

پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره ۷۰، زمستان

صص ۱۹-۱

## تحلیل همدیدی موج سرمای شدید دی‌ماه ۱۳۸۶ ایران

قاسم عزیزی\* - دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

طیبه اکبری - دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

محمود داودی - دانشجوی کارشناسی ارشد اقلیم‌شناسی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

مهری اکبری - دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

پذیرش مقاله: ۱۳۸۷/۱۲/۱۵ تأیید نهایی: ۱۳۸۸/۹/۴

### چکیده

سرمای شدید و یخبندان‌ها از مخاطرات مهم جوی به‌شمار می‌آیند که معمولاً در ایران سالانه خسارات فراوانی را به محصولات کشاورزی و تأسیسات وارد می‌کنند. تحلیل سینوپتیکی آماری این یخبندان‌ها به پیش‌بینی وقوع آنها و اتخاذ تصمیمات صحیح پیش از وقوع و البته مقابله با آنها کمک می‌کند. در پژوهش حاضر به بررسی و تحلیل موج سرمای شدید و فراگیر در ژانویه ۲۰۰۸ پرداخته شده است. در این تحقیق به منظور بررسی و تحلیل رویداد سرمای غیرمعمول دی‌ماه ۱۳۸۶ (ژانویه ۲۰۰۸) اقدام به جمع‌آوری آمار و اطلاعات دمای حداقل روزانه ماه ژانویه در ایستگاه‌های سینوپتیک سراسر کشور شد. سپس با مطالعه ۲۱ ایستگاه منتخب، ناهنجاری دمای ژانویه ۲۰۰۸ در مقایسه با میانگین درازمدت دمای حداقل ژانویه کشور مورد بررسی قرار گرفت. با بررسی ناهنجاری‌ها و شاخص بی‌بعد نمره استاندارد، مشاهده شد که دمای حداقل ژانویه ۲۰۰۸ به جز در ۶ ایستگاه در نیمه جنوبی کشور (اهواز، بوشهر، بندرعباس، شیراز، کرمان، ایرانشهر)، در سایر ایستگاه‌ها دارای ناهنجاری بیش از ۵- درجه سلسیوس در مقایسه با دوره آماری ۳۰ ساله بوده است. با تحلیل دمای حداقل ژانویه ۲۰۰۸ در قالب ۶ دوره ۵ روزه، مشخص شد که ایستگاه‌های مورد بررسی در دوره چهارم (روزهای شانزدهم تا بیستم) سردترین دماها را داشته‌اند. به منظور تحلیل شرایط همدیدی مؤثر در وقوع یخبندان ژانویه ۲۰۰۸ و تعیین علل آن، داده‌های مربوط به دما، فشار سطح دریا، ارتفاع ژئوپتانسیل، مؤلفه باد نصف‌النهاری و مداری (U و V) در ترازهای متفاوت و در چهار ساعت، از سایت NCEP/NCAR برای روزهای ژانویه ۲۰۰۸ استخراج گردید. به وسیله داده‌های ارتفاع ژئوپتانسیل و فشار سطح دریا، وضعیت شکل‌گیری سامانه بندالی مورد بررسی قرار گرفت. از داده‌های دما، مؤلفه باد نصف‌النهاری و مداری (U و V) نیز برای ترسیم نقشه‌های ترکیبی فرارفت دما، ضخامت جو، بردارهای شیو دما و باد گرمایی استفاده شد. با مشاهده نقشه‌های تراز میانی جو مشاهده شد که در سراسر ژانویه ۲۰۰۸ به طور مداوم سامانه بندالی حاکمیت داشته است، به طوری که تشکیل سامانه بندالی زوجی در پنجه چهارم (روزهای شانزدهم تا بیستم) و پنجه دوم (روزهای ششم تا دهم) به خوبی مشاهده می‌شود. با بررسی باد گرمایی در لایه ضخامت ۱۰۰۰ تا ۵۰۰ هکتوپاسکال، مشاهده می‌شود که نیمه شمالی کشور در معرض فرارفت شدید هوای سردی است که از مناطق قطبی و شمال منطقه سرد سیبری می‌گذرد و با خود هوای سرد و خشک را به داخل کشور منتقل می‌کند. بنابراین، بروز یخبندان فرارفتی در نواحی شمال شرقی و نیمه شمالی کشور در روزهای پنجه چهارم توجیه می‌شود. همچنین باد گرمایی در جنوب کشور و بر روی خلیج فارس و دریای عمان و کرانه‌های آن با سرعتی بیش از ۳۰ متر بر ثانیه از شدت سرمای مناطق جنوبی کشور کاسته است. به نظر می‌رسد که بالاتر بودن دمای حداقل ایستگاه‌های اهواز، بوشهر، بندرعباس، شیراز، کرمان و چابهار به همین علت باشد.

کلیدواژه‌ها: موج سرما، سامانه بندالی، فرارفت سرد، باد گرمایی، ژانویه ۲۰۰۸، ایران.

## مقدمه

زمستان ۱۳۸۶ یکی از سردترین زمستان‌هایی بود که کشور ایران به خود دیده است و طبعاً دی‌ماه سردترین ماه این زمستان بود، که از نظر فراگیری و شدت سرما خسارات شدید و بی‌سابقه‌ای را به بار آورد. برف سنگین همراه با سرمای شدید با دمای حداقلی در حدود  $-30^{\circ}\text{C}$  در بعضی استان‌ها صدمات جبران‌ناپذیری به بخش کشاورزی، دامی و حتی ترابری وارد ساخت که دامنه تأثیر آن، بیشتر کشور را دربرگرفت. در بعضی نواحی جلگه‌ای، ارتفاع برف به  $1/8$  متر رسید و با قطع جاده‌های مواصلاتی در ارائه خدمات به روستاها، در سراسر کشور مشکلاتی پدید آمد. با توجه به سرمای موجود، تنها به استان مازندران بیش از ۴۵۰ میلیارد ریال خسارت وارد شد (سایت سازمان هواشناسی استان مازندران). بررسی‌های آماری نشان می‌دهند که ژانویه ۲۰۰۸ کمترین دمای مشاهده شده در طی سال‌های آماری را داشته است (جدول ۱). بسیاری از شهرهای کشور پس از سال‌ها (حداقل دو دهه در بوشهر) برای اولین بار بارش برف را به تماشا نشستند. از سوی دیگر، با وجود ثبت سرمای بی‌سابقه در برخی از ایستگاه‌های کشور، تعدادی از ایستگاه‌های اروپایی (نظیر مسکو در مقایسه با اردبیل) ژانویه گرم‌تری را پشت سر گذاشتند.

در مورد سرما مطالعات زیادی در سراسر جهان و کشور انجام شده است. بائو (2001, 620) به تحلیل زمستان‌های سرد و گرم در چین - به عنوان یکی از وسیع‌ترین پهنه‌های خشکی در اوراسیا - پرداخته است. او ضمن توصیف و مقایسه زمستان‌های سرد و گرم، فرایندهای مؤثر بر افت دما و سامانه‌های باران‌زا در چین را تحلیل کرده و سرانجام با استفاده از تفسیر و تحلیل شرایط موجود به ارائه راهکارهایی در خصوص پیش‌بینی شرایط جوی زمستانه در چین پرداخته است. دان گودگل (2005, 2) به بررسی رخداد غیرعادی سرما در روزهای ۲۹ نوامبر تا ۴ دسامبر ۲۰۰۴ از نظر رفتار پارامترهای هواشناسی همراه با موقعیت‌های همدیدی کم‌سابقه در کانادا پرداخته و نشان داده است که وجود سامانه کم‌ارتفاع در سطوح فوقانی باعث بروز سرما در منطقه در طی روزهای مورد مطالعه شده است.

عزیزی (۱۰۰، ۱۳۸۳) به بررسی یخبندان‌های فراگیر بهاری نیمه غربی ایران پرداخته است. وی با استفاده از نقشه‌های سطح زمین و تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در ساعت صفر، نشان می‌دهد که در تمام روزهای همراه با یخبندان، سامانه‌ای کم‌ارتفاع در شمال دریای خزر و در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال مشاهده می‌شود که معمولاً با سامانه کم‌ارتفاع نسبتاً قوی در غرب خود و بر روی مدیترانه همراه است.

مجرد قره‌باغ (۵، ۱۳۷۶) به بررسی یخبندان‌های آذربایجان در طی دوره آماری ۹۰-۱۹۷۰ پرداخته است. از جمله ویژگی‌های مهم کار او می‌توان به بررسی دوره‌های کوتاه‌مدت یخبندان و روزهای انجماد - ذوب اشاره کرد. علیجانی و هوشیار (۲، ۱۳۸۷) به منظور شناسایی و طبقه‌بندی الگوهای سینوپتیکی ایجادکننده سرماهای شدید منطقه شمال غرب ایران، از آمار روزانه فشار، دما و بردار باد سطح زمین و تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال استفاده کردند. بررسی آنها نشان داد که ۷۰ درصد سرماهای شدید شمال غرب ایران به خاطر استقرار ناوهای عمیق بر روی شمال ایران و قرار گرفتن منطقه مورد مطالعه در قسمت عقب آن و همچنین وجود یک پرفشار در سطح زمین است.

براتی (۳، ۱۳۷۵) به بررسی یخبندان‌های بهاره ایران پرداخته و با استفاده از نقشه‌های روزانه هوای سطح زمین، ۵۰۰ هکتوپاسکال و نقشه‌های ضخامت هوا، منشأ و مسیر سامانه‌های فشار عامل یخبندان را تعیین کرده است.

شاهرخوندی (۹۳، ۱۳۸۶) با بررسی نقشه‌های سینوپتیکی به مطالعه مراکز عمل در فصل زمستان بر روی ایران پرداخته و در توجیه سرمای بی‌سابقه ژانویه ۱۹۶۴، استقرار پرفشار بر روی اروپای مرکزی را همراه با ناهنجاری مثبت و شدید فشار، دلیل خشکی هوای خاورمیانه در این سال معرفی می‌کند. او همچنین ادغام پرفشار روی اروپای مرکزی را با پرفشار سیبری در امتداد نصف‌النهار ۵۵ درجه شرقی، عامل تشکیل ناوه بین دریاچه‌های آرال و خزر و در نتیجه فرارفت هوای سرد به داخل کشور می‌داند.

فرید مجتهدی (۵، ۱۳۸۵) یخبندان‌های سواحل جنوبی دریای خزر را به دو روش آماری و سینوپتیکی مورد تجزیه و تحلیل قرار داد و نتیجه گرفت که الگوی روزهای اوج یخبندان در منطقه، نشان از قرارگیری محور ناوه در شرق دریای خزر و محور پشته در شرق اروپا یا شرق دریای سیاه دارد. امام هادی (۱، ۱۳۸۳) به‌منظور تعیین توده‌های هوایی مؤثر بر اقلیم کشور در دوره سرد سال، پس از تحلیل‌های آماری - سینوپتیکی و تفسیر نمودارهای ترمودینامیک، به شناسایی و طبقه‌بندی توده‌های هوا در دوره سرد سال پرداخته است.

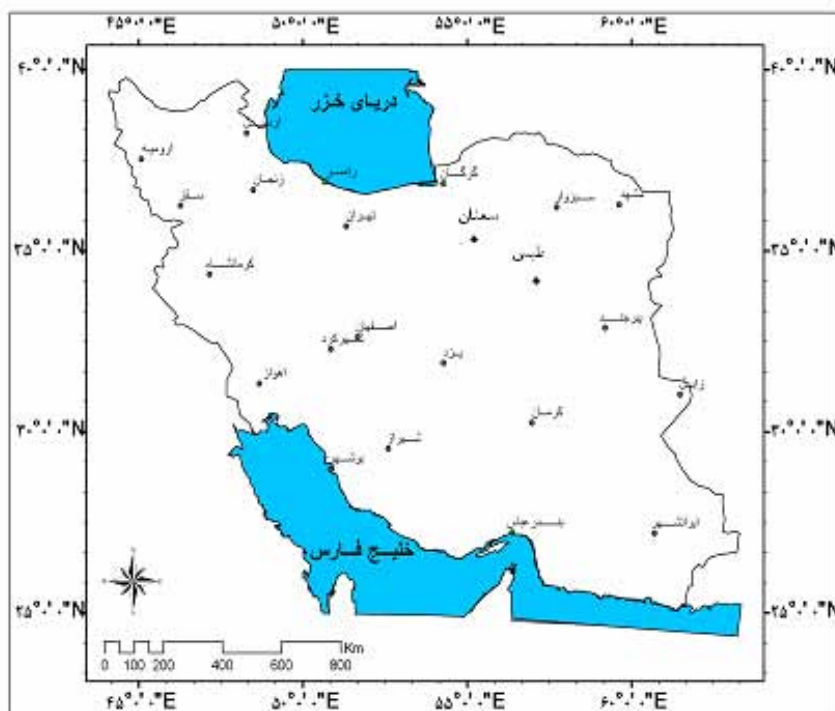
## مواد و روش‌ها

به‌منظور مطالعه سرمای شدید دی ماه ۱۳۸۶ در ابتدا اقدام به جمع‌آوری ثبت آمار و اطلاعات مربوط به دمای حداقل روزانه ایستگاه‌های سینوپتیک سراسر کشور شد. سپس یک دوره آماری مشترک ۳۰ ساله (۲۰۰۵-۱۹۷۶) انتخاب گردید. از آنجا که طول دوره آماری منتخب در کل ایستگاه‌ها یکسان نبود، لذا تنها ایستگاه‌هایی که حداقل دوره آماری منتخب را بدون خلأ آماری، پوشش می‌دادند انتخاب گردیدند. در نتیجه، از مجموع ۳۲۳ ایستگاه سینوپتیک کشور در این مرحله، ۴۰ ایستگاه انتخاب شدند و سپس با استفاده از تحلیل خوشه‌ای<sup>۱</sup>، تعداد ایستگاه‌های منتخب مجدداً به ۱۴ ایستگاه تقلیل یافت. ولی به دلیل عدم پوشش مناسب ایستگاه‌های خروجی، چند ایستگاه در مناطق کم‌تراکم کشور به ایستگاه‌ها اضافه گردید و سرانجام تحلیل آماری با استفاده از ۲۱ ایستگاه منتخب انجام شد (شکل ۱).

برای ۲۱ ایستگاه منتخب، اقدام به بررسی ناهنجاری دمای حداقل ژانویه ۲۰۰۸ در مقایسه با میانگین بلندمدت دمای حداقل ژانویه کشور شده است. با بررسی ناهنجاری‌ها و شاخص بی‌بعد نمره استاندارد، مشاهده شد که دمای حداقل ژانویه ۲۰۰۸ به‌جز در معدودی از ایستگاه‌های نیمه جنوبی کشور (اهواز، بوشهر، بندرعباس، شیراز، کرمان، ایرانشهر)، در سایر ایستگاه‌ها حتی ناهنجاری منفی تا ۱۳- درجه سانتی‌گراد در مقایسه با دوره آماری ۳۰ ساله رخ داده است (جدول ۱). به‌منظور تعیین الگوهای همدیدی مؤثر در وقوع یخبندان ژانویه ۲۰۰۸، داده‌های مربوط به دما، فشار سطح دریا، ارتفاع ژئوپتانسیل، مؤلفه باد نصف‌النهاری و مداری (V, U) در ترازهای متفاوت در چهار ساعت، از سایت NCEP/NCAR برای روزهای ژانویه ۲۰۰۸ استخراج گردید. به‌وسیله داده‌های ارتفاع ژئوپتانسیل و فشار سطح دریا، وضعیت شکل‌گیری سامانه بندالی<sup>۲</sup> مورد بررسی قرار گرفت. از داده‌های دما، مؤلفه باد نصف‌النهاری و مداری (V, U) نیز

1. Cluster analysis  
2. Blocking

برای ترسیم نقشه‌های فرارفت دما، ضخامت جو، بردارهای شیو دما و باد گرمایی استفاده شد. در ادامه برای سهولت در تحلیل داده‌های دما، دوره یک‌ماهه مورد بررسی، به ۶ دوره ۵ روزه تقسیم شد. در بین دوره‌های شش‌گانه، دوره چهارم (روزهای شانزدهم تا بیستم) سردترین دماها را داشته است (جدول ۲). بر این اساس، ضمن مطالعه کلی دمای حداقل ژانویه ۲۰۰۸ بر مطالعه ویژگی‌های دمای دوره چهارم تمرکز بیشتری صورت گرفت.



شکل ۱. پراکنش ایستگاه‌های منتخب در پهنه کشور

با توجه به اینکه در پژوهش حاضر، پدیده غالب همدیدی مؤثر بر رخداد سرمای ژانویه ۲۰۰۸ ایران، پدیده بندالی بوده است، در ادامه مختصری به تشریح ویژگی‌های آن پرداخته می‌شود.

معیارهایی برای تشخیص سامانه بندالی وجود دارند که در زیر به آنها اشاره می‌شود (عزیزی، ۱۳۷۸، ۳۸):

۱. جریان اصلی بادهای غربی تبدیل به دو شاخه شوند.
  ۲. هر شاخه از جریان توده هوای مشخصی را منتقل کند.
  ۳. جریان‌های دو شاخه شده باید حداقل ۴۵ درجه طول جغرافیایی را دربرگیرد.
  ۴. جریان دوشاخه شده، تغییر حالتی از شارش مداری بالادست به شارش نصف‌النهاری پایین‌دست نشان دهد.
  ۵. و بالاخره این الگو برای مدت ۱۰ روز باید همواره با پیوستگی مشخص دوام داشته باشد.
- علاوه بر علائم ذکر شده، با استفاده از روش‌های کمی نیز می‌توان سامانه بندالی را تشخیص داد. بنابراین، پیش از انجام مطالعات کیفی معمول در تعیین سامانه‌ها، اقدام به آزمون وجود سامانه بندالی به صورت کمی شده است.

جدول ۱. مقایسه نمره استاندارد (Z) و ناهنجاری دمای حداقل ژانویه ۲۰۰۸ در طی دوره ۳۰ ساله

ایستگاهها	کمترین Z رخ داده در ماه ژانویه در طی دوره آماری	Z ژانویه ۲۰۰۸	حداکثر ناهنجاری منفی رخ داده در ماه ژانویه در طی دوره آماری (°C)	ناهنجاری ژانویه ۲۰۰۸ (°C)	ارتفاع ایستگاهها (متر)
اهواز	-۲/۱	-۲/۴	-۲/۸	-۳/۳	۲۲
اردبیل	-۱/۴	-۲/۱	-۸	-۱۱/۹	۱۳۳۲
بندرعباس	-۲/۳	-۱/۸	-۳/۱	-۲/۵	۹
بیرجند	-۱/۷	-۳/۳	-۲/۹	-۵/۸	۱۴۹۱
بوشهر	-۲/۴	-۱/۹	-۳	-۲/۳	۱۹
اصفهان	-۲/۲	-۵/۳	-۲/۸	-۷/۲	۱۵۵۰
سبزوار	-۳/۱	-۷/۴	-۵/۱	-۱۲/۸	۹۷۷
سقز	-۱/۹	-۲/۸	-۸/۵	-۱۳	۱۵۲۲
شهرکرد	-۳/۱	-۴/۳	-۷/۲	-۱۰/۱	۲۰۴۸
شیراز	-۲/۱	-۱/۸	-۳/۱	-۲/۶	۱۴۸۴
تهران	-۲/۴	-۴/۲	-۴/۶	-۸/۱	۱۱۹۰
یزد	-۲/۴	-۳/۴	-۳/۷	-۵/۳	۱۲۳۷
زابل	-۲	-۴/۲	-۲/۹	-۶/۲	۴۸۹
زنجان	-۲/۳	-۲/۸	-۸	-۱۰/۱	۱۶۶۳
گرگان	-۲/۳	-۵	-۳/۸	-۸/۸	۱۳
ایرانشهر	-۱/۵	-۱/۹	-۲/۲	-۲/۹	۵۹۱
کرمان	-۱/۸	-۱/۲	-۳/۳	-۲/۲	۱۷۵۳
کرمانشاه	-۲/۱	-۴/۵	-۳/۴	-۷/۵	۱۳۱۸
مشهد	-۲/۹	-۴/۷	-۶/۱	-۱۰/۱	۹۹۹
ارومیه	-۳/۷	-۳/۸	-۷/۸	-۸	۱۳۱۵
رامسر	-۲/۵	-۲/۹	-۴/۱	-۴/۹	-۲۰

در رابطه (۱) چنانچه مقادیر C مساوی یا کوچکتر از صفر باشند؛ در جریان هوا استعداد رخداد سامانه بندالی وجود دارد ولی اگر مقادیر بزرگتر از صفر باشند، بادهای غربی در حالت نرمال جریان دارند (باری و کارلتون، ۲۰۰۱، ۳۰۸). رابطه (۱) بیان می‌دارد که هرچه بادهای غربی سرعت بیشتری داشته باشند، طول موج‌های ساکن افزایش می‌یابد (علیچانی، ۱۳۸۵، ۷۵).

$$C = U - \frac{\beta^* Ls^2}{4\pi^2} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن C: سرعت جابه‌جایی موج به‌طرف شرق، U: سرعت بادهای غربی (متر بر ثانیه)، Ls: طول موج ساکن (کیلومتر) است و ضریب  $\beta$  از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$\beta = \frac{2\omega^* \text{Cos}\phi}{R} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن،  $\omega$ : سرعت زاویه‌ای زمین با مقدار ثابت  $7/29 \times 10^{-5} \text{ rad}^{-s}$  است، R: شعاع کره زمین برحسب

کیلومتر و  $\phi$ : عرض جغرافیایی (درجه) است.

طول موج ساکن ( $L_s$ ) که برای عرض‌های مختلف جغرافیایی و سرعت‌های مختلف باد با توجه به جدول ۳ و رابطه

(۳) قابل محاسبه است (عزیزی، ۱۳۷۵، ۳۰۰)، از رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$L_s = 2\pi - \sqrt{\frac{U}{\beta}} \quad \text{رابطه (۳)}$$

U را هم می‌توان با استفاده از رابطه (۴) به دست آورد.

$$U = \frac{\beta \times L^2}{4\pi^2} \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن L طول موج واقعی است و برحسب مقیاس نقشه‌های سینوپتیک محاسبه می‌شود.

جدول ۲. مقایسه متوسط دمای حداقل ایستگاه‌ها (درجه سانتی‌گراد) در دوره‌های پنج روزه اول تا ششم

ایستگاه‌ها	دوره اول	دوره دوم	دوره سوم	دوره چهارم	دوره پنجم	دوره ششم
اهواز	۱۱	۳/۱	۲/۹	۳	۸/۱	۷/۷
اردبیل	-۶/۴	-۱۵/۵	-۲۲/۲	-۲۵/۱	-۱۸/۱	-۴/۹
بندرعباس	۱۴/۵	۱۲/۲	۱۱/۴	۷/۸	۷/۸	۱۳
بیرجند	-۱/۸	-۱۱/۲	-۵/۲	-۹/۸	-۸/۶	-۵/۴
بوشهر	۱۵/۸	۷/۸	۸/۶	۶/۴	۱۱/۵	۹/۸
اصفهان	-۱/۹	-۱۰/۶	-۹	-۱۱/۳	-۷/۲	-۶/۲
سبزوار	-۳/۳	-۹/۴	-۱۲/۴	-۱۷/۵	-۱۵/۶	-۹/۳
سقز	-۷/۸	-۱۷/۳	-۱۹/۳	-۲۸/۳	-۱۹/۴	-۹/۱
شهرکرد	-۱/۸	-۱۹/۷	-۱۵	-۲۶/۴	-۱۲/۵	-۱۰/۶
شیراز	۵/۳	-۴/۲	-۱/۲	-۴/۸	۱/۸	۰/۲
تهران	۰/۱	-۹/۱	-۷/۸	-۷/۷	-۶/۱	-۲/۶
یزد	۰/۳	-۴/۹	-۶/۳	-۶/۱	-۵	-۲/۳
زابل	۲/۴	-۳/۲	-۳/۴	-۵/۱	-۶	-۲/۶
زنجان	-۶/۴	-۱۶/۹	-۱۷	-۱۷/۸	-۱۳/۵	-۸/۷
گرگان	-۰/۲	-۵/۱	-۵/۱	-۵/۶	-۳/۷	-۳/۴
ایران‌شهر	۱۰/۴	۹/۸	۶/۸	۱/۷	۵/۵	۷/۸
کرمان	۳	-۷/۱	-۴/۳	-۹/۷	-۳/۶	-۱/۷
کرمانشاه	-۰/۹	-۶/۵	-۱۲	-۱۶/۳	-۸/۷	-۵/۴
مشهد	-۱/۸	-۱۴/۳	-۱۴/۲	-۱۳	-۱۵/۶	-۸/۴
ارومیه	-۵/۱	-۱۵/۱	-۱۴/۱	-۱۵/۴	-۱۳/۱	-۶/۵
رامسر	۶	-۱/۶	-۱/۵	-۰/۹	۱/۳	۲/۷

جدول ۳. طول موج ساکن برحسب کیلومتر برای عرض‌های جغرافیایی و سرعت‌های مختلف باد

سرعت باد (متر بر ثانیه)					عرض جغرافیایی (درجه)
۲۰	۱۶	۱۲	۸	۴	
۶۳۱۰	۵۶۴۴	۴۸۸۸	۳۹۹۰	۲۸۲۲	۳۰
۶۹۷۸	۶۲۵۱	۵۴۰۵	۴۴۱۲	۳۱۲۰	۴۵
۸۳۰۴	۷۴۲۸	۶۴۳۲	۵۲۵۲	۳۷۱۳	۶۰

منبع: عزیزی، ۱۳۷۵، ۳۱۴

### یافته‌های تحقیق

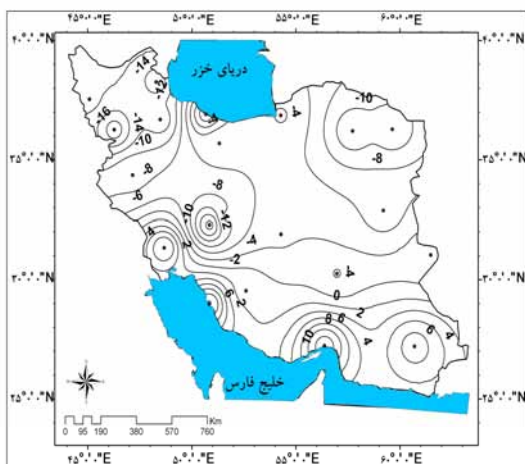
با مقایسه ناهنجاری دمای حداقل ژانویه ۲۰۰۸ نسبت به میانگین حداقل دمای ۳۰ سال گذشته، مشخص شد که در حدود ۸۱ درصد از ایستگاه‌های مورد بررسی (۱۷ ایستگاه از ۲۱ ایستگاه) پایین‌ترین دمای حداقل در سال ۲۰۰۸ مشاهده شده است. از دیگر سو، این ایستگاه‌ها در پنجه چهارم (روزهای شانزدهم تا بیستم) و پنجه دوم (روزهای ششم تا دهم) نیز، به ترتیب بیشترین ناهنجاری منفی دمای حداقل را در مقایسه با سایر روزهای ژانویه ۲۰۰۸ داشته‌اند. از این رو با مقایسه این پنجه‌ها، بررسی جزئیات سرما ساده‌تر می‌شود. مقایسه میانگین ماهانه دمای ژانویه ۲۰۰۸ با میانگین روزهای شانزدهم تا بیستم، نشان از افت بیشتر دما در این پنج روز دارد (جدول ۲ و شکل ۲).

بررسی‌های اولیه نقشه‌های هوا در سطح زمین و ترازهای بالایی، نشان داد که در طی روزهای سرد پنجه چهارم ژانویه ۲۰۰۸ در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکالی، سامانه بندالی مشاهده می‌شود که ایران را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در سطح زمین هم ایران تحت تأثیر قسمت جنوب‌شرقی پرفشار موسوم به سیبری است که هسته آن با هم‌فشار ۱۰۵۲ هکتوپاسکال در شمال دریاچه بایکال بسته شده است (شکل ۳-الف). میزان پایداری و همچنین شدت این سامانه با استفاده از رابطه (۱) به روش کمی مورد بررسی قرار گرفته است. میزان شاخص C برای روزهای ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ ام (به عنوان نماینده ۳۰ روز ژانویه ۲۰۰۸) محاسبه شده است.

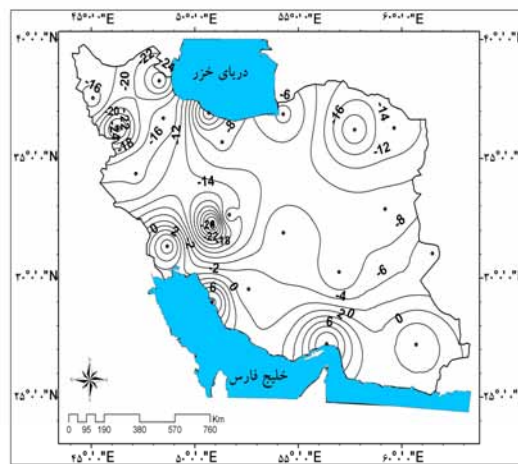
سامانه بندالی، روند معمولی جریان‌های غربی را دچار اختلال می‌کند (عزیزی، ۱۳۸۷، ۳۸) و در واقع این جریان‌ها را به دو شاخه تقسیم می‌کند، در نتیجه شارش غالب را از حالت مداری به حالت نصف‌النهاری بدل می‌سازد. سامانه بندالی به عنوان پرفشاری گرم و ماندگار (یا با حرکت بسیار کند) از اجزای بادهای غربی شناخته می‌شود. آنها معمولاً از زبانه گرم و پراتقاعی که هوای گرم را از مناطق حاره به سمت عرض‌های بالا فرارفت می‌کند، شروع به شکل‌گیری می‌کنند (جاناتان، ۱۹۹۴، ۸۴). سامانه بندالی باعث ایجاد انحراف در مسیر بادهای غربی و وافشارهای حاصل از تغییر شکل جبهه قطبی به سمت شرق می‌گردد. از این رو سامانه مذکور پیامدهای متفاوتی در نواحی مختلف خواهد داشت، به گونه‌ای که در بخش‌هایی باعث بروز بی‌بارشی و خشکسالی و در مکان دیگر سبب افزایش بارش می‌شوند. بررسی نقشه‌های همدیدی سطح زمین نشان می‌دهد که به هنگام حاکمیت واچرخندهای بندالی، فرارفت هوای گرم به طور غیرمعمول به عرض‌های جغرافیایی بالاتر نفوذ می‌کند و هوای سرد به سمت منطقه جنب حاره کشیده می‌شود. با در نظر گرفتن این جریان‌های نصف‌النهاری، برحسب موقعیت، بخش‌های معینی از مناطق تحت تأثیر سامانه بندالی، گرما و یا

سرماى نابهنجارى مى‌يابند. اين شرايط جوى غيرمعمول، گاه ممكن است چند هفته متوالى ادامه يابد. در برخى موارد، وقوع مكرر الكوهای بندالى مى‌تواند ويژگى كلّى فصل را تغيير دهند (مكيل وين، ۱۹۹۲، ۳۹۸).

به‌منظور مطالعه فرارفت جريانات هوا، نقشه سرعت مؤلفه نصف‌النهارى بادهای غربى در ارتفاع ۳۰۰ هکتوپاسکالى و براى تعيين كيفيت تأثير سامانه بندالى بر روى جريان‌های غربى، نقشه خطوط جريان هوا در ارتفاع ۵۰۰ هکتوپاسکالى مورد بررسى قرار گرفت (شکل‌های ۴ و ۵). همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده مى‌شود، بر اثر شکل‌گيرى سامانه بندالى، جريان بادهای غربى به شدت نصف‌النهارى شد و با ايجاد اختلال در جريان عادى بادهای غربى، به فاصله گرفتن دو پربند ۵۵۰ و ۵۶۰ ژئوپتانسیل دکامتر از يکديگر انجاميد، به طوری که پربند بسته ۵۶۰ ژئوپتانسیل دکامتر بر روى دريای مدیترانه بادهای غربى را به دو شاخه تقسيم کرده است. شاخه‌ای از بادهای غربى به موازات پربند ۵۶۰ ژئوپتانسیل دکامتر با جهت شمال غربى - جنوب شرقى وارد ايران مى‌شود و نيمه شمالى کشور را بيشتر تحت تأثير قرار مى‌دهد. شاخه ديگر بادهای غربى به موازات پربند ۵۷۰ ژئوپتانسیل دکامتر با جهت جنوب غربى وارد کشور مى‌شود و بخش‌های جنوبى کشور را بيشتر تحت تأثير قرار مى‌دهد (شکل‌های ۳- ب و ۵- ب). اين شرايط باعث فرارفت سرد هوا در نيمه شمالى کشور شده است. بدین ترتيب با ريزش هوای سرد از عرض‌های بالا، بيش از ۸۰ درصد از ايستگاه‌های کشور کمترین دماها را در روزهای شانزدهم تا بيستم به خود ديده‌اند (شکل‌های ۴ و ۵ و جدول ۲). با بررسى نقشه میانگین سطح دريا در سردترین دوره، يعنى روزهای پنجه چهارم (روزهای شانزدهم تا بيستم ژانويه ۲۰۰۸) مى‌توان مرکز پرفشارى با فشار مرکزى ۱۰۵۲ هکتوپاسکال در شمال مسکو و روى منطقه سيبىرى مشاهده کرد که زبانه آن دريای خزر را فراگرفته است. قرار گرفتن منحنى ۱۰۲۴ هکتوپاسکال تا جنوب کشور با سرماى شديد در اکثر ايستگاه‌های کشور در اين دوره همخوانى دارد (شکل‌های ۳ و ۲- الف). در ايستگاه‌های سقز، شهرکرد، اردبيل، زنجان، کرمانشاه، سبزوار، مشهد، اروميه، اصفهان، بيرجند، تهران، گرگان و رامسر، کمترین دمای حداقل در روزهای شانزدهم تا بيستم مشاهده شده است و مى‌توان اين ايستگاه‌ها را به عنوان نماينده بخش‌های شمالى کشور و در معرض جريانات بادهای غربى با جهت شمال غربى - جنوب شرقى در نظر گرفت.

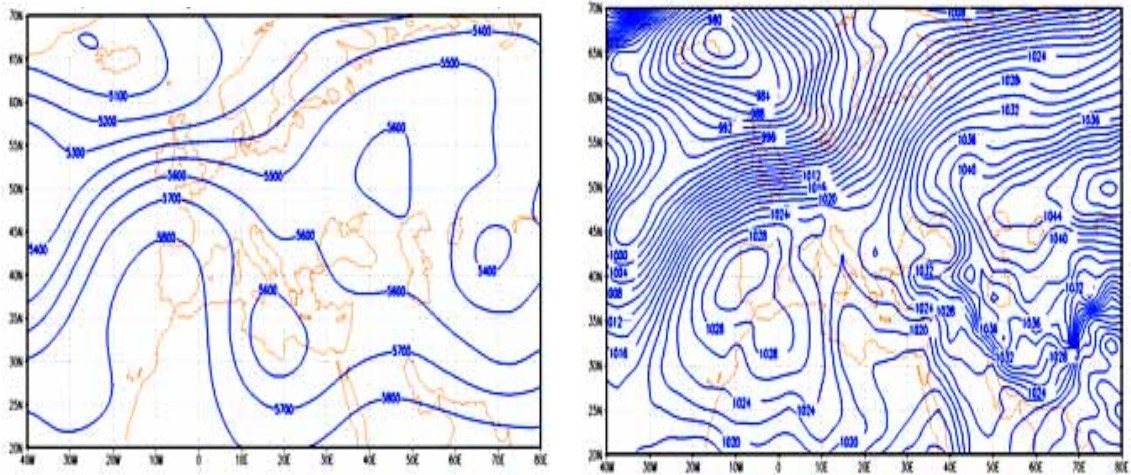


شکل ۲- ب) نقشه همدمای میانگین ژانویه ۲۰۰۸



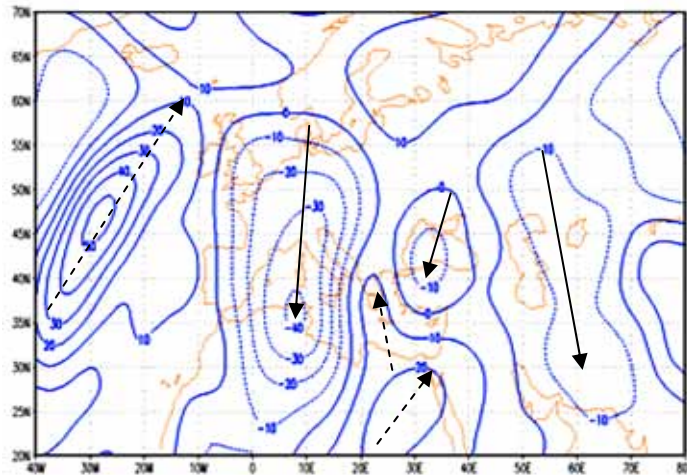
شکل ۲- الف) نقشه همدمای میانگین دوره چهارم





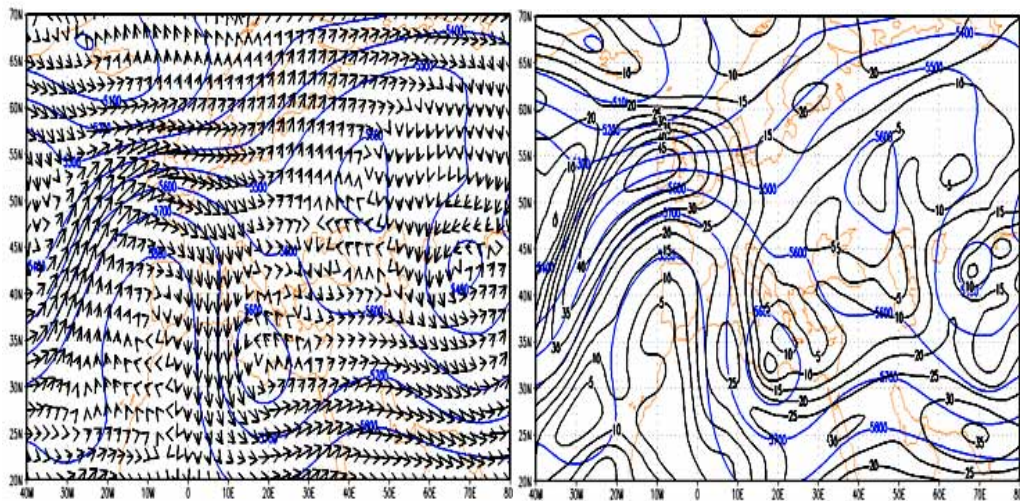
شکل ۳- الف) نقشه میانگین فشار سطح دریا (شکل ۳- ب) نقشه میانگین ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در پنجه چهارم (روزهای شانزدهم تا بیستم ژانویه ۲۰۰۸)

برای شناسایی فرارفت سرد در کشور، نقشه میانگین مؤلفه نصف‌النهاری باد (V Wind) در روزهای شانزدهم تا بیستم ژانویه ۲۰۰۸ در تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، جریانات نصف‌النهاری با جهت شمالی (با هسته سرعت ۱۰ متر بر ثانیه) در نیمه شرقی کشور قابل شناسایی است. علامت منفی نشان از فرارفت سرد با جهت شمالی - جنوبی و مقادیر مثبت، نشان از فرارفت هوای گرم دارند. پیکان توپر فرارفت سرد و پیکان خط‌چین فرارفت گرم را نشان می‌دهد (شکل ۴).



شکل ۴. نقشه سرعت مؤلفه نصف‌النهاری (V) باد در تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال در پنجه چهارم (شانزدهم تا بیستم) ژانویه ۲۰۰۸ (متر بر ثانیه).

براساس شکل ۴ فرارفت هوای سرد، کل کشور به‌ویژه نیمه شرقی ایران را تحت تأثیر قرار داده است. بدین ترتیب در روزهای شانزدهم تا بیستم، اکثر ایستگاه‌های کشور با افت دما مواجه شدند (شکل ۴ و جدول ۲).



شکل ۵. نقشه ترکیبی میانگین ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال الف) سرعت باد (متر بر ثانیه) ب) خطوط جریان در پنجه چهارم (روزهای شانزدهم تا بیستم) ژانویه ۲۰۰۸ ساعت 12 GMT

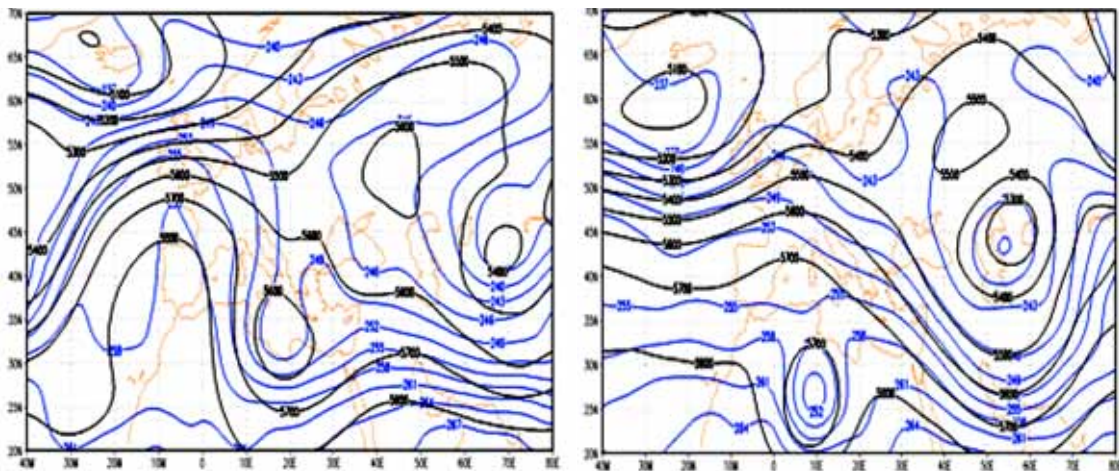
جدول ۲، وقوع کمترین دماهای ماه ژانویه را در ایستگاه‌های جنوبی کشور - نظیر کرمان، بوشهر، اهواز، یزد، زابل، شیراز، ایرانشهر و بندرعباس - در روزهای شانزدهم تا بیستم نشان می‌دهد. با مشاهده شکل ۵- ب مشخص می‌شود که فرارفت هوای سردی است که به وسیله شاخه جنوبی بادهای غربی ایجاد شده، پس از گذشتن از روی آب‌ها اندکی گرمتر شده، و بالاخره به جنوب کشور رسیده و دما را در این مناطق کاهش داده است. البته شدت این کاهش دما در مقایسه با ایستگاه‌های شمالی کشور که در معرض ریزش هوای سرد عرض‌های بالاتر قرار دارند، کمتر است (شکل ۵- ب و جدول ۲).

به منظور پیگیری میزان گسترش بادهای غربی به مناطق جنوبی، منحنی هم‌ارتفاع ۵۸۲۰ متر به عنوان مرز جنوبی بادهای غربی در نظر گرفته می‌شود (علیجانی، ۱۳۸۱، ۱۳۱). بررسی‌ها نشان داد که در روزهای پنجه چهارم ژانویه، پربند ۵۸۲۰ متر تا عرض ۲۰ درجه شمالی نیز نفوذ داشته است. به نظر می‌رسد که گسترش هستهٔ پرسرعت رودباد جبهه قطبی تا عرض ۲۵ درجه شمالی (جنوب شرق ایران) و با هسته سرعت بیش از ۳۵ متر بر ثانیه، نفوذ زبانهٔ پراارتفاع ۵۸۲۰ متر تا عرض‌های ۲۰ درجه شمالی را توجیه می‌کند (شکل ۵- الف).

به منظور آزمون حضور سامانه بندالی به عنوان الگوی غالب کنترل‌کننده شرایط جوی دوره مورد مطالعه، مقادیر شاخص نحوهٔ جابه‌جایی طرح موج بادهای غربی به طرف شرق (C)، با استفاده از رابطه‌های (۱) تا (۴) محاسبه شد. اگر جابه‌جایی طرح موج به سمت شرق باشد، مقدار C مثبت و اگر به سمت غرب باشد مقدار آن منفی خواهد شد. علت این امر آن است که همزمان با حرکت وضعی زمین، سرعت جابه‌جایی طرح موج تا جایی کاهش یافته که به اصطلاح از زمین عقب افتاده است. در صورتی که هیچ‌گونه جابه‌جایی در الگوی موج دیده نشود، مقدار C معادل صفر خواهد بود. نتایج حاکی از آن بود که در روزهای ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ ام ژانویه مقدار C به ترتیب معادل  $-۰/۰۰۸$ ،  $-۰/۰۲۶$ ،  $-۰/۰۰۲$ ،  $-۰/۰۰۷$  و  $-۰/۰۰۵$  متر بر ثانیه بوده است. بر این اساس مشاهده می‌شود که در تمام روزهای مورد بررسی، مقدار عددی C منفی بوده که نشان‌دهندهٔ کاهش جابه‌جایی امواج بادهای غربی است. این نتیجه نیز خود مؤید

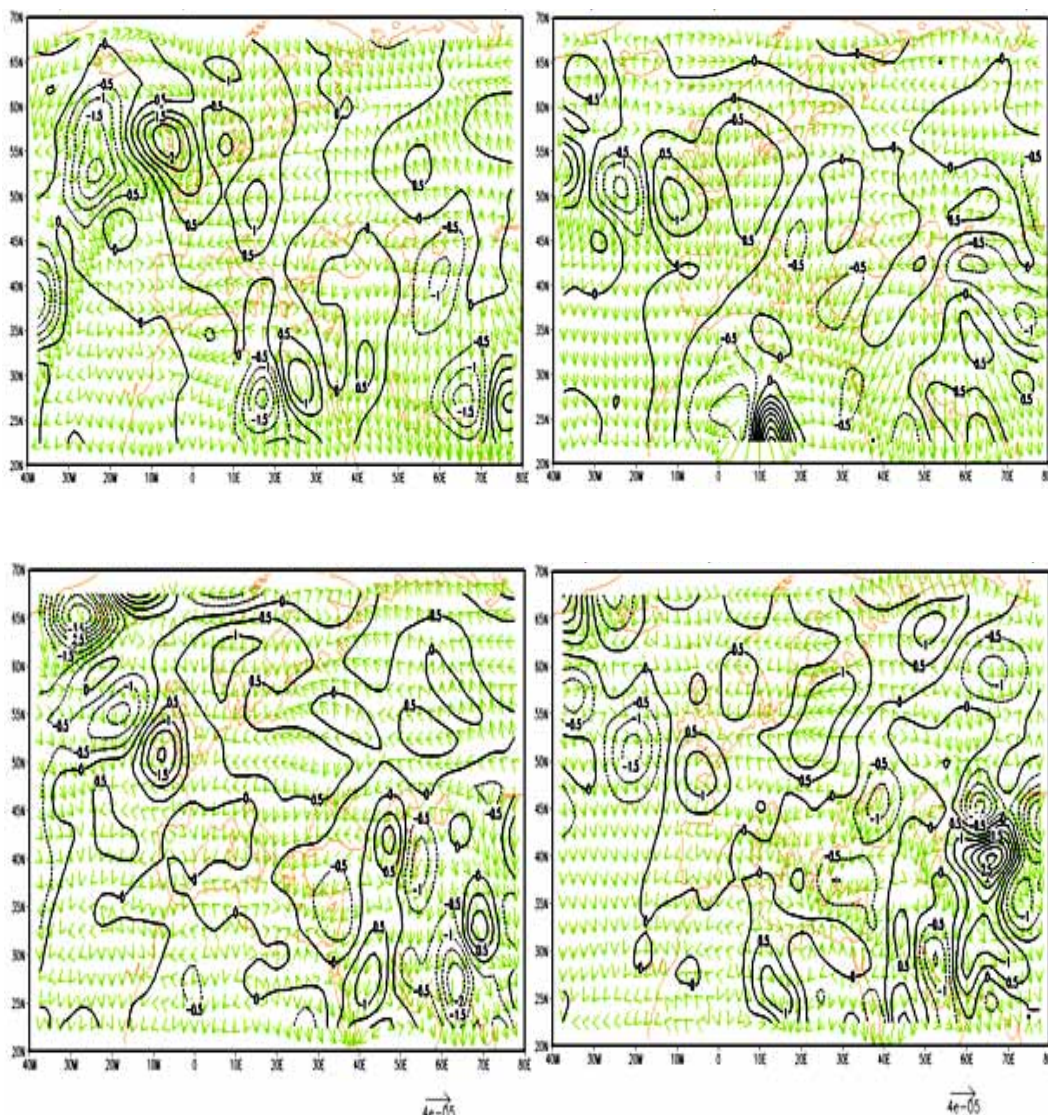
استقرار مداوم سامانه بندالی در طی ژانویه ۲۰۰۸ است. اشکال مختلف حاکمیت سامانه بندالی زوجی به ترتیب در پنجه‌های دوم (روزهای ششم تا دهم) و چهارم (روزهای شانزدهم تا بیستم)، در شکل ۶ دیده می‌شود. مطابق این شکل سامانه بندالی در روزهای شانزدهم تا بیستم قوی‌تر از پنجه دوم است، زیرا درجه حرارت در سطوح میانی جو در پنجه چهارم کمتر از پنجه دوم است (شکل ۶- الف و ۶- ب).

علاوه بر آزمون شاخص طرح موج (C) برای یافتن سامانه بندالی، با بررسی جهت بردارهای شیو دما نیز می‌توان مناطق همراه با استقرار سامانه بندالی را مشخص ساخت. شکل ۷ میانگین عددی فرارفت دما و بردارهای شیو افقی دما را در ارتفاع میانی جو (۵۰۰ هکتوپاسکال) و ارتفاع ۱۰۰۰ ژئوپتانسیل متر در پنجه دوم و چهارم نشان می‌دهد. براساس شکل مشاهده می‌شود که هر جا شیو دما بیشتر است - و به عبارت دیگر بردارهای شیو دما طول بیشتری دارند - فرارفت هوا نیز شدیدتر است. مقادیر منفی و مثبت فرارفت دما به ترتیب فرارفت هوای سرد و گرم را نشان می‌دهند. مطابق شکل ۷- ب در ارتفاع میانی جو مقادیر فرارفت دمای هوا در طول روزهای شانزدهم تا بیستم ژانویه با مراکز منفی معادل  $-1 \times 10^{-4} \text{ K}^\circ \text{S}^{-1}$  و  $-1/5 \times 10^{-4} \text{ K}^\circ \text{S}^{-1}$  به ترتیب بر روی شمال شرق و جنوب شرق کشور نشان‌دهنده فرارفت سرد هوا در روزهای مذکور است. این در حالی است که در روزهای ششم تا دهم، مراکز فرارفت دمای هوا در شمال و شرق کشور دارای مقادیر مثبت هستند و فرارفت هوای سرد شدت کمتری دارد. از این رو در پنجه چهارم، ریزش هوای سرد از عرض‌های بالاتر و از جهت شمال شرق بر روی کشور بیشتر از پنجه دوم است و به همین دلیل در روزهای شانزدهم تا بیستم (پنجه چهارم) افت بیشتر دما در اکثر ایستگاه‌های کشور دیده می‌شود (شکل ۷- الف و ۷- ب). در سطح زمین نیز در روزهای پنجه چهارم شرایط مشابهی مشاهده می‌شود، با این تفاوت که مرکز منفی فرارفت سرد در جنوب شرق کشور به دلیل شیو دمایی بیشتر تقویت می‌شود و مرکز منحنی آن با بیش از  $-2 \times 10^{-5} \text{ K}^\circ \text{S}^{-1}$  از شدیدتر شدن فرارفت هوای سرد در نیمه شرقی کشور در سطح زمین نسبت به پنجه دوم خبر می‌دهد (شکل ۷- ج و ۷- د).



شکل ۶. نقشه ترکیبی میانگین ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و دما (کلوین) که نمایانگر سامانه بندالی است

بنابراین با مقایسه نقشه‌های میانگین فرارفت دمای پنجه‌های دوم و چهارم، مشخص شد که شدت سرمای بیشتر در پنجه چهارم در مقایسه با پنجه دوم به اختلاف بیشتر فرارفت مثبت و منفی دمایی در روزهای شانزدهم تا بیستم بر روی سطح کشور مربوط است (شکل ۷-الف و ۷-ب).



شکل ۷. نقشه ترکیبی همچندهای فرارفت دما با فاصله  $10^{-1} K^0 S^{-1}$  و بردار شیو دمایی تراز ۵۰۰ و ۱۰۰۰ هکتوپاسکال برای روزهای ۶ تا ۱۰ (الف و ج) و ۱۶ تا ۲۰ (ب و د) ژانویه ۲۰۰۸ بزرگی بردارها نشان از بیشتر بودن شیو دما (برحسب کلون بر متر) دارد.

### تحلیل فرارفت هوا براساس باد گرمایی

به‌منظور بررسی و تحلیل علت سرما و فرارفت هوای سرد، از نمایش بردارهای باد گرمایی استفاده شد. ضخامت جو، اختلاف ارتفاع دو تراز فشاری است و باد گرمایی تفاضل بین بردار بادهای زمین‌گرد در دو سطح ارتفاعی یا فشاری مختلف است (Stull, 2000, 230). سرعت و جهت بردارهای باد گرمایی در ضخامت ۵ کیلومتری جو در رابطه‌های (۵)

و (۶) و (۷) محاسبه شد. در این تحقیق با بررسی باد گرمایی، نحوه فرارفت هوا مورد مطالعه قرار گرفت زیرا باد گرمایی و مقدار شیو قائم سرعت باد، تابعی از ساختار دمای جو است و به همین دلیل در مناطقی که جو سردتر است ضخامت جو کمتر و در مناطق گرم ضخامت جو بیشتر است (مسعودیان و کاویانی، ۱۳۸۶، ۲۸). از آنجا که در این شرایط بردار باد گرمایی در راستای خطوط هم‌ضخامت می‌وزد - به طوری که در نیم‌کره شمالی ضخامت‌های کمتر در چپ آن قرار می‌گیرد - میانگین باد زمین‌گرد، نماینده فرارفت هواست و بر خطوط ضخامت عمود است. بنابراین تنها با آگاهی از پراکنندگی قائم باد زمین‌گرد (باد گرمایی) در یک نقطه می‌توان بخشی از گرایش دما در همسایگی آن نقطه را مشخص کرد (Martin, 2006, 90).

در شکل ۱۰ نقشه‌های ترکیبی ضخامت و باد گرمایی با استفاده از روابط ۵ و ۶ و ۷ و با به‌کارگیری داده‌های ارتفاع ژئوپتانسیل، سرعت مداری و نصف‌النهاری باد برای پنجه چهارم ژانویه ۲۰۰۸ محاسبه و ترسیم شده است. همچنین برای نشان دادن تغییرات ضخامت هوا در کشور، عرض ۳۲ درجه شمالی به‌عنوان نماینده انتخاب شد و تغییرات ضخامت هوا در طول جغرافیایی به صورت نیم‌رخ از جو در شکل ۹ نشان داده شده است. برای نمایش رابطه باد گرمایی و فرارفت دما شکل ۸ ترسیم شد. این شکل خطوط ارتفاعی را در دو سطح ۱۰۰۰ و ۵۰۰ ژئوپتانسیل به همراه خطوط هم‌ضخامت در پنجه چهارم ژانویه ۲۰۰۸ نشان می‌دهد. بردارهای باد زمین‌گرد در هر دو سطح ارتفاعی به ترتیب با شماره‌های ۱ و ۲ و بردار باد گرمایی با شماره ۳ در لایه ضخامت نمایش داده شده است. میانگین باد زمین‌گرد به صورت خط‌چین و با شماره ۴ نشان می‌دهد که فرارفت سرد حاکم است. این بردارها - همان‌گونه که گفته شد - عمود بر خطوط هم‌ضخامت و باد گرمایی است. بنابراین براساس شکل ۱۰- الف در پنجه چهارم می‌توان فرارفت سرد را عمود بر بردارهای باد گرمایی مشاهده کرد.

$$U_{TW} = u_{g_2} - u_{g_1} = -\frac{g \cdot \Delta TH}{f_c \cdot \Delta y} \quad \text{رابطه (۵)}$$

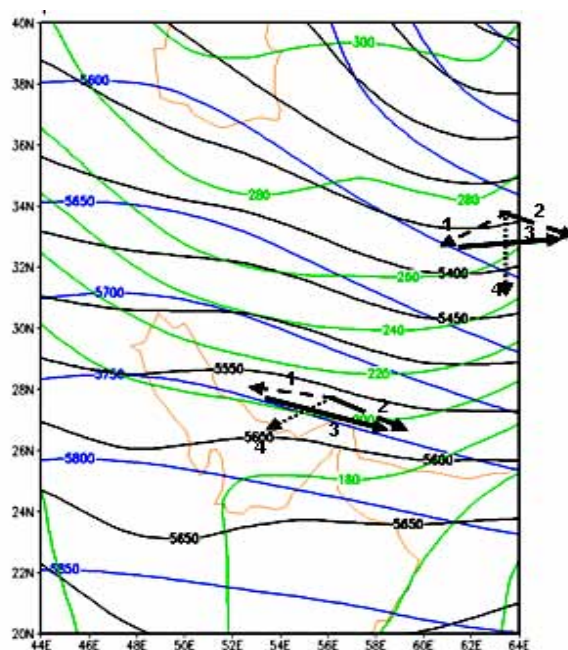
$$V_{TW} = v_{g_2} - v_{g_1} = \frac{g \cdot \Delta TH}{f_c \cdot \Delta x} \quad \text{رابطه (۶)}$$

و ضخامت نیز با استفاده از رابطه ۷ به‌دست آمد:

$$TH = h_{g_2} - h_{g_1} \quad \text{رابطه (۷)}$$

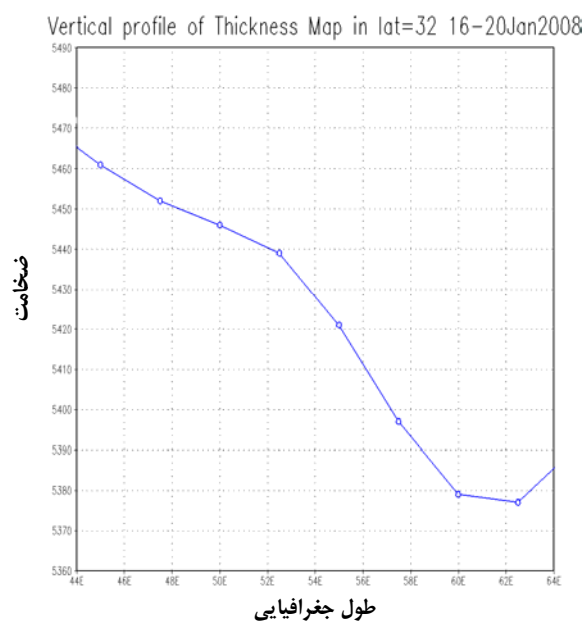
در این رابطه‌ها  $U_{TW}$  مؤلفه افقی سرعت باد گرمایی و  $V_{TW}$  مؤلفه عمودی سرعت باد گرمایی است.  $u_{g_2}$  مؤلفه افقی سرعت باد زمین‌گرد در سطح ارتفاعی بالاتر (در اینجا ۵۰۰ هکتوپاسکال) و  $u_{g_1}$  مؤلفه افقی سرعت باد ژئوستروفیک در سطح ارتفاعی اول پایین‌تر (در اینجا ۱۰۰۰ هکتوپاسکال) است. به‌همین ترتیب  $v_{g_2}$  مؤلفه عمودی سرعت باد زمین‌گرد در سطح ارتفاعی بالاتر و  $v_{g_1}$  مؤلفه عمودی سرعت باد زمین‌گرد در سطح ارتفاعی اول یا پایین‌تر است.  $g$  معرف شتاب جاذبه زمین،  $\Delta TH$  تفاوت ضخامت در دو طرف سطوح ارتفاعی،  $f_c$  عامل کوریولیس و  $\Delta x$  فاصله افقی و  $\Delta y$  فاصله عمودی در دو ضخامت مورد بررسی است. همچنین  $TH$  ضخامت و  $h_{g_2}$  ارتفاع ژئوپتانسیل سطح دوم و  $h_{g_1}$  ارتفاع ژئوپتانسیل سطح اول است (بیستول، ۲۰۰۰، ۲۲۹).

شکل ۱۰- الف جهت بردارهای باد گرمایی در لایه ضخامت ۱۰۰۰ تا ۵۰۰ هکتوپاسکال را در پنجه چهارم نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که با در نظر گرفتن جهت فرارفت هوا که عمود بر باد گرمایی است، نیمه شمالی کشور در معرض فرارفت سرد هوایی است که از مناطق قطبی و بالای منطقه سرد سیبری گذر می‌کند و با خود هوای سرد و خشک را به داخل کشور انتقال می‌دهد، به طوری که با بررسی میزان کاهش ضخامت در روی عرض ۳۲ درجه شمالی مشخص شد که بیشترین کاهش ضخامت هوا در بین طول‌های جغرافیایی ۶۰ تا ۶۲ درجه شرقی وجود دارد که نواحی شرق و شمال شرقی ایران را در برمی‌گیرد (شکل ۹). بنابراین به دنبال این کاهش ضخامت و به عبارتی شیو شدید دما، سامانه سیبری به طور دینامیکی تقویت می‌گردد و فرارفت هوای سرد و بروز سرمای فرارفتی در نواحی شمال شرقی و نیمه شمالی کشور در روزهای پنجه چهارم توجیه می‌شود. مطابق شکل ۱۱ مقدار فرارفت دما و بردارهای باد گرمایی بر روی ایران در روزهای شانزدهم تا بیستم نشان می‌دهد که دو مرکز اصلی فرارفت هوای سرد در شمال شرق و جنوب شرق کشور به ترتیب با مقادیر مرکزی بیش از  $0/9-$  و  $1/5-$  فعال‌اند و زبانه‌های آن با مقدار  $0/3-$  به نواحی غربی کشور رسیده است. همچنین بر روی عربستان و سرزمین‌های مجاور غرب و جنوب کشور، مرکز فرارفت گرم فعال است و از طرف دیگر براساس شکل ۱۰- ب سرعت باد گرمایی بر روی جنوب کشور و بر روی خلیج فارس و دریای عمان و کرانه‌های کشور به بیش از ۳۰ متر بر ثانیه می‌رسد و با فرارفت گرم هوا از شدت سرمای مناطق جنوبی کشور کاسته می‌شود؛ به نظر می‌رسد که بالاتر بودن دمای حداقل ایستگاه‌های اهواز، بوشهر، بندرعباس، شیراز، کرمان و چابهار در پنجه چهارم به همین علت باشد (شکل‌های ۱۰ و ۱۱).

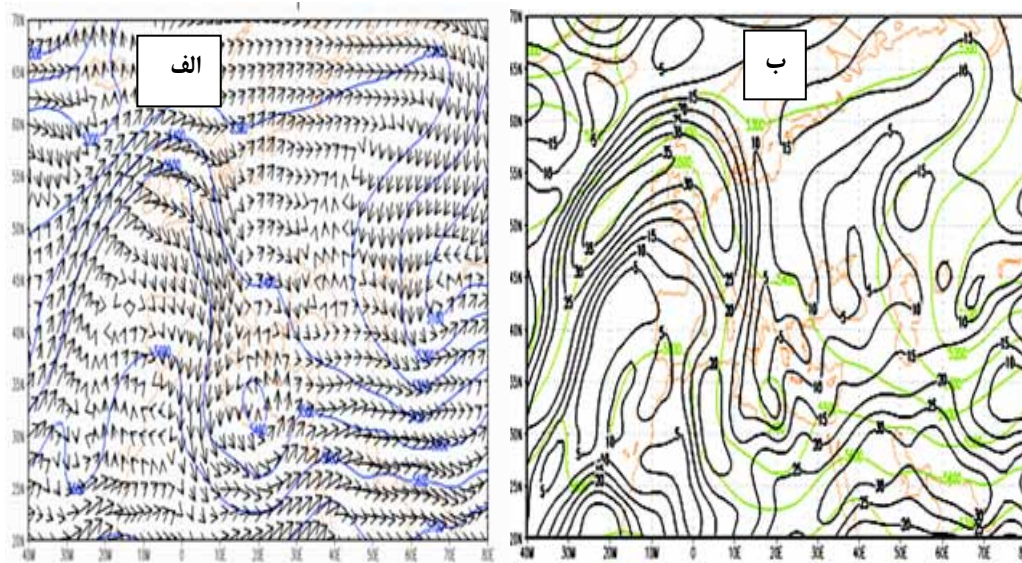


شکل ۸. نمایش ارتباط باد گرمایی با فرارفت دما در دو نقطه انتخابی: بردارهای شماره (۱) و (۲) به ترتیب نماینده باد زمین‌گرد در سطح ۱۰۰۰، ۵۰۰ هکتوپاسکال، بردارهای شماره (۳) باد گرمایی (تفاضل ۱ و ۲) و بردارهای شماره (۴) فرارفت هوا را نشان می‌دهد. مشاهده می‌کنید که بردار میانگین بردارهای باد زمین‌گرد همان بردار فرارفت هوا و عمود بر خطوط هم‌ضخامت و باد گرمایی است.

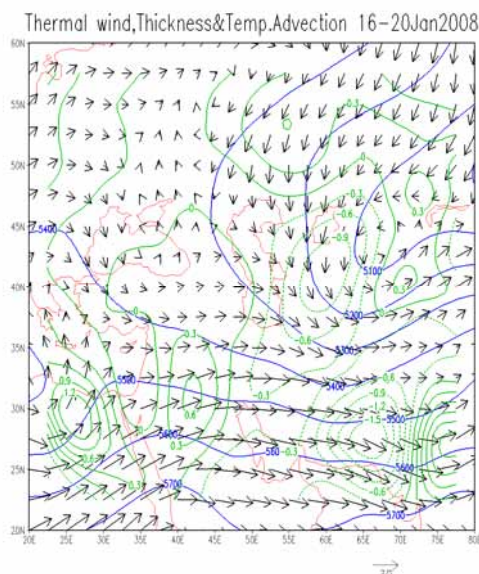
به منظور مقایسه پنجه چهارم و دوم شکل ۱۲ ترسیم شده است. این شکل نشان می‌دهد که مرکز تمرکز فرارفت سرد در پنجه چهارم تفاوت زیادی با پنجه دوم دارد، به طوری که مراکز فرارفت هوای سرد به جای شمال شرق و جنوب شرق کشور در روزهای ششم تا دهم در جنوب غرب کشور متمرکز شده است و جهت ریزش و فرارفت هوای سرد عمود بر بردارهای باد گرمایی است که به موازات خطوط ضخامت در حال جریان هستند. بنابراین، الگو و منشأ ریزش هوای سرد در طی پنجه دوم کاملاً با پنجه چهارم متفاوت است؛ هر چند که در هر دو سامانه بندالی زوجی تشکیل شده است.



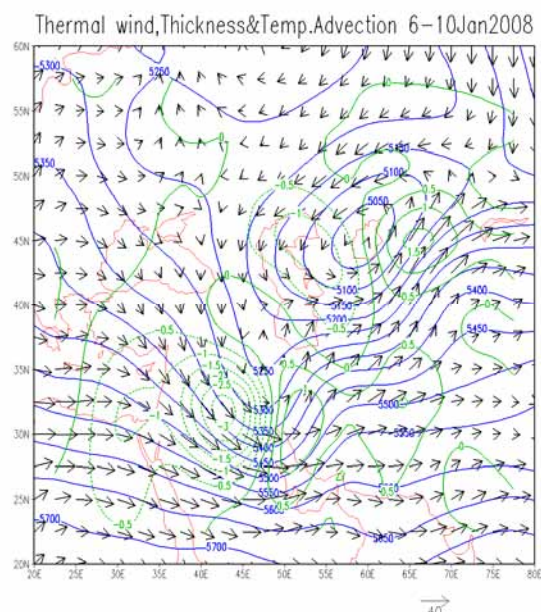
شکل ۹. نیمرخ ضخامت جو در بین سطوح ۱۰۰۰ تا ۵۰۰ هکتوپاسکال در عرض ۳۲ درجه شمالی در پنجه چهارم



شکل ۱۰. نقشه ترکیبی ضخامت جو در لایه ارتفاعی ۱۰۰۰ تا ۵۰۰ هکتوپاسکال (الف) بردار باد گرمایی (ب) سرعت باد گرمایی (متر بر ثانیه)



شکل ۱۱. نقشه ترکیبی میانگین همجندهای فرارفت دما با فواصل  $10^{-4} K^{\circ} S^{-1}$  و بردارهای باد گرمایی و خطوط ضخامت در پنجه چهارم ژانویه ۲۰۰۸



شکل ۱۲. نقشه ترکیبی میانگین همجندهای فرارفت دما با فواصل  $10^{-4} K^{\circ} S^{-1}$  و بردارهای باد گرمایی و خطوط ضخامت در پنجه دوم ژانویه ۲۰۰۸

## نتیجه گیری

بررسی آماری دمای حداقل ژانویه، در طول دوره آماری ۳۰ ساله بیانگر سرمای بی سابقه ژانویه ۲۰۰۸ است. نتایج بررسی نقشه‌های ژئوپتانسیل سطوح بالا نشان می‌دهد که با گسترش زبانه‌های پرفشار سیبری به همراه تقویت کم‌فشار جنب قطبی در روزهای ژانویه ۲۰۰۸ کاهش شدید دمای حداقل در ایران رخ داده است، به طوری که در روزهای شانزدهم تا



بیستم سردترین دماها در اکثر ایستگاه‌های کشور گزارش شده است. نقشه‌های تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در این روزها به خوبی گسترش سامانه‌های دینامیکی - حرارتی جو را نشان می‌دهد (شکل ۳-ب). با بررسی نقشه ترکیبی سرعت باد به همراه منحنی‌های ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ (شکل ۵) مشخص شد که در این روزها پربند ۵۸۲۰ متر تا عرض‌های ۲۰ درجه شمالی نفوذ کرده است (شکل ۵). وجود هستهٔ پرسرعت جت جبهه قطبی واقع در عرض‌های بالاتر از ۳۰ درجه که دارای هسته سرعت به مقدار بیش از ۴۰ متر بر ثانیه است و همچنین به علت وجود هسته‌های سرعت جت جنبه حاره در عرض‌های پایین‌تر به مقدار بیش از ۳۰ متر بر ثانیه، زبانه پر ارتفاع ۵۸۲۰ متر تا عرض‌های ۲۰ درجه شمالی نفوذ کرده است و سبب تقویت بادهای شمالی شده‌اند و با تشکیل سامانه بندالی زوجی شکل تا عرض‌های ۲۰ درجه شمالی بر روی دریای عرب امتداد یافته است (شکل ۴ و ۵).

با محاسبهٔ شاخص نحوه جابه‌جایی طرح موج بادهای غربی، مشخص شد که مقادیر سرعت جابه‌جایی طرح موج به طرف شرق (C) برای روزهای ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰م ژانویه به ترتیب معادل  $-۰/۰۰۸$ ،  $-۰/۰۲۶$ ،  $-۰/۰۰۲$ ،  $-۰/۰۰۷$ ،  $-۰/۰۰۸$  و  $-۰/۰۰۵$  متر بر ثانیه بوده است. از آنجا که مقادیر منفی نشان از جابه‌جایی طرح موج به سمت غرب دارد، بنابراین در تمام روزهای مورد بررسی مقدار عددی منفی برای جابه‌جایی طرح موج بادهای غربی به دست آمده است. این نتیجه نیز خود مؤید استقرار مداوم سامانهٔ بندالی در طی ژانویه ۲۰۰۸ است. روز دهم با مقدار  $-۰/۰۲۶$  قوی‌ترین حالت سامانه بندالی را نشان می‌دهد که این نتیجه خود مؤید استقرار مداوم سامانه بندالی در طی ژانویه ۲۰۰۸ است. همچنین با توجه به شکل ۳-ب مشاهده شد که دو شاخه شدن بادهای غربی در امتدادی بیش از ۴۵ درجه طول جغرافیایی، ثابت بودن طرح موج و در نتیجه استقرار ثابت سامانهٔ بندالی را در مدت نسبتاً طولانی ۴ هفته (ماه ژانویه) نشان می‌دهد. افزون بر این حاکمیت سامانه بندالی در پنجه چهارم (روزهای شانزدهم تا بیستم) و پنجه دوم (روزهای ششم تا دهم) از نوع زوجی است (شکل ۳ و ۶).

به منظور بررسی و تحلیل علت یخبندان، از جهت وزش باد گرمایی و ویژگی‌های دمایی در ضخامت جو استفاده شد. براساس شکل ۱۰-الف که جهت بردارهای باد گرمایی در لایه ضخامت ۱۰۰۰ تا ۵۰۰ هکتوپاسکال را نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که نیمهٔ شمالی کشور در معرض فرارفت سرد هوایی قرار دارد که از مناطق قطبی و بالای منطقه سرد سیبری می‌گذرد و هوای سرد و خشک را به داخل کشور منتقل می‌کند. میزان کاهش ضخامت در روی عرض ۳۲ درجه شمالی نشان از آن دارد که بیشترین کاهش ضخامت هوا در بین طول‌های جغرافیایی ۶۰ تا ۶۲ درجه شرقی وجود دارد که نواحی شرقی و شمال شرقی ایران را دربرمی‌گیرد (شکل ۹). بنابراین، کاهش ضخامت و به عبارتی شیو شدید دما و فرارفت سرد، بروز یخبندان فرارفتی در نواحی شمال شرقی و نیمهٔ شمالی کشور در روزهای پنجه چهارم را توجیه می‌کند. مطابق شکل ۱۱ دو مرکز اصلی فرارفت هوای سرد در شمال شرق و جنوب شرق کشور به ترتیب با مقادیر مرکزی بیش از  $۰/۹$  و  $۱/۵$ - فعال‌اند و زبانه‌های آنها با مقدار  $۰/۳$ - به نواحی جنوبی کشور رسیده است. این در حالی است که مرکز فرارفت گرم بر روی عربستان و سرزمین‌های مجاور غرب و جنوب غرب کشور فعال است و از طرف دیگر براساس شکل ۱۰-ب سرعت باد گرمایی بر روی جنوب کشور و بر روی خلیج فارس و دریای عمان و کرانه‌های کشور به بیش از ۳۰ متر بر ثانیه می‌رسد و با فرارفت گرم هوا از شدت سرمای مناطق جنوبی کشور کاسته می‌شود؛ به نظر می‌رسد که

بالا تر بودن دمای حداقل ایستگاه‌های اهواز، بوشهر، بندرعباس، شیراز، کرمان و چابهار به همین علت باشد (شکل ۱۰ و ۱۱).

بر مبنای نتایج این تحقیق، شکل‌گیری سامانه زوجی بندالی از مهم‌ترین ویژگی‌های روزهای ژانویه ۲۰۰۸ به‌شمار می‌آید. به دنبال تشکیل این سامانه، فرارفت هوای سرد باعث فرارفت شدید هوای سرد به داخل کشور می‌شود. این هوای سرد که از مناطق سرد قطبی نشأت می‌گیرد، باعث تقویت سامانه پرفشار سیبری نیز شده است، به طوری که این سامانه حرارتی - دینامیکی به یک سامانه دینامیکی - حرارتی قوی تبدیل شده و زبانه‌های آن تا عرض‌های پایین کشیده شده و حتی تا بخش‌های جنوبی ایران نیز رسیده است. بر اساس شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مقایسه روزهای پنجه چهارم و دوم ژانویه ۲۰۰۸ مشخص می‌کند که مرکز تمرکز فرارفت سرد در پنجه چهارم تفاوت زیادی با پنجه دوم دارد، به طوری که مراکز فرارفت هوای سرد به جای شمال شرق و جنوب شرق کشور در روزهای ششم تا دهم در جنوب غرب کشور متمرکز شده و جهت ریزش و فرارفت هوای سرد عمود بر بردارهای باد گرمایی است که به موازات خطوط ضخامت در حال جریان هستند. این در حالی است که فرارفت هوای سرد در روزهای پنجه چهارم بیشتر از روزهای پنجه دوم تحت تأثیر سامانه پرفشار حرارتی - دینامیکی سیبری قرار گرفته است. بنابراین، الگو و منشأ ریزش هوای سرد در طی پنجه چهارم کاملاً با پنجه دوم متفاوت است؛ هر چند که در هر دوی آنها سامانه بندالی زوجی تشکیل شده است. در مجموع مهم‌ترین ویژگی‌های مشاهده شده در ژانویه ۲۰۰۸ را می‌توان به شرح ذیل بیان کرد.

- حاکمیت سامانه بندالی زوجی در پنجه چهارم (روزهای شانزدهم تا بیستم) و پنجه دوم (روزهای ششم تا دهم).
- فرارفت بادهای سرد شمالی در نیمه شمالی و نیمه غربی کشور.
- تفاوت الگو و منشأ فرارفت هوای سرد در طی پنجه چهارم با پنجه دوم.
- گسترش زبانه پرفشار با فشار مرکزی ۱۰۵۰ هکتوپاسکال از سمت شمال کشور.

### تقدیر و تشکر

این مقاله برگرفته از طرح شماره ۴۱۰۷۰۰۲/۱/۱ است، که با مساعدت مالی معاونت محترم پژوهشی دانشگاه تهران به انجام رسیده است. بدین وسیله از ایشان قدردانی و تشکر می‌شود.

### منابع

- Alijani, B., 2006, **Synoptic Climatology**, Samt publication, pp 175.
- Alijani, B., Hoshyar, M., 2008, **Synoptic Patterns of Sever Freezing in West of Iran**, Physical Geography Researches Journal, No. 65 , pp 1-6.
- Anderson, J.L., 1995, **A Simulation of Atmospheric Blocking with a Forced Barotropic Model**, J. Atmosph. Sci., 52(15), 2593±2608.
- Azizi, Gh., 1996, **Blocking and Its Effect on Iran Precipitations**, Ph.D. thesis, Tarbiat Modares University, pp 314.

- Azizi, Gh., 1999, **Blocking**, Geography Researches Journal, No.39, pp 38.
- Azizi, Gh., 2004, **Synoptic Assessment of Spring Wide Frost in West Half of Iran**, Modarres Human Sciences Journal, No.1, pp 99-117.
- Barati, Gh., 1996, **Design and Forecasting of Synoptic Patterns Spring Frosts in Iran**, Ph.D. thesis of Climatology, Tarbiat Modares University, Human Sciences Department.
- Barry, Roger G. and Carleton, Andrew M., 2001, **Synoptic and Dynamic Climatology**, Routledge ,pp 308.
- Chenglan, Bao, 2001, **Synoptic Meteorology in China**, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York and London, pp 620.
- Dan Gudgel, 2005, **The Unusual Frost Event of Nov. 29 to Dec. 4 2004**, WFO San Joaquin Valley, National Weather Service, Hanford,CA, , pp2.
- D'Andrea, F., Tibaldi, S., Blackburn, M., Boer, G., D\_enu\_e, M., Dix, M. R., Dugas, B., Ferranti, L., Iwasaki, T., Kitoh, A., Pope, V., Randall, D., Roeckner, E., Straus, D., Stern, W., van den Dool, H., Williamson, D., 1998, **Northern Hemisphere Atmospheric Blocking as Simulated By 15 Atmospheric General Circulation Models in the Period 1979±1988**. Clim. Dynam., 14.
- EmamHadi, Mandana, 2004, **Effective Air Mass of Iran During Cold Seasons**, Geography Researches Journal, No.1, pp 1.
- FaridMojtahedi, Nima, 2006, **Synoptic and Statistical Analysis of Frost in Southern Coast of Caspian sea**, Msc thesis, Tehran University, Geography department, pp 5.
- Hansen, A.R., Sutera, A., 1984, **A Comparison of the Spectral Energy and Enstrophy Budgets of Blocking vs.**
- Martin, Jonathan E., 2006, **Mid-Latitude Atmospheric Dynamics**, A first course, the University of Wisconsin-madison, pp 90.
- Masoodian, S.A., Kaviani, M.R., 2007, **Climatology of Iran**, Isfahan university pub, pp 128.
- Mcil Veen, Robin, 2001, **Fundamentals of Weather and Climate**, Chapman & Hall (London), pp 398.
- Mojard Ghare Bagh, F., 1997, **Analysis and Forecasting of Frost in Azerbaijan**, Ph.D. thesis , Tarbiat Modarres University, Human Sciences Department, pp 2.
- Non-blocking Periods, **Tellus**, 36A.
- Roland B. Stull, 2000, **Meteorology for Scientists and Engineers**, Second Edition, Thomson Learning, Chapter 11, ,pp 229,230.
- Shahrokhvandi, S. M., 2007, **Atmosphere Normal Circulation and Parameters Indices of Active Centres in Winter on Iran**, Human Sciences Researches Journal, Isfahan University, Vol. 22, No. 1, pp 93.
- Shutts, G.J., 1986, **A Case Study of Eddy Forcing During an Atlantic Blocking Episode**, Adv. in Geophys. 29, 135±162.
- Tibaldi, S., Ruti, P., Tosi, E., Maruca, M., 1995, **Operational Predictability of Winter Blocking at ECMWF: an update**, Ann. Geophysicae, 13.