

## بررسی دینامیکی اثر تابشگرمی و ردایست بر جبهه‌زایی سطوح زیرین و زیرین

منصوره عبداللهی<sup>۱</sup>، فرهنگ احمدی گیوی<sup>۲\*</sup> و محمد میرزائی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲. دانشیار، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳. استادیار، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت: ۹۷/۶/۳۱، پذیرش نهایی: ۹۷/۱۰/۱۱)

### چکیده

در این مطالعه، نقش بی‌هنجاری مثبت تاوایی پتانسیلی (PV) در وردسپهر زیرین بر جبهه‌زایی سطوح زیرین و زیرین در منطقه‌ی خاورمیانه و ایران مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، ابتدا سه سامانه همراه با تابشگرمی و ردایست و جبهه‌ی قوی انتخاب شد. سپس، حذف بی‌هنجاری تاوایی پتانسیلی مربوط به تابشگرمی و ردایست با روش میانگین‌گیری مداری PV و وارون‌سازی آن انجام و میدان‌های هواشناختی تغییر یافته به دست آمد. در ادامه، دو شبیه‌سازی، یکی بدون تغییر داده‌ها و دیگری با داده‌های تغییر یافته با استفاده از مدل WRF انجام شد. در انتها، جملات تابع جبهه‌زایی با به‌کار بردن خروجی مدل، محاسبه و مورد بررسی قرار گرفتند.

نتایج نشان داد که با حذف تابشگرمی و ردایست، کاهش شیوهای افقی و قائم دما، تضعیف سرعت افقی و سرعت قائم منفی در سطوح زیرین و زیرین و افزایش سرعت قائم مثبت در سطوح زیرین رخ می‌دهد. به‌طور کلی جملات دگرشکلی و جبهه‌زایی قائم و کج‌شدگی در سطوح زیرین و زیرین با علامتی مثبت، کاهش می‌یابند. جمله کج‌شدگی با علامتی منفی در سطوح زیرین، مطابق تغییر الگوی سرعت قائم، افزایش می‌یابد. در بررسی سه سامانه به‌طور کلی، با حذف تابشگرمی و ردایست، جبهه‌زایی کل، به‌خصوص در سطوح زیرین، مانند الگوی جبهه‌زایی قائم در پایین‌دست ناوه و نزدیک به مرکز حذف تابشگرمی و ردایست کاهش می‌یابد؛ تنها در یکی از سامانه‌ها دورتر از مرکز حذف تابشگرمی و ردایست و در سطوح زیرین، مقدار جبهه‌زایی کل افزایش می‌یابد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که تابشگرمی و ردایست نقش بارزی در تضعیف و تقویت جبهه‌های سطوح زیرین و زیرین وردسپهر ایفا می‌کند.

واژه‌های کلیدی: تاوایی پتانسیلی، تابشگرمی و ردایست، جبهه‌زایی، شبیه‌سازی، جبهه‌های سطوح زیرین و زیرین.

### ۱. مقدمه

میان این ویژگی‌ها کم‌رنگ می‌شوند. کیسر و همکاران (۱۹۸۸) بردار جبهه‌زایی را به‌صورت آهنگ تغییرات لاگرائژی اندازه و جهت شیو افقی دما تعریف کرده و در مختصات طبیعی مؤلفه مماسی شامل جملات دگرشکلی و تاوایی، و مؤلفه نرده‌ای شامل جملات دگرشکلی و واگرایی ارائه کردند.

مطالعات بسیاری درباره فرآیندهای چرخندزایی و جبهه‌زایی از دیدگاه PV انجام شده است. از آن جمله می‌توان به مطالعه بنیادی هاسکینز و همکاران (۱۹۸۵) اشاره کرد که از تاوایی پتانسیلی برای بررسی چرخندزایی و جبهه‌زایی استفاده شده است. کیسر و شاپیرو (۱۹۸۶) نشان دادند که ناپایستاری PV در حضور اصطکاک و فرآیندهای بادرو موجب گسترش توزیعی از PV در

دینامیک تابشگرمی و ردایست ارتباط نزدیکی با جت و جبهه‌زایی سطوح زیرین دارد. این پدیده‌ها نقش مهمی در انتقال هوای پوشش‌سپهری به وردسپهر، جفت‌شدگی دینامیکی سطوح زیرین و زیرین وردسپهر و به‌وجود آمدن پدیده‌های فرین وضع هوا ایفا می‌کنند. تابشگرمی و ردایست در عرض‌های میانی که همراه با توسعه ناپایداری کژ فشار جریان جتی غربی شکل می‌گیرد، با جبهه‌زایی در سطوح زیرین وردسپهر و هم‌چنین در بیشتر موارد با چرخندزایی سطحی در ارتباط است (هاسکینز، ۱۹۸۲). مطالعات مختلفی در سال‌های اخیر به بررسی تابشگرمی و ردایست، جبهه‌های سطوح زیرین و زیرین پرداخته‌اند. سندرز (۱۹۵۵) منطقه جبهه‌ای سطوح زیرین را در مجاورت شیو افقی دما، واگرایی و چینش افقی باد دانست که در سطوح

جبهه‌های سطوح زیرین وردسپهر و تاشدگی‌های وردایست می‌شود. کیسر و روتانو (۱۹۹۰) جبهه‌زایی را با به‌کار بردن نتایج یک شبیه‌سازی عددی امواج کژفشار مطالعه کرده و چگونگی گسترش تاشدگی وردایست و جبهه سطوح زیرین به سطوح میانی را ارائه کردند. سندرز و همکاران (۱۹۹۱) با بررسی تحول جبهه سطوح زیرین با استفاده از پایستاری تاوایی پتانسیلی بر روی سطوح هم‌آنژیومی نشان دادند که این کمیت در پایه ناوه دمایی زیرین افزایش می‌یابد و منجر به گسترش مناطق جبهه‌ای می‌شود. دیویس و روسا (۱۹۹۸) نشان دادند که مناطق جبهه‌ای وردسپهر زیرین به‌عنوان مناطقی از گرادیان‌های PV قوی روی سطوح هم‌آنژیومی قابل فرایابی هستند.

شولتز و داسول (۱۹۹۹) از مدل میان‌مقیاس MMS برای شبیه‌سازی مناطق جبهه‌ای در دو جریان شمال‌غربی و جنوب‌غربی استفاده کردند. آنها بردار جبهه‌زایی کیسر و همکاران (۱۹۸۸) را کامل‌تر کرده، جمله حرکت‌های قائم (کج‌شدگی) را به مؤلفه‌های جبهه‌زایی اضافه کردند و مدلی مفهومی برای جبهه‌زایی در دو جریان شمال‌غربی و جنوب‌غربی ارائه دادند. شولتز و سندرز (۲۰۰۲) به بررسی ارتباط جبهه‌زایی با الگوی فرارفت دما پرداختند و برای جریان‌های هم‌شاری و اشاری نقش هر کدام از جملات مؤلفه‌های جبهه‌زایی در معادله گرایش فرارفت دما را تعیین کردند. نتایج مطالعه گری (۲۰۰۳) نشان داد که بسیاری از انتقال‌های همرفتی مربوط به همرفت‌های عمیق واقع در زیر کم‌فشارهای وردایست است، ولی بخش قابل ملاحظه‌ای اختصاص به تاشدگی وردایست همراه با جبهه سرد دارد. لانگ و مارتین (۲۰۱۲) ساختار و تحول مناطق جبهه‌ای در پوشش سپهر زیرین و وردسپهر زیرین را در جریان‌های شمال‌غربی و جنوب‌غربی مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه، چگونگی تحول و دینامیک دو منطقه جبهه‌ای پوشش سپهر زیرین توسط یک حالت پایه از دیدگاه‌های مختلف بررسی شد و غیرهم‌زمان بودن تحول مناطق جبهه‌ای پوشش سپهر زیرین و وردسپهر زیرین همراه با سامانه‌های جت و جبهه وردسپهر زیرین نشان داده شد.

در دهه‌های اخیر با استفاده از خاصیت وارون‌پذیری تاوایی پتانسیلی و محاسبه میدان دما و باد همراه با بی‌هنجاری‌های تاوایی پتانسیلی سطوح زیرین و زیرین، مطالعات زیادی در خصوص جبهه‌زایی و وادشت‌های مؤثر در آن انجام شده است (مانند هاسکینز و همکاران، ۱۹۸۵؛ دیویس و امانوئل، ۱۹۹۱؛ کرنر و مراتین، ۲۰۰۰). ونیش و نیلسون-گامون (۲۰۰۰) فرآیند تاشدگی وردایست در چرخه عمر امواج کژفشار را مورد مطالعه قرار دادند. آنها با بررسی عوامل مؤثر بر ایجاد تاشدگی واریست، تابع تاشدگی‌زایی را معرفی کردند. مک و همکاران (۲۰۱۶) اثر گرمایش بادررو را بر جبهه‌زایی در سطوح زیرین مورد بررسی قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که این اثر تنها به‌صورت غیرمستقیم با تغییر میدان آزمینگرد بر جبهه‌زایی در سطوح زیرین اثر می‌گذارد. بسیاری از ناپایداری‌های جوئی در منطقه خاورمیانه و ایران تحت تأثیر سامانه‌های همراه با جبهه‌های سطوح زیرین و زیرین و تاشدگی وردایست هستند و در بررسی جبهه‌ها، سهم قابل‌توجهی مربوط به بی‌هنجاری تاوایی پتانسیلی سطوح زیرین است. از این‌رو، مطالعه دینامیکی این پدیده‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در ایران مطالعات مختلفی در رابطه با جبهه‌ها در سطوح مختلف انجام شده که از آن جمله می‌توان به پژوهش میرزائی (۱۳۸۵) اشاره کرد که فرآیند جبهه‌زایی سطوح زیرین و عوامل مؤثر بر آن از دو دیدگاه جنبش‌شناختی و تاوایی پتانسیلی را مطالعه کرد. نتایج این پژوهش نشان داد که تاشدگی وردایست سبب نفوذ تاوایی پتانسیلی با منشأ پوشش‌سپهری و ریزش هوای سرد با پایداری ایستایی قوی به وردسپهر میانی و زیرین شده و شکل‌گیری جبهه سرد را به‌دنبال دارد. باستانفرد (۱۳۸۷) فرآیند جبهه‌زایی سطوح زیرین وردسپهر از دیدگاه جنبش‌شناختی و اثر گرمایش نهان را به‌طور جداگانه مورد مطالعه قرار داد. از جمله نتایج این پژوهش آن است که هر دو جمله دگرشکلی و کج‌شدگی، در منطقه جبهه‌ای متمرکز بوده و بیشینه مقدار آن نزدیک

## ۲. داده‌ها و روش کار

برای انجام این مطالعه، ابتدا سامانه‌های جبهه‌ای بین سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۵ در منطقه خاورمیانه همراه با بارش سنگین مرور شد. با بررسی میدان‌های ارتفاع ژئوپتانسیلی و تاوایی پتانسیلی تراز  $500\text{hPa}$  حاصل از داده‌های بازتحلیل مرکز اروپایی پیش‌بینی میان‌مقیاس وضع هوا (ECMWF) با تفکیک افقی  $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ ، سه سامانه همراه با ناوه عمیق و تاشدگی وردایست، که بارشی بیش از  $50$  میلی‌متر بر روی ایران داشتند، انتخاب شد. سامانه اول در بازه زمانی ۲۴ تا ۲۶ دسامبر ۲۰۱۵ (۳ تا ۵ دی ۱۳۹۴) در نواحی جنوب‌شرق دریای مدیترانه تا جنوب‌شرق ایران فعال بوده‌است. منشأ این سامانه، جنوب دریای مدیترانه بوده و ضمن حرکت بر روی جنوب و مرکز ایران، باعث بارش بسیار زیادی در منطقه با بیشینه مقدار  $59/9$  میلی‌متر در استان هرمزگان شده‌است. همچنین این سامانه همراه با بی‌هنجاری تاوایی پتانسیلی قوی در منطقه جنوب‌غرب کشور بوده‌است. سامانه دوم در تاریخ ۱۰ تا ۱۲ مارس ۲۰۱۵ (۱۹ تا ۲۱ اسفند ۱۳۹۳) همراه با تاشدگی وردایست بر روی شمال و مرکز ایران واقع بوده و با ایجاد بارش فرینی (بیشینه مقدار ثبت شده  $50$  میلی‌متر در کرمان) این منطقه را متأثر ساخته‌است. سامانه سوم در روزهای پنجم تا هفتم ژانویه ۲۰۰۸ (۱۵ تا ۱۷ دی ۱۳۸۶) با ایجاد جوئی ناپایدار، باعث بارش فراگیری در کل کشور با بیشینه مقدار  $71/7$  میلی‌متر ثبت شده در گیلان و  $86$  میلی‌متر در سیستان و بلوچستان شده‌است. تاشدگی وردایست همراه با این سامانه در شمال‌غرب ایران رخ داده‌است. پس از انتخاب سه سامانه فوق، برای بررسی اثر تاشدگی وردایست بر جبهه‌های سطوح زیرین و زیرین، از مدل میان‌مقیاس WRF استفاده شد. مدل با به‌کار بردن داده‌های ECMWF یاد شده به‌عنوان شرایط اولیه و مرزی برای دو حوزه با تفکیک افقی  $27$  و  $9$  کیلومتر اجرا شد. انتخاب حوزه اول و دوم به‌گونه‌ای است که به‌ترتیب مسیر جابه‌جایی تاشدگی و منطقه‌ی جبهه‌ای را در برگیرد (شکل ۱). از آنجا که

سطح زمین و در محل شیو شدید دمای بالقوه و تغییر جهت شدید باد قرار دارد. در پژوهش غلامی (۱۳۹۰) فرآیند جبهه‌زایی سطوح زیرین وردسپهر از طریق تأثیرپذیری از عوامل سطوح زیرین وردسپهر مورد مطالعه قرار گرفته‌است و نتایج آن بیانگر تأثیر مستقیم هم‌زمانی حرکت‌های قائم سطوح زیرین وردسپهر در فرآیند جبهه‌زایی سطوح زیرین وردسپهر است.

با وجود این که مطالعات متعددی در رابطه با سازوکارهای جبهه‌زایی در منطقه خاورمیانه و ایران انجام شده و علی‌رغم اهمیت تاشدگی وردایست در تشکیل و تقویت جبهه‌ها، تا آنجا که ما اطلاع داریم، مطالعه‌ای با هدف بررسی تأثیر مستقیم تاشدگی وردایست بر جبهه‌زایی در سامانه‌هایی که کشور ایران را تحت تأثیر قرار می‌دهند، انجام نشده‌است. به‌علاوه، در این مطالعات جملات جبهه‌زایی حاصل از گرمایش بادر و جبهه‌زایی قائم محاسبه نشده و هر دو جبهه‌ی سطوح زیرین و زیرین به‌صورت هم‌زمان مورد بررسی قرار نگرفته‌اند. لذا این امر را بر آن داشت تا در این پژوهش به مطالعه اثر تاشدگی وردایست در جبهه‌زایی سطوح زیرین و زیرین در طی تحول سامانه‌هایی که ایران را تحت تأثیر قرار می‌دهند، بپردازیم. برای این منظور با انتخاب سه سامانه جبهه‌ای از مدل WRF برای شبیه‌سازی ساختار این سامانه‌ها برای دو حالت با و بدون تاشدگی وردایست استفاده شده‌است. بدین ترتیب، ساختار این مقاله به این صورت است که در بخش دوم، داده‌ها و روش کار و در بخش سوم تحلیل هم‌دیدی سامانه‌های منتخب آورده شده‌است. بخش چهارم به ارائه نتایج شبیه‌سازی برای حالت‌های با و بدون تاشدگی وردایست و همچنین بررسی دینامیکی اثر تاشدگی وردایست بر کمیت‌های مؤثر بر جبهه‌زایی سطوح زیرین و زیرین اختصاص دارد. در بخش پنجم نیز نتیجه‌گیری این پژوهش ارائه شده‌است.

۱۰ میلی‌متر، حاصل از نتایج درستی‌سنجی مطالعه خانسالاری (۱۳۹۵) استفاده شد که در جدول ۱ دیده می‌شود.

انتخاب طرحواره فیزیکی مناسب خارج از اهداف این مطالعه بوده است، برای انجام شبیه‌سازی‌ها از پیکربندی منتخب و مناسب برای بارش‌های متوسط و فرین بیشتر از



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۱. موقعیت حوزه‌های اول و دوم اجرای مدل با تفکیک ۲۷ و ۹ کیلومتر برای سامانه‌های (الف) اول، (ب) دوم و (ج) سوم.

جدول ۱. پیکربندی‌های مورد استفاده در اجرای مدل WRF.

حوزه	تفکیک افقی	ترازهای قائم	طرح‌واره فیزیک تابشی موج کوتاه / موج بلند	طرح‌واره خردفیزیک	طرح‌واره لایه سطحی	طرح‌واره لایه مرزی	طرح‌واره همرفت کومه‌ای
اول	۲۷	۳۵	Goddard/rrtm	Lin	MOJ	MYJ TKE	Tiedtke
دوم	۹	۳۵	Goddard/rrtm	Lin	MOJ	MYJ TKE	Tiedtke

زیر به دست می‌آید (بولشتاین، ۱۹۹۳):

$$F_D = \frac{1}{|\nabla_p \theta|} \left\{ \frac{\partial \theta}{\partial x} \left[ - \left( \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) - \left( \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial \theta}{\partial y} \left[ - \left( \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) - \left( \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) \right] \right\} \quad (1)$$

$$F_T = \frac{1}{|\nabla_p \theta|} \left\{ - \frac{pg}{RT} \left[ - \frac{\partial \theta}{\partial x} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial p} \right) - \frac{\partial \theta}{\partial y} \left( \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial \theta}{\partial p} \right) \right] \right\} \quad (2)$$

$$F_H = \frac{1}{|\nabla_p \theta|} \left\{ \frac{\partial \theta}{\partial x} \left[ \frac{1}{c_p} \left( \frac{p_s}{p} \right)^{\frac{r}{c_p}} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{dQ}{dt} \right) \right] \right] + \frac{\partial \theta}{\partial y} \left[ \frac{1}{c_p} \left( \frac{p_s}{p} \right)^{\frac{r}{c_p}} \left[ \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{dQ}{dt} \right) \right] \right] \right\} \quad (3)$$

$$F_V = \frac{1}{|\nabla_3 \theta|} \left\{ - \frac{pg}{RT} \frac{\partial \theta}{\partial p} \left[ \frac{1}{c_p} \left( \frac{p_s}{p} \right)^{\frac{r}{c_p}} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{dQ}{dt} \right) \right] - \left( \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) - \left( \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) \right] + \frac{pg}{RT} \left( \frac{\partial w}{\partial p} \frac{\partial \theta}{\partial p} \right) \right\} \quad (4)$$

در این روابط  $u$ ،  $v$  و  $w$  مؤلفه‌های سرعت و همچنین  $|\nabla_p \theta|$  و  $|\nabla_3 \theta|$  به ترتیب اندازه شیو دوبعدی و سه‌بعدی دمای بالقوه،  $\frac{dQ}{dt}$  آهنگ گرمایش بر واحد جرم و  $p$  نشان‌دهنده فشار است.  $F_D$ ،  $F_T$ ،  $F_H$  و  $F_V$  به ترتیب توابع جبهه‌زایی دگرشکلی، کج‌شدگی، گرمایش بادررو و قائم هستند. بدین ترتیب جبهه‌زایی کل از مجموع رابطه‌های (۱) تا (۴) حاصل می‌شود. در پژوهش حاضر برای محاسبه تابع جبهه‌زایی حاصل از گرمایش بادررو، از رابطه امانوئل و همکاران (۱۹۸۷) استفاده شد. پس از محاسبه تابع جبهه‌زایی، نقشه‌های مربوط به هر یک از جملات دگرشکلی، کج‌شدگی، گرمایش بادررو، جبهه‌زایی قائم و مجموع اثر آنها همراه با میدان‌های هواشناختی مؤثر بر جبهه‌های سطوح زیرین و زیرین در سطوح مختلف

برای بررسی تأثیر تاشدگی وردایست بر جبهه، دو شبیه‌سازی شامل کنترلی با تاشدگی وردایست (control) و بدون تاشدگی وردایست (without CTL)، و بدون تاشدگی وردایست (without tropopause folding WTF)، انجام شده است. اجرای CTL در حالت واقعی جو و بدون هیچ تغییری انجام گرفته، اما در اجرای WTF بی‌هنجاری تاوایی پتانسیلی از حالت واقعی جو در زمان آغاز اجرا، حذف شده است. قبل از انجام شبیه‌سازی، حذف تاشدگی وردایست یا به عبارتی حذف بی‌هنجاری تاوایی پتانسیلی، با استفاده از روش وارون‌سازی این کمیت، صورت می‌گیرد. در روش وارون‌سازی PV، ابتدا بی‌هنجاری تاوایی پتانسیلی مربوط به تاشدگی وردایست با روش میانگین‌گیری مداری حذف می‌شود، سپس با وارون‌سازی این کمیت میدان‌های هواشناختی تغییر یافته مرتبط با آن به دست می‌آید. در گام بعد، میدان‌های باد افقی و دمای بالقوه تغییر یافته تحلیل شده و با میدان‌های متناظرشان مربوط به PV اصلی (بدون تغییر) مقایسه می‌شوند. در این مطالعه با کاربست بسته نرم‌افزاری حذف بی‌هنجاری PV اسپرینگر (۲۰۰۷) و استفاده از داده‌ها شامل مؤلفه‌های باد، دما، رطوبت ویژه، فشار سطحی و ارتفاع ژئوپتانسیلی در ترازهای مختلف، میدان تاوایی پتانسیلی ارتل تغییر یافته به‌عنوان هدف تعیین می‌شود. در وارون‌سازی انجام شده در این مطالعه، برای همه سامانه‌ها، جعبه‌ای به ابعاد افقی ۳۰۰۰ کیلومتر با ارتفاعی از ۲ تا ۱۲ کیلومتری از سطح زمین، استفاده شد. پس از حذف بی‌هنجاری تاوایی پتانسیلی و انجام وارون‌سازی و اجرای دو شبیه‌سازی، اثر تغییرات میدان‌های باد، دمای بالقوه، ارتفاع ژئوپتانسیلی در جبهه‌های سطوح زیرین و زیرین در منطقه تحت تأثیر سامانه مورد مطالعه گرفت. برای این منظور با استفاده از خروجی‌های مدل شامل میدان باد، دما، رطوبت نسبی و بخار آب جملات تابع جبهه‌زایی شامل دگرشکلی، کج‌شدگی، قائم و گرمایش بادررو در سطوح هم‌فشار محاسبه شده است. جملات تابع جبهه‌زایی سه‌بعدی (روابط ۱ تا ۴) در سطوح هم‌فشار و تجزیه آن به عوامل مؤثر بر جبهه‌زایی به صورت

فشاری برای هر دو شبیه‌سازی CTL و WTF ترسیم شد. قبل از بررسی نتایج این شبیه‌سازی‌ها، در بخش بعد برای شناخت بهتر شرایط جوئی، تحلیل همدیدی برای این سامانه‌ها ارائه می‌شود.

### ۳. تحلیل همدیدی

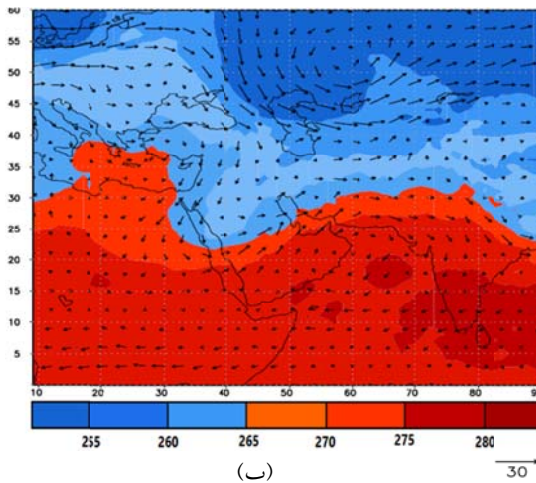
در این بخش، شرایط همدیدی سامانه اول به‌طور مبسوط ارائه می‌شود و برای رعایت اختصار تنها ویژگی‌های مهم دو سامانه دیگر بیان می‌شود. برای این منظور، از داده‌های ECMWF با تفکیک افقی  $0.75^\circ \times 0.75^\circ$  استفاده شده است. سامانه بارش‌زای ۲۵ دسامبر ۲۰۱۵ (سامانه اول) با ایجاد جوئی ناپایدار، بخش‌های جنوبی و مرکزی کشور را تحت تأثیر قرار داده و منجر به بارش فرینی با بیشینه مقدار ۵۹/۹ میلی‌متر در این مناطق شد. با بررسی میدان ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در روز ۲۵ دسامبر، مشاهده می‌شود که ناوهای با محور شمال‌شرقی- جنوب‌غربی در مقیاس سیاره‌ای، جنوب‌غرب خاورمیانه را دربرگرفته است، به‌طوری‌که سبب ریزش هوای سرد از عرض‌های بالاتر به عرض‌های پایین‌تر در این منطقه می‌شود (شکل ۲-الف). در این شکل، پشته‌ای بر روی شمال اروپا وجود دارد که با حرکت شرق‌سوی ناوه، این پشته پهناور جایگزین آن می‌شود. به‌عبارتی، این پشته با ناوه مستقر بر روی جنوب‌غرب خاورمیانه الگوی دوقطبی تشکیل داده‌اند. در نقشه فشار میانگین سطح دریا (شکل ۲-د)، یک کم‌فشار با مرکز ۹۸۵ هکتوپاسکال در عرض‌های بالا بر روی جنوب روسیه و دو پرفشار، یکی با مرکز ۱۰۳۵ هکتوپاسکال در شرق خاورمیانه و مرکز دیگر با مقدار ۱۰۳۴ هکتوپاسکال در شرق اروپا و کشور ترکیه دیده می‌شود. همچنین در سطح زمین شیو فشار در جنوب‌غرب خاورمیانه با کمترین فشار ۱۰۲۰ هکتوپاسکال قرار دارد. با حرکت هم‌زمان پرفشار اروپا و کم‌فشار جنوب روسیه به سمت شرق، جریان‌ات سرد شمالی بر سواحل دریای خزر حاکم شده و شیو فشاری در منطقه غرب ایران نیز افزایش یافته است. در بررسی سامانه دوم،

مشابه با سامانه اول، ناوهای در ترازهای میانی مشاهده می‌شود که از عرض‌های بالا تا نواحی مرکزی ایران امتداد یافته و در سطح زمین در جنوب‌شرق کشور یک کم‌فشار در پایین‌دست این ناوه مستقر است. این کم‌فشار منطبق بر ناحیه حرکت‌های بالاسو در این سامانه می‌باشد و از این‌رو به تقویت جبهه سطوح زیرین کمک می‌کند (شکل آورده نشده است). همچنین در سامانه سوم، در نقشه تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، ناوهای وسیع و عمیق با محوری در راستای شمال‌شرق- جنوب‌غرب در شمال ایران و ناوهای دیگر در شمال دریای مدیترانه مستقر است که با ایجاد الگوی دوقطبی با ناوه شمال ایران، آن را تقویت می‌کند (مشابه سامانه اول). به‌علاوه، در این سامانه یک کم‌فشار بر روی شرق دریای مدیترانه و کم‌فشاری دیگر بر روی کشور عربستان دیده می‌شود که با حرکت جنوب‌سوی ناوه تراز میانی، شیو فشار را در شمال و مناطق مرکزی سامانه سوم افزایش می‌دهد (شکل آورده نشده است).

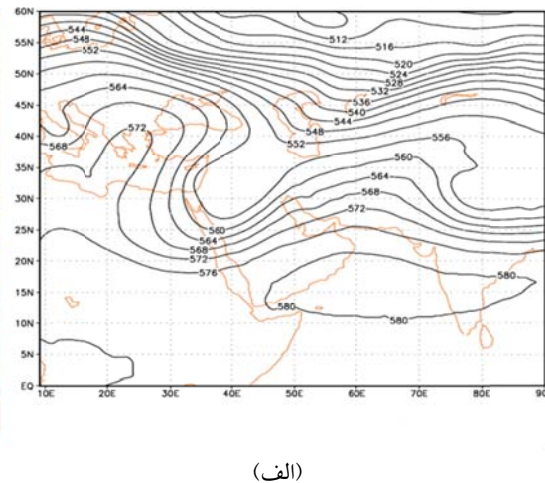
در ادامه بررسی سامانه اول، در شکل‌های ۲-الف و ۲-د، شیو فشاری زیاد در سطح زمین همراه با ناوه تراز میانی جو در جنوب‌غرب ایران و کشور عربستان، منطقه جبهه سرد سطوح زیرین را نشان می‌دهد. برای بررسی موقعیت جبهه سطوح زیرین، علاوه بر ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و فشار میانگین سطح دریا، از الگوهای فرارفت دما در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۲-ب) و رطوبت نسبی در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال (شکل آورده نشده است) استفاده شد. در شکل ۲-ب، با توجه به جهت باد و پربندهای دما در محل ناوه، می‌توان فرارفت هوای سرد و شیو دما در پایین‌دست ناوه را مشاهده کرد که حاکی از وجود جبهه سرد سطوح زیرین در این منطقه است. با قرار گرفتن جبهه در پایین‌دست ناوه و ریزش هوای سرد در پشت آن، جبهه سرد تقویت می‌شود. از سوی دیگر، بررسی رطوبت (شکل آورده نشده است) و میدان افقی باد و دما در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال نشان از وجود فرارفت هوای گرم و مرطوب از دریای سرخ و مدیترانه دارد که با جریان هوا به پایین‌دست ناوه کشیده

شیو افقی دما، چینش شدید قائم باد افقی و جریان جتی تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال وجود دارد (شکل‌ها آورده نشده است). در سامانه سوم، مشابه دو سامانه دیگر، شیو افقی دما و تغییرجهت ناگهانی بردارهای سرعت در پایین‌دست ناوه و همچنین جبهه سرد سطوح زیرین دیده می‌شود که در اثر فرارفت هوای سرد از عرض‌های بالاتر در پایین‌دست ناوه، این جبهه تقویت شده است. جت جنب‌حاره‌ای نیز در جنوب کشور مستقر است که با نصف‌النهاری شدن جریان جتی در عرض‌های بالاتر، جت قطبی به سمت جت جنب‌حاره‌ای کشیده شده است. این جریان جتی در منطقه چینش شدید قائم سرعت افقی و شیو افقی دما قرار دارد (شکل‌ها آورده نشده است).

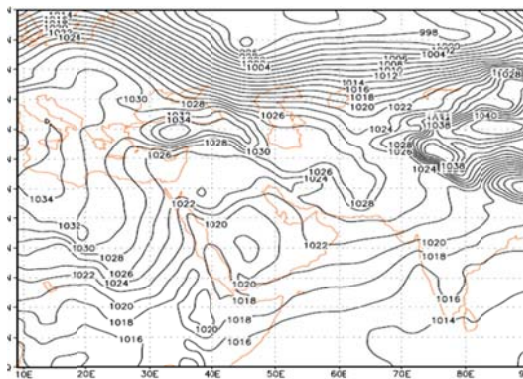
شده است. وجود رطوبت نسبتاً زیاد و حرکات بالاسو در پایین‌دست ناوه، موجب ناپایداری جو و آماده شدن شرایط برای تشکیل ابر و بارش شده است. در شکل ۲-ج مربوط به الگوی جریان جتی در تراز ۳۰۰ hPa، در نیمه جنوبی کشور، جت جنب‌حاره‌ای تا شرق ایران کشیده شده است. در منطقه جریان جتی، چینش قائم سرعت افقی دیده می‌شود (شکل ارائه نشده است) که این چینش سرعت همراه با شیو افقی دما منطقه‌ای با خصوصیات کژفشاری را به وجود آورده‌اند. در بررسی نقشه میدان‌های دما و باد افقی در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال مربوط به سامانه دوم، فرارفت هوای سرد، شیو دما و رطوبت نسبی در راستای جبهه سطوح زیرین به چشم می‌خورد و در منطقه



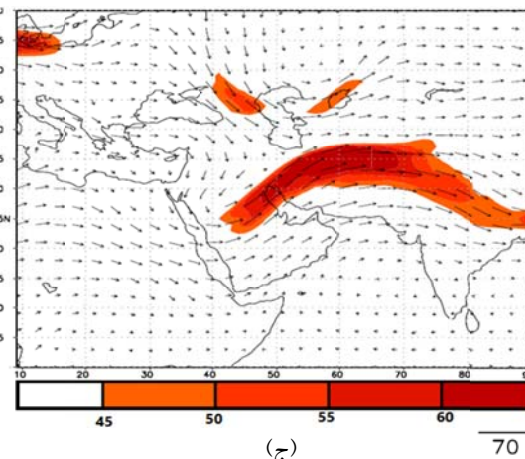
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۲. (الف) میدان ارتفاع ژئوپتانسیلی (پریندها با فاصله ۴۰ ژئوپتانسیل متر) در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، (ب) دما (سایه-روشن رنگی با فاصله ۵K) و بردار باد افقی در سطح ۷۰۰ هکتوپاسکال، (ج) میدان باد (سایه-روشن رنگی) در سطح ۳۰۰ هکتوپاسکال و (د) میانگین فشار سطح دریا (پریندها با فاصله ۲ هکتوپاسکال) برای ساعت ۰۶۰۰ روز ۲۵ دسامبر ۲۰۱۵.

#### ۴. تحلیل دینامیکی اثر تابش روی جبهه‌زایی سطوح زیرین و زیرین

##### ۴-۱. تابش روی جبهه‌زایی

در این بخش به بررسی میدان کمیت‌های هواشناختی و همچنین جملات مختلف تابع جبهه‌زایی محاسبه شده در سطوح زیرین و زیرین در دو شبیه‌سازی CTL (کنترلی) و WTF (تغییر یافته) می‌پردازیم. برای یافتن تابش روی جبهه‌زایی (بی‌هنجاری سه‌بعدی PV)، کوتاه‌ترین و مؤثرترین راه، تهیه نیم‌رخ‌های قائم و افقی میدان PV است. بررسی میدان PV در تراز ۳۰۰ hPa برای شبیه‌سازی CTL (شکل ۳-الف)، تابش روی جبهه‌زایی با مقادیر بالای PV از ۳/۵ تا ۶/۵ PVU با منشأ پوشش سپهری در مرکز کم‌ارتفاع تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال از شمال عربستان تا ترکمنستان را نشان می‌دهد که از جنوب غرب ایران تا دریای خزر را دربر گرفته است. در این شکل، شیو شدید PV نیز مشخص است که می‌تواند حاکی از وردایستی شیب‌دار باشد. در بررسی نیم‌رخ قائم فشاری PV و دمای بالقوه بر روی برش افقی AA' در طول جغرافیایی ۴۵ درجه شرقی حاصل از شبیه‌سازی CTL در زمان UTC ۰۶۰۰ روز ۲۵ دسامبر، تابش روی جبهه‌زایی تا تراز ۴۷۵ هکتوپاسکال دیده می‌شود (شکل ۳-ج). همچنین در این شکل، خطوط به هم فشرده هم‌دمای بالقوه در راستای تابش روی جبهه‌زایی با شیب تندی قرار گرفته است که نشان‌دهنده جبهه‌زایی زیرین است. به عبارتی، هوای سرد و خشک پوشش سپهری همراه با زبانه تابش روی جبهه‌زایی در مجاورت هوای گرم و مرطوب وردسپهر قرار گرفته و با حضور دو توده هوا با ویژگی‌های فیزیکی متفاوت، جبهه‌زایی زیرین به وجود آمده است.

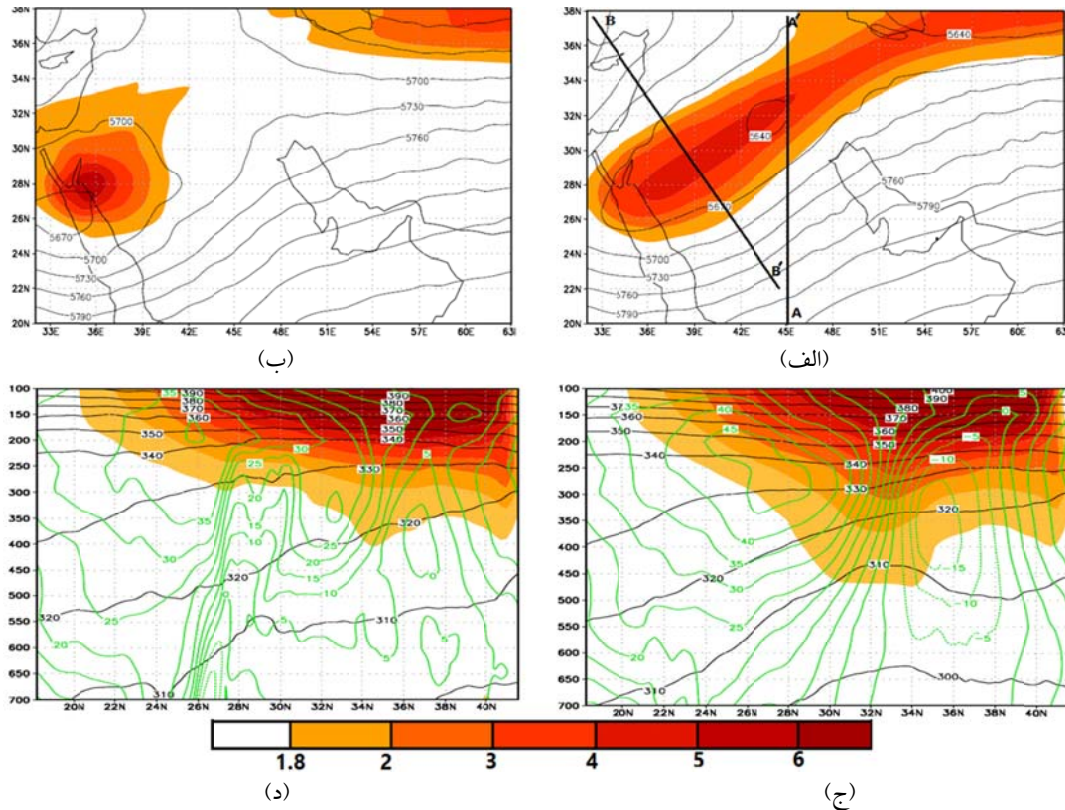
با حذف تابش روی جبهه‌زایی در اجرای WTF، مقادیر PV در ترازهای زیرین و میانی به مقدار ۱ تا ۳/۵ PVU کاهش یافته است (شکل‌های ۳-ب و ۳-د). علاوه بر این، خطوط هم‌دمای بالقوه در این اجرا در راستای جبهه‌زایی زیرین از هم فاصله گرفته و باعث کاهش شیو افقی و قائم دمای بالقوه و در نتیجه تضعیف جبهه‌زایی سطوح زیرین شده است

(شکل ۳-د). شیو PV در همه سطوح در ناحیه جبهه‌زایی سطوح زیرین به چشم می‌خورد که با حرکت به سمت سطوح زیرین این شیو افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۳-ب مربوط به اجرای WTF، مشاهده می‌شود که ناوه تضعیف شده و مرکز بسته ناوه به ۵۷۰ دکامتر رسیده است. در شکل ۳-ج، وجود جریان جتی در ناحیه تابش روی جبهه‌زایی و از این رو گردش‌های آزمینگرد اطراف آن، با ایجاد و تقویت خصوصیات کژفشاری در زیر این ناحیه، جبهه‌زایی سطوح زیرین را تشدید می‌کنند. با حذف تابش روی جبهه‌زایی، سرعت افقی در همه ترازها کاهش یافته و با کاهش چرخش قائم سرعت افقی و شیو افقی دما، خصوصیات کژفشاری در سطوح زیرین کمتر شده است (شکل ۳-د). همچنین در اجرای WTF، با کم شدن سرعت باد افقی به اندازه حداقل ۵ متر بر ثانیه در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال و افزایش دمای بالقوه به اندازه ۶ درجه کلون در محل ناوه، فرافرت هوای سرد کاهش یافته و در نتیجه جبهه‌زایی سرد تضعیف شده است (شکل آورده نشده است).

##### ۴-۲. حرکت‌های قائم

با توجه به نقش مهم سرعت قائم در جبهه‌زایی سطوح زیرین و زیرین و همچنین در جملات تابع جبهه‌زایی، در این بخش، تغییرات این کمیت در مرحله تقویت جبهه‌زایی مورد بررسی قرار می‌گیرد که برای اختصار تنها نتایج مربوط به سامانه اول ارائه می‌شود. با بررسی الگوی تاوایی نسبی و ارتفاع ژئوپتانسیلی در تراز ۵۰۰ hPa (شکل ۴-الف) و سرعت قائم و رطوبت نسبی در تراز ۷۰۰ hPa (شکل ۴-ب)، اثر حرکت‌های قائم در تحول جبهه‌زایی زیرین در اجرای CTL را بررسی می‌کنیم. با مقایسه شکل‌های ۴-الف و ۴-ب، همان‌طور که از امواج کژفشار انتظار می‌رود، حرکت‌های بالاسو در مقیاس همدیدی در پایین دست مرکز کم‌ارتفاع تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و در شرق ناوه، دیده می‌شوند. همچنین الگوی سرعت قائم در بالادست ناوه، حرکت‌های پایین سو را نشان می‌دهد.

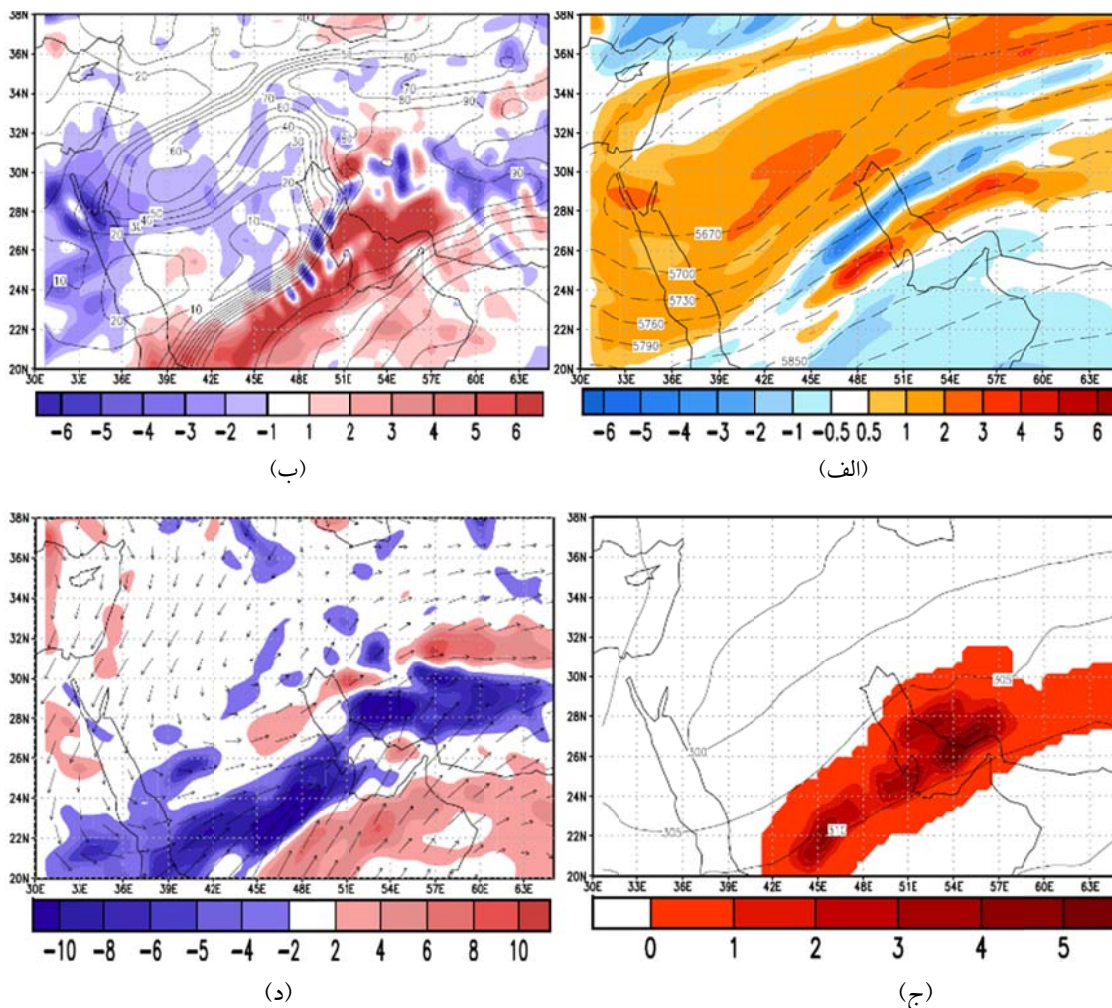




شکل ۳. (الف) و (ب) میدان‌های افقی تاوایی پتانسیلی (سایه-روشن رنگی با یکای  $10^{-6} m s^{-1} K kg^{-1}$ ) در تراز  $300 hPa$  و ارتفاع ژئوپتانسیلی (پرندها با فاصله  $30$  متر) در تراز  $500 hPa$  (ج) و (د) نیم‌رخ قائم فشاری تاوایی پتانسیلی و دمای بالقوه (پرندها با فاصله  $5K$ ) واقع بر روی برش افقی  $AA'$  در طول جغرافیایی  $45$  درجه شرقی، برای اجرای CTL در سمت راست و اجرای WTF در سمت چپ برای ساعت  $0600 UTC$  روز  $25$  دسامبر  $2015$ . خط افقی  $BB'$  به فاصله  $2046$  کیلومتری از  $AA'$  محل برش قائم در شکل‌های ۷ و ۸ را نشان می‌دهد.

(آزاد شدن گرمای نهان) ایجاد می‌شود (شکل ۴-ج). در شکل ۴-ج می‌توان انطباق منطقه تولید گرمایش با حرکت‌های بالاسو را مشاهده کرد که تقویت حرکت‌های بالاسو باعث افزایش ناپایداری می‌شود. با فرونشست هوای خشک پوشش سپهری در مرکز ناوه، رطوبت نسبی پایینی در این ناحیه در اجرای CTL دیده می‌شود (شکل‌های ۴-الف و ۴-ب). مطابق شکل ۴-الف، تاوایی نسبی مثبت در محل کم‌ارتفاع تراز  $500 hPa$  هکتوپاسکال واقع بوده و با توجه به جهت باد زمینگرد، حرکت‌های بالاسو (پایین‌سو) در پایین‌دست ناوه تراز  $700 hPa$  (شکل ۴-ب) در جلوی فرارفت مثبت (منفی) تاوایی نسبی در تراز  $500$  هکتوپاسکال قرار گرفته است و با فرارفت تاوایی نسبی در ترازهای میانی هم‌خوانی نسبتاً خوبی دارد.

به عبارتی دیگر، با توجه به مکان جبهه سطوح زیرین (راستای شیو دما در پایین‌دست ناوه)، حرکت‌های بالاسو و پایین‌سو در جلو و پشت جبهه سرد سطوح زیرین قرار دارند؛ به طوری که صعود هوا در برخورد جبهه سرد با جبهه گرم و آزاد شدن گرمای نهان رخ داده است. حرکت‌های پایین‌سو در زیر مرکز ناوه، منطبق بر مکان تاشدگی وردایست هستند که نشانگر گسترش پایین‌سوی هوای سرد سطوح زیرین (با منشأ پوشش سپهری) به سطوح زیرین بوده و با ریزش هوای سرد به این منطقه، تقویت جبهه سرد سطوح زیرین را به همراه دارد. طبق شکل ۴-ب، در راستای شیو دما و جبهه سرد، شیو شدید رطوبت نسبی نیز به چشم می‌خورد. در جلوی این ناحیه (شیو رطوبت نسبی) و در محدوده حرکت‌های بالاسو به دلیل وجود رطوبت نسبی بیش از  $90$  درصد، گرمایش بادرو



شکل ۴. (الف) تاوایی نسبی (سایه-روشن رنگی با یکای  $10^{-2} s^{-1}$ ) و ارتفاع ژئوپتانسیلی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (پریندهای خط‌چین با فاصله ۳۰ ژئوپتانسیل-متر)، (ب) سرعت قائم (سایه-روشن رنگی با فاصله  $10^{-2} ms^{-1}$ ) و پریندهای رطوبت نسبی (با فاصله پریندی ۱۰ درصد) در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال، (ج) آهنگ گرمایش (سایه-روشن رنگی با یکای  $Ks^{-1}$ ) و پریندهای دمای بالقوه (با فاصله ۵ K) و (د) واگرایی (سایه-روشن رنگی با یکای  $10^{-6} s^{-1}$ ) و بردار باد در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال مربوط به اجرای CTL برای ساعت ۰۶:۰۰ UTC روز ۲۵ دسامبر ۲۰۱۵.

قائم در پایین دست ناوه، برخلاف حرکت‌های پایین سو در مرکز ناوه متاثر از تاشدگی وردایست، ناشی از هم‌گرایی و واگرایی سرعت‌های افقی در سطوح زیرین است. در اجرای WTF، با حذف بی‌هنجاری تاوایی پتانسیلی و تضعیف ناوه سطوح میانی، در همه زمان‌ها، حرکت‌های بالاسو مشابه الگوی پریندهای دما در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال به عرض‌های بالاتر منتقل می‌شوند و کاهش چشم‌گیر حرکت‌های پایین سو در ناوه سطوح میانی و بیشتر در مرکز آن رخ می‌دهد که با کاهش گسترش پایین سوی هوای پوشن سپهری در آن ناحیه قابل انتظار

در اجرای WTF، تاوایی نسبی در نزدیکی مرکز حذف تاشدگی وردایست در غرب ایران کاهش چشم‌گیری پیدا کرده است (شکل آورده نشده است). در شکل ۴-د مشاهده می‌شود که واگرایی منفی (هم‌گرایی) در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال منطبق بر حرکت‌های بالاسو بوده و به تقویت این حرکت‌ها در این تراز کمک می‌کند. همچنین مکان واگرایی مثبت (واگرایی) با حرکت‌های پایین سو انطباق دارد. مقادیر واگرایی در جلوی جبهه و پایین دست ناوه ظاهر شده و در مرکز ناوه، با وجود حرکت‌های پایین سو، این واگرایی صفر است. از این رو حرکت‌های

نسبت به اجرای CTL کمتر می‌شود. با حرکت به سمت شرق و به سمت عرض‌های بالاتر در راستای پربندهای دمای بالقوه (دورتر از مرکز ناوه)، جمله دگرشکلی با مقادیر مثبت بزرگی نسبت به اجرای CTL دیده می‌شود. در شکل ۵-ب مقادیر منفی نسبتاً بزرگ جمله کج‌شدگی (رابطه ۲) در سطوح زیرین در طول جبهه وجود دارد. مقادیر جمله کج‌شدگی به‌طور کلی نسبت به مقادیر جمله دگرشکلی، با توجه به کوچک بودن سرعت‌های قائم، کوچک‌تر هستند. مطابق تعریف جمله کج‌شدگی، در اثر چپش افقی سرعت قائم، خطوط هم‌دمای بالقوه شیب‌دار یا به اصطلاح کج می‌شوند و با تغییر شیو افقی و قائم دما جبهه را تقویت یا تضعیف می‌کنند. در نیم‌رخ قائم سرعت قائم (شکل آورده نشده است)، می‌توان دید که در این حالت الگوی سرعت‌های قائم مثبت (منفی) باعث کاهش (افزایش) شیب خطوط دمای بالقوه و افزایش (کاهش) شیو دما و در نهایت جبهه‌زایی ناشی از کج‌شدگی مثبت (منفی) شده است. اثر کج‌شدگی طبق رابطه آن با چپش افقی سرعت قائم و علامت شیو دمای بالقوه، با حرکت در راستای افقی و قائم هم‌خوانی دارد. نکته قابل توجه دیگر آن است که علامت جمله کج‌شدگی مخالف علامت مقادیر جبهه‌زایی ناشی از دگرشکلی است؛ یعنی در قسمت‌هایی که جبهه‌زایی مثبت مربوط به دگرشکلی مشاهده می‌کنیم، جبهه‌زایی منفی مربوط به کج‌شدگی قرار گرفته و عکس آن نیز صادق است. در واقع، در این سامانه دو جمله دگرشکلی و کج‌شدگی مخالف یکدیگر عمل می‌کنند. به بیانی دیگر، هم‌گرایی در سطوح زیرین با افزایش شیو افقی دما منجر به مقدار مثبت جمله دگرشکلی می‌شود و از سوی دیگر، این هم‌گرایی سرعت‌های قائم مثبت ایجاد می‌کند و همین سرعت‌های قائم مثبت با کاهش شیب خطوط هم‌دما در راستای قائم، باعث کم‌شدن شیو افقی دما و در نتیجه ایجاد مقادیر منفی جمله کج‌شدگی می‌شوند. در اجرای WTF، مکان مقادیر کج‌شدگی با تغییر جهت راستای جبهه سطوح زیرین، مشابه الگوی حرکت‌های قائم تغییر یافته و مقادیر منفی

است (شکل آورده نشده است). با کاهش فرونشست هوای خشک پوشن سپهری، مقادیر رطوبت نسبی سطوح زیرین در این ناحیه بیشتر می‌شود و در نتیجه، افزایش رطوبت نسبی باعث آزاد شدن بیشتر گرمای نهان شده و سرعت‌های بالاسوی بزرگ‌تری را به وجود می‌آورد. علاوه بر این، در اجرای WTF و با حذف تاشدگی وردایست، از شدت پایداری ایستایی در زیر ناحیه آن کاسته شده و سرعت‌های قائم در سطوح زیرین به شدت ضعیف می‌شوند (شکل ارائه نشده است).

#### ۳-۴. تابع جبهه‌زایی در سطوح زیرین

به منظور تحلیل جملات تابع جبهه‌زایی مربوط به سامانه اول که با استفاده از خروجی مدل در شبیه‌سازی CTL محاسبه شده‌اند، ابتدا به بررسی جمله دگرشکلی (رابطه ۱) در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال می‌پردازیم. در شکل ۵-الف، مقادیر مثبت بسیار بزرگ جمله دگرشکلی در پایین دست ناوه دیده می‌شود؛ البته مقادیر منفی نیز در امتداد جبهه در کنار این مقادیر مثبت و در ضلع گرم جبهه وجود دارد. با توجه به شکل ۵-د، جریان‌های هم‌شاری (واشاری) با نزدیک (دور) کردن پربندهای هم‌دمای بالقوه در راستای جبهه، مقادیر مثبت (منفی) جبهه‌زایی (جبهه‌زدایی) ناشی از دگرشکلی را به وجود آورده و با افزایش (کاهش) شیو شدید افقی دما، جبهه سطوح زیرین را تقویت (تضعیف) می‌کند. در اجرای WTF (شکل ۶-الف)، جمله دگرشکلی نزدیک مرکز حذف تاشدگی واقع در پایین دست ناوه و در عرض‌های پایین (نزدیک مرکز ناوه) در اثر کاهش شیو افقی دمای بالقوه و کاهش سرعت‌های افقی، با مقادیر مثبت کوچک دیده می‌شود. این مقادیر نسبت به اجرای کنترلی در عرض‌های پایین تر و نزدیک مرکز ناوه ضعیف تر افزایش یافته است. طبق الگوی واگرایی در اجرای WTF (شکل ارائه نشده است)، تضعیف هم‌گرایی‌ها در عرض‌های پایین تر (نزدیک مرکز ناوه) با افزایش فاصله پربندهای هم‌دما (کاهش شیو دمای بالقوه) همراه بوده و در نتیجه اثر هم‌شاری در این ناحیه

آن بزرگ‌تر می‌شود (شکل ۶-ب). در بخش حرکت‌های قائم دیدیم که سرعت‌های بالاسو همراه با تغییر الگوی جبهه در سطوح زیرین در اجرای WTF، افزایش پیدا می‌کنند. با کاهش حرکت‌های پایین‌سو و افزایش حرکت‌های بالاسو (یعنی کاهش بیشتر شیو دما) در اجرای WTF، مقادیر منفی جمله کج‌شدگی افزایش می‌یابد.

در شکل ۵-ج، جمله گرمایش بادررو (رابطه ۳) در سطوح زیرین در اجرای CTL، با وجود آهنگ گرمایش (شکل ۴-ج) دارای مقادیر منفی نسبتاً بزرگ و مثبت کمتر در طول جبهه است. جبهه‌زایی حاصل از گرمایش بادررو نسبت به جملات دگرشکلی و کج‌شدگی در سطوح زیرین بسیار بزرگ‌تر است. در شکل ۵-ج، آهنگ گرمایش با مقادیر مثبت در محدوده سرعت‌های قائم مثبت و رطوبت نسبی بیش از ۹۰ درصد دیده می‌شود. با ایجاد گرمایش بادررو در راستای جبهه و نزدیک به جبهه سرد، شیو دما در طول جبهه کاهش یافته و در نتیجه مقدار منفی تابع جبهه‌زایی به وجود آمده است. به علاوه، براساس رابطه (۳)، با توجه به افزایش دمای بالقوه از غرب به شرق  $\partial\theta/\partial x > 0$  و با حرکت به سمت شرق، ابتدا مقدار  $d\theta/dt$  افزایش و سپس کاهش می‌یابد؛ در نتیجه مقادیر مثبت و منفی جمله گرمایش بادررو (شکل ۵-ج) در یک راستا و تقریباً در جلوی جبهه سرد سطوح زیرین ایجاد می‌شود. بدین ترتیب می‌توان گفت که بسته به مکان ایجاد گرمایش بادررو، مقدار آن می‌تواند باعث تقویت و یا تضعیف جبهه سطوح زیرین شود. جمله جبهه‌زایی گرمایش بادررو در اجرای WTF با حذف تا شدگی وردایست با مقادیر مثبت بزرگ‌تری مشاهده می‌شود (شکل ۶-ج) که مطابقت خوبی با افزایش رطوبت نسبی و به تبع آن آهنگ گرمایش بادررو در هنگام حذف تا شدگی وردایست دارد. این جمله با مقادیر بزرگ‌تری در پایین‌دست ناوه و در عرض‌های بالاتر، مشابه الگوی گرمایش بادررو، به چشم می‌خورد.

جمله جبهه‌زایی قائم (رابطه ۴) در اجرای CTL (شکل ۵-د)، با مقادیر مثبت بسیار زیاد در راستای شیو افقی دما و

در پایین‌دست ناوه دیده می‌شود. این جمله به دلیل بزرگ بودن شیو قائم دما نسبت به شیو افقی آن بسیار بزرگ‌تر از جمله‌های دیگر جبهه‌زایی (در حالت دو بعدی و افقی) است. طبق رابطه جبهه‌زایی قائم، این جمله متأثر از جمله دگرشکلی، کج‌شدگی و گرمایش بادررو در راستای قائم است. در نتیجه برای بررسی تغییرات این جمله باید اثر مجموع جملات دیگر را در نظر گرفت که از این‌رو تحلیل را پیچیده می‌کند. با محاسبه جملات مختلف مؤثر بر جبهه‌زایی قائم در رابطه (۴) و مقایسه آنها با یکدیگر مشاهده می‌شود که جملات دوم و سوم در این رابطه دارای بیشترین تأثیر بر جبهه‌زایی قائم هستند و می‌توان مقادیر مثبت جبهه‌زایی قائم را به کم‌شدن شیو قائم دمای بالقوه بر اثر افزایش سرعت افقی نسبت به راستای قائم (چینش قائم سرعت افقی) نسبت داد. بنابراین به دلیل مثبت بودن تغییرات  $u$  و  $v$  نسبت به ارتفاع، گردش به وجود آمده در اثر آن باعث افزایش شیو قائم دما شده است. به عبارتی دیگر، از آنجا که دو جمله فوق در واقع اثر دگرشکلی در راستای قائم هستند، جمله جبهه‌زایی قائم بیشتر تحت تأثیر دگرشکلی در راستای قائم تغییر می‌کند. در اجرای WTF (شکل ۶-د)، مقادیر مثبت کم و زیاد جبهه‌زایی قائم در پایین‌دست ناوه و در عرض‌های پایین‌تر و بالاتر به ترتیب کمتر و بسیار بیشتر شده است. با توجه به عوامل مختلف مؤثر بر این جمله، با کاهش سرعت افقی و شیوهای قائم و افقی دمای بالقوه در عرض‌های پایین‌تر، مقدار جبهه‌زایی قائم در این ناحیه کمتر شده است. همچنین با تغییر الگوی شیو دمای بالقوه در عرض‌های بالاتر در سطوح زیرین، مقدار جبهه‌زایی قائم در اثر افزایش دگرشکلی و گرمایش بادررو افزایش یافته است. در نهایت، اثر مجموع جملات تابع جبهه‌زایی، با در نظر گرفتن بزرگی مقدار جمله جبهه‌زایی قائم در این سامانه، مطابق این جمله بوده و دارای مقدار مثبت زیاد در راستای جبهه سطوح زیرین است (شکل ۸-الف)؛ با اضافه شدن دیگر جملات، مقدار تابع جبهه‌زایی فقط به اندازه کوچکی بزرگ‌تر می‌شود. الگوی مجموع جملات تابع

سامانه دارای بزرگی یکسان هستند. جمله جبهه‌زایی قائم، مشابه سامانه اول، مقادیر مثبت بیشتری از جملات دگرشکلی و کج‌شدگی دارد؛ اما نسبت به سامانه اول، این مقادیر کوچک‌تر است که دلیل آن کوچک‌تر بودن سرعت‌های افقی و شیو دما می‌باشد. با حذف تاشدگی وردایست، جمله جبهه‌زایی قائم در بیشتر مکان‌ها در پایین‌دست ناوه کاهش می‌یابد. سرعت‌های قائم مثبت و رطوبت نسبی بیش از ۹۰ درصد در پایین‌دست ناوه و در ناحیه‌ای محدود موجب آزاد شدن گرمای نهان شده و در نتیجه آن جمله گرمایش بادرو با مقادیر بالا ایجاد شده است. مقادیر منفی جمله گرمایش بادرو نقش غالب داشته و الگوی ثابتی در دو شبیه‌سازی دیده می‌شود که می‌توان آن را به الگوی ثابت آزاد شدن گرمای نهان نسبت داد. همچنین این جمله در ناحیه‌ای محدود بسیار بزرگ‌تر از جملات دیگر تابع جبهه‌زایی است و برخلاف سامانه اول، مقادیر بزرگ‌تری از جمله جبهه‌زایی قائم داشته و در نواحی محدودی نقش غالب در جبهه‌زایی را ایفا می‌کند.

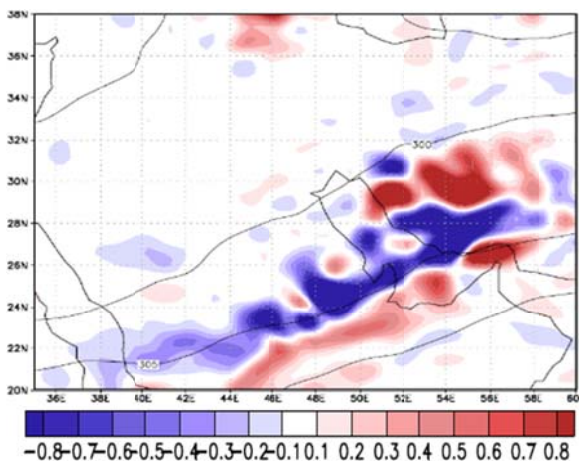
سامانه سوم با ناوه‌ای عمیق در شمال‌غرب ایران همراه با مقادیر مثبت بی‌هنجاری PV این ناحیه را تحت تأثیر قرار داده است. برخلاف سامانه اول، جمله دگرشکلی در بالادست ناوه دارای مقادیر بزرگ‌تری است و دلیل آن بیشتر بودن سرعت و شیو افقی دما در بالادست ناوه می‌باشد. در اجرای WTF، مقادیر مثبت این جمله کاهش یافته است. جمله کج‌شدگی از بالادست تا پایین‌دست ناوه دارای علامت مثبت بوده و به‌صورت جبهه‌زایی عمل می‌کند. براساس الگوی سرعت‌های قائم، این مقادیر مثبت دقیقاً منطبق بر حرکت‌های پایین‌سو هستند؛ از این‌رو می‌توان نتیجه گرفت که در الگوی دمایی این سامانه، حرکت‌های نزولی منجر به مقادیر مثبت جمله کج‌شدگی شده‌اند. در شبیه‌سازی WTF، با کاهش حرکت‌های پایین‌سو، مقادیر مثبت یاد شده بیشتر در مرکز ناوه کاهش می‌یابند. همانند دو سامانه دیگر، سرعت‌های افقی و شیو دما با حذف تاشدگی وردایست در سامانه سوم تضعیف

جبهه‌زایی در اجرای WTF نیز به‌علت بزرگ‌تر بودن مقدار جبهه‌زایی قائم در این تابع، مطابق جبهه‌زایی قائم با مقدار مثبت زیاد در راستای جبهه تغییر کرده است (شکل ۸-ب).

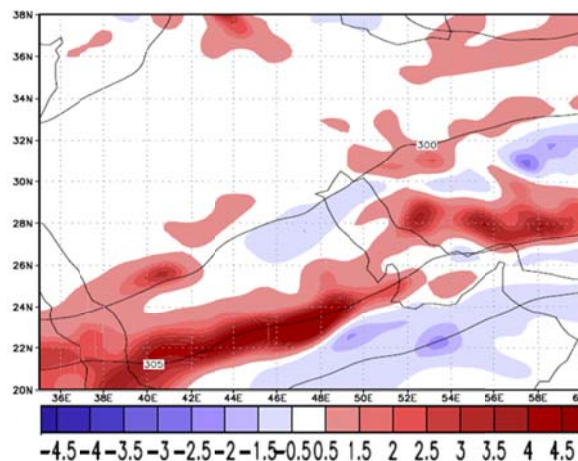
در بررسی جملات تابع جبهه‌زایی در دو سامانه دیگر بیشتر به تفاوت این جملات در مقایسه با سامانه اول و با یکدیگر پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است برای اختصار، شکل‌های مربوط به این دو سامانه ارائه نشده است. سرعت قائم مثبت در هر دو اجرا در سامانه دوم، برخلاف سامانه اول، الگوی ثابتی دارد ولی در اجرای WTF مقدار سرعت‌های قائم منفی مشابه سامانه اول کاهش پیدا کرده است. جمله دگرشکلی در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال بیشتر با علامتی مثبت در راستای پربندهای هم‌دمای بالقوه در پایین‌دست ناوه ظاهر می‌شود. با مقایسه نتایج دو شبیه‌سازی این سامانه، مشاهده می‌شود که الگوی جمله دگرشکلی، برخلاف سامانه اول، ثابت مانده است؛ زیرا در سامانه دوم گرمای نهان بسیار کمتر بوده و در ناحیه‌ای محدود آزاد شده است. از این‌رو الگوی دمای بالقوه در پایین‌دست ناوه تغییر نکرده و الگوی جبهه‌زایی ثابت است. همچنین مقادیر مثبت و منفی جمله دگرشکلی در پایین‌دست ناوه در اجرای WTF کاهش پیدا کرده است. این کاهش مقادیر دگرشکلی ناشی از کاهش سرعت‌ها، تضعیف هم‌شاری و شیو افقی دما در بیشتر زمان‌ها دیده می‌شود. جمله کج‌شدگی، برخلاف سامانه اول، با علامتی مثبت در پایین‌دست ناوه دیده می‌شود. به‌علاوه، جمله کج‌شدگی در همه مکان‌ها با الگویی ثابت در اجرای WTF افزایش اندکی یافته که با الگوی ثابت سرعت قائم که پیش‌تر به آن اشاره شد، تطابق دارد. نکته قابل‌توجه دیگر آن است که برخلاف سامانه اول، جملات دگرشکلی و کج‌شدگی علامتی مشابه در نواحی مختلف دارند؛ زیرا الگوی دما به‌گونه‌ای است که هم‌گرایی و حرکت‌های بالاسو توأم با هم، شیو دما را افزایش می‌دهند. همچنین برخلاف سامانه اول، مقادیر کج‌شدگی و دگرشکلی به‌دلیل بزرگ‌تر بودن سرعت‌های قائم در این

مرکز آن) کاهش یافته است. جمله گرمایش بادررو نیز با مقادیر مثبت بزرگی در سطوح زیرین تنها در چند ناحیه کوچک، برخلاف سامانه اول که ناحیه آن نسبتاً گسترده بود، به چشم می خورد. در اجرای WTF این ناحیه کوچک با افزایش رطوبت و آزادشدن گرمای نهان مقداری بزرگ تر پیدا می کند.

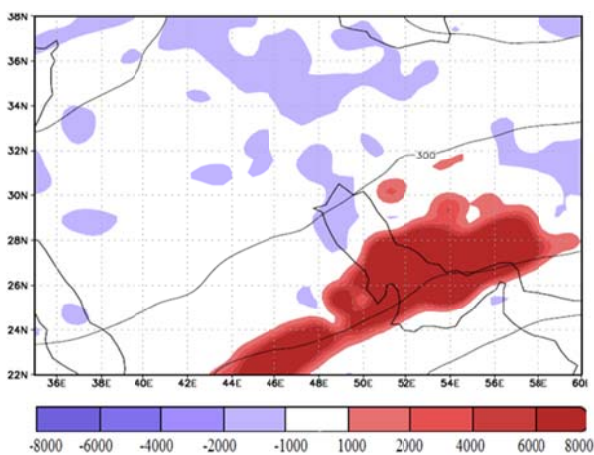
می شوند؛ اما این سامانه، برخلاف دو سامانه دیگر، دارای سرعت های قائم بیشتری است. لذا جمله کج شدگی مقادیر قابل مقایسه ای با جمله دگرشکلی دارد. جمله جبهه زایی قائم با مقادیر مثبت در راستای پربندهای همدمای بالقوه از بالادست تا پایین دست ناوه دیده می شود. در اجرای WTF، مقادیر جبهه زایی قائم در کل ناحیه ناوه (بیشتر در



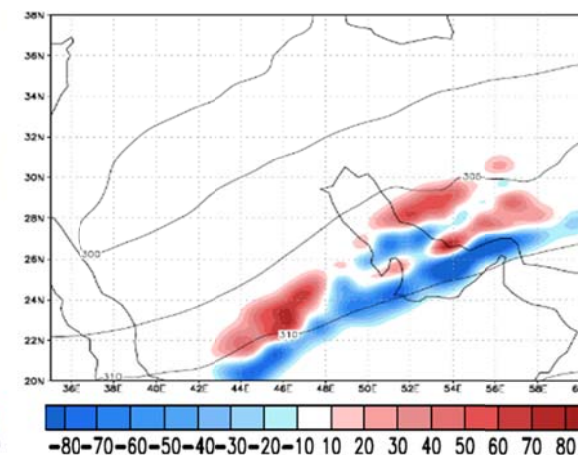
(ب)



(الف)

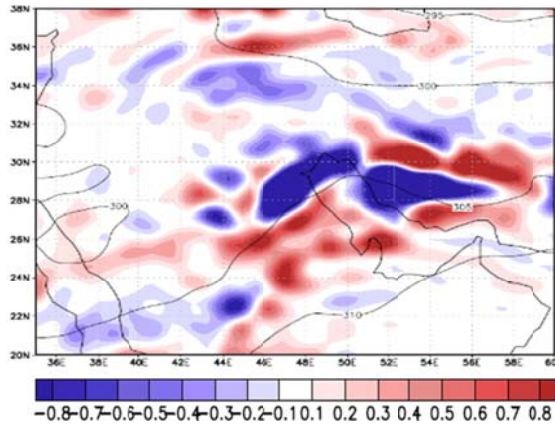


(د)

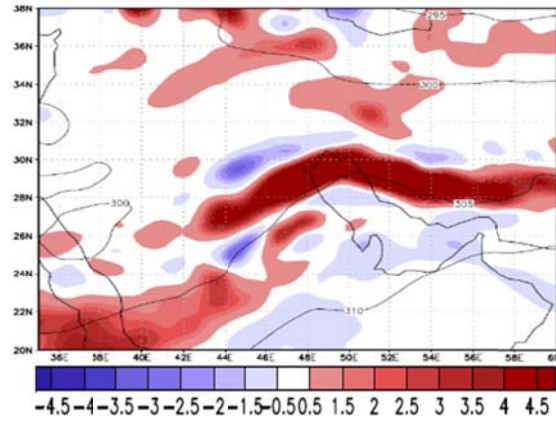


(ج)

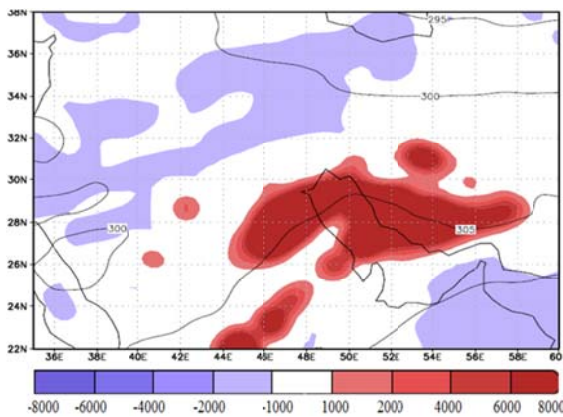
شکل ۵. توزیع افقی جملات تابع جبهه زایی شامل: (الف) دگرشکلی، (ب) کج شدگی، (ج) گرمایش بادررو، (د) جبهه زایی قائم (سایه-روشن رنگی با یکای  $10^{-11} \text{ Km}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ) همراه با پربندهای دمای بالقوه در تراز  $700 \text{ hPa}$ ، مربوط به اجرای CTL در ساعت  $0600 \text{ UTC}$  روز ۲۵ دسامبر ۲۰۱۵.



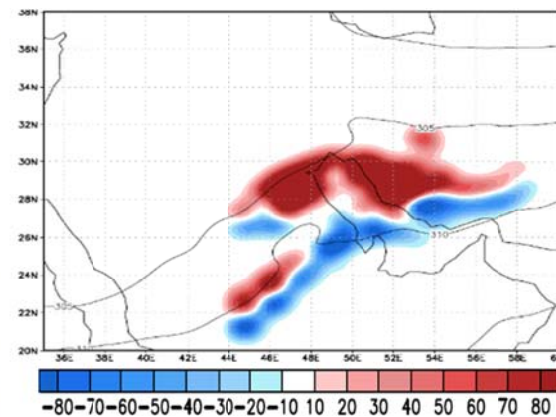
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۶. مشابه شکل ۵، اما برای اجرای WTF.

(شکل ۳-ج)، چینش باد افقی نیز بسیار شدت یافته است. در نتیجه با افزایش ارتفاع، جمله دگرشکلی در راستای جنبه افزایش نشان می‌دهد. در نیم‌رخ قائم، مقادیر منفی جمله دگرشکلی در ترازهای زیرین بسیار کوچک بوده و در برابر مقادیر مثبت می‌توان از آنها چشم‌پوشی کرد. در اجرای WTF (شکل ۷-ه)، فاصله پرندهای هم‌دمای بالقوه افزایش و شیب و شیو این پرندها در راستای جنبه سطوح زیرین کاهش می‌یابد. همچنین تاشدگی وردایست کم‌عمق شده و همراه با آن جنبه سطوح زیرین ضعیف‌تر می‌شود. با حذف تاشدگی وردایست، در اثر تضعیف سرعت‌های افقی، می‌توان کاهش مقادیر دگرشکلی در راستای شیو دمای بالقوه را در سطوح مختلف در نیم‌رخ قائم این جمله مشاهده کرد. به‌علاوه، شیب خطوط

۴-۴. تابع جنبه‌زایی در سطوح زیرین

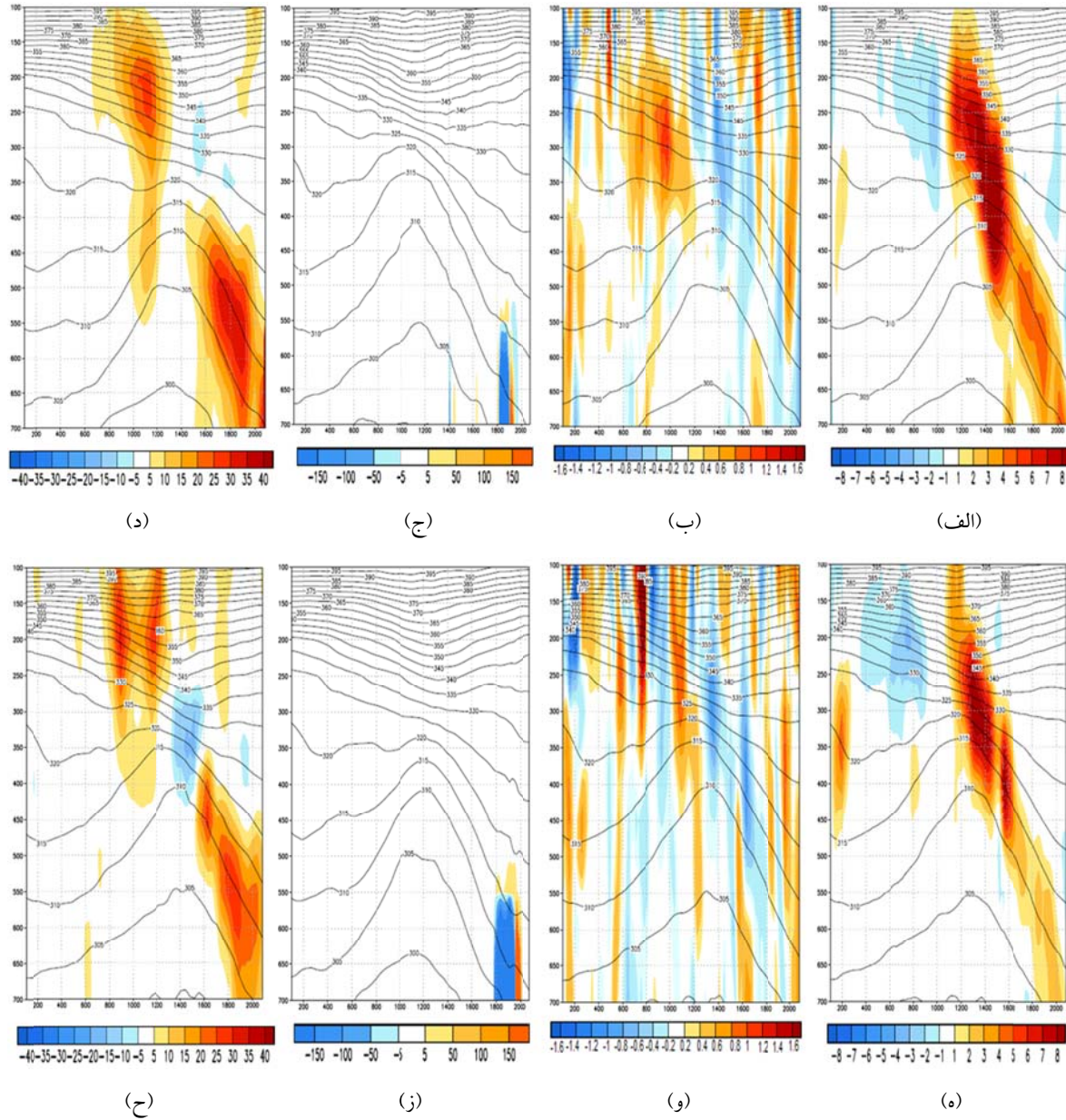
در نیم‌رخ قائم جمله دگرشکلی و دمای بالقوه واقع بر خط افقی BB' در شکل ۳-الف، در سطوح زیرین از اجرای CTL مربوط به سامانه اول، مقادیر مثبت دگرشکلی در راستای شیوهای افقی و قائم دما به چشم می‌خورد (شکل ۷-الف). از این رو تطابق خوبی بین جمله دگرشکلی تابع دوبعدی جنبه‌زایی و مکان جنبه سطوح زیرین وجود دارد. مطابق شکل ۷-الف، با افزایش ارتفاع، هم مقادیر مثبت جمله دگرشکلی در راستای جنبه سطوح زیرین افزایش می‌یابد و هم شیوهای قائم و افقی دما در ناحیه تاشدگی وردایست در اثر نفوذ و کج شدن پرندهای هم‌دمای بالقوه از پوشن سپهر، بیشتر شده‌اند. از طرف دیگر، به دلیل وجود هسته سرعت‌های زیاد در این ناحیه

هم‌دمای بالقوه در این اجرا کم شده و در بعضی از زمان‌ها به حالتی افقی در آمده‌اند که باعث تضعیف شیو افقی دما و کاهش اثر دگرشکلی شده است.

جمله کج‌شدگی (شکل ۷-ب) در راستای جبهه سطوح زیرین دارای مقادیر منفی بوده که با افزایش ارتفاع مقدار آن بزرگ‌تر و علامت آن مثبت می‌شود. این مقادیر، برخلاف مقادیر جمله دگرشکلی، تطابق خوبی با راستای شیو دمای بالقوه ندارند. در نیم‌رخ قائم سرعت قائم واقع بر خط افقی  $BB'$  (شکل ارائه نشده است)، در سمت چپ جبهه سطوح زیرین، حرکت‌های پایین‌سو قرار دارد که با توجه به شیب پربندهای دمای بالقوه، این حرکت‌ها باعث افزایش شیب پربندهای دما و افزایش شیو افقی دما شده و در اثر آن کج‌شدگی مثبت به وجود آمده است. همچنین در سمت راست جبهه، حرکت‌های بالاسو سبب کاهش شیب و شیو پربندهای دمای بالقوه شده‌اند که در نتیجه آن کج‌شدگی منفی در این ناحیه دیده می‌شود. جمله کج‌شدگی در سطوح زیرین مانند سطوح زیرین بسیار کمتر از جمله دگرشکلی است. در اجرای WTF (شکل ۷-و)، نسبت به اجرای CTL، مقادیر مثبت و منفی کج‌شدگی در راستای جبهه سطوح زیرین کمتر شده است؛ بدین‌صورت که با کاهش سرعت‌های افقی در جریان جتی، گردش قائم اطراف آن نیز تضعیف می‌شود. با حذف تا شدگی و ردايست، حرکت‌های پایین‌سو کاهش یافته و در نتیجه شیب و شیو پربندهای دمای بالقوه کم شده و اثر کج‌شدگی در سطوح زیرین و میانی ضعیف می‌شود. در نیم‌رخ قائم جمله گرمایش بادرو (شکل‌های ۷-ج و ۷-ز)، به دلیل آزاد شدن گرمای نهان در ترازهای زیرین و ردسپهر (نزدیک لایه مرزی) و دورتر از شرق جبهه سطوح زیرین، مقادیر جمله گرمایش بادرو مربوط به سطوح زیرین در همه زمان‌ها در اجراهای CTL و

WTF نزدیک به صفر است. نکته قابل‌توجه آن که گرمایش اثری قوی و غیرمستقیم در جبهه سطوح زیرین با ایجاد حرکت‌های بالاسو و تغییر میدان سرعت آزمینگرد موج کژ فشار دارد. جمله جبهه‌زایی قائم با مقادیر بزرگ مثبت در سطوح زیرین و زیرین در راستای جبهه سطوح زیرین دیده می‌شود (شکل ۷-د) و از این رو تطابق خوبی بین این مقادیر و مکان جبهه سطوح زیرین وجود دارد. همچنین مطابق این شکل، جمله جبهه‌زایی قائم در سطوح زیرین مقادیر بیشتری نسبت به سطوح زیرین دارد. از آنجا که شیو قائم دمای بالقوه دارای اثر قابل‌توجهی بر جمله جبهه‌زایی قائم است، در شکل ۷-د می‌توان سازگاری خوبی بین شیو قائم دمای بالقوه و مقادیر جبهه‌زایی قائم در سطوح زیرین و میانی مشاهده کرد. به‌علاوه، مشابه حالت افقی، جمله دگرشکلی در راستای قائم دارای بیشترین تأثیر در جبهه‌زایی قائم است؛ بدین‌صورت که در اطراف جت و در راستای جبهه سطوح زیرین در اثر تغییر شدید سرعت افقی نسبت به ارتفاع، مقادیر جمله جبهه‌زایی قائم ظاهر شده‌اند. مشابه حالت افقی، جمله جبهه‌زایی قائم نسبت به بقیه جملات، اثر غالب در جبهه سطوح زیرین دارد. در نتیجه الگوی تابع جبهه‌زایی کل در راستای جبهه سطوح زیرین (شکل ۸-ج) کاملاً مشابه الگوی جمله جبهه‌زایی قائم بوده و با اضافه شدن جملات دیگر، تنها مقدار تابع جبهه‌زایی قدری بزرگ‌تر شده است. جمله جبهه‌زایی قائم در اجرای WTF با مقادیر بزرگ مثبت در راستای جبهه سطوح زیرین قرار دارد (شکل ۷-ح). در مقایسه با اجرای CTL، مقادیر آن تقریباً در راستای جبهه سطوح زیرین کوچک شده است. الگوی جبهه‌زایی کل (شکل ۸-د) در اجرای WTF همانند اجرای CTL از الگوی جبهه‌زایی قائم تبعیت کرده و به‌طور کلی کاهش می‌یابد.





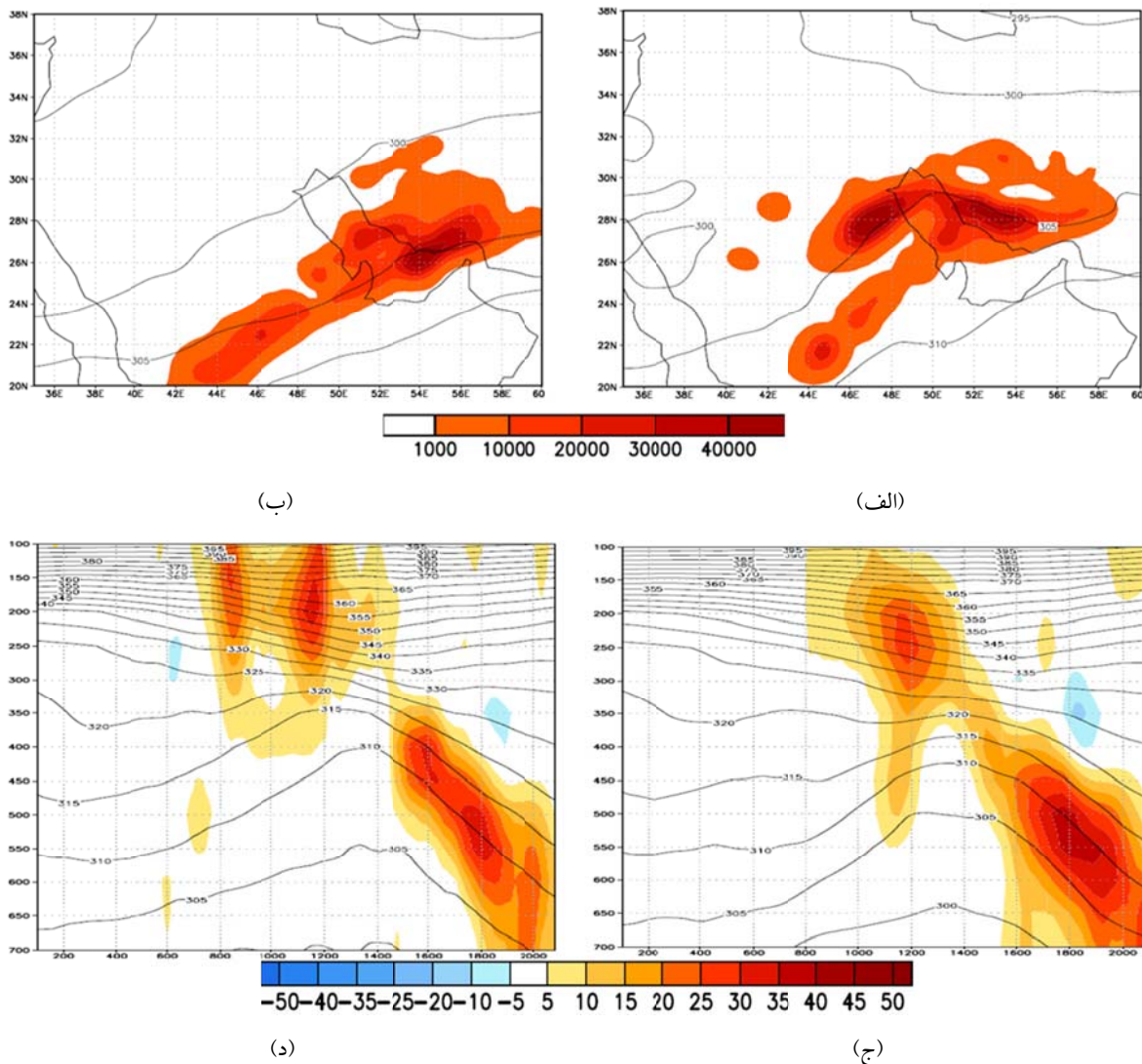
شکل ۷. نیم‌رخ قائم فشاری جملات تابع جبهه‌زایی واقع بر روی خط افقی BB' در شکل ۳-الف شامل (الف) دگرشکلی، (ب) کج‌شدگی، (ج) گرمایش بادررو و (د) جبهه‌زایی قائم (سایه-روشن رنگی با یکای  $10^{-1} \text{ Km}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ) همراه با پریندهای دمای بالقوه مربوط به اجرای CTL و مناظر آنها به ترتیب شکل‌های (ه)، (و)، (ز) و (ح) مربوط به اجرای WTF در ساعت ۰۶:۰۰ UTC روز ۲۵ دسامبر ۲۰۱۵.

ضعیف‌تر بودن جریان جتی کمتر است. در اجرای WTF، جمله دگرشکلی کاهش چشم‌گیری داشته که این تغییر در همه زمان‌ها دیده می‌شود. جمله کج‌شدگی با شیو دما در سطوح زیرین هم‌خوانی خوبی ندارد و مقادیر آن در سطوح زیرین به علت بزرگ‌تر بودن سرعت‌های قائم بیشتر است و در سطوح زیرین مقادیر کوچک‌تری

جملات تابع جبهه‌زایی سطوح زیرین مربوط به سامانه‌های دوم و سوم نیز محاسبه شده‌اند، اما در اینجا برای اختصار تنها به توضیح نتایج آنها پرداخته و شکل‌های مربوطه ارائه نمی‌شود. در نیم‌رخ قائم فشاری مربوط به سامانه دوم، جمله دگرشکلی با علامتی مثبت در راستای شیو دما قرار دارد؛ ولی تطابق آنها نسبت به سامانه اول، به دلیل

حرکت‌های صعودی بیشتر، اثر کج‌شدگی افزایش می‌یابد. جمله جبهه‌زایی قائم با مقادیر مثبت نسبتاً بزرگ در راستای شیو دما قرار گرفته و در جبهه‌زایی سطوح زیرین نقش غالب را در بین دیگر جملات دارد. با حذف تاشدگی و رایست، جمله جبهه‌زایی قائم کاهش چشم‌گیری پیدا می‌کند. مشابه سامانه اول، جمله گرمایش بادررو دارای مقادیر ناچیزی در سطوح زیرین است.

نسبت به جمله دگرشکلی دارد. همچنین با توجه به الگوی سرعت‌های قائم در جلوی جبهه سطوح زیرین، حرکت‌های صعودی مشاهده می‌شود که در بعضی از نواحی در سطوح زیرین در کنار حرکت‌های نزولی قرار گرفته و الگوی جمله کج‌شدگی را پیچیده کرده است. با حذف تاشدگی، جمله کج‌شدگی در سطوح زیرین کاهش پیدا کرده است؛ اما در سطوح زیرین، با آزادشدن گرمای نهان و در نتیجه ایجاد



شکل ۸. (الف) و (ب) به ترتیب توزیع افقی تابع جبهه‌زایی کل (سایه-روشن رنگی با یکای  $10^{-11} \text{ Km}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ) و دمای بالقوه (پرندها با فاصله ۵K) مربوط به اجراهای CTL و WTF. (ج) و (د) مشابه (الف) و (ب) اما برای نیمرخ قائم فشاری واقع بر روی خط افقی BB' برای ساعت UTC ۰۶:۰۰ روز ۲۵ دسامبر ۲۰۱۵.

وردایست، جمله کج‌شدگی به‌صورت چشم‌گیری کاهش می‌یابد. جمله جبهه‌زایی قائم نقش غالب را در جبهه‌زایی سطوح زیرین، همانند سامانه اول، ایفا می‌کند؛ اما برخلاف این سامانه به‌دلیل اثر مشترک دگرشکلی و کج‌شدگی با علامت‌های منفی و مثبت ظاهر شده است. در اجرای WTF، جبهه‌زایی قائم به‌طور کلی کاهش می‌یابد. همچنین جمله گرمایش بادررو در این سامانه مانند دو سامانه دیگر در سطوح زیرین صفر است. جداول ۲ و ۳ تغییرات جملات تابع جبهه‌زایی در سطوح زیرین و زیرین در سه سامانه، با حذف تاشدگی وردایست را به‌طور خلاصه نشان می‌دهد.

برخلاف سامانه‌های اول و دوم، در سامانه سوم، علاوه بر این‌که هم‌خوانی خوبی بین شیو افقی دما و جمله دگرشکلی مشاهده نمی‌شود، مقادیر منفی نسبتاً بزرگی هم در راستای شیو دما وجود دارد. این مقادیر منفی در اثر واگرایی‌ها در سطوح زیرین به‌وجود آمده است. در اجرای WTF، مقادیر منفی این جمله در اثر کاهش سرعت‌های افقی و در نتیجه تضعیف و اشاری کوچک‌تر شده است. جمله کج‌شدگی به‌دلیل بزرگی سرعت‌های قائم، هم‌مقدار جمله دگرشکلی بوده و مقادیر مثبت آن دارای تطابق نسبتاً خوبی با جبهه سطوح زیرین است. با حذف تاشدگی

جدول ۲. تغییرات جملات مختلف تابع جبهه‌زایی با حذف تاشدگی وردایست در سطوح زیرین برای سه سامانه جبهه‌ای.

تابع جبهه‌زایی	دگرشکلی	کج‌شدگی	گرمایش بادررو	جبهه‌زایی قائم	کل
سامانه اول	کاهش / مثبت	افزایش / منفی	افزایش / مثبت	افزایش / مثبت	افزایش / مثبت
سامانه دوم	کاهش / مثبت	کاهش / مثبت	افزایش / منفی	کاهش / مثبت	کاهش / مثبت
سامانه سوم	کاهش / مثبت	کاهش / مثبت	افزایش / مثبت	کاهش / مثبت	کاهش / مثبت

جدول ۳. مانند جدول ۲ ولی در سطوح زیرین.

تابع جبهه‌زایی	دگرشکلی	کج‌شدگی	گرمایش بادررو	جبهه‌زایی قائم	کل
سامانه اول	کاهش / مثبت	افزایش / منفی	صفر	کاهش / مثبت	کاهش / مثبت
سامانه دوم	کاهش / مثبت	کاهش / مثبت	صفر	کاهش / مثبت	کاهش / مثبت
سامانه سوم	کاهش / مثبت	کاهش / مثبت	صفر	کاهش / مثبت	کاهش / مثبت

## ۵. نتیجه گیری

مثبت، جبهه‌زایی حاصل از دگرشکلی مثبت و کج‌شدگی با علامت مثبت می‌شود. از سوی دیگر، جبهه‌زایی منفی حاصل از کج‌شدگی را کاهش می‌دهد. دسته دوم اثر تا شدگی و ردايست تنها در جبهه سطوح زیرین است، بدین صورت که سرعت قائم مثبت را در جلوی جبهه سرد و جبهه‌زایی حاصل از گرمایش بادررو را تضعیف می‌کند. دسته سوم مربوط به اثر تا شدگی و ردايست تنها بر جبهه سطوح زیرین است، وضعیتی که موجب تقویت جریان جتی شده و سرعت قائم مثبت را با تقویت گردش‌های قائم اطراف جت افزایش می‌دهد.

## مراجع

باستانفرد، ب.، ۱۳۸۷، بررسی دینامیکی جبهه‌زایی سطحی در سه سامانه چرخندی همراه با جبهه بر روی خاورمیانه و ایران. پایان‌نامه کارشناسی ارشد هواشناسی، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.

خانسالاری، س.، ۱۳۹۵، تعیین سازوکارهای واداشت رویدادهای بارشی مهم سرد در منطقه تهران از دیدگاه تاوایی پتانسیلی. رساله دکتری هواشناسی، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.

غلامی، س.، ۱۳۹۰، مطالعه دینامیکی تأثیرات عوامل جوئی ترازهای زیرین بر جبهه‌زایی ترازهای زیرین. پایان‌نامه کارشناسی ارشد هواشناسی، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.

میرزائی، م.، ۱۳۸۵، بررسی دینامیکی جبهه‌زایی سطوح زیرین در سه سامانه چرخندی بر روی خاورمیانه و ایران. پایان‌نامه کارشناسی ارشد هواشناسی، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.

با توجه به این که بسیاری از سامانه‌هایی که خاورمیانه و ایران را تحت تأثیر قرار می‌دهند همراه با تا شدگی و ردايست و جبهه‌های سطوح زیرین و زیرین می‌باشند، لذا در این پژوهش اثر بی‌هنجاری مثبت تاوایی پتانسیلی مربوط به تا شدگی و ردايست بر جبهه‌زایی سطوح زیرین و زیرین این مناطق مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور سه سامانه همراه با ناوه عمیق و تا شدگی و ردايست، که بارشی بیش از ۵۰ میلی‌متر بر روی ایران داشتند، انتخاب شد. به‌طور کلی نتایج نشان داد که جمله جبهه‌زایی قائم در سطوح زیرین با مقادیر مثبت بزرگ اثر جبهه‌زایی دارد و مشابه مطالعه مک و همکاران (۲۰۱۶)، این جمله به دلیل بزرگ بودن شیو قائم دما نسبت به شیو افقی آن، بسیار بیشتر از جمله‌های دیگر جبهه‌زایی (دگر شکلی، کج‌شدگی و گرمایش بادررو) در حالت دو بعدی و افقی است. اثر گرمایش بادررو بر جبهه‌زایی در سطوح زیرین، مانند نتایج مک و همکاران (۲۰۱۶)، نزدیک به صفر است. همچنین جمله کج‌شدگی در سطوح زیرین بسیار کمتر از جمله دگرشکلی است؛ نتیجه‌ای که در بررسی جریان جنوب‌غربی توسط شولتز و داسول (۱۹۹۹) نیز مشاهده می‌شود. براساس نتایج پژوهش حاضر، اثر تا شدگی و ردايست بر جبهه‌زایی سطوح زیرین و زیرین را می‌توان به سه دسته به شرح زیر تقسیم کرد. دسته اول اثر مشترک آن در دو جبهه سطوح زیرین و زیرین است که باعث تقویت سرعت افقی و عمیق‌تر شدن ناوه، کاهش دما و رطوبت در ناوه و افزایش شیو دمایی بالقوه در راستای جبهه می‌شود. همچنین سرعت قائم منفی را افزایش داده و در نتیجه سبب افزایش جبهه‌زایی قائم

Bluestein, H. B., 1993, Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes. Volume II: Observation and Theory of Weather Systems. Oxford University Press, 594 pp.

Davies, H. C. and Rossa, A. M., 1998, PV frontogenesis and upper tropospheric fronts. Mon. Wea. Rev., 126, 1528-1539.

Davies, C. A. and Emanuel, K. A., 1991, Potential vorticity diagnostics of cyclogenesis. Mon. Wea. Rev., 119, 1929-1953.

Emanuel, K. A., Fantini, A. M. and Thorpe, A. J., 1987, Baroclinic instability in an environment of small stability to slantwise moist convection. Part I: Two-dimensional models. J. Atmos. Sci., 44, 1559-1573.

Gray, S. L., 2003, A case study of stratosphere to troposphere transport: The role of convective transport and the sensitivity to model resolution. J. Geophys. Res., 108, 45-90.

Hoskins, B. J., McIntyre, M. E. and Robertson, A.

- W., 1985, On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 111, 877-946.
- Hoskins, B. J., 1982, The mathematical theory of frontogenesis. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 14, 131-151.
- Keyser, D. and Rotunno, R., 1990, On the formation of potential-vorticity anomalies in upper-level jet-front systems. *Mon. Wea. Rev.*, 118, 1914-1921.
- Keyser, D., Reeder, M. J. and Reed, R. J., 1988, A generalization of Petterssen's frontogenesis function and its relation to the forcing of vertical motion. *Mon. Wea. Rev.*, 116, 762-780.
- 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.
- Korner, S. O. and Martin, J. E., 2000, Piecewise frontogenesis from a potential-vorticity perspective: Methodology and a case study. *Mon. Wea. Rev.*, 128, 1266-1288.
- Lang, A. and Martin, J. E., 2012, The structure and evolution of lower stratospheric frontal zones. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 138, 1350-1365.
- Mak, M., Lu, Y. and Deng, Y., 2016, Dynamics of upper-level frontogenesis in baroclinic waves. *J. Atmos. Sci.*, 73, 2699-2714.
- Sanders, F., 1955, An investigation of the structure and dynamics of an intense frontal zone. *G. Meteor.*, 12, 543-552.
- Sanders, F., Bossart, L. F. and Lai, C. C., 1991, Initiation and evolution of an intense upper-level front. *Mon. Wea. Rev.*, 119, 1337-1367.
- Schultz, D. M. and 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., 1999, Conceptual models of upper-level frontogenesis in southwesterly and northwesterly flow. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 125, 2535-2562.
- Sprenger, M., 2007, Numerical piecewise potential vorticity inversion: A user guide for realcase experiments. Thesis for Postgraduate course in computer science FHSS Schweiz., 98 pp.
- Wandish, M. and Nielson-Gammon, J., 2000, A potential vorticity diagnostic approach to upper level frontogenesis within a developing baroclinic wave. *J. Atmos. Sci.*, 57, 3918-3945.

## Dynamical analysis of the effect of tropopause folding on the upper and lower-level frontogenesis

Abdollahi, M.<sup>1</sup>, Ahmadi-Givi, F.<sup>2\*</sup> and Mirzaei, M.<sup>3</sup>

1. M.Sc. Student, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

2. Associate Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

3. Assistant Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 22 Sep 2018, Accepted: 1 Jan 2019)

### Summary

Tropopause folds are intimately linked to upper level frontogenesis and jet stream dynamics. They play an important role for stratosphere-troposphere exchange, the dynamical coupling of upper and lower tropospheric levels, and for generating severe weather events. In this study, the effect of upper-level positive potential vorticity (PV) anomaly on upper- and lower-level frontogenesis over the Middle East and Iran is investigated. In this regard, first three frontal systems associated with deep tropopause folding and strong fronts were selected by using the ECMWF data with the horizontal resolution of  $0.75 \times 0.75$  degrees on the latitude and longitude. Then, PV anomaly was removed by replacing the zonal mean of PV in the study area and inverted to obtain the modified fields. To do this, a program package (PV inversion), comprising several different steps, is used which allows to isolate PV elements and then to study their impact on the atmospheric flow field as well as the temperature distribution. In the next step, the weather research and forecasting (WRF) model was applied by using the ECMWF data to perform two simulations with real (unchanged) and modified data, as initial conditions, in two domains with 9km resolution for the inner domain. Finally, the frontogenesis function terms, including deformation, tilting, diabatic heating and vertical frontogenesis were computed, using the WRF outputs. By comparing the results of the two simulations, we can determine the effect of tropopause folding on the frontogenesis function terms in the upper- and lower levels throughout the lifecycle of the fronts.

Results show that in the absence of tropopause folding, the horizontal and vertical temperature gradients, horizontal velocity, as well as negative vertical velocity are decreased significantly in the upper and lower levels. Also, positive vertical velocity is increased and its pattern is changed mainly in the lower levels. Generally, large positive values of deformation and vertical frontogenesis terms are collocated well with the gradient of potential temperature (frontal zone), and these terms are declined due to decreasing of horizontal velocity and temperature gradient when the fold of tropopause is removed. The tilting term does not have a fixed pattern in the upper and lower levels, and it follows the vertical velocity pattern. By removing the tropopause folding, vertical velocities are changed, thereby having variable effects on the tilting term and the gradient of potential temperature. The diabatic heating term produced by the release of latent heat intensifies ascending motions, and so affects the gradient of potential temperature (frontogenesis) in the lower levels. This term is also increased in the absence of tropopause folding in the lower levels. The other noticeable point is that the diabatic heating term does not significantly affect the frontogenesis in upper levels, because heating mostly takes place in the lower half of the troposphere far to the east of the upper level front. The total amount of frontogenesis function follows the vertical frontogenesis term in the upper and lower levels, and vertical gradient of potential temperature is generally very large. Although, the amount of the diabatic heating term is larger than the vertical frontogenesis term in the lower levels, but it is limited to a small area. Removal of the tropopause fold causes the total amount of frontogenesis function, similar to the vertical frontogenesis term, to decrease throughout the region of the upper-level front, especially in the downstream of the upper-level trough close to the center of tropopause folding omission. The results of the three cases studied here indicate that frontogenesis function terms are considerably more intense in the presence of tropopause folding. Therefore, it is concluded that tropopause folding has a remarkable positive effect on the formation and intensification of the upper-and lower-level fronts.

**Keywords:** Potential vorticity, tropopause folding, frontogenesis, simulation, upper- and lower-level fronts.

---

\*Corresponding author:

ahmadig@ut.ac.ir