

## نقش تاوایی پتانسیلی هم ارز و تر در مسیریابی سامانه‌های سودانی

محمد مرادی<sup>۱</sup>، امیرحسین مشکواتی<sup>۲</sup>، مجید آزادی<sup>۳</sup>،  
عباسعلی علی اکبری بیدختی<sup>۴</sup>

(تاریخ پذیرش نهایی مقاله: ۸۷/۵/۲۲)

تاوایی پتانسیلی که در هر عرض جغرافیایی به تاوایی نسبی و پایداری ایستایی وابسته است، همواره در تحلیل سامانه‌ها در عرض‌های میانی بکار می‌رود. از آنجایی که این کمیت به نم ویژه بستگی ندارد، از این رو استفاده از تاوایی پتانسیلی برای تعیین مسیر حرکت سامانه‌هایی که با مرکز پیشینه نم ویژه همراه هستند، مانند سامانه‌های سودانی که در فصل سرد ایران را تحت تاثیر قرار می‌دهند، مناسب نیست. برای تشخیص مسیر حرکت این سامانه‌ها از دو کمیت تاوایی پتانسیل هم ارز و تر که هر دو به ترتیب از طریق دمای پتانسیل هم ارز و تر به نم ویژه ارتباط دارند، می‌توان استفاده کرد. در این بررسی با بکارگیری داده‌های بایگانی NCEP / NCAR و انتخاب دو مورد سامانه جنوبی که مناطق مختلف ایران را تحت

### چکیده

\*

\*

\*

۱- استادیار سازمان هواشناسی کشور

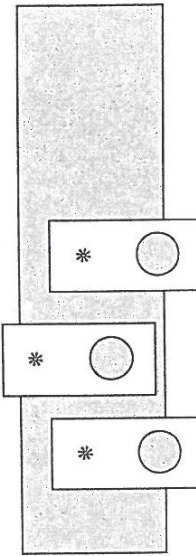
۲- استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

۳- استادیار پژوهشکده هواشناسی و علوم جو

۴- استاد موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران

تاثیر قرار داده‌اند، تاوایی پتانسیلی، تاوایی پتانسیلی هم ارز و تاوایی پتانسیلی تر محاسبه شدند و نتایج مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر منفی و کوچک تاوایی پتانسیل هم ارز و تر مسیر حرکت این دو سامانه را به خوبی نشان می‌دهد. از این رو در تحلیل این گونه سامانه‌ها و پیش‌بینی موقعیت آنها این دو کمیت می‌توانند به عنوان یک ابزار مناسب کاربردی در مراکز پیش‌بینی مورد استفاده قرار گیرند. همچنین گرته تاوایی پتانسیل هم ارز و تر مشابه هم می‌باشند با این تفاوت که مقدار تاوایی پتانسیل هم ارز از مقدار تاوایی پتانسیل تر بزرگتر است.

**کلمات کلیدی:** تاوایی پتانسیلی، تاوایی پتانسیلی هم ارز، تاوایی پتانسیلی تر.



#### مقدمه

در بحث گسترش، توسعه و زوال سامانه‌های جوی، تاوایی تراز میانی، فرارفت گرمایی و سرعت قائم نقش مهمی را ایفا می‌کنند. سات کلیف<sup>[۱۴]</sup> یکی از اولین پژوهشگرانی بود که گسترش چرخندها و واچرخندها را مورد بررسی قرار داده است. او تشخیص داد که چرخندزایی با همگرایی در ترازهای زیرین و نیز فرارفت تاوایی مطلق مثبت تراز میانی همراه است ( $-\bar{U} \cdot \nabla_a \zeta_a > 0$ ). پس از آن پیترسون<sup>[۱۱]</sup> با استفاده از معادله‌های تاوایی و ضخامت، توسعه چرخندها را به فرارفت ضخامت، حرکت قائم و میدان گرمایش دررو نسبت داد. کارلسون<sup>[۵]</sup> توسعه چرخند سطح زمین در یک منطقه کزفشاری را دلیل شروع فرارفت گرمایی و فرارفت تاوایی سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال می‌دانند. او همچنین دلیل توسعه ناوه تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال را به فرارفت تاوایی مطلق مثبت و فرارفت تاوایی گرمایی مثبت ( $-\bar{U} \cdot \nabla_T \zeta_T > 0$ ) که سبب مثبت بودن گرایش تاوایی خواهند شد، ربط می‌دهد. پس از

1. Sutcliffe
2. Petterssen
3. Carlson

مطالعه هاسکینز<sup>۱</sup> و همکاران [۹] تاوایی پتانسیلی که نخستین بار توسط راسبی [۱۱] تعریف شده بود، به دلیل دارا بودن سه ویژگی، پایداری، وارون پذیری و فرارفت افقی آن، مورد توجه خاص هواشناسان قرار گرفت. پایداری تاوایی پتانسیلی در تشخیص کیفی نوع توده هوا و وارون پذیری آن برای بدست آوردن میدان باد و تابع جریان، در بررسی‌های همدیدی و عددی همواره مورد توجه پژوهشگران هواشناسی قرار دارد. در ایران نیز محب‌الحجه و مرادی [۲] تاوایی پتانسیلی را در روی سطوح هم دمای پتانسیل برای یک حالت موردی مطالعه کردند و نشان دادند که با حرکت شرق سوی ناوه شرق دریای مدیترانه، پربند ۱/۲ واحد تاوایی پتانسیلی نیز به سوی شرق جابجا می‌شود و هنگامیکه این ناوه در اثر فرایند دررو تضعیف می‌شود، این کمیت نیز دستخوش تغییر می‌گردد. همچنین احمدی گیوی و همکاران [۱] در بررسی این کمیت روی خاور میانه و ایران نشان می‌دهند که مرحله تکوین چرخند سطحی فقط با حضور بی‌هنجاری تاوایی پتانسیلی سطوح زیرین آغاز می‌شود و در مرحله بلوغ سامانه بر هم کنش سه عامل تاوایی پتانسیل سطوح زیرین، تاوایی پتانسیلی ناشی از فرایندهای دررو و تاوایی پتانسیلی ناشی از فرارفت‌های گرم سطوح زیرین منجر به چرخندزایی می‌گردد. از آنجایی که گرتة دمای پتانسیل با گرتة سامانه‌ها در عرض‌های میانی بیشتر هماهنگ است و نیز با کاهش عرض جغرافیایی تاوایی مطلق کم می‌شود از این رو نقش تاوایی پتانسیلی در روی سطوح دمای پتانسیل مختلف، در تحلیل کم فشارهایی که منشا آنها مناطق اطراف دریای سرخ است و خط هم فشار ۱۰۱۲ هکتوپاسکال جنوب آن دریا و منطقه سودان و اتیوپی را در بر می‌گیرد و در این مطالعه به سامانه‌های سودانی معروف است [۴]، در پرده ابهام باقی می‌ماند. چون دمای پتانسیل هم ارز و تر در عرض‌های جنوبی هماهنگ با گرتة فشاری سامانه‌ها تغییر می‌یابد، از این رو سعی می‌شود تا با جانشانی دمای پتانسیل هم ارز و تر به جای دمای پتانسیل در رابطه تاوایی پتانسیلی، به ترتیب تاوایی پتانسیلی هم ارز و تر در تحلیل سامانه‌های جنوبی ارزیابی شوند. برای این کار دو مورد سامانه جنوبی که در طول دوره زندگی خود مسیرهای متفاوتی را طی می‌کنند، انتخاب می‌شوند و گرتة کمیت‌های تاوایی پتانسیلی هم ارز و تر بررسی می‌شوند. از آنجایی که برای گسسته سازی این دو کمیت در تراز

۶۰۰ هکتوپاسکال، از داده‌های ترازهای ۵۰۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال استفاده می‌شود و این دو تراز به ترتیب، ویژگی‌های دینامیکی و ترمودینامیکی جو را در بر می‌گیرد، از این رو گرته‌های کمیته‌های تاوایی پتانسیلی تر و هم‌ارز در این تراز بررسی شده‌اند.

### مبانی نظری و بررسی همدیدی

تاوایی پتانسیلی که در ایجاد و توسعه جریان‌های چرخندی ترازهای پایین از طریق تولید یک باند کژفشاری در آن تراز نقش عمده‌ای دارد، در یک جریان بدون اصطکاک و بی‌دررو در روی ترازهای فشاری مختلف بصورت زیر تعریف می‌شود [۹]:

$$P_V = g(\zeta + f) \left( -\frac{\partial \theta}{\partial p} \right) \quad (1)$$

که در آن  $\zeta + f$  تاوایی مطلق روی ترازهای فشاری و  $\left( -\frac{\partial \theta}{\partial p} \right)$  پایداری ایستایی است. در اینجا،  $g$  شتاب گرانی،  $f$  تاوایی سیاره‌ای و  $\theta$  دمای پتانسیلی است.  $P_V$  نیز تاوایی پتانسیلی ارتل می‌باشد. به ازای  $f = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ،  $g = 10 \text{ ms}^{-2}$  و تغییر دمای پتانسیل ده درجه کلون در ۱۰۰ هکتوپاسکال در نبود تاوایی نسبی، مقدار کمی تاوایی پتانسیلی بصورت زیر است:

$$P_s \cong 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 10^{-4} \text{ s}^{-1} \times \frac{10 \text{ k}}{10000 \text{ pa}} = 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ K s}^{-1} \text{ kg}^{-1} \quad (2)$$

مقدار  $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$  در عمل واحد تاوایی پتانسیلی است و با PVU نشان داده می‌شود. تاوایی پتانسیل هم‌ارز<sup>۱</sup> نیز در دستگاه دکارتی بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$EP_V = \frac{1}{\rho} \bar{c}_a \cdot \nabla \theta_e \quad (3)$$

که در آن  $\rho$  چگالی و  $\bar{c}_a$  بردار تاوایی مطلق است.  $\theta_e$  دمای پتانسیل هم‌ارز نیز از معادله زیر بدست می‌آید [۵]:

$$\theta_e = T \left( 1 + \frac{L_v}{C_p} \frac{r(P, T_d)}{T} \right) \left( \frac{1000}{P} \right)^{1/286} \quad (4)$$

که در آن  $T$  دما،  $P$  فشار،  $L_v = 2/5 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$  گرمای نهان تبخیر،  $C_p = 1005/5 \text{ JK}^{-1} \text{ kg}^{-1}$  گرمای ویژه هوای خشک در فشار ثابت و  $r(P, T_d)$  نسبت

اختلاط است که از معادله زیر محاسبه می‌شود [۱۲ و ۱۳]:

$$r(P, T_d) = \frac{0.622 e_s(T_d)}{p - e_s(T_d)} \quad (5)$$

که در آن  $e_s(T_d)$  فشار بخار آب و  $T_d$  دمای نقطه شبنم است. با بکارگیری معادله آب ایستایی و باز کردن رابطه (۳)، مشابه معادله (۱)، رابطه تاوایی پتانسیلی هم ارز بصورت زیر بدست می‌آید:

$$EP_V = g(\zeta + f) \left( -\frac{\partial \theta_e}{\partial p} \right) \quad (6)$$

به روش مشابه رابطه تاوایی پتانسیل تر<sup>۱</sup> نیز بصورت زیر می‌باشد [۱۶]:

$$WP_V = g(\zeta + f) \left( -\frac{\partial \theta_w}{\partial p} \right) \quad (7)$$

در این رابطه  $\theta_w$  دمای پتانسیل تر است و از حل معادله زیر به روش نیوتن رافسون [۳] بدست می‌آید:

$$C_p L_n \left( \frac{\theta_w}{T_w} \right) = R_d L_n \left( \frac{1000}{P} \right) - L_v \left[ \frac{r(1000, \theta_w)}{\theta_w} - \frac{r(P, T_w)}{T_w} \right] \quad (8)$$

که در آن  $R_v = 461/5 \text{ JK}^{-1} \text{ kg}^{-1}$  ثابت ویژه گاز برای بخار آب،  $R_d = 287/5 \text{ JK}^{-1} \text{ kg}^{-1}$  ثابت ویژه گاز برای هوای خشک و  $T_w$  دمای تر برحسب درجه کلوین از حل رابطه سایکرومتری محاسبه می‌شود [۵]:

$$T_w = T - 0.622 \frac{L_v}{C_p} \left[ \frac{e(T_w) - e(T)}{p} \right] \quad (9)$$

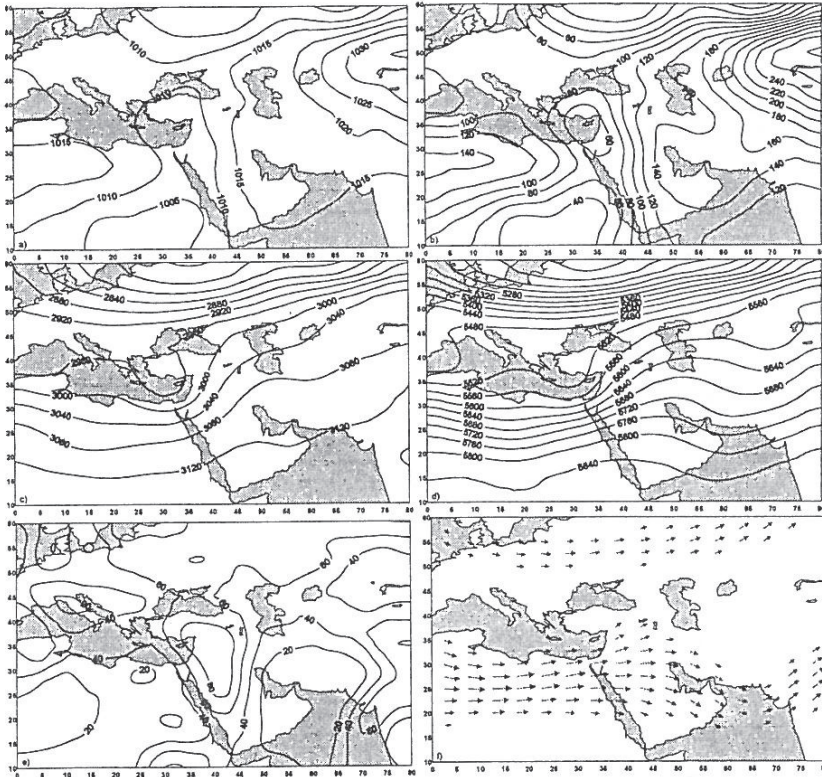
برای تشخیص توزیع میدان تاوایی پتانسیلی از رابطه (۱) دیده می‌شود که به سبب افزایش عرض جغرافیایی، چون تاوایی سیاره‌ای از استوا به قطب افزایش می‌یابد، در غیاب پایداری ایستایی، تاوایی پتانسیلی نیز از استوا به قطب زیاد می‌شود. با وجود پایداری ایستایی، چون در پوش سپهر این کمیت بالاترین مقدار را دارد و ارتفاع پوش سپهر از استوا به قطب کاهش می‌یابد، از این رو افزایش تاوایی سیاره‌ای و پایداری ایستایی موجب افزایش تاوایی پتانسیلی از استوا به قطب می‌شوند. عموماً در ترازهای بالای ۴۰۰

هکتوپاسکال جمله پایداری ایستایی سبب افزایش تاوایی پتانسیلی از استوا به قطب می‌شود [۹]. در ناوه‌ها (پشته‌ها) چون تاوایی مطلق زیاد (کم) و نیز ارتفاع وردایست پایین (بالا) و در نتیجه پایداری ایستایی زیاد (کم) است پس هر دو جمله تاوایی مطلق و پایداری ایستایی در ناوه‌ها (پشته‌ها) موجب افزایش (کاهش) تاوایی پتانسیلی می‌شود. از معادله (۶) و (۷) نیز دیده می‌شود که در عرض‌های نزدیک استوا به سبب کاهش تاوایی سیاره‌ای و در نتیجه کاهش تاوایی مطلق، تغییرات قائم دمای پتانسیل هم ارز و تر سبب کاهش پایداری ایستایی در ترازهای زیرین جو می‌شود. بنابراین از گرته این کمیت‌ها می‌توان وضعیت و مسیر حرکت سامانه‌های جنوبی را بررسی کرد. در این مقاله دو سامانه جنوبی با مسیرهای متفاوت برای بررسی انتخاب می‌شوند. مورد اول که در روز ششم ژانویه ۱۹۵۸ با عبور از روی بوشهر، سبب ریزش ۱۵۰ میلیمتر باران در مدت بیست و چهار ساعت شده است و مورد دوم که در هفدهم ژانویه ۲۰۰۰ از روی بندرعباس عبور کرده است و بارش بیست و چهار ساعته در آن بندر ۱۲۸ میلیمتر ثبت شده است.

#### بررسی همدیدی مورد ۰۶ ژانویه ۱۹۵۸

بررسی میدان فشار نشان می‌دهد که در غرب دریای سرخ و نیز در عرض‌های شمالی دو مرکز کم فشار قرار دارند. در روی سبیری مرکز پرفشار ۱۰۴۰ هکتوپاسکال و در غرب دریای مدیترانه نیز پرفشار ۱۰۱۵ هکتوپاسکال وجود دارند که پشته‌های آنها به ترتیب به شرق دریای سرخ و جنوب دریای مدیترانه امتداد یافته‌اند. به تدریج ناوه کم فشار غرب دریای سرخ در امتداد دریای سرخ به سوی عرض‌های شمالی امتداد می‌یابد و در اثر تقویت پرفشار غرب دریای مدیترانه و امتداد پشته آن، یک سلول ۱۰۱۰ هکتوپاسکال در شرق دریای مدیترانه از ناوه فشاری دریای سرخ جدا می‌شود. این ناوه به همراه مرکز کم فشار عرض‌های شمالی به سوی شرق حرکت می‌کند و به تدریج روی دریای خزر قرار می‌گیرد. این سازوکار سبب می‌شود تا پرفشار روی سبیری ضعیف شود و پشته آن به عرض‌های بالاتر جابجا گردد و ناوه فشاری دریای سرخ به سوی جنوب غرب ایران امتداد یابد و با سلول کم فشار روی خلیج فارس ترکیب شود. از این رو مرکز کم فشار یاد شده در روز ششم ژانویه در شمال شرق ایران قرار می‌گیرد و به تدریج در حین تضعیف از ایران خارج می‌شود. با جابجایی پرفشار به جنوب دریای مدیترانه، یک مرکز کم فشار دیگر در

شمال اروپا شکل می‌گیرد که مرکز آن به ۹۸۰ هکتوپاسکال می‌رسد و ناوه آن به تدریج به سوی دریای سیاه امتداد می‌یابد. در روی سودان نیز کم فشار گرمایی با خط هم فشار ۱۰۱۰ هکتوپاسکال قرار گرفته است و ناوه ضعیف آن به سوی مرکز دریای سرخ کشیده شده است. سراسر عرض‌های میانی تحت تأثیر پشته‌های فشاری ناشی از دو مرکز پرفشار یاد شده می‌باشد. به تدریج کم فشار روی اروپای مرکزی در حرکت شرق سوی خود به سوی شمال دریای سیاه جابجا می‌شود و دو ناوه از آن به سوی شرق دریای مدیترانه و شمال دریای خزر امتداد می‌یابد. در زیر ناوه دومی، پشته فشاری ۱۰۱۵ هکتوپاسکال ناشی از پرفشار غرب دریای مدیترانه قرار دارد که خط هم‌فشار ۱۰۱۵ هکتوپاسکال آن به جهت ۳۴۰ درجه به سوی هرمرزگان گسترده شده است و سبب تشکیل یک سلول پرفشار در روی خلیج فارس می‌شود (شکل ۱-ا). در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال شرایط مشابه میدان فشار است (شکل ۱-ب). در دو تراز ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال، یک کم ارتفاع در روی اسکانندیناوی قرار دارد که یک ناوه از آن به سوی جنوب دریای مدیترانه امتداد دارد. ناوه ضعیف دیگری نیز از روی دریای خزر به سوی دریای عمان کشیده شده است. همچنین یک پشته ضعیف در نوار غربی ایران دیده می‌شود (شکل‌های ۱-ج و ۱-د). در عرض‌های زیر ۱۵ درجه شمالی، پرارتفاع جنب حاره‌ای قرار دارد. به تدریج ناوه روی ایران، از ایران خارج می‌شود و ناوه دیگر به سوی شرق دریای مدیترانه حرکت می‌کند. این ناوه در روز ششم ژانویه کاملاً به عرض‌های جنوبی گسترده می‌شود و پرارتفاع جنب حاره‌ای را در غرب دریای سرخ به دو بخش تقسیم می‌کند. به تدریج بخشی از ناوه ذکر شده در شرق دریای سرخ عمیق‌تر می‌شود و به سوی شرق حرکت می‌کند و در روز نهم ژانویه از منطقه تنگه هرمز عبور می‌کند. بررسی میدان نم نسبی تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال نشان می‌دهد که در روی دریای سرخ مرکز بیشینه نم نسبی قرار دارد. در دو طرف این مرکز بیشینه، دو مرکز کمینه ۲۰ درصدی قرار دارد که یکی در غرب دریای سرخ و دیگری در شرق آن دریا در روی ایران قرار گرفته است. مرکز بیشینه به تدریج به سوی عرض‌های بالاتر گسترده می‌شود و با مرکز بیشینه روی دریای سیاه ترکیب می‌شود و یک نوار باریکی از جنوب غرب دریای سرخ به سوی دریای سیاه را پدید می‌آورند. این نوار بیشینه نم نسبی به تدریج روی نیمه غربی ایران قرار می‌گیرد بطوری که در روز ششم ژانویه در روی خلیج فارس و استان بوشهر سلول ۸۰ درصدی نم نسبی بسته می‌شود. با عبور این سلول و جابجایی آن



شکل ۱- (a) گرته فشاری سطح متوسط دریا برحسب هکتوپاسکال، (b) گرته ارتفاع تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال برحسب متر، (c) گرته ارتفاع تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال برحسب متر، (d) گرته ارتفاع تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال برحسب متر، (e) گرته نم نسبی تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال برحسب درصد و (f) میدان باد تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال برحسب متر بر ثانیه، در ساعت UTC ۱۲۰۰ مورخه دوم ژانویه سال ۱۹۵۸ فاصله هم‌فشارها ۵ هکتوپاسکال، فاصله پربندهای تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال ۲۰ متر، فاصله پربندهای تراز ۵۰۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال ۴۰ متر و فاصله پربندهای نم نسبی ۲۰ درصد است اعداد روی محورهای مختصات طول و عرض جغرافیایی برحسب درجه می‌باشند.

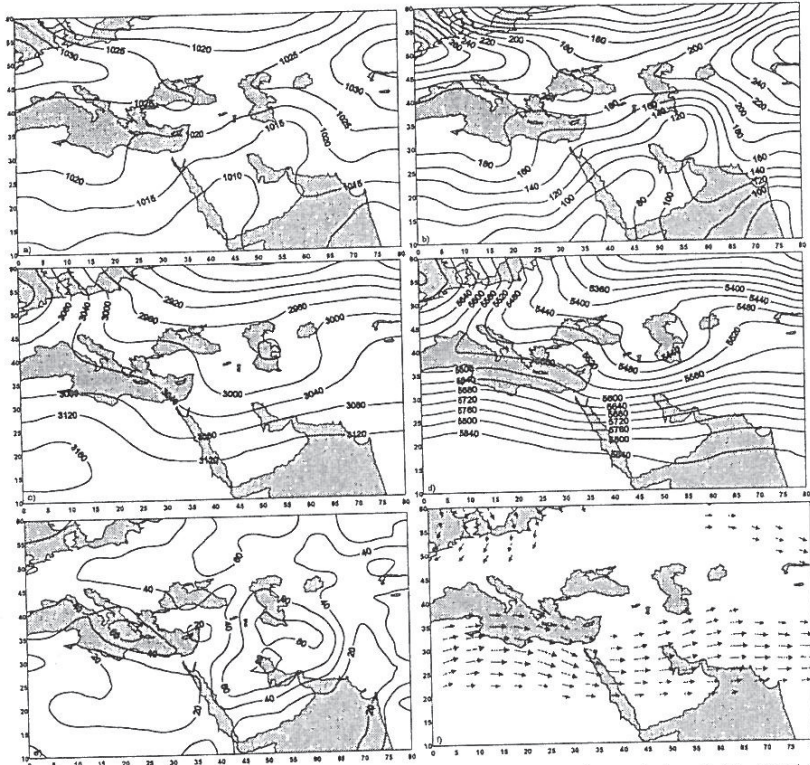
به شرق ایران، منطقه نم نسبی کمینه ایران را دربر می‌گیرد (شکل ۱- e). به تدریج یک سلول ۸۰ درصدی از نم نسبی از جنوب غرب دریای سرخ به سوی خلیج فارس کشیده می‌شود که در روز نهم ژانویه این سلول خود را به تنگه هرمز کشانده، سپس از آنجا خارج



می‌شود. بررسی میدان باد تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال نشان می‌دهد که محور جت جنب حاره‌ای در اطراف مدار ۲۶ درجه شمالی است که در مسیر خود به سوی شرق در غرب دریای سرخ دارای خم و اچرخندی و در جنوب شرق ایران دارای خم چرخندی می‌باشد. به تدریج این دو خم به سوی شرق تغییر مکان می‌یابند (شکل ۱-f). در روز ششم ژانویه یک خم چرخندی در محور جت جنب حاره‌ای در روی دریای سرخ ایجاد می‌شود.

### بررسی همیدی مورد ۱۷ ژانویه ۲۰۰۰

بررسی میدان فشار نشان می‌دهد که در اطراف مدار ۴۰ درجه شمالی یک مرکز پرفشار ۱۰۳۵ هکتوپاسکالی قرار گرفته است که پشته آن کشور پاکستان، دریای عرب و شرق دریای سرخ را در بر گرفته و از شمال دریای سرخ به سوی جنوب دریای مدیترانه امتداد یافته است. در روی سودان نیز کم فشار گرمایی با مرکز ۱۰۱۰ هکتوپاسکال وجود دارد که ناوه آن به سوی شمال دریای سرخ امتداد یافته است. با تضعیف پرفشار عرض‌های میانی، ناوه فشاری دریای سرخ به عرض‌های شمالی تر کشیده می‌شود و بخش شمالی آن به سوی خلیج فارس متمایل می‌گردد و سپس با عبور از روی خلیج فارس تا شمال شرق ایران امتداد می‌یابد (شکل ۲-a). این سازوکار سبب می‌شود تا مرکز پرفشار عرض‌های میانی به دو سلول مجزا تقسیم شوند و کم فشار عرض‌های شمالی نیز به سوی دریای سیاه امتداد یابد. ناوه فشاری دریای سرخ به تدریج مناطق جنوب و شمال تنگه هرمز را نیز در بر می‌گیرد و سبب تولید جریان‌های دریا به خشکی به سوی سواحل اطراف تنگه هرمز می‌شود. همچنانکه مرکز کم فشار گرمایی در روی سودان باقی می‌ماند، کم فشار عرض‌های شمالی به سوی شرق دریای مدیترانه امتداد می‌یابد و دو مرکز پرفشار عرض‌های میانی را به عرض‌های شرقی و غربی می‌راند و نیز ناوه فشاری عرض‌های جنوبی ایران از جنوب غرب کشور خارج می‌شود. از بررسی میدان ارتفاع تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال دیده می‌شود که در روی سودان مرکز کمینه این کمیت وجود دارد که ناوه آن به سوی عرض‌های شمالی تر، در راستای دریای سرخ امتداد می‌یابد. در عرض‌های میانی نیز مرکز پرارتفاع این تراز دیده می‌شود. در اثر تقویت پشته‌های این پرارتفاع در جنوب دریای عمان و نیز جنوب دریای مدیترانه، ناوه فشاری دریای سرخ شکل مشخص تری را به خود می‌گیرد و سپس به سوی خلیج فارس امتداد می‌یابد.



شکل ۲- (a) گرته فشاری سطح متوسط دریا برحسب هکتوپاسکال، (b) گرته ارتفاع تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال برحسب متر، (c) گرته ارتفاع تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال برحسب متر، (d) گرته ارتفاع تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال برحسب متر، (e) گرته نم نسبی تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال برحسب درصد و (f) میدان باد تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال برحسب متر بر ثانیه، در ساعت UTC ۱۲۰۰ مورخه شانزدهم ژانویه سال ۲۰۰۰ فاصله همفشارها ۵ هکتوپاسکال، فاصله پریندهای تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال ۲۰ متر، فاصله پریندهای تراز ۵۰۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال ۴۰ متر و فاصله پریندهای نم نسبی ۲۰ درصد است اعداد روی محورهای مختصات طول و عرض جغرافیایی برحسب درجه می‌باشند.

بخش شمالی این ناوه تا جنوب شرق ایران کشیده می‌شود و بخش جنوبی آن در روی سودان باقی می‌ماند. از این رو محور این سامانه از روی سودان تا شمال شرق ایران امتداد یافته است (شکل ۲- b). با تقویت کم ارتفاع عرض‌های شمالی و امتداد ناوه آن به سوی عرض‌های جنوبی مرکز پر ارتفاع عرض‌های میانی به دو بخش تقسیم می‌شود و در اثر

تضعیف این منطقه پرفشار، ناوه فشاری دریای سرخ به سوی عرض‌های شمالی تر امتداد می‌یابد. از بررسی میدان ارتفاع در دو تراز ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال دیده می‌شود که ناوه مرکز کم ارتفاع عرض‌های شمالی دریاچه بالخاش بصورت مورب از زیر دریای خزر به سوی شمال شرق دریای مدیترانه امتداد دارد و در عرض‌های جنوبی منطقه مورد مطالعه پرارتفاع جنب حاره‌ای قرار گرفته است. همچنین پرارتفاع روی غرب دریای مدیترانه در راستای آن دریا به سوی شرق کشیده شده است. به تدریج ناوه شمال شرق دریای مدیترانه بصورت یک کم فشار بریده تغییر شکل می‌دهد و در غرب دریای خزر جای می‌گیرد. این مرکز سپس باز می‌شود (شکل‌های ۲-c و d) و از نوار شمالی ایران عبور می‌کند. بررسی میدان نم نسبی تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال نشان می‌دهد که در مرکز دریای مدیترانه و شرق آن مراکز بیشینه‌ای وجود دارد که مرکز دومی با خط هم مقدار ۶۰ درصد از گسترش زیادی برخوردار است و تا نوار غربی ایران را نیز تحت پوشش قرار داده است. با حرکت شرق سوی این مرکز بیشینه و تقویت آن، خط هم مقدار ۸۰ درصدی، نیمه غربی ایران را در بر می‌گیرد و سپس به سلول‌های کوچک ۸۰ درصدی تبدیل می‌شود که یکی از این سلول‌ها در غرب خلیج فارس و دیگری در نیمه شمالی ایران جای می‌گیرد (شکل ۲-e). در اثر تقویت مراکز کمینه اطراف این منطقه بیشینه، این هسته باریک تر می‌شود و به سوی جنوب شرق ایران کشیده تر می‌گردد و پشته آن به سوی سودان امتداد می‌یابد. از بررسی میدان باد تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال دیده می‌شود که محور جت جنب حاره‌ای در اطراف مدار ۲۷/۵ درجه شمالی قرار گرفته است و از جنوب دریای مدیترانه تا جنوب شرق ایران شارش یافته است. محور این جت در شرق دریای سرخ انحنا چرخندی پیدا می‌کند و بصورت یک موج سینوسی تغییر شکل می‌دهد (شکل ۲-f).

## مواد و روش‌ها

داده‌های مورد نیاز سامانه‌های انتخابی از بایگانی NCEP/NCAR از تارنمای اینترنتی CDC\REANALYSIS گرفته شده است. این داده‌ها که در قالب netcdf می‌باشند به فاصله زمانی ۶ ساعته و گام شبکه‌ای ۲/۵ درجه‌ای در راستای طول و عرض جغرافیایی، تمام کره زمین را پوشش می‌دهند. داده‌ها شامل فشار سطح متوسط دریا و دما، ارتفاع، نم نسبی، مولفه‌های مداری و نصف النهاری و مولفه قائم بردار باد در ۱۷ تراز فشاری معیار

می‌باشند. برای محاسبه مشتق متغیرهای وابسته‌ای که در تعریف فراسنج‌های فرمول بندی شده آشکار شده‌اند، مشتق‌های مورد نظر با عبارت‌های تفاضل متناهی که بر پایه بسط سری تیلور استوار است، تقریب زده می‌شوند. این کار در یک شبکه منظم افقی در ناحیه‌ای محدود به طول جغرافیایی صفر تا ۸۰ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۱۰ تا ۶۰ درجه شمالی انجام می‌شود. همچنین در این بررسی از دستگاه مختصات قطبی کروی استفاده می‌شود. در این دستگاه مختصات، مولفه قائم تاوایی نسبی بصورت زیر بدست می‌آید:

$$\zeta = \frac{1}{r \cos \phi} \frac{\partial v}{\partial \lambda} - \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \phi} + \frac{v}{r} \tan \phi \quad (10)$$

که در آن  $r$  شعاع متوسط زمین است. با استفاده از تقریب تفاضل متناهی برای نقاط داخل شبکه، روش مشتق پس سو برای مرزهای بالا و راست و روش مشتق پیش سو برای مرزهای پایین و چپ، شکل تفاضل متناهی معادله (۱۰) در روی شبکه انتخابی برای نقطه  $i, j$  هر تراز فشاری با اندیس  $k$  بدست می‌آید:

$$\zeta_{i,j,k} = \frac{1}{r \cos(\phi_j)} \frac{1}{2d\lambda} (v_{i+1,j,k} - v_{i-1,j,k}) - \frac{1}{r} \frac{1}{2d\phi} (u_{i,j+1,k} - u_{i,j-1,k}) + \frac{v_{i,j,k}}{r} \tan(\phi_j) \quad (11)$$

از این رو تاوایی مطلق با معلوم بودن عرض جغرافیایی و در نتیجه تاوایی سیاره‌ای، در هر تراز فشاری برای هر نقطه از شبکه حاصل می‌شود. با معلوم بودن مقادیر دما در هر نقطه از شبکه می‌توان دمای پتانسیل، دمای پتانسیل هم ارز و دمای پتانسیل تر را بدست آورد و سپس تاوایی پتانسیل از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$P_{Vi,j,k} = -\frac{g}{\delta p} [(\zeta_{i,j,k} + f_j)(\theta_{i,j,k+1} - \theta_{i,j,k-1})] \quad (12)$$

بدیهی است که با جانشانی دمای پتانسیل هم ارز و تر در معادله (۱۲)، تاوایی پتانسیلی هم ارز و تاوایی پتانسیل تر بدست می‌آید. در این معادله  $\delta p = 200 \text{ hPa}$  است که اختلاف فشار بین دو تراز ۵۰۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال می‌باشد شایان ذکر است که برای محاسبه فشار بخار اشباع روی سطح آب مایع یا یخ، روابط زیادی وجود دارد که می‌توان به رابطه گف گراچ (۱۹۴۶)، گف (۱۹۵۷)، تیتنز (۱۹۶۷)، هایلند و واسلر (۱۹۸۳)، بوک (۱۹۹۶، ۱۹۸۱) و مورفی (۲۰۰۵) اشاره کرد [۶، ۷، ۸، ۱۰ و ۱۵]. در این بررسی برای محاسبه فشار بخار

آب از معادله

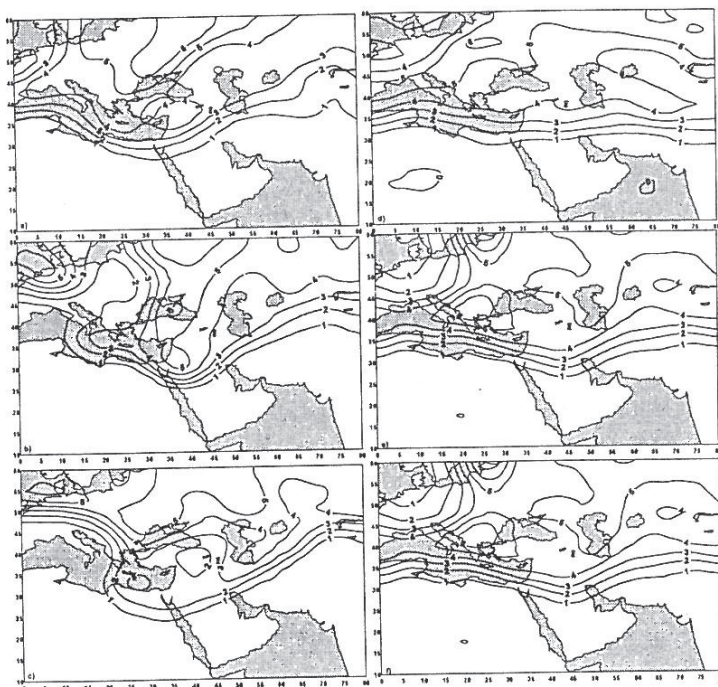
$$e_s(X) = 6/11 \text{Exp} \left[ \frac{L_v}{R_v} \left( \frac{1}{273/15} - \frac{1}{X} \right) \right]$$

استفاده شده است که با انتگرال گیری از معادله کلاوسیوی کلاپیرون بدست آمده است [۱۳]. با جانشانی  $T_d$  و  $T_w$  در این معادله، به ترتیب  $e_s(T_d)$  و  $e_s(T_w)$  بدست می آید.

### نتایج و بحث

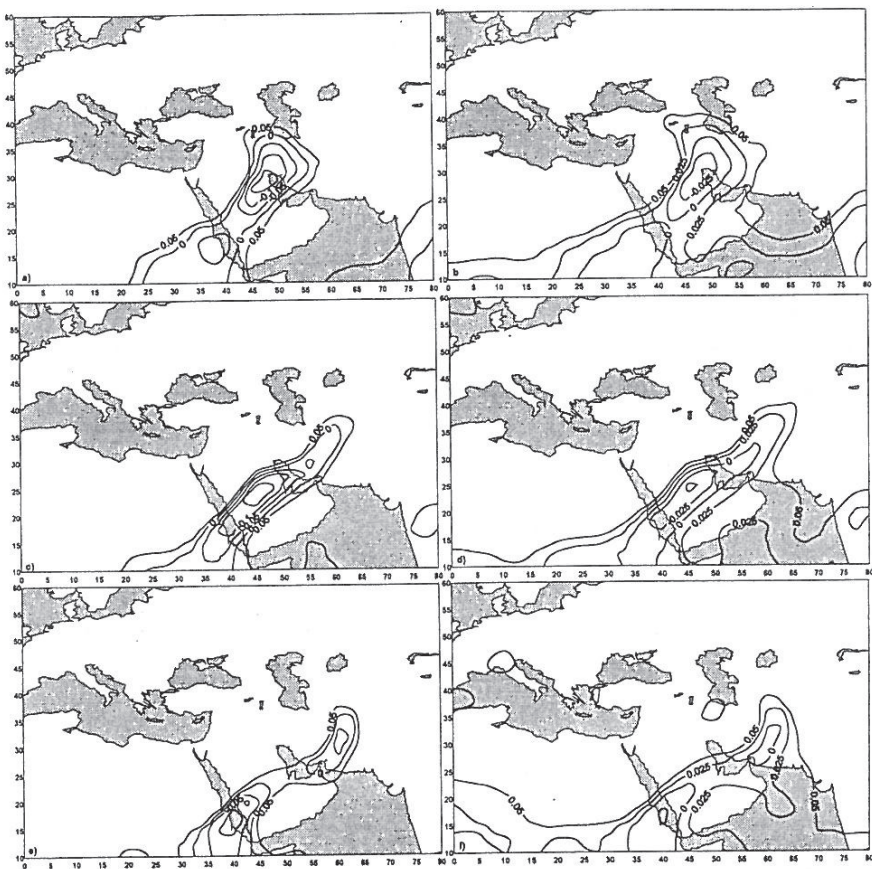
بررسی میدان تاوایی پتانسیلی در تراز ۳۳۰ درجه کلونین در حالت موردی ششم ژانویه ۱۹۵۸ نشان می دهد که مرکز بیشینه این کمیت با هسته مرکزی ۴ واحدی در روی آب های شرق دریای مدیترانه وجود دارد و در روی کشور ایران خط هم مقدار ۱ واحدی نیمه شمالی را از نیمه جنوبی آن جدا کرده است. به تدریج در مرکز دریای مدیترانه یک مرکز بیشینه گسترده ۴ واحدی بوجود می آید که به سوی شرق آن دریا حرکت می کند. بخش شرقی این مرکز در شرق دریای مدیترانه با بخش جنوبی مرکز بیشینه ای که در شمال دریای سیاه شکل گرفته است ترکیب می شود و بخش غربی آن بصورت یک پشته این کمیت به سوی غرب دریای مدیترانه امتداد می یابد. از این رو هسته بیشینه این کمیت با خط هم مقدار ۶ واحدی در غرب دریای سیاه قرار گرفته است و خط هم مقدار ۴ واحدی تا شمال دریای سرخ نیز امتداد یافته است. بنابراین یک مرکز بیشینه در عرض های شمالی دریای سیاه بوجود می آید که پشته آن بصورت نوار باریکی تا شرق دریای مدیترانه و سپس تا شمال شرق دریای سرخ امتداد یافته است. این نوار باریک به تدریج به سوی شرق حرکت می کند و از روی کشور ایران عبور می نماید. با عبور این منطقه بیشینه، سلول های کوچک کمینه ای در جنوب دریای سیاه بوجود می آید و در شرق دریای مدیترانه نیز مجدداً پشته های این کمیت دیده می شود که به تدریج بصورت مراکز بیشینه مجزایی به سوی شرق حرکت کرده و مشابه یک نوار باریک از نوار غربی کشور و سپس به تدریج از شمال شرق و شرق کشور ایران خارج می شوند و جای آن را مناطق کمینه این کمیت پر می کند (شکل های ۳-ا، b، c). بررسی این کمیت در حالت موردی هفدهم ژانویه ۲۰۰۰ نیز نشان می دهد که در اطراف مدار ۳۲/۵ درجه شمالی خطوط هم مقدار ۱، ۲، ۳ و ۴

واحدی این کمیت کشیده شده است و مقادیر بیشینه ۵ واحدی در عرض‌های بالاتری قرار گرفته‌اند که منطبق بر کم ارتفاع تراز میانی عرض‌های شمالی است. پشته مرکز بیشینه ۶ واحدی عرض‌های شمالی دریای خزر بصورت کج به سوی کشور ایتالیا امتداد می‌یابد و بخش جنوبی آن در شرق دریای بالتیک بصورت یک مرکز بیشینه مستقل ۶ واحدی از مرکز بیشینه اصلی جدا می‌شود. در غرب خلیج فارس خم چرخندی در خطوط هم مقدار ۱ تا ۴ واحدی بوجود می‌آید (شکل‌های ۳-d، e، f). مرکز بیشینه شرق دریای بالتیک به تدریج به سمت عرض‌های شمالی دریای سیاه جابجا و تضعیف می‌شود. در روی کشور ایران پشته‌ها و ناوه‌های کوتاه و ضعیفی از نوار شمالی عبور می‌کنند.



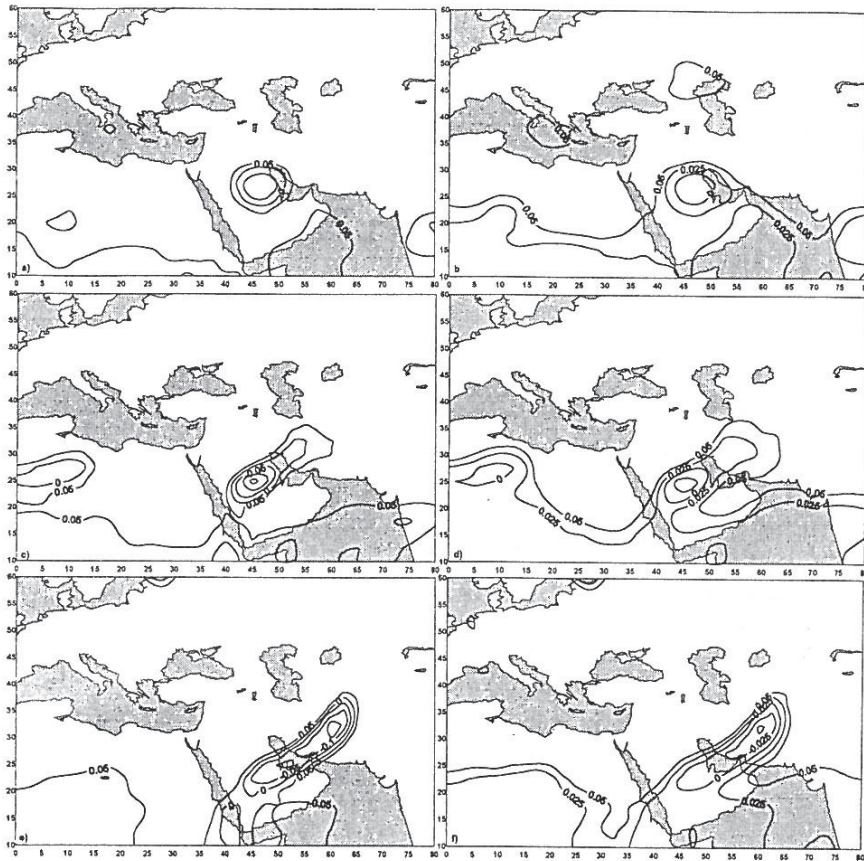
شکل ۳- گرته تاوایی پتانسیلی تراز ۳۳۰ درجه کلون برحسب p۷۰۰، در ساعت ۰۰:۰۰ UTC مورخه (a) پنجم ژانویه سال ۱۹۵۸، (b) ششم ژانویه سال ۱۹۵۸، (c) هفتم ژانویه سال ۱۹۵۸، (d) شانزدهم ژانویه سال ۲۰۰۰، (e) هفدهم ژانویه سال ۲۰۰۰ و (f) هیجدهم ژانویه سال ۲۰۰۰، فاصله هم مقدارهای تاوایی پتانسیلی یک واحد است اعداد روی محورهای مختصات طول و عرض جغرافیایی برحسب درجه می‌باشند.

بررسی میدان تاوایی پتانسیلی هم ارز در تراز ۶۰۰ هکتوپاسکال در حالت موردی ششم ژانویه ۱۹۵۸ نشان می دهد که در روی کشور سودان مرکز کمینه این کمیت قرار دارد که در راستای دریای سرخ به سوی عرض های شمالی امتداد یافته است. این مرکز کمینه بصورت سلول های کوچک ۰/۱ واحدی در اطراف منطقه ذکر شده پخش شده اند. به تدریج در جنوب شرق دریای مدیترانه و شمال غرب دریای سرخ مرکز بیشینه ای از این کمیت بوجود می آید که با گسترش آن، مرکز کمینه روی کشور سودان شکل مشخص تری به خود می گیرد، به گونه ای که ناوه این کمیت در امتداد دریای سرخ به سوی شرق دریای مدیترانه کشیده می شود. بخش شمالی این ناوه در شرق دریای سرخ بصورت یک هسته بسته عمل می کند و بخش جنوبی آن همچنان در روی کشور سودان ماندگار است. به تدریج سلول کمینه شرق دریای مدیترانه به سوی ایران حرکت می کند و با عبور از جنوب غرب این کشور، مرکز و شمال شرق آن را نیز در بر می گیرد. هسته اصلی این مرکز کمینه با خط هم مقدار ۰/۱- واحد در غرب خلیج فارس قرار می گیرد و سپس این هسته مرکز و شمال شرق کشور ایران را در بر می گیرد و محور این مرکز از شمال شرق ایران به سوی کشور سودان کشیده می شود (شکل های ۴-a، c، e). این شرایط به تناوب همچنان ادامه می یابد و هسته های کمینه این کمیت در شرق دریای سرخ و سپس خلیج فارس و مرکز ایران تشکیل می شوند و از شرق ایران خارج می گردند. این وضعیت برای تاوایی پتانسیلی تر این تراز که در شکل های ۴-b، d، f نشان داده شده است، نیز دیده می شود. با این تفاوت که مقدار این کمیت کمتر از مقدار تاوایی پتانسیلی هم ارز است. در حالت موردی هفدهم ژانویه ۲۰۰۰ نیز دیده می شود که در روی کشور سودان مرکز کمینه صفر واحدی قرار دارد که ناوه آن در راستای دریای سرخ تا شمال آن دریا امتداد یافته است. به سبب وجود مراکز بیشینه روی کشور ایران و شرق و جنوب دریای مدیترانه، گرادیان مناسبی از این کمیت در روی خلیج فارس به چشم می خورد. سلول بسته صفر واحدی به تدریج به شمال شرق دریای سرخ جابجا می شود و سپس در غرب خلیج فارس قرار گرفته و تقویت می شود بطوری که خط هم مقدار مرکزی آن به ۰/۱- واحد می رسد. این مرکز کمینه در راستای خط شمال شرق-جنوب غرب گسترش می یابد، بطوری که از جنوب غرب دریای سرخ تا شمال شرق کشور ایران امتداد دارد. این هسته کمینه به تدریج به مرکز خلیج فارس جابجا شده و سپس در روی تنگه هرمز به سوی شمال شرق و جنوب



شکل ۴- (a) گره تاوایی پتانسیلی هم ارز تر از ۶۰۰ هکتوپاسکال برحسب pvu، در ساعت UTC ۰۰۰۰ مورخه پنجم ژانویه سال ۱۹۵۸، (b) گره تاوایی پتانسیلی تر تر از ۶۰۰ هکتوپاسکال برحسب pvu، در ساعت UTC ۰۰۰۰ مورخه پنجم ژانویه سال ۱۹۵۸، (c) مانند شکل (a) ولی برای ساعت UTC ۰۰۰۰ مورخه ششم ژانویه سال ۱۹۵۸، (d) مانند شکل (b) ولی برای ساعت UTC ۰۰۰۰ مورخه ششم ژانویه سال ۱۹۵۸، (e) مانند شکل (a) ولی برای ساعت UTC ۰۰۰۰ مورخه هفتم ژانویه سال ۱۹۵۸ و (f) مانند شکل (b) ولی برای ساعت UTC ۰۰۰۰ مورخه هفتم ژانویه سال ۱۹۵۸، فاصله هم مقدار های تاوایی پتانسیلی هم ارز ۰/۰۵۰ واحد و فاصله هم مقدار های تاوایی پتانسیلی تر ۰/۰۲۵ واحد است اعداد روی محورهای مختصات طول و عرض جغرافیایی برحسب درجه می باشند.





شکل ۵- (a) گرته تاوایی پتانسیلی هم ارز تر از ۶۰۰ هکتوپاسکال بر حسب pvu، در ساعت ۰۰۰۰ UTC مورخه شانزدهم ژانویه سال ۲۰۰۰، (b) گرته تاوایی پتانسیلی تر تر از ۶۰۰ هکتوپاسکال بر حسب pvu، در ساعت ۰۰۰۰ UTC مورخه شانزدهم ژانویه سال ۲۰۰۰، (c) مانند شکل (a) ولی برای ساعت ۰۰۰۰ UTC مورخه هفدهم ژانویه سال ۲۰۰۰، (d) مانند شکل (b) ولی برای ساعت ۰۰۰۰ UTC مورخه هفدهم ژانویه سال ۲۰۰۰، (e) مانند شکل (a) ولی برای ساعت ۰۰۰۰ UTC مورخه شانزدهم ژانویه سال ۲۰۰۰ و (f) مانند شکل (b) ولی برای ساعت ۰۰۰۰ UTC مورخه شانزدهم ژانویه سال ۲۰۰۰، فاصله هم مقدارهای تاوایی پتانسیلی هم ارز  $0.05$  واحد و فاصله هم مقدار های تاوایی پتانسیلی تر  $0.25$  واحد است. اعداد روی محورهای مختصات طول و عرض جغرافیایی بر حسب درجه می باشند.

غرب گسترش می‌یابد (شکل‌های ۵-a، c، e). این تغییرات به گونه‌ای است که هسته اصلی روی کشور سودان همچنان بدون تغییر در آن منطقه جای گرفته است و گاهی نیز به سوی شرق و شمال شرق امتداد می‌یابد و سبب تشکیل هسته‌های کمینه در برخی مناطق ذکر شده، از بریده شدن بخش شمالی ناوه‌های تشکیل یافته می‌شود. گرته تاوایی پتانسیلی تر نیز در شکل‌های ۵-b، d، f نشان داده شده است.

### جمع بندی

دو سامانه جنوبی که اولی در روز ششم ژانویه ۱۹۵۸ در روی بوشهر و دومی در هفدهم ژانویه ۲۰۰۰ در روی بندرعباس فعالیت داشته‌اند برای بررسی همدیدی انتخاب شده‌اند. با استفاده از داده‌های بایگانی NCEP / NCAR روی یک شبکه منظم، گرته تاوایی پتانسیلی هم ارز و تر محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهند که مقادیر منفی و کوچک این دو کمیت، مکان و مسیر تقویت سامانه‌های جنوبی را به خوبی نشان می‌دهند و تاوایی پتانسیلی به سبب عدم وابستگی به نم ویژه نمی‌تواند نقش مناسبی را در این سامانه‌ها به عهده داشته باشد.

### تشکر و قدردانی

این پژوهش در قالب بخشی از پایان نامه دوره دکتری هواشناسی انجام شده که از حمایت مالی سازمان هواشناسی کشور برخوردار بوده است. بدینوسیله از مسئولین محترم سازمان هواشناسی کشور برای تامین اعتبار، امکانات رایانه‌ای و حمایت‌های لازم تشکر می‌شود.

### منابع

- ۱- احمدی گیوی، ف.، محب الحجه، ع. ر. و قرایلو، م.، ۱۳۸۵، مطالعه دینامیک سامانه‌های چرخندی روی ایران از دیدگاه تاوایی پتانسیلی-مطالعه موردی برای آذر ماه ۱۳۸۲، مجله فیزیک زمین و فضا، جلد ۳۲، شماره ۱، ۱-۱۴.
- ۲- محب الحجه، ع. ر. و م. مرادی، ۱۳۸۱، فرایابی تاوایی پتانسیلی راسبی-ارتل بر روی سطوح

- همدمای پتانسیلی، دومین کارگاه آموزشی پیش‌بینی عددی، تهران، ۱۷ مهر ۱۳۸۱، ۱-۸.
- ۳- مرادی، م.، قائمی، ه.، پرهیزکار، د و رضازاده، پ.، ۱۳۸۰، SKEW-T و محاسبه چند کمیت ترمودینامیکی، اولین کارگاه آموزشی پیش‌بینی عددی، تهران، ۸ مرداد ۱۳۸۰، ۳۵-۳۰.
- ۴- مشکواتی، ا.، ح، و م.، مرادی، ۱۳۸۳، بررسی ناوه فشاری دریای سرخ از دیدگاه دینامیکی، نیوار، شماره‌های ۵۲ و ۵۳، ۵۳-۷۴.
- 5- Carlson, T.N., 1991, Mid-Latitude Weather System, Cambridge University Press, pp. 507.
- 6- Goff, J. A. and S., Gratch, 1946, Low Pressure Properties of Water from -160 to 212 F, in Transactions of the American Society of Heating and Ventilating Engineers, pp 95-122, Presented at the 52<sup>nd</sup> Annual Meeting of the American Society of Heating and Ventilating Engineers, New York.
- 7- Goff, J. A., 1957, Saturation Pressure of Water on the New Kelvin Temperature Scale, Transactions of the American Society of Heating and Ventilating Engineers, pp 347-354, Presented at the Semi-annual Meeting of the American Society of Heating and Ventilating Engineers, Murray Bay, Que. Canada.
- 8- Hyland, R. W. and A. Wexler, 1983, Formulations for the Thermodynamic Properties of the Saturated Phases of H<sub>2</sub>O from 173.15K to 473.15K ASHRAE Trans, 89(2A), 500-519.
- 9- Hoskins, B.J., McIntyre, M.E. and Robertson, A.W., 1985, On the Use Significance of Isentropic Potential-Vorticity Maps, Q.J., Roy. Meteorol. Soc., 111, 877-946.
- 10- Murphy, D.M. and T. Koop, 2005, Review of the Vapor Pressures of Ice and Super cooled Water for Atmospheric Applications, Quart. J. Royal Met. Soc. 131, 1539-1565.
- 11- Petterssen, S., 1956, Weather Analysis and Forecasting, Vol II, Weather and Weather System, McGraw Hill, Book Company, New York, pp. 266.
- 12- Retallach, B.J., 1981, Compendium of Meteorology, Vol. 1, part 2, physical Meteorology, Geneva, WMO Publ., 364, pp. 211.
- 13- Rogers, R.R. and M.K., yau, 1996, A Short Course in Cloud Physics, Third Edition, Butterworth-Heinemann, pp. 290.
- 14- Sutcliffe, R.C., 1938, On Development in the Field of Barometric Pressure, Q.J. Roy. Meteorol., Soc., 64, 495-509.

- 15- World Meteorological Organization, 1988, General Meteorological Standards and Recommended Practices, Appendix A., WMO Technical Regulations, No. 49.
- 16- Zohao, C. and Zhang, D.l., 2004, Tracking Surface Cyclones with Moist Potential Vorticity, Adv. in Atmos., Sci. 5, 830-835.