

## شبیه‌سازی عددی امواج گرانی‌لختی با استفاده از مدل WRF روی ایران: بررسی موردي

مژگان امیرامجدی<sup>۱</sup>، علیرضا محب‌الحجه<sup>۲\*</sup> و محمد میرزاوی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

<sup>۳</sup> استادیار، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۹۲/۲/۲۸، پذیرش نهایی: ۹۲/۷/۱۶)

### چکیده

در این پژوهش، تولید و انتشار امواج گرانی‌لختی روی منطقه ایران مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین‌منظور برای استخراج ویژگی‌های موج گرانی‌لختی مشاهده شده در تاریخ ۷ تا ۹ فوریه ۱۳۹۰ (۱۸ تا ۲۰ بهمن ۱۴۰۲) که همراه با بارش باران و برف مناسب در بیشتر شهرهای کشور بود، این رخداد در یک شبکه با تفکیک متوسط و با استفاده از مدل میان مقیاس WRF شبیه‌سازی شده است. در این شبیه‌سازی، میدان واگرایی افقی در حکم کمیت اصلی مورد توجه قرار می‌گیرد، زیرا اثر جریان زمینه بر رخداد میان مقیاس را نادیده می‌گیرد و برای گستره همه طول موج‌ها کاربرد دارد. برآورده مقدار طول موج قائم و افقی، بسامد و دوره ذاتی، تندی فاز و سرعت گروه امواج نشان‌دهنده وجود امواج میان مقیاس با بسامد زیاد است که با طول موج افقی ۱۵۰ تا ۱۷۵ کیلومتر در نواحی شمال‌غرب و زاگرس مرکزی و جنوبی، و طول موج افقی ۱۰۰ تا ۱۲۰ کیلومتر در ناحیه تلاقی البرز و زاگرس متشر می‌شوند. با هدف شناسایی چشممه‌های انرژی شرکت‌کننده در این انتشار، با بهره‌گیری از قابلیت‌های مدل WRF، چهار اجرای متفاوت تحت شرایط حذف کوه‌ساری، حذف رطوبت، حذف هم‌زمان رطوبت و کوه‌ساری و اجرا با فیزیک کامل مسئله صورت می‌گیرد. در اجرای بدون رطوبت و کوه‌ساری امواج بلند گرانی‌لختی مشاهده می‌شوند. در حضور رطوبت، با وجود بازخورد مشتبه که بین رهاسازی هم‌رفت و چرخه جریان جتی به چشم می‌خورد، نمی‌توان گفت هم‌رفت به طور مستقیم در راهاندازی موج نقش دارد. اما در اعمال کوه‌ساری، ویژگی‌های موج از شدت تا دامنه و جهت انتشار آچنан تحت تاثیر قرار می‌گیرد که در نهایت نقش برجسته رشته‌کوه زاگرس در سازمان‌دهی انتشار موج گرانی‌لختی مورد بررسی را آشکار می‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** موج گرانی‌لختی، شبیه‌سازی عددی، میدان واگرایی افقی، رشته‌کوه‌های زاگرس

### Simulation of inertia-gravity waves using WRF model over Iran: a case study

AmirAmjadi, M.<sup>1</sup>, Mohebalhojeh, A. R.<sup>2</sup> and Mirzaei, M.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> M. Sc. Graduated Student of Meteorology, Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor, Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

<sup>3</sup> Assistant Professor, Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 18 May 2013, Accepted: 08 Oct 2013)

### Summary

A fluid, which is stable under the action of buoyancy, can oscillate under the influence of buoyancy and Coriolis forces. The resulting ageostrophic oscillations with a frequency between Coriolis and buoyancy frequencies are called inertia-gravity waves, hereafter IGWs.

In this study we investigate the generation and propagation of IGWs over Iran. To this end, the Weather Research and Forecasting (WRF) mesoscale

model is used to simulate an event with noticeable IGWs within a synoptic system accompanied by rain and snow, from 6 to 9 February, 2012. The NCEP FNL data (final analyses) are used for this simulation in a domain of  $8000 \text{ km} \times 6375 \text{ km}$  extent and a medium resolution (grid interval  $\Delta s=25 \text{ km}$ ). The model has 35 levels in vertical direction with its top at 10 hPa ( $\sim 30 \text{ km}$ ). A time step of 150 seconds is used and the model is run for 72 hours initialized at 12UTC 6 February and continued until 12UTC 9 February 2012. An implicit Rayleigh damping layer is used to prevent unphysical wave reflection from the upper boundary of the computational domain (Klemp et al, 2008). In order to investigate generation and propagation of IGWs and to determine the effects of each of energy sources in the region, four different model runs are designed and performed with/without orography/moisture.

In order to facilitate the conduct of the study, the main area of interest is classified into three regions where the IGWs are most active. The first area is located in the northwest of the country, in the vicinity of the maximum wind speed of the midlatitude jet stream and the left side of the jet streak. The second area, including the central and southern Zagros Mountain, is located in the vicinity of unbalanced flow and the right side of the jet streak. The third area is located geographically at the conjunction of Zagros and Alborz mountain ranges, is at the exit region of the jet stream and along a rain belt with significant cloud coverage as in the second area.

The fundamental quantities of wave like the wave frequency and periods, the intrinsic phase speed, the group velocity and horizontal and vertical wavelengths are obtained based on the horizontal divergence field as the main quantity. This is possible, because the procedure avoids explicit treatment of the background field, which has zero divergence, and is applicable to waves of arbitrary wavelength. Previous studies have shown that the most important energy sources for IGWs are: jet streams, fronts, convection and orography. Furthermore, the IGWs propagate in the atmosphere with a phase speed of 15 to  $35 \text{ ms}^{-1}$ , vertical wavelength of 500 m to 15 km and horizontal wavelength of 50 to 1000 km.

In the reference run (with the topography and moisture included), the distribution of the horizontal divergence clearly shows the waves closely follow the major topography and propagate nearly perpendicular to it. Estimation of wave properties shows that a high-frequency wave with  $\omega/f > 5$  is emitted in this case. The quantity  $\omega/f$  is the estimate for wave frequency scaled by inertial frequency. In the first and second areas, the typical values of the horizontal wavelengths are from 150 to 175 km, the vertical wavelength from 5 to 6 km and intrinsic phase speed from 15 to  $19 \text{ ms}^{-1}$ . In the third area, the IGWs travel with a phase speed of about 15 to  $21 \text{ ms}^{-1}$  and horizontal and vertical wavelengths of 100 to 120 km and 5 to 6 km, respectively.

Based on the characteristics of the IGWs and their propagation, it can be inferred that the waves are generated in the troposphere by jet-front mechanisms due to topography and then undergo deformation. Some of the waves generated in the upper troposphere cross the tropopause and propagate well into the stratosphere. Disregard of the way wave are generated, this transfer of activity from troposphere to the stratosphere is a common phenomena.

The results of this study are in good agreement with those obtained by Zhang and Koch in 2000 who studied simulation over Rockies Mountain in Montana and Dakota. They estimated a single wave packet with 3 or 4 waves, a

wavelength of 150 km and phase speed of 15.2 ms<sup>-1</sup>. Zulick and Peters in 2006 identified two wave packets in their study. The first wave packet included large waves with wavelengths of about 500 km and period of approximately 10 hour which were classified as sub-synoptic (or meso- $\alpha$ ). The second wave packet, however, consisted of small waves with much higher frequency than the first wave packet, and wavelengths of almost 200 km and period of nearly 5 hour, which were classified as meso- $\beta$  (mesoscale- $\beta$ ).

Having investigated the possible energy sources in the region, the following conclusions can be made. In the run without either orography or moisture, large-amplitude waves are observed that carry energy upward to the stratosphere and downward to the troposphere. Entering a positive feedback, the downward propagating waves emitted by the jet can facilitate convective activity at lower levels and play a role in enhancing precipitation. Although adding mountains to the physics of the model affects wave characteristics like intensity, amplitude, and direction of propagation, the presence of all of the factors is necessary for describing the actual wave generation and propagation processes.

**Keywords:** Inertia-Gravity Wave, Numerical simulation, Horizontal divergence field, Zagros Mountain ranges

## ۱ مقدمه

شکل گیری ابرهای قطبی پوشن‌سپهر است. چشمۀ اصلی انرژی موج گرانی لختی کوهها هستند و نواحی دارای همرفت عمیق، سازوکارهای مرتبط با جبهه و جت و گسیل تنظیم خود به خودی بهمنزله چشمۀ های غیرکوهستانی این امواج شناخته می‌شوند. از آنجا که این امواج در سطح میان‌مقیاس و زیر مقیاس شبکه‌ای شناخته می‌شوند، لازم است در مدل‌های گردش جهانی پارامتری شوند. برای این منظور باید چشمۀ های انرژی موج شناسایی شوند و مورد بررسی قرار گیرند، ارتباط و برهم‌کنش میان آنها مشخص شود و توان هر کدام از آنها در تولید موج گرانی لختی برآورد شود. عملی شدن این امر از چند جنبه دشوار است. اول، محدودیت پراکندگی چشمۀ های غیر کوهستانی این امواج است که به طور عمده در وردسپهر هستند. دوم، شناخت ما از سازوکارهای فیزیکی مسئول انتشار امواج غیرکوهستانی اندک است (فریتس و الکساندر، ۲۰۰۳). سوم اینکه برآورد توزیع جهانی جریان تکانه از راه مشاهدات با مشکلات گوناگونی از جمله محدودیت

هنگامی که جریان از نظر گرانشی و لختی در حالت پایدار باشد، جابه‌جایی‌های بسته شاره تحت اثر دو نیروی شناوری و کوریولیس قرار می‌گیرد. به همین سبب نوسان‌های آزمین‌گرد حاصل که با بسامدی بین بسامد لختی و کوریولیس رخ می‌دهند را امواج گرانی لختی می‌نامند. امواج گرانی لختی از راه واداشت دینامیکی بر گردش کلی جو به خصوص در پوشن‌سپهر و میان‌سپهر اثرمی‌گذارند و در ناحیه‌هایی که بارندگی در منطقه‌ای گسترده رخ می‌دهد، در اثر حضور این امواج، کمرندهای پُربارش به صورت بارش سنگین برف و باران می‌توانند تشکیل شود (بوزارت و همکاران، ۱۹۹۸). در مناطق غیر اشبع جو، امواج گرانی لختی با دامنه و انرژی مناسب می‌توانند بسته هوا را تا حد اشبع یا حتی تراز همرفت آزاد (اگر وجود داشته باشد) حرکت دهند و بدین ترتیب همرفت را راهاندازی و ساماندهی کنند. انتقال قائم و افقی جرم، تکانه و انرژی از نتایج انتشار امواج گرانی لختی است. اثرات دیگر این امواج شامل مشارکت در وضعیت تلاطم هوای صاف (CAT) در پوشن‌سپهر زیرین و

را در نواحی خروجی جت، جایی که باد تغییر جهت می‌دهد و ناوه عمیق ژئوپتانسیلی وجود دارد، شناسایی کردند.

ژنگ و کاک (۲۰۰۰) با شبیه‌سازی عددی نشان دادند که فرایندهایی در وردسپهر زیرین مرتبط با ازین رفتار سیم‌لوله کوه و دشت (MPS، Mountain-Plain Backward solenoid) و جریان چگالی پس‌رو (orographic density current)، می‌توانند عامل تولید امواج گرانی باشند. طبق نظریه ناپایداری شرطی از نوع CISK، Conditional instability of the second kind، همگرایی‌ای که از موج گرانی تولید می‌شود می‌تواند همرفت را تقویت کند، در حالی که گرمای نهان آزاد شده در همرفت، یک چشمۀ انرژی برای موج فراهم می‌کند. امواج مشاهده شده در حضور پدیده همرفت عمدتاً با طول موج قائم دو تا پنج کیلومتر و طول موج افقی ۲۰ تا ۱۰۰ کیلومتر در میان مقیاس β قرار می‌گیرند (داکا و همکاران، ۲۰۱۱؛ الکساندر و هولتون، ۲۰۰۴؛ چویی و همکاران، ۲۰۰۵). مواردی از انتشار امواج گرانی لختی هم وجود دارد که انرژی آنها به طور هم‌زمان از چند چشمۀ انرژی تأمین می‌شود. این رخدادها و نقش هریک از چشمۀ‌ها به راحتی با اعمال تغییراتی در فیزیک مدل میان مقیاس قابل بررسی هستند.

مدل‌های عددی میان مقیاس مانند WRF و MM5 می‌توانند موج گرانی لختی را در وردسپهر و پوشن‌سپهر به صورت واقعی شبیه‌سازی کنند و ابزارهایی ساده برای برآورد ویژگی‌های موج و سازوکار تولید و انتشار آنها هستند. از آنجاکه اندازه‌گیری و بررسی این موارد از فضا یا با ابزارهای زمینی کار مشکلی است، مدل‌سازی با مدل‌های میان مقیاس مناسب و کاربردی است. اما باید در نظر گرفت که استفاده از این ابزار نیز محدودیت‌هایی دارد که مربوط به تفکیک و پخش عددی مورد استفاده در مدل است که در عین قابل کنترل بودن، نتایج را تا حدی

تفکیک ماهواره‌های مشاهداتی (ارن و همکاران، ۲۰۰۴) یا محدودیت پوشش ابزار و وسائل اندازه‌گیری برای بررسی‌های پایه روی نمایه‌های قائم رو به رو است (وو و جیانگ، ۲۰۰۲).

تحقیقاتی که تاکنون در این زمینه صورت گرفته است را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد: اول، تحقیقاتی بر پایه مشاهدات که به بررسی علل تولید و فعالیت امواج گرانی لختی پرداخته‌اند و دوم شبیه‌سازی عددی این امواج با در نظر گرفتن شرایط اولیه واقعی و آرمانی. بررسی موردنی امواج گرانی لختی در «بستر شبیه‌سازی عددی واقعی» به همراه «مشاهدات» صورت می‌گیرد. از تحقیقات صورت گرفته از راه داده‌های مشاهداتی می‌توان به پژوهش یوسیلینی و کاک (۱۹۸۷) اشاره کرد. آنها با استفاده از مجموعه داده‌های ۱۳ بررسی موردنی، ضمن آشکارسازی امواج گرانی لختی میان مقیاس، ناپایداری چیزی و تنظیم زمین گرد را در حکم دو سازوکار مرتبط با تولید امواج گرانی معرفی کردند. همچنین محل حضور این امواج را نواحی اطراف جریان جتی در وردسپهر زیرین و سمت سرد جبهه سطحی یافتند.

در ناحیه فعالیت جبهه جت، چند سازوکار ممکن است مشارکت داشته باشند: ناپایداری چیزی، ناپایداری متقارن، همرفت عمیق، گسیل تنظیم خودبه‌خودی و تنظیم راسبی. این عوامل ممکن است به صورت هم‌زمان رخ دهنده، به گونه‌ای که نتوان آنها را در تولید امواج، از یکدیگر مستقل دانست؛ اما در پیشتر بررسی‌های مشاهداتی و عددی، تنظیم راسبی به مترله چشمۀ اصلی امواج گرانی لختی در ناحیه حضور جت شناسایی شده است. تنظیم راسبی فرایندی است که در آن شارش از یک حالت کاملاً نامتوازن با تابش امواج گرانی لختی به سوی حالتی متوازن میل می‌کند. پلوگونون و همکاران (۲۰۰۳) با تحلیل داده‌های مشاهداتی به دست آمده از ۲۲۴ رادیو گمانه در اقیانوس اطلس شمالی، امواج گرانی لختی

هکتوپاسکال) ترکیب شده است. همچنین یک جبهه ایستور روی کشور ترکیه استقرار یافته است و جبهه سردی از کشور عراق به سمت مرزهای غربی کشورمان حرکت می‌کند. جریان جتی قوی عرضهای میانی در ترازهای زیرین وردسپهر به گونه‌ای شکل گرفته است که بیشینه سرعت باد آن از ۶۰ متر بر ثانیه نیز تجاوز می‌کند و ناحیه خروجی آن بر استان‌های شمال و شمال‌غربی ایران قرار دارد. تصاویر ماهواره‌ای همان زمان نیز نوار ابر گستردگی را روی ایران نشان می‌دهد که آرایش آن از موقعیت جریان جتی پیروی می‌کند (شکل ۱).

**۳ شبیه‌سازی عددی با داده‌های واقعی**  
 یکی از روش‌های برآورد ویژگی‌های موج، محاسبه واگرایی افقی است که روی میدان باد به دست آمده از مدل‌سازی یا داده‌های مرکز اروپایی پیش‌بینی میان‌مدت ECMWF، European Center for Medium- (range Weather Forecast NCEP، National Centers for Environmental Prediction) قابلِ اعمال است. در نگاه اول مزیت استفاده از این روش این است که واگرایی در حکم کمیت اصلی، میدان زمین‌گرد را به طور مؤثر نادیده می‌گیرد (به عبارت دیگر، واگرایی جریان زمینه صفر است). بنابراین نیازی به بهره‌گیری از پالاینده برای حذف جریان بزرگ مقياس زمینه برای آشکارسازی پدیده میان‌مقیاس نیست. مزیت دیگر این روش این است که طول موج افقی نیز همچون طول موج قائم به طور مستقیم از داده‌ها قابل استخراج است. با داشتن طول موج قائم و افقی، بسامد و سرعت فاز ذاتی از رابطه پاشندگی به دست می‌آید:

$$\omega = \left( f^2 + N^2 \frac{k_h^2}{k_z^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

که در آن،  $f$  بسامد کوریولیس،  $N$  بسامد شناوری،  $k_h$

تحت تاثیر قرار می‌دهد (زویلک و پترس، ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷ و ۲۰۱۰؛ پلوگونون و همکاران، ۲۰۱۰).

تا آنجا که اطلاع داریم هیچ بررسی موردی درباره تولید امواج گرانی لختی در سامانه‌هایی که ایران را متاثر می‌کنند، صورت نگرفته است. لذا در این پژوهش، تولید و انتشار این امواج در یک شبیه‌سازی واقعی با مدل عددی میان‌مقیاس WRF برای یک سامانه که روی ایران بارش خوبی داشته است، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲ مشاهدات همدیدی

بررسی موردی حاضر، رخدادی را مورد تحقیق قرار می‌دهد که از ۷ تا ۹ فوریه ۲۰۱۲ (مصادف با ۱۸ تا بهمن ۱۳۹۰) اتفاق افتاده است و در طی آن بسیاری از شهرهای کشور، بارش به شکل برف و باران را تجربه کردن. بررسی نقشه‌های همدیدی در این زمان نشان‌دهنده تشکیل یک مرکز کم ارتفاع گستردگ و فعال دینامیکی در جنوب اروپا و روی کشور ایتالیا است. در نقشه تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال (نشان داده نشده)، وضعیت مرکز کم ارتفاع و ناوه و ریزش هوای سرد و فرارفت هوای گرم و مرطوب همانند تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال دیده می‌شود که فعال بودن این مرکز کم ارتفاع را تایید می‌کند. پشتۀ سطوح زیرین وردسپهر بر کشور ترکمنستان و مرزهای شمال‌شرقی ایران و ناوه بر شمال افریقا واقع شده است. در سطح زمین، پرشار سیبری با فشار مرکزی بیش از ۱۰۴۰ هکتوپاسکال روی کشور افغانستان، در وضعیت بسیار فعال خود قرار گرفته و زبانه آن روی ایران و تا آب‌های اقیانوس هند و عربستان گسترش یافته است. این وضعیت موجب کاهش دما روی کشور ایران می‌شود و رطوبت آب‌های جنوبی را به داخل کم‌فشار سودانی منتقل می‌کند، شیب فشاری برای کم‌فشار سودانی- مدیترانه‌ای مقابل را تامین می‌سازد. مرکز کم‌فشاری روی جنوب اروپا و مدیترانه تشکیل و زبانه هم‌فشار ۱۰۱۵ هکتوپاسکالی آن با زبانه کم‌فشار گرمایی سودانی (با خط هم‌فشار مرزی ۱۰۱۵

دوم با توجه به اینکه توجه‌مان معطوف به تولید امواج گرانی لختی در ایران و ارتفاع متوسط فلات ایران از سطح دریا ۱۰۰۰ متر است، وضعیت کوه‌ساری به گونه‌ای تغییر داده شد که در شبکه، سرزمینی هموار با ارتفاع متوسط ۱۰۰۰ متر جایگزین شود. اجرای سوم شامل حذف رطوبت و اجرای چهارم، بدون رطوبت و کوه‌ساری است.

#### ۴ ویژگی‌های موج شبیه‌سازی شده

برای سهولت در بررسی، ناحیه مورد نظر را به سه منطقه شاخص دسته‌بندی کردیم. منطقه اول، واقع در شمال غربی کشور، در مجاورت سرعت‌های بیشینه جریان جتی عرض‌های میانی و سمت چپ رگه جت قرار دارد. منطقه دوم، شامل زاگرس مرکزی و جنوبی، در سمت راست رگه جت و در ناحیه نامتوازن جریان جت واقع شده است. منطقه سوم نیز منطبق بر محل تلاقی دو رشته کوه البرز و زاگرس، در ناحیه خروجی جریان جت و در امتداد کمرنگ بارشی با پوشش مناسبی از ابر است. حضور امواج گرانی لختی روی کشور تا حوالی ساعت ۱۰ روز ۹ فوریه (۱۳:۳۰ روز ۲۰ بهمن) ادامه داشت اما به علت کاهش پوشش ابر، تداوم این حضور اثر محسوسی از خود بر جای نگذاشت.

#### ۱-۴ موج گرانی لختی در منطقه اول

رسم نقشه افقی میدان واگرایی افقی، به متنزه کمیت اصلی در این بخش، و سرعت‌های قائم همبسته با آن نشان می‌دهد که تولید امواج گرانی لختی، در حوالی ساعت ۲۰UTC روز ۷ فوریه و از مناطق شمال‌غربی کشور آغاز شده است. بسته موج اولیه به طور مشخص با سه تا چهار طول موج ظاهر می‌شود و فاز آن به خوبی از جهت رشته کوه‌های شمال‌غربی پیروی می‌کند. راستای انتشار این بسته موج، جنوب غربی‌شمال شرقی است.

عدد موج در راستای افقی  $k_z$  عدد موج در راستای قائم است. تندی فاز ذاتی موج نیز به صورت

$$c_i = \frac{\omega}{k_z} \quad (2)$$

و سرعت گروه در راستای قائم مطابق با رابطه (۳) خواهد بود:

$$c_{g,z} = -N^2 \frac{k_h^2}{\omega k_z^3} \quad (3)$$

نتایج حاصل از روش واگرایی علاوه بر آنکه به تفکیک و پخش مدل بستگی دارد، از میان پارامترهای کنترل کننده‌ای چون تفکیک قائم، افقی و زمان spin up بیشتر نسبت به تفکیک افقی حساس هستند (پلوگونون و همکاران، ۲۰۱۰).

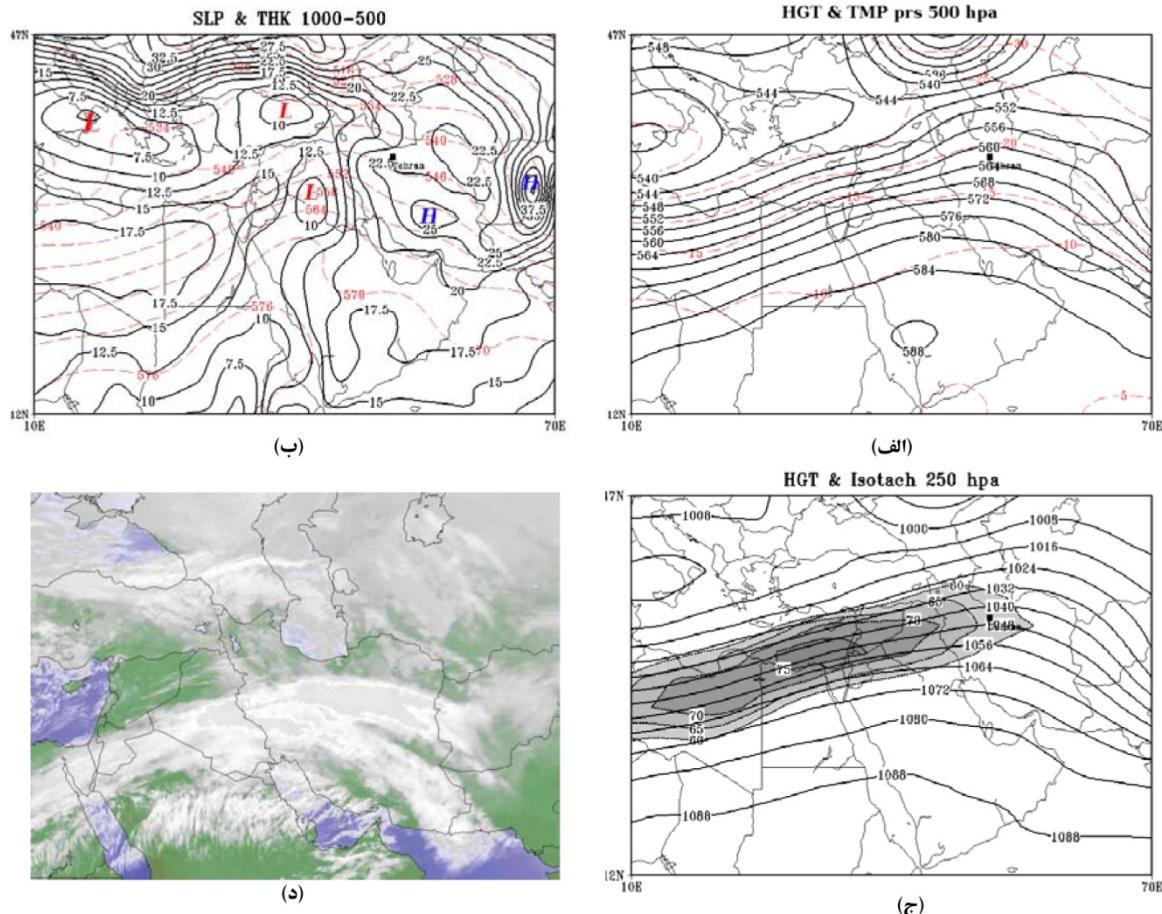
در جریان این بررسی موردی و برای شبیه‌سازی واقعی امواج گرانی لختی، از نسخه ۳ مدل میان مقیاس WRF استفاده شد. به این‌منظور شبکه‌ای با تفکیک افقی  $\Delta s = 25 \text{ km}$  با تفکیک متوسط در شبکه‌ای با ابعاد  $6375 \times 8000$  کیلومتر مربع در نظر گرفته شد. بالاترین تراز فشاری برابر  $10 \text{ hPa}$  پاسکال قرار گرفته و مدل با  $35 \text{ m}$  تراز قائم و  $5 \text{ m}$  زمانی  $150 \text{ s}$  ثانیه، برای مدت  $72 \text{ h}$  ساعت از ۱۲UTC روز ششم فوریه ۲۰۱۲ تا ساعت ۱۲UTC روز نهم فوریه اجرا شد. داده‌های مورد استفاده از نوع FNL (NCEP Final Analyses) با تفکیک یک درجه و به صورت شش ساعته هستند. همچنین برای پرهیز از بازتاب موج گرانی از روی تراز زبرین، از یک لایه جذب کننده رایلی ضمنی (کلمپ و همکاران، ۲۰۰۸) استفاده شد. جدول ۱ طرحواره‌های مورد استفاده در بخش فیزیک مدل را نشان می‌دهد.

شبیه‌سازی واقعی در این پژوهش چهار بار صورت گرفت که اجرای اول با فیزیک کامل مسئله و اجرای دوم، به‌منظور بررسی اثر کوه‌ساری بر تولید امواج گرانی لختی، شامل حذف عوارض زمینی است. در اجرای

ذاتی  $\omega_i \approx 8/0.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ،  $f \approx 8/95$  h $^{-1}$ ،  $\omega_i \approx 8/0.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ، بسامد کوریولیس) است. بر این اساس، دوره تناوب موج  $\tau \approx 2/17 \text{ h}$ ، تندی فاز ذاتی  $17/3$  تا  $19/2$  متر بر ثانیه و سرعت گروه در راستای قائم  $2/7 \text{ km h}^{-1}$  به دست می‌آید؛ چنین سرعت گروهی نشان می‌دهد انرژی این بسته موج به حدود  $4/7$  ساعت زمان نیاز دارد تا از  $Z=10 \text{ km}$  به ارتفاع  $Z=20 \text{ km}$  برسد.

پریشیدگی حاصل از حضور موج، خود را به شکل نوسان‌های کوچکی در میدان ارتفاع ژئوپتانسیلی و میدان سرعت افقی آشکار می‌سازد (شکل ۲).

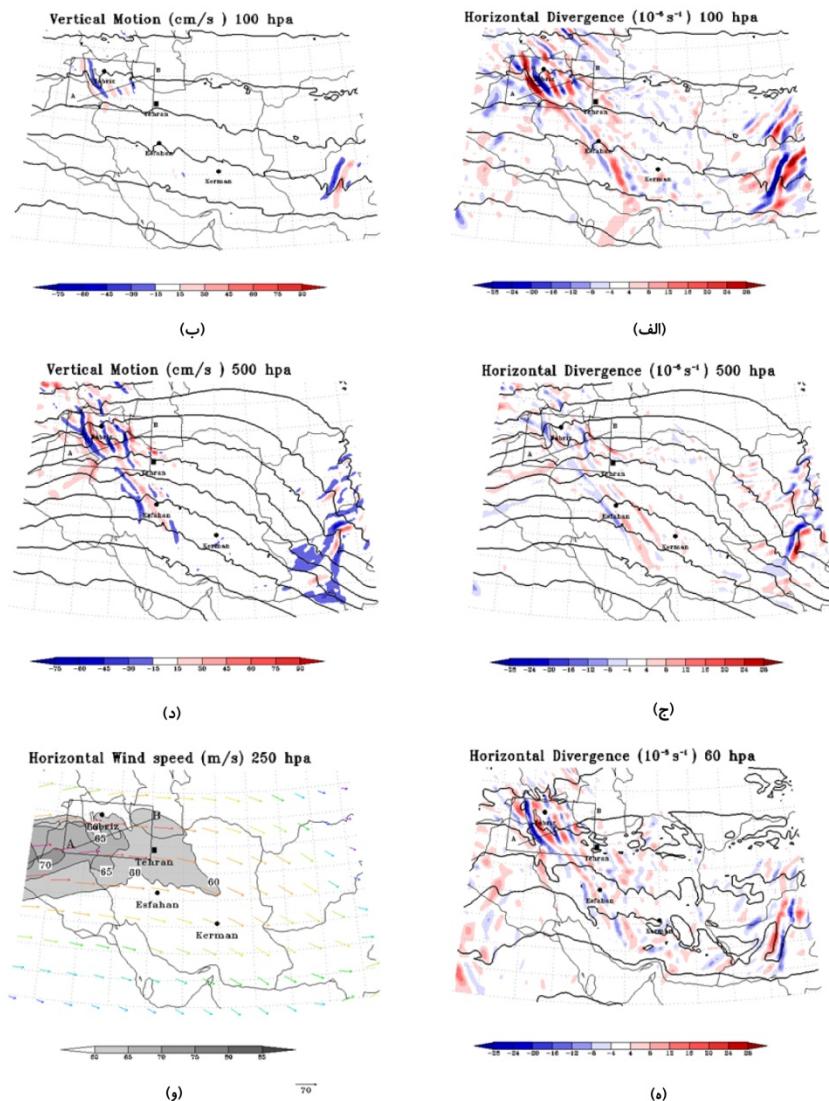
برای این زمان، نقشه‌های برش قائم میدان‌های واگرایی افقی، سرعت‌های قائم و افقی نیز در امتداد خط AB در شکل ۲ رسم شده‌اند (شکل ۳). موج مشاهده شده در این منطقه به طور نوعی دارای طول موج قائم  $5/5$  تا  $6$  کیلومتر، طول موج افقی  $15/0$  کیلومتر و بسامد



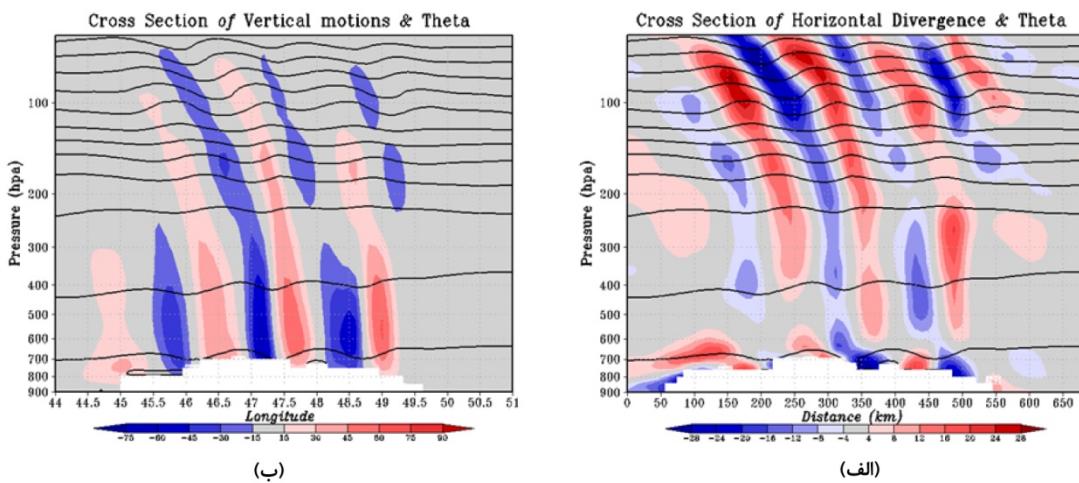
شکل ۱. نقشه‌های GFS برای ساعت ۰۰ UTC ۸ فوریه ۲۰۱۲ در (الف) تراز  $500 \text{ hPa}$  شامل ارتفاع ژئوپتانسیلی (خطوط توپر با بازه پرینتی  $40 \text{ dm}$ ) و دما (خطوط خطچین با بازه پرینتی  $5 \text{ درجه سلسیوس}$ )؛ (ب) تراز فشار متوسط سطح دریا (در مقیاس  $1000 \text{ hPa}$  با بازه پرینتی  $2/5 \text{ hPa}$ ) و ضخامت  $1000-500$  (خطوط خطچین با بازه پرینتی  $10 \text{ dm}$ )؛ (ج) تراز  $250 \text{ hPa}$  شامل ارتفاع ژئوپتانسیلی (خطوط توپر با بازه پرینتی  $80 \text{ dm}$ ) و سرعت افقی (سایه روشن با بازه پرینتی  $5 \text{ m s}^{-1}$ ) و (د) تصویر ماهواره‌ای ساعت ۲۳:۳۰ بامداد روز ۸ فوریه به وقت محلی.

جدول ۱. طرحواره‌های مورد استفاده برای فیزیک مدل.

لایه مرزی سیاره‌ای	سطح زمین	لایه سطحی	تابش کوتاه‌موج	تابش بلندموج	خُردفیزیک	فیزیک مدل
YSU scheme	unified Noah land-surface model	Monin- Obukhov scheme	Dudhia scheme	rrtm scheme	WSM 3-class simple ice scheme	طرحواره



شکل ۲. نقشه‌های افقی تولید اولین بسته موج در ساعت ۲۰ UTC روز ۷ فوریه شامل (الف) میدان واگرایی (با بازه پریندی  $4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) و ارتفاع ژئوپتانسیلی (با بازه پریندی  $80 \text{ m}$ ) در تراز  $80 \text{ hPa}$  (ب) میدان سرعت قائم (با بازه پریندی  $15 \text{ cm s}^{-1}$ ) و ارتفاع ژئوپتانسیلی (با بازه پریندی  $80 \text{ m}$ ) در همان تراز، (ج) میدان واگرایی (با بازه پریندی  $4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) و ارتفاع ژئوپتانسیلی (با بازه پریندی  $40 \text{ m}$ ) در تراز  $40 \text{ hPa}$  (د) میدان سرعت قائم (با بازه پریندی  $50 \text{ m s}^{-1}$ ) و ارتفاع ژئوپتانسیلی (با بازه پریندی  $4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) در تراز  $60 \text{ hPa}$  هکتوپاسکال و  $15 \text{ cm s}^{-1}$  و ارتفاع ژئوپتانسیلی (با بازه پریندی  $40 \text{ m}$ ) در همان تراز، (ه) میدان واگرایی (با بازه پریندی  $5 \text{ m s}^{-1}$ ) در تراز  $250 \text{ hPa}$  سایه‌روشن بازه پریندی  $5 \text{ m}$  و بردارسرعت افقی بر مبنای پیکان پایین شکل. خط AB روی همه شکل‌های فوق محل ترسیم برش قائم را نشان می‌دهد و نواحی با رنگ سرخ و آبی در شکل‌های (الف) تا (ه) به ترتیب نشان‌دهنده مقدارهای مثبت و منفی است.



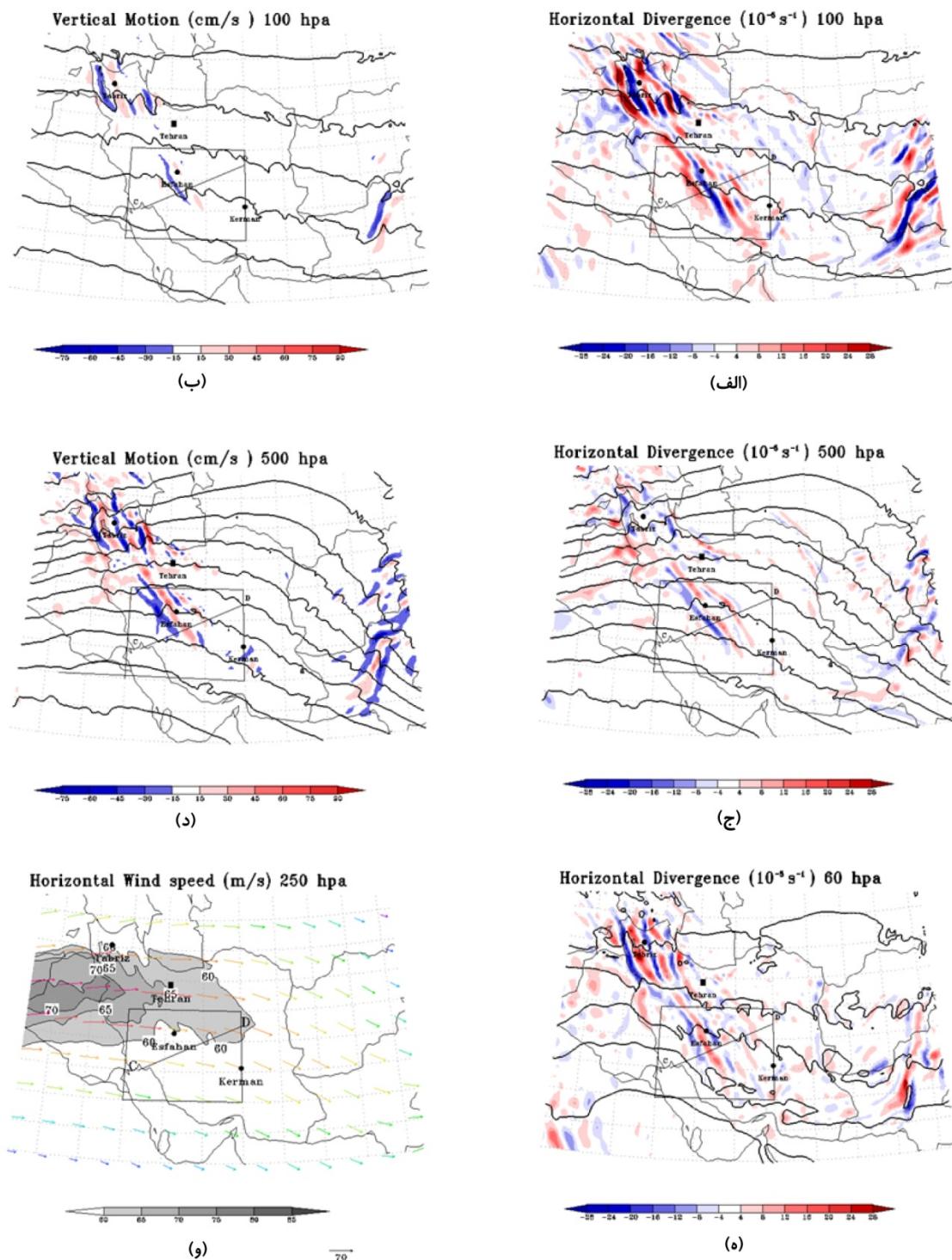
شکل ۳. برش قائم دمای پتانسیلی (خطوط توپر با بازه پرینتی  $K = 15$ ) به همراه (الف) میدان واگرایی (با بازه پرینتی  $5 \times 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$ ) و (ب) میدان سرعت قائم (با بازه پرینتی  $5 \times 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$ ) برای ساعت ۲۰ UTC روز ۷ فوریه در امتداد خط مورب AB در شکل ۲. محور قائم فشار (بر حسب hPa) و محور افقی بازه پرینتی بر حسب km است و نواحی با رنگ سرخ و آبی به ترتیب مقادیر مثبت و منفی را نشان می‌دهند.

ساعت است.

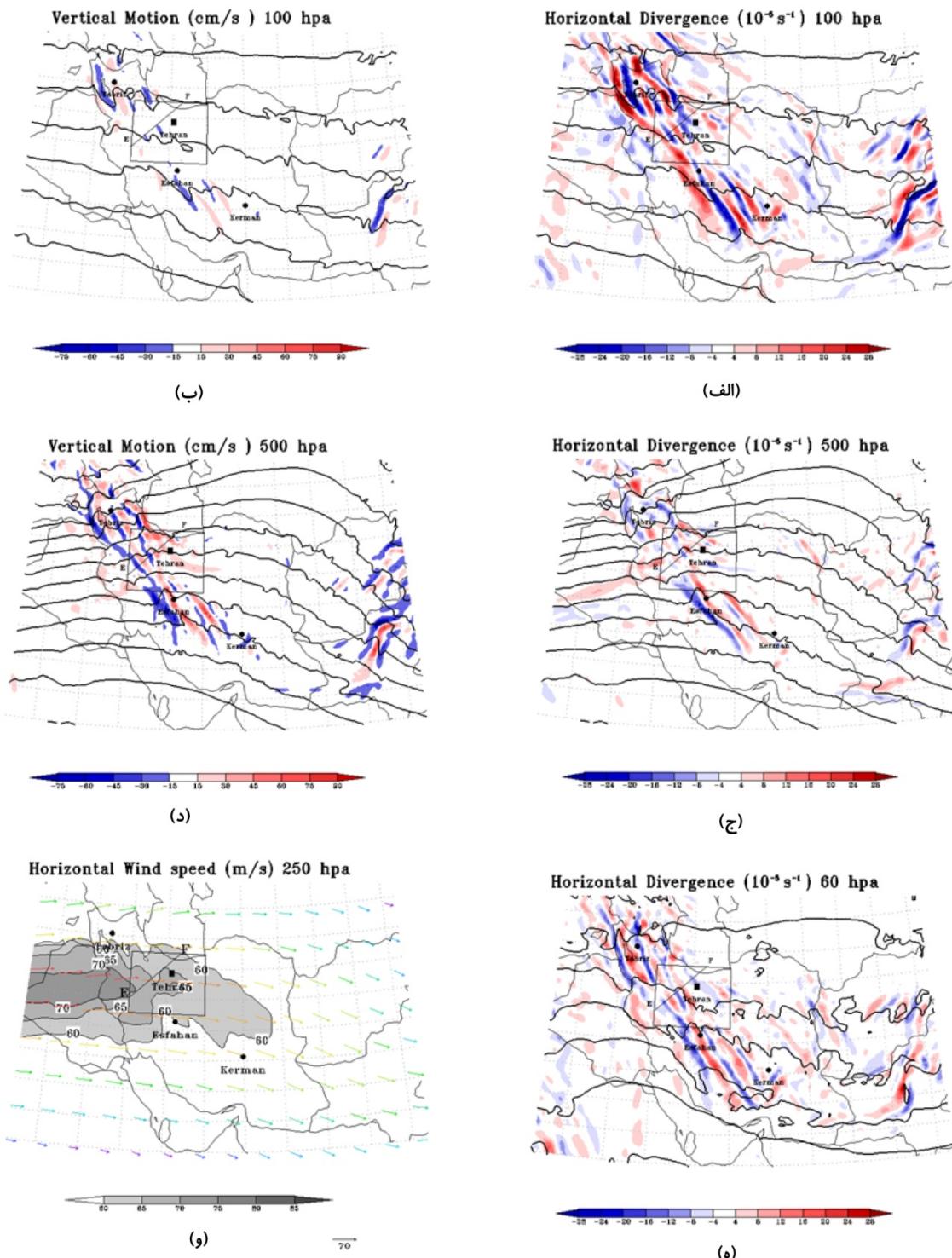
**۴-۴ منطقه سوم، بارش برف در تهران**  
بارش برف در تهران از بامداد روز ۸ فوریه به وقت محلی آغاز و تا چند ساعت پس از طلوع خورشید ادامه داشت. تصاویر ماهواره‌ای پوشش ضخیمی از ابر بر فراز تهران را نشان می‌دهند. شبیه‌سازی‌ها نیز شواهدی از فعالیت مناسب موج گرانی‌لختی روی منطقه تهران به دست می‌دهند. این موج اگرچه دامنه ضعیف‌تری نسبت به دو منطقه دیگر دارد (شکل‌های ۵ و ۷)، اما مهیا بودن شرایط همدیدی و ابر و بارش، در نهایت موجب بروز نتیجه اثر بخشی از انتشار موج گرانی‌لختی شد. موج مشاهده شده در تهران دارای طول موج قائم نوعی ۴ تا ۶ کیلومتر و طول موج افقی ۱۰۰ تا ۱۲۰ کیلومتر، بسامد ذاتی  $f = ۱/۱۳$  تا  $۱/۱۵$  تندی فاز ذاتی  $۱۴/۷$  تا  $۲۱/۶$  متر بر ثانیه، سرعت گروه  $۱/۴۵$  تا  $۲/۶$  کیلومتر بر ساعت و دوره ذاتی  $۱/۴۵$  تا  $۲/۲$  ساعت است.

#### ۴-۲ موج گرانی‌لختی در منطقه دوم

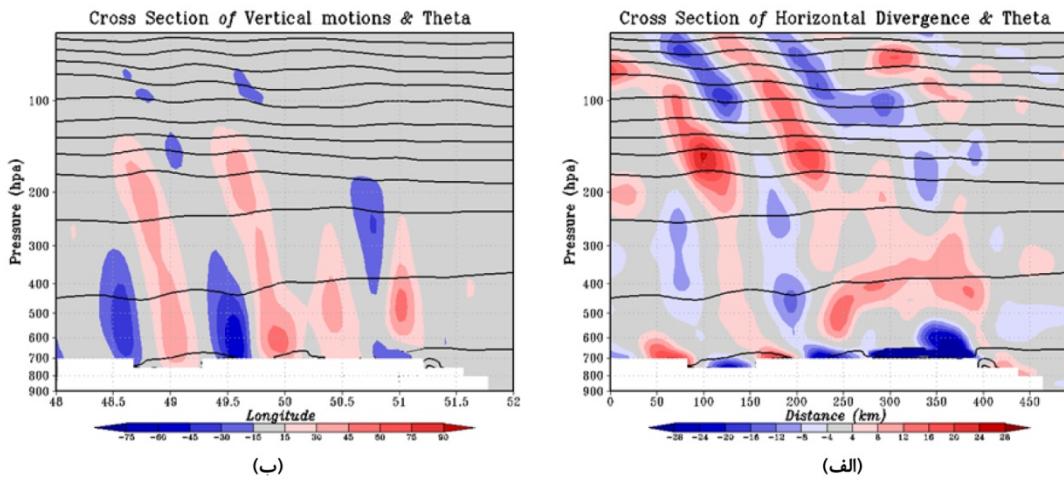
چهار ساعت پس از انتشار اولین بسته موج، بسته موج دیگری فعالیت خود را در دامنه‌های رشته‌کوه زاگرس آغاز می‌کند. این بسته موج اگرچه فقط با دو یا سه طول موج ظاهر می‌شود، اما منطقه وسیع‌تری را تحت تاثیر خود قرار می‌دهد و همچنان با تبعیت فاز از الگوی کوهساری، انتشار در راستای شمال شرقی صورت می‌گیرد (شکل ۴). بسته موج در منطقه دوم از نظر شدت از اولی ضعیفتر و سازوکار تولید آن اندکی متفاوت است. در اینجا بردار عددموج هم در پوشن‌سپهر و هم در وردسپهر به سمت پایین است ( $k_z < 0$ ). با توجه به انتشار بالاسوی انرژی برای چنین موجی، باید در وردسپهر پایینی به دنبال چشمeh آن بود (شکل ۶). استخراج ویژگی‌های این بسته موج نشان می‌دهد که موج به طور عمده دارای طول موج قائم ۴ تا ۵ کیلومتر و طول موج افقی ۱۵۰ تا ۱۷۵ کیلومتر، بسامد ذاتی  $f_i \approx ۷/۳۶$  تا  $۶/۸۷$  است. تندی فاز ذاتی در راستای افقی ۱۶ تا ۱۹ متر بر ثانیه و دوره ذاتی  $۲/۲$  تا  $۳/۲$



شکل ۴. همانند شکل ۲ برای تولید موج در منطقه دوم در ساعت ۰۰ UTC روز ۸ فوریه ۱۴۰۲.



شکل ۵. همانند شکل ۲ برای تولید موج در منطقه سوم در ساعت UTC ۸، روز ۸ فوریه ۱۴۰۲.



شکل ۶. همانند شکل ۳ برای تولید موج در منطقه سوم در ساعت ۰۰ UTC روز ۸ فوریه ۲۰۱۲.

راست آن قرار گرفته باشد، جهت جریان آزمین گردی رو به سمت چرخندی جت است. در کنار چنین ویژگی بزرگ‌مقیاسی، حضور امواج گرانی با مقیاس کوچک‌تر نیز خود را در محاسبه عدد راسی لاغرانتزی نمایان می‌سازند. این نوسان‌های کوچک را می‌توان با استفاده از پالایه‌ای از بین برد، به طوری که مقدار حاصل، فقط شامل اطلاعاتی در مورد وضعیت جریان زمینه باشد.

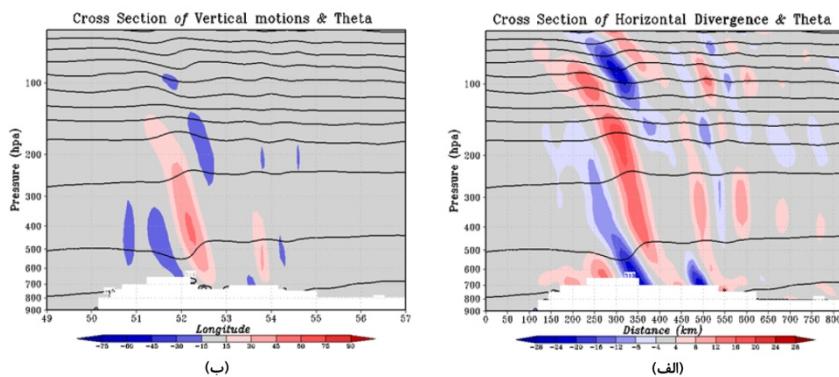
برای نیل به این هدف، ابتدا محاسبه  $Ro_{\perp}$  اولیه برای مناطقی صورت می‌گیرد که سرعت باد بیش از ۲۰ متر بر ثانیه باشد. همان‌طور که در شکل ۸-الف دیده می‌شود، ناحیه وسیعی با  $Ro_{\perp}$  مثبت وجود دارد و در مقایسه با تصاویر میدان واگرایی، بخوبی می‌توان ساختار موج گونه ناشی از حضور عامل میان‌مقیاس موج گرانی‌لختی را مشاهده کرد. بهمنظور حذف اثر امواج گرانی‌لختی از کمیت فرایابی شده و مشاهده عامل بزرگ‌مقیاس به وجود آورنده متوازن نبودن جریان، از یک پالاینده با تابع وزن کرسمن ( $F_c = (s_c^2 - s^2)/(s_c^2 + s^2)$ ) استفاده شد که در این رابطه  $s$  شاعع موثر و  $s_c = 580 \text{ km}$  شاعع قطع آن در راستای افقی است. بدین ترتیب همه امواج با طول

**۴-۴ فرایابی محل جریان نامتوازن**  
ناحیه خروجی جت، چشم‌های ارزی موج گرانی‌لختی است. این محل به علت تغییرات ناگهانی جریان، به شدت ناپایدار است. زمانی که سرعت جریان زمین گرد کاهشی حدود ۳۰ متر بر ثانیه را در یک ناحیه زیر مقیاس همی‌دیدی حدود  $\delta s \sim 500 \text{ km}$  تجربه کند، جریان با مقیاس زمانی در حدود  $\frac{\delta s}{U} \sim 5 \text{ h}$  پاسخ می‌دهد که از دوره تناوب لختی  $(T \sim 15 \text{ h})$  بسیار کمتر است. بنابراین شرایط توازن زمین گردی مختلف و بازگشت به حالت توازن منجر به گسیل موج گرانی‌لختی می‌شود.

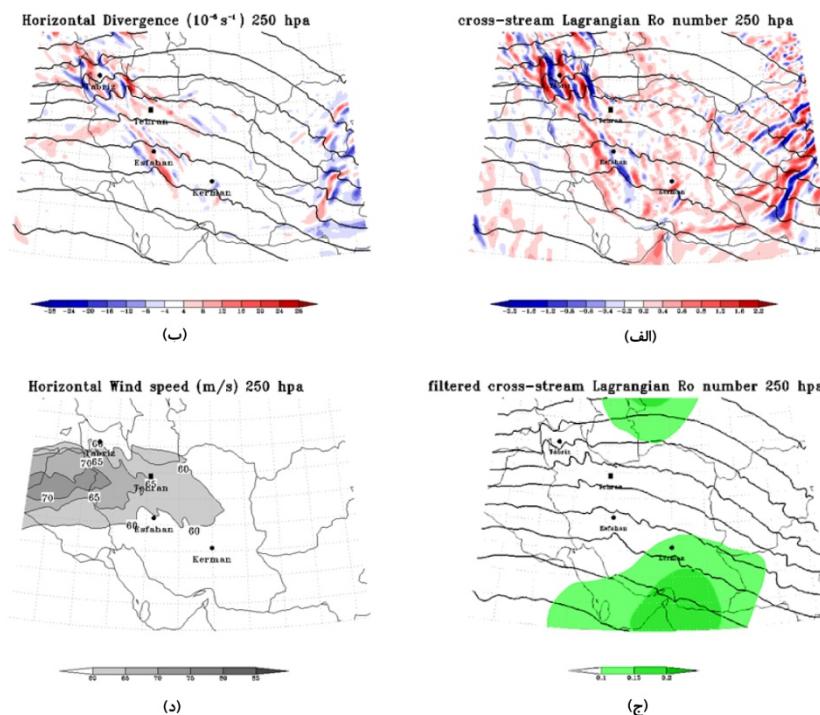
ناحیه نامتوازن جریان را می‌توان با کمیت بی‌بعد عدد راسی به تصویر کشید. استفاده از عدد راسی لاغرانتزی در عرض جریان (کاک و دورین، ۱۹۸۸) مطابق با  $Ro_{\perp} = \frac{|V_{ag}^{\perp}|}{|V|} Ro_{\perp}$  (که  $V_{ag}^{\perp}$  بردار باد آزمین گرد و  $V$  بردار باد کل است) با آستانه  $0.5$  می‌تواند ناحیه جریان نامتوازن را آشکار کند. براساس یافته‌های کاک و دورین (۱۹۸۸)، مقادیر مثبت عدد راسی لاغرانتزی در عرض جریان، متناسب با ناحیه‌ای است که شتاب جریان کندشونده است. زیرا زمانی که بیشینه جریان جتی در محلی بین یک چرخند در سمت چپ آن و یک واچرخند در سمت

از جریان نامتوازن روی کشورمان با  $[R0_{\perp}]_{580\text{ km}, 5\text{ km}}$   
۱/ متناظر با ناحیه خروجی جریان جتی در شکل ۸-ج،  
مشاهده می‌شود (علامت [ ] اشاره به اعمال پالینده بر  
کمیت موردنظر دارد).

موج کوچک‌تر از این مقدار حذف می‌شوند. در مرحله بعد، اعمال پالینده در راستای قائم با شعاع قطع  $Z_c=5 \text{ km}$  صورت گرفت. بعد از کاربست پالایه با شرایط فوق، در نقشه‌های تراز ۲۵۰ hPa نواحی وسیعی



شکل ۷. همانند شکل ۳ برای تولید موج در منطقه دوم در ساعت ۰۰ UTC روز ۸ فوریه ۲۰۱۲



شکل ۸ برای ساعت ۰۰ UTC روز ۸ فوریه ۲۰۱۲ در تراز ۲۵۰ hPa شامل (الف) عدد راسی لاگرانژی در عرض جریان (با بازه پربندی  $0/2$ )، (ب) میدان واگرایی افقی (با بازه پربندی  $5^{-5} \times 10^{-4}$ )، (ج) عدد راسی لاگرانژی در عرض جریان پالایش شده با پالینده کرسمن (به بازه پربندی  $0/05$ ) و مشخص شده با رنگ سبز) و (د) جریان جتی (سایه‌روشن با بازه پربندی  $5 \text{ m s}^{-1}$ ). در (الف) و (ب) رنگ‌های سرخ و آبی به ترتیب مقدارهای مثبت و منفی را نشان می‌دهند.

همه موج را به عامل کوهستان نسبت داد. این موج تا حدی شیبدار است و با شدت مناسبی دقیقاً بر فراز کوهستان قرار دارد. در اجرای CM محل همرفت به علت حضور عوارض زمینی جابه‌جا شده است و برهم‌نھی امواج با چشمھهای گوناگون، الگوی نهایی انتشار موج را ساخته است.

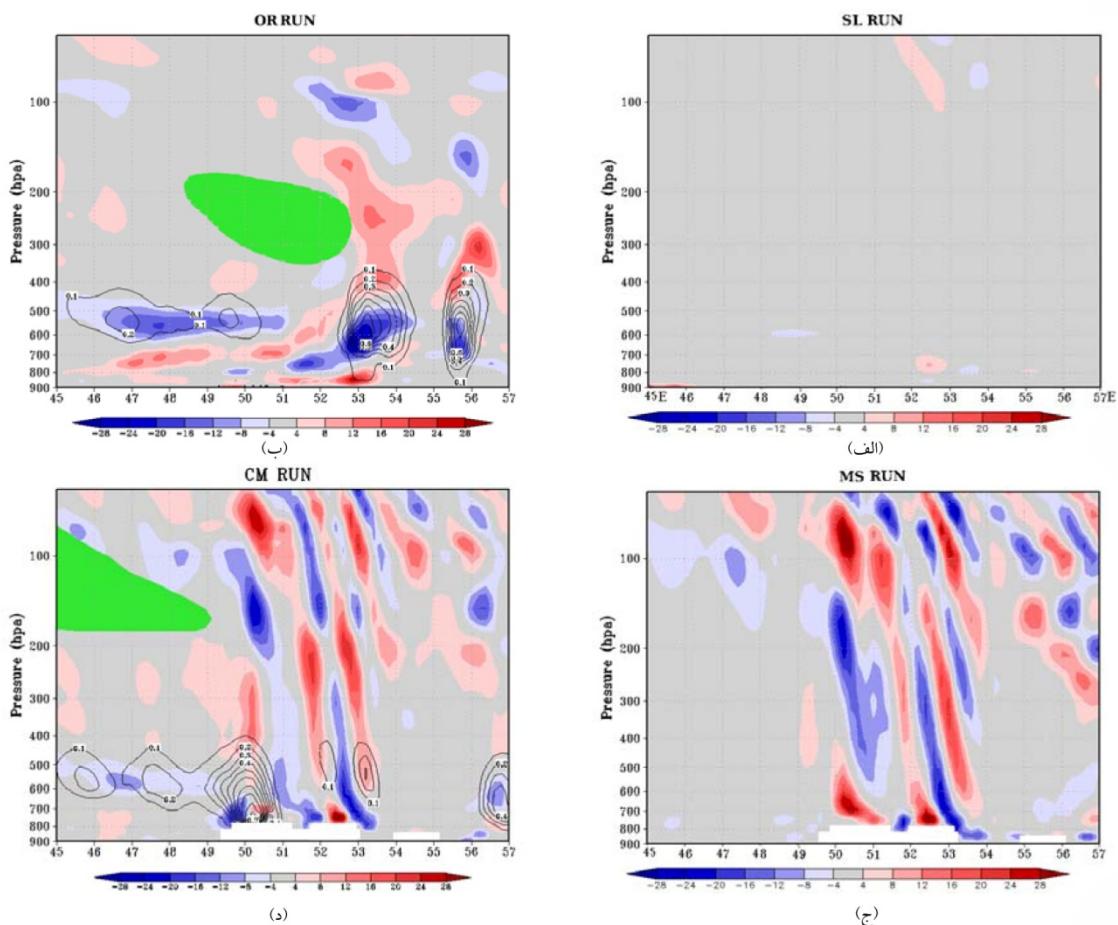
در منطقه اول، در اجرای ساده امواج بلندی در زیر و بالای جت وردسپهر زیرین در حوالی تراز ۲۵۰ hPa وجود دارند. این بدان مفهوم است که سازوکارهای همراه با جت، مسئول راهاندازی این گسیل موج هستند. افزودن رطوبت ضمن تقویت دامنه موج، ناحیه واگرایی منفردی به دور از جریان جتی را ساماندهی می‌کند که در اجرای CM به کلی حذف می‌شود. همانند آنچه برای منطقه دوم بررسی مطرح شد، سهم بزرگ برانگیزش و تأمین انرژی موج گرانی‌لختی در اجرای OR مشخص شده است و به کوهستان‌های فلات ایران اختصاص می‌یابد. فاز موج ضمن پیروی از جریان جتی وردسپهر زیرین، به شدت تحت تاثیر امواج کوهستان قرار می‌گیرد و تنظیم می‌شود. حضور همزمان همه عوامل در شکل ۱۱-د باز هم به نقش انکارناپذیر عامل کوهساری اشاره دارد. همرفت عمیق درست در جلوی کوهستان و زیر ناحیه جریان نامتوازن شکل می‌گیرد و نسبت به حالت MS شدت بیشتری دارد.

#### ۵-۴ تفکیک چشمھهای انرژی

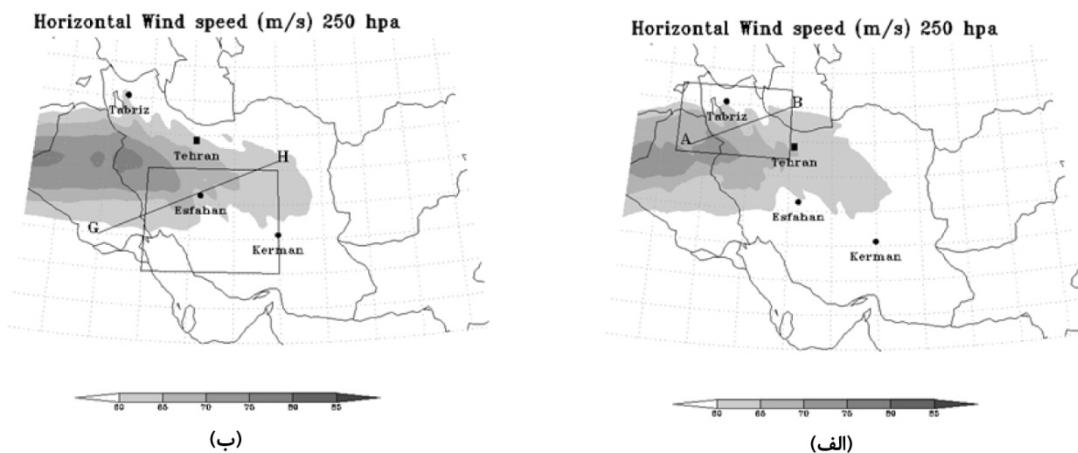
بهمنظر بررسی عملکرد هریک از چشمھهای انرژی شامل جریان جتی وردسپهر زیرین، کوهساری و همرفت مرطوب موجود در منطقه، برای تولید موج گرانی‌لختی مشاهده شده، این چشمھهای انرژی با تغییر در فیزیک مدل، در چهار اجرا از یکدیگر جدا شدند (جدول ۲). در شکل ۱۰ برش‌های قائم واگرایی برای ساعت ۱۲UTC روز ۸ فوریه در امتداد خط GH (شکل ۹) در منطقه دوم بررسی آورده شده است. در این تصاویر نقش مؤثر عامل کوهساری در رخداد موج گرانی‌لختی حاضر به وضوح آشکار است. در اجرای SL (شکل ۱۰-الف) در امتداد خط مورب پیش گفته، هیچ فعالیت موجی مشاهده نمی‌شود که در مقایسه با شکل‌های ۱۰-ج و ۱۰-د، پیش از حذف رشته‌کوههای زاگرس، بسیار قابل توجه است. افزوده شدن رطوبت، دو محل همرفت عمیق در طول جغرافیایی ۵۳° و ۵۵/۵ را آشکار می‌کند. دامنه این دو رخداد فقط به وردسپهر محدود نمی‌شوند و تا ترازهای پوشن‌سپهر زیرین نیز راه می‌یابند. ناحیه همگرایی شدید در مرکز منطقه همرفت و ناحیه واگرایی که تا حوالی وردایست گسترده شده، آشکار است. اجرای MS نیز در جایگاه خود قابل توجه است؛ از آنجاکه در غیاب کوهساری هیچ موجی مشاهده نشد، می‌توان در این حالت

جدول ۲. شرایط فیزیکی چهار اجرای مدل.

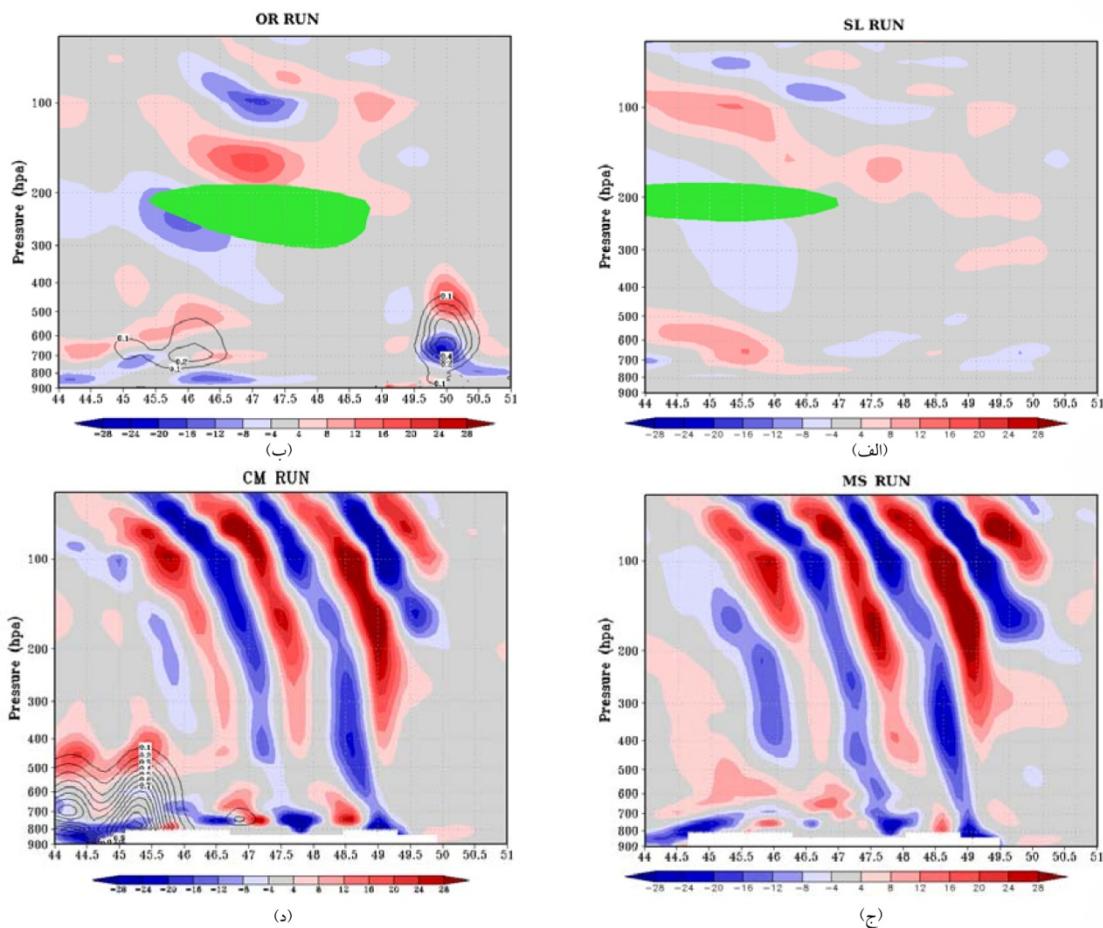
Fake Dry	کومهای	کوهساری	شناسه	عنوان اجرا
خیر	بله	بله	CM (complex)	ترکیبی
بله	خیر	بله	MS (without moisture)	بدون رطوبت
خیر	بله	خیر	OR (without orography)	بدون کوهساری
بله	خیر	خیر	SM (simple)	بدون رطوبت و کوهساری



شکل ۹. برش قائم میدان واگرایی افقی (با فاصله  $10^{\circ} \text{ s}^{-1}$ ) در امتداد خط مورب GH شکل ۹ برای ساعت ۱۲UTC روز ۸ فوریه در (الف) اجرای SL (ب) اجرای OR، (ج) اجرای CM، (د) اجرای MS. رنگ سرخ و آبی به ترتیب مقادیر مثبت و منفی واگرایی، رنگ سبز مقادیر بزرگتر از ۱۵ عدد راسی لاغرانی در عرض جریان و پریندهای سیاه رنگ نسبت آمیختگی بارش ( $10^{\circ} \text{ g/kg}$ ) را نشان می‌دهند.



شکل ۱۰. جریان جت (سایه‌روشن با بازه پریندی  $5 \text{ m s}^{-1}$ ) در تراز ۲۵۰ hPa در ساعت (الف) CM، در ۱۲UTC و (ب) ۰۰UTC روز ۸ فوریه.



شکل ۱۱. همانند شکل ۱۰ برای ساعت ۱۰۰۰ UTC، روز ۸ فوریه در امتداد خط AB شکل ۹.

کمرنگ بارشی، ممکن است بارش را تقویت کند که به خوبی می‌توان اثر آن را با تغییر فیزیک مسئله در اجرای مدل دید. با این حال باید در نظر داشت که ویژگی‌های موج، تحت تأثیر پخش عددی و تفکیک مدل قرار دارد. به منظور سهولت در بررسی، ناحیه مورد نظر به سه منطقه شاخص با بیشترین فعالیت موجی دسته‌بندی شد. منطقه اول واقع در شمال غربی کشور که شدیدترین فعالیت موجی را شامل می‌شود در مجاورت سرعت‌های بیشینه جت عرض‌های میانی قرار دارد. اگرچه دامنه موجی که در این ناحیه مشاهده شد از سایر نواحی بیشتر است اما چون از نظر همایدی امکان بارش ندارد، بهره چندانی از

## ۵ نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تولید و انتشار امواج گرانی‌لختی روى ایران با استفاده از شبیه‌سازی واقعی مورد بررسی قرار گرفت. در شبیه‌سازی، از میدان واگرایی افقی در حکم کمیت اصلی برای برآورد ویژگی‌های موج نظیر طول موج قائم و افقی، بسامد و دوره ذاتی، سرعت فاز و مولفه قائم سرعت گروه استفاده شد. از آنجا که در این کمیت، واگرایی جریان زمینه صفر است به سادگی می‌توان با استفاده از آن به همراه میدان سرعت قائم، امواج گرانی‌لختی را مورد بررسی قرار داد. حضور موج گرانی پریشیدگی‌هایی در میدان فشار ایجاد می‌کند و تقارن آن با

در واقعیت وجود همه عوامل در کنار یکدیگر برای توضیح فرایند تولید و انتشار امواج گرانی‌لختی لازم است.

#### مراجع

- Alexander, M. J. and Holton, J. R., 2004, On the spectrum of vertically propagating gravity waves generated by a transient heat source, *Atmos. Chem. Phys.*, **4**, 923-932.
- Bosart, L. F., Bracken, W. E. and Seimon, A., 1998, A study of cyclone mesoscale structure with emphasis on a large-amplitude inertia-gravity wave, *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 1497-1527.
- Choi, Y. G., Lee, S. C., McDonald, A. J. and Hooper, D. A., 2005, Wind-profiler observations of gravity waves produced by convection at mid-latitudes, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, **5**, 11029-11054.
- Dhaka, S. K., Bhatnagar, R., Shibagaki, Y., Hashiguchi, H., Fukao, S., Kozu, T. and Panwar, V., 2011, Gravity waves generated in a convective and a non-convective environment, *Ann. Geophys.*, **29**, 2259-2276.
- Fritts, D. and Alexander, M. J., 2003, Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere, *Rev. Geophys.*, **41**, 1003, doi: 10.1029/2001RG000106.
- Klemp, J. B., Dudhia, J. and Hassiotis, A. D., 2008, An upper gravity-wave absorbing layer for NWP applications, *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 3987-4004.
- Koch, S. E. and Dorian, P. B., 1988, A mesoscale gravity wave event observed during CCOPE. Part III: Wave environment and probable source mechanisms, *Mon. Wea. Rev.*, **116**, 2570-2592.
- Plougonven, R., Arsac, A., Hertzog, H., Guez, L. and Vial, F., 2010, Sensitivity study for mesoscale simulations of gravity waves above Antarctica during Vorcore, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **136**, 1371-1377.
- Plougonven, R., Teitelbaum, H. and Zeitlin, V., 2003, Inertia-gravity wave generation by the tropospheric midlatitude jet as given by the Fronts and Atlantic Storm-Track Experiment radio soundings, *J. Geophys. Res.*, **108**, 4686, doi: 10.1029/2003GL017716.
- Uccellini, L. W. and Koch, S. E., 1987, The synoptic setting and possible source mechanisms for mesoscale gravity wave events, *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 721-729.
- Wu, D. L. and Jiang, J. H., 2002, MLS

آن نمی‌گیرد. امواج در راستای افقی با پیروی از وضعیت کوهساری در جهتی به تقریب عمود بر آن (در راستای جنوب‌غرب-شمال‌شرق) منتشر می‌شود.

در منطقه دوم، شامل زاگرس مرکزی و جنوبی، جهت‌گیری انتشار امواج همانند منطقه اول تحت تاثیر رشته کوه‌های زاگرس در جهت شمال غربی است. امواج در این منطقه که در ناحیه نامتوازن جریان جت قرار دارد با اندکی تأخیر نسبت به منطقه اول شروع به انتشار می‌کند. دامنه امواج در اینجا ضعیفتر و فاز امواج بلندتر است. منطقه سوم نیز در محل تلاقی دو رشته کوه البرز و زاگرس، در ناحیه خروجی جریان جت و در امتداد کمربند بارشی با پوشش مناسبی از ابر قرار دارد. اگرچه امواج مشاهده در این ناحیه از دو منطقه دیگر ضعیفتر است اما بهره بیشتری از نتایج حضور آن دیده می‌شود.

برآورد ویژگی‌های امواج گرانی‌لختی به وضوح نشان داد که در مورد بررسی شده، موجی با بسامد زیاد مشاهده شده و اثر شناوری بر اثر چرخش در تولید آن، غالب است. ابعاد این امواج می‌تواند اشاره‌ای بر تغییر‌شکل امواج تولید شده از سازوکارهای جت‌جهه بر اثر وجود کوهستان باشد. بهمنظور بررسی اثر هریک از چشمه‌های انرژی حاضر در منطقه، ۴ اجرای مدل WRF با فیزیک متفاوت مسئله تعریف شد. در اجرای بدون رطوبت و کوهساری، در منطقه اول امواج‌های بلندی مشاهده شد که در وردسپهر به سمت پایین و در پوشن‌سپهر به سمت بالا، حامل انرژی بودند. رهاسازی همرفت عمیق با امواج پایین‌سوی منتشر شده از جت تسهیل می‌شود و بازخورد مثبت آن روی چرخه جریان جتی است، اما نمی‌توان گفت که به طور مستقیم در راهاندازی امواج نقش دارد، زیرا امواج اولیه در اجرای بدون رطوبت نیز با قوت قابل توجهی ظاهر شده است. اگرچه افروده شدن کوهستان به فیزیک اجرای مدل، ویژگی‌های امواج از شدت تا دامنه و جهت انتشار را تحت تاثیر قرار می‌دهد،

- Sci., **63**(12), 3253-3276.
- Zülicke, C. and Peters, D. H. W., 2007, Impact of upper-level jet-generated inertia-gravity waves on surface wind and precipitation, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, **7**, 15873-15909.
- Zülicke, C. and Peters, D. H. W., 2008, Parameterization of strong stratospheric inertia-gravity waves forced by poleward breaking Rossby waves, *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 98-119.
- observations of atmospheric gravity waves above Antarctica, *J. Geophys. Res.*, **107**, 4773, DOI: 10.1029/2002JD002, 390.
- Zhang, F. and Koch, S., 2000, Numerical simulations of a gravity wave event over CCOPE, Part II: Waves generated by an orographic density current, *Mon. Wea. Rev.*, **128**(8, Part 1), 2777-2796.
- Zülicke, C. and Peters, D. H. W., 2006, Simulation of inertia-gravity waves in a poleward breaking Rossby wave, *J. Atmos.*