

## بررسی تغییرات ارتفاع تراز ناواگرا در ایران

محمد مرادی\*

استادیار، پژوهشکده هواشناسی

پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۳/۲۵

تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۱۵

### چکیده

در این پژوهش تغییرات ارتفاع تراز ناواگرا در ماه‌های ژانویه و ژولای در دوره آماری ۱۹۷۶-۲۰۱۵ در ایران بررسی شد. تراز ناواگرا، پایین‌ترین تراز فشاری است که در آن واگرایی افقی صفر می‌باشد. در ایران نه نقطه انتخاب و نیمرخ قائم میدان واگرایی افقی و امگا در این نقاط تحلیل شد. بررسی روزانه نیمرخ قائم واگرایی در حالت‌های موردی نشان داد که چون کم‌فشارها (پرفشارها) با همگرایی (واگرایی) در ترازهای زیرین و واگرایی (همگرایی) در ترازهای بالا همراه است، پس حداقل یک تراز ناواگرا در مناطقی که تحت‌تأثیر این سامانه‌ها قرار می‌گیرند، وجود دارد و ارتفاع تراز ناواگرا به ژرفای همگرایی (واگرایی) زیرین بستگی دارد. هر چه ژرفای همگرایی (واگرایی) زیرین بیشتر باشد، تراز ناواگرا در سطح فشاری بالاتری قرار می‌گیرد. بنابراین تراز ناواگرا در کم‌فشارهای گرمائی، در تراز فشاری پایین‌تری هستند. بررسی میانگین ماهانه نیمرخ قائم واگرایی نشان داد که در شمالغرب، غرب، جنوبغرب، مرکز، جنوب، شرق و جنوبشرق ایران، تراز ناواگرا در ژولای پایین‌تر از ژانویه است. این تفاوت به دلیل وجود کم‌فشارگرمائی در این ماه و ایجاد حرکت صعودی و همگرایی کم‌عمق می‌باشد. در شمال و شمالشرق ایران تراز ناواگرا در ژانویه پایین‌تر از ژولای است. این مناطق در ماه ژولای کمتر تحت‌تأثیر کم‌فشارگرمائی قرار دارند. بررسی نتایج روند نشان داد که تغییرات میانگین ماهانه تراز ناواگرا در ژولای در غرب و شمالشرق ایران روند صعودی دارد که معرف کاهش ژرفای همگرایی زیرین ناشی از کم‌فشارهای عبوری است. در مرکز و جنوب ایران این کمیت دارای روند نزولی است که بیانگر افزایش ژرفای همگرایی زیرین ناشی از کم‌فشارگرمائی در این منطقه است.

**واژه‌های کلیدی:** تراز بدون واگرایی، نیمرخ قائم واگرایی، همگرایی افقی.

## مقدمه

یکی از فرایندهای هواشناسی که در تحلیل سامانه‌های همدیدی به کار می‌رود و به طور مستقیم با میدان باد در ارتباط است، واگرایی<sup>۱</sup> (همگرایی) افقی است که از دیر باز مورد توجه پژوهشگران هواشناسی قرار گرفته است. ساتکلیف (۱۹۴۷) و ساتکلیف و فورس‌دیک (۱۹۵۰) با معرفی تراز ناواگرا نشان دادند که در لایه ۱۰۰۰ و تراز ناواگرا، چرخندها و واچرخندهای سطحی در اثر واگرایی و ردسپهر پایین و بالا توسعه می‌یابند. پیترسون با توسعه نظریه ساتکلیف، نقش پایداری، گرمایش و سرمایش دررو و بی‌دررو را در توسعه سامانه‌های فشاری بررسی نمود و معادله توسعه ساتکلیف-پیترسون را بنا نهاد (پیترسون، ۱۹۵۶). او تغییرات تاوایی نسبی تراز ۱۰۰ هکتوپاسکال را به فرارفت تاوایی مطلق در تراز ناواگرا، لاپلاسین فرارفت ضخامت، لاپلاسین پایداری و لاپلاسین گرمایش (سرمایش) بی‌دررو در لایه ۱۰۰۰ و تراز ناواگرا وابسته کرد و نشان داد که توسعه چرخندهای (واچرخندهای) سطحی به فرارفت تاوایی مطلق مثبت (منفی) در تراز ناواگرا، فرارفت هوای گرم (سرد)، حرکت صعودی و ناپایداری یا حرکت نزولی و پایداری زیاد (حرکت نزولی و پایداری زیاد یا حرکت صعودی و ناپایداری) و گرمایش بی‌دررو (سرمایش بی‌دررو) در لایه ۱۰۰۰ و تراز ناواگرا بستگی دارد. از آنجائی که تراز ناواگرا معمولاً بین سطوح فشاری ۶۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال قرار دارد، معادله توسعه ساتکلیف-پیترسون برای لایه ۵۰۰-۱۰۰۰ استفاده می‌شود. کارلسون (۱۹۹۸) و مارتین (۲۰۰۶) با استفاده از تئوری توسعه ساتکلیف و بدون در نظر گرفتن سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال به عنوان تراز ناواگرا، نشان دادند که همگرایی (واگرایی) نزدیک سطح زمین نسبت به واداشتهای فرارفت تاوایی گرمایی

و فرارفت تاوایی سیاره‌ای با باد گرمایی نقش مهم-تری در حرکت بالاسو (پایین سو) دارد. ایده ساتکلیف و پیترسون بعدها به وسیله فیلیپ، ساندرز و هولتون به تئوری شبه زمینگرد تغییر یافت (لاکمن، ۲۰۱۱) و سپس به وسیله ترنبرث (۱۹۷۸)، هاسکینز و همکاران (۱۹۷۸) و هاسکینز و پدر (۱۹۸۰) به معادله امگای شبه زمینگرد منجر شد. تراز ناواگرا در سال‌های اخیر کمتر مورد توجه قرار گرفته است، ولی پژوهش‌های زیادی به طور مستقیم یا غیر مستقیم به واگرایی و حرکت قائم از طریق بردار  $Q$  و نقش آنها در چرخند زائی اختصاص یافته است که می‌توان به رایمر و همکاران (۲۰۱۴) و مارتین (۲۰۱۴) اشاره کرد. رایمر و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از تئوری شبه زمینگرد و به کارگیری بردار  $Q$  برای حرکت قائم سطوح میانی، اهمیت جریان‌های جتی و ناوه ارتفاع تراز بالا در توسعه چرخندها را بررسی کردند. این پژوهشگران با استفاده از مدل MM5 نسخه سه و در نظر گرفتن دو آشیانه تو در تو با گام افقی ۶۰ و ۲۰ کیلومتر توسعه چرخندها را در سه حالت موردی شبیه‌سازی کردند و نشان دادند که در هر سه مورد ناوه ارتفاع تراز بالا از طریق واگرایی نقش برجسته‌ای در توسعه چرخندها دارد. مارتین (۲۰۱۴) در توسعه سامانه جت-جبهه در ترازهای فشاری بالا، از تئوری شبه زمینگرد مبتنی بر بردار  $Q$  برای حرکت قائم سطوح میانی استفاده کرد. او با جدا کردن بخش چینش و انحنا از تاوایی زمینگرد، در دو حالت موردی نشان داد که منفی بودن فرارفت چینش تاوایی زمینگرد به وسیله باد گرمایی همراه با فرارفت هوای سرد قسمت چرخندی جت، نقش عمده‌ای در جبهه زائی تراز بالا دارد. در ایران واگرایی و سرعت قائم در بیشتر پژوهش‌های همدیدی و دینامیکی مانند مرادی و همکاران (۱۳۹۶) بررسی شده است ولی

واگرایی صفر است به عنوان تراز ناواگرا در نظر گرفته شده است. هدف از این تحقیق بررسی تغییرات ارتفاع تراز ناواگرا در نقاط مختلف ایران در ماه‌های ژانویه و ژولای در یک دوره آماری چهار ساله منتهی به ۲۰۱۵ برای شناسایی نحوه فعالیت سامانه‌های فشاری در ایران می‌باشد.

خاورمیانه و ایران از بایگانی NCEP/NCAR در دوازده تراز فشاری معیار از ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ هکتوپاسکال در ساعت ۰۰۰۰ گرینویچ روزهای ژانویه (معرف ماه سرد) و ژولای (معرف ماه گرم). این محدوده برای آشکارسازی امواج همدیدی و تحلیل همدیدی نتایج انتخاب شده است.

۲- انتخاب دستگاه مختصات کروی و محاسبه واگرایی در شبکه مورد نظر بر اساس تعریف واگرایی برای ترازهای فشاری انتخابی. در این دستگاه مختصات برای محاسبه واگرایی از معادله رابطه ۱ استفاده شد (کویفر، ۲۰۱۱):

رابطه (۱)

$$\nabla \cdot \vec{V} = \frac{1}{a^2 \cos(\varphi)} \left[ \frac{\partial(au)}{\partial \lambda} + \frac{\partial(av \cos(\varphi))}{\partial \varphi} \right]$$

که در آن که در آن  $D = \nabla \cdot \vec{V}$  واگرایی افقی بر حسب بر ثانیه،  $a$  شعاع متوسط زمین بر حسب متر،  $\lambda$  و  $\varphi$  به ترتیب طول و عرض جغرافیایی بر حسب درجه و  $u$  و  $v$  نیز به ترتیب مولفه‌های مداری و نصف النهاری بردار باد افقی  $\vec{V}$  بر حسب متر بر ثانیه می‌باشند.

۳- تعیین نه نقطه انتخابی در مناطق مختلف ایران شامل شمالغرب، غرب، جنوبغرب، شمال، مرکز، جنوب، شمالشرق، شرق و جنوب کشور. مختصات این نقاط به گونه‌ای است که در روی شبکه منظم مورد نظر قرار داشته باشند تا نیازی به درونیابی داده‌های باد یا واگرایی در آن نقاط وجود نداشته باشد. شکل ۱ موقعیت نقاط انتخابی را در روی ایران نشان می‌دهد.

تراز ناواگرا مورد توجه قرار نگرفته است و این مقاله می‌تواند اولین پژوهشی باشد که تغییرات ارتفاع فشاری تراز ناواگرا را در ایران بررسی کرده است. در این پژوهش برای حذف اثر لایه مرزی و عوارض زمینی بر تراز ناواگرا، پایین‌ترین تراز فشاری بین ۷۰۰ و ۳۰۰ هکتوپاسکال که در آن

## مواد و روش‌ها

محاسبه واگرایی افقی، مقادیر مثبت، صفر و منفی با معنایی به دست می‌دهد که از طریق معادله تاوایی بر تغییرات تاوایی و از طریق معادله پیوستگی بر حرکت‌های قائم تاثیر زیادی دارند به طوری که واگرایی افقی مثبت (منفی) سبب کاهش (افزایش) تاوایی و مولفه قائم سرعت باد و در نتیجه توسعه واپرخندها (واچرخنده) می‌شود (هولتون، ۲۰۱۲). وجود تراز ناواگرا از بررسی روش جنبش شناختی برای محاسبه مولفه قائم باد آشکار می‌شود. این روش که بر پایه معادله پیوستگی در دستگاه مختصات فشاری بنا شده است، مولفه قائم سرعت باد در هر تراز فشاری را به انتگرال‌گیری قائم واگرایی در ترازهای زیرین از سطح زمین تا سطح وردایست ارتباط می‌دهد (احمدی گیوی و همکاران، ۱۳۷۲؛ اردکانی و همکاران، ۱۳۸۴). بر اساس این روش، در حالتی که مقادیر واگرایی در دو لایه زیرین و زیرین برابر باشند، مطابق اصل خنثی سازی دنیس، باید بین سطح زمین و وردایست، ترازوی وجود داشته باشد که مقدار واگرایی در آن صفر باشد. چنین ترازوی به تراز ناواگرا معروف می‌باشد (والاس و هوب، ۲۰۰۶). روش تحقیق برای تعیین ارتفاع تراز ناواگرا به شرح زیر است:

۱- انتخاب دوره آماری چهار ساله از ۱۹۷۶ تا ۲۰۱۵ و استخراج مولفه‌های مداری، نصف‌النهاری و قائم میدان باد در یک شبکه منظم محدود به

که در آن  $D$  واگرایی افقی،  $P$  فشار و اندیس‌های  $a$ ،  $b$  و  $NDL$  به ترتیب به تراز بالا، تراز پایین و تراز بدون واگرایی اشاره می‌کنند.

۶- محاسبه میانگین فشار تراز ناوگرا و فراوانی میانگین ماهانه در دوره آماری برای نقاط مختلف ایران.

۷- آزمون وجود روند با استفاده از روش من-کندال در سطح اعتماد نود و پنج درصد به کمک نرم افزار آماری مینی‌تب.

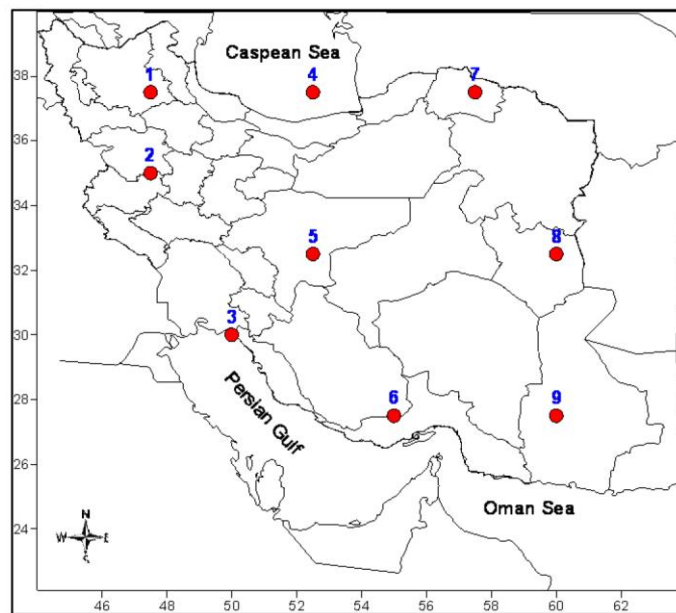
۸- انتخاب و تحلیل هم‌دیدگی دو سامانه کم‌فشار قوی برای بررسی نحوه تغییرات تراز ناوگرا بر اساس وجود ناوه و پشته قوی در سال‌های اخیر و تحلیل نیمرخ قائم واگرایی و مولفه قائم سرعت باد در نقاط انتخابی.

۴- استخراج میدان واگرایی محاسبه شده در بند ۲ و مولفه قائم باد برای نقاط تعیین شده در ماه‌های ژانویه و ژولای.

۵- محاسبه ارتفاع فشاری تراز ناوگرا براساس تغییر علامت واگرایی در راستای قائم. برای اینکار در یک روز علامت واگرایی دو تراز فشاری متوالی سنجیده می‌شود. اگر در تمام ترازهای متوالی علامت مقدار واگرایی تغییر نکند، آنگاه در آن روز تراز ناوگرا وجود ندارد. در غیر اینصورت دو تراز فشاری متوالی وجود دارد که در آنها علامت واگرایی تغییر می‌کند. بنابراین بین این دو تراز، تراز ناوگرا که در آن واگرایی صفر است، وجود دارد و فشار آن تراز از رابطه ۲ به دست آمد:

رابطه ۲)

$$P_{NDL} = p_a - \left( \frac{P_b - P_a}{D_b - D_a} \right) D_a$$



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی نه نقطه انتخابی. دایره‌های توپر قرمز رنگ نقاط انتخابی را نشان می‌دهند.

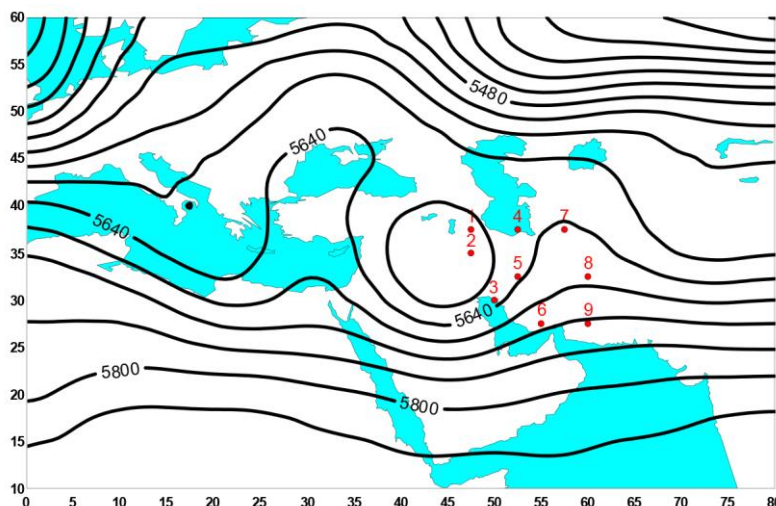
پشته‌های عمیق باشد، انتخاب و تحلیل شد. سپس تغییرات تراز ناوگرا در نقاط انتخابی بررسی گردید. شکل ۲ میدان ارتفاع تراز میانی در روز

## نتایج

برای بررسی تغییرات واگرایی روزانه در نقاط انتخابی، ابتدا دو سامانه کم‌فشار که دارای ناوه‌ها و

شرایط به سبب وجود بادهای غربی و اثر رشته کوه البرز ایجاد شده است. تراز ناواگرا در این روز در شمالغرب ۴۵۷، در غرب ۵۱۶، در جنوبغرب ۵۷۸، در شمال ۳۹۷، در مرکز ۵۲۵ و در جنوب ایران ۴۴۶ هکتوپاسکال برآورد شده است. شکل ۳ نمونه‌ای از تغییرات واگرایی در ترازهای مختلف در این روز در غرب ایران را نشان می‌دهد. در بقیه نقاط که تحت تاثیر پشته ارتفاعی قرار دارند، در ترازهای زیرین واگرایی و در ترازهای بالا همگرایی رخ داده است. تراز ناواگرا در این روز در شمالشرق ۶۵۲، در شرق ۶۱۳ و در جنوبشرق ۳۹۸ هکتوپاسکال برآورد شده است.

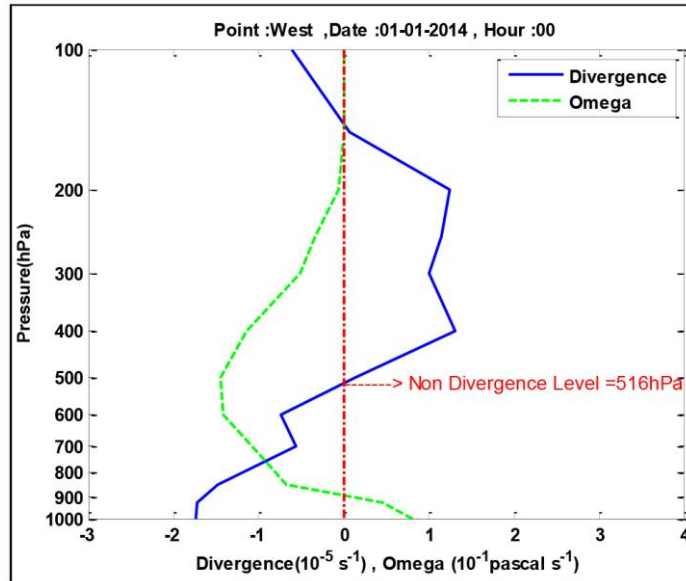
یکم ژانویه ۲۰۱۴ را نشان می‌دهند. از این شکل دیده می‌شود که یک کم‌فشار بریده در غرب ایران قرار گرفته است و نقاط واقع در شمالغرب، غرب، جنوبغرب، شمال، مرکز و جنوب ایران را تحت تاثیر قرار داده است. در این روز در شمالغرب، غرب، جنوب غرب، مرکز و جنوب ایران در ترازهای زیرین همگرایی و در ترازهای بالاتر واگرایی وجود دارد. این شرایط بیانگر فعالیت سامانه کم‌فشار در این مناطق می‌باشد. در شمال ایران در ترازهای زیر ۸۰۰ هکتوپاسکال واگرایی قرار گرفته است و سپس در تراز نزدیک ۷۵۰ هکتوپاسکال مقدار واگرایی صفر می‌شود. این



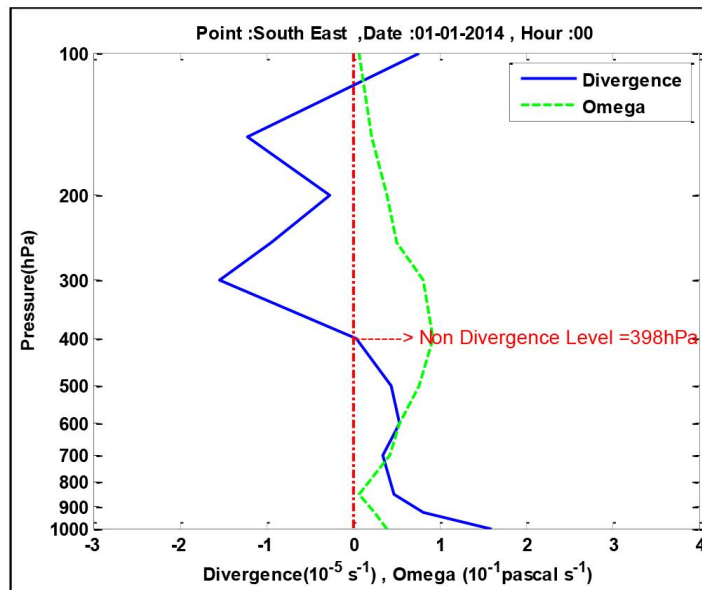
شکل ۲: میدان ارتفاع تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (بر حسب متر) در ساعت ۰۰:۰۰ گرینویچ روز یکم ژانویه ۲۰۱۴. فاصله پربندهای ارتفاع ۴۰ متر است و مربع‌های قرمز و اعداد روی شکل معرف نقاط انتخابی می‌باشند.

قرار گرفته باشد، آنگاه در تراز ناواگرا کمترین امگای منفی (بیشترین حرکت بالاسو) قرار دارد و هنگامی که در ترازهای زیرین واگرایی وجود داشته باشد، در تراز ناواگرا بیشترین امگای مثبت (بیشترین حرکت نزولی) جای گرفته است. این وضعیت در نمونه شکل‌های ۲ و ۳ مشخص شده است.

شکل ۴ تغییرات واگرایی در جنوبشرق ایران را نشان می‌دهد. پایین بودن تراز ناواگرا در شمالشرق نسبت به جنوب شرق به سبب وجود پشته قوی در شمالشرق و فعال بودن سامان پرفشار دینامیکی در منطقه فوق است. از بررسی نیمرخ قائم مولفه قائم سرعت در دستگاه فشاری دیده شد که قدر مطلق امگا در تراز ناواگرا بیشینه می‌باشد. هنگامی که در ترازهای زیرین همگرایی



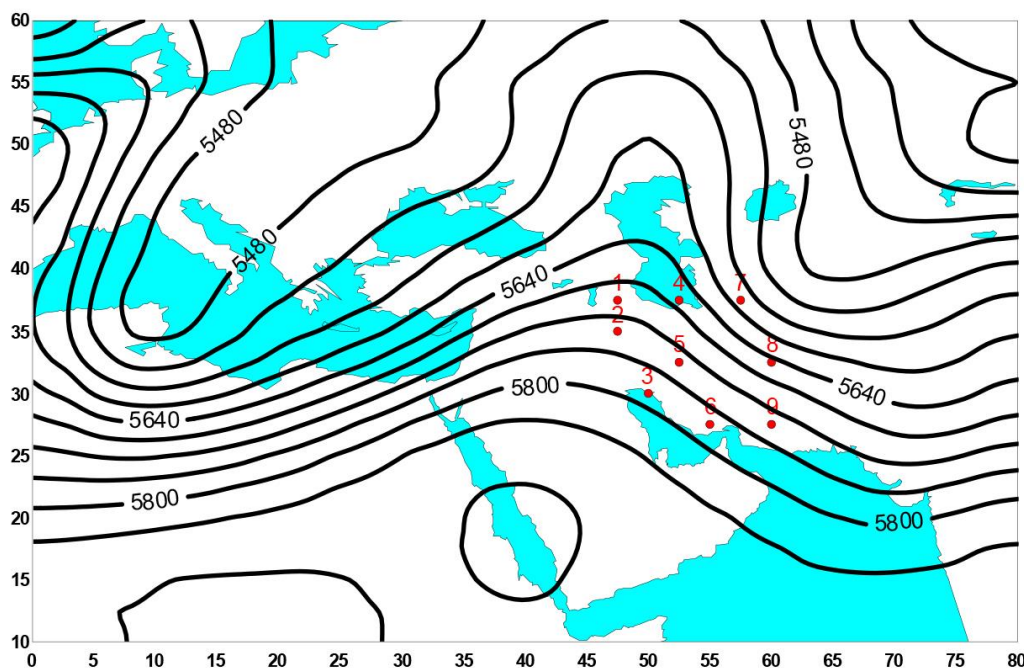
شکل ۳: نیمرخ قائم واگرایی (خط ممتد آبی) و امگا (خط چین‌های سبز) در غرب ایران در ساعت ۰۰۰۰ گرینویچ روز اول ژانویه ۲۰۱۴.



شکل ۴: نیمرخ قائم واگرایی (خط ممتد آبی) و امگا (خط چین‌های سبز) در جنوب‌شرق ایران در ساعت ۰۰۰۰ گرینویچ روز اول ژانویه ۲۰۱۴.

جنوب ایران را تحت‌تاثیر قرار داده است. بنابراین در این روز واگرایی در ترازهای زیرین و همگرایی در ترازهای بالا و در نتیجه حرکت نزولی و امگای مثبت در این نقاط دیده می‌شود.

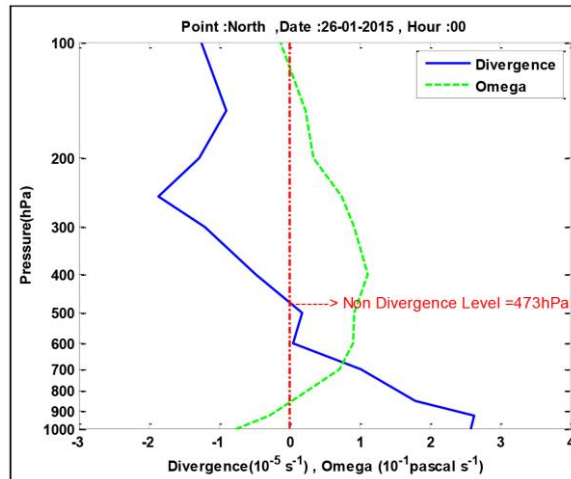
شکل ۵ میدان ارتفاع تراز میانی را در روز بیست و ششم ژانویه ۲۰۱۵ نشان می‌دهد. از این شکل دیده می‌شود که پشته ارتفاعی این تراز نقاط واقع در شمال‌غرب، غرب، جنوب‌غرب، شمال، مرکز و



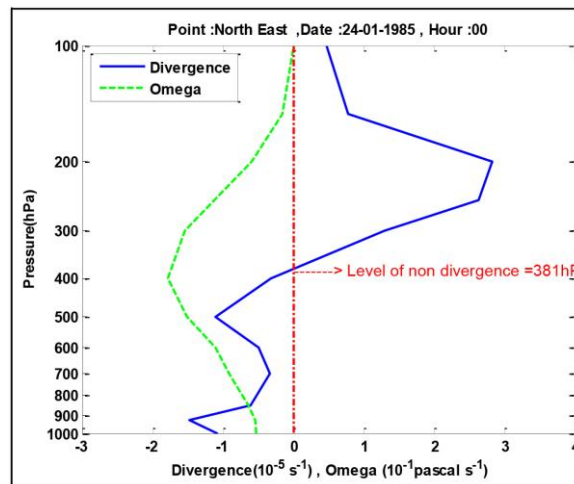
شکل ۵: میدان ارتفاع تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (بر حسب متر) در ساعت ۰۰:۰۰ گرینویچ روز بیست و ششم ژانویه ۲۰۱۵. فاصله پربندهای ارتفاع ۴۰ متر است و مربع‌های قرمز و اعداد روی شکل معرف نقاط انتخابی می‌باشند.

۳۸۱ هکتوپاسکال قرار گرفته است. این شکل نشان می‌دهد که مقدار واگرایی تراز میانی از مقدار همگرایی تراز زیرین به مراتب بیشتر است و بیانگر عمیق شدن کم‌فشار سطح زمین می‌باشد. نتایج بررسی روزانه تراز ناواگرا نشان می‌دهد که با نزدیک شدن سامانه‌های کم‌فشار (پرفشار) به نقاط انتخابی، در ترازهای زیرین همگرایی (واگرایی) و در ترازهای بالا واگرایی (همگرایی) رخ می‌دهد و هر چقدر عمق همگرایی (واگرایی) زیرین بیشتر باشد، تراز ناواگرا در سطح فشاری بالاتر قرار می‌گیرد و بیانگر تقویت فعالیت سامانه‌های کم‌فشار می‌باشد. همچنین بررسی مولفه قائم باد در ترازهای فشاری مختلف نشان می‌دهد که در تراز ناواگرا قدر مطلق امگا بیشینه است.

شکل ۶ نیمرخ قائم تغییرات واگرایی و امگا را در شمال ایران در روز ۲۶ ژانویه ۲۰۱۵ نشان می‌دهد. از این شکل دیده می‌شود که در این روز تراز ناواگرا در تراز فشاری ۴۷۳ هکتوپاسکال است. بقیه نقاط انتخابی نیز تحت تاثیر عبور ناوه ارتفاعی قرار دارند و در ترازهای زیرین دارای همگرایی می‌باشند. عبور برخی سامانه‌های کم‌فشار، همگرایی عمیقی در وردسپهر نقاط منطقه مطالعاتی ایجاد می‌کند. این شرایط با حرکت بالاسوی شدیدی نیز همراهی می‌کند. در چنین شرایطی تراز ناواگرا به ترازهای فشاری بالاتر رانده می‌شود و فعالیت سامانه‌های کم‌فشار تقویت می‌شود. شکل ۷ تراز ناواگرا را برای نقطه واقع در شمالشرق ایران در روز ۲۴ ژانویه ۱۹۸۵ نشان می‌دهد. تراز ناواگرایی این روز در سطح فشاری



شکل ۶: تغییرات واگرایی (خط ممتد آبی) و امگا (خط چین‌های سبز) در شمال ایران در ساعت ۰۰:۰۰ گرینویچ روز بیست و ششم ژانویه ۲۰۱۵.

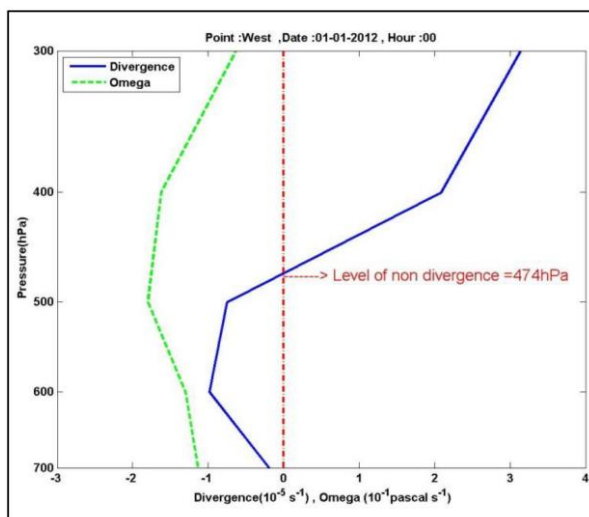


شکل ۷: تغییرات واگرایی (خط ممتد آبی) و امگا (خط چین‌های سبز) در شمال‌شرق ایران در ساعت ۰۰:۰۰ گرینویچ روز ۲۴ ژانویه ۱۹۸۵.

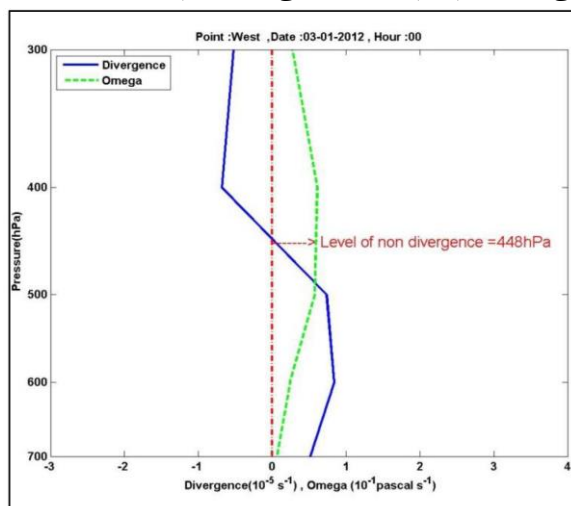
گرفته است. مقادیر منفی امگا در تمام لایه ۳۰۰-۷۰۰ وجود دارد و کمینه مقدار آن در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال است. این شکل وجود یک سامانه کم‌فشار دینامیکی را در منطقه نشان می‌دهد. شکل ۹ نشان می‌دهد که تراز ناواگرا در سطح فشاری ۴۴۸ هکتوپاسکال قرار گرفته است. مقادیر امگا در تمام لایه ۳۰۰-۷۰۰ مثبت است و بیشینه مقدار آن در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال می‌باشد. از این شکل می‌توان به کاهش فعالیت سامانه کم‌فشار و نزدیک شدن سامانه پرفشار به منطقه اشاره کرد.

در ادامه بررسی تراز ناواگرا بین دو تراز فشاری ۷۰۰ و ۳۰۰ هکتوپاسکال، روزهای ماه ژانویه و ژولای به روزهای بدون تراز ناواگرا، روزهای با یک، دو و سه تراز ناواگرا، دسته‌بندی شد. برای روزهای با یک تراز ناواگرا نیز دو دسته‌بندی ارائه شد. دسته اول (دوم) مربوط به روزهایی است که در سطوح زیر تراز ناواگرا، همگرایی (واگرایی) و در سطوح بالای تراز ناواگرا، واگرایی (همگرایی) قرار گرفته است. شکل‌های ۸ و ۹ نمونه‌ای از این دسته‌ها را نشان می‌دهند. از شکل ۸ دیده می‌شود که تراز ناواگرا در سطح ۴۷۴ هکتوپاسکال قرار





شکل ۸: نیمرخ قائم واگرایی (خط ممتد آبی) و امگا (خط چین‌های سبز) در غرب ایران در ساعت ۰۰۰۰ گرینویچ روز یکم ژانویه سال ۲۰۱۲. همگرایی در وردسپهر پایین و واگرایی در وردسپهر بالا.



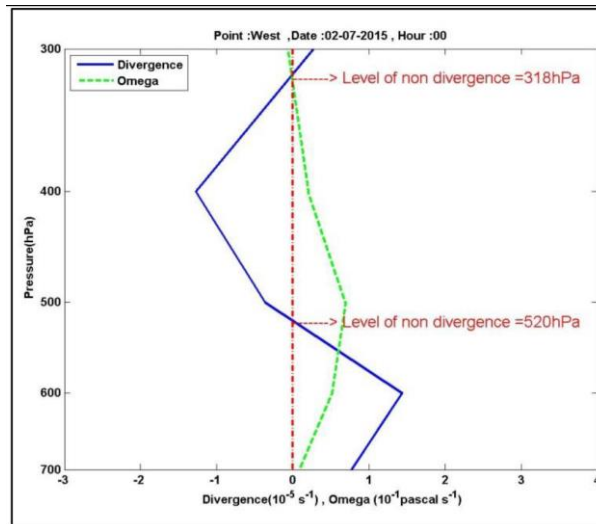
شکل ۹: نیمرخ قائم واگرایی (خط ممتد آبی) و امگا (خط چین‌های سبز) در غرب ایران در ساعت ۰۰۰۰ گرینویچ روز یکم ژانویه سال ۲۰۱۲. همگرایی در وردسپهر پایین و واگرایی در وردسپهر بالا.

ترازها مثبت است. شکل ۱۱ نشان می‌دهد که ترازهای ناواگرا در ۶۵۰ و ۳۷۱ هکتوپاسکال است و امگا نیز مثبت می‌باشد. نمونه‌ای از روزهای با سه تراز ناواگرا نیز در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است. واگرایی- همگرایی - واگرایی - همگرایی در شکل ۱۲ و همگرایی - واگرایی - همگرایی - واگرایی در شکل ۱۳ برای وردسپهر زیرین، میانی، میانی و بالا آورده شده است. از شکل ۱۲ دیده می‌شود که تراز ناواگرا در سطوح فشاری ۶۱۳، ۵۵۲ و ۴۸۷ هکتوپاسکال قرار دارند.

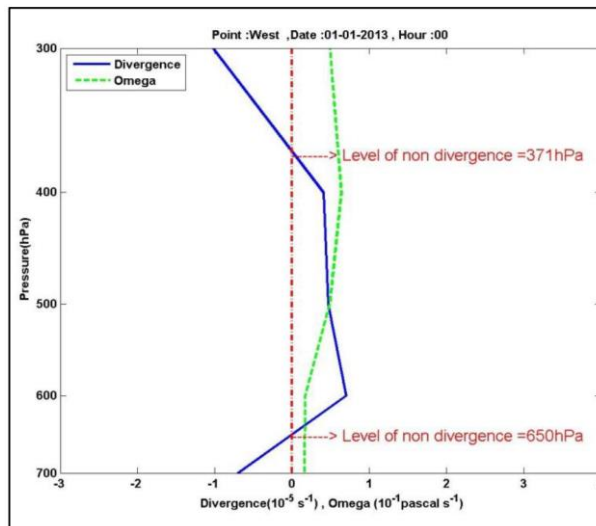
به روش مشابه دسته‌بندی روزهای با دو تراز ناواگرا نیز ارائه شد. دسته اول که نمونه‌ای از آن در شکل ۱۰ نشان داده شده است، همگرایی- واگرایی- همگرایی است که به ترتیب در وردسپهر زیرین، میانی و بالا رخ داده است. دسته دوم نیز که نمونه‌ای از آن در شکل ۱۱ آورده شده است، واگرایی- همگرایی- واگرایی است که به ترتیب در وردسپهر زیرین، میانی و بالا رخ داده است. از شکل ۱۰ دیده می‌شود که ترازهای ناواگرا در ۵۲۰ و ۳۱۸ هکتوپاسکال است و مقدار امگا در همه

آن میدان‌های واگرایی و همگرایی مختلفی در این لایه‌ها به وجود می‌آید که همدیگر را خنثی می‌کنند. بنابراین حرکت صعودی مناسبی ایجاد و یا تقویت نمی‌شود و در نتیجه، این وضعیت معرف تضعیف فعالیت کم‌فشارها و یا تقویت پرفشارها در منطقه می‌باشد.

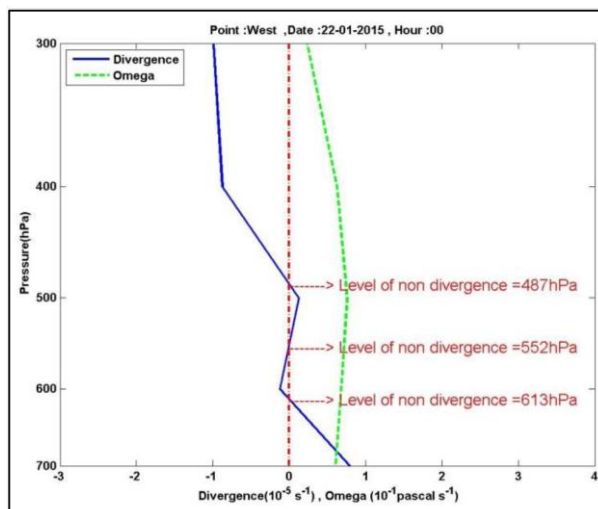
شکل ۱۳ نیز نشان می‌دهد که ترازهای ناواگرا در سطوح ۶۳۶، ۴۵۶ و ۳۷۴ هکتوپاسکال می‌باشند. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که در روزهای با دو و سه تراز ناواگرا در بین سطوح فشاری ۷۰۰ تا ۳۰۰ هکتوپاسکال، تغییرات میدان باد با ارتفاع در لایه‌های فشاری کوچک خیلی شدید است و در اثر



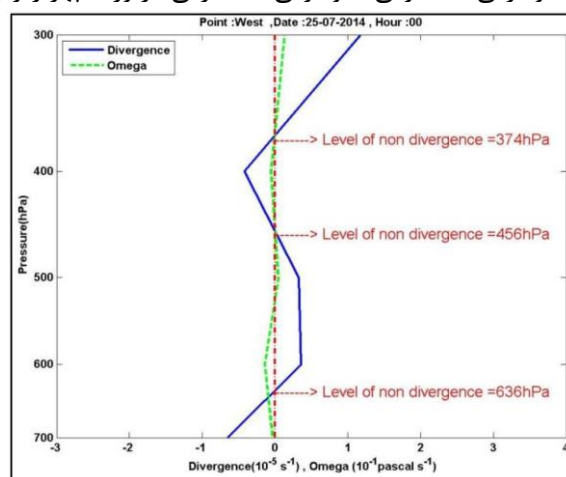
شکل ۱۰: نیمرخ قائم واگرایی (خط ممتد آبی) و امگا (خط چین‌های سبز) در غرب ایران در ساعت ۰۰۰۰ گرینویچ روز دوم ژولای سال ۲۰۱۵. واگرایی - همگرایی - واگرایی در وردسپهر زیرین، میانی و بالا.



شکل ۱۱: نیمرخ قائم واگرایی (خط ممتد آبی) و امگا (خط چین‌های سبز) در غرب ایران در ساعت ۰۰۰۰ گرینویچ روز دوم ژولای سال ۲۰۱۳. همگرایی - واگرایی - همگرایی در وردسپهر زیرین، میانی و بالا.



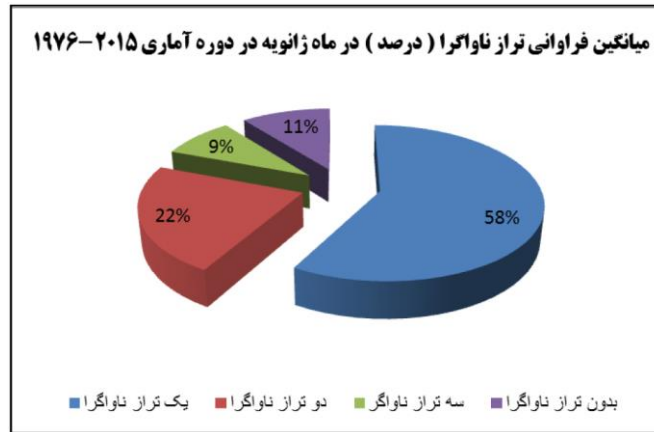
شکل ۱۲: نیمرخ قائم واگرایی (خط ممتد آبی) و امگا (خط چین‌های سبز) در غرب ایران در ساعت ۰۰:۰۰ گرینویچ روز بیست و دوم ژانویه سال ۲۰۱۵. واگرایی - همگرایی - واگرایی - همگرایی در وردسپهر زیرین، میانی، میانی و بالا.



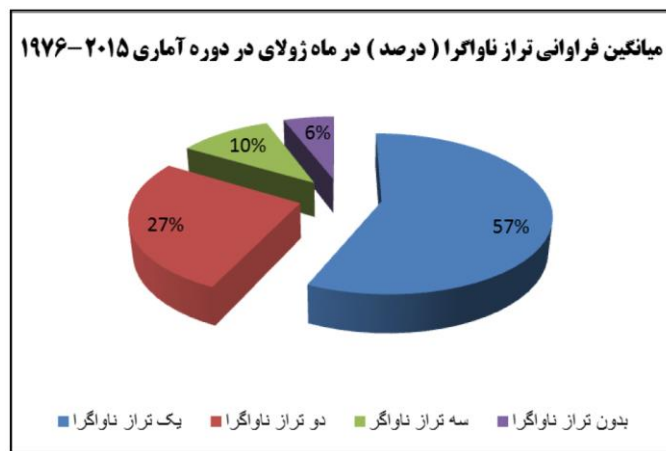
شکل ۱۳: نیمرخ قائم واگرایی (خط ممتد آبی) و امگا (خط چین‌های سبز) در غرب ایران در ساعت ۰۰:۰۰ گرینویچ روز بیست و پنجم ژوئای سال ۲۰۱۴. همگرایی - واگرایی - همگرایی - واگرایی در وردسپهر زیرین، میانی، میانی و بالا.

(ژوئای) به طور میانگین در ۵۸ درصد (۵۷ درصد) موارد یک تراز ناواگرا، در ۲۲ درصد (۲۷ درصد) موارد دو تراز ناواگرا، در ۹ درصد (۱۰ درصد) موارد سه تراز ناواگرا در غرب ایران تشکیل شده است. در ۱۱ درصد (۶ درصد) موارد نیز تراز ناواگرا در لایه ۳۰۰-۷۰۰ هکتوپاسکال مشاهده نشده است. این نتایج بیانگر فراوانی کم‌فشارهای دینامیکی در ماه ژانویه و کم‌فشار گرمائی در ماه ژوئای می‌باشد.

بررسی فراوانی تعداد ترازهای ناواگرا در دوره آماری انتخابی برای نقاط مختلف کشور نشان می‌دهد که تعداد روزهای با یک تراز ناواگرا در هر دو ماه ژانویه و ژوئای فراوانی بیشتری دارد و فراوانی تعداد روزهای با دو تراز ناواگرا در مرتبه بعدی قرار دارد. شکل‌های ۱۴ و ۱۵ به ترتیب نمونه‌ای از تحلیل فراوانی در نقطه واقع در غرب ایران در ماه ژانویه و ژوئای را نشان می‌دهند. از این شکل‌ها دیده می‌شود که در ماه ژانویه



شکل ۱۴: میانگین فراوانی تراز ناواگرا بر حسب درصد در ماه ژانویه در غرب ایران در دوره آماری ۱۹۷۶-۲۰۱۵.



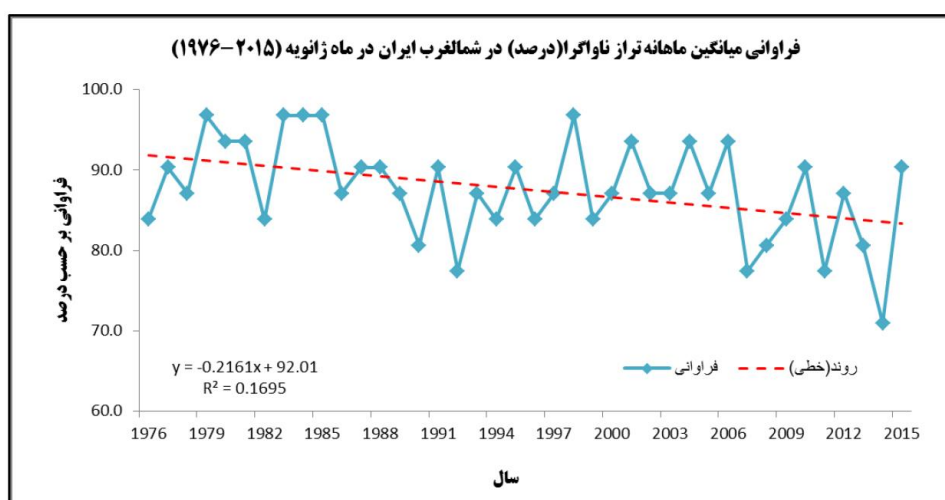
شکل ۱۵: میانگین فراوانی تراز ناواگرا بر حسب درصد در ماه ژولای در غرب ایران در دوره آماری ۱۹۷۶-۲۰۱۵.

تراز ناواگرا در این ماه، نشان می‌دهد داد که در شمالغرب و غرب، فراوانی سامانه‌های فشاری کاهش یافته است. در ماه ژولای روند نزولی در نقطه واقع در غرب و روند صعودی در نقطه‌های واقع در شمالشرق و شرق تایید و در بقیه نقاط وجود روند تایید نشد. وجود روند صعودی در فراوانی سالانه تراز ناواگرا بیانگر افزایش نوسان سامانه‌های فشاری در شمالشرق و شرق ایران می‌باشد. در جدول ۱ مشخصه‌های آزمون من-کندال برای ماه‌های ژانویه و ژولای نشان داده شده است. شکل‌های ۱۶ و ۱۷ به ترتیب نمونه‌ای از تحلیل فراوانی و روند در نقطه واقع در شمالغرب ایران در ماه ژانویه و شرق ایران در ماه ژولای را نشان می‌دهند.

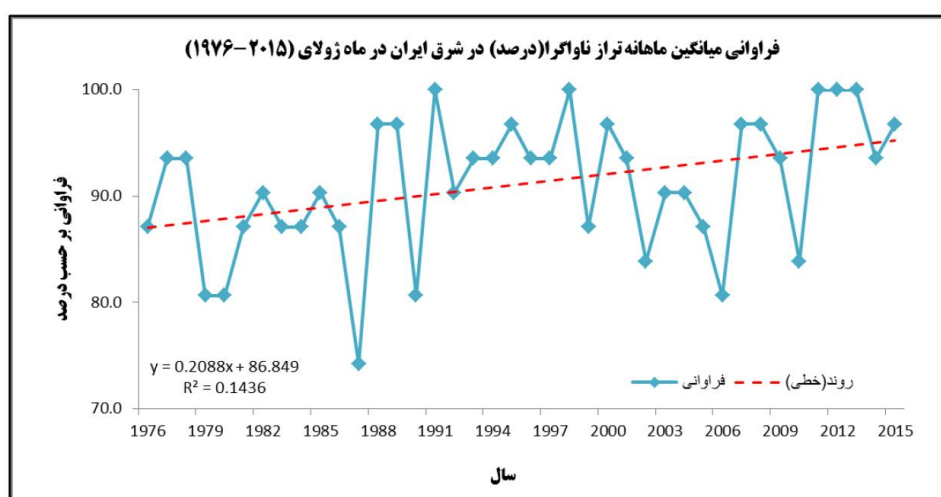
در ادامه روند فراوانی سالانه تراز ناواگرا در ماه‌های ژانویه و ژولای بررسی شد. نتایج نشان داد که در ماه ژانویه در نقاط واقع در شمالغرب، شمال، مرکز و شمالشرق نزولی و در غرب، جنوبغرب، جنوب، شرق و جنوبشرق فراوانی سالانه تراز ناواگرا دارای روند صعودی است. در ماه ژولای نیز روند فراوانی در نقاط واقع در شمالغرب، جنوبغرب، مرکز و جنوب نزولی و در غرب، شمال، شمالشرق، شرق و جنوبشرق صعودی می‌باشد. با استفاده از آزمون من-کندال وجود روند در سطح اعتماد ۹۵ درصد برای نقاط مختلف انتخابی آزمایش شد و روند نزولی در ماه ژانویه، در نقاط واقع در شمالغرب و غرب تایید شد. در بقیه نقاط وجود روند مورد تایید قرار نگرفت. روند نزولی در فراوانی سالانه

جدول ۱: مشخصه‌های آزمون من-کندال در سطح اعتماد ۹۵ درصد برای فراوانی میانگین ماهانه تراز ناواگرا.

موقعیت	ژانویه	ژولای	موقعیت	ژانویه	ژولای
	Z	P-Value	Z	P-Value	
شمالغرب	-2.29778	0.0107873	تایید روند نزولی	وجود روند	رد
غرب	0.370574	0.355477	رد	تایید روند نزولی	رد
جنوبغرب	0.578113	0.281594	رد	رد	رد
شمال	-1.96116	0.0249304	تایید روند نزولی	رد	رد
مرکز	-0.11881	0.452711	رد	رد	رد
جنوب	0.378405	0.352565	رد	رد	رد
شمالشرق	-0.03550	0.485842	رد	تایید روند صعودی	رد
شرق	0.570957	0.284014	رد	تایید روند صعودی	رد
جنوبشرق	1.51984	0.0642758	رد	رد	رد



شکل ۱۶: فراوانی میانگین ماهانه تراز ناواگرا بر حسب درصد در شمالغرب ایران در ماه ژانویه در دوره آماری ۲۰۱۵-۱۹۷۶. خط چین‌های قرمز خط روند را نشان می‌دهد.



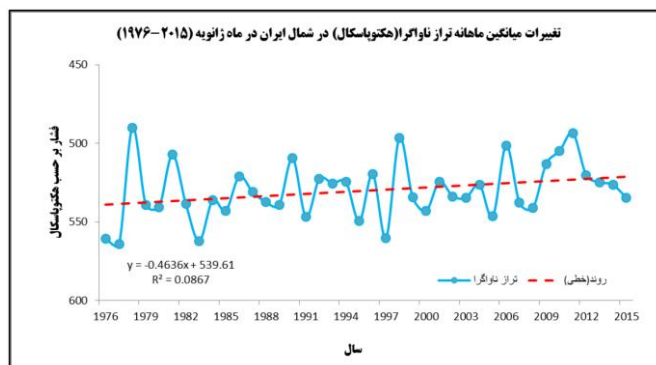
شکل ۱۷: فراوانی میانگین ماهانه تراز ناواگرا بر حسب درصد در شرق ایران در ماه ژولای در دوره آماری ۲۰۱۵-۱۹۷۶. خط چین‌های قرمز خط روند را نشان می‌دهد.

تایید شد. در جدول ۲ مشخصه‌های آزمون من-کندال برای ماه‌های ژانویه و ژولای نشان داده شده است. از آنجائی که در ماه ژولای کم‌فشار گرمائی بر روی ایران قرار می‌گیرد و این سامانه در ترازهای زیرین سبب ایجاد حرکت صعودی می‌شود، از این رو وجود روند نزولی در مرکز و جنوب ایران که بیانگر کاهش فشار تراز ناواگرا و افزایش ارتفاع این تراز است، نشان می‌دهد که در این مناطق یا عمق کم‌فشار گرمائی بیشتر شده است و یا پشته ارتفاعی عمیق‌تر شده است. روند صعودی در غرب و شمالشرق ایران نیز که معرف افزایش فشار تراز ناواگرا است، نشان می‌دهد که در این مناطق یا عمق کم‌فشار گرمائی کاهش یافته است و یا از عمق پشته ارتفاعی در طول دوره آماری کاسته شده است. شکل‌های ۱۸ و ۱۹ به ترتیب نمونه‌ای از تحلیل تغییرات میانگین ماهانه تراز ناواگرا و روند در نقطه واقع در شمال در ماه ژانویه و شمالشرق ایران در ماه ژولای را نشان می‌دهند.

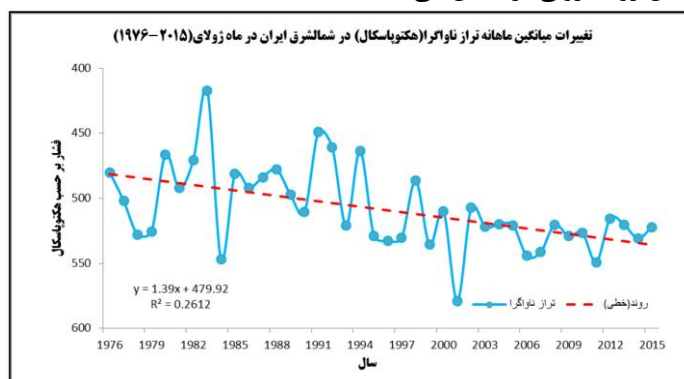
بررسی روند تغییرات میانگین ماهانه فشار تراز ناواگرا نشان داد که در ماه ژانویه در نقاط واقع در شمالغرب، جنوبغرب، شمال، مرکز و جنوب روند نزولی و در غرب، شمالشرق، شرق و جنوبشرق روند صعودی وجود دارد. آزمون من-کندال در سطح اعتماد ۹۵ درصد فقط روند نزولی نقطه واقع در شمال ایران را تایید کرد. روند نزولی نشان می‌دهد که فشار (ارتفاع) تراز ناواگرا کاهش (افزایش) یافته است و تراز ناواگرا در ماه ژانویه در شمال ایران در ترازهای فشاری بالاتر ایجاد شده است. بنابراین فعالیت سامانه‌های فشار کم در این منطقه افزایش یافته است. در ماه ژولای نیز در نقاط واقع در مرکز، جنوب و جنوبشرق روند نزولی و در شمالغرب، غرب، جنوبغرب، شمال، شمالشرق و شرق روند صعودی وجود دارد. با به کارگیری از آزمون من-کندال وجود روند در سطح اعتماد ۹۵ درصد برای نقاط مختلف انتخابی در این ماه نیز آزمایش شد و روند نزولی در مرکز و جنوب ایران و هم‌چنین روند صعودی در غرب و شمالشرق

جدول ۲: مشخصه‌های آزمون من-کندال در سطح اعتماد ۹۵ درصد برای تغییرات میانگین ماهانه تراز ناواگرا.

موقعیت	ژانویه	Z	P-Value	وجود روند	ژولای	Z	P-Value	وجود روند
شمالغرب	-0.25642	0.398813	0.287957	رد	0.559364	0.287957	رد	
غرب	0.466073	0.320582	0.0053618	رد	2.55158	0.0053618	تایید روند صعودی	
جنوبغرب	-0.12816	0.449011	0.476766	رد	0.058271	0.476766	رد	
شمال	-1.84099	0.0328116	0.337438	تایید روند نزولی	0.419466	0.337438	رد	
مرکز	-1.14188	0.126752	0.0303402	رد	-1.87582	0.0303402	تایید روند نزولی	
جنوب	-0.33793	0.367710	0.0466869	رد	-1.67786	0.0466869	تایید روند نزولی	
شمالشرق	0.664109	0.253310	0.0008276	رد	3.14599	0.0008276	تایید روند صعودی	
شرق	0.687504	0.245882	0.141867	رد	1.07197	0.141867	رد	
جنوبشرق	0.163126	0.435210	0.217482	رد	-0.78073	0.217482	رد	



شکل ۱۸: تغییرات میانگین ماهانه تراز ناوگرا در شمال ایران در ماه ژانویه در دوره آماری ۲۰۱۵-۱۹۷۶. خط چین‌های قرمز خط روند (در این شکل روند نزولی) را نشان می‌دهد.



شکل ۱۹: تغییرات میانگین ماهانه تراز ناوگرا در شمال‌شرق ایران در ماه ژوئیه در دوره آماری ۲۰۱۵-۱۹۷۶. خط چین‌های قرمز خط روند (در این شکل روند صعودی) را نشان می‌دهد.

در جنوب‌شرق تغییر می‌کند. دامنه این تغییرات در ماه ژوئیه بیشتر از ماه ژانویه می‌باشد. در ماه ژوئیه میانگین فشار تراز ناوگرا از  $514/3$  هکتوپاسکال در شمال‌شرق تا  $580/1$  هکتوپاسکال در جنوب‌شرق تغییر می‌کند. از آنجائی که با تغییر عرض جغرافیائی، میزان تابش خورشیدی تغییر می‌کند، از این رو انتظار می‌رود که تراز ناوگرا نیز تغییر نماید. این تغییر باید به گونه‌ای باشد که ارتفاع تراز ناوگرا از شمال به جنوب به سبب افزایش تابش خورشیدی و ایجاد حرکت صعودی کم عمق، کاهش یابد. مقادیر ارائه شده در جدول ۳ نشان می‌دهد که این تغییرات در برخی نقاط رخ نداده است. چنین برمی‌آید با وجودی که اثر کوهستان بر ارتفاع تراز ناوگرا تا حدودی حذف شده است ولی هم‌چنان این اثر در مناطقی که

در جدول ۳ میانگین فشار تراز ناوگرا در ماه‌های ژانویه و ژوئیه در دوره آماری برای نقاط انتخابی نشان داده شده است. از این جدول دیده می‌شود که در نقاط شمال‌غرب، غرب، جنوب‌غرب، مرکز، جنوب، شرق و جنوب‌شرق، تراز ناوگرا در ماه ژوئیه پایین تر از ماه ژانویه می‌باشد. این تفاوت به دلیل وجود کم‌فشار گرمائی در این ماه و ایجاد حرکت صعودی و همگرایی کم‌عمق، ایجاد شده است. در شمال و شمال‌شرق تراز ناوگرا در ماه ژانویه پایین تر از ماه ژوئیه می‌باشد. این مناطق در ماه ژوئیه معمولاً تحت‌تاثیر پرفشارهای عبوری است و کم‌فشار گرمائی اثر کمتری دارد. داده‌های این جدول نشان می‌دهد که در ماه ژانویه در روی ایران میانگین فشار تراز ناوگرا بین  $528/2$  هکتوپاسکال در شمال‌غرب تا  $536/3$  هکتوپاسکال

ارتفاع آنها بیش از ارتفاع تراز ۷۰۰ هکتوپاسکالی است، باقی مانده است. برای نمونه می‌توان به تراز ناواگرا در غرب، مرکز و شرق ایران اشاره کرد.

جدول ۳: میانگین ماهانه فشار تراز ناواگرا در ماه‌های ژانویه و ژولای در دوره آماری ۱۹۷۶-۲۰۱۵.

نقاط انتخابی	ژانویه	ژولای
شمالغرب	528.2	564.8
غرب	535.7	562.8
جنوبغرب	531.0	567.0
شمال	532.0	517.9
مرکز	529.8	570.3
جنوب	536.3	557.3
شمالشرق	534.7	514.3
شرق	528.2	584.8
جنوبشرق	535.6	580.1

### نتیجه گیری

وجود کم‌فشار گرمائی در منطقه، تغییرات ماهانه تراز ناواگرا در مرکز و جنوب روند نزولی دارد. وجود روند صعودی در غرب و شمالشرق ایران نیز در این ماه نشان می‌دهد که در این مناطق عمق کم‌فشار گرمائی کاهش داشته است. با پذیرش گرمایش جهانی، می‌توان گفت که در دوره آماری انتخابی، تاثیر افزایش میانگین دمای هوا و در نتیجه کاهش فشار در مرکز کم‌فشار گرمایی و افزایش ژرفای همگرایی این سامانه در مرکز و جنوب ایران، بیشتر از غرب و شمالشرق ایران بوده است.

-تراز ناواگرا در شمالغرب، غرب، جنوبغرب، مرکز، جنوب، شرق و جنوبشرق ایران، در ماه ژولای پایین تر از ماه ژانویه و در شمال و شمالشرق ایران در ماه ژانویه پایین تر از ماه ژولای است. در ماه ژانویه در روی ایران میانگین فشار تراز ناواگرا بین ۵۳۶/۳ هکتوپاسکال در شمالغرب تا ۵۲۸/۲ هکتوپاسکال در جنوبشرق تغییر می‌کند. این تغییرات در ماه ژولای از ۵۱۴/۳ هکتوپاسکال در شمالشرق تا ۵۸۰/۱ هکتوپاسکال در جنوبشرق می‌باشد.

بر پایه بررسی مطالب بندهای پیش، علاوه بر ارائه شکل‌های مربوط به نیمرخ قائم واگرایی و مولفه قائم باد، برای تعیین تراز ناواگرا به عنوان نتایج این تحقیق، موارد زیر نیز به عنوان نتایج موردی ارائه می‌شود. شایان توجه است که این نتایج با کار پژوهشگران پیشین به سبب نبود پژوهش‌هایی در این زمینه، مقایسه نشده است.

-ارتفاع تراز ناواگرا به عمق همگرایی (واگرایی) زیرین بستگی دارد به طوریکه هر چه عمق همگرایی (واگرایی) زیرین بیشتر باشد، تراز ناواگرا در سطح فشاری بالاتری قرار می‌گیرد. بنابراین تراز ناواگرا در کم‌فشارهای گرمائی که عمق کمتری دارند، در تراز پایین‌تری قرار می‌گیرند.

-در تراز ناواگرا، قدر مطلق مولفه قائم باد بیشینه است. به طوریکه کمترین (بیشترین) مقدار امگا با همگرایی (واگرایی) زیرین همراهی دارد.

-تغییرات میانگین ماهانه تراز ناواگرا در ماه ژانویه در شمال ایران دارای روند نزولی است و نشان می‌دهد که فشار تراز ناواگرا به سبب افزایش فراوانی سامانه‌های فشار کم عبوری، در این نقطه کاهش داشته است. در ماه ژولای نیز به سبب



## پانوش

## 1-Divergence

## منابع

- شو، فصلنامه تحقیقات جغرافیائی، شماره ۷۸، ص ۵۰-۶۵.
- مرادی، م.، سلیقه زاده، م. و ارکیان، ف.، ۱۳۹۶. بررسی چینش قائم باد سطوح بالا، پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، شماره‌های ۳۱ و ۳۲، ص ۵۳-۳۷.
- Carlson, T.N., 1998. Mid-Latitude Weather Systems, American Meteorological Society, 507 p.
- Coiffier, J., 2011. Fundamentals of numerical weather prediction, Cambridge: university press Inc, 340 p.
- Hoskins, B.J., Draghici, I. and Davis, H.C., 1978. A new look at the  $\omega$ -equation: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, v. 104, p. 31-38.
- Hoskins, B.J. and Pedder, M.A., 1980. The diagnosis of middle latitude synoptic development: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, v. 104, p. 31-38.
- Holton, J.R., 2012. An Introduction to Dynamic Meteorology: Elsevier, Academic Press Inc., 553 p.
- Lackmann, G.M., 2011. Midlatitude Synoptic Meteorology: Dynamics, Analysis and Forecasting, American Meteorological Society, 345 p.
- Martin, J.E., 2006. Mid-Latitude Atmospheric Dynamics: John Wiley & Sons, Ltd, 324 p.
- Martin, J.E., 2014. Quasi-geostrophic diagnosis of the influence of vorticity advection on the development of upper level jet-front systems, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, v. 104, p. 2658-2671.
- احمدی گیوی، ف. و قائمی، ه.، ۱۳۷۲. محاسبه سرعت قائم با استفاده از روش جنبش شناختی، نشریه فیزیک زمین و فضا، شماره ۲۰ (۴۵)، ص ۱-۶۴.
- اردکانی، ح.، مرادی، م. و قائمی، ه.، ۱۳۸۴. تخمین بارش به وسیله سرعت قائم و آب بارش
- Petterssen, S., 1956. Motion and Motion Systems, Vol. I. Weather Analysis and Forecasting: McGraw-Hill, 428 p.
- Riemer, M., Baumgart, M. and Eiermann, S., 2014. Cyclogenesis Downstream of Extratropical Transition Analyzed by Q-Vector Partitioning Based on Flow Geometry: Journal of the atmospheric sciences, v. 71, p. 4204-4220.
- Sutcliffe, R.C., 1947. A contribution to the problem of development: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, v. 73, p. 370-383.
- Sutcliffe, R.C. and Forsdyke, A.G., 1950. The theory and use of upper - air thickness patterns in forecasting: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, v. 76, p. 1890-217.
- Trenberth, K.E., 1978. On the interpretation of the diagnostic quasi-geostrophic omega equation: Monthly Weather Review, v. 106, p. 131-137.
- Wallace, J.M. and Hobbs, P.V., 2006. Atmospheric science, An introductory survey, 487 p.