخش‌های بعد، این رخداد از دیدگاه دینامیکی و رطوبتی با بررسی بی‌هنجاری‌های ارتفاع ژئوپتانسیلی، جریان باد و رطوبت در ترازهای مختلف جو مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

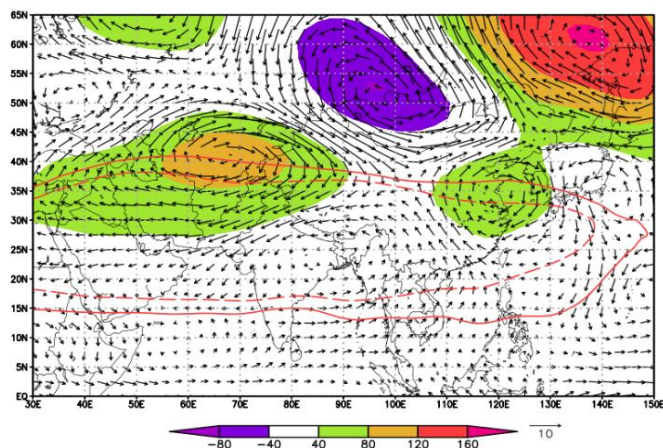


شکل ۳. نقشه بی‌هنجاری بارش ایران در جولای ۲۰۲۲ نسبت به میانگین بلندمدت این ماه.

بررسی بی‌هنجاری کمیت‌های هواشناختی در ماه جولای ۲۰۲۲

شکل ۴ نقشه بی‌هنجاری‌های ارتفاع ژئوپتانسیلی و بردار باد افقی تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال در ماه جولای ۲۰۲۲ را نشان می‌دهد. به‌علاوه در این شکل مرز ارتفاع‌زیاد جنوب آسیا با مقدار ۱۲۵۰۰ ژئوپتانسیل‌متر در

وضعیت اقلیمی و جولای ۲۰۲۲ نمایش داده شده است. مطابق شکل، ایران متأثر از استقرار یک بی‌هنجاری واچرخندی که مرکز آن بر روی ترکمنستان است، قرار دارد. جریان جت شرقی حاره‌ای نیز در جولای ۲۰۲۲ تضعیف شده است.

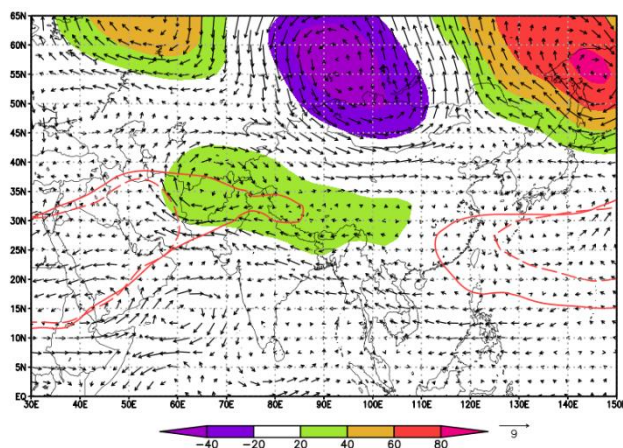


شکل ۴. نقشه بی‌هنجاری میانگین ماه جولای ۲۰۲۲ مربوط به ارتفاع ژئوپتانسیلی (برحسب ژئوپتانسیل متر) و بردار باد افقی نسبت به میانگین بلندمدت این ماه در تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال. منحنی توپر (خط چین) قرمز، نشان‌دهنده وضعیت میانگین پربند ۱۲۵۰۰ ژئوپتانسیل متر در جولای ۲۰۲۲ (بلندمدت) است.

ارائه شده است. به علاوه در این شکل مرز ارتفاع زیاد آزرز و ارتفاع زیاد غرب آرام شمالی با مقدار ۵۸۸۰ ژئوپتانسیل متر در وضعیت اقلیمی و جولای ۲۰۲۲ نشان داده شده است. این شکل حاکی از وجود یک بی‌هنجاری واچرخندی بر روی افغانستان، تقویت جریانات شرقی مربوط به چرخند موسمی در نیمه شمالی هند و از طرفی دیگر تضعیف واچرخند جنب حاره‌ای آزرز در نیمه شرقی ایران و دریای عرب است.

انتهای شرقی پربند ۱۲۵۰۰ ژئوپتانسیل متر که حدوداً در ۱۴۰ درجه شرقی حضور داشت، در جولای ۲۰۲۲ با پیشروی شرق سو به طول جغرافیایی ۱۵۰ درجه شرقی رسیده است. همچنین در شکل ۴ کشیدگی شمال‌سوی این ارتفاع زیاد دیده می‌شود و این الگوی بی‌هنجاری موجب تقویت قابل ملاحظه واگرایی ترازهای بالا بر روی ایران شده است.

در شکل ۵ نقشه بی‌هنجاری‌های ارتفاع ژئوپتانسیلی و بردار باد افقی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در جولای ۲۰۲۲

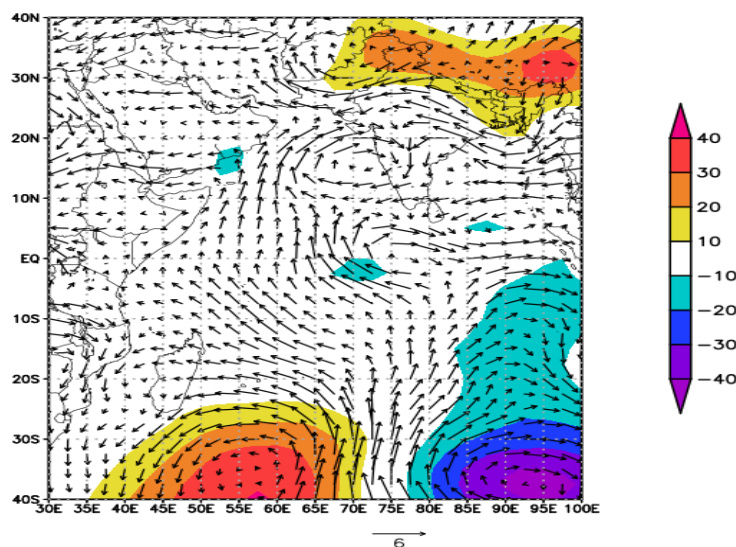


شکل ۵. مشابه شکل ۴ ولی برای تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال. منحنی توپر (خط چین) قرمز، نشان‌دهنده وضعیت میانگین پربند ۵۸۸۰ ژئوپتانسیل متر در جولای ۲۰۲۲ (بلندمدت) است.

در جولای ۲۰۲۲، بی‌هنجاری ارتفاع زیاد واقع بر ایران به‌طور قابل ملاحظه‌ای تقویت شده و انتهای شرقی آن تا غرب فلات تبت گسترده شده است. هم‌زمان ارتفاع زیاد غرب آرام شمالی تا حدود طول جغرافیایی ۱۱۰ درجه شرقی در شرق فلات تبت گسترش یافته است.

شکل ۶ نقشه بی‌هنجاری‌های ارتفاع ژئوپتانسیلی و بردار باد افقی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در جولای ۲۰۲۲ را

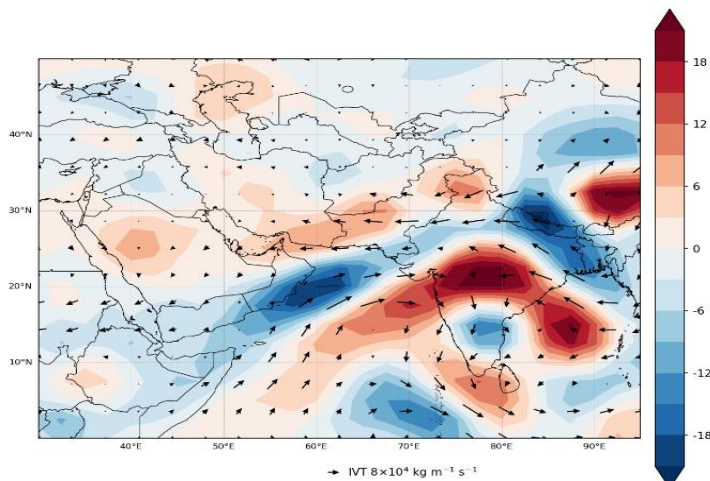
نشان می‌دهد. مطابق شکل، جریان موسمی در دریای عرب دارای بی‌هنجاری جنوبی است که این به معنای تضعیف مولفه غربی و در مقابل تقویت مولفه جنوبی جریان موسمی و در نتیجه انتقال بادهای موسمی به عرض‌های بالاتر این منطقه است. از طرفی در جلگه هند و گنگ در نیمه شمالی هند شاهد بی‌هنجاری‌های بسیار قوی شرقی هستیم که این بی‌هنجاری‌ها تا پاکستان و جنوب شرق ایران نیز امتداد دارد.



شکل ۶. مشابه شکل ۴ ولی برای تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال.

به‌منظور شناسایی نواحی همگرایی و واگرایی رطوبتی مرتبط با سامانه موسمی، بی‌هنجاری انتگرال قائم همگرایی شار رطوبت (VIMFC) و بردار شار رطوبت بین ترازهای ۱۰۰۰ تا ۵۰۰ هکتوپاسکال برای ماه جولای ۲۰۲۲ نسبت به میانگین بلندمدت محاسبه و در شکل ۷ نمایش داده شده است. مطابق شکل، یک نوار بی‌هنجاری

واگرایی شار رطوبت با آرایش قوسی شکل از خلیج بنگال و جنوب تبت تا دریای عرب، امتداد دارد. این نوار دارای دو هسته عمده بی‌هنجاری واگرایی شار رطوبت یکی در جنوب تبت و دیگری بر روی میانه دریای عرب است که منشأ اصلی تغذیه رطوبت سامانه‌های موسمی به شمار می‌روند و در جولای ۲۰۲۲ تقویت شده‌اند.

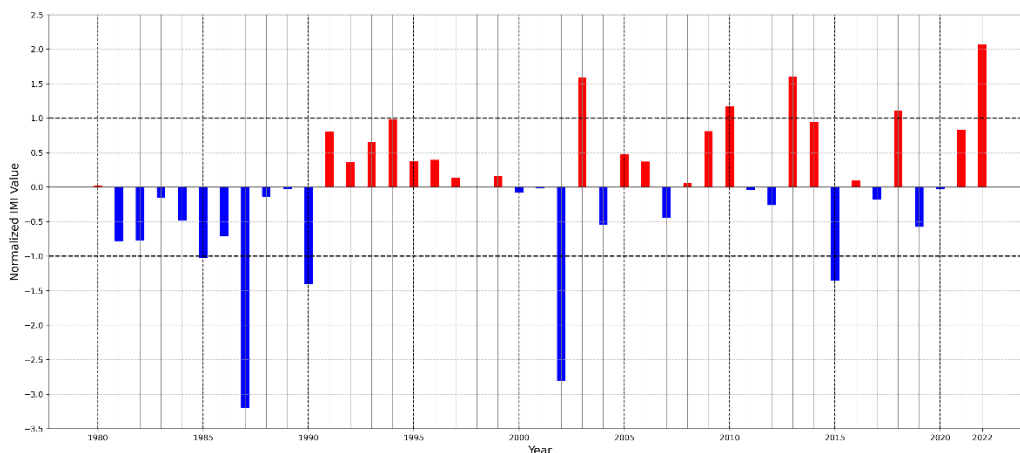


شکل ۷. نقشه بی‌هنجاری انتگرال قائم همگرایی شار رطوبت (برحسب $10^4 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$) بین ترازهای ۱۰۰۰ تا ۵۰۰ هکتوپاسکال و بردار آن (برحسب $\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$) در ماه جولای ۲۰۲۲.

رطوبت در ترازهای پایین تا میانی جو در نیمه جنوبی ایران توسط دو شاخه بی‌هنجار یادشده تشکیل می‌شود.

ارزیابی قدرت موسمی در جولای ۲۰۲۲ شکل ۸ سری زمانی استاندارد شده قدرت موسمی براساس IMI طی ماه جولای از سال ۱۹۸۰ تا سال ۲۰۲۲ را نمایش می‌دهد. طبق شکل، شاخص موسمی هند در جولای ۲۰۲۲ با بیش از دو انحراف معیار بالاتر از میانگین اقلیمی، بیشترین مقدار خود از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۲ را ثبت کرده است. به عبارتی دیگر، موسمی جولای ۲۰۲۲ قوی‌ترین موسمی طی ۴۳ سال اخیر بوده است.

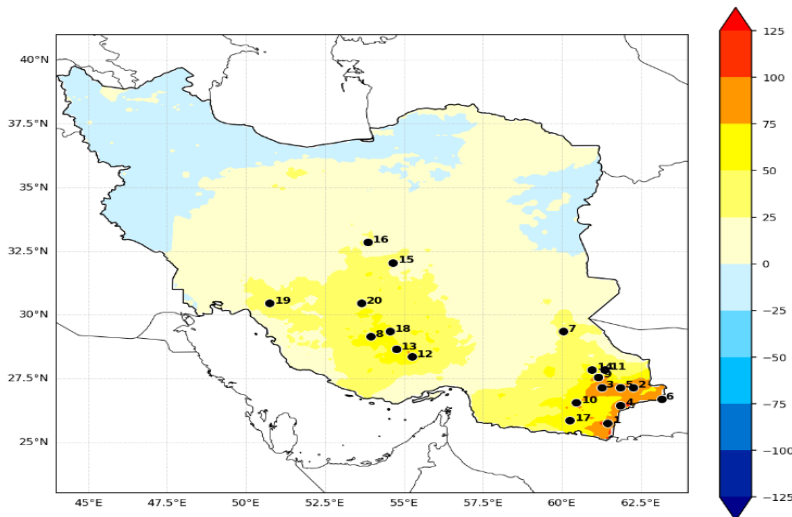
بردارهای شار رطوبت، جهت و شدت انتقال رطوبت را نشان می‌دهند. جریانات بسیار قوی بی‌هنجار شرقی در نوار مداری ۲۵ تا ۳۰ درجه شمالی حاکی از چرخش اساسی در جهت باد نسبت به میانگین بلندمدت و همچنین افزایش قابل ملاحظه تندی آن است که موجب انتقال شار رطوبت بی‌هنجار به سوی پاکستان و نیمه جنوبی ایران می‌شود. بخشی از این جریان بی‌هنجار شرقی نیز پس از ترکیب شدن با جریان بی‌هنجار موسمی دریای عرب، شار رطوبت چشم‌گیری را به داخل ایران منتقل می‌کند. در نهایت، منطقه وسیعی از بی‌هنجاری همگرایی شار



شکل ۸. سری زمانی شاخص استاندارد شده IMI در ماه جولای از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۲.

مثبت بارش جولای ۲۰۲۲ (موقعیت آنها در شکل ۹ نمایش داده شده است) نشان می‌دهد که پیوند مکانی-زمانی آشکاری میان شدت موسمی و بارش‌های جنوب ایران برقرار است.

بررسی ارتباط موسمی هند و بارش تابستانی ایران تحلیل همبستگی بین شاخص موسمی هند (IMI) و بارش ماهانه در بیست نقطه دارای بیشترین بی‌هنجاری



شکل ۹. نقشه نقاط دارای بیشینه بی‌هنجاری مثبت بارش در جولای ۲۰۲۲.

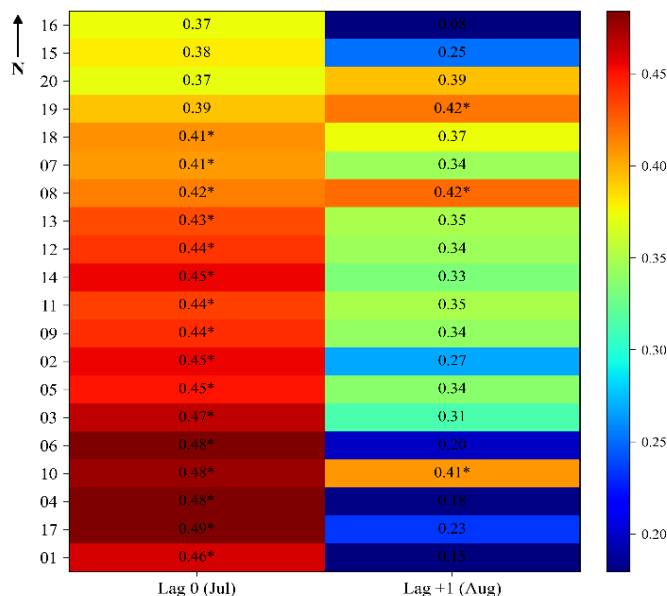
در فاز تأخیری ($Lag + 1$ ؛ ماه آگوست)، مقادیر همبستگی در بیشتر نقاط کاهش یافته و تنها سه نقطه دارای ضریب بیش از 0.4 و معنی‌داری آماری در سطح اطمینان بالا هستند. این موضوع نشان می‌دهد که اثر موسمی هند بر بارش ایران عمدتاً در فاز هم‌زمان جولای آشکار و در ماه بعدی تضعیف می‌شود. با این حال، دو نقطه ۱۰ (محدوده نیک‌شهر سیستان و بلوچستان) و ۸ (محدوده استهبان فارس) در هر دو ماه جولای و آگوست دارای ضرایب بالا و معنی‌دارند که بیانگر تداوم اثر موسمی در این نواحی است.

از دیدگاه مکانی، الگوی توزیع ضرایب همبستگی در شکل ۱۰ نشان می‌دهد که پاسخ بارش ایران به تغییرات موسمی هند دارای ساختاری عرض‌وابسته است؛ یعنی هرچه عرض جغرافیایی پایین‌تر باشد، ارتباط آماری قوی‌تر و نقش موسمی محسوس‌تر است. این یافته با الگوهای دینامیکی بخش‌های پیشین سازگاری دارد، زیرا

در نمایش ضرایب همبستگی بر طبق شکل ۱۰، محور افقی دو حالت هم‌زمانی ($Lag 0$ ؛ جولای) و تأخیر یک‌ماهه ($Lag + 1$ ؛ آگوست) و محور قائم، نقاط منتخب را به ترتیب از شمال به جنوب بر حسب عرض جغرافیایی نشان می‌دهد. بررسی مقادیر ضرایب همبستگی در این شکل نشان می‌دهد که در نواحی واقع در عرض‌های پایین‌تر از 30° درجه شمالی (شامل سیستان و بلوچستان و بخش‌هایی از نیمه جنوبی فارس)، ضرایب در ماه جولای ($lag 0$) همگی بیش از 0.4 بوده و در سطح اطمینان آماری ۹۵ درصد معنی‌دار هستند. این وضعیت بیانگر آن است که افزایش شدت موسمی هند، هم‌زمان با افزایش بارش‌های جولای در این نواحی رخ داده است. در مقابل، نقاط واقع در عرض‌های بالاتر از 30° درجه شمالی دارای ضریب کمتر از 0.4 و فاقد معنی‌داری آماری‌اند؛ به عبارت دیگر، در این نواحی رابطه بین شاخص موسمی و بارش از نظر آماری قابل اعتماد نیست و بارش‌ها بیشتر تحت تأثیر سامانه‌های غیرموسمی قرار دارند.

و دریای عرب به سوی جنوب ایران است. در مجموع، نتایج این بخش نشان می‌دهد که شاخص موسمی هند (IMI) قادر است بخش قابل توجهی از تغییرپذیری بارش تابستانی نیمه جنوبی ایران را تبیین کند.

در همان نواحی که ضرایب همبستگی بالا مشاهده می‌شود، بی‌هنجاری‌های همگرایی شار رطوبت و انتقال افقی رطوبت نیز تقویت شده‌اند. بدین ترتیب، الگوی آماری مشاهده شده در شکل ۱۰، بازتاب مستقیم سازوکار فیزیکی انتقال و تمرکز رطوبت از خلیج بنگال



شکل ۱۰. نمایش ضرایب همبستگی بین IMI و بارش ماهانه.

نواحی جنوبی ایران شده است. دو هسته اصلی واگرایی شار رطوبت در ترازهای پایین تا میانی جو در جنوب تبت و دریای عرب به طور هم‌زمان تقویت شده‌اند. بی‌هنجاری‌های شرقی قوی بر روی جلگه هند و گنگ و پاکستان تا جنوب شرق ایران امتداد یافته و در ترکیب با بی‌هنجاری جنوبی بر روی دریای عرب، الگوی انتقال رطوبت از دو هسته یادشده را به سوی ایران، تقویت کرده‌اند. این فرایند، زمینه اصلی شکل‌گیری بارش‌های گسترده و فراتر از نرمال در استان‌های جنوبی کشور، به ویژه سیستان و بلوچستان و فارس، را فراهم کرده است.

بررسی همبستگی میان شاخص IMI و بارش ماهانه در بیست نقطه دارای بیشینه بی‌هنجاری مثبت بارش نشان داد که بین شدت موسمی و بارش‌های ایران، پیوند زمانی و مکانی معنی‌داری برقرار است. در نواحی واقع در

جمع‌بندی

نتایج این پژوهش بیانگر آن است که رخداد بارش‌های فرین مرداد ۱۴۰۱ در ایران به‌طور مستقیم تحت تأثیر یکی از قوی‌ترین موسمی‌های چهار دهه اخیر قرار داشته است. شاخص موسمی هند (IMI) در جولای ۲۰۲۲ بیش از دو انحراف معیار بالاتر از میانگین اقلیمی بود و در نتیجه، قوی‌ترین مقدار خود را از سال ۱۹۸۰ تاکنون ثبت کرد. این افزایش چشم‌گیر در شدت موسمی، با تغییرات بارز در الگوی گردش جو و انتقال رطوبت در ترازهای مختلف همراه بوده است.

در جولای ۲۰۲۲، تقویت و اچرخند در ترازهای میانی و بالایی جو بر فراز ایران همراه با تضعیف جت شرقی حاره‌ای و جابه‌جایی شرق‌سوی ارتفاع‌زاد جنوب آسیا، موجب واگرایی تراز بالا و صعود همرفتی در

عرض‌های پایین‌تر از ۳۰ درجه شمالی، ضرایب همبستگی بیش از ۰/۴ و در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار بودند که بیانگر هم‌زمانی افزایش شدت موسمی با افزایش بارش در ماه جولای است. در مقابل، نواحی شمالی‌تر همبستگی ضعیف‌تری نشان دادند. همچنین، در فاز تأخیری مقدار ضرایب کاهش یافته است که حاکی از تضعیف اثر موسمی در ماه بعدی می‌باشد.

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که شاخص موسمی هند (IMI) می‌تواند بخش قابل‌توجهی از تغییرپذیری بارش تابستانی نیمه جنوبی ایران را تبیین کند. یافته‌ها مؤید آن است که گسترش شمال‌سوی الگوی موسمی و تقویت جریان‌های شرقی - جنوبی بر روی دریای عرب و شمال هند، از طریق انتقال و همگرایی رطوبت، نقش اصلی را در وقوع بارش‌های گسترده و شدید جولای ۲۰۲۲ در ایران ایفا کرده‌اند.

منابع

۱. آب خرابات، ش.، رضایی بنفشه، م.، جهان‌بخش اصل، س.، کریمی، م.، رسولی، ع. (۱۳۹۵). تحلیل دینامیکی - سینوپتیکی سازوکار بارش‌های تابستانه جنوب شرق ایران، فصلنامه پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۸ (۹۷)، ۳۳۵-۳۴۹.
۲. آرمش، م.، خسروی، م.، سلیقه، م. (۱۳۹۸). مطالعه همدید نفوذ سامانه مونسون به جنوب شرق ایران، نشریه دگرگونی‌ها و مخاطرات آب و هوایی، ۱ (۱)، ۱-۳۸.
۳. جلالی، م.، شاهبایی، ع.، کمریان، و. (۱۳۹۶). شناسایی الگوهای همدید بارش‌های شدید تابستانه در سواحل جنوبی دریای خزر، نشریه جغرافیا و برنامه ریزی، ۲۱ (۵۹)، ۲۳-۳۹.
۴. حاجی محمدی، ح. (۱۴۰۱). بررسی سازوکار دینامیکی موسمی تابستانه ۲۰۲۲ آسیا موثر بر بارش‌های سنگین ایران، نشریه هواشناسی و علوم جو، ۵ (۱)، ۱-۲۱.
۵. خدام، ن.، ایران نژاد، پ.، احمدی گیوی، ف. (۱۳۹۴). بررسی اثر موسمی هند بر اقلیم تابستانی ایران، مجله ژئوفیزیک ایران، ۹ (۲)، ۵۲-۶۶.
۶. خوش اخلاق، ف.، عزیزی، ق.، لشکری، ح.، ماهوتچی، م. (۱۳۹۸). واکاوی الگوهای همدید- پویشی بارش‌های ابرسنگین فراگیر تابستانه جنوب شرق ایران، فصلنامه آمایش جغرافیایی فضا، ۹ (۳۳)، ۲۰۲-۱۸۵.
۷. سازمان هواشناسی کشور. (۱۴۰۱). گزارش ماهانه مرداد ۱۴۰۱ تحلیل بارش، دما و خشکسالی در سال آبی جاری.
۸. عربی، ز. (۱۳۸۵). تحلیل سینوپتیکی بارندگی دوره ۲۱ تا ۲۶ تیرماه ۱۳۷۸ در ایران، فصلنامه پژوهش‌های جغرافیایی، ۳۸ (۵۶)، ۱-۱۵.
۹. علیجانی، ب.، مفیدی، ع.، علی‌اکبری بیدختی، ع. (۱۳۹۰). الگوهای گردش جو بارش‌های تابستانه جنوب شرق ایران در ماه ژوئیه ۱۹۹۴. فیزیک زمین و فضا، ۳۷ (۳)، ۲۲۷-۲۰۵.
۱۰. نجارسلیمه، م. (۱۳۷۷). بررسی سینوپتیکی بارش مرداد ماه ۱۳۷۴ در جنوب شرق ایران. رشد آموزش جغرافیا، ۱۳ (۱۳)، ۱۷-۱۳.
11. Busker, T., van den Hurk, B., de Moel, H., & Aerts, J. C. (2025). The value of precipitation forecasts to anticipate floods. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 106(3), E473-E491.
12. Editor Mausam. (2024). Weather in India: MONSOON SEASON (June - September 2022). *MAUSAM*, 74(3), 881-910.
13. Ghassabi, Z., Karami, S., Vazifeh, A., & Habibi, M. (2023). Investigating the unprecedented summer 2022 penetration of the Indian monsoon to Iran and evaluation of global and regional model forecasts. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 103, 101386.
14. He, C., Zhou, T., Zhang, L., Chen, X., & Zhang, W. (2023). Extremely hot East Asia and flooding western South Asia in the summer of 2022 tied to reversed flow over Tibetan Plateau. *Climate Dynamics*, 61(5), 2103-2119.
15. Hong, C. C., Huang, A. Y., Hsu, H. H., Tseng, W. L., Lu, M. M., & Chang, C. C. (2023). Causes of 2022 Pakistan flooding and its linkage with China and Europe heatwaves. *npj Climate and Atmospheric Science*, 6(1), 163.
16. <https://moi.ir/x3stq>
17. Li, X., Hu, Q., Wang, R., Zhang, D., & Zhang, Q. (2021). Influences of the timing of extreme precipitation on floods in Poyang Lake, China. *Hydrology Research*, 52(1), 26-42.
18. Ma, Y., Hu, X., Chen, Y., Hu, Z., Feng, T., & Feng, G. (2023). Different characteristics and drivers of the extraordinary Pakistan rainfall in July and August 2022. *Remote Sensing*, 15(9), 2311.
19. Nanditha, J. S., Kushwaha, A. P., Singh, R., Malik, I., Solanki, H., Chuphal, D. S., ... & Mishra, V. (2023). The Pakistan flood of August 2022: causes and implications. *Earth's Future*, 11(3), e2022EF003230.
20. Otto, F. E., Zachariah, M., Saeed, F., Siddiqi, A., Kamil, S., Mushtaq, H., ... & Clarke, B. (2023). Climate change increased extreme monsoon rainfall, flooding highly vulnerable communities in Pakistan. *Environmental Research: Climate*, 2(2), 025001.
21. Rezaei, M., & Pashoh, F. (2025). Has the Extent of Summer Monsoon Rainfall Activity Increased in

- Iran? A Long-Term Analysis of Trends and Connection with Monsoon Indices. *International Journal of Climatology*, e8852.
22. Teale, N., & Winter, J. M. (2024). The relationship between extreme precipitation and damaging floods in the Northeastern United States. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 63(9), 1035-1047.
23. Wang, B., Ding, Q., & Joseph, P. V. (2009). Objective definition of the Indian summer monsoon onset. *Journal of Climate*, 22(12), 3303-3316.
24. Wang, B., Wu, R., & Lau, K. M. (2001). Interannual variability of the Asian summer monsoon: Contrasts between the Indian and the western North Pacific–East Asian monsoons. *Journal of climate*, 14(20), 4073-4090.
25. Yuan, X., Yang, K., Sun, J., Wang, Y., He, Y. Y., Zou, M. J., & Jiang, Y. Z. (2023). Why was Pakistan extreme precipitation stronger in 2022 than in 2010? *Advances in Climate Change Research*, 14(6), 913-

Investigation of the Role of the Indian Monsoon in the July 2022 Precipitation Anomalies over Southern Iran

Pournaghdi, M.¹, Ahmadi-Givi, F.^{2*}, Mohebalhojeh, A.R.², Mirzaei, M.³

¹ M.Sc. graduate of Meteorology, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

² Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

³ Associate Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

*Corresponding Author Email: ahmadig@ut.ac.ir

Received: 15 July 2025, Accepted: 01 November 2025

ABSTRACT

One of the primary systems influencing heavy summer rainfall over Asia is the Indian monsoon, whose variations in intensity and position can substantially alter precipitation patterns in surrounding regions. During the summer of 2022, large parts of Iran experienced intense rainfall and devastating floods. Concurrently, India experienced an exceptionally strong monsoon season. Using a large-scale synoptic approach, this study investigates the dynamic mechanisms associated with this extreme event. The NCEP/NCAR reanalysis data were used to analyze atmospheric circulation fields, the ERA5 reanalysis to calculate the Indian Monsoon Index (IMI), and monthly satellite-based GPM precipitation data to examine rainfall over Iran. Anomalies of geopotential height, horizontal wind, and vertically integrated moisture flux convergence were computed for July 2022. In addition, to evaluate the temporal linkage between the monsoon and rainfall, the Pearson correlation coefficient between the IMI and monthly precipitation at twenty points with the highest positive rainfall anomalies in southern Iran was calculated for both simultaneous and one-month-lagged phases. The results indicate that the IMI value in July 2022 exceeded its long-term mean by more than two standard deviations, representing one of the strongest monsoon phases in the past four decades. Correlation coefficients between the IMI and precipitation exceeded 0.4 and were statistically significant at the 95% confidence level south of 30° N, while the relationship weakened at higher latitudes. The moisture-anomaly pattern further revealed enhanced moisture transport from the Bay of Bengal and the Arabian Sea toward southern Iran, leading to increased convergence and intensified rainfall. Overall, the findings highlight that the exceptionally strong Indian monsoon phase in summer 2022 was the principal driver of Iran's extreme precipitation and associated floods.

Keywords: extreme rainfall in Iran, three-dimensional structure of atmospheric circulation, Indian monsoon, anomalies of meteorological quantities, July 2022

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Pournaghdi, M., Ahmadi-Givi, F., Mohebalhojeh, A. R., Mirzaei, M. (2025). Investigation of the Role of the Indian Monsoon in the July 2022 Precipitation Anomalies over Southern Iran. *Journal of Meteorology and Atmospheric Science.*, 7(2): 20-32. Doi: 10.22034/jmas.2025.534485.1247

COPYRIGHTS

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to the JMAS Journal. This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

