

بررسی دینامیکی جبهه‌زایی سطوح زیرین در سه سامانه چرخندی روی ایران و خاورمیانه

فرهنگ احمدی گیوی^{۱*} و محمد میرزائی^۲

^۱ استادیار گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد هواشناسی، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۸۵/۶/۴، پذیرش نهایی: ۸۶/۶/۱۷)

چکیده

در این بررسی پدیده جبهه‌زایی سطوح میانی و زیرین برای سه سامانه چرخندی که خاورمیانه و ایران را تحت تأثیر قرار داده‌اند، بررسی شده است. برای این کار، مدل میان‌مقیاس MM5 (mesoscale model version 5) برای هر سه سامانه اجرا شده و با استفاده از برون‌داد مدل، شامل میدان‌های دما و باد، هر یک از جملات بردار جبهه‌زایی برای نقاط شبکه‌ای در سطوح فشاری متفاوت محاسبه شد. بردار جبهه‌زایی دارای دو مؤلفه چرخشی و نرده‌ای است که هر مؤلفه شامل جملات تغییر شکل، تاوایی و کج‌شدگی است.

نتایج بررسی جبهه‌زایی در سه سامانه نشان می‌دهد که علامت جملات مؤلفه نرده‌ای بردار جبهه‌زایی مورد به مورد می‌تواند تغییر کند. اثر دو جمله واگرایی و تغییر شکل مؤلفه نرده‌ای در دو سامانه ۱ و ۳ به‌صورت جبهه‌زایی و در سامانه ۲ به‌صورت جبهه‌زدایی است. جمله کج‌شدگی در سامانه‌های ۱ و ۳ به‌صورت جبهه‌زدایی و در سامانه ۲ به‌صورت جبهه‌زایی عمل می‌کند. از نظر مقایسه بزرگی جملات، جمله واگرایی در همه موارد در مقایسه با جملات دیگر کوچک‌تر است. این در حالی است که در سامانه‌های ۲ و ۳ جمله کج‌شدگی و در سامانه ۱ جمله تغییر شکل نقش غالب دارد.

برای مؤلفه چرخشی بردار جبهه‌زایی، در هر سه سامانه، دو جمله تغییر شکل و کج‌شدگی دارای مقادیر منفی و جمله تاوایی دارای مقادیر مثبت است. اندازه جمله تاوایی از دو جمله دیگر بزرگ‌تر است که علت اصلی آن چرخش چرخندی پربندهای دما و ایجاد فرارفت سرد است.

واژه‌های کلیدی: جبهه‌زایی سطوح زیرین، بردار جبهه‌زایی، تغییر شکل واگرایی، کج‌شدگی و تاوایی

۱ مقدمه

جبهه‌زایی در این منطقه، مطالعه‌ای در کشور صورت نگرفته و یا بسیار محدود بوده است. لذا این ضرورت ما را بر آن داشت تا در این بررسی به بررسی فرایند جبهه‌زایی در چند سامانه‌ای که ایران و خاورمیانه را تحت تأثیر قرار داده‌اند، بپردازیم.

مطالعات زیادی در مورد ساختار و دینامیک جبهه‌های سطوح زیرین صورت گرفته است. برخی از نتایج به‌دست آمده از مطالعات اولیه روی جبهه‌های سطوح زیرین (برای مثال رید و دنیلسن، ۱۹۵۹؛ استیلی، ۱۹۶۰؛ نیوتن و پرسن، ۱۹۶۲؛ دنیلسن، ۱۹۶۴؛ نیوتن،

بررسی نقشه‌های هم‌دید سطح زمین و سطوح فوقانی جو در سازمان هواشناسی کشور در زمان‌های متفاوت نشان می‌دهد که برخی از ناپایداری‌های جوی، عموماً همراه با بارش، در منطقه خاورمیانه و ایران تحت تأثیر سامانه‌های همراه با جبهه‌اند. از این‌رو بررسی دینامیکی این پدیده برای شناخت ساختار و امکان پیش‌بینی آنها حائز اهمیت ویژه است. گرچه بررسی‌هایی درباره جبهه‌زایی از دیدگاه هم‌دید در مناطق متفاوت ایران صورت گرفته است، ولی تا آنجا که اطلاع داریم در خصوص سازوکار جبهه‌زایی و بررسی کمی و کیفی عوامل مؤثر در

۱۹۶۵؛ بوسارت، ۱۹۷۰ و شاپیرو، ۱۹۷۰) بیانگر آن است که این نوع جبهه‌ها دارای عرضی باریک (حدود ۱۰۰ km) هستند، از وردایست به سمت پایین گسترش می‌یابند، اغلب با هوای پوش‌سپهر با مقادیر زیادی از تاوایی پتانسیلی و نسبت اختلاط اوزون همراه می‌شوند. همچنین این جبهه‌ها را به مناطق بیشینه سرعت باد نیز نسبت می‌دهند که در بعضی موارد با عنوان سامانه‌های جبهه-جت سطوح زبرین در نظر گرفته می‌شوند. شاپیرو (۱۹۸۱) مدلی مفهومی برای تحول سامانه جبهه-جت ورودسپهر زبرین در جریان هم‌شاری شمال غربی شامل چهار مرحله فشارورد هم ارز، فرارفت سرد، کم‌فشار بسته و فرارفت گرم ارائه کرد. البته این مدل نمی‌تواند به‌طور کامل و دقیق برای نشان دادن تحول جبهه به‌کار رود، برای مثال قادر به توجیه فرارفت سرد مشاهده شده در پایه ناوه نیست و تحول جبهه سطوح زبرین را فقط در جریان شمال غربی نشان می‌دهد. علت جبهه‌زایی قوی در جریان‌های شمال غربی در مطالعات مدل‌سازی صورت گرفته روی جبهه‌های سطوح زبرین واقعی (برای مثال شاپیرو، ۱۹۸۱؛ کیسر و پکنیک، ۱۹۸۵؛ کیسر و همکاران، ۱۹۸۸ و ریدر و کیسر، ۱۹۸۸) به این صورت بیان شد که هم‌شاری جریان در مقیاس هم‌دیدگی در ناحیه ورودی جت و فرارفت سرد در راستای طولی جبهه منجر به ایجاد گرادیان حرکت‌های قائم در عرض جبهه شده است، که موجب جبهه‌زایی می‌شود. روتنو و همکاران (۱۹۹۴) از اثر دو واداشت هم‌شاری و فرارفت سرد در جبهه‌زایی سطوح زبرین به عنوان اثر شاپیرو نام برده‌اند. با توجه به اشکالاتی که مدل شاپیرو داشت، شولتز و داسول (۱۹۹۹) با استفاده از مدل MM5 جبهه‌زایی در دو جریان شمال غربی و جنوب غربی را شبیه‌سازی کردند. نتایج این بررسی نشان داد که تحول از مرحله فشارورد هم ارز به مرحله فرارفت سرد در جریان جنوب غربی اتفاق می‌افتد و برخلاف مدل شاپیرو، برای جریان شمال غربی این مورد وجود ندارد.

نکته دیگر این که برای جبهه‌های جریان شمال غربی، فرارفت سرد در پایه ناوه دمایی متمرکز می‌شود. علاوه بر این، شولتز و داسول با استفاده از مؤلفه‌های بردار جبهه‌زایی (معادله آن در بخش بعدی آورده شده است) به بررسی جبهه‌زایی در دو جریان شمال غربی و جنوب غربی پرداخته و نشان دادند برای مؤلفه نرده‌ای بردار جبهه‌زایی در جریان‌های جنوب غربی و شمال غربی به ترتیب جملات تغییرشکل و کج‌شدگی غالب است و جمله تاوایی مؤلفه چرخشی بردار جبهه‌زایی در هر دو جریان دارای مقدار بیشینه است. شولتز و سندرز (۲۰۰۲) همچنین روشن ساختند که جملات تغییرشکل و کج‌شدگی مؤلفه نرده‌ای جبهه‌زایی به ترتیب در جریان‌های هم‌شاری و واشاری نقش غالب ایفا می‌کنند. از سوی دیگر، برای مؤلفه چرخشی، جمله تاوایی در جریان واشاری و هر دو جمله تاوایی و کج‌شدگی در جریان هم‌شاری مهم‌اند.

هدف از این تحقیق، بررسی دینامیکی چگونگی تحول جبهه سطوح زبرین و تعیین نقش هریک از جملات مؤلفه‌های بردار جبهه‌زایی برای سه سامانه چرخندی که در منطقه حد فاصل بین ایران و دریای مدیترانه قرار گرفته و بارندگی خوبی روی ایران داشته‌اند، است.

۲ مبانی نظری

بعد از معرفی تابع جبهه‌زایی از سوی پیترسن (۱۹۳۶) که فقط شامل آهنگ تغییرات زمانی اندازه گرادیان دمای پتانسیلی بود، کیسر و همکاران (۱۹۸۸) بردار جبهه‌زایی را ارائه کردند. این کمیت به‌صورت آهنگ تغییرات لاگرانژی گرادیان افقی دمای پتانسیلی (شامل اندازه و جهت گرادیان دما) است. در این بررسی، جریان به‌صورت دوبعدی در نظر گرفته شد. در ادامه، شولتز و داسول (۱۹۹۹) شکل کامل‌تری از بردار جبهه‌زایی در جریان سه‌بعدی را به‌صورت زیر ارائه کردند:

شده (۳) و (۴)، معادلات زیر به دست می‌آید:

$$F_n = \frac{1}{|\nabla_H \theta|} \left\{ \frac{\partial \theta}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial \theta}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial \theta}{\partial z} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) \right\} \quad (۸)$$

$$F_s = \frac{1}{|\nabla_H \theta|} \left\{ \frac{\partial \theta}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) - \frac{\partial \theta}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial \theta}{\partial z} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial \theta}{\partial x} - \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) \right\} \quad (۹)$$

روابط واگرایی (D)، تاوایی (ζ) و دو مؤلفه تغییر شکل کشیدگی (E_{st}) و برشی (E_{sh}) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \quad (۱۰)$$

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (۱۱)$$

$$E_{st} = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \quad (۱۲)$$

$$E_{sh} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \quad (۱۳)$$

با قرار دادن چهار رابطه فوق در معادلات (۸) و (۹)، به معادلات زیر می‌رسیم:

$$F_n = \frac{1}{2} |\nabla_H \theta| \left\{ D + 2 \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) |\nabla_H \theta|^{-2} E_{sh} + \left[\left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 - \left(\frac{\partial \theta}{\partial y} \right)^2 \right] |\nabla_H \theta|^{-2} E_{st} \right\} + \frac{1}{|\nabla_H \theta|} \left[\frac{\partial \theta}{\partial z} (\nabla_H w \cdot \nabla_H \theta) \right] \quad (۱۴)$$

$$F_s = \frac{1}{2} |\nabla_H \theta| \left\{ \zeta + 2 \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) |\nabla_H \theta|^{-2} E_{st} - \left[\left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 - \left(\frac{\partial \theta}{\partial y} \right)^2 \right] |\nabla_H \theta|^{-2} E_{sh} \right\} + \frac{1}{|\nabla_H \theta|} \left[\frac{\partial \theta}{\partial z} \hat{k} \cdot (\nabla_H w \times \nabla_H \theta) \right] \quad (۱۵)$$

$$\vec{F} = \frac{D}{Dt} \nabla_H \theta \quad (۱)$$

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z} \quad \text{و}$$

$$\nabla_H = \hat{i} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{j} \frac{\partial}{\partial y}$$

هم‌فشاری و در مختصات طبیعی ($\hat{s}, \hat{n}$) که محور s بر خطوط هم‌دما مماس است و محور n عمود بر محور s به طرف هوای سردتر است، به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\vec{F} = F_n \hat{n} + F_s \hat{s} \quad (۲)$$

که F_n مؤلفه نرده‌ای و F_s مؤلفه چرخشی بردار جبهه‌زایی نامیده شده و به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$F_n = - \frac{D}{Dt} |\nabla_H \theta| \quad (۳)$$

$$F_s = \hat{n} \cdot \left(\hat{k} \times \frac{D}{Dt} \nabla_H \theta \right) \quad (۴)$$

در اینجا F_n مثبت (منفی) جبهه‌زدایی (جبهه‌زایی) را نشان می‌دهد و مقدار مثبت (منفی) F_s بیانگر چرخش چرخندی (واچرخندی) خطوط هم‌دما نسبت به میدان جریان است. از طرفی معادله انرژی ترمودینامیکی برای جریان بی‌درروی سه‌بعدی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{D\theta}{Dt} = 0 \quad (۵)$$

اگر از معادله انرژی ترمودینامیکی نسبت به x, y مشتق بگیریم، از بسط دو رابطه خواهیم داشت:

$$\frac{D}{Dt} \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right) = - \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial y} - \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (۶)$$

$$\frac{D}{Dt} \left(\frac{\partial \theta}{\partial y} \right) = - \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial \theta}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial \theta}{\partial y} - \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (۷)$$

با جایگزینی معادلات (۶) و (۷) در معادلات بسط داده

پایین‌تری نسبت به دو سامانه دیگر حرکت می‌کند و رطوبت زیادی نیز از عرض‌های پایین دریافت می‌کند و بارش نسبتاً خوبی در نواحی مرکزی و جنوبی ایران به همراه داشته است.

پس از انتخاب این سه سامانه، برای بررسی فرایند جبهه‌زایی از مدل میان‌مقیاس MM5 استفاده شد و در اجرای مدل، تفکیک افقی برابر ۷۵ کیلومتر و تعداد تراز در راستای قائم مساوی ۲۳ در نظر گرفته شد. همچنین با توجه به تفکیک افقی انتخابی (۷۵ کیلومتر)، از طرح واره بتس و میلر (۱۹۹۳) برای پارامتری کردن حرکت‌های همرفتی استفاده شد. در ادامه با استفاده از داده‌های مرکز ملی پیش‌بینی محیطی (NCEP) (National Centers for Environmental Prediction) با تفکیک یک درجه در راستای طول و عرض جغرافیایی، مدل MM5 برای هر سامانه اجرا شد و به کمک میدان‌های باد و دمای ناشی از خروجی مدل، جملات مؤلفه‌های F_n و F_s (روابط ۱۴ و ۱۵) روی سطوح فشاری با تفاضل‌گیری متناهی مرتبه دوم در داخل حوزه و تفاضل‌گیری متناهی مرتبه اول روی مرزها به‌دست آمد. پس از محاسبه بردار جبهه‌زایی برای نقاط شبکه‌ای، نقشه‌های مربوط به هریک از جملات مؤلفه‌های نرده‌ای و چرخشی در تراز ۵۰۰ hPa ترسیم شد. گفتنی است که در این نقشه‌ها، مقادیر مثبت (منفی) مؤلفه نرده‌ای بردار جبهه‌زایی ($-F_n$) بیانگر جبهه‌زایی (جبهه‌زدایی) است و مقدار مثبت (منفی) مؤلفه چرخشی بردار جبهه‌زایی بیانگر چرخش چرخندی (واچرخندی) پربندهای دمای پتانسیلی نسبت به میدان ارتفاع ژئوپتانسیلی است. علاوه بر این، نقشه‌های کمیت‌های دیگر مانند تاوایی نسبی، فرارفت دما، سرعت قائم و دمای پتانسیلی نیز تهیه شد. از دمای پتانسیلی به‌مثابه کمیتی پایستار برای تعیین موقعیت جبهه سطوح زبرین استفاده شده است که گرادیان بزرگ این کمیت، مکان جبهه را مشخص می‌کند.

طبق رابطه (۱۴)، مؤلفه نرده‌ای جبهه‌زایی شامل سه جمله واگرایی، تغییر شکل و کج‌شدگی است. درحالی‌که رابطه (۱۵) که بیانگر مؤلفه چرخشی جبهه‌زایی است، شامل سه جمله تاوایی، تغییر شکل و کج‌شدگی است. شایان ذکر است که جملات تغییر شکل و کج‌شدگی در هر دو رابطه بالا وجود دارد، اما کاملاً با یکدیگر متفاوت است و نباید آنها را یکسان در نظر گرفت.

۳ داده‌ها و روش کار

برای به انجام رساندن این بررسی ابتدا همه سامانه‌های چرخندی بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ در منطقه بین دریای مدیترانه و ایران مورد بررسی اولیه قرار گرفت. سپس با در نظر گرفتن داده‌هایی که در اختیار بود، سه سامانه چرخندی که با ناوه عمیق در سطوح فوقانی همراه بودند، انتخاب شد. دلیل انتخاب این سه سامانه، منشأ متفاوت، مسیر حرکت گوناگون و بارش قابل توجه آنها روی ایران است. سامانه ۱ روی ناحیه شمالی دریای مدیترانه شکل می‌گیرد و ضمن حرکت به سمت شرق باعث بارش بسیار زیادی روی ایران شده است، به‌طوری‌که ضمن آن بارش سنگین برف در شمال ایران و در شهر رشت گزارش شده است. این سامانه در بازه زمانی ۲ تا ۵ فوریه ۲۰۰۵ (۱۴ تا ۱۷ بهمن ۱۳۸۳) در نواحی شمالی و شرقی دریای مدیترانه مورد بررسی قرار گرفته است. سامانه ۲ روی دریای سیاه تشکیل می‌شود و ضمن حرکت به سمت جنوب شرق، سبب بارندگی شدید در نواحی شمالی و مرکزی ایران شده است. این سامانه در بازه زمانی ۱۷ تا ۱۹ دسامبر ۲۰۰۴ (۲۷ تا ۲۹ آذر ۱۳۸۳) روی ایران بررسی شده است. سامانه ۳ نیز روی ناحیه جنوبی دریای مدیترانه و روی دریای سرخ شکل می‌گیرد که در بازه زمانی ۲۷ تا ۲۹ دسامبر ۲۰۰۴ (۷ تا ۹ دی ۱۳۸۳) منطبق بر ایران مورد بررسی قرار گرفته است. این سامانه در عرض‌های

۴ نتایج و تحلیل بررسی‌های صورت گرفته

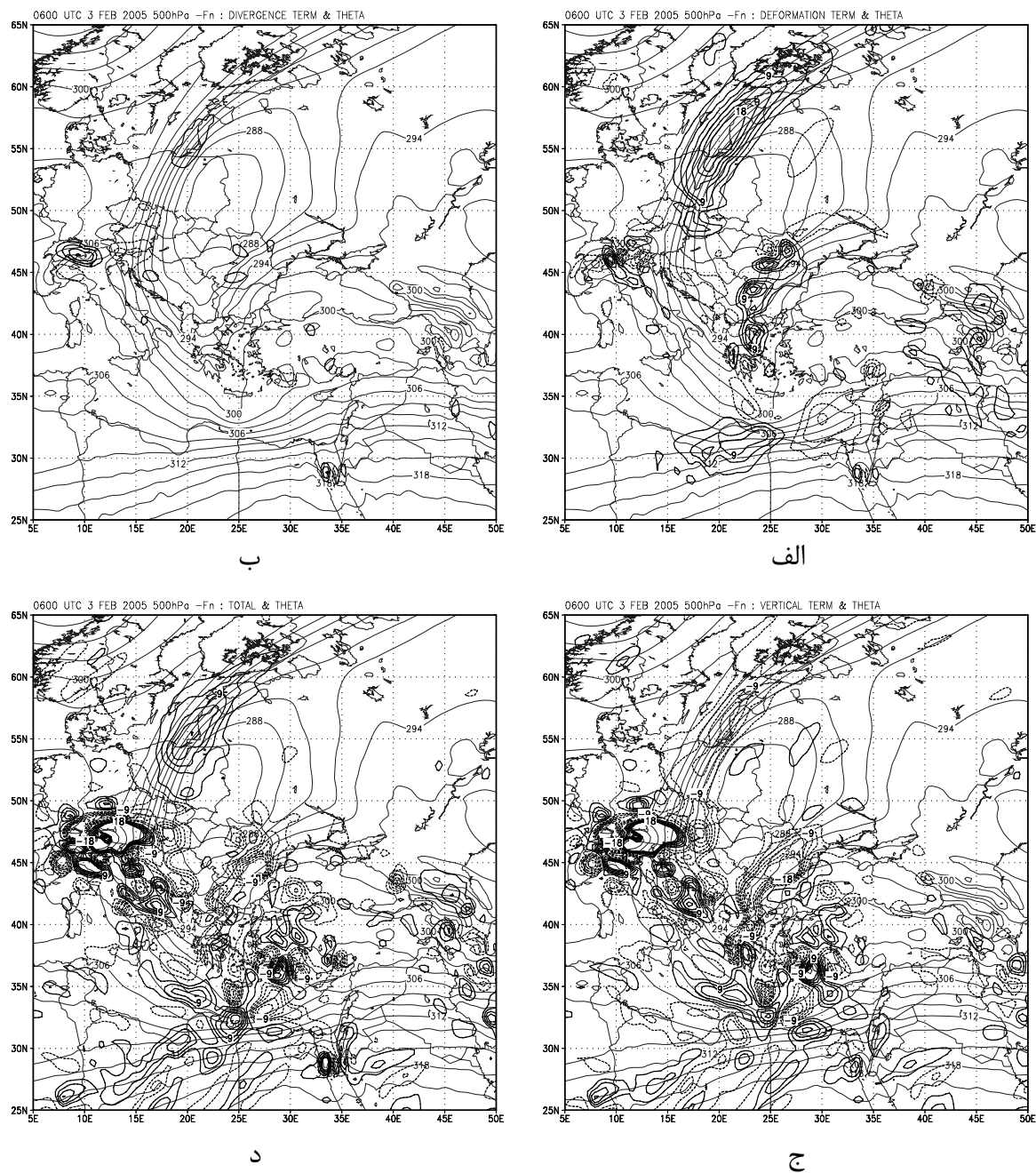
نقشه‌های مربوط به جملات مؤلفه نرده‌ای بردار جبهه‌زایی برای سامانه ۱ در شکل ۱ ترسیم شده است. مطابق این شکل، در پادجریان‌سوی ناوه دمایی مستقر در شمال اروپا، گرادیان دمایی پتانسیلی (جبهه) از عرض‌های بالا به سمت عرض‌های پایین‌تر امتداد یافته است. شکل ۱-الف، جبهه‌زایی حاصل از جمله تغییر شکل را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، این جمله در بالادست ناوه دمایی و در راستای طولی جبهه دارای علامت مثبت است و به‌صورت جبهه‌زایی عمل می‌کند. جمله واگرایی منطبق بر جبهه، نقش ضعیف اما مثبت در جبهه‌زایی دارد (شکل ۱-ب). همچنین جمله کج‌شدگی در سرتاسر طول جبهه، دارای علامت منفی است و موجب جبهه‌زدایی شده است (شکل ۱-ج). از مقایسه شکل‌های ۱-ج و ۷-الف می‌توان به انطباق حرکت‌های پایین‌روی (W منفی) ضعیف روی جبهه، به خصوص ناحیه سرد آن پی برد که تأییدی بر اثر جبهه‌زدایی جمله کج‌شدگی است. در شکل ۱-د، اثر مجموع جملات مؤلفه نرده‌ای ترسیم شده است که نقش غالب جمله تغییر شکل در جبهه‌زایی کل را نشان می‌دهد.

شکل ۲ چگونگی تغییرات جملات مؤلفه چرخشی بردار جبهه‌زایی برای سامانه ۱ را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۲-الف، جمله تغییر شکل در بالادست ناوه و در سرتاسر طول جبهه دارای علامت منفی است که منجر به چرخش واچرخندی پرندهای دمایی پتانسیلی می‌شود. از طرفی مطابق شکل ۲-ب، جمله تاوایی در طول جبهه علامتی مثبت دارد که پرندهای آن دقیقاً منطبق بر ناحیه تاوایی نسبی مثبت است (که در شکل به‌صورت سایه روشن مشخص شده است). این جمله نقش مهمی در چرخش چرخندی پرندهای دمایی پتانسیلی دارد و سبب ایجاد فرارفت سرد روی جبهه می‌شود که وجود فرارفت سرد منطبق بر محل جبهه در شکل ۸-الف این نتیجه را

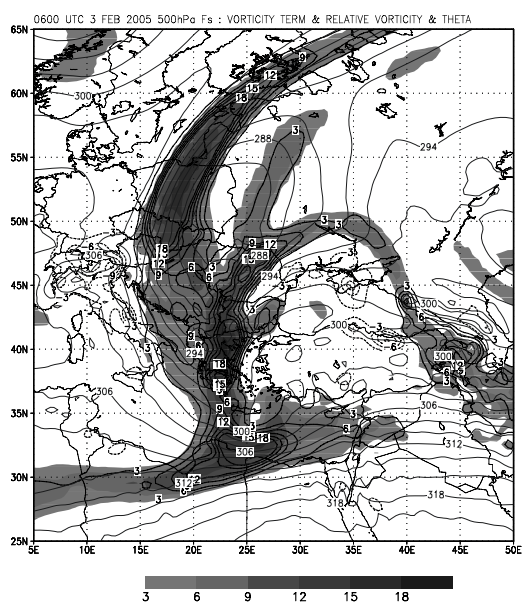
تأیید می‌کند. همچنین شکل ۲-ج نقش جمله کج‌شدگی در جبهه‌زایی چرخشی را نشان می‌دهد که حاکی از گسترش پرندهای این جمله با علامت منفی در طول جبهه است و سبب چرخش واچرخندی پرندهای دمایی پتانسیلی شده است. علاوه بر این، طبق شکل ۲-د جبهه‌زایی ناشی از مؤلفه چرخشی کل متأثر از جمله تاوایی است و نقش غالب این جمله را نشان می‌دهد.

تغییرات جملات مؤلفه نرده‌ای بردار جبهه‌زایی برای سامانه ۲ در شکل ۳ ترسیم شده است. با توجه به شکل ۳-الف، جمله تغییر شکل در بالادست و متمایل به پایه ناوه دمایی منطبق بر محل جبهه سبب جبهه‌زدایی می‌شود. جمله واگرایی در بالادست (پایه) ناوه دارای مقدار کوچک و منفی است (شکل ۳-ب). همچنین جمله کج‌شدگی در بخش وسیعی از طول جبهه دارای مقداری بزرگ و مثبت است که موجب جبهه‌زایی شده است (شکل ۳-ج). الگوی سرعت قائم در شکل ۷-ب، حرکت‌های پایین‌روی بزرگ بر روی جبهه به‌خصوص ضلع گرم آن را نشان می‌دهد که با اثر جبهه‌زایی جمله کج‌شدگی در شکل ۳-ج همخوانی دارد.

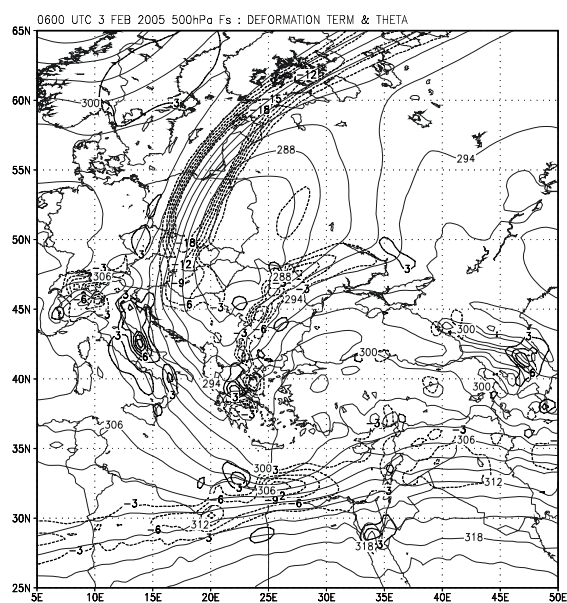
الگوی مؤلفه چرخشی جبهه‌زایی سامانه ۲ در شکل ۴ نشان می‌دهد که جمله تغییر شکل از بالادست تا پایه ناوه علامت منفی دارد و روی ضلع گرم جبهه به‌صورت ضعیف و با علامت مثبت گسترش یافته است (شکل ۴-الف). جمله تاوایی مطابق شکل ۴-ب، در سرتاسر طول جبهه از بالادست تا پایه ناوه و منطبق بر ناحیه تاوایی نسبی مثبت، به‌صورت مثبت ظاهر شده است. این در حالی است که جمله کج‌شدگی در پایه ناوه علامت منفی دارد (شکل ۴-ج). علاوه بر این موارد، اثر جمعی این سه جمله در جبهه‌زایی مؤلفه چرخشی در شکل ۴-د ترسیم شده که بیانگر نقش غالب جمله تاوایی است. برخلاف سامانه قبلی، در این مرحله از تحول جبهه با وجود چرخش چرخندی پرندهای دما در پایه ناوه از فرارفت سرد در این



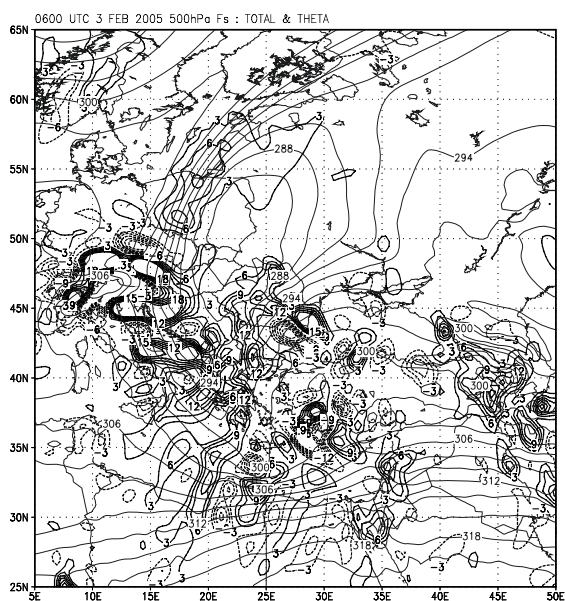
شکل ۱. خطوط هم‌دمای پتانسیلی (خطوط کم رنگ توپر با فاصله ۲ K) و جملات مؤلفه نرده‌ای بردار جبهه‌زایی (خطوط پرنرنگ توپر (خط‌چین) با فاصله $3 \times 10^{-1} \text{ Km}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (جبهه‌زایی) را نشان می‌دهد) در تراز ۵۰۰ hPa برای سامانه ۱ در ساعت ۰۶۰۰ UTC روز ۳ فوریه ۲۰۰۵ شامل (الف) جمله تغییر شکل (در بازه $20 \times 10^{-1} \text{ Km}^{-1} \text{ s}^{-1}$ تا -20)، (ب) جمله واگرایی (در بازه $12 \times 10^{-1} \text{ Km}^{-1} \text{ s}^{-1}$ تا -12)، (ج) جمله کج‌شدگی (در بازه $20 \times 10^{-1} \text{ Km}^{-1} \text{ s}^{-1}$ تا -20) و (د) مؤلفه جبهه‌زایی نرده‌ای کل ($-F_n$) (در بازه $20 \times 10^{-1} \text{ Km}^{-1} \text{ s}^{-1}$ تا -20).



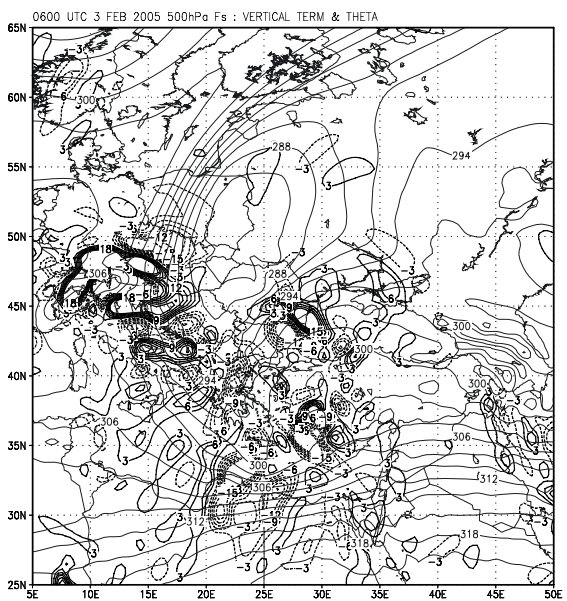
ب



الف

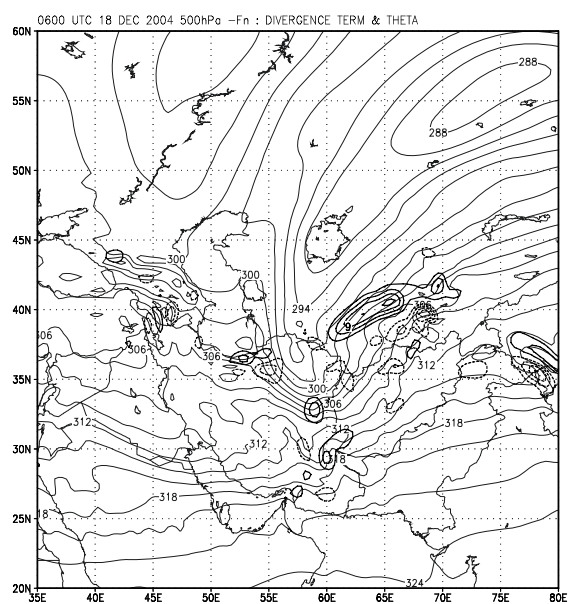


د

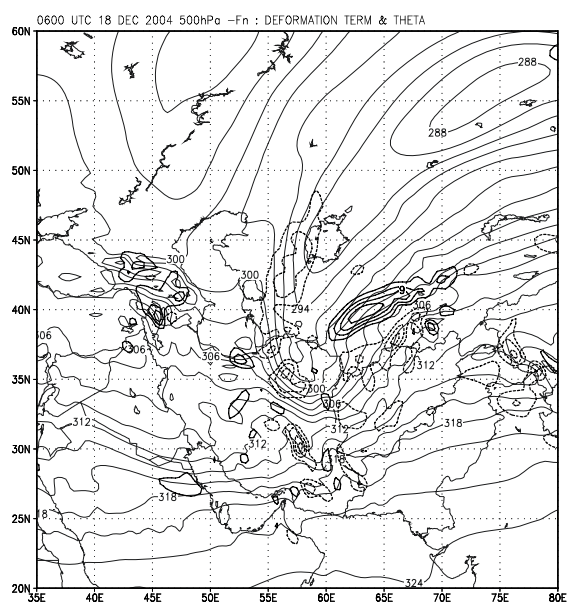


ج

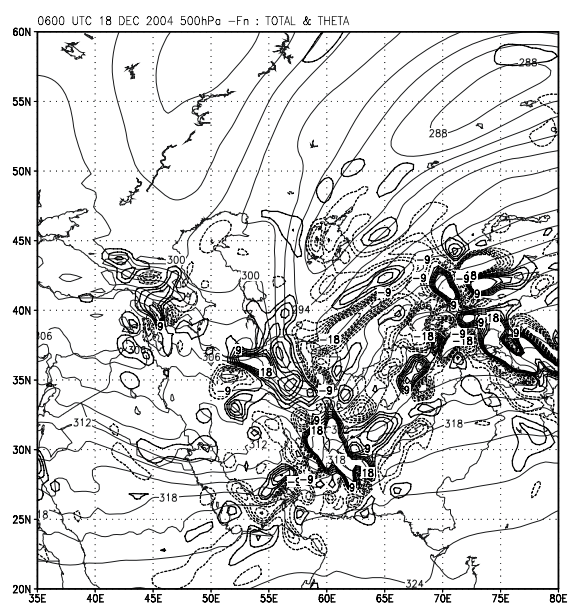
شکل ۲. خطوط هم‌دمای پتانسیلی (خطوط کم رنگ توپر با فاصله ۲ K) و جملات مؤلفه چرخشی بردار جبهه‌زایی (خطوط پررنگ توپر (خط‌چین) با فاصله $3 \times 10^{-10} \text{ Km}^{-1} \text{ s}^{-1}$ جبهه‌زایی چرخشی مثبت (منفی) را نشان می‌دهد) در تراز ۵۰۰ hPa برای سامانه ۱ در ساعت ۰۶۰۰ UTC روز ۳ فوریه ۲۰۰۵ شامل (الف) جمله تغییر شکل (در بازه $20 \times 10^{-10} \text{ Km}^{-1} \text{ s}^{-1}$ تا -20)، (ب) جمله تاوایی (در بازه $12 \times 10^{-10} \text{ Km}^{-1} \text{ s}^{-1}$ تا -12) همراه با تاوایی نسبی (به صورت سایه روشن با فاصله $3 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1}$)، (ج) جمله کج‌شدگی (در بازه $20 \times 10^{-10} \text{ Km}^{-1} \text{ s}^{-1}$ تا -20) و (د) مؤلفه جبهه‌زایی چرخشی کل (F_s) (در بازه $20 \times 10^{-10} \text{ Km}^{-1} \text{ s}^{-1}$ تا -20).



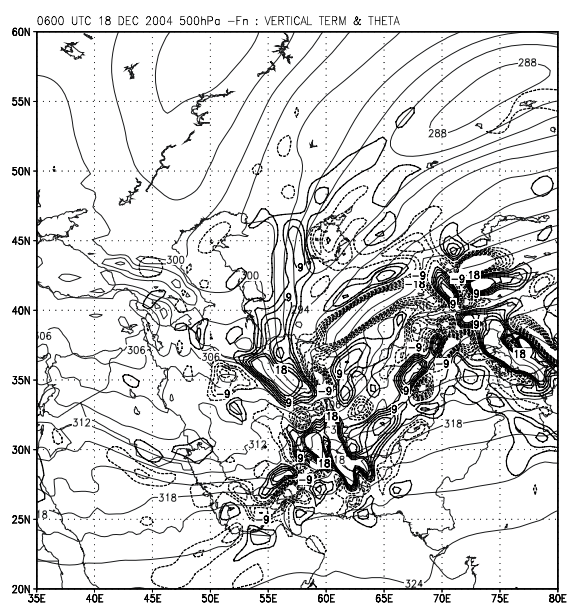
ب



الف

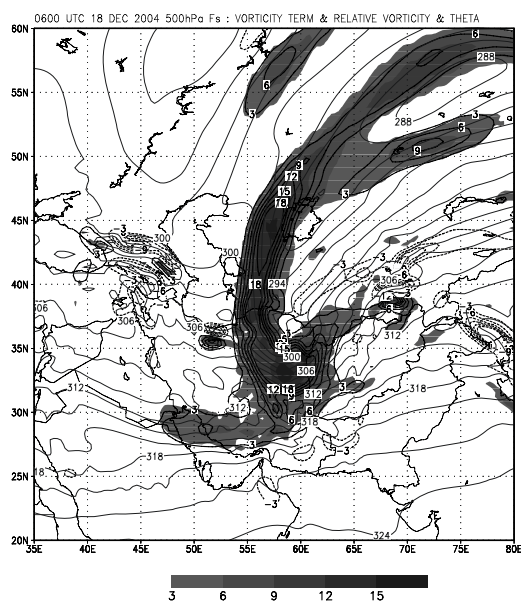


د

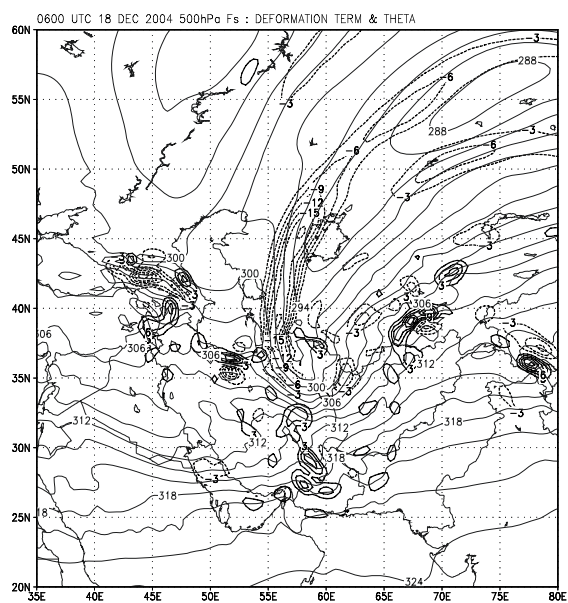


ج

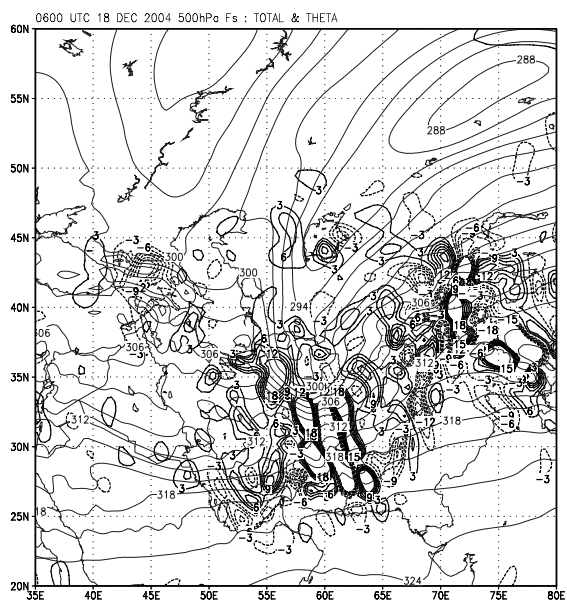
شکل ۳. مشابه شکل ۱ اما برای سامانه ۲ در ساعت ۰۶۰۰ UTC روز ۱۸ دسامبر ۲۰۰۴.



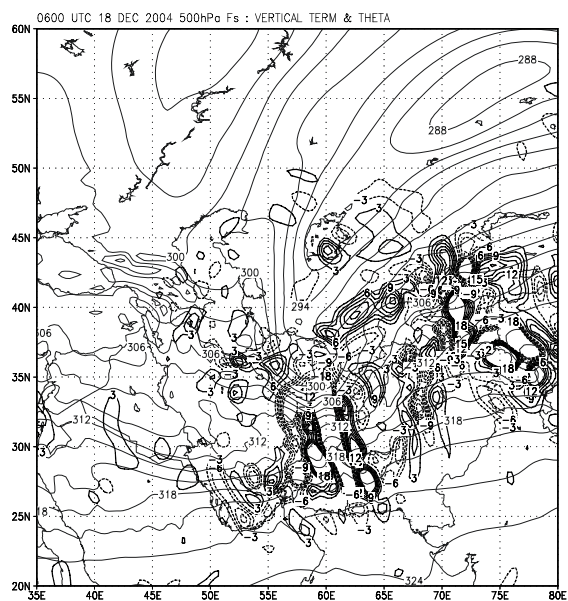
ب



الف



د



ج

شکل ۴. مشابه شکل ۲ اما برای سامانه ۲ در ساعت ۰۶۰۰ UTC روز ۱۸ دسامبر ۲۰۰۴.

ناحیه هیچ اثری دیده نمی‌شود (با مقایسه شکل‌های ۸-ب و ۴-د).

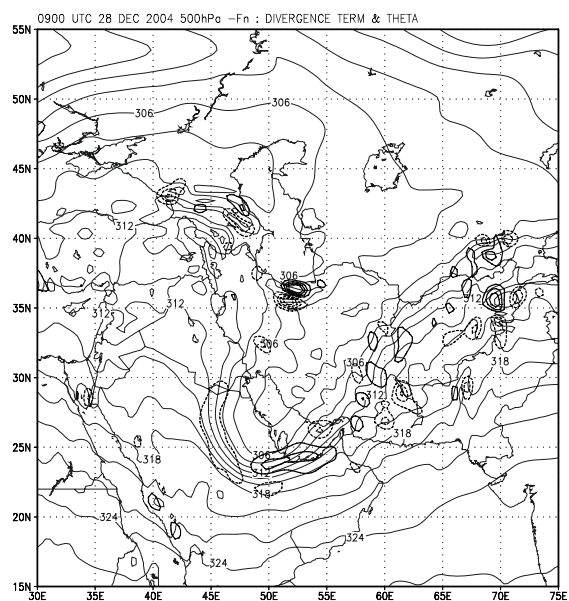
چگونگی تغییرات جملات مؤلفه نرده‌ای بردار جبهه‌زایی برای سامانه ۳ در شکل ۵ آورده شده است. طبق شکل ۵-الف، جمله تغییر شکل با علامت منفی در بالادست ناوه گسترش پیدا کرده و در پایه ناوه به صورت منفی ظاهر شده است. جمله واگرایی در بالادست (پایه) ناوه به صورت جبهه‌زدایی (جبهه‌زایی) عمل می‌کند (شکل ۵-ب). همچنین مطابق شکل ۵-ج، جمله کج‌شدگی در بالادست ناوه سبب جبهه‌زایی و در پایین دست و پایه ناوه باعث جبهه‌زدایی شده است. البته لازم به ذکر است که این جمله در ناحیه گرم جبهه واقع در پایه ناوه علامتی مثبت دارد که دلالت بر جبهه‌زایی با این جمله می‌کند. در این سامانه نیز با مقایسه شکل‌های ۵-ج و ۷-ج انطباق حرکت‌های نزولی روی ناحیه گسترش جبهه‌زایی ناشی از جمله کج‌شدگی در بالادست و پایه ناوه‌دمایی مشاهده می‌شود که می‌تواند علت اصلی غالب بودن این جمله بر جملات دیگر باشد. علاوه بر این، نقشه جبهه‌زایی ناشی از مؤلفه نرده‌ای کل در شکل ۵-د، نشان می‌دهد که جمله کج‌شدگی در سرتاسر طول جبهه، فارغ از نوع علامت آن، نقش اصلی و غالب ایفا می‌کند.

برای تحلیل الگوی مؤلفه چرخشی جبهه‌زایی سامانه ۳، نقشه هریک از جملات مؤلفه چرخشی در شکل ۶ تهیه شده است. پربندهای جمله تغییر شکل (شکل ۶-الف)، با علامت مثبت در پایه ناوه دیده می‌شود، درحالی‌که علامت این جمله در بالادست و پایین دست ناوه منفی است. از طرفی مطابق شکل ۶-ب، تاوایی نسبی مثبت بیشینه به‌طور فشرده در پایه ناوه قرار گرفته و اثر آن به‌صورت جبهه‌زایی چرخشی مثبت در جمله تاوایی نمایان شده است. جمله کج‌شدگی در پایه ناوه، با علامت منفی قابل مشاهده است (شکل ۶-ج). همچنین جبهه‌زایی چرخشی کل در شکل ۶-د، بر نقش غالب جمله تاوایی

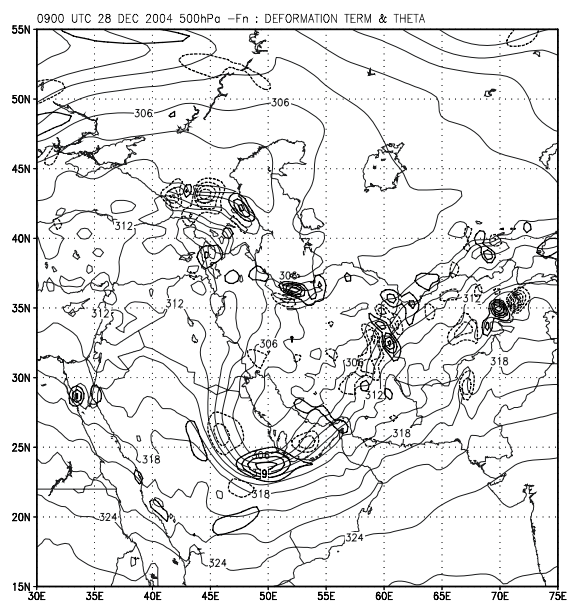
دلالت دارد. به علاوه، طبق شکل ۸-ج، گسترش فرارفت سرد منطبق بر جبهه بر نقش جبهه‌زایی چرخشی مثبت در ایجاد آن تأکید می‌کند.

۵ نتیجه‌گیری

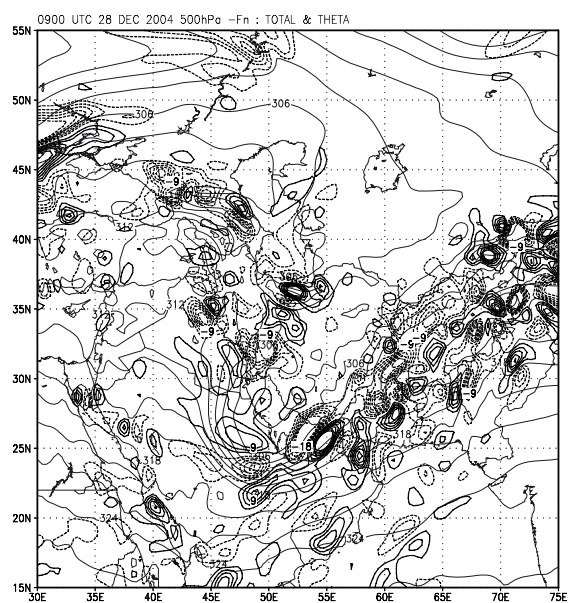
نتایج بررسی تحول جبهه‌های سه سامانه فوق نشان می‌دهد که در مؤلفه نرده‌ای بردار جبهه‌زایی، جمله واگرایی از دو جمله تغییر شکل و کج‌شدگی کوچک‌تر است. از آنجا که این بررسی‌ها در تراز ۵۰۰hPa صورت گرفته و مقدار واگرایی در این تراز ناچیز است (بلوشتاین، ۱۹۹۳؛ هلتنون، ۲۰۰۴)، بنابراین انتظار می‌رود جبهه‌زایی ناشی از جمله واگرایی کوچک باشد. در سامانه ۱، جهت جریان‌ها در دو طرف پربندهای دما (اثر تغییر شکل) به گونه‌ای است که سبب افزایش گرادیان دما و تقویت جبهه می‌شود. به این دلیل، جمله تغییر شکل در این سامانه نقش غالب در جبهه‌زایی نرده‌ای کل ایفا می‌کند. نتایج به‌دست آمده برای این سامانه از نظر اهمیت نسبی جملات بردار جبهه‌زایی، با نتایج شولتز و داسول (۱۹۹۹) برای جریان‌های جنوب غربی مشابه است. در سامانه ۲، حرکت‌های پایین‌روی منطبق بر محل جبهه، به‌خصوص در ناحیه گرم آن، ممکن است علت غالب بودن جمله کج‌شدگی در مؤلفه نرده‌ای جبهه‌زایی باشد. همچنین جمله کج‌شدگی در بیشتر طول جبهه در سامانه ۳ دارای علامت منفی است، ولی در ناحیه گرم جبهه، علامت آن مثبت است. این جمله اثر غالب در مؤلفه نرده‌ای جبهه‌زایی کل دارد. نتایج به‌دست آمده برای سامانه‌های ۲ و ۳ (به جز علامت جمله کج‌شدگی در سامانه ۳) با نتایج شولتز و داسول (۱۹۹۹) در جریان‌های شمال غربی هم‌خوانی دارد. از سوی دیگر، در هر سه سامانه، جمله تاوایی نقش غالب در مؤلفه چرخشی بردار جبهه‌زایی ایفا می‌کند که با آنچه شولتز و داسول (۱۹۹۹) برای این مؤلفه به‌دست آورده‌اند، مشابه است. همچنین مقدار بزرگ و مثبت جمله تاوایی



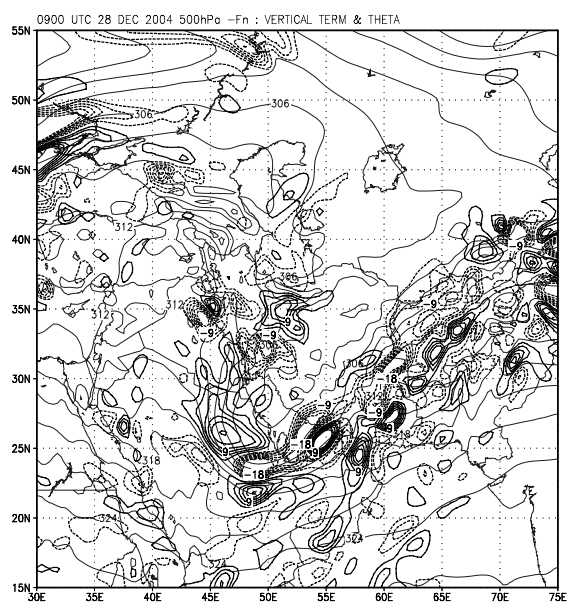
ب



الف

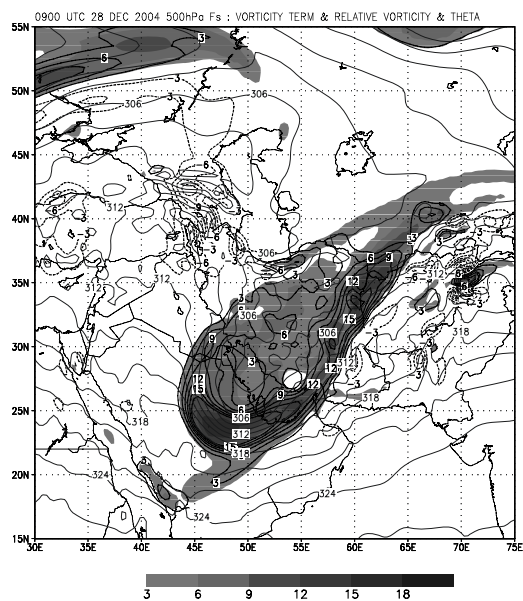


د

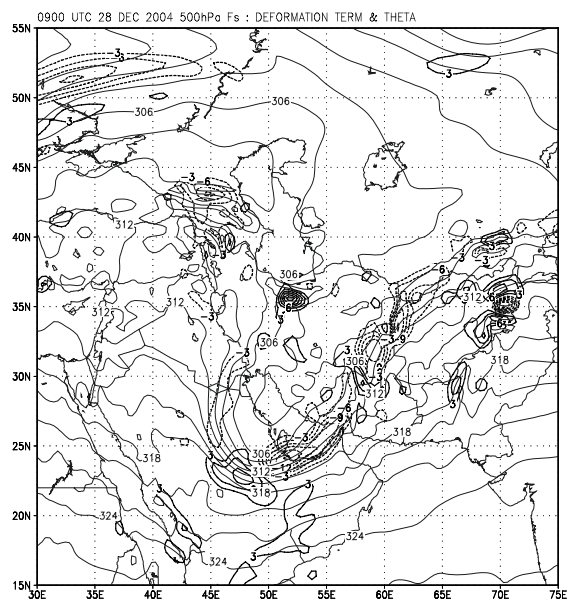


ج

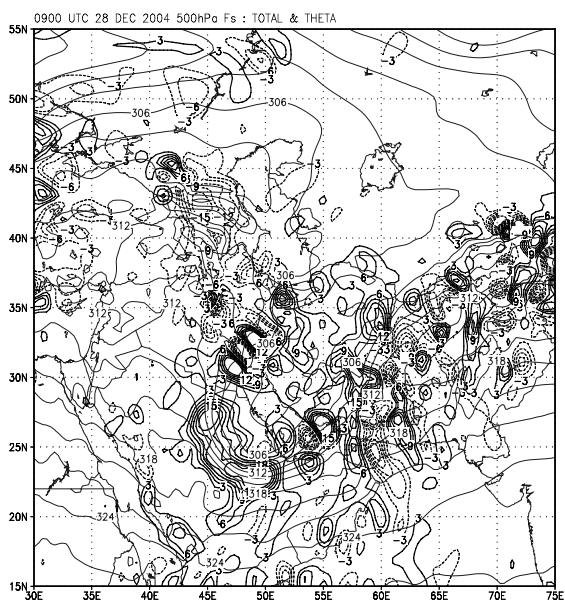
شکل ۵. مشابه شکل ۱ اما برای سامانه ۳ در ساعت ۰۹۰۰ UTC روز ۲۸ دسامبر ۲۰۰۴.



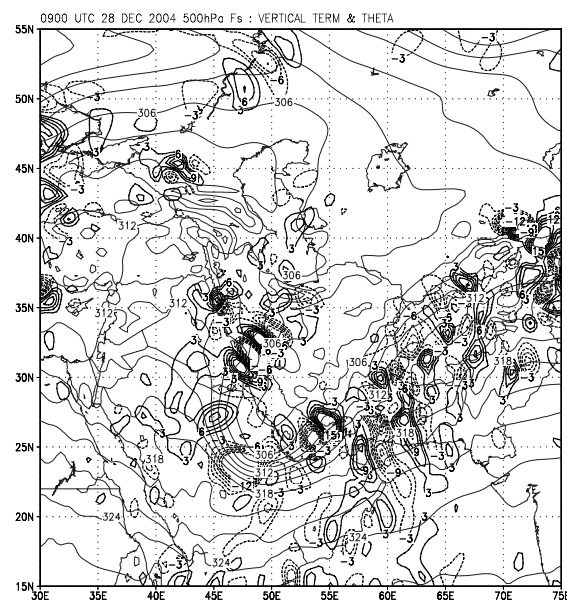
ب



الف

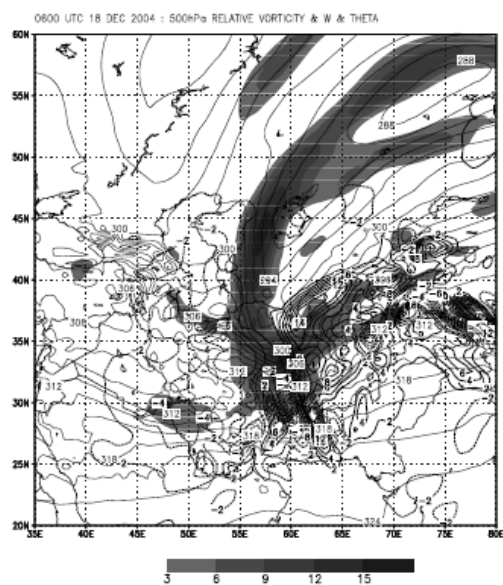


د

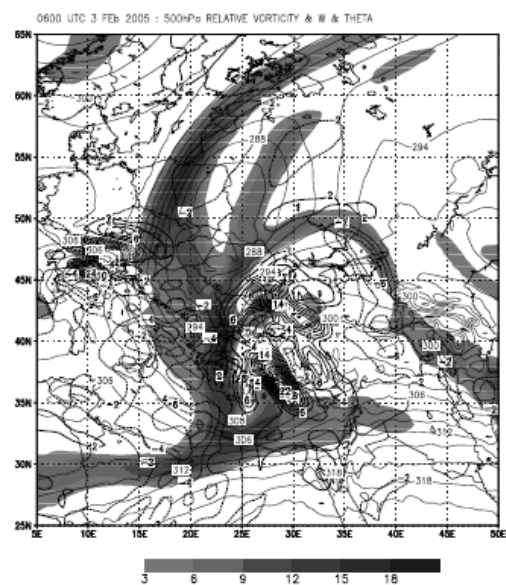


ج

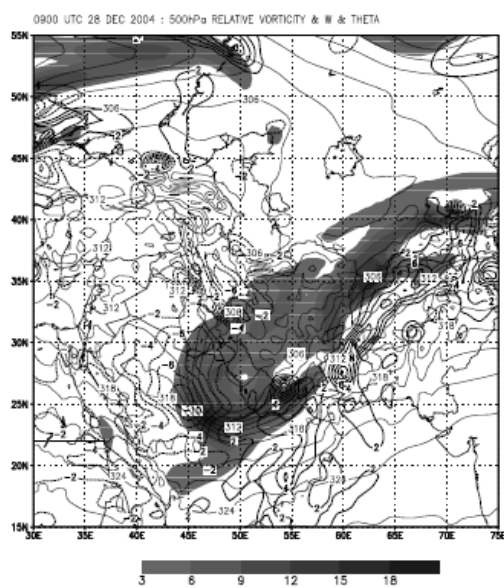
شکل ۶. مشابه شکل ۲ اما برای سامانه ۳ در ساعت ۰۹۰۰ UTC روز ۲۸ دسامبر ۲۰۰۴.



ب

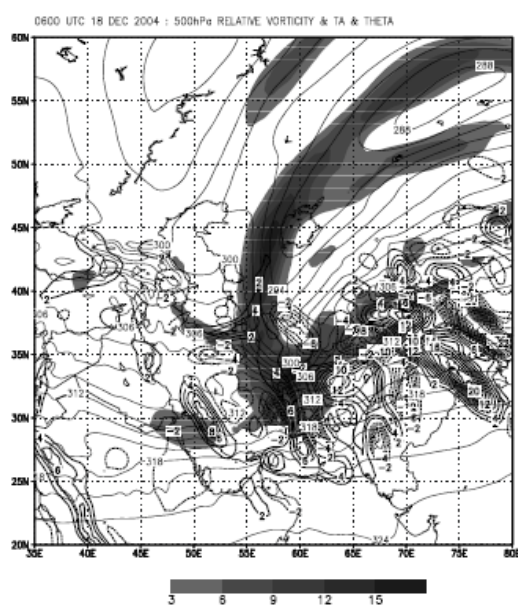


الف

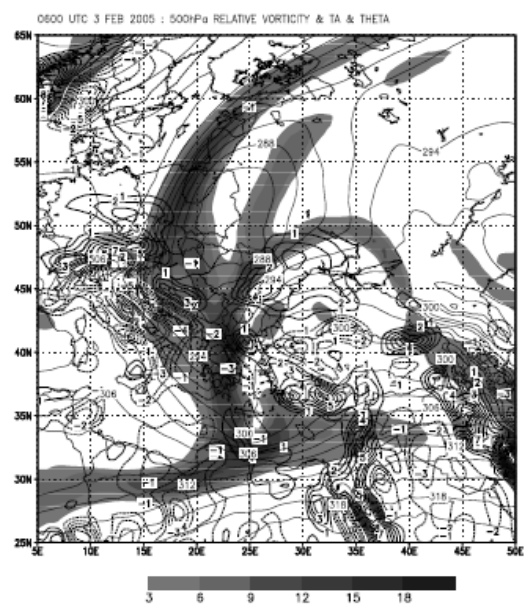


ج

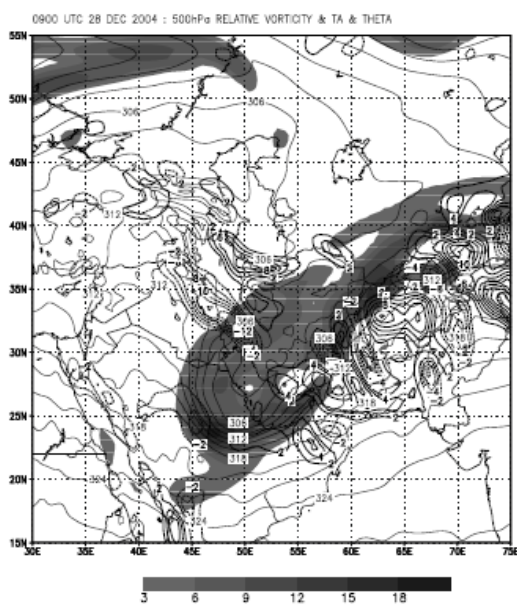
شکل ۷. خطوط هم‌دمای پتانسیلی (خطوط کم رنگ توپر با فاصله ۲ K)، تاوایی نسبی (به صورت سایه روشن با فاصله $3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) و سرعت قائم (خطوط پررنگ توپر (خط‌چین) با فاصله 0.2 ms^{-1} که حرکت‌های صعودی (نزولی) را نشان می‌دهد) در تراز ۵۰۰hPa برای سامانه ۱ در ساعت (الف) ۰۶۰۰ UTC روز ۳ فوریه ۲۰۰۵، (ب) ۰۶۰۰ UTC روز ۱۸ دسامبر ۲۰۰۴ و (ج) ۰۹۰۰ UTC روز ۲۸ دسامبر ۲۰۰۴.



ب



الف



ج

شکل ۸. خطوط هم‌دمای پتانسیلی (خطوط کم رنگ توپر با فاصله ۲ K)، تاوایی نسبی (به‌صورت سایه روشن با فاصله $10^{-4} \text{ s}^{-1} \times 3$) و فرارفت دما (خطوط پررنگ توپر (خطچین) با فاصله $10^{-3} \text{ K s}^{-1} \times 1$ که فرارفت گرم (سرد) را نشان می‌دهد) در تراز ۵۰۰hPa برای سامانه ۱ در ساعت (الف) UTC ۰۶۰۰ روز ۳ فوریه ۲۰۰۵، (ب) UTC ۰۶۰۰ روز ۱۸ دسامبر ۲۰۰۴ و (ج) UTC ۰۹۰۰ روز ۲۸ دسامبر ۲۰۰۴.

علامت این جملات در سامانه‌های ۱ و ۳ مشابه یکدیگرند. از نظر مقایسه بزرگی جملات، جمله واگرایی در همه موارد در مقایسه با جملات دیگر کوچک‌تر است. حال آن که در سامانه‌های ۲ و ۳ جمله کج‌شدگی و در سامانه ۱ جمله تغییر شکل نقش غالب دارد. از سوی دیگر، در جدول ۱ دیده می‌شود که علامت هر سه جمله مؤلفه چرخشی بردار جبهه‌زایی در سه سامانه، مشابه یکدیگر است و در همه موارد، جمله تاوایی نقش غالب دارد.

مؤلفه چرخشی بردار جبهه‌زایی در سرتاسر طول جبهه سبب چرخش چرخندی پرندهای دما نسبت به میدان جریان می‌شود و در نتیجه فرارفت سرد ایجاد می‌کند. خلاصه نتایج چگونگی تغییرات مقدار و علامت جملات مؤلفه‌های بردار جبهه‌زایی برای این سه سامانه در مراحل متفاوت تحول جبهه در جدول ۱ آورده شده است. با توجه به این جدول مشاهده می‌شود که علامت جملات مؤلفه نرده‌ای بردار جبهه‌زایی مورد به مورد تغییر می‌کند و

جدول ۱. چگونگی تغییرات مقدار و علامت جملات مؤلفه‌های بردار جبهه‌زایی برای سه سامانه مورد بررسی در مراحل متفاوت تحول جبهه.

	مؤلفه نرده‌ای (F_n)			مؤلفه چرخشی (F_s)		
	تغییر شکل	واگرایی	کج‌شدگی	تغییر شکل	تاوایی	کج‌شدگی
سامانه ۱	بسیار بزرگ	کوچک	بزرگ	بزرگ	بسیار بزرگ	کوچک
سامانه ۲	بزرگ	کوچک	بسیار بزرگ	کوچک	بسیار بزرگ	بزرگ
سامانه ۳	کوچک	کوچک	بسیار بزرگ	کوچک	بسیار بزرگ	بزرگ

منابع

- vertical motion. Mon. Wea. Rev., **116**, 762-780.
- Keyser, D., and Pecnick, M. J., 1985, A two-dimensional primitive equation model of frontogenesis forced by confluence and horizontal shear. J. Atmos. Sci., **42**, 1259-1282.
- Keyser, D., and Shapiro, M. A., 1986, A review of the structure and dynamics of upper-level frontal zones. Mon. Wea. Rev., **114**, 452-499.
- Newton, C. W., 1965, Variations in structure of subtropical current system accompanying a deep polar outbreak. Mon. Wea. Rev., **93**, 101-110.
- Newton, C. W., and Persson, A. V., 1962, Structural characteristics of the subtropical jet stream and certain lower-stratospheric wind systems. Tellus, **14**, 221-241.
- Petterssen, S., 1936, Contribution to the theory of frontogenesis. Geophys. Publ., **11(6)**, 127.
- Betts, A. K., and Miller, M. J., 1993, The Betts-Miller scheme. Chapter in the representation of cumulus convection in numerical models of the atmosphere. Eds. K. A. Emanuel and D. J. Raymond. American Meteorological Society.
- Bluestein, H. B., 1993, Synoptic-Dynamic Meteorology Midlatitudes. Oxford University Press, 594 pp.
- Bosart, L. F., 1970, Mid-tropospheric frontogenesis. Q. J. Roy. Meteor. Soc., **96**, 442-471.
- Danielsen, E. F., 1964, Project Springfield report. DASA 1517, Defense Atomic Support Agency, 97 pp. (NTIS AD-607980).
- Holton, J. R., 2004, An Introduction to Dynamic Meteorology. 3rd Ed., Academic Press, 535 pp.
- Keyser, D., Reeder, M. J., and Reed, R. J., 1988, A generalization of Petterssen's frontogenesis function and its relation to the forcing of

- northwesterly flow. Q. J. Roy. Meteor. Soc., **125**, 2535-2562.
- Shapiro, M. A., 1970, On the applicability of the geostrophic approximation to upper-level frontal-scale motions. J. Atmos. Sci., **27**, 408-420.
- Shapiro, M. A., 1981, Frontogenesis and geostrophically forced secondary circulations in the vicinity of jet stream-frontal zone systems. J. Atmos. Sci., **38**, 954-973.
- Staley, D. O., 1960, Evaluation of potential-vorticity changes near the tropopause and the related vertical motions, vertical advection of vorticity, and transfer of radioactive debris from stratosphere to troposphere. J. Meteor., **17**, 591-620.
- Reed, R. J., and Danielsen, E. F., 1959, Fronts in the vicinity of the tropopause. Arch. Meteor. Geophys. Bioklimatol, **A11**, 1-17.
- Reeder, M. J., and Keyser, D., 1988, Balanced and unbalanced upper-level frontogenesis. J. Atmos. Sci., **45**, 3366-3386.
- Rotunno, R., Skamarock, W. C., and Snyder, C., 1994, An analysis of frontogenesis in numerical simulations of baroclinic waves. J. Atmos. Sci., **51**, 3373-3398.
- Schultz, D. M., Sanders, F., 2002, Upper-level frontogenesis associated with the birth of mobile troughs in northwesterly flow. Mon. Wea. Rev., **130**, 2593-2610.
- Schultz, D. M., and Doswell, C. A., III, 1999, Conceptual models of upper-level frontogenesis in southwesterly and