

شناسایی خودکار جبهه‌های جوی با استفاده از روش‌های عددی بر روی ایران و شرق مدیترانه (مطالعه موردی: ۱۳ و ۱۴ آوریل ۲۰۱۷)

ناصر منصور درخشان^۱

بهلول علیجانی^۲

مجید آزادی^۳

مهری اکبری^۴

چکیده

اغلب بارش‌های شدید در عرض‌های میانی با جبهه‌ها همراه هستند. با توجه به استقرار ایران در این نواحی، شناسایی و بررسی جبهه‌ها بسیار ضروری می‌باشد. از طرفی مطالعات اقلیمی جبهه‌ها با استفاده از نتایج روش جبهه‌گذاری دستی که اغلب دارای نتایج متفاوتی نیز می‌باشد، بسیار زمان‌بر و پرهزینه بوده و عملاً غیر ممکن است. لذا در این تحقیق برای نخستین بار در داخل کشور به جبهه‌گذاری خودکار و عددی پرداخته شده است. ابتدا داده‌های منظم شبکه‌ای با وضوح 0.75×0.75 درجه شامل دما، ارتفاع ژئوپتانسیلی، رطوبت نسبی، باد مدار و نصف النهاری در ترازهای مناسب از مرکز ECMWF اخذ گردید. سپس به کمک برنامه نویسی کامپیوتری، تابع شناسایی جبهه، محاسبه و با تعیین آستانه‌های مناسب برای مقادیر گرادیان دمایی و پارامتر دمایی جبهه (TFP)، جبهه‌های سامانه چرخندی در تراز 700 hPa شناسایی و رسم شدند. در ادامه، جهت

۱- دانشجوی دکتری، گروه آب و هواشناسی سینوپتیک، دانشکده جغرافیا، دانشگاه خوارزمی، تهران

۲- استاد آب و هواشناسی سینوپتیک، دانشکده جغرافیا، دانشگاه خوارزمی، تهران (نویسنده مسئول)

Email: bralijani@yahoo.com-Tel: 09121304541

۳- دانشیار، گروه آب و هواشناسی سینوپتیک و دینامیکی، پژوهشکده هواشناسی، تهران

۴- استادیار، گروه آب و هواشناسی سینوپتیک، دانشکده جغرافیا، دانشگاه خوارزمی تهران

صحت سنجی جبهه‌های شناسایی شده، تابع جبهه زایی با استفاده از داده‌های مرکز داده NCEP/NCAR با وضوح شبکه‌ای $2/5 \times 2/5$ درجه و در همان تراز محاسبه و ترسیم گردید. بررسی و مقایسه جبهه‌های ماشینی با خروجی تابع جبهه زایی و تصاویر ماهواره، نشان دهنده صحت روش شناسایی عددی جبهه می‌باشد. مقایسه نتایج جبهه زایی در جبهه‌های سرد و گرم، نشان دهنده واداشت مقادیر مثبت بیشینه جبهه زایی توسط جبهه‌های سرد نسبت به جبهه‌های گرم می‌باشد. همچنین بررسی موقعیت جبهه‌های سرد و گرم در سامانه چرخندی نشان داد که این جبهه ها، اغلب در پایین دست ناوه و بالا دست پشته سطوح فوقانی یافت می‌شوند و در مواجهه با ارتفاعات غربی ایران پسروری نموده و تغییر شکل داده اند. نتایج نشان دهنده نقش بارزتر جبهه‌های سرد در شکل گیری و تحول سامانه چرخندی می‌باشند.

واژگان کلیدی: تابع شناسایی جبهه، TFP، آستانه، تابع جبهه زایی، جبهه سرد، سامانه چرخندی

مقدمه

جبهه‌ها به عنوان لایه‌های نازک یا نواحی ورقه‌ای غیر صلب با گرادیان دمای افقی خیلی زیاد می‌باشند (هیوسن^۱، ۱۹۹۸ : ۳۶). همچنین جبهه‌های هوا نواحی با گرادیان‌های بزرگ تاوایی، چگالی، رطوبت و پایداری‌ایستایی نیز شناخته می‌شوند که مقیاس طولی آنها یک مرتبه بزرگی از مقیاس عرضی بزرگتر است. به جبهه‌ای که دارای بیشینه تقویت در نزدیکی سطح زمین باشد، جبهه سطحی می‌گوییم. این نوع جبهه‌ها معمولاً با ابرناکی و بارش همراه بوده و از لحاظ حرکت توده‌های هوا نسبت به یکدیگر، به جبهه‌های سرد، گرم، ساکن و بند آمده تقسیم می‌گردند. ناحیه عرض جبهه، به عنوان منطقه کژفشاری شناخته می‌شود و در آن خطوط جبهه‌ای، دارای شدیدترین گرادیان دمایی می‌باشند که با زاویه‌ای بین خطوط فشار و دما مشخص می‌شوند. موقعیت یک جبهه در قسمت گرم گرادیان شدید دمایی در داخل منطقه انتقال حرارتی قرار دارد و شدت جبهه با اندازه گرادیان افقی یا شبه افقی دما تعیین می‌شود (رنارد و کلارک^۲، ۱۹۶۵ : ۷۶۵). اولین مطالعات صورت گرفته راجع

¹ Hewson

² Renard and Clarke

به جبهه ها، توسط برکنس و سولبرگ، در اوایل قرن بیستم، صورت گرفت. آنها با مطالعه جزئیات هوای سطح زمین و شبیه سازی جو، الگوی کلی چرخندهای عرضهای میانی را بدست آورده و نشان دادند که چرخندها شامل دو خط اصلی همگرایی بوده که در مرکز چرخند به هم می‌رسند (برکنس و سولبرگ^۱، ۱۹۹۲ : ۴). هاندلی و بوسارت با مطالعه اقلیمی جبهه‌های سرد از غرب تا شمال غرب کوه‌های آپالچین دریافتند که جبهه‌ها در برخورد با قله کوه پسروری نموده و سرعت آنها به صورت خطی و با شیب ملایم ۴۰٪ از ۶ سانتیمتر بر ثانیه به ۳-۴ سانتی متر بر ثانیه به سمت شمال کوه آلپ کاهش پیدا می‌کند. در حالی که سرعت این جبهه‌ها در قله‌های جنوبی آلپ، به ۹-۷ سانتیمتر در ثانیه می‌رسد (هاندلی و بوسارت^۲، ۱۹۹۶ : ۱۳۵۷). برای درک بهتر فرایندهایی مانند تغییر شکل جبهه ها، پسروری، جبهه زایی، جبهه زدایی، چرخندزایی لی و بارش‌های کوهستان، چندین آزمایش میدانی نیز صورت گرفته است که به عنوان مثال می‌توان به آزمایش آلپ توسط کوتتر و برنامه میان مقیاس آلپ توسط بوگولت و همکاران اشاره نمود. در این مطالعات به گسستگی و تغییر شکل جبهه‌ها در نواحی کوهستانی و تاثیر کوه در جبهه زایی و جبهه پرداخته شده است (کوتتر^۳، ۱۹۸۲ : ۱۲۴)، (بوگولت و همکاران^۴، ۲۰۰۱ : ۴۴۱). در چندین مطالعه نیز، بلاکینگ جبهه‌ها در نواحی کوهستانی، بصورت ایده ال مدلسازی و به بر همکنش بین جبهه و کوه پرداخته شد (کلجان^۵ و همکاران، ۲۰۰۱ : ۱۰۱)، (یوداین^۶، ۲۰۰۷ : ۹۱)، (ایگر و هوینکا^۷، ۱۹۹۲ : ۳۵). هوینکا نیز نشان داد که تقریباً ۵۰٪ بارش سالانه در نواحی آلپ اروپایی مربوط به جبهه‌ها می‌باشد و در مناطق کوهستانی، جبهه‌ها تمایل به پسروری، تغییر شکل، تقویت یا تضعیف دارند که می‌تواند منجر به بارندگی‌های سنگین محلی شوند (هوینکا، ۱۹۸۵ : ۵۶). در مطالعه‌ای دیگر هوینکا و والکرت با بررسی تغییرات سرعت جبهه‌ها در نواحی

¹ Bjerknæs and Solberg

² Handley and Bosart

³ Kuettner

⁴ Bougeault, et al.

⁵ Kljun

⁶ Yudin

⁷ Egger and Hoinka

کوهستانی، دریافتند که جبهه سرد در قسمت‌های شمالی آلپ با سرعت ملایم در حدود ۳ سانتیمتر بر ثانیه حرکت می‌کند. در حالی که در قسمت جنوبی آلپ سرعت آن به ۹ متر بر ثانیه می‌رسد. (هوینکا و والکرت^۱، ۱۹۹۲: ۵۷) بری و همکاران با تحلیل عینی جبهه‌های جوی در بازه زمانی (۱۹۸۹-۲۰۰۹) دریافتند که فرکانس جبهه‌ها در مسیر طوفان اطلس شمالی در حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد در طول دوره آماری کاهش می‌یابد (بری و همکاران^۲، ۲۰۱۱: ۲). در مطالعه‌ای دیگر، هاپ و همکاران نیز به کمک روش تحلیل عینی جبهه‌ها، به بررسی اقلیم شناختی جبهه‌ها در منطقه جنوب غرب و غرب استرالیا در بازه زمانی (۱۹۷۹-۲۰۰۶) پرداخته و نشان دادند که ۵۳ درصد بارش‌های شدید در این نواحی با جبهه‌ها همراه بوده است (هاپ و همکاران^۳، ۲۰۱۴: ۳۵۹).

در ترسیم دستی جبهه‌ها، حتی بهترین متخصصان همیدی نیز در خصوص موقعیت جبهه، نوع و شدت آنها با یکدیگر اختلاف نظر دارند و در نتیجه، جبهه‌های ترسیم شده توسط آنها بسیار متفاوت هستند (مک کان و ویستلر^۴، ۲۰۰۱: ۱۹۵). این در حالی است که جبهه‌گذاری ماشینی بر پایه روش‌های عددی بوده و هدف آن اجتناب از اعمال سلیقه افراد در جبهه‌گذاری دستی است (جنکتر و همکاران^۵، ۲۰۱۰: ۲). از مزایای جبهه‌گذاری ماشینی نسبت به جبهه‌گذاری دستی، سرعت بالا، امکان تعیین مقدار فراوانی، نحوه حرکت، و بازخورد جبهه‌ها با عوارض زمین می‌باشد. تاکنون روش‌های مختلفی برای جبهه‌گذاری ماشینی ابداع گردیده است. نخستین جبهه‌گذاری خودکار توسط رنارد و کلارک و با استفاده از روش‌های عددی صورت گرفته است (رنارد و کلارک، ۱۹۹۶: ۵۵۱). افراد دیگری نیز برای جبهه‌گذاری ماشینی الگوریتم تهیه نموده‌اند. آنها جبهه‌گذاری ماشینی را با استفاده از روش‌های عددی و به کمک مشتق اول و دوم پارامتر دمایی بر روی شبکه منظم با وضوح نسبتاً پایین در حدود ۱۰۰ کیلومتر انجام دادند (هوبر و همکاران^۶، ۱۹۸۱: ۲۵).

¹ Volkert

² Gareth Berry, et al.

³ Pandora Hope, et al.

⁴ McCannand Whistler

⁵ Jenkner, et al.

⁶ Huber, et al.

(استینکر^۱، ۱۹۹۲: ۹۴)، (هیوسن، ۱۹۹۸: ۴۶)، (جنکتر و همکاران^۲، ۲۰۱۰: ۵) و (پارفیت و همکاران^۳، ۲۰۱۷: ۳). در مطالعه‌ای دیگر، کاسپار با استفاده از پارامتر دمایی و تعیین نواحی آستانه‌ای، جبهه‌ها را به صورت خودکار ترسیم نموده و به تحلیل عینی جبهه‌ها در مرکز اروپا پرداخت (کاسپار^۴، ۲۰۰۳: ۶۳۲). در داخل کشور تاکنون راجع به جبهه گذاری خودکار و عددی مطالعه‌ای صورت نگرفته است. در یک مطالعه احمدی گیوی و میرزایی با بررسی جبهه زایی سطوح میانی و زبرین نشان دادند که جمله تاوایی مولفه چرخشی بردار جبهه زایی نقش غالب را در جبهه زایی سامانه‌های چرخندی داشته است (احمدی گیوی و میرزایی، ۱۳۸۵: ۱۲۹). اردکانی و همکاران با مطالعه و بررسی ارتباط بین فرایند جبهه زایی و بارش‌های جبهه‌ای در منطقه خراسان شمالی، مشاهده کردند که جبهه زایی، نقش عمده-ای در بارش‌های فرین‌این منطقه داشته است (اردکانی و همکاران، ۱۳۸۵: ۱). مسعودیان و جعفری با بررسی و مطالعه الگوهای فشاری سطح دریا نشان دادند که با ادغام جبهه قطبی و رود باد جنب حاره‌ای، شرایط برای بارش‌های سنگین در پهنه کم بارش شمالی ایران فراهم می‌شود (مسعودیان و جعفری، ۱۳۹۲: ۳۲۹). مطالعات علیجانی و کاویانی نشان داد که به دلیل گذار اندک هوای سرد شمال اقیانوس اطلس، فراوانی جبهه زایی در منطقه مدیترانه در حدود ۵۰ درصد می‌باشد، در حالی که این فراوانی در اقیانوس اطلس و قاره آمریکا، به حدود ۶۰ الی ۷۰ درصد افزایش می‌یابد. (علیجانی و کاویانی، ۱۳۸۶: ۲۸۹).

بیش از ۹۰ درصد بارش‌های شدید در عرض‌های جنب حاره‌ای همراه با جبهه می-باشند (کاتو^۵، ۲۰۱۳: ۹۷۲). لذا با توجه قرار گرفتن ایران در محدوده عرض‌های میانی، بررسی و شناسایی جبهه‌ها بسیار ضروری می‌باشد. از طرفی مطالعات اقلیمی جبهه‌ها با روش جبهه گذاری دستی بسیار زمان بر و پرهزینه بوده و عملاً غیر ممکن است. لذا در این

1 Steinacker

2 Jenkner, et al.

3 Parfitt, et al.

4 Kaspar

5 Catto

تحقیق برای نخستین بار در داخل کشور به جبهه گذاری خودکار و عددی پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

برای انجام این تحقیق از داده‌های شبکه‌ای باز تحلیل مرکز پیش بینی میان مدت اروپا و با وضوح شبکه‌ای 0.75×0.75 درجه طول و عرض جغرافیایی، شامل، دما، ارتفاع ژئوپتانسیلی، رطوبت نسبی، باد مداری و نصف النهاری در تراز مناسب استفاده شده است. در ادامه با استفاده از برنامه نویسی در محیط فرترن، کمیت‌های مورد نیاز از جمله دمای پتانسیل هم ارز (بولتون، ۱۹۸۰: ۵۵۲)، گرادیان افقی دما و پارامتر دمایی جبهه (TFP)^۱، در یک شبکه دکارتی منظم به ابعاد 69×69 محاسبه و سپس وارد مختصات طبیعی زمین، گردید. به دلیل ثابت ماندن دمای پتانسیلی در فرآیندهای بی دررو بر روی سطوح فشار ثابت، در محاسبه شدت جبهه‌ها از گرادیان افقی دمای پتانسیلی استفاده می‌شود. از سوی دمای پتانسیل هم ارز شامل رطوبت هوا و اثرات گرمای نهان نیز می‌باشد، لذا از این پارامتر برای شناسایی جبهه‌ها استفاده شده است که رنارد و کلارک (رنارد و کلارک، ۱۹۶۵: ۵۴۹) و جنکتر و همکاران (جنکتر و همکاران، ۲۰۱۰: ۵ و ۶) نیز از دمای پتانسیل هم ارز برای شناسایی جبهه‌ها استفاده نمودند.

در ادامه با استفاده از گرادیان افقی دمای پتانسیل هم ارز و یک تابع شناسایی، خطوط جبهه در ناحیه کژ فشاری شناسایی گردید.

$$|\nabla_T| > K \quad (1)$$

$$\left| \frac{\partial_T}{\partial x} \right| (-ABZ) > K_1, \quad K_{1min} = 0 \quad (2)$$

$$\nabla |\nabla_T| > K_2, \quad K_{2min} = 0 \quad (3)$$

$$TFP = -\nabla |\nabla_T| \cdot \frac{\nabla_z}{|\nabla_T|} > K_2 \quad (4)$$

¹ Termal front parameter

معادله (۱) و (۲) بیانگر گرادیان دمایی می باشند که بایستی از حداقل آستانه اول، بیشتر باشد. معادله (۳)، آهنگ گرادیان دمایی در ناحیه کُرفشاری می باشد که بایستی مقدار آن از حداقل آستانه دوم در منطقه جبهه ای، کمتر باشد. معادله (۴)، تابع شناسایی جبهه می باشد و توسط رنارد و کلارک (رنارد و کلارک، ۱۹۶۵: ۵۵۱) ابداع گردیده است. در چندین مطالعه نیز، از پارامتر TFP، برای شناسایی اتوماتیک جبهه ها استفاده شده است (زواتس^۱ و همکاران، ۱۹۸۷: ۲۳)، (جنکتر و همکاران، ۲۰۱۰: ۵). با توجه به این که منطقه جبهه ای در عرض جبهه واقع شده و چندین خطوط نسبتاً موازی، منطقه کُرفشاری را نمایش می دهند، لذا برای ترسیم خط جبهه، از چند آستانه برای حذف خطوط اضافی استفاده گردید و خطوط پربندی صفر پارامتر دمایی جبهه، به عنوان خطوط جبهه در نظر گرفته شد. جهت تفکیک جبهه سرد و گرم نیز معادله ۵ که توسط جنکتر و همکاران به کار گرفته شده، استفاده گردید (جنکتر و همکاران، ۲۰۱۰: ۶). طبق این معادله مقادیر مثبت، بیانگر جبهه سرد و مقادیر منفی نیز جبهه گرم را نشان می دهد. در این معادله، V باد افقی می می باشد.

$$V_f = V \cdot \frac{V(TFP)}{|V(TFP)|} \quad (5)$$

$$V_f > 0$$

جبهه سرد

$$V_f < 0$$

جبهه گرم

در ادامه، جهت صحت سنجی جبهه های شناسایی شده از تابع جبهه زایی استفاده شده است. در این تحقیق با استفاده از داده های بازتحلیل (NCEP/NCAR)^۲ شامل دما و رطوبت نسبی با قدرت تفکیک مکانی $2/5 \times 2/5$ درجه طول و عرض جغرافیایی، تابع جبهه زایی دو بعدی سباستین و مارتین طبق معادله ۶، محاسبه و ترسیم گردید که مقادیر مثبت تابع جبهه زایی، نشان دهنده جبهه زایی و مقادیر منفی آن، جبهه زدایی را واداشت می نماید (سباستین و مارتین^۳، ۱۹۹۹: ۱۲۷۲).

¹ Zwatz, et al.

² National Center for Environmental Prediction & National Center for Atmospheric Research

³ Sebastian and Martin

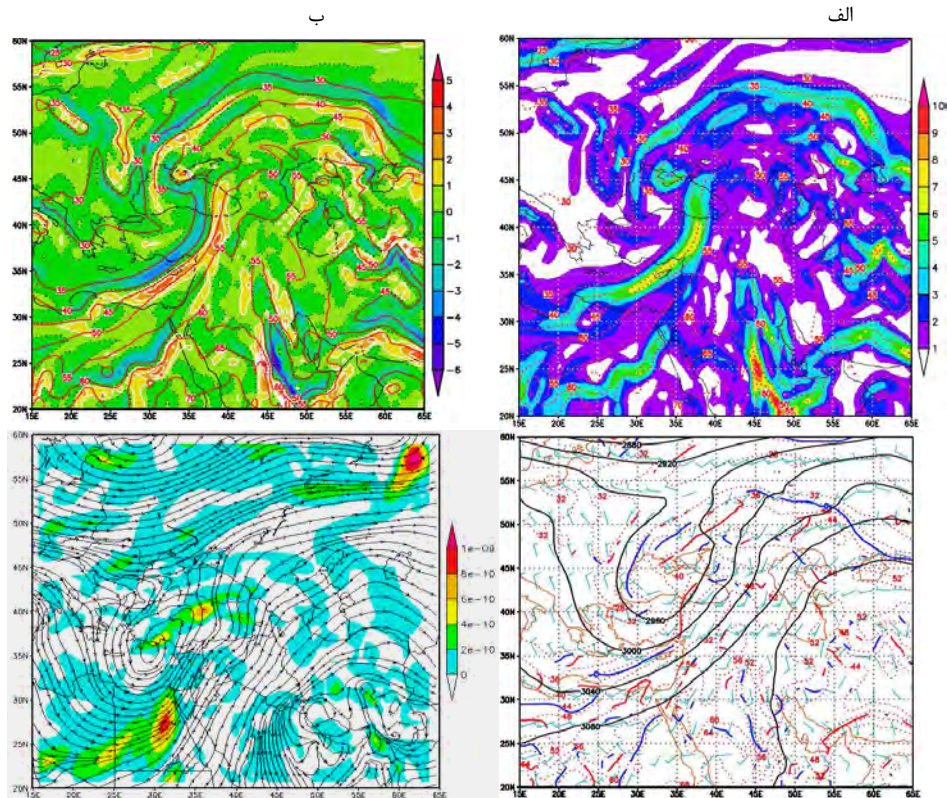
$$F = \frac{1}{|\nabla_H \theta|} \left\{ -\frac{\partial \theta}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) - \frac{\partial \theta}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) \right\} \quad (6)$$

یافته‌ها و بحث

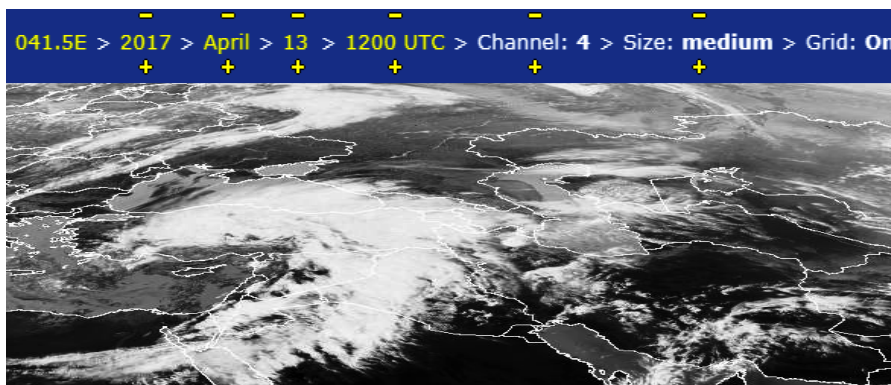
جهت بررسی نتایج روش جبهه‌گذاری خودکار، جبهه‌های سامانه چرخندی مستقر در شرق مدیترانه و غرب ایران که با بارش سنگین و منجر به سیل گسترده در منطقه شمال غرب نیز همراه بوده، در روزهای ۱۳ و ۱۴ آوریل ۲۰۱۷ با استفاده از روش‌های عددی شناسایی خودکار جبهه‌ها در مراحل مختلف تشکیل، تحول و میرایی جبهه، شناسایی و ترسیم گردید. با بررسی و مقایسه خروجی جبهه‌گذاری در ترازهای مختلف، سطح فشاری ۷۰۰hPa به عنوان تراز ارتفاعی مناسب برای شناسایی خودکار جبهه‌ها انتخاب گردید. بررسی گرادیان دمایی، نخستین گام شناسایی جبهه‌ها می‌باشد. مطابق شکل الف، در ساعت ۱۲:۰۰ UTC روز ۱۳ آوریل ۲۰۱۷ در مرحله تشکیل و تحول سامانه چرخندی مستقر در شرق مدیترانه و در تراز ۷۰۰hPa، خطوط هم‌دما با گرادیان شدید از ۲۰ تا ۴۰ درجه طول جغرافیایی و ۳۰ تا ۴۵ درجه عرض جغرافیایی کشیده شده‌اند. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، در طرفین ناحیه گرادیان شدید دمایی، خطوط هم‌دما پتانسیل هم‌ارز با اختلاف دمایی ۲۰ تا ۲۵ درجه سانتیگراد وجود دارند که با توجه به تعریف جبهه، محل تشکیل یک جبهه می‌باشد و با بررسی مقادیر مختلف گرادیان دمایی، آستانه مناسب $K_1 = 3^\circ\text{C}/(100\text{km})$ جهت شناسایی جبهه در این منطقه و در ارتفاع تقریبی ۳۰۰۰ متری تعیین گردید.

سپس جهت تعیین آستانه مناسب پارامتر دمایی جبهه، مقادیر مختلف آهنگ گرادیان دمایی مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ب، حداقل و حداکثر مقادیر پارامتر دمایی جبهه، نشان داده شده است. در این شکل، نواحی محصور به خطوط منقطع نازک سیاه، نشان‌دهنده حداقل آستانه پارامتر دمایی جبهه با آستانه $K_{2min} = 1^\circ\text{C}/(100\text{km}^2)$ می‌باشد که تقریباً در تمام منطقه مورد مطالعه مشاهده می‌شود. نتایج نشان‌دهنده این است که با افزایش مقادیر آستانه‌ای، خطوط جبهه‌ای پیوستگی بیشتر داشته و جبهه‌های واقعی‌تر شناسایی می‌شوند و برعکس با کاهش آستانه، خطوط ناپیوسته و جبهه‌های

غیر واقعی نشان داده می شوند. نواحی محدود به پربندهای ضخیم سفید، نواحی کژفشاری شدید، با حداکثر آستانه $(100km^2)/5^{\circ}C = K_{2max}$ می باشند که جبهه های واقعی و قویتری را در مرحله تشکیل و تحول سامانه چرخندی شناسایی می نمایند. در ادامه به بررسی جبهه های ماشینی شناسایی شده در سامانه چرخندی می پردازیم. مطابق شکل ۱ج، یک ناوه نسبتا عمیق از حدود عرض های ۶۰ درجه تا شمال دریای سرخ کشیده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می گردد، چرخش باد در محل ناوه در راستای شمال غرب-جنوب شرق و به صورت پادساعتگرد می باشد و نشان دهنده تشکیل یک چرخند نسبتا قوی بوده و وجود جبهه در شمال دریای مدیترانه و دریای سرخ و همچنین بر روی دریای سیاه را نشان می دهد. مطابق این شکل، چندین جبهه عددی در منطقه شناسایی شده است. یکی از جبهه های بارز شناسایی شده، بین عرض های جغرافیایی (۲۰-۳۵) شرقی و طول جغرافیایی (۱۵-۳۵) درجه شمالی و در شرق دریای مدیترانه مستقر شده است؛ جبهه سرد قابل توجه دیگر بر روی شمال دریای سرخ شناسایی شده و هر دو جبهه دقیقا در محل گرادیان شدید دمایی قرار گرفته اند که فرارفت هوای سرد در پشت جبهه سرد و فرارفت هوای گرم در جلوی جبهه، تطابق نسبتا خوبی با تعریف جبهه سرد دارد. اندکی جلوتر یک جبهه گرم بر روی شرق دریای سیاه، شناسایی و ترسیم شده است که یک جریان گرم و مرطوب منسجم، یا همان کمربند همگرایی مرطوب چرخندهای عرض های میانی، در پشت جبهه کاملا مشهود است. همان طور که شکل ۱د، نشان می دهد، در مرحله تشکیل جبهه، در پایین دست ناوه و در نواحی شمالی دریای مدیترانه و دریای سرخ، مقادیر جبهه زاپی مثبت بیشینه واداشت شده است که ناشی از فرا رفت تاوایی مثبت بوده و با محل جبهه سرد و گرم عددی شکل ۱ج، منطبق است و نشان دهنده آن است که جبهه در حال شکل گیری است. جهت بررسی بیشتر، جبهه های عددی شکل ۱الف، با تصاویر ماهواره داندی در کانال ۴ در محدوده طیف (3.48 - 4.36 μm) در مراحل مختلف تحول جبهه نیز مقایسه شده است. مطابق شکل ۲، جبهه های ماشینی، با چرخند گسترده و جبهه های آن در تصویر ماهواره ای انطباق خوبی را نشان می دهند.



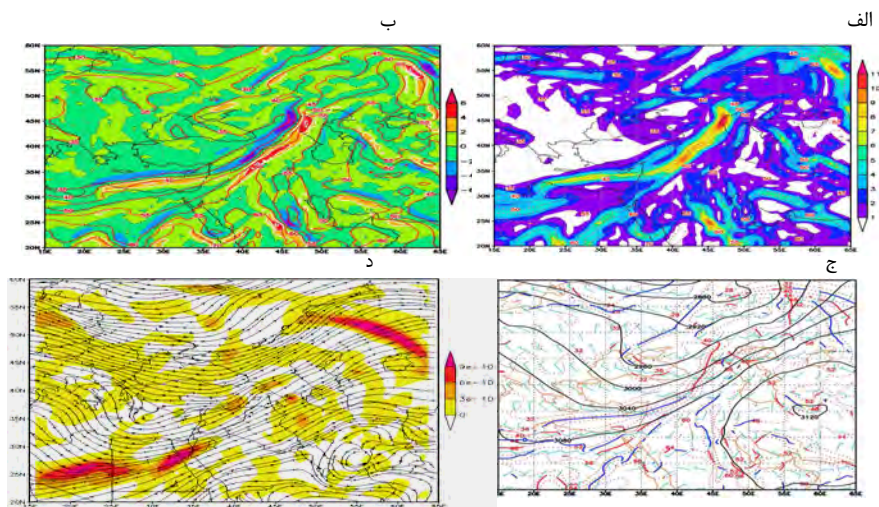
شکل ۱- الف) هاشور، گرادیان دمای پتانسیل با آستانه $(K_c = 3^{\circ}C / (100km))$ ، هاشور، آهنگ گرادیان دما، نواحی محصور به پربندهای خط چین سیاه نازک و (ضخیم سفید)، حداقل و (حداکثر) پارامتر دمایی جبهه، به ترتیب برای $(100km^2) / (K_{zmin} = 1^{\circ}C) / (100km^2, K_{zmax} = 5^{\circ}C)$ (ج) خطوط نایبسته ضخیم (آبی) و قرمز، (جبهه سرد) و جبهه گرم شناسایی شده در $TFP=0$ ، خطوط پربندی سیاه ارتفاع ژئوپتانسیلی با فاصله ۴ دکامتر و نمادهای آبی (سمت و سرعت باد) (د) پربندهای سیاه خطوط جریان، هاشور مقادیر تابع جبهه زایی بر حسب $Km^{-2} E^{-2}$ ، الف)، ب) و ج) پربندهای خط چین قرمز، دمای پتانسیل هم ارز با فاصله $5^{\circ}C$ ، در تراز $700 hPa$ ، ساعت $1200 UTC$ روز ۱۳ آوریل ۲۰۱۷.



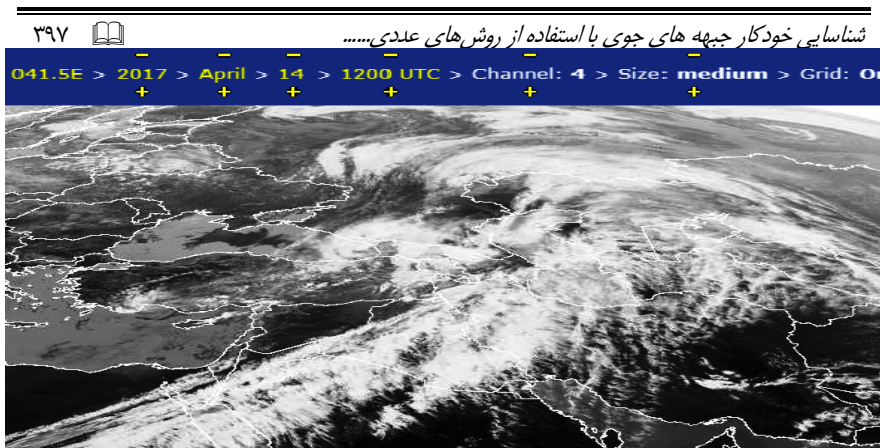
شکل ۲- تصویر ماهواره داندی در کانال ۴، مربوط به مرحله شکل گیری سامانه چرخندی و جبهه گسترده در ساعت UTC ۱۲۰۰ روز ۱۳ آوریل ۲۰۱۷.

مطابق شکل ۳ الف، در ساعت 1200 UTC روز ۱۴ آوریل، در مرحله اوج تقویت جبهه، نوار گردیان دمایی شدید، از شرق دریای خزر تا نواحی شرقی دریای مدیترانه و در راستای شمال شرق - جنوب غرب کشیده شده است. همان طور که در شکل مشاهده می شود، در مرحله تقویت سامانه چرخندی، خطوط هم دمای پتاسیلی فشرده تر شده و مقادیر گردیان دمایی نیز به شدت افزایش پیدا کرده است. به طوری که مقدار گردیان دمایی در نواحی شرقی دریای سیاه به $8^{\circ}\text{C}/(100\text{km})$ رسیده که نشان دهنده منطقه جبهه ای قوی می باشد. همچنین مطابق شکل ۳ ب، پربندهای ضخیم سفید که مقادیر بیشینه مثبت TFP، در منطقه جبهه های سرد و گرم مستقر در شرق مدیترانه و جنوب دریای سیاه را نشان می دهند به مقدار بیشینه $6^{\circ}\text{C}/(100\text{km}^2)$ در نواحی یاد شده افزایش پیدا کرده و مناطق کژفشاری شدید را واداشت می نمایند. مطابق شکل ۳ ج، جبهه های شناسایی شده نسبت به روز قبل گستردگی و شدت بیشتری پیدا کرده اند. از جمله جبهه سرد شناسایی شده در شرق مدیترانه است که در مقایسه با مرحله تشکیل چرخند، تقویت شده و اندکی به سمت شرق کشیده شده است و نواحی غرب و شمال غرب کشور تحت تاثیر جریانات صعودی و ناپایداری شدید جلو جبهه سرد قرار گرفته

است. جبهه دیگر، جبهه گرم مستقر در شرق دریای سیاه است که در اثر واداشت مقادیر بیشینه آهنگ گرادیان دمایی و تشدید جریانات جنوب به شمال در پشت جبهه و در داخل منطقه کمربند گرم مرطوب، تقویت شده است. در این مرحله، جبهه‌ها در حرکت به سمت شرق، در اثر برهم کنش با ارتفاعات غربی ایران، تغییر شکل پیدا و پسروی نموده و به سمت عرض‌های بالاتر جابجا شده‌اند. در شکل ۳، نیز خروجی تابع جبهه‌زایی در همین ساعت مقادیر جبهه‌زایی بسیار مثبتی را در محل جبهه‌های شناسایی شده و با شدت بیشتر در محل جبهه سرد مستقر در شمال دریای سرخ را نشان می‌دهد که انطباق نسبتاً خوبی با جبهه ماشینی دارد. تصویر ماهواره داندی در شکل ۴ نیز در این ساعت و مرحله تقویت جبهه، انطباق جبهه‌های مدل شده با چرخند گسترده و جبهه‌های آن را در منطقه به خوبی نشان می‌دهد. در این شکل، جبهه سرد به منطقه شمال غرب-ایران رسیده که با کاهش دما و بارش شدید در شمال غرب ایران، همراه است.



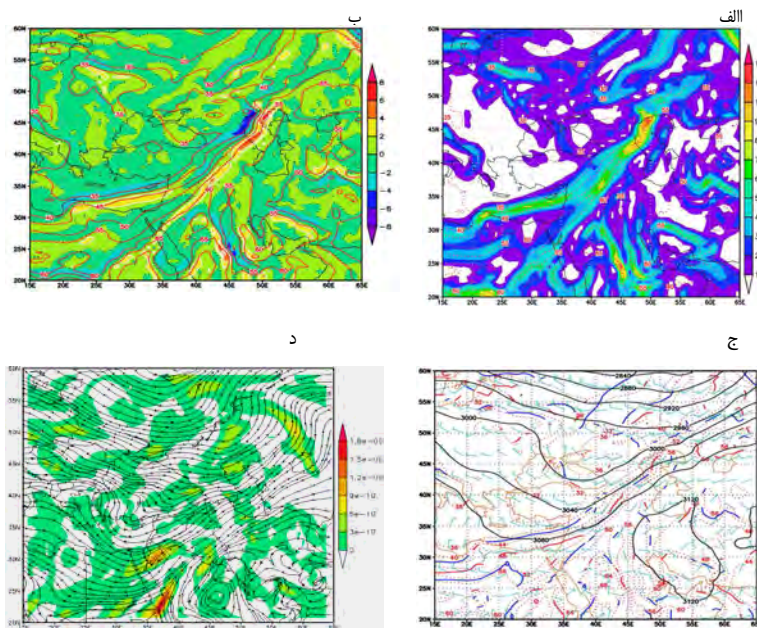
شکل (۳) مطابق شکل ۱، در مرحله تقویت سامانه چرخندی در ساعت UTC ۱۲۰۰ روز ۱۴ آوریل ۲۰۱۷.



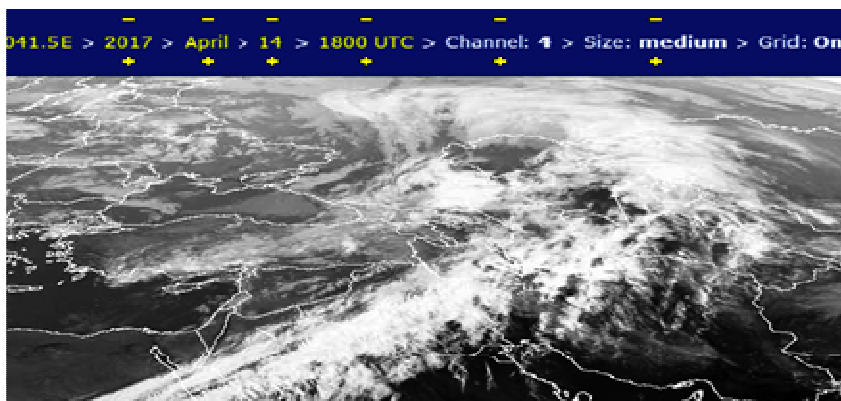
شکل (۴) مطابق شکل ۲ و تقویت سامانه چرخندی در ساعت UTC ۱۲۰۰ روز ۱۴ آوریل ۲۰۱۷.

نهایتاً در ساعت UTC ۱۸۰۰ روز ۱۴ آوریل ۲۰۱۸، مطابق شکل ۵الف، گرادیان خطوط هم دما بر روی ایران و شرق مدیترانه به شدت کاهش یافته و مقادیر گرادیان بالای دمایی به سمت عرض های بالاتر و شمال شرق دریای خزر جابجا شده اند. در شکل ۵ب، با تضعیف جبهه در منطقه و بین طولهای (۳۵-۴۵) و عرض های (۳۰-۴۰) درجه جغرافیایی، آهنگ گرادیان دمایی نیز به مقادیر حداقل و در حدود $100\text{km}^2 / \text{C}^{\circ}$ رسیده است و کژفشاری در محل جبهه های سرد و گرم شناسایی شده به ویژه در نواحی شرق مدیترانه و غرب ایران نسبت به ساعات قبل، به شدت کاهش یافته است. مطابق شکل ۵ج، مرکز پر ارتفاع گسترده ۳۱۲ دکامتری بر روی ایران گسترده شده است که نشان دهنده استقرار و اچرخند و شروع میرایی سامانه چرخندی در منطقه می باشد. در این شکل نیز چندین جبهه شناسایی شده است. از جبهه های بارز شناسایی شده در مرحله تضعیف سامانه چرخندی، جبهه سرد مستقر در شرق مدیترانه است که نسبت به مرحله قبل محدودتر و تضعیف شده و دو جبهه سرد نیز در عرض های پایین تر، یکی بر روی قسمت شمال شرقی دریای سرخ و دیگری در قسمت مرکزی دریای سرخ قرار گرفته است. جبهه گرم مستقر در شرق دریای سیاه نیز که در مرحله تقویت سامانه چرخندی بین عرض های (۴۰ تا ۵۰) درجه گسترده شده بود در این مرحله به شدت تضعیف شده و امتداد آن به حدود عرض ۴۰ درجه محدود شده است. از سویی با جایگزینی جبهه های سرد به جای جبهه گرم، جریانات جنوب به شمال تضعیف

شده و با فرارفت هوای سرد، جبهه گرم به تدریج در مرحله میرایی خود قرار گرفته است. مطابق شکل ۵د، جبهه سرد مستقر در شرق مدیترانه نیز تضعیف شده و مقادیر جبهه زایی اندکی را نسبت به جبهه سرد نسبتاً قوی مستقر در شمال دریای سرخ که دارای مقادیر مثبت بیشینه جبهه زایی است، واداشت نموده است. شکل ۶، تصویر ماهواره‌ای سامانه چرخندی در مرحله شروع میرایی جبهه را نشان می‌دهد، که با تضعیف چرخند، جبهه‌های آن در مرحله میرایی قرار گرفته است و منطقه شمال غرب در پشت جبهه سرد قرار گرفته و بارش‌ها به سمت نواحی شرقی ایران منتقل شده‌اند.



شکل (۵) مطابق شکل ۱، شروع میرایی سامانه چرخندی در ساعت UTC ۱۸:۰۰ روز ۱۴ آوریل ۲۰۱۷.



شکل (۶) مطابق شکل ۲ و شروع میرایی سامانه چرخندی در ساعت UTC ۱۸۰۰ روز ۱۴ آوریل ۲۰۱۷.

نتیجه گیری

با توجه به این که بسیاری از بارش های سنگین در عرض های جنب حاره ای، همراه با جبهه ها هستند و کشور ایران نیز در محدوده عرض های میانی گرفته، لذا مطالعه و بررسی جبهه های جوی در کشورمان بسیار حائز اهمیت است. جهت مطالعه جبهه ها به ویژه انجام مطالعات اقلیمی نیاز به ترسیم جبهه ها بر روی نقشه های همدیدی می باشد. اما در اغلب موارد، نتایج جبهه گذاری دستی، به علت تفاوت در روش های جبهه گذاری و تجربه افراد، بسیار متفاوت هستند. در خارج از کشور جهت اجتناب از اعمال سلیقه افراد و افزایش دقت و سرعت جبهه گذاری، این جبهه ها به صورت ماشینی تهیه و ترسیم می شوند. لذا جهت مرتفع نمودن این مشکلات و امکان تحلیل فضایی و مکانی جبهه ها با دقت بالا، برای نخستین بار در داخل کشور در این تحقیق جبهه گذاری خودکار با روش های عددی انجام گرفته است. بررسی نتایج جبهه گذاری ماشینی نشان داد که تشخیص جبهه ها در نزدیکی سطح زمین به علت برهمکنش بین لایه مرزی و جبهه ها، با خطای بسیار همراه بوده و عملاً جبهه ها قابل تشخیص نمی باشند. از طرفی در ترازهای بالاتر نیز جبهه های کم عمق در خروجی عددی شناسایی نمی شوند. لذا تراز مناسب برای شناسایی خودکار جبهه ها در منطقه مورد مطالعه،

تراز 70.0 hPa انتخاب گردید. از بررسی نتایج چنین استنباط می‌شود که جبهه‌های سرد و گرم، اغلب در پایین دست ناوه و بالا دست پشته سطوح فوقانی یافت می‌شوند و این جبهه‌ها در مرحله تشکیل، اغلب به صورت ناپیوسته بوده و به تدریج در طی مراحل تحول و تقویت جبهه، شکل منسجم تری پیدا می‌کنند. بررسی‌ها نشان دادند که جبهه‌های سرد نسبت به جبهه‌های گرم، جبهه‌های مثبت و قوی تری را واداشت می‌نمایند و در مراحل تشکیل، تقویت و میرایی چرخند، فراوانی بیشتری نسبت به جبهه‌های گرم داشته و بارزتر هستند. همچنین جبهه‌های گرم سامانه چرخندی عمر کوتاه تری نسبت به جبهه‌های سرد داشته و با حرکت به سمت عرض‌های بالاتر به شدت تضعیف می‌شوند. نتایج بررسی‌ها نشان دهنده تغییر شکل، ناپیوستگی و پسروی جبهه‌ها در برخورد با کوهستان می‌باشد، که با نتایج مطالعات هوینکا (۱۹۸۵: ۵۶) نیز همخوانی خوبی را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج این تحقیق، مقادیر آستانه‌ای مناسب برای شناسایی جبهه‌ها در ارتفاع تقریبی ۳ کیلومتری، به ترتیب برابر با $K_1 = 3^\circ\text{C} / (100\text{km})$ و $K_{2\text{max}} = 5^\circ\text{C} / (100\text{km}^2)$ تعیین گردید. همچنین خروجی جبهه‌های ماشینی نشان داد که TFP، پارامتر مناسبی برای شناسایی جبهه در این منطقه بوده و با نتایج مطالعات پیشین از جمله هیوسن (۱۹۹۸: ۴۹)، جنکتر و همکاران (۲۰۱۰: ۹)، نیز تطابق خوبی را نشان می‌دهند. نتایج حاصل از انجام این تحقیق می‌تواند در بحث اقلیم‌شناختی و پیش‌بینی جبهه‌ها به کار گرفته شود و می‌تواند در بحث مدیریت سیلاب ناشی از بارش‌های سنگین جبهه‌ای راهگشا باشد.

منابع

- احمدی گیوی، فرهنگ؛ میرزایی، محمد (۱۳۸۶)؛ بررسی دینامیکی جبهه زایی سطوح زبرین در سه سامانه چرخندی بر روی ایران و خاورمیانه، *فصلنامه فیزیک زمین و فضا*، شماره ۲، ۱۳۰-۱۱۵.
- اردکانی، حسین؛ زمانیان، محمد تقی؛ هاشمی دوین، مهری (۱۳۸۵)، بررسی کیفی و کمی جبهه زایی برای بیشینه بارش های جبهه ای با توجه به نظامهای همدیدی موثر بر روی منطقه خراسان، *دهمین کنفرانس دینامیک شاره ها*.
- علیجانی، بهلول و محمد رضا کاویانی (۱۳۸۶). *مبانی آب و هواشناسی*. انتشارات سمت، دانشگاه تهران، ۲۸۹-۲۸۲.
- مسعودیان، ابوالفضل؛ جعفری شندی، فاطمه (۱۳۹۲)؛ بررسی رابطه سامانه های همدیدی موثر در بارش های سنگین پهنه کم بارش شمالی ایران، *نشریه جغرافیا و برنامه ریزی*، شماره ۲، ۳۳۱-۳۰۵.
- Berry, G., Jakob, C., Reeder, M., Recent global trends in atmospheric fronts, *Geophysical Research Letter*, (2011), 38, 1-48.
- Bjerknes J, Solberg H. (1922). Life cycle of cyclones and the polar front
- theory of atmospheric circulation. *Geofysiske Publikationer* 3(1):1-18
- Bolton, D. (1980). The computation of equivalent potential temperature. *Mon. Wea. Rev* , 108, 1046-1053.
- Bougeault, P. P. (2001). The MAP Special Observing Period. *American Meteorological Society* , 82(3), 433-462.
- Catto, J. L., and S. Pfahl. (2013),. The importance of fronts for extreme precipitation. *J. Geophys. Res. Atmos* , 10, 791-801.
- Egger, J. and K. Hoinka. (1992). Fronts and orography. *Meteorol. Atmos. Phys* , 48, 3-36.
- Hewson, T. D. (1998). Objective fronts. *Meteorological Applications* , 5(1), 36-75.

- Hoinka, K. (1985). On Fronts in central Europe. *Beiträge zur Physik der Atmosphäre* , 58, 560–571.
- Hoinka, K., and H. Valkert.(1992). Fronts and the Alps: Findings from the front experiment. *Meteorology and Atmospheric Physics* , 48, 51–75
- Hope, P., Keay, K., Pook, M., Catto, J., Simmonds, I., Mills, G., Mcintosh, P., Risbey, J., and G., Berry. (2014). A Comparison of Automated Methods of Front Recognition for Climate Studies: A Case Study in Southwest Western Australia. *Monthly Weather Review*.,142, 343-363.
- Huber-Pock, F., and Kress, C. (1981), Contributions to the problem of numerical frontal analysis. *Proceedings of the Symposium on Current Problems of Weather-Prediction* , 253, 23–26.
- Jenkner, J., M. Sprenger, I. Schwenk, C. Schwierz, S. Dierer, and D. Leuenberger (2010), Detection and climatology of fronts in a high-resolution model reanalysis over the Alps. *Meteorol. Appl* , 17(1), 1–18.
- Ka.Par, M. (2003). Objective Frontal Analysis Techniques Applied To extreme/Non-Extreme Precipitation Events. *Geophys. Geod.* , 47, 605-631.
- Kljun N, S. M. (2001). Frontal modification and lee cyclogenesis in the Alps. *Meteorol Atmos. Phys* , 78, 89–105.
- Kuettner, J. P. (1982). An overview of ALPEX. *Ann. Meteor* , 19, 3–12.
- McCann, D. W., and J. P. Whistler (2001), Problems and solutions for drawing fronts objectively. *Meteorol Appl* , 8, 195–203.
- O’Handley C., and Bosart. L. (1996). The impact of the Appalachian mountains on cyclonic weather systems. *Monthly Weather Review* , 124, 1353–1373.
- Parfitt, R. A. Czaja., Seo, A. (2017). A simple diagnostic for the detection of atmospheric fronts. *Geophys. Res. Lett* , 44, 1-8.
- Renard, R. J., and L. C. Clarke (1965), Experiments in numerical objective frontal analysis. *Mon. Wea. Rev.* , 547–556. .

- Sebastian, O. and Martin .J. (1999). Piecewise Frontogenesis from a Potential Vorticity Perspective:Methodology and a Case Study. Mon. Wea. Rev. , 128, 1288-1266.
- Steinacker, R. (1992). Dynamical aspects of frontal analysis. Meteorology and Meteorology and Atmospheric Physics , 48, 93-103.
- Yudin, M. (2007). Orographic retardation of a cold atmospheric front. Atmosph., etc. , 11, 87-92.
- Zwatz., M. V. and G. Mahringer. (1987). Use of satellite imagery, combined with numerical Satellite and Radar Imagery Interpretatio. (pp. 20–24). England: Preprints for a Workshop.