



جغرافیا و روابط انسانی، بهار ۱۴۰۵، دوره ۹ شماره ۱، صص ۷۲۸-۷۱۰

تحلیل همدیدی-ترمودینامیکی بارش همرفتی بهاره فراگیر در شمال غرب ایران

زینب قدرتی^۱، برومند صلاحی^{۲*}، مهناز صابر^۳

۱- دانشجوی دکتری آب و هواشناسی دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده علوم اجتماعی، گروه جغرافیای طبیعی، اردبیل، ایران.

۲- استاد آب و هواشناسی دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده علوم اجتماعی، گروه جغرافیای طبیعی، اردبیل، ایران

bromand416@yahoo.com

۳- پژوهشگر پسادکتری آب و هواشناسی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۰۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۰۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۲۸

چکیده

این پژوهش با هدف واکاوی همدیدی-ترمودینامیکی الگوهای منجر به بارش همرفتی سنگین در منطقه شمال غرب ایران انجام شده است. برای این منظور از داده بارش روزانه ۱۷ ایستگاه سینوپتیک منتخب در سه استان اردبیل، آذربایجان شرقی و آذربایجان غربی طی دوره آماری ۱۷ ساله (۱۳۷۹-۱۳۹۵) استفاده گردید. از بین ۶۳ روز با بارش همرفتی فراگیر (با پوشش حداقل ۹ ایستگاه) در فصل بهار، دو روز به عنوان روز نماینده در منطقه انتخاب و بارش آن‌ها تحلیل همدیدی-ترمودینامیکی شد. ملاک انتخاب این دو روز، پوشش دهی حداقل ۱۵ ایستگاه و دریافت حداقل ۵۰ میلی‌متر بارش در هسته بیشینه است. برای تحلیل همدیدی روزهای منتخب، از داده‌های فشار سطح دریا (SLP)، ارتفاع ژئوپتانسیل (HGT)، رطوبت نسبی، سرعت قائم (Omega)، تاوایی، مؤلفه باد مداری (Uwnd) و باد نصف-النهاری (Vwnd) تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، نم و یژه و آب قابل بارش (PW) استفاده شد. بررسی نقشه‌ها و شاخص‌های ناپایداری به شناسایی دو الگوی مولد بارش‌های فراگیر و سنگین بهاره منتهی شد. الگوی اول، فعالیت آنتی‌سیکلون قوی در سبیری و سیکلونی در حوالی عراق در سطح زمین و سردچال و ناوه مورب بر روی سوریه و اطراف آن در تراز میانی جو را نشان داد. الگوی دوم، استیلای آنتی‌سیکلون بر روی دریای سیاه در سطح زمین و فعالیت سامانه شبه‌امگایی و ناوه آن در تراز بالا بود. ارزیابی هر دو الگو نشان دهنده نقش بارز و وجود واداشت‌های دینامیکی در کنار واداشت‌های محلی و گرمایش ناشی از محل در وقوع این نوع بارش در منطقه است.

کلیدواژه: بارش تندری، تحلیل سینوپتیکی، ترمودینامیک، شمال غرب ایران.

مقدمه

بارش در سرزمین کم‌آبی نظیر ایران از اهمیت زیادی برخوردار است (عساکره و رزمی، ۱۳۹۰). یکی از عوامل مطالعه و مشخصه‌های اقلیمی بارش در نواحی مختلف بعد نامشخص بودن برخی از رفتارهای آن است. بارش‌های شمال غربی کشور به وسیله عوامل زمانی و مکانی متعددی کنترل می‌گردد. مطالعات اولیه درباره‌ی بارش و عوامل تولید آن، عمدتاً رابطه‌ی بین توزیع مکانی و شدت بارش را با سیستم‌های سینوپتیک بررسی کرده‌اند. مکانیزم‌های صعود بارندگی در مناطق مختلف تابع الگوهای متفاوتی هستند (عزیزی و ربانی، ۱۳۹۲). بارش‌های همرفتی در مقیاس-های محلی، در نتیجه ناپایداری اتفاق می‌افتد و اگر این همرفت‌ها بر اثر گرما ایجاد شوند، آن‌ها را همرفت حرارتی و باران‌های رخ داده به این شیوه را رگبارهای گرمایی می‌نامند (علیجانی، ۱۳۷۲). پژوهشگران زیادی به بررسی بارش‌های تندری و الگوهای مولد آن‌ها در مناطق مختلف جهان پرداخته‌اند:

دلن (۲۰۰۱) به تحلیل هم‌دید طوفان‌های تندری در غرب اروپا پرداخته است و نتایج نشان داد که ناپایداری شدید سطوح فوقانی جو عامل اصلی رخداد طوفان‌های تندری هستند. دایان و همکاران (۲۰۰۱) به تحلیل طوفان‌های پاییزی شرق مدیترانه پرداختند و دریافتند عمیق شدن ناوه تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال سبب تقویت جت استریم جنب‌حاره و ناوه مستقر در دریای سرخ شده و منجر به ایجاد ناپایداری و طوفان‌های تندری شده است. ترنتمن و همکاران (۲۰۰۹) بارش‌های همرفتی در جنگل‌های واقع در جنوب غربی آلمان را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که حداکثر انرژی همرفتی در دسترس برای این بارش‌ها در اوایل بعد از ظهر رخ می‌دهد. مسترانگو و همکاران (۲۰۱۰) در جنوب شرق استرالیا جت سطوح پایین را سبب فرارفت توده هوای مرطوب و علت وقوع بارش‌های سنگین دانسته‌اند. لوگینوف و همکاران (۲۰۱۰) تغییرات طوفان‌های تندری در بلاروس را مورد مطالعه قرار دادند و مطابق یافته آنان رخداد این پدیده در مناطق کوهستانی بیشتر از سایر نواحی بوده است. لولیس (۲۰۱۱) تغییرپذیری بارش‌های همرفتی زمستانه جنوب شرق اروپا را بررسی کرد. والپر و جیمز (۲۰۱۵) الگوهای طوفان‌های تندری در اروپای مرکزی را مورد تحلیل هم‌دید قرار دادند. کونز و همکاران (۲۰۲۰) شرایط رخداد تگرگ در اروپای مرکزی را در سال‌های بین ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۴ بررسی کردند و نتایج نشان داد که حدود یک‌چهارم از تگرگ‌های رخ داده با یک جبهه همراه هستند. پابلوداویلا و همکاران (۲۰۲۱) الگوهای هم‌دید منجر به رویدادهای تگرگ شدید در اسپانیا را طی دوره آماری ۸ ساله (۲۰۱۲-۲۰۱۹) بررسی کردند و از تکنیک خوشه‌بندی K-means و شاخص‌های ناپایداری LI و CAPE استفاده کردند و نتایج پژوهش نشان داد که دمای بالاتر از ۲۰ درجه و شار رطوبت فراوان در تراز ۸۵۰ میلی‌بار و وجود هوای مرطوب در مجاورت سطح زمین عامل اصلی وقوع چنین رخدادی بوده است. پوربا و همکاران (۲۰۲۳) طوفان‌های تندری شبانه در لهستان را بررسی کردند.

ثنایی‌نژاد و همکاران (۱۳۸۸) به منظور بررسی وضعیت ناپایدار جو در ۶ مرداد ۱۳۸۸ مشهد با استفاده از داده‌های جو بالا به ترسیم نمودارهای اسکیتی پرداخته و شاخص‌های ناپایداری را محاسبه کردند. نتایج حاصل از شاخص‌های ناپایداری بیان‌گر احتمال بالای وقوع ناپایداری در این روز بودند. خالدی و همکاران (۱۳۸۹) طوفان‌های تندری سیلاب‌ساز در استان کرمانشاه را در سال‌های ۱۹۹۴-۱۹۸۷ مورد تحلیل هم‌دید قرار دادند. نتایج پژوهش نشان داد

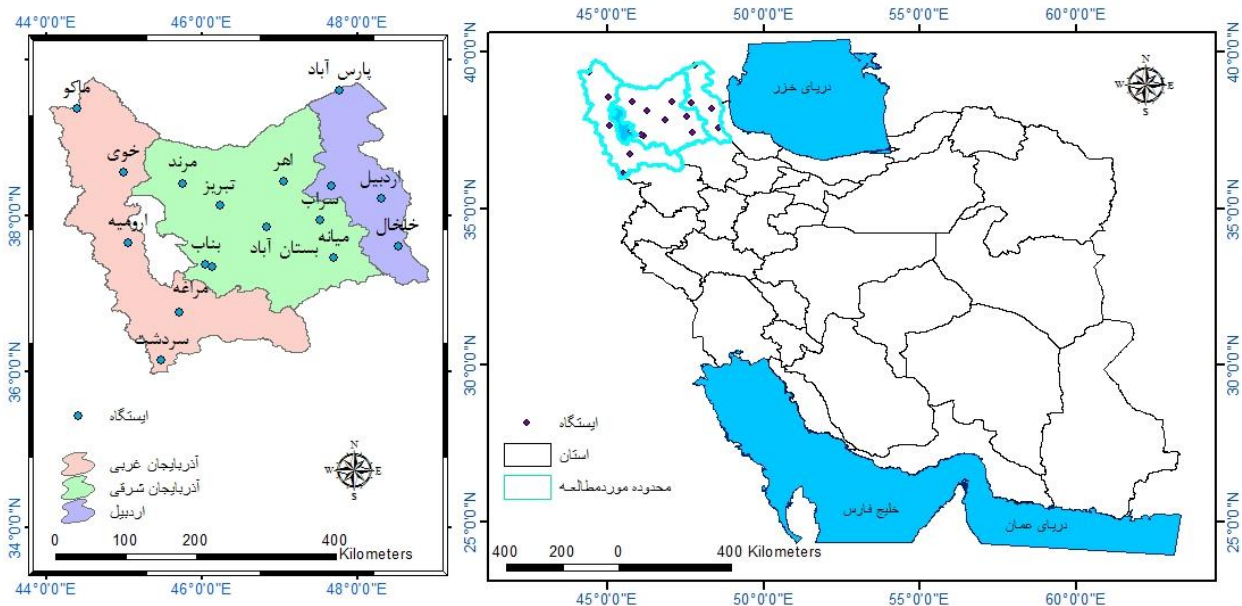
کم‌فشار بزرگ غرب آسیا و قرارگیری در جلوی ناوهای غرب کشور منجر به طوفان‌های تندری سیلاب‌ساز شده است. قوبدل رحیمی (۱۳۹۰) نشان داد که وقوع طوفان تندری و بارش در روز طوفان تندری روز ۵ اردیبهشت ۱۳۸۹ تبریز بر اثر ورود جبهه هوای سرد و عوامل دینامیکی صورت گرفته و عوامل محلی در ایجاد آن نقشی نداشته است. فرجی و همکاران (۱۳۹۴) الگوهای زمانی و مکانی بارش‌های تندری در استان زنجان را در دوره آماری (۱۹۹۴-۲۰۰۹) مورد واکاوی همدید قرار دادند و قرارگیری محورهای فرود بادهای غربی همراه با بریده‌های کم‌فشار را عامل اصلی ناپایداری‌های شدید و طوفان تندری در استان معرفی کرده‌اند. رحم دل (۱۳۹۵) به بررسی شرایط ابرناکی و برخی شاخص‌های ناپایداری شامل: شاخص K، شولتر، آب قابل بارش و شاخص CAPE جهت تعیین پتانسیل بارورسازی ابرها در مشهد پرداخت. بر این اساس ضریب همبستگی پیرسون بین این شاخص‌ها و میزان بارش ارتباط مستقیم بسیار ضعیفی را در سطح معنی‌دار ۹٪ و داده‌ها پراکندگی بسیار بالایی را نشان دادند.

بارش‌های رخ داده در منطقه شمال غرب تحت تأثیر تنوع سیستم‌های سینوپتیکی و محلی همچون بارش‌های اوروگرافیکی و همرفت دامنه‌ای هستند (معصوم پور و همکاران ۱۳۹۲: ۲۲۹؛ سلیقه و همکاران، ۱۳۹۷: ۱۳۱). در بررسی مکانیزم‌های صعود بارندگی‌های ایران، نقش عامل همرفت معمولی در بارش‌های شمال غرب بیشتر از سایر عوامل است (علیجانی، ۱۳۷۲). طوفان‌های تندری منطقه شمال غرب توسط پژوهشگران متعددی مورد کنکاش و بررسی قرار گرفته است از جمله کاشکی و همکاران (۱۳۹۵) ساختار جو را در زمان رخداد طوفان‌های تندری همراه بارش شدید در شمال غرب ایران مورد بررسی قرار دادند و نتایج نشان داد عامل اصلی رخداد طوفان‌های تندری ناوه عمیق و بریده کم‌فشار در شرق یا غرب ناحیه خزری است. سلیقه و همکاران (۱۳۹۷) بارش‌های همرفتی بهاری در شمال غرب را با شاخص‌های ناپایداری (TT - LI - PW - KI - SI - CAPE) در دوره آماری ۲۵ ساله (۲۰۱۴-۱۹۸۰) بررسی کردند و نتایج پژوهش نشان داد نقش عامل همرفت در وقوع بارش‌های بهاری قابل توجه بوده و مهم‌ترین نقش را در رخداد بارش ماه‌های می و ژوئن دارد. آزر و همکاران (۱۳۹۸) دریافتند واداشت‌های دینامیکی-همدیدی در فصل بهار، در ترکیب با فرارفت افقی و قائم گرما و گرمایش محلی بر روی دامنه‌های جنوبی و غربی ارتفاعات در ساعات روز، وقوع بارش با مشخصات همرفتی در شمال غرب ایران را در پی خواهد داشت. صلاحی و بهروزی (۱۴۰۰) پدیده تگرگ در شمال غرب ایران را بر مبنای شاخص‌های ناپایداری (TTI, KI, LI, CAPE), PW, L.C.L و SWEAT) در دوره آماری ۲۰۱۸-۱۹۹۵ بررسی کردند و نتایج پژوهش نشان داد در الگوی اول شاخص ناپایداری ضعیف بوده، الگوی دوم ناپایداری جو را نشان داده و الگوی سوم شدت رخداد طوفان تندی و رخداد تگرگ را مشخص کرده است. گرامی و همکاران (۱۴۰۱) بارش‌های همراه با طوفان تندری فراگیر بهاره در شمال غرب ایران را تحلیل همدید کردند و از روش تحلیل عاملی و خوشه‌بندی به روش ادغام Ward استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند الگوی کم‌ارتفاع بسته بیش‌ترین و الگوی ناوه عمیق کم‌ترین تکرار را دارد.

در این پژوهش به واکاوی همدیدی- ترمودینامیکی الگوهای منجر به بارش‌های تندری فراگیر در گستره شمال غرب ایران با استفاده از نقشه‌های سینوپتیکی و به‌کارگیری شاخص‌های ناپایداری پرداخته می‌گردد. لذا در این پژوهش به شناسایی الگوهای سینوپتیکی و شرایط ترمودینامیکی منجر به ایجاد ناپایداری‌ها و بارش‌های تندری فراگیر در این منطقه به‌منظور انجام برنامه‌ریزی جامع و مدیریت مسائل مختلف پرداخته خواهد شد.

محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه بین ۳۶ درجه الی ۳۹ درجه و ۴۴ دقیقه عرض شمالی و ۴۴ الی ۴۹ درجه طول شرقی واقع شده است که از شمال به جمهوری‌های آذربایجان و ارمنستان و جمهوری خودمختار نخجوان، از غرب به کشور ترکیه و عراق، از جنوب به استان‌های کردستان و زنجان، از شرق به استان‌های گیلان و دریای خزر محدود می‌شود. این محدوده استان‌های آذربایجان شرقی غربی و آذربایجان و اردبیل را شامل می‌شود.



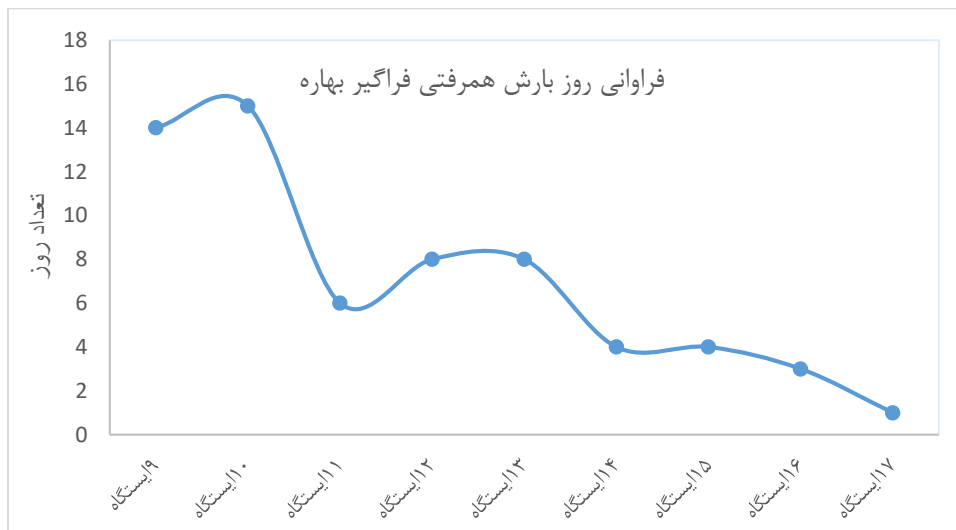
شکل ۱ - نقشه موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه

مواد و روش

مطالعه حاضر به تحلیل همید بارش‌های همرفتی فراگیر در شمال غرب ایران با رویکرد محیطی به گردشی پرداخته است. پس از استخراج و جداسازی بارش‌های بیش از ۵ میلی‌متر برای ۱۷ ایستگاه منتخب منطقه مورد مطالعه طی دوره آماری ۱۷ ساله (۱۳۷۹-۱۳۹۵)، روزهایی که حداقل در ۹ ایستگاه بارش آن‌ها اتفاق افتاده است به‌عنوان روزهای فراگیر بارش همرفتی تعیین شدند. از بین این روزها دو روز به‌عنوان نماینده روزهای با بارش همرفتی فراگیر و سنگین انتخاب شدند که معیار گزینش آن‌ها پوشش‌دهی حداقل ۱۵ ایستگاه و دریافت حداقل ۵۰ میلی‌متر در هسته بیشینه است. در ادامه داده‌های مربوط فشار روزانه سطح دریاهای آزاد (SLP) و ارتفاع ژئوپتانسیل سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال (HGT)، رطوبت نسبی، سرعت قائم (Omega)، تاوایی، مؤلفه باد مداری (Uwnd)، مؤلفه باد نصف-النهاری (Vwnd) تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، نم و یخه و آب قابل بارش (PW) در این دو روز در محدوده جغرافیایی شمال غرب ایران بررسی و تحلیل همید شد. همچنین برای بررسی شرایط ترمودینامیکی جو از شاخص‌های ناپایداری از قبیل KI، SI، LI، TT، و نمودار Skew-T استفاده شد.

یافته‌ها

در دوره آماری مورد مطالعه در مجموع ۶۳ روز دارای بارش همرفتی فراگیر (با پوشش حداقل ۹ ایستگاه) بوده است. از این تعداد، ۱۴ و ۱۵ روز به ترتیب ۹ و ۱۰ ایستگاه منطقه را پوشش داده است و هر چه بر تعداد ایستگاه‌ها و پوشش‌دهی بیشتر آن‌ها افزوده می‌شود از فراوانی روزهای فراگیر کاسته می‌شود (شکل ۲). از بین ۶۳ روز با بارش همرفتی فراگیر در فصل بهار دو روز به عنوان روز نماینده در منطقه انتخاب شد و به تحلیل هم‌دیدگی-ترمودینامیکی بارش آن‌ها پرداخته شد. برای تحلیل هم‌دیدگی روزهای منتخب از داده‌های فشار سطح دریا (SLP)، ارتفاع ژئوپتانسیل (HGT)، نم و یخه، سرعت قائم (Omega)، تاوایی، مؤلفه باد مداری (Uwnd)، مؤلفه باد نصف‌النهاری (Vwnd) تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و آب قابل بارش (PW) استفاده شد.



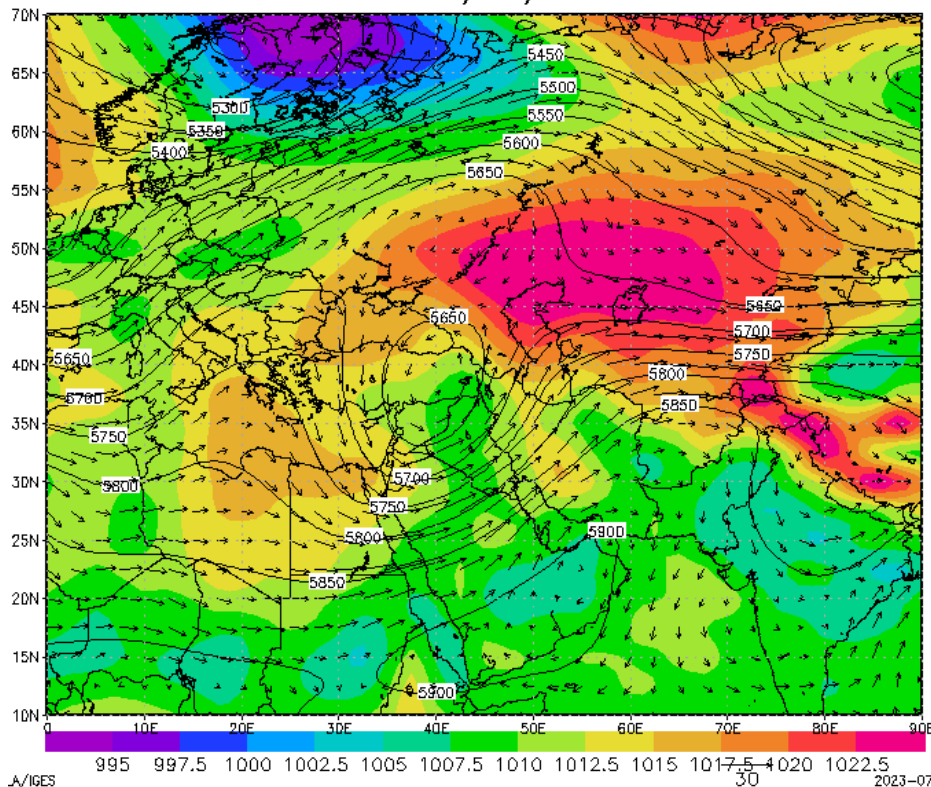
شکل ۲- فراوانی وقوع روز بارش همرفتی فراگیر در منطقه در طول دوره آماری مورد مطالعه طی فصل بهار

در روز ۲ می سال ۲۰۱۰ مصادف با ۱۲ اردیبهشت ۱۳۸۹، مجموع و میانگین بارش دریافتی ۱۷ ایستگاه محدوده مورد بررسی به ترتیب ۳۲۵/۵ و ۱۹/۱ میلی‌متر بوده و بیشینه بارش این روز در سردشت به میزان ۷۳ میلی‌متر باریده است. بررسی نقشه فشار تراز سطح دریا در این روز (شکل ۳) نشان‌دهنده فعالیت یک و اچ‌رخند قوی در قسمت‌هایی از دریای خزر، روسیه و سیبری با فشار مرکزی ۱۰۲۲/۵ هکتوپاسکال است که منطقه وسیعی را در امتداد مدار ۳۵ تا ۵۰ درجه شمالی و ۲۵ تا ۹۰ درجه شرقی در بر گرفته و جریان هوا را به صورت ساعت‌گرد از طریق زبان‌های جنوب‌سوی خود را به منطقه ارسال کرده است. هم‌چنین یک کم‌فشاری با فشار مرکزی ۱۰۱۰ میلی‌بار بر روی عراق، شرق سوریه و قسمت‌هایی از ترکیه تشکیل شده که خلیج فارس و عرض‌های پایین‌تر را نیز در بر گرفته است و منطقه مورد بررسی در مرز بیرونی کم‌فشار جنوب‌سوی عراق- شرق سوریه و پرفشار شمال‌سوی دریای خزر- روسیه واقع شده و در منطقه هم‌رسی زبان‌های کم‌فشار و پرفشار محل تشکیل جبهه قرار دارد که درجه حرارت در دو طرف آن باهم تفاوت دارد. در اینجا منحنی ۱۰۱۵ میلی‌بار از روی محدوده گذر کرده و فرارفت هوای گرم و مرطوب دریای سیاه و دریای خزر از روی هوای سرد شمالی سبب شکل‌گیری همرفت اجباری، صعود هوا و ناپایداری شده است.

آرایش توپوگرافی نقشه تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال نشان‌دهنده شکل‌گیری یک سردچال و قرارگیری ناوه نسبتاً عمیق آن با ارتفاع ۵۶۵۰ متر بر روی سوریه و قسمت‌هایی از عراق و دریای مدیترانه و اردن است که ضمن تغذیه رطوبت از دریای سیاه و مدیترانه به تقویت سیستم کم‌ارتفاع سطح بالا و کم‌فشار سطح زمین پرداخته و قرارگیری منطقه شمال غرب ایران در جلوی فرود این سردچال به‌عنوان محل واگرایی بالایی و همگرایی پایینی، وزش افقی چرخندگی مثبت و محل صعود، اغتشاشات جوی سبب بروز ناپایداری و بارش شده است. جهت وزش باد تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در این روز از شمال به جنوب و به‌صورت نصف‌النهاری است. با در نظر گرفتن الگوی جریان و شار رطوبت، منبع اصلی رطوبت برای وقوع این نوع بارش‌ها دریاها و سیاه و مدیترانه می‌باشند.

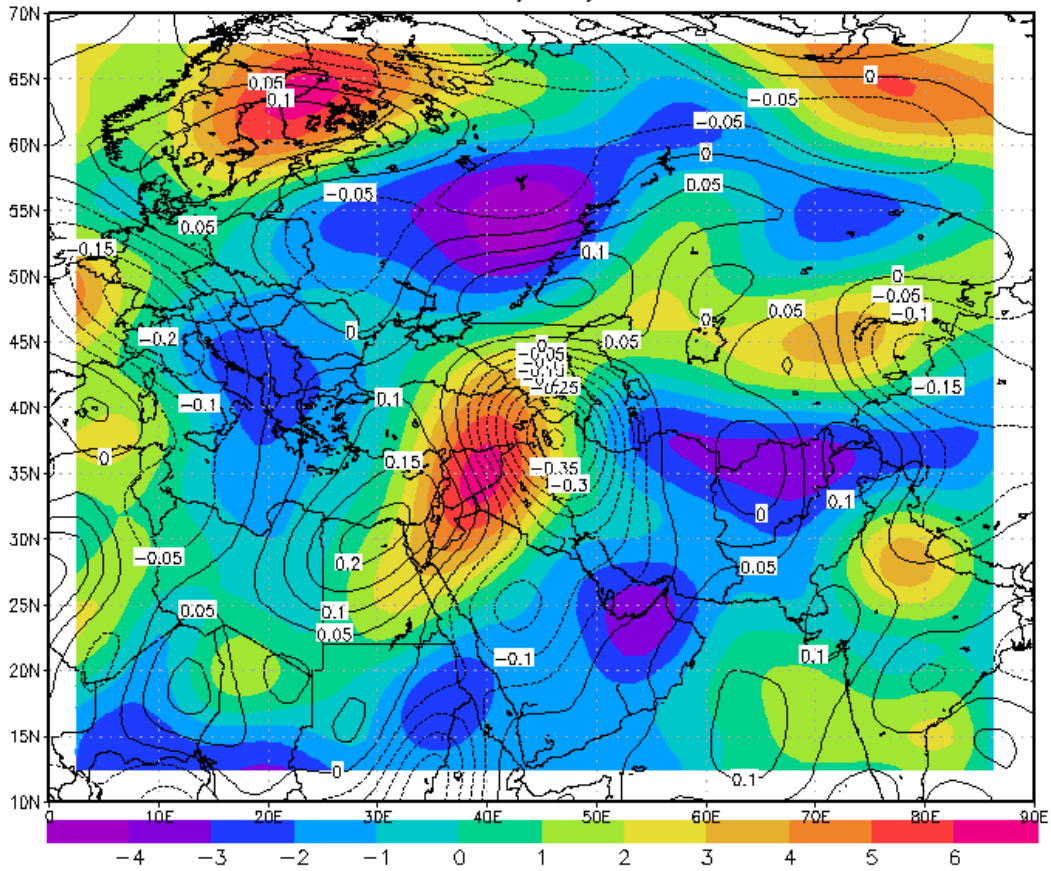
بررسی نقشه امگای روز ۲ می سال ۲۰۱۰ (شکل ۴) نشان می‌دهد که امگا در جایی که محل استقرار سردچال و کم‌فشار بوده یعنی از شرق سوریه، عراق تا نیمه غربی ایران به‌صورت هسته منفی ظاهر شده و مقدار آن در منطقه شمال غرب ایران (۰/۴-) پاسکال بر ثانیه در همراهی با تاوایی مثبت ۳ متر در ثانیه بوده است که در مجموع گرمایش سطحی توأم با فرارفت تاوایی مثبت، نقش قابل توجهی در ایجاد و تشدید ناپایداری منطقه ایفا می‌کند. میانگین رطوبت نسبی منطقه مورد مطالعه در این روز برابر با ۶۰ درصد است و آب قابل بارش در منطقه شمال غرب ایران در این روز رقم قابل توجه ۲۰ کیلوگرم در مترمربع را نشان می‌دهد که حاکی از وجود پتانسیل تغذیه رطوبتی برای تداوم وقوع بارش همرفتی در منطقه است (شکل ۵).

2010/05/02



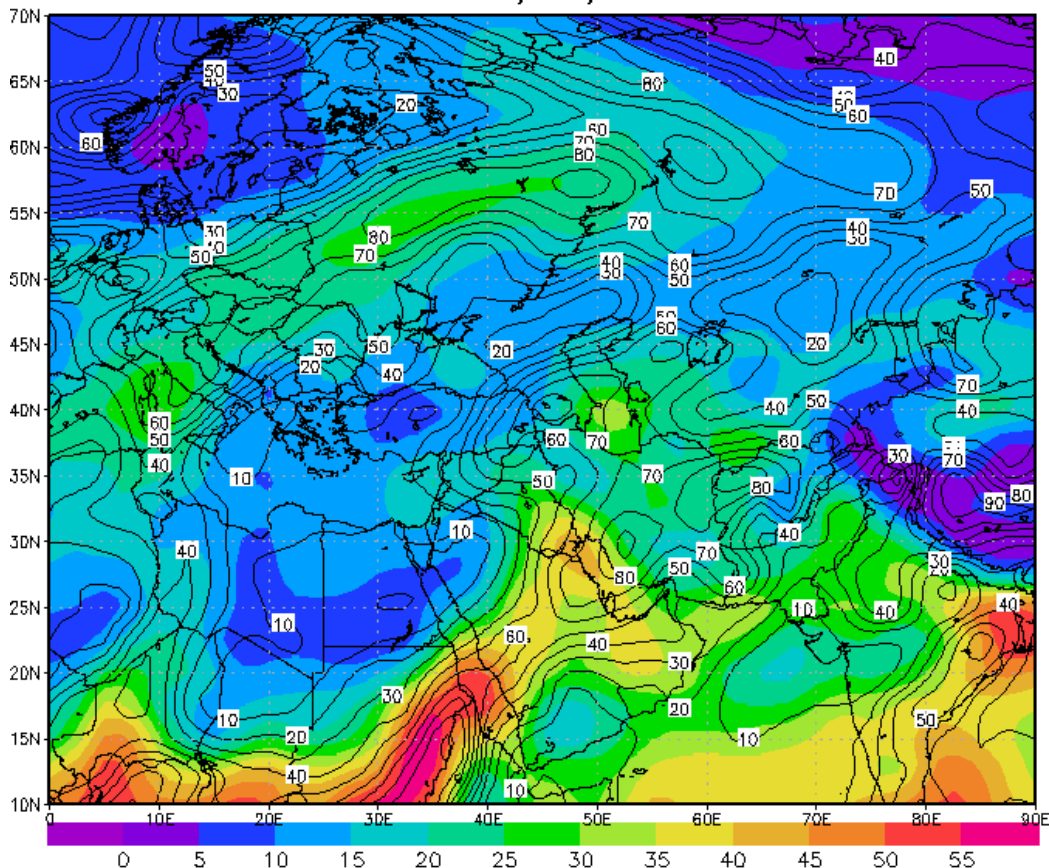
شکل ۳ - وضعیت متوسط همدیدی در روز ۲ می ۲۰۱۰: متوسط فشار سطح دریا (رنگ‌ها بر حسب هکتوپاسکال)؛ متوسط ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (کتورها بر حسب ژئوپتانسیل متر)؛ خطوط جریان باد در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (پیکان‌ها جهت وزش باد و طول پیکان‌ها معرف سرعت باد هستند)

2010/05/02



شکل ۴- وضعیت متوسط همدیدی در روز ۲ می ۲۰۱۰: متوسط تاوایی نسبی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (رنگ‌ها بر حسب متر در ثانیه)؛ متوسط امگای تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (کتورها بر حسب پاسکال بر ثانیه)

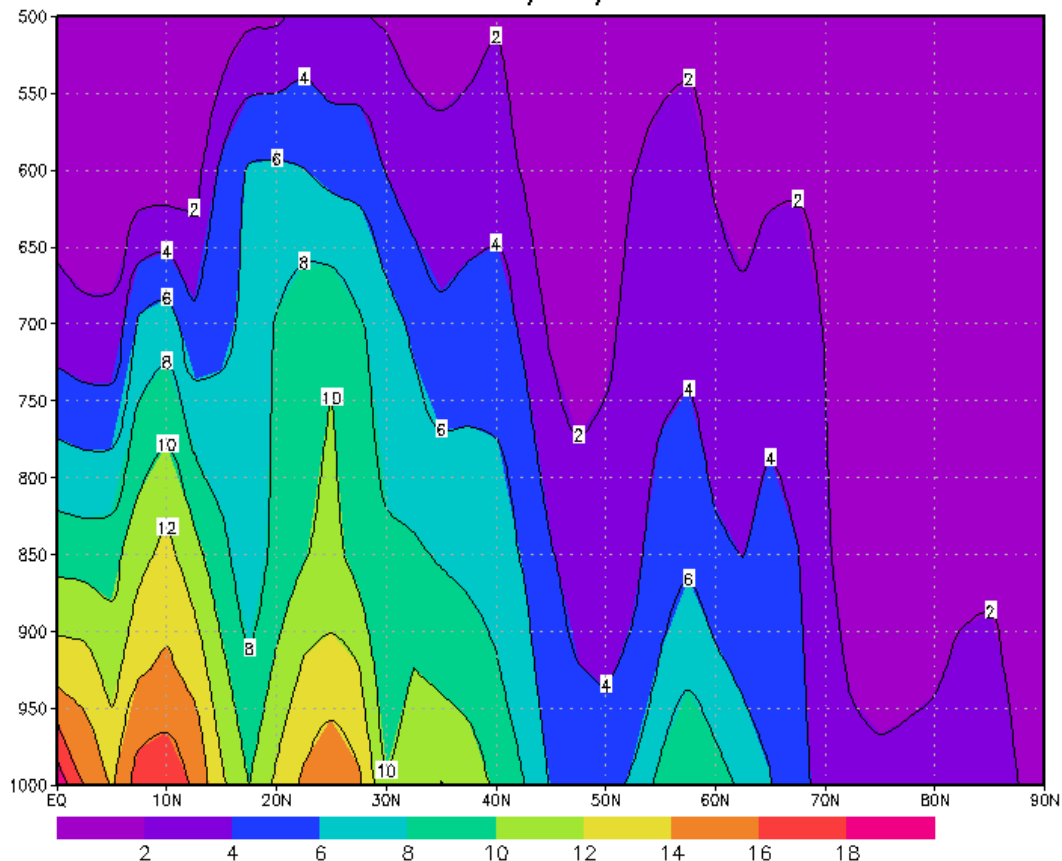
2010/05/02



شکل ۵- وضعیت متوسط همدیدی در روز ۲ می ۲۰۱۰: متوسط رطوبت نسبی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (کتورها بر حسب درصد): آب قابل بارش (رنگها بر حسب کیلوگرم در مترمربع)

نمودار هوف مولر نوع چهارم برای نمایش تغییرپذیری فراسنج رطوبت ویژه در طول جغرافیایی $46/24$ درجه شرقی برای ۲ می ۲۰۱۰ در عرض‌های جغرافیایی و ترازهای ۱۰۰۰ تا ۵۰۰ هکتوپاسکال ترسیم گردید (شکل ۶). مطابق نیمرخ قائم تغییرات رطوبت ویژه از سطوح زمین تا سطوح فوقانی جو، هسته بیشینه رطوبت ویژه در این روز در عرض جغرافیایی ۱۰ درجه شمالی قرار دارد. هسته دیگری از رطوبت ویژه به مرکزیت عرض جغرافیایی ۲۵ درجه شمالی قرار دارد که رطوبت ویژه آن تا تراز ۷۵۰ هکتوپاسکال در حدود ۱۰ گرم در کیلوگرم است. منحنی‌های متحدالمرکز اطراف آن با مقدار ۱۰ گرم در کیلوگرم کل منطقه شمال غرب ایران را در بر گرفته است. با افزایش عرض جغرافیایی و تراز جوی به تدریج از مقدار نم ویژه کاسته شده است. به این ترتیب که رطوبت ویژه در عرض جغرافیایی ۱۰ درجه شمالی در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال حدود ۱۸ گرم در کیلوگرم و در عرض ۴۵ درجه شمالی از تراز ۱۰۰۰ تا ۵۰۰ هکتوپاسکال بین ۶ تا ۲ گرم در کیلوگرم است.

2010/05/02

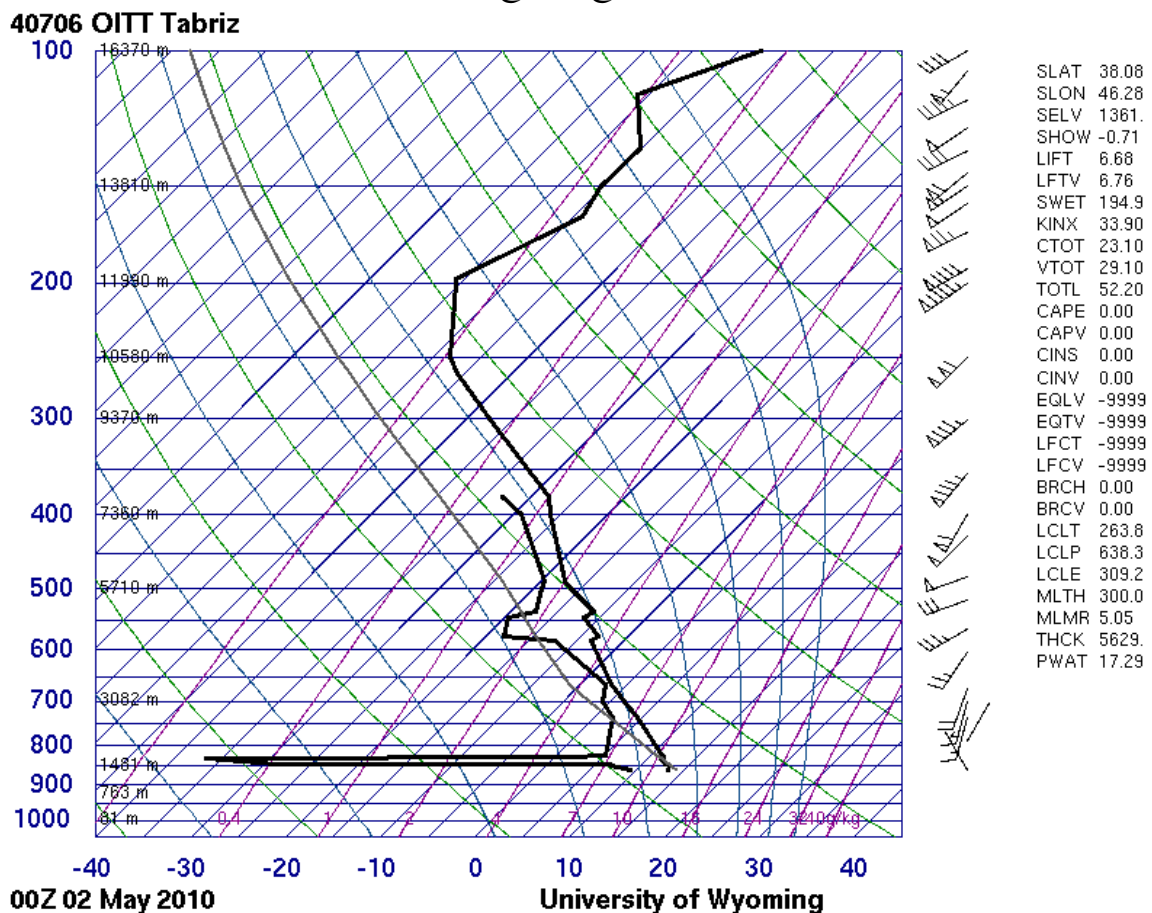


شکل ۶- نمودار نوع چهارم (Time ثابت و Lon و Lev و Lat متغیر) برای فراسنج رطوبت ویژه در ۲ می ۲۰۱۰ در طول ۴۶/۲۴ شرقی و ترازهای ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ هکتوپاسکال

منحنی رطوبت ویژه دارای ۱۲ تا ۴ گرم در کیلوگرم منشعب از هسته بیشینه ثانویه واقع در مرکز منطقه شمال غرب ایران در عرض ۳۰ تا ۴۰ درجه شمالی از تراز ۱۰۰۰ تا ۵۵۰ هکتوپاسکال قرار دارد که نشان‌دهنده قدرت هوای مرطوب لایه‌های فوقانی و نفوذ هوای مرطوب از این ترازها تا عرض ۵۰ درجه شمالی است.

نمودار ترمودینامیکی اسکیتی روز ۲ می ۲۰۱۰ ساعت ۰۰ برای ایستگاه تبریز به‌عنوان نماینده منطقه شمال غرب کشور جهت بررسی وضعیت ناپایداری جو ترسیم گردید (شکل ۷). در این نمودار منحنی سمت راست نیمرخ دمای هوا و منحنی سمت چپ نیمرخ دمای نقطه شبنم و خط سیاه بین آن‌ها افت محیطی دما را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در این ساعت در تراز ۶۵۰ میلی بار دمای توده هوا به دمای نقطه شبنم نزدیک شده است که این امر به معنای اشباع و تراکم توده هوای صعودی در این سطح می‌باشد. از این سطح به بعد توده هوا به دلیل طی کردن مسیر افت آدیاباتیک اشباع از نیمرخ نقطه شبنم و افت محیطی دما فاصله گرفته است. جهت ارزیابی شرایط جوی در این ساعت از شاخص‌های CAPE برای بررسی وضعیت ناپایداری و از شاخص K برای نشان دادن نوع بارش استفاده گردید. شاخص CAPE حداکثر انرژی جنبشی بسته هوای در حال صعود را نشان می‌دهد. مقدار محاسبه شده آن در این روز برابر صفر (۰/۰۰) است که نشان می‌دهد میزان ناپایداری حادث شده جزئی می‌باشد. شاخص KI که برای اندازه‌گیری پتانسیل طوفان تندی بر اساس افت محیطی دما و صعود عمودی آن کاربرد دارد، در این روز در

ایستگاه تبریز به میزان ۳۳/۹۳ محاسبه گردید که نشان‌دهنده پتانسیل زیاد برای وقوع تندر همراه با بارش شدید می‌باشد. شاخص TT با مقدار ۵۲/۲ نشان‌دهنده احتمال طوفان تندری شدید است. شاخص LI با مقدار ۶/۶۸ احتمال طوفان شدید را نشان می‌دهد. شاخص شوالتر در این روز ۰/۷۱- درجه بوده که ناپایداری جو را نشان می‌دهد. شاخص ویتینگ (KI) ۲۵/۵ است که نشان می‌دهد که احتمال همرفت با پتانسیل متوسط وجود دارد. آب قابل بارش آن نیز ۱۷/۲۹ میلی‌متر برآورد شده است. در این روز هوا تا سطح تراکم (LCL) که در ارتفاع ۳۰۹/۲ متر قرار دارد، به صورت بی‌دروی خشک صعود کرده و در این ارتفاع به اشباع رسیده است.

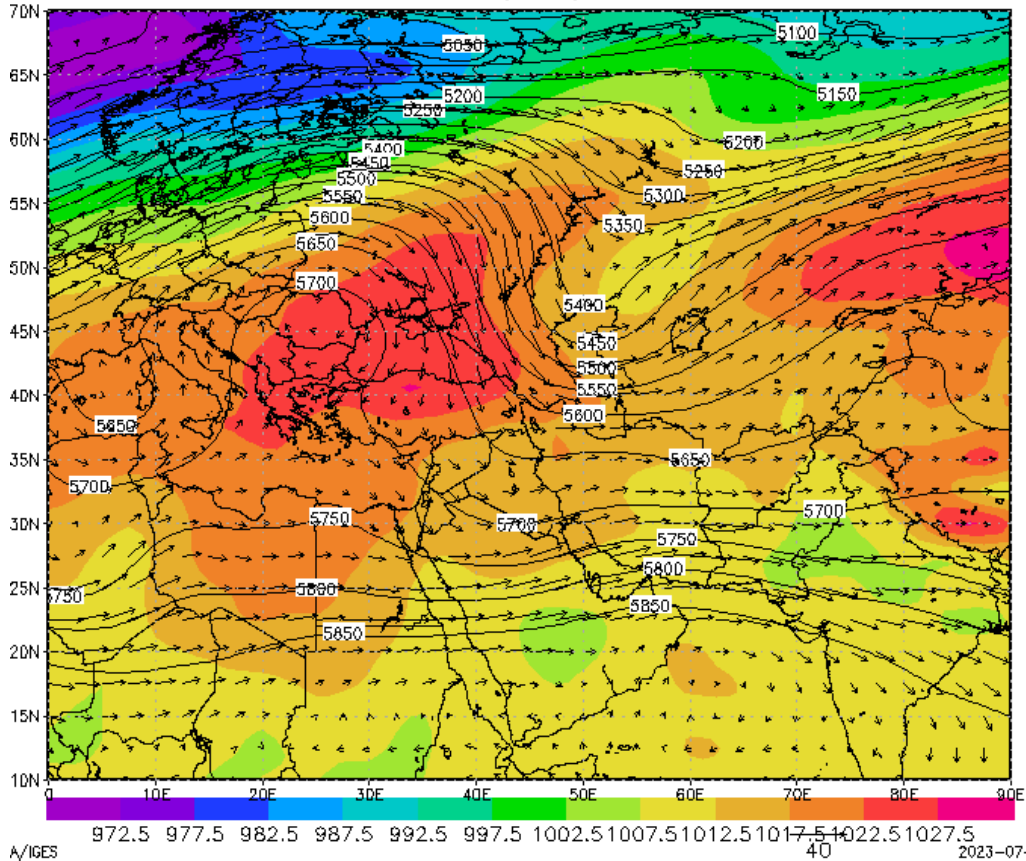


شکل ۷- نمودار Skew-T ایستگاه تبریز در روز ۲ می ۲۰۱۰

بارش تندری فراگیر که در روز ۲۱ مارس ۲۰۱۴ (مصادف با ۱۰ فروردین ۱۳۹۳) در شمال غرب رخ داده ۱۵ ایستگاه منطقه را پوشش داده و در مجموع ۲۷۰/۲ میلی‌متر بارندگی در کل ۱۵ ایستگاه و به‌طور میانگین ۱۸ میلی‌متر بارندگی در هر ایستگاه در پی داشته است. هسته بیشینه بارش در این روز بر روی سردشت با ۵۲ میلی‌متر قرار دارد. بررسی نقشه فشار سطح زمین (شکل ۸) مبین فعالیت سیستم پرفشار است، مرکز و اچرخند قوی با ۱۰۲۷/۵ میلی‌بار در دریای سیاه و کشورهای همسایه آن بسته شده که زبان‌های جنوب‌سوی آن به سمت عرض‌های پایین تا عرض ۱۵ درجه شمالی نیز کشیده شده و تسلط گردش و اچرخندی و عبور زبان ۱۰۲۲/۵ میلی‌بار آن از روی محدوده مورد بررسی سبب شده جریان سرد شمالی در جهت ساعت‌گرد با حرکت به سمت عرض پایین و عبور از روی آب‌های نسبتاً گرم دریای خزر، جریان رطوبت و گرمای دریای خزر را به شمال غرب ایران منتقل کند. با نفوذ هوای سرد به منطقه،

شرایط برای ساز و کار همرفت وزشی فراهم شده و ضمن صعود هوای سبک‌تر، رطوبت آن نیز به ترازهای بالا منتقل شده و ناپایداری ایجاد شده شرایط را برای تراکم و ابرناکی و ریزش بارش سنگین همرفتی در محدوده مورد پژوهش فراهم کرده است.

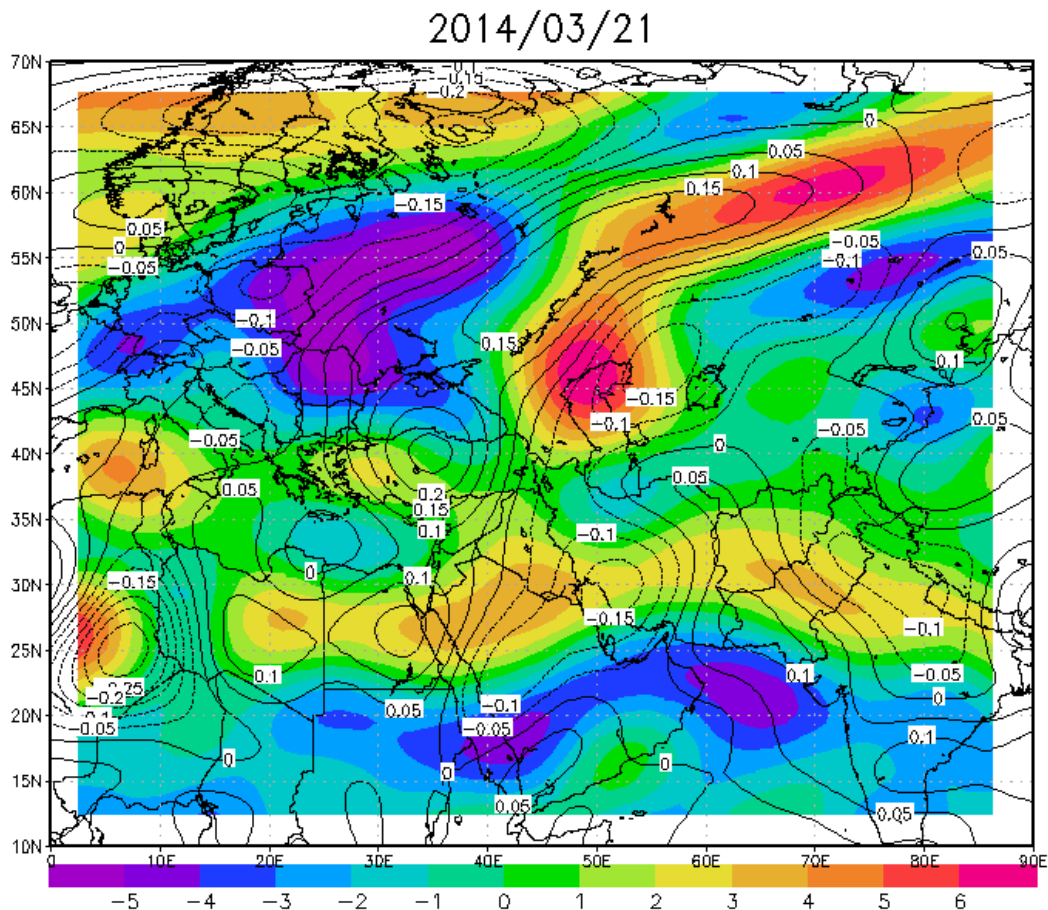
2014/03/21



شکل ۸ - وضعیت متوسط همدیدی در روز ۲۱ مارس ۲۰۱۴: متوسط فشار سطح دریا (رنگ‌ها بر حسب هکتوپاسکال)؛ متوسط ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (کتورها بر حسب ژئوپتانسیل متر)؛ خطوط جریان باد در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (پیکان‌ها جهت وزش باد و طول پیکان‌ها معرف سرعت باد هستند)

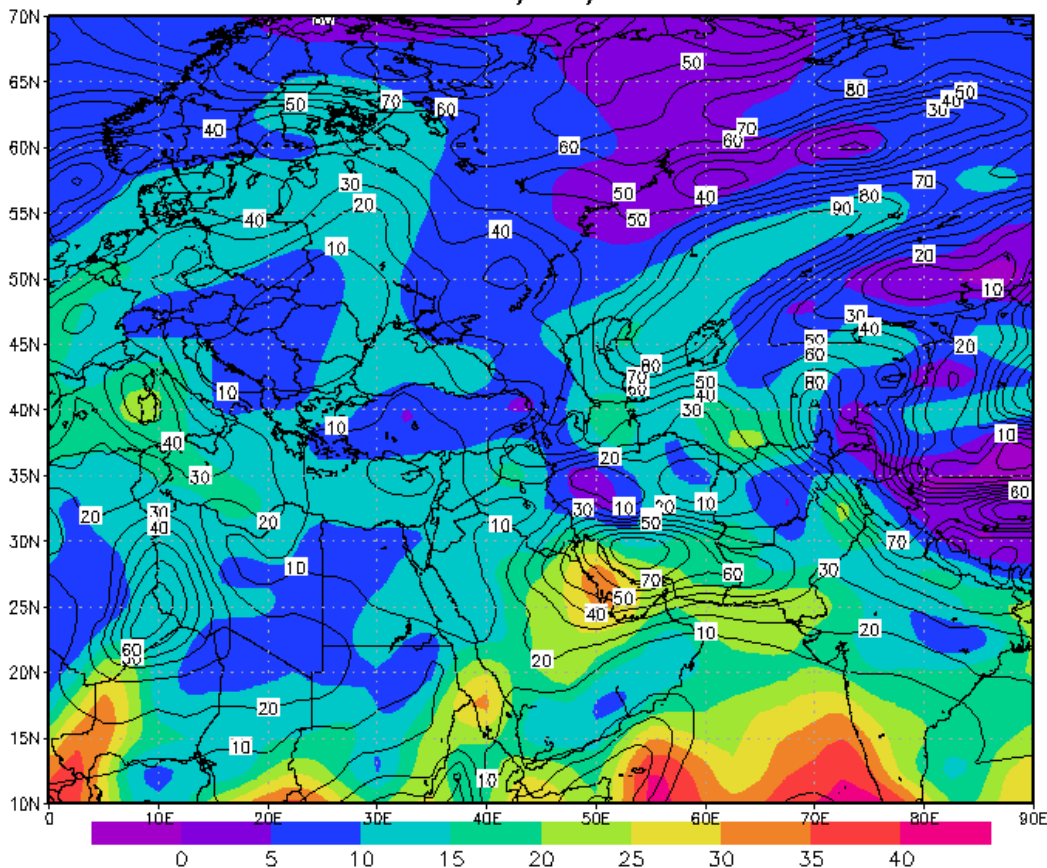
واکاوی نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۸) نشان می‌دهد که در این روز سامانه‌های فراز و فرودی در حال فعالیت و ناپایداری هستند. در این میان پدیده‌ای که جلب توجه می‌کند، شارش سامانه بلوکی‌نگ شبه آمگایی در حوالی دریای سیاه و روسیه و ناپایداری ناوه مورب کم‌عمق شمالی است که منطقه در جلوی فرود قرار دارد و هوای سرد عرض شمالی با حرکت به سمت عرض‌های جنوبی‌تر و با عبور از روی دریای سیاه و مدیترانه و مکش رطوبتی آن به صورت جریان نصف‌النهاری وارد شمال غرب ایران شده و منطقه در معرض باد شمالی و واگرایی ضعیف این ناوه مورب تقریباً کم‌عمق قرار گرفته و منحنی ۵۶۵۰ متر از روی آن گذر کرده است. فراز مانع آن در دریای سیاه و مدیترانه با ارتفاع ۵۷۰۰ متر واقع شده که جریان هوا در آن نزولی و جنوبی می‌باشد. شمالی‌ترین منحنی فرود عمیقی که در بستر سیبری شکل گرفته، ۵۱۰۰ متر ارتفاع دارد و خطوط منحنی‌های آن در شمال دریای خزر در بستر موج بلند عمیق شده و محور آن تا دریای سرخ کشیده شده است.

نقشه‌ی امگای تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در روز ۲۱ مارس ۲۰۱۴ (شکل ۹) گویای وجود امگای منفی (۱/۰- پاسکال بر ثانیه) است که دلالت بر حرکت بالاسو، تقویت همرفت و ناپایداری دارد و بیشینه آن در روسیه منطبق بر محور ناوه است. مقدار تاوایی در این تراز برای شمال غرب ایران برابر با مثبت ۱ است که بیان‌کننده حرکت صعودی هوا و گردش سیکلونی می‌باشد. در این روز مقدار رطوبت نسبی منطقه مورد مطالعه ۴۰ درصد در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و آب قابل بارش آن نیز ۱۰ کیلوگرم در متر مربع برای تمام ضخامت جو است (شکل ۱۰).



شکل ۹ - وضعیت متوسط همدیدی در روز ۲۱ مارس ۲۰۱۴: متوسط تاوایی نسبی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (رنگ‌ها بر حسب متر در ثانیه)؛ متوسط امگای تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (کتورها بر حسب پاسکال بر ثانیه)

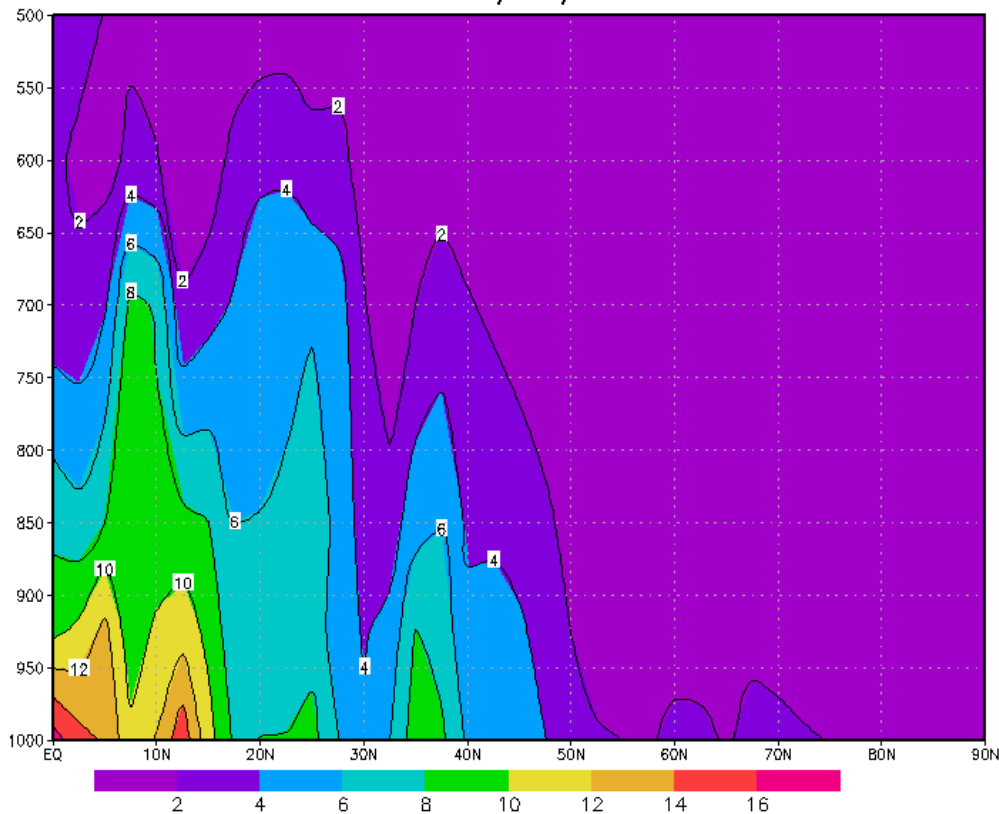
2014/03/21



شکل ۱۰- وضعیت متوسط همدیدی در روز ۲۱ مارس ۲۰۱۴: متوسط رطوبت نسبی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (کنتورها بر حسب درصد): آب قابل بارش (رنگ‌ها بر حسب کیلوگرم در مترمربع)

مطابق نیمرخ قائم تغییرات رطوبت ویژه از سطوح زمین تا سطوح فوقانی جو در طول جغرافیایی ۴۶/۲۴ درجه شرقی برای ۲۱ مارس ۲۰۱۴ (شکل ۱۱)، تمرکز بیشینه رطوبت ویژه در این روز در حوالی عرض جغرافیایی ۱۲ درجه شمالی و منطقه حاره قرار دارد. هسته بیشینه ثانویه دیگری از رطوبت ویژه به مرکزیت عرض جغرافیایی ۳۸ درجه شمالی قرار دارد که در برگیرنده منطقه مورد بررسی با مقدار نم ویژه ۱۰ گرم در کیلوگرم (در تراز ۱۰۰۰ تا ۹۵۰ هکتوپاسکال) است که رطوبت ویژه آن تا تراز ۶۵۰ هکتوپاسکال در حدود ۲ گرم در کیلوگرم است. همچنان با افزایش عرض جغرافیایی و تراز جوی به تدریج از مقدار نم ویژه کاسته می‌شود. به این ترتیب که رطوبت ویژه در این عرض‌ها تا تراز ۸۰۰ هکتوپاسکال ۴ گرم در کیلوگرم تا تراز ۶۵۰ هکتوپاسکال ۲ گرم در کیلوگرم است. نم ویژه در عرض جغرافیایی ۴۴ درجه شمالی در تراز ۱۰۰۰ تا تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال حدود ۴ گرم در کیلوگرم است.

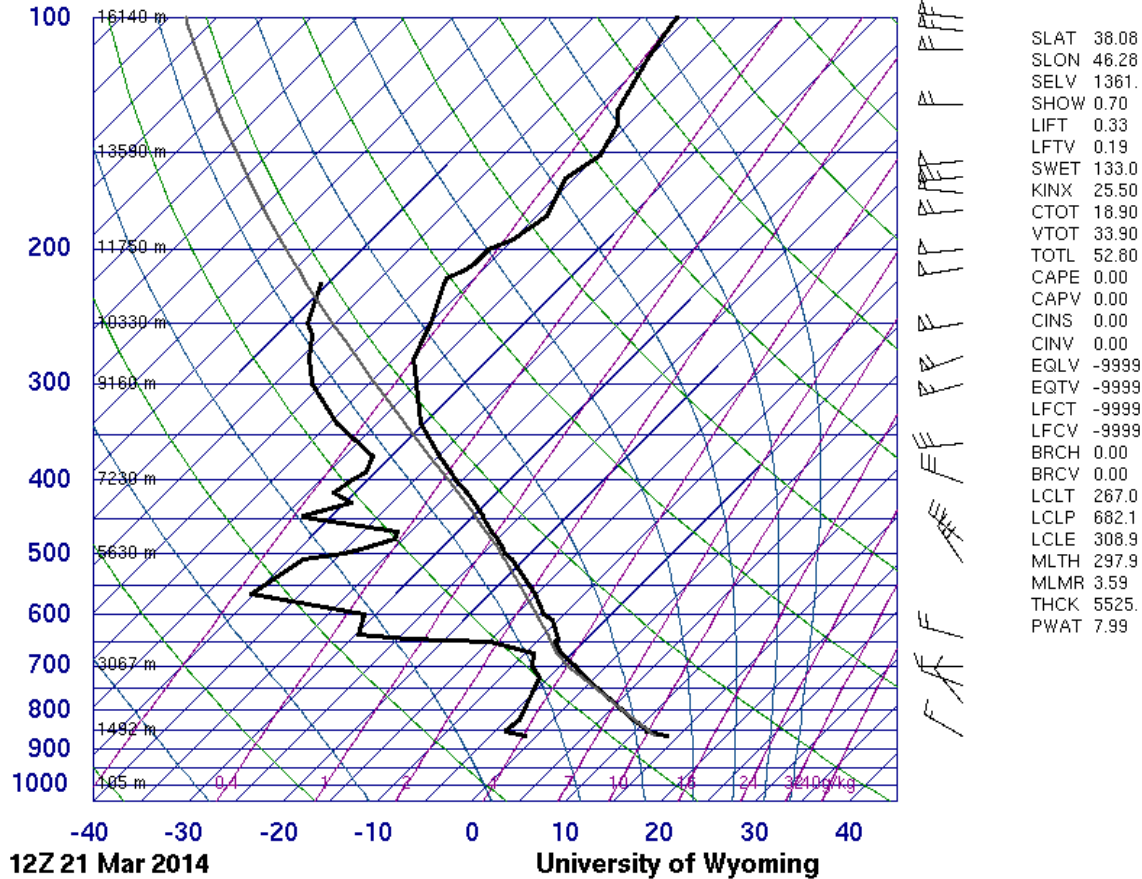
2014/03/21



شکل ۱۱- نمودار نوع چهارم (Time و Lon ثابت و Lat و Lev متغیر) برای فراسنج رطوبت ویژه ۲۱ مارس ۲۰۱۴ در طول ۴۶/۲۴ شرقی و ترازهای ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ هکتوپاسکال

نمودار ترمودینامیکی اسکیتوتی روز ۲۱ مارس ۲۰۱۴ ساعت ۱۲ ایستگاه تبریز (شکل ۱۲) نشان می‌دهد در این شاخص CAPE برابر با مقدار ۰/۰۰ بوده که نشان دهنده تشکیل شرایط ناپایدار جزئی می‌باشد. شاخص شوالتر در این روز ۰/۷۰ درجه بوده که تا حدودی ناپایداری جو را نشان می‌دهد. شاخص ویتینگ (KI) ۲۵/۵ است که نشان می‌دهد احتمال همرفت با پتانسیل متوسط وجود دارد. شاخص بالابری (LI) با ۰/۳۳ احتمال وقوع رگبارهای باران و برف و مجموع بالابری (TTI) با مقدار ۵۲/۸۰ نیز ناپایداری جو را نشان می‌دهد. مقدار آب قابل بارش ۷/۹۹ میلی‌متر بوده است. بر روی نمودار اسکیتوتی، منحنی دمای محیط و نقطه شبنم در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال به هم نزدیک شده‌اند که نشان‌دهنده شناور بودن بسته هوا است. در تراز ۸۵۰ خط پایه ابر تشکیل شده است و در این تراز، بسته هوا به نقطه اشباع رسیده و با اضافه شدن رطوبت و سرمایش هوا، رطوبت موجود متراکم شده و به صورت بارش فرو می‌بارد.

40706 OITT Tabriz



شکل ۱۲ - نمودار Skew-T ایستگاه تبریز در روز ۲۱ مارس ۲۰۱۴

نتیجه گیری

این پژوهش به تحلیل همدید بارش‌های همرفتی فراگیر و سنگین در شمال غرب ایران با رویکرد محیطی به گردشی و با استفاده از محاسبه شاخص‌های ناپایداری می‌پردازد. برای این منظور داده‌های ساعتی بارش ۱۷ ایستگاه منتخب، طی دوره آماری ۱۷ ساله (۱۳۷۹-۱۳۹۵) از آرشیو سازمان هواشناسی دریافت شد و پس از استخراج و جداسازی بارش‌های بیش از ۵ میلی‌متر برای ۱۷ ایستگاه منتخب منطقه، روزهای بارشی با پوشش حداقل ۹ ایستگاه به‌عنوان روزهای فراگیر بارش همرفتی تعیین شدند. سپس از بین این روزها دو روز به‌عنوان نماینده روزهای بارش همرفتی فراگیر و سنگین بر اساس معیار پوشش‌دهی حداقل ۱۵ ایستگاه و دریافت حداقل ۵۰ میلی‌متر در هسته بیشینه، گزینش شدند.

تحلیل روزهای منتخب نشان‌دهنده دو الگوی جریان است که در آن‌ها عمده منبع رطوبتی منطقه را دریای خزر و سیاه و مدیترانه تأمین می‌کند. الگوی اول فعالیت و اچرخند قوی در سیبری و شمال دریای خزر و عارضه دیگر یک کم‌فشار بر روی عراق، شرق سوریه و بخش‌هایی از ترکیه است. زبانه جنوب‌سوی و اچرخند به منطقه مورد مطالعه وارد شده و گرادیان شدیدی را در محل تلاقی با کم‌فشار مذکور ایجاد کرده و جبهه‌ای را تشکیل داده است. در سطح بالا سردچال جوی و ناوه نسبتاً عمیقی بر روی سوریه و قسمت‌هایی از عراق و دریای مدیترانه و اردن تشکیل شده که ضمن تغذیه رطوبت از دریای سیاه و مدیترانه به تقویت سیستم کم‌ارتفاع سطح بالا و کم‌فشار سطح زمین پرداخته و

قرارگیری منطقه شمال غرب ایران در جلوی فرود این سردچال به عنوان محل واگرایی بالایی و همگرایی پایینی، وزش افقی چرخندگی مثبت و محل صعود، اغتشاشات جوی سبب بروز ناپایداری و بارش شده است. مقدار امگا در محل استقرار سردچال منفی بوده که به ایجاد و تقویت ناپایداری کمک نموده و گرمایش سطح توأم با فرارفت تاوایی مثبت ۳ و نم ویژه ۱۰ گرم بر کیلوگرم و آب قابل بارش در این الگو رقم قابل توجه ۲۰ کیلوگرم بر مترمربع است که حاکی از وجود پتانسیل تغذیه رطوبتی برای تداوم وقوع بارش همرفتی در منطقه دارد. بررسی شاخص‌های ناپایداری از جمله: LI, TT, KI و شاخص شوالتر نشان‌دهنده شرایط جو باروکلینیک و احتمال طوفان تندری شدید هستند. در الگوی دوم واچرخندی بر روی دریای سیاه و مجاور آن حاکم بوده که تسلط گردش واچرخندی و ورود زبانه‌های آن به منطقه با ایجاد همرفت وزشی از روی دریای خزر به آن موجب فرارفت رطوبت و هوای گرم به ترازهای بالا و ناپایداری شده و شرایط را برای بارش سنگین همرفتی فراهم کرده است. در تراز بالا سامانه بلوکینگ شبه‌امگایی بر روی دریای سیاه و روسیه فعالیت دارد و ناوه مورب آن هوای سرد را به منطقه ریزش نموده و با مکش رطوبتی از روی دریای سیاه و مدیترانه در منطقه مورد مطالعه که در جلوی فرود و محل همگرایی بالایی قرار گرفته، موجب ناپایداری و اغتشاشات جوی و تراکم و بارش سنگین در آنجا گردیده است. امگای منفی و تاوایی مثبت در منطقه دلالت بر حرکت بالاسو و تقویت همرفت و ناپایداری دارند. شاخص‌های ناپایداری در این الگو شدت کمتری نسبت به الگوی اول دارند ولی همچنان به وجود ناپایداری و احتمال وقوع رگبار و همرفت با پتانسیل متوسط دلالت می‌کنند. در هر دو الگوی جوی مولد بارش همرفتی سنگین بهاره در منطقه شمال غرب به نوعی واداشت‌های دینامیکی از جمله ناوه تراز میانی جو و هماهنگی امگا و تاوایی با آن‌ها در کنار واداشت‌های محلی و گرمایش زمین نقش داشته‌اند که نشان می‌دهد همرفت نه از نوع مستقل بلکه از نوع واداشته است. به عبارتی این نوع بارش در صورت وجود واداشت‌های دینامیکی مساعدکننده شرایط جو برای ایجاد و یا تقویت ناپایداری و فرارفت رطوبت در همراهی با گرمایش محلی ناشی از بستر کوهستانی منطقه به وقوع می‌پیوندد. این نتیجه با یافته عزیززی و ربانی (۱۳۹۲) همخوانی دارد که نامبردگان در تحلیل ترمودینامیکی بارش‌های همرفتی منطقه شمال غرب وقوع این پدیده را مستقل ندانسته‌اند و اذعان داشته‌اند در نبود شرایط دینامیکی مناسب امکان صعود همرفتی منجر به بارش در این منطقه دور از ذهن است. همچنین با یافته آزر و همکاران (۱۳۹۸) نیز مطابقت زیادی دارد. آنان اغلب بارش همرفتی بهاره در این منطقه را نوعی همرفت واداشته می‌دانند و وقوع آن را حاصل ترکیب حضور واداشت‌های دینامیکی و حضور پایدار و پیوسته فرارفت افقی و قائم گرمای ناشی از گرمایش محلی دانسته‌اند. فرارفت افقی گرما از دامنه‌های کوهستانی به مثابه واداشت محلی در تأمین گرما و انرژی موردنیاز برای تکوین همرفت و بارش‌های همرفتی عمل می‌کنند. علاوه بر این تا حدودی تأییدکننده نتیجه پژوهش سلیقه و همکاران (۱۳۹۷) است که وقوع بارش‌های شدید در ایستگاه نماینده شمال غرب ایران را ناشی از حرکات قائم همرفتی در ترازهای زیر ۵۰۰ هکتوپاسکال و عبور سامانه‌های سینوپتیکی مانند سیکلون‌های مدیترانه‌ای و بسترسازی آن‌ها جهت ناپایداری هوا می‌دانند و همراهی این سامانه‌ها و همرفت‌های محلی را در فراهم نمودن بارش‌های سیلابی مؤثر عنوان می‌کنند.

همچنین وجود مراکز فشار در اطراف محدوده مورد مطالعه و جبهه تشکیل شده در محل تلاقی هوای گرم و مرطوب عرض‌های پایین و هوای سرد و در حال نزول عرض‌های بالا در بروز بارش‌های سنگین مؤثر شناخته شدند که با یافته پژوهش عزیززی و همکاران (۱۳۸۸) و شمسی‌پور و همکاران (۱۳۹۷) و صلاحی و بهروزی (۱۴۰۰) مطابقت

دارد. شمسی پور و همکاران (۱۳۹۷) استقرار مرکز کم فشار بر روی دریای مدیترانه و جابجایی شرق سوی آن را در ایجاد شرایط مناسب برای ناپایداری و وقوع بارش و نیز انتقال هوای گرم و مرطوب جلوی ناوه حوالی مدیترانه به سمت عرض های پایین تر را باعث تقویت سامانه بارشی و رخداد بارش های سنگین غرب ایران مؤثر می دانند. صلاحی و بهروزی (۱۴۰۰) تشکیل سردچال جوی در تراز میانی جو را در وقوع توفان تندری شمال غرب ایران اثرگذار عنوان می کنند.

منابع

- آزرم، کامل؛ مفیدی، عباس؛ محمدخورشید دوست؛ علی (۱۳۹۸). بررسی سازوکار میان مقیاس وقوع بارش های همرفتی بهاره در شمال غرب ایران. مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۴۵، شماره ۳، صص ۵۳۳-۵۷۳.
- ثنایی نژاد، سید حسین؛ صالحی، حسن؛ باباییان، ایمان، (۱۳۸۸). تحلیل سینوپتیکی و دینامیکی پدیده های همرفتی محلی به منظور بهبود پیش بینی آن ها. چهاردهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، تهران، صص ۲۳۴-۲۳۷.
- خالدی، شهریار؛ خوش اخلاق، فرامرز؛ خزایی، محمد (۱۳۸۹). تحلیل همدیدی طوفان های تندری سیلاب ساز استان کرمانشاه. مجله چشم انداز جغرافیایی، سال ۵، شماره ۱۳، صص ۱۲-۳۲.
- خوش اخلاق، فرامرز؛ ماهوتچی، محمدحسن (۱۳۹۸). واکاوی همدیدی بارش های تندری منرب مشهد، مجله علم و تکنولوژی محیط زیست. دوره ۲۱، شماره ۱۲، صص ۲۳۵-۲۴۸.
- رحم دل، محسن (۱۳۹۵). بررسی شرایط ابرناکی و برخی شاخص های ناپایداری جهت تعیین پتانسیل بارورسازی ابرها در مشهد. مجله علمی و ترویجی نیوار، شماره ۹۲-۹۳، دو فصلنامه، صص ۳۳-۴۲.
- سلیقه، محمد؛ ناصرزاده، محمدحسین؛ غفاری، علی (۱۳۹۷). بررسی بارش های همرفتی بهاری شمال غرب ایران با استفاده از شاخص های ناپایداری (مطالعه موردی ایستگاه تبریز). نشریه علمی-پژوهشی جغرافیا و برنامه ریزی، سال ۲۲، شماره ۶۴، صص ۱۲۹-۱۴۷.
- شمسی پور، علی اکبر؛ کاکلی، سیف اله؛ جعفری، ایوب؛ جاسمی، سید میثم (۱۳۹۷). واکاوی همدیدی- ترمودینامیکی بارش های سنگین غرب و جنوب غرب ایران. نشریه علمی- پژوهشی جغرافیا و برنامه ریزی، سال ۲۲، شماره ۶۴، صص ۱۴۹-۱۶۷.
- صادقی حسینی، سید علیرضا؛ رضائیان، مهتاب (۱۳۸۵). بررسی تعدادی از شاخص های ناپایداری و پتانسیل بارورسازی ابرهای همرفتی منطقه اصفهان مجله فیزیک زمین و فضا، جلد ۳۲، شماره ۲، صص ۸۳-۹۸.
- سلیقه، محمد؛ ناصرزاده، محمدحسین؛ غفاری، علی (۱۳۹۷). بررسی بارش های همرفتی بهاری شمال غرب ایران با استفاده از شاخص های ناپایداری (مطالعه موردی ایستگاه تبریز). نشریه علمی-پژوهشی جغرافیا و برنامه ریزی، سال ۲۲، شماره ۶۴، صص ۱۲۹-۱۴۷.
- صلاحی، برومند؛ بهروزی، محمود (۱۴۰۰). تحلیل همدیدی پدیده تگرگ در شمال غرب ایران بر مبنای شاخص های ناپایداری، نشریه هواشناسی و علوم جو، جلد ۴، شماره ۱، صص ۴۵-۶۶.

عزیزی، قاسم؛ ربانی، فاطمه (۱۳۹۲). بررسی و تحلیل بارش‌های همرفتی در شمال غرب ایران. دوفصلنامه جغرافیا، شماره ۲۴، ص ۳۵-۶۰.

عزیزی، قاسم؛ نیری، معصومه؛ رستمی جلیلیان، شیما (۱۳۸۸). تحلیل سینوپتیک بارش‌های سنگین در غرب کشور (مطالعه موردی: بارش دوره ۷-۱۴ مارس ۲۰۰۵، تا ۲۴ اسفند ۱۳۸۵). فصلنامه جغرافیای طبیعی، سال ۱، شماره ۴، صص ۱۳-۱.

علیجانی، بهلول (۱۳۷۲). مکانیزم‌های صعود بارندگی در ایران. فصلنامه دانشکده ادبیات و علوم انسانی دانشگاه تربیت معلم، شماره ۱، صص ۸۵-۱۰۱.

فرجی، عبدالله؛ دوستکامیان، مهدی؛ صفری، زهرا (۱۳۹۴). واکاوی همدیدی الگوهای زمانی و مکانی بارش‌های تندری (مطالعه موردی: استان زنجان). فصلنامه جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال ۴، شماره ۱۴، صص ۶۵-۴۱.

قویدل رحیمی (۱۳۹۰). کاربرد شاخص‌های ناپایداری جوی برای آشکارسازی و تحلیل دینامیک توفان تندری روز ۱۵ اردیبهشت ۱۳۸۹ تبریز. فصلنامه فضای جغرافیایی، سال ۱۱، شماره ۳۳، صص ۱۸۲-۲۰۸.

کاشکی، عبدالرضا؛ اسدی، مهدی؛ حاجی محمدی، حسن (۱۳۹۵). بررسی ساختار جو در زمان رخداد طوفان‌های تندری همراه با بارش شدید در شمال شرق ایران. مجله آب و هواشناسی کاربردی، شماره ۱.

گرامی، محمد صالح؛ کریمی، مصطفی؛ عزیزی، قاسم؛ رفعتی آلاشتی، سمیه (۱۴۰۱). تحلیل همدیدی بارش‌های همراه با طوفان تندری فراگیر بهاره در شمال غرب ایران. فصلنامه پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره ۵۴، شماره ۱، صص ۹۵-۱۱۰.

Dayan, U; Margaret. Z.B; Sharon, M.E (2001). Averse Autumn Storm over the Middle, est: Synoptic and Mesoscale Convection Analysis. Theoretical and Applied Climatology, 69:103.122.

Delden, A. V (2001). The synoptic setting of thunderstorms in Western Europe. 2001, Atmospheric Research, 56: 89-110.

Hagen, M; Finke, U (2000). Motion characteristics of thunderstorms in southern Germany. Meteorological Applications, 6: 227-239.

Kunz, M., Wandel, J., Fluck, E., Baumstark, S., Mohr, S; Schemm, S (2020). Ambient conditions prevailing during hail events in central Europe. Natural Hazards and Earth System Sciences, <https://doi.org/10.5194/nhess-2019-412>.

Lericos, T.P.; Fuelberg, H.E; Watson, A.I; Holle, R.L (2002). Warm season lightning distributions over the Florida Peninsula as related to synoptic patterns. Weather and Forecasting, 17: 83-98.

Loginov, V. F; Volchek, A. A; Shpoka, I. N (2010). Estimation of the Role of Various Factors in the Thunderstorm Formation on the Territory of Belarus. Russian Meteorology and Hydrology, 35(3): 175-181.

Lolis, C J(2011). Winter convective precipitation variability in southeastern Europe and its connection to middle tropospheric circulation for the 60-year period. Theoretical and Applied Climatology, 107: 189-200.

- Mestrangelo, D; Horvath, K; Rocio, A; Miglietta, M.M (2011). Mechanisms for Convective Develop Meant in A Long-Lasting Heavy Precipitation Event. Over Southeastern Italy Atmospheric Research, 100, 586-602.
- Pablo Dávila L. F., J. Rivas Soriano, L.J., Jiménez Alonsob, C; Mora Garcíac, M (2021). Synoptic patterns of severe hailstorm events in Spain. Atmospheric Research, 250, 105397. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105397>.
- Poręba, S., Kiełt, L., Pietras, B., Tazarek, M (2023). Nocturnal thunderstorms in Poland: Environments, synoptic patterns and comparison to diurnal thunderstorms. Atmospheric Research, Volume 291.
- Trentmann, J., Keil, C., Salzmänn, M., Barthlott, C (2009). Multi-model simulations of a convective situation in low-mountain terrain in central Europe. Meteorology and Atmospheric Physics, 103: 95–103.
- Wapler, K., James, P (2015). Thunderstorm occurrence and characteristics in Central Europe under different synoptic conditions. Atmospheric Research, 158–159 (1–15): 231-244.