

شبیه‌سازی و تحلیل عوامل موثر بر توفان برف در شمال ایران در فوریه ۲۰۱۴

سارا کرمی^۱، نسیم حسین حمزه^{۲*}، عباس رنجبر سعادت آبادی^۳

۱- استادیار، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

۲- دکتری هواشناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳- دانشیار، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

چکیده

در روزهای یک تا شش فوریه ۲۰۱۴ توفان برف در ایران، خصوصاً نواحی شمال کشور اتفاق افتاد. بارش برف در شمال ایران به گونه ای بود که در ۳۰ سال گذشته بی سابقه بوده و منجر به خسارات فراوان گردید. بررسی همدیدی پدیده توفان برف نشان داد که یک سامانه پرفشار سطحی در شمال و یک کم‌فشار دینامیکی در شرق و جنوب شرقی ایران در نقشه فشار سطح دریا و یک ناوه عمیق در تراز 500 hPa وجود دارد. در نقشه باد تراز 925 hPa بادهای شمال و شمال غربی در سراسر ایران نشان داده شده که سبب ورود هوای سرد از عرض‌های بالاتر می‌گردد، در تراز 300 hPa هسته یک جت غربی در مرکز ایران واقع شده و یک جت شمالی در شمال مرزهای ایران وجود دارد که از بی‌هنجاری بزرگی برخوردار است. نقشه‌های بی‌هنجاری فشار سطح دریا نشان‌دهنده افزایش بی‌سابقه فشار در شمال ایران است، همچنین بی‌هنجاری دمایی سطحی نیز کاهش دمایی در سراسر ایران و بویژه شمال شرقی آن را نشان می‌دهد. بررسی سطح مقطع‌های مولفه نصف‌النهاری باد، دما و رطوبت نسبی نشان داد که علاوه بر عوامل بزرگ مقیاس و ترمودینامیکی، وجود یک جبهه سرد در شرق ایران دلیل دیگری بر بارش در این منطقه است. مقایسه خروجی مدل WRF با نقشه‌های مربوط به تاریخ مذکور نشان می‌دهد که مدل، الگوی همدیدی حاکم بر منطقه در این نمونه را به خوبی شبیه‌سازی کرده، البته شدت سامانه‌ها اندکی کمتر از میزان حقیقی برآورد شده است. با بررسی خروجی بارش مدل می‌توان نتیجه گرفت که اگرچه مدل ارتفاع برف و گستردگی مناطق تحت پوشش آن را به مراتب کمتر از مقادیر حقیقی محاسبه کرده است اما عمده خطای آن در تعیین نوع بارش است.

کلید واژه‌ها: توفان برف، بررسی همدیدی، جبهه سرد، کاهش دما، مدل WRF.

مقدمه

پیش‌بینی دقیق پدیده‌های بارش برف و باران و میزان این بارش‌ها از موضوعات مورد توجه پژوهشگران است که علاوه بر کاهش خسارت در پدیده توفان‌های شدید، در مدیریت منابع آب و روان‌آب‌ها نیز نقش قابل توجهی دارد. تاکنون مدل‌های زیادی به منظور شبیه‌سازی توزیع برف در مکان‌هایی با پوشش گیاهی و کوهساری مختلف در مقیاس کوچک ارائه شده است (Pomeroy et al. 1997; Liston and Sturm 1998; Purves et al. 1998; Gauer 1998; Essery et al. 1999). بارش برف همچون باران و حتی بیشتر از آن، دارای تغییرپذیری زمانی و مکانی زیاد ناشی از واداشتهای جوی و برهمکنش آن‌ها با ناهمواری و پوشش گیاهی منطقه می‌باشد؛ (Elder et al. 1991, Bloschl 1999, Black and Elder 2000, Liston and Sturm 2002, Liston et al. 2002, Essery and Pomeroy 2004) پیش‌بینی آن کاری دشوار است. بنابراین علاوه بر در نظر گرفتن عوامل محلی مانند پوشش گیاهی و ناهمواری، بررسی عوامل همدیدی و ترمودینامیکی حاکم بر منطقه در زمان وقوع بارش امری ضروری است.

یکی از روش‌های بررسی پدیده توفان برف و بارش برف، استفاده از مدل‌های عددی است. آیکدا و همکاران (۲۰۱۰) پدیده برف فصلی را در کلرادو شبیه‌سازی کرده‌اند. نتایج آنها نشان داد که شبیه‌سازی زمانی و مکانی صحیح پدیده بارش برف، با انتخاب صحیح تفکیک مدل و پارامترسازی فیزیکی امکان‌پذیر است. یو (۲۰۱۲) پدیده برف در شمال چین را با استفاده از مدل WRF شبیه‌سازی کرد. تفکیک افقی و طرحواره‌های فیزیکی مدل WRF را نیز مورد بررسی قرار داد و نشان داد که مدل، توزیع زمانی و مکانی برف را به درستی شبیه‌سازی کرده است و با داده‌های مشاهداتی هم‌خوانی مناسبی دارد. لیو و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی عملکرد مدل WRF در طرحواره‌های لایه سطحی مختلف و شرایط اولیه و مرزی متفاوت در ناحیه تبت در مارس ۲۰۱۷ پرداختند. بارش هنگامی دقیقتر به دست آمد که از طرحواره CLM و داده‌های ERA-Interim استفاده شد. در ایران نیز مطالعات زیادی درباره شبیه‌سازی پدیده توفان برف صورت گرفته است. خدامراد و همکاران (۱۳۹۶) به بررسی یک مورد برف

سنگین در غرب و شمال کشور با استفاده از مدل NOAH MP-جفت شده با مدل منطقه‌ای WRF پرداختند. نتایج این بررسی نشان دهنده موفقیت مدل NOAHMP-WRF در پیش‌بینی حداقل دمای هوا در تمام نواحی است. در حالی که هنوز هم در پارامترسازی کسر پوشش برف و عمق برف در نواحی کوهستانی دارای عدم قطعیت بالایی است. فریدمجتهدی و همکاران (۱۳۹۶) با استفاده از مدل منطقه‌ای WRF برف سنگین در جلگه گیلان را در ۳ سال متفاوت بررسی کردند. آنها نتیجه‌گیری کردند که خروجی مدل دقت قابل قبولی در شبیه‌سازی مقادیر بارش و آشکارسازی دو هفته پیشینه ارتفاع برف یکی در جلگه مرکزی گیلان و دیگری حوالی تالاب انزلی دارد.

همچنین بررسی‌های بسیاری همدیدی در زمینه توفان‌های برف در مناطق مختلف کشور صورت گرفته است. یکی از آنها، بررسی این پدیده از دیدگاه همدیدی است. فتاحی و شیراوند (۱۳۹۱) به بررسی سامانه‌های همدیدی حاکم بر بارش سنگین در منطقه غرب ایران پرداختند و در دسته‌بندی این الگوها از روش خوشه‌بندی استفاده نمودند. گاهی وقوع حوادث نادر جوی مانند وقوع همزمان برف و گردوخاک در کشور نیز مشاهده شده است که ناشی از وجود جبهه در غرب کشور بوده است (کرمی و همکاران، ۲۰۲۰). خالدی و همکاران (۱۳۹۲)، به بررسی بارش سنگین در استان گیلان در بهمن ۱۳۹۲ پرداخته‌اند. بررسی همدیدی آنها نشان داد که یک مرکز پرفشار قوی در بخش‌های شمالی اروپا شکل گرفته و جریانات جنوب سوی آن بر روی دریاچه خزر مستقر شده است. همچنین به علت ایجاد اختلافات شدید دمایی بین آب دریا و توده هوای ورودی، همرفت شدید و صعود هوا بر روی منطقه مورد مطالعه و بارش‌های شدید و مخاطره آمیز در سواحل جنوبی خزر بویژه جلگه گیلان رخ داده است. باغبانان و حسینی (۱۳۹۷) به بررسی برف سنگین بهمن ماه سال ۱۳۹۶ پرداخته‌اند که در بسیاری از شهرهای ایران از جمله تهران رخ داد و صدمات و خسارات فراوانی را به بار آورد. بررسی همدیدی نشان داد که در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال ناوه عمیقی بر روی مدیترانه مستقر است که محور آن از دریای سیاه تا غرب دریای سرخ امتداد دارد و ایران در نیمه شرقی آن قرار دارد. محور فرود این ناوه جنوب غربی - شمال شرقی است و یک مرکز کم ارتفاع در ارتفاعات شمالی زاگرس تشکیل

ابتدا توفان برف ۱ تا ۶ فوریه ۲۰۱۴ با استفاده از داده‌های ERA5 با دقت ۰/۵ درجه، از نظر همدیدی و ترمودینامیکی بررسی می‌شود. مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های آب و هوایی (ECMWF) پیش‌بینی‌های خود را در ۳۷ تراز فشاری از سطح (۱۰۰۰ هکتوپاسکالی) تا ۱ هکتوپاسکال ارائه می‌دهد. داده‌های بازتحلیل ERA-Interim با داده‌های ERA5 جایگزین شد که تجزیه و تحلیل جدید کمیت‌های جوی را با کیفیت بالاتر ارائه می‌دهد (دی و همکاران، ۲۰۱۱؛ فرانسیس و همکاران، ۲۰۱۹). در این مطالعه، از میانگین فشار سطح دریا، ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز 500 hPa، 850 hPa و 925 همراه با بادهای مداری و نصف‌النهاری در چندین سطح با وضوح مکانی ۰/۵ درجه استفاده شد.

همچنین داده‌های بارش برف، دمای پیشینه و کمینه چند ایستگاه همدید واقع در شمال ایران از گزارش‌های سینوپ آن‌ها بدست آمده که به خوبی نشان‌دهنده شدت توفان و گستردگی آن می‌باشد. سپس به منظور شبیه‌سازی این رخداد، مدل WRF با دقت افقی 30 km و ۳۰ تراز قائم از ساعت UTC 00 روز ۱ فوریه تا ساعت UTC 00 روز ۶ فوریه ۲۰۱۴ اجرا شده است که برای شرایط اولیه و مرزی مدل، از داده‌های آنالیز GFS با دقت ۰/۵ درجه استفاده شده است.

داده است. جریان‌های جوی در ترازهای میانی در این سامانه نصف‌النهاری شده و هوای مرطوب مدیترانه رابه سوی ایران انتقال داده است. رضایی و جانباز (۲۰۱۲) بارش برف در استان گیلان را برای چند نمونه مختلف از دیدگاه همدیدی در نظر گرفته و با بررسی نقشه‌های فشار سطح زمین و ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز 500 hPa نتیجه گرفتند که در زمان این بارش‌ها پرفشار قطبی در سطح زمین و یک ناوه در ترازهای میانی جو وجود دارد.

در روزهای یک تا شش فوریه ۲۰۱۴ توفان بزرگ برف در ایران، خصوصاً نواحی شمال کشور اتفاق افتاد. بارش برف در شمال ایران به گونه‌ای بود که در ۳۰ سال گذشته بی‌سابقه بوده و منجر به تعطیلی مدارس و ادارات، بسته شدن راه‌ها، قطع شدن گاز و برق، از بین رفتن محصولات کشاورزی و خسارات فراوان گردید تا جایی که گروه‌های امداد و ارتش برای کمک به مردم و همچنین توزیع آب و غذا، به این مناطق اعزام شدند. همچنین در برخی مناطق جنوبی کشور پس از سال‌ها مردم شاهد بارش برف بودند. در این مقاله عوامل همدیدی و ساختارهای دینامیکی و ترمودینامیکی توفان برف سال ۲۰۱۴ بررسی می‌شود. در این بررسی، ضمن بررسی همدیدی و شبیه‌سازی توفان برف بی‌سابقه شمال کشور که در ۳۰ سال اخیر بی‌سابقه بوده است، پروفایل قائم کمیت‌های هواشناسی باد نصف‌النهاری، دما و رطوبت نسبی جهت بررسی جبهه بندآمده رخ داده با استفاده از خروجی مدل مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است

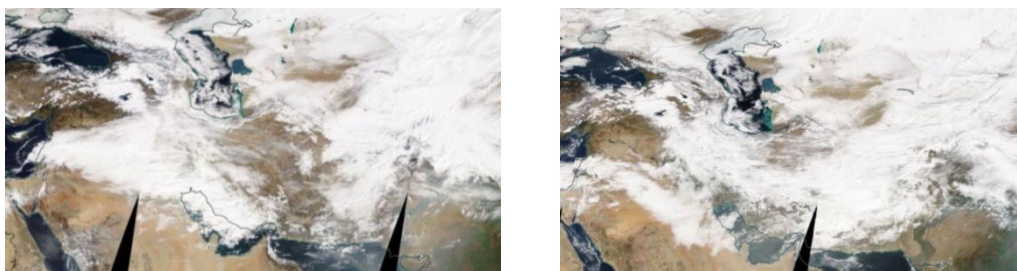
مواد و روش‌ها

جدول ۱- طرحواره‌های به کار رفته در مدل WRF

طرحواره‌های مورد استفاده در مدل	
میکروفیزیک	لین (لین و همکاران، ۱۹۸۳)
تابش موج کوتاه	گودارد (ویلد و همکاران، ۲۰۰۰)
تابش موج بلند	RRTM (ویلد و همکاران، ۲۰۰۰)
لایه سطحی	مونین - ابوخوا (ابوخوا، ۱۹۹۳)
تابش سطح - زمین	نوا (چن و دودهییا، ۲۰۰۱ و اک و همکاران ۲۰۰۳)
همرفت کومه‌ای	کاین و فریتچ (کاین، ۱۹۹۳)
طرحواره لایه مرزی	YSU (هونگ، ۲۰۰۶ و ۲۰۱۰)

(الف)

(ب)

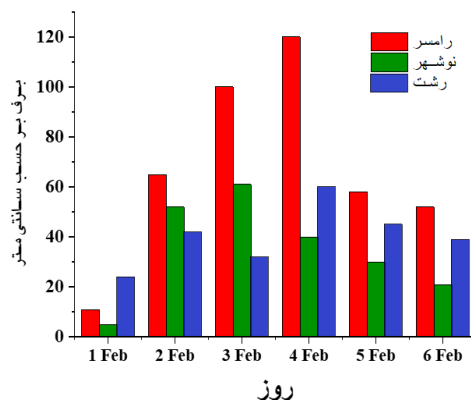


شکل ۱- تصویر رنگ حقیقی سنجنده مودیس ماهواره ترا در الف - ۱ فوریه ۲۰۱۴ ب- ۳ فوریه ۲۰۱۴

نتایج و بحث

رشت در روزهای ۱ تا ۶ فوریه ۲۰۱۴ در شکل ۲ نمایش داده شده است که نشان می‌دهد بیشترین میزان بارش در روز پانزدهم در شهر رامسر گزارش شده است که حدود ۱۲۰ سانتی‌متر است.

شکل ۱ تصویر رنگ حقیقی سنجنده مودیس ماهواره ترا در روزهای ۱ فوریه و ۳ فوریه ۲۰۱۴ را نشان می‌دهد. همان‌گونه در هر دو شکل نمایان است، پوشش ضخیم برف در کل منطقه مورد مطالعه نمایان است. نمودار ارتفاع برف برای ایستگاه‌های رامسر، نوشهر و



شکل ۲- نمودار زمانی بارش برف روزانه برای ایستگاه‌های رامسر، نوشهر و رشت در روزهای ۱ تا ۶ فوریه ۲۰۱۴

گسترش یافته است، از طرف دیگر یک مرکز کم فشار از سمت جنوب شرقی وارد ایران شده و مناطق جنوبی ایران را کاملاً پوشش می‌دهد. در نتیجه گرادیان فشاری شدیدی در مناطق مرکزی ایران حاکم است. در شکل ۳ ب که میانگین بی‌هنجاری فشار برای همان تاریخ نسبت به میانگین ۳۰ ساله از ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰ است، افزایش فشار در مناطق شمالی و مرکزی ایران مشاهده می‌شود، که در شمال ایران به ۹ تا ۱۲ hPa می‌رسد.

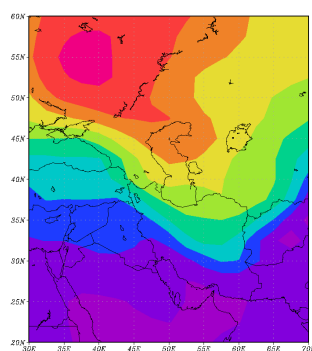
در جدول ۱ میانگین پیشینه و کمینه دما و بارش برف کل در روزهای ۱ تا ۶ فوریه ۲۰۱۴ برای ۴ ایستگاه ارائه شده است که بخوبی نشان دهنده شدت بی‌سابقه بارش برف نسبت به میانگین ۳۰ ساله در این مناطق کشور است.

در شکل ۳ الف میانگین فشار سطح دریا برای روزهای ۱ تا ۶ فوریه ۲۰۱۴ نشان داده شده است. یک مرکز پر فشار در شمال ایران وجود دارد که زبان‌های آن تا نواحی مرکزی ایران نیز

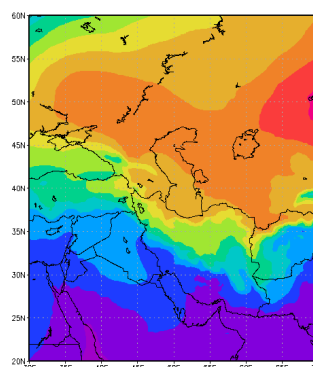
جدول ۱- میانگین دمای بیشینه، دمای کمینه و مجموع بارش برف در روزهای ۱ تا ۶ فوریه ۲۰۱۴ و میانگین مجموع بارش برف ۳۰ ساله از سال ۱۹۸۲ تا سال ۲۰۱۲

نام ایستگاه	کد ایستگاه	ارتفاع ایستگاه (m)	بیشینه دما (°C)	کمینه دما (°C)	بارش برف (cm)	میانگین بارش برف (cm)
رامسر	۴۰۷۳۲	-۲۰	۱/۶۲	-۱/۷	۴۰۶	۳/۲۸
نوشهر	۴۰۷۳۴	-۲۰/۹	۱/۸۲	-۲	۲۰۹	۲/۲۹۷۲
رشت	۴۰۷۱۹	-۸/۶	-۰/۲۲	-۲	۲۴۲	۲/۶۹۸
بندرانزلی	۴۰۷۱۸	-۲۳/۶	۰/۷۲	-۰/۷۵	۶۴/۴	۴/۸۵۹

(ب)



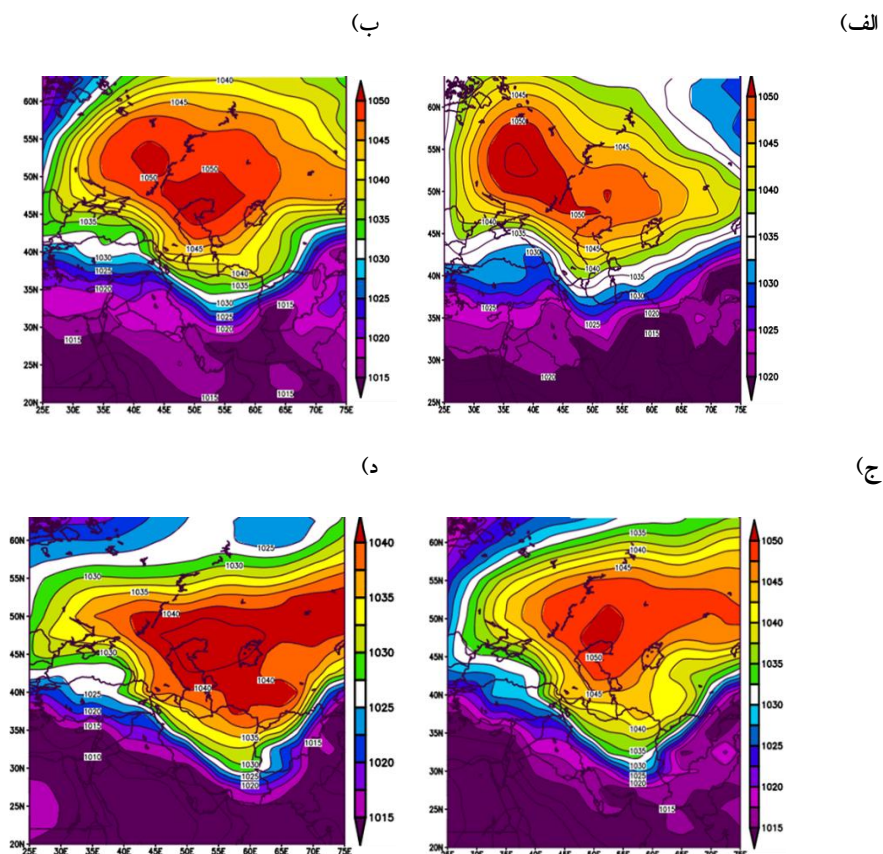
(الف)



شکل ۳- الف) میانگین فشار سطح دریا (hPa) روزهای ۱ تا ۶ فوریه ۲۰۱۴ ب) میانگین بی‌هنجاری فشار سطح دریا (hPa) همان روزها نسبت به میانگین ۳۰ ساله از ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰.

بسته شده است. به تدریج با تقویت سامانه پرفشار در روز ۲ فوریه (شکل ۴-ج) زبان‌های آن به جنوب ایران رسیده و کم فشار را به عقب می‌راند، همچنین راستای گردش خطوط هم‌فشار در شمال افغانستان نشان دهنده وجود جبهه بندآمده در این منطقه و به دنبال آن وجود یک جبهه سرد در نیمه شرقی ایران و عامل بارش در این منطقه است. با حرکت سامانه پرفشار به سمت شرق، این سامانه تضعیف می‌گردد، اما همچنان تا روز ۳ فوریه (شکل ۴-د) بخش‌هایی از شمال شرقی ایران را در بر گرفته است که سبب سرمای شدیدی در این مناطق می‌شود.

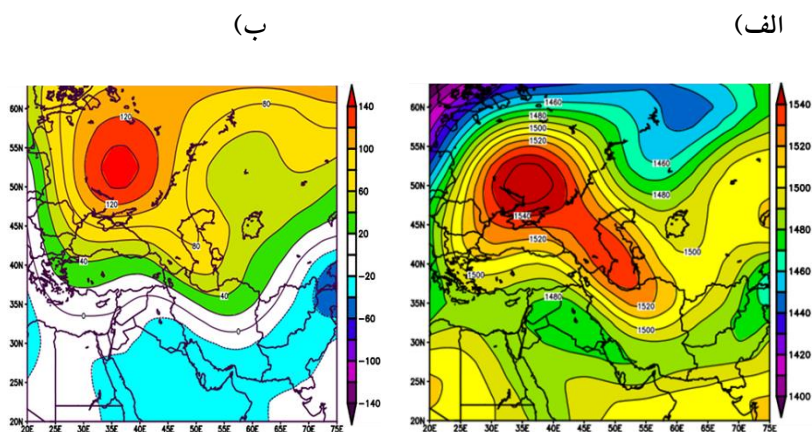
به منظور بررسی بیشتر سامانه‌های سطح زمین حاکم بر منطقه شکل ۴ نقشه‌های فشار سطح دریا را از تاریخ روزهای ۳۱ ژانویه تا ۳ فوریه ۲۰۱۴ مربوط به ساعت ۱۲ ارائه می‌دهد. در روز ۳۱ ژانویه (شکل ۴-الف) زبان‌های یک سامانه پرفشار قوی که مرکز آن در شمال کشور ایران و روی اروپا واقع شده به سواحل دریای خزر رسیده است، از سوی دیگر یک سامانه کم فشار دینامیکی از سمت جنوب شرقی وارد ایران شده و نواحی جنوب شرقی ایران را به طور کامل پوشش می‌دهد. در روز ۱ فوریه ۲۰۱۴ (شکل ۴-ب) سامانه پرفشار قوی‌تر شده و دامنه آن تا نواحی مرکزی ایران می‌رسد و سامانه کم فشار نیز تقویت شده و مرکز ۱۰۱۵ hPa در جنوب شرقی ایران



شکل ۴- فشار سطح دریا (hPa) در ساعت ۱۲ UTC روزهای (الف) ۳۱ ژانویه (ب) ۱ فوریه (ج) ۲ فوریه (د) ۳ فوریه ۲۰۱۴

پراارتفاع قوی از روی دریای خزر همراه با استقرار سامانه کم ارتفاع در غرب و نیمه جنوبی ایران، می تواند شرایط مساعدی را برای ایجاد گردان ارتفاعی شدید در نوار شمالی کشور فراهم سازد.

در شکل ۵ ارتفاع ژئوپتانسیلی سطح ۸۵۰ hPa نشان داده شده است. در این شکل سامانه پراارتفاع قوی در شمال دریای سیاه قرار گرفته و زبانه پراارتفاع آن ضمن گسترش بر روی دریای خزر و نواحی شمالی ایران، بخشی از نواحی مرکزی ایران را تحت تأثیر قرار داده است. سامانه کم ارتفاع نیز بر روی مناطق وسیعی از جمله کشور عراق، مناطق جنوبی و غربی ایران گسترده شده است (شکل ۵-الف). نفوذ زبانه سامانه



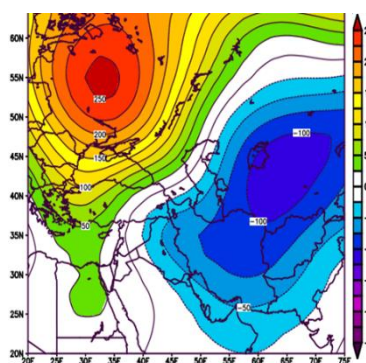
(ب)

(الف)

شکل ۵-الف) میانگین ارتفاع ژئوپتانسیلی سطح hPa ۸۵۰ در روزهای ۱ تا ۶ فوریه ۲۰۱۴ (ب) بی‌هنجاری ارتفاع ژئوپتانسیلی سطح hPa ۸۵۰ همان روزها نسبت به میانگین ۳۰ ساله از ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰.

بسته به شدت آن‌ها ممکن است سبب بارندگی شود، زیرا ناوه در سطح بالا سبب ریزش هوای سرد از عرض‌های بالاتر شده و پرفشار سطحی، این هوای سرد را به سطح زمین می‌رساند، از طرفی رطوبت موجود در شمال ایران به دلیل مجاورت با دریای خزر به شرط وجود شرایط مناسب برای صعود آن تا ترازهای بالاتر جو، باعث ابرناکی و بارندگی در این مناطق می‌شود. ولی در توفان برف اخیر شدت این سیستم‌ها به حدی بوده که نه تنها سبب بارش برف و افت دمای بی‌سابقه در شمال ایران شده، بلکه با وجود رشته کوه‌های البرز در شمال ایران مناطق مرکزی آن را نیز تحت تاثیر قرار داده است و بی‌هنجاری ناوه در شمال شرق ایران نسبت به میانگین سی ساله بسیار زیاد است.

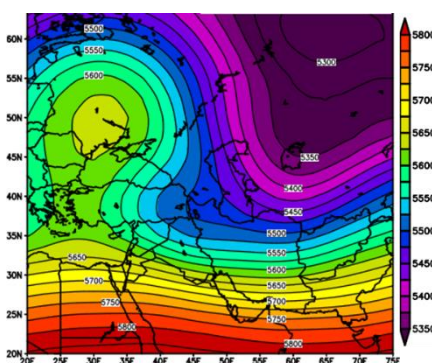
(ب)



همچنین استقرار سامانه کم ارتفاع قوی در روی روسیه و شمال شرق دریای خزر و گسترش ناوه آن تا بخش‌هایی از شمال شرقی دریای خزر می‌تواند سبب ریزش هوای سرد در بخش شرقی این ناوه (دریای خزر) و در نتیجه افزایش رطوبت در بخش جنوبی دریای خزر گردد. در نقشه بی‌هنجاری ارتفاع ژئوپتانسیلی نیز بی‌هنجاری مثبت قابل توجه ارتفاع ژئوپتانسیلی نسبت به میانگین ۳۰ ساله در شمال دریای سیاه تا روی دریای خزر و بخش‌های شمالی ایران به ویژه سواحل دریای خزر مشاهده می‌گردد.

در شکل ۶ ارتفاع ژئوپتانسیلی سطح hPa ۵۰۰ دیده می‌شود. وجود یک سیستم پرفشار در سطح و یک ناوه در تراز hPa ۵۰۰ پدیده‌ای متداول در زمستان‌های شمال ایران است که

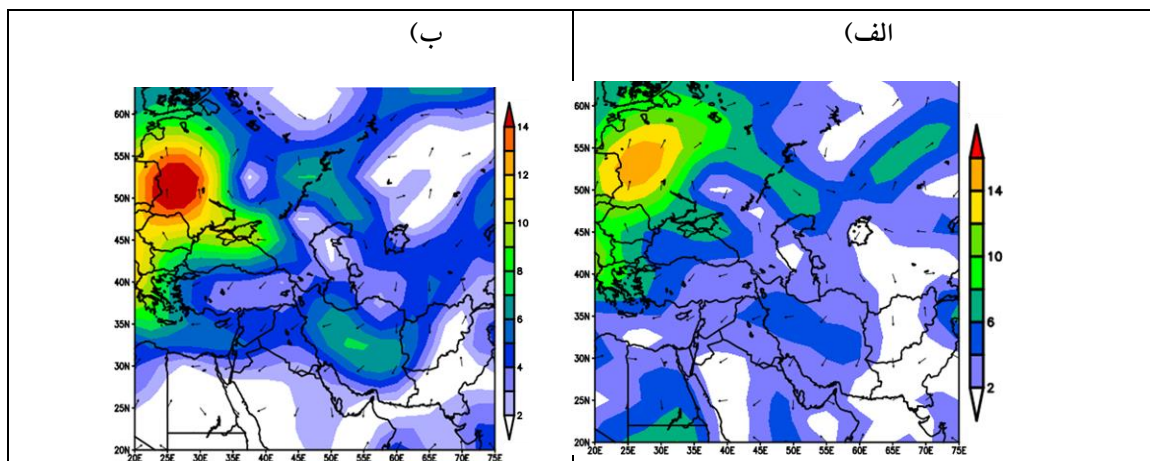
(الف)



شکل ۶-الف) میانگین ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز hPa ۵۰۰ از روز ۱ تا ۶ فوریه ۲۰۱۴ (ب) بی‌هنجاری ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز hPa ۵۰۰ همان روزها نسبت به میانگین ۳۰ ساله از ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰.

حدود $7 m/s$ می‌رسد و جهت باد نیز در سراسر ایران، شمالی و شمال شرقی می‌باشد، که سبب ورود هوای سرد از عرض‌های بالاتر و کاهش دما می‌شود.

شکل ۷ باد و بی‌هنجاری آن را در تراز hPa ۹۲۵ نشان می‌دهد. سرعت باد در کلیه مناطق ایران، بویژه مناطق مرکزی به دلیل گرادیان فشار زیاد بوده و کلیه مقادیر بی‌هنجاری نیز مثبت است تا جایی که در نواحی مرکزی بی‌هنجاری آن به

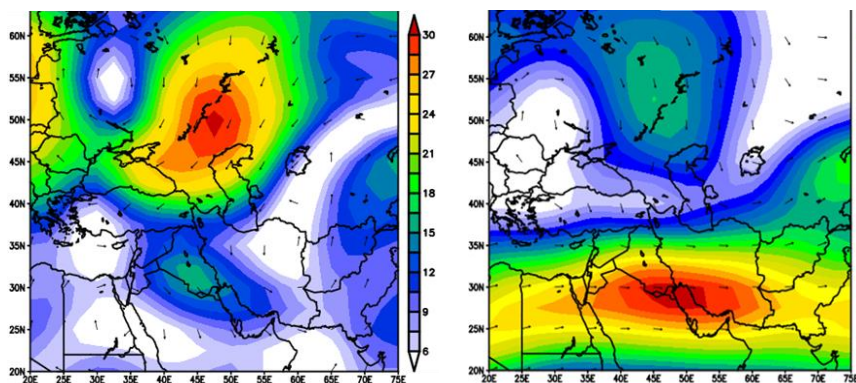


شکل ۷- الف، میانگین باد تراز 925 hPa از روز ۱ تا ۶ فوریه ۲۰۱۴ ب، بی‌هنجاری باد سطح 925 hPa همان روزها نسبت به میانگین ۳۰ ساله از ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰.

شمالی خیلی زیاد نیست، ولی از بی‌هنجاری بالایی برخوردار است که نشان می‌دهد پدیده‌ای متداول نیست. همچنین جت غربی واقع در نواحی جنوبی ایران نیز از بی‌هنجاری مثبت نسبتاً بزرگی بویژه در غرب کشور برخوردار است که نشان از شدت آن دارد.

باد در تراز 300 hPa و بی‌هنجاری آن در شکل ۸ نمایش داده شده است. هسته‌ی جت در حدود عرض جغرافیایی ۲۸ درجه واقع شده که مناطق جنوبی و مرکزی ایران را دربر گرفته و باد غالب در این مناطق باد غربی است. از طرف دیگر در شمال مرزهای ایران، یک جت شمالی وجود دارد، که بخش‌هایی از شمال ایران را نیز پوشش می‌دهد. اگرچه شدت این جت

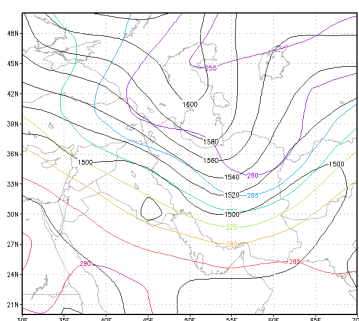
(الف) (ب)



شکل ۸- الف، میانگین باد تراز 300 hPa از روز ۱ تا ۶ فوریه ۲۰۱۴ ب، بی‌هنجاری باد تراز 300 hPa همان روزها نسبت به میانگین ۳۰ ساله از ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰.

سرد در این مناطق به خوبی قابل مشاهده است که همگی از نشانه‌های وجود جبهه است. از طرف دیگر شکستگی خطوط همدم‌ها و ارتفاع ژئوپتانسیلی در شمال افغانستان، محل جبهه بندآمده را نشان می‌دهد. به منظور بررسی بیشتر سطح مقطع برخی کمیت‌ها در منطقه مورد نظر رسم می‌شود.

برای بررسی وجود جبهه سرد در نیمه شرقی کشور، نقشه ارتفاع ژئوپتانسیلی و خطوط همدمای تراز 850 hPa در شکل ۹ مشاهده می‌شود. در نیمه شرق و شمال شرقی ایران گرادیان دما زیاد است و پربندهای ارتفاع ژئوپتانسیلی با شیب قابل توجهی خطوط همدم‌ها را قطع می‌کنند و فرارفت هوای



شکل ۹- ارتفاع ژئوپتانسیلی (خطوط مشکی) بر حسب متر و پربندهای دما (خطوط رنگی) بر حسب کلون تراز ۸۵۰ hPa

در شکل ۱۰، طول جغرافیایی ۵۷ درجه شرقی استفاده شده در مدل WRF برای نمایش نیمرخ قائم باد نصف النهاری، دما و رطوبت نسبی را نشان داده است. این منطقه نواری از شرق و شمال شرق ایران را شامل می‌شود.



شکل ۱۰- طول جغرافیایی ۵۷ درجه شرقی

توجه به شیب شدید پربندهای همدم، آن را نیز می‌توان یکی دیگر از علل جبهه به حساب آورد. بی‌هنجاری دما نیز، کاهش دمای شدیدی را تا ترازهای بالای جو نشان می‌دهد. بویژه در عرض‌های جغرافیایی بین ۳۰ تا ۴۰ درجه شمالی که بی‌هنجاری دما، کاهشی تا حدود ۱۴- درجه را در پایین تراز ۸۵۰ hPa ارائه می‌دهد.

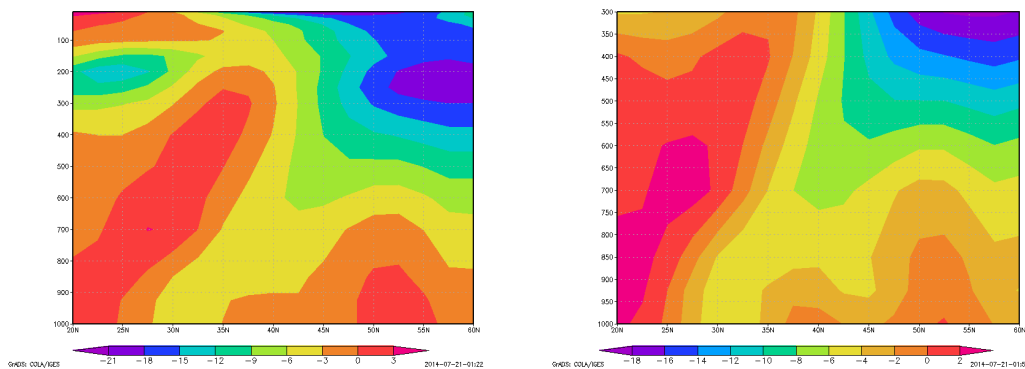
در شکل ۱۳ سطح مقطع قائم رطوبت نسبی نشان داده شده است. مجدداً در عرض‌های جغرافیایی بین ۳۰ تا ۴۰ درجه شمالی گرادیان شدید رطوبت نسبی مشاهده می‌شود که آن نیز تایید کننده وجود جبهه در این مناطق است

در شکل ۱۱ سطح مقطع قائم سرعت باد نصف النهاری در طول جغرافیایی ۵۷ درجه شرقی نشان داده شده است. نکته جالب توجه این است که در عرض‌های جغرافیایی بین ۳۰ تا ۴۰ درجه شمالی، گرادیان شدید سرعت نصف النهاری باد و تغییر جهت آن از باد جنوبی به شمالی دیده می‌شود که می‌تواند از نشانه‌های وجود جبهه سرد باشد. در ادامه، به بررسی سطح مقطع قائم دما و رطوبت نسبی نیز می‌پردازیم.

سطح مقطع قائم دما که در شکل ۱۲ نمایش داده شده، در عرض‌های جغرافیایی بین ۳۰ تا ۴۰ درجه شمالی، گرادیان شدید و همچنین کاهش قابل توجه دما را نشان می‌دهد که با

الف

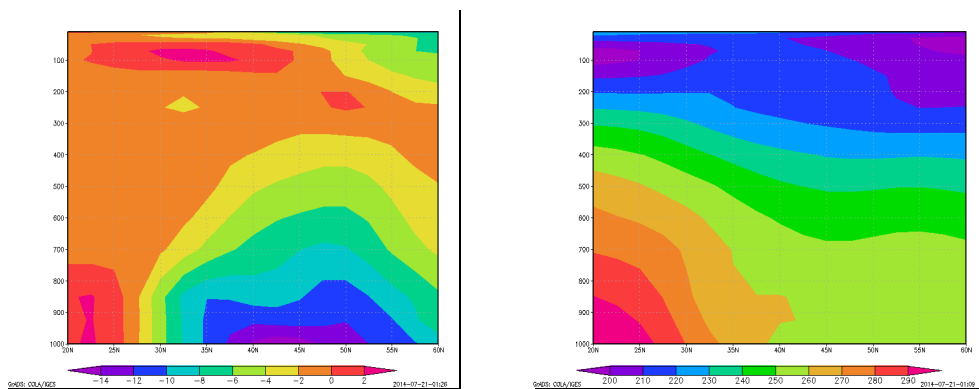
ب



شکل ۱۱- الف، سطح مقطع میانگین مولفه نصف النهاری باد در طول جغرافیایی ۵۷ درجه شرقی از روز ۱ تا ۶ فوریه ۲۰۱۴ ب، بی
 هنجاری سطح مقطع مولفه نصف النهاری باد در طول جغرافیایی ۵۷ درجه شرقی همان روزها نسبت به میانگین ۳۰ ساله از ۱۹۸۰ تا
 ۲۰۱۰.

الف

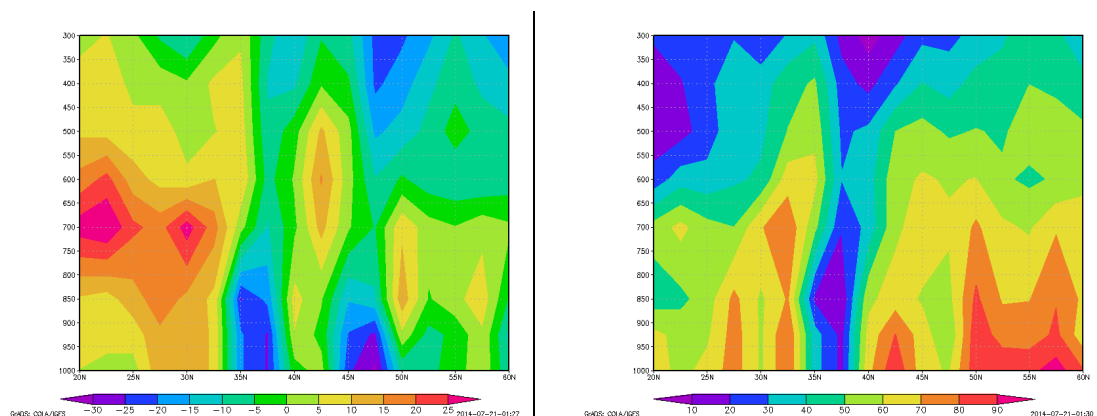
ب



شکل ۱۲- الف، سطح مقطع میانگین دما در طول جغرافیایی ۵۷ درجه شرقی از روز ۱ تا ۶ فوریه ۲۰۱۴ ب، سطح مقطع بی هنجاری
 میانگین دما در طول جغرافیایی ۵۷ درجه شرقی همان روزها نسبت به میانگین ۳۰ ساله از ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰.

الف

ب

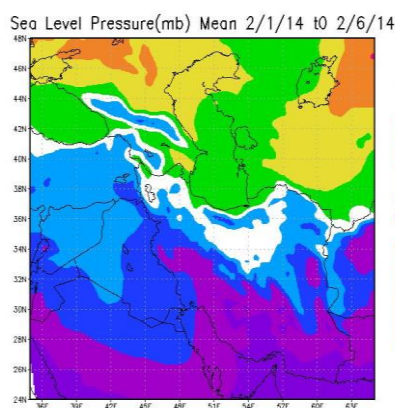


شکل ۱۳- الف، سطح مقطع میانگین رطوبت نسبی در طول جغرافیایی ۵۷ درجه شرقی از روز ۱ تا ۶ فوریه ۲۰۱۴ ب، بی هنجاری سطح مقطع میانگین رطوبت نسبی در طول جغرافیایی ۵۷ درجه شرقی همان روزها نسبت به میانگین ۳۰ ساله از ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰.

سامانه پرفشار در شمال ایران دیده می‌شود، البته شدت آن از مقادیر واقعی کمتر برآورد شده، به گونه‌ای که در داده‌های آنالیز شده، میانگین فشار ۶ روزه در شمال ایران بین 1030 تا 1032 hPa نشان داده شده، در حالی که در خروجی WRF فشار سطح دریا بین 1026 تا 1029 هکتوپاسکال بدست آمده است. همچنین مدل وجود کم‌فشار دینامیکی در نیمه جنوبی ایران را به خوبی شبیه‌سازی کرده است و گرادیان فشار در مناطق مرکزی کشور دیده می‌شود.

با توجه به شکل‌های ارائه شده که نشان دهنده گرادیان شدید باد، دما و رطوبت در حدود عرض جغرافیایی ۳۵ شمالی است می‌توان نتیجه گرفت که بارندگی‌های شدید این منطقه ناشی از وجود جبهه است.

در اینجا به مقایسه نتایج حاصل از اجرای مدل WRF با نقشه‌های ارائه شده می‌پردازیم. شکل ۱۴ میانگین فشار سطح دریا بدست آمده از مدل WRF را نشان می‌دهد. در اینجا نیز



شکل ۱۴- میانگین فشار سطح دریا (hPa) مدل WRF روزهای ۱ تا ۶ فوریه ۲۰۱۴.

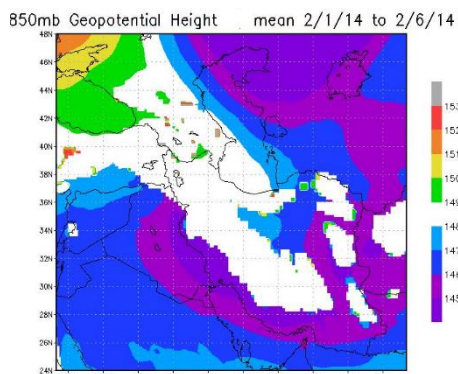
شمال غربی ایران به مراتب کمتر از مقادیر حقیقی، محاسبه شده است. در نقشه‌های حقیقی مقادیر میانگین ارتفاع ژئوپتانسیلی در شمال ایران بین 1520 تا 1530 متر نشان داده شده ولی در

در شکل ۱۵ الف میانگین ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز 850 hPa نشان داده شده است. اگرچه در اینجا نیز زبانه‌های ناوه از سمت شمال غربی وارد ایران شده‌اند، اما ارتفاع در شمال و

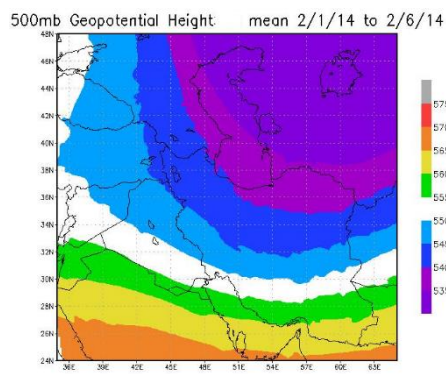
ناوه را در شرق و شمال شرقی ایران نشان می‌دهد، همچنین کج شدگی محور ناوه به سمت شرق نیز در خروجی مدل مشاهده می‌شود.

اینجا این ارتفاع بین ۱۴۸۰ تا ۱۴۹۰ متر می‌باشد. ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ hPa که در شکل ۱۳ اب نمایش داده شده، دارای تشابه بیشتری با نقشه‌های حقیقی است و به خوبی

(ب)



(الف)

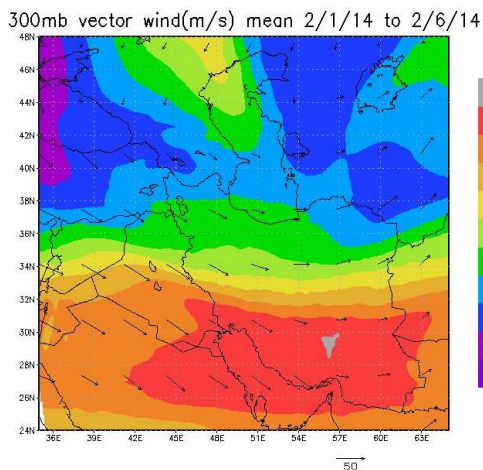


شکل ۱۵- میانگین خروجی های مدل WRF برای روزهای ۱ تا ۶ فوریه ۲۰۱۴ برای ارتفاع ژئوپتانسیلی (متر) الف، سطح ۸۵۰hPa ب، سطح ۵۰۰hPa

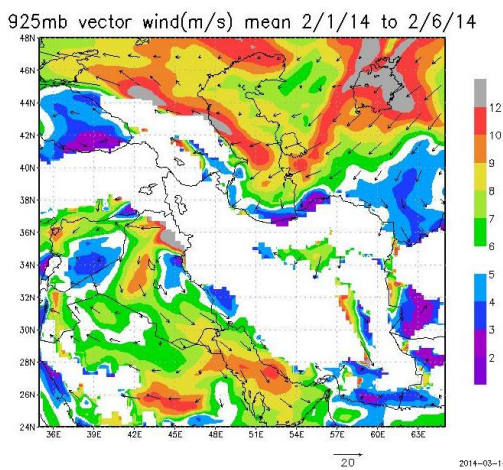
است. باد در سطح ۳۰۰ hpa که در شکل ۱۵ب دیده می‌شود، تشابه زیادی با مقادیر حقیقی دارد و جت شمالی در شمال مرزهای ایران و جت غربی در جنوب ایران به خوبی قابل مشاهده هستند.

شکل ۱۶ الف باد را در تراز ۹۲۵ hPa نشان می‌دهد. به دلیل وجود رشته کوه‌های البرز و زاگرس، سرعت باد در این تراز در نواحی مرکزی ایران به خوبی نشان داده نشده است، اما در سواحل دریای خزر باد شمالی و شمال شرقی بدست آمده

(ب)



(الف)

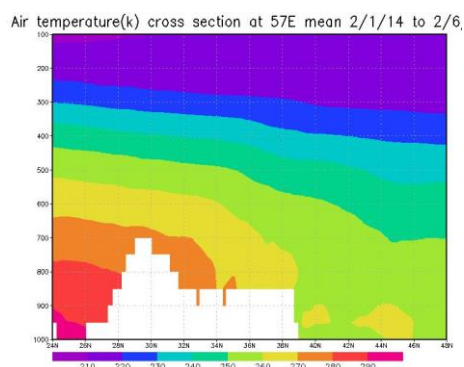


شکل ۱۶- میانگین خروجی های مدل WRF برای روزهای ۱ تا ۶ فوریه ۲۰۱۴ برای باد الف، تراز ۹۲۵hPa ب، تراز ۳۰۰hPa

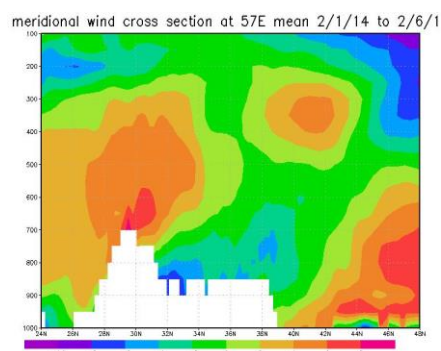
شیب خطوط همدمها در طول جغرافیایی بین ۳۰ تا ۴۰ درجه شمالی و همچنین تغییر جهت باد از جنوبی به شمالی قابل مشاهده است.

در شکل ۱۷ الف و ب به ترتیب سطح مقطع دما و باد در طول جغرافیایی ۵۷ درجه شرقی ارائه شده است. به دلیل وجود رشته کوه‌های البرز در شمال ایران، در برخی قسمت‌ها در سطوح پایین‌تر، اطلاعاتی مشاهده نمی‌شود، اما با این وجود،

ب



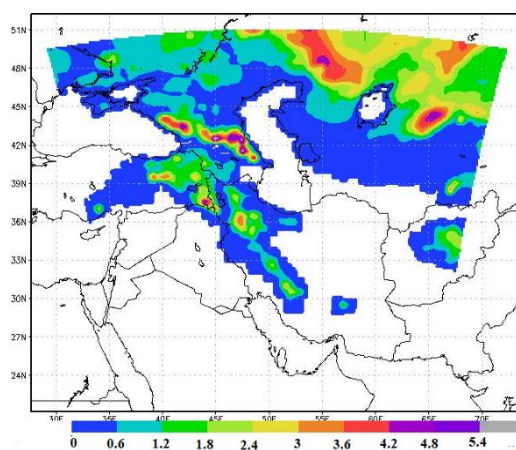
الف



شکل ۱۷- میانگین خروجی های مدل WRF برای روزهای ۱ تا ۶ فوریه ۲۰۱۴ برای پروفایل قائم الف، دما (k) ب، مولفه نصف النهاری باد (m/s)

نوع بارش خطا داشته و به جای برف، باران پیش‌بینی کرده باشد نقشه میانگین مجموع میزان بارش برف و باران در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود.

در شکل ۱۸ مجموع ارتفاع برف نشان داده شده است. بیشتر بارش‌ها برای مناطق شمالی و غربی کشور بدست آمده، در حالی که هم گستردگی بارش برف و هم شدت آن به مراتب کمتر، پیش‌بینی شده است. از آنجایی که ممکن است مدل در

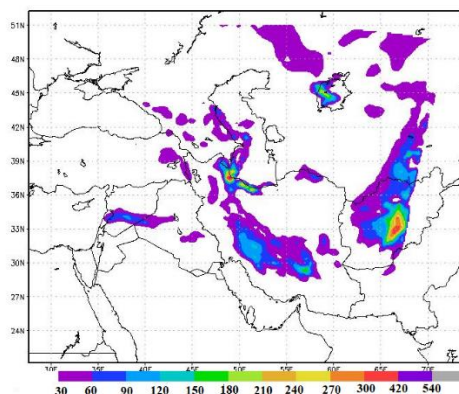


شکل ۱۸- مجموع ارتفاع برف (cm) خروجی مدل WRF برای روزهای ۱ تا ۶ فوریه ۲۰۱۴.

توجهی نشان می‌دهد. در این حالت نیز بیشترین بارش‌ها در سواحل دریای خزر مشاهده می‌شود، البته از آنجایی که این

شکل ۱۹، مجموع بارش برف و باران خروجی مدل را از ۱ تا ۶ فوریه ۲۰۱۶ نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن مجموع برف و باران، هم میزان بارندگی و هم گستردگی آن افزایش قابل

مقادیر مجموع بارش ۶ روزه هستند می‌توان نتیجه بدست آمده را قابل قبول ارزیابی کرد.



شکل ۱۹- مجموع بارش برف و باران (mm) خروجی مدل WRF برای روزهای ۱ تا ۶ فوریه ۲۰۱۴.

نتیجه گیری

در تراز 300hPa هسته یک جت غربی در مرکز ایران واقع شده و یک جت شمالی در شمال مرزهای ایران وجود دارد که بی‌هنجاری قابل توجهی دارد و پدیده‌ای کمیاب در این عرض‌های جغرافیایی می‌باشد. نقشه‌های بی‌هنجاری فشار سطح دریا نشان‌دهنده افزایش بی‌سابقه فشار در شمال ایران و قدرت بسیار زیاد سامانه پرفشار است، همچنین بی‌هنجاری دمای سطحی نیز افت دمای شدیدی در سراسر ایران و بویژه شمال شرقی آن را نشان می‌دهد تا جایی که کاهش دما در این مناطق به $10-$ درجه کلوین نیز می‌رسد.

وجود جبهه سرد در شرق کشور، با بررسی نقشه همدیدی تراز 850hPa و تقاطع پربندهای ارتفاع ژئوپتانسیلی و همدمای و همچنین سطح مقطع‌های مولفه نصف‌النهاری باد، دما و رطوبت نسبی تایید شد. تغییر جهت باد از باد جنوبی به شمالی، گرادیان شدید دما، شیب خطوط همدمای و گرادیان شدید رطوبت نسبی، همگی از نشانه‌های وجود جبهه می‌باشند که در شرق ایران مشاهده شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که علاوه بر عوامل بزرگ مقیاس و ترمودینامیکی، وجود یک جبهه سرد نیز می‌تواند دلیل دیگری بر بارش‌ها باشد. دو ویژگی مهم این سامانه، ماندگاری طولانی و وجود ناوه کج با جهت شمال شرقی به جنوب غربی که انتهای آن در محدوده شمال غربی ایران قرار می‌گیرد که این وضعیت با نفوذ زیانه پرفشار روی خزر و نوار شمالی کشور همراه شده

در سال ۲۰۱۴ بین روزهای ۱ تا ۶ فوریه بارش سنگین برف، سراسر ایران و به ویژه مناطق شمالی کشور را تحت تاثیر قرار داد. بررسی نقشه همدیدی سطح زمین نشان می‌دهد که یک سامانه پرفشار سطحی در شمال و یک کم‌فشار دینامیکی در شرق و جنوب شرقی ایران واقع شده است، که با گذشت زمان پرفشار سطحی تقویت شده و زیانه‌های آن تا مرکز ایران کشیده شده و کم‌فشار را به عقب می‌راند، همچنین وجود یک جبهه بندآمده در شمال کشور افغانستان و به دنبال آن یک جبهه سرد در شرق ایران به خوبی قابل شناسایی است. در سطح 500hPa یک ناوه عمیق وجود دارد که سبب انتقال هوای سرد از عرض‌های جغرافیایی بالاتر و پرفشار سطحی موجب ریزش این هوای سرد به سطح زمین می‌گردد، از طرفی مجاورت با دریا نیز چنانچه رطوبت تا ترازهای میانی جو صعود کرده باشد، می‌تواند رطوبت لازم برای بارش را تامین کند. همچنین، یک ناوه عمیق در محدوده شمال دریاچه آرال قرار دارد. بی‌هنجاری ناوه در شمال شرق دریاچه آرال نسبت به میانگین سی ساله بسیار زیاد (بیش از 100m) بوده و با شدت کمتری ایران بویژه نواحی شمال شرق کشور (بین 50 تا 100) را تحت تاثیر قرار داده است.

همچنین خروجی پروفایل قائم دما و باد مدل WRF به خوبی وجود جبهه را در این مورد مطالعاتی آشکار کرده است که با مطالعه نگاه و همکاران (۱۳۹۳) در برف شدید مارس ۲۰۱۲ در استان گیلان در شمال کشور به خوبی هم‌خوانی دارد. در بررسی نگاه و همکاران نیز، مدل WRF به خوبی پروفایل قائم دما و بارش را در منطقه مورد مطالعه را نمایش داده است و به خوبی وجود جبهه را شبیه‌سازی کرده است. مدل WRF، ارتفاع برف و گستردگی مناطق تحت پوشش آن را به مراتب کمتر از مقادیر گزارش شده از ایستگاه‌ها بدست آورده که با بررسی میزان بارش باران بدست آمده توسط آن می‌توان نتیجه گرفت که عمده خطای مدل در محاسبه نوع بارش است که ممکن است ناشی از خطا در محاسبه دما باشد. همچنین خدامرادپور و ایران‌نژاد (۱۳۹۷) در بررسی و شبیه‌سازی بارش‌های برف سنگین در سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ در شمال و غرب کشور، نشان دادند که مدل WRF عملکرد ضعیفی در برآورد کسر پوشش برف و بهترین عملکرد را در برآورد حداقل دمای هوا داشته است.

منابع

1. Khodamorad Pour, M., Irannejad, P., Akhavan, S. and Babei, K., 2018. The evaluation of snow model in NOAA-MP coupled with WRF model during the periods of heavy snow over the northern and western regions of Iran. *Iranian Journal of Geophysics*, 11(4), pp.146-163.
2. Faridmojtahedi, N., Ghaffarian, P. and Negah, S., 2017. Analyzing the Spatial Distribution of Heavy Snow Fall Depth in Gilan Plain (February 2005, January 2008, and February 2014) Using WRF Model. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 6(1), pp.109-126.
3. Balk, B., and K. Elder, 2000, Combining binary decision tree and geostatistical methods to estimate snow distribution in a mountain watershed. *Water Resour. Res.*, 36, 13-26.
4. Bloßschl, G., 1999, Scaling issues in snow hydrology. *Hydrol. Processes*, 13, 2149-2175.
5. Chou, M. D. and Suarez, M. J., 1994, An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in general circulation models, NASA Tech. Memo.104606,3,85p.
6. Elder, K., Dozier, J., & Michaelsen, J, 1991, Snow accumulation and distribution in an alpine watershed. *Water Resources Research*, 27(7), 1541-1552.
7. Essery, R., & Pomeroy, J., 2004, Vegetation and topographic control of wind-blown snow distributions in distributed and aggregated simulations for an Arctic tundra basin. *Journal of Hydrometeorology*, 5(5), 735-744.
8. Faranda, D., 2020. An attempt to explain recent changes in European snowfall extremes. *Weather and Climate Dynamics*, 1(2), pp.445-458.
9. Gauer, P., 1998, Blowing and drifting snow in Alpine terrain: numerical simulation and related field measurements. *Ann. Glaciol.*, 26, 174-178.
10. Ikeda, K., Rasmussen, R., Liu, C., Gochis, D., Yates, D., Chen, F., Tewari, M., Barlage, M., Dudhia, J., Miller, K. and Arsenault, K., 2010. Simulation of seasonal snowfall over

که شرایط مساعدی برای تشدید تغذیه رطوبت به مناطق جنوبی دریای خزر و ریزش هوای سرد در بخش شمالی کشور می‌شود. براین اساس مناطق واقع در جلوه‌ناوه و همچنین اثرات کوهساری شرایط مساعدی برای بارش دارند که با توجه به سردی هوا و ماندگاری ناوه در بخش شمالی کشور ریزش برف سنگین رخ خواهد داد.

مقایسه خروجی مدل WRF با نقشه‌های مربوط به تاریخ مذکور نشان می‌دهد که مدل، الگوی هم‌مدیدی حاکم بر منطقه در این نمونه را به خوبی شبیه‌سازی کرده است. خروجی مدل در نقشه سطح زمین، پرفشار سطحی در شمال کشور و کم فشار واقع در نیمه شرقی و جنوبی کشور را بدست آورده و گرادیان فشار در مرکز ایران را به خوبی نشان داده است. همچنین مدل، مراکز کم ارتفاع و پر ارتفاع ژئوپتانسیلی سطوح فشاری مختلف را مشابه نقشه‌های حقیقی نشان داده و ناوه سطح ۵۰۰ hPa و حتی کج‌شدگی محور آن به سمت شرق را نیز به خوبی بدست آورده است. البته از مقایسه نقشه‌ها می‌توان نتیجه گرفت که شدت پرفشار سطحی، پراارتفاع تراز hPa ۸۵۰ و ناوه تراز ۵۰۰ hPa اندکی کمتر از میزان حقیقی برآورد شده است.

- Colorado. Atmospheric Research, 97(4), pp.462-477.
11. Kain, J. S. and Fritsch, J. M., 1993, Convective parameterization for mesoscale models: The Kain- Fritsch scheme. The representation of cumulus convection in numerical models, K. A. Emanuel and D.J. Raymond, Eds., Amer. Meteor. Soc., 246 p.
 12. Karami, S., Hamzeh, N.H., Alam, K. and Ranjbar, A., 2020. The study of a rare frontal dust storm with snow and rain fall: Model results and ground measurements. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 197, p.105149.
 13. Khodamorad Pour, M., Irannejad, P., Akhavan, S. and Babei, K., 2018. The evaluation of snow model in NOAA-MP coupled with WRF model during the periods of heavy snow over the northern and western regions of Iran. *Iranian Journal of Geophysics*, 11, pp.146-163.
 14. Lin, Y. L., Farley, R. D. and Orville, H. D., 1983, Bulk parameterization of the snow field in a cloud model, *J.Climate Appl. Meteor.*, 22, pp. 1065-1092.
 15. Liston, G.E., and M. Sturm, 1998, A snow-transport model for complex terrain. *J. Glaciol.*, 44, 498 – 516 . Essery, R.L.H., L. Li and J.W. Pomeroy, 1999, A distributed model of blowing snow fluxes over complex terrain. *Hydrol. Processes*, 13, 2423 – 2438.
 16. Liston, G.E., and M. Sturm, 2002, Winter precipitation patterns in arctic Alaska determined from a blowing-snow model and snow-depth observations. *J.Hydrometeor.*, 3, 646 – 659.
 17. Liston, G.E., J.P. McFadden, M. Sturm and R.A. Pielke, 2002, Modelled changes in arctic tundra snow, energy and moisture fluxes due to increased shrubs. *Global Change Biology*, 8, 17 – 32.
 18. Liu, L., Ma, Y., Menenti, M., Zhang, X. and Ma, W., 2019. Evaluation of WRF modeling in relation to different land surface schemes and initial and boundary conditions: a snow event simulation over the Tibetan plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(1), pp.209-226.
 19. Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J., & Clough, S. A., 1997, Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 102(D14), 16663-16682.
 20. Negah, S., Momenpoor, F., Ghaffarian, P., Farid Mojtahedi, N. and Asadi Oskooiee, E., 2014. Identification and formation mechanism' analysis of spatial pattern snowfall in central plain of guilan (delta snow) by using weather and research forecast (WRF) model. *Journal of Climate Research*, 19, pp.113-125.
 21. Noh Y, Cheon WG, Raasch S. 2000, The improvement of the K-profile model for the PBL using LES. In Preprints of the International Workshop of Next Generation NWP Model. Laboratory for Atmospheric Modeling Research: Seoul, South Korea; 65–66.
 22. O’Gorman, P.A., 2014. Contrasting responses of mean and extreme snowfall to climate change. *Nature*, 512(7515), pp.416-418.
 23. Pomeroy, J.W., T. Brown, G. Kite, D.M. Gray, R.J. Granger and A. Pietroniro, 1998, PBS-SLURP Model. National Hydrology Research Institute Contribution Series No.CS-98003. Report to Saskatchewan Water Corporation, Moose Jaw and the Upper Assiniboine River Basin Study, Environment Canada, Regina, Saskatchewan. 24 pp. plus appendices.
 24. Purves, R.S., J.S. Barton, W.A. Mackaness and D.E. Sugden, 1998, The development of a rule-based spatial model of wind transport and deposition of snow. *Ann. Glaciol.*, 26, 197 – 202
 25. Yu, E., 2013. High-resolution seasonal snowfall simulation over Northeast China. *Chinese Science Bulletin*, 58(12), pp.1412-1419.