

عدم قطعیت در تعیین امواج گرانی‌لختی در یک بررسی موردی روی ایران

مژگان امیرامجدی^۱، علیرضا محب‌الحجه^۱ و محمد میرزائی^{۱*}

^۱مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۵/۱۳، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۰/۸)

چکیده

از روش‌های مرسوم برای به‌دست آوردن ویژگی‌های موج گرانی‌لختی رسم شتاب‌نگار و رسم میدان واگرایی افقی است. در این پژوهش، عدم قطعیت‌ها در کاربست این دو روش برای برآورد ویژگی‌های موج گرانی‌لختی مشاهده شده در طی یک مطالعه موردی روی ایران بررسی می‌شود. داده‌های موردنیاز برای اجرای روش شتاب‌نگار، اطلاعات به‌دست آمده از رادیوگمانه‌های پرتاب شده از چهار ایستگاه جوّ بالای کشور در تاریخ ۷ تا ۹ فوریه ۲۰۱۲، به دنبال مشاهده نشانه‌هایی از فعالیت موج گرانی‌لختی هستند. نمایه‌های قائم باد مداری و نصف‌النهاری و شتاب‌نگار مربوط به آن در قسمتی از نمایه که بیشترین فعالیت موجی وجود داشت، رسم شد و نتایج با مقادیر برآورد شده از رسم میدان واگرایی افقی با استفاده از برونداد اجرای مدل میان‌مقیاس WRF، مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که اگرچه مقادیر برآورد شده از خروجی مدل تحت‌تأثیر پخش و تفکیک مدل کمتر از مشاهدات هستند، با تفکیک متوسط مدل، رسم میدان واگرایی افقی به‌منزله کمیت اصلی برای برآورد ویژگی‌های موج به‌طور رضایت‌بخشی عمل می‌کند. شتاب‌نگار در برآورد ویژگی‌های کیفی موج عملکرد قابل‌قبولی دارد، اما عدم قطعیت زیادی در برآورد ویژگی‌های کمی موج ظاهر می‌شود. همچنین مشخص شد که روش شتاب‌نگار، تنها امواجی با بسامد کم را آشکارسازی می‌کند و از برآورد ویژگی موج گرانی‌لختی با اثر غالب شناوری که به‌طور عمده بسامد زیادی دارد ناتوان است.

واژه‌های کلیدی: امواج گرانی‌لختی، روش شتاب‌نگار، رادیوگمانه، شبیه‌سازی عددی، میدان واگرایی افقی

Uncertainties in the determination of inertia–gravity waves in a case study over Iran

Mozhgan AmirAmjadi¹, Ali Reza Mohebalhojeh¹ and Mohammad Mirzaei^{1*}

¹Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 4 August 2013, accepted: 29 December 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, abbreviated as IGWs, hereafter. Typically, the phase speeds of IGWs are 15 to 35 ms⁻¹, their vertical wavelengths are 500 m to 15 km and their horizontal wavelengths are 50 to 1000 km.

*Corresponding author:

mirzaeim@ut.ac.ir

*نگارنده رابط:

This study is concerned with uncertainties in two common methods to study IGWs: the hodograph method and the method that uses the horizontal divergence field to estimate the wave characteristics. To this end, a noticeable IGW event that occurred during 7 to 9 February 2012 over Iran was investigated. This event was accompanied by the passage of a synoptic system and a noticeable amount of precipitation.

Moreover, this IGW event was simulated with the Weather Research and Forecasting (WRF) mesoscale model using the NCEP FNL (final analyses) data for 72 hours, from 12UTC 6 February until 12UTC 9 February. The setup of the model included a horizontal resolution of 25km, 35 levels in the vertical direction with a model top of 10 hPa (~30 km) and a time step of 150 s.

The wave properties such as wave frequency and period, intrinsic phase speed, group velocity and horizontal and vertical wavelengths obtained based on the horizontal divergence field as the main determining quantity were investigated. This is possible, because the procedure avoids an explicit treatment of the background field, which has a zero divergence, and is applicable to waves of an arbitrary wavelength.

Observational data were obtained from radio soundings launched from four upper-air stations on the above dates. Previous studies have shown that the presence of IGWs leads to perturbations in temperature and wind fields. Therefore, IGWs structures can be identified by the fluctuations which are obtained after subtracting the background flow. The preliminary analysis of the observational data gives a typical vertical wavelength of 0.5-6 km. Subtraction is performed either by fitting a polynomial of sixth degree or applying a high-pass filter to suppress perturbations with scales larger than 6 km.

Vertical wind and temperature profiles obtained from the observational data as well as a numerical simulation were plotted and compared against each other at the same time and the same location. The results showed that the simulated data were smoother and more homogeneous than the observed data, because the IGW amplitude was damped by the explicit and implicit diffusion of the numerical model. Nevertheless, with a medium resolution, the wave characteristics estimated from the horizontal divergence field were satisfactory. An estimation of the wave properties showed that a high-frequency wave with $\omega/f > 5$ was emitted in this case. The quantity ω/f was an estimate for the wave frequency scaled by the inertial frequency.

For the observed data, hodographs were plotted for that part of stratospheric and tropospheric wind profiles with maximum wave activity. This method had an acceptable performance in the assessment of the qualitative features of the wave. However, a great uncertainty appeared in the quantitative characteristics of the observed IGWs. Uncertainties are greater when a polynomial fitting was used in separating perturbation from the mean field, as it sometimes created overshoots. On the other hand, filters often damped the wave amplitudes. In addition to the sensitivity of the background removal, some of the information was out of reach because of the superposition of either multiple waves or a wave packet with its reflection as shown by Zhang et al. (2004).

Intrinsic frequencies determined by this method were typically close to the Coriolis frequency. This study, like other previous studies (Plogounven et al., 2003; Zhang et al., 2004; Guest et al., 2000; Lue and Kuo, 2012) suggests that the nature of the hodograph method is only able to detect the low-frequency part of the IGW spectra. Considering the limitations and uncertainties of the hodograph method, it should be used in conjunction with other methods such as those based on the horizontal divergence field, Stokes parameters and radar observations.

Keywords: Inertia-gravity waves, hodograph method, radio sound, numerical simulation, horizontal divergence

۱ مقدمه

تحقیقات نشان داده است که امواج گرانی لختی پریشیدگی‌هایی در میدان‌های هواشناختی باد، دما و فشار ایجاد می‌کنند که این پریشیدگی‌ها می‌توانند به خوبی ویژگی‌های موج مربوط را مشخص کنند (پلوگونون و همکاران، ۲۰۰۳؛ ژنگ و همکاران، ۲۰۰۴؛ زولیک و پترس، ۲۰۰۶). این امواج که به طور نوعی با طول موج قائم ۱ تا ۱۵ کیلومتر، طول موج افقی ۵۰ تا ۱۰۰۰ کیلومتر و تندی فاز ذاتی ۱۵ تا ۳۵ متر بر ثانیه در جو سیر می‌کنند، از راه واداشت دینامیکی بر گردش کلی جو اثر می‌گذارند و انتقال قائم و افقی جرم، تکانه و انرژی از نتایج انتشار امواج گرانی لختی است. در نواحی‌ای که بارندگی در منطقه‌ای گسترده رخ می‌دهد، در اثر حضور این امواج کمربندهای پربارش به صورت بارش سنگین برف و باران می‌تواند تشکیل شود (بوزارت و همکاران، ۱۹۹۸). در مناطق غیراشباع، امواج گرانی لختی با دامنه و انرژی مناسب می‌توانند بسته هوا را تا حد اشباع یا حتی تراز همرفت آزاد (اگر وجود داشته باشد) حرکت دهند و بدین ترتیب همرفت را راه‌اندازی و ساماندهی کنند. چشمه اصلی انرژی موج گرانی لختی کوه‌ها هستند و نواحی دارای همرفت عمیق، سازوکارهای مرتبط با جبهه و جت و گسیل تنظیم خودبه‌خودی به منزله چشمه‌های غیرکوهستانی این امواج شناخته می‌شوند.

از جمله هدف‌های مهم در بررسی این امواج، پارامتری کردن آنها در مدل‌های گردش کلی است، زیرا با توجه به ابعادشان، در سطح میان‌مقیاس و زیرشبکه‌ای دسته‌بندی می‌شوند. با این هدف و با توجه به ابزار پژوهش، بررسی‌های صورت گرفته در این زمینه را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد: اول، تحقیقاتی بر پایه داده‌های مشاهداتی و دوم، شبیه‌سازی عددی با شرایط اولیه واقعی و آرمانی. در این پژوهش‌ها چشمه‌های انرژی موج شناسایی و مورد بررسی قرار می‌گیرند، ارتباط و

برهم‌کنش آنها مشخص می‌شود و پس از برآورد توان هرکدام در تولید موج گرانی لختی، در مدل‌های گردش کلی پارامتری می‌شوند.

یوسیلینی و کاک (۱۹۸۷) در یک تحقیق هم‌دیدگی، با بررسی ۱۳ بررسی موردی صورت گرفته، الگوی هم‌دیدگی مناسب برای آشکارسازی موج گرانی لختی را عرضه کردند. این نتیجه‌گیری که تاکنون با مشاهدات بسیاری تأیید شده است، بیان می‌دارد که وجود هم‌زمان پشته تراز ۳۰۰ یا ۵۰۰ هکتوپاسکال، جریان جتی تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال، مرکز کم‌فشار و جبهه سطح زمین، نشان‌دهنده احتمال حضور امواج گرانی لختی است.

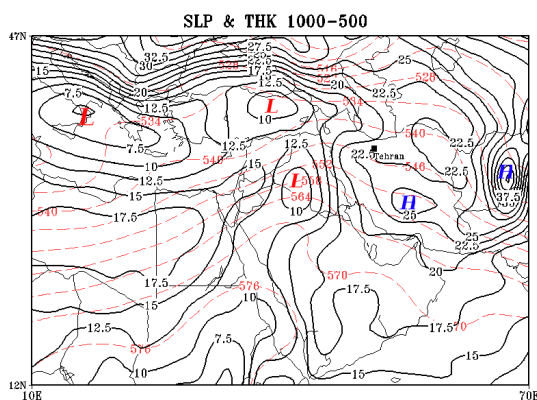
از نخستین تحقیقاتی که به منظور پارامتری کردن جبهه و جت در حکم چشمه انرژی امواج گرانی لختی صورت گرفته است، به پژوهش شارون و مانزینی (۲۰۰۲) می‌توان اشاره کرد که به صورت کیفی عملی شده است. این در حالی است که هنوز دانش کمی از سازوکار تولید امواج گرانی ناشی از جبهه و جت اندک است (پلوگونون و ژنگ، ۲۰۰۷).

با استفاده از مشاهدات زمینی، جهت‌یاب رادیویی (Rawinsonde)، تصویربرداری با ماهواره، رادار و ابزارهای دیگر، پدیده موج گرانی که در دو مرحله شکل گرفته بود از سوی کاک و دورین (۱۹۸۸) و ژنگ و کاک (۲۰۰۰) مورد بررسی قرار گرفت. وضعیت جو مرحله اول شامل نوارهای رگبار و مرحله دوم شامل چند توفان تندری فعال بود. کاک و دورین تنظیم زمین‌گرد و ناپایداری چینی را به منزله دو سازوکار احتمالی چشمه موج در طول مرحله دوم در نظر گرفتند و فرایندهایی در وردسپهر زیرین مرتبط با از بین رفتن سیم‌لوله کوه-دشت (Mountain-Plain solenoid) در شبیه‌سازی‌های عددی ژنگ و کاک عامل تولید امواج در مرحله اول شناخته شد.

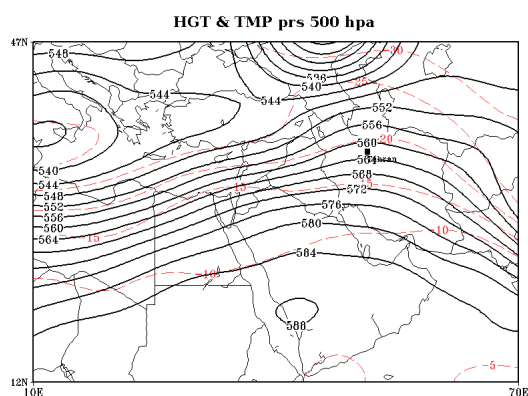
پلوگونون و همکاران (۲۰۰۳) نیز در یک تحقیق جامع با استفاده از داده‌های ۲۲۴ رادیوگمانه، با تحلیل نمایه قائم باد و با استفاده از رسم شتاب‌نگار (Hodograph)، به بررسی تولید و انتشار امواج گرانی‌لختی پرداخته و دریافتند که هم در پوشش سپهر و هم در وردسپهر، در نواحی به دور از عوارض زمینی، جریان جتی چشمه اصلی انرژی امواج گرانی‌لختی است.

با توجه به محدودیت‌هایی که در هر روش وجود دارد، محاسبه کمیت‌های مشخصه موج گرانی‌لختی از

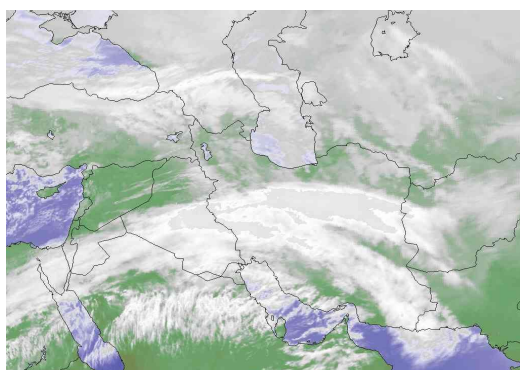
طبق فرضیه ناپایداری شرطی نوع دوم (CISK, Conditional Instability of the Second Kind)، همگرایی که موج گرانی تولید می‌کند، می‌تواند همرفت را تقویت کند، درحالی‌که گرمای نهان آزاد شده در همرفت، چشمه انرژی برای موج فراهم می‌کند. امواج مشاهده شده در حضور پدیده همرفت عمده‌تاً با طول موج قائم دو تا پنج کیلومتر و طول موج افقی ۲۰ تا ۱۰۰ کیلومتر در میان‌مقیاس β قرار می‌گیرند (داکا و همکاران، ۲۰۱۱؛ الکساندر و هولتون، ۲۰۰۴؛ چویی و همکاران، ۲۰۰۵).



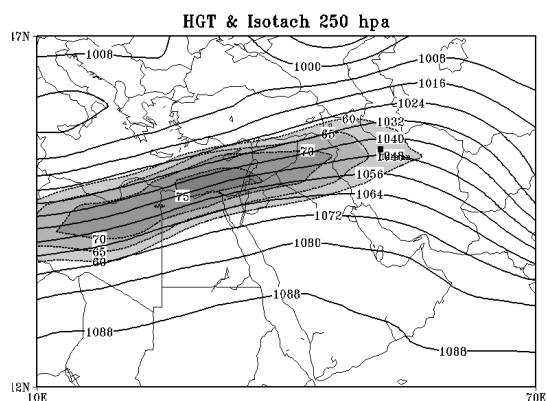
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۱. نقشه‌های GFS برای ساعت ۰۰ UTC روز ۸ فوریه ۲۰۱۲ در (الف) تراز ۵۰۰ hPa شامل ارتفاع ژئوپتانسیلی (خطوط توپر با بازه پربندی ۴ gpdm) و دما (خطوط خط‌چین با بازه پربندی ۵ درجه سلسیوس)؛ (ب) تراز فشار متوسط سطح دریا (در مقیاس ۱۰۰۰ با بازه پربندی ۵ hPa) و ضخامت ۱۰۰۰-۵۰۰ (خطوط خط‌چین با بازه پربندی ۶-۶)؛ (ج) تراز ۲۵۰ hPa شامل ارتفاع ژئوپتانسیلی (خطوط توپر با بازه پربندی ۸-۸) و سرعت افقی (سایه روشن با بازه پربندی 5 m s^{-1}) و (د) تصویر ماهواره‌ای ساعت ۳:۳۰ بامداد روز ۸ فوریه به وقت محلی.

وردسپهر بر کشور ترکمنستان و مرزهای شمال شرقی ایران و ناوه بر شمال افریقا واقع شده است. در سطح زمین، پُرفشار سیبری با فشار بیش از ۱۰۴۰ هکتوپاسکال روی کشور افغانستان، در وضعیت بسیار فعال خود قرار گرفته است و زبانه آن روی ایران و تا آب‌های اقیانوس هند و عربستان گسترش یافته است که موجب کاهش دما روی کشور ایران می‌شود و رطوبت آب‌های جنوبی را به داخل کم‌فشار سودانی منتقل و شیب فشاری برای کم‌فشار سودانی-مدیترانه‌ای مقابل را تامین می‌کند. مرکز کم‌فشاری روی جنوب اروپا و مدیترانه تشکیل شده است و زبانه هم‌فشار ۱۰۱۵ هکتوپاسکالی آن با زبانه کم‌فشار گرمایی سودانی (با خط هم‌فشار مرزی ۱۰۱۵ هکتوپاسکال) ترکیب شده است. همچنین یک جبهه ایستا روی کشور ترکیه استقرار یافته 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 سرعت باد آن از ۶۰ متر بر ثانیه نیز فراتر می‌رود و ناحیه خروجی آن بر استان‌های شمال و شمال‌غربی ایران قرار دارد. تصاویر ماهواره‌ای همان زمان نیز نوار ابر گسترده‌ای را روی ایران نشان می‌دهد که آرایش آن از موقعیت جریان جتی پیروی می‌کند (شکل ۱).

۳ تحلیل داده‌ها

۱-۳ داده‌های مشاهداتی

۱-۱-۳ پیش‌پردازش داده‌ها

تحقیقات صورت گرفته روشن ساخته است که پریشیدگی‌ای که موج گرانی لختی بر میدان‌های باد و دما ایجاد می‌کند به‌خوبی می‌تواند ویژگی‌های آن را منعکس کند. با جدا کردن جریان زمینه از نمایه‌های قائم، این پریشیدگی‌ها به‌دست می‌آیند (برای مثال، برای دما

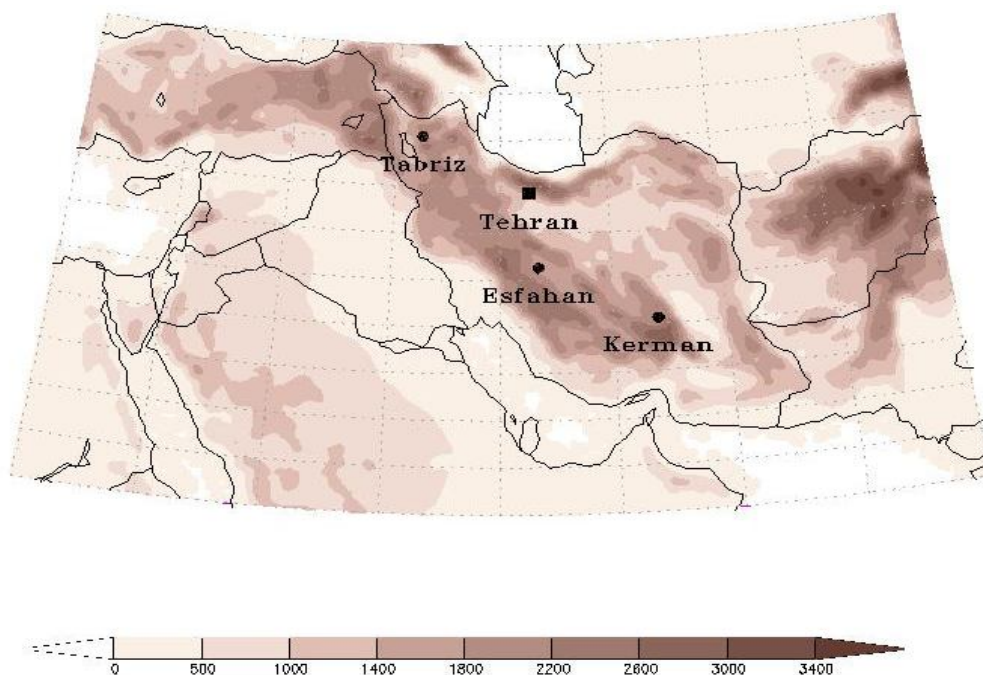
جمله بسامد، طول موج و دوره ذاتی به هر روشی با عدم قطعیتی‌هایی همراه خواهد بود. برای مثال، در پژوهش ژنگ و همکاران (۲۰۰۴)، برآورد طول موج قائم و بسامد ذاتی به روش شتاب‌نگار به انتخاب پالایند مورد استفاده برای تفکیک جریان زمینه و پریشیدگی حاصل از حضور موج گرانی در نمایه قائم بسیار حساس است و بزرگ‌ترین عدم قطعیت در کمیت طول موج افقی را آشکار می‌سازد. لَوَا و کوْا (۲۰۱۲) نیز در تأیید تحقیق ژنگ و همکاران به عدم قطعیت‌هایی در نتایج روش شتاب‌نگار به علت برهم‌نهی امواج بالاسو و پایین‌سو یا معنی‌دار بودن نتایج روش شتاب‌نگار و پارامترهای استوکس، فقط در بسامدهای کم اشاره کردند.

در این پژوهش ضمن بررسی تولید و انتشار موج گرانی لختی با استفاده از داده‌های مشاهداتی رادیوگمانه برای یک سامانه که بارش خوبی روی ایران داشته است، محدودیت‌ها و عدم قطعیت کاربست روش شتاب‌نگار در مقایسه با نتایج اجرای مدل میان‌مقیاس WRF در شبیه‌سازی عددی با داده‌های واقعی برای این رخداد مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۲ مشاهدات هم‌بندی

بررسی موردی حاضر، رخدادی را مورد تحقیق قرار می‌دهد که از ۷ تا ۹ فوریه ۲۰۱۲ (مصادف با ۱۸ تا ۲۰ بهمن ۱۳۹۰) اتفاق افتاده و در طی آن بسیاری از شهرهای کشور بارش به شکل برف و باران را تجربه کردند.

بررسی نقشه‌های هم‌بندی در این زمان نشان‌دهنده تشکیل یک مرکز کم‌ارتفاع گسترده و فعال دینامیکی در جنوب اروپا و روی کشور ایتالیا است. در نقشه تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال (نشان داده نشده)، وضعیت مرکز کم‌ارتفاع ناوه و ریزش هوای سرد و فرارفت هوای گرم و مرطوب همانند تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال دیده می‌شود که فعال بودن این مرکز کم‌ارتفاع را تایید می‌کند. پشته سطوح زیرین



شکل ۲. نمایش ۴ ایستگاه جوّ بالای کشور که داده‌های رادیوگمانه آنها مورد بررسی قرار گرفت. وضعیت کوهساری منطقه نیز به صورت سایه‌روشن (برحسب متر) نشان داده شده است.

شش؛ برای آزمایش‌های بیشتر در مورد سایر چندجمله‌ای‌ها به مقاله ژنگ و همکاران (۲۰۰۴) مراجعه شود)، همچنین استفاده از یک پالاینده پایین‌گذر (به نام OBSnKM که n حد بالای پالایه است) برای پالایش آشفستگی‌های با مقیاس بزرگ‌تر از ۶ کیلومتر صورت گرفت. این حد بالا پس از تحلیل فوریه اولیه بر داده‌های خام که نشان داد طول موج قائم به‌طور نوعی بین ۵۰۰ تا ۶۰۰۰ متر تغییر می‌کند، تعیین شد. پالاینده به کار رفته در اینجا، به‌منظور حفظ فازهای هماهنگ سیگنال، از نوع ناپیوسته است که از پنجره Kaiser استفاده می‌کند (همینگ، ۱۹۸۳). جزئیات بیشتر در مورد پالاینده و تابع گذردهی آن در مقاله اسکاوزو و همکاران (۱۹۹۸) آورده شده است.

بدیهی است که رادیوگمانه ضمن صعود، به‌طور افقی نیز دچار جابه‌جایی خواهد شد، به‌خصوص آنهایی که در نزدیکی محور جت (خط شاخصی که از بیشینه سرعت‌های جت روی یک سطح هم‌فشار رسم می‌شود) پرتاب می‌شوند. اما این فرارفت چندان اهمیت ندارد زیرا

به‌صورت $T = T_0 + T'$ و به‌همین ترتیب بر سایر متغیرها قابل اعمال است). برای این منظور، می‌توان از انطباق یک چندجمله‌ای بر نمایه قائم استفاده کرد. جریان زمینه با کاربست یک پالایه میان‌گذر نیز قابل حذف است. در این روش ابتدا با استفاده از تبدیل فوریه طول موج‌های قائم غالب در نمایه شناسایی و پس از آن، پالایه عبور آشفستگی‌های گرانی‌لختی و حذف جریان زمینه و نوفه‌ها به کار گرفته می‌شود.

به‌منظور بررسی مشاهداتی موج گرانی‌لختی، از داده‌های رادیوگمانه چهار ایستگاه جوّ بالای کشور (شکل ۲) که در طی رویداد پیش‌گفته پرتاب شده‌اند، استفاده شد (جدول ۱). فرایند آماده‌سازی داده‌ها با درونیابی نمایه باد و دمای به‌دست آمده آغاز شد تا نقاط فواصل ارتفاعی مساوی ۱۰ متر داشته باشند. این درونیابی با روش اسپلاین صورت گرفت و گام ارتفاعی با توجه به مقادیر اولیه ثبت شده با رادیوگمانه‌ها انتخاب شد. حذف جریان زمینه نیز با کاربست یک چندجمله‌ای درجه شش بر نمایه قائم باد و دما (به نام OBS6POL برای چندجمله‌ای درجه

که شرط دوم را برآورده می‌کند، نمایه‌های قائم سرعت تحلیل شده‌اند.

۳-۱-۲ رسم شتاب‌نگار

روش شتاب‌نگار بر پایه فرضیه خطی امواج گرانی لختی در یک شماره در حال سکون و یا در یک شارش یکنواخت عرضه می‌شود. در اجرای این روش، پس از جداسازی جریان زمینه از نمایه قائم باد مداری و نصف‌النهاری، شتاب‌نگار پریشیدگی بادها برای یک بخش از نمایه (مثلاً) بخش وردسپهری یا پوشن‌سپهری و یا قسمت خاصی از هر کدام) رسم می‌شود. با نگاهی اجمالی بر شکل حاصل می‌توان ویژگی‌های محیط انتشار موج را به راحتی دریافت. در نگاه اول، شتاب‌نگار وضعیت چینش قائم باد (چگونگی تغییرات باد با ارتفاع) را نمایش می‌دهد. برای دو نقطه مشخص روی نمایه قائم، یک شتاب‌نگار با خط سیر طولانی، نشانی از چینش قائم شدید باد است. همچنین با توجه به وضعیت تغییر شتاب‌نگار با ارتفاع، می‌توان جهت انتشار انرژی موج و در نتیجه محل منبع انرژی را برآورد کرد. به گونه‌ای که وقتی تغییر جهت باد با افزایش ارتفاع پس‌گرد (backing) است، فرارفت هوای سرد و فروود دینامیکی برقرار است و انرژی پایین سو منتشر و

عمدتاً میزان تغییر کمیت‌های مورد علاقه برای بررسی در طول این جابه‌جایی در راستای افقی کمتر از راستای قائم است. علاوه بر این، رادیوگمانه در حین صعود به‌طور موازی با محور جت (در امتداد جریان) حرکت می‌کند و همواره فاصله خود را تا محور جت حفظ می‌کند. این مسئله را پلوگونون و همکاران (۲۰۰۳) با ره‌گیری فاصله افقی پرتابه تا محور جت در زمان پرتاب و آخرین لحظه مخابره اطلاعات بررسی کرده و نشان دادند که میزان جابه‌جایی تا محور جت در وردسپهر زبرین و پوشن‌سپهر زیرین کمتر از ۱۵ کیلومتر (کمتر از ۱۰٪) بوده است. در برآورد ویژگی‌های موج، این نکته که رادیوگمانه نمایه قائم لحظه‌ای را فراهم نمی‌آورد نیز می‌تواند چالش برانگیز باشد. با این حال، تحلیل نمایه قائم باد را با در نظر گرفتن برقراری دو شرط زیر می‌توان توجیه کرد: اگر جابه‌جایی افقی نسبت به طول موج افقی کوچک باشد؛ و چنانچه زمان صعود دستگاه در طی یک موج قائم از دوره ذاتی موج کوچک‌تر باشد (گست و همکاران، ۲۰۰۰). در اینجا به علت در دسترس نبودن اطلاعاتی در مورد جابه‌جایی افقی با فرض بر قرار بودن شرط اول، همچنین با دانستن سرعت متوسط صعود رادیوگمانه (حدود ۵/۵ متر بر ثانیه)

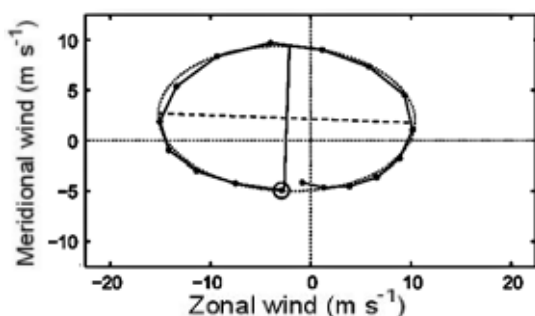
جدول ۱. زمان و مکان پرتاب رادیوگمانه‌ها. طول و عرض جغرافیایی برحسب درجه هستند.

شماره گمانه‌زن	محل پرتاب	روز	ساعت پرتاب (UTC)	ارتفاع ایستگاه (m)	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
۱	تبریز	۶	۲۳:۳۷	۱۳۶۴	+۴۶.۲۴	+۳۸.۱۲
۲	تبریز	۷	۲۳:۳۴	۱۳۶۴	+۴۶.۲۴	+۳۸.۱۲
۳	تبریز	۸	۲۳:۳۹	۱۳۶۴	+۴۶.۲۴	+۳۸.۱۲
۴	تهران	۷	۲۳:۴۲	۱۱۹۱	+۵۱.۳۰	+۳۵.۶۹
۵	تهران	۸	۱۱:۱۵	۱۱۹۱	+۵۱.۳۰	+۳۵.۶۹
۶	اصفهان	۷	۱۲:۰۲	۱۵۵۰	+۵۱.۷۱	+۳۲.۵۲
۷	اصفهان	۸	۱۱:۵۶	۱۵۵۰	+۵۱.۷۱	+۳۲.۵۲
۸	اصفهان	۹	۱۲:۰۰	۱۵۵۰	+۵۱.۷۱	+۳۲.۵۲
۹	کرمان	۷	۱۱:۳۹	۱۷۵۳	+۵۶.۹۶	+۳۰.۲۵
۱۰	کرمان	۸	۱۱:۵۱	۱۷۵۳	+۵۶.۹۶	+۳۰.۲۵
۱۱	کرمان	۹	۱۱:۴۴	۱۷۵۳	+۵۶.۹۶	+۳۰.۲۵

۲-۳ شبیه‌سازی عددی

در این تحقیق، شبیه‌سازی واقعی امواج گرانی‌لختی روی ایران، به کمک مدل میان‌مقیاس WRF صورت گرفته است. شرایط اجرای مدل شامل تفکیک افقی ۲۵ km، بالاترین تراز فشاری برابر با ۱۰hPa، ۳۵ تراز قائم و گام زمانی ۱۵۰s است. مدل برای مدت ۷۲ ساعت از ۱۲UTC روز ششم فوریه ۲۰۱۲ تا ساعت ۱۲UTC روز نهم فوریه و با کمک داده‌های FNL (NCEP Final Analyses) با تفکیک افقی یک درجه اجرا شده است (امیرامجدی و همکاران، ۱۳۹۲).

برای برآورد ویژگی‌های موج، واگرایی افقی میدان باد به دست آمده از مدل‌سازی محاسبه می‌شود. استفاده از این روش دارای دو مزیت عمده است: (۱) واگرایی جریان زمینه صفر است و نیازی به استفاده از پالاینده برای حذف جریان بزرگ‌مقیاس زمینه برای آشکارسازی پدیده میان‌مقیاس نیست. (۲) طول موج افقی را می‌توان همچون طول موج قائم به‌طور مستقیم از داده‌ها استخراج کرد. بدین ترتیب، با داشتن طول موج قائم و افقی، بسامد از رابطه پاشندگی و تندی فاز ذاتی و سرعت گروه از روابط (۳) و (۴) به دست می‌آیند.



شکل ۳. شتاب‌نگار و بیضی منطبق شده بر آن. فاصله ارتفاعی متناظر هر دو نقطه روی شتاب‌نگار ۳۱۴ متر است (ژنگ و همکاران، ۲۰۰۴).

می‌شود، برعکس وقتی تغییر جهت بردار باد با افزایش ارتفاع پیش‌گرد (veering) است، فرارفت هوای گرم و صعود دینامیکی برقرار است و انرژی بالاسو منتشر می‌شود (اندروز و همکاران، ۱۹۸۷؛ پلوگونون و همکاران، ۲۰۰۳). از راه انطباق یک بیضی روی شتاب‌نگار، خصوصیات کمی موج به این صورت استخراج می‌شود (ژنگ و همکاران، ۲۰۰۴): جهت‌گیری محور بزرگ ϕ ، جهت انتشار موج را نشان می‌دهد و از نسبت بین محور بزرگ و کوچک بیضی (AB) مطابق رابطه زیر برای تعیین بسامد ذاتی استفاده می‌شود:

$$\frac{\omega}{f} = AB, \quad (1)$$

که f بسامد کوریولیس است. طول موج قائم دو برابر فاصله ارتفاعی بین دو انتهای محور کوچک بیضی است (شکل ۳). طول موج قائم λ_z را همچنین می‌توان به‌طور مستقیم از فاصله دو بیشینه یا دو کمینه نمایه قائم پریشیدگی باد برآورد کرد. با توجه به اینکه مقیاس افقی این امواج نسبت به مقیاس قائم آنها خیلی بزرگ‌تر است، با تقریب خوبی توازن آب‌ایستایی (هیدروستاتیک) برای آنها برقرار است و با داشتن این دو مقدار معلوم و با استفاده از رابطه پاشندگی برای امواج گرانی‌لختی آب‌ایستایی طول موج افقی λ_h به شکل زیر استخراج می‌شود:

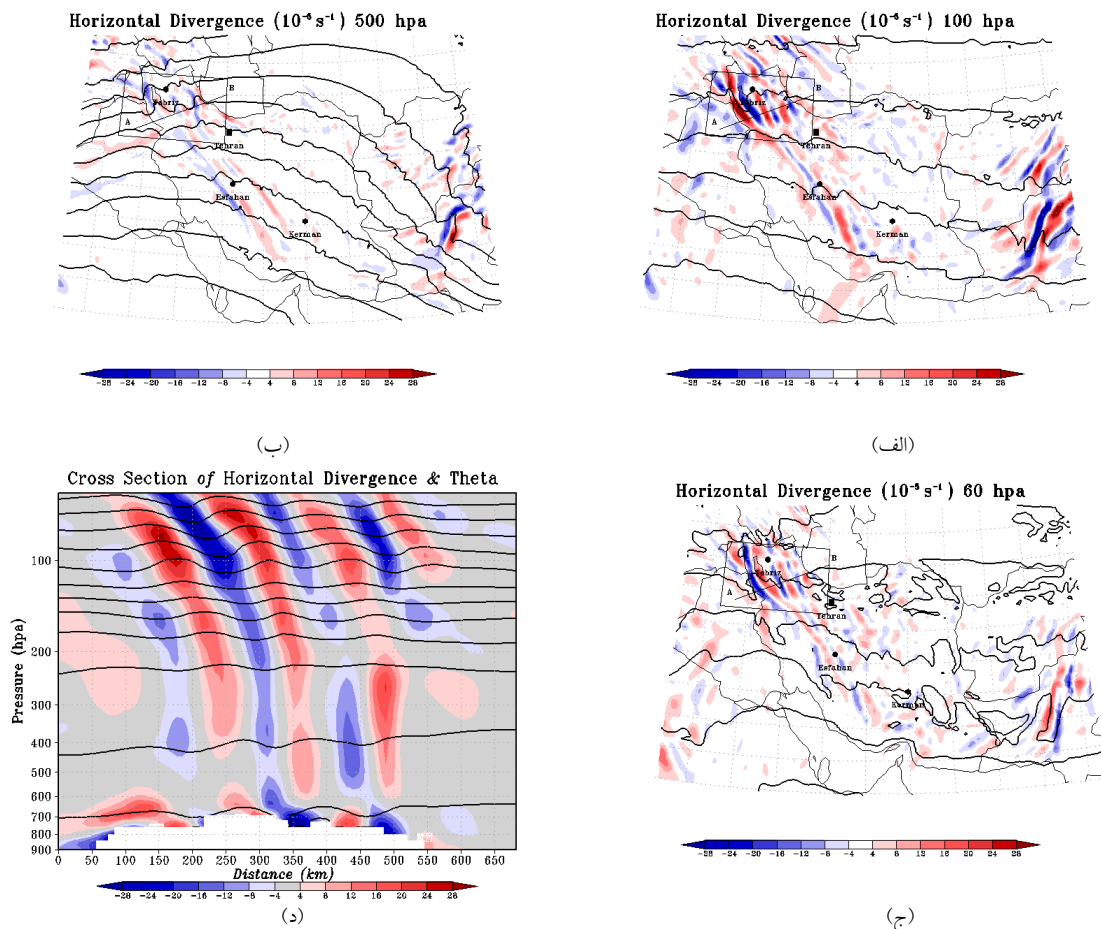
$$\lambda_h = \lambda_z \frac{N}{\sqrt{\omega^2 - f^2}}, \quad (2)$$

که N بسامد شناوری است. تندی فاز ذاتی افقی و سرعت گروه در راستای قائم نیز به شکل زیر خواهند بود:

$$c_h = \frac{\omega}{k_h}, \quad (3)$$

$$c_{g,z} = -N^2 \frac{k_h^2}{\omega k_z^3}, \quad (4)$$

که k_z و k_h به ترتیب عدد موج در راستای افقی و قائم است.



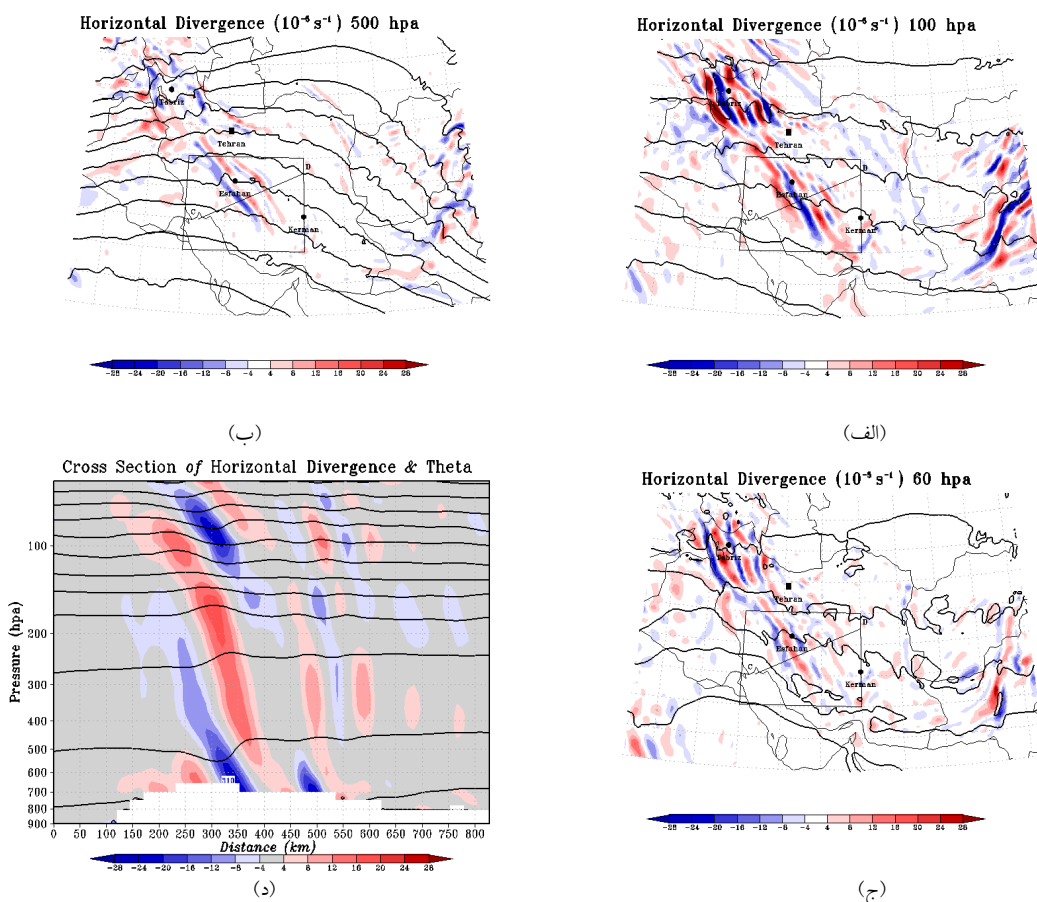
شکل ۳. نقشه‌های میدان واگرایی افقی برای تولید و انتشار موج در منطقه سوم در ۲۰ UTC روز ۷ فوریه ۲۰۱۲. (الف) میدان واگرایی و ارتفاع ژئوپتانسیلی (با فاصله ۸۰ gpm) در تراز ۱۰۰ hPa، (ب) میدان واگرایی و ارتفاع ژئوپتانسیلی (با فاصله ۴۰ gpm) در تراز ۵۰۰ hPa، (ج) میدان واگرایی در تراز ۶۰ hPa (خط AB روی همه شکل‌های فوق محل ترسیم برش قائم را نشان می‌دهد) و (و) برش قائم دمای پتانسیلی (خطوط توپر با فاصله ۱۵ K) به همراه میدان واگرایی در امتداد خط مورب AB (محور قائم فشار برحسب hPa و محور افقی فاصله برحسب km است و نواحی با رنگ سرخ و آبی (با فاصله $4 \times 10^{-2} s^{-1}$) در شکل‌ها به ترتیب مقدارهای مثبت و منفی واگرایی را نشان می‌دهد).

مشاهده شده در سه ناحیه فوق (شکل‌های ۴ الی ۶)، شامل بسامد و دوره ذاتی، تندی فاز، سرعت گروه و طول موج‌های قائم و افقی با ترسیم میدان واگرایی افقی استخراج شد. نتایج بیانگر انتشار امواج گرانی لختی با بسامد زیاد ($\omega/f > 5$) و در سطح میان‌مقیاس ($\lambda_h < 350 km$) است. مشخصه‌های امواج مشاهده شده در سه منطقه فوق، در جدول ۲ آورده شده است.

۴ بحث

۴-۱ شبیه‌سازی عددی

برای بررسی دقیق‌تر چگونگی تولید و انتشار امواج گرانی لختی، ناحیه شبیه‌سازی شده (ایران) به سه منطقه اصلی با بیشترین فعالیت موجی شامل شمال غربی ایران (منطقه اول)، زاگرس مرکزی و جنوبی (منطقه دوم)، محل تلاقی دو رشته کوه البرز و زاگرس (منطقه سوم) تقسیم شد (امیرامجدی و همکاران، ۱۳۹۲). ویژگی‌های امواج



شکل ۵. مشابه شکل ۴ برای تولید و انتشار موج در منطقه دوم در ۰۰ UTC روز ۸ فوریه ۲۰۱۲.

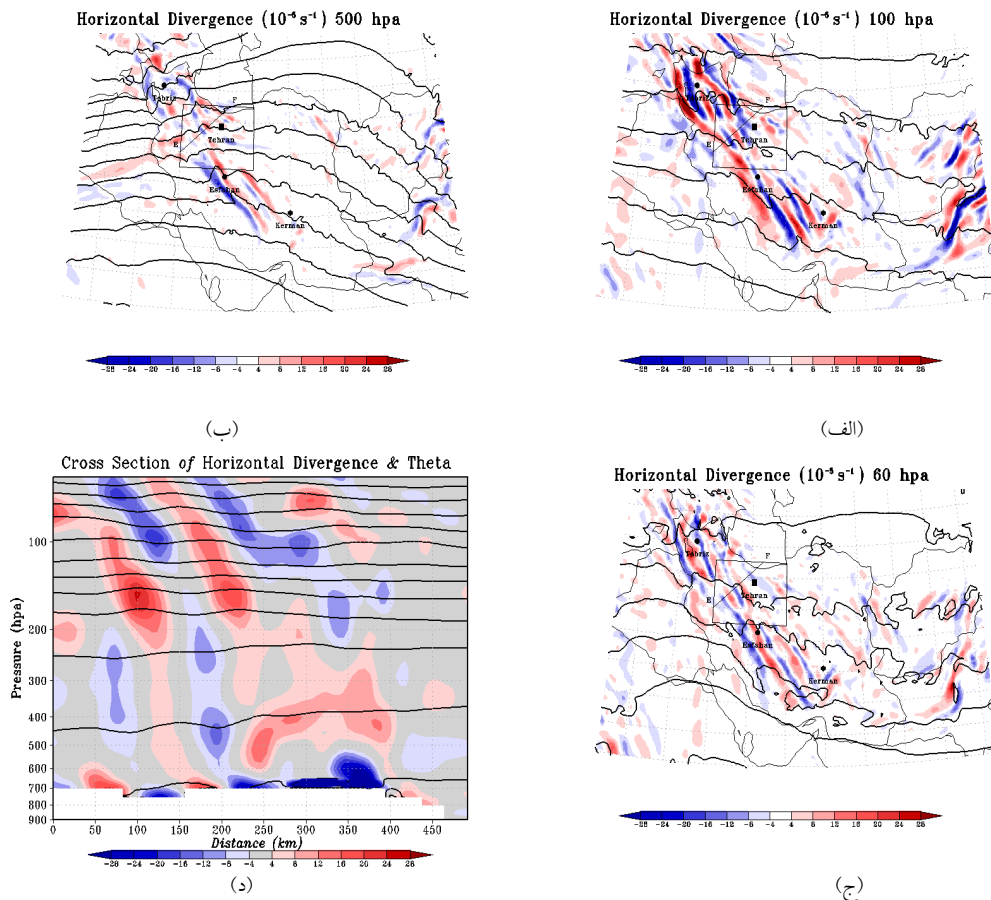
۴-۲ بازبینی نمایه‌های قائم باد و دما

به منظور راست آزمایی ویژگی‌های موج برآورد شده از راه شبیه‌سازی، مقایسه مستقیمی با مشاهدات رادیوگمانه‌ها صورت گرفت. شکل ۷ نمایه‌های قائم باد مداری، نصف‌النهاری و دما (که از میان داده‌های موجود به‌طور تصادفی انتخاب شده‌اند) را برای داده‌های مشاهداتی (هموار شده برای مقادیر ارتفاع بزرگ‌تر از ۱ کیلومتر) و

داده‌های شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد. این نمایه‌های رسم شده، می‌توانند ساختار بزرگ مقیاس جو را به خوبی نمایش دهند. در بازبینی دقیق‌تر، این موضوع که باد مداری شبیه‌سازی شده در حدود ۱۰ متر بر ثانیه از مشاهدات کمتر است، جلب توجه می‌کند؛ با وجود این در هر دو حالت در بیشتر موارد بیشینه آن در ارتفاع حدود ۱۱

جدول ۲. مشخصه‌های موج گرانی‌لختی مشاهده شده در سه منطقه مورد مطالعه.

منطقه	$\lambda_h (km)$	$\lambda_z (km)$	$\omega_i (10^{-4} s^{-1})$	ω/f	$c_h (m/s)$	$c_{g,z} (m/s)$	$\tau(h)$
یک	۱۷۵ - ۱۵۰	۶ - ۵/۵	۸/۰۵ - ۷/۲۶	۸/۹۴ - ۸/۰۶	۱۹/۲۳ - ۱۷/۳۲	۲/۵۶ - ۲/۱۳	۲/۴ - ۲/۱۷
دو	۱۷۵ - ۱۵۰	۶ - ۵	۸/۰۷ - ۵/۶۷	۱۰/۴۵ - ۷/۵	۱۹/۲۵ - ۱۶	۲/۷ - ۱/۶	۳ - ۲/۲
سه	۱۲۰ - ۱۰۰	۷ - ۴	۱۲/۳۹ - ۵/۴۷	۱۴/۵۷ - ۶/۴	۲۲ - ۸/۷	۴/۸ - ۱/۶۵	۳/۲ - ۱/۵

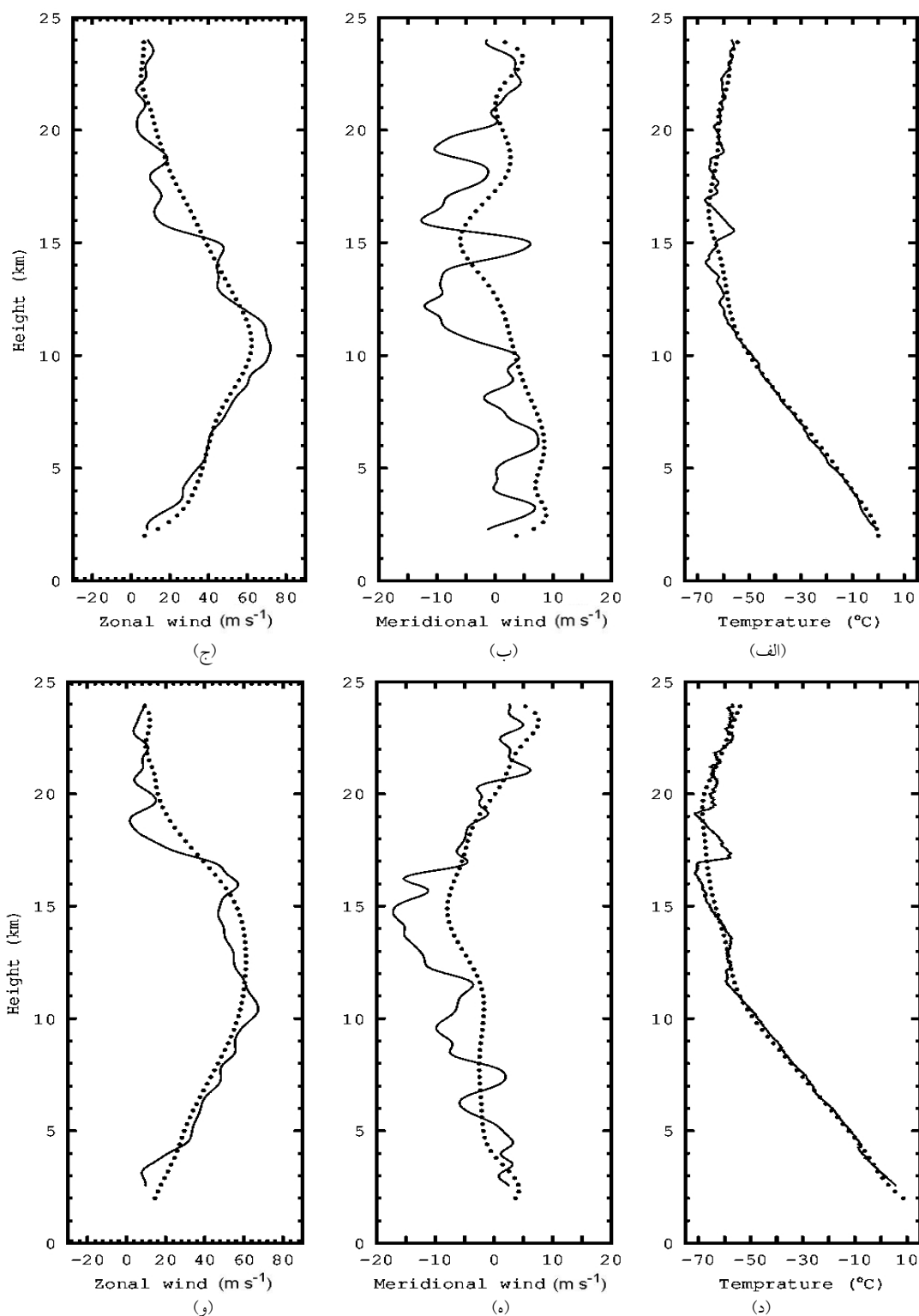


شکل ۶. مشابه Error! Reference source not found. برای تولید و انتشار موج در منطقه سوم در ۰۰ UTC روز ۸ فوریه ۲۰۱۲.

که همین امر استخراج ویژگی‌های موج از این روش را نسبت به OBS6POL ساده‌تر می‌کند. نمایه قائم دما به انتخاب روش حساس‌تر است و این حساسیت را می‌توان به‌خوبی در شکل ۸ با وجود نوسانی به طول ۸ کیلومتر در اعمال چندجمله‌ای مشاهده کرد. علت این امر نیز می‌تواند تغییرات شدید دما با ارتفاع، نسبت به تغییرات تندی باد باشد. نمایه‌های قائم باد مداری و نصف‌النهاری و پریشیدگی هر کدام نیز در شکل ۹ نشان داده شده است.

کیلومتری اتفاق می‌افتد. باد نصف‌النهاری شبیه‌سازی شده نسبت به مشاهدات کمتر تغییر جهت شمالی-جنوبی دارد و دما نیز از سطح تا وردایست کاهش می‌یابد و پس از آن عمدتاً ثابت می‌ماند.

دامنه و طول موج در نمایه پریشیدگی باد و دما به‌شدت به روش جداسازی جریان زمینه وابسته است و در بیشترین هماهنگی در استفاده از چندجمله‌ای مرتبه ۶ با پالایه طراحی شده، مقیاس نوسانات به‌طور کلی بین ۲ تا ۶ کیلومتر به‌دست آمد. این نوسانات در جایی که روش OBS6KM استفاده شده، انسجام و تقارن بیشتری دارند



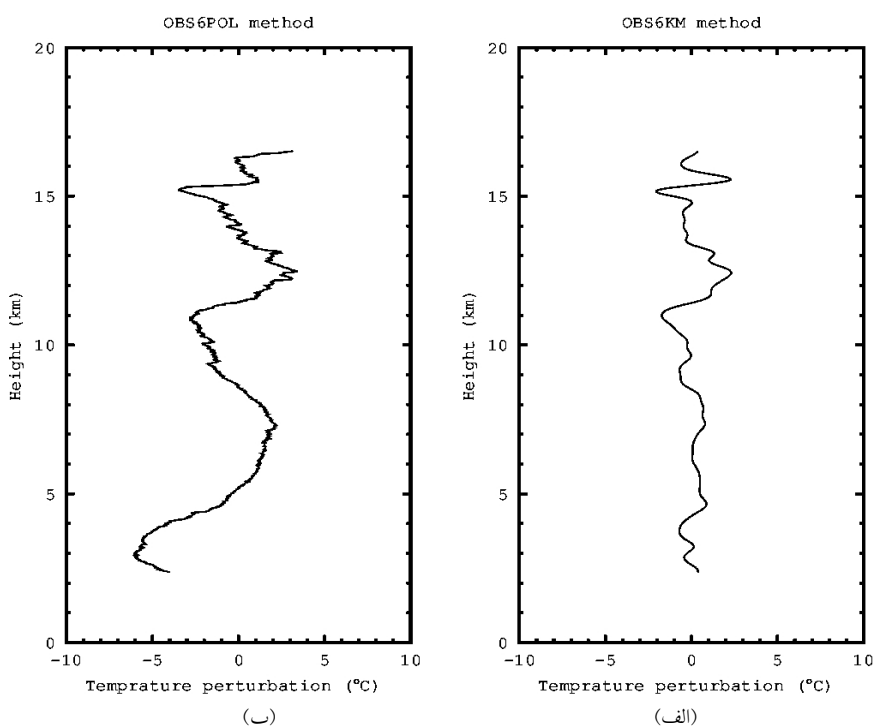
شکل ۷. (الف) و (د) نمایه قائم دما، (ب) و (ه) باد نصف‌النهاری و (ج) و (و) باد مداری؛ بالا برای رادیوگمانه ۵ پرتاب شده در ۱۲UTC روز ۸ فوریه از تهران و پایین برای رادیوگمانه ۸ پرتاب شده در ۱۲UTC روز ۹ فوریه از اصفهان (خط پُر: داده‌های مشاهداتی و نقطه‌چین‌ها: داده‌های شبیه‌سازی شده از مدل WRF هستند).

حدود ارتفاع ۱۷ کیلومتر ارسال اطلاعات را عملی ساخته است، نمی‌توان در مورد وضعیت نمایه در پوشش سپهر با قطعیت بیشتری اظهار نظر کرد.

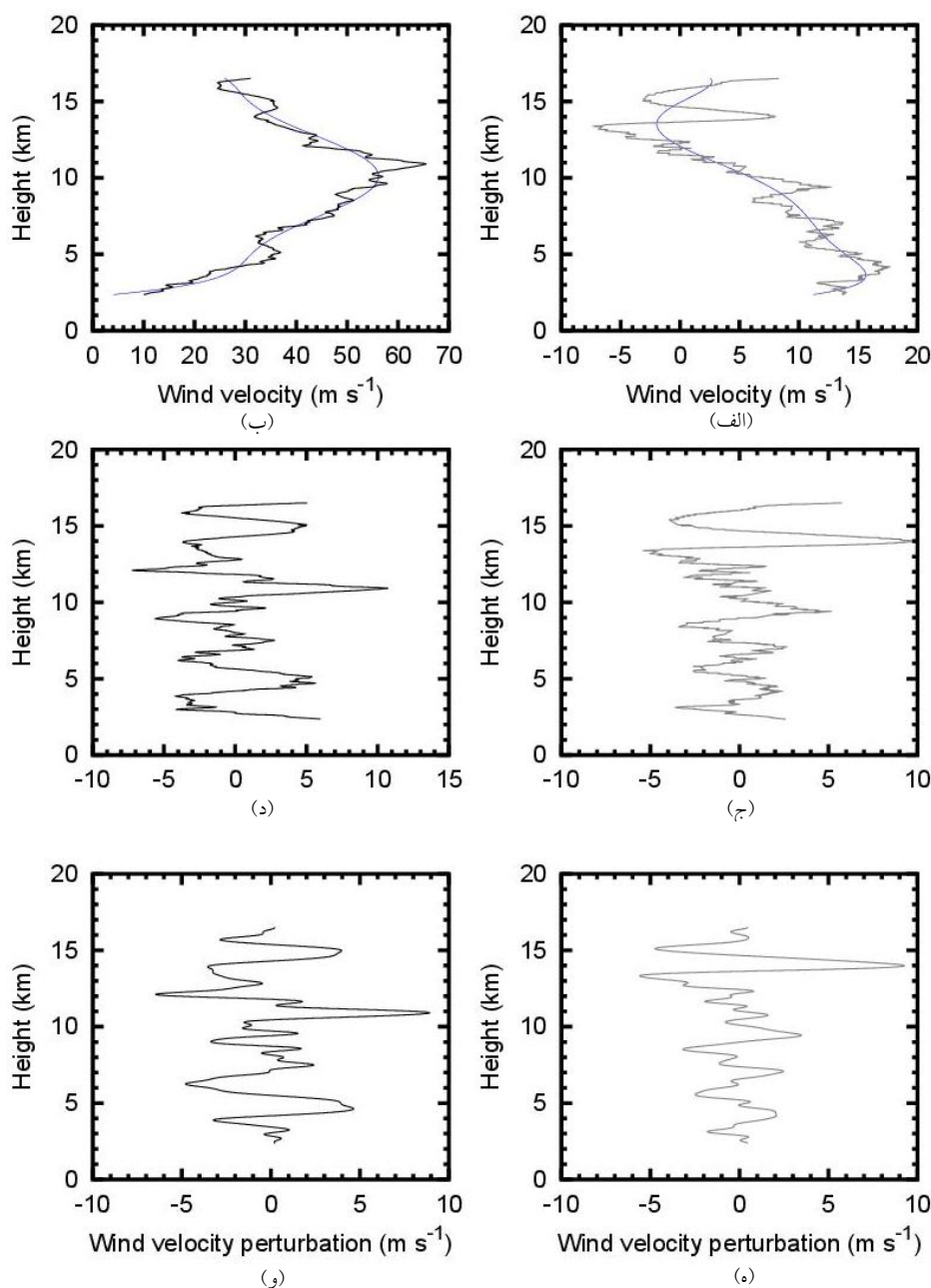
شتاب‌نگار وردسپهر در ارتفاع بین ۳/۲ تا ۸ کیلومتر رسم شده است، در نتیجه چشمه انرژی‌ای در سطح وجود دارد. طول موج قائم ۳۰۵۰ متر، طول موج افقی ۱۴۸ کیلومتر، بسامد ذاتی $\omega = 2/5f = 2/248 \times 10^{-4} s^{-1}$ و جهت‌گیری بردار موج ۱۴/۶۹ درجه است.

در بخش پوشش سپهری رسم شده بین ارتفاع ۱۲ تا ۱۶/۵ کیلومتر، شتاب‌نگار دارای پیش‌گرد و در نتیجه انتشار انرژی بالاسو است. نسبت قطرهای بیضی منطبق بر آن ۱/۷۹، طول موج قائم ۱۹۴۰ متر و طول موج افقی ۲۹۰ کیلومتر برآورد می‌شود. جهت‌گیری محور بزرگ بیضی

۳-۴ برآورد ویژگی موج با استفاده از شتاب‌نگار شتاب‌نگارها عمدتاً برای ارتفاعاتی رسم شده‌اند که بیشترین فعالیت موج در آنها دیده می‌شود. شکل ۱۰ نمایه قائم پریشیدگی باد و شتاب‌نگار پوشش سپهری آن را برای رادیوگمانه ۴ نشان می‌دهد. پیش‌گرد شتاب‌نگار حکایت از انتشار بالاسوی انرژی دارد. نسبت قطرهای بیضی برای این بخش از نمایه ۱/۵۳ و بنابراین بسامد ذاتی $\omega = 1/53f$ است. طول موج قائم ۳۳۰۰ متر و طول موج افقی ۶۴/۶۷۷ کیلومتر به دست می‌آید. از نزدیک بودن نسبت محورها به عدد ۱ نتیجه می‌شود که یک موج کم‌بسامد آشکار شده است. جهت‌گیری بردار موج در شتاب‌نگار با پنجره ۱-۶ کیلومتر، ۳۶/۶۳ درجه و برای دیگری ۳۲/۱۳ درجه است. شکل ۱۱ نیز نمایه‌های قائم پریشیدگی باد و شتاب‌نگار وردسپهری مرتبط با رادیوگمانه ۲ را نشان می‌دهد. البته به علت نقصان داده‌های این گمانه‌زن که تا



شکل ۸. نمایه قائم پریشیدگی دما برای رادیوگمانه ۲، پرتاب شده در ۰۰ UTC روز ۸ فوریه از تبریز؛ (الف) به روش OBS6KM و (ب) به روش OBS6POL.



شکل ۴. نمایه قائم باد برای رادیوگمانه ۲، باد مداری (سمت چپ) و نصف‌النهاری (سمت راست). (الف) و (ب) داده‌های خام و جریان زمینه حاصل از انطباق چندجمله‌ای مرتبه ششم؛ (ج) و (د) پایشیدگی حاصل از OBS6POL؛ (ه) و (و) پایشیدگی حاصل از OBS6KM.

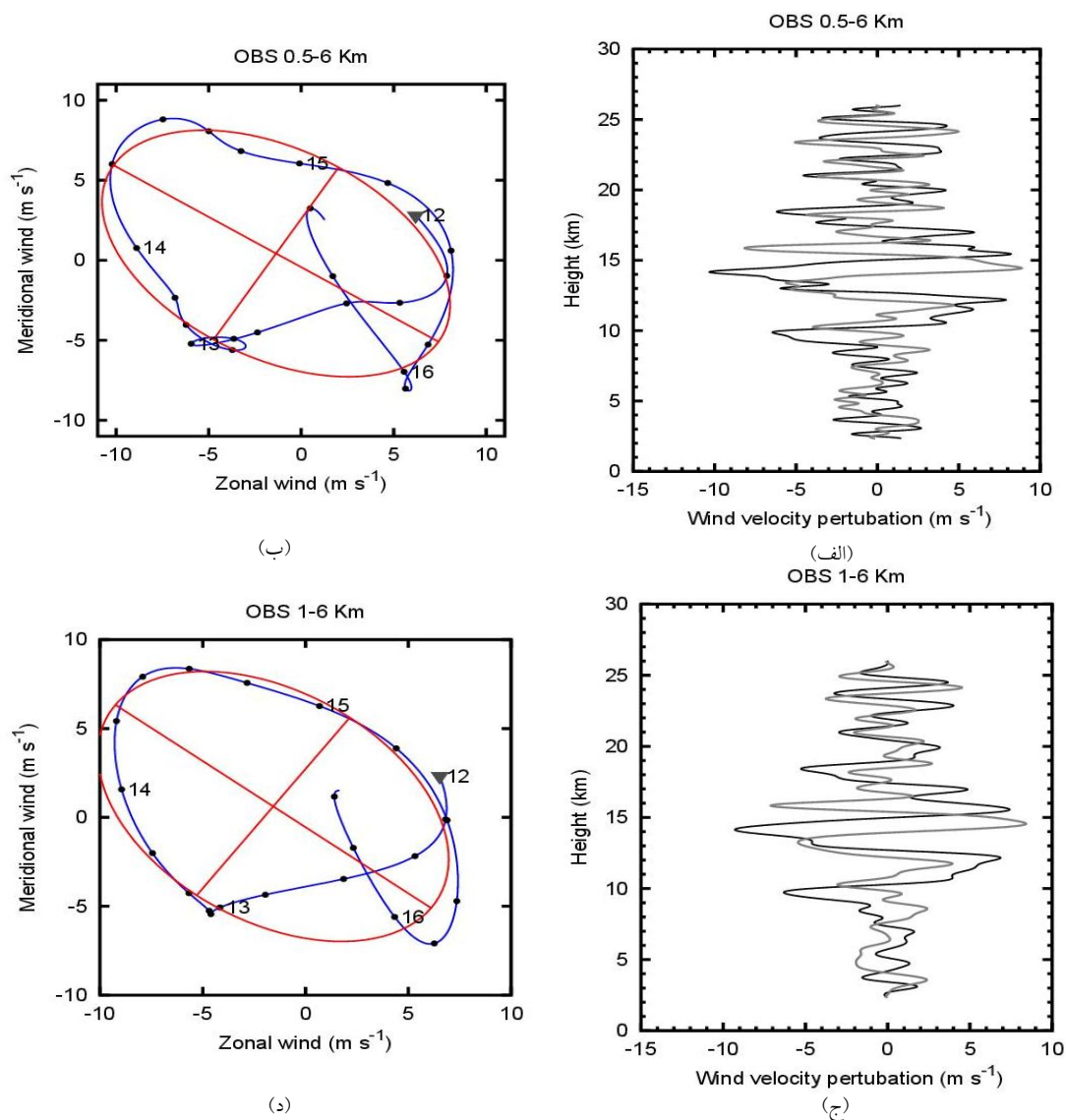
می‌کند که در بخشی از نمایه قائم با هم مشترک هستند. شکل‌های ۱۲-ج و ۱۲-د، شامل نمایه باد از ارتفاع ۱۷ تا ۲۲ کیلومتر و شکل‌های ۱۲-و و ۱۲-ه شامل نمایه باد در ارتفاعات بین ۱۳ تا ۲۰ کیلومتر است. بخش ۱۷/۵ تا ۲۰ کیلومتر از این دو شتاب‌نگار مشترک و در واقع، قسمت

و پیرو آن جهت‌گیری بردار موج ۷۲/۸- درجه و دوره ذاتی نیز ۱۰ ساعت است استفاده از روش شتاب‌نگار برای استخراج ویژگی‌های رادیوگمانه ۷ نیز در شکل ۱۲ نشان داده شده است. این شکل شتاب‌نگارهای دو بخش از پوشن سپهر را مقایسه

ششم و پالایش با پنجره ۶-۱ و ۶-۰/۵ کیلومتر در وردسپهر در شکل ۱۳ نشان داده شده است. این تصاویر نماینده‌ای از شتاب‌نگارهایی هستند که به دلایلی، از جمله برهم‌نهی امواج پایین‌سو و بالاسوی گرانی لختی بازتاب شده از سطح یا با دو چشمه انرژی، پردازش آنها ممکن نیست. به همین علت است که در بیشتر موارد شتاب‌نگارهای پوشش سپهر شکل منظم‌تری نسبت وردسپهر دارند و اطلاعات موج در وردسپهر بدین ترتیب از دسترس

فعال و مؤثر موج در نمایه است. این خصوصیت در استفاده از پالایه با پنجره ۶-۱ کیلومتر به‌خوبی آشکار است. اما فراوانی نوفه‌های موجود در نمایه پریشیدگی باد حاصل از OBS6POL این ویژگی را به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد، به طوری که جهت‌گیری محور بزرگ بیضی حدود ۹۰ درجه تغییر می‌کند، درحالی‌که جهت انتشار برآورد شده از OBS6KM تقریباً ثابت باقی می‌ماند.

شتاب‌نگارهای حاصل از انطباق چندجمله‌ای مرتبه



شکل ۱۰. نمایه قائم و شتاب‌نگار بخش پوشش سپهری (ارتفاع ۱۲ تا ۱۶/۵ کیلومتر) برای رادیوگمانه ۴. (الف) و (ب) به روش OBS6KM با پنجره ۶-۰/۵ کیلومتر؛ (ج) و (د) همان روش با پنجره ۶-۱ کیلومتر (رنگ مشکی: باد مداری و رنگ خاکستری: باد نصف‌النهاری است، فاصله نقاط ارتفاعی در شتاب‌نگارها ۲۰۰ متر است).

خارج می‌شود.

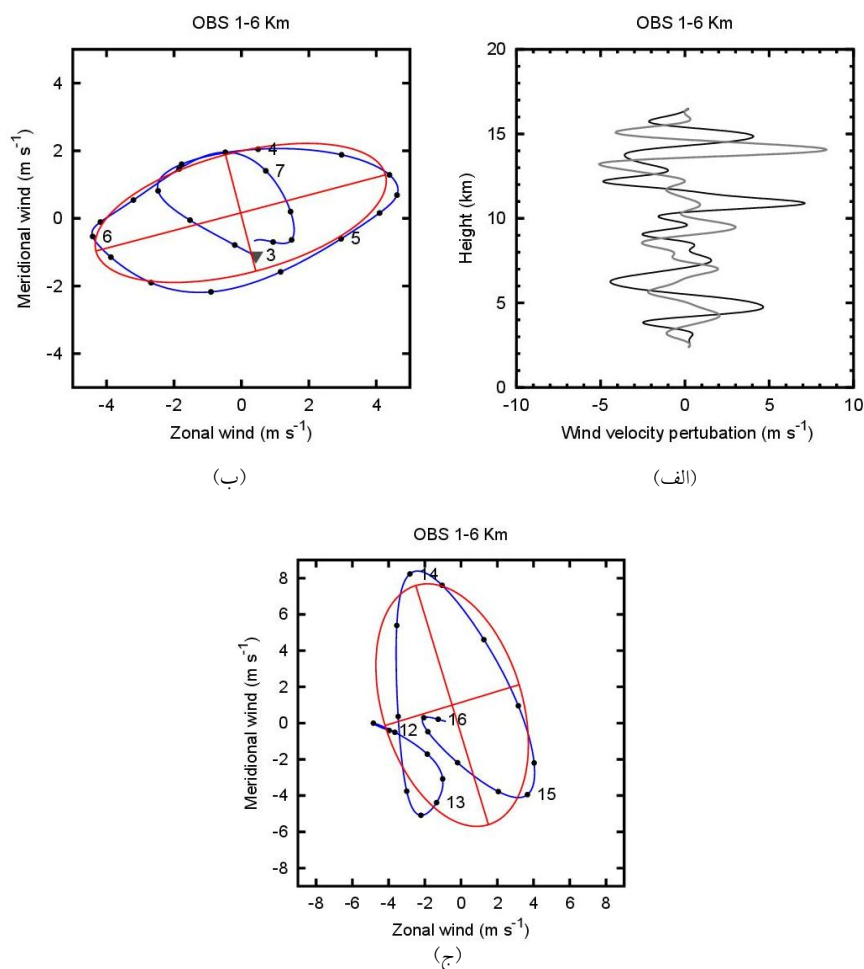
جدول‌های ۳ و ۴ ویژگی‌های موج برآورد شده از رادیوگمانه‌های مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهند.

۵ نتیجه‌گیری

عدم قطعیت و محدودیت‌هایی در استفاده از تنها یک روش برای به‌دست آوردن ویژگی‌های موج گرانی‌لختی می‌تواند وجود داشته باشد، از این رو لازم است بررسی هم‌زمان و به‌صورت مکمل به روش‌های متفاوت صورت گیرد و نتایج مقایسه شوند.

در مقایسه نمایه قائم میدان‌های باد و دما حاصل از شبیه‌سازی عددی با داده‌های رادیوگمانه‌های چهار ایستگاه جوّ بالای کشور که در بازه زمانی رخداد موج، پرتاب شده بودند مشخص شد که مقادیر برآورد شده در شبیه‌سازی با تفکیک متوسط، تحت‌تاثیر عواملی چون تفکیک و پخش مدل، به‌طور محسوس (به‌ویژه در منطقه پیشینه تندی باد) کمتر از مشاهدات هستند و چنانچه بررسی مستقیم داده‌ها مدنظر باشد نیاز است شبیه‌سازی با تفکیک بیشتری صورت گیرد.

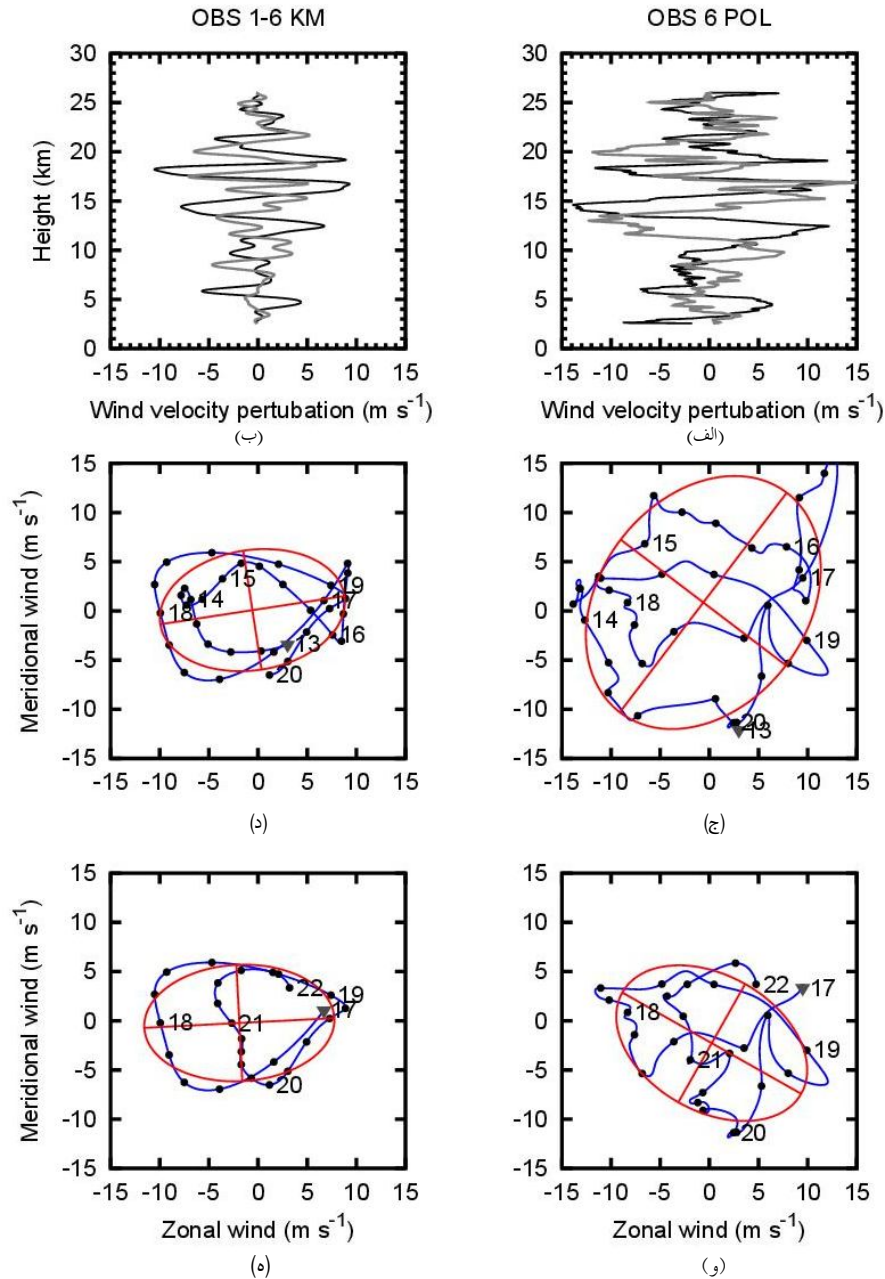
برآورد ویژگی‌های موج با استفاده از محاسبه کمیت واگرایی افقی به‌منزله کمیت اصلی در شبیه‌سازی عددی با



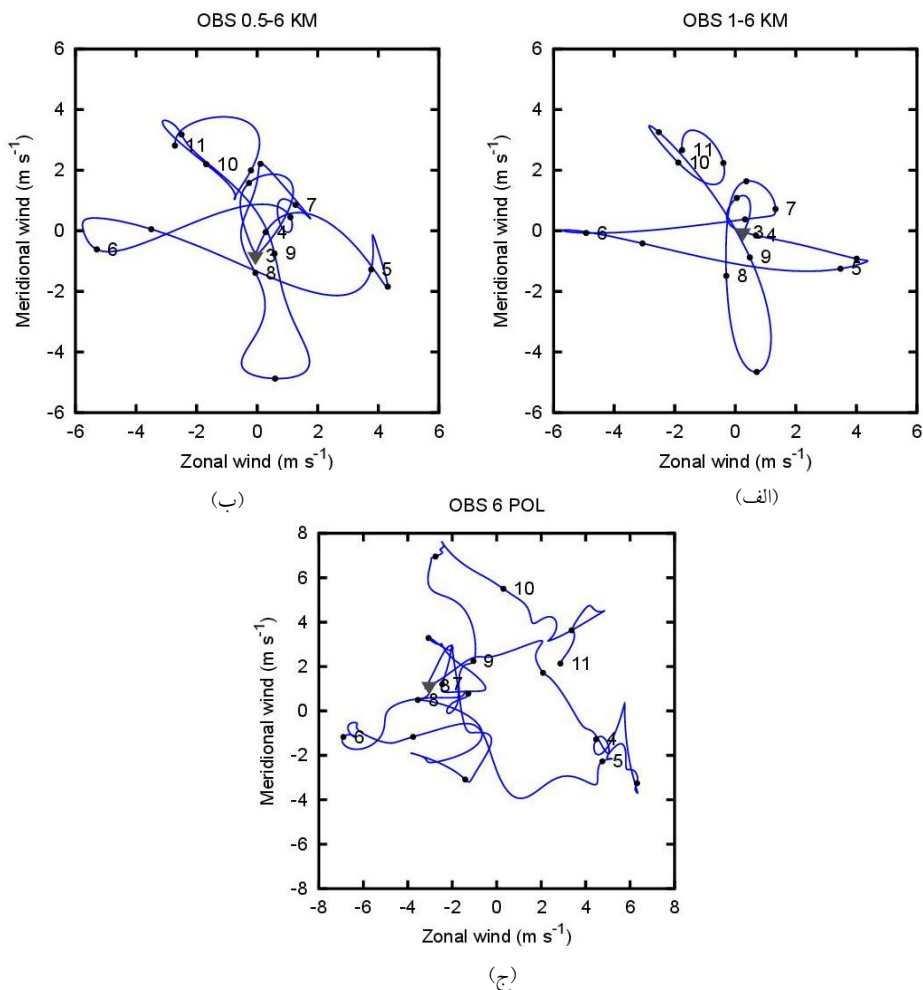
شکل ۱۱. نمایه قائم، شتاب‌نگار وردسپهر و پوشن‌سپهر برای گمانه‌زن ۲. (الف) نمایه قائم با پنجره ۱-۶ کیلومتر؛ (ب) شتاب‌نگار وردسپهری و (ج) شتاب‌نگار پوشن‌سپهری.

مشاهدات، ناکامل است. در این راستا، داده‌های مشاهداتی به‌روش رسم شتاب‌نگار مورد بررسی قرار گرفت. تحقیقات پیشین نشان داده‌اند که پریشیدگی‌ای که موج گرانی لختی در میدان‌های باد و دما ایجاد می‌کند به‌خوبی ویژگی‌های آن را منعکس می‌کند اما استخراج نتایج از

داده‌های واقعی نشان داد که موجی با بسامد زیاد ($\omega/f > 5$) و در سطح میان‌مقیاس β ($\lambda_h < 350 \text{ km}$) مشاهده شده و اثر شناوری بر اثر چرخش در تولید آن، غالب است (امیرامجدی و همکاران، ۱۳۹۲).
بررسی موردی امواج گرانی لختی بدون بررسی



شکل ۵. نمایه قائم پریشیدگی باد و شتاب‌نگار پوشش‌سپهر برای رادیوگمانه ۷. (الف) و (ب) نمایه قائم باد، (ج) و (د) شتاب‌نگار پوشش-سپهر زیرین (LS)؛ (و) و (ه) شتاب‌نگار پوشش‌سپهر زیرین (US). سمت چپ کاربست OBS6KM با پنجره ۱-۶ کیلومتر و سمت راست OBS6POL.



شکل ۶. شتاب‌نگار بخش وردسپهری برای رادیوگمانه ۷. (الف) کاربست روش OBS6KM با پنجره ۱-۶ کیلومتر؛ (ب) روش OBS6KM با پنجره ۰/۵-۶ کیلومتر؛ (ج) روش OBS6POL (فاصله نقاط ارتفاعی ۵۰۰ متر است).

داده‌هایی که رادیوگمانه فراهم می‌آورد شدیداً به نحوه اجرای روش‌های گوناگون با کاربست یک چندجمله‌ای بر نمایه قائم و استفاده از پالاینده بر جریان حذف جریان زمینه از آن بستگی دارد. زمینه برای جداسازی بخش پریشیدگی به نتایج متفاوتی

جدول ۳. ویژگی‌های موج گرانی‌لختی برآورد شده از رادیوگمانه ۷ با اعمال روش‌های گوناگون در پوشش سپهر.

روش	ارتفاع (km)	λ_z (km)	λ_h (km)	AB	ω_l ($10^{-4} s^{-1}$)	c_h (m/s)	φ (°)
OBS6KM	LS*	۳۰۰۰	۶۴۵/۰۹۸	۱/۵۵	۱/۲۱۶	۱۲/۴۸	۸۷۳
OBS6KM	US	۲۸۰۰	۷۵۹/۵۵۱	۱/۳۶	۱/۲۸	۱۱/۲۴	۳/۱۵
OBS6POL	LS	۴۵۰۰	۲۰۷/۱۳۱۴	۱/۳۳	۱/۰۴	۲۱/۷۵	-۲۹/۴۹
OBS6POL	US	۲۸۰۰	۴۷۰/۶۲۸	۱/۵۱	۱/۱۹	۱۱/۹	۵۷/۷۳

* نماد LS نماینده پوشش سپهر زیرین و US نماینده پوشش سپهر زیرین است.

جدول ۴. ویژگی‌های موج گرانی لختی مشاهده شده در تاریخ ۷ الی ۹ فوریه ۲۰۱۲.

روش	شماره گمانه‌زن	ارتفاع (km)	λ_z (km)	λ_h (km)	AB	ω_i ($10^{-4} s^{-1}$)	c_h (m/s)	ϕ (°)
OBS6KM	T2	۸-۳/۲	۳۰۸۰	۱۵۰	۲/۴۹	۲/۴۵	۵/۳۵	۱۴/۶۹
OBS6KM	S2	۱۶/۵-۱۲	۲۰۰۰	۲۹۱/۲۹۹	۱/۷۹	۱/۶۱	۷/۶	-۷۲/۸۸
OBS6KM	S3	۲۳-۱۷/۵	۳۴۰۰	۱۶۸/۳۴۳	۲/۴	۲/۱۸	۱۱/۹	-۳۶/۷۴
(0.5-6)OBS6KM	S4	۱۶/۵-۱۲	۴۲۰۰	۹۹۹/۷۷۴	۱/۶	۱/۳۸	۱۷/۱۲	-۱۷/۱۲
OBS6KM	S4	۱۶/۵-۱۲	۴۲۰۰	۳۳۳/۷۹۱	۱/۶	۱/۳۶	۱۷/۱۲	-۳۹/۶۴
OBS6KM	S4	۳۲/۷-۲۱	۱۸۰۰	۲۳۳/۳۱۱	۱/۶۹	۱/۴۳	۷/۱	-۲۴/۵۵
OBS6KM	S5	۱۷-۱۳/۷	۳۰۸۰	۴۳۴/۷۹	۹/۳	۷/۸	۹/۸۶	۴۰
OBS6KM	S5	۲۶-۱۸	۲۱۲۰	۸۸۹/۱۰۱۳	۱/۱	۰/۹۵	۱۶/۱۹	۱/۲
OBS6KM	T10	۱۱-۵	۳۲۰۰	۸۷۴/۱۶۱	۲/۴	۲/۱۷	۵/۶	-۳۳/۴۸
OBS6KM	S10	۲۰-۱۵	۲۲۸۰	۴۹۰/۴۳۸	۱/۷۳	۱/۲۷	۸/۸۹	-۸۰/۷۴
OBS6KM	S10	۲۳-۱۹	۲۰۰۰	۹۵۷/۸۱	۶/۷	۴/۹۴	۶/۴	-۹/۲۶
OBS6KM	S11	۱۹-۱۵	۲۲۸۰	۵۲۶/۲۲۱	۲/۹۷	۲/۱۸	۷/۷	۰/۰۴

اجتناب‌ناپذیر است، بهره‌گیری از برخی ویژگی‌های شتاب‌نگار همانند جهت‌گیری و راستای انتشار موج هنوز هم می‌تواند کاربردی باشد و مشابه نتیجه‌گیری پلوگونون و همکاران (۲۰۰۳)، نقش عوامل بزرگ‌مقیاسی چون فرایند تنظیم راسبی در انتشار موج را به‌طور کیفی می‌توان برآورد کرد. باین‌حال داده‌های مشاهداتی با در نظر داشتن حساسیت به روش جداسازی جریان زمینه یا از دسترس خارج شدن قسمتی از اطلاعات به علت برهم‌نهی امواج، می‌تواند در جهت اعتبارسنجی با مقادیر برآورد شده از روش شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گیرند.

با توجه به نتایج عرضه شده در این تحقیق و پژوهش‌های پیشین در مورد محدودیت‌هایی که در روش‌های برآورد ویژگی‌های موج گرانی لختی وجود

منجر می‌شود. درحالی‌که پالایه‌ها اغلب دامنه موج را میرا می‌کنند، انطباق چندجمله‌ای گاهی اوقات خطاهای بزرگی ایجاد می‌کند. این خطاها در جایی که نمایه با ارتفاع به شدت تغییر می‌کند (برای مثال تغییرات دما در وردسپهر) بارزتر است. ژنگ و همکاران (۲۰۰۴) نیز پیش‌تر در تحقیقی جامع به عدم قطعیت‌های قابل توجهی در استفاده از روش شتاب‌نگار به‌همراه پالاینده از مرتبه‌های گوناگون اشاره کرده‌اند. علاوه‌براین، وجود نوفه در نمایه، مانع از برآورد امواج با بسامد زیاد شده و باعث می‌شود ماهیت این روش تنها قادر به برآورد بخشی از طیف امواج گرانی لختی با بسامد کم (نزدیک به بسامد کوریولیس) باشد. باوجوداین، ضمن آنکه استفاده از داده‌های مشاهداتی برای بررسی امواج گرانی لختی

- the lower stratosphere over Macquarie Island: *J. Atmos. Sci.*, **57**, 737–752.
- Hamming, R. W., 1989, *Digital Filters: 3D ed.* Prentice-Hall.
- 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.
- Lue, H. Y., and Kuo, F. S., 2012, Comparative studies of methods of obtaining AGW's propagation properties: *Ann. Geophys.*, **30**, 557–570.
- Plougonven, R., and Zhang, F., 2007, On the forcing of inertia-gravity waves by synoptic-scale flows: *J. Atmos. Sci.*, **64**, 1737–1742.
- 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.
- Scavuzzo, C. M., Lamfri, M. A., Teitelbaum, H., and Lott, F., 1998, A study of the low-frequency inertia-gravity waves observed during the Pyrenees Experiment: *J. Geophys. Res.*, **103**, 1747–1758.
- 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.
- 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.
- Zhang, F., Wang, S., and Plougonven, R., 2004, Uncertainties in using the hodograph method to retrieve gravity wave characteristics from individual soundings: *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L11110.
- Zülicke, C., and Peters, D. H. W., 2006, Simulation of inertia-gravity waves in a poleward breaking Rossby wave: *J. Atmos. Sci.*, **63**(12), 3253 – 3276.
- دارد، استفاده از پارامترهای استوکس برای استخراج ویژگی‌های موج از نمایه‌های قائم مشاهداتی یا شبیه‌سازی شده روش دیگری است که می‌تواند در کنار دو روش دیگر، به درک بهتری از سازوکار تولید و انتشار موج گرانی لختی منجر شود.
- منابع**
- امیرامجدی، م.، محب‌الحجه، ع. ر.، میرزائی، م.، ۱۳۹۳، شبیه‌سازی عددی امواج گرانی-لختی با استفاده از مدل WRF روی ایران: بررسی موردی: *مجله فیزیک زمین و فضا (زیر چاپ)*.
- 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.
- Andrews, D. G., Holton J. R., and Leovy, C. B., 1987, *Middle Atmosphere Dynamics: International Geophysics Series*, **40**, Academic Press, 489 pp.
- Bosart, L. F., and 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.
- Charron, M., and Manzini, E., 2002, Gravity waves from fronts: Parameterization and middle atmosphere response in a general circulation model: *J. Atmos. Sci.*, **59**, 923–941.
- Choi, Y. G., Lee, S. C., McDonald, A. J., and Hooper, D. A., Wind-profiler observations of gravity waves produced by convection at mid-latitudes: *Atmos. Chem. Phys.*, **6**, 2825–2836.
- Dhaka, S. K., Bhatnagar, R., Shibagaki Y., Hashiguchi, H., Fukao, Kozu, S. T., and Panwar, V., 2011, Gravity waves generated in a convective and a non-convective environment: *Ann. Geophys.*, **29**, 2259–2276.
- Guest, F. M., Reeder, M. J., Marks, C. J., Karoly, D. J., 2000, Inertia-gravity waves observed in