

## ارزیابی کاربست پارامترهای استوکس در برآورد ویژگی‌های امواج گرانی-لختی

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

۱. دانشجوی دکتری هواشناسی، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

۲. استادیار، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

۳. دانشیار، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۹۳/۹/۱۸، پذیرش نهایی: ۹۴/۷/۱۴)

### چکیده

در این پژوهش، قابلیت‌ها و محدودیت‌های استفاده از پارامترهای استوکس در برآورد ویژگی‌های امواج گرانی-لختی طی یک رخداد موج بر روی ایران بررسی شد. نتایج نشان داد پارامترهای استوکس به‌طور مستقیم نمی‌تواند بخش بالاسامد امواج گرانی-لختی را آشکار کند. همچنین اثر باد زمینه، مانع از برآورد دقیق از جهت‌گیری افقی انتشار امواج می‌شود. از طرف دیگر ماهیت این روش قادر به تمایز جهت انتشار شرق‌سو (شمال‌سو) و غرب‌سو (جنوب‌سو) و همچنین انتشار بالاسو و پایین‌سو انرژی نیست. از این رو با توجه به تحلیل‌های اولیه لازم است استفاده از روش‌های دیگر نیز مدنظر قرار گیرد. کاربست طیف چرخشی در این زمینه نتایج قابل قبولی در بردارد و نشان می‌دهد که در رخداد مورد مطالعه، انتشار بالاسوی انرژی در پوشن‌سپهر و به‌خصوص در وردسپهر، بر انتشار پایین‌سو آن غالب است. این در حالی است که استفاده از پارامترهای استوکس در محاسبه طیف چرخشی در مقایسه با روش متعارف این محاسبات، موجب کاهش محاسبات و خطای ناشی از استفاده مکرر از تبدیل فوریه می‌شود. برآورد انرژی جنبشی و پتانسیل حاصل از پریشیدگی میدان‌های دما و باد، گویای وجود چشمه بزرگ تولید امواج گرانی-لختی در وردسپهر است که با نتایج همانندسازی عددی در پژوهش‌های پیشین این رخداد، سازگار بوده و تأییدی بر نتایج کاربست طیف چرخشی در این پژوهش است.

واژه‌های کلیدی: امواج گرانی-لختی، پارامترهای استوکس، تحلیل موجک، طیف چرخشی

### ۱. مقدمه

اسپیگا و همکاران (۲۰۰۸) برای مطالعه منابع انرژی امواج گرانی-لختی در منطقه کوردیلرا آند (Andes Cordillera) از رسم میدان واگرایی باد افقی برای داده‌های به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی عددی مدل عددی WRF همراه با بررسی داده‌های رادیوگمانه (Radiosounding) و ماهواره مودیس (MODIS) استفاده کردند. در پژوهش فوق، به‌منظور مطالعه طول موج غالب در نمایه قائم، نرم‌افزار تحلیل موجک تورنس و کامپو (۱۹۹۸) به کار گرفته شد تا ضمن تعیین مؤلفه‌های موج موجود در سیگنال، نمایه به‌صورت ضمنی تحلیل شود. نتایج بیانگر نقش برجسته جریان جتی (به‌عنوان چشمه اصلی) و همرفت و کوهساری (به‌عنوان منابع دیگر انرژی موجود در منطقه) در راه‌اندازی و انتشار

امواج گرانی-لختی با بسامدی بین بسامد شناوری و لختی، بر دینامیک جو تأثیرات مهمی دارند و موجب انتقال قائم و افقی جرم، تکانه و انرژی می‌شوند. با در نظر گرفتن نوع ابزار پژوهش، مطالعات انجام‌گرفته در زمینه شناسایی این امواج را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد؛ دسته اول، بر پایه داده‌های مشاهداتی و دسته دوم، بر پایه شبیه‌سازی عددی با شرایط واقعی یا آرمانی. روش‌های متداول برای تخمین ویژگی‌های موج عبارت‌اند از: محاسبه میدان واگرایی افقی باد، محاسبه پارامترهای استوکس، طیف چرخشی (Rotary Spectrum)، تحلیل طیفی متقاطع (Cross-Spectral)، رسم شتاب‌نگار (Hodograph) و بررسی مستقیم نمایه قائم پریشیدگی میدان‌های باد و دما.

فريتس (۱۹۸۷) برای برآورد ویژگی‌های امواج گرانی-لختی در جو به کار بردند و سپس اِکرمَن و وینسنت (۱۹۸۹) آن را توسعه دادند. در این راستا بر اساس مطالعه اِکرمَن (۱۹۹۶) فرض می‌شود برای هر پریشیدگی باد مداری و نصف‌النهاری  $(u'(z), v'(z))$  با بیشینه دامنه  $(u'_0, v'_0)$ ، همچنین تبدیلات فوریه  $U_r(m) + iU_i(m)$  و  $V_r(m) + iV_i(m)$  چهار پارامتر استوکس به صورت زیر تعیین شوند:

$$I = \overline{u'^2_0} + \overline{v'^2_0} = A \left[ \overline{U_r^2(m)} + \overline{U_i^2(m)} + \overline{V_r^2(m)} + \overline{V_i^2(m)} \right] \quad (1)$$

$$D = \overline{u'^2_0} - \overline{v'^2_0} = A \left[ \overline{U_r^2(m)} + \overline{U_i^2(m)} - \overline{V_r^2(m)} - \overline{V_i^2(m)} \right] \quad (2)$$

$$P = \overline{u'_0 v'_0 \cos \delta} = 2A \left[ \overline{U_r(m)V_r(m)} + \overline{U_i(m)V_i(m)} \right] \quad (3)$$

$$Q = \overline{u'_0 v'_0 \sin \delta} = 2A \left[ \overline{U_r(m)V_i(m)} - \overline{U_i(m)V_r(m)} \right] \quad (4)$$

که نماد  $(\bar{\phantom{x}})$  معرف میانگین‌گیری در زمان یا ارتفاع،  $A$  یک ثابت و  $\delta$  فازی است که مقدار بیضی‌بودن موج را مشخص می‌کند (مقادیر ۰ و ۱۸۰ درجه برای  $\delta$  نشان‌دهنده قطبش خطی، ۹۰ و ۲۷۰ درجه نشان‌دهنده قطبش دایره‌ای و هر مقدار دیگری نشان‌دهنده قطبش بیضوی است). در پارامترهای استوکس،  $I$  کمیت توان گذردهی،  $D$  پارامتر ناهمسانگردی گذردهی،  $P$  مربوط به قطبش خطی و  $Q$  مشخص‌کننده وضعیت قطبش دایره‌ای است. آنگاه  $\phi$  (جهت‌گیری محور بزرگ بیضی)،  $d$  (درجه قطبیدگی موج) و  $AR$  (نسبت محورهای بیضی) به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\phi = \frac{1}{2} \arctg \left( \frac{P}{D} \right) \quad (5)$$

$$d = \frac{(D^2 + P^2 + Q^2)^{\frac{1}{2}}}{I} \quad (6)$$

$$AR = \cotg(\xi) \quad , \quad \xi = \frac{1}{2} \arcsin \left( \frac{Q}{dI} \right) \quad (7)$$

به کمک کمیت  $AR$  و با در نظر گرفتن  $f$  برای پارامتر کوریولیس، بسامد ذاتی  $\omega$  از رابطه (۸) به دست می‌آید:

$$\frac{\omega}{f} = AR \quad (8)$$

امواج گرانی-لختی است. زولیک و پیترس (۲۰۰۶) با محاسبه میدان واگرایی افقی باد برای داده‌های به دست آمده از اجرای مدل میان‌مقیاس MM5، رخداد موج گرانی را در پی شکست موج راسبی بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از پارامترهای استوکس که مستلزم حذف جریان زمینه است (استفاده از صافی میان‌گذر یا برازش چندجمله‌ای)، نشان دادند که پارامترهای موج، به چگونگی حذف جریان زمینه حساس است. در حالی که مطابق روش محاسبه میدان واگرایی افقی باد، اثر جریان زمینه نادیده گرفته می‌شود. از طرف دیگر، میدان واگرایی و همچنین طول موج افقی به دست آمده برای امواج، به تفکیک افقی انتخابی در مدل وابسته بود (زولیک و پیترس، ۲۰۰۶). ژنگ و همکاران (۲۰۰۴) نیز نشان دادند که برآورد طول موج قائم و بسامد ذاتی موج به کمک روش شتاب‌نگار، به انتخاب روش تفکیک جریان زمینه و پریشیدگی در نمایه قائم بسیار حساس است و عدم قطعیت زیادی در تخمین طول موج افقی وجود دارد. علاوه بر حساسیت به نحوه حذف جریان زمینه، روش‌های استفاده از پارامترهای استوکس و رسم شتاب‌نگار با عدم قطعیت‌های بالقوه‌ای روبه‌رو هستند که می‌تواند ناشی از وردایی فضایی بسته موج یا حضور امواج متعدد باشد. لیو و کیو (۲۰۱۲) در شرایط آرمانی و لیو و همکاران (۲۰۱۳) در یک مطالعه موردی، به محدودیت‌های روش شتاب‌نگار و پارامترهای استوکس در برآورد ویژگی‌های امواج و معنادار بودن نتایج آن‌ها در بسامدهای پایین اشاره کردند.

در مطالعه موردی حاضر، رویداد موج گرانی-لختی در دوره ۷ تا ۹ فوریه ۲۰۱۲ (مصادف با ۱۸ تا ۲۰ بهمن ۱۳۹۰) که پیش از این امیرامجدی و همکاران (۱۳۹۳) الف و ب) با روش‌های دیگر آن را مطالعه کرده بودند، با استفاده از پارامترهای استوکس بررسی و با نتایج روش‌های شتاب‌نگار و واگرایی باد افقی مقایسه می‌شود.

## ۲. داده‌ها و روش

استفاده از پارامترهای استوکس را در ابتدا وینسنت و

داده‌های استفاده‌شده شامل داده‌های رادیوگمانه پنج ایستگاه جو بالایی کشور (تبریز، تهران، کرمانشاه، اصفهان و کرمان) است که طی رویداد مذکور پرتاب شده‌اند.

### ۳. نتایج

#### ۳.۱. تحلیل نمایه قائم

شکل ۱ نمایه‌های قائم باد مداری و نصف‌النهاری حاصل از داده‌های رادیوگمانه پرتاب‌شده در ساعت ۰۰ UTC روز ۸ فوریه ۲۰۱۲ در ایستگاه تهران را نشان می‌دهد. در این شکل، چینش قائم باد مداری در حضور جریان جتی (ارتفاع بین ۹ تا ۱۴ کیلومتر با بیشینه حدود ۸۵ متر بر ثانیه در ارتفاع ۱۲ کیلومتری) به‌خوبی نمایان است. شکل ۲ نتایج به‌دست‌آمده از کاربست تحلیل موجک مورلت برای نمایه‌های قائم ارائه‌شده در شکل ۱ را نمایش می‌دهد. در شکل ۲-الف می‌توان حضور طول موج قائم  $4\text{ km} < \lambda < 8\text{ km}$  در نمایه مداری را ملاحظه کرد. در نمایه باد نصف‌النهاری (شکل ۲-ب) علاوه بر این، موج دیگری ( $2\text{ km} < \lambda < 4\text{ km}$  و  $\lambda \sim 1\text{ km}$ ) نیز به چشم می‌خورد. نمایه قائم باد مداری و نصف‌النهاری برای ایستگاه اصفهان (۱۲ UTC روز ۸ فوریه) در شکل ۴ و نتایج حاصل از کاربست تابع تحلیل موجک مربوط به آن در شکل ۵ نشان داده شده است. در این تصویر موجی با طول موج قائم  $3/5\text{ km} \sim \lambda$  در نمایه مداری و  $7\text{ km} \sim \lambda$  در نمایه نصف‌النهاری غالب است. با کاهش سطح اطمینان از ۹۵ درصد به ۹۳ درصد طول موج  $7\text{ km} \sim \lambda$  در نمایه مداری نیز آشکار می‌شود.

نشانه‌های حضور موج با طول موج قائم  $7\text{ km} \sim \lambda$  در نمایه پریشیدگی باد، پس از کاربست صافی میان‌گذر با پنجره  $2 - 8\text{ km}$  (شکل ۳-الف) دیده می‌شود. برای اینکه اثر این موج به طور مشخص‌تر دیده شود، صافی میان‌گذر با پنجره  $4 - 8\text{ km}$  به کار گرفته شد (شکل ۳-ب). از وضعیت انتقال فاز مؤلفه‌های باد (شکل‌های ۳ و ۶) می‌توان استنباط کرد که امواج گرانی-لختی منتشرشده، هم در ورود سپهر و هم در پوشش سپهر زیرین، به سمت بالا منتشر می‌شوند. شایان ذکر است که اگر قله

طیف چرخشی، از توان طیفی جمع مختلط مؤلفه‌های پریشیدگی باد افقی  $(u'(z) + iv'(z))$  محاسبه می‌شود که  $i = \sqrt{-1}$  است. این روش، وضعیت چرخش مؤلفه‌های پریشیدگی باد افقی با ارتفاع را مشخص می‌کند. حالت چرخش ساعت‌گرد (CW) متناسب با انتشار بالاسوی انرژی و چرخش پادساعت‌گرد (ACW) متناسب با انتشار پایین‌سوی انرژی است. اِکرمن (۱۹۹۶) نشان داد که بین پارامترهای استوکس و طیف چرخشی، رابطه زیر برقرار است:

$$CW = \frac{1}{2}[I - Q] \quad (9)$$

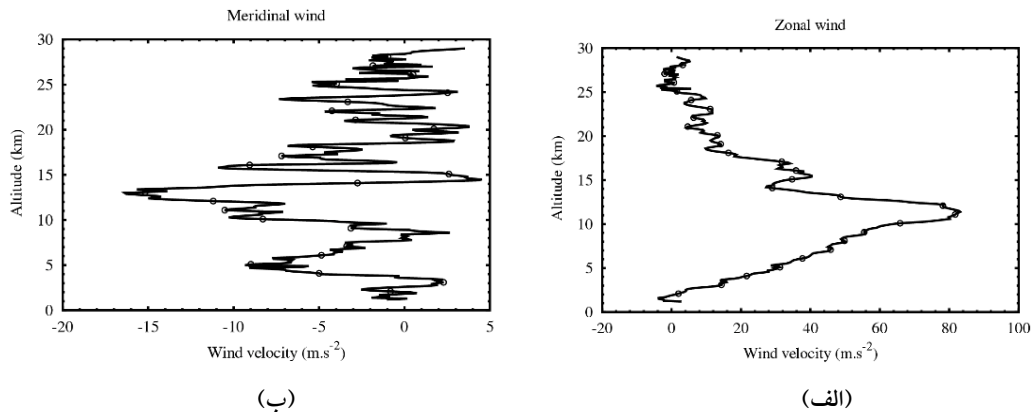
$$ACW = \frac{1}{2}[I + Q] \quad (10)$$

انرژی موج (انرژی بر واحد جرم) نیز به‌طور مستقیم و طبق رابطه زیر از میدان‌های نوسان به دست می‌آید:

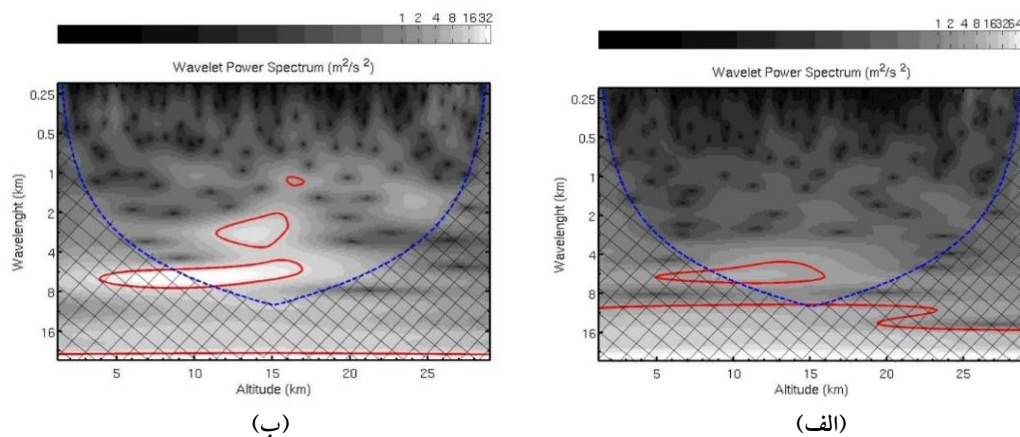
$$e = \frac{1}{2} \left( \overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \frac{\overline{g^2 T'^2}}{N^2 T_0^2} \right) \quad (11)$$

که در آن،  $N$  بسامد شناوری و  $T_0$  دمای زمینه است. در رابطه (۱۱) دو جمله اول انرژی جنبشی پریشیدگی باد مداری ( $E_{Kz}$ ) و نصف‌النهاری ( $E_{Km}$ ) و جمله سوم انرژی پتانسیلی موج ( $E_p$ ) را نشان می‌دهد. در پژوهش حاضر بر پایه مطالعه پیشین (امیرامجدی و همکاران، ۱۳۹۳ ب)، برای به‌دست‌آوردن پریشیدگی میدان‌های دما و باد از برازش یک چندجمله‌ای درجه ششم بر نمایه قائم استفاده شد. روش دیگر، کاربست یک صافی میان‌گذر است. بدین منظور، ابتدا نمایه‌های باد و دما با روش اسپلاین مکعبی درون‌یابی شدند تا نقاط، فواصل ارتفاعی مساوی ۱۰۰ متر داشته باشند. سپس نرم‌افزار تحلیل موجک ارائه‌شده توسط تورنس و کامپو (۱۹۹۸) (وبگاه: <http://atoc.colorado.edu/research/wavelets>) به کار گرفته شد تا طول‌موج‌های قائم غالب در نمایه شناسایی شود. بر اساس پژوهش‌های پیشین (اسپیگا و همکاران، ۲۰۰۸ و سرافیموویچ و همکاران، ۲۰۰۵) تابع موجک مورلت برای این تحلیل انتخاب و پس از آن صافی میان‌گذر لَنکروس برای عبور آشفتگی‌های گرانی-لختی و حذف جریان زمینه و نوفه‌ها استفاده شد.

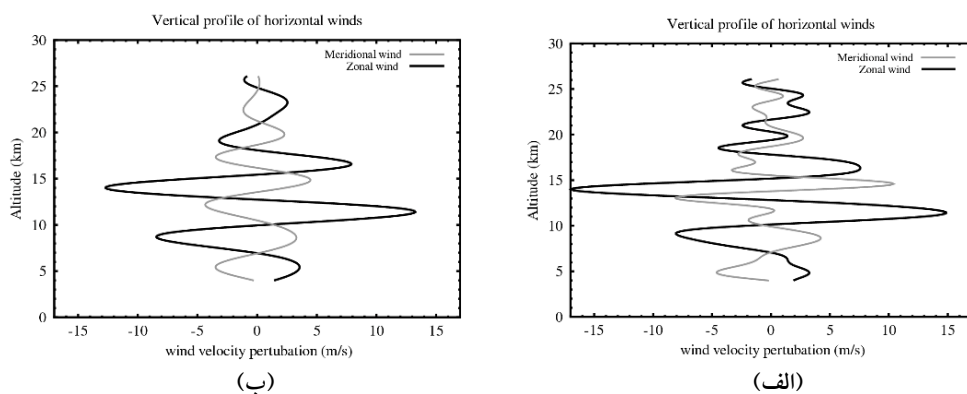
دامنه پریشیدگی باد مداری بالاتر (پایین تر) از قله دامنه پریشیدگی باد نصف النهاری هم فاز با آن قرار بگیرد، نشان می‌دهد که انتشار موج بالاسو (پایین سو) است.



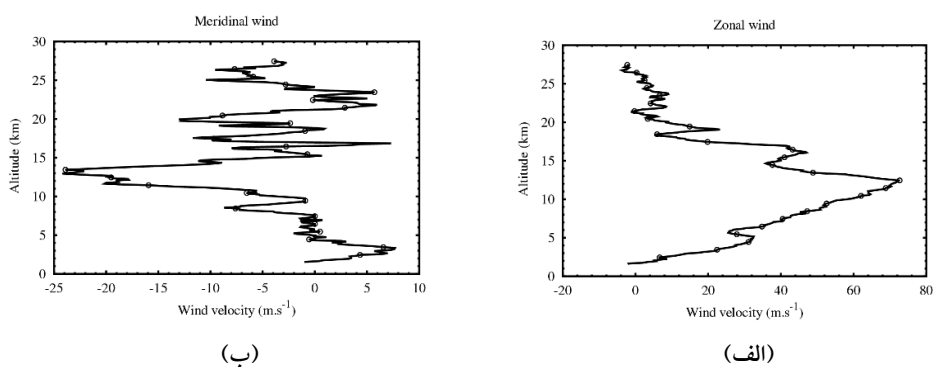
شکل ۱. نمایه قائم باد (الف) مداری و (ب) نصف النهاری برای رادیوگمانه پرتاب شده در ۰۰ UTC روز ۸ فوریه ۲۰۱۲ از ایستگاه تهران. (خط توپر داده‌های درون‌یابی شده با روش اسپلاین با تفکیک قائم ۱۰۰ متر است و دایره‌ها متناسب با فاصله‌های ارتفاعی ۱ کیلومتر علامت‌گذاری شده‌اند).



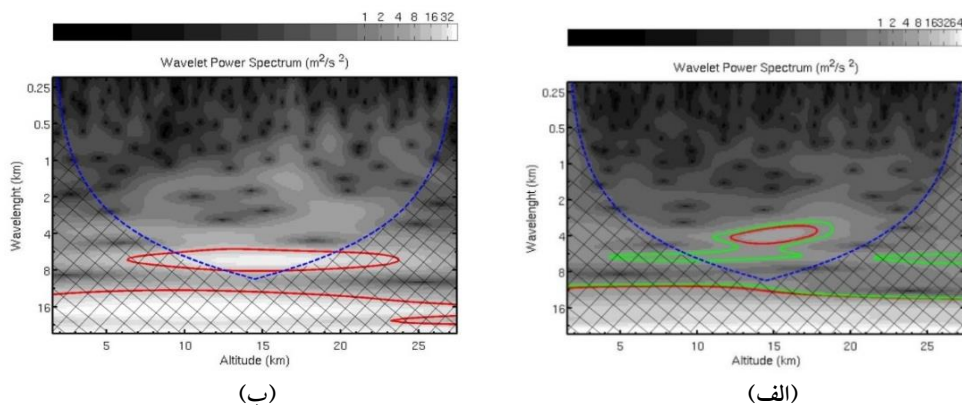
شکل ۲. تحلیل موجک مورلت برای نمایه‌های باد (الف) مداری و (ب) نصف النهاری نشان داده شده در شکل ۱. توان طیفی ( $m^2 s^{-2}$ ) با سطح اطمینان ۹۵ درصد (خطوط قرمز) طول موج‌های غالب و محل آن‌ها در نمایه را مشخص می‌کند. سطح هاشور زده، خارج از مخروط اطمینان (خط چین آبی) است و در نظر گرفته نمی‌شود.



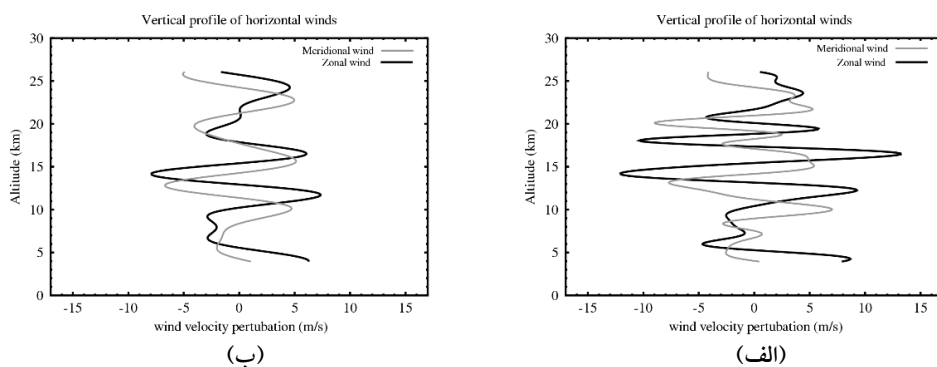
شکل ۳. نمایه پریشیدگی باد مداری (مشکی) و نصف النهاری (خاکستری) مربوط به شکل ۱ بعد از کار بست پالایه با پنجره (الف) ۸-۲ کیلومتر و (ب) ۴-۸ کیلومتر.



شکل ۴. مشابه شکل ۱ برای رادیوگمانه پرتاب شده از ایستگاه اصفهان در ۱۲ UTC روز ۸ فوریه.



شکل ۵. مشابه شکل ۲ برای رادیوگمانه پرتاب شده از ایستگاه اصفهان در ۱۲ UTC روز ۸ فوریه. رنگ قرمز سطح اطمینان ۹۵ درصد و رنگ سبز سطح اطمینان ۹۳ درصد است.



شکل ۶. مشابه شکل ۳ برای رادیوگمانه پرتاب شده از ایستگاه اصفهان در ۱۲ UTC روز ۸ فوریه.

جدول ۱. ویژگی‌های امواج گرانی-لختی برآورد شده با استفاده از پارامترهای استوکس در وردسپهر.

| Lanczos صافی             |      |                     |      |            | برآزش چندجمله‌ای درجه ۶  |      |                     |      | ایستگاه  | زمان/روز UTC |
|--------------------------|------|---------------------|------|------------|--------------------------|------|---------------------|------|----------|--------------|
| $\omega(10^{-4} s^{-1})$ | AR   | $\varphi(^{\circ})$ | d    | Window(km) | $\omega(10^{-4} s^{-1})$ | AR   | $\varphi(^{\circ})$ | d    |          |              |
| ۲/۱۵                     | ۲/۷۵ | ۶/۷۰۷               | ۰/۷۴ | ۴-۸        | ۲/۲۸                     | ۲/۹۰ | -۱/۸۲               | ۰/۷۹ | اصفهان   | ۱۲ Feb/ ۸    |
| ۱/۳۲                     | ۱/۶۰ | -۳۷/۹۲              | ۰/۷۹ | ۴-۸        | ۱/۴۴                     | ۱/۷۶ | ۲۱/۷۰               | ۰/۸۰ | کرمانشاه | ۰۰ Feb/ ۸    |
| ۱/۵۷                     | ۱/۷۴ | ۸/۴۱                | ۰/۹۰ | ۴-۸        | ۴/۹۷                     | ۵/۵۲ | -۹/۵۵               | ۰/۶۲ | تبریز    | ۰۰ Feb/ ۹    |
| ۱/۱۶                     | ۱/۵۸ | ۸/۹۸                | ۰/۸۰ | ۵-۷        | ۶/۵۱                     | ۸/۸۶ | -۴/۴۳               | ۰/۸۹ | کرمان    | ۱۲ Feb/ ۸    |
| ۳/۵۱                     | ۴/۲۳ | -۲۷/۲۸              | ۰/۹۳ | ۴-۸        | ۲/۴۸                     | ۲/۹۱ | -۲۲/۴۲              | ۰/۸۳ | تهران    | ۰۰ Feb/ ۸    |

جدول ۲. ویژگی‌های امواج گرانی-لختی برآوردشده با استفاده از پارامترهای استوکس در پوشش سپهر زیرین.

| ایستگاه  | زمان/روز UTC | برازش چندجمله‌ای درجه ۶  |      |                     |      | صافی Lanczos |      |                     |      |
|----------|--------------|--------------------------|------|---------------------|------|--------------|------|---------------------|------|
|          |              | $\omega(10^{-4} s^{-1})$ | AR   | $\varphi(^{\circ})$ | d    | Window(km)   | d    | $\varphi(^{\circ})$ | AR   |
| اصفهان   | ۱۲ Feb/۸     | ۱/۳۷                     | ۱/۷۴ | -۴۴/۲۳              | ۰/۳۲ | ۲-۵          | ۰/۸۵ | -۰/۸۴               | ۲/۳۲ |
| کرمانشاه | ۰۰ Feb/۸     | ۱/۱۵                     | ۱/۴۱ | -۴۴/۹۲              | ۰/۶۶ | ۲-۴          | ۰/۷۶ | -۲۷/۷۶              | ۱/۴۵ |
| تبریز    | ۰۰ Feb/۹     | ۶/۱۹                     | ۶/۸۷ | ۴۱/۴۵               | ۰/۵۰ | ۴-۸          | ۰/۷۶ | -۳۵/۸۹              | ۳/۵۱ |
| کرمان    | ۱۲ Feb/۸     | ۱/۰۳                     | ۱/۴۱ | ۱۳/۰۳               | ۰/۹۱ | ۵-۷          | ۰/۸۳ | -۳۱/۸۴              | ۲/۲۳ |
| تهران    | ۰۰ Feb/۸     | ۱/۵۹                     | ۱/۸۷ | -۲۸/۳۱              | ۰/۵۷ | ۴-۸          | ۰/۸۹ | -۲۰/۵۵              | ۳/۳۷ |

### ۲.۳. کاربری پارامترهای استوکس

پس از جداسازی جریان زمینه، به منظور پرهیز از تأثیرات سرعت‌های بیشینه بر نتایج (اسپیگا و همکاران، ۲۰۰۸)، نمایه قائم به دو بخش در بالای منطقه جت در پوشش سپهر (۱۴ تا ۲۷ کیلومتر) و پایین منطقه جت در ورسپهر (۳ تا ۹ کیلومتر) تقسیم شد. مشخصه‌های موج برآوردشده با استفاده از پارامترهای استوکس در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده‌اند.

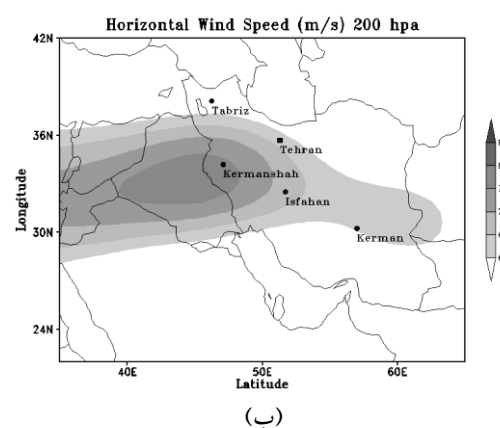
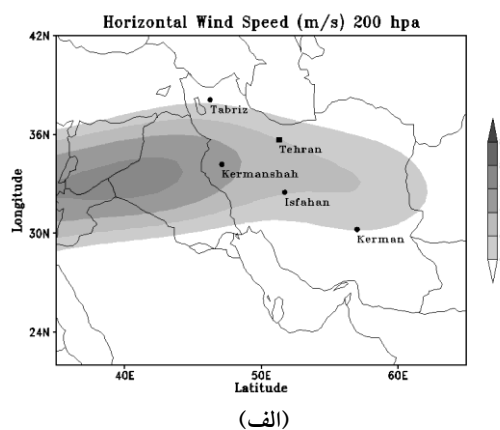
مقایسه مقادیر برآوردشده از دو روش اعمال صافی لنکروس و برازش چندجمله‌ای درجه ششم برای همه پارامترها، نشان می‌دهد که استفاده از برازش چندجمله‌ای درجه ششم به پراکندگی بیشتری در مقادیر ویژگی‌های موج (به خصوص در ورسپهر) می‌انجامد، در حالی که نتایج استفاده از صافی با پنجره مناسب (پس از تحلیل نمایه)، پراکندگی کمتری دارند.

مقادیر به دست آمده برای بسامد ذاتی  $\omega$  (نزدیک به بسامد کوریولیس) مؤید آن است که ماهیت این روش همانند روش شتاب‌نگار، ناتوان از تخمین طیف موج گرانی-لختی با بسامد بالاست (امیرامجدی و همکاران، ۱۳۹۳ ب؛ پلوگونون و همکاران، ۲۰۰۳).

جهت‌گیری انتشار موج ( $\varphi$ ) در اینجا به مقادیر منفی (راستای شمال شرقی - جنوب غربی) تمایل شایان توجهی دارد که در مقایسه با برآوردهای مستقیم آن با روش واگرایی باد افقی (امیرامجدی و همکاران، ۱۳۹۳ الف) بیشتر به سمت راست متمایل است. این اختلاف می‌تواند ناشی از اثر تغییرات باد زمینه، در داده‌های مشاهداتی باشد.

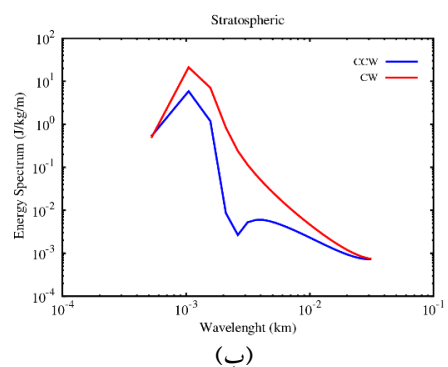
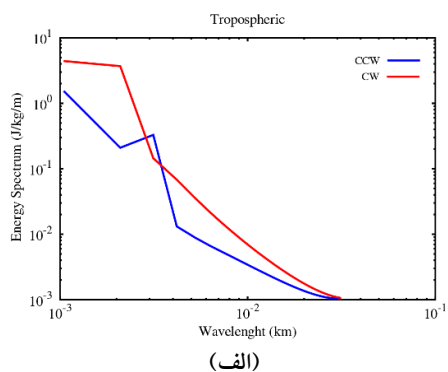
همان‌طور که در بخش ۲ اشاره شد، پارامترهای

استوکس قادر به نمایش جهت انتشار موج نیستند. بنابراین لازم است از روش‌های دیگری به صورت مکمل استفاده شود. در پژوهش حاضر برای تعیین بالاسو یا پایین‌سو بودن جهت انتشار انرژی، از روش طیف چرخشی استفاده شد. در برآورد جهت‌گیری با روابط متعارف این روش، ابتدا لازم است داده‌های خام با تبدیل فوری سریع (FFT) پالایش شوند (دو مرتبه تبدیل فوری به صورت مستقیم و دو مرتبه در جهت وارون). پس از آن یک تبدیل فوری دیگر برای بازیابی و در مجموع پنج مرتبه کاربری تبدیلات لازم است (وینست، ۱۹۸۴). اِکرمن (۱۹۹۶) نشان داد چنانچه از پارامترهای استوکس در این راستا استفاده شود، تنها دو تبدیل فوری کافی است. نتایج کاربری روش طیف چرخشی در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. در این تصاویر ملاحظه می‌شود که انتشار بالاسوی انرژی در پوشش سپهر زیرین بر انتشار پایین‌سوی آن غالب است (شکل ۷-الف). همین وضعیت به طور مشابه در ورسپهر نیز در حالی برقرار است که چگالی انرژی بالاسو از مقدار پایین‌سوی آن بسیار بزرگ‌تر است (شکل ۷-ب). بر این اساس نتیجه می‌شود که باید یک چشمه بزرگ انرژی در سطح زمین وجود داشته باشد. این در حالی است که چگالی انرژی پایین‌سو در ورسپهر با انرژی بالاسو در پوشش سپهر تقریباً برابر است و می‌تواند منتسب به جریان جتی ورسپهر باشد. از طرف دیگر، برای ایستگاه‌هایی که به رگه جتی (Jet Streak) نزدیک‌ترند (شکل ۹) سهم بیشتری از انرژی پایین‌سو در ورسپهر وجود دارد که حتی با انرژی بالاسو قابل مقایسه است (شکل ۸-الف).

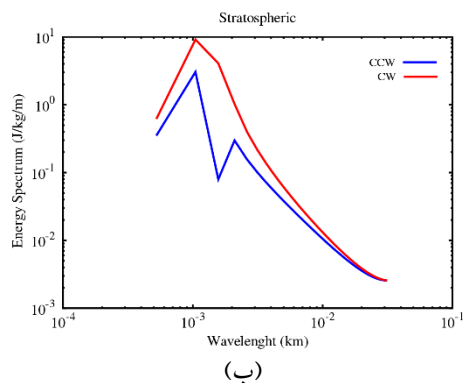
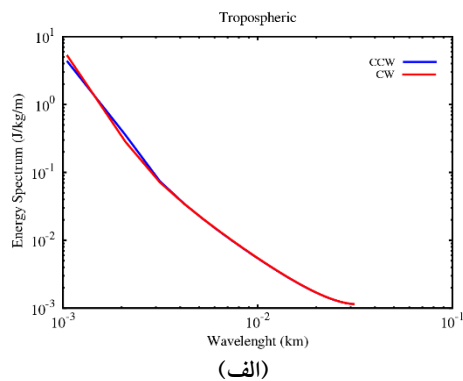


شکل ۹. میدان سرعت افقی در تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال حاصل از داده‌های NCEP (سایه‌روشن با بازه پربندی  $5 \text{ ms}^{-1}$  برای مقادیر بزرگ‌تر از  $60 \text{ ms}^{-1}$ ) برای (الف) ۰۰ UTC و (ب) ۱۲ UTC روز ۸ فوریه.

در ادامه، انرژی جنبشی و پتانسیل موج در وردسپهر و پوشش سپهر زیرین طبق رابطه ۱۱ محاسبه شد (جدول ۳). مقادیر بزرگ انرژی پتانسیل موج در وردسپهر نیز شاهد دیگری بر ادعای وجود کوهساری به عنوان چشمه اصلی انتشار امواج گرانی-لختی در این مطالعه موردی است. اما در پوشش سپهر زیرین نسبت انرژی پتانسیل موج به انرژی جنبشی آن کمتر از ۱ است، زیرا بیشتر انرژی موج موجود در وردسپهر ضمن عبور از محل استقرار جریان جتی، تضعیف می‌شود و تنها چشمه درخور توجه انرژی امواج در پوشش سپهر زیرین، جریان جتی وردسپهر است.



شکل ۷. طیف انرژی چرخشی رسم شده (در مقیاس لگاریتمی) برای ایستگاه اصفهان در ۱۲ UTC روز ۸ فوریه مربوط به (الف) وردسپهر و (ب) پوشش سپهر زیرین (رنگ قرمز: طیف ساعت گرد متناسب با انتشار بالاسوی انرژی؛ رنگ آبی: طیف پادساعت گرد متناسب با انتشار پایین‌سوی انرژی).



شکل ۸. مشابه شکل ۷ برای ایستگاه تهران در ۰۰ UTC روز ۸ فوریه.

جدول ۳. چگالی انرژی جنبشی پرتشیدگی باد مداری ( $E_{Kz}$ ) و نصف‌النهاری ( $E_{Km}$ ) و انرژی پتانسیلی ( $E_P$ ) موج با واحد  $m^2s^{-2}$ .

| ایستگاه  | زمان / UTC | وردسپهر   |       |          |          |             | پوشن سپهر زیرین |       |          |          |             |
|----------|------------|-----------|-------|----------|----------|-------------|-----------------|-------|----------|----------|-------------|
|          |            | $E_P/E_K$ | $E_P$ | $E_{Km}$ | $E_{Kz}$ | Window (km) | $E_P/E_K$       | $E_P$ | $E_{Km}$ | $E_{Kz}$ | Window (km) |
| اصفهان   | ۱۲ Feb/ ۸  | ۴-۸       | ۴/۹۶  | ۱/۰۲     | ۹۳۳/۹۱   | ۱۵۶/۳۱      | ۲-۵             | ۱۱/۷۴ | ۳/۱۰     | ۳/۷۴     | ۰/۵۲۵       |
| کرمانشاه | ۰۰ Feb/ ۸  | ۴-۸       | ۱۲/۴۱ | ۵/۹۳     | ۹۳۶/۵۱   | ۵۲/۵۲       | ۲-۴             | ۴/۰۴  | ۵/۴۰     | ۰/۰۴     | ۰/۰۰۵       |
| تبریز    | ۰۰ Feb/ ۹  | ۴-۸       | ۱/۷۴  | ۰/۰۹     | ۳۳۵/۹۱   | ۱۸۳/۲۵      | ۴-۸             | ۲/۰۲  | ۱/۳۹     | ۰/۱۶     | ۰/۰۴۶       |
| کرمان    | ۱۲ Feb/ ۸  | ۵-۷       | ۲/۷۱  | ۱/۱۶     | ۱۶۰/۰۹   | ۴۱/۳۵       | ۵-۷             | ۱/۶۱  | ۲/۹۹     | ۲/۷۱     | ۰/۵۸۹       |
| تهران    | ۰۰ Feb/ ۸  | ۴-۸       | ۱۰/۲۷ | ۳/۱۷     | ۷۲۶/۱۲   | ۵۴/۰۲       | ۴-۸             | ۴/۶۲  | ۱/۴۲     | ۰/۰۲     | ۰/۰۰۴       |

#### ۴. نتیجه گیری

گرفته شد. کاربست روابط ۹ و ۱۰ به جای روابط متعارف این روش، این مزیت را دارد که به جای پنج بار استفاده از تبدیل فوریه، تنها با دو بار استفاده از آن می‌توان به پاسخ مناسب رسید. روش طیف چرخشی نشان داد که در رخداد مورد مطالعه، انتشار بالاسوی انرژی در پوشن سپهر و به‌خصوص در وردسپهر بر انتشار پایین‌سوی آن غالب است. همچنین نسبت انرژی پتانسیل تخمین زده شده به انرژی جنبشی در وردسپهر بزرگ‌تر از ۱ است. به عبارت دیگر، باید یک چشمه بزرگ انرژی در وردسپهر وجود داشته باشد که با نتایج شبیه‌سازی عددی نیز سازگار است. از طرف دیگر، در پوشن سپهر زیرین این نسبت کمتر از ۱ است، زیرا بیشتر انرژی موجود در وردسپهر پیش از ورود به پوشن سپهر توسط جریان جتی جذب می‌شود و تنها منبع انرژی آن جریان جتی وردسپهر است.

#### مراجع

امیرامجدی، م.، محب‌الحجه، ع. و میرزائی، م.، ۱۳۹۳ الف، شبیه‌سازی عددی امواج گرانی-لختی با استفاده از مدل WRF: مطالعه موردی بر روی ایران، م. فیزیک زمین و فضا، ۴۰(۱)، ۱۴۹-۱۶۶.

امیرامجدی، م.، محب‌الحجه، ع. و میرزائی، م.، ۱۳۹۳ ب، عدم قطعیت در تعیین امواج گرانی-لختی در یک بررسی موردی روی ایران، م. ژئوفیزیک ایران، ۸(۱)، ۱۳-۳۲.

در این مطالعه، ابتدا با کاربست روش تحلیل موجک بر روی نمایه قائم درونیابی شده (پیش از حذف جریان زمینه) مشخص شد که طول موج قائم غالب در نمایه باد در بیشتر موارد بین ۴ تا ۸ کیلومتر (و در برخی موارد در پوشن سپهر زیرین ۲ تا ۴ کیلومتر) است. برای مطالعه منسجم‌تر و پرهیز از اثر سرعت‌های بیشینه در منطقه جریان جتی (۹-۱۴ کیلومتر)، نمایه قائم به دو بخش وردسپهر (۳ تا ۹ کیلومتر) در بالای منطقه جت و پوشن سپهر زیرین (۱۴ تا ۲۷ کیلومتر) در زیر منطقه جت تقسیم شد. بررسی بسامد ذاتی حاصل از کاربست این روش نشان داد که همانند رسم شتاب‌نگار، کاربست پارامترهای استوکس نیز به‌طور عمده، تنها تخمین بخش کم بسامد طیف امواج گرانی-لختی ( $\omega < 5/f$ ) را ممکن می‌کند. مقادیر برآوردشده جهت‌گیری انتشار امواج در مقایسه با برآوردهای مستقیم آن با مدل میان‌مقیاس (امیرامجدی و همکاران، ۱۳۹۲، الف)، بیشتر به سمت راست متمایل هستند که احتمالاً به دلیل تغییرات باد زمینه است.

از طرف دیگر باید در نظر داشت که پارامترهای استوکس قادر به تمایز انتشار شرق سو (شمال سو) و غرب سو (جنوب سو) از یکدیگر نیست. همچنین این روش به تنهایی نمی‌تواند انتشار بالاسو و پایین‌سوی امواج را از یکدیگر تمیز دهد. بنابراین در کنار آن، روش طیف چرخشی به کار



- Eckermann, S. and Vincent, R., 1989, Falling sphere observations of gravity waves motions in the upper stratosphere over Australia, *Pure Appl. Geophys.*, 130, 509-532.
- Eckermann, S. D., 1996, Hodographic analysis of gravity waves: relationships among Stokes parameters, rotary spectra, and cross-spectral methods, *J. Geophys. Res.*, 101, 19169-19174.
- Lue, H. Y. and Kuo, F. S., 2012, Comparative studies of methods of obtaining AGW's propagation properties, *Ann. Geophys.*, 30, 557-570.
- Lue, H. Y., Kuo, F. S., Fukao, S. and Nakamura, T., 2013, Studies of gravity wave propagation in the mesosphere observed by MU radar, *Ann. Geophys.*, 31, 845-858.
- Serafimovich, A., Hoffmann, P., Peters, D. and Lehmann, V., 2005, Investigation of inertia-gravity waves in the upper troposphere/lower stratosphere over Northern Germany observed with collocated VHF/UHF radars, *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 295-310.
- Spiga, A., Teitelbaum, H. and Zeitlin, V., 2008, Identification of the sources of inertia-gravity waves in the Andes Cordillera region, *Ann. Geophys.*, 26, 2551-2568.
- Torrence, C. and Compo, G. P., 1998, A practical guide to wavelet analysis, *B. Am. Meteorol. Soc.*, 79, 61-78.
- Vincent, R. A., 1984, Gravity-wave motions in the mesosphere, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 46, 119-128.
- Vincent, R. and Fritts, D., 1987, A climatology of gravity wave motions in the mesopause region at Adelaide, Australia, *J. Atmos. Sci.*, 44, 748-760.
- 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.