

بررسی امواج کوهستان با استفاده از یک مدل تحلیلی دو بُعدی

مرضیه سالاری^۱، فرهنگ احمدی گیوی^{۲*} و محمد حسین معماریان^۳

^۱ واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

^۲ مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

^۳ گروه هواشناسی، دانشکده فیزیک دانشگاه یزد، یزد

(تاریخ دریافت: ۹۰/۱۰/۵، تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۲/۱۹)

چکیده

جریان هوا روی کوه از پارامترهای گوناگون از جمله ارتفاع کوه، سرعت باد، شکل کوه و عوامل متعدد دیگر تاثیر می‌پذیرد. در این مقاله، با استفاده از یک مدل تحلیلی دو بُعدی میان مقیاس غیرخطی، شارش‌های جوی روی کوه و پشت به باد آن بررسی شده است. در این راستا، با در نظر گرفتن تقریب بوسینسک و صرف‌نظر از نیروهای کوریولیس و اصطکاک و همچنین فرض ثابت بودن گرادیان دما و سرعت باد آستانه با ارتفاع، دستگاه معادلات به معادله هلمهولتز تبدیل شده و با استفاده از معادلات بسط مرتبه اول و دوم حل می‌شود. مدل برای حالت‌های ترکیبی گوناگون شامل یک و دو قله منفرد زنگی شکل با تغییر در پهنای کوه، ارتفاع و پارامتر لیرا و با استفاده از داده‌های تحلیلی که دامنه تغییرات عدد بدون بعد «فرود» در مورد آن مدنظر قرار گرفته، اجرا شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش تعداد قله و ارتفاع کوه، کاهش پهنای پارامتر لیرا، تأثیر محسوسی بر تغییر مؤلفه قائم و افقی باد در پشت به باد کوه دارد. در بین پارامترهای فوق، تأثیر ارتفاع کوه بر امواج کوهستان و مؤلفه‌های سرعت باد بیشتر است. به علاوه، در مورد دو قله منفرد نیز بعد از قله دوم، خطوط جریان تقویت شده و مؤلفه قائم سرعت افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: امواج کوهستان، پارامتر لیرا، خطوط جریان، مدل تحلیلی دو بُعدی میان مقیاس

A Study of mountain waves using a 2D analytical model

Marzieh Salari¹; Farhang Ahmadi-Givi² and Mohamad Hosein Memarian³

¹ Department of Meteorology, Tehran Researches and Sciences Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

² Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

³ Department of Physics, University of Yazd, Yazd, Iran

(Received: 26 December 2011, accepted: 10 March 2014)

Summary

Mountain waves are formed on the leeward side when a uniform and steady air flow impinges a mountain. Unstable air and severe winds on the leeward side are hazardous to the flight of aircrafts, change the distribution of aerosols, and cause damage to agricultural products. The purpose of this study is to examine the air flow over the entire mountain region using a two-dimensional analytical meso-scale model. The model was run for various conditions by changing one of the main factors or the number of mountain

ridges. These factors included Lyra parameter ($\lambda_c = 2\pi U/N$, where the initial state zonal flow U and buoyancy frequency N are both assumed to be constant), Froude number ($F_r = \lambda_c / 2\pi h_m$, where h_m is the amplitude of the mountain ridge), height and width of mountains. For simplicity, we made many assumptions. The initial air flow on the windward side was assumed to be stable, steady and frictionless with no rotation. Also, the horizontal temperature gradient and thereby the vertical wind shear for maintaining a thermal wind balance are constant. These conditions cause the non-linear equations to become linear. By running the model, the Helmholtz equation is solved using the first and second Bessel equations and the horizontal wind which impacts the mountain nearly at a right angle is transformed to the Lyra parameter.

Our results showed that all the factors mentioned above could substantially affect the characteristics of the air flow over the mountain ridge as well as at the leeward side. In this regard, streamlines as well as the horizontal and vertical components of the wind were investigated. For fixed height and width of a single mountain, the maximum amplitude of the streamlines and thereby the maximum upward motions were weakened by increasing the Lyra parameter, whereas there was no specific change in the horizontal component of the wind. Alternatively, for a fixed mountain height and the Lyra parameter, the maximum amplitude of the streamlines and the maximum horizontal wind were increased in the wide mountain ridge compared to the narrow one. Since streamlines tilted toward the west with height in the leeward side, the maximum upward motions were decreased somewhat. In the next experiment, for a fixed mountain width and the Lyra parameter, all the characteristics of the air flow in the leeward side (the maximum amplitude of streamlines and the maximum values of horizontal and vertical components of wind) were intensified largely when the mountain height was increased.

In general, the effect of the mountain height on the characteristics of the air flow impinging a mountain is the dominant one among the other factors. It can be mainly due to the increase of streamline gradient in the windward side of the mountain. Extremely large surface and upper-level winds (horizontal and vertical components) were seen in all the experiments. This is because the friction term has been neglected in the equations. In the real atmosphere, friction would moderate these winds quickly.

Now consider a mountain associated with two ridges having equal heights. It is observed that the existence of the second ridge leads to more intensification of the horizontal and vertical components of the wind in the leeward side of the second ridge. Also, the lee cyclones produced by the wide ridges, especially over the second ridge, were more intense than those by the narrow ridges. The other noticeable point was that the more westward vertical tilt of streamlines in the wide ridges were associated with smaller vertical motions, compared to the narrow ridges. This is because the vertical gradient of streamlines for the narrow ridges is much more than in the wide ridges. But generally, the upward and downward motions became maxima in the downstream and upstream sides of the troughs, respectively.

Keywords: Mountain waves, Lyra parameter, streamline, two dimensional analytical meso-scale model

۱ مقدمه

از امواج بادپناه کوه (امواج لی) را خلبان‌های این نوع هواپیماها عملی ساختند. در سال‌های ۱۹۲۰-۱۹۴۰، فورچ توگت (۱۹۴۹)، خلبان هواپیمای بدون موتور، چندین آزمایش با استفاده از هواپیمای خود روی کوه‌های آلپ

در اوایل قرن بیستم، اثراتی که کوهستان روی حرکت هواپیماهای بدون موتور هنگام عبور از آنها می‌گذاشت، توجه پژوهشگران را به خود جلب کرد. اولین مشاهدات

جریان آستانه آن را خطی ساخت. در دهه ۱۹۶۰ و با پیشرفت علوم و ماشین‌های محاسباتی، تحقیقات وسیعی در زمینه شبیه‌سازی عددی به‌منظور شناخت امواج کوهستان و اثر آنها صورت گرفت. از جمله این تحقیقات می‌توان به کارهای کلمپ و لیلی (۱۹۷۸) اشاره کرد. آنها با استفاده از تقریب هیدروستاتیک به شبیه‌سازی عددی امواج کوهستان پرداختند و به‌صورت دو بُعدی خطوط جریان و مؤلفه‌های سرعت را برای موانع سینوسی و زنگی شکل و همچنین برای کوه‌های راکی در منطقه کلرادوی امریکا محاسبه کردند.

در دو دهه گذشته، پژوهش‌های بسیاری با استفاده از مدل‌های گردش کلی جو و مدل‌های میان‌مقیاس برای بررسی تأثیر کوهستان بر جریان‌های جوئی در مقیاس همدیدی و چرخندزایی در پشت کوه‌های بزرگ صورت گرفته است. برای نمونه، هایس و همکاران (۱۹۹۳) به مطالعه عددی چرخندهای پناه پرداخته و روشن ساختند که دلیل چرخندزایی پناه، همراه شدن یک موج کژ فشار در حال رشد با یک موج مانا در همان مقیاس است که به واسطه کوهستان واداشت شده است. این نتایج با بررسی تحلیلی آنها نیز همخوانی دارد. کژونیکوف (۱۹۹۹) با به‌کار بردن یک مدل تحلیلی دو بُعدی میان‌مقیاس برای بررسی شارش هوا روی کوه، اقدام به حل معادلات بسط کرد. وی برای حل معادلات از روش پربشیدگی استفاده کرد، اما پربشیدگی‌ها را کوچک در نظر نگرفت. در نهایت، هنگام حل معادلات به‌روش تحلیلی ناگزیر به فرض ثابت بودن گرادیان دما و سرعت باد با ارتفاع برای جریان ورودی شد. هرچند مدل به‌صورت خطی حل شده است، ولی به علت کوچک نبودن آشفتگی‌ها، نتایج نمایان‌گر غیرخطی بودن جریان‌های آشفته روی کوهستان است. فراهانی و وو (۲۰۰۳) کشال کوهستان و تنظیم به حالت متوازن را به‌طور عددی مورد بررسی قرار دادند و پس از تقسیم عدد فرود به سه ناحیه، $F > 2$ ، $1 < F < 2$ و

واقع در اروپا اجرا و اطلاعات منسجمی درباره شارش هوا روی کوه تهیه کرد. تأثیر کوهستان بر شارش‌های جوئی در مقیاس‌های میانی و همدیدی است. این پدیده به سبب اهمیت و فراوانی رخداد آن روی رشته‌کوه‌های راکی و آلپ، از دهه‌های قبل به‌طور گسترده و به کمک مدل‌های متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. مدل‌های مورد استفاده در بررسی امواج کوهستان را می‌توان به دسته‌های گوناگون از قبیل تحلیلی و عددی، خطی و غیرخطی، هیدروستاتیک و غیر هیدروستاتیک تقسیم‌بندی کرد. در ابتدا محققان از مدل‌های تحلیلی برای شبیه‌سازی امواج کوهستان استفاده می‌کردند. به کار بردن معادلات خطی برای بررسی امواج کوهستان به‌طور عمده با کارهای لیرا (۱۹۴۳) و کوئینی (۱۹۴۸) شروع شده است. لیرا با استفاده از نظریه پربشیدگی، معادلات بسط خطی و شارش هوا را روی یک مانع چهار گوشه بررسی کرد. او نشان داد که با برخورد شارش هوا به مانع چهار گوشه، موجی تشکیل می‌شود که در ارتفاعات بالا بیش از یک نوسان دارد و دامنه این نوسان با ارتفاع افزایش می‌یابد. در نهایت لیرا به این نتیجه رسید که آشفتگی‌ها به شکل کوه و جابه‌جایی قائم وابسته است. در ادامه، کوئینی (۱۹۴۸) نیز با استفاده از نظریه پربشیدگی برای خطی‌سازی معادلات حاکم، جو را پایدار و به دو لایه با چگالی‌های متفاوت تقسیم‌بندی و تغییرات باد با ارتفاع را ثابت فرض کرد. او معادله ریاضی نسبتاً طولانی به‌دست آورد که جزئیات زیادی را در بر می‌گرفت. حل این معادله برای ناهمواری‌های کوتاه سبب تشکیل امواج گرانی و تولید نشدن امواج بادپناه می‌شد (ضعف مدل). او نشان داد که موج تولید شده در راستای افقی و قائم، با فاصله گرفتن از مانع، به سرعت تضعیف و از بین می‌رود. لانگ (۱۹۵۳) اولین کسی بود که از دستگاه معادلات غیرخطی در این زمینه استفاده کرد. او دستگاه معادلات غیرخطی را به یک معادله غیرخطی تقلیل و سپس با فرض چینه‌بندی شاره و شرایط دیگر در

$0 < F < 1$ نتیجه گرفتند که: ۱- حالت نهایی، در توازن زمین گرد نیست؛ ۲- جبهه‌ها در اثنای تنظیم زمین گرد مشاهده نمی‌شوند؛ ۳- نسبت انرژی جنبشی به پتانسیلی منتشر شده در حین تنظیم کمتر از مقدار پیش‌بینی شده با نظریه است هنگامی که انرژی جنبشی از باد زمین گرد محاسبه شود و بیشتر از مقدار نظری است وقتی که از باد واقعی استفاده شود؛ ۴- برای اعداد فرود کوچک، ارتباط بین کشتال کوهستان و عدد فرود پیچیده‌تر از مقداری است که قبلاً فرض می‌شد. کزونیکوف و معماریان (۲۰۰۶) با استفاده از تقریب هیدروستاتیک، یک مدل تحلیلی دو بُعدی را طراحی و خطوط میدان و مؤلفه‌های سرعت بر فراز قله‌ها را محاسبه و تحلیل کردند. در این تحقیق علاوه بر عرضه مدل تحلیلی غیر خطی هواشناختی، سعی در بررسی مسئله امنیت پرواز هواپیماها هنگام عبور از روی کوه‌ها شده و پارامترهای گوناگون از جمله زاویه تاخت و اضافه‌باری، بررسی شده است. این محاسبات در حالت کلی برای دو نوع هواپیما، هواپیماهای سبک و سنگین (سرع‌السییر)، صورت گرفته است. بررسی فوق را می‌توان به‌طور اختصاصی برای هر هواپیما، با توجه به مشخصات آن عملی ساخت. در پژوهشی دیگر، معماریان و همکاران (۲۰۰۹) با یک مدل مانای غیرخطی دو بُعدی، جریان هوا روی کوهستان را بررسی کردند. از آنجاکه به همراه جریان هوا، بخار آب نیز جابه‌جا می‌شود، در این پژوهش‌ها رطوبت و دمای محاسبه شده برای تعیین توزیع رطوبت نسبی روی کوه به‌کار رفته و براساس آن میزان ابرناکی روی کوه‌ها نیز به‌دست آمده است. علاوه بر آن، ابرهای کوهستان شبیه‌سازی شده‌اند و مشاهده می‌شود که محل تشکیل ابرها با مناطقی که هوا صعود می‌کند، مطابقت دارد. ابرهای کوهستان بر قله‌های امواج، روی و پشت کوه‌ها (به شرط وجود رطوبت یا سرمایش کافی) تشکیل می‌شوند. در ضمن تاثیر این امواج در ارتفاعات بالاتر نیز بررسی شده و امکان وجود ابرهای چندلایه‌ای

کوهستانی مورد توجه قرار گرفته است.

در ایران نیز بررسی تاثیر کوهستان بر امواج تولید شده با آنها و همچنین بر چرخندزایی و بارش مورد توجه پژوهشگران بوده است. از جمله معماریان و علی‌اکبری بیدختی (۱۳۷۵) به کمک یک مدل عددی و به‌کار بردن روش‌های تفاضل متناهی و طرحواره لیپ‌فراگ، امواج بادپناه را در دستگاه مختصات دو بُعدی با محور قائم دمای پتانسیلی شبیه‌سازی کردند. در پژوهشی دیگر، مرادی و همکاران (۱۳۸۶) با استفاده از یک مدل دو لایه‌ای، شارش هوا و تغییرات آن را روی یک و دو کوه منفرد بررسی کردند. آنها با تغییر ارتفاع بیشینه قله، تغییر سرعت افقی باد و تغییر پارامتر اسکورر در یک و دو لایه، نشان دادند که در جو دو لایه‌ای، وقتی پارامتر اسکورر در لایه پایین بیشتر از لایه بالایی است، خطوط جریان از شکل کوه پیروی می‌کند و هرچه ارتفاع قله‌ها بیشتر باشد یا سرعت باد افزایش یابد، پشته‌ها و ناو‌های خطوط جریان ناشی از اثر کوه ژرف‌تر می‌شود. به علاوه، هسته‌های بیشینه و کمینه سرعت قائم، به ترتیب در بخش بادسو و بادپناه کوه تشکیل می‌شود و گسترش این هسته‌ها با ارتفاع افزایش می‌یابد. احمدی گیوی و نجیبی فر (۱۳۸۳) به بررسی همدیدی و دینامیکی چرخندزایی در بادپناه کوه‌های آلپ و اثر آن در دوره یک‌ساله (۲۰۰۲) بر وضع هوای خاورمیانه پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که چرخندهای مربوط به ماه‌های سرد، بیشتر وضع هوای ایران را تحت تاثیر قرار می‌دهند. عزیزاده و همکاران (۱۳۸۷) نیز با استفاده از مدل MMS5 تاثیر رشته کوه البرز در تقویت سامانه‌های همدیدی در نواحی بادپناه آن را بررسی کردند و روشن ساختند که با کاهش ارتفاع ناهمواری‌ها، مقادیر دمای پتانسیلی و سرعت قائم در بادپناه کوه و همچنین بارش تجمعی در برخی نقاط کاهش می‌یابد.

مدل‌های مورد استفاده در پژوهش‌های صورت گرفته

پس از ساده‌سازی دستگاه معادلات فوق با استفاده از تقریب بوسینسک (گیل، ۱۹۸۲) در حالتی که جو مانا (مستقل از زمان) است و پریشیدگی‌ها کوچک نیستند، دستگاه معادلات به صورت زیر در می‌آید (کژونیکف، ۱۹۹۹):

$$\begin{cases} (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -R T_1 \nabla \frac{p'}{\bar{p}} + \frac{T'}{T_1} \vec{g}, \\ (\vec{V} \cdot \nabla) T' = -(\gamma_a - \gamma) w, \\ \nabla \cdot \vec{V} = 0, \end{cases} \quad (2)$$

که در این دستگاه معادلات w مولفه قائم سرعت باد، \bar{p} فشار در جریان آستانه، p' پریشیدگی فشار، R ثابت عمومی گازها، γ_a آهنگ افت دمای بی‌درروی خشک، γ آهنگ افت دما در جریان آستانه (که با ارتفاع به‌طور خطی تغییر می‌کند)، T' پریشیدگی دما و T_1 دمای مشخصه لایه است.

با در نظر گرفتن روابط زیر برای مولفه‌های افقی و قائم سرعت (w و u):

$$u = -\frac{\partial \Psi}{\partial z}, \quad w = \frac{\partial \Psi}{\partial x}, \quad (3)$$

با فرض کوچک نبودن پریشیدگی‌ها و ثابت بودن گرادیان قائم دما و سرعت باد در شرایط اولیه، دستگاه معادلات غیرخطی به صورت معادله هلمهولتز برحسب پریشیدگی تابع جریان به دست می‌آید (کژونیکف، ۱۹۶۳ و ۱۹۹۹):

$$\nabla^2 \Psi' + k^2 \Psi' = 0, \quad \Psi' = \Psi - \bar{\Psi}, \quad \bar{\Psi} = -Uz, \quad (4)$$

که Ψ تابع جریان، $\bar{\Psi}$ تابع جریان ناآشفته در آستانه حرکت (شرایط مرزی جانبی در جهت بادسوی کوه است که در راستای محور x قرار دارد و عاری از هرگونه پریشیدگی است) و Ψ' پریشیدگی تابع جریان است. U سرعت جریان آستانه (شرایط اولیه) و مستقل از ارتفاع

در ایران اغلب عددی‌اند و در آنها به بررسی سامانه‌های همدیدی پرداخته شده است. در این پژوهش سعی بر آن است که با استفاده از یک مدل تحلیلی غیرخطی دو بُعدی که از نیروی اصطکاک و کوریولیس صرف نظر شده است، اقدام به شبیه‌سازی امواج کوهستان روی رشته‌کوه‌های فرضی تک و دو قله‌ای شود. جریان عبوری با توجه به طول کوه (که در اینجا با عنوان پهنای کوه ذکر شده است و به عبارتی، میانگین ارتفاعات در جهت عمود بر باد است) تغییر می‌کند. در واقع، کوهساری نمایش داده شده که نشان‌دهنده رشته‌کوه است و به اختصار با کلمه کوه از آن نام برده شده است.

۲ روش تحقیق

برای فرایندهای میان‌مقیاس جوی می‌توان از معادلات دینامیکی شامل تکانه، پیوستگی و انرژی (بی‌درروی) استفاده کرد. در این معادلات، از نیروی کوریولیس به علت میان‌مقیاس بودن پدیده مورد بررسی و از نیروی اصطکاک به علت کوچک بودن در مقابل نیروی شناوری صرف نظر می‌شود (چون مدل دو بُعدی است و از بعد سوم در راستای عمود بر کوه میان‌گیری شده است، می‌توان با تقریب قابل قبول از نیروی کوریولیس صرف نظر کرد). معادلات حاکم، شامل مؤلفه‌های x و z تکانه، انرژی ترمودینامیکی و پیوستگی در دستگاه مختصات دکارتی برای جو چینه‌بندی شده است.

$$\begin{cases} \frac{d\vec{V}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p - \vec{g}, \\ \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + (\nabla \cdot \vec{V}) = \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) \right] = 0, \\ \frac{d\Theta}{dt} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

که در این دستگاه معادلات \vec{V} بردار سرعت باد، p فشار، ρ چگالی، \vec{g} شتاب گرانی، Θ دمای پتانسیلی و t زمان است.

پیشیدگی‌ها به‌خصوص در قسمت سمت باد جریان (سمتی که باد آستانه می‌وزد) تضعیف می‌شوند. بنابراین برای هر خط جریان دلخواه می‌توان نوشت:

$$z = z_* + G(x), \quad (8)$$

که z_* نشان‌دهنده ارتفاع خط جریان نسبت به سطح زمین در جریان آستانه است. $G(x)$ مقدار انحراف از جریان آستانه در هر تراز است. برای تعیین کوهساری منطقه، $G(x)$ در سطح زمین برابر مشخصات ارتفاع کوه نسبت به سطح زمین قرار داده می‌شود. مقدار $G(x)$ با استفاده از نقشه‌های کوهساری و متوسط‌گیری در راستای عمود بر جریان آستانه به‌دست می‌آید. درواقع، پایین‌ترین خط جریان درحکم شرط مرزی زیرین (کوهساری) تعیین می‌شود.

با فرض تراکم‌ناپذیری هوا در طول خط جریان، می‌توان نوشت:

$$\Psi'(x, z) = UG(x), \quad \Psi = -Uz, \quad (9)$$

با توجه به مطالب فوق و تبدیل مختصات دکارتی به مختصات قطبی تابع‌های نیومن و بسل، می‌توان Ψ' را به شکل زیر نشان داد (کزونیکف، ۱۹۶۸ و ۱۹۹۹):

$$\Psi' = -Uk^{-1} \sum_{i=1}^n B_i \bar{\Psi}'(r_i, \phi_i), \quad (10)$$

که r_i و ϕ_i به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$r_i = \left[(x + a_i)^2 + z^2 \right]^{1/2}, \quad \phi_i = \frac{x + a_i}{|x + a_i|} \sin^{-1} \frac{z}{r_i}, \quad (11)$$

$$\bar{\Psi}' = \sum_{m=1}^{19} b'_m \tilde{\Psi}'(\bar{r}_m, \phi_m), \quad \bar{r}_m = \frac{2\pi r_m}{\lambda_c},$$

a_i فاصله مکانی مورد استفاده در مدل، و Δa_i فاصله افقی شبکه است که به‌صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$\Delta a_i = a_{i+1} - a_i = 0.1125 \lambda_c, \quad a_i = i \Delta a_i, \quad (12)$$

b'_m ضریبی است که معادل -0.15 ، -0.20 ، -0.40 ،

است. k را می‌توان با استفاده از روابط زیر معرفی کرد:

$$k = \frac{N}{U} = 2\pi \lambda_c^{-1}, \quad \lambda_c = 2\pi \frac{U}{N}, \quad (5)$$

$$N^2 = \frac{g}{\theta} \frac{d\theta}{dz} = g \frac{\gamma_a - \gamma}{T_i},$$

در اینجا N بسامد شناوری یا بسامد برانت-وایسالا، g شتاب گرانی، T_i دمای مشخصه لایه جو در جریان آستانه (برای حالت ناآشفته) و T دما برحسب کلوین است. مقیاس لیرا، λ_c را لیرا (۱۹۴۳) با استفاده از سرعت باد آستانه (U) و بسامد شناوری (N) معرفی کرد. در دینامیک شاره‌ها به‌منظور بررسی حرکت شاره از روی مانع (در اینجا امواج کوهستان) از عدد بدون بُعد فرود، نسبت انرژی جنبشی به انرژی پتانسیلی، استفاده و به‌صورت زیر تعریف می‌شود (علی‌اکبری بیدختی، ۱۳۸۳):

$$Fr = \frac{U}{Nh_m}, \quad (6)$$

که h_m ارتفاع بیشینه کوهستان است. در این تحقیق از پارامتر لیرا استفاده شده که علاوه بر در نظر گرفتن عوامل تاثیرگذار در تشکیل امواج کوهستان مانند نیروهای لختی و گرانی، فاکتورهای کوهساری نیز در آن گنجانده شده است. رابطه بین مقیاس لیرا و عدد فرود به‌صورت زیر است:

$$Fr = \frac{\lambda_c}{2\pi h_m} \quad (7)$$

۱-۲ خطوط جریان

یکی از مهم‌ترین مسائلی که درباره امواج کوهستان مطرح می‌شود، میزان شارش و چگونگی عبور جریان از روی موانع است. برای این کار می‌توان تابع جریان را محاسبه و خطوط جریان را در حالت‌های متفاوت رسم کرد.

در حل این معادله فرض می‌شود با افزایش ارتفاع

هم مقدار مؤلفه‌های افقی و قائم سرعت حاصل از مدل تحلیلی برای حالت‌های گوناگون رسم و تحلیل شده است. برای جزئیات بیشتر مؤلفه قائم باد، به معماریان و همکاران (۱۳۸۸) و مؤلفه افقی آن به سالاری و همکاران (۱۳۸۹) مراجعه شود.

۳ داده‌ها و روش تحقیق

در مرحله نخست از شبیه‌سازی، با اجرای مدل تحلیلی دو بُعدی میان‌مقیاس که منجر به حل معادله هلمهولتز با استفاده از معادلات بسل مرتبه اول و دوم می‌شود، شارش هوا روی کوه و در بادپناه آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. به‌علاوه، مدل برای شکل‌های ساده کوه (زنگی‌شکل منفرد و دوقله‌ای) با ارتفاعات و پهنای متفاوت، اجرا و نتایج مدل از جنبه دینامیکی تحلیل می‌شود.

با در نظر گرفتن دو سرعت باد آستانه انتخابی نزدیک به واقعیت و شرایطی که برای اجرای مدل در بخش ۲-۲ به آن اشاره شد، مقادیر محاسبه شده اعداد فرود با استفاده از پارامتر لیرای مفروض و ارتفاع‌های متفاوت کوه، در جدول ۱ آورده شده است. با توجه به شرایط ذکر شده، مدل فقط برای عدد فرود برابر با ۰/۶۲ قابل اجرا نیست.

در همه اجراها، گرادیان قائم دما در جریان آستانه ثابت و معادل $\gamma = -\frac{dT}{dz} = 0.1^\circ \text{Cm}^{-1}$ (نزدیک به شرایط آرمانی) است و دمای اولیه سطح زمین ۳۰۰ کلوین است. برای اجرای مدل، کمیت‌های گوناگون هواشناختی از قبیل میدان‌های افقی و قائم باد، تابع جریان و دما روی کوه و بادپناه آن موردنیاز است تا اثر کوه در جریان‌های جوئی تعیین شود.

۴ نتایج

۴-۱ اجرای مدل برای یک قله منفرد زنگی شکل در این قسمت از اجراهای مدل، یک قله منفرد در شبکه

۰/۰۲۰، ۰/۰۶۵، ۰/۰۲۳، ۰/۰۰۵، -۰/۳۷، ۱/۰، -۰/۳۸، ۰/۰۴۰، ۰/۰۲۵، ۰/۰۰۳، ۰/۰۱۲، ۰/۰۰۳، ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۱، -۰/۰۰۱ و ۰/۰۳ به کار می‌رود. میانگین تابع‌های جریان آشفستگی ($\tilde{\Psi}'$) را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$\tilde{\Psi}' = 0.25N_1(kr_i) \sin \phi_i + \pi^{-1} \sum_{v=1}^{\infty} \frac{2v}{(2v)^2 - 1} J_{2v}(kr_i) \sin 2v\phi_i, \quad (13)$$

که N_1 و J_{2v} اشاره به تابع‌های نیومن و بسل دارند. B_i از یک برنامه تخصصی به دست می‌آید که توضیحات بیشتر آن در کژونیکف (۱۹۹۹) آورده شده است. لازم به ذکر است که به علت مفصل بودن روابط ریاضی مدل و چگونگی اجرای آن، به طرح مختصر مطالب ضروری اکتفا شده است و برای آگاهی از جزئیات مبسوط مدل می‌توان به منابع اشاره شده مراجعه کرد.

۲-۲ خطوط هم‌تندی

علاوه بر استفاده از معادلات فوق برای به دست آوردن تابع جریان، می‌توان این معادلات را برای محاسبه مؤلفه‌های افقی و قائم سرعت به شکل زیر به کار برد:

$$\frac{\partial \tilde{\Psi}}{\partial x} = 0.25 \left[\frac{k}{2} (N_0(kr_i) - N_2(kr_i)) \left(\frac{x+a_i}{r_i} \right) \sin \phi + N_1(kr_i) \left(-z/r_i^2 \right) \cos \phi \right] \quad (14)$$

$$+ \pi^{-1} \sum_{v=1}^{\infty} \frac{2v}{(2v)^2 - 1} \left[\frac{k}{2} (j_{2v-1}(kr_i) - j_{2v+1}(kr_i)) \left(\frac{x+a_i}{r_i} \right) \sin 2v\phi + j_{2v}(kr_i) (2v) \left(-z/r_i^2 \right) \cos 2v\phi \right]$$

$$\frac{\partial \tilde{\Psi}}{\partial z} = 0.25 \left[\frac{k}{2} (N_0(kr_i) - N_2(kr_i)) \left(z/r_i^2 \right) \sin \phi + N_1(kr_i) \left(\frac{x+a_i}{r_i} \right) \cos \phi \right], \quad (15)$$

$$+ \pi^{-1} \sum_{v=1}^{\infty} \frac{2v}{(2v)^2 - 1} \left[\frac{k}{2} (j_{2v-1}(kr_i) - j_{2v+1}(kr_i)) \left(z/r_i^2 \right) \sin 2v\phi + j_{2v}(kr_i) (2v) \left(\frac{x+a_i}{r_i} \right) \cos 2v\phi \right]$$

که با استفاده از رابطه (۳)، مؤلفه‌های افقی و قائم باد محاسبه می‌شود. در بخش نتایج این بررسی، خطوط

کیلومتر افزایش می‌یابد و مدل با پارامتر لیرای $7/8$ کیلومتر و عدد فرود $0/82$ اجرا می‌شود. مقایسه نتایج این اجرای مدل برای یک کوه باریک با نتایج آزمایش ذکر شده در فوق (شکل‌ها نشان داده نشده است) حاکی از آن است که خطوط جریان در این اجرا دارای پشته‌ها و ناوه‌های عمیق‌تر بوده است و بیشترین دامنه آنها از حدود ارتفاع $2/9$ تا $7/2$ کیلومتری امتداد می‌یابد (شکل ۱-الف).

همچنین با افزایش پهنای کوه، به‌طور چشم‌گیر پشته‌ها و ناوه‌های امواج تقویت می‌شوند و حتی دو پرنده در بین ارتفاع 3 تا 7 کیلومتر بر فراز کوه مشاهده می‌شود (شکل ۱-ب).

در آزمایش بعد، با ثابت نگه داشتن ارتفاع قله ($1/5$ کیلومتر) و افزایش پارامتر لیرا به 10 کیلومتر، عدد فرود به $1/06$ می‌رسد. در این آزمایش، کاهش دامنه خطوط جریان، هم برای کوه باریک و هم برای کوه پهن به چشم می‌خورد (شکل ۲). نکته قابل‌توجه آنکه تعداد خطوط جریان بسته به پهنای کوه (شکل ۲-ب)، نسبت به اجرای قبلی، از دو مورد به یک مورد کاهش یافته و گسترده‌گی پرنده آن نیز کوچک‌تر شده است.

۲-۱-۴ مؤلفه‌های افقی و قائم سرعت روی قله

منفرد باریک و پهن

مقادیر سرعت قائم محاسبه شده براساس اجرای مدل با ارتفاع قله $1/5$ کیلومتر و پارامتر لیرای $7/8$ کیلومتر در شکل‌های ۱-ج و ۱-د آمده است. برای کوه باریک (شکل ۱-ج)، در ارتفاع 5 کیلومتری بیشینه سرعت قائم بالاسو به 7 متر بر ثانیه می‌رسد؛ حال آن‌که در سطح زمین واقع در بادپناه کوه و همچنین در حوالی ارتفاع 9 کیلومتری، سرعت قائم پایین‌سو بیشینه است. در این حالت نیز با افزایش پهنای کوه، خطوط جریان کج‌شدگی به سمت غرب دارند (شکل ۱-د). در ارتفاع $5/5$

دو بُعدی X و Z به ابعاد به ترتیب 300 و 10 کیلومتر در نظر گرفته شده است. با محاسبه عدد فرود نتیجه می‌شود که می‌توان مدل را برای دو حالت $\lambda_c = 7/8 \text{ km}$ و $\lambda_c = 10 \text{ km}$ با ارتفاع‌های بیشینه $0/5$ ، 1 ، $1/5$ و 2 کیلومتر برای کوه باریک به پهنای تقریبی 30 کیلومتر و کوه پهن به پهنای 150 کیلومتر اجرا کرد.

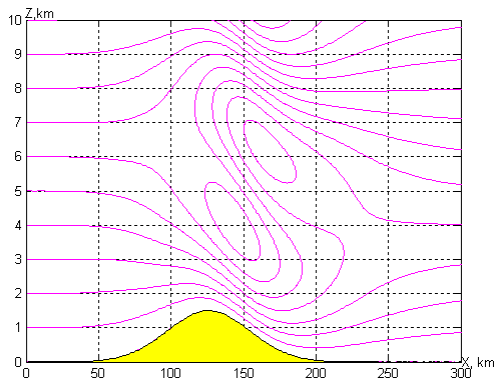
۱-۱-۴ خطوط جریان روی قله منفرد باریک و پهن

اجراهای گوناگون مدل با در نظر گرفتن پارامتر لیرا برابر $7/8$ کیلومتر، $U = 13/76 \text{ ms}^{-1}$ و ارتفاع کوه $0/5$ کیلومتر آغاز می‌شود. برای این حالت، عدد فرود معادل $2/48$ به دست می‌آید (جدول ۱). انتظار می‌رود برای کوه باریک، طبق رابطه پاشندگی به شکل $m^2 = N^2 / \bar{u}^2 - k^2$ که m و k به ترتیب اعداد موج در راستاهای x و z هستند، $m^2 < 0$ شده و خطوط جریان با افزایش ارتفاع از شکل کوه پیروی کنند. همچنین با افزایش پهنای کوه، $m^2 > 0$ شده و خطوط جریان کج‌شدگی به سمت غرب یافته و دامنه امواج عکس شود (هولتون، ۲۰۰۴).

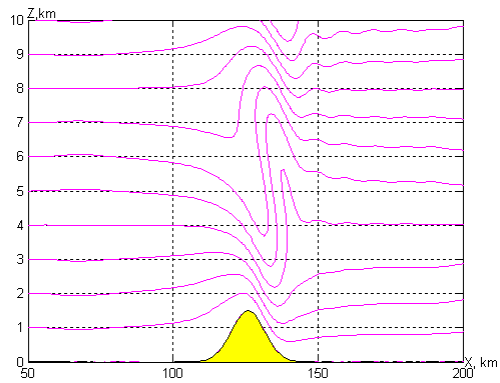
جدول ۱. مقادیر محاسبه شده عدد فرود با استفاده از پارامتر لیرای مفروض و ارتفاعات مختلف کوه.

ارتفاع کوه	پارامتر لیرا	عدد بدون بعد فرود
h (km)	λ_c (km)	
0/5	7/8	2/48
0/5	10	3/18
1	7/8	1/24
1	10	1/59
1/5	7/8	0/82
1/5	10	1/06
2	7/8	0/62
2	10	0/79

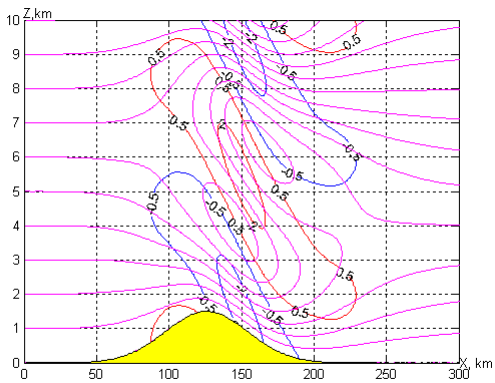
در آزمایشی دیگر، ارتفاع کوه تک‌قله‌ای به $1/5$



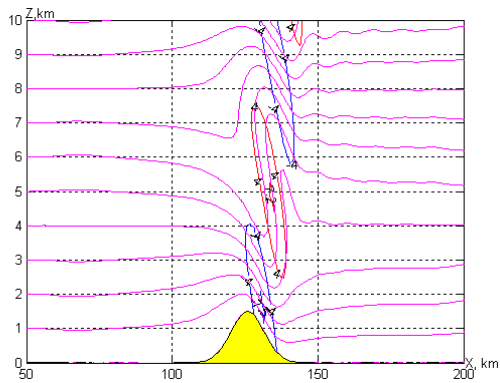
(ب)



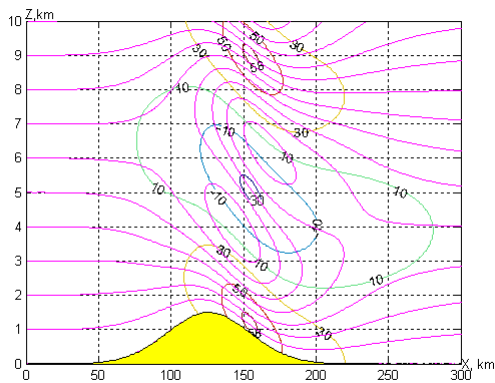
(الف)



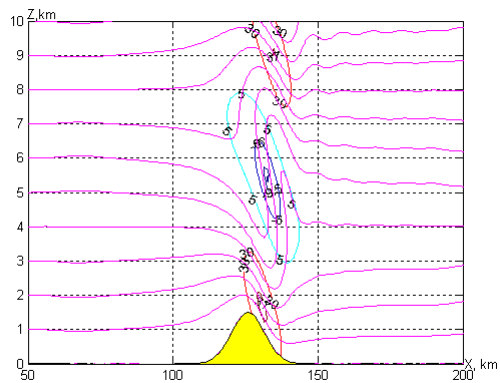
(د)



(ج)



(و)



(ه)

شکل ۱. خطوط جریان به تنهایی (الف-ب) و همراه با پربندهای سرعت قائم (ج-د) و پربندهای سرعت افقی (ه-و) مربوط به اجرای مدل با پارامتر لیرای $7/8$ کیلومتر (معادل عدد فرود 0.82) و ارتفاع قله $1/5$ کیلومتر برای کوه باریک (شکل‌های ستون سمت راست) و کوه پهن (شکل‌های ستون سمت چپ). در شکل‌های ج-د پربندهای سرخ معرف حرکت‌های بالاسو و پربندهای آبی معرف حرکت‌های پایین‌سو است. در شکل‌های ه-و نیز مقادیر مثبت نشان‌دهنده حرکت‌های غربی و مقادیر منفی نشان‌دهنده حرکت‌های شرقی است.

است.

کیلومتری، سرعت قائم بالاسو به بیش از 2 متر بر ثانیه می‌رسد؛ درحالی‌که در سطح زمین واقع در بادپناه کوه و همچنین در ارتفاع 9 کیلومتری سرعت قائم پایین‌سو بیشینه

نتایج محاسبه سرعت قائم مربوط به اجرای مدل با ارتفاع قله $1/5$ کیلومتر و پارامتر لیرای 10 کیلومتر (معادل

است؛ حال آن که در سطح زمین واقع در بادپناه کوه و در ارتفاع ۹ کیلومتر سرعت افقی بیشینه ۵۸ متر بر ثانیه است. باید به این نکته توجه داشت که سرعت‌های افقی حاصل در سطح زمین به علت نادیده گرفته شدن اصطکاک، دقت کافی ندارند.

برای کوه باریک مربوط به اجرای مدل با پارامتر لیرای ۱۰ کیلومتر (شکل ۲-ه)، جایی که بیشینه دامنه موج وجود دارد، سرعت افقی کمینه به ۳- متر بر ثانیه می‌رسد و در سطح زمین واقع در بادپناه کوه بیشینه سرعت افقی باد ۳۸ متر بر ثانیه است. در مورد کوه پهن (شکل ۲-و)، بیشینه سرعت افقی باد در سطح زمین واقع در بادپناه کوه بیش از ۵۰ متر بر ثانیه است.

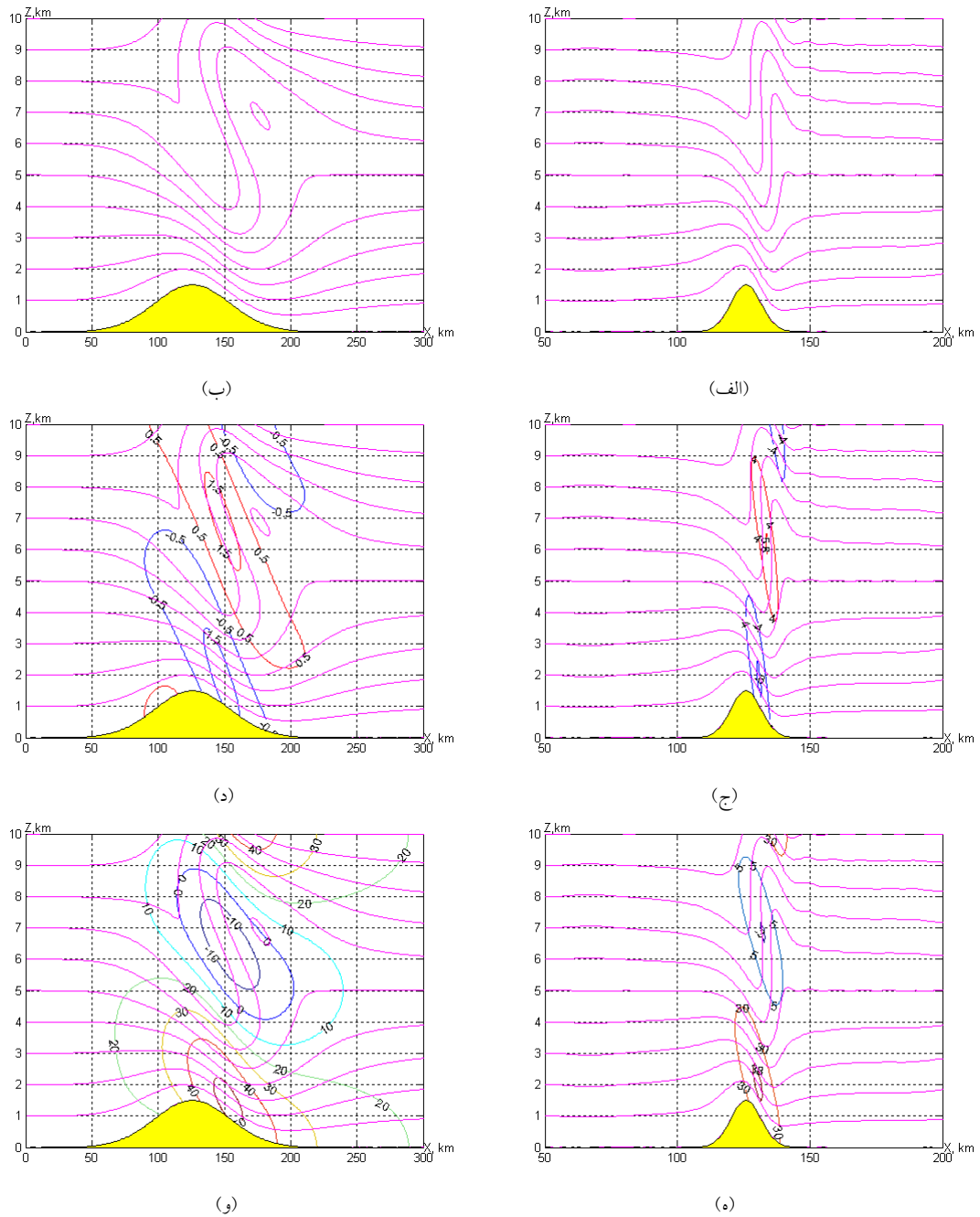
نتایج اجراهای گوناگون برای قله منفرد، شامل بیشینه دامنه خطوط جریان، سرعت‌های افقی کمینه و بیشینه و سرعت قائم بالاسو مربوط به کوه‌های باریک و پهن در جدول ۲ آورده شده است.

عدد فرود (۱/۰۶) در شکل‌های ۲-ج و ۲-د مشاهده می‌شود. برای کوه باریک (شکل ۲-ج)، از ارتفاع ۴/۵ تا ۸ کیلومتر، جایی که بیشینه دامنه موج وجود دارد، سرعت قائم به ۵ متر بر ثانیه رسیده است. برای کوه پهن (شکل ۲-د)، در ارتفاع ۵/۴ تا ۸/۵ کیلومتر، سرعت قائم بالاسو بیش از ۱/۵ متر بر ثانیه است.

مقادیر سرعت‌های افقی محاسبه شده مربوط به اجراهای مدل با ارتفاع قله ۱/۵ کیلومتر و پارامترهای لیرای ۷/۸ و ۱۰ کیلومتر نیز به ترتیب در شکل‌های ۱ و ۲ آورده شده است. برای کوه باریک با پارامتر لیرای ۷/۸ کیلومتر (شکل ۱-ه)، در ارتفاع ۵/۵ کیلومتر واقع در بادپناه کوه، کمینه سرعت افقی ۹/۵- متر بر ثانیه است؛ در حالی که در سطح زمین و در ارتفاع ۹ کیلومتری، سرعت افقی به بیشینه مقدار ۳۷ متر بر ثانیه می‌رسد. با افزایش پهنای کوه در همان اجرا (شکل ۱-و)، در ارتفاع ۵/۵ کیلومتر، سرعت افقی کمینه کمتر از ۳۰- متر بر ثانیه

جدول ۲. بیشینه دامنه خطوط جریان همراه با سرعت‌های قائم و افقی برای قله منفرد با شرایط متفاوت.

کوه پهن			کوه باریک				عدد بدون بُعد فرود	پارامتر لیرا	ارتفاع کوه	
سرعت کمینه افقی	سرعت بیشینه افقی	سرعت بالاسو	بیشینه دامنه خطوط جریان	سرعت کمینه افقی	سرعت بیشینه افقی	سرعت بالاسو				
U (m/s)	U (m/s)	W (m/s)	Δh (km)	U (m/s)	U (m/s)	W (m/s)	Δh (km)	$Fr = \lambda_c / 2\pi h$	λ_c (km)	h (km)
-	-	۰/۳	۱	-	-	۱/۳۵	۰/۸	۲/۴۸	۷/۸	۰/۵
-	-	۰/۲۸	۰/۷	-	-	۱/۳	۰/۶	۳/۱۸	۱۰	۰/۵
-۶	۳۳	۰/۹	۳/۶	۱	۲۶	۳/۵	۲/۲	۱/۲۴	۷/۸	۱
۱	۳۵	۰/۷	۲/۶	۶	۲۹	۳	۱/۶	۱/۵۹	۱۰	۱
-۳۱	۵۸	۲	۶/۳	-۹/۵	۳۷	۷/۲	۴/۳	۰/۸۲	۷/۸	۱/۵
-۱۶	۵۱	۱/۵	۶	-۳	۳۸	۵/۵	۴	۱/۰۶	۱۰	۱/۵
-۴۱	۸۰	۳/۵	۸/۵	-۱۴	۵۰	۱۰	۶	۰/۷۹	۱۰	۲



شکل ۲. مانند شکل ۱ ولی برای پارامتر لیرای ۱۰ کیلومتر (معادل عدد فرود ۱/۰۶) و ارتفاع قله ۱/۵ کیلومتر.

اجرا می‌شود. برای کوه دوقله‌ای باریک، پهنای تقریبی ۵۰ کیلومتر و برای کوه پهن، پهنای ۲۵۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است.

۲-۴ اجرای مدل برای کوه دوقله‌ای با ارتفاعات یکسان

در اجراهای این بخش، شرایط شبیه به شرایط اجرای مدل برای یک قله منفرد است، با این تفاوت که مدل روی کوه دوقله‌ای با ارتفاع‌های یکسان ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ کیلومتر

۱-۲-۴ خطوط جریان روی دو قله جفتی باریک و

پهن

در این قسمت نیز شبیه حالت تک قله‌ای منفرد، ابتدا مدل به ازای پارامتر لیرای $7/8$ کیلومتر و ارتفاع قله‌ها برابر $0/5$ کیلومتر (معادل عدد فرود $2/48$) اجرا شده است. در صورتی که پارامتر لیرا $7/8$ کیلومتر و ارتفاع قله‌ها $1/5$ کیلومتر (معادل عدد فرود $0/82$) باشد، مشاهده می‌شود که برای کوه دو قله‌ای باریک (شکل ۳-الف)، ارتفاع خط جریانی که دارای بیشترین دامنه است، در حدود 6 کیلومتری در سمت بادسوی قله اول بوده است و بعد از قله اول، دامنه آن از ارتفاع $4/1$ تا ارتفاع $7/8$ کیلومتر کشیده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود، در سمت بادپناه قله دوم، عمق و ارتفاع پشته و ناوه خط جریان بسیار زیاد شده و به بیشینه مقدار $5/3$ کیلومتر می‌رسد (از حدود $2/9$ تا $8/2$ کیلومتر). با افزایش پهنای کوه‌ها (شکل ۳-ب) خطوط جریان بسته‌ای روی قله‌ها و در سمت بادپناه آنها ظاهر می‌شود و عمق و ارتفاع ناوه‌ها و پشته‌های امواج افزایش چشم‌گیری پیدا می‌کند، به طوری که روی قله دوم مراکز بسته قوی‌تری به وجود می‌آید. در ارتفاع $1/5$ الی 6 کیلومتر، چهار پرنبد با جهت جریان هوا به سوی پایین و در ارتفاع $4/5$ تا $7/9$ کیلومتر سه پرنبد با جهت جریان هوا به سوی بالا روی قله دوم مشاهده می‌شود.

در اجرای بعدی مدل، ارتفاع دو قله $1/5$ کیلومتر باقی مانده است، ولی پارامتر لیرا به 10 کیلومتر افزایش می‌یابد (معادل عدد فرود $1/06$). نتایج این اجرا در شکل ۴ آمده است. با توجه به شکل، دامنه خطوط جریان برای کوه‌های باریک و پهن نسبت به اجرای قبلی که پارامتر لیرا کوچک‌تر بود (شکل ۳)، کاهش می‌یابد و به علاوه، خطوط جریان بسته کمتری برای کوه دو قله‌ای پهن به چشم می‌خورد (شکل ۴-ب).

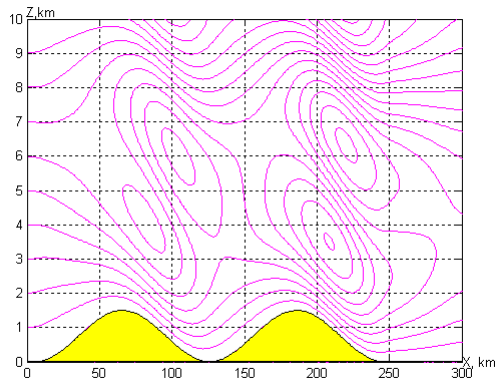
۲-۲-۴ مؤلفه‌های افقی و قائم سرعت روی دو قله

جفتی باریک و پهن

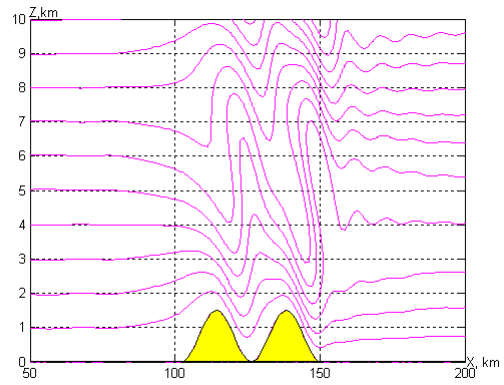
مقادیر محاسبه شده سرعت قائم براساس اجرای مدل برای دو قله $1/5$ کیلومتری و پارامتر لیرای $7/8$ کیلومتر (معادل عدد فرود $0/82$) در شکل‌های ۳-ج و ۳-د نشان داده شده است. برای دو قله باریک (شکل ۳-ج)، در ارتفاع 4 تا 5 کیلومتر بعد از قله دوم، بیشینه سرعت قائم بالاسو به 10 متر بر ثانیه می‌رسد و در سطح زمین واقع در بادپناه قله دوم و همچنین در ارتفاع 8 کیلومتر، سرعت قائم پایین‌سو بیشینه است. در این اجرا نیز با افزایش پهنای کوه، خطوط جریان کج شدگی به سمت غرب دارند (شکل ۳-د). در ارتفاع 5 کیلومتری بعد از قله دوم، سرعت قائم دارای مقداری بیش از $3/5$ متر بر ثانیه است، در حالی که بعد از قله اول، سرعت قائم بالاسو کمتر از این مقدار است. همچنین در سطح زمین واقع در بادپناه قله دوم و در ارتفاع 8 تا 9 کیلومتر، بیشینه سرعت قائم پایین‌سو $3/5$ متر بر ثانیه دیده می‌شود.

نتایج سرعت قائم محاسبه شده برای اجرای مدل با در نظر گرفتن دو قله $1/5$ کیلومتری و پارامتر لیرای 10 کیلومتر (معادل عدد فرود $1/06$) در شکل‌های ۴-ج و ۴-د آورده شده است. برای دو قله باریک (شکل ۴-ج)، از ارتفاع 5 تا $6/5$ کیلومتر، جایی که بیشینه دامنه موج وجود دارد، سرعت قائم بعد از قله دوم به 8 متر بر ثانیه می‌رسد. برای دو قله پهن (شکل ۴-د)، از ارتفاع $4/2$ تا 8 کیلومتر بعد از قله دوم، پرنبد سرعت قائم بالاسو با مقدار 2 متر بر ثانیه مشاهده می‌شود.

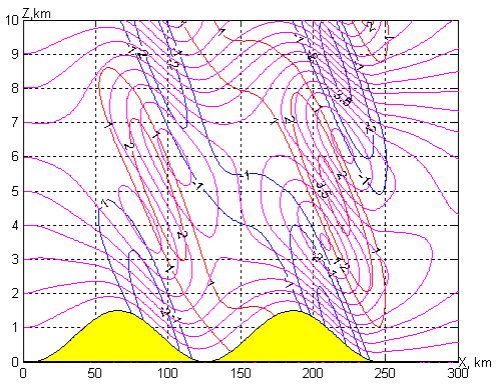
سرعت‌های افقی محاسبه شده مربوط به اجراهای مدل با دو قله $1/5$ کیلومتری و پارامترهای لیرای $7/8$ (معادل عدد فرود $0/82$) و 10 کیلومتر (معادل عدد فرود $1/06$) نیز به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ آورده شده است. برای دو قله باریک با عدد فرود $0/82$ (شکل ۳-ه)، بیشینه سرعت افقی بعد از قله دوم واقع در سطح زمین و همچنین در



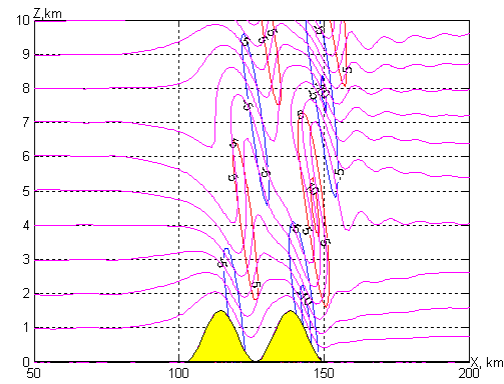
(ب)



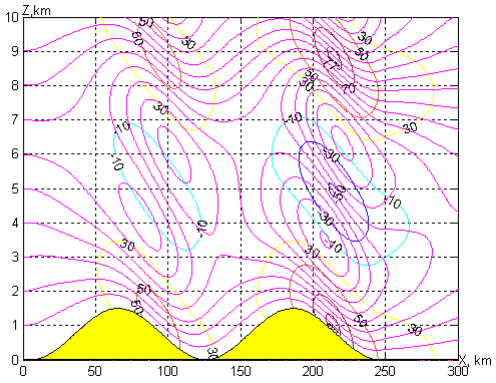
(الف)



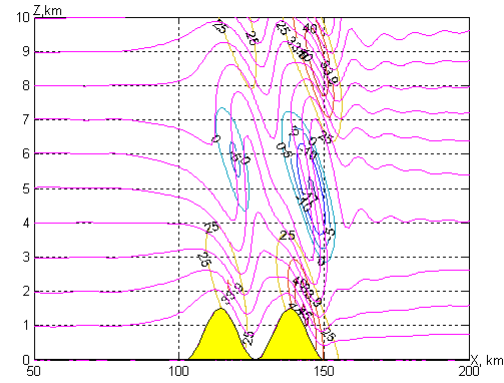
(د)



(ج)



(و)



(ه)

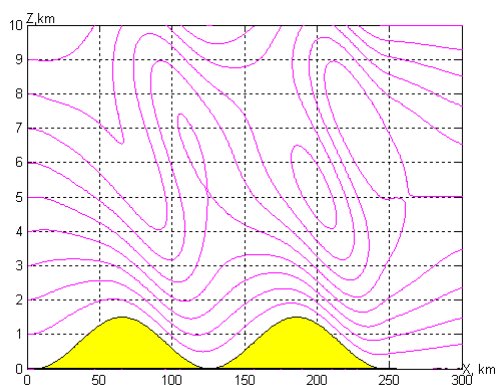
شکل ۳. مانند شکل ۱ ولی برای کوه دوقله‌ای.

افقی در سطح زمین واقع در پشت به باد و در حدود ارتفاع ۹ کیلومتری قله دوم به طور فوق‌العاده‌ای افزایش می‌یابد (بیش از ۵۰ متر بر ثانیه). چنین سرعتی در سطح زمین می‌تواند به مناطق مسکونی و حتی کشاورزی خسارت

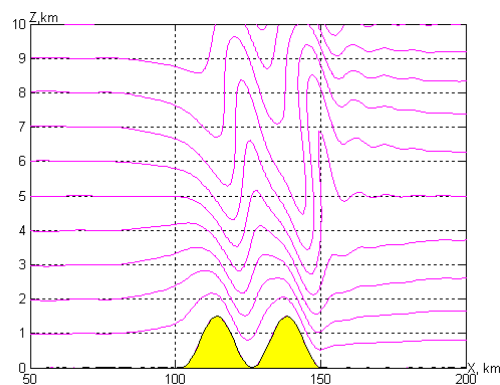
حدود ارتفاع ۹ کیلومتر دارای مقدار ۴۴ متر بر ثانیه است؛ درحالی‌که کمینه سرعت افقی در فاصله بین این دو بیشینه (حدود ارتفاع ۵ کیلومتری)، کمتر از ۱۷- متر بر ثانیه است. با افزایش پهنای کوه (شکل ۳-و)، مقدار سرعت

پشت به باد قله دوم و در ارتفاع بالاتر از ۱۰ کیلومتر، بیشینه سرعت افقی باد ۴۳ متر بر ثانیه است. با افزایش پهنای کوه (شکل ۴-و)، در سطح زمین واقع در

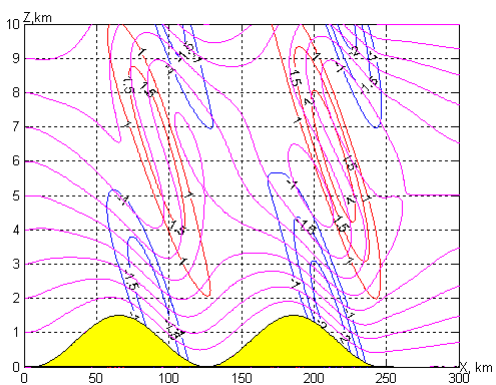
وارد کند. همچنین در حدود ارتفاع ۵ کیلومتر و در بادپناه قله دوم، سرعت افقی باد کمتر از ۵۰-متر بر ثانیه است. با توجه به شکل ۴-ه مربوط به دو قله باریک با عدد فرود ۱/۰۶، مشاهده می‌شود که در سطح زمین واقع در



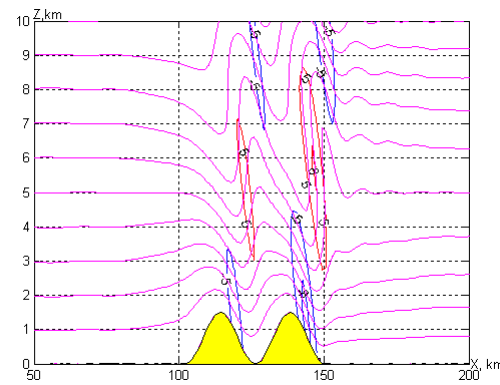
(ب)



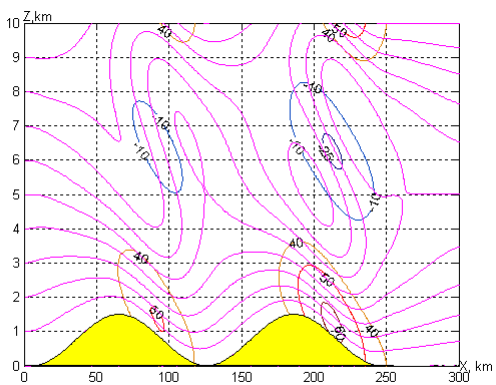
(الف)



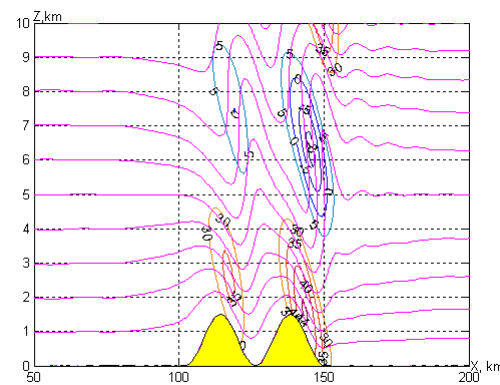
(د)



(ج)



(و)



(ه)

شکل ۴. مانند شکل ۲ ولی برای کوه دوقله‌ای.

جدول ۳. بیشینه دامنه خطوط جریان و سرعت‌های قائم و افقی برای کوه دو قله‌ای با شرایط متفاوت.

کوه‌های پهن					کوه‌های باریک					عدد بدون بُعد فرود	پارامتر لیرا	ارتفاع کوه
سرعت افقی	سرعت عمودی	سرعت عمودی	بیشینه دامنه خطوط	بیشینه دامنه خطوط	سرعت افقی	سرعت عمودی	سرعت عمودی	بیشینه دامنه خطوط	بیشینه دامنه خطوط			
U (m/s)	U (m/s)	W (m/s)	$\Delta h(km)$	$\Delta h(km)$	U (m/s)	U (m/s)	W (m/s)	$\Delta h(km)$	$\Delta h(km)$	$2\pi h \lambda_c Fr =$	$\lambda_c (km)$	h(km)
-	-	۰/۳۶	۱	۰/۹	-	-	۱/۵	۰/۹	۰/۷	۲/۴۸	۷/۸	۰/۵
-	-	۰/۳	۰/۸	۰/۶	-	-	۱/۳	۰/۷	۰/۵	۳/۱۸	۱۰	۰/۵
-۱۰	۳۵	۱	۴/۴	۳/۶	-۲	۳۰	۴/۵	۳/۹	۱/۵	۱/۲۴	۷/۸	۱
۰	۳۶	۰/۹	۳/۴	۲/۵	۳	۳۲	۴	۲/۳	۱/۵	۱/۵۹	۱۰	۱
-۵۰	۷۷	۳/۵	۷/۲	۶/۲	-۱۷	۴۴	۱۰	۵/۷	۳/۸	۰/۸۲	۷/۸	۱/۵
-۲۰	۶۰	۲	۷	۵/۸	-۸	۴۳	۸	۴/۸	۲/۸	۱/۰۶	۱۰	۱/۵
-۷۵	۱۱۰	۵/۵	بیش از ۱۰	۹	-۲۵	۶۰	۱۰	۶/۸	۴/۹	۰/۷۹	۱۰	۲

صرف نظر می‌شود، اما در نهایت خطای مدل کمتر از یک مدل سه بُعدی است (تیکسیرا و همکاران، ۲۰۰۸).

با توجه به نتایج اجراهای گوناگون برای قله منفرد (شکل‌های ۱ و ۲ و جدول ۲)، مشاهده می‌شود که هر یک از عوامل شامل عدد فرود، پارامتر لیرا، ارتفاع و پهنای کوه می‌تواند در شارش‌های جوئی و ویژگی‌های آن در برخورد به کوه تاثیر مهم داشته باشد. با ثابت نگه داشتن ارتفاع و پهنای کوه و افزایش پارامتر لیرا، بیشینه دامنه خطوط جریان و در نتیجه بیشینه مقدار سرعت بالاسو کاهش می‌یابد، ولی بیشینه و کمینه سرعت‌های افقی از نظم و روند خاصی پیروی نمی‌کنند. با ثابت نگه داشتن همه عوامل و فقط افزایش پهنای کوه، مشاهده می‌شود که بیشینه دامنه خطوط جریان افزایش می‌یابد، اما به علت کج‌شدگی خطوط جریان به سمت غرب با ارتفاع، از مقدار سرعت قائم بسیار کاسته می‌شود و درعین حال مقدار بیشینه مؤلفه افقی سرعت همراه با افزایش است. ثابت ماندن ارتفاع و پهنای قله و افزایش عدد فرود نیز سبب کاهش بیشینه دامنه خطوط جریان و بیشینه سرعت

باد قله دوم، سرعت افقی بیش از ۶۰ متر ثانیه و کمینه آن کمتر از ۲۰- متر بر ثانیه (در ارتفاع ۵ تا ۷/۵ کیلومتر) است.

خلاصه نتایج حاصل از اجراهای گوناگون شامل بیشینه دامنه خطوط جریان همراه با سرعت‌های افقی کمینه و بیشینه و سرعت قائم بالاسو برای کوه دو قله‌ای در جدول ۳ نشان داده شده است.

۵ نتیجه‌گیری

در این تحقیق از یک مدل تحلیلی دو بُعدی میان‌مقیاس برای بررسی چگونگی شارش جریان و مولفه‌های افقی و قائم سرعت روی کوه و بادپناه آن استفاده شده است. اگرچه به نظر می‌رسد که کاربست مدل سه بُعدی منجر به نتایج دقیق‌تری شود، اما به علت پیچیدگی‌های بسیار در معادلات حاکم و حل آنها، در حالت سه بُعدی میزان خطای محاسبات افزایش می‌یابد. به بیان دیگر، با وجود اینکه در مدل تحلیلی دو بُعدی از برخی پارامترها

بالاسو می‌شود. همچنین افزایش ارتفاع قله به تنهایی نیز موجب افزایش چندبرابری بیشینه دامنه خطوط جریان و به تبع آن بیشینه سرعت بالاسو و همچنین بیشینه سرعت افقی می‌شود.

مقایسه تاثیر عوامل گوناگون روی شارش‌های جوئی که به کوه تک قله‌ای برخورد می‌کنند، حاکی از آن است که افزایش ارتفاع قله اثر بیشتر و محسوس‌تری بر مؤلفه‌های افقی و قائم سرعت باد روی کوه و در بادپناه آن دارد که علت آن می‌تواند تقویت خطوط جریان و افزایش گرادیان خطوط در مجاورت سطح بادپناه کوه باشد. باید توجه داشت که چون اثر وشکسانی در مدل در نظر گرفته نشده است، مقادیر به‌دست آمده برای سرعت در سطح زمین واقعی نیست و درستی لازم را ندارد.

در مورد کوه دو قله‌ای می‌توان گفت که وجود قله دوم موجب تقویت مؤلفه‌های قائم و افقی سرعت می‌شود که علت آن تقویت خطوط جریان در بادپناه قله دوم است. با توجه به شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود که چرخندهای ایجاد شده روی کوه‌های دو قله‌ای پهن قوی‌تر از کوه‌های باریک هستند و شدت چرخند روی قله دوم کوه‌ها نیز بزرگ‌تر است. نکته دیگر آنکه به علت کج شدگی بیشتر خطوط جریان به سمت غرب با ارتفاع، مقادیر سرعت قائم روی کوه‌های پهن نسبت به کوه‌های باریک ضعیف‌تر است. همچنین از آنجاکه بعد از قله باریک، گرادیان قائم خطوط جریان بسیار بیشتر است، مقدار سرعت قائم در سمت بادپناه کوه افزایش می‌یابد. به‌علاوه، مقدار مؤلفه افقی سرعت در بادپناه کوه‌های پهن به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد که می‌تواند موجب جریان افقی شدید هوا در نزدیکی سطح بادپناه کوه‌های پهن دو یا چند قله‌ای شود.

با توجه به حرکات بالاسو و پایین‌سوی متناوب همراه با خطوط جریان در برخورد با مانع کوهستان، مشاهده می‌شود که در جلوی ناو‌های خطوط جریان حرکات

بالاسو و در پشت آن حرکات پایین‌سو به بیشینه مقدار خود می‌رسد. در اثر این امر، گرادیان افقی شدید سرعت قائم ایجاد می‌شود که می‌تواند با ایجاد لرزش‌های تند برای پرواز هواپیماها خطر ساز باشد.

منابع

احمدی گیوی، ف. و نجیبی فر، ی.، ۱۳۸۳، مطالعه چرخندزایی در پشت به باد کوه‌های آلپ و اثر آن بر آب و هوای خاورمیانه برای دوره یک ساله: فیزیک زمین و فضا، ۳۰(۲)، ۱۹-۱.

سالاری، م.، احمدی گیوی، ف. و معماریان، م. ح.، ۱۳۸۹، بررسی تاثیر امواج کوهستان بر سرعت افقی باد با استفاده از یک مدل تحلیلی دو بُعدی: چهاردهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ۲۱-۲۳ اردیبهشت ۱۳۸۹.

علی اکبری بیدختی، ع. ع.، ۱۳۸۳، مبانی دینامیک شارها: مؤسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران- ایران.

علیزاده، ا.، آزادی، م. و علی اکبری بیدختی، ع. ع.، ۱۳۸۷، بررسی نقش رشته کوه البرز در تقویت سامانه‌های همدیدی: فیزیک زمین و فضا، ۳۴(۱)، ۲۴-۹.

مرادی، م.، مشکواتی، ا. ح.، آزادی، م. و علی اکبری بیدختی، ع. ع.، ۱۳۸۶، بررسی تحلیلی شارش هوای روی کوهستان: فیزیک زمین و فضا، ۳۳(۱)، ۱۵۵-۱۳۵.

معماریان، م. ح.، احمدی گیوی، ف. و سالاری، م.، ۱۳۸۸، بررسی امواج کوهستان ناشی از شارش‌های جوئی با استفاده از یک مدل تحلیلی دو بُعدی: هشتمین همایش پیش‌بینی عددی وضع هوا، پژوهشکده هواشناسی تهران، ۹۰-۸۱.

Farahani, M. M. and Wu, R., 2003, Mountain drag and adjustment to equilibrium: A numerical study. J. of the Earth and Space

- Atmospheric Overflow above the Mountains: Mir, Moscow, 200 pp.
- Kozhevnikov, V. N., and M. H. Memarian, 2006, Orographical disturbances and flights safety problems over mountains in Iran: (in Russian), Issues of risk analysis, **3**, 346-361.
- Long, R. R., 1953, Some aspects of stratified fluids. 1. A theoretical investigation: *Tellus*, **5**, 42-58.
- Lyra, G., 1943, Theorie der stationaren Leewellenstromung in freier Atmosphere: *Angew. Math. Mech.*, **23**, 1-28.
- Memarian, L. R., Kozhevnikov., M. H., and Dmitriev-Arrago, V. N., 2009, Waves clouds over mountains: *Russian Meteorology and Hydrology*, **34**, 604-612.
- Queney, P., 1948, The problem of air flow over mountains: A summary of theoretical studies: *B. Am. Meteorol. Soc.* **29**, 16-26.
- Teixeira, M. A. C., M. A. Miranda., and J.L. Argain, 2008, Mountain waves in two-layer sheared flows: Critical-level effects, wave reflection, and drag enhancement: *J. Atmos. Sci.*, **65**, 1912-1926.
- Physics., **29**, 1-12.
- Forchtogott, J., 1949, Wave currents on the leeward side mountain crests: *Meteorologicke Zparavy*, **3**, 5-49. (As on translation in library, British Meteorological Office.)
- Gill, A. E., 1982, *Atmospheric – Ocean Dynamics*. Academic Press, 666 pp.
- Hayes, J. L., Williams, R.T., and Rennick, M. A., 1993, Lee cyclogenesis, Part II: Numerical studies: *J. Atmos. Sci.*, **50**, 2354-2368.
- Holton, J. R., 2004, *An Introduction to Dynamic Meteorology*: Elsevier, Academic Press, 553pp.
- Klemp, J. B., and Lilly, D. K., 1978, Numerical simulation of hydrostatic mountain waves: *J. Atmos. Sci.*, **3**, 78-107.
- Kozhevnikov, V. N., 1963, One nonlinear problem of orographic disturbance of a stratified airflow: *Izv. AN SSSR, Ser. Geophys.*, **7**, 1108-1116.
- Kozhevnikov, V. N., 1968, Orographic disturbances in two-dimensional stationary problem: *Bull, Izv. Akad. Nauk SSSR*, (1), 4.
- Kozhevnikov, V. N., 1999, Disturbances of the