

اثر دینامیکی ترازهای بالای جو بر جبهه‌زایی در ترازهای پایین

سیاوش غلامی^{۱*}، الهه اولاد^۲

۱ و ۲- دانشجوی دکتری پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جو

(تاریخ دریافت: ۹۵/۱۱/۰۶، تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۵/۲۵)

چکیده

همگرایی (واگرایی) تراز بالا از طریق حرکات نزولی (صعودی) و واگرایی (همگرایی) تراز پایین با یکدیگر برهمکنش دارند و این حرکات منجر به تشدید یا تضعیف گرادیان دمای سطوح پایین (جبهه‌زایی یا جبهه‌زدایی) می‌شوند. در این تحقیق چرخند جبهه‌ای که در ۱۸ نوامبر ۲۰۰۹ بر روی ایران مستقر بوده است، برای مطالعه انتخاب شد. در مرحله اول مدل WRF با استفاده از داده‌های GFS برای منطقه مورد نظر اجرا شد. در مرحله بعد کمیت‌هایی مانند ارتفاع ژئوپتانسیلی و مؤلفه‌های افقی سرعت باد برای ترازهای ۵۰۰ هکتوپاسکال به بالا در ورودی مدل تغییر داده شد، به این صورت که برای این ترازها به جای داده‌های اصلی از داده‌های ۲۴ ساعت قبل استفاده و از ۵۰۰ هکتوپاسکال به پایین همان داده‌های ساعت مورد نظر استفاده و مدل اجرا شد. جملات تابع جبهه‌زایی مانند جملات هم‌شاری و چینشی برای هر دو اجرای مدل محاسبه و ترسیم شد. مقایسه دو اجرای مدل اختلاف‌هایی را به وضوح در مقادیر تابع جبهه‌زایی و جملات آن نشان داد. اختلاف بیشتر در جبهه سرد مشاهده شد که دارای گرادیان دمایی بزرگ‌تری است. در نهایت دریافتیم که همزمانی حرکات قائم ترازهای پایین با حرکات قائم ترازهای بالا در فرایند جبهه‌زایی تأثیر مستقیم دارد و اگر سرعت جریان جتی تراز بالا در اجرای مدل از طریق مؤلفه‌های افقی سرعت دچار تغییر شود، این تغییر در تک تک جملات تابع جبهه‌زایی نیز دیده می‌شود که نشان از تأثیر به سزای تراز بالا روی جبهه‌زایی سطحی دارد.

کلمات کلیدی: جبهه‌زایی، هم‌شاری، چینش.

مقدمه

سرد ایده‌آل در نظر گرفته شد و توانست شیب جبهه را به دست آورد. در تمایز بین جبهه‌های سرد و گرم مکتب برگن^۲ نقش اساسی ایفا کرده است. جبهه گرم با تحلیل دقیق همدیدی توسط برکنس^۳ (۱۹۱۹) شناسایی شد. جیدل^۴ (۱۹۷۸) نشان داد که معمولاً جبهه سرد سریع‌تر از جبهه گرم منتشر می‌شود و این حالت با فرایند جبهه‌زایی مطابقت دارد. مطالعات بایرز^۵ (۱۹۷۴) نشان داد که سطح جبهه‌ای هر دو جبهه سرد و گرم در سطح زمین گسترش می‌یابند و در راستای قائم دچار کج‌شدگی به سمت هوای سرد می‌شوند. در مدل چرخندی برکنس و سولبرگ^۶ (۱۹۲۱ و ۱۹۲۲) ابرهای پوشنی^۷ جلوی جبهه گرم و ابرهای کومه‌ای^۸ پشت جبهه سرد به نمایش درآمده است. مطالعات بعدی برای نمونه کارهای هاوز^۹ و هابز^{۱۰} (۱۹۸۲) این مدل را تصحیح کردند، بطوریکه نوار بارشی را در بر می‌گیرد اما هنوز اختلاف در نوع ابرها را لحاظ نمی‌کند. آخرین تفسیر این اختلاف‌ها تأکید بر تغییر در جهت انتشار دارد. برگن^{۱۱}

پدیده‌های جوی با اینکه از پیچیدگی خاصی برخوردارند اما همگی پیرو قوانین فیزیکی هستند که بر آن‌ها حکم‌فرماست و اگر وضعیت کنونی متغیرهای اصلی جو از قبیل مؤلفه افقی باد یعنی باد مداری و باد نصف النهاری، مؤلفه قائم باد، دما، فشار، ارتفاع ژئوپتانسیل و رطوبت مشخص باشد، از طریق تدوین روابط ریاضی برگرفته از دینامیک و فیزیک پدیده‌ها می‌توان به وضعیت آینده دست پیدا کرد (مارتین، ۲۰۰۶).

یکی از پدیده‌های مهم جوی، جبهه است که پیش‌بینی آن بر اساس تابع جبهه‌زایی در هواشناسی اهمیت فراوانی دارد و محاسبه روزمره این تابع کمک شایانی در پیش‌بینی مخاطرات جوی و دریایی می‌نماید. ساده‌ترین مدل جبهه‌ای تحت عنوان مدل مارگولس توسط هواشناس استرالیایی ماکس مارگولس^۱ (۱۹۰۶) ارائه شد که در آن یک جبهه

* نگارنده رابط:

s.gholami@inio.ir

1- Max Margules	2 - Bergen	3 - Bjerknes
4- Gidel	5 - Byers	6- Solberg
7 - Stratus	8 - Cumulus	9- Houze
10- Hobbs	11- Bergron	

پایین و بالا و همچنین بارش سنگین همراه با جبهه را به درستی شبیه‌سازی نمودند. گسکن^۷ و همکاران، ۲۰۱۵، از مدل WRF برای شبیه‌سازی عوامل همرفت عمیق در رویداد حدی برف مادرید در سال ۲۰۱۱ استفاده نمودند و نتیجه گرفتند که این همرفت عمیق همراه با جبهه‌زایی شدید بوده است.

مواد و روش‌ها

برای انجام این تحقیق از داده‌های GFS^۸ که یک مدل عددی برای پیش‌بینی وضعیت آب و هوا است و توسط NOAA^۹ اجرا می‌شود، استفاده شد. قابلیت این داده‌ها در مستندسازی مناطق جبهه‌ای در مطالعات پیشین بر روی ایران توسط میرزایی در ۲۰۰۶ (تحلیل و بررسی جبهه‌های ترازهای بالا) و باستانفرد در ۲۰۰۸ (تحلیل و بررسی جبهه‌های ترازهای پایین) به اثبات رسیده است.

برای این منظور کم‌فشاری که در ۱۷ نوامبر ۲۰۰۹ بر روی عراق و عربستان شکل می‌گیرد (شکل ۱) و در ۱۸ نوامبر ۲۰۰۹ روی ایران مستقر می‌شود (شکل ۲)، تحلیل می‌شود. اولین عامل، در شکل‌گیری این جبهه‌ها نقش عمده ترازهای پایین در تقویت این جبهه‌ها است (برای نمونه کار باستانفرد در ۲۰۰۸). عامل دوم خصیصه ترازهای بالا (وردسپهر) در شکل‌گیری و رشد جبهه‌ها است.

تحقیق حاضر با هدف بررسی فرآیندهای درگیر در رشد جبهه‌های مشاهده شده در طول دوره ۱۷ و ۱۸ نوامبر انجام شده است. بنابراین بایستی توجه ویژه‌ای به پیامدهای بالقوه فرآیندهای ترازهای بالا در تشدید جبهه‌زایی شود و فرآیندهای جفت‌شدگی بین جت تراز بالا و گردش آزمینگرد جبهه تراز پایین از طریق اعمال تغییرات در مؤلفه‌های باد ترازهای بالا و نشان دادن این تغییرات بر شیو دمای پتانسیلی و مؤلفه‌های باد تراز پایین چگونه منجر به تغییرات در معادله جبهه‌زایی و به تبع خود جبهه می‌شود. در این مقاله ابتدا موقعیت همدیدی ۱۸ نوامبر ۲۰۰۹ به طور خلاصه معرفی و بررسی می‌شود. سپس نتایج اجرای مدل WRF نسخه 3.4.1 با هسته دینامیکی ARW برای سامانه مورد نظر

(۱۹۳۷) نشان داد که این اختلافات در حضور اصطکاک سطحی منجر به ایجاد جبهه‌های سرد شدیداً شیب‌دار می‌شود ولی در مقابل جبهه گرم با شیب کمتر را نتیجه می‌دهد. بال^۱ (۱۹۶۰) از این اثر یک مدل تحلیلی برای جبهه‌های ساکن ارائه داد اما هاسکینز^۲ و هکلی^۳ (۱۹۸۱) نشان دادند که این مدل تنها برای جبهه‌های سرد کارایی دارد. بعلاوه مدل‌های عددی دارای گسترش جبهه‌ای (ویلیامز^۴ و همکاران (۱۹۸۱)؛ هاسکینز و هکلی (۱۹۸۱) اثبات کردند که ساختار جبهه‌ای نسبت به جهت انتشار نسبتاً حساس است.

ویلیامز و همکاران (۱۹۸۱) پیشنهاد دادند که جبهه‌های گرم از تغییر شکل افقی از نوع برگن (۱۹۲۸) نشأت می‌گیرند و جبهه‌های سرد از جریان‌های چینی ایجاد می‌شوند در حالیکه همانطور که پترسن^۵ (۱۹۵۶) اشاره کرد حرکت چینی برآیند تغییر شکل خالص و چرخش است و شدت جبهه‌زایی جریان‌های افقی مستقل از مؤلفه افقی‌اش است. پس از نقطه نظر جبهه‌زایی یک تغییر شکل چینی هم‌ارز با یک تغییر شکل کششی است. الیاسن^۶ (۱۹۶۲) نشان داد که عامل اصلی اختلاف ساختاری جبهه‌های سرد و گرم اختلاف در تغییرات دمایی در طول آن‌ها است و میدان تغییر شکل آزمینگرد برای جبهه‌های سرد شدیدتر است. جیدل (۱۹۷۸) نشان داد که جبهه‌های سرد شبیه‌سازی شده نسبت به جبهه‌های گرم شبیه‌سازی شده قوی‌تر، کج‌شدگی شدیدتر و دارای سرعت انتشار بیشتر است درحالیکه مدل جبهه‌های گرم در یک واداشت بزرگ مقیاس جبهه‌زدا ایجاد می‌شود. میرزایی (۱۳۸۵) با مطالعه جبهه‌زایی سطوح بالای سه سامانه چرخندی بر روی ایران نشان داد که جملات کج‌شدگی و تغییر شکل مؤلفه نرده‌ای بردار جبهه‌زایی نقش بسزایی در جبهه‌زایی دارند و جمله واگرایی تأثیر کمی در جبهه‌زایی دارد. باستانفرد (۱۳۸۷) با مطالعه جبهه‌زایی سطوح پایین سه سامانه چرخندی بر روی ایران، نشان داد که گرمای نهان آزاد شده در فاز شکل‌گیری جبهه در جبهه‌زایی نقش مثبت دارد و سبب تشدید جبهه می‌شود. یو و همکاران ۲۰۱۵، از مدل WRF برای شبیه‌سازی توفان در منطقه چین استفاده نمودند و با استفاده از مدل ویژگی‌های توفان را در سطوح

7- Gascón

8 - Global Forecast System

9 - National Oceanic and Atmospheric Administration

1 - Ball

2- Hoskins

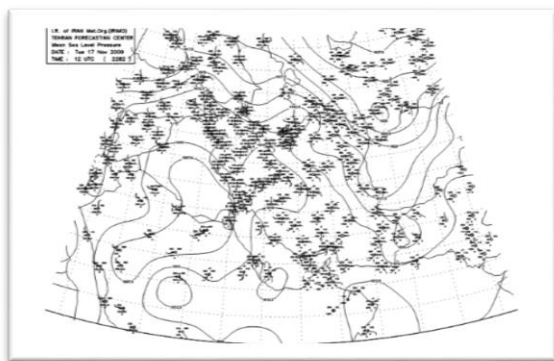
3 - Heckly

4 - Williams

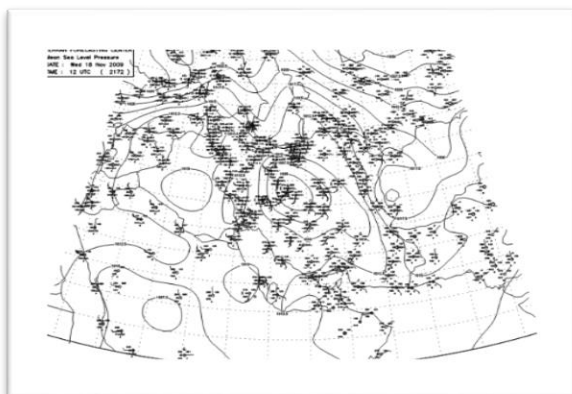
5 - Petterson

6 - Eliasse

۱ و ۲). در ساعت UTC ۰۰ هفدهم نوامبر کم فشار در حال شکل گیری بر روی عربستان است و در ساعت ۱۲ UTC به مرزهای غربی ایران می رسد. در ساعت ۰۰ UTC هیجدهم بر روی ایران استقرار می یابد و در ۱۲ UTC به اوج فعالیت خود می رسد.



شکل ۱- نقشه سطح زمین برای ساعت ۱۲ UTC هفدهم نوامبر (سازمان هواشناسی ایران)



شکل ۲- نقشه سطح زمین برای ساعت ۱۲ UTC هیجدهم نوامبر (سازمان هواشناسی ایران)

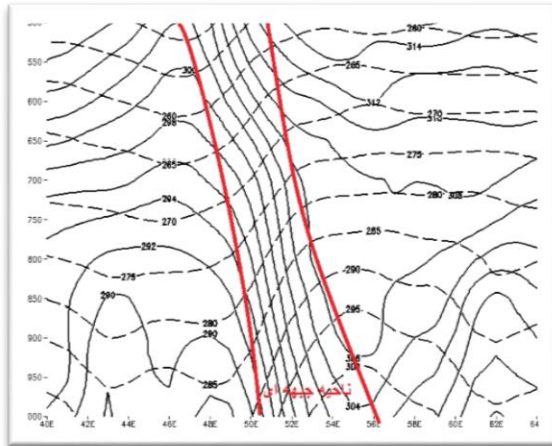
در شکل ۳ واضح است که بیشینه ارتفاع ژئوپتانسیل در پشت جبهه سرد (غرب کم فشار سطحی) افت پیدا می کند (ناحیه ای که بیشینه فرارفت هوای سرد رخ می دهد). نیم طول موج های بین صعودهای ارتفاع بیشینه و افت های ارتفاع نسبت به الگوی نیم طول موج اولیه ارتفاع به سمت کوتاه تر شدن میل می کند. بنابراین تغییرات در خم شدگی ناوه و پشته ها نشان دهنده چرخندزایی و به تبع آن جبهه زایی ترازهای پایین وردسپهر است.

که درونداد آن داده های GFS (برای پیش بینی ۷۲ ساعته) است تحت سه شبکه تو در تو به ترتیب با فاصله شبکه ای ۴۵، ۱۵ و ۵ کیلومتر برای سه حوزه و همچنین گام زمانی ۲۷۰ ثانیه اجرا می شود. طرحواره های WRF مورد استفاده در این مطالعه عبارتند از: برای لایه مرزی سیاره ای طرحواره YSU، برای لایه سطحی طرحواره همانندی MM5 (Similarity)، برای خردفیزیک روش Lin، برای تابش موج بلند طرحواره RRTM، برای تابش موج کوتاه طرحواره Goddard، برای همرفت طرحواره Kain-Fritsch و برای سطح زمین طرحواره پخش گرمایی پنج لایه ای (5-layer Term Diffusion) که برای جزئیات بیشتر این طرحواره ها به مقاله وانگ و همکاران (۲۰۱۴) مراجعه شود. در گام بعد به منظور اثر ترازهای بالا بر جبهه زایی سطحی کمیت هایی مانند ارتفاع ژئوپتانسیلی و مؤلفه های باد افقی از داده های ورودی مدل تغییر داده می شود به این صورت که در ترازهای ۵۰۰ هکتوپاسکال به بالا از داده های ۲۴ ساعت قبل استفاده می شود و بعد از اعمال این تغییرات بار دیگر مدل اجرا می شود. در نهایت برای درک نقش تراز بالا بر جبهه زایی سطحی جملات تابع جبهه زایی سطحی برای هر دو اجرا محاسبه و ترسیم می شود و این دو اجرا با هم مقایسه می شود. بر اساس قرارداد، اجرایی که بدون دستکاری ترازهای بالا صورت می گیرد را اجرای اولیه و اجرایی که با استفاده از تغییر ترازهای بالا صورت می گیرد، اجرای ثانویه نامگذاری می شود.

نتایج و بحث

موقعیت همدیدی ۱۸ نوامبر ۲۰۰۹ را می توان چنین خلاصه کرد: چرخند جبهه ای مربوط به کم فشاری است که روی عراق به طرف شرق در حال حرکت است. در هیجدهم نوامبر این کم فشار دوره تعمیق خود را بین ساعت ۰۰ UTC تا ۱۲ UTC تجربه نمود. این کم فشار در ساعت ۱۲ UTC هجدهم نوامبر با فشار متوسط سطح دریا ۱۰۰۵ هکتوپاسکال در مرکز ایران استقرار یافت. اولین اطلاعات ما از ساختار دینامیکی و ترمودینامیکی این کم فشار را می توان در نقشه های همدیدی پیدا کرد (شکل های

شکل ۴ الگوی پربندهای هم‌تندی تحت اجرای مدل WRF (شبکه ۴۵ کیلومتری) بر حسب متر بر ثانیه را نشان می‌دهد که خطوط پررنگ برای ساعت ۱۲ UTC هفدهم و خط‌چین‌ها برای ساعت ۱۲ UTC هجدهم نوامبر ۲۰۰۹ است.



شکل ۵- نیمرخ قائم منطقه جبهه‌ای تحت اجرای مدل WRF (شبکه ۴۵ کیلومتری) در ۱۲ UTC، ۱۸ نوامبر ۲۰۰۹ که خطوط پررنگ دمای پتانسیلی و خط‌چین‌ها دما بر حسب کلونین هستند.

نیمرخ قائم باد زمینگرد ۱۸ نوامبر

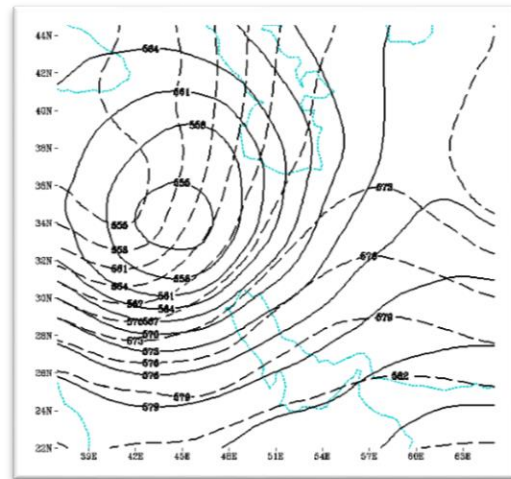
در مناطق جبهه‌ای گرادیان دمای پتانسیلی ($\nabla\theta$) بزرگ است و بنابراین در نیمرخ قائم دمای پتانسیلی به وضوح باید دیده شود. رابطه باد گرمایی ایجاب می‌کند که چینش قائم باد زمینگرد در این مناطق بزرگ باشد.

شکل ۵ نیمرخ قائم منطقه جبهه‌ای ۱۸ نوامبر در عرض جغرافیایی 33° شمالی (ساعت ۱۲ UTC) را نشان می‌دهد و مشاهده می‌شود که بزرگی گرادیان دمای پتانسیلی در نزدیک سطح و تا تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال بیشینه است.

جملات تابع جبهه‌زایی

تابع جبهه‌زایی دو بعدی (مارتین، ۲۰۰۶) که شامل جملات هم‌شاری و چینی است را می‌توان به صورت زیر نوشت:

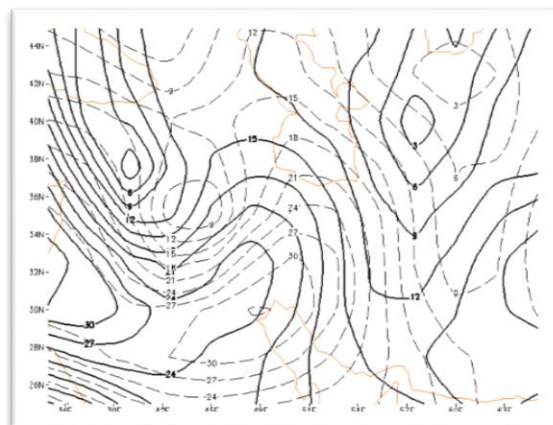
$$F_{2D} = \frac{1}{|\nabla\theta|} \left[\left(-\frac{\partial\theta}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial\theta}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial\theta}{\partial y} \right) - \left(\frac{\partial\theta}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial\theta}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial\theta}{\partial y} \right) \right] \quad (1)$$



شکل ۳

شکل ۳ الگوی موجی ارتفاع ژئوپتانسیل تحت اجرای مدل WRF (شبکه ۴۵ کیلومتری) بر حسب دکامتر در ۵۰۰ هکتوپاسکال را نشان می‌دهد که خطوط پررنگ برای ساعت ۱۲ UTC هجدهم نوامبر و خط‌چین‌ها برای ساعت ۱۲ UTC هفدهم نوامبر ۲۰۰۹ است.

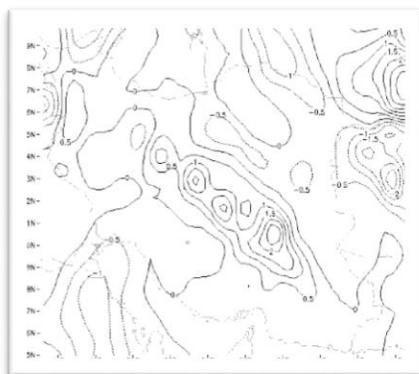
کاهش ارتفاع ۵۰۰ هکتوپاسکال در غرب مرکز کم‌فشار سطحی همراه با افزایش در شیو (گرادیان) ارتفاع ژئوپتانسیلی بین افت منطقه‌ای با ارتفاع ۵۰۰ هکتوپاسکال و بخش گرم جایی که در آن تغییرات ارتفاع اندک است، به وقوع می‌پیوندد. در نتیجه افزایش در سرعت بادهای زمینگرد غربی در غرب مرکز کم‌فشار سطحی خواهد بود، که منجر به تشکیل هسته جریان جتی (جت استریم) (شکل ۴) در آن بخش از موج خواهد شد. توجه شود که سرعت، یک متغیر شمال شرق سو است.



شکل ۴

مداری نسبت به طول جغرافیایی در این نواحی دیده می‌شود و در استان گیلان نیز این گرادیان مشاهده می‌شود. بر خلاف این نواحی بر روی استان فارس و اشاری بزرگی داریم. با اینکه در این مناطق $\partial u / \partial x$ کمترین مقدار را دارد اما مقادیر $\partial \theta / \partial x$ به گونه‌ای رفتار می‌کند که منجر به اشاری شدید می‌شود. در نواحی شرقی ایران وضعیت خنثی است و مقادیر هم‌شاری تقریباً صفر است زیرا در این نواحی تغییرات دمای پتانسیلی نسبت به طول جغرافیایی تقریباً صفر است. یک اشاری نیز بر روی دریای خزر مشاهده می‌شود که بر اثر گرادیان سرعت مداری نسبت به طول جغرافیایی است.

شکل ۶-ب اثر جمله هم‌شاری یا اشاری در جهت x برای اجرای ثانویه مدل در ساعت ۰۰ UTC نشان می‌دهد. برخلاف اجرای اولیه که روی استان خوزستان و عراق مقادیر بزرگ هم‌شاری وجود داشت، در این نواحی صفر شده‌اند و روی قسمت شمالی خلیج فارس مقادیر منفی اند در حالیکه در اجرای اولیه در این ناحیه شاهد هم‌شاری بودیم. همچنین روی استان فارس مقداری از اشاری‌های بزرگ که در اجرای اولیه دیده شد، تقریباً به حالت خنثی درآمده‌اند. مقادیر بزرگ هم‌شاری به صورت مورب استان‌های اصفهان، یزد و کرمان را فرا گرفته در حالیکه در اجرای اولیه مدل مقادیر صفر هم‌شاری را در این نواحی به دست می‌آورد. در نیمه شرقی مقادیر کوچک اشاری ظاهر شده‌اند در حالیکه برای اجرای اولیه صفر بودند.



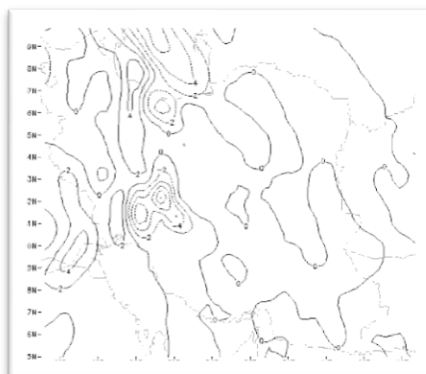
ب) اجرای ثانویه

برای اینکه دینامیک جبهه ۱۸ نوامبر بررسی شود، ضروری است که تک تک جملات تابع جبهه‌زایی با استفاده از خروجی‌های مدل محاسبه شود و از مقایسه جملات مشابه اجرای اولیه و ثانویه با استفاده از ترسیم آن‌ها تأثیر ترازهای بالا بر جبهه‌زایی ترازهای پایین نمایان شود. برای این منظور تابع جبهه‌زایی دو بعدی و جملات تابع جبهه‌زایی در تراز 700 hPa برای هر دو اجرای اولیه و ثانویه در ساعات ۰۰ UTC هیجدهم نوامبر ۲۰۰۹ محاسبه و ترسیم می‌شود. جملات تأثیرگذار بر تابع جبهه‌زایی دو بعدی شامل جملات هم‌شاری و چینشی است.

اثر جملات هم‌شاری یا اشاری بر تابع جبهه‌زایی

در رابطه (۱) جملات $\left(-\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial x}\right)$ و $\left(-\frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial \theta}{\partial y}\right)$ نشان دهنده اثر هم‌شاری یا اشاری به ترتیب در جهت x و y هستند. هم‌شاری در جهت x به این معناست که مؤلفه مداری سرعت خطوط هم‌آنروپی را در جهت مداری فشرده می‌کند و نیز هم‌شاری در جهت y مؤلفه نصف النهاری سرعت خطوط هم‌آنروپی را در جهت نصف النهاری فشرده می‌کند. مقادیر مثبت روی شکل‌ها مبین هم‌شاری و مقادیر منفی مبین اشاری هستند.

شکل ۶-الف اثر جمله هم‌شاری در جهت x در ساعت ۰۰ UTC هیجدهم نوامبر در اجرای اولیه را نشان می‌دهد. در نیمه غربی استان خوزستان مرز ایران و عراق هم‌شاری مقادیر بزرگی دارد زیرا از نقشه‌های بردارهای باد (در اینجا نیاورده‌ایم) مشاهده می‌شود که بیشترین گرادیان سرعت

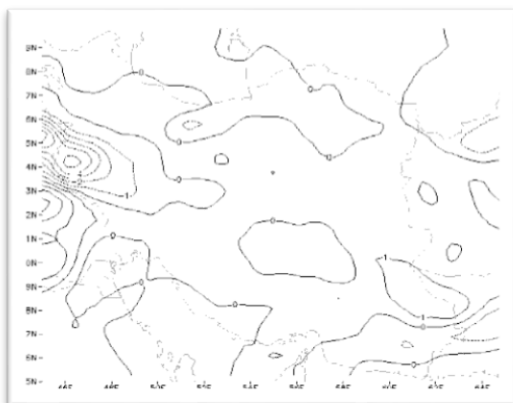


الف) اجرای اولیه

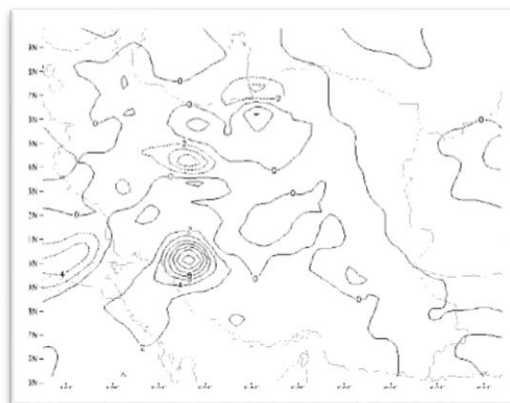
شکل ۶-اثر جمله هم‌شاری و اشاری در جهت x روی تابع جبهه‌زایی از مرتبه $10^{-10} \text{ km}^{-1} \text{ s}^{-1}$ برای ساعت ۰۰ UTC، ۱۸ نوامبر ۲۰۰۹

دارد که همچنان ناشی از گرادیان نصف‌النهاری است. در سایر نقاط ایران اثر جمله هم‌شاری صفر است.

شکل ۷-ب هم‌شاری یا واشاری در جهت γ در ساعت UTC ۰۰ برای اجرای ثانویه را نشان می‌دهد. در این ساعت بجز در نواحی غربی (استان کرمانشاه) یک واشاری بزرگ دیده می‌شود (که ناشی از گرادیان سرعت نصف‌النهاری نسبت عرض جغرافیایی است) تقریباً در سایر نواحی هم‌شاری صفر است که به دلیل عدم وجود گرادیان سرعت است. در حالیکه در اجرای اولیه روی استان فارس هم‌شاری قوی و روی استان مرکزی واشاری مشاهده گردید. نتیجه کلی از مقایسه اجرای اولیه و ثانویه اثر هم‌شاری در جهت γ تضعیف اجرای ثانویه است.



ب) اجرای ثانویه



الف) اجرای اولیه

شکل ۷- اثر هم‌شاری و واشاری در جهت γ روی تابع جبهه‌زایی از مرتبه برای ساعت UTC ۰۰، ۱۸ نوامبر ۲۰۰۹

شرقی این جمله مقادیر صفر به خود می‌گیرد، زیرا سرعت مداری نسبت به عرض جغرافیایی تغییر چندانی ندارد. شکل ۸-ب اثر چینش نصف‌النهاری روی تابع جبهه‌زایی در ساعت UTC ۰۰ (اجرای ثانویه) نشان می‌دهد. در این شکل دیده می‌شود که نسبت به اجرای اولیه در مجموع اثر جمله چینش به مراتب ضعیف‌تر است. در مرکز ایران مقادیر چینش منفی دیده می‌شود که از گرادیان دمای پتانسیلی نشأت می‌گیرد و بالاتر از آن چینش منفی شاهد هستیم که ناشی از گرادیان سرعت مداری نسبت به عرض جغرافیایی است. در شمال شرق مقادیر منفی چینش دیده می‌شود که در اجرای اولیه مشاهده نمی‌شود.

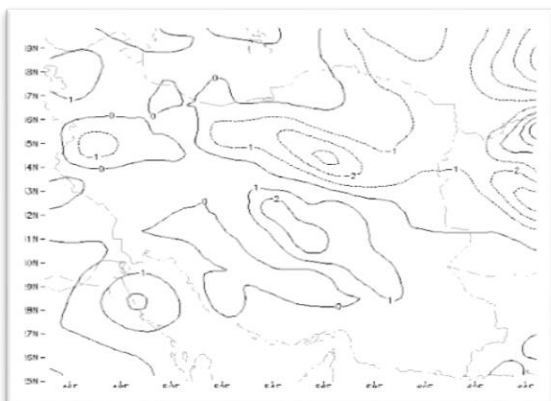
شکل ۷-الف اثر جمله هم‌شاری یا واشاری در جهت γ برای اجرای اولیه ساعت ۰۰ UTC نشان می‌دهد. در استان‌های غربی ایران هم‌شاری در جهت γ وجود ندارد. زیرا در این ناحیه گرادیان سرعت نصف‌النهاری نسبت به γ تقریباً صفر است. اما یک هم‌شاری بزرگ روی استان بوشهر، قسمت‌هایی از استان شیراز و یاسوج وجود دارد که ناشی از گرادیان بزرگ سرعت نصف‌النهاری در راستای γ است. یک واشاری بزرگ روی استان مرکزی وجود دارد که ناشی از گرادیان منفی سرعت نصف‌النهاری است. در نواحی شرقی هم‌شاری صفر است چرا که در این ناحیه گرادیان سرعت نصف‌النهاری نسبت به γ صفر است. در نهایت یک واشاری روی استان گرگان و دریای خزر وجود

اثر جملات چینشی بر تابع جبهه‌زایی

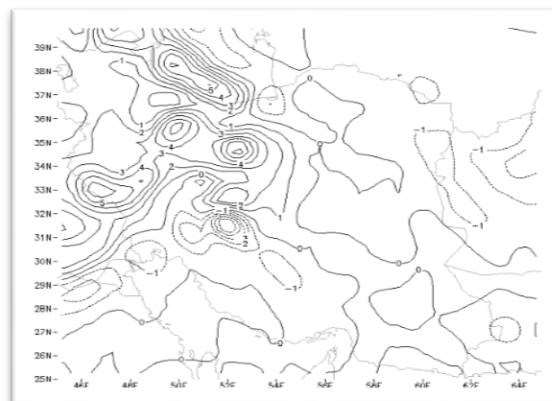
در رابطه ۱ جملات $\left(-\frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial \theta}{\partial x}\right)$ و $\left(-\frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial y}\right)$ به ترتیب

اثر چینش نصف‌النهاری و چینش مداری را نشان می‌دهد.

شکل ۸-الف اثر جمله چینش نصف‌النهاری را روی تابع جبهه‌زایی برای ساعت ۰۰ UTC (اجرای اولیه) نشان می‌دهد. در مرزهای غربی (استان ایلام) یک چینش قوی به دلیل چینش سرعت مداری وجود دارد. این چینش به مرکز و شمال ایران نیز کشیده می‌شود. نواحی جنوبی استان اصفهان و شمال استان فارس به دلیل چینش نصف‌النهاری باد مداری جمله چینش دارای مقادیر منفی است. در نیمه



ب) اجرای ثانویه



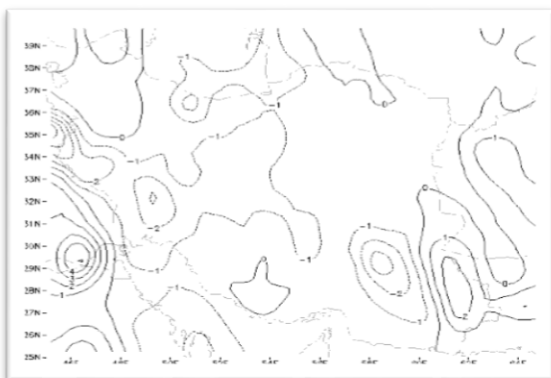
الف) اجرای اولیه

شکل ۸- اثر چینش نصف‌النهاری روی تابع جبهه‌زایی از مرتبه برای ساعت UTC+00، ۱۸ نوامبر ۲۰۰۹

جغرافیایی منتج شده است. چینش در ناحیه شرقی ایران به جز در شمال شرق که یک چینش منفی دیده می‌شود، تقریباً صفر است زیرا در مجموع عملکرد گرادیان دمایی پتانسیلی نسبت به عرض جغرافیایی و گرادیان سرعت مداری نسبت به طول جغرافیایی به گونه‌ای است که نتیجه آن چینش صفر است.

شکل ۹-ب اثر چینش مداری جبهه‌زایی در ساعت ۰۰ UTC برای اجرای ثانویه است. در کل اثر این جمله در این حالت روی ایران منفی است در حالیکه در اجرای اولیه مقادیر بیشتر مثبت بود. این چینش منفی بیشترین مقدار خود را در جنوب شرق ایران داراست در حالیکه در اجرای اولیه صفر است. از مقایسه شکل ۹ (الف و ب) می‌توان نتیجه گرفت که اثر جمله چینش مداری در ساعت ۰۰ UTC (اجرای ثانویه) در کل منفی شده است.

شکل ۹-الف اثر جمله چینش مداری روی تابع جبهه‌زایی را در ساعت ۰۰ UTC برای اجرای اولیه نشان می‌دهد. در این حالت در استان‌های خوزستان، ایلام و لرستان یک چینش مداری که هسته آن روی عراق است، مشاهده می‌شود. زیرا اولاً گرادیان دمایی نسبت به عرض جغرافیایی بالاست و دوماً گرادیان مداری سرعت نصف‌النهاری بزرگ است. بر روی استان فارس جمله چینش منفی است زیرا دمایی پتانسیلی دارای گرادیان شدید نسبت به طول جغرافیایی است (با اینکه سرعت نصف‌النهاری نسبت به طول جغرافیایی تغییرات چندانی ندارد). بر روی استان اصفهان و شهرکرد نیز یک چینش مثبت دیده می‌شود که بیشتر از گرادیان دمایی پتانسیلی به عرض جغرافیایی ناشی می‌شود و بالاتر از این چینش مثبت یک چینش منفی برقرار است که از تغییرات سرعت نصف‌النهاری نسبت به طول



ب) اجرای ثانویه

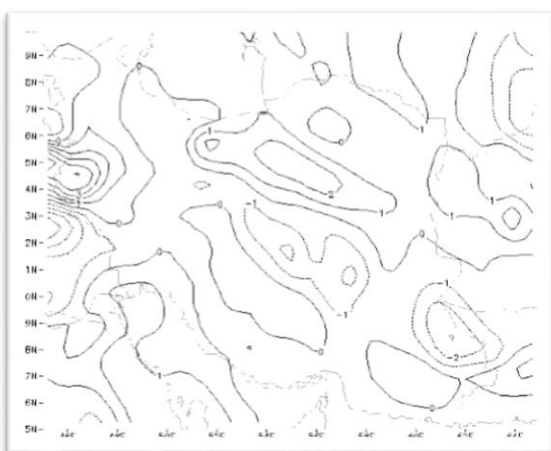


الف) اجرای اولیه

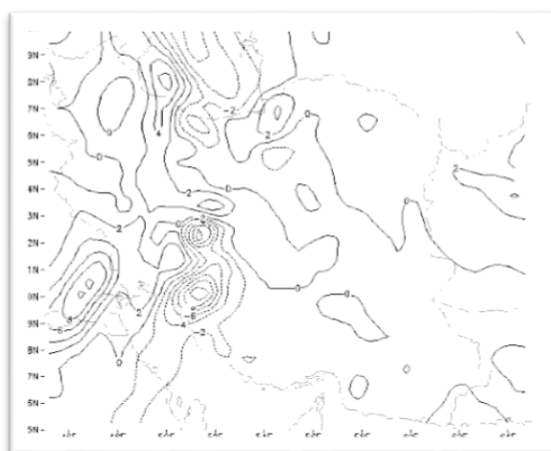
شکل ۹- اثر چینش مداری روی تابع جبهه‌زایی از مرتبه برای ساعت UTC+00، ۱۸ نوامبر ۲۰۰۹

شکل ۱۰-الف تابع جبهه‌زایی دو بعدی را برای اجرای اولیه و ثانویه در ساعت ۰۰ UTC نشان می‌دهد. مقادیر مثبت این تابع در مرزهای جنوبی ایران و عراق مثبت است و جبهه‌زایی وجود دارد. این مقادیر مثبت جبهه‌زایی به صورت مورب از این مرزها غربی شروع شده و تا ناحیه غربی دریای خزر ادامه دارد (بیشترین مقدار آن روی مرز غربی استان خوزستان و روی کشور عراق شکل گرفته است). روی استان‌های بوشهر و فارس و قسمت‌های جنوبی اصفهان جبهه‌زایی شدید دیده می‌شود که روی ایران بیشترین مقدار را به خود اختصاص می‌دهد.

شکل ۱۰-ب تابع جبهه‌زایی دو بعدی برای ساعت ۰۰ UTC در اجرای ثانویه است. برخلاف اجرای اولیه که مطابق انتظار در جبهه‌سرد گرادیان دما با زمان در حال افزایش است ولی در اجرای ثانویه بی‌نظمی در تابع جبهه‌زایی دیده می‌شود به گونه‌ای که در مرزهای غربی یک جبهه زدایی بزرگ و شمال آن نیز جبهه‌زایی بزرگی دیده می‌شود. بر روی جبهه گرم جبهه‌زایی مشاهده می‌شود در حالی که در اجرای اولیه این حالت مشاهده نمی‌شود. در جنوب شرق ایران نیز یک جبهه‌زدایی مشاهده می‌شود در حالیکه در اجرای اولیه جبهه‌زایی صفر است.

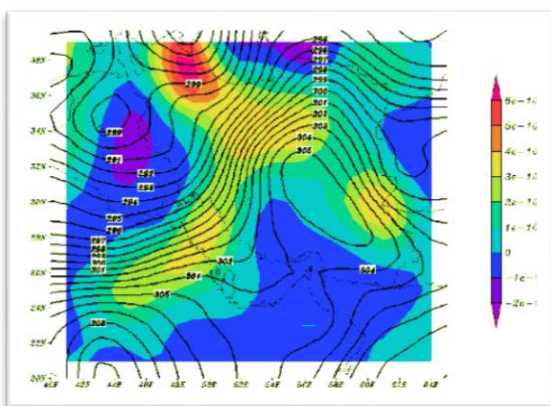


ب) اجرای ثانویه

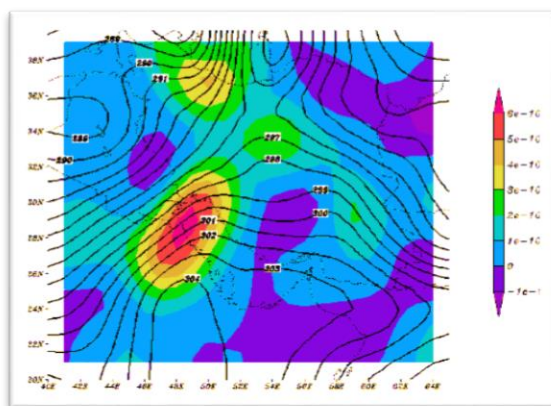


الف) اجرای اولیه

شکل ۱۰- تابع جبهه‌زایی دو بعدی از مرتبه برای ساعت ۰۰ UTC ۱۸ نوامبر ۲۰۰۹



ب) ساعت ۱۲ UTC، ۱۸ نوامبر ۲۰۰۹.



الف) ساعت ۰۰ UTC، ۱۸ نوامبر ۲۰۰۹

شکل ۱۱- برهم‌نهی تابع جبهه‌زایی دوبعدی (نواحی هاشور خورده) و دمای پتانسیلی (پربندهای سیاه) سطح ۹۰۰ هکتوپاسکال

UTC و ۱۲ UTC محاسبه گردید، که بهترین سطح فشاری بدون اجرای مدل برای منطقه مورد مطالعه سطح فشاری ۹۰۰ هکتوپاسکال بود (شکل ۱۱ الف و ب) زیرا مقادیر تابع

در پایان برای تأیید مدعا (به ویژه برای ساعت ۰۰ UTC که نتایج تابع جبهه‌زایی آن آورده‌ایم) با استفاده از داده‌های GFS (بدون اجرای مدل) تابع جبهه‌زایی نیز برای ساعات ۰۰

تغییر در تک تک جملات تابع جبهه‌زایی نمایان می‌شود و چنانچه دیده شد با لحاظ کردن این تغییرات به صورت مصنوعی در شرایط اولیه و مرزی مدل، نتایج متفاوت نسبت به حالت طبیعی به دست می‌آید. این نتایج نه تنها به لحاظ کیفی در شکل‌های مرتبط به تابع جبهه‌زایی و جملات آن (شکل‌های ۱ الی ۱۰) دیده می‌شود، بلکه از نظر کمی هم کاملاً ملموس است. به عنوان نمونه در ساعت ۰۰ UTC مقدار تابع جبهه‌زایی در غرب استان خوزستان و نوار مرزی با کشور عراق مقدار این تابع در اجرای اولیه $8 \times 10^{-10} \text{ km}^{-1} \text{ s}^{-1}$ است، در حالیکه این مقدار در اجرای ثانویه صفر می‌شود.

با توجه به اینکه کار حاضر تاکنون دقیقاً انجام نگرفته است، ضرورت اجرای آن به صورت عملیاتی تأکید می‌شود. زیرا می‌تواند به بهبود پیش‌بینی‌ها به ویژه برای پدیده‌های حدی نظیر سرمای شدید، برف سنگین و توفان‌های میان‌مقیاس کمک شایانی نماید.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند که از راهنمایی بی‌دریغ جناب آقای مهندس حسین اردکانی در ارائه ایده نوشتن این مقاله قدردانی و سپاسگزاری نمایند.

منابع

۱- باستانفرد، م. 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.

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

3- Ball, F. K., (1960), A theory of fronts in relation to surface stress. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 86, 51-60.

4- Bergeron, T., (1928), Uber Die Dreidimensional Verknupfende. Geofys Publ., 5, No.6, 73-79.

5- Bergeron, T., (1928), Uber Die Dreidimensional Verknupfende. Geofys Publ., 5, No.6, 73-79.

جبهه‌زایی با گرادیان دمای پتانسیلی هم‌خوانی بالایی دارد، به ویژه برای ساعت ۱۲ UTC که کاملاً جبهه روی ایران استقرار پیدا کرده است.

نتیجه‌گیری

به منظور درک بهتری از عملکرد و اثرات ترازهای بالای جوی بر جبهه‌زایی یا جبهه‌زدایی در ترازهای پایین، تغییراتی در شرایط اولیه و مرزی مدل WRF لحاظ گردید که نتایج آن برای یک چرخند جبهه‌ای (۱۸ نوامبر ۲۰۰۹) تحلیل و بررسی شد. این تغییرات در هر یک از جملات تابع جبهه‌زایی کاملاً مشهود بود و در مجموع اختلاف تابع جبهه‌زایی در دو اجرای اولیه و ثانویه به این صورت خلاصه می‌شود: در ساعت ۰۰ UTC اجرای اولیه در نیمه غربی ایران (جبهه سرد) شاهد جبهه‌زایی هستیم که بزرگترین مقادیر آن روی مرزهای جنوب غربی ایران و کشور عراق دیده می‌شود و همچنین در نیمه غربی شمال ایران نیز این اتفاق رخ می‌دهد. در حالیکه در اجرای ثانویه تقریباً در این مناطق جبهه‌زایی صفر است و در نیمه شمالی ایران یک هسته جبهه زا شکل گرفته است که در اجرای اولیه این ناحیه جبهه‌زدا بود. در اجرای اولیه یک هسته جبهه‌زدا بر روی استان فارس دیده می‌شود که در اجرای ثانویه این هسته ناپدید شده است و بالاخره چنانچه انتظار می‌رفت بیشترین تغییرات در نیمه غربی دیده می‌شود، جایی که جبهه سرد حاکم است و گرادیان شدید دمایی رخ می‌دهد.

در نهایت این چنین نتیجه گرفته می‌شود که تغییرات در ترازهای بالا، بر جبهه‌زایی ترازهای سطحی تأثیر بسزایی دارد (فرآیندهای عمده درگیر در رشد چرخند قوی، فرآیندهای جفت‌شدگی بین جت تراز بالا و گردش آزمینگرد جبهه تراز پایین)، که این تأثیر در معادله جبهه‌زایی به وضوح دیده می‌شود. همزمانی حرکات قائم و افقی ترازهای پایین، با حرکات قائم و افقی ترازهای بالا، در فرایند جبهه‌زایی تأثیر مستقیم دارد و اگر سرعت جریان جتی تراز بالا، در اجرای مدل از طریق مولفه‌های افقی سرعت دچار تغییر شود (که در اینجا از طریق تغییر در عدم همزمانی فرایندهای تراز پایین با بالا اعمال شده است)، این

- 16- Margules, M., (1906), Zur Sturmtheorie. Meteor., 9, 169-171.
- 17- Martin, J. E., (2006), Mid-Latitude Atmospheric Dynamics: a first course. John Wiley & Sons, Ltd, 324pp. 189-190.
- 18- Petersen, S., (1956), Weather Analysis and Forecasting, Vol. I. McGraw Hill 428 pp.
- 19- Shapiro, M.A., (1974), The use of isentropic coordinates in the formulation of objective analysis and numerical prediction models, Atmosphere, 12:1, 10-17.
- 20- Smith, R. K., & Reeder, M. J., (1988), On the movement and low-level structure of cold fronts. Monthly weather review, 116 (10), 1927-1944.
- 21- Wang, W., Bruyère, C., Duda, M., Dudhia, J., Gill, D., Kavulich, M., et al., (2014), ARW Version 3 Modeling System User's Guide January. National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, http://www2.Mmm.Ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3_2014.
- 22- Williams, R. T., L. C. Chou and C. J. Cornelius, (1981), effect of condensation and surface motion on the structure of steady-state fronts. J. Atmos. Sci., 38, 2365-2376.
- 23- Yu, Z., Ji, C., Xu, J., Bao, S., & Qiu, J. (2015). Numerical simulation and analysis of the Yangtze River Delta Rainstorm on 8 October 2013 caused by binary typhoons. Atmospheric Research, 166, 33-48.
- 6- Bergeron, T., (1937), On the physics of front. Bull. Amer. Meteor. Soc., 18, 265-275.
- 7- Bjerknes, J., (1919), On the structure of moving cyclones. Geofys. Publ. 1, No.2, 1-8.
- 8- Bjerknes, J., and H. Solberg, (1921), Meteorological conditions for the formation of rain. Geofys.Publ., 2, No. 3, 60 pp.
- 9- Bjerknes, J., and H. Solberg, (1922), Life cycle of cyclones on the polar front theory of atmospheric circulation. Geofys. Publ., 3, No. 1, 18 pp.
- 10- Byers, H. R., (1974), General Meteorology McGraw Hill, 461 pp.
- 11- Elias Sen, A., (1962), On the vertical circulation in frontal Zones. Geofys. Publ., 24, 147-160.
- 12- Gascón, E., Sánchez, J. L., Charalambous, D., Fernández-González, S., López, L., García-Ortega, E., & Merino, A. (2015). Numerical diagnosis of a heavy snowfall event in the center of the Iberian Peninsula. Atmospheric Research, 153, 250-263.
- 13- Gidel, L. T., (1978), Simulation of the differences and similarities of warm and cold surface frontogenesis. J. Geophys. Res., 83, 915-928.
- 14- Hoskins, B.J., And W. A. Heckley, (1981), Cold and warm fronts in baroclinic waves. Quart. J. Ro. Meteor. Soc., 107, 79-90.
- 15- Houze, R. A., Jr., and P. V. Hobbs, (1982), Organization and structure of precipitation cloud systems. Advances in Geophysics, Vol. 14, Academic Press, 225-315.