

## تحلیل دینامیکی انتشار و همگرایی امواج راسبی و تغییرات جت استریم در دوره‌های خشک فراگیر زمستانه ایران

عباس رنجبرسعدت‌آبادی<sup>۱\*</sup>، فرانک بهرامی<sup>۲</sup> و ابراهیم فتاحی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استاد، گروه پیش‌آگاهی مخاطرات جوی، پژوهشکده هواشناسی، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران  
<sup>۲</sup> دکتری هواشناسی، گروه پیش‌آگاهی مخاطرات جوی، پژوهشکده هواشناسی، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران  
<sup>۳</sup> استاد، گروه پژوهشی هواشناسی ترابری پژوهشکده هواشناسی، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۰، پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۱۵)

### چکیده

در این پژوهش، سازوکارهای دینامیکی مؤثر بر شکل‌گیری و تداوم دوره‌های خشک فراگیر زمستانه در ایران با تمرکز بر انتشار امواج راسبی و تغییرات میدان جت استریم در لایه‌های فوقانی وردسپهر بررسی شده است. بدین منظور، از داده‌های بارش ماهانه ۱۷۹ ایستگاه همدیدکشور استفاده و شاخص نمره استاندارد (Z-score) برای ماه‌های دسامبر، ژانویه و فوریه طی دوره آماری ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴ محاسبه شد. بر اساس میانگین فضایی این شاخص، برای هر ماه چهار دوره خشک فراگیر شدید شناسایی شد. برای دوره‌های منتخب، الگوی شار فعالیت موج راسبی، مسیرهای انتقال و نواحی همگرایی انرژی موج، و همچنین میدان جت استریم در تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال و بی‌هنجاری آن نسبت به شرایط اقلیمی مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که در تمامی دوره‌های خشک، فعالیت امواج راسبی در نواحی بالادست، به‌ویژه بر روی اقیانوس اطلس و مدیترانه، تقویت شده است، اما بخش عمده انرژی موج در عرض‌های جغرافیایی بالاتر همگرا شده و انتقال انرژی موج مؤثری به سمت غرب آسیا و ایران صورت نگرفته است.

در نتیجه، امواج راسبی ورودی به ایران یا با دامنه ضعیف همراه بوده‌اند یا به‌دلیل فقدان همگرایی مؤثر شار فعالیت موج، پیش از نفوذ به منطقه تضعیف شده‌اند. تحلیل میدان جت قطبی نیز حاکی از چرخش ساعتگردی، جابه‌جایی جت قطبی روی اقیانوس اطلس به عرض‌های بالاتر و تقویت هم‌زمان جت جنب‌حاره‌ای شمال آفریقا و گسترش آن بر فراز ایران است. این آرایش جوی با کاهش نوسانات نصف‌النهاری، تضعیف صعود دینامیکی و تقویت شرایط پایدار در ترازهای فوقانی، از نفوذ سامانه‌های بارشی عرض‌های میانی جلوگیری کرده و زمینه‌ساز تداوم خشکسالی‌های زمستانه فراگیر در ایران شده است.

**کلمه‌های کلیدی:** امواج راسبی، جت استریم، دوره‌های خشک زمستانه، شار فعالیت موج راسبی

## ۱ مقدمه

منطقه خاورمیانه و ایران به واسطه موقعیت جغرافیایی خود در کمربند جنب‌حاره‌ای و ناحیه خشک جهانی قرار گرفته‌اند. از این رو، شرایط جوی این منطقه در فصل گرم عمدتاً تحت تأثیر سامانه پرتافتاح جنب‌حاره‌ای و در فصل سرد متأثر از سامانه‌های عرض‌های میانی است. محدود بودن مقدار بارش و تغییرپذیری قابل توجه آن در مقیاس سالانه و بین‌سالی در بخش وسیعی از این مناطق، پیامدهای گسترده و بعضاً مخربی را در حوزه‌هایی نظیر کشاورزی، منابع آب، محیط‌زیست و فعالیت‌های اقتصادی-اجتماعی به همراه دارد. بر همین اساس، بررسی تغییرات بارش و شناسایی سازوکارهای مؤثر بر آن همواره از موضوعات محوری پژوهش‌های هواشناسی در این منطقه بوده است.

بارندگی در ایران و بخش عمده‌ای از خاورمیانه عمدتاً در فصل زمستان و اوایل بهار رخ می‌دهد که این امر به عبور پیچک‌های گذرای عرض‌های میانی و قرارگیری منطقه در مسیر توفان‌های منشأگرفته از اقیانوس اطلس شمالی و دریای مدیترانه نسبت داده می‌شود (مارتین، ۱۹۹۲). شواهد متعددی نیز بر تأثیرپذیری وضعیت دینامیکی جو منطقه از نوسانات و سامانه‌های فعال بر روی اقیانوس اطلس دلالت دارند (هارل، ۱۹۹۵؛ هارل و ون‌لون، ۱۹۹۷؛ رادول و همکاران، ۱۹۹۹). در این راستا، پژوهش حاضر با هدف بررسی نقش توفان‌های اطلس و مدیترانه در قالب چارچوب دینامیکی شار فعالیت موج راسبی و همچنین تأثیرپذیری این سامانه‌ها از مراکز همگرایی و واگرایی شار موج انجام شده است. شار فعالیت موج، مفهومی بنیادین در هواشناسی دینامیکی است که برای توصیف انتقال انرژی و تکانه امواج جوی، به‌ویژه امواج راسبی، به کار می‌رود. این کمیت، مسیر و منبع انتقال انرژی موجی را مشخص کرده و ابزاری کلیدی برای درک برهم‌کنش موج-جریان میانگین و

تیین الگوهای بزرگ‌مقیاس گردش جو به شمار می‌آید. مطالعات اولیه اورلانسکی و کاتزنی (۱۹۹۱)، اورلانسکی و شلدون (۱۹۹۳) و چنگ (۱۹۹۷) نشان داد که برای بررسی و ردیابی انتشار بسته‌های موجی می‌توان از شار ژئوپتانسیلی غیرزمین‌گرد استفاده کرد، چراکه این کمیت سهم عمده‌ای در نمایش انتقال انرژی پیچکی دارد. با این حال، تفکیک کمی دقیق جملات شار انرژی و جملات تبدیل انرژی امکان‌پذیر نبوده است. به‌منظور رفع این محدودیت، مفهوم فعالیت موج معرفی شد که در آن جملات بودجه به‌صورت یکتا قابل تعیین هستند (پلام، ۱۹۸۶؛ اسلر و هینر، ۱۹۹۹؛ تاکایا و ناکامورا، ۲۰۰۰؛ دنیلسون و همکاران، ۲۰۰۶).

چنگ و اورلانسکی (۱۹۹۴) با محاسبه شار و سرعت گروه در مدل‌هایی با حالت پایه متغیر در راستای قائم نشان دادند که شار ژئوپتانسیلی غیرزمین‌گرد، در جریان‌های دارای چینش خطی ایده‌آل، ارتباط مستقیمی با سرعت گروه دارد. نتایج آنها بیانگر آن است که این شار می‌تواند برای نمایش انتشار انرژی پیچکی در جریان‌های غیرخطی با تغییرات قائم و مداری نیز به کار رود. همچنین ونسه و شفر (۱۹۹۸) نشان دادند که در شرایطی که ضرایب معادلات خطی شده به‌آهستگی در فضا و زمان تغییر کنند، شرایط متناظر با تقریب کارمرز-ونتزل-بریلوین (WKB)، روابط فعالیت موج همواره خاصیت سرعت گروه را ارضا می‌کنند.

در مطالعات اخیرتر، هنگ و ناکامورا (۲۰۱۷) با بررسی بودجه فعالیت موج در زمستان نیمکره شمالی نشان دادند که مسیرهای توفان‌های اقیانوس آرام و اطلس عمدتاً تحت کنترل سه مؤلفه اصلی شامل شار گرمایی پیچکی نصف‌النهاری در سطوح پایین، همگرایی افقی شار فعالیت موج و چشمه‌ها و چاه‌های دررو هستند. در مقیاس منطقه‌ای، اسعدی و همکاران (۱۳۹۰) با تحلیل دینامیک مسیر توفان مدیترانه بر مبنای شار فعالیت موج

مناطق بیش از نرمال گزارش شده است.

در این پژوهش، سازوکارهای دینامیکی حاکم بر شکل‌گیری و تداوم دوره‌های خشک و تر در ایران از طریق تحلیل نظام‌مند بودجه، شدت و مسیر انتشار سامانه‌های توفانی در مقیاس‌های سینوپتیکی و سیاره‌ای وابسته به اقیانوس اطلس شمالی و دریای مدیترانه بررسی شده است. بدین منظور، چهار مورد برای هر ماه خشک شدید فراگیر کشور شامل دسامبر، ژانویه و فوریه انتخاب شد و با بهره‌گیری از پارامتر شار فعالیت موج راسبی بر اساس فرمول‌بندی تاکایا و ناکامورا (۲۰۰۱)، نواحی چشمه و چاه موج، مسیرهای انتقال انرژی و پیوند آن‌ها با نوسانات مشاهده‌شده بارش تحلیل شد. در این چارچوب، برهم‌کنش امواج راسبی با آشفتگی‌های سینوپتیکی، تغییرات مکانی، شدت جت استریم و بی‌هنجاری‌های آن در تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال، و جابه‌جایی مسیر توفان‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

## ۲ شیوه پژوهش

در این پژوهش، از داده‌های بازتحلیل مراکز ملی پیش‌بینی محیطی-مرکز ملی پژوهش‌های جوی برای دوره آماری (۱۹۹۵-۲۰۲۴)، با تفکیک افقی  $2/5^{\circ} \times 2/5^{\circ}$  در دو راستای طول و عرض جغرافیایی و داده‌های بارش ۱۷۹ ایستگاه هواشناسی، سازمان هواشناسی کشور برای دوره اقلیمی ۱۹۹۵-۲۰۲۴ استفاده شده است. این داده‌ها شامل بارش ماهانه، ارتفاع ژئوپتانسیل، مؤلفه‌های افقی سرعت باد است.

پارامتر شار فعالیت موج یکی از پارامترهایی است که می‌توان با استفاده از آن فرآیند توسعه و مسیر حرکت چرخندها و واچرخندها را نیز توضیح داد (اورلانسکی و کاتزفی، ۱۹۹۹). رابطه بودجه این کمیت بصورت معادله (۱) است:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \cdot F = D \quad (1)$$

نشان دادند که در ماه‌های ژانویه و فوریه، غرب مدیترانه به‌شدت تحت تأثیر توفان‌های اطلس قرار دارد، در حالی که در ماه دسامبر، مسیر توفان مدیترانه تا حد زیادی مستقل از مسیر توفان اطلس است.

رضائیان و همکاران (۱۳۹۳) در مطالعه‌ای آماری-دینامیکی درباره رابطه مسیر توفان مدیترانه و نوسان اطلس شمالی (NAO) نشان دادند که در فاز مثبت NAO بیش از فاز منفی آن، مسیر توفان مدیترانه تحت تأثیر چرخندزایی در شمال شرق اطلس و شمال اروپا قرار می‌گیرد. احمدی‌گیوی و همکاران (۲۰۱۳) نیز با بررسی برهم‌کنش بسته‌های کژفشار اطلس شمالی و مسیر توفان مدیترانه، نقش تعیین‌کننده شار افقی فعالیت موج را در سراسر دامنه مسیر توفان مدیترانه به‌وضوح نشان دادند. نصر اصفهانی و همکاران (۲۰۱۱) از دیدگاه انرژی‌تیک به بررسی ارتباط مسیر توفان مدیترانه و نوسان اطلس شمالی پرداختند و نشان دادند که بردارهای شار انرژی، انتقال‌دهنده انرژی از غرب اقیانوس اطلس و شمال اروپا به منطقه مدیترانه هستند؛ فرآیندی که در فاز مثبت NAO نسبت به فاز منفی آن تضعیف می‌شود.

بهرامی و همکاران (۱۳۹۷) در یک مطالعه موردی نشان دادند که در دوره‌های خشک فصل بهار، فعالیت پیچکی بر روی اقیانوس اطلس تشدید شده و یک ناحیه واگرایی شدید موج (چشمه موج) بر فراز شرق اطلس شکل می‌گیرد. نتایج آن‌ها همچنین بیانگر تغذیه رطوبتی امواج در هنگام عبور از منطقه مدیترانه و تأثیرگذاری این سامانه‌ها بر ایران از سمت غرب و جنوب غرب است. در ادامه، بهرامی و همکاران (۲۰۱۹، ۲۰۲۱) با بررسی مسیر توفان‌های اطلس و مدیترانه بر مبنای شار فعالیت موج در دوره‌های گذار فاز ENSO نشان دادند که تأثیر مسیر توفان اطلس بر مسیر توفان مدیترانه در گذار لائینا به ال‌نینو (گذار نوع ۱) قوی‌تر از گذار معکوس آن (گذار نوع ۲) است و در گذار نوع ۱، بارش‌های ایران در اغلب

می‌باشند:

$$\nabla \cdot = \left( \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \lambda} + \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} + \frac{\partial}{\partial z} \right)^T \quad (۴)$$

برای بدست آوردن فعالیت موجی که توسط تاکایا و ناکامورا (۲۰۰۱) معرفی شده،  $M$  از معادله (۵) تخمین زده می‌شود.

$$M = \frac{P}{2} \left( \frac{\dot{q}^2}{2|\nabla_H Q|} + \frac{e}{|U| - C_p} \right) \cos \phi \quad (۵)$$

بنابر این در این مطالعه از شار فعالیت افقی موج راسبی استفاده شده و مولفه‌های افقی عملگر واگرایی بصورت زیر در نظر گرفته شده‌اند:

$$\nabla_{H \cdot} = \left( \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \lambda} + \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \phi} + 0 \right)^T \quad (۶)$$

در این مطالعه، با بهره‌گیری از فرمول‌بندی تاکایا و ناکامورا (۲۰۰۱)، بی‌هنجاری تابع جریان موج و بخش افقی شار فعالیت موج در ماه‌های خشک فصل زمستان (دسامبر، ژانویه و فوریه) بر تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال بررسی شده است. با توجه به ماهیت شار فعالیت موج به عنوان شاخصی از برهمکنش موج-شارش میانگین، علاوه بر شار فعالیت موج، موقعیت مکانی و بی‌هنجاری جت استریم‌ها نیز مورد تحلیل قرار گرفته است. انتخاب تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال با در نظرگیری اختلاف ارتفاعی جت قطبی و جت جنب‌حاره، امکان نمایش بهینه هر دو جت را فراهم می‌آورد و چارچوبی یکپارچه برای تفسیر دینامیک انتشار امواج راسبی و تغییرات جت در دوره‌های خشکسالی زمستانه ارائه می‌دهد.

برای انتخاب ماه‌های خشک شدید فراگیر فصل زمستان طی دوره ۳۰ ساله (۲۰۲۴-۱۹۹۵)، از داده‌های ماهانه بارش دیده‌بانی شده در ۱۷۹ ایستگاه هواشناسی استفاده شد. برای این منظور ابتدا متوسط بارش ۱۷۹ ایستگاه در هر سال محاسبه شد و آن را به عنوان شاخص بارش آن ماه در نظر گرفته شد و شاخص نمره استاندارد  $Z$  (رابطه ۷)، که یکی از شاخص‌های اصلی در مطالعه آماری برای تعیین تغییرات است، برای هر ماه محاسبه شد:

که در آن  $D$  واداشت‌های پیچکی ناپایستار موج ناشی از واداشت‌ها و میرایی‌ها همچون گرمایش دررو و اصطکاک است که برای امواج پایستار این کمیت صفر است.  $A$  چگالی فعالیت موج است که مشتق زمانی آن اثرات گذرای موج را مشخص می‌کند.  $F$  نیز بیانگر شار فعالیت موج است. این رابطه بیانگر وابستگی واگرایی شار فعالیت موجی ( $\nabla \cdot F$ ) به خصوصیات فیزیکی موج و اثرات ناپایستاری موج، مانند شار انرژی پیچکی، است. چگالی فعالیت موج  $A$  و بردار شار  $F$  طوری تعریف می‌شوند که وقتی مقیاس فضایی پریسیدگی در مقابل تغییرات حالت پایه کوچک است، خاصیت سرعت گروه برقرار باشد.  $F$  حاصل ضرب سرعت گروه و چگالی فعالیت موج بر طبق معادله (۲) است:

$$F = C_g A \quad (۲)$$

که  $C_g$  سرعت گروه است و  $F$  معیاری است از انتشار فعالیت موج (دنیلسون و همکاران، ۲۰۰۶).

با توجه به تعریف  $D$  در رابطه (۱)، تبدیل‌های انرژی در عرض‌های میانی در مرحله نخست بدین دلیل رخ می‌دهند که حالت پایه در راستای مداری و نصف‌النهاری متغیر است. در این مقاله به منظور بررسی شار فعالیت موج راسبی از فرمول بندی تاکایا و ناکامورا (۲۰۰۱) مطابق روابط زیر استفاده شده است:

$$F = \frac{P \cos \phi}{2|U|} \left[ \frac{U}{a^2 \cos^2 \phi} \left[ \left( \frac{\partial \psi}{\partial \lambda} \right)^2 - \psi \frac{\partial^2 \psi}{\partial \lambda^2} \right] + \frac{V}{a^2 \cos \phi} \left[ \frac{\partial \psi}{\partial \lambda} \frac{\partial \psi}{\partial \phi} - \psi \frac{\partial^2 \psi}{\partial \lambda \partial \phi} \right] \right] + \frac{f_0^2}{N^2} \left[ \frac{U}{a \cos \phi} \left[ \frac{\partial \psi}{\partial \lambda} \frac{\partial \psi}{\partial z} - \psi \frac{\partial^2 \psi}{\partial \lambda \partial z} \right] + \frac{V}{a} \left[ \frac{\partial \psi}{\partial \phi} \frac{\partial \psi}{\partial z} - \psi \frac{\partial^2 \psi}{\partial \phi \partial z} \right] \right] \quad (۳)$$

که  $\psi$ ، پریسیدگی تابع جریان زمین‌گرد،  $P$  (Pressure/1000hPa)، تاوایی پتانسیلی شبه زمین‌گرد،  $\dot{q}$  پریسیدگی تاوایی پتانسیلی شبه زمین‌گرد و  $C_v$  برداری است که نشان‌دهنده انتشار فاز در جهت  $U$  است. عملگرهای واگرایی سه بعدی، کمیت  $M$  و گردایان افقی به ترتیب مطابق معادله‌های (۴) تا (۶)

محاسبه شاخص نمره استاندارد  $Z$ ، بی‌هنجاری‌های بارش هر ماه نسبت به متوسط اقلیمی آن ماه بر اساس داده‌های بازتحلیل NCEP/NCAR، برای ایران و نواحی مجاور، تعیین و برای هر ماه، چهار مورد که کاهش فراگیر بارش در منطقه رخ داده بود (شکل ۱)، شار فعالیت موج، جت استریم، و بی‌هنجاری آنها برای تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال بررسی شده است.

### ۳-۱ بی‌هنجاری بارش ماه‌های خشک شدید فراگیر

شکل (۱) الگوی توزیع مکانی بی‌هنجاری بارش را در سه ماه فصل سرد سال (دسامبر، ژانویه و فوریه) برای دوره‌های منتخب خشک شدید نشان می‌دهد. بررسی این نقشه‌ها بیانگر آن است که در ماه دسامبر، بخش عمده‌ای از ایران تحت تأثیر خشکی شدید و فراگیر قرار داشته و بی‌هنجاری منفی بارش تقریباً سراسر کشور را دربر گرفته است.

وجه اشتراک تمامی دوره‌های منتخب در این ماه، حاکمیت بی‌هنجاری منفی بسیار شدید بارش در نیمه غربی کشور، به‌ویژه نواحی جنوب‌غرب و غرب ایران است. شدت این خشکی به‌گونه‌ای بوده است که در برخی مناطق جنوب‌غربی، کاهش بارش ماهانه نسبت به میانگین بلندمدت به بیش از ۶۰ میلی‌متر رسیده است که بیانگر یک اختلال جدی در سامانه‌های بارشی فصل سرد می‌باشد.

$$Z = \frac{P_i - \bar{P}}{SD} \quad (7)$$

که در آن:  $P_i$ : بارش در ماه مشخص،  $\bar{P}$ : میانگین بارش دراز مدت در همان ماه و  $SD$ : انحراف معیار بارش ماه مورد نظر در طول دوره آماری می‌باشد. سپس برای هر ماه چهار بیشینه مقادیر منفی  $Z$  آن ماه در طول دوره ۳۰ ساله به ترتیب به عنوان دوره‌های خشک شدید فراگیر انتخاب شد و شار فعالیت موج، ارتفاع ژئوپتانسیل و بی‌هنجاری آنها در تراز ۲۵۰ هکتوپاسکالی برای آنها بررسی شده است.

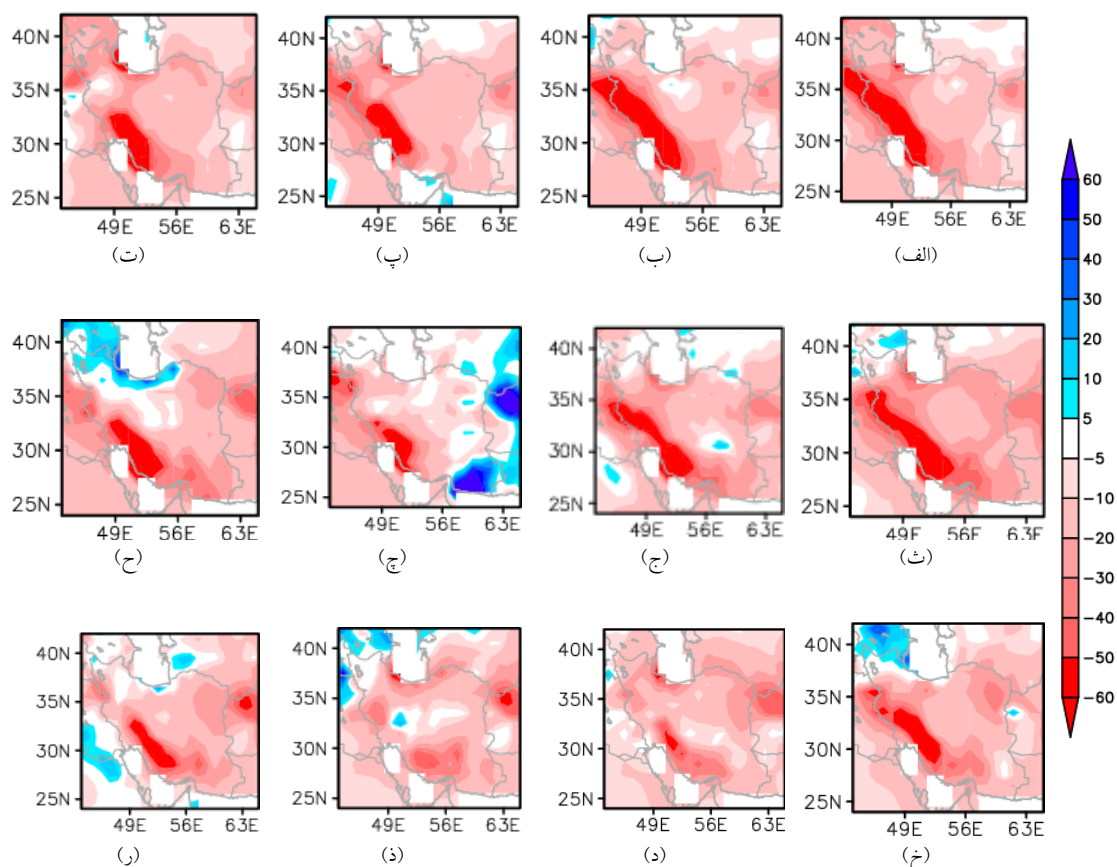
### ۳ نتایج و بحث

مقادیر شاخص نمره استاندارد  $Z$ ، برای ماه‌های خشک شدید فراگیر زمستان در جدول (۱) نشان داده شده است. بیشترین مقدار این شاخص مربوط به ژانویه ۲۰۲۱ بوده که شاخص نمره استاندارد  $Z$ ، در این ماه ۱/۶۹-، و رتبه‌های بعدی ماه‌های خشک بر اساس این شاخص، مربوط به فوریه ۱۹۹۷ و دسامبر ۲۰۱۱ با مقدار  $Z$ ، به ترتیب ۱/۶۲- و ۱/۴۳- بوده است. در ۱۰ سال خشک نسبی دوره مورد مطالعه، بر اساس مقدار  $Z$  (کمتر از -۱) برای ماه‌های دسامبر، ژانویه و فوریه، به ترتیب ۴، ۲ و ۶ مورد دوره خشک شدید رخ داده است. بسامد نسبتاً کم (زیاد) رخدادهای خشک شدید در ماه ژانویه (فوریه) می‌تواند بیانگر ثبات (بی‌ثباتی) بیشتر بارش کشور در این ماه‌ها باشد.

پس از تعیین شدت خشکی ماه‌های مورد مطالعه برای ایران با استفاده از داده‌های دیدبانی شده بارش کشور و

جدول ۱. شاخص نمره استاندارد  $Z$  خشک‌ترین ماه‌های فصل زمستان طی دوره ۳۰ ساله ۱۹۹۵-۲۰۲۴.

سال	۲۰۱۱	۱۹۹۸	۲۰۱۷	۲۰۱۰	۱۹۹۶	۲۰۲۴	۲۰۱۴	۲۰۲۳	۱۹۹۹	۲۰۰۸
دسامبر	-۱/۴۳	-۱/۳۳	-۱/۱۸	-۱/۱۱	-۰/۹۸	-۰/۹۳	-۰/۸۱	-۰/۸۰	-۰/۷۸	-۰/۵۹
ژانویه	-۱/۶۹	-۱/۴۴	-۰/۸۵	-۰/۸۵	-۰/۸۲	-۰/۷۵	-۰/۷۵	-۰/۷۱	-۰/۶۸	-۰/۶۷
فوریه	-۱/۶۲	-۱/۳۳	-۱/۱۹	-۱/۱۵	-۱/۱۴	-۱/۱۰	-۰/۹۹	-۰/۸۴	-۰/۸۱	-۰/۷۲



شکل ۱. توزیع مکانی بی‌هنجاری‌های بارش (میلی‌متر بر ماه) ماه‌های خشک شدید فراگیر بر روی مناطق خشکی، سطر اول مربوط به ماه‌های دسامبر (الف) - دسامبر ۲۰۱۱، ب- دسامبر ۱۹۹۸، پ- دسامبر ۲۰۱۷، ت- دسامبر ۲۰۱۰، سطر وسط مربوط به ماه‌های ژانویه (ث- ژانویه ۲۰۲۱، ج- ژانویه ۱۹۹۵، چ- ژانویه ۲۰۱۷، ح- ژانویه ۲۰۱۸)، سطر پایین مربوط به ماه‌های فوریه (خ- فوریه ۱۹۹۷، د- فوریه ۲۰۰۱، ذ- فوریه ۲۰۰۴، ر- فوریه ۲۰۱۶).

ماه فوریه نیز، به‌جز سال ۲۰۱۶ که در آن بخش‌هایی از نوار ساحلی دریای خزر بی‌هنجاری مثبت بارش را تجربه کرده‌اند، سایر دوره‌های منتخب با حاکمیت خشکی فراگیر در سطح کشور همراه بوده‌اند. در این ماه نیز همانند دسامبر و ژانویه، بی‌هنجاری منفی بارش در نیمه غربی ایران، به‌ویژه در مناطق غربی و جنوب‌غربی، برجسته‌تر و پایدارتر از سایر نواحی مشاهده می‌شود. به‌طور کلی، وجه اشتراک تمامی ماه‌ها و دوره‌های مورد بررسی، تمرکز و تداوم بی‌هنجاری منفی بارش در نیمه غربی کشور، به‌ویژه در غرب و جنوب‌غرب ایران است. این الگوی مکانی پایدار خشکی، در هماهنگی کامل با نتایج حاصل از تحلیل شار فعالیت موج راسبی و میدان

الگوهای بارش در ماه ژانویه نیز در دوره‌های خشک منتخب، شرایطی نسبتاً مشابه را نشان می‌دهند. در سال‌های ۱۹۹۵ و ۲۰۲۱، تقریباً کل کشور با بی‌هنجاری منفی بارش مواجه بوده و بارش‌ها در اغلب مناطق کمتر از مقدار نرمال ثبت شده است. در مقابل، در ژانویه ۲۰۱۷ بخش محدودی از جنوب‌شرق کشور و در ژانویه ۲۰۱۸ نوار ساحلی جنوبی و شمالی کشور بارش‌هایی بیش از نرمال را تجربه کرده‌اند که در برخی مناطق مقدار آن به حدود ۵۰ میلی‌متر در ماه رسیده است. با این حال، این افزایش‌های موضعی بارش نتوانسته‌اند ماهیت کلی الگوی خشک حاکم بر کشور را تغییر دهند و بخش‌های وسیعی از ایران همچنان در شرایط کم‌بارشی باقی مانده‌اند. در

چاه موج شناخته می‌شوند و نشان‌دهنده تجمع و میرایی انرژی موجی، کاهش سرعت جریان میانگین (تضعیف جت استریم) و افزایش تبادل تکانه بین موج و جریان هستند. این نواحی از دیدگاه دینامیکی، مکان‌های کلیدی برای اثرگذاری امواج بر جریان میانگین و شکل‌گیری یا تقویت پربیشیدگی‌های جوی محسوب می‌شوند. در این ارتباط، تابع جریان موج، الگوی مکانی واگرایی و همگرایی شار فعالیت موج را مشخص کرده و بردارهای شار، جهت و شدت انتشار انرژی موجی را نشان می‌دهند، چارچوبی که نخستین بار به‌طور منسجم توسط تاکایا و ناکامورا (۲۰۰۱) ارائه شده و امروزه به‌عنوان یکی از ابزارهای استاندارد تحلیل دینامیک امواج راسبی در مقیاس بزرگ مقیاس مورد استفاده قرار می‌گیرد.

### ۳-۲-۱ شار فعالیت موج راسبی در ماه‌های دسامبر خشک شدید فراگیر

نقشه‌های شار فعالیت موج راسبی در تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال (شکل‌های ۲ تا ۴)، الگوی همگرایی و واگرایی شار افقی فعالیت موج و همچنین جهت و شدت انتشار انرژی موجی را در ماه‌های دسامبر خشک شدید و فراگیر نشان می‌دهند. در این نقشه‌ها، نواحی با مقادیر مثبت (قرمز) و منفی (آبی) به ترتیب بیانگر واگرایی (چشمه موج) و همگرایی (چاه موج) شار فعالیت موج هستند. بزرگی این مقادیر و گرادیان مکانی آن‌ها شاخصی از شدت و ناهمگنی فعالیت موجی بوده و بیانگر میزان برهم‌کنش موج با جریان میانگین در ناحیه مورد مطالعه است. از دیدگاه دینامیکی، نواحی همگرایی شار فعالیت موج راسبی به‌عنوان چاه موج عمل کرده و نشان‌دهنده تجمع انرژی موجی، افزایش برهم‌کنش موج-جریان و کاهش سرعت جریان میانگین (تضعیف جت استریم) هستند. در مقابل، نواحی واگرایی شار به‌منزله چشمه موج بوده و معرف خروج انرژی موجی از

جت استریم، نشان‌دهنده نقش غالب سازوکارهای دینامیکی ترازهای بالای جو در تضعیف صعود قائم، کاهش تغذیه رطوبتی و در نهایت شکل‌گیری و تداوم دوره‌های خشک فراگیر در فصل سرد سال بر فراز ایران می‌باشد.

### ۳-۲ شار فعالیت موج راسبی

فعالیت موج، معیاری از شدت، ساختار و میزان سازمان‌یافتگی پربیشیدگی‌های موجی نسبت به جریان میانگین جو است و بیانگر نقش دینامیکی امواج در تعدیل و تغییر جریان بزرگ مقیاس می‌باشد. در این چارچوب، شار فعالیت موج به‌عنوان یک کمیت برداری تعریف می‌شود که نه تنها جهت انتشار امواج راسبی را نشان می‌دهد، بلکه مسیر و کارایی انتقال انرژی موجی را نیز در ترازهای بالای وردسپهر توصیف می‌کند. برخلاف بردار باد یا شار انرژی کلاسیک، شار فعالیت موج به‌طور مستقیم از معادلات دینامیکی موج-جریان استخراج شده و بنابراین وابستگی کمتری به چارچوب مختصات و جریان زمینه‌ای دارد.

استفاده از این کمیت امکان شناسایی هم‌زمان مناطق همگرایی و واگرایی شار افقی فعالیت موج، چاه‌ها و چشمه‌های موج، و همچنین شدت و جهت غالب انتشار انرژی موجی را فراهم می‌سازد. در این چارچوب، هر زوج همگرایی-واگرایی شار فعالیت موج راسبی معرف یک زوج از نواحی دریافت و گسیل انرژی موجی بوده و مسیر انتقال امواج بین این دو ناحیه را مشخص می‌کند. به بیان دیگر، مراکز واگرایی شار فعالیت موج به‌عنوان چشمه موج عمل کرده و بیانگر خروج انرژی موجی از یک ناحیه، شتاب‌گیری جریان میانگین و تقویت جت استریم، همراه با تضعیف برهم‌کنش موج-جریان می‌باشند.

در مقابل، مراکز همگرایی شار فعالیت موج به‌عنوان

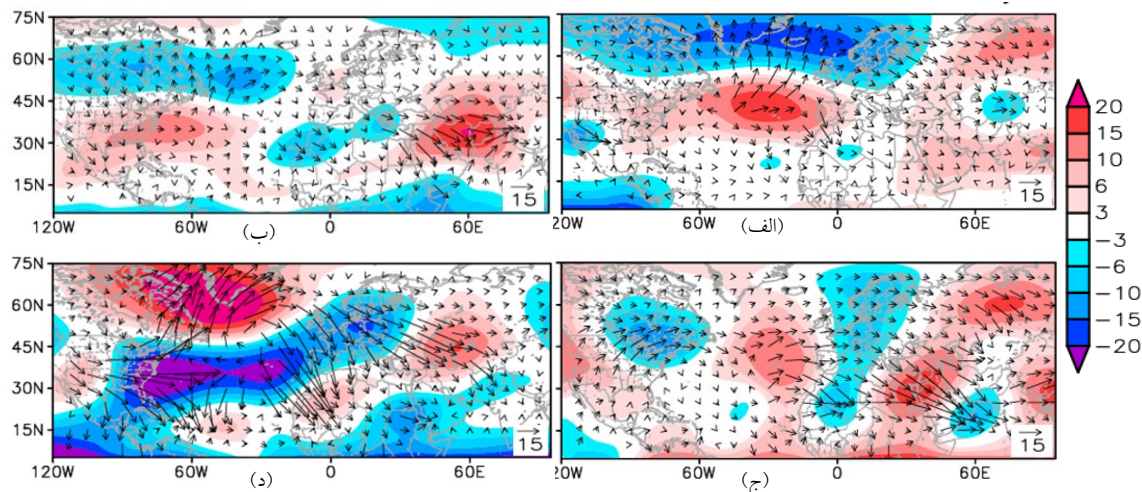
شبه‌جزیره عربستان تا غرب اقیانوس آرام، نشان‌دهنده تقویت جت جنب‌حاره‌ای در این نواحی است. در نتیجه، بر فراز ایران واگرایی شار فعالیت موج و بردارهای ضعیف و پراکنده مشاهده می‌شود که بیانگر ورود حداقلی انرژی موجی، تضعیف صعود قائم و نبود شرایط دینامیکی مناسب برای تقویت سامانه‌های بارشی است.

**دسامبر ۱۹۹۸ (شکل ۲-ب):** در این دوره نیز الگوی کلی مشابه دسامبر ۲۰۱۱ بوده است. اقیانوس اطلس نقش یک چشمه فعالیت موج نسبتاً ضعیف را ایفا کرده و دو زوج واگرایی-همگرایی در راستای شمال‌شرقی-جنوب‌شرقی شکل گرفته‌اند. شاخه جنوب‌شرقی انرژی موجی پس از عبور از شرق اطلس و مدیترانه بخش عمده‌ای از انرژی خود را از دست داده و بر فراز ایران، واگرایی شار با دامنه متوسط و بردارهای عمدتاً مداری مشاهده می‌شود. این الگو نشان‌دهنده گذر موج بدون تمرکز انرژی و نبود همگرایی مؤثر شار فعالیت موج در منطقه ایران است.

**دسامبر ۲۰۱۷ (شکل ۲-ج):** در این ماه، الگوی انتشار انرژی موجی متفاوت بوده و بیشترین انرژی از شرق اقیانوس اطلس تأمین شده است. بردارهای شار فعالیت

ناحیه، شتاب‌گیری جریان میانگین (تقویت جت استریم) و تضعیف تبادل تکانه بین موج و جریان می‌باشند. بردارهای شار فعالیت موج نیز مسیر انتشار و انتقال انرژی موجی را مشخص کرده و همگرایی یا واگرایی آن‌ها میزان تمرکز یا پراکندگی فعالیت موج را نشان می‌دهد.

**دسامبر ۲۰۱۱ (شکل ۲-الف):** در این ماه، یک چشمه موج قوی با واگرایی شدید شار فعالیت موج بر روی اقیانوس اطلس میانی شکل گرفته است. انرژی موجی گسیل شده از این ناحیه به دو شاخه اصلی تقسیم می‌شود: شاخه شمال‌شرقی که به سمت شمال اقیانوس اطلس و اروپا گسترش یافته و در عرض‌های بالاتر همگرا شده است، و شاخه جنوب‌شرقی که در مسیر حرکت به سمت مدیترانه شرقی و خاورمیانه به تدریج تضعیف شده است. به‌طور کلی، حاکمیت واگرایی گسترده شار بر روی اطلس شمالی موجب انتقال بخش عمده‌ای از انرژی موجی به عرض‌های شمالی شده و سهم ناچیزی از این انرژی به عرض‌های میانی و ناحیه خاورمیانه رسیده است. در این الگو، مناطق شمالی اطلس (گرینلند، ایسلند و اسکاندیناوی) به‌عنوان نواحی اصلی دریافت انرژی موج عمل کرده‌اند، در حالی که گسترش واگرایی شار از



**شکل ۲.** بی‌هنجاری تابع جریان موج (نواحی رنگی، حسب  $10^6$  متر مربع بر ثانیه) و شار فعالیت موج (بردارها، حسب ثانیه و بردارها متر مربع بر مجذور ثانیه) در ماه‌های دسامبر خشک، الف-دسامبر ۲۰۱۱، ب-دسامبر ۱۹۹۸، ج-دسامبر ۲۰۱۷ و د-دسامبر ۲۰۱۰.

نقشه‌های شار فعالیت موج راسبی در تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال برای ماه‌های ژانویه خشک شدید (شکل ۳)، الگوی انتشار، تمرکز و میرایی انرژی موجی را در مقیاس نیمکره‌ای نشان می‌دهند. بررسی این نقشه‌ها حاکی از آن است که در تمامی ژانویه‌های خشک منتخب، ایران عمدتاً خارج از کانون‌های اصلی همگرایی شار فعالیت موج قرار داشته و یا در مسیر گذر سریع و کم انرژی امواج واقع شده است.

**ژانویه ۲۰۲۱ (شکل ۳-الف):** در این ماه، گستره وسیعی از همگرایی شار فعالیت موج راسبی در محدوده  $30^{\circ}$  تا  $80^{\circ}$  غربی و  $40^{\circ}$  تا  $90^{\circ}$  شمالی شکل گرفته و منجر به ایجاد دو زوج همگرایی-واگرایی در راستای شمالی-جنوبی شده است. شاخه شمالی این الگو از شدت بیشتری برخوردار بوده و بردارهای شار با همگرایی قوی بر روی اروپا متمرکز شده‌اند. بخشی از انرژی موجی نیز پس از عبور از دریای خزر، همگرایی ضعیفی بر فراز ترکمنستان و ازبکستان ایجاد کرده است. در مقابل، ایران تحت تأثیر واگرایی شار فعالیت موج و بردارهای بسیار ضعیف قرار داشته است. این پیکربندی بیانگر آن است که انرژی موجی به صورت مؤثر وارد کشور نشده و شرایط لازم برای شکل‌گیری همگرایی منطقه‌ای و تحریک سامانه‌های بارشی فراهم نبوده است. پیامد این وضعیت، تداوم شرایط پایدار دینامیکی و گسترش خشکی فراگیر در سطح کشور بوده است.

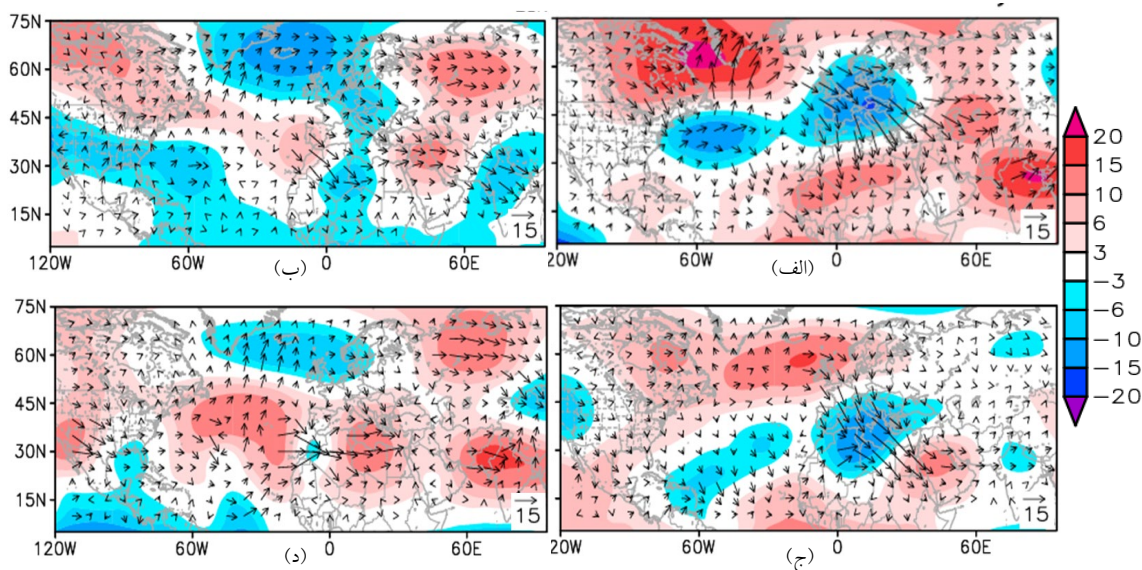
**ژانویه ۱۹۹۵ (شکل ۳-ب):** در این دوره، بر روی شرق کانادا و نواحی مرکزی اقیانوس اطلس، فعالیت موجی ضعیف و بردارهای شار کم‌دامنه مشاهده می‌شود. در مقابل، واگرایی شار در جنوب شرق اقیانوس اطلس با بردارهای نسبتاً قوی شمال‌غربی، انرژی موجی را به سمت شمال آفریقا گسیل کرده است. بخشی از این انرژی در عرض‌های حدود  $25^{\circ}$  شمالی و  $10^{\circ}$  شرقی میرا شده و بخش دیگری با امتداد شمال شرقی وارد ایران شده است.

موج عمدتاً در راستای شرق و جنوب‌شرق گسترش یافته و شاخه جنوب شرقی در شمال آفریقا همگرا شده است. پس از عبور از عربستان، بخشی از انرژی موج وارد ایران شده و یک کانون با شدت نسبتاً قوی بر فراز کشور مشاهده می‌شود. با این حال، جهت غالب بردارها، پراکندگی فضایی آن‌ها و نبود همگرایی پایدار شار نشان می‌دهد که موج با سرعت بالا از منطقه عبور کرده و تمرکز انرژی موجی برای تقویت ناپایداری‌های دینامیکی فراهم نشده است.

**دسامبر ۲۰۱۰ (شکل ۲-د):** در این دوره، نوار گسترده‌ای از همگرایی شار فعالیت موج راسبی در راستای جنوب‌غرب-شمال شرق بر روی اطلس شمالی و بخش‌هایی از اروپا شکل گرفته و به سمت شرق و شمال شرق گسترش یافته است. چند مرکز جذب انرژی موج در عرض‌های میانی و بالاتر ایجاد شده و بردارهای شار قوی در بخش غربی اطلس، انرژی موجی را به سمت شمال شرق هدایت کرده‌اند. هم‌زمان، یک مرکز واگرایی قوی نیز در شمال غرب اطلس مشاهده می‌شود که بیانگر گسیل انرژی موجی از این ناحیه است.

اگرچه در نیمه جنوبی ایران نشانه‌هایی از جذب ضعیف انرژی موج مشاهده می‌شود که بالقوه می‌توانست به تقویت پریشیدگی‌های جوی کمک کند، اما بردارهای شار ضعیف، پراکنده و فاقد همگرایی مؤثر بوده‌اند. در نیمه شمالی کشور نیز تنها شاخه‌های کم‌انرژی موجی حضور داشته و شرایط برای تقویت صعود و بارش مناسب نبوده است. در مجموع، ایران در این دوره عمدتاً در نقش منطقه گذر انرژی موج ظاهر شده و از دیدگاه دینامیکی، شرایط لازم برای تغذیه سامانه‌های بارشی فراهم نشده است.

**۲-۲-۳ شار فعالیت موج راسبی در ماه‌های ژانویه خشک شدید فراگیر**



شکل ۳. بی‌هنجاری تابع جریان موج (نواحی رنگی، حسب  $10^6$  متر مربع بر ثانیه) و شار فعالیت موج (بردارها، حسب ثانیه و بردارها متر مربع بر مجذور ثانیه) در ماه‌های ژانویه خشک، الف- ژانویه ۲۰۲۱، ب- ژانویه ۱۹۹۵، ج- ژانویه ۲۰۱۷ و د- ژانویه ۲۰۱۸.

همگرا بوده‌اند. این شرایط نشان می‌دهد که صعود مؤثر هوا محدود شده و جریان‌های مرطوب نتوانسته‌اند به‌طور کارآمد بر روی کشور تقویت شوند.

**ژانویه ۲۰۱۸ (شکل ۳-د):** در ژانویه ۲۰۱۸، واگرایی نسبتاً قوی شار فعالیت موج در مرکز اقیانوس اطلس مشاهده می‌شود و انرژی موجی به دو شاخه شمال شرقی و جنوب شرقی تقسیم شده است. شاخه شمال شرقی عمدتاً در شمال اطلس همگرا شده، در حالی که شاخه جنوب شرقی با مسیر مداری به سمت شرق مدیترانه گسترش یافته است. آرایش مداری بردارهای شار در مسیر آفریقا تا مدیترانه نشان‌دهنده نبود تمرکز و همگرایی مؤثر انرژی موج است. انرژی موج در این شاخه به تدریج تضعیف شده و پیش از رسیدن به ایران از بین رفته است. در نتیجه، بر فراز ایران واگرایی شار و بردارهای شار بسیار ضعیف حاکم بوده که بیانگر نبود تغذیه دینامیکی لازم برای سامانه‌های بارشی است. در مجموع، در تمامی ژانویه‌های خشک بررسی شده (۱۹۹۵، ۲۰۱۷، ۲۰۱۸ و

**ژانویه ۲۰۱۷ (شکل ۳-ج):** در این ماه، یک منطقه واگرایی قوی اگرچه ایران به‌طور موقت در محدوده یک همگرایی موجی با دامنه نسبتاً بالا قرار گرفته، اما جهت غالب بردارهای شار نشان می‌دهد که انتقال انرژی موجی به سرعت به سمت جنوب شرق و ناحیه پاکستان منحرف شده است. در نتیجه، تمرکز انرژی موج بر فراز ایران پایدار نبوده و همگرایی مؤثر برای تقویت ناپایداری‌های دینامیکی و بارش شکل نگرفته است. بر روی اقیانوس اطلس شمالی شکل گرفته، اما بردارهای شار فعالیت موج نسبتاً ضعیف بوده و با چرخش به سمت جنوب شرق وارد حوزه مدیترانه شده‌اند. در شرق مدیترانه، همگرایی منطقه‌ای و تقویت نسبی فعالیت موج مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده تخلیه بخشی از انرژی موج در این ناحیه است. شاخه‌ای از انرژی موج با مسیر جنوب شرقی از روی صحرای عربستان عبور کرده و از نیمه جنوبی ایران گذشته است. با این حال، بر روی ایران واگرایی شار موج غالب بوده و بردارهای شار بسیار ضعیف و فاقد آرایش

ایجاد کرده‌اند. این الگو موجب تقویت ناو‌های میانی و انتقال مؤثر انرژی موجی به عرض‌های بالاتر، به‌ویژه اروپا، شده است. شاخه جنوب‌شرقی انرژی موج از روی صحرای عربستان به سمت ایران امتداد یافته، اما بر روی کشور، به‌جز بخش‌هایی از شمال و شمال‌غرب، واگرایی شار و بردارهای شار ضعیف غالب بوده است. جهت‌گیری بردارها به سمت خارج از منطقه نشان می‌دهد که ایران در حاشیه سامانه موجی و فاقد همگرایی مؤثر قرار داشته است.

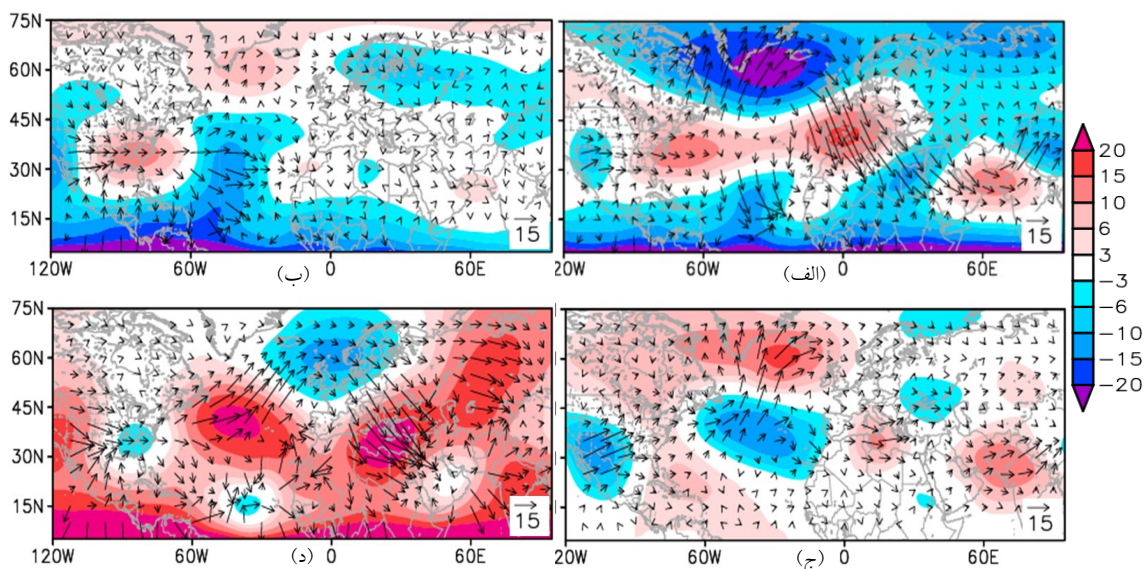
**فوریه ۲۰۰۱ (شکل ۴-ب):** در فوریه ۲۰۰۱، یک مرکز واگرایی شار فعالیت موج نسبتاً قوی بر روی آمریکای مرکزی شکل گرفته است. بردارهای شار در این ناحیه عمدتاً پراکنده و مداری بوده و بیانگر تضعیف انرژی موج به سمت شمال‌شرق و تمرکز نسبی به سمت جنوب‌شرق هستند. در اقیانوس اطلس جنوبی، یک همگرایی شار فعالیت موج شکل گرفته که انرژی موج را جذب کرده و مانع انتشار مؤثر آن به سمت اروپا، آفریقا و خاورمیانه شده است. در نتیجه، مسیر انتقال انرژی موج به نواحی مؤثر بر ایران تقریباً مسدود بوده و بر روی کشور،

ایران یا تحت تأثیر واگرایی شار فعالیت موج قرار داشته یا در مسیر گذر سریع امواج کم‌انرژی واقع شده است. تضعیف تدریجی انرژی موج در طول مسیر، آرایش مداری بردارهای شار و نبود چاه‌های موج پایدار بر فراز کشور، موجب شده است که انتقال مؤثر انرژی موج و تحریک دینامیکی بارش به‌شدت محدود شود.

### ۳-۲-۳ شار فعالیت موج راسبی در ماه‌های فوریه خشک شدید فراگیر

نقشه‌های شار فعالیت موج راسبی در ماه‌های فوریه خشک (شکل ۴) نشان می‌دهند که اگرچه در برخی سال‌ها فعالیت موجی قوی در مقیاس نیمکره‌ای وجود داشته، اما تمرکز و تخلیه اصلی انرژی موج غالباً در خارج از محدوده ایران رخ داده است.

**فوریه ۱۹۹۷ (شکل ۴-الف):** در این ماه، یک چشمه موج با مقادیر واگرایی شار قوی بر روی جنوب غرب اقیانوس اطلس مرکزی شکل گرفته است. بردارهای شار ابتدا با حرکت شمالی و سپس چرخش ساعت‌گرد وارد شمال اطلس شده و در آنجا یک منطقه همگرایی قوی



**شکل ۴.** بی‌هنجاری تابع جریان موج (نواحی رنگی، حسب  $10^6$  متر مربع بر ثانیه) و شار فعالیت موج (بردارها، حسب ثانیه و بردارها متر مربع بر مجذور ثانیه) در ماه‌های فوریه خشک. الف-فوریه ۱۹۹۷، ب-فوریه ۲۰۰۱، ج-فوریه ۲۰۰۴ و د-فوریه ۲۰۱۶.

### ۳-۳ تغییرات جت استریم ماه‌های خشک فراگیر

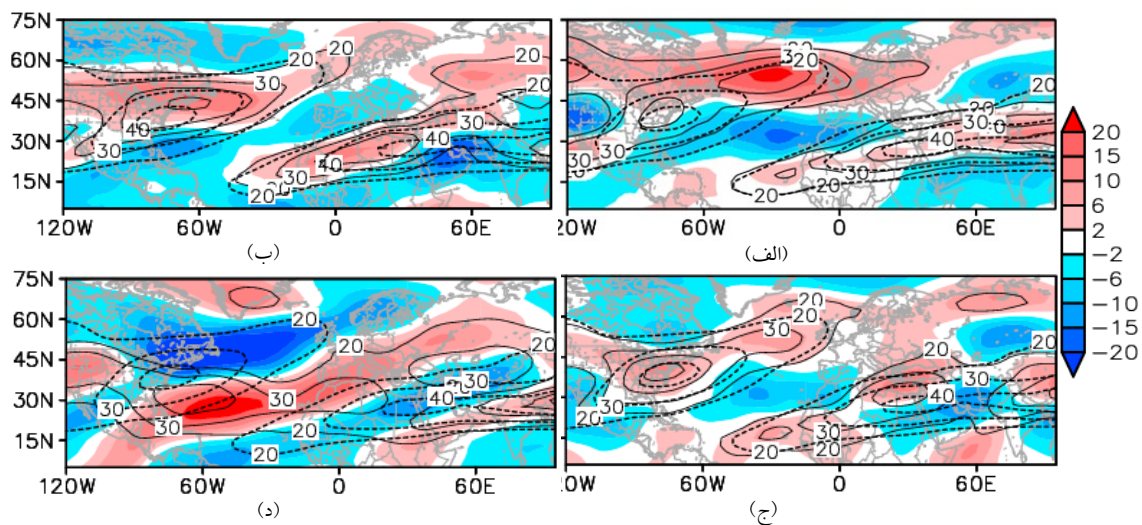
#### ۳-۳-۱- ماه دسامبر

در دسامبر ۲۰۱۱، محور اصلی و پر قدرت جت استریم روی اقیانوس اطلس در تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال، ضمن اینکه محور آن به دو بخش تقسیم شده، و یکی از محورهای آن در شمال اقیانوس اطلس قرار گرفته، به‌طور قابل توجهی نسبت به شرایط اقلیمی آن، در عرض‌های جغرافیایی شمالی‌تر، حدود ۵۰ تا ۶۵ درجه شمالی، بر روی شمال اقیانوس اطلس، بی‌هنجاری مثبت قوی سرعت باد در شمال اطلس مشاهده می‌شود (شکل ۵-۵-الف). علاوه بر این محور جت واقع شده در شمال اطلس بجای داشتن شیب جنوب شرقی-شمال شرقی شرایط اقلیمی آن، چرخشی به صورت ساعتگرد داشته و محور آن تقریباً غربی-شرقی شده و تا شمال اروپا گسترش یافته است گسترش مداری و شمال سوی جت (بی‌هنجاری‌های مثبت منفی) در بخش شمالی (مرکزی) اطلس، فعالیت موج را به عرض‌های شمالی منتقل نموده است. بنابر این جابجایی شمالی موجب محدود شدن فعالیت دینامیکی جت استریم به عرض‌های بالاتر شد و شرایطی را ایجاد کرد که معمولاً با فعالیت سامانه‌های کم‌فشار و بارش‌های شدید در شمال و غرب اروپا همراه است. این الگو همچنین مسیر امواج جوی را منحرف کرده و نفوذ سامانه‌های بارشی به جنوب اروپا، شمال آفریقا و غرب آسیا را کاهش می‌دهد. همچنین در این ماه جت جنب حاره شمال آفریقا بصورت مداری گسترش و تقویت شده و محور این جت به شرق منتقل شده و در بخش شمالی محور جت (روی ایران و افغانستان و تواحی شرقی آن) بی‌هنجاری مثبت سرعت باد (تا حدود ۱۵ متر بر ثانیه) و بخش جنوبی آن (از جنوب دریای سرخ تا روی دریای عمان و شمال اقیانوس هند) بی‌هنجاری منفی سرعت باد (تا حدود ۱۰ متر بر ثانیه) مشاهده می‌شود (شکل ۵-الف).

بی‌هنجاری‌های شار بسیار ضعیف و پراکنده مشاهده می‌شود. این شرایط نشان می‌دهد که انرژی موج راسبی عملاً به ایران نرسیده و هیچ همگرایی دینامیکی مؤثری شکل نگرفته است.

**فوریه ۲۰۰۴ (شکل ۴-ج):** در این دوره، منطقه همگرایی شار فعالیت موج بر روی جنوب اقیانوس اطلس مشاهده می‌شود. با وجود بردارهای شار نسبتاً ضعیف، دو شاخه شمالی و شرقی تا حدی شکل گرفته‌اند. شاخه شمالی عمدتاً در اطلس شمالی همگرا شده و موجب تجمع انرژی موج در عرض‌های بالا شده است. شاخه شرقی نیز تا اروپا و غرب مدیترانه گسترش یافته، اما آرایش مداری بردارها و تضعیف تدریجی آن‌ها بیانگر میرایی انرژی موج پیش از رسیدن به شرق مدیترانه و ایران است. بر روی ایران، واگرایی شار فعالیت موج همراه با بردارهای شار بسیار ضعیف غالب بوده که نشان‌دهنده انتقال ناکارآمد انرژی موج و نبود تمرکز شرایط دینامیکی لازم برای تقویت ناو‌ها و صعود قائم است.

**فوریه ۲۰۱۶ (شکل ۴-د):** در فوریه ۲۰۱۶، دو منطقه واگرایی شار فعالیت موج بسیار قوی بر روی مرکز اقیانوس اطلس و اروپا مشاهده می‌شود. در اطلس، بردارهای شار قوی عمدتاً به سمت شمال شرق هدایت شده و در شمال اروپا به تدریج میرا شده‌اند. بخشی از انرژی موج با مسیر جنوبی‌تر به سمت ترکیه و شرق مدیترانه منتقل شده و در این ناحیه همگرایی و تخلیه انرژی موج رخ داده است. بر روی نواحی جنوبی ایران، علی‌رغم حضور همگرایی نسبی شار فعالیت موج، بردارهای شار بسیار ضعیف بوده و جهت‌گیری آن‌ها به سمت خارج از کشور نشان می‌دهد که انرژی موج پیش از ورود به ایران عمدتاً در شرق مدیترانه تخلیه شده است. در نتیجه، موج وارد شده به کشور فاقد شرایط لازم برای تقویت صعود قائم و بارش بوده است.



شکل ۵. موقعیت مکانی و بی‌هنجاری جت استریم در تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال (پریندهای هم سرعت باد مداری، حسب متر بر ثانیه) در ماه‌های دسامبر خشک. الف-دسامبر ۲۰۱۱، ب-دسامبر ۱۹۹۸، ج-دسامبر ۲۰۱۷ و د-دسامبر ۲۰۱۰. نواحی رنگی شده، بی‌هنجاری سرعت باد مداری نسبت به متوسط اقلیمی آن، پریندهای مشکی مقدار جت در ماه خشک و پریندهای خط چین مقدار جت دوره اقلیمی.

(شکل ۵-ج). بی‌هنجاری مثبت سرعت باد بر روی آمریکا، شمال اقیانوس اطلس و شمال اروپا مشاهده می‌شود (شکل ۵-ج). همزمان، جت جنب حاره ضمن تقویت و گسترش مداری، پهن شدگی محور آن و جابجایی شمال سوی آن بر روی بخش شرقی دریای مدیترانه داشته و همزمان بخش شرقی آن به گونه ای تقویت شده که بر روی ایران افغانستان و عربستان و نواحی مجاور بی‌هنجاری منفی سرعت باد قابل ملاحظه بوده و بنظر می‌رسد این نواحی به گونه تحت تاثیر پراارتفاع جنب حاره ای قرار گرفته‌اند که محور پشته ارتفاعی تقویت شده بر روی ایران قرار گرفته است (شکل ۵-ج). به طور کلی، محور هر دو جت استریم نسبت به میانگین بلندمدت به عرض‌های شمالی‌تر انتقال یافته و جابجایی شمال سوی جت جنب حاره، بیانگر تقویت پشته ارتفاعی و مختل شدن فعالیت ناوه مدیترانه جهت واداشت صعود هوا، تشکیل ابر و بارش بر فراز ایران را مختل کرده است، که زمینه‌ساز یک دوره خشک فراگیر بوده است.

در دسامبر ۱۹۹۸، نقشه جت استریم تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال نشان‌دهنده تقویت جریان غربی بر فراز شمال غربی اقیانوس اطلس و شمال اروپا بود و بی‌هنجاری مثبت سرعت جت استریم در این مناطق به وضوح مشاهده می‌شود (شکل ۵-ب). محور جت نسبت به میانگین بلندمدت ضمن چرخش ساعتگردی، به سمت شمال جابجا شده و بطوری که در بخش شمالی (جنوبی) محور اقلیمی جت اطلس، بی‌هنجاری‌های مثبت (منفی) رخ داده است. محور جت جنب حاره شمال آفریقا ضمن چرخش پادساعتگردی به سمت غرب موقعیت اقلیمی خود جابجا شده بصورت مداری گسترش و تقویت شده و محور این جت به شرق منتقل شده شده است. بر روی ایران ضمن کاهش قابل ملاحظه سرعت باد، منحنی‌های هم سرعت باد بصورت پشته درآمده است.

نقشه بی‌هنجاری سرعت جت استریم در دسامبر ۲۰۱۷ نشان می‌دهد که جت اطلس که هسته اصلی آن در سواحل جنوب شرقی آمریکا قرار گرفته نسبت به شرایط اقلیمی آن قوی‌تر و گسترش شمال شرقی داشته است

و ارتباط آن‌ها بر روی ایران قطع می‌شود که احتمالاً ناشی از تقویت و گسترش پرفشار جنب‌حاره‌ای بر فراز ایران است. در الگوی سوم، محور جت با چرخش ساعتگرد نسبت به موقعیت اقلیمی خود به سمت جنوب شرق جابجا شده و امتداد آن تا شمال غرب آفریقا تداوم می‌یابد؛ هم‌زمان، جت جنب‌حاره‌ای نیز به سمت جنوب و شرق منتقل شده و به جت غرب اقیانوس آرام متصل می‌شود.

### ۳-۳-۲ ماه ژانویه

در ژانویه ۲۰۲۱، هسته اصلی جت اطلس ضمن تقویت قابل توجه، دچار چرخش ساعتگردی شد؛ به گونه‌ای که افزایش سرعت بادهای غربی در بخش‌های جنوب شرقی و مرکزی اطلس و تداوم آن تا اروپای مرکزی مشاهده می‌شود، در حالی که هم‌زمان کاهش محسوسی در سرعت باد بر فراز سواحل شرقی کانادا و بخش‌های شمالی اطلس رخ داده است (شکل ۶-الف). علاوه بر این، تقویت و جابجایی شرق‌سوی جت جنب‌حاره‌ای منجر به تضعیف بادهای غربی بر فراز ایران شده است (شکل ۶-الف). این آرایش جتی با تقویت پشته ارتفاعی در غرب آسیا همراه بوده و از نفوذ سامانه‌های بارشی عرض‌های میانه به کشور جلوگیری کرده است؛ در نتیجه، شرایط خشک و کم‌بارش در گستره وسیعی از ایران تشدید شده است.

در ژانویه ۱۹۹۵، محور جت اطلس به صورت دو شاخه مجزا سازمان‌دهی شده است. شاخه نخست، با شدت کمتر، در شمال موقعیت اقلیمی خود مستقر بوده و با چرخش ساعتگردی، آرایشی عمدتاً غربی-شرقی یافته است؛ در حالی که شاخه دوم در بخش‌های جنوبی و جنوب‌شرقی موقعیت اقلیمی جت اطلس قرار گرفته و ضمن پهن‌شدگی، چرخش ساعتگردی آشکاری را نشان می‌دهد (شکل ۶-ب). در این دوره، استریم مستقر بر فراز شمال ایران (حدود عرض‌های ۳۵ تا ۴۰ درجه شمالی) در

در دسامبر ۲۰۱۰، الگوی جت استریم نشان‌دهنده جابجایی، چرخش ساعتگردی قابل ملاحظه و گسترش شرق‌سوی جت اطلس و گسترش آن از نواحی مرکزی اطلس شمالی تا شمال ایران می‌باشد (شکل ۵-د). این گسترش شرق‌سوی جت اطلس در عرض‌های جنب‌حاره سبب جابجایی قابل ملاحظه جت جنب‌حاره‌ای به شرق موقعیت اقلیمی خود شده است (شکل ۵-د).

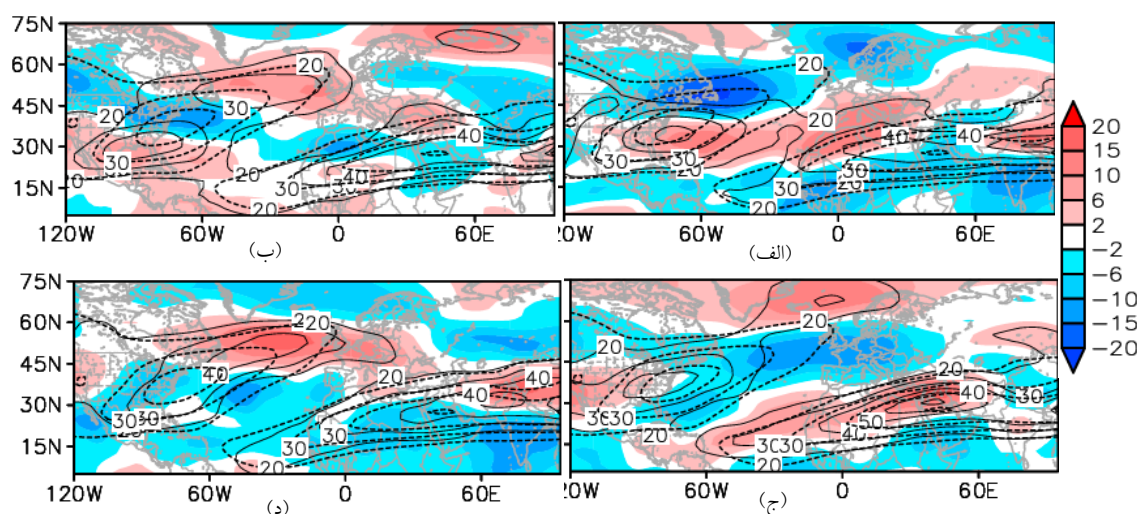
در دسامبرهای همراه با خشکی فراگیر، جت شمال آفریقا به‌طور معناداری تقویت می‌شود. در شرایطی که امتداد جت اطلس به شمال غرب آفریقا محدود گردد، این جت با تغییر آرایش مکانی خود به سمت غرب کشیده شده و از نواحی ساحلی صحرای غربی و موریتانی عبور کرده و در نهایت به جت غرب اقیانوس آرام متصل می‌شود. با این حال، در اغلب این رخدادها، شدت جت بر فراز ایران و غرب آسیا کاهش یافته و به همین دلیل پیوستگی دینامیکی میان جت شمال آفریقا و جت غرب اقیانوس آرام بر روی این نواحی برقرار نمی‌شود. پیامد این آرایش جتی، غلبه بی‌هنجاری منفی باد مداری بر فراز شمال اقیانوس هند، دریای عمان، شبه‌جزیره عربستان، دریای سرخ، سودان و بخش وسیعی از ایران است؛ در مقابل، در عرض‌های بالاتر این مناطق و به‌ویژه شمال غرب اقیانوس هند، تقویت بادهای غربی مشاهده می‌شود.

تحلیل چهار مورد از دسامبرهای خشک فراگیر نشان می‌دهد که سامانه‌های جتی الگوهای متمایزی را تجربه کرده‌اند. در الگوی نخست، جت اطلس به عرض‌های شمالی‌تر از موقعیت اقلیمی خود جابجا شده و هم‌زمان جت شمال آفریقا از سواحل موریتانی کشیده شده و به جت غرب اقیانوس آرام متصل می‌شود. الگوی دوم با تضعیف شدید بادهای غربی بر فراز خاورمیانه و تقویت هم‌زمان آن‌ها بر شمال غرب اقیانوس هند و اروپا مشخص می‌شود؛ در این حالت، جت‌های آفریقا و آرام پهن شده

بی‌هنجاری مثبت بسیار قوی بر فراز غرب آمریکای شمالی متمرکز بود که نشان‌دهنده حضور جت استریمی قدرتمند و پایدار در این ناحیه است. به‌طور هم‌زمان، جت استریم جنب‌حاره‌ای بر روی خاورمیانه و ایران تقویت شده و فعالیت آن به‌وضوح افزایش یافته است. شاخص‌ترین ویژگی این دوره، جابجایی محور جت‌ها به عرض‌های شمالی‌تر از نرمال است که منجر به انتقال عمده انرژی موجی و جریان‌های غربی به نواحی شمالی ایران و پیرامون خاورمیانه شده است.

واقع‌امتناد جت استریم جنب‌حاره‌ای تقویت‌شده‌ای بود که هسته اصلی آن در عرض‌های جنوبی‌تر، به‌ویژه جنوب ایران، قرار داشت. این الگو بیانگر فعالیت و گسترش شمال‌سوی جت جنب‌حاره‌ای و استقرار جت استریم قطبی در عرض‌های بالاتر از حد نرمال است؛ شرایطی که از نظر دینامیکی مشابه ژانویه ۲۰۲۱، اما با شدت کمتر، ارزیابی می‌شود.

در ژانویه ۲۰۱۷، الگوی جت استریم‌ها تفاوت محسوسی با سال‌های پیشین داشت. در این دوره، یک



شکل ۶. موقعیت مکانی و بی‌هنجاری جت استریم در تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال (پربندهای هم سرعت باد مداری، حسب متر بر ثانیه) در ماه‌های ژانویه خشک، الف-ژانویه ۲۰۲۱، ب-ژانویه ۱۹۹۵، ج-ژانویه ۲۰۱۷ و د-ژانویه ۲۰۱۸. نواحی رنگی شده، بی‌هنجاری سرعت باد مداری نسبت به متوسط اقلیمی آن، پربندهای مشکی مقدار جت در ماه خشک و پربندهای خط چین مقدار جت دوره اقلیمی.

جنب‌حاره‌ای، مهم‌ترین سازوکار دینامیکی حاکم بر شکل‌گیری شرایط خشک و محدودیت ورود سامانه‌های بارشی به ایران بوده است.

به‌طور کلی، در دوره‌های خشک فراگیر ماه ژانویه، آرایش جت‌ها از چند الگوی غالب تبعیت می‌کند که همگی بیانگر بازآرایی مکانی و شدت سامانه‌های جتی در مقیاس نیم‌کره‌ای هستند. در یکی از این الگوها، جت اطلس به‌طور محسوسی تقویت شده و همراه با چرخش ساعتگردی، هسته بیشینه بادهای غربی آن به عرض‌های

الگوی ژانویه ۲۰۱۸ تا حد زیادی مشابه ژانویه ۲۰۱۷ بوده است، به‌طوری که محور جت استریم جنب‌حاره‌ای به سمت عرض‌های شمالی گسترش یافته و به‌صورت مداری بخش عمده‌ای از ایران را دربر گرفته است. هم‌زمان، جت استریم قطبی نسبت به میانگین بلندمدت تقویت شده و گستره مکانی آن به عرض‌های شمالی‌تر افزایش یافته است. این الگوها نشان می‌دهد که در چنین دوره‌هایی، تضعیف نفوذ مؤثر جت استریم قطبی به عرض‌های میانی پایین‌تر و گسترش و تقویت جت استریم

سوی شمال جابجا می‌شود، باشد. این شرایط که با تضعیف انتقال رطوبت و کاهش فعالیت سامانه‌های بارشی، نقش تعیین‌کننده‌ای در تداوم و تشدید شرایط خشک فراگیر منطقه‌ای در ماه ژانویه ایفا می‌کند.

### ۳-۳-۳ ماه فوریه

در فوریه ۱۹۹۷، بررسی نقشه بی‌هنجاری سرعت جت‌استریم در تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال نشان می‌دهد که هر دو سامانه اصلی جت‌استریم نیمکره شمالی به‌طور هم‌زمان تقویت شده‌اند. جت‌استریم جنب‌حاره‌ای بی‌هنجاری‌های مثبت بسیار شدید بر روی عرض‌های ۲۰ تا ۳۵ درجه شمالی، به‌ویژه بر فراز خاورمیانه، مستقر بوده و محور آن با جابه‌جایی قابل توجه به سمت شمال‌شرق، دقیقاً از روی خلیج فارس تا شرق افغانستان امتداد یافته است (شکل ۷-الف). سرعت این جت در منطقه به‌طور چشمگیری فراتر از میانگین بلندمدت بوده است. در عرض‌های بالاتر، جت اطلس نیز با چرخش ساعت‌گرد محور خود و گسترش در راستای شمال‌شرقی موقعیت اقلیمی، به‌گونه‌ای آرایش یافته که یک جریان تقریباً زونال از شرق کانادا تا بریتانیا شکل گرفته است؛ به‌طوری‌که بیشینه بی‌هنجاری‌های مثبت بادهای غربی در غرب انگلستان به مقادیری بیش از ۲۰ متر بر ثانیه رسیده است (شکل ۷-الف). در فوریه ۲۰۰۱ (شکل ۷-ب)، جت اطلس با چرخش ساعت‌گرد محور خود حدود ۱۰ متر بر ثانیه تقویت شده است. هم‌زمان، جت‌استریم جنب‌حاره‌ای نیز گسترش یافته، به‌گونه‌ای که بخش غربی آن تا روی اقیانوس اطلس و نواحی غربی موریتانی امتداد پیدا کرده و محور کشیده آن از شمال‌غرب آفریقا تا شرق پاکستان قرار گرفته است.

در فوریه ۲۰۰۴ (شکل ۷-ج)، محور جت‌استریم جنب‌حاره‌ای جابه‌جایی محسوسی به سمت شرق نسبت به موقعیت اقلیمی خود نشان می‌دهد، به‌طوری‌که هسته

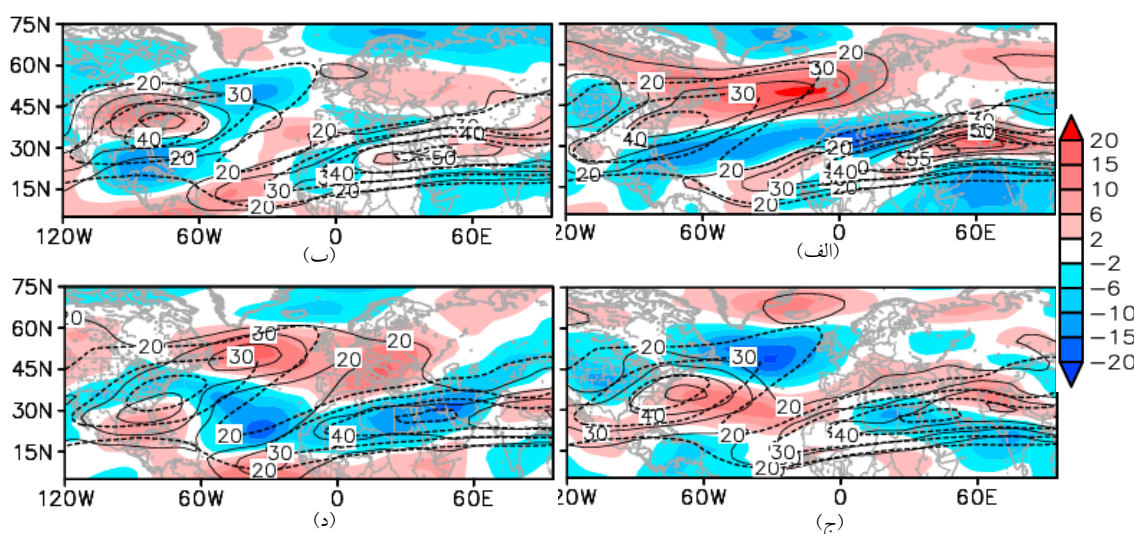
شمالی‌تر منتقل می‌شود؛ در چنین شرایطی، جت جنب‌حاره‌ای تضعیف شده و جت شمال آفریقا دچار پهن‌شدگی و جابجایی شمال‌سوی می‌گردد که پیامد آن کاهش بادهای غربی بر فراز خاورمیانه است. الگوی دیگر با دوشاخه‌شدن جت اطلس مشخص می‌شود؛ به‌گونه‌ای که هر دو شاخه دارای چرخش ساعتگردی‌اند، اما یکی با شدت کمتر در شمال‌شرق موقعیت اقلیمی خود، از شمال اطلس تا بریتانیا، مستقر می‌شود و شاخه دیگر در جنوب موقعیت اقلیمی، عمدتاً بر نیمه جنوبی آمریکای شمالی، گسترش می‌یابد. در این حالت، جت جنب‌حاره‌ای بر فراز ایران تضعیف و پهن شده و به‌صورت یک پشته ارتفاعی عمل می‌کند که مانع نفوذ سامانه‌های بارشی عرض‌های میانه به کشور می‌شود.

در الگوی سوم، جت اطلس دچار جابجایی غرب‌سوی شده و هم‌زمان جت جنب‌حاره‌ای با جابجایی شمال‌سوی تقویت می‌گردد؛ به‌طوری‌که امتداد آن تا غرب موریتانی و بخش‌هایی از جنوب اطلس شمالی قابل ردیابی است. الگوی چهارم نیز با جابجایی شمال‌سوی و چرخش ساعتگردی جت اطلس شناخته می‌شود، به‌نحوی که بیشینه افزایش سرعت بادهای غربی از شمال اطلس تا شمال‌غرب اروپا متمرکز شده و در مقابل، جت جنب‌حاره‌ای نسبت به موقعیت اقلیمی خود به سمت شرق جابجا می‌شود. این بازآرایی‌های جتی در مجموع باعث تمرکز فعالیت دینامیکی در عرض‌های بالاتر و کاهش نفوذ مؤثر جریان‌های غربی به عرض‌های میانی پایین‌تر، به‌ویژه بر فراز ایران، می‌شوند.

وجه مشترک تمامی این الگوها، تضعیف بادهای غربی بر فراز خلیج فارس، دریای عمان و دریای سرخ، به‌ویژه در محدوده راهبردی تنگه باب‌المندب، و حاکمیت بی‌هنجاری منفی سرعت باد در این نواحی است، که می‌تواند یک نوع بلاکینگ که همراه تضعیف شدید بادهای غربی، به ویژه وقتی جت قطبی خیلی به

بخشی از جت بر فراز اطلس باقی مانده است. در مقابل، جت اطلس در عرض‌های پایین‌تر مستقر شده و دو هسته با بی‌هنجاری مثبت شدید در طول‌های جغرافیایی حدود ۴۰ درجه غربی و ۲۰ درجه شرقی شکل گرفته‌اند. این آرایش دو هسته‌ای منجر به تقویت یک پشته فشار بر روی ایران و خاورمیانه شده و با ایجاد فرونشینی گسترده هوا، نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری دوره خشک این ماه ایفا کرده است.

اصلی آن بر روی پاکستان مستقر شده است. در این شرایط، جت بر فراز ایران پهن شده و به شکل یک پشته دینامیکی ظاهر شده است. جت اطلس نیز با چرخش ساعت‌گرد محور خود حدود ۱۰ متر بر ثانیه تقویت شده و هم‌زمان اندکی به سمت شرق کشیده شده است (شکل ۷-ج). در فوریه ۲۰۱۶ (شکل ۷-د)، جت استریم جنب‌حاره‌ای ضمن تضعیف نسبی، به سمت شرق جابه‌جا شده است؛ هرچند در ناحیه ورودی آن، خط هم‌سرعت ۳۰ متر بر ثانیه بر روی موریتانی از بدنه اصلی جدا شده و



شکل ۷. موقعیت مکانی و بی‌هنجاری جت استریم در تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال (پربندهای هم‌سرعت باد مداری، حسب متر بر ثانیه) در ماه‌های فوریه خشک. الف-فوریه ۱۹۹۷، ب-فوریه ۲۰۰۱، ج-فوریه ۲۰۰۴ و د-فوریه ۲۰۱۶. نواحی رنگی شده، (بی‌هنجاری سرعت باد مداری نسبت به متوسط اقلیمی آن، پربندهای مشکی مقدار جت در ماه خشک و پربندهای خط چین مقدار جت دوره اقلیمی).

دسامبر مرطوب‌ترین (شکل ۸-الف)، یک منطقه واگرایی در عرض‌های میانه اقیانوس اطلس مشاهده می‌شود که امواج قوی را به سمت جنوب شرق اطلس گسیل می‌کند. این امواج در غرب مدیترانه و شمال غرب آفریقا تقویت شده و بردارهای شار فعالیت موج در نواحی جنوب شرق، شرق و شمال شرق آن واگرا می‌شوند. بخشی از این امواج بر روی ایران و جنوب غرب آسیا همگرا شده و ضمن تقویت دامنه موج، یک منطقه همگرایی شار فعالیت موج ایجاد می‌کند (شکل ۸-الف).

#### ۴ نمونه‌ای از شارفعالیت موج و بی‌هنجاری جت‌ها در ماه‌های تر

در این مطالعه، شارفعالیت موج و بی‌هنجاری جت‌ها در ماه‌های مرطوب (دسامبر، ژانویه و فوریه) نیز بررسی شده است. شکل (۸) نمونه‌ای کلی از این الگوها را برای مقایسه ارائه می‌دهد.

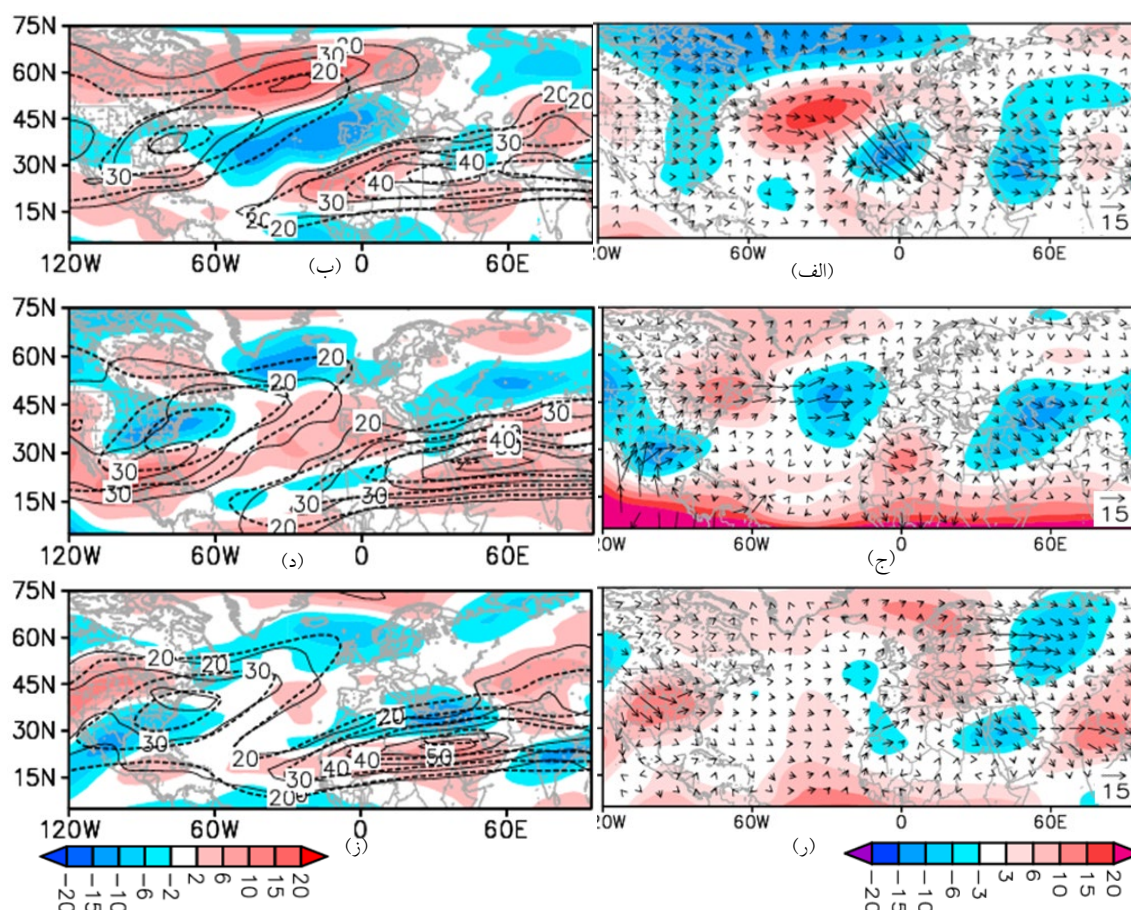
دسامبر مرطوب‌ترین (۲۰۰۴): در همه ماه‌های دسامبر ترسالی دوره مورد مطالعه، همگرایی شار فعالیت موج بر روی ایران و جنوب غرب آسیا غالب بوده است. در

شده است. جت جنب حاره در غرب آسیا باریک تر، در نیمه شرقی دریای مدیترانه پهن تر و محور آن در جنوب ایران به دو بخش شرقی و غربی تقسیم شده که جابجایی غرب سوی آن قابل توجه است (شکل ۸-ب). مقایسه الگوی جت ها در دسامبر خشک ترین (شکل ۵-الف) و مرطوب ترین (شکل ۸-ب) نشان می دهد که جت قطبی اطلس در شرایط مرطوب باریک تر و با چرخش پادساعت گرد همراه است، در حالی که جت جنب حاره در دسامبر خشک ضمن تقویت و گسترش، در شرایط ترسالی با جابجایی غرب سو، باریک تر شده، در غرب آسیا تضعیف و با چرخش ساعت گرد اندک همراه است.

این فرآیند می تواند ناوه شرق مدیترانه را تقویت کرده و شرایط مساعد برای بارش زایی فراهم آورد.

در مقابل، در دسامبر خشک ترین (شکل ۲-الف)، منطقه واگرایی شار بر روی اطلس غالب است و انتشار امواج از این منطقه عمدتاً به سمت شمال (و با شدت کمتر به جنوب شرق) جهت گیری کرده اند. انتشار امواج به سمت مدیترانه و بخش شرقی مشاهده نمی شود و واگرایی شار فعالیت موج بر غرب آسیا حاکم است (شکل ۲-الف).

در دسامبر مرطوب ترین، جت قطبی اطلس نسبت به شرایط اقلیمی باریک تر و به سمت شمال شرقی گسترده



شکل ۸. ستون سمت راست: بی هنجاری تابع جریان موج (نواحی رنگی، حسب  $10^6$  متر مربع بر ثانیه) و شار فعالیت موج (بردارها، حسب ثانیه و بردارها متر مربع بر مجذور ثانیه) و ستون سمت چپ: موقعیت مکانی و بی هنجاری جت استریم در تراز  $250$  هکتوپاسکال (پریندهای هم سرعت باد مداری، حسب متر بر ثانیه) در ماه های تر. الف و ب - دسامبر ۲۰۰۴، ج و د - ژانویه ۱۹۹۸، ر و ز - فوریه ۲۰۱۷.

منطقه همگرایی بسیار قوی شار فعالیت موج در شمال اطلس و دو چشمه موج - یکی در جنوب غربی اطلس و دیگری در شرق اطلس بر اروپا - شکل گرفته است. بردارهای شار در این چشمه‌ها عمدتاً به سمت شمال و جنوب جهت‌گیری کرده‌اند.

در فوریه مرطوب (شکل ۸-۸): شار فعالیت موج در اطلس شمالی به طور کلی ضعیف بوده و همگرایی ضعیف شار در مناطق مرکزی و شرقی آن غالب است. بر اروپای مرکزی چشمه موجی قرار دارد که امواجی را به سمت نواحی شرقی مدیترانه گسیل می‌کند و مرکز همگرایی شار در این نواحی ایجاد می‌نماید. جذب انرژی امواج در شرق مدیترانه می‌تواند دامنه امواج همدیدی - از جمله ناوه شرق مدیترانه - را تقویت کند؛ در حالی که در دوره‌های خشک، واگرایی غالب شار مانع از این تقویت می‌شود.

در فوریه خشک (شکل ۷-الف): جت قطبی اطلس گسترش چشمگیری داشته به طوری که بخش چرخندی خروجی آن در شمال اطلس قرار گرفته است. جت جنب حاره با بی‌هنجاری‌های مثبت بسیار شدید بر ایران و خاورمیانه، به صورت پشته بر این نواحی ظاهر شده است. در مقابل، در فوریه تر (شکل ۸-ز): جت قطبی اطلس محدود شده و محور آن با گردش ساعت‌گرد نسبت به شرایط اقلیمی همراه است. جت جنب حاره ضمن باریک شدن در غرب آسیا، محور آن نسبت به موقعیت اقلیمی به سمت جنوب جابجا شده است.

### نتیجه‌گیری

این پژوهش با تمرکز بر تحلیل همزمان انتشار و همگرایی امواج راسبی و تغییرات میدان جت استریم، نشان داد که دوره‌های خشک فراگیر زمستانه ایران عمدتاً ریشه در بازآرایی دینامیکی سامانه‌های تراز بالای وردسپهر در مقیاس بزرگ دارند. نتایج مبتنی بر شاخص نمره

ژانویه مرطوب‌ترین: منطقه واگرایی شار در جنوب شرقی کانادا قرار دارد و امواج شرق‌سوی گسیلی از آن، پس از تقویت بر روی اطلس، به بخش شرقی اطلس رسیده و منطقه همگرایی شار فعالیت موج ایجاد می‌کنند. بخشی از این امواج به شرق و جنوب شرق منتقل شده است (شکل ۸-ج). همچنین، ناحیه واگرایی شار در شمال غربی آفریقا، امواج شرقی و شمال شرقی را گسیل می‌کند که همراه با امواج ضعیف انتقالی از شرق اطلس، در جنوب غربی آسیا همگرایی شار فعالیت موج و دریافت انرژی ایجاد می‌نماید. این امر دامنه امواج همدیدی را - به ویژه ناوه شرقی مدیترانه - تقویت کرده و شرایط بارش‌زایی در شرق مدیترانه و ایران را مساعد می‌سازد.

در مقابل، در ژانویه خشک (شکل ۳-ب)، گسیل و بازتاب امواج بین چشمه موج قوی بر کانادا و چاهک موج در جنوب غرب اطلس رخ داده و امواجی به سمت اروپا گسیل می‌شود. این فرآیند همگرایی قوی شار فعالیت موج بر اروپا و واگرایی وسیع بر غرب آسیا ایجاد می‌کند و ظاهراً پشته (ناوه) ارتفاعی بر اروپا (غرب آسیا) را تقویت نموده که منجر به کاهش چشمگیر بارش در غرب آسیا می‌گردد.

ژانویه مرطوب‌ترین (شکل ۸-د): محور جت قطبی اطلس به سمت جنوب نسبت به موقعیت اقلیمی جابجا شده است. محور جت جنب حاره نیز ضمن جابجایی به سمت جنوب شرق، در نیمه شرقی دریای مدیترانه باریک‌تر از شرایط اقلیمی شده است. در مقابل، در ژانویه خشک‌ترین (شکل ۶-الف): محور جت قطبی اطلس محدودتر و با چرخش ساعت‌گرد نسبت به موقعیت اقلیمی مشاهده می‌شود. محور جت جنب حاره نیز تقویت شده و در نواحی مدیترانه پهن‌تر گردیده است.

فوریه خشک (شکل ۴-الف): واگرایی شار در نواحی مرکزی اطلس شمالی غالب است، در حالی که یک

نشان داد که الگوهای مرطوب با همگرایی شار فعالیت موج بر ایران و جنوب غرب آسیا، انتشار امواج از مناطق واگرایی اطلس و آفریقا، و جابجایی غرب سو/جنوب سوی جت‌ها (باریک‌تر شدن جت قطبی اطلس و تضعیف جت جنب حاره) همراه است؛ این فرآیند ناوه شرق مدیترانه را تقویت و شرایط بارش‌زایی را مساعد می‌سازد. در مقابل، شرایط خشک با واگرایی غالب شار بر غرب آسیا، گسترش و چرخش ساعت‌گرد جت قطبی اطلس، و تقویت/پهن شدن جت جنب حاره (به صورت پشته بر خاورمیانه) مشخص می‌شود که مانع تقویت ناوه و منجر به کاهش بارش می‌گردد.

هرچند شدت و موقعیت چشمه‌ها/چاه‌های موج و آرایش جت‌ها در ماه‌های مختلف فصل سرد متفاوت است، پیامد دینامیکی نهایی در دوره‌های خشک، کاهش تغذیه انرژی موجی مؤثر بر ایران و تضعیف پایدار سامانه‌های بارشی است. بیشترین اختلال در انتقال انرژی موجی در ژانویه و دسامبر مشاهده شد، در حالی که در فوریه، علی‌رغم تقویت مقطعی امواج، تخلیه انرژی عمدتاً در اروپا یا شرق مدیترانه رخ می‌دهد.

در مجموع، خشکی‌های فراگیر زمستانه ایران بازتاب ناهم‌مکانی سیستماتیک این کشور با مسیرهای اصلی انتشار و همگرایی امواج راسبی و نواحی فعال جت‌استریم است. تحلیل همزمان شار فعالیت موج راسبی و میدان جت‌استریم تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال، چارچوبی فیزیکی و کارآمد برای درک و پیش‌بینی این پدیده فراهم می‌آورد. این الگوهای دینامیکی، که اغلب چند هفته پیش از استقرار خشکی‌های پایدار قابل شناسایی هستند، می‌توانند به عنوان شاخص‌های هشدار زودهنگام در سامانه‌های پیش‌بینی فصلی عمل کنند و نقش مؤثری در مدیریت منابع آب و کاهش ریسک خشکسالی زمستانه ایران ایفا نمایند.

استاندارد Z و تحلیل داده‌های بازتحلیل NCEP/NCAR بیانگر آن است که شدیدترین خشکی‌های زمستانه (نظیر ژانویه ۲۰۲۱، فوریه ۱۹۹۷ و دسامبر ۲۰۱۱) با الگوهای منسجم و تکرارشونده‌ای از اختلال در انتقال انرژی موجی و تغییر آرایش جت‌استریم‌ها همراه بوده‌اند.

تحلیل شار فعالیت موج راسبی در تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال نشان می‌دهد که در تمامی دوره‌های خشک فراگیر، ایران به‌طور سیستماتیک خارج از کانون‌های اصلی همگرایی انرژی موج قرار گرفته است. چشمه‌ها و چاه‌های فعال موج عمدتاً بر روی اقیانوس اطلس شمالی، اروپا و در برخی موارد شرق مدیترانه متمرکز بوده و انرژی موجی یا پیش از رسیدن به خاورمیانه دچار میرایی شده، یا مسیر انتقال آن به عرض‌های بالاتر منحرف شده است. در نتیجه، ایران غالباً در ناحیه واگرایی شار یا در مسیر گذر سریع و کم‌انرژی امواج راسبی قرار داشته است، شرایطی که مانع از تقویت صعود دینامیکی، توسعه ناپایداری‌های سینوپتیکی و شکل‌گیری بارش مؤثر می‌شود.

از دیدگاه دینامیک جت‌استریم، یافته‌ها نشان می‌دهد که وجه مشترک تمامی دوره‌های خشک مورد بررسی، جابجایی شمال‌سوی و چرخش ساعت‌گردی جت‌استریم قطبی (اطلس) و تمرکز بیشینه بادهای غربی در عرض‌های بالاتر است. این جابه‌جایی، مسیر اصلی هدایت و تقویت امواج راسبی را از عرض‌های میانی به نواحی شمالی منتقل کرده و ایران را در پایین‌دست غیرفعال جت قطبی قرار داده است. هم‌زمان، تقویت و گسترش مداری جت‌استریم جنب‌حاره‌ای بر فراز خاورمیانه و ایران، با کاهش برهم‌کنش موج-جریان و محدود شدن مؤلفه‌های نصف‌النهاری جریان، به استقرار پشته‌های ارتفاعی پایدار و فرونشینی گسترده هوا منجر شده است.

مقایسه شار فعالیت موج و بی‌هنجاری جت‌استریم در ماه‌های بسیار خشک و مرطوب دسامبر، ژانویه و فوریه

- N. Y., Mesbahzadeh, T., & Soleimani Sardoo, F. (2021). Synoptic–dynamic patterns affecting Iran’s autumn precipitation during ENSO phase transitions. *Climate*, 9(7), 106.
- Chang, E. K. M., & Orlanski, I. (1994). On energy flux and group velocity of waves in baroclinic flows. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 51(16), 3823–3828.
- Danielson, R. E., Gyakum, J. R., & Straub, D. N. (2006). Downstream baroclinic development: A case study of diagnoses of eddy energy and wave activity. Part II: Over the North Pacific Ocean. *Monthly Weather Review*, 134(5), 1549–1567.
- Esler, J. G., & Haynes, P. H. (1999). Baroclinic wave breaking and internal variability of the tropospheric circulation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 56(24), 4014–4031.
- Huang, C. Y. S., & Nakamura, N. (2017). Implications for the Northern Hemisphere wintertime wave activity budgets over the Atlantic and Pacific: Local storm tracks. *Geophysical Research Letters*, 44(11), 5673–5682.
- Hurrell, J. W. (1995). Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation. *Science*, 269(5224), 676–679.
- Hurrell, J. W., & van Loon, H. (1997). Decadal variations in climate associated with the North Atlantic Oscillation. *Climatic Change*, 36(3–4), 301–326.
- Martyn, D. (1992). *Climates of the world* (1–435). PWN/Elsevier.
- Nasr-Esfahany, M. A., Ahmadi-Givi, F., & Mohebalhojeh, A. R. (2011). An energetic view of the relation between the Mediterranean storm track and the North Atlantic Oscillation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(658), 749–756.
- Orlanski, I., & Katzfey, J. J. (1991). The life cycle of a cyclone waves in the Southern Hemisphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 48(16), 1972–1998.
- Orlanski, I., & Sheldon, J. (1993). A case of downstream baroclinic development over western North America. *Monthly Weather Review*, 121(9), 2929–2950.
- Plumb, R. A. (1986). Three-dimensional propagation of transient quasi-geostrophic eddies and its relationship with the eddy forcing of the time–mean flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 43(16), 1657–1673.
- منابع**
- اسعدی، ع.، احمدی گیوی، ف.، قادر، س. و محب الحجه، ع. (۱۳۹۰). بررسی دینامیک مسیر توفان مدیترانه از دیدگاه شار فعالیت موج راسبی، مجله ژئوفیزیک ایران، ۵(۴)، ۳۱–۴۵.
- بهرامی، ف.، رنجبر سعادت آبادی، ع.، مشکوتی، ا.ح و کمالی، غ.ع. (۱۳۹۷). مطالعه توفان‌های اقیانوس اطلس و دریای مدیترانه بر مبنای شار فعالیت موج راسبی در دوره‌های خشک و تر بهاره در ایران. *هواشناسی و علوم جو*، ۱(۱)، ۱–۱۲.
- رضائیان، م.، محب الحجه، ع.، احمدی گیوی، ف و نصر اصفهانی، م.ع.، ۱۳۹۲. تحلیل آماری-دینامیکی رابطه بین مسیر توفان مدیترانه و نوسان اطلس شمالی بر مبنای فریافت فعالیت موج، مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۴۰، شماره ۲، ۱۳۹۳، ص ۱۳۹–۱۵۲.
- Asaadi, A., Ahmadi-Givi, F., Ghader, S., & Moheb-Al-Hojjeh, A. (2011). Dynamics of the Mediterranean storm track from the perspective of Rossby wave activity flux. *Iranian Journal of Geophysics*, 5(4), 31–45. (in persian).
- Bahrami, F., Ranjbar Saadatabadi, A., Meshkooti, A. H., & Kamali, G. A. (2018). A study of North Atlantic and Mediterranean storms based on Rossby wave activity flux during wet and dry spring periods in Iran. *Meteorology and Atmospheric Sciences*, 1(1), 1–12. (in Persian)
- Rezaeian, M., Moheb-Al-Hojjeh, A., Ahmadi-Givi, F., & Nasr-Esfahani, M. A. (2013). Statistical–dynamical analysis of the relationship between Mediterranean storm track and the North Atlantic Oscillation based on wave activity approach. *Journal of Earth and Space Physics*, 40(2), 139–152. (in Persian)
- Bahrami, F., Ranjbar Saadatabadi, A., Meshkateh, A. H., & Kamali, G. A. (2020). The impact of ENSO phase transition on the atmospheric circulation, precipitation and temperature in the Middle East autumn. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 56(3), 439–453.
- Bahrami, F., Ranjbar Saadatabadi, A., Krakauer,

- Rodwell, M. J., Rowell, D. P., & Folland, C. K. (1999). Oceanic forcing of the North Atlantic Oscillation and European climate. *Nature*, 398(6725), 320–323.
- Takaya, K., & Nakamura, H. (2001). A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 58(5), 608–627.
- Vanneste, J., & Shepherd, T. G. (1998). The group-velocity property for conservation laws. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 55(7), 1063–1068.

## Dynamical analysis of rossby wave propagation, convergence, and jet stream variability during widespread winter dry periods in Iran

Abbas Ranjbar Saadat Abadi<sup>1\*</sup>, Faranak Bahram<sup>2</sup> and Ebrahim Fatahi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Professor, Atmospheric Hazard Early Warning Group, Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science (RIMAS), Tehran, Iran

<sup>2</sup> Ph.D. in Meteorology, Atmospheric Hazard Early Warning Group, Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science (RIMAS), Tehran, Iran

<sup>3</sup> Professor, Transportation Meteorology Research Group, Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science (RIMAS), Tehran, Iran

(Received: 09 February 2025, Accepted: 04 April 2026)

### Summary

Understanding the dynamical mechanisms responsible for widespread winter droughts in Iran is essential for improving seasonal precipitation predictability and supporting effective drought risk management. Located downstream of the North Atlantic–Mediterranean wave corridor, Iran’s winter precipitation is highly sensitive to variations in Rossby wave propagation and upper-tropospheric jet stream dynamics. This study investigates how disruptions in Rossby wave energy transmission and changes in jet stream configuration contribute to the onset and persistence of widespread winter dry conditions across Iran.

Rossby wave pathways, energy convergence, and intensity were examined using the wave activity flux (WAF) formulation of Takaya and Nakamura (2001). The spatial structure, intensity, and latitudinal displacement of the 250-hPa jet stream were analyzed to assess its role in modulating wave–mean flow interaction and large-scale vertical motion. The analysis focuses on December, January, and February.

Observed monthly precipitation data from 179 stations across Iran were used to identify extreme dry conditions. For each winter month, four representative dry episodes were selected based on standardized precipitation Z-scores, enabling consistent comparison of Rossby wave behavior and circulation patterns. WAF analysis reveals that during all selected dry periods, downstream Rossby wave energy transfer from the North Atlantic and Mediterranean toward Iran was substantially disrupted. Two dominant mechanisms were identified. First, Rossby wave packets weakened and dissipated along their eastward path, reducing amplitude and dynamical influence before reaching West Asia. Second, over Iran, WAF vectors were weak, incoherent, and non-convergent, indicating insufficient wave energy accumulation to induce upper-level divergence, ascent, and persistent precipitation.

In several cases, despite strong cyclonic activity and an intensified Rossby wave train over the North Atlantic, much of the energy converged over northern and western Europe. This diverted the main energy pathway poleward, positioning Iran downstream in a dynamically unfavorable “wave passage” regime rather than in active entrance or exit regions. An exception occurred in February 2016 when the eastern Mediterranean briefly acted as a secondary wave source; however, the dominant energy was directed south toward the northern Red Sea, leaving Iran decoupled from effective wave forcing.

Analysis of the 250-hPa jet stream shows a common pattern: a poleward displacement of the polar jet over the Atlantic–Europe and strengthening with meridional expansion of the subtropical jet over the Middle East and Iran. This configuration suppresses meridional variability, weakens Rossby wave amplification, limits constructive wave–mean flow interaction, reinforces upper-level stability, reduces vertical motion, and favors persistent winter droughts.

Overall, widespread winter droughts in Iran primarily reflect a misalignment with Rossby wave energy pathways and jet stream structures. Combined WAF and jet stream analysis provides a physically consistent framework for diagnosing and anticipating winter droughts, supporting improved seasonal forecasts and climate risk management in water-limited regions.

**Keywords:** Rossby waves, jet stream, winter dry periods, Rossby wave activity flux

---

\* Corresponding author:

aranjbar@gmail.com