مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره دهم، شماره ۲۹، پاییز ۱۴۰۰
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۱/۱۴
تاریخ بازنگری نهایی مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۱۶
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۱۲
صفحات: ۱۴۴ - ۱۲۵

مقاله (علمی پژوهشی)

الگوهای همدیدی و ترمودینامیکی رودخانه‌های جوی منجر به بارش سنگین دوره سرد کشور ایران

حسن لشکری*[۱]، ندا اسفندیاری[۲]

۱*. دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران
۲. دانشجوی دکتری آب وهواشناسی سینوپتیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

چکیده

رودخانه‌ی جوی، پدیده‌ای تقریباً نوظهور در ادبیات علمی جهان هست که به¬سبب ارتباط با فرین‌های جوی به¬خصوص بارش‌های سنگین و سیل‌آسا موردبررسی قرارگرفته است. روش کار این مطالعه گردشی به محیطی قلمداد می‌شود؛ به¬این‌گونه که ابتدا برای شناسایی رودخانه‌های جوی از داده‌های یکپارچه‌شده شار قائم بخارآب استفاده گردید و معیارهایی برای تفکیک آن از شارش‌های روزانه تعیین شد. سپس صدک نودم بارش روزانه برای ایستگاه‌های همدید سراسر کشور به‌عنوان معیار بارش سنگین درنظر گرفته شد. تاریخ‌های مرتبط با بارش‌های سنگین به¬هنگام حضور رودخانه‌های جوی به¬دست آمد و الگوهای آن پس از تهیه ماتریسی ۱۱۹۰×۱۰۷ از ارتفاع ژئوپتانسیل ۱۰۰۰ هکتوپاسکالی به¬روش تحلیل عاملی و بررسی ارزش ویژه هر تاریخ استخراج شد. نتایج نشان داد ۳ عامل اول نزدیک به ۷۰ درصد پراش مجموع را تبیین می‌کنند. در یک جمع‌بندی کلی در تمام الگوها کم‌فشار سودان نقش غیرقابل‌انکاری در شکل‌گیری رودخانه‌های جوی و ایجاد بارش‌های سنگین داشته است. در الگوی ترکیبی کم‌فشار سودان و مدیترانه مناطق جنوب غرب و غرب کشور بیشترین اثرپذیری را داشته‌اند. الگوی ترکیبی کم‌فشار سودان و چرخند شرق اروپا بخش‌های گسترده‌تری از کشور را در برگرفته است. نفوذ این‌گونه سامانه‌ها بر روی کشور بیشتر از سایر الگوها بود. در الگوی ترکیبی کم‌فشار سودان و واچرخند مهاجر رودخانه‌ها و پهنه بارشی گسترش زیادی به عرض‌های شمالی کشور نداشتند. ازنظر ساختار شکل‌گیری، در تمام الگوها در ترازهای زیرین وردسپهر کم‌فشار سودان و پرفشار سیبری نقش اصلی در ایجاد شیو حرارتی و انتقال رطوبت به رودخانه‌های جوی داشتند و منابع رطوبتی در این لایه‌ها دریای عمان- عرب بودند.

واژگان کلیدی: الگوی همدیدی، رودخانه‌های جوی، بارش سنگین، ایران.

*- حسن لشکری (نویسنده مسئول) Email: h-lashkari@sbu.ac.ir

مقدمه

حجم عظیمی از رطوبت در تروپوسفر پایینی توسط مسیرهایی باریک و بلند به نام رودخانه‌های اتمسفری در حال حرکت هستند. بخش اعظم از بخارآب انتقال‌یافته به‌وسیله آن‌ها درصورتی‌که با شرایط همدیدی و ترمودینامیکی مناسب همراه شود می‌تواند موجب بارش‌های سنگین یا سیلاب در مناطق تحت تأثیر از این پدیده شود. اگرچه هنوز در مورد شروع و شکل‌گیری آن از رطوبت منطقه حاره (کنیپرز و همکاران، ۲۰۱۳) و یا کمربند انتقال‌دهنده گرمای پیشانی جبهه سرد سیکلون‌های برون حاره (بائو و همکاران، ۲۰۰۶) برخی اختلاف‌نظرها وجود دارد، این رودخانه‌های جوی سالانه در مناطق مختلف جهان با منشأ حاره‌ای و گاه جنب‌حاره‌ای تشکیل‌شده و مقادیر عظیمی از رطوبت را از عرض‌های جنوبی به عرض‌های میانه و شمالی فرارفت می‌کنند؛ به‌این‌ترتیب رودخانه‌های جوی نقش مهمی در چرخه جهانی آب و به‌خصوص در فرین‌های آب و هواشناسی دارند (ژو و نیوول، ۱۹۹۸). والیزر و گوان (۲۰۱۷) نشان دادند این پدیده در توزیع نیمی از رخدادهای فرین باد و بارش به‌ویژه در عرض‌های متوسط مشارکت دارد. ایشان ۴۰ تا ۷۵ درصد رخداد این دو پدیده فرین را در بیش از ۴۰ درصد نواحی ساحلی جهان به رودخانه‌های جوی بارش‌شو نسبت دادند. پالتان و همکاران (۲۰۱۷) نقش رودخانه‌های اتمسفری در سیلاب‌های جهانی و دسترسی به آب را بررسی کردند و دریافتند که بارش‌های رودخانه‌های جوی تقریباً ۲۲ درصد مجموع رواناب را در بیش از ۵۰ درصد مناطق جهان شامل می‌شوند. مناطق مستعد از این پدیده تا ۸۰ درصد احتمال سیلاب را افزایش داده همچنین نشان دادند تقریباً ۳۰۰ میلیون از مردم جهان در معرض سیل و خشک‌سالی متأثر از این پدیده می‌باشند. ریو و همکاران (۲۰۱۱) منشأ و مسیر رودخانه‌های اتمسفری که منجر به بارش‌های شدید در سواحل غرب آمریکا شدند را موردبررسی قراردادِند و ۱۰ مسیر با منشأهای متفاوت یافت کردند. نتایج ایشان نشان داد گردش بزرگ‌مقیاس کنترل‌کننده اصلی در انتقال رطوبت در این مناطق است. لاورز (۲۰۱۳) نتایج آن‌ها بر روی ناهنجاری‌های فشار سطح دریا مرتبط با رودخانه‌های جوی نشان داد تراف قرارگرفته در مرکز ایالات‌متحده و پشته‌ی قرارگرفته بروی شرق سواحل ایالات‌متحده منجر به وزش بادهای جنوبی و فرارفت رطوبت بر روی منطقه شده است. همچنین باراکا و همکاران (۲۰۱۸) به تحلیل ارتباط رودخانه‌های جوی و سیلاب در منطقه‌ی گالیشیای اسپانیا تحت شرایط همدید پرداختند.

اهمیت رودخانه‌های جوی به‌سبب احتمال ارتباط آن‌ها با مجموع بارش کلی نیز هست. در آمریکای شمالی بین ۲۰ تا ۴۵ درصد از بارش در مرکز و شمال کالیفرنیا را به رودخانه‌های جوی نسبت دادند این میزان در برخی سال‌ها به ۵۰ درصد نیز رسیده است. (دتینگر و همکاران، ۲۰۱۱ دتینگر ۲۰۱۳) همچنین این ارتباط حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد برای مجموع بارش‌های غرب اروپا به‌دست‌آمده است (لاورس و ویلارینی، ۲۰۱۵).

در ایران مطالعات محدودی به بررسی این پدیده پرداخته‌اند. شادمانی (۱۳۹۵) وجود یا عدم وجود رودخانه‌های جوی را بر ۲ مورد بارندگی شدید منجر به سیل در غرب و جنوب کشور موردبررسی قرارداد. نتایج ایشان نشان داد مبدأ و منشأ مسیرهای حرکت رطوبتی همگی به سمت جنوب (استوا) می‌باشند، ولی به‌طورکامل به استوا نمی-رسند. سلیمی و سلیقه (۱۳۹۴) به بررسی حمل و انتقال بخارآب از طریق رودخانه‌های اتمسفری در لایه‌های مختلف جو برای دوره سه‌ساله (۲۰۱۳-۲۰۱۱) پرداختند. نتایج تحلیل ایشان نشان داد که سالانه به‌طور میانگین، حدود دوازده رودخانه اتمسفری تشکیل می‌شود که رطوبت بخشی از بارش‌های ایران را تأمین می‌کند. در این مطالعه

مجموع شار بخارآب تمام ستون جو یکجا درنظر گرفته نشده است. اکبری و همکاران (۲۰۱۹) با همین روش طولانی‌ترین و عمیق‌ترین مسیرها را با طول چندین هزار کیلومتر در خاورمیانه به‌عنوان رودخانه‌های جوی معرفی کردند.

طبیعت خشک و نیمه‌خشک ایران، دسترسی به منابع محدود آبی و شدت تأثیر منطقه از پدیده‌های فرین اهمیت مطالعه این پدیده را نشان می‌دهد. تاریخچه اقلیمی کشور نشان می‌دهد وقوع بارش‌های سنگین همه‌ساله منجر به سیلاب‌های مخرب می‌شود و علاوه بر اینکه حجم زیادی از بارش‌ها را دسترس خارج می‌سازد، خسارت‌های عظیمی به زیرساخت‌ها و منابع طبیعی وارد می‌کند. بنابراین مفهوم رودخانه‌های جوی و شناسایی آن‌ها چارچوب جدید و عملی برای آزمون و سنجیدن شرایط جوی مرتبط با بارش‌های سنگین را فراهم می‌کند (رالف و همکاران، ۲۰۱۸) و بررسی الگوهای جوی مختوم به وقوع بارش‌های سنگین ناشی از این پدیده می‌تواند در پیش‌آگاهی و کنترل شرایط سیلابی به برنامه‌ریزان محلی کمک نماید.

بنابراین، این مطالعه الگوهای اصلی حاکم بر رخداد رودخانه‌های جوی را که با بارش‌های سنگین در شش‌ماهه سرد و بارشی ایران همراه بوده‌اند شناسایی می‌کند و شرایط ترمودینامیکی و همدیدی آن‌ها را بررسی خواهد کرد.

داده‌ها و روش‌ها

به‌طورکلی از دو رویکرد در به‌کارگیری داده‌ها باهدف شناسایی رودخانه‌های جوی استفاده می‌شود (جیمنو ۲۰۱۴): یکی استفاده از داده‌های مجموع بخارآب ستون جو (مانند رالف و همکاران ۲۰۰۴، گوان و همکاران ۲۰۱۰، دتینگر ۲۰۱۱)؛ و دیگری محاسبه داده‌های شار قائم بخارآب می‌باشد (مانند نایاک ۲۰۱۴، اسپینوزا و همکاران ۲۰۱۸، ویتارات و همکاران ۲۰۱۸). داده‌های اول تنها به تمرکز بخارآب در جو اشاره دارند (بلامی ۲۰۱۸). داده‌های شار باتوجه به ارتباط مستقیم با بارش‌های کوهستانی (نیمن ۲۰۰۸) و یا عوارض پیچیده (جانکر ۲۰۰۸) کاربردی‌تر هستند؛ بنابراین در این مطالعه رویکرد دوم را انتخاب کردیم. به‌این‌منظور جهت شناسایی رودخانه‌های جوی ابتدا داده‌های یکپارچه‌شده شار قائم بخارآب (شرق سو و شمال سو) از مرکز پیش‌بینی میان‌مدت جو اروپا۱ با تفکیک مکانی ۰/۵ درجه قوسی برای بازه زمانی نوامبر تا آوریل (۲۰۰۷- ۲۰۱۸) و درگام های ۶ ساعته استخراج شد؛ سپس بزرگی شار رطوبت (MT) بر اساس فرمول زیر محاسبه گردید.

$$MT = \frac{1}{g}\left(\int_{1000hPa}^{300\,hPa} qudp + \int_{1000hPa}^{300hPa} qvdp\right) \quad (۱)$$

در اینجا q نشان‌دهنده نم ویژه، u و v مؤلفه‌های مداری و نصف‌النهاری باد، g شتاب گرانی و dp اختلاف فشار میان دو سطح هست (لاورز و همکاران ۲۰۱۲، راموس و همکاران ۲۰۱۵)

برای تفکیک رودخانه‌های جوی از شارش‌هایی که به‌طورمعمول و روزانه در جو رخ می‌دهند نیاز به تعیین معیار بود؛ بنابراین در تعیین رودخانه‌های جوی به‌عنوان منطقه‌ای پیوسته از شار قائم بخارآب که هر شبکه در آن بالاتر از

1 ECMWF

آستانه باشد با استناد به کار گوان و والیزر ۲۰۱۵ از صدک ۸۵ ام منطقه به‌عنوان آستانه و همین‌طور شرایط ژئومتریک شامل طول بزرگ‌تر از ۲۰۰۰ کیلومتر و نسبت طول به عرض بیشتر از ۲ استفاده شد.

به‌این‌منظور ابتدا داده‌های بزرگی شار قائم بخارآب در ساعت ۱۲ هرروز به‌وقت هماهنگ جهانی در محدوده ۱۳ تا ۴۳ درجه شمالی و ۳۳ تا ۶۹ درجه شرقی استخراج شد و سپس صدک ۸۵ ام شار قائم بخارآب منطقه به‌طور جداگانه برای هرماه محاسبه شد.

نقشه شار قائم بخارآب در گام‌های ۶ ساعته برای هرروز (مشمول دوره آماری) ترسیم گردید. با اعمال فیلتر بر روی هر نقشه مقادیر شار کمتر از آستانه از روی نقشه حذف شدند. به‌عنوان‌مثال برای تمام روزهای ماه ژانویه معیار به‌دست‌آمده از این ماه (صدک ۸۵ ام) به مقدار ۱۵۱ کیلوگرم متر بر ثانیه استفاده شد و تنها مقادیر بالاتر از آن مقدار بر روی نقشه‌ها حفظ شدند.

درنهایت مسیرهایی طویل و باریک بر روی هر نقشه درصورتی‌که شرایط هندسی که در بالا یاد شد را داشتند و از مرزهای خشکی ایران عبور کرده بودند به‌عنوان رودخانه جوی حفظ شدند و تاریخ آن‌ها ثبت شد. (رجوع شود به اسفندیاری و لشکری ۲۰۲۰).

برای تعیین بارش‌های سنگین از معیارهای مختلفی استفاده می‌شود. باتوجه به‌اینکه میزان بارش در نواحی مختلف کشور متفاوت می‌باشد استفاده از یک معیار مطلق برای تمام نقاط ایستگاهی کشور مناسب نبود؛ بنابراین به شاخص کاربردی‌تر صدک‌ها استناد شد. در این شاخص عموماً برای تعیین بارش‌های سنگین به صدک ۹۵ ام یا ۹۰ ام بارش استناد می‌شود. ازآنجاکه فراوانی روزهای بارشی بالاتر از صدک ۹۵ ام در کشور کم است (علیجانی ۲۰۱۱) در این مطالعه از صدک ۹۰ ام بارش هر ایستگاه و حداقل بارش ۱ میلی‌متر (به‌منظور جلوگیری از غیرواقعی شدن آستانه برحسب صدک) به‌عنوان آستانه استفاده شد (مانند گوریزمن ۲۰۰۱، هایلوک ۲۰۰۶). داده‌های بارش روزانه برای ۳۴۰ ایستگاه همدید در سراسر ایران از سازمان هواشناسی کشور دریافت و پس از همگن‌سازی ایستگاه‌ها و رفع خطاهای موجود، آستانه یادشده برای هر ایستگاه به‌طور جداگانه محاسبه شد. در مرحله بعد بارش‌های روزانه در تاریخ‌هایی که رودخانه‌های جوی حضور داشتند (۳۶۴ تاریخ) استخراج شد و بارش‌های بالاتر از آستانه برای هر ایستگاه در محدوده جغرافیایی که رودخانه جوی گسترش‌یافته است علامت زده شد. درنهایت مشخص شد ۱۰۷ تاریخ با بارش سنگین همراه بودند به‌طوری‌که در هر رخداد حداقل ۵ و حداکثر ۷۵ ایستگاه بارش سنگین داشته‌اند.

به‌منظور تعیین الگوهای همدید غالب برای ۱۰۷ تاریخ به‌دست‌آمده از داده‌های ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال با تفکیک مکانی ۲/۵ درجه قوسی از مرکز ملی تحقیقات و پیش‌بینی جو آمریکا۱ استفاده شد و با استفاده از آن‌ها ماتریس زمان – مکان به ابعاد ۱۱۹۰×۱۰۷ تهیه شد. سپس به‌منظور کاهش حجم داده‌ها و به‌دست‌آوردن تیپ الگوهای گردشی، تحلیل عامل‌ها به‌روش مؤلفه‌های مبنا برای ماتریس اولیه اجرا شد. جدول ۲ مشخصات روش انجام‌شده را نشان می‌دهد. تعداد عامل‌ها به‌صورت پیش‌فرض پیشنهادشده و تازمانی که عوامل، تبیین مناسب و کافی از مجموع داده‌ها ارائه کنند تغییر یافت. بنابراین پس از مشخص شدن مؤثرترین عوامل، با مرتب کردن تاریخ‌ها بر اساس ضرایب همبستگی، نمونه‌های عوامل اصلی با ضریب همبستگی بالاتر از ۰/۸۵ به‌عنوان تاریخ‌های منتخب

1 NCEP/NCAR

استخراج‌شده و الگوهای همدیدی آن‌ها به‌تفصیل مورد تحلیل قرار گرفتند. به‌این‌منظور از نقشه‌های ترکیبی ارتفاع ژئوپتانسیل نم ویژه و جریان تراز ۱۰۰۰، ۸۵۰، ۷۰۰، نقشه‌های امگا در تراز ۷۰۰ و ۵۰۰ به‌همراه نقشه رودخانه‌های جوی و پهنه‌های بارشی استفاده شد.

پس از بررسی چشمی تمام الگوها، مؤثرترین سامانه جاذب رطوبت به داخل کشور در لایه‌های پایین جو، کم‌فشار سودان شناخته شد؛ بنابراین محور این سامانه (بااتصال مراکز کم‌فشار) برای هریک از رخدادها در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال ترسیم شد و سپس بر اساس نزدیکی به الگوهای اصلی به‌دست‌آمده از تحلیل عامل‌ها طبقه‌بندی شدند. درنهایت دید بهتری از نحوه گسترش این سامانه در هر الگو به‌دست آمد.

جدول ۱: مشخصه‌های مورداستفاده و به‌دست‌آمده در روش تحلیل عامل‌ها

ورودی					**خروجی**		
روش استخراج	روش تحلیل	نوع چرخش	تعداد عامل‌ها	ماتریس اولیه	درصد تبیین	ماتریس نهایی
مؤلفه‌های مبنا	همبستگی	متعامد واریماکس	۱۰	۱۰۷×۱۱۹۰	۰/۹۰۴	۱۰۷×۱۰

یافته‌های تحقیق

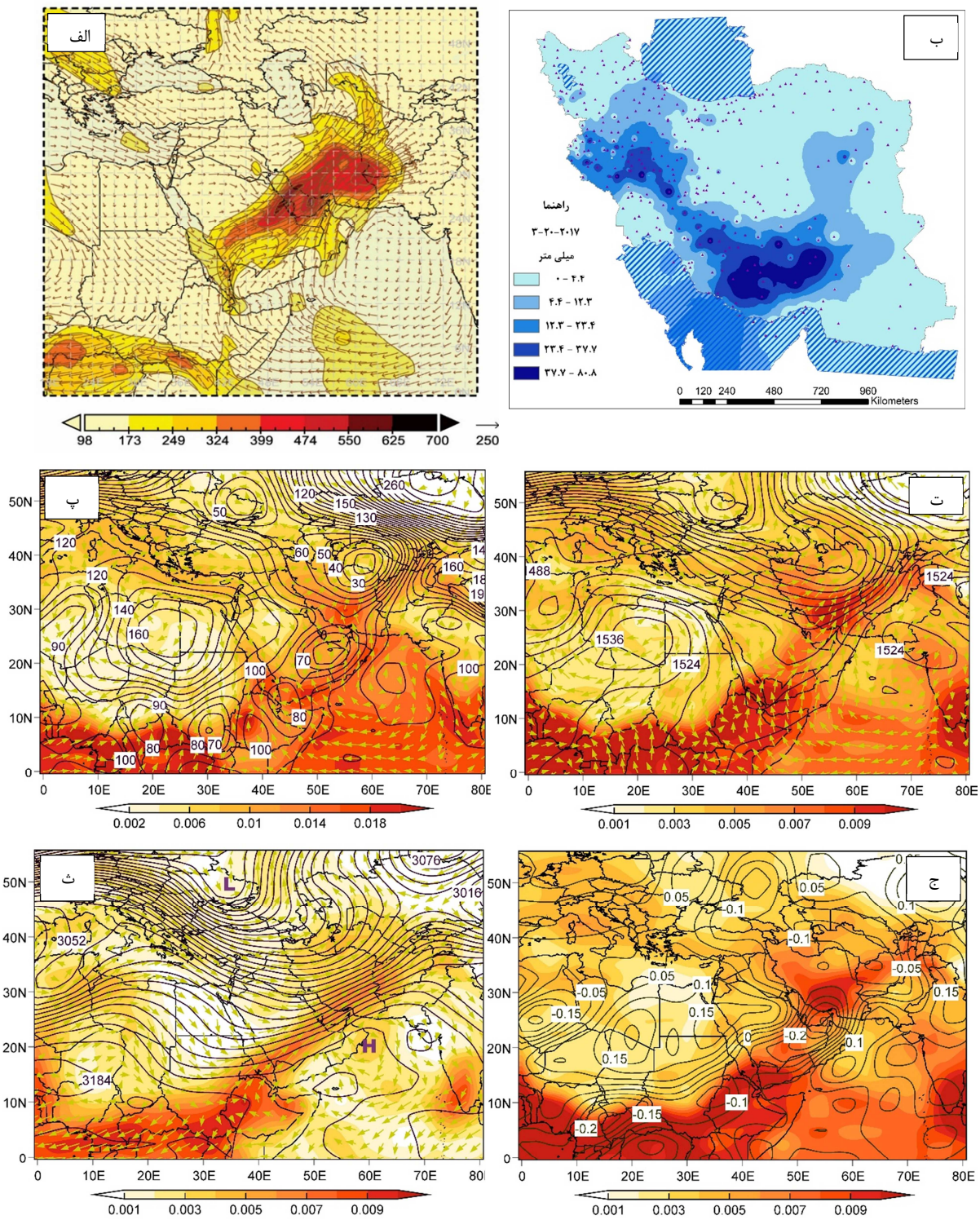
نتایج تحلیل الگوهای همدیدی بر اساس مؤلفه‌های مبنا نشان داد درمجموع ۱۰ عامل بیش از ۹۰ درصد واریانس (پراش) را تبیین کرده‌اند. این درحالی‌است که ۳ عامل اول نزدیک به ۷۰ درصد پراش کل را توجیه کرده‌اند و سایر عامل‌ها هرکدام بین ۲ تا ۵ درصد پراش مجموع داده‌ها را تبیین کرده‌اند؛ بنابراین تاریخ‌های مستخرج از ضرایب یادشده درمیان عوامل اصلی (الگوهای غالب گردشی رودخانه‌های جوی مرتبط با بارش سنگین) تحلیل شد:

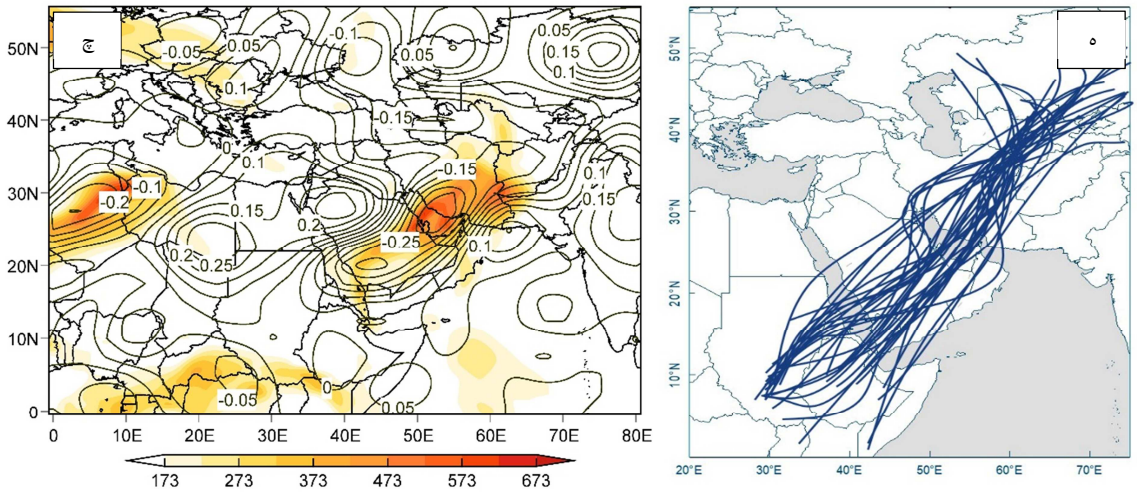
الگوی ترکیبی کم‌فشار سودان – چرخند انتقالی شرق اروپا (الگوی نماینده ۲۰ مارس ۲۰۱۷)

این رودخانه جوی از روی دریای سرخ شکل‌گرفته و از جنوب وارد ایران شده است (شکل ۱ الف). این پدیده در ۱۱ گام ۶ ساعته تداوم داشته و اوج شدت شار بخارآب در این روز مربوط به ساعت (۰۰ به‌وقت هماهنگ جهانی[1]) با بزرگی بیش از ۷۲۵ کیلوگرم متر بر ثانیه بوده است. درمجموع ۵۶ ایستگاه همدید دارای بارش سنگین بوده‌اند که از بین آن‌ها ۲۴ ایستگاه در محدوده گسترش رودخانه جوی قرار داشته است. شکل ۱ (ب) الگوی بارشی این روز را نشان می‌دهد. بالاترین بارش به میزان ۸۱ میلی‌متر در ایستگاه بافت (کرمان) به وقوع پیوسته است.

شکل‌های ۱ (پ، ت، ث) الگوی همدیدی نماینده این‌گونه رودخانه‌های جوی را نشان می‌دهد. در تراز زیرین وردسپهر زبانه کم‌فشار گسترده‌ای با راستای جنوب غربی- شمال شرقی از روی کشور سودان شروع‌شده و در ادامه تا شمال شرق ایران امتدادیافته است. این زبانه در شمال شرق با چرخند انتقالی از شرق اروپا یکپارچه‌شده است.

1 UTC


الف
98 173 249 324 399 474 550 625 700 250
ب
راهنما
۳-۲۰-۲۰۱۷
میلی متر
۰ - ۴.۴
۴.۴ - ۱۲.۳
۱۲.۳ - ۲۳.۴
۲۳.۴ - ۳۷.۷
۳۷.۷ - ۸۰.۸
0 120 240 480 720 960 Kilometers
پ
0.002 0.006 0.01 0.014 0.018
ت
0.001 0.003 0.005 0.007 0.009
ث
0.001 0.003 0.005 0.007 0.009
ج
0.001 0.003 0.005 0.007 0.009



شکل ۱ الف) رودخانه جوی شکل‌گرفته بر فراز ایران در تاریخ ۲۰ مارس ۲۰۱۷ ساعت ۰۶ جهانی با واحد کیلوگرم متر بر ثانیه. ب) الگوی بارش روزانه. پ) نقشه ترکیبی نم ویژه (کیلوگرم بر کیلوگرم) جریان و ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۱۰۰۰ ت) ۸۵۰ ث) ۷۰۰ هکتوپاسکال. ج) نقشه ترکیبی امگای تراز ۷۰۰ و نم ویژه تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال. چ) نقشه ترکیبی امگای تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و رودخانه جوی. ه) موقعیت محورهای کم‌فشار سودان بر اساس الگوی اول.

همان‌طورکه دیده می‌شود در این الگو سامانه سودانی از سمت شرق در هم‌جواری یک سامانه واچرخندی قوی که بر روی آب‌های گرم عمان و عرب قرار دارد. این سامانه که در شرق شبه‌جزیره عربستان قرار دارد با فرارفت گرم و مرطوب از روی آب‌های گرم انرژی ترمودینامیکی لازم را برای تقویت سامانه سودانی فراهم کرده است.

هم‌زمان با این سامانه، سامانه واچرخندی آفریقا در این تراز از جو بر روی غرب مصر و لیبی قرار دارد. استقرار این سامانه در این موقعیت جغرافیایی علاوه بر اینکه باعث جابجایی شرق سوی سامانه سودانی شده است. با فرارفت سرد از عرض‌های جنب حاره سبب افزایش شیو حرارتی در دامنه غربی سودان و تقویت دینامیکی این سامانه گردیده است. نقشه ترکیبی جریان و نم ویژه در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال به‌خوبی این پدیده را نشان می‌دهد.

در تراز ۸۵۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال دو ناوه عمیق در عرض‌های جنب حاره و جنب قطبی دیده می‌شود. ناوه جنب قطبی با راستای شمال غربی- جنوب شرقی تا ساحل جنوب شرقی دریای مازندران امتداد می‌یابد. در این ترازها واچرخند عربستان در مناسب‌ترین موقعیت خود بر روی آب‌های گرم عمان و عرب قرار دارد. ناوه جنب‌حاره‌ای با راستای شمال شرقی- جنوب غربی از شمال شرق ایران شروع‌شده و تا دریای سرخ و شرق مصر گسترش داشته است. شکل ۱ (ت و ث) جریان فرارفت رطوبت را به جلو ناوه نشان می‌دهد. گسترش شمال سوی واچرخند آفریقایی و تقویت آن طی روزهای گذشته که ارتفاع ژئوپتانسیلی آن حدود ۴۰ تا ۵۰ ژئوپتانسیل متر افزایش نشان می‌دهد سبب بلوکه‌شدن ناوه جنوبی‌تر گردیده است. به‌همین‌دلیل انتهای ناوه به سمت عقب (غرب) برگشت پیداکرده است. جریان‌های ترازهای ۸۵۰ و ۷۰۰ به‌خوبی فرارفت سرد جنب قطبی را به دامنه غربی ناوه و فرارفت رطوبتی را به جلو ناوه نشان می‌دهد. همان‌طورکه دیده می‌شود در این الگو دریاهای گرم عرب و عمان در ترازهای زیرین وردسپهر (زیر تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال) مهم‌ترین نقش را در تأمین رطوبت رودخانه‌های جوی ورودی به منطقه دارند. ولی از تراز

۷۰۰ هکتوپاسکال بشدت از نقش رطوبت فرستی این دریاها کم شده و برعکس بر سهم رطوبت انتقالی از منطقه همگرایی حاره‌ای افزوده می‌شود.

شکل ۱ (ه) محور زبانه‌های کم‌فشار سودانی را در الگوی ترکیبی سودان و چرخند اروپایی نشان می‌دهد. همان‌طورکه دیده می‌شود در این الگو به‌دلیل ترکیب دو سامانه، زبانه‌ها عموماً طویل بوده و تا کشورهای آسیای میانه نیز امتداد می‌یابند. منشأ اولیه این سامانه‌ها از روی سودان می‌باشد. در این الگوها به‌دلیل حرکت جنوب و شرق سوی قابل‌توجه واچرخند عربستان، سامانه‌ها از بخش جنوبی و مرکزی دریای سرخ عبور کرده و عموماً از جنوب میانی وارد ایران شدند و بخش‌های گسترده‌ای از ایران را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

شکل ۱ (ج، چ) نقشه ترکیبی نم ویژه ۸۵۰ و امگای ترازهای ۷۰۰ همچنین رودخانه جوی به همراه امگای تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال را نشان می‌دهد. همان‌طورکه دیده می‌شود میدان امگای منفی درست بر منطقه با نم ویژه بالا و منطقه شدیدترین بارش منطبق است و بزرگی این جریان‌ها به ۰/۲۵- و ۰/۳۵- پاسکال بر ثانیه رسیده است. به‌این‌ترتیب علاوه بر فرارفت رطوبتی مناسب به رودخانه‌های جوی انطباق بسیار مناسب جریان‌های افقی و بالاسوی (شار افقی و قائم) مهم‌ترین نقش را در ایجاد بارش‌های سنگین ایفا می‌کنند.

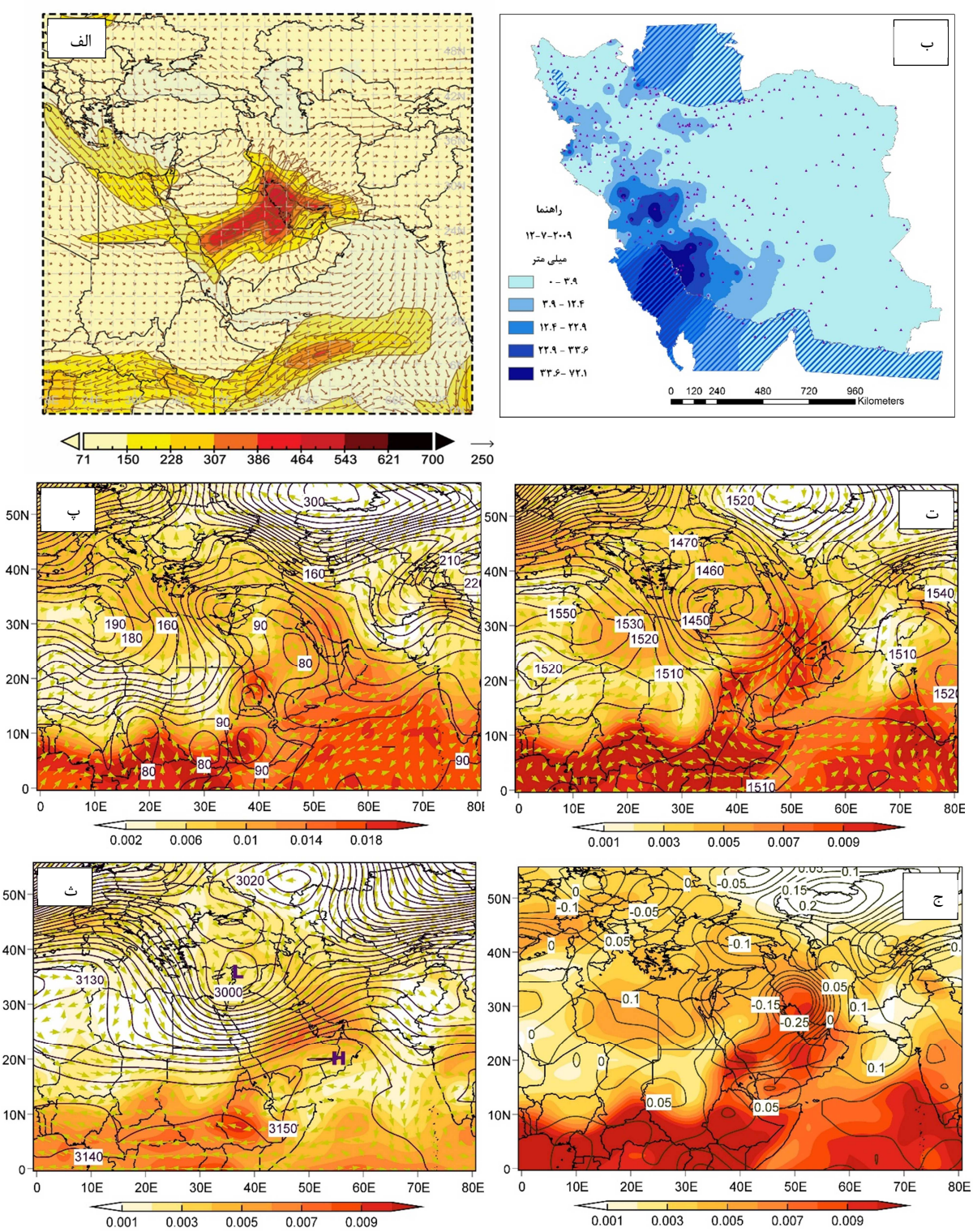
الگوی ترکیبی سودان-مدیترانه (نماینده الگو سامانه ۷ دسامبر ۲۰۰۹)

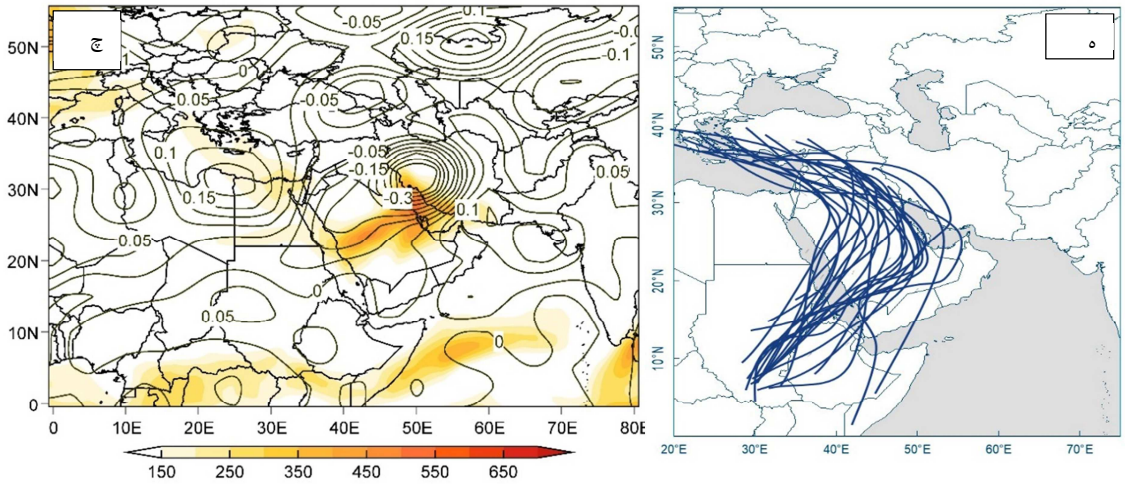
منشأ اولیه این رودخانه خلیج عدن - دریای سرخ هست و محور اصلی آن بر اساس ماکزیمم شار، از جنوب (استان بوشهر) وارد کشور می‌شود. شکل ۲ (الف، ب) رودخانه جوی در ساعت اوج (۰۶ جهانی) به همراه پهنه بارشی این روز را نشان می‌دهد. در این تاریخ ۲۰ ایستگاه همدید با بارش سنگین همراه بوده‌اند که تمام آن‌ها در محدوده گسترش رودخانه جوی بوده است و بالاترین بارش به میزان ۷۳ میلی‌متر در جزیره خارک (استان بوشهر) روی‌داده است.

شکل ۲ (پ) نماینده الگوی حاکم در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال هست. این نقشه ترکیبی از ارتفاع ژئوپتانسیل، نم ویژه و جریان هوا را در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال نشان می‌دهد. همان‌طورکه مشاهده می‌شود میدان چرخندی گسترده‌ای از سودان تا شرق دریای مدیترانه را در برگرفته است. نفوذ جنوب‌سوی زبانه واچرخندی سیبری بر روی دریای عمان و عرب با گردش واچرخندی سبب فرارفت رطوبتی دریاهای گرم جنوبی به درون کم‌فشار سودانی شده است. به‌این‌ترتیب دریاهای عرب و عمان منشأ اصلی تأمین رطوبت رودخانه جوی هست. این رطوبت فرارفت‌شده به‌تدریج بر روی دریای سرخ و خلیج عدن قوام پیداکرده و رودخانه جوی شکل می‌گیرد. در این الگو به‌دلیل عملکرد هم‌زمان دو سامانه سودانی و مدیترانه‌ای در لایه زیرین وردسپهر میدان چرخندی گسترده‌ای تمام محدوده سودان، غرب عربستان، غرب ایران تا مدیترانه شرقی را دربرمی گیرد. همان‌طورکه در شکل ۲ (ه) دیده می‌شود زبانه چرخندی در تمام نمونه‌های متأثر از این الگو ابتدا با محور جنوب غربی- شمال شرقی از روی سودان تا جنوب عراق و اردن امتدادیافته و سپس کاملاً با چرخش به سمت شمال غرب تا ساحل شرقی مدیترانه امتدادیافته است. حدود ۲۵ مورد از رودخانه‌های جوی منجر به بارش‌های سنگین از الگویی مشابه تبعیت کرده‌اند.

در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال به‌عنوان نماینده تراز لایه‌مرزی مرکز چرخندی با منحنی پربندی ۱۴۵۰ ژئوپتانسیل متر بر روی ساحل شرقی دریای مدیترانه استقرار دارد. ناوه حاصل از این مرکز چرخندی با گسترش جنوب‌سوی خود تا

جنوب عربستان گسترش دارد. همان‌طورکه دیده می‌شود. در این تراز نیز زبانه واچرخندی سیبری همچنان با گسترش جنوب سو تمام پهنه دریاهای گرم عمان و عرب را تا خلیج عدن فراگرفته است.


الف
71 150 228 307 386 464 543 621 700 250
ب
راهنما
۱۲-۷-۲۰۰۹
میلی متر
۰ - ۳.۹
۳.۹ - ۱۲.۴
۱۲.۴ - ۲۲.۹
۲۲.۹ - ۳۳.۶
۳۳.۶- ۷۲.۱
0 120 240 480 720 960
Kilometers
پ
0.002 0.006 0.01 0.014 0.018
ت
0.001 0.003 0.005 0.007 0.009
ث
0.001 0.003 0.005 0.007 0.009
ج
0.001 0.003 0.005 0.007 0.009



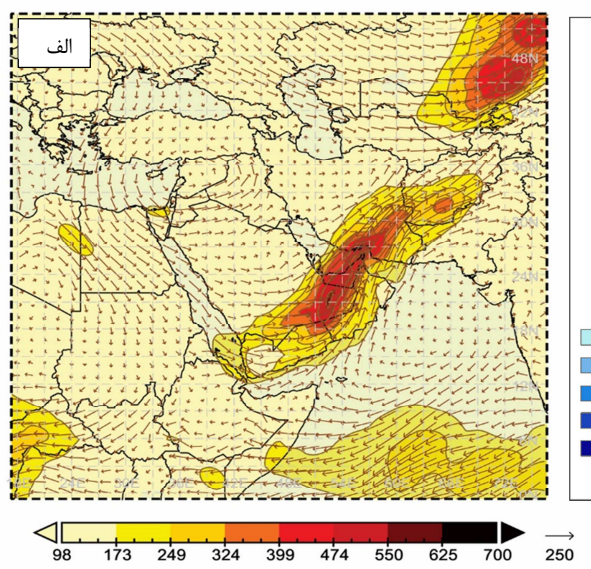
شکل ۲ الف) رودخانه جوی شکل‌گرفته بر فراز ایران در تاریخ ۷ دسامبر ۲۰۰۹ ساعت ۱۲ جهانی با واحد کیلوگرم متر بر ثانیه. ب) الگوی بارش روزانه. پ) نقشه ترکیبی نم ویژه (کیلوگرم بر کیلوگرم) جریان و ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۱۰۰۰ ت) ۸۵۰ ث) ۷۰۰ هکتوپاسکال. ج) نقشه ترکیبی امگای تراز ۷۰۰ و نم ویژه تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال. چ) نقشه ترکیبی امگای تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و رودخانه جوی. ه) موقعیت محورهای کم‌فشار سودان بر اساس الگوی دوم.

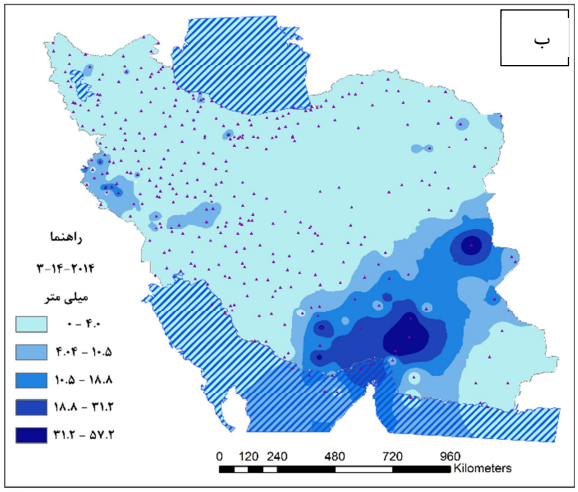
نقشه جریان به‌خوبی فرارفت گرم و مرطوب را به جلو ناوه نشان می‌دهد. با دور شدن از تأثیر عوارض توپوگرافی و انتقال راحت‌تر رطوبت فرارفتی از روی دریاهای گرم، زبانه رطوبتی به‌خوبی در جلو ناوه شکل‌گرفته است. همان‌طورکه دیده می‌شود دریاهای عرب و عمان نقش مهمی در تأمین رطوبت رودخانه‌های جوی تا تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال دارند (شکل ۲ ت).

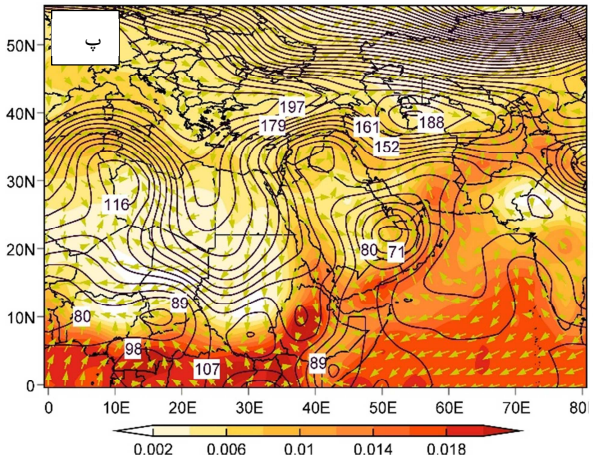
در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۲ ث) نیز مرکز چرخندی با جابه‌جایی جنوب‌سو تا جنوب سوریه گسترش داشته است. این مرکز سرد چال با گسترش جنوب‌سو و فرارفت توپوگرافی شیو دمایی شدیدی را بر روی غرب عربستان و جنوب غرب و غرب ایران ایجاد کرده است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود در این تراز باتوجه به ساختار دینامیکی حاکم به‌تدریج نقش رطوبتی دریاهای عرب و عمان کاهش‌یافته ولی رطوبت فرارفتی از منطقه همگرایی نقش مهم‌تری پیداکرده است.

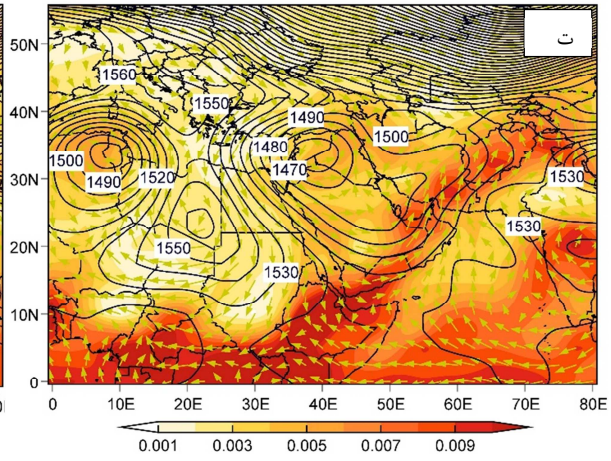
همان‌طورکه شکل ۲ (ج) نقشه ترکیبی امگا تراز ۷۰۰ و نم ویژه تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال دیده می‌شود، میدان گسترده‌ای از امگای منفی تمام پهنه شبه‌جزیره عربستان و جنوب غرب و غرب ایران را در برگرفته است. بالاترین مقدار امگای منفی به بزرگی ۰/۲۸- پاسکال بر ثانیه درست بر روی استان‌های خوزستان و بوشهر قرار دارد. انطباق بسیار خوب میدان امگای منفی یا جریان‌های بالاسوی با میدان رطوبتی بر روی جنوب غرب ایران به‌خوبی نقش جریان‌های بالاسوی قوی را در تشدید میعان در درون جریان‌ها و رشد قطره‌های درون سامانه نشان می‌دهد. درنتیجه بالاترین حجم بارشی منطبق با بزرگی امگای منفی هست. در نقشه تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۲ ج، چ) میدان

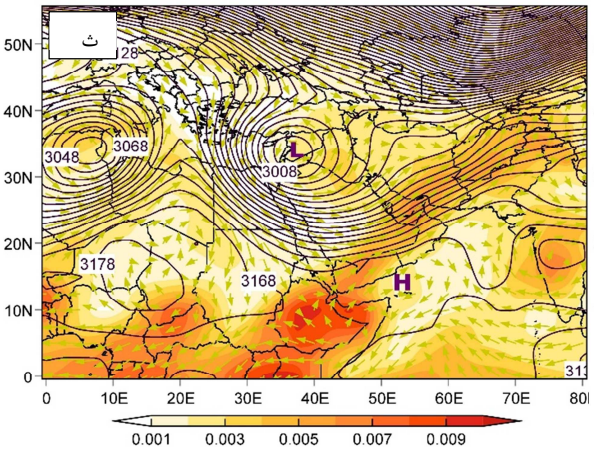
امگای منفی انطباق کاملی با میدان امگای تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال دارد. ولی بزرگی میدان امگا در هسته آن به بیش از ۰/۳۲- پاسکال بر ثانیه افزایش‌یافته است. این پدیده بیانگر تشدید جریان‌های بالاسو در لایه زیرین می‌باشد.

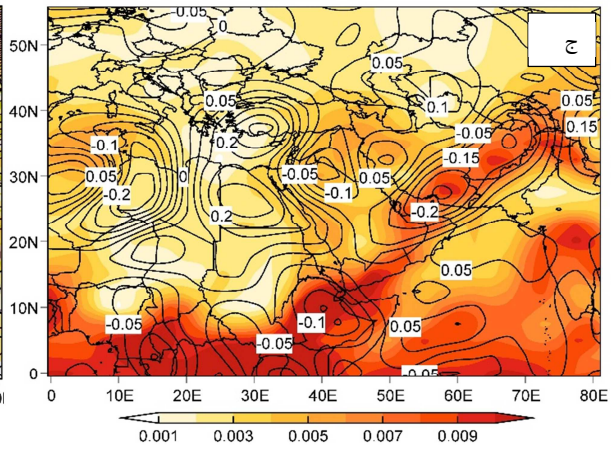

الف
48N
98 173 249 324 399 474 550 625 700 250

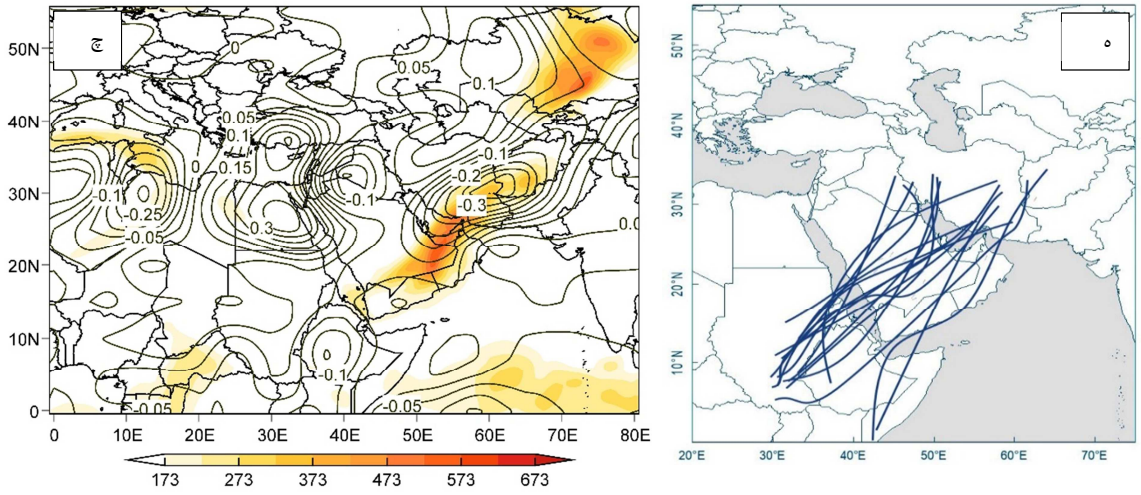

ب
راهنما
۳-۱۴-۲۰۱۴
میلی متر
۰ - ۴.۰
۴.۰۴ - ۱۰.۵
۱۰.۵ - ۱۸.۸
۱۸.۸ - ۳۱.۲
۳۱.۲ - ۵۷.۲
0 120 240 480 720 960
Kilometers


پ
50N
40N
30N
20N
10N
0
0 10E 20E 30E 40E 50E 60E 70E 80
197 179 161 188 152 116 80 71 89 80 98 107 89
0.002 0.006 0.01 0.014 0.018


ت
50N
40N
30N
20N
10N
0
0 10E 20E 30E 40E 50E 60E 70E 80E
1560 1550 1490 1500 1480 1470 1500 1490 1520 1530 1530 1550 1530
0.001 0.003 0.005 0.007 0.009


ث
50N
40N
30N
20N
10N
0
0 10E 20E 30E 40E 50E 60E 70E 80
3048 3068 3008 L 3178 3168 H
0.001 0.003 0.005 0.007 0.009


ج
50N
40N
30N
20N
10N
0
0 10E 20E 30E 40E 50E 60E 70E 80E
0.05 0 0.05 0.1 0.05 0.15 -0.1 0.2 -0.05 -0.15 0.05 -0.2 0 -0.05 -0.1 0.05 -0.2 0.2 0.05 -0.05 -0.1 -0.05 0.05
0.001 0.003 0.005 0.007 0.009



شکل ۳ الف) رودخانه جوی شکل‌گرفته بر فراز ایران در تاریخ ۱۴ مارس ۲۰۱۴ ساعت ۰۰ جهانی با واحد کیلوگرم متر بر ثانیه. ب) الگوی بارش روزانه. پ) نقشه ترکیبی نم ویژه (کیلوگرم بر کیلوگرم) جریان و ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۱۰۰۰ ت) ۸۵۰ ث) ۷۰۰ هکتوپاسکال. ج) نقشه ترکیبی امگای تراز ۷۰۰ و نم ویژه تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال. چ) نقشه ترکیبی امگای تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و رودخانه جوی. ه) موقعیت محورهای کم‌فشار سودان بر اساس الگوی سوم.

سودان- واچرخند مهاجر (الگوی نماینده ۱۴ مارس ۲۰۱۴)

در این الگوی نماینده، رودخانه جوی از روی جنوب دریای سرخ شکل‌گرفته است (شکل ۳ الف). محور اصلی آن از جنوب (تنگه هرمز) وارد ایران شده است و در امتداد جنوب غربی - شمال شرقی پس از متأثر ساختن نواحی جنوبی و جنوب شرقی و شرقی کشور تا کشور افغانستان ادامه یافته است.

الگوی بارشی این روز در شکل ۳ (ب) نشان‌داده شده است. در این رخداد مجموعاً ده ایستگاه همدید دارای بارش سنگین بوده‌اند که هر ده ایستگاه در محدوده گسترش رودخانه جوی بوده‌اند. بالاترین میزان بارش ۵۷/۳ میلی‌متر در کهنوج (کرمان) رخداده است.

الگوی ترکیبی نم ویژه و ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۳ پ) نشان می‌دهد که در این الگو نیز گسترش زبانه واچرخند سیبری بر روی آب‌های عمان و عرب و تزریق هوای گرم و مرطوب به درون سامانه سودانی در ضلع شرقی، موجب فعال شدن این سامانه ترمودینامیکی تا عرض‌های بالاتر شده است. مسیر این کم‌فشار کاملاً با مسیر شکل‌گیری رودخانه جوی منطبق است و زبانه آن تقریباً در جهت جنوب به شمال پس از عبور از روی شاخ آفریقا - یمن و شبه‌جزیره عربستان از روی تنگه هرمز وارد ایران شده است؛ اما مهم‌ترین تفاوت با الگوهای قبل حضور زبانه‌های واچرخند مهاجر است که نیمه شمالی کشور را تحت تأثیر قرار داده است. مکانیسم حاکم بر این واچرخند موجب شده تا زبانه‌ی کم‌فشار سودان نتواند تا بالاتر از عرض جغرافیایی ۳۲ درجه شمالی نفوذ کند؛ بنابراین گسترش شمال سوی رودخانه جوی نیز به‌همین عرض جغرافیایی محدود شده است. در این الگو دریای سرخ کاملاً در پشت سامانه کم‌فشار مورد فرارفت سرد قرارگرفته و منابع رطوبتی رودخانه جوی در این لایه از دریای عمان- عرب تأمین می‌شود که به‌وسیله جریان‌های جنوبی سامانه کم‌فشار به درون رودخانه جوی فرارفت شده است.

شکل ۳ (ه) محور کم‌فشار مؤثر در شکل‌گیری سایر رودخانه‌های جوی را که منطبق بر این الگو بودند نشان می‌دهد. همان‌طورکه مشاهده می‌شود نیمه‌ی شمالی کشور در این الگو تحت تأثیر زبانه چرخندی و رودخانه‌های جوی قرار نگرفته است.

در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال (شکل ۳ ت) مرکز چرخندی به‌سمت هوای سرد و شمال غرب متمایل شده است و زبانه‌های آن تا عرض جغرافیایی ۱۵ درجه شمالی نفوذ کرده و تمام گستره کشور را پوشش داده‌اند. واچرخند سیبری موقعیت خود را بر روی آب‌ها حفظ کرده است و فرارفت رطوبت به‌مانند لایه زیرین از طریق جریان‌های جنوبی زبانه چرخندی صورت می‌گیرد.

در تراز ۷۰۰ (شکل ۳ ث) ناوه حاصل از مرکز چرخندی تا عرض ۱۵ درجه شمالی گسترش‌یافته است. محور ناوه با جهت شمال غربی- جنوب شرقی از ساحل شرقی مدیترانه تا یمن امتدادیافته است؛ بنابراین دریای مدیترانه و سرخ در پشت ناوه و تحت تأثیر فرارفت سرد قرارگرفته‌اند و جریان اصلی رطوبت در این لایه از منطقه همگرایی حاره‌ای توسط جریان‌های جنوبی واچرخند عربستان و جلوی ناوه به دورن رودخانه جوی صورت گرفته است. شکل ۳ (ج) ترکیب نم ویژه تراز ۸۵۰ و امگای تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال را نشان می‌دهد. میدان بزرگی از امگای منفی منطبق با جریان رطوبت گسترش‌یافته در امتداد حرکت‌های چرخندی است و بزرگی آن به میزان ۰/۲۵- پاسکال متر بر ثانیه می‌رسد. جریان‌های بالاسو در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال به‌طورکامل با جریان رودخانه جوی منطبق بوده (شکل ۳ چ) و بزرگی این واگرایی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال به ۰/۳- پاسکال بر ثانیه در شمال تنگه هرمز تا شمال سیستان و بلوچستان نشان‌دهنده تشدید واگرایی در لایه زیرین و افزایش انرژی سیستم هست. مرکز واگرایی در دو تراز ۷۰۰ و ۵۰۰ با بالاترین بارش‌های رخ‌داده در این روز مطابقت داشته است.

نتیجه‌گیری

کشور ایران همواره از منابع محدود آبی رنج می‌برد و درعین‌حال به‌شدت تحت تأثیر نوسان‌های اقلیمی قرار دارد. بارش‌های سنگین اگرچه می‌تواند فرصتی برای تأمین بخشی از منابع آبی کشور باشد، به‌دلیل عدم مدیریت صحیح، نبود زیرساخت‌های مناسب، تخریب سالانه پوشش گیاهی و تغییرهای کاربری نامناسب در اغلب موارد منجر ایجاد سیلاب و خسارت‌های بسیار زیاد در ابعاد گسترده می‌شود؛ بنابراین شناسایی علل وقوع این رخدادها و مکانیسم گردشی آن‌ها گامی در جهت پیش‌آگاهی و کنترل این‌گونه حوادث خواهد بود. این مطالعه شرایط همدیدی و ترمودینامیکی پدیده رودخانه جوی منجر به بارش‌های سنگین در دوره سرد و بارشی کشور را بررسی کرد. به این منظور از داده‌های یکپارچه‌شده شار قائم بخارآب استفاده شد. برای هرماه به‌طور مشخص آستانه‌ای تعیین شد تا این پدیده را از شارش‌هایی که به‌طورمعمول در جو رخ می‌دهد تفکیک کند. سپس مسیرهایی متمرکز از بخارآب که طولی بیش از ۲۰۰۰ هزار کیلومتر داشتند و نسبت طول به عرض آن‌ها بیشتر از ۲ بود، درصورتی‌که از مرزهای ایران عبور کرده بودند به‌عنوان رودخانه جوی شناخته شدند.

برای ۳۴۰ ایستگاه همدید گسترده در سراسر کشور با محاسبه صدک ۹۰ ام هر ایستگاه معیاری برای بارش سنگین به‌دست آمد و تمام رودخانه‌های جوی شناسایی‌شده با بارش روزانه ایستگاهی موردمقایسه قرار گرفت. رودخانه‌هایی

که منجر به بارش سنگین شده بودند تفکیک شدند و درنهایت مشخص شد ۱۰۷ روز رخداد بارش سنگین در حضور رودخانه‌های جوی و زیر چتر گسترش آن‌ها به وقوع پیوسته است. در مرحله بعد به‌منظور تعیین تیپ الگوی گردشی این روزها، حجم داده‌ها از طریق تحلیل عامل‌ها کاهش یافت. نتایج نشان داد ۳ عامل اول نزدیک به ۷۰ درصد پراش کل داده‌ها را تبیین می‌کند. ازمیان هر عامل تاریخ‌هایی به‌عنوان نماینده هر الگو که ضریب تبیین بالاتر از ۰/۸۵ داشتند، انتخاب شدند.

به‌طورمشترک در لایه‌های زیرین برای هر سه الگو برهمکنش سامانه واچرخندی سیبری و چرخندی سودان مشخص بود. به‌گونه‌ای که بانفوذ واچرخند سیبری تا عرض‌های پایین‌تر بر روی دریای عمان و عرب و گردش واچرخندی سبب فرارفت رطوبتی دریاهای گرم جنوبی به درون کم‌فشار سودانی شده است. تفاوت الگوها متأثر از نحوه گسترش سامانه چرخندی بر روی کشور بوده است. در الگوی اول که حدود ۳۳ درصد رودخانه‌ها نزدیک به این شرایط شکل گرفتند سامانه چرخندی سودان با زبانه‌ای انتقالی از شرق اروپا ادغام شدند که در این صورت نواحی گسترده‌ای از کشور از جنوب تا شمال و شمال شرق تحت تأثیر گسترش رودخانه جوی قرار گرفتند و محور کم‌فشار اغلب تا آسیای میانه گسترش‌یافته است. این الگو فراوان‌ترین تیپ گردشی به‌هنگام حضور رودخانه‌های منجر به بارش سنگین در کشور بوده است. در الگوی دوم سامانه چرخندی سودان و مدیترانه ادغام شده‌اند که بیش از ۲۳ درصد رودخانه‌های جوی را شامل می‌شود. در این الگو بیشتر نواحی جنوبی جنوب غربی و غربی کشور تحت تأثیر رودخانه جوی قرار گرفتند. در الگوی سوم به‌دلیل نفوذ زبانه‌ی واچرخند مهاجر بر روی کشور به‌صورت مداری، سامانه چرخندی نتوانسته به بالاتر از عرض جغرافیایی ۳۲ درجه جغرافیایی در داخل کشور برسد؛ بنابراین نواحی شمالی از بارش‌های سنگین تحت شرایط این الگو کمتر متأثر شدند. ۱۳ درصد رودخانه‌های جوی الگویی تقریباً مشابه داشتند. سایر الگوها بین ۲ تا ۵ درصد پراش مجموع را تبیین کردند که به‌دلیل محدودیت در پرداختن به هریک از این عوامل از ارائه آن‌ها صرف‌نظر شد.

درمجموع برای تمام الگوها در لایه‌های زیرین چرخند سودانی به‌عنوان یک سامانه ترمودینامیکی مؤثرترین سامانه در جذب و حمل رطوبت به درون رودخانه جوی بوده است. واچرخند سیبری تا عرض‌های جغرافیایی پایین بر روی آب‌های گرم جنوبی گسترش داشته است و مهم‌ترین منابع رطوبتی در ترازهای پایینی (تا ۸۵۰ هکتوپاسکال) دریای عمان- عرب بوده است. رطوبت پس از فرارفت‌شدن به‌تدریج بر روی خلیج عدن و نیمه جنوبی دریای سرخ متمرکز می‌شود و میزان نم ویژه در این لایه‌ها به‌اندازه ۱۸ تا ۲۰ گرم در کیلوگرم نیز رسیده است. منشأ رطوبت به رودخانه‌های جوی در لایه‌های بالاتر تغییر می‌کند و به‌تدریج نقش رطوبتی دریاهای عرب و عمان کاهش‌یافته ولی رطوبت فرارفتی از منطقه همگرایی اهمیت می‌یابد. باتوجه به ساختار دینامیکی در این ترازها رطوبت از طریق گردش جلوی ناوه به درون رودخانه جوی انتقال‌یافته است.

ازنظر حرکت‌های قائم، نتایج این تحقیق نشان داد میدان واگرایی یا امگای منفی در تمام الگوها به‌طورکامل بر شکل رودخانه جوی منطبق بوده و با نزدیک شدن به هسته شار شدت واگرایی‌ها نیز افزایش‌یافته است. علاوه بر آن بیشترین حجم بارشی نیز منطبق با بالاترین میدان واگرایی بود. میزان امگای منفی به‌ترتیب از ترازهای ۷۰۰ به ۵۰۰ هکتوپاسکال افزایش‌یافته که نشان‌دهنده قدرت سامانه در تشدید جریان‌های بالاسو و افزایش قطره‌های رطوبتی

است. به‌این‌ترتیب علاوه بر فرارفت رطوبتی مناسب انطباق بسیار مناسب جریان‌های افقی و بالاسوی (شار افقی و قائم) مهم‌ترین نقش را در ایجاد بارش‌های سنگین ایفا می‌کنند.

این مطالعه برای اولین بار مشخص کرد بارش‌های سنگینی که توسط رودخانه‌های جوی در ایران به وقوع پیوسته‌اند توسط چه الگوهایی فراهم‌شده‌اند و سهم رخداد هریک از این الگوها چه اندازه است. منابع رطوبتی مهم و سامانه‌های تأثیرگذار در شکل‌گیری رودخانه‌های جوی نیز در این مطالعه آشکار شدند. نتایج این مطالعه در تایید با مطالعات لشکری و همکاران ۱۳۹۱، مزیدی و همکاران ۱۳۹۱، امیدوار و ترکی ۱۳۹۱، اکبری و سیاه منصور ۱۳۹۳، مصطفایی و همکاران ۱۳۹۴، لشکری و همکاران ۱۳۹۵، راستگو و سعادت آبادی ۱۳۹۷، احمدی و جعفری ۱۳۹۷ در خصوص نقش سامانه سودان و ادغامی سودان- مدیترانه در شکل‌گیری بارش‌های سنگین و فراگیر، همین‌طور مطالعات امیدوار و همکاران ۱۳۹۶ در ارتباط با الگوی کم‌فشار سودان- واچرخند مهاجر در رخداد بارش‌های سنگین و سیلابی و مطالعات کریمی و فرج زاده ۱۳۹۰، دارند ۱۳۹۴، روشنی و پرک ۱۳۹۷، محمدی و لشکری ۱۳۹۷ در ارتباط با اهمیت منابع رطوبتی دریای عرب و عمان بر بارش‌های ایران بود.

در انتها شناسایی و تفکیک الگوهای همدیدی با توجه به منشأ شکل‌گیری رودخانه‌های جوی و یا مناطق بارشی متأثر از آن‌ها برای مطالعات آینده به محققان پیشنهاد می‌شود.

منابع

احمدی محمود؛ جعفری فرزانه (۱۳۹۷). مسیریابی کامل و تحلیل سینوپتیک یک نمونه مطالعاتی از سامانه‌های منجر به بارش‌های سنگین بیش از ۵۰ میلی‌متر در جنوب ایران، نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال پنجم. شماره ۳. صص ۱۰۲-۸۳.

اکبری زینب؛ نصیری فرناز؛ سیاه منصور مجتبی (۱۳۹۳). تحلیل الگوهای سینوپتیکی و شاخص‌های ناپایداری منجر به وقوع بارش‌های نیمه‌سنگین و سنگین استان لرستان، اولین همایش علوم جغرافیایی ایران (۳۰ اردیبهشت)، تهران، موسسه جغرافیا.

امیدوار کمال؛ ترکی مسلم (۱۳۹۱). شناسایی الگوهای ریزش بارش‌های سنگین در استان چهارمحال و بختیاری. برنامه‌ریزی آمایش و فضا، شماره ۴. صص ۱۶۹-۱۳۵.

امیدوار کمال؛ شفیعی شهاب؛ سپندار نساء (۱۳۹۶). تحلیل سینوپتیک و ترمودینامیک بارش سنگین و سیلابی روزهای ۵ تا ۸ آبان ۱۳۹۴ در استان کرمانشاه، فصلنامه علمی پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، شماره ۱۰۷. صص ۲۵۲- ۲۳۷.

دارند محمد (۱۳۹۴). تحلیل همدیدی بارش‌های سیل‌آسای کردستان. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، شماره ۳۷. صص ۷۰-۴۷.

راستگو زهرا؛ رنجبر سعادت آبادی عباس (۱۳۹۷). مطالعه بارش‌های شدید و حدی استان بوشهر ازدیدگاه همدیدی- دینامیکی، نشریه هواشناسی و علوم جو، شماره ۱. ۹۶-۷۷.

روشنی احمد؛ پرک فاطمه (۱۳۹۷). تحلیل واگرایی شار رطوبت از منابع رطوبتی اطراف ایران و اثرات آن بر توزیع فضایی نابرابر بارش در نیمه جنوبی کشور، نشریه هواشناسی و علوم جو، شماره ۱. صص ۳۸-۲۵.

علیجانی بهلول (۱۳۹۰). تحلیل فضایی دماها و بارش‌های بحرانی روزانه در ایران. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، شماره ۲۰. صص ۳۰-۹.

سلیمی سعدون؛ سلیقه محمد (۱۳۹۵). تأثیر رودخانه‌های اتمسفری (ARS) بر آب‌وهوای ایران. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره ۴۸. صص ۲۶۴-۲۴۷.

شادمانی ناهید (۱۳۹۵). بررسی وجود و نقش رودخانه‌های جوی در ایجاد بارش‌های سیل‌آسا در غرب و جنوب کشور (مطالعه موردی: سیل‌های ۹ و ۲۱ آبان ۱۳۹۴). پایان‌نامه کارشناسی ارشد وزارت علوم تحقیقات و فناوری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه شهرکرد.

کریمی مصطفی؛ فرج زاده منوچهر (۱۳۹۰). شار رطوبت و الگوهای فضایی- زمانی منابع تأمین رطوبت بارش‌های ایران، تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، شماره ۲۲. صص ۱۲۸-۱۰۹.

لشکری حسن؛ قائمی هوشنگ؛ حجتی زهرا؛ امینی میترا (۱۳۹۱). تحلیل سینوپتیکی بارش‌های شدید در استان اصفهان، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره ۴. صص ۱۱۶-۹۹.

لشکری حسن؛ متکان علی‌اکبر؛ آزادی مجید؛ محمدی زینب (۱۳۹۵). تحلیل همدیدی نقش پرفشار عربستان و رودباد جنب‌حاره‌ای در کوتاه‌ترین طول دوره بارشی جنوب و جنوب غرب ایران، فصلنامه علوم محیطی، شماره ۴. صص ۷۴-۵۹.

محمدی زینب؛ لشکری حسن (۱۳۹۷). نقش جابجایی مکانی پرفشار عربستان و رودباد جنب‌حاره‌ای در الگوهای همدیدی و ترمودینامیکی ترسالی‌های شدید جنوب و جنوب غرب ایران، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره ۳. صص ۵۰۹- ۴۹۱.

مزیدی احمد؛ کوشکی حسین؛ نصر آزادانی مهناز (۱۳۹۱). تحلیل سینوپتیکی بارش‌های بیش از ۳۰ میلی‌متر شهر خرم‌آباد از ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۵، اندیشه جغرافیایی، شماره ۱۱. صص ۱۲۰-۱۰۷.

مصطفایی حسن؛ علیجانی بهلول؛ سلیقه محمد (۱۳۹۴). تحلیل سینوپتیکی بارش‌های شدید و فراگیر در ایران، نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، شماره ۴. صص ۷۶-۶۵.

Akbary, M., Salimi, S., Hosseini, SA., & Hosseini, M., (2019), Spatio-temporal changes of atmospheric rivers in the Middle East and North Africa region, Int J Climatol, Vol. 39, pp. 3976–3986.

Bao, J. S., Michelson, A., Neiman, P., Ralph, F., & Wilczak, J., (2006), Interpretation of Enhanced Integrated Water Vapor Bands Associated with Extratropical Cyclones: Their Formation and Connection to Tropical Moisture, Monthly Weather Review, Vol. 134, pp. 1063–1080.

Blamey, RC., Ramos, AM, Trigo, RM., Tomé, R., Reason, CJC., (2018) The influence of atmospheric rivers over the South Atlantic on winter rainfall in South Africa, Journal of Hydrometeorology, Vol. 19. No. 1, pp. 127–142. Dettinger, MD., Ralph, FM., Das, T., Neiman, PJ., Cayan, DR., (2011), Atmospheric Rivers, Floods and the Water Resources of California, Water, Vol. 3, No. 2, pp. 445–478.

Dettinger, M., (2011), Climate change, atmospheric rivers, and floods in California - a multimodel analysis of storm frequency and magnitude changes, Journal of the American Water Resources Association, Vol. 47, No. 3, pp. 514–523. Dettinger, MD., (2013), Atmospheric Rivers as Drought Busters on the U.S. West Coast, Journal of Hydrometeorology, Vol. 14, No. 6, pp. 1721–1732.

Esfandiari, N., Lashkari, H., (2020), Identifying atmospheric river events and their paths into Iran, Theor Appl Climatol, [Online].

Espinoza, V., Waliser, DE., Guan, B., Lavers, DA., Ralph, FM., (2018), Global Analysis of Climate Change Projection Effects on Atmospheric Rivers, Geophysical Research Letters, Vol. 45, No. 9, pp. 4299–4308.

Eiras-Barca, J., Lorenzo, N., Taboada, J., (2018), On the relationship between atmospheric rivers, weather types and floods in Galicia (NW Spain), Nat Hazards Earth Syst Sci,Vol. 18, pp. 1633–1645.

Gimeno, L., Nieto, R., Vázquez, M., Lavers, DA., (2014) Atmospheric rivers: a mini-review, Frontiers in Earth Science, Vol. 2, (March), pp. 1–6.

Guan, B., Molotch, NP., Waliser, DE., Fetzer, EJ., Neiman, PJ., (2010), Extreme snowfall events linked to atmospheric rivers and surface air temperature via satellite measurements, Geophysical Research Letters, Vol. 37, No. 20, pp. 2–7.

Guan, B., Waliser, DE., (2015), Detection of atmospheric rivers: Evaluation and application of an algorithm for global studies, Journal of Geophysical Research, Vol.120, No. 24, pp. 12,514-12,535.

Groisman, PY., Knight, RW., Karl, TR., (2001) Heavy Precipitation and High Streamflow in the Contiguous United States: Trends in the Twentieth Century, Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. 82, No. 2, pp. 219–246.

Haylock, MR., Cawley, GC., Harpham, C., Wilby, RL., Goodess, CM., (2006) Downscaling heavy precipitation over the United Kingdom: a comparison of dynamical and statistical methods and their future scenarios, International Journal of Climatology, Vol. 26, No. 10, pp. 1397–1415.

Junker, NW., Grumm, RH., Hart, R., Bosart, LF., Bell, KM., Pereira, FJ., (2008) Use of normalized anomaly fields to anticipate extreme rainfall in the mountains of northern California, Weather and Forecasting, Vol. 23, No. 3, pp. 336–356.

Knippertz, P., Wernli, H., Gläser, G., (2013) A global climatology of tropical moisture exports, Journal of Climate, Vol. 26, No. 10, pp. 3031–3045.

Lavers, DA., Villarini, G., Allan, RP., Wood, EF., Wade, AJ., (2012) The detection of atmospheric rivers in atmospheric reanalyses and their links to British winter floods and the large-scale climatic circulation. Journal of Geophysical Research Atmospheres, Vol. 117, No. 20, pp. 1–13.
Lavers, DA., Villarini, G., (2013), The nexus between atmospheric rivers and extreme precipitation across Europe, Geophysical Research Letters, Vol. 40. No. 12, pp. 3259–3264.
Lavers, DA., Villarini, G., (2015), The contribution of atmospheric rivers to precipitation in Europe and the United States, Journal of Hydrology, Vol. 522, No. 1, pp. 382–390.
Nayak, MA., Villarini, G., Lavers, DA., (2014) On the skill of numerical weather prediction models to forecast atmospheric rivers over the central United States, Geophysical Research Letters, Vol. 41, No. 12, pp. 4354–4362.
Neiman, PJ., Ralph, FM., Wick, GA., Lundquist, JD., Dettinger, MD., (2008) Meteorological Characteristics and Overland Precipitation Impacts of Atmospheric Rivers Affecting the West Coast of North America Based on Eight Years of SSM/I Satellite Observations, Journal of Hydrometeorology, Vol. , No. 1, pp. 22–47.
Paltan, H., Waliser, D., Lim, WH., Guan, B., Yamazaki, D., Pant, R., Dadson, S., (2017), Global Floods and Water Availability Driven by Atmospheric Rivers, Geophysical Research Letters, Vol. 44, No. 20, pp. 10,387-10,395.
Ralph, FM., Neiman, PJ., Wick, GA., (2004), Satellite and CALJET Aircraft Observations of Atmospheric Rivers over the Eastern North Pacific Ocean during the Winter of 1997/98, Monthly Weather Review, Vol. 132, No. 7, pp. 1721–1745.
Ralph, FM., Dettinger, MD., Cairns, MM., (2018), Defining “atmospheric river”: How the Glossary of Meteorology helped resolve a debate, Bull Am Meteorol Soc, Vol. 99, pp. 837–839.
Ramos, AM., Trigo, RM., Liberato, MLR., Tomé, R., (2015), Daily Precipitation Extreme Events in the Iberian Peninsula and Its Association with Atmospheric Rivers, Journal of Hydrometeorology, Vol. 16, No. 2, pp. 579–597.
Ryoo, J.M., Waliser, DE., Fetzer, EJ., (2011), Trajectory analysis on the origin of air mass and moisture associated with Atmospheric Rivers over the west coast of the United States, Atmos Chem Phys Discuss, Vol. 11, pp.11109–11142.
Vitart, F., Waliser, DE., DeFlorio, MJ., Ralph, FM., Guan, B., Lavers, DA., (2018), Global Assessment of Atmospheric River Prediction Skill, Journal of Hydrometeorology, Vol. 19, No. 2, pp. 409–426.
Waliser, D., Guan, B., (2017), Extreme winds and precipitation during landfall of atmospheric rivers, Nature Geoscience, Vol. 10, No. 3, pp. 179–183.
Zhu, Y., Newell RE., (1998), A Proposed Algorithm for Moisture Fluxes from Atmospheric Rivers, Monthly Weather Review, Vol. 126, No. 3, pp. 725–735.

Research Article

Synoptic and thermodynamic patterns of atmospheric rivers associated to heavy precipitation in the cold period of Iran

Hassan Lashkari[1*], Neda Esfandiari[2]

1*. Associate Prof., Department of Physical Geography, School of Earth Science, Shahid Beheshti University (SBU), Tehran, Iran

2. PhD Student of Synoptic Climatology, Department of Physical Geography, School of Earth Science, Shahid Beheshti University (SBU), Tehran, Iran

Received: 02-04-2020 Final Revised: 05-05-2020 Accepted: 01-06-2020

Abstract

The atmospheric river is an almost emerging phenomenon in the modern scientific literature of the world that has been studied due to its association with weather extreme events, especially heavy rainfall and floods.In this study, the integrated vertical vapour transport data were used to identify atmospheric rivers and the criteria were determined for its separation from daily fluxes. The 90th percentile of daily precipitation was then considered as the criterion for heavy precipitation across the country. Dates associated with heavy precipitation in the presence of atmospheric rivers were obtained, and its patterns were extracted by factor analysis after preparation of a 107×1190 matrix from 1000 level Geopotential height. The results showed that the first three factors account nearly about 70% of the total variance. Overall, Sudan's low-pressure system have an undeniable role in the formation of atmospheric rivers and heavy precipitation. In Sudan's low-pressure and the Mediterranean combination pattern, the most effect was on south-west and west of the country. Sudan's low-pressure and Eastern Europe cyclone combination pattern encompass the wider parts of the country. The influence of such systems on the country was more than other patterns. In the low-pressure combination pattern of Sudan and the migratory cyclone, the rivers and heavy precipitation zones did not much extend to the northern latitudes. In terms of formation, in all patterns, the Sudan low-pressure and the Siberian High Pressure were played a major role in the gradient generation and moisture transfer to the atmospheric rivers, in the low levels of the troposphere. The sources of moisture in these layers were the Oman-Arabian Sea.

Keywords: Synoptic pattern, Atmospheric rivers, Heavy precipitation, Iran.

[*] Corresponding Author Email: h- lashkari@sbu.ac.ir

References

References (in Persian)

Ahmadi, M., Jafari, F., (2018), Full routing and synoptic analysis A sample of studies of heavy rainfall systems in excess of 50 mm in southern Iran, Jsaeh, Vol. 5, No. 3, pp. 83-102. [In Persian]

Akbary, z., Nasiri, F., Siahmansur, M., (2014), Analysis of synoptic patterns and instability indices caused heavy heavy rainfall in Lorestan province, First Iranian Geographical Sciences Conference (20 May), Tehran, Institute of Geography. [In Persian]

Omidvar, K., Torki, M., (2012), Identification of heavy rainfall patterns in Chaharmahal va Bakhtiari province, Journal of Spatial Planning, No. 1, pp. 1-8. [In Persian]

Omidvar, K., Sepandar, N., Shafiee, S., (2018), Synoptic and thermodynamic analysis of heavy precipitation in the Province of Kermanshah from October27 to 30, 2015, Vol. 27, No. 107, pp. 237-252. [In Persian]

Darand, M., (2015), Synoptic analysis of heavy precipitations of Kurdistan province. researches in Geographical Sciences, Vol. 15, No. 37, pp. 47-70. [In Persian]

Rastgoo, Z., Ranjbar Saadatabadi, A., (2018), Study of heavy and extreme rain in Bushehr province in term of synoptic-dynamic, Journal of Meteorology and Atmospheric Science, Vol. 1, No.1, pp. 77-96. [In Persian]

Roshani, A., Parak, F., (2018), Divergence analysis of moisture flux originating from moisture sources around Iran and its effects on the unequal spatial distribution of precipitation in the southern part of Iran, Journal of Meteorology and Atmospheric Science, Vol. 1, No.1, pp. 25-38. [In Persian]

Alijani, B., (2011), Spatial analysis of daily extreme temperatures and rains in Iran, Journal of Applied Researches in Geographical Sciences, No. 20, pp. 9-30. [In Persian]

Salimi, S., Saligheh, M., (2016), The effect of Atmospheric Rivers on Iran climate, Physical Geography Research Quarterly, Vol. 48, No.96, pp. 247-264. [In Persian]

Shademani, N., (2016), Investigating the Existence and Role of Atmospheric Rivers in Generating Flooding Rainfalls in the West and South of the Country Case Study: The Floods of October 31and November 12 in 2015, Master of Science Thesis, Ministry of Science and Technology, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Shahrekord University. [In Persian]

Karimi, M., Farajzadeh, M., (2012), Moisture Flux and Spatial -Temporal Patterns of Moisture Supply Resources in Precipitation of Iran, Journal of Applied Researches in Geographical Sciences, No. 22, pp. 109-128. [In Persian]

Lashkari, H., Ghaemi, H., Hojati, Z., Amini, M., (2012), Synoptic Analysis of Heavy Precipitation in the Isfahan Province, Physical Geography Research, Vol. 44, No. 4, pp. 99-116. [In Persian]

Lashkari, H., Matkan, A., Azadi, M., mohammadi, Z., (2017), Synoptic analysis of Arabian subtropical high pressure and subtropical jet Stream in shortest period of precipitation in South and South West of Iran, Environmental Sciences, Vol. 14, No. 4, pp. 59-74. [In Persian]

Mohammadi, Z., Lashkari, H., (2018), Effects of Spatial Movement of Arabia Subtropical High Pressure and Subtropical Jet on Synoptic and Thermodynamic Patterns of Intense Wet Years in the South and South West Iran, Physical Geography Research Quarterly, Vol. 50, No. 105, pp. 491-509. [In Persian]

Mazidi, A., Koushki, H., Naseazadani, M., (2012), A Synoptic Analysis of Higher-than 30 mm Rains from 2000 to 2005: The Case of Khoram Abad, Journal of Geographical Notion, Vol. 6, No. 11, pp. 1-33. [In Persian]

Mostafaii, H., Alijani, B., Saligheh, M., (2016), Synoptic Analysis of Widespread Heavy Rains in Iran, Journal of Spatial Analysis Environmental Hazarts, Vol. 2, No. 4, pp. 65-76. [In Persian]

References (in English)

Akbary, M., Salimi, S., Hosseini, SA., & Hosseini, M., (2019), Spatio-temporal changes of atmospheric rivers in the Middle East and North Africa region, Int J Climatol, Vol. 39, pp. 3976–3986.

Bao, J. S., Michelson, A., Neiman, P., Ralph, F., & Wilczak, J., (2006), Interpretation of Enhanced Integrated Water Vapor Bands Associated with Extratropical Cyclones: Their Formation and Connection to Tropical Moisture, Monthly Weather Review, Vol. 134, pp. 1063–1080.

Blamey, RC., Ramos, AM, Trigo, RM., Tomé, R., Reason, CJC., (2018) The influence of atmospheric rivers over the South Atlantic on winter rainfall in South Africa, Journal of Hydrometeorology, Vol. 19. No. 1, pp. 127–142. Dettinger, MD., Ralph, FM., Das, T., Neiman, PJ., Cayan, DR., (2011), Atmospheric Rivers, Floods and the Water Resources of California, Water, Vol. 3, No. 2, pp. 445–478.

Dettinger, M., (2011), Climate change, atmospheric rivers, and floods in California - a multimodel analysis of storm frequency and magnitude changes, Journal of the American Water Resources Association, Vol. 47, No. 3, pp. 514–523. Dettinger, MD., (2013), Atmospheric Rivers as Drought Busters on the U.S. West Coast, Journal of Hydrometeorology, Vol. 14, No. 6, pp. 1721–1732.

Esfandiari, N., Lashkari, H., (2020), Identifying atmospheric river events and their paths into Iran, Theor Appl Climatol, [Online].

Espinoza, V., Waliser, DE., Guan, B., Lavers, DA., Ralph, FM., (2018), Global Analysis of Climate Change Projection Effects on Atmospheric Rivers, Geophysical Research Letters, Vol. 45, No. 9, pp. 4299–4308.

Eiras-Barca, J., Lorenzo, N., Taboada, J., (2018), On the relationship between atmospheric rivers, weather types and floods in Galicia (NW Spain), Nat Hazards Earth Syst Sci,Vol. 18, pp. 1633–1645.

Gimeno, L., Nieto, R., Vázquez, M., Lavers, DA., (2014) Atmospheric rivers: a mini-review, Frontiers in Earth Science, Vol. 2, (March), pp. 1–6.

Guan, B., Molotch, NP., Waliser, DE., Fetzer, EJ., Neiman, PJ., (2010), Extreme snowfall events linked to atmospheric rivers and surface air temperature via satellite measurements, Geophysical Research Letters, Vol. 37, No. 20, pp. 2–7.

Guan, B., Waliser, DE., (2015), Detection of atmospheric rivers: Evaluation and application of an algorithm for global studies, Journal of Geophysical Research, Vol.120, No. 24, pp. 12,514-12,535.

Groisman, PY., Knight, RW., Karl, TR., (2001) Heavy Precipitation and High Streamflow in the Contiguous United States: Trends in the Twentieth Century, Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. 82, No. 2, pp. 219–246.

Haylock, MR., Cawley, GC., Harpham, C., Wilby, RL., Goodess, CM., (2006) Downscaling heavy precipitation over the United Kingdom: a comparison of dynamical and statistical methods and their future scenarios, International Journal of Climatology, Vol. 26, No. 10, pp. 1397–1415.

Junker, NW., Grumm, RH., Hart, R., Bosart, LF., Bell, KM., Pereira, FJ., (2008) Use of normalized anomaly fields to anticipate extreme rainfall in the mountains of northern California, Weather and Forecasting, Vol. 23, No. 3, pp. 336–356.

Knippertz, P., Wernli, H., Gläser, G., (2013) A global climatology of tropical moisture exports, Journal of Climate, Vol. 26, No. 10, pp. 3031–3045.

Lavers, DA., Villarini, G., Allan, RP., Wood, EF., Wade, AJ., (2012) The detection of atmospheric rivers in atmospheric reanalyses and their links to British winter floods and the large-scale climatic circulation. Journal of Geophysical Research Atmospheres, Vol. 117, No. 20, pp. 1–13.

Lavers, DA., Villarini, G., (2013), The nexus between atmospheric rivers and extreme precipitation across Europe, Geophysical Research Letters, Vol. 40. No. 12, pp. 3259–3264.

Lavers, DA., Villarini, G., (2015), The contribution of atmospheric rivers to precipitation in Europe and the United States, Journal of Hydrology, Vol. 522, No. 1, pp. 382–390.

Nayak, MA., Villarini, G., Lavers, DA., (2014) On the skill of numerical weather prediction models to forecast atmospheric rivers over the central United States, Geophysical Research Letters, Vol. 41, No. 12, pp. 4354–4362.

Neiman, PJ., Ralph, FM., Wick, GA., Lundquist, JD., Dettinger, MD., (2008) Meteorological Characteristics and Overland Precipitation Impacts of Atmospheric Rivers Affecting the West Coast of North America Based on Eight Years of SSM/I Satellite Observations, Journal of Hydrometeorology, Vol. , No. 1, pp. 22–47.

Paltan, H., Waliser, D., Lim, WH., Guan, B., Yamazaki, D., Pant, R., Dadson, S., (2017), Global Floods and Water Availability Driven by Atmospheric Rivers, Geophysical Research Letters, Vol. 44, No. 20, pp. 10,387-10,395.

Ralph, FM., Neiman, PJ., Wick, GA., (2004), Satellite and CALJET Aircraft Observations of Atmospheric Rivers over the Eastern North Pacific Ocean during the Winter of 1997/98, Monthly Weather Review, Vol. 132, No. 7, pp. 1721–1745.

Ralph, FM., Dettinger, MD., Cairns, MM., (2018), Defining “atmospheric river”: How the Glossary of Meteorology helped resolve a debate, Bull Am Meteorol Soc, Vol. 99, pp. 837–839.

Ramos, AM., Trigo, RM., Liberato, MLR., Tomé, R., (2015), Daily Precipitation Extreme Events in the Iberian Peninsula and Its Association with Atmospheric Rivers, Journal of Hydrometeorology, Vol. 16, No. 2, pp. 579–597.

Ryoo, J.M., Waliser, DE., Fetzer, EJ., (2011), Trajectory analysis on the origin of air mass and moisture associated with Atmospheric Rivers over the west coast of the United States, Atmos Chem Phys Discuss, Vol. 11, pp.11109–11142.

Vitart, F., Waliser, DE., DeFlorio, MJ., Ralph, FM., Guan, B., Lavers, DA., (2018), Global Assessment of Atmospheric River Prediction Skill, Journal of Hydrometeorology, Vol. 19, No. 2, pp. 409–426.

Waliser, D., Guan, B., (2017), Extreme winds and precipitation during landfall of atmospheric rivers, Nature Geoscience, Vol. 10, No. 3, pp. 179–183.

Zhu, Y., Newell RE., (1998), A Proposed Algorithm for Moisture Fluxes from Atmospheric Rivers, Monthly Weather Review, Vol. 126, No. 3, pp. 725–735.