

شناسایی مجرای امواج گرانی-لختی بر روی ایران در دوره ژانویه تا مارس ۲۰۱۶

میثم زارع احمدآبادی^۱، علیرضا محب الحجه^۲ و محمد میرزائی^{۳*}

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

۲. استاد، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

۳. استادیار، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۹۶/۱/۲۰، پذیرش نهایی: ۹۶/۸/۲)

چکیده

یکی از پدیده‌های مهم جوی امواج گرانی-لختی هستند که در انتقال انرژی و تکانه نقش بسیار مهمی ایفا می‌کنند. شرط لازم برای ماندگاری و انتشار افقی این امواج در جو، وجود مجرای موج یا موجبر است. در این پژوهش، از داده‌های با تفکیک بالای سامانه پیش‌بینی جهانی (GFS) برای تعیین مکان و زمان رخداد مجراهای امواج گرانی-لختی در دوره سه‌ماهه ژانویه تا مارس ۲۰۱۶ بر روی ایران استفاده شد. برای شناسایی مجرای موج، دو شرط برای امکان انتشار امواج در مجرا وجود دارد که مطابق آن مجرا باید از نظر ایستایی پایدار بوده و دارای ضخامت حداقل یک‌چهارم طول موج قائم مشاهداتی باشد. با کاربست این دو شرط در این بازه مطالعاتی، ضمن شناسایی ۱۰ مورد رخداد مجرای موج بر روی ایران، دو مورد از آن‌ها انتخاب شد. سپس با کاربست شرط وجود لایه‌ای ناپایدار یا بازتابنده در بالای مجرای موج، به‌عنوان شرط سوم برای این دو مورد مجرا و حذف نقاطی که این شرط را نداشتند، ویژگی‌های مجرای موج برای سایر نقاط برآورد شد. در ادامه، برای شناسایی امواج گرانی-لختی منتشرشده در مجرای موج، یک مورد انتخابی مجرا با مدل میان‌مقیاس WRF شبیه‌سازی شد. بررسی نتایج این شبیه‌سازی به شناسایی دو بسته‌موج گرانی-لختی منتشرشده در مجرای موج منجر گردید که ویژگی‌های این امواج به کمک ترسیم میدان واگرایی افقی سرعت تعیین شد. نتایج نشان داد که یک چهارم طول موج قائم به‌دست آمده برای دو بسته‌موج فوق کمتر از ضخامت لایه مجراست؛ این امر با شرط ضخامت برای تشکیل مجرای موج مطابقت خوبی دارد.

واژه‌های کلیدی: امواج گرانی-لختی، مجرای موج، مدل WRF، واگرایی سرعت افقی.

۱. مقدمه

مورد توجه پژوهش حاضر است، به‌طور کلی مجرای موج، محیط بزرگ‌مقیاسی است که به‌مثابه لایه پایدار برآمده تعریف می‌شود (ناپو، ۲۰۰۲). مجرای موج، امواج گرانی-لختی‌ای را دربرمی‌گیرد که شرایط انتشار در آن لایه پایدار (مجرای موج) را داشته باشند و در محیط‌های بزرگ‌مقیاس برای فرابازتاب، تقویت و نگهداری امواج مناسب باشد. در غیاب این لایه پایدار قوی، امکان انتشار قابل توجه امواج گرانی-لختی وجود ندارد. وجود این لایه پایدار برای حضور بلندمدت امواج گرانی-لختی با دامنه بزرگ ضروری است (ناپو، ۲۰۰۲). مجراهای موجی که در جو تشکیل می‌شوند دو نوع مجرای موج دمایی و مجرای موج بادی هستند. ناپو (۲۰۰۲) ساده‌ترین مجرای موج در جو را مجرای موج دمایی تعریف کرد که به‌وسیله یک ناپوستگی در آهنگ افت دما ایجاد می‌شود و نشان

نوسانات آرمینگراد حاصل از دو واداشت شناوری و کوریولیس دارای بسامدی بین بسامد لختی و کوریولیس هستند که به آن‌ها امواج گرانی-لختی می‌گویند. این امواج از طریق انتقال انرژی و تکانه در راستای افقی و قائم بسیاری از پدیده‌های جوی را تحت تأثیر قرار می‌دهند و انرژی را از محل تولیدشان در سراسر جو منتشر می‌کنند (هولتون، ۲۰۰۴). شرط لازم برای ماندگاری و انتشار افقی امواج گرانی آشکار شده در جو، وجود لایه‌ای در وردسپهر زیرین به نام مجرای موج (Wave Duct) است که در واقع مجرا به‌منزله موجبر عمل کرده و انرژی موج را به دام می‌اندازد (ناپو، ۲۰۰۲).

سازوکار مجراسازی موج با بازتاب موج منتشرشده از لایه‌ای در نزدیکی سطح زمین و تداخل سازنده آن با موج منتشرشده اولیه فراهم می‌شود. در وردسپهر زیرین که

داد سرعت گروه امواج منتشرشده در مجرای دمایی با عمق لایه مجرا رابطه عکس دارد. مجرای موج بادی مجرای رایجی در سراسر جو است. چیموناس و هاینز (۱۹۸۶) برای اولین بار این مجرا را مجرای تعریف کردند که از طریق یک جت باد زمینه در جهت انتشار موج ایجاد می‌شود. منطقه بیشینه سرعت جت می‌تواند یک منطقه مجرا باشد که باعث تقویت، تشدید و تداوم (مجراسازی) امواج گرانی شود. در دو طرف دیگر منطقه بیشینه سرعت جت، امواج گرانی از بین می‌روند که به‌عنوان منطقه ناپایدار تعریف می‌شود (ناپو، ۲۰۰۲).

لیندزن و تونگ (۱۹۷۶) با مطالعه نظری مجرای امواج گرانی-لختی، شرایط لازم را برای تشکیل مجرای موج مناسب به‌صورت زیر بیان کردند:

- لایه مجرای موج باید از نظر ایستایی پایدار باشد؛ به عبارتی مجذور بسامد شناوری باید مثبت باشد تا انتشار موج در مجرا امکان‌پذیر باشد.

- مجرا باید به اندازه کافی ضخامت داشته باشد تا بتواند یک‌چهارم طول موج قائم مربوط به سرعت فاز موج مشاهده‌شده را در خود جای دهد. در صورتی که منطقه پایدار ضخامتی کمتر از یک‌چهارم طول موج قائم داشته باشد، جو نمی‌تواند مجرای موج لازم را برای موج ایجاد کند.

- بالای لایه مجرا باید یک لایه بازتابنده قوی وجود داشته باشد که از نظر ایستایی ناپایدار یا دارای پایداری بسیار کمتری از لایه مجرا باشد. در صورتی که لایه ناپایدار (لایه دوم) بازتابنده ضعیف باشد، انرژی موج از طریق انتشار قائم از بین می‌رود. اگر لایه دوم بازتابنده خوبی باشد حداقل در دو چرخه انرژی موج را نگه می‌دارد. برای امواج بلند لازم است که ضریب بازتاب حداقل ۰.۸۵ باشد.

- سرعت باد در مجرا نمی‌تواند برابر با سرعت فاز موج باشد. در صورتی که این دو برابر شوند یک سطح بحرانی در منطقه پایدار با عدد ریچاردسون بزرگ‌تر از یک‌چهارم ایجاد می‌شود. این سطح بحرانی باعث جذب

همه انرژی امواج در همان لایه می‌شود. در مورد مجرای امواج گرانی-لختی مطالعاتی به‌صورت نظری و مشاهداتی انجام گرفته است. تیر (۱۹۵۰) مدلی دولایه‌ای را تعریف کرد که در آن امواج افقی در امتداد مرز دو لایه منتشر می‌شوند و آن‌ها را «امواج در یک وارونگی» نامید. لیندزن و تونگ (۱۹۷۶) به مطالعه نظری مجرای امواج گرانی-لختی پرداختند و با بررسی مجرا به‌وسیله یک وارونگی به این نتیجه رسیدند که برای سرعت‌های فاز مناسب (حدود ۲۵ متر بر ثانیه) در مجرا، ضریب بازتاب کوچک می‌شود و یک وارونگی به‌تنهایی نمی‌تواند مجرای مناسبی برای امواج گرانی-لختی باشد و انرژی امواج را مهار کند. آن‌ها در عوض موفق به شناسایی یک مجرای پایدار نزدیک زمین شدند که روی آن یک لایه ناپایدار یا بازتابنده قرار داشت. آن لایه ناپایدار باعث می‌شود امواجی که در راستای قائم منتشر شده‌اند، بازتاب و به‌صورت افقی با کاهش انرژی کمی انتشار یابند. یوسلینی و کاک (۱۹۸۷)، با مطالعه مشاهداتی امواج گرانی-لختی، یک وارونگی دمایی شدید در وردسپهر زیرین و یک رگه جت که به سمت محور پشته مرتبط با این امواج جابه‌جا می‌شد در وردسپهر زیرین مشاهده کردند. حضور مداوم این وارونگی و سرعت فاز امواج مشاهداتی، با نتایج مطالعات نظری برای مجرای موج توسط لیندزن و تونگ (۱۹۷۶) هماهنگی داشت. اشنایدر (۱۹۹۰) و کاک و اهانلی (۱۹۷۷) نتیجه گرفتند هنگامی که لایه بالایی بسیار ناپایدار و لایه پایینی (مجرا) بسیار پایدار باشد، بیشینه تشدید دامنه موج اتفاق می‌افتد. پاورز و رید (۱۹۹۳) ساختار مجرا را در نمودار Skew-T داده‌های مشاهداتی و داده‌های حاصل از خروجی مدل MM4 مقایسه کردند. داده‌های حاصل از مدل، هرچند سرعت‌های باد را بیشتر از داده‌های واقعی نشان داد اما از نظر ساختار مجرا به مشاهدات نزدیک بود.

با توجه به این که امواج گرانی-لختی نقش مهمی در انتشار انرژی و تکانه در راستای افقی و قائم جو ایفا می‌کنند، شناخت سازوکارهای تولید و انتشار این امواج از اهمیت

۲. شناسایی مجرای امواج گرانی-لختی

۲-۱. داده و روش کار

در این پژوهش، داده‌های سامانه پیش‌بینی جهانی (Global Forecast System) با تفکیک $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ در دو راستای طول و عرض جغرافیایی برای بازه مطالعاتی ژانویه تا مارس ۲۰۱۶ تهیه شده است. گام زمانی این داده‌ها که روی ۲۶ سطح فشاری در راستای قائم قرار دارند، هر ۶ ساعت و ۴ بار در روز است. برای شناسایی مجرا در وردسپهر زیرین، سطوح فشاری ۱۰۰۰ تا ۴۰۰ هکتوپاسکال در نظر گرفته شده است.

با توجه به مطالعه نظری لیندزن و تونگ (۱۹۷۶)، در جو باید شرایطی برای تشکیل یک مجرای موج مناسب برقرار باشد. اولین شرط که در اکثر مطالعات پس از شناسایی موج گرانی-لختی به آن پرداخته شده، بررسی پایداری لایه مجرای موج از نظر ایستایی است تا انتشار موج در آن امکان‌پذیر باشد. بنابر دومین شرط، مجرای موج باید ضخامت کافی داشته باشد تا یک‌چهارم طول موج قائم مربوط به سرعت فاز موج در آن قرار بگیرد که در مطالعات کمتر به آن اهمیت داده شده است. دو شرط مذکور اجازه انتشار اولیه موج را در مجرا می‌دهند که در این مطالعه ابتدا به شناسایی اولیه مجرا با این دو شرط، به‌عنوان دو شرط اصلی، پرداخته می‌شود. به منظور بررسی شرط پایداری لایه مجرا، نقاطی که دارای لایه‌های هم‌دما و وارونگی دما هستند به‌عنوان نقاط نامزد برای شرط پایداری لایه مجرا در نظر گرفته می‌شوند. عسگری (۱۳۹۴) در مطالعه‌ای مشاهداتی در شناسایی و شبیه‌سازی امواج گرانی-لختی بر روی ایران، امواجی را شناسایی کرد که دارای طول موج قائم در محدوده ۴ تا ۹ کیلومتر بودند. در ادامه با بررسی نمودار Skew-T برای امواج شناسایی شده، در همه موارد ضخامت لایه مجرا را کمتر از یک‌چهارم طول موج قائم امواج مجراسازی شده به دست آورد؛ به طوری که برای کمترین طول موج قائم (۴ کیلومتر) ضخامت لایه ۸۵۸ متر و برای بیشترین طول موج قائم (۹ کیلومتر) ۷۷۲ متر محاسبه شد. به همین منظور در

خاصی برخوردار است. تاکنون بیشتر مطالعات انجام گرفته بر روی امواج گرانی-لختی بر سازوکارهای تولید این امواج و همچنین شناسایی چشمه‌های این امواج در جو متمرکز بوده است؛ در حالی که انتشار امواج و برهمکنش آن‌ها با محیط زمینه نیز بسیار مهم است. یکی از عوامل تقویت و نگهداشت امواج گرانی-لختی برای مدت طولانی در جو قرار گرفتن آن‌ها در مجرای موج است؛ بنابراین شناسایی مجرای موج و مطالعه ساختار آن می‌تواند به درک بهتر چرخه زندگی امواج گرانی-لختی بلنددامنه کمک کند. علاوه بر موارد ذکر شده برای ضرورت علمی مطالعه مجراسازی امواج گرانی-لختی در سطح بین‌المللی، ضمن شناسایی این امواج، محیط انتشار موج (مجرا) به صورت نقطه‌ای و ایستگاهی بررسی شده است (اشنایدر، ۱۹۹۰؛ کاک و اهالنلی، ۱۹۷۷؛ مونسرات و تورپ، ۱۹۹۶). در ایران نیز مطالعات محدودی روی این امواج و مجرای آن‌ها انجام گرفته است. برای نمونه عسگری (۱۳۹۴) ضمن مطالعه امواج گرانی-لختی، تنها برای چند نقطه ایستگاهی، شرایط را برای رخداد امواج گرانی-لختی بررسی کرد؛ نتایج نشان داد یک‌چهارم طول موج قائم از عمق لایه مجرا بیشتر بود و بنابراین با شرط دوم لیندزن و تونگ (۱۹۷۶) مغایرت داشت. از این رو در این پژوهش شناسایی مجرای امواج گرانی-لختی در وردسپهر زیرین برای دوره سه‌ماهه ژانویه تا مارس ۲۰۱۶ بر روی ایران مورد مطالعه قرار می‌گیرد. ساختار این مقاله به این صورت است که ابتدا در بخش دوم، با توضیح روش اجرای تحقیق و کاربست شرایط لازم برای مجراسازی، موارد رخداد مجرای موج شناسایی می‌شود. در بخش سوم، به تحلیل آماری مجرای موج به صورت درصد رخداد ماهیانه، دوره سه‌ماهه و جداگانه برای شب و روز پرداخته می‌شود. در ادامه، نتایج شبیه‌سازی یک مورد انتخابی از رخدادهای مجرای موج به کمک مدل WRF در بخش چهارم و در نهایت نتیجه‌گیری این پژوهش در بخش پنجم آمده است.

بر روی سطح زمین بر روی خشکی در طول فصل زمستان، امکان شکل‌گیری لایه پایدار برآمده را ضعیف‌تر می‌کند.

در این مقاله، تحول مکانی و زمانی دو مورد مجرای موج از موارد مذکور بررسی می‌شود. جزئیات این دو مورد در پایان‌نامه زارع احمدآبادی (۱۳۹۵) آورده شده که خواننده می‌تواند به آن مراجعه کند و در اینجا برای رعایت اختصار فقط توصیف کلی تحول زمانی ارائه می‌شود. مورد اول، مجرای موج گسترده‌ای است که در UTC ۰۶:۰۰ روز ۲۸ ژانویه روی عربستان شکل گرفته و بخشی از آن خلیج فارس، سواحل آن، قسمتی از کویت و جنوب عراق را شامل می‌شود. این مجرا در ساعات اولیه روز بعد (UTC ۰۰:۰۰ روز ۲۹ ژانویه) روی خلیج فارس و جنوب غرب ایران گسترش چشمگیری می‌یابد (شکل ۱-الف). در ادامه، مجرا تا ۶ ساعت بعد، در نواحی جنوب و جنوب شرق به صورت پراکنده تشکیل و سپس کاملاً تضعیف می‌شود. برای مورد دوم، دو عدد مجرای موج، یکی روی دریای خزر و دیگری روی خلیج فارس، در ساعت UTC ۰۶:۰۰ روز ۲۶ مارس تشکیل می‌شوند (شکل ۱-ب). بعد از ۶ ساعت، هر دو مجرا تضعیف شده و سپس در ساعت UTC ۱۲:۰۰ همان روز تقویت می‌شوند. در ادامه و به‌طور کلی در ساعات بعد، مجرای موج رخ داده روی دریای خزر تضعیف اما مجرای موج روی خلیج فارس، به تناوب، تقویت و تضعیف می‌شود. در بررسی شرط سوم برای مورد اول (در ساعت UTC ۰۰:۰۰ روز ۲۹) الگوی مجرا برای نقاطی که میانگین مجذور بسامد شناوری در لایه بالای مجرا کمتر از نصف میانگین آن در لایه مجرا باشد رسم شده است (شکل ۱-ب). مطابق این شکل، مجرای موج کوچک در سمت راست زیر منطقه ورودی مجرا و نقاط پراکنده زیر مجرا به‌طور کامل حذف شده و الگوی نهایی مجرا با تقریب خوبی حفظ می‌شود. برای نمایش ویژگی‌های مجرای مشخص شده در شکل ۱-ب، طرحواره‌ای از مدل دولایه‌ای لایه مجرا و لایه بازتابنده در شکل ۲ رسم شده

این مطالعه، برای بررسی شرط دوم (ضخامت)، کمینه ضخامت لایه‌های پایدار ۵۰۰ متر در نظر گرفته می‌شود تا نقاط بیشتری را پوشش دهد؛ توجه شود که این کمینه ضخامت هم خود برای به‌دام‌انداختن امواجی با طول موج قائم کوچک‌تر از ۲ کیلومتر توانایی دارد.

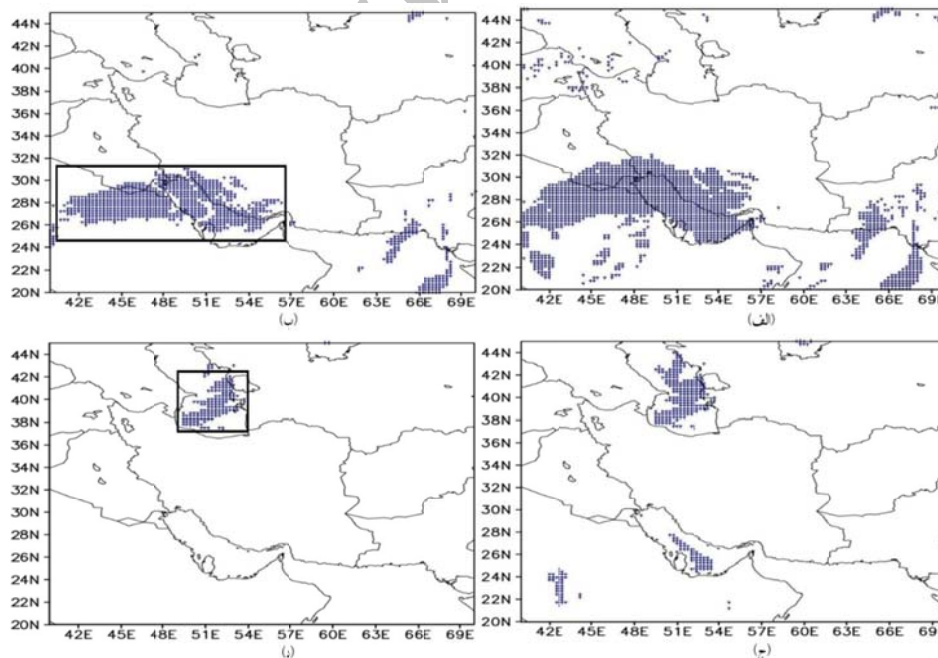
سومین شرط، وجود لایه بازتابنده بالای لایه مجرای موج است. این لایه مانع از انتشار قائم موج شده و به بازتاب موج و انتشار افقی آن منجر می‌شود. بنابراین بعد از شناسایی اولیه مجرای امواج گرانی-لختی با دو شرط پایداری و ضخامت، شرط وجود لایه بازتابنده در بالای لایه مجرا بررسی شده است. به این ترتیب که ابتدا لایه‌ای به عمق ۲۰۰ هکتوپاسکال، به‌عنوان لایه بازتابنده بالای لایه مجرا در نظر گرفته و سپس میانگین مجذور بسامد شناوری برای تمام نقاط لایه مجرا و لایه بالای آن محاسبه می‌شود. در نهایت نقاطی به‌عنوان مجرا در نظر گرفته می‌شود که پارامتر پایداری (مجذور بسامد شناوری) در لایه بالای مجرا کمتر از نصف مقدار آن در لایه مجرا باشد.

۲-۲. کاربست شرایط تشکیل مجرا

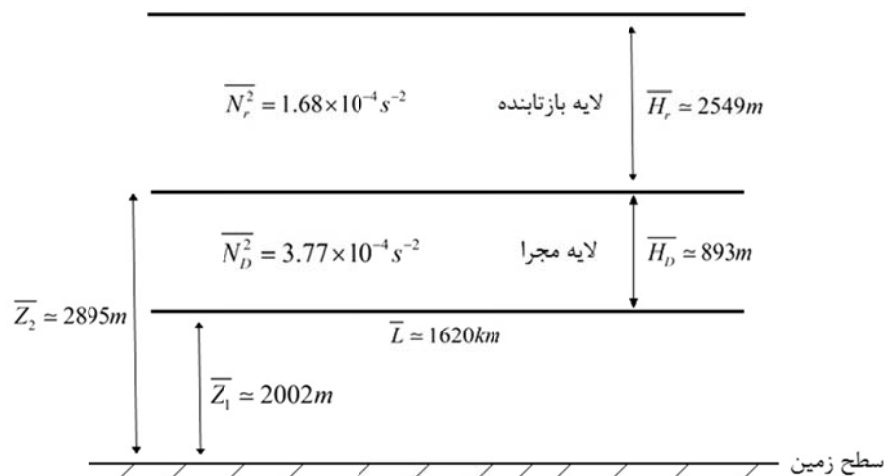
با کاربست دو شرط پایداری و ضخامت، موارد مجرا به‌ترتیب برای ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس ۲۰۱۶ شناسایی شد. از موارد شناسایی شده، مواردی که دارای گستردگی مکانی و زمانی بزرگ‌تری بودند، به‌عنوان مجرای موج گرانی-لختی در نظر گرفته شدند. به این ترتیب که در این بازه مطالعاتی، ۱۰ مورد مجرای موج شناسایی شد که سه مورد آن در ماه ژانویه، چهار مورد در ماه فوریه و سه مورد دیگر در ماه مارس بودند. مجراهای موج شناسایی شده در این بازه مطالعاتی به‌طور عمده بر روی نواحی دریای خزر و سواحل آن، شمال و شمال شرق ایران و خلیج فارس شکل گرفتند. به‌عبارتی مجرای بارزی داخل فلات ایران مشاهده نشد که دلیل آن احتمالاً مربوط به تفاوت وضعیت لایه مرزی بر روی خشکی و دریا در فصل زمستان است. شکل‌گیری لایه نازکی از هوای سرد

ویژگی‌های مجرای مشخص شده در شکل ۱-د در جدول ۱ آورده شده است. مطابق جدول ۱، برای مجرای مورد دوم، میانگین طول افقی مجرا ۴۳۰ کیلومتر، ارتفاع میانگین کف لایه مجرا از سطح زمین حدود ۱۵ متر، ارتفاع میانگین بالای لایه مجرا از سطح زمین حدود ۶۳۸/۵ متر، عمق میانگین لایه مجرا حدود ۶۲۳/۵ متر، عمق میانگین لایه بازتابنده حدود ۱۵۸۹ متر، میانگین مجذور بسامد شناوری در لایه مجرا حدود $۴/۰۲ \times 10^{-۴}$ بر مجذور ثانیه و میانگین مجذور بسامد شناوری در لایه بازتابنده حدود $۱/۴۸ \times 10^{-۴}$ بر مجذور ثانیه است. ارتفاع بسیار کم میانگین کف لایه مجرا از سطح و همچنین مقادیر میانگین مجذور بسامد شناوری در لایه مجرا و لایه بازتابنده، نشان‌دهنده تشکیل لایه‌ای با پایداری شدید (لایه مجرا) در نزدیکی سطح دریا است که روی آن لایه‌ای با پایداری بسیار کم (لایه بازتابنده) وجود دارد. این شرایط برای تشکیل مجرای موجی که بیشینه تشدید دامنه موج در آن رخ دهد، بسیار مناسب است.

است. مطابق این شکل، میانگین طول افقی مجرا ۱۶۲۰ کیلومتر، ارتفاع میانگین کف لایه مجرا از سطح زمین حدود ۲۰۰۲ متر، ارتفاع میانگین بالای لایه مجرا از سطح زمین حدود ۲۸۹۵ متر، عمق میانگین لایه مجرا حدود ۸۹۳ متر، عمق میانگین لایه بازتابنده حدود ۲۵۴۹ متر، میانگین مجذور بسامد شناوری در لایه مجرا حدود $۳/۷۷ \times 10^{-۴}$ بر مجذور ثانیه و میانگین مجذور بسامد شناوری در لایه بازتابنده حدود $۱/۶۸ \times 10^{-۴}$ بر مجذور ثانیه به دست آمده است (جدول ۱). نتیجه کاربست شرط سوم در مجرای مورد دوم (در ساعت ۰۶:۰۰ UTC روز ۲۶)، برای نقاطی که میانگین مجذور بسامد شناوری در لایه بالای مجرا کمتر از نصف میانگین آن در لایه مجرا باشد، در شکل ۱-د رسم شده است. با کاربست این شرط، قسمتی از منطقه شمالی مجرا، در مقایسه با حالت قبل که این شرط وجود ندارد (شکل ۱-ج)، حذف می‌شود و همین‌طور مجرای کوچک تشکیل شده روی خلیج فارس به‌طور کامل از بین می‌رود که نشان‌دهنده نبود لایه بازتابنده قوی روی لایه مجراست (شکل ۱-د).



شکل ۱. نقشه‌های الگوی مجرا؛ الف: برای ساعت ۰۰ UTC روز ۲۹ ژانویه ۲۰۱۶ بدون در نظر گرفتن شرط سوم (وجود لایه ناپایدار بالای لایه مجرا) و ب: همراه با کاربست شرط سوم برای شکل (الف)، به‌طوری‌که میانگین مجذور بسامد شناوری در لایه بازتابنده کمتر از نصف مقدار آن در لایه مجرا باشد. (ج) مشابه شکل (الف) برای ساعت ۰۶ UTC روز ۲۶ مارس ۲۰۱۶ و (د) مشابه شکل (ب) برای ساعت ۰۶ UTC روز ۲۶ مارس ۲۰۱۶.



شکل ۲. طرح‌های از لایه مجرا و لایه بازتابنده مربوط به مجرای مشخص شده در شکل ۱-ب؛ \bar{L} میانگین طول افقی مجرا، \bar{Z}_1 و \bar{Z}_2 به ترتیب ارتفاع میانگین کف و بالای لایه مجرا از سطح زمین، \bar{H}_D و \bar{H}_r به ترتیب عمق میانگین در لایه مجرا و لایه بازتابنده، و \bar{N}_D^2 و \bar{N}_r^2 به ترتیب میانگین مجذور بسامد شناوری در لایه مجرا و لایه بازتابنده هستند.

جدول ۱. ویژگی‌های مجرای امواج گرانی-لختی بر مبنای کمیت‌های مشاهده‌شده.

مورد	زمان	\bar{L} (km)	\bar{Z}_1 (m)	\bar{Z}_2 (m)	\bar{H}_D (m)	\bar{H}_r (m)	\bar{N}_D^2 ($10^{-4}s^{-2}$)	\bar{N}_r^2 ($10^{-4}s^{-2}$)
اول	۰۰:۰۰ UTC روز ۲۹ ژانویه	۱۶۲۰	۲۰۰۲	۲۸۹۵	۸۹۳	۲۵۴۹	۳/۷۷	۱/۶۸
دوم	۰۶:۰۰ UTC روز ۲۶ مارس	۴۳۰	۱۵	۶۳۸	۶۲۳	۱۵۸۹	۴/۰۲	۱/۴۸

۳. تحلیل آماری مجرای موج

در این بخش از پژوهش، درصد رخداد‌های مجرای امواج گرانی-لختی برای ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس ۲۰۱۶ و همچنین درصد رخداد دوره سه‌ماهه ژانویه تا مارس ۲۰۱۶ روی ایران بررسی شده است. درصد رخداد ماهیانه و دوره سه‌ماهه ابتدا با در نظر گرفتن دو شرط پایداری و ضخامت برای لایه مجرا و سپس افزودن شرط وجود لایه بازتابنده در بالای مجرا (شرط سوم) تعیین می‌شود. علاوه بر این، درصد رخداد‌های روزانه (در ساعت‌های ۱۲:۰۰ UTC و شبانه (در ساعت‌های ۰۰:۰۰ UTC) نیز برای کل روزهای این سه ماه (۹۱ روز) به دست آمده است.

در ماه ژانویه، با کاربست دو شرط پایداری و ضخامت، مجرای موج به‌طور میانگین در نواحی شرق، جنوب شرق، شمال، شمال غرب ایران و دریای خزر و سواحل آن و خلیج فارس رخ داده است. اکثر رخداد‌های مجرای موج در نواحی رشته کوه‌های البرز و زاگرس با مقدار حدود ۳۵ درصد شکل گرفته‌اند که احتمال دارد در فرایند مجراسازی امواج گرانی-لختی منتشر شده از کوه مؤثر باشند. با کاربست شرط سوم، درصد رخداد‌های مجرای موج ماه ژانویه در تمام نواحی‌ای که با دو شرط اول رخ داده بود، کاهش یافته است. این کاهش چنان است که فراوانی رخداد مجرا در نواحی شمال غرب، رشته کوه‌های زاگرس و خلیج فارس به کمتر از ۲۰ درصد کاهش

ماه مارس مقدار بیشتری در مقایسه با ماه ژانویه نشان می‌دهد و با کاربست شرط سوم کاهش کمتری دارد. به عبارتی، با کاربست شرط سوم، الگوی مکانی مجراهای تشکیل شده در شمال شرق تا حد خوبی باقی می‌ماند و گستردگی خود را حفظ می‌کند.

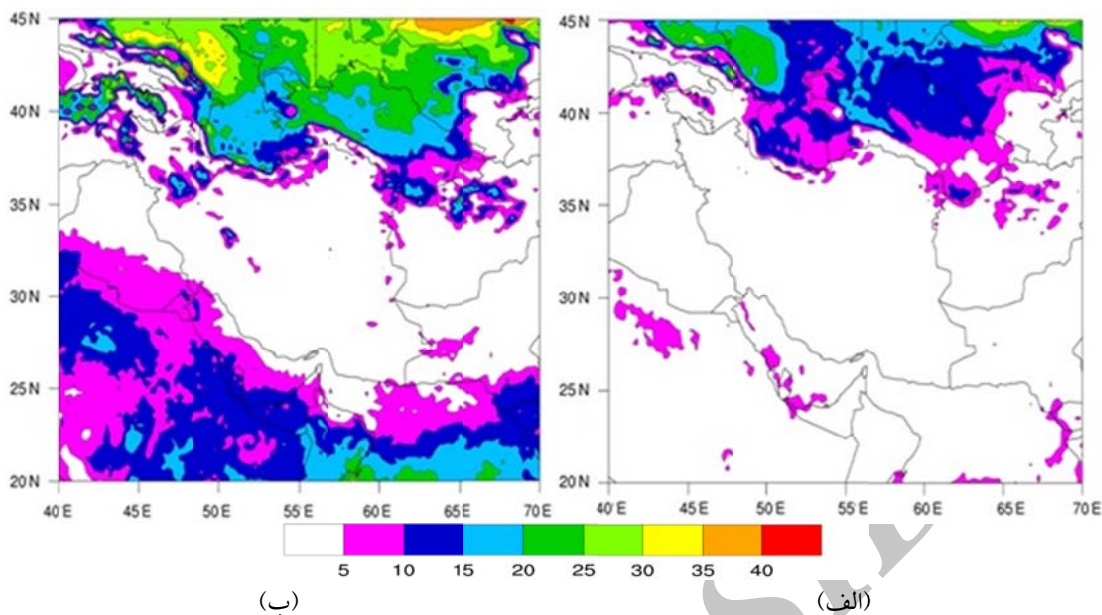
محاسبه درصد رخداد مجرای موج با کاربست دو شرط پایداری و ضخامت برای دوره سه‌ماهه ژانویه تا مارس ۲۰۱۶ نشان می‌دهد که به‌طور میانگین مجرای موج در نواحی شمال شرق، شمال، شمال غرب ایران، دریای خزر، سواحل آن و خلیج فارس رخ داده است. اکثر رخداد های مجرای موج در نواحی شمال دریای خزر با مقادیر ۳۰ تا ۳۵ درصد و بعد از آن در نواحی رشته کوه‌های البرز و زاگرس با مقادیر ۱۵ تا ۲۰ درصد شکل گرفته‌اند (شکل ۳-الف). با کاربست شرط سوم برای دوره سه‌ماهه، رخداد های مجرای موج در تمام نواحی نسبت به کاربست دو شرط اول کاهش نشان می‌دهد. این کاهش به گونه‌ای است که درصد رخداد در نواحی شمال غرب و نواحی رشته کوه‌های البرز و زاگرس تقریباً به صفر می‌رسد اما این مقدار در روی دریای خزر و شمال شرق ایران کاهش کمتری در مقایسه با نواحی مذکور نشان می‌دهد (شکل ۳-ب).

مقایسه درصد رخداد روزانه و شبانه مجرای امواج گرانی-لختی در دوره سه‌ماهه ژانویه تا مارس ۲۰۱۶ با در نظر گرفتن سه شرط لازم (پایداری، ضخامت و وجود لایه بازتابنده بالای لایه مجرا) برای تشکیل مجرای موج تعیین می‌شود. بدین منظور، درصد رخداد روزانه برای نتایج ساعت ۱۲:۰۰ UTC و درصد رخداد شبانه برای نتایج ساعت ۰۰:۰۰ UTC در طول ۹۱ روز دوره مطالعاتی به دست آمده‌اند. به‌طور کلی نتایج نشان داد که درصد رخداد مجرای موج در شب (۰۰:۰۰ UTC) بیشتر از روز (۱۲:۰۰ UTC) است.

می‌یابد. در مناطق شمالی و روی دریای خزر، با اعمال شرط سوم، میانگین رخداد مجرای موج در مقایسه با نواحی مذکور کمتر کاهش یافته است.

در ماه فوریه، مجرای موج به‌طور میانگین برای دو شرط پایداری و ضخامت مشابه ماه ژانویه و در همان مناطق رخ داده است. تفاوت این ماه با ماه ژانویه در مقدار و موقعیت بیشینه رخدادها است. بیشینه رخدادها روی مناطق شمالی دریای خزر (حدود ۴۵ درصد) در طول ۵۰ درجه شرقی و عرض ۴۸ درجه شمالی تشکیل شده است. در نواحی شمال غرب، درصد رخداد های مجرای موج حدود ۲۵ درصد است که در مقایسه با ماه قبل (ژانویه) حدود ۱۰ درصد کاهش نشان می‌دهد. درصد رخداد مجرای موج شرقی ایران رخ داده است. نتایج کاربست شرط سوم در ماه فوریه نشان‌دهنده کاهش میانگین رخداد مجرای موج در تمام نواحی در مقایسه با ماه قبل بوده که در برخی مناطق این مقدار حتی به صفر نیز رسیده است. همچنین، علاوه بر کاهش رخداد مجرای موج با کاربست شرط سوم، درصد رخداد مجرای موج روی دریای خزر و شمال شرق ایران نسبت به مناطق دیگر بیشتر به دست آمده است.

با کاربست دو شرط پایداری و ضخامت برای ماه مارس، به‌طور میانگین مجرای موج بیشتر در نواحی شمال شرق ایران، دریای خزر و خلیج فارس مشاهده می‌شود. بیشتر رخداد های مجرای موج روی دریای خزر دارای مقداری حدود ۲۵ درصد است. با کاربست شرط سوم برای ماه مارس، درصد رخداد مجرای موج در تمام نواحی ای که در حالت قبل (بدون اعمال شرط سوم) تشکیل شده بود، کاهش می‌یابد. این کاهش بر روی خلیج فارس در مقایسه با دریای خزر و شمال شرق ایران بیشتر بوده است. علاوه بر این، درصد رخداد مجرای موج در شمال شرق ایران برای



شکل ۳. درصد رخداد مجرای موج (به صورت سایه-روشن) در دوره سه‌ماهه ژانویه تا مارس ۲۰۱۶ بر روی ایران با کاربست الف: دو شرط پایداری و ضخامت و ب: شرط وجود لایه بازتابنده بالای لایه مجرا.

و عرض جغرافیایی استفاده شده است. شبیه‌سازی در دو شبکه تودرتو با فاصله‌های شبکه‌ای ۹ و ۳ کیلومتر به ترتیب برای شبکه بیرونی و درونی انجام گرفت (شکل ۴). شبکه‌های بیرونی و درونی به ترتیب دارای ۳۵۰ و ۵۷۱ نقطه در راستای مداری و ۳۵۰ و ۴۸۷ نقطه در راستای نصف‌النهار هستند. همچنین برای فرایندهای فیزیکی مورد استفاده در اجرای مدل از طرحواره‌های پیش‌فرض خود مدل انتخاب شده است (جدول ۲). بالاترین تراز فشاری برای اجرای مدل ۵۰ هکتوپاسکال است. مدل با در نظر گرفتن ۳۵ تراز در راستای قائم و گام زمانی ۶۰ ثانیه به مدت ۳۶ ساعت اجرا شد. همچنین ۱۲ ساعت اول اجرای مدل به عنوان زمان spinup در تحلیل‌ها نیامده است. علاوه بر این، یک لایه جذب‌کننده رایلی ضمنی (کلمپ و همکاران، ۲۰۰۸) با ضخامت ۸ کیلومتر برای جلوگیری از بازتاب موج از بالاترین تراز شبکه در نظر گرفته شده است.

۴. شبیه‌سازی عددی

با توجه به اینکه زمان انتشار امواج گرانی-لختی تولید شده در جو نسبتاً کوتاه است، داده‌های GFS مورد استفاده برای شناسایی مجرای امواج گرانی-لختی در بخش دوم (با گام زمانی ۶ ساعت) برای شناسایی امواج گرانی-لختی و سازوکارهای انتشار آنها در جو مناسب نیستند. از این‌رو برای شبیه‌سازی و شناسایی امواج منتشر شده در مجرا از نسخه ۳.۶.۱ مدل میان‌مقیاس WRF استفاده می‌شود. این شبیه‌سازی برای مجرای موج مورد اول (۲۸ ماه ژانویه ۲۰۱۶) صورت گرفته است که امکان بررسی دقیق‌تر فرایند به دام افتادن امواج گرانی-لختی را فراهم می‌کند.

۴-۱. شرایط اجرای مدل میان‌مقیاس

برای شرایط اولیه و مرزی از داده‌های سامانه داده‌گواری جهانی (Global Data Assimilation System) با تفکیک افقی $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ در دو راستای طول



شکل ۴. موقعیت شبکه استفاده شده برای اجرای مدل در مجرای مورد اول در ماه ژانویه ۲۰۱۶.

جدول ۲. شرایط اجرای مدل.

تفکیک افقی (km)	تعداد تراز در راستای قائم	طرحواره خردفیزیک	طرحواره همرفت	طرحواره لایه مرزی	طرحواره تابش طول موج بلند	طرحواره تابش طول موج کوتاه	
۹	۳۵	WSM3	Kain-Fritsch	YSU	RRTM	Dudhia	حوزه بیرونی
۳	۳۵	WSM3	خاموش	YSU	RRTM	Dudhia	حوزه درونی

با داشتن طول موج‌های افقی و قائم، بسامد ذاتی موج از رابطه پاشندگی زیر به دست می‌آید:

$$\omega = \left(f^2 + N^2 \frac{(k^2 + l^2)}{m^2} \right)^{1/2} \quad (1)$$

که در آن f پارامتر کوریولیس، N بسامد شناوری، k عدد موج در راستای محور x ، l عدد موج در راستای محور y و m عدد موج در راستای محور z است. همچنین تندی فاز ذاتی افقی از رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$c_h = \frac{\omega \lambda_h}{2\pi} \quad (2)$$

که λ_h طول موج افقی است و مؤلفه‌های افقی و قائم سرعت گروه از رابطه ۳ به دست می‌آیند.

$$\begin{aligned} (c_{g,x}, c_{g,y}, c_{g,z}) &= \left(\frac{\partial \omega}{\partial k}, \frac{\partial \omega}{\partial l}, \frac{\partial \omega}{\partial m} \right) \\ &= \left(k \frac{N^2}{\omega m^2}, l \frac{N^2}{\omega m^2}, -N^2 \frac{(k^2 + l^2)}{\omega m^3} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

۴-۲. شناسایی امواج گرانی-لختی منتشر شده در مجرا به منظور شناسایی امواج گرانی-لختی منتشر شده در مجرای موج و برآورد ویژگی‌های آن‌ها، کمیت واگرایی افقی سرعت باد در ترازهای فشاری مختلف (برای حوزه درونی مدل) محاسبه و رسم شد. لازم به ذکر است میدان سرعت افقی را می‌توان به دو بخش زمینگرد و آزمینگرد تقسیم کرد که واگرایی بخش زمینگرد آن صفر است. بنابراین میدان واگرایی افقی سرعت نشانگر بخش آزمینگرد شارش یا همان امواج گرانی-لختی می‌باشد (زولیک و پیترس، ۲۰۰۶). در این مورد مطالعاتی، با ترسیم میدان واگرایی افقی سرعت حاصل از شبیه‌سازی، دو بسته موج گرانی-لختی در زمان‌های مختلف شناسایی شد. طول موج افقی و قائم این امواج به ترتیب با استفاده از فاصله افقی و قائم بین دو بیشینه متوالی مثبت یا منفی واگرایی افقی سرعت در مسیر حرکت موج تعیین می‌شود.

بسته‌موج دوم در مقایسه با بسته‌موج اول دارای دامنه کوچک‌تری است. برش قائم میدان واگرایی افقی سرعت در امتداد خط مورب CD شکل ۵-ج در شکل ۵-د نشان می‌دهد که بسته‌موج دوم نیز مانند بسته‌موج اول انتشاری در راستای قائم نداشته و الگوی انتشار منظمی در راستای افقی دارد. به عبارت دیگر مجرای موج مانع از انتشار قائم این بسته‌موج شده و در طول زمان انتشار موج منجر به هدایت و تقویت آن در راستای افقی می‌شود.

با تعیین طول موج قائم و افقی دو بسته‌موج شناسایی شده در شکل‌های ۵-ب و ۵-د، دیگر ویژگی‌های این امواج به کمک روابط ۱ تا ۳ محاسبه شده و در جدول ۳ آورده شده‌اند. مطابق این جدول، طول موج قائم بسته‌موج‌های اول و دوم به ترتیب حدود ۳/۲ و ۳ کیلومتر است. مقایسه این طول‌موج‌های قائم با عمق میانگین ۸۹۳ متر به دست آمده برای مجرای موج مورد اول ماه ژانویه ۲۰۱۶ (شکل ۲) با شرط دوم لیندزن و تونگ (۱۹۷۶) مطابقت دارد. این شرط بیان می‌کند موجی در مجرا تقویت و منتشر می‌شود که یک‌چهارم طول موج قائم آن از عمق لایه مجرا بیشتر نباشد. به طور کلی روش کمی شناخته‌شده‌ای برای درستی‌سنجی نتایج شبیه‌سازی مجرای موج و امواج گرانی-لختی منتشرشده در مجرای موج وجود ندارد اما می‌توان تا حدی اعتبار نتایج را با بررسی داده‌های مشاهداتی در ایستگاه‌های همدیدی مجاور منطقه مجرای موج و انتشار امواج بررسی کرد. برای نمونه‌ای از این نوع اعتبارسنجی می‌توان به پژوهش چلاک نیر (۱۳۹۵) مراجعه کرد. به هر حال تا آنجا که به پژوهش حاضر مربوط می‌شود، انتشار افقی گسترده امواج گرانی-لختی در منطقه‌ای که با معیارهای پیش‌گفته به مثابه مجرای موج با پیوستگی مکانی و زمانی بارز در مقیاس همدیدی تعیین شده، خود گواهی بر درستی شناسایی مجراست.

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش مجرای امواج گرانی-لختی در دوره سه‌ماهه ژانویه تا مارس ۲۰۱۶ بر روی ایران شناسایی

در این پژوهش، در منطقه تشکیل مجرای موج (خلیج فارس) کمیت واگرایی سرعت افقی در ترازهای مختلف ترسیم شد و در نهایت تراز ۸۰۰ هکتوپاسکال که بیشترین انتشار را برای هر دو بسته‌موج نشان می‌داد انتخاب شد. بسته‌موج اول در ساعت ۱۹:۴۰ UTC روز ۲۸ ژانویه ۲۰۱۶ در منطقه خروجی مجرا تشکیل می‌شود. میدان واگرایی سرعت افقی ترسیم شده در ساعت ۲۰:۰۰ UTC همان روز (در تراز ۸۰۰ هکتوپاسکال)، الگوی انتشار افقی این بسته موج را در این زمان نشان می‌دهد (شکل ۵-الف). سرعت گروه افقی جهت انتشار افقی موج را تعیین می‌کند که مطابق رابطه ۳ سرعت گروه افقی هم‌جهت با بردار عدد موج افقی و عمود بر خطوط هم‌فاز موج می‌باشد. در این مورد، خطوط هم‌فاز موج در راستای شمال‌شرق-جنوب‌غرب قرار دارد و موج در راستای عمود بر این خطوط انتشار می‌یابد. مدت زمان انتشار این بسته‌موج داخل مجرا حدود یک ساعت و ده دقیقه است که با گذشت زمان گستره افقی حضور موج افزایش یافته است. این امر نشانگر تقویت این بسته‌موج و انتشار آن در مجراست. برش قائم میدان واگرایی افقی سرعت در امتداد خط AB در شکل ۵-الف در شکل ۵-ب ترسیم شده و نشان می‌دهد که بسته‌موج انتشار قائم نداشته است و در سطوح زیرین و ردسپهر اثری از آن مشاهده نشده است.

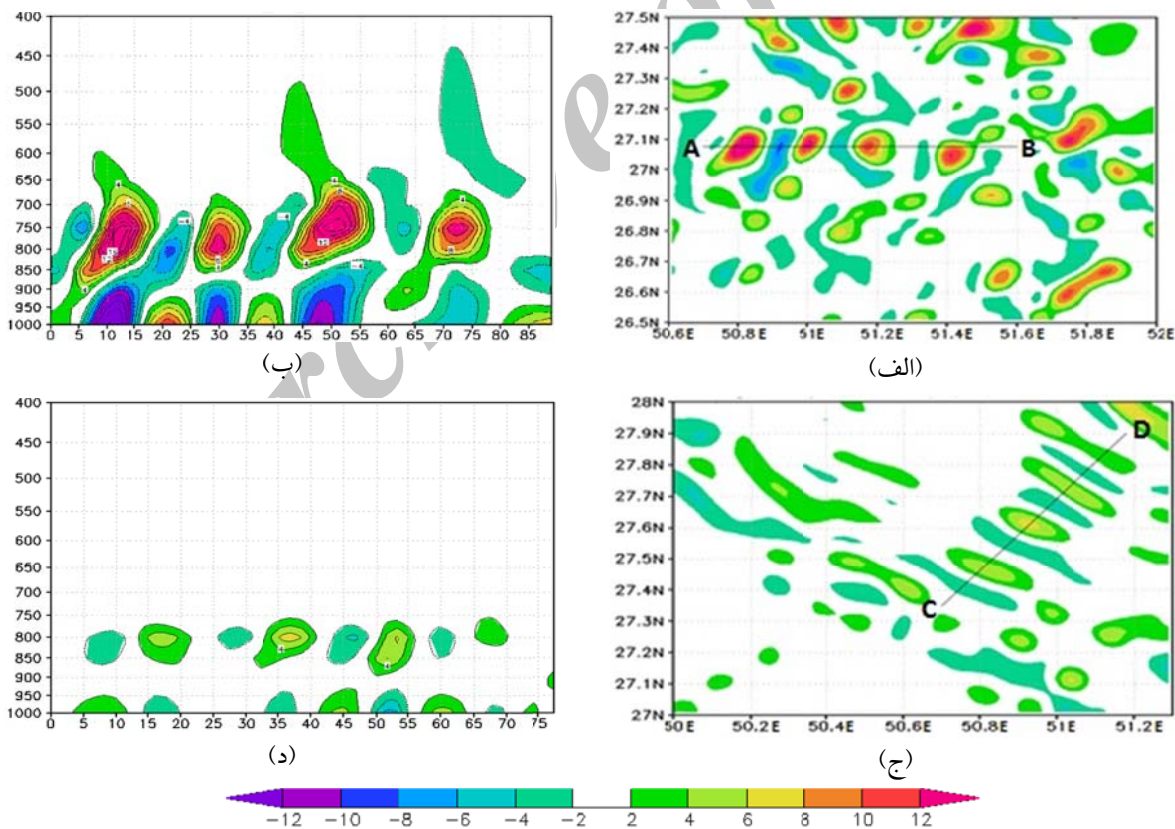
بسته‌موج گرانی-لختی دوم، حدود دو ساعت بعد از نابودی بسته‌موج اول، در ساعت ۲۳:۱۰ UTC روز ۲۸ ژانویه ۲۰۱۶، تشکیل شده و در راستای شمال‌شرق-جنوب‌غرب شروع به انتشار می‌کند. این بسته‌موج نیز مانند مورد قبلی (بسته‌موج اول) در منطقه خروجی مجرا تشکیل شده و مدت زمان انتشار آن در داخل مجرا حدود یک ساعت است. شکل ۵-ج، الگوی انتشار افقی بسته‌موج دوم را در ساعت ۲۳:۴۰ UTC همان روز نشان می‌دهد. در این زمان گستره افقی حضور موج نسبت به زمان تشکیل آن افزایش یافته است. همچنین مناطق مثبت و منفی میدان واگرایی افقی سرعت در این بسته‌موج گرانی-لختی در مقایسه با بسته‌موج اول مقادیر کوچک‌تری دارد. به عبارتی

به پایداری مناسب لایه مجرای تشکیل شده در نزدیکی سطح دریا نسبت داد. همچنین تفاوت درصد رخداد مجرای موج در روز و شب (که در طول روز این مقدار از شب کمتر است) را می‌توان به تفاوت شکل‌گیری همرفت، تلاطم و ناپایداری لایه مرزی در روز و شب نسبت داد.

با رسم میدان واگرایی افقی سرعت برای مجرای مورد اول ماه ژانویه ۲۰۱۶، دو بسته‌موج گرانی-لختی در خروجی مجرا شناسایی شد. برش قائم میدان واگرایی افقی در هر دو بسته‌موج نشان داد که این امواج انتشار در راستای قائم ندارند. این امر به خوبی حضور مجرای موج را برای این امواج تأیید می‌کند. همچنین برای هر دو بسته‌موج، ربع طول موج قائم موج مشاهداتی نسبت به عمق لایه مجرا کمتر بود که با شرط دوم لیندن و تونگ (۱۹۷۶) مطابقت داشت.

و بررسی شد. در این بازه مطالعاتی به‌طور میانگین در هر ماه سه مورد مجرای موج با کاربست دو شرط پایداری و ضخامت شناسایی شد که این مجراها به‌طور عمده بر روی نواحی دریای خزر و سواحل آن، شمال و شمال‌شرق ایران و خلیج فارس قرار داشتند؛ به عبارتی مجرای بارزی داخل فلات ایران مشاهده نشد.

با کاربست شرط سوم برای مجرای موج، درصد رخداد مجرا در مناطق رشته‌کوه‌های البرز و زاگرس کاهش زیادی می‌یابد. این امر نشان‌دهنده آن است که در این مناطق لایه بازتابنده مناسبی روی لایه مجرای موج تشکیل نمی‌شود؛ بنابراین عمده انتشار امواج گرانی-لختی منتشرشده در این مناطق به صورت قائم است. این در حالی است که بر روی دریای خزر با کاربست شرط سوم، درصد رخداد مجرای موج فقط اندکی کاهش می‌یابد که دلیل آن را می‌توان



شکل ۵. میدان واگرایی افقی تراز ۸۰۰ هکتوپاسکال (مناطق رنگی با فاصله $\pm 2 \times 10^{-7} s^{-2}$) در ساعت ۲۰:۰۰ UTC و ۲۳:۴۰ UTC روز ۲۸ ژانویه ۲۰۱۶. برش قائم میدان واگرایی افقی در ساعت (ب) ۲۰:۰۰ UTC در امتداد خط AB شکل (الف) و (د) ۲۳:۴۰ UTC روز ۲۸ ژانویه ۲۰۱۶ در امتداد خط مورب CD شکل (ج) (مناطق رنگی با فاصله $\pm 2 \times 10^{-7} s^{-2}$).

جدول ۳. ویژگی‌های امواج گرانی-لختی مشاهده‌شده در مجرای مورد اول ماه ژانویه ۲۰۱۶.

شمارهٔ بسته‌موج	زمان	λ_z (km)	λ_h (km)	ω ($10^{-3} s^{-1}$)	τ (h)	c_h (m/s)	c_z (m/s)	c_{gx} (km/h)	c_{gy} (km/h)	c_{gz} (km/h)
اول	۲۰:۰۰ UTC روز ۲۸ ژانویه	۳/۲	۱۸	۱/۷۸	۰/۹۸	۵/۱	۰/۹	۱۰/۱	۳۶/۶	۳/۲۵
دوم	۲۳:۴۰ UTC روز ۲۸ ژانویه	۳	۱۷	۱/۷۶	۰/۹۸	۴/۷۷	۰/۸۴	۹/۷	۷/۶	۳

وردسپهر زیرین بر روی تهران در دوره ۲۰۱۵-۱۹۶۱، پایان نامه کارشناسی ارشد، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.

زارع احمدآبادی، م.، ۱۳۹۵، شناسایی مجرای امواج گرانی-لختی روی ایران در فصل زمستان، پایان نامه کارشناسی ارشد، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران. عسگری، ر.، ۱۳۹۴، شناسایی و شبیه‌سازی امواج گرانی-لختی در وردسپهر زیرین و میانی بر روی ایران، پایان نامه کارشناسی ارشد، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.

Chimonas, G. and Hines, C. O., 1986, Doppler ducting of atmospheric gravity waves, *J. Geophys. Res.*, 91, 1219-1230.
 Holton, J. R., 2004, *An Introduction to Dynamic Meteorology*, 4D ed. Academic Press, 535 pp.
 Klemp, J. B., Dudhia, J. and Hassiotis, A. D., 2008, An upper gravity-wave absorbing layer for NWP application, *Mon. Wea. Rev.*, 136, 3987-4004.
 Koch, S. E. and O'Handley, C., 1977, Operational forecasting and detection of mesoscale gravity waves, *Wea. Forecasting*, 12, 253-281.
 Lindzen, R. S. and Tung, K. K., 1976, Banded convective activity and ducted gravity waves, *Mon. Wea. Rev.*, 104, 1602-1617.
 Monserrat, S. and Thorpe, A. J., 1996, Use of ducting theory in an observed case of gravity waves. *J. Atmos. Sci.*, 53, 1724-1736.
 Nappo, C. J., 2002, *An Introduction to Atmospheric Gravity Waves*, Academic Press, 276 pp.

تشکر و قدردانی

نگارندگان این مقاله از دانشگاه تهران برای حمایت مالی و فراهم کردن شرایط برای انجام این پژوهش تشکر و قدردانی می‌کنند. صورت کامل این پژوهش در پایان‌نامه نگارندهٔ اول موجود است که خوانندگان علاقه‌مند می‌توانند به آن مراجعه کنند. دریافت نتایج تفصیلی هم با مراجعه به نگارندهٔ رابط مقاله امکان‌پذیر است.

مراجع

چالاک‌نیر، م.، ۱۳۹۵، شناسایی امواج گرانی-لختی در Powers, J. G. and Reed, R. J., 1993, Numerical simulation of the large-amplitude mesoscale gravity wave event of 15 December 1987 in the central United States, *Mon. Wea. Rev.*, 121, 2285-2308.
 Schneider, R. S., 1990, Large-amplitude gravity wave disturbances within the intense Midwest extratropical cyclone of 15 December 1987, *Wea. Forecasting*, 5, 533-558.
 Tepper, M., 1950, A proposed mechanism of squall lines: The pressure jump line, *J. Meteor.*, 7, 21-29.
 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.
 Züllicke, 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.

Identification of inertia–gravity waves ducts over Iran during January to March 2016

Zare Ahmadabadi, M.¹, Mohebalhojeh, A. R.² and Mirzaei, M.^{3*}

1. M.Sc. Graduated, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

2. Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

3. Assistant Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 9 April 2017, Accepted: 24 Oct 2017)

Summary

When a fluid is forced by buoyancy and Coriolis forces, it undergoes oscillations. The frequency of ageostrophic oscillations resulting from these two forces is between buoyancy and inertial frequencies; they are thus called inertia–gravity waves (IGWs). These waves play important roles in propagation of energy and momentum in the atmosphere and exert influence on many atmospheric phenomena. The necessary condition for horizontal propagation of IGWs over a large horizontal distance in the atmosphere is the existence of a statically stable layer in the lower troposphere, which is called a wave duct. Actually a wave duct acts as a waveguide and traps wave energy. The underlying mechanism for the formation of a wave duct is provided by reflection of waves propagating from a layer near the surface of the earth and the constructive interference of the reflected waves with the primary propagating waves. The wave duct provides suitable environment for the maintenance of waves through over-reflection and amplification mechanisms. There are two types of wave duct in atmosphere: thermal wave duct and wind wave duct.

Considering that in Iran only a few studies have been carried out on IGWs and their ducts, this study is devoted to the detection and study of the wave ducts happened over Iran in the three-month period from January to March 2016. For this purpose, the data from the Global Forecast System (GFS) with $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ resolution are used to identify the spatio–temporal characteristics of the ducts. To identify the wave duct, two conditions are considered that permit wave propagation in the duct: duct should be statically stable and have a minimum thickness of a quarter of the vertical wavelength of the waves observed. By applying these conditions to the data in the domain of study, the number of candidate cases for wave ducts is reduced. Most cases occurred in the Caspian Sea, the Persian Gulf, the north and northeast of Iran. So 10 cases of wave duct were identified; in this research, results for two cases are presented. Also by considering the condition of the existence of an unstable or the reflective layer on top of the wave duct for the two cases, the wave ducts obtained using the first two conditions were further screened. Considering only the points obeying the foregoing three conditions, the wave duct characteristics were then estimated.

Given that the lifetime of IGWs propagation in the atmosphere is short, the GFS data used to detect wave ducts are not suitable for identification of IGWs and determination of their propagation mechanisms. In order to detect IGWs propagating in the wave duct, we simulated one of the cases with the WRF mesoscale model. Then, for estimating IGWs properties, the horizontal velocity divergence in different pressure levels was used in the internal domain. The results of led to the identification of two wave packets at different times. Also the cross section of horizontal velocity divergence was used to estimate the properties of the two wave packets. Results showed that for both wave packets, a quarter of the dominant wavelength was less than the average thickness of the ducting layer, so they were consistent with the thickness criterion required for the wave duct formation.

Keywords: wave duct, inertia–gravity waves, the WRF model, horizontal velocity divergence.

* Corresponding author:

mirzaeim@ut.ac.ir