

بررسی عوامل دینامیکی و همدیدی موثر در رخداد بارش سنگین برف در استان تهران مطالعه موردی: ژانویه ۲۰۱۸

زهرا قصابی*^۱، مائده فتحی^۲، پرویز رضازاده^۳، عباس رنجبر سعادت آبادی^۴

۱- عضو هیئت علمی (استادیار)، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران

۲- دکتری هواشناسی، سازمان هواشناسی کشور، تهران

۳- کارشناس ارشد هواشناسی، سازمان هواشناسی کشور، تهران

۴- عضو هیئت علمی (دانشیار)، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران

(تاریخ دریافت: ۹۸/۰۵/۱۶، تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۹/۱۰)

چکیده

بارش برف در مناطق مختلف از الگوهای متفاوتی تبعیت می‌کند. شدت بارش در مناطق پرجمعیتی مانند تهران به دلیل موقعیت خاص توپوگرافی (دامنه‌ی جنوبی رشته‌کوه البرز)، اثر آن بر زیرساخت‌های شهری و اختلال در حمل و نقل در مدیریت شهری و استان اهمیت دارد. در این پژوهش رخداد بارش سنگین برف در استان تهران طی روزهای ۲۷ و ۲۸ ژانویه ۲۰۱۸ با ویژگی رخداد بیشینه‌ی برف در مناطق جنوبی استان نسبت به مناطق کوهستانی شمال آن از دیدگاه همدیدی و دینامیکی بررسی شد. بعلاوه شبیه‌سازی جو با مدل میان‌مقیاس پیش‌بینی عددی وضع هوا (WRF) انجام شد. نتایج نشان داد که استقرار جبهه ساکن در جنوب دامنه‌های البرز به مدت دو روز سبب بیشینه‌ی فعالیت سامانه در بخش‌های جنوبی استان نسبت به ارتفاعات شمال آن شده است. گسترش زبانه پرفشار گرمایی روسیه تا فلات ایران در تقابل با سامانه کم‌فشار مدیترانه و زبانه کم‌فشار سودانی در نیمه جنوبی و مرکز ایران، گرادبان دمایی شدید در منطقه ایجاد کرده است. همزمان با فعالیت جبهه گرم در دشت‌های جنوب استان، فرارفت تاوایی منفی در جنوب دریای خزر و فرارفت تاوایی مثبت در جنوب غرب، غرب و مرکز ایران مشاهده شد. همچنین، ارتفاع وردایست به مقدار ۲۵۰ دکامتر در منطقه کاهش نشان داد و بیشینه همگرایی شار رطوبت در دامنه‌های جنوب غرب رشته‌کوه البرز و بخش‌هایی از مرکز کشور مشاهده شد. نتایج شبیه‌سازی بارش تجمعی ۲۴ ساعته نشان داد که مدل در پیش‌بینی بارش در منطقه‌ی مطالعه فروتخمین داشته و جایگاه هسته بارش را به درستی پیش‌بینی نکرده است.

کلمات کلیدی: بارش سنگین برف، فرارفت تاوایی، همگرایی شار رطوبت، ارتفاع وردایست، استان تهران.

مقدمه

شمال اروپا و گسترش زبانه‌های آن روی دریای خزر و منطقه مطالعه، سبب گرادبان شدید فشار و دما شده است. در تراز بالای (۵۰۰ هکتوپاسکال) در شمال غرب، غرب و نواحی مرکزی کشور ناوه کج بسیار شدید قرار دارد. فرارفت شدید تاوایی مطلق و منفی بودن سرعت قائم در مختصات فشاری، نشان‌دهنده‌ی ناپایداری و صعود هوا بوده و قرار گرفتن تهران در جلوی زبانه‌ی کم فشار و جبهه‌ی گرم بسیار فعال، موجب بارش برف شدید و مداوم در منطقه شده است. فتاحی و شیرواند (۱۳۹۳) با بررسی الگوهای گردش جوی روزهای همراه با بارش برف سنگین در غرب ایران نشان دادند که در اغلب موارد پرفشار سبیری گسترش وسیعی داشته و با تقویت پرفشار آزرز، کمربند پرفشار سبیری-آزرز در شرق اروپا تشکیل شده و با فعالیت زبانه کم‌فشار سودانی در غرب ایران، این منطقه محل تلاقی سامانه‌های کم‌فشار و پرفشار و تداخل

از پدیده‌های جوی که با خسارت‌های فراوان در بخش‌های مختلف اجتماعی، اقتصادی و ... همراه است، رخداد بارش برف سنگین است. ویژگی‌ها و اثرات این رخداد طبیعی تابعی از شرایط زمانی و مکانی محل وقوع آن بوده و به عوامل زیادی بستگی دارد. مطالعه شرایط همدیدی و دینامیکی رخداد برف جهت آگاهی از سازوکار شکل‌گیری و شناخت رفتار آن منجر به پیش‌بینی دقیق‌تر رخداد‌های مشابه خواهد شد که نتیجه آن در برنامه‌ریزی‌های بهنگام نهادهای مختلف اجرایی برای کاهش خسارت‌های جانی و مالی بسیار مفید خواهد بود.

مطالعات بسیاری برای شناخت دلایل بارش‌های سنگین انجام شده است. بارش برف شهر تهران در فوریه ۲۰۰۳ توسط اردکانی و همکاران (۱۳۹۳) مطالعه و مشخص شد که تقابل مرکز کم‌فشار روی مدیترانه و حضور مرکز پرفشار سرد در

چرخند شمال شرق آفریقا سبب ترابرد رطوبت به غرب و جنوب غرب ایران می شود. همچنین در پژوهش شناسایی منابع رطوبتی ایران روشن شد که در فصل تر جذب رطوبت از دریای عرب، خلیج فارس و دریای مدیترانه و در فصل خشک از دریای سرخ، دریای خزر و خلیج فارس است (حیدرزاده و همکاران، ۲۰۱۸).

پژوهشگران خارجی مطالعات فراوانی در باره ی بارش های سنگین انجام داده اند. در پژوهش ماساکند و همکاران (۱۹۹۸) فرارفت بی هنجاری تاوایی پتانسیلی آغازگر توفان های شدید در دامنه های جنوبی کوهستان آلپ دانسته شد که هوای پوشن-سپهر را در راستای شمال-جنوب از جزایر بریتانیا به غرب مدیترانه می رساند. در پژوهش تیکسیرا و همکاران (۲۰۰۶) در خصوص مشخصات همدیدی و دینامیکی بارش سنگین در جنوب برزیل، وجود ناوه عمیق وردسپهر میانی در شرق اقیانوس آرام جنوبی که از سه روز قبل به منطقه نزدیک می-شود، کم فشار سطح زمین که در شمال آرژانتین از یک روز قبل تشکیل می شود، جت تراز پائین که روی پاراگوئه از دو روز قبل توسعه می یابد و همگرایی شار رطوبت قوی در جنوب برزیل از یک روز قبل تعیین شدند. مالیک و تیلور (۲۰۱۰) در تحلیل نیمرخ قائم همگرایی شار رطوبت در حوضه ی آبریز مکزیکی، بیشینه همگرایی شار رطوبت در ارتفاع بین ۸۵۰ تا ۷۰۰ هکتوپاسکال را تعیین کردند. در بررسی بارش های سنگین جنوب شرق ایتالیا توسط مسترانجلو (۲۰۱۱)، بیان شد که جت تراز پائین در الگوی بزرگ مقیاس، با ابقای محیط ناپایدار همرفتی سبب فرارفت توده هوای مرطوب در ترازهای خیلی پایین می شود. همچنین کوهساری سازوکار صعود را در توسعه همرفت فراهم می کند. در مطالعه ی ترابرد بخار آب و نقش آن در تامین رطوبت رویدادهای گسترده بارش برف در شمال-شرق چین، روشن شد که انتقال بخار آب با جهت جنوبی از دریاها ی مجاور و دریای ژاپن روی شرق چین، نقش مهمی در تامین بخار آب رویدادهای برف دارد (سان، ۲۰۱۳). همچنین تاخیر زمانی ۱۸ ساعته بین بودجه ی انتقال بخار آب و بارش وجود دارد. در بررسی راتنا و همکاران (۲۰۱۴) در خصوص اثر رطوبت دریای عرب بر بارش مونسون تابستانی هند،

هوای گرم و سرد شده است. همچنین ناوه با محور شمال-جنوبی یا شمال شرقی- جنوب غربی بر روی شمال خزر و غرب ایران گسترش یافته و سبب ریزش هوای سرد شده است. مهمترین عامل تاثیر گذار در کولاک برف استان آذربایجان غربی در زمان اوج رخداد پدیده کولاک برف (ماه های ژانویه و فوریه)، علاوه بر عامل توپوگرافی، الگوهای کم فشار دریای خزر- پرفشار اروپای شرقی و کم فشار دریای سیاه معرفی شدند (ملازاده و همکاران، ۱۳۹۳). در پژوهش دیگری، عوامل دینامیکی موثر بر بارش سنگین برف در تهران شامل بی هنجاری تاوایی پتانسیلی (PV) ترازهای زیرین و میانی وردسپهر و دو رشته کوه البرز و زاگرس بررسی و مشخص شد که بی هنجاری PV ترازهای زیرین دارای بیشترین تاثیر بوده است (خان سالاری و همکاران، ۱۳۹۶). در گاهیان و علیجانی (۱۳۹۶) در بررسی بارش برف بهمن ۱۳۹۲ در ایران، وجود ناوه عمیق در شرق بندال امگا و تداوم آن برای ۶ روز متوالی همراه با ریزش هوای سرد ناشی از پرفشار قوی در شمال خزر را دلایل رخداد برف سنگین بیان کردند. فرج زاده و همکاران (۲۰۰۷) در مطالعه شار رطوبت در ترازهای پائین و بالای وردسپهر، منابع اصلی رطوبت برای بارش در غرب ایران را دریای عرب و دریای عمان در تراز پائین، دریای سرخ و دریای مدیترانه در تراز میانی بیان داشتند. بیشتر شار رطوبت در ترازهای پائین انتقال می یابد و جریان باد ناشی از سامانه ی فشار سطح زمین نقش مهمی در شار رطوبت به سوی ایران دارد. منابع رطوبت، چگونگی ترابرد رطوبت روی ایران و عوامل موثر بر آن ها در ماه های گوناگون در یک دوره ۳۰ ساله توسط خدادی و همکاران (۱۳۹۲) مطالعه و روشن شد که در ماه های دسامبر تا آوریل به علت وجود سامانه ی کم ارتفاع بر روی شرق دریای مدیترانه، انحنای چرخندی بردار شار رطوبت و ترابری رطوبت از روی دریای مدیترانه به شمال غرب ایران وجود دارد. به علت استقرار واچرخند جنب حاره روی شبه جزیره ی عربستان، دریای عمان و دریای عرب انحنای واچرخندی بردار شار رطوبت از روی غرب اقیانوس هند و دریای سرخ به شرق عربستان دیده می شود و شکل گیری سامانه های دینامیکی در شرق مدیترانه و ترکیب آن ها با

سنگین برف در تاریخ ۷ و ۸ بهمن ۱۳۹۶ در استان تهران مطالعه شد. داده‌های بارش و برف از سازمان هواشناسی کشور تهیه شد. به منظور تحلیل همدیدی و دینامیکی این سامانه از داده‌های بازتحلیل ERA-INTERIM مرکز اروپایی پیش‌بینی میان‌مدت وضع هوا (ECMWF)^۱ با تفکیک افقی ۰/۷۵ درجه برای بررسی کمیت‌های فشار سطح زمین، ضخامت لایه ۵۰۰-۱۰۰۰ هکتوپاسکال، ارتفاع ژئوپتانسیلی ترازهای ۸۵۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال و فرارفت تاوایی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال استفاده شد. همچنین کمیت‌های ارتفاع ژئوپتانسیلی ۲ PVU و شار رطوبت که در مطالعات پیشین در منطقه موردنظر قرار نگرفته‌اند، نیز برای تحلیل‌های بیشتر بررسی شدند. فرارفت تاوایی طبق رابطه (۱) (هلتون، ۲۰۰۴) و همگرایی شار رطوبت طبق رابطه (۲) (بناکوس و شولتز، ۲۰۰۵) محاسبه شدند:

$$-V_g \cdot \nabla(\xi_g + f) = -V_g \cdot \nabla \xi_g - \quad (1)$$

$$MFC = -\nabla \cdot (q\bar{V}_h) = -\bar{V}_h \cdot \nabla q - \quad (2)$$

$$MFC = [-u \frac{\partial q}{\partial x} - v \frac{\partial q}{\partial y}] - q(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y})$$

در رابطه (۱) دو جمله سمت راست به ترتیب فرارفت تاوایی نسبی و تاوایی سیاره‌ای را نشان می‌دهند و در رابطه (۲) منظور از MFC^2 همگرایی شار رطوبت (گرم بر کیلوگرم بر ثانیه) است. جمله اول بر فرارفت افقی رطوبت ویژه و جمله دوم بر همگرایی افقی رطوبت ویژه دلالت دارند. در مقیاس همدیدی با مقیاس زمانی از مرتبه یک روز و مقیاس فضایی از مرتبه ۱۰۰۰ کیلومتر، جمله اول (فرارفت افقی رطوبت ویژه) از مرتبه $10^{-4} gr kg^{-1} s^{-1}$ و جمله دوم (همگرایی افقی رطوبت ویژه) از مرتبه $10^{-5} gr kg^{-1} s^{-1}$ می‌باشند. با توجه به اینکه جمله دوم یک مرتبه کوچکتر است، بنابراین در اینجا صرفاً جمله فرارفت افقی در محاسبه همگرایی شار رطوبت در نظر گرفته شد (بناکوس و شولتز، ۲۰۰۵)

برای شبیه‌سازی جو در طی این رویداد از مدل پیش‌بینی عددی وضع هوا (WRF) نسخه ۳/۹/۱ استفاده شد و داده‌های پیش-بینی بارش تجمعی ۲۴ ساعته از خروجی مدل بدست آمد. مدل

همبستگی قوی بین رطوبت دریای عرب و بارش روی هند مشاهده شد، به گونه‌ای که با کاهش حرکت‌های صعودی و نیز بادهای غربی در دریای عرب، انتقال رطوبت به سوی هند و در نتیجه بارش در منطقه کاهش می‌یابد. لی لی (۲۰۱۵) با محاسبه‌ی شار بخار آب در لایه‌ی بین سطح زمین تا ۸۵۰ هکتوپاسکال در بررسی انتقال رطوبت ترازهای پائین در بارش غرب آفریقا بیان کرد که مولفه‌ی مداری میانگین شار رطوبت فصلی در انتقال رطوبت به ساحل و مولفه‌ی نصف‌النهاری آن در انتقال رطوبت به سواحل گینه موثر است. کرتیس (۲۰۱۶) نتیجه گرفت که عوامل مهم در رخداد سیل شدید و ناگهانی در منطقه پورتلند در ایالات متحده، رطوبت نسبی بالا، افزایش ترابرد رطوبت توسط بیشینه جت تراز پائین در پائین دست ناوه موج کوتاه تراز بالا، افزایش دوره بارش به سبب میدان‌های باد موثر در شکل‌گیری توفان‌های پشت ساختمان‌ها، افزایش حرکات صعودی به دلیل جبهه ساحلی می‌باشند. همچنین لو و همکاران (۲۰۱۷) در بررسی نقش رطوبت مناطق حاره‌ای در بارش‌های فرین و سیل‌های ایالات متحده روشن ساختند که انتقال نصف‌النهاری توده هواهای مرطوبی که در مناطق اقیانوسی حاره تشکیل شده‌اند، به عرض‌های بالاتر، در رخداد سیل به‌ویژه در عرض‌های میانی در شمال‌شرق ایالات متحده موثر است.

هدف این پژوهش مطالعه شرایط هواشناسی منجر به بارش برف سنگین در مناطق جنوبی استان تهران است. رخداد بارش سنگین برف در استان تهران در ژانویه ۲۰۱۸، از بارش‌های حدی طی دوره ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۸ بوده و سبب ایجاد خسارات زیادی شده است. از این‌رو در این مطالعه به بررسی و تحلیل جبهه ساکن در جنوب دامنه‌های البرز و همچنین سایر شرایط همدیدی و دینامیکی در این سامانه پرداخته شده است. همچنین عملکرد مدل WRF برای پیش‌بینی‌های ۲۴ و ۴۸ ساعته ارزیابی شد.

مواد و روش‌ها

بارش برف سنگین از جمله مخاطرات جوی است که پیش‌بینی شدت و مکان آن اهمیت زیادی دارد. در این تحقیق بارش

1. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
2. Moisture Flux Convergence

با دو حوزه، حوزه بزرگ با تفکیک افقی ۱۵ کیلومتر، محدوده ۱۰-۵۱ درجه شمالی و ۸۰-۲۰ درجه شرقی و حوزه کوچک با تفکیک افقی ۵ کیلومتر، محدوده ۲۳-۴۱ درجه شمالی و ۶۵-۴۲ درجه شرقی اجرا شد. زمان اجرای مدل ساعت ۱۲UTC روزهای ۲۵ و ۲۶ ژانویه ۲۰۱۸ است و مدت زمان اجرا ۶۰ ساعت می‌باشد (جدول ۱). برای شرایط مرزی و اولیه مدل از داده‌های شرایط اولیه و مرزی

جدول ۱- مشخصه‌های اجرای مدل WRF

داده‌های شرایط اولیه و مرزی	تعداد حوزه	تفکیک حوزه اول	تفکیک حوزه دوم	Spin up time
GFS 0.5	۲	۱۵ کیلومتر	۵ کیلومتر	۱۲ ساعت

جدول ۲- طرحواره‌های فیزیکی انتخاب شده برای مدل WRF

Boundary layer	Surface layer	Land surface	Cumulus physics	Microphysics	Shortwave/ Long wave radiation
Mellor-Yamada-Janjic TKE scheme	Monin-Obukhov-Janjic scheme	Unified Noah land-surface model	Kain-Fritsch (new Eta) scheme	Lin et al. scheme	Dudhia/RRTM scheme

نشان می‌دهد. بیشترین مقدار بارش برف برای ایستگاه‌های فرودگاه مهرآباد و فرودگاه امام‌خیمینی در ژانویه سال ۲۰۱۸ روی داده، این در حالی است که ایستگاه‌های آبعلی و فیروزکوه واقع در ارتفاعات شمال استان در همین زمان بارش برف بسیار کمی داشته‌اند. از این رو نزول بیشینه بارش برف در مناطق جنوبی استان رخدادی بی‌سابقه است (دوره آماری ایستگاه فرودگاه امام‌خیمینی از سال ۲۰۰۴ و بقیه ایستگاه‌ها از ۱۹۹۳ است).

تحلیل نتایج

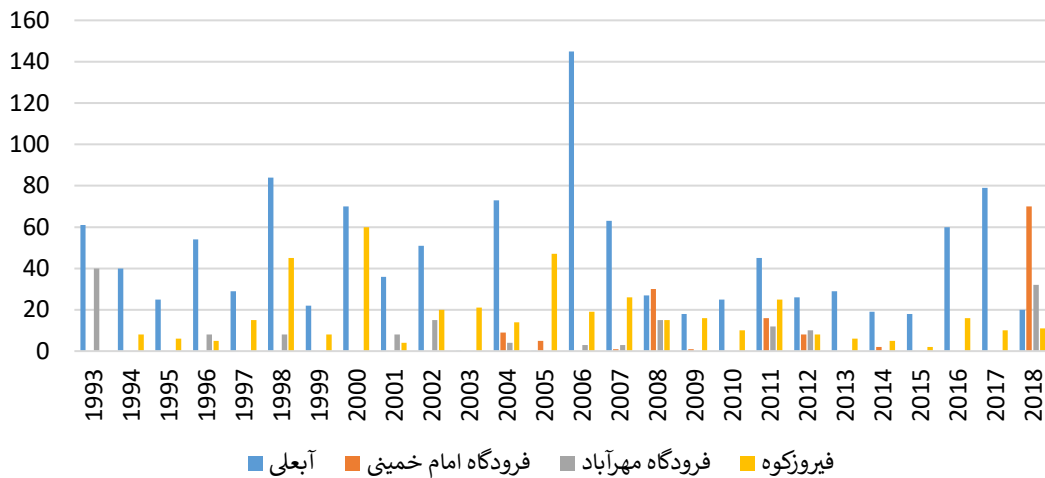
الف- بررسی آماری

مجموع بارش ناشی از رخداد بارش سنگین برف طی روزهای ۲۷ و ۲۸ ژانویه ۲۰۱۸ در ایستگاه‌های هم‌دیدگی منطقه (جدول ۳) نشان می‌دهد که فرودگاه امام در جنوبی‌ترین بخش استان، دارای بیشترین بارش برف با ضخامت ۷۰ سانتی‌متر و آب معادل ۵۷/۶ میلی‌متر است. شکل (۱) بیشینه مقدار بارش برف در ایستگاه‌های فرودگاه مهرآباد، فرودگاه امام‌خیمینی، فیروزکوه و آبعلی را در ماه ژانویه طی دوره ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۸

جدول ۳- مجموع بارش در ایستگاه‌های منطقه در تاریخ ۷ و ۸ بهمن ۱۳۹۶ (۲۷ و ۲۸ ژانویه ۲۰۱۸)

ایستگاه	بارش (میلی‌متر)	ایستگاه	بارش (میلی‌متر)
شمیرانات	۳۹/۴	ژنوفیزیک	۷/۸
آبعلی	۱۱/۵	چیتگر	۲۴/۴
دماوند	۱۰/۱	مهرآباد	۲۸/۹
فیروزکوه	۷	فرودگاه امام	۵۷/۶
فیروزکوه آلودگی	۲۴/۷	شهریار	۴۳/۸
لواسان	۲۲/۵	ورامین	۲۴/۱

سری زمانی برف



شکل ۱- سری زمانی بیشینه مقدار بارش برف ۲۴ ساعته ماه ژانویه در ایستگاه‌های استان تهران.

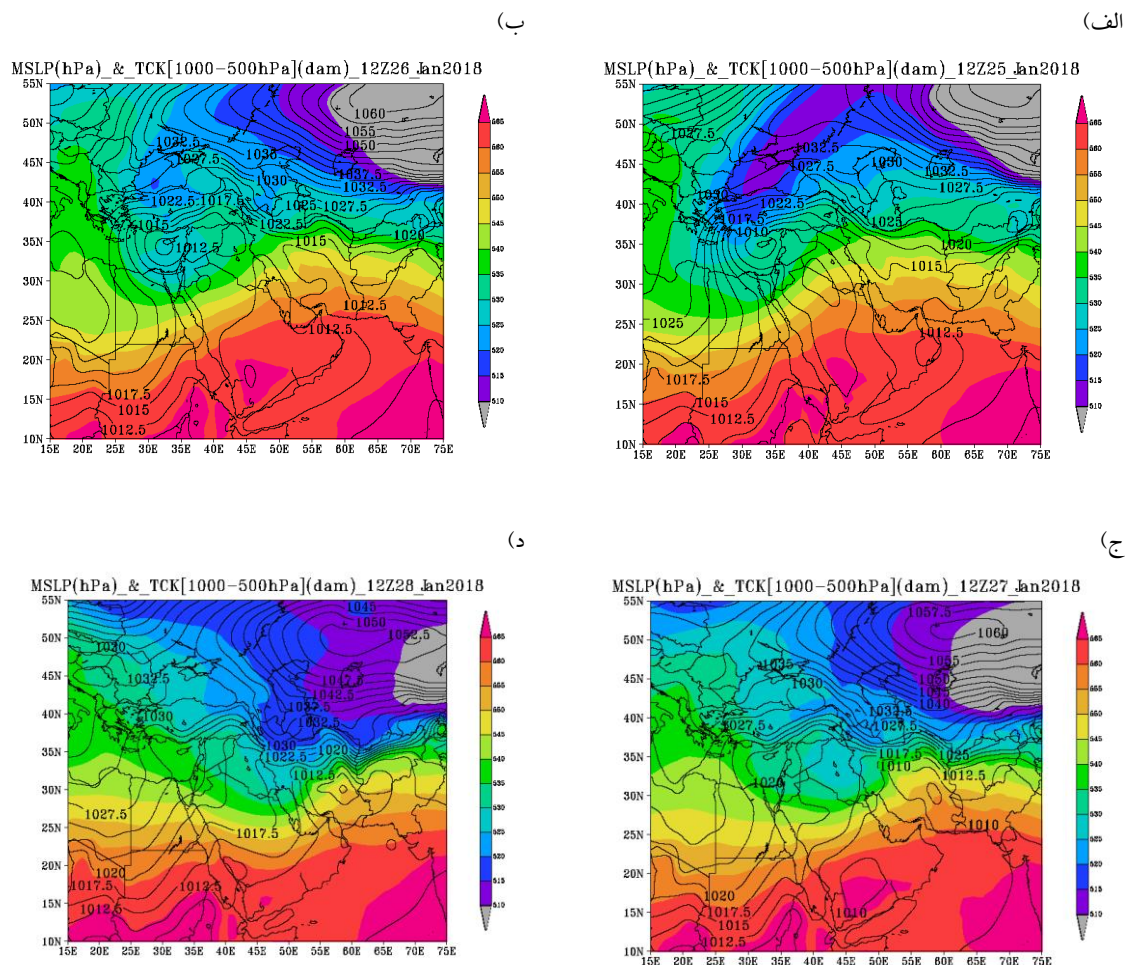
ب- بررسی همدیدی و دینامیکی

برای بررسی همدیدی و دینامیکی رخداد بارش سنگین برف طی روزهای ۲۷ و ۲۸ ژانویه ۲۰۱۸، کمیت‌های موردنظر شامل فشار سطح دریا، ضخامت لایه ۵۰۰-۱۰۰۰ هکتوپاسکال، ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال، ارتفاع ژئوپتانسیلی و فرارفت تاوایی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، ارتفاع وردایست (۲PVU) و شار رطوبت ترازهای ۷۰۰ و ۹۲۵ هکتوپاسکال از دو روز قبل از رخداد مطالعه شد.

- فشار سطح دریا و ضخامت لایه ۵۰۰-۱۰۰۰ هکتوپاسکال

کمربند پرفشار بر روی روسیه تا شرق و جنوب شرق اروپا طی روز ۲۵م ژانویه ۲۰۱۸ مستقر است، زبانه‌ای از آن روی دریای خزر نفوذ کرده و زبانه‌ی دیگری روی دریای سیاه قرار دارد. در همین زمان، کم‌فشار بسته ۱۰۰۷/۵ هکتوپاسکال در شرق مدیترانه و زبانه کم‌فشار سودانی در شمال عربستان دیده می‌شود (شکل ۲-الف). گرادیان فشار نسبتاً شدیدی روی ترکیه و نوار شمالی ایران ایجاد شده که چند روز در همین منطقه حاکم بوده است. بنابراین تقابل توده هوای سرد پرفشار شمالی و گرم کم‌فشار سودانی و کم‌فشار شرق مدیترانه سبب تشکیل و تقویت جبهه در منطقه شده است. جریانات شمالی واداشتی از پرفشار در نوار شرقی ایران، هوای سرد عرض‌های بالاتر را وارد کشور می‌کند. این جریان شمالی با رسیدن به

دریای عمان و دریای عرب در اثر نیروی کوریولیس و در نبود نیروی واداشتی با تغییر جهت ساعتگرد بسوی شرق، هوای گرم و مرطوب را به سمت عربستان هدایت می‌کند. سپس این جریان در همراهی با کم‌فشار حاکم در شمال عربستان، عراق و سپس شرق مدیترانه با جهت جنوب‌غربی و با کسب رطوبت بیشتر از دریای سرخ و دریای مدیترانه، رطوبت مناسبی را به سوی ایران و به‌ویژه منطقه مطالعه منتقل می‌کند (شکل ۲-الف و ب). این وضعیت به وضوح تا روز ۲۷م مشاهده می‌شود. در روز ۲۷م و سپس ۲۸م، با نفوذ بیشتر زبانه پرفشار به نوار شمالی کشور و حتی دامنه‌های جنوبی البرز، گرادیان فشاری در منطقه تشدید شده و کم‌فشار دینامیکی شرق مدیترانه و زبانه کم‌فشار گرمایی سودانی به تدریج به سوی شرق کشور حرکت می‌کند (شکل ۲-ج و د) و در روز ۲۹م از مرزهای شرقی خارج می‌شود (نقشه روز ۲۹م در اینجا نیامده است). افت ضخامت لایه ۵۰۰-۱۰۰۰ هکتوپاسکال در نوار شمالی کشور و به‌ویژه در منطقه‌ی تهران طی روزهای ۲۷م و ۲۸م (رنگ آبی) نشان‌دهنده‌ی کاهش ارتفاع ستون هوا با نفوذ پرفشار و توده هوای سرد به منطقه مطالعه است. بعلاوه، گرادیان آشکار ضخامت لایه ۵۰۰-۱۰۰۰ هکتوپاسکال در دامنه جنوبی البرز، بر روی دشت تهران، شاخص حضور جبهه ساکن در این منطقه است و با بارش رخ داده در منطقه مطابقت دارد.

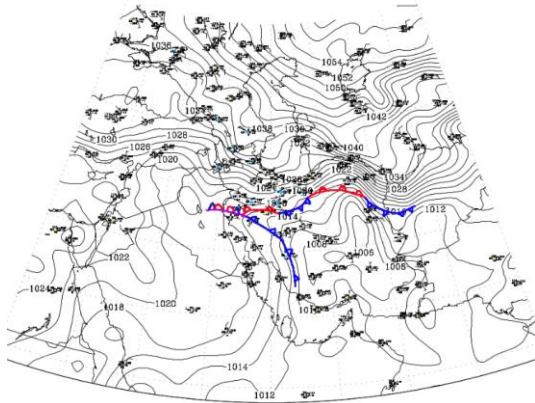


شکل ۲- الگوی فشار سطح دریا و ضخامت لایه ۵۰۰-۱۰۰۰ هکتوپاسکال (رنگی) در ساعت ۱۲ UTC، ۲۵ام تا ۲۸ام ژانویه ۲۰۱۸.

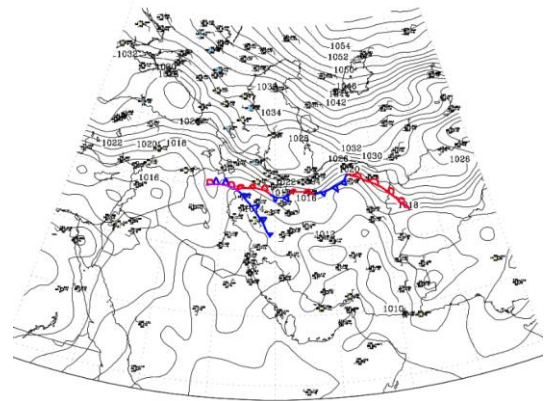
جبهه ساکن مرز دو توده هوای سرد (ناشی از پرفشار از شمال تا جنوب کوه‌های البرز) و توده هوای گرم (که از جنوب غرب کشور به منطقه نزدیک شده است) می‌باشد که به صورت دنباله‌ای از جبهه‌های گرم و سرد فعالیت خود را از گرم به سرد و بالعکس تغییر می‌دهد. با توجه به تداوم بارش و اینکه رخداد بارشی در فصل سرد سال است، بنابراین در این جبهه ساکن بارش از جبهه گرم آن در منطقه تهران رخ داده است و توده هوای سردی که از شمال تا دشت تهران آمده است، اثر کوهساری را بسیار کم‌رنگ کرده و سبب رخداد بیشترین بارش در جنوب تهران شده است. همچنین جریان جنوبی از روی دریای سرخ و جریان شرقی از دریای مدیترانه به سوی ایران مطابق با الگوی جریان که در بخش قبلی بیان شد، می‌باشد.

- میدان‌های ارتفاع ژئوپتانسیلی، باد و دمای تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال روز ۲۵ام گرادیان دمای ۱۲ درجه سلسیوس از شمال غرب تا جنوب غرب ایران و حدود ۸ درجه سلسیوس بین شمال و جنوب رشته کوه البرز وجود دارد. در ۲۴ ساعت بعد گرادیان دما بین شمال و جنوب رشته کوه البرز به ۱۲ درجه سلسیوس رسیده است. گرادیان دمای شدید و جهت باد طی روزهای ۲۷ام و ۲۸ام، استقرار جبهه ساکن (شکل ۳) در دامنه‌های جنوبی البرز را نشان می‌دهد که به علت ضعیف بودن مولفه‌ی عمودی باد بر سطح جبهه، حرکت سریعی ندارد و بیش از ۴۸ ساعت در منطقه باقی مانده است (شکل ۴- ج و د). علاوه بر آن خط همدمای صفر درجه سلسیوس در روز ۲۷ام (شکل ۴- ج) روی تهران قرار دارد که نشانگر بارش برف در این منطقه است. لازم به ذکر است که

(ب)



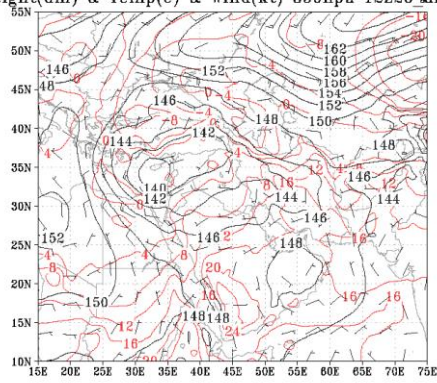
(الف)



شکل ۳- جبهه ساکن در ساعت ۰۰:۰۰ UTC، (الف) ۲۷ ژانویه ۲۰۱۸ و (ب) ۲۸ ژانویه ۲۰۱۸.

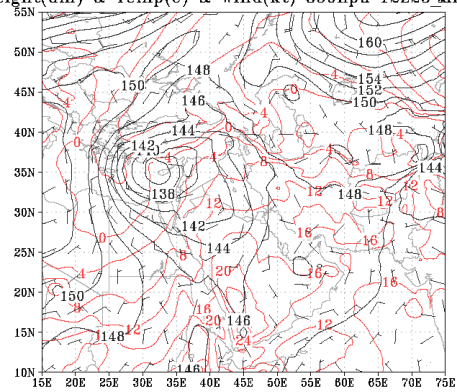
(ب)

Height(dm) & Temp(c) & Wind(kt) 850hpa 12Z26 Jan2018



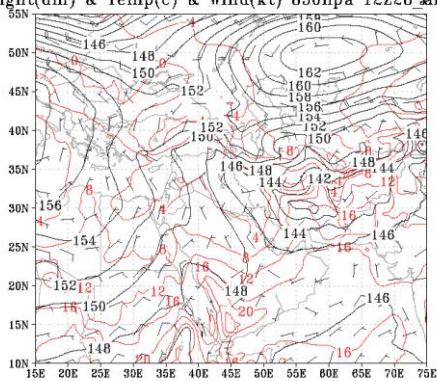
(الف)

Height(dm) & Temp(c) & Wind(kt) 850hpa 12Z25 Jan2018



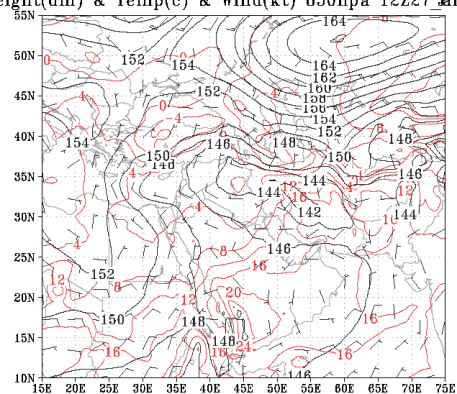
(د)

Height(dm) & Temp(c) & Wind(kt) 850hpa 12Z28 Jan2018



(ج)

Height(dm) & Temp(c) & Wind(kt) 850hpa 12Z27 Jan2018

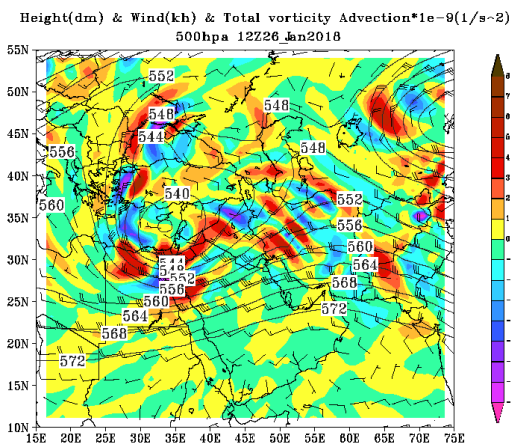


شکل ۴- الگوی ارتفاع ژئوپتانسیلی، باد و دمای تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در ساعت ۱۲ UTC، ۲۵ تا ۲۸ ژانویه ۲۰۱۸.

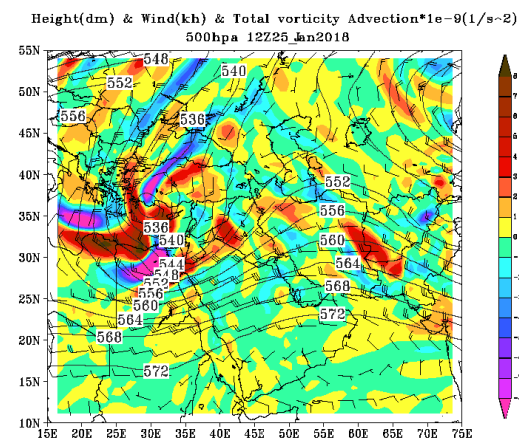
بخش‌هایی از غرب، مرکز ایران و دامنه‌های جنوبی البرز و فرارفت تاوایی منفی در جنوب دریای خزر قرار دارد (شکل ۵-ج). با حرکت آهسته و شرق‌سوی ناوه، شاهد استقرار آن تا بعدازظهر روز ۲۸م در منطقه هستیم (شکل ۵-د) و به تدریج در روز ۲۹م ناوه از نوار شرقی کشور خارج می‌شود (شکل در اینجا نیامده است). در طی فعالیت کم‌فشار بریده در منطقه، مقادیر زیاد فرارفت تاوایی مثبت در جلوی ناوه همواره سبب تقویت این سامانه شده است. لازم به ذکر است که با جنوب-غربی شدن راستای وزش باد از ساعت ۱۲ روز ۲۵م، پشته از منطقه مطالعه (محدوده استان تهران) عبور کرده است. حد فاصل خط پشته تا خط ناوه، با توجه به بیشینه فرارفت تاوایی مثبت با فعالیت جبهه همراه است.

ارتفاع، باد و فرارفت تاوایی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال
در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال روز ۲۵م، ناوه عمیقی در جنوب-شرق اروپا تا شرق دریای مدیترانه و در ادامه تا شمال دریای سرخ حاکم است (شکل ۵-الف). به دلیل گرادیان ارتفاعی بیشتر در غرب این ناوه نسبت به شرق آن، باد با سرعت بیشتری در غرب ناوه می‌وزد. وزش باد شمالی سبب نفوذ هوای سرد از عرض‌های بالاتر به عرض‌های پایین‌تر می‌شود. به دلیل استقرار پشته ارتفاعی ناشی از پراارتفاع جنب حاره که در راستای نصف‌النهاری از تنگه هرمز تا شمال‌شرق دریای خزر و شمال دریاچه آرال کشیده شده است، کم‌فشار بریده و ناوه آن در شرق مدیترانه حرکت آرامی داشته و تا ۲۴ ساعت بعد در همین منطقه فعال است (شکل ۵-ب). در نهایت، از ساعت ۰۶ UTC روز ۲۷م کم‌فشار بریده و ناوه همراه آن وارد ایران می‌شود. طی روز ۲۷م بیشینه فرارفت تاوایی در جنوب‌غرب،

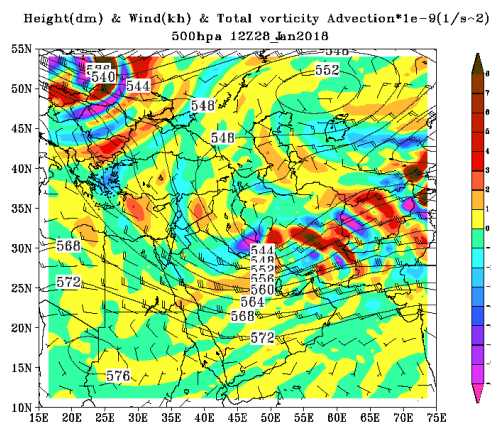
(ب)



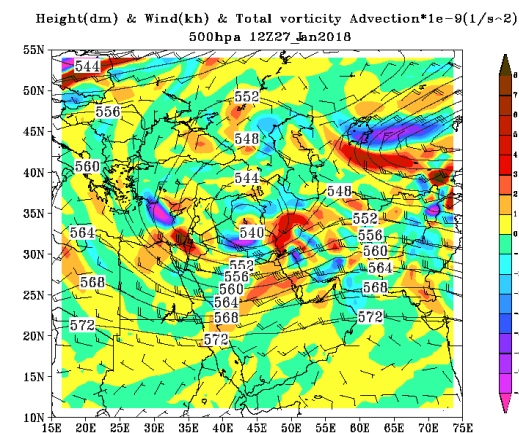
(الف)



(د)



(ج)



شکل ۵- الگوی ارتفاع ژئوپتانسیلی، باد و فرارفت تاوایی (رنگی) تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در ساعت ۱۲ UTC، ۲۵م تا ۲۸م ژانویه ۲۰۱۸.

- ارتفاع وردایست (۲PVU)

شرق ترکیه و بخش‌های مرکزی و شمال‌شرقی عربستان و به تدریج در روز ۲۶م در دامنه‌های جنوبی رشته کوه البرز و بخش‌هایی از مرکز کشور است. این شرایط تا پایان روز ۲۷م نیز برقرار است (نقشه‌های تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در اینجا نیامده است). با توجه به اینکه مرکز کم‌فشار از روز ۲۴م در شرق مدیترانه حاکم بوده و به دلیل همگرایی در سطح زمین و حرکات صعودی همراه با آن و استقرار بیش از ۷۲ ساعت در منطقه‌ی مدیترانه با رطوبت مناسبی همراه شده است و سبب انتقال رطوبت از سه روز قبل از رخداد این سامانه به سوی دامنه‌های جنوب البرز شده که در تقویت آن نقش مهمی داشته است. از سوی دیگر، جریانات شرقی از دریای عرب به سوی عربستان و سپس همراهی این جریانات با جریانات جنوبی از روی دریای سرخ منجر به انتقال رطوبت به سوی جنوب‌غرب، غرب و در ادامه دامنه‌های جنوبی البرز و مرکز کشور شده است.

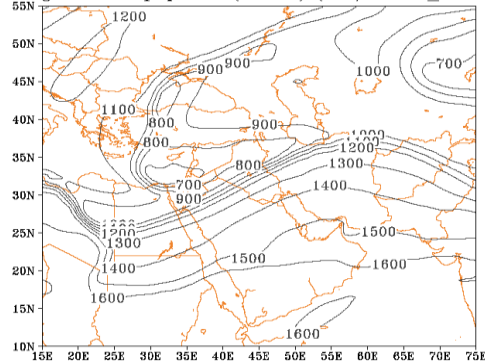
در شکل ۶ ارتفاع وردایست (۲PVU) نشان داده شده است. در روز ۲۵م ساعت ۱۲UTC، کمینه ارتفاع (۶۰۰ دکامتر) دقیقاً در روی خط ناوه در دریای سیاه و همچنین در شرق دریای مدیترانه قرار دارد و ارتفاع وردایست روی تهران ۱۰۵۰ دکامتر است (شکل ۶-الف). پشته ارتفاعی در راستای نصف‌النهاری تا شمال‌شرق ایران کشیده شده و سبب افزایش شدید گرادیان ارتفاع از شمال دریای سرخ به سوی ایران شده است (شکل ۶-ب) این هم دلیل دیگری برای حرکت آرام سامانه مذکور است. کمینه ارتفاع (۷۰۰ دکامتر) در ساعت ۱۲UTC روز ۲۷م در غرب ایران و ۲۴ ساعت بعد در منطقه تهران با مقدار ۸۰۰ دکامتر مشاهده می‌شود که نشانگر نفوذ جت قطبی به عرض‌های جنوبی‌تر از تهران است. بنابراین ارتفاع وردایست در منطقه تهران در طی گذر سامانه ۲۵۰ دکامتر افت کرده است.

- شار رطوبت ترازهای ۹۲۵ و ۷۰۰ هکتوپاسکال

شبیه‌سازی بارش تجمعی
مقادیر بارش تجمعی ۲۴ ساعته در ایستگاه‌های استان تهران و پیش‌بینی بارش تجمعی ۲۴ ساعته با استفاده از مدل در جدول ۴ آمده است. مقایسه‌ی مقادیر آن نشان می‌دهد که مدل در پیش‌بینی مقدار بارش در منطقه فروتخمین^۱ داشته است. مقادیر میانگین خطای مطلق و جذر میانگین مربعات (شکل ۹) در استان تهران نشان می‌دهد که مقدار خطا در پیش‌بینی ۲۴ ساعت اول کمتر از پیش‌بینی ۲۴ ساعت دوم است، به‌طوریکه مقدار میانگین خطای مطلق برای پیش‌بینی‌های ۲۴ و ۴۸ ساعته به ترتیب ۷/۸ و ۱۱/۹ است. همچنین نقشه‌ی توزیع بارش تجمعی ۲۴ ساعته مدل، نشان می‌دهد که موقعیت مکانی پیش‌بینی هسته بارش توسط مدل به‌سوی جنوب‌غرب استان تهران متمایل بوده و روی استان مرکزی است (شکل ۱۰).

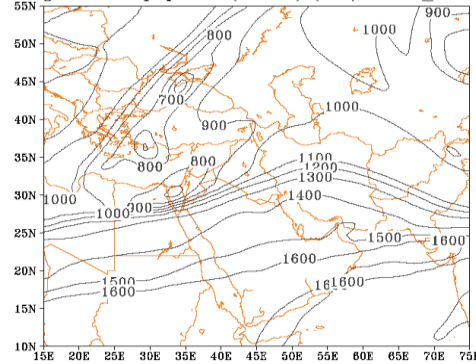
شار رطوبت به منظور بررسی شرایط تامین رطوبت و چگونگی ترابرد آن از روی دریاهای آزاد به منطقه مطالعه در تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال و نیز به دلیل کوهساری بودن منطقه در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال بررسی می‌شود. در تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال بیشینه شار رطوبت در روز ۲۵م در شرق دریای سرخ، جنوب و مرکز عربستان و غرب عراق دیده می‌شود. با توجه به اینکه رطوبت همراه با بادهای شرقی از روی دریای عمان و عرب و سپس بادهای جنوبی و جنوب‌غربی از روی دریای سرخ و در ادامه بادهای غربی از روی دریای مدیترانه به سوی غرب ایران جابه‌جا می‌شود؛ در بعدازظهر روز ۲۵م و طی روز ۲۶م بیشینه آن در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال به ترتیب در جنوب‌غرب و غرب کشور و دامنه‌های جنوب‌غربی البرز دیده می‌شود (شکل ۷-ب). همچنین در روز ۲۶م در تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال بیشینه آن در دامنه‌های جنوبی البرز مرکزی و غربی، بخش‌هایی از مرکز کشور و نیز جنوب و جنوب‌شرق عربستان است (شکل ۸). این شرایط تا ۲۴ ساعت بعد نیز ادامه دارد. در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال بیشینه شار رطوبت طی روز ۲۵م، روی عراق،

Height of Tropopause (2 PVU) (dm) 12Z26 Jan2018



ب

Height of Tropopause (2 PVU) (dm) 12Z25 Jan2018

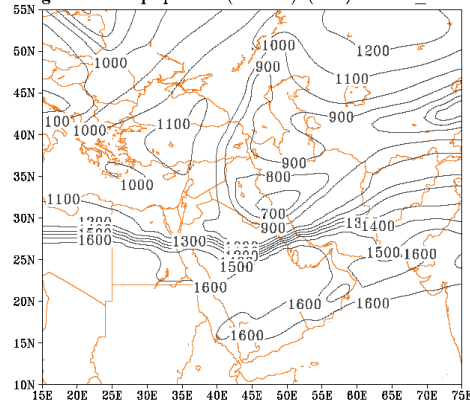


الف

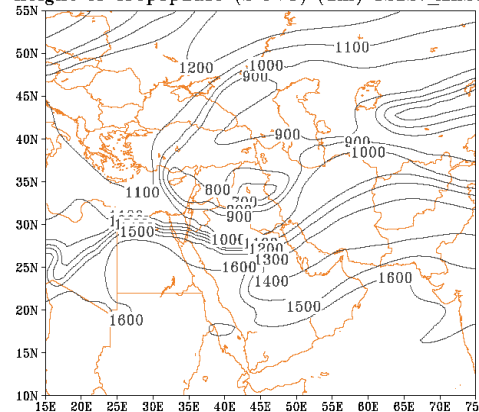
د

ج

Height of Tropopause (2 PVU) (dm) 12Z28 Jan2018



Height of Tropopause (2 PVU) (dm) 12Z27 Jan2018

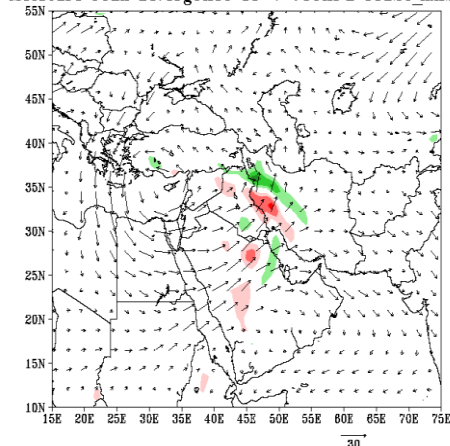


شکل ۶- الگوی ارتفاع وردایست (۲PVU) (دکامتر) در ساعت UTC ۱۲، ۲۵ تا ۲۸م ژانویه ۲۰۱۸.

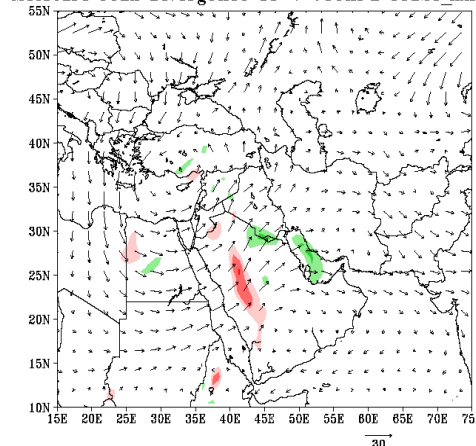
ب

الف

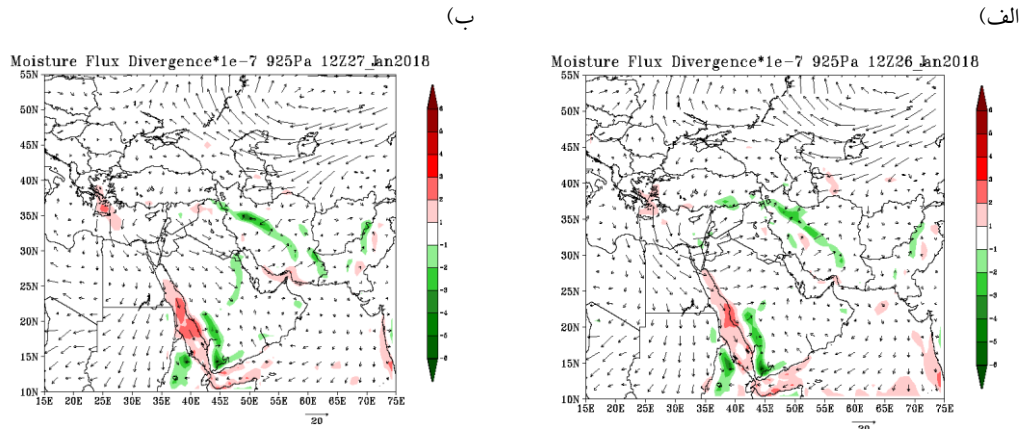
Moisture Flux Divergence*1e-7 700hPa 00Z26 Jan2018



Moisture Flux Divergence*1e-7 700hPa 00Z25 Jan2018



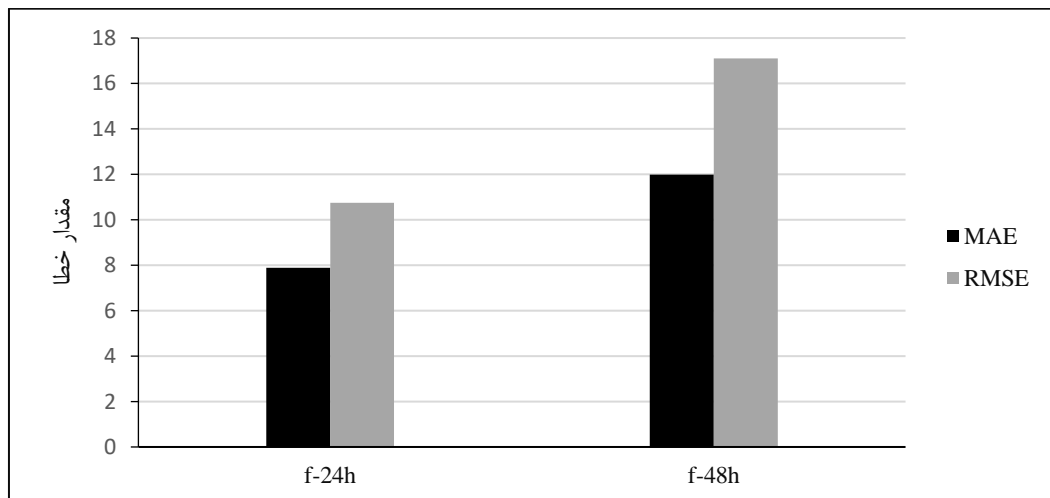
شکل ۷- الگوی شار رطوبت بر حسب $gr\ kg^{-1}s^{-1}$ (همگرایی به رنگ سبز و واگرایی به رنگ قرمز) و باد بر حسب متر بر ثانیه، تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال در تاریخ ۲۵ و ۲۶ ژانویه ۲۰۱۸.



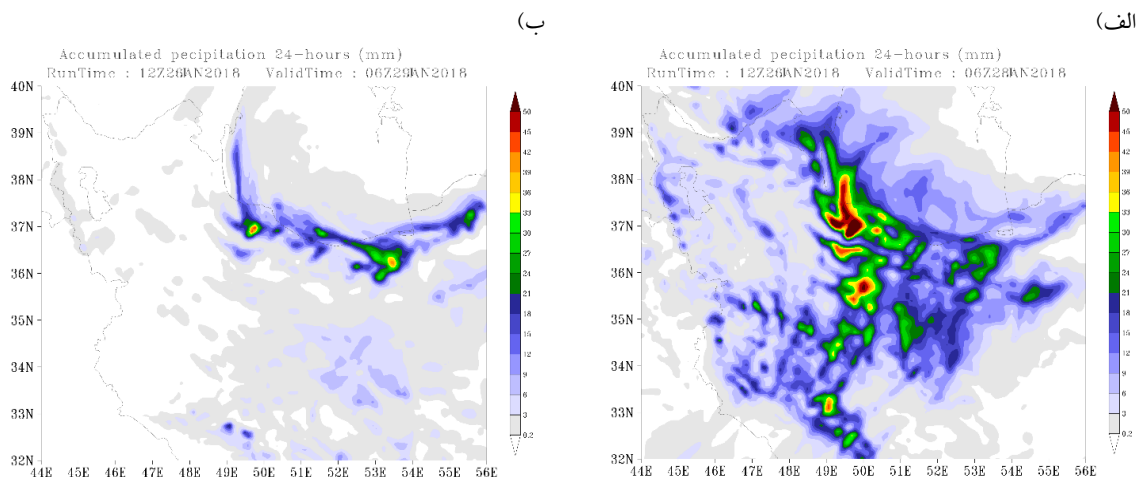
شکل ۸- الگوی شار رطوبت بر حسب $\text{gr kg}^{-1}\text{s}^{-1}$ (همگرایی به رنگ سبز و واگرایی به رنگ قرمز) و باد بر حسب متر بر ثانیه، تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال در تاریخ ۲۶ و ۲۷ ژانویه ۲۰۱۸.

جدول ۴- مجموع بارش ۲۴ ساعته و پیش‌بینی ۲۴ و ۴۸ ساعته مدل در ایستگاه‌های منطقه در ۷ و ۸ بهمن ۱۳۹۶ (۲۷ و ۲۸ ژانویه ۲۰۱۸)

نام ایستگاه	بارش تجمعی ۲۴ ساعته روز ۱۲۷م	پیش‌بینی ۲۴ ساعته	پیش‌بینی ۴۸ ساعته	بارش تجمعی ۲۴ ساعته روز ۱۲۸م	پیش‌بینی ۲۴ ساعته	پیش‌بینی ۴۸ ساعته
تهران مهرآباد	۲۲/۷	۱۳/۶۱	۰/۴۸	۶	۰/۰۵	۰/۰۹
شمیرانات	۳۲/۶	۱۶/۰۲	۱/۳۰	۶/۸	۱/۰۲	۳/۶۴
آبعلی	۹/۲	۱۵/۷۳	۹/۷۱	۰/۵	۱/۲۳	۰/۹۶
ژئوفیزیک	۲۵	۱۳/۴۹	۰/۵۹	۰/۲	۰/۰۰	۰/۱۷
دماوند	۸	۱۳/۵۹	۴/۸۰	۲	۱/۵۶	۰/۸۳
شهریار	۴۰	۱۵/۳۶	۴/۳۰	۳/۷	۰/۵۳	۰/۰۰
فرودگاه امام	۴۵	۱۸/۲۱	۷/۹۵	۱۲	۲/۶۶	۱/۲۹
فیروزکوه	۲۰/۷	۸/۹۵	۲/۹۵	۲/۴	۰/۶۸	۱/۶۰
چیتگر	۲۴	۱۵/۲۰	۱/۵۵	---	۰/۲۳	۰/۰۷
لواسان	۲۰/۱	۱۸/۱۲	۳/۹۷	۲/۳	۱/۸۵	۳/۹۸
ورامین	۱۱/۳	۱۳/۸۸	۱۲/۰۶	۱۲/۸	۰/۹۱	۰/۰۶



شکل ۹- میانگین خطای مطلق و جذر میانگین مربعات در استان تهران در تاریخ ۲۷ و ۲۸ ژانویه ۲۰۱۸.



شکل ۱۰- پیش‌بینی بارش تجمعی ۲۴ ساعته مدل الف (۲۷ و ب) ۲۸ ژانویه ۲۰۱۸

نتیجه‌گیری

شناخت سازوکار بارش‌های شدید از جمله بارش سنگین برف در منطقه‌ی تهران حائز اهمیت است، از این رو موضوع این پژوهش بررسی یک نمونه بارش سنگین برف در استان تهران است. معمولاً بارش در مناطق کوهستانی استان تهران نسبت به دشت‌ها بیشتر است، اما در سامانه بررسی شده در این پژوهش، بارش در دشت‌های جنوبی استان نسبت به ارتفاعات شمال آن بسیار بیشتر بود. مطالعه حاضر به دلیل بی‌سابقه بودن بارش برف در مناطق کم‌ارتفاع جنوب استان با بررسی کمیت‌های مختلف هواشناسی انجام شد که برخی از آن‌ها تاکنون بررسی نشده بودند. مطالعه‌ی کمیت‌های هواشناسی مناسب از جمله فرارفت رطوبت، افت ارتفاع وردایست و میدان دما و فشار می‌تواند پیش‌نشانگرهای مناسبی در رخداد بارش‌های سنگین در منطقه باشد. نتایج این تحقیق نشان داد که:

- کم‌فشار بریده و ناوه آن در شرق مدیترانه و روی ترکیه تا دریای سیاه استقرار داشته و به دلیل حاکمیت پشته ارتفاعی در نیمه شرقی ایران، حرکت آرامی داشته و به مدت دو روز در منطقه فعال بوده است.

- با ورود کم‌ارتفاع بریده و ناوه همراه آن از جنوب‌غرب به کشور، فرارفت تاوایی مثبت در جلوی ناوه (در جنوب‌غرب، بخش‌هایی از غرب و مرکز ایران) سبب تقویت سامانه شده است.

- بیشینه افت ارتفاع وردایست در طی گذر سامانه (۲۵۰ دکامتر) در منطقه تهران رخ داد.

- شار رطوبت تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال در دو روز قبل از رخداد بارش سنگین برف نشان می‌دهد که رطوبت مناسبی از دریای عمان و عرب و نیز از دریای سرخ به سوی غرب ایران جابه‌جا می‌شود که با توجه به کوهساری بودن فلات ایران بیشینه رطوبت تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال در جنوب‌غرب و غرب کشور و دامنه‌های جنوب‌غربی البرز طی روزهای ۲۶م و ۲۷م ژانویه مشاهده شد.

بنابراین در این سامانه با توجه به استقرار توده هوای سرد در منطقه و ورود جبهه‌ی گرم فعال از جنوب‌غرب و در نتیجه افزایش گرادیان دما، فعالیت جبهه گرم در دامنه‌های جنوبی البرز تقویت شده و سبب رخداد بیشینه بارش برف در این مناطق شده است. در مطالعات پیشین معمولاً تشکیل جبهه سرد و ساکن با ریزش هوای سرد از عرض‌های بالاتر و فرارفت

- در این سامانه منطقه فعالیت جبهه ساکن در حد فاصل دو توده هوای سرد (پرفشار از شمال تا جنوب کوه‌های البرز) و توده هوای گرم که از جنوب‌غرب کشور به منطقه نزدیک شده است، می‌باشد. توده هوای سردی که از شمال تا دشت تهران آمده است، اثر کوهساری را بسیار کم‌رنگ کرده است؛ بنابراین بیشترین بارش در جنوب تهران رخ داده است. با توجه به تداوم بارش و اینکه رخداد بارشی در فصل سرد سال است، بنابراین در این جبهه ساکن بارش از جبهه گرم آن رخ داده است.

۶. ملازاده، ب.؛ م. سلیقه، ب. علیجانی و م. ح. ناصرزاده. ۱۳۹۳. تحلیل آماری و سینوپتیکی کولاک برف در استان آذربایجان غربی. نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی. ۷۵-۹۰: (۴)۱.

7. Banacos, P.C. and D.M. Schultz. 2005. The Use of Moisture Flux Convergence in Forecasting Convective Initiation: Historical and Operational Perspectives. *Journal of Weather and Forecasting*, 20: 351-366.
8. Curtis, M.B. 2016. A Synoptic and Mesoscale Analysis of Heavy Rainfall at Portland, Maine, 13-14 August 2014. *Journal of Operational Meteorology*, 5(7): 78-86.
9. Faragzadeh, M.; M. Karimi Ahmadabad; H. Ghaemi and M. Mobasheri. 2007. Studying the Moisture Flux over West of Iran: A Case Study of January 1 to 7, 1996 Rain Storm. *Journal of Applied Sciences*, 7(20): 3023-3030.
10. Heydarizad, M.; E. Raeisi; R Sori and L. Gimeno. 2018. The Identification of Iran's Moisture Sources Using a Lagrangian Particle Dispersion Model. *Atmosphere MDPI*, 9: 408. 15.
11. Holton, J.R. 2004. *An Introduction to Dynamic Meteorology*. Fourth Edition. Elsevier Academic Press, San Diego, California, USA
12. Lele, M. I.; L. Leslie and J. Lamb Peter. 2015. Analysis of Low-Level Atmospheric Moisture Transport Associated with the West African Monsoon. *Journal of Climate*, 28: 4414-4430.
13. Lu, M. and U. Lall. 2017. Tropical Moisture Exports, Extreme Precipitation and Floods in Northeast US. *Earth Science Research*, 6(2): 91-111, DOI:10.5539/esr.v6n2p91.
14. Malik, K. M. and P. A. Taylor. 2010. Characteristics of Moisture Flux Convergence over the Mackenzie River Basin for Water Years 1991-2008. *Atmosphere-Ocean*, 49(3): 279-288.
15. Massacand, A.C.; W. Heini and C.D. Huw; 1998. Heavy precipitation on the Alpine southside: An upper-level precursor. *Geophysical Research Letters*, 25(9): 1435-1438.
16. Mastrangelo, D.; K. Horvath; A. Riccio and M.M. Miglietta. 2011. Mechanisms for convection development in a long-lasting heavy precipitation event over southeastern Italy. *Atmospheric Research*, 100: 586-602.

تاوایی مثبت به سمت منطقه سبب ریزش برف شدید در مناطق کوهستانی استان تهران ذکر شده است (اردکانی و همکاران ۱۳۹۳).

همچنین شبیه‌سازی بارش تجمعی ۲۴ ساعته توسط مدل میان مقیاس WRF نشان داد که مدل در پیش‌بینی بارش تجمعی ۲۴ ساعته در این سامانه بارشی، در مناطق جنوبی استان تهران فروتخمین قابل ملاحظه‌ای داشته و جایگاه هسته بارش را به درستی پیش‌بینی نکرده است. همچنین میانگین خطای مطلق برای پیش‌بینی‌های ۲۴ و ۴۸ ساعته به ترتیب ۷/۸ و ۱۱/۹ جذر میانگین مربعات به ترتیب ۱۰/۷ و ۱۷/۱ است.

قدردانی

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از سازمان هواشناسی کشور جهت در اختیار قرار دادن داده‌های مورد نیاز تشکر و قدردانی نمایند.

منابع

۱. اردکانی، ح.؛ پ. آقایی ارم ساداتی و ف. ارکیان (۱۳۹۳). مطالعه موردی سامانه‌های همدیدی موثر در بارش برف سنگین در شهر تهران در فوریه ۲۰۰۳، مجله پژوهش‌های علوم و فنون دریایی، سال نهم، شماره اول، صفحات ۸۹-۹۹.
۲. خان‌سالاری، س.؛ ع. محب‌الحجه و ف. احمدی‌گیوی. ۱۳۹۶. عوامل دینامیکی موثر بر بارش سنگین برف در تهران: مطالعه موردی. فیزیک زمین و فضا. ۴۴(۱): ۱۷۹-۱۹۸.
۳. خدادی، م.؛ م. آزادی و پ. رضازاده. ۱۳۹۲. منابع رطوبت و ترابرد ماهانه آن روی ایران و برهمکنش آن با منسون هندوستان و پراترفاع جنب‌حاره. مجله ژئوفیزیک ایران. ۲: ۱۱۳-۹۶.
۴. درگاهیان، ف. و ب. علیجانی. ۱۳۹۶. بررسی سینوپتیکی و دینامیکی بارش برف بهمن ۹۲ در ایران با تاکید بر نقش پدیده بلاکینگ. مجله مخاطرات طبیعی. ۶(۱۲): ۳۶-۱۹.
۵. فتاحی، ا. و ه. شیراوند. ۱۳۹۲. بررسی الگوهای گردش جوی روزهای همراه با بارش برف سنگین در غرب ایران. نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی. ۱(۱): ۹۷-۱۰۷.

19. Sun, B. and W. Huigun. 2013. Water Vapor Transport Paths and Accumulation during Wide spread Snowfall in Northeastern China. *Journal of Climate*, 26: 4550-4566.
20. Teixeira, M. D. S and P. Satyamurty. 2006. Dynamical and Synoptic Characteristics of Heavy Rainfall Episodes in Southern Brazil. *Monthly Weather Review*, 135: 598-617.
17. Ratna, S. B.; A. Cherchi; P.V. Joseph; S. Behera; B. Abish and S. Masina. 2014. Moisture trend over the Arabian Sea and its influence on the Indian summer monsoon rainfall. *Centro Euro-Mediterraneo Sui Cambiamenti Climatici*, RP0225.
18. Stucki, P.; R. Rickli; S. Bronnimann; O. Martius; H. Wanner; D. Grebner and J. Luterbacher. 2012. Weather patterns and hydro-climatological precursors of extreme floods in Switzerland since 1868. *Meteorologische Zeitschrift*, 21(6): 531–550.