

## بررسی تاوایی پتانسیلی روی سطوح همدمای پتانسیلی، بکمک یک مدل عددی و ارتباط آن با بارش بر روی ایران (مطالعه موردی: ۲۴-۲۸ دسامبر ۲۰۰۴)

### عباس رنجبر سعادت آبادی

استادیار پژوهشکده هواشناسی، محل کار پژوهشکده هواشناسی

#### چکیده

هدف اصلی این مطالعه موردی، تاوایی پتانسیلی روی سطوح همدمای پتانسیلی، به کمک مدل عددی MM5 و ارتباط آن با بارش دیدبانی ایران در دسامبر ۲۰۰۴ شده است. نقش اغتشاش‌های وردسپهر بالا که بوسیله میدان تاوایی پتانسیلی مشخص می‌شود در تکامل تدریجی بارش سنگین بسیار با اهمیت بوده و در این مطالعه تاوایی پتانسیلی بر روی سطوح همدمای پتانسیلی محاسبه و نتایج پیش‌بینی‌های مدل عددی MM5 برای چند حالت که بارش‌های قابل توجهی داشته است، بررسی خواهد شد. به عبارت دیگر در این پژوهش، توسعه و ردیابی چرخندهایی که بارش‌های قابل توجهی بر روی ایران داشته بر اساس تاوایی پتانسیلی روی سطوح همدمای پتانسیلی و ارتباط آن با بارش بررسی شده است. نتایج نشان داد که این رهیافت می‌تواند به عنوان یک پیش‌نشانگر برای بارش، بویژه در مناطق پیچیده‌ای مانند سواحل جنوبی که مدل نمی‌تواند بارش آن را پیش‌بینی کند، بکار برده شود. بارش‌های رخ داده در ایستگاه‌های هواشناسی برای بسیاری از نقاط در محدوده‌ای است که میدان تاوایی پتانسیلی روی این سطح همدمای پتانسیلی بین IPVU تا 3PVU است.

**کلمات کلیدی:** تاوایی پتانسیلی، پیش‌بینی بارش، مدل عددی، ایران

#### مقدمه

گستره وسیعی از مقیاس‌ها بکار می‌رود. جایگاه اصلی تاوایی پتانسیلی در دینامیک جو از مقیاس‌های سیاره‌ای تا میان مقیاس، آن را تبدیل به کمیّت مهمی برای تحلیل سامانه‌های جوی در این مقیاس‌ها نموده است و فرایندهای همراه با چرخندزایی بخوبی در چارچوب تاوایی پتانسیلی توجیه می‌شود. از تاوایی پتانسیلی هم برای بررسی‌های کیفی هم‌دیددی متداول و هم برای بررسی کمی سامانه‌های جوی استفاده می‌شود. در بررسی کیفی آنچه تاوایی پتانسیلی را متمایز می‌سازد ویژگی فرارفت افقی خالص آن بر روی سطوح همدمای پتانسیلی (هم  $\theta$ ) در ترازهای فوقانی وردسپهر است که با تقریب خوبی در بسیاری از شارش‌های جوی، تحت شرایط بی‌دررو (بدون اثرات دررو و اصطکاک)، مورد توجه در پیش‌بینی عددی، بر قرار است.

تاوایی پتانسیلی ارتل حاصل ضرب تاوایی مطلق و پایداری ایستایی می‌باشد. واحدی که برای PV استفاده می‌شود عبارت است از:  $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ k kg}^{-1}$  و به صورت PVU نشان داده

پیش‌بینی دقیق بارش یکی از چالش‌های جدی در هواشناسی بویژه در مناطقی با توپوگرافی پیچیده مانند نواحی کوهستانی ایران است. امروزه دقت پیش‌بینی کمیت‌های دما، فشار و باد بهبود چشمگیری داشته اما پیشرفت‌ها در پیش‌بینی کمی بارش در مقایسه با سایر کمیت‌های هواشناختی کند بوده است. با وجود این مشکلات، پیش‌بینی کمی صحیح بارش برای جامعه اهمیت خاصی دارد. بارش می‌تواند گاهی سبب اثرات ناگواری شده و اغلب بارش‌های شدید، خسارات جانی و مالی جبران‌ناپذیری بر جای می‌گذارند. پیش‌بینی زمانی و مکانی بارش بویژه بارش‌های سنگین میان مقیاس، با توجه به وابستگی چندگانه میدان‌هایی مانند فشار، دما و ژئوپتانسیل بسیار مشکل بوده که در خیلی از حالت‌ها معمولاً رهیافت تاوایی پتانسیلی (PV) و توزیع سه بعدی آن می‌تواند نقش بسیار مؤثری را ایفا نماید. تاوایی پتانسیلی در تحلیل دینامیکی حرکت‌های جوی در

می‌شود. سه خاصیت زیر علت استفاده PV را برای نمایش فرایندهای دینامیکی در جو نشان می‌دهد.

۱- اصل پایستاری لاگرانژین برای تاوایی پتانسیلی بیان می‌کند که اگر از فرایندهای اصطکاک و با دررو صرف‌نظر شود، PV در طول سه بعد حرکت پایستار می‌ماند.

۲- اصل وارون‌پذیری از توزیع PV اعم از اینکه فرایندهای با دررو و اصطکاک وجود دارد یا نه، مهم است. با در دست داشتن توزیع PV و شرایط مرزی مناسب، با حل معادله PV می‌توان ارتفاع ژئوپتانسیلی، میدان‌های باد، سرعت‌های قائم، دمای پتانسیلی و دیگر کمیت‌ها و هم چنین تحت یک شرایط توازن مناسب با در دسترس بودن اطلاعات کافی راجع به فرایندهای با دررو و اصطکاک بدست آورد.

۳- همراه با دو اصل فوق، خاصیت دیگر PV که به مفهوم و درک دینامیک جو کمک می‌کند بررسی نیم‌رخ میانگین فصلی PV در وردسپهر و آرام‌سپهر می‌باشد.

تاوایی پتانسیلی به سبب خاصیت پایستاری در نبود گرمایش دررو و اصطکاک و اصل وارون‌پذیری آن، یک متغیر دینامیکی و ابزاری مفید برای مقاصد مختلف در هواشناسی از جمله مقوله چرخندزایی است (هاسکینز ۱۹۸۵؛ آمبايوم، ۱۹۹۷؛ هیو و همکاران، ۱۹۹۹؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۰۲؛ کیو و ژانگ ۲۰۱۰ و ۲۰۱۲). بر این اساس مطالعات متعددی در این زمینه انجام شده که می‌توان به موارد زیر اشاره نمود. هورینوشی (۲۰۱۴) تأثیر اغتشاش‌های وردسپهر فوقانی تاوایی پتانسیلی روی سطح 330K بر روی تغییرات الگوهای همدیدی، بارش و انتقال رطوبت را بررسی کرد. او نشان داد که ارتباط آشکاری بین پریشیدگی‌های وردسپهر فوقانی (یا وردایست)، بارش و رطوبت وردسپهر پایینی وجود دارد و بطور متناوب محدوده بارشی به پهنای چند صد کیلومتر و طول هزار تا چند هزار کیلومتر از سواحل شرقی چین تا شمال غرب اقیانوس آرام در بخش استوا سوی و نواحی با PV کم شمال سوی پربند

1.5PVU سطح 330K رخ می‌دهد. مک اینتایر (۱۹۹۸) نقش بکار بردن تاوایی پتانسیلی و دما و رطوبت برای درک چرخندزایی مناطق برون حاره را مطالعه کرد و نشان داد که PV ابزار مهمی در توسعه چرخندزایی در این مناطق است. کاراسنا و همکاران (۲۰۰۰ و ۲۰۰۱) نقش اغتشاش‌های وردسپهر بالا که بوسیله میدان PV مشخص می‌شود در تکامل تدریجی بارش سنگین را بررسی کرد. در مطالعات متعددی از جمله هیو و همکاران (۱۹۹۹)، داویس و همکاران (۱۹۹۲) و نقش PV در چرخندزایی و جبهه‌زایی سطح زمین را بررسی کردند. هاسکینز در سال ۱۹۸۵، تحلیل نقشه‌های هم آتروپی PV را همانند یک ابزار قاطع فرایابی برای آگاهی از فرایندهای دینامیکی در جو شناخته است. در نتیجه تمایل برای استفاده از تاوایی پتانسیلی برای فرایابی رفتار جو، بخصوص در چرخندزایی، برای تحقیق و اهداف عملیاتی پیش‌بینی بسیار افزایش یافته است.

### داده‌ها و روش تحقیق

در این تحقیق برای محاسبه تاوایی پتانسیلی بر روی سطوح همدمای پتانسیلی و بررسی بارش‌های پیش‌بینی شده از مدل منطقه‌ای MM5 استفاده شده است. برای این منظور، دو دامنه تو در تو با تفکیک افقی ۳۰ و ۱۰ کیلومتر در نظر گرفته شد. از آنجا که فرآیندهای فیزیکی، نقش اساسی و مهمی در دقت پیش‌بینی و شبیه‌سازی پدیده‌های مورد نظر دارند، بایستی قبل از اجرای مدل گزینه‌های فیزیکی مناسب را با توجه به ویژگی‌های سامانه‌های میان مقیاس حاکم بر منطقه انتخاب کرد. بر اساس نتایج مطالعات هدایتی دزفولی و آزادی (۱۳۸۹) در این شبیه‌سازی از طرح‌واره‌های MRF و BETS-MILLER به ترتیب برای پارامتری‌سازی فرآیندهای لایه مرزی و همرفت استفاده شده است. سپس نتایج پیش‌بینی‌های مدل عددی MM5 برای محدوده جغرافیایی ۲۴ تا ۴۳ درجه عرض شمالی و ۳۰ تا ۶۴ درجه طول شرقی و بارش‌های دیدبانی شده در ایستگاه‌های هواشناسی ایران با گام زمانی ۶ ساعته، بصورت

ب- پیش‌بینی‌های میدان تاوایی پتانسیلی بر روی سطح همدمای 330K و بارش تجمعی ۶ ساعته قبل از آن رخ داده است.

ج- میانگین ۲۴ ساعته پیش‌بینی‌های میدان تاوایی پتانسیلی بر روی سطح همدمای 330K و بارش تجمعی ۲۴ ساعته که در این مدت رخ داده است.

همچنین در همه حالت‌های بالا نیز بارش‌های پیش‌بینی شده توسط مدل MM5 نیز آورده شده است.

در شکل (۱) که پیش‌بینی‌های میدان تاوایی پتانسیلی بر روی سطح همدمای 330K و بارش تجمعی ۶ ساعته بعد از آن رخ داده بصورت اعداد و همچنین بارش پیش‌بینی شده توسط مدل بصورت پررنگ نشان داده شده است. بیشینه مقدار تاوایی پتانسیلی در ساعت 1800UTC روز ۲۴ دسامبر ۲۰۰۴، در نواحی مرزهای مشترک عراق با سوریه و ترکیه و همچنین شمال دریاچه ارومیه دیده می‌شود، اما مقدار بارش‌های رخ داده در بخش‌های زاگرس جنوبی با بیشینه مقدار ۱۵ میلیمتر دیده می‌شود.

در پیش‌بینی ۲۴ ساعته تاوایی پتانسیلی روی سطح همدمای پتانسیل 330K برای ساعت 00UTC روز ۲۵ دسامبر ۲۰۰۴ شکل (۱) بیشینه مقدار تاوایی پتانسیلی در شمال عراق و شمال دریاچه ارومیه دیده می‌شود که بیانگر ناحیه با بیشینه PV است که به سمت پایین و بسوی وردسپهر میانی انتقال می‌یابد. مقدار بارش‌های رخ داده در بخش‌های زاگرس جنوبی نسبت به ۶ ساعت قبل افزایش یافته بیشینه مقدار آن‌ها به ۱۹ میلی‌متر رسیده که بیشتر این بارش‌ها در محدوده تاوایی پتانسیلی کمتر از ۲/۵ واحد دیده می‌شود.

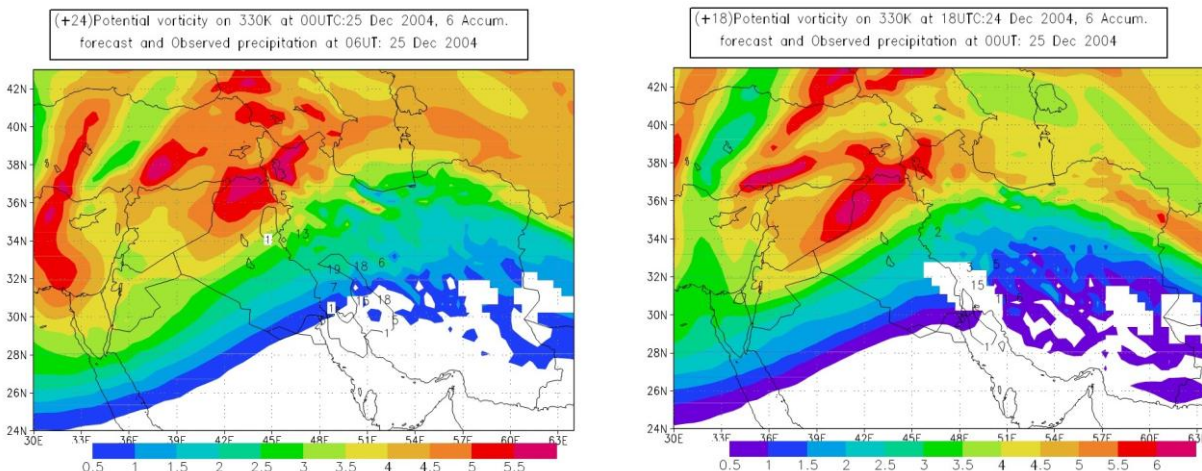
موردی بررسی شده است. به عبارت دیگر در این پژوهش، توسعه و ردیابی چرخندهایی که بارش‌های قابل توجهی بر روی ایران داشته بر اساس ناهنجاری‌های تاوایی پتانسیلی و بکمک مدل میان‌مقیاس عددی MM5 بررسی شده است.

برای ترسیم PV بر روی نقشه‌های همدمای پتانسیلی، ابتدا مدل MM5 برای سامانه بارشی ۲۴-۲۸ دسامبر ۲۰۰۴ اجرا، سپس برنامه کامپیوتری تهیه گردید که خروجی مدل را گرفته و نقشه‌های مورد نظر برای سطوح مختلف همدمای پتانسیلی آماده می‌کند. این نرم‌افزار خروجی مدل MM5 را به عنوان ورودی گرفته و در محیط گرد قابل اجرا می‌باشد. مهمترین پارامترهای ورودی این نرم‌افزار عبارت از میدان باد، سرعت قائم، دما و میدان فشار می‌باشد. برای یک سطح همدمای پتانسیلی در دستگاه مختصات‌های مختلف و همچنین تهیه سطوح همدمای پتانسیلی استفاده کرد. در این مطالعه تاوایی پتانسیلی بر روی سطوح همدمای پتانسیلی و ارتباط آن با بارش بررسی شده است.

## بحث و بررسی

با استفاده از نرم‌افزار بالا، ارتباط بین تاوایی پتانسیلی بر روی سطوح همدمای پتانسیلی با بارش‌های روی ایران بررسی شده است، که نتایج حاصل در شکل‌های (۱) تا (۶) نشان داده شده است. برای تحلیل ارتباط بین تاوایی پتانسیلی بر روی سطوح همدمای پتانسیلی با بارش در نقاط مختلف سه حالت زیر در نظر گرفته شده است:

الف- پیش‌بینی‌های میدان تاوایی پتانسیلی بر روی سطح همدمای 330K و بارش تجمعی که در ۶ ساعت آینده آن رخ داده است.



**شکل شماره ۱-** پیش‌بینی‌های ۱۸ و ۲۴ ساعته تاوایی پتانسیلی (حسب PVU) روی سطح همدمای پتانسیل 330K برای ساعت 18UTC روز ۲۴ دسامبر و ساعت 00UTC روز ۲۵ دسامبر ۲۰۰۴ و بارش تجمعی ۶ ساعت آینده دیدبانی شده در ایستگاه‌های هواشناسی بصورت اعداد روی شکل نوشته شده و بارش پیش‌بینی شده توسط مدل بصورت پربند نشان داده شده است. ساعت شروع اجرای مدل، ساعت 00UTC روز ۲۴ دسامبر ۲۰۰۴ بوده و مناطق رنگی بیانگر مقادیر تاوایی پتانسیلی با فاصله 0.5PVU می‌باشد.

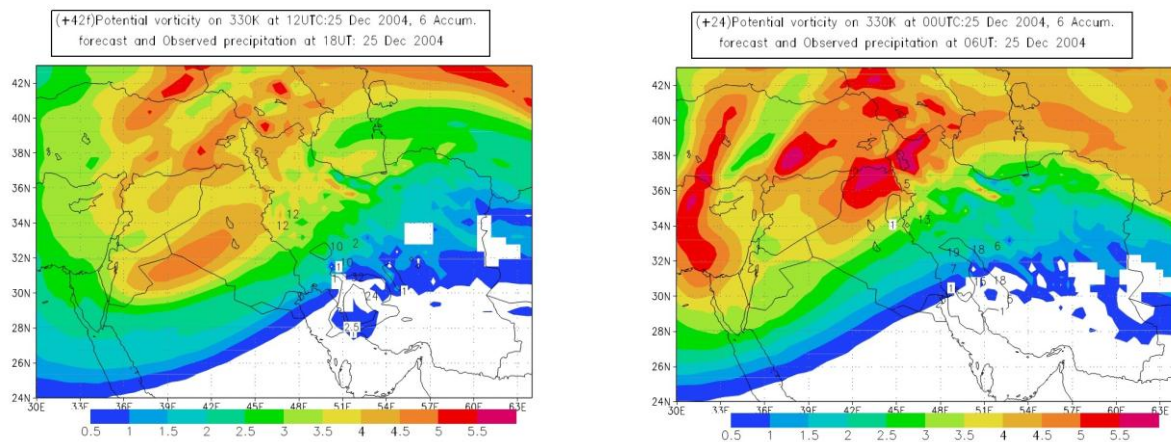
و در این زمان که بیشینه مقدار تاوایی پتانسیلی در شمال ایران دیده می‌شود بارش در ۶ ساعت آینده رخ داده که تقریباً مقدار بیشینه بارش‌ها با بیشینه مقدار PV همخوانی دارد. ولی مدل بارشی برای نواحی شمالی پیش‌بینی نکرده است.

در نقشه پایینی شکل (۳) میانگین ۲۴ ساعته پیش‌بینی‌های میدان تاوایی پتانسیلی و بارش تجمعی ۲۴ ساعته نشان داده شده است. مقدار بارش‌های رخ داده در شمال کشور با بیشینه مقدار تاوایی پتانسیلی در این مناطق همخوانی دارد. دو هسته تاوایی زیاد (یکی در جنوب غرب دریای خزر و دیگری در شمال عربستان) قرار گرفته است که در این حالت دو هسته بیشینه بارش یکی در شمال و دیگری در نواحی جنوب ایران دیده می‌شود. در شکل‌های ۴ و ۵ پیش‌بینی‌های (۱۸ و ۲۴) و (۳۶ و ۴۸) ساعته تاوایی پتانسیلی روی سطح همدمای پتانسیلی 330K برای ساعت 18UTC روز ۲۵ و ساعت 00UTC روز ۲۶ دسامبر ۲۰۰۴ و ساعت‌های 06UTC و 12UTC روز ۲۶ دسامبر ۲۰۰۴ همراه با بارش تجمعی ۶ ساعت آینده دیدبانی شده در ایستگاه‌های هواشناسی بصورت اعداد روی شکل نوشته شده و بارش پیش‌بینی شده توسط مدل بصورت پربند نشان داده شده است. در هر دو شکل بیشینه PV و بارش در سواحل جنوبی دریای خزر مشاهده می‌شود.

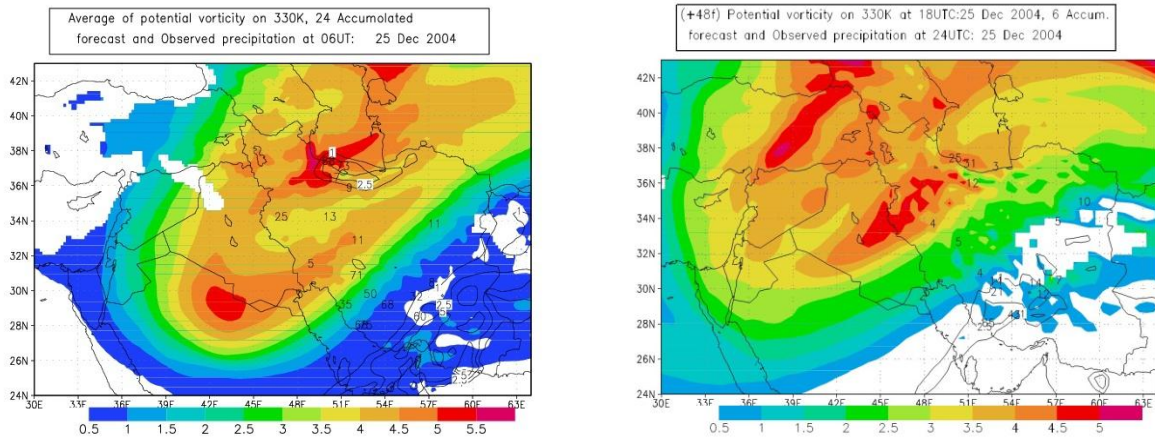
در پیش‌بینی ۳۶ ساعته تاوایی پتانسیلی روی سطح همدمای پتانسیل 330K برای ساعت 06UTC روز ۲۵ دسامبر ۲۰۰۴ (شکل ۲) بیشینه مقدار تاوایی پتانسیلی در شمال دریاچه ارومیه دیده می‌شود. مقدار بارش‌های رخ داده در بخش‌های زاگرس جنوبی نسبت به ۶ ساعت قبل افزایش یافته بیشینه مقدار آن‌ها به ۳۵ میلی‌متر رسیده که بیشتر این بارش‌ها در محدوده تاوایی پتانسیلی کمتر از ۲/۵ واحد دیده می‌شود. بارش‌های پیش‌بینی شده توسط مدل نیز در محدوده بارش‌ها رخ داده می‌باشد اما مقدار آن‌ها درست پیش‌بینی نشده است.

در پیش‌بینی ۴۲ ساعته تاوایی پتانسیلی روی سطح همدمای پتانسیلی 330K برای ساعت 12UTC روز ۲۵ دسامبر ۲۰۰۴ (شکل ۲) بیشینه مقدار تاوایی پتانسیلی در شمال غربی ایران کاهش یافته و همچنین مقدار بارش‌های رخ داده در بخش‌های زاگرس جنوبی نسبت به ۶ ساعت قبل نیز کاهش یافته است.

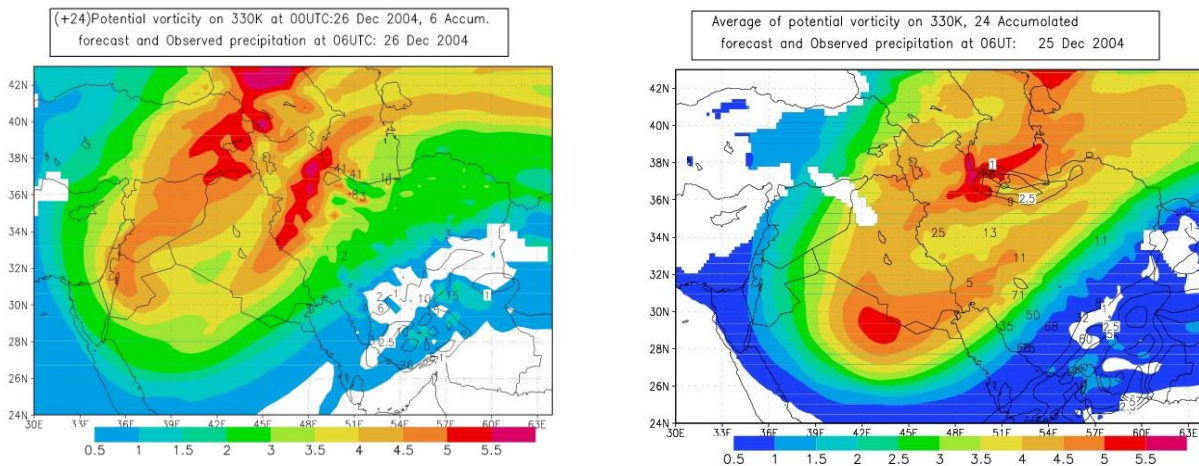
پیش‌بینی ۴۸ ساعته تاوایی پتانسیلی روی سطح همدمای پتانسیلی 330K برای ساعت 18UTC روز ۲۵ دسامبر ۲۰۰۴ در شکل (۳) نشان داده شده است. در این ساعت بیشینه مقدار تاوایی پتانسیلی در نواحی غربی و شمالی ایران نسبت به ۶ ساعت قبل افزایش یافته است. مقدار بارش‌های رخ داده در بخش‌های زاگرس جنوبی نسبت به ۶ ساعت قبل محدودتر شده



شکل شماره ۲- مانند شکل (۱)، اما برای پیش‌بینی‌های ۳۶ و ۴۲ ساعته (ساعت‌های 06UTC و 12UTC روز ۲۵ دسامبر ۲۰۰۴)

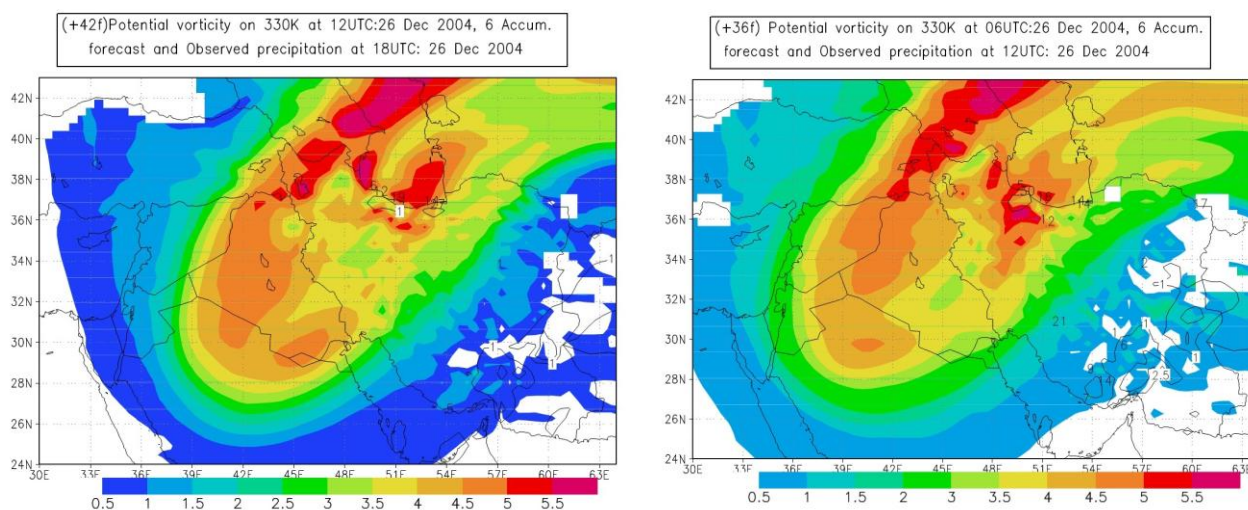


شکل شماره ۳- پیش‌بینی ۴۸ ساعته تاوایی پتانسیلی روی سطح همدمای پتانسیلی 330K برای ساعت 18UTC روز ۲۵ دسامبر ۲۰۰۴ و بارش تجمعی ۶ ساعت آینده دیدبانی شده (نقشه بالا) و میانگین ۲۴ ساعته تاوایی پتانسیلی روی سطح همدمای پتانسیلی 330K تا ساعت 06UTC روز ۲۵ دسامبر ۲۰۰۴ و بارش تجمعی ۲۴ ساعت دیدبانی شده در ایستگاه‌های هواشناسی بصورت اعداد روی شکل نوشته شده و بارش پیش‌بینی شده توسط مدل بصورت پرنده نشان داده شده است.



شکل شماره ۴- پیش‌بینی‌های ۱۸ و ۲۴ ساعته تاوایی پتانسیلی روی سطح همدمای پتانسیلی 330K برای ساعت 18UTC روز ۲۵ دسامبر ۲۰۰۴ و ساعت 00UTC روز ۲۶ دسامبر ۲۰۰۴ و بارش تجمعی ۶ ساعت آینده دیدبانی شده در ایستگاه‌های هواشناسی بصورت اعداد روی شکل نوشته شده و بارش پیش‌بینی شده توسط مدل بصورت پرنده نشان داده شده است. ساعت شروع اجرای مدل، ساعت 00UTC روز ۲۵ دسامبر ۲۰۰۴ بوده و مناطق رنگی بیانگر مقادیر تاوایی پتانسیلی با فاصله 0.5PVU می‌باشد.

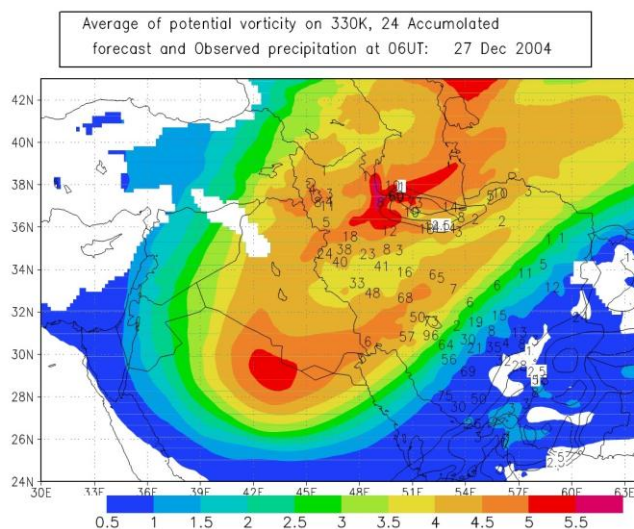




شکل شماره ۵- مانند شکل (۴)، اما برای پیش‌بینی‌های ۳۶ ساعته و ۴۲ ساعته (ساعت‌های 06UTC و 12UTC روز ۲۶ دسامبر ۲۰۰۴)

تاوایی پتانسیلی زیاد (یکی در جنوب غرب دریای خزر و دیگری در شمال عربستان) قرار گرفته است که در این حالت دو هسته بیشینه بارش یکی در شمال و دیگری در نواحی جنوب ایران دیده می‌شود.

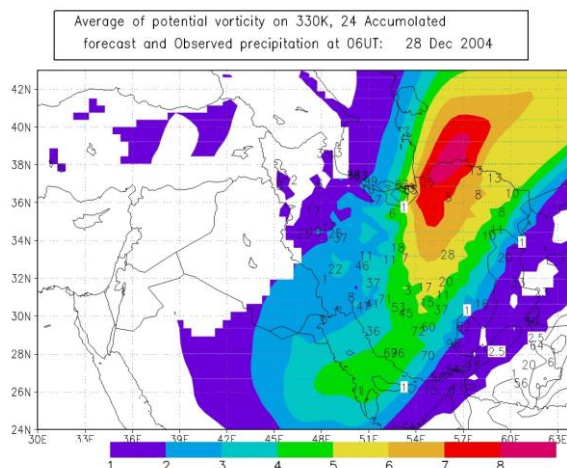
در شکل (۶) میانگین ۲۴ ساعته پیش‌بینی‌های میدان تاوایی پتانسیلی و بارش تجمعی ۲۴ ساعته نشان داده شده است. بارش در سطح کشور بویژه در نیمه غربی و نواحی مرکزی رخ داده، اما مقدار بارش‌های رخ داده در شمال کشور با بیشینه مقدار تاوایی پتانسیلی در این مناطق همخوانی دارد. همچنین دو هسته



شکل شماره ۶- میانگین ۲۴ ساعته پیش‌بینی‌های میدان تاوایی پتانسیلی روی سطح همدمای پتانسیلی 330K تا ساعت 06UTC روز ۲۶ دسامبر ۲۰۰۴ و بارش تجمعی ۲۴ ساعت دیدبانی شده در ایستگاه‌های هواشناسی بصورت اعداد روی شکل نوشته شده و بارش پیش‌بینی شده توسط مدل بصورت پرنده نشان داده شده است.

دسامبر ۲۰۰۴) نشان داده شده است. بارش در سطح کشور بویژه نواحی مرکزی و جنوب شرقی قابل ملاحظه است. در این حالت بیشینه مقدار تاوایی پتانسیل در شمال شرقی قرار گرفته است.

در شکل (۷) میانگین ۲۴ ساعته پیش‌بینی‌های میدان تاوایی پتانسیلی روی سطح همدمای پتانسیلی 330K تا ساعت 06UTC روز ۲۸ دسامبر ۲۰۰۴ و بارش تجمعی ۲۴ ساعته (از ساعت 06UTC روز ۲۷ دسامبر تا ساعت 06UTC روز ۲۸



**شکل شماره ۷-** میانگین ۲۴ ساعته پیش‌بینی‌های میدان تاوایی پتانسیلی روی سطح همدمای پتانسیلی 330K تا ساعت 06UTC روز ۲۸ دسامبر ۲۰۰۴ و بارش تجمعی ۲۴ ساعت دیدبانی شده در ایستگاه‌های هواشناسی بصورت اعداد روی شکل نوشته شده و بارش پیش‌بینی شده توسط مدل بصورت پرنده نشان داده شده است.

موردی، احتمال می‌رود که کمیت تاوایی پتانسیلی می‌تواند به عنوان یک پیش‌نشانگر بارش در این منطقه بسیار پیچیده باشد، هرچند که برای اظهار نظر قطعی در این مورد نیاز به مطالعه بیشتری است.

در حالی که میانگین ۲۴ ساعته پیش‌بینی‌های میدان تاوایی پتانسیلی روی سطح همدمای پتانسیلی 330K و بارش تجمعی ۲۴ ساعته دیدبانی شده در روی یکدیگر قرار گیرند، مشاهده می‌شود، در مناطقی بارش رخ داده که تاوایی پتانسیلی روی سطح همدمای پتانسیلی 330K، از ۱PVU بیشتر می‌باشد.

## مراجع

۱. اکرم هدایتی دزفولی، ا. و آزادی، م.، ۱۳۸۹: راستی آزمایی پیش‌بینی بارش مدل منطقه‌ای MM5 روی ایران، فصلنامه فیزیک زمین و فضا، سال سی و ششم، شماره ۳، ۱۱۵-۱۳.

## نتیجه‌گیری

برنامه نرم‌افزاری تهیه شده امکان محاسبه PV روی سطوح همدمای پتانسیلی را فراهم می‌آورد. نتایج حاصل از مطالعه بارش‌های پیش‌بینی شده توسط مدل MM5 نشان داد که این مدل، مقدار بارش را در بیشتر ساعت‌ها، کمتر از مقدار دیدبانی شده، نشان می‌دهد. پیش‌بینی‌های ۴۸ ساعته، با گام زمانی ۶ ساعته، تاوایی پتانسیلی روی سطح همدمای پتانسیلی 330K نشان داد که بارش‌های رخ داده در ایستگاه‌های هواشناسی برای بسیاری از نقاط در محدوده‌ای است که میدان تاوایی پتانسیلی روی این سطح همدمای پتانسیلی بین ۱PVU تا ۳PVU است، اما در سواحل جنوبی دریای خزر، بارش‌های رخ داده در محدوده‌ای است که میدان تاوایی پتانسیلی روی این سطح همدمای پتانسیلی بین ۳/۵PVU تا ۵PVU است؛ این در حالی است که در بیشتر حالت‌ها، مدل، بارشی را برای این مناطق، پیش‌بینی نکرده است. لذا بر اساس نتایج حاصل از این مطالعه

9. Hoskins, B. J., 1991: Towards a PV- $\theta$  view of the general circulation. *Tellus*, 43 AB, 27–35.
10. Hoskins, B. J., M. E. McIntyre, and A. W. Robertson, 1985: On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 111, 877-946.
11. Huo, Z.-H., D.-L. Zhang, and J. Gyakum, 1999: The interaction of potential vorticity anomalies in extratropical cyclogenesis. Part I: Static piecewise inversion. *Mon. Wea. Rev.*, 127, 2546–2561.
12. Kieu, C. Q., and D.-L. Zhang, 2010: A piecewise potential vorticity inversion algorithm and its application to hurricane inner-core anomalies. *J. Atmos. Sci.*, 67, 2616–2631.
13. Kieu, C. Q., and D.-L. Zhang, 2012: Is the Isentropic Surface Always Impermeable to the Potential Vorticity Substance? *Advances in Atmospheric Sciences*, Vol. 29, No. 1, 29–35.
14. McIntyre, M. E., 1988b: The use of potential vorticity and low-level temperature/moisture to understand extratropical cyclogenesis. *Ibid*, 261-280.
15. Zhang, D.-L., W. Cheng, and J. Gyakum 2002: The impact of various potential vorticity anomalies on multiple frontal cyclogenesis events. *Quart. J. Royal Meteor. Soc.*, 128, 1847–1878.
2. Ambaum, M. 1997: Isentropic formation of the tropopause. *J. Atmos. Sci.* 54, 555–568.
3. Caracena, F., A. Marroquin, and E.I. Tollerud, 2000: Potential vorticity patterns and their relationship to heavy precipitation in mesoscale convective systems. 15th Conf. on Hydrology, Long Beach, CA, Amer. Meteor. Soc., 218-221.
4. Caracena, F., Marroquin, A., and Tollerud, E. 2001: A PV-streamer's role in a succession of heavy rain-producing MCSs over the central United States, *Phys. Chem. Earth, Part B-Hydrology Oceans and Atmos.*, 26(9), 643–648.
5. Davis, C. A., 1992: Piecewise potential vorticity inversion. *J. Atmos. Sci.* 49, 1397-1411.
6. Davis, C. A., and K. A. Emanuel, 1991: Potential vorticity diagnostics of cyclogenesis. *Mon. Wea. Rev.*, 119, 1929-1953.
7. Horinouchi, T., 2014: Influence of Upper Tropospheric Disturbances on the Synoptic Variability of Precipitation and Moisture Transport over Summertime East Asia and the Northwestern Pacific. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 92, No. 6, 519-541.
8. Hoerling, M. P., 1992: Diabatic sources of potential vorticity in the general circulation. *J. Atmos. Sci.* 49, 2282-2292.