

پیش‌بینی تلاطم هوای صاف در غرب ایران (مسیر پروازی تهران- اهواز و

تهران- اردبیل) با استفاده از شبیه‌سازی‌های مدل WRF

محمد مهدی آریامنش^۱، سرمد قادر^{۲*}، عباسعلی علی اکبری بیدختی^۳ و امید علیزاده^۴^۱ دانشجوی دکتری هواشناسی، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران^۲ دانشیار، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران^۳ استاد، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران^۴ دانشیار، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۲۵، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۷)

چکیده

تلاطم هوای صاف پدیده‌ای جوّی است که می‌تواند سلامت پرواز را به خطر اندازد و محدودیت‌هایی را در مراقبت پرواز و عملیات هوانوردی ایجاد کند؛ از این رو با توجه به اینکه کشور ایران در منطقه غرب آسیا واقع است و به نوعی دروازه ورود به اروپای شرقی به شمار می‌رود، به نظر می‌رسد مطالعه پیش‌بینی وقوع تلاطم هوای صاف روی کشور ضروری باشد. به این منظور از شاخص‌های تلاطم هوای صاف مانند عدد ریچاردسون، چینش قائم باد و شاخص داتن استفاده و با گزارش‌های خلبان و نقشه‌های هوانوردی راستی‌آزمایی شد. سپس با استفاده از داده‌های مدل GFS به عنوان ورودی مدل میان‌مقیاس WRF و با سه دامنه تودرتو با تفکیک ۲، ۶ و ۱۸ کیلومتری، پیش‌بینی تلاطم هوای صاف برای بیست و چهار ساعت در منطقه غرب ایران، به‌ویژه در دو مسیر پروازی تهران به اردبیل (۹ مارس ۲۰۱۸) و اهواز به تهران (۲۴ آوریل ۲۰۱۸) برای هر دو روز صادر شد. این دو مسیر پروازی هر دو در مسیر رشته‌کوه‌های البرز و زاگرس قرار دارند. نتایج نشان داد پیش‌بینی CAT با استفاده از شاخص داتن و طرح‌واره لایه مرزی YSU، طرح‌واره‌های کومولوسی KF و طرح‌واره‌های میکروفیزیکی Lin و Kessler، پیش‌بینی با استفاده از شاخص چینش قائم باد و طرح‌واره لایه مرزی MYJ، طرح‌واره کومولوسی KF و طرح‌واره میکروفیزیکی WSM3 و نیز پیش‌بینی با استفاده از شاخص عدد ریچاردسون و طرح‌واره لایه مرزی MYJ و YSU، طرح‌واره کومولوسی KF و طرح‌واره فیزیکی Lin و WSM3 برای این دو مسیر پروازی بهترین عملکرد را داشته است. علاوه بر این، با توجه به نتیجه‌های راستی‌آزمایی از بین شاخص‌های معرف تلاطم هوای صاف، برای مسیر پروازی تهران به اردبیل، با تفکیک افقی ۱۸ کیلومتر، شاخص‌های داتن، عدد ریچاردسون و چینش قائم باد و برای مسیر پروازی اهواز به تهران شاخص‌های عدد ریچاردسون، داتن و چینش قائم باد بهترین کیفیت پیش‌بینی تلاطم هوای صاف با شدت سبک تا متوسط را در نزدیکی رودیادهای همراه با ناوه و پشته‌های جوّی سطوح ۳۰۰ تا ۲۰۰ هکتوپاسکالی دارند.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی عددی وضع هوا، مدل WRF، عدد ریچاردسون، تلاطم هوای صاف

۱ مقدمه

تلاطم هوای صاف (CAT)، یکی از پدیده‌های جوّی است که می‌تواند سلامت پرواز را به خطر اندازد و محدودیت‌هایی را در مراقبت پرواز و عملیات هوانوردی ایجاد کند. این پدیده که در جوّ بدون هیچ علامت ظاهری در مقایسه با دیگر فعالیت‌های تلاطمی مانند تلاطم همرفتی، رخ می‌دهد (لستر، ۱۹۹۳)، اولین بار در سال ۱۹۴۰ معرفی شد (باخمن، ۱۹۴۶). امروزه وقوع تلاطم هوای صاف در مقایسه با تعداد پروازها سهم کوچکی دارد، اما گاهی می‌تواند خسارت‌های جبران‌ناپذیری به سلامت و ایمنی پرواز وارد کند. با توجه به تأثیر این پدیده جوّی در هوانوردی از دیدگاه سلامت مسافران و خدمه پرواز، بررسی منطقه‌ای این پدیده روی کشور از اهمیت زیادی برخوردار است. پیش‌بینی پدیده‌های جوّی به‌ویژه تلاطم در طول مسیرهای پروازی، می‌تواند امنیت پرواز را افزایش و اطلاعات کافی و مفید را در طول مسیر پرواز و منطقه مقصد در اختیار کادر پروازی و خلبان قرار دهد؛ از این رو باتوجه به اینکه کشور ایران در منطقه غرب آسیا واقع است و به نوعی دروازه ورود به اروپای شرقی به شمار می‌رود، به نظر می‌رسد مطالعه و پیش‌بینی وقوع تلاطم هوای صاف روی کشور ضروری باشد. در مسیرهای پروازی، تلاطم می‌تواند محدودیت‌هایی در امور مربوط به مراقبت پرواز به وجود آورد؛ بنابراین برای جلوگیری از برخورد احتمالی هواپیماها به دلیل تلاطم و بالا و پایین شدن هواپیما در مسیر پروازی، خلبان باید جدایی قائم هواپیما را افزایش دهد. تلاطم هوای صاف بیشتر در وردسپهر زبرین و پوشن‌سپهر زیرین رخ می‌دهد. به تلاطم در سطوح فوقانی، تلاطم سطوح جبهه‌ای یا تلاطم رودبادی نیز گفته می‌شود. چهار عامل اصلی در تولید تلاطم هوای صاف در مناطق سطح جبهه‌ای ترازهای فوقانی، نقش دارند که شامل جبهه‌های رودبادی، رودباد، وردایست و امواج بزرگ‌مقیاس هستند. در هوانوردی، تلاطم به معنای تکان‌های ملموس هواپیما

است (لستر، ۱۹۹۳). تلاطم باعث تغییرات ناگهانی و نامنظم سمت و سرعت باد، دمای هوا و چگالی می‌شود و به عوامل ناپایدارکننده مثل گرادیان‌های سرعت باد، ناهموازی سطح زمین، گرمایش سطح زمین و آزاد شدن گرمای نهان در جوّ، بستگی دارد. تلاطم، حالتی از حرکت هوا است که در آن بردار سرعت باد کاملاً متغیر و تصادفی است (شارمن، ۲۰۰۶ و لستر، ۱۹۹۳). چینش شدید باد در سطوح زبرین جوّ در نبود ابرهای همرفتی، تلاطم هوای صاف را به وجود می‌آورد (تریر و همکاران، ۲۰۱۰ و اشتول، ۱۹۸۸). داتن و پانوفسکی (۱۹۷۰) به ارتباط بین تلاطم هوای صاف و چینش باد دست یافتند و CAT را خطری مهم برای سلامت پرواز معرفی کردند. در سال ۱۹۷۰ موفقیت‌های چشمگیری هم در پیش‌بینی تلاطم امواج کوهستان به‌دست‌آمد (بروچ و همکاران، ۲۰۰۰).

یکی از شاخص‌های تلاطم، عدد ریچاردسون (Ri) است. بررسی تلاطم در یک جبهه درونی با ایجاد ناپایداری‌های $K-H$ و معرفی حدود بحرانی Ri و اعمال شرط ناپایداری $Ri < 0.25$ انجام شده است (میلز، ۱۹۶۱؛ مانکاسو و اندلیچ، ۱۹۶۶؛ زاوارینا و یاندی، ۱۹۶۰؛ داتن و پانوفسکی، ۱۹۷۰؛ پسرن، ۲۰۰۳ و پسرن و ناپ، ۲۰۰۷). احتمال وقوع CAT در مناطقی با چینش قائم قوی باد و گرادیان بیشینه افقی دما زیاد است؛ بنابراین بیشترین احتمال وقوع تلاطم هوای صاف در عرض‌های میانی و در ماه‌های سرد مثل ژانویه و فوریه به علت افزایش گرادیان افقی دما در ترازهای بالایی جوّ است. این تلاطم در مناطق جنب حاره‌ای عرض‌های میانی در وردسپهر نیز دیده می‌شود که با جریان‌های رودباد همراهی دارند.

با افزایش پروازها در سطوح فوقانی جوّ و در بخش‌های پروازهای داخلی و بین‌المللی، حساسیت مطالعه CAT بیشتر شده است (فیرال و وایت، ۱۹۹۱). کلاتری و همکاران (۱۳۹۵) با بررسی تلاطم هوای صاف و شکل‌گیری امواج کوهستان بر فراز رشته‌کوه زاگرس،

وقوع تلاطم هوای صاف را در مقیاس کوچک و در جو آزاد تأیید و عوامل اصلی ایجاد آن را آشفتگی‌های میان‌مقیاس تا کوچک مقیاس امواج کوهستان معرفی کردند. در مطالعه یادشده، بررسی امواج کوهستان در دوره سه ساله ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۲ بر فراز کوه‌های زاگرس با تخمین پارامتر اسکورر و عدد بی‌بعد فرود انجام و برای محاسبه شاخص تلاطم هوای صاف، از عدد ریچاردسون گرادانی استفاده شده است. براساس نتایج آن پژوهش، شار قائم تکانه در محدوده $0/73$ تا $0/1$ به‌دست آمده و احتمال این رخداد در فصل زمستان بیشتر بوده است. همچنین تلاطم با شدت متوسط تا شدید در ساعت UTC ۱۲۰۰ و در سطح ۶۵۰ هکتوپاسکالی وجود داشته است. آزادی و همکاران (۱۳۸۵) و تاجبخش و همکاران (۲۰۰۶) سطوح فوقانی در جو ایران را به کمک شاخص‌های تلاطم هوای صاف بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که تلاطم با شدت‌های بیشتر از متوسط در ایران نادر است و در جریان سوی ناوه ژئوپتانسیلی بیشترین مقادیر عددی شاخص‌های همراه با تلاطم هوای صاف دیده شده است.

سوسونیز و فیچ (۱۹۹۴) بررسی‌هایی را درباره پیش‌بینی تلاطم هوای صاف روی اقیانوس اطلس به‌صورت موردی و در یک دوره کوتاه انجام دادند و با مدل میان‌مقیاس پیش‌بینی و تحقیقات وضع هوا (WRF) شبیه‌سازی کردند. داده‌های اولیه در این تحقیق، داده‌های خروجی مدل GFS بودند. مدل در ساعت UTC ۰۰۰۰ و به ازای هر شش ساعت تا بیست و چهار ساعت و در هر روز، چهار تا هشت مرتبه و با فاصله شبکه‌ای ۳۶ کیلومتر اجرا و شش شاخص ایجاد ناپایداری و تشخیص تلاطم هوای صاف بررسی و با داده‌های واقعی و مشاهدات مقایسه شد. با توجه به بروز نود تلاطم هوای صاف، بررسی در فصول مختلف سال انجام شد که در بین چند شاخص بررسی‌شده، شاخص الود ۲ و شاخص میانگین پنج

شاخص دیگر نیز ارزش زیادی را برای پیش‌بینی تلاطم هوای صاف در تمام دوره داشتند.

جفری و ناپ (۲۰۰۷) با استفاده از مدل WRF برای پیش‌بینی تلاطم در مقیاس‌های کوچک، با ترکیب دو شاخص پانوفسکی در ترازهای پایین جو و شاخص اغتشاش در ترازهای بالای جو با خروجی مدل و فاصله شبکه‌ای ۲، ۶ و ۸ کیلومتر در دوره زمانی بیست و چهار ساعته و با ۷۵ نمونه گزارش‌های خلبان (در شمال نیوجرسی آمریکا) نشان دادند که گرچه در این دو شاخص، اختلاف در پیش‌بینی تلاطم هوای صاف وجود دارد، یک روند کلی پیش‌یابی در فاصله‌های شبکه‌ای کوچک‌تر دیده می‌شود و باید برای گام‌های زمانی و مکانی کوچک‌تر، شرایط محلی نیز در نظر گرفته شود. همچنین افزایش تعداد ترازها در نزدیکی سطح زمین در مدل WRF مشکلات را افزایش می‌دهد. در پیش‌بینی CAT، شاخص پانوفسکی نسبت به دیگر شاخص‌های تلاطم، اشتباه‌های کمتری دارد.

جونگ و های (۲۰۱۰) در مطالعه عددی تلاطم هوای صاف روی کره جنوبی در سال ۲۰۰۷ در سه ناحیه ساحلی و کوهستانی شبه‌جزیره کره، با استفاده از نه گزارش خلبان در طول ۶/۵ ساعت و با استفاده از تصاویر ماهواره، تصاویر رادار و در شرایط غیرهمرفتی یا هوای صاف، با استفاده از مدل WRF و در شش حوزه تودرتو با کمترین فاصله شبکه افقی ۰/۳۷ کیلومتر و چهل تراز قائم و بزرگ‌ترین فاصله شبکه که ۳۰ کیلومتر (بیرونی) بود، شبیه‌سازی را انجام دادند و نتایج آن را بررسی کردند. نتایج در سه منطقه مورد مطالعه متفاوت بود. برای سواحل، یک گرادیان نصف‌النهار دمای قوی، سبب تشکیل یک ناحیه جبهه‌ای شدید سطوح بالا شد و با توجه به رابطه باد گرمایی، جبهه‌زایی سطوح فوقانی را نشان داد که سبب تقویت رودباد روی سواحل غربی شبه‌جزیره کره شده بود. در سطوح فوقانی، عدد ریچاردسون کوچک‌تر از

۰/۲۵ برآورد شد که می‌تواند ناپایداری کلون-هلمهولتز را آغاز کند و منجر به تلاطم هوای صاف شود. روی سواحل با فاصله شبکه‌ای ۳۰ کیلومتر و سطوح فوقانی با فاصله شبکه قائم ۳۰۰ متر، مناطق رخداد تلاطم هوای صاف شناسایی شد. در منطقه جزیره‌ای، رخداد تلاطم هوای صاف مربوط به ناپایداری ساکن بود و در بخش چینش واجر خندی هسته رودباد، ناپایداری ساکن بزرگ‌تر و بیشینه آشکار شد. در مناطق کوهستان شرقی، رخداد CAT مربوط به شکست امواج کوهستان در پوشش سپهر زیرین بود.

جفری پسنر (۲۰۱۴) در تحقیقات خود تحت عنوان پیش‌بینی تلاطم سطوح پائین جو با استفاده از مدل WRF-ARW با مقیاس مناسب و تفکیک بالا که در آزمایشگاه تحقیقات ارتش آمریکا صورت گرفت، پنج روش را با فاصله شبکه ۱ و ۱/۶۷ کیلومتری روی لس آنجلس توسط نیروی هوایی آمریکا برای تأیید نتیجه گزارشهای CAT توسط هواپیماهای بلند پرواز انجام داد.

مک‌کان (۱۹۹۳) با استفاده از گزارش‌های هواپیماها از دسامبر ۱۹۹۲ تا فوریه ۱۹۹۳ و تحلیل رادیوگمانه‌ها نشان داد ضرایب تصحیح ارتباط وقوع CAT و فرایابی تلاطم هوای صاف برای کاربردهای عملیاتی از ± 0.1 کمتر و از ± 0.35 بیشتر نیست. (کالسون، ۱۹۶۸) همراهی طولانی مدت CAT را در سامانه‌های واجر خندی مطالعه کرد. وی نشان داد که به شاخص‌های موجود برای تحلیل CAT برای تمامی الگوهای جوی نمی‌توان اعتماد کرد. در ماه‌های سرد سال، احتمال وقوع CAT با هر شدتی در یک مسیر پرواز به طول ۲۰۰ کیلومتر و در ورود سپهر فوقانی و پوشش سپهر زیرین حدود ۱۵ درصد است. این وضعیت برای وقوع CAT با شدت متوسط یا شدید، حدود ۶ درصد و برای وقوع CAT با شدت بسیار شدید حدود ۱ درصد است (کالسون، ۱۹۶۸).

۲ شاخص‌های تلاطم هوای صاف

ناپایداری‌های کلون-هلمهولتز هنگامی تلاطم هوای صاف را ایجاد می‌کنند که مقادیر کوچک شاخص عدد ریچاردسون (Ri) (رابطه ۱) (نسبت پایداری ایستایی محلی به چینش محلی باد)، با مقادیر بزرگ چینش قائم باد (wind shear) همراه باشد. مقدار عددی چینش قائم باد تقریباً ۱۰ متر بر ثانیه بر ۳۰۰ متر است. شاخص‌های ایجاد تلاطم هوای صاف که در این مقاله استفاده شده است با روابط (۱) و (۲) معرفی می‌شوند. اغلب تلاطم‌های قوی هوای صاف در مناطقی دیدبانی شده‌اند که میدان تغییر شکل (DEF) و چینش قائم باد (VWS) به نسبت بزرگ باشد (منکوسو و اندلیچ، ۱۹۶۶).

۱-۲ عدد ریچاردسون گرادانی

ناپایداری‌های کلون-هلمهولتز ($K-H$) زمانی تلاطم هوای صاف را ایجاد می‌کنند که عدد ریچاردسون (Ri) به مقدار کوچکی میل کند. بر اساس اصل ناپایداری خطی، مناطق با Ri کوچک (کمتر از ۰/۲۵)، مناطق مناسب وقوع تلاطم هستند (داتن و پانوفسکی، ۱۹۷۰). در رابطه (۱) عدد ریچاردسون گرادانی (اشتول، ۱۹۸۸) معرفی شده است که می‌تواند به عنوان شاخص ناپایداری استفاده شود:

$$Ri = \frac{(g/\theta) \partial \theta / \partial z}{\left[\left(\partial u / \partial z \right)^2 + \left(\partial v / \partial z \right)^2 \right]} \quad (1)$$

که g شتاب جاذبه، $\frac{\partial \theta}{\partial z}$ تغییرات دمای پتانسیل با ارتفاع و ∂u و ∂v تغییرات مؤلفه‌های بردار باد با فاصله قائم است. این عدد معرف نسبت پارامتر پایداری ایستایی به چینش قائم باد است. با شکل‌گیری جبهه‌ها، معمولاً گرادیان سرعت باد افزایش و با وجود گرادیان قائم دمای پتانسیلی، Ri کاهش می‌یابد و تلاطم رخ می‌دهد. این تلاطم موجب

$$S_v = \frac{[(u)^2 + (v)^2]^{1/2}}{z} \quad (۳)$$

$$S_h = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \quad (۴)$$

۳ پیکربندی مدل WRF-ARW

مدل استفاده‌شده در این مقاله، سامانه مدل‌سازی‌های عددی تحقیقاتی پیشرفته WRF است که از هسته دینامیکی ARW آن در این پژوهش استفاده شده است (اسکاماروک و همکاران، ۲۰۰۸). نسخه استفاده‌شده، نسخه ۳/۹/۱/۱ مربوط به اوت ۲۰۱۷ است. مدل میان‌مقیاس WRF که برای دامنه‌های وسیعی از مقیاس‌ها مناسب است، از چند متر تا هزاران کیلومتر را پوشش می‌دهد. این مدل، یک مدل منطقه محدود کاملاً تراکم‌پذیر و غیرآب‌ایستایی با معادلات بسط و انتخاب‌های چندگانه برای طرح‌واره‌های پارامترسازی فیزیکی گوناگون است. WRF سامانه مدل‌سازی عددی میان‌مقیاس است که با همکاری چندین مؤسسه و سازمان در ایالات متحده آمریکا توسعه یافته است و برای پیش‌بینی‌های عملیاتی و نیازهای پژوهشی به‌کار می‌رود. با سامانه پیش‌پردازش WPS انواع درون‌یابی‌های جهانی و شرایط اولیه جو و شرایط مرزی جانبی در شبکه مدل اصلی محاسبه می‌شود. ورودی مدل اصلی، داده‌های خروجی از مدل پیش‌پردازش‌گر است. با استفاده از نرم‌افزارهای گرافیکی پس‌پردازش‌کننده و برنامه‌نویسی پیشرفته، می‌توان خروجی مدل را مشاهده کرد و تحلیل همدیدی و هواشناختی انجام داد.

پارامترسازی‌های فیزیکی استفاده‌شده در کار حاضر بر اساس مطالعات پسنر و ناپ (۲۰۰۷)، جونگ و های (۲۰۱۰)، پسنر (۲۰۱۴)، ونکاتش و همکاران (۲۰۱۴) و مادالا و همکاران (۲۰۱۸) انتخاب شده‌اند. مشخصات پنج پیکربندی فیزیکی متفاوت استفاده‌شده در کار حاضر در جدول ۲ ذکر شده است.

اختلاط می‌شود و تکانه هوا در مرکز تراز را وادار به حرکات پیچکی در راستای قائم می‌کند؛ بنابراین چینش باد در میان تراز ضعیف می‌شود که خود می‌تواند افزایش Ri و در نتیجه، کاهش احتمال ایجاد تلاطم را به همراه داشته باشد (اشتول، ۱۹۸۸).

۲-۲ چینش قائم باد

مقادیر بزرگ چینش باد با اعداد کوچک ریچاردسون موجب تولید تلاطم می‌شود (داتن و پانوفسکی، ۱۹۷۰). مقدار عددی چینش قائم باد تقریباً ۳ متر بر ثانیه بر ۳۰۰ متر برای CAT با شدت متوسط مناسب است که در جدول ۱ نشان داده شده است (الرود و ناپ، ۱۹۹۲). داتن (۱۹۸۰) این مقدار را ۷ متر بر ثانیه بر ۳۰۰ متر معرفی کرده است.

جدول ۱. مقادیر بحرانی مؤلفه‌های چینش باد برای تلاطم زیاد (لستر،

۱۹۹۳).

شدت تلاطم	چینش عمودی باد افقی (knots/1000ft)
متوسط	۵-۶
شدید	>۶

۳-۲ شاخص داتن

این شاخص بر اساس رگرسیون خطی تحلیل گزارش تلاطم هواپیماهای عبوری از فراز اقیانوس اطلس شمالی و شمال غرب اروپا در سال ۱۹۷۶ به‌دست آمده است. شاخص تجربی E، که در رابطه (۲) نشان داده شده است، برای پیش‌بینی CAT بر اساس ترکیب چینش‌های افقی و قائم باد (داتن، ۱۹۸۰) است:

$$E = 1.25S_h + 0.25S_v^2 + 10.5 \quad (۲)$$

که $V=(u,v)$ سرعت افقی باد و u و v مؤلفه‌های سرعت افقی باد هستند. S_h چینش افقی باد و S_v چینش قائم باد است که با روابط (۳) و (۴) معرفی می‌شوند:

جدول ۲. مشخصات پیکربندی متفاوت مدل WRF استفاده شده در مقاله حاضر.

شماره	عنوان اختصاری	خردفیزیک	لایه مرزی سیاره‌ای	کومولوس	تابش موج بلند	تابش موج کوتاه	لایه سطحی	سطح زمین
۱	Phys01	Lin	YSU	Kain-Fritsch	RRTM	Dudhia	MM5	Noah
۲	Phys02	WSM3	MYJ	Kain-Fritsch	RRTM	Dudhia	Eta	Noah
۳	Phys03	NEW Thompson	MYJ	Kain-Fritsch	RRTM	Dudhia	Eta	Noah
۴	Phys04	WSM3	MYJ	Kain-Fritsch	RRTM	Dudhia	Eta	5-layer
۵	Phys05	Kessler	YSU	Kain-Fritsch	RRTM	Dudhia	MM5	5-layer

۴ داده‌ها و منطقه بررسی شده

در این مقاله از دو گروه داده استفاده شده است که شامل گزارش‌های خلبان و کادر پروازی خطوط پروازی مسافری و پروازهای نظامی، جهت اعتبارسنجی مدل و داده‌های مورد نیاز برای تأمین شرایط اولیه و شرایط مرزی مدل WRF است. داده‌های پنجاه گزارش تلاطم هوای صاف در مسیر پروازی تهران به اردبیل و برعکس در شمال غرب ایران و چهل گزارش تلاطم هوای صاف انواع پروازهای هواپیماهای مختلف فرودگاه مقصد و عبوری مسیر پروازی تهران به اهواز و برعکس در جنوب غرب ایران بررسی شد. در غرب و جنوب غرب ایران، توپوگرافی کوهستانی رشته کوه زاگرس وجود دارد. خلاصه این گزارش‌ها در جدول ۳ آورده شده است.

پروازهای داخلی در مسیر پروازی تهران به اردبیل از ارتفاعات پیچیده البرز عبور می‌کنند و به منطقه جنگلی استان گیلان وارد می‌شوند سپس از قسمت‌های جنوبی دریای خزر مجدداً به ارتفاعات البرز شمال غربی در استان اردبیل می‌رسند و از منطقه کوهستانی‌ای گذر می‌کنند که امواج پشت کوه فراوانی در قسمت پشت ارتفاعات تشکیل می‌شود و پس از آن به مقصد می‌رسند. تقریباً در فصول

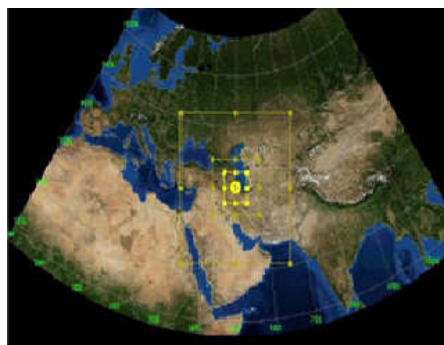
سرد سال و زمان‌های گذار بین دو فصل، به دلیل وجود ارتفاعات زیاد در سطح زمین در این مسیر پروازی، تلاطم هوای صاف ناشی از تأثیر الگوهای متداول جوّی به‌ویژه سامانه‌های جوّی و تأثیر رودبادهای قطبی و جنب حاره روی عرض‌های میانی و منطقه ایران مشاهده می‌شود. برای بررسی، حوزه‌ای با سه شبکه تودرتو و با فواصل افقی شبکه ۱۸، ۶ و ۲ کیلومتر، شبکه‌بندی و استفاده شده است (شکل الف - ۱). با توجه به مسیر طولانی‌تر تهران به اهواز، دو شبکه تودرتو با فاصله ۱۸ و ۶ کیلومتر انتخاب شد (شکل ب - ۱). برای حوزه اصلی مدل، از داده‌های ده دقیقه‌ای؛ برای شبکه دوم، از داده‌های پنج دقیقه‌ای و برای حوزه داخلی، از داده‌های سی ثانیه‌ای استفاده شد. در مناطق مورد مطالعه، گزارش‌های خلبان (AIREP) برای راستی‌آزمایی و کیفیت‌سنجی پیش‌بینی‌های مدل به کار گرفته شدند. برای تأیید گزارش‌های خلبان و تعیین نقاط ضعف و قوت پیش‌بینی، از روش‌های آماری، نمایه قائم جوّ، نقشه‌های واقعی سطوح مختلف از ۳۰۰ تا ۱۰۰ هکتوپاسکال، تصاویر ماهواره‌های هواشناسی EUMETSAT و EUMETRAIN و تحلیل و تفسیر

جدول ۳. خلاصه اطلاعات گزارش‌های خلبان.

تاریخ	تاریخ میلادی	FL (سطح پروازی)	ارتفاع (متر)	ارتفاع ژئوپتانسیل	موقعیت	شدت تلاطم	ساعت گزارش تلاطم
۱۳۹۶/۱۲/۱۸	۲۰۱۸/۰۳/۰۹	FL۳۰۰	۹۰۰۰M	۳۰۰ hpa	تهران - اردبیل	L	۱۸۰۰ UTC
۱۳۹۷/۲/۴	۲۰۱۸/۰۴/۲۴	FL۳۰۰	۹۰۰۰M	۳۰۰ hpa	اهواز - تهران	L	۱۸۰۰ UTC



(ب)



(الف)

شکل ۱. (الف) نمایش حوزه اصلی مسیر پروازی تهران به اردبیل (ب) نمایش حوزه اصلی مسیر پروازی تهران به اهواز و اجرای مدل و دو ناحیه داخلی آن. نسبت حوزه داخلی به ناحیه والد ۱ به ۳ است.

وقوع آن، گزارش‌های خلبان طی روزهای مختلف و از پروازهای متفاوت به صورت جدول طراحی شد و در اختیار کادر پروازی پروازهای داخلی، پروازهای نظامی خطوط هوایی مختلف داخلی قرار گرفت. تلاطم هوای صاف در فصل‌های زمستان و بهار بیشتر گزارش شده است؛ لذا نمونه گزارش خلبان در تاریخ مذکور انتخاب و با مدل WRF شبیه‌سازی شده است.

۵ روش پژوهش

تلاطم هوای صاف معمولاً در سطوح فوقانی جو و تقریباً در حالت وجود رودبادها و در ترازهای فشاری ۲۵۰، ۳۰۰ و ۳۰۰ هکتوپاسکال رخ می‌دهد. برای آشکارسازی تلاطم هوای صاف در این ترازها، به الگوهای جوی جریان‌سوی ناوه، جریان‌سوی پشته، قله پشته و جریان‌های مداری همراه با رودباد و فرافرت‌های هوای سرد توجه می‌شود. در کار حاضر برای مطالعه این تلاطم در مناطق شمال غرب و غرب کشور، برخی از مهم‌ترین شاخص‌ها، از جمله شاخص‌های عدد ریچاردسون (Ri)، چینش قائم باد ($Wind\ Shear$) و داتن ($Dutton$) محاسبه شده است. علاوه بر محاسبه شاخص‌های معرفی‌شده در ترازهای بیان‌شده، نمودارهای ارتفاع ژئوپتانسیلی، دما، سمت و سرعت باد نیز جهت بررسی توزیع قائم تلاطم هوای صاف

نقشه‌های همدیدی همراه با تلاطم هوای صاف استفاده شد. در اجرای مدل و برای پیش‌بینی تلاطم هوای صاف در این منطقه، داده‌های GFS برای شرایط ابتدایی جو و شرایط مرزی شامل پارامترهای دما، جهت باد و سرعت باد در ترازهای مختلف جو و با فاصله زمانی سه ساعته و با تفکیک افقی 0.5×0.5 درجه از ساعت UTC ۰۰۰۰ روز ۹ مارس ۲۰۱۸ تا ساعت UTC ۰۰۰۰ روز ۱۰ مارس ۲۰۱۸ برای مسیر پروازی تهران به اردبیل و از ساعت UTC ۰۰۰۰ روز ۲۴ آوریل ۲۰۱۸ تا ساعت UTC ۰۰۰۰ روز ۲۵ آوریل ۲۰۱۸ به مدت بیست و چهار ساعت دریافت و استفاده شده است.

حوزه شبیه‌سازی مدل برای ناحیه اصلی و دو ناحیه داخلی در شکل ۱ نشان داده شده است. فاصله نقاط شبکه برای حوزه اصلی ۱۸ کیلومتر، برای حوزه دوم ۶ کیلومتر و برای ناحیه داخلی ۲ کیلومتر فرض شده است. با توجه به فاصله شبکه‌ای حوزه اول (ناحیه اصلی)، گام زمانی انتگرال‌گیری، ۹۰ ثانیه برای حوزه بیرونی است و مقادیر با نسبت یک به سه برای دو حوزه داخلی در نظر گرفته شده‌اند. به دلیل گزارش خلبان از تلاطم هوای صاف در سطح پروازی ۳۰۰۰۰ پایی و در نزدیک‌ترین زمان به ساعت گرینویچ، بررسی و تحلیل در ساعت UTC ۱۸۰۰ صورت گرفت. برای تعیین نوع و شدت تلاطم و ساعت

درصد صحت پیش‌بینی تلاطم هوای صاف بررسی می‌شوند (ویلکس، ۲۰۱۱).

جدول ۴. پیشامدهای دودویی ممکن در وقوع پدیده CAT.

	Q_1	Q_2	
Y_1	a	b	a+b
Y_2	c	d	C+d
	a+c	b+d	n=a+b+c+d

جدول ۵. معرفی شاخص‌های استفاده‌شده در جدول دودویی بر اساس توزیع‌های احتمال آماره‌های توصیفی.

Q_1	دیدبانی‌های مثبت (وقوع پدیده)
Q_2	دیدبانی‌های منفی (نبود پدیده)
Y_1	پیش‌بینی‌های مثبت (وقوع پدیده)
Y_2	پیش‌بینی‌های منفی (نبود پدیده)
a	تعداد دفعاتی که پدیده اتفاق افتاده و وقوع آن پیش‌بینی شده باشد.
b	تعداد دفعاتی که پدیده اتفاق نیفتاده ولی وقوع آن پیش‌بینی شده باشد.
c	تعداد دفعاتی که پدیده اتفاق افتاده ولی وقوع آن پیش‌بینی نشده باشد.
d	تعداد دفعاتی که پدیده اتفاق نیفتاده و وقوع آن پیش‌بینی نشده باشد.

۵-۱- سنجه‌های راستی‌آزمایی

۵-۱-۱- آهنگ برخورد یا احتمال آشکارسازی (POD)

احتمال آشکارسازی با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$H = POD = \frac{a}{a+c} \quad (5)$$

که a پیش‌بینی‌های مثبت، c تعداد دفعاتی که پدیده اتفاق افتاده ولی وقوع آن پیش‌بینی نشده باشد و $(a+c)$ کل دیدبانی‌های رخ داده است. پیش‌بینی کامل برابر عدد یک و پیش‌بینی‌های نادرست برابر صفر است.

۵-۱-۲- نسبت هشدارهای نادرست (FAR)

این نسبت تعداد پیش‌بینی‌های نادرست (b) را به تعداد کل پیش‌بینی‌های مثبت ($a+b$) نشان می‌دهد:

$$FAR = \frac{b}{a+b} \quad (6)$$

پیش‌بینی‌های کامل برابر صفر و پیش‌بینی‌های نادرست برابر یک است.

بررسی شده است. در ادامه برای محاسبه این شاخص‌ها، ابتدا داده‌های خروجی مدل مورد نیاز برای رسم نمودارهای دما، باد، ارتفاع ژئوپتانسیلی و دیگر شاخص‌های مورد نظر با استفاده از نرم‌افزار NCL رسم شد. سپس الگوهای جوّی همراه با این تلاطم در نواحی غربی و تا حدودی فراتر از مرزهای ایران بررسی شد. برای تحلیل حساسیت‌سنجی مدل، پارامترهای مختلفی از جمله پارامترسازی‌های فیزیکی متفاوت، تفکیک افقی و تفکیک قائم مدنظر قرار گرفته‌اند. پیکربندی‌های منتخب مدل برای محاسبه این تلاطم بعد از انجام تحلیل‌های حساسیت‌سنجی و از میان چند پیکربندی انتخاب شده است. برخی میدان‌های اولیه نیز همانند باد و دما برای ترازهای ژئوپتانسیلی مشخص و در محدوده جغرافیایی مسیر پروازی تهران- اردبیل و اهواز- تهران محاسبه شد. اغلب شاخص‌های فرایابی تلاطم هوای صاف، تجربی هستند؛ بنابراین در این پژوهش سعی شده است بهترین شاخص‌ها برای مناطق شمال غرب و غرب کشور و همچنین آستانه مقادیر حدی وقوع تلاطم متوسط تا سبک شناسایی شوند.

بسیاری از پدیده‌های هواشناسی را می‌توان در حکم پیش-آمدهای دودویی ساده در نظر گرفت و پیش‌بینی در مورد این پیشامدها به صورت این که رخ می‌دهد یا رخ نمی‌دهد صادر می‌شود. این نوع پیش‌بینی‌ها به عنوان پیش‌بینی‌های بله یا خیر نیز شناخته می‌شود. در پژوهش حاضر مقایسه و بررسی صحت محاسبات با داده‌های دریافتی توسط روش‌های درستی‌سنجی پیش‌بینی‌های تلاطم هوای صاف، تعیین شده است. در جدول‌های ۴ و ۵، برخی از آماره‌های توصیفی برای ارزیابی به روش دودویی و بر اساس متغیرهای معرفی شده آورده شده است.

در این مقاله با استفاده از روش‌های احتمال آشکارسازی (POD)، نسبت هشدار نادرست (FAR)، نسبت تشخیص غلط (F) و شاخص فراوانی اریبی (FBI)،

۵-۱-۳ شاخص فراوانی اریبی (FBI)

نسبت تعداد پیش‌بینی‌های رخ داده به تعداد رخ داده‌های مشاهدات واقعی را فراوانی اریبی می‌نامند (دونالسون و همکاران، ۱۹۷۵). اگر FBI بیشتر از یک باشد؛ مدل، بیش‌پیش‌بینی و اگر کمتر از یک باشد، کم‌پیش‌بینی دارد. عدد یک نشان‌دهنده پیش‌بینی عالی است:

$$FBI = B = \frac{a+b}{a+c} \quad (V)$$

۵-۱-۴ معیار هشدارهای نادرست (POFD)

این شاخص که احتمال آشکارسازی نادرست را تعیین می‌کند، به هشدارهای غلط و منفی صحیح حساس است و با کم‌تخمینی بهبود می‌یابد. d تعداد دفعاتی است که پدیده اتفاق نیفتاده و وقوع آن پیش‌بینی نشده باشد. این معیار دامنه‌ای بین صفر و یک دارد و امتیاز عالی آن صفر است:

$$F = \frac{b}{b+d} \quad (A)$$

ملاک انتخاب داده‌ها، پوشش دوره زمانی مورد نظر، تفکیک افقی و دقت شبیه‌سازی رخداد تلاطم هوای صاف است. دوره مورد بررسی در بخش مطالعه موردی، دست‌کم چند رخداد زمستان و بهار سال ۲۰۱۸ و مشاهدات (گزارش‌های خلبان و خروجی مدل‌های دیگر) را شامل می‌شود.

نقشه پارامترهای باد و دما برای ترازهای استاندارد پروازی داخلی و بین‌المللی تهیه و بررسی شد. بهترین خروجی مدل جهت پیش‌بینی میدان باد و دما در ترازهای ۱۸۰۰ پا (۵۰۰ هکتوپاسکال)، ۳۰۰۰ پا (۳۰۰ هکتوپاسکال)، ۳۴۰۰ پا (۲۵۰ هکتوپاسکال)، ۳۹۰۰ پا (۲۰۰ هکتوپاسکال) انجام شد. چند نمونه از گزارش‌های خلبان، که انواع تلاطم هوای صاف را گزارش کرده‌اند، با مدل میان‌مقیاس شبیه‌سازی و با نقشه‌های واقعی مقایسه شد. با استفاده از پیش‌بینی‌های صادرشده برای میدان باد،

شاخص‌های پیش‌بینی تلاطم با برنامه‌نویسی در محیط نرم‌افزار NCL محاسبه و با اطلاعات واقعی مقایسه شد. برای بهترین شاخص که با مقدار رخداد واقعی هم‌خوانی بهینه داشت، مدل برای پیش‌بینی رخداد تلاطم هوای صاف اجرا شد. همچنین برای بررسی حساسیت نتایج مدل به تعداد ترازهای قائم و انجام شبیه‌سازی‌های مدل WRF از تعداد ترازهای قائم ۴۹، ۶۰ و ۸۴ تراز و فواصل میان‌یابی ۳۰۰ و ۵۰۰ متر برای اجراها استفاده شده است.

۶ تجزیه و تحلیل نتایج

روش استفاده‌شده در این مطالعه برای بررسی تأیید تلاطم، مقایسه گزارش‌های خلبان (AIREP) و پیش‌بینی‌های برونداد مدل است. با استفاده از خروجی مدل WRF، تأیید تلاطم به یک دوره یک‌ساعته در اطراف زمان پیش‌بینی مدل محدود می‌شود. پیش‌بینی تلاطم در ساعت ۱۸۰۰ جهانی با توجه به گزارش‌های AIREP است؛ بنابراین مقایسه فقط از ساعت ۱۷۰۰ تا ۱۹۰۰ جهانی انجام شد. گزارش‌های AIREP با دو شدت LGT (light) تا MDT (moderate)، به‌عنوان شدت حدی تر طبقه‌بندی و مورد توجه قرار گرفت. تنها ارتفاع پیش‌بینی تلاطم هوای صاف مدل، که نزدیک به گزارش‌های خلبان و کادر پرواز بود، به‌عنوان یک معیار استاندارد پذیرفته شد. برای سطوح پروازی بالای ۲۰۰۰ پا از سطح زمین، تلاطم پیش‌بینی‌شده می‌تواند تا ارتفاع ۲۰۰۰ پایی از منطقه باتلاطم فاصله داشته باشد.

ارزیابی تلاطم برای روزهای ۹ مارس ۲۰۱۸ و ۲۴ آوریل ۲۰۱۸ با استفاده از گزارش‌های خلبان در دو مسیر پروازی تهران به اردبیل و اهواز به تهران انجام شد. این چارچوب زمانی شامل انواع شرایط آب و هوایی زمستانی و بهاری بود.

جدول ۶ راستی‌آزمایی پیش‌بینی تلاطم را با استفاده از خروجی مدل WRF در مسیر پروازی اهواز به تهران و

جدول ۶. راست آزمایی پیش بینی تلاطم " بلی / خیر " با استفاده از خروجی مدل WRF در مسیر پروازی اهواز به تهران و تهران به اردبیل با فاصله شبکه ۱۸ کیلومتر، برای سه شاخص اندازه گیری تلاطم هوای صاف (داتن، عدد ریچاردسون و چینش عمودی باد) با استفاده از Phys01 (جدول ۲).

	فاصله شبکه ۱۸ کیلومتر (تهران- اهواز)			فاصله شبکه ۱۸ کیلومتر (تهران- اردبیل)		
	شاخص داتن	شاخص چینش عمودی باد	شاخص عدد ریچاردسون	شاخص داتن	شاخص چینش عمودی باد	شاخص عدد ریچاردسون
POD	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳	۰/۵	۰/۸۳	۰/۱۶
FAR	۰	۰	۰	۰	۰	۰
FBI	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳	۰/۵	۰/۸۳	۰/۱۶
POFD	۰	۰	۰	۰	۰	۰

تهران به اردبیل با فاصله شبکه ای ۱۸ کیلومتر و برای سه شاخص اندازه گیری تلاطم هوای صاف (شاخص های داتن، عدد ریچاردسون و چینش عمودی باد) با استفاده از Phys01 (جدول ۲) نشان می دهد. در مسیر پروازی تهران به اردبیل و از نظر سنجه های راستی آزمایی POD و FBI به ترتیب شاخص های چینش عمودی باد، داتن و عدد ریچاردسون و در مسیر پروازی تهران به اهواز هر سه شاخص برآورد میزان تلاطم، بهترین شاخص های تشخیص شدت تلاطم هوای صاف با شدت سبک تا متوسط هستند. جدول ۷ راستی آزمایی پیش بینی تلاطم هوای صاف را با استفاده از خروجی مدل WRF و در مسیر پروازی اهواز به تهران و تهران به اردبیل با فاصله شبکه ای ۱۸ کیلومتر، برای سه شاخص اندازه گیری تلاطم هوای صاف با استفاده از Phys02 (جدول ۲) نشان می دهد. در این جدول ترتیب اهمیت تشخیص شاخص ها به صورت شاخص های چینش

عمودی باد، داتن و عدد ریچاردسون است. جدول ۸ راستی آزمایی پیش بینی CAT را با استفاده از خروجی مدل WRF در مسیر پروازی اهواز به تهران و تهران به اردبیل با فاصله شبکه ای ۱۸ کیلومتر و برای سه شاخص اندازه گیری تلاطم هوای صاف (شاخص های داتن، عدد ریچاردسون و چینش عمودی باد) با استفاده از Phys03 (جدول ۲) نشان می دهد که برای مسیر پروازی تهران به اردبیل، شاخص های داتن و چینش عمودی باد و عدد ریچاردسون و برای مسیر پروازی اهواز به تهران، شاخص های عدد ریچاردسون، داتن و چینش عمودی بهترین شاخص های تشخیص تلاطم با شدت سبک تا متوسط هستند. جدول های ۹ و ۱۰ راستی آزمایی پیش بینی تلاطم هوای صاف را با استفاده از خروجی مدل WRF در مسیر پروازی اهواز به تهران و تهران به اردبیل با فاصله شبکه ای ۱۸ کیلومتر و برای سه شاخص اندازه گیری تلاطم هوای صاف با استفاده از Phys04 و Phys05

جدول ۷. راست آزمایی پیش بینی تلاطم " بلی / خیر " با استفاده از خروجی مدل WRF در مسیر پروازی اهواز به تهران و تهران به اردبیل با فاصله شبکه ۱۸ کیلومتر، برای سه شاخص اندازه گیری تلاطم هوای صاف (داتن، عدد ریچاردسون و چینش عمودی باد) با استفاده از Phys02 (جدول ۲).

	فاصله شبکه ۱۸ کیلومتر (تهران- اهواز)			فاصله شبکه ۱۸ کیلومتر (تهران- اردبیل)		
	شاخص داتن	شاخص چینش عمودی باد	شاخص عدد ریچاردسون	شاخص داتن	شاخص چینش عمودی باد	شاخص عدد ریچاردسون
POD	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۶	۰/۶	۰
FAR	۰	۰	۰	۰	۰	۰
FBI	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۸۳	۰
POFD	۰	۰	۰	۰	۰	۰

جدول ۸. راست‌آزمایی پیش‌بینی تلاطم " بلی / خیر " با استفاده از خروجی مدل WRF در مسیر پروازی اهواز به تهران و تهران به اردبیل با فاصله شبکه ۱۸ کیلومتر، برای سه شاخص اندازه‌گیری تلاطم هوای صاف (داتن، عدد ریچاردسون و چینش عمودی باد) با استفاده از Phys03 (جدول ۲).

	فاصله شبکه ۱۸ کیلومتر (تهران- اهواز)			فاصله شبکه ۱۸ کیلومتر (تهران- اردبیل)		
	شاخص داتن	شاخص چینش عمودی باد	شاخص عدد ریچاردسون	شاخص داتن	شاخص چینش عمودی باد	شاخص عدد ریچاردسون
POD	۰/۱۶	۰	۰/۶	۰/۵	۰/۵	۰/۳
FAR	۰	۰	۰	۰	۰	۰
FBI	۰/۱۶	۰	۰/۶	۰/۵	۰/۵	۰/۳
POFD	۰	۰	۰	۰	۰	۰

برای سه شاخص اندازه‌گیری تلاطم هوای صاف استفاده شد. بهترین شاخص‌ها برای اندازه‌گیری تلاطم در محدوده غرب ایران در فصل زمستان و بهار و گذار رودبادهای قطبی و جنب حاره، که یکی از نشانه‌های تلاطم هوای صاف است، را معیارهای راستی‌آزمایی FBI و POD نشان می‌دهند. با توجه به گذر پروازهای داخلی یا خارجی عبوری از مسیر تهران به اردبیل و در راستای راستی‌آزمایی چینش قائم باد در مسیر پروازی و همچنین مشاهده دما و چگونگی چینش جهت و تندی باد در ارتفاع ۳۰۰۰۰ پایی که خلبان و کادر پروازی گزارش تلاطم کرده‌اند، نمایه‌های قائم جو (SKEW_T) در این مسیر پروازی که شامل شهرهای تهران، کرج، رشت، انزلی، ماسوله، نیر و اردبیل است (این شهرها در حوزه اصلی شبکه افقی مدل قرار دارند) با برنامه‌نویسی نرم‌افزار NCL برای ساعت

(جدول ۲) نشان می‌دهند. برای مسیر تهران به اردبیل، شاخص‌های داتن، چینش عمودی باد و عدد ریچاردسون به‌ترتیب بهترین شاخص‌های برآورد CAT هستند. برای مسیر پروازی تهران به اردبیل و با استفاده از فیزیک Phys04 (جدول ۲)، شاخص‌های عدد ریچاردسون، چینش عمودی باد و داتن و با استفاده از Phys05 شاخص‌های عدد ریچاردسون، داتن و چینش عمودی باد به‌ترتیب شاخص‌های برآورد شدت تلاطم هوای صاف هستند. بررسی دقیق‌تر این داده‌ها نشان داد که تلاطم در سطح ۲۰۰ تا ۳۰۰ هکتوپاسکال و با توجه به سه شاخص استفاده‌شده با فاصله شبکه‌ای ۱۸ کیلومتر و با فاصله عمودی شبکه با ۶۰ تراز روی مناطق غربی و شمال غربی ایران اهمیتی ویژه دارد. در جدول‌های ۶ تا ۱۰، چهار معیار راستی‌آزمایی POD، FAR، FBI و POFD (بخش ۵-۱)

جدول ۹. راست‌آزمایی پیش‌بینی تلاطم " بلی / خیر " با استفاده از خروجی مدل WRF در مسیر پروازی اهواز به تهران و تهران به اردبیل با فاصله شبکه ۱۸ کیلومتر، برای سه شاخص اندازه‌گیری تلاطم هوای صاف (داتن، عدد ریچاردسون و چینش عمودی باد) با استفاده از Phys04 (جدول ۲)

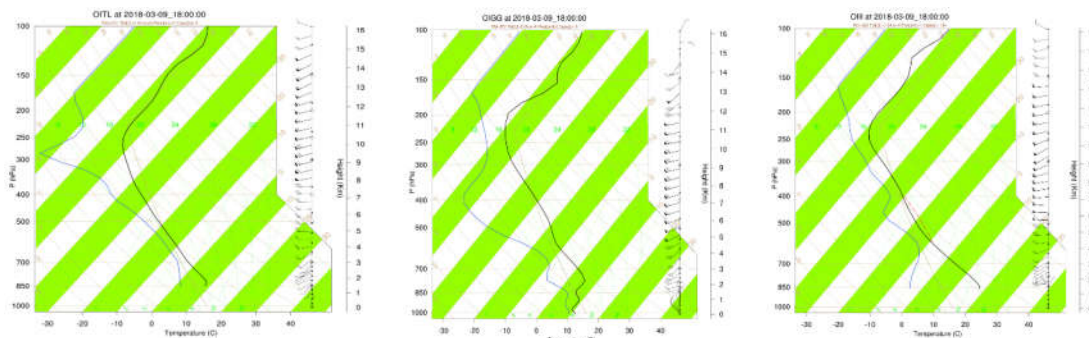
	فاصله شبکه ۱۸ کیلومتر (تهران- اهواز)			فاصله شبکه ۱۸ کیلومتر (تهران- اردبیل)		
	شاخص داتن	شاخص چینش عمودی باد	شاخص عدد ریچاردسون	شاخص داتن	شاخص چینش عمودی باد	شاخص عدد ریچاردسون
POD	۰	۰	۰/۳۳	۱	۱	۰
FAR	۰	۰	۰	۰	۰	۰
FBI	۰	۰	۰/۳۳	۱	۱	۰
POFD	۰	۰	۰	۰	۰	۰

جدول ۱۰. راست آزمائی پیش بینی تلاطم " بلی / خیر " با استفاده از خروجی مدل WRF در مسیر پروازی اهواز به تهران و تهران به اردبیل با فاصله شبکه ۱۸ کیلومتر، برای سه شاخص اندازه گیری تلاطم هوای صاف (داتن، عدد ریچاردسون و چینش عمودی باد) با استفاده از Phys05 (جدول ۲)

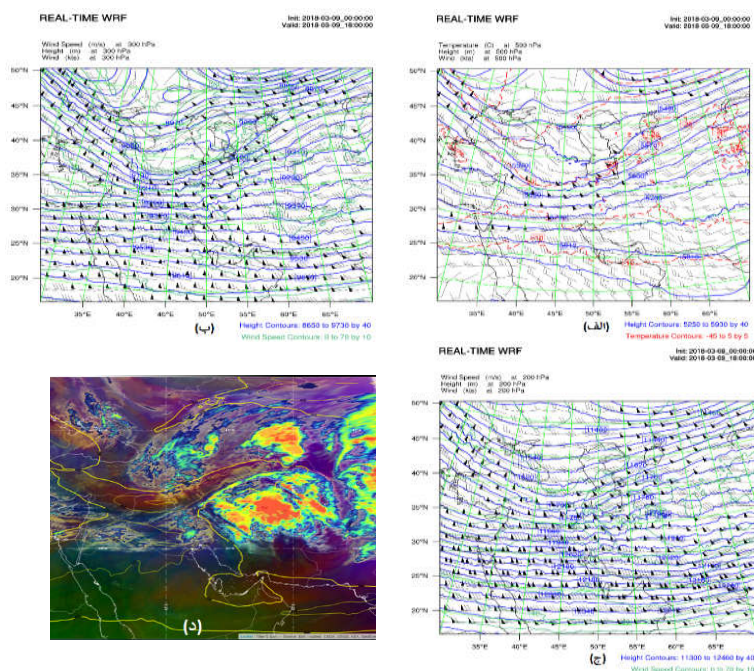
	فاصله شبکه ۱۸ کیلومتر (تهران- اهواز)			فاصله شبکه ۱۸ کیلومتر (تهران- اردبیل)		
	شاخص داتن	شاخص چینش عمودی باد	شاخص عدد ریچاردسون	شاخص داتن	شاخص چینش عمودی باد	شاخص عدد ریچاردسون
POD	۰/۵	۰/۳۳	۰/۸۳	۰/۶	۰/۶	۰
FAR	۰	۰	۰	۰	۰	۰
FBI	۰/۵	۰/۳۳	۰/۸۳	۰/۶	۰/۶	۰
POFD	۰	۰	۰	۰	۰	۰

صاف در سمت جریان سوی جنوبی این رودباد می شود. شکل ۳- الف در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکالی، زبانه کم فشار را نشان می دهد که مرکز آن روی شمال اروپا با مقدار ۵۲۴۰ ژئوپتانسیل متر قرار گرفته است و خطوط دمایی ۱۵- درجه سانتیگراد در مرکز آن و خط هم دمای ۲۰- درجه سانتیگراد در شمال ایران به ویژه غرب کشور وجود دارد. منطقه ای که تلاطم هوای صاف دارد، علاوه بر قرار گرفتن در دامنه زبانه کم فشار، موجک های ریزی دارد که امواج تلاطمی کوهستانی را در سطح زمین ارتفاعات البرز ایجاد کرده است. این سطح ابتدای محدوده وجود تلاطم هوای صاف به سمت ترازهای بالاتر با بادهای بیشتر از ۵۰ نات است که نشان دهنده چینش افقی و عمودی باد به دلیل وجود رودباد در سطح ۳۰۰ تا ۲۰۰ هکتوپاسکالی است.

۱۸۰۰ جهانی ترسیم شد. در شکل ۲، برای نمونه، SKEW_T سه شهر تهران به عنوان مبدأ یا مقصد پرواز، رشت در ادامه مسیر و اردبیل به عنوان مقصد یا مبدأ پرواز نشان داده شده است. نمودارهای SKEW_T در ارتفاع پروازی استاندارد ۳۰۰۰۰ پایی یا سطح ژئوپتانسیل متری ۳۰۰ هکتوپاسکالی، که در گزارش خلبان به آن به عنوان سطح مشاهده تلاطم ملایم هوای صاف گزارش شده در نمودارهای SKEW_T با سرعت باد بیش از ۶۰ نات در محدوده تهران، بیش از ۸۰ نات در محدوده رشت و بیش از ۸۰ نات در محدوده اردبیل و سطح ۳۰۰ هکتوپاسکالی را نشان می دهد که نشانه گذر رودباد از این ناحیه و ارتفاع است. همان طور که در نقشه های واقعی روز ۹ مارس ۲۰۱۸ در شکل ۳ نیز مشاهده می شود، گذر شاخه جنوبی رودباد قطبی از منطقه شمال غرب ایران، باعث ایجاد تلاطم هوای



شکل ۲. نمودار نمایه قائم جو در مسیر پروازی تهران به اردبیل در روز ۹ مارس ۲۰۱۸ برای شهرهای تهران (OIII)، رشت (OIGG) و اردبیل (OITL) در ساعت ۱۸۰۰ جهانی.



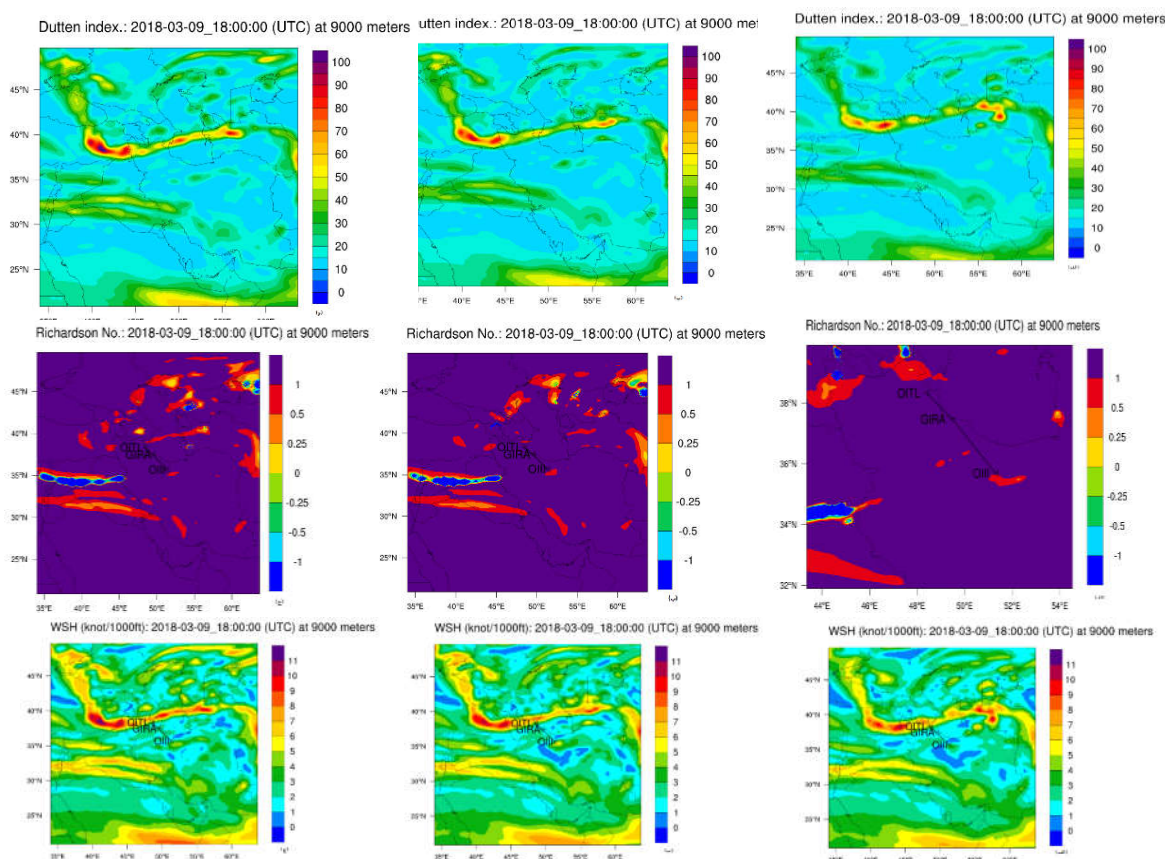
شکل ۳. نقشه‌های ژئوپتانسیل متری سطح (الف) ۵۰۰ هکتوپاسکالی (ب) ۳۰۰ هکتوپاسکالی، (ج) ۲۰۰ هکتوپاسکالی (د) تصویر ماهواره فروسرخ در ساعت ۱۸۰۰ جهانی روز ۹ مارس ۲۰۱۸.

تندی بیش از ۸۰ نات در منطقه شمال غرب کشور را نشان می‌دهد. در این سطح از حالت ناوهای رودباد کاسته شده است و جریان‌ات تقریباً حالت مداری شده‌اند. شکل ۳- د تصویر فروسرخ (IR) ماهواره هواشناسی توده‌های هوا در سطح ۳۰۰ هکتوپاسکال مربوط به ساعت ۱۸۰۰ جهانی روز ۹ مارس ۲۰۱۸ را نشان می‌دهد که بیانگر هوای صاف منطقه، بدون همراهی سامانه‌های جوئی با گزارش تلاطم است. خطوط زردرنگ در شکل، منطقه قرار گرفتن رودباد و محور رودباد را با بیشینه تندی باد روی منطقه شمال غرب کشور نشان می‌دهند.

شکل ۴ نمودارهای شاخص‌های تلاطم هوای صاف را برای فیزیک‌های Phys01 (جدول ۲) و به ترتیب شاخص‌های داتن، عدد ریچاردسون و چینش قائم باد و نیز تعداد ترازهای قائم متفاوت استفاده‌شده را برای حساسیت‌سنجی مدل نشان می‌دهد. در ۴۸ تراز (شکل ۴- الف)، در ۶۰ تراز (شکل ۴- ب) و در ۸۴ تراز (شکل ۴- ج)

شکل ۳- ب سطح ۳۰۰ هکتوپاسکالی در ساعت ۱۸۰۰ جهانی تاریخ ۹ مارس ۲۰۱۸ را در ساعتی نشان می‌دهد که خلبان CAT را گزارش کرده است که ضمن هم- خوانی با سطح ۵۰۰ هکتوپاسکالی با سرعت باد بیش از ۱۱۰ نات در عرض‌های بالاتر، بیش از ۷۵ نات در محدوده تهران و ۸۵ نات در شمال غرب کشور و محدوده فرودگاه اردبیل، گرادیان شدید خطوط هم‌مقدار باد را هم نشان می‌دهد. نفوذ رودباد قطبی که از عرض‌های بالاتر با سرعت ۹۵ نات تا سرعت بیش از ۷۵ نات در غرب آسیا، جریان‌ات ناپایدار را به دلیل وجود رودباد در سطح ۳۰۰ هکتوپاسکالی ایجاد کرده است، تأیید می‌کند که تلاطم هوای صاف در محدوده این رودباد وجود داشته است.

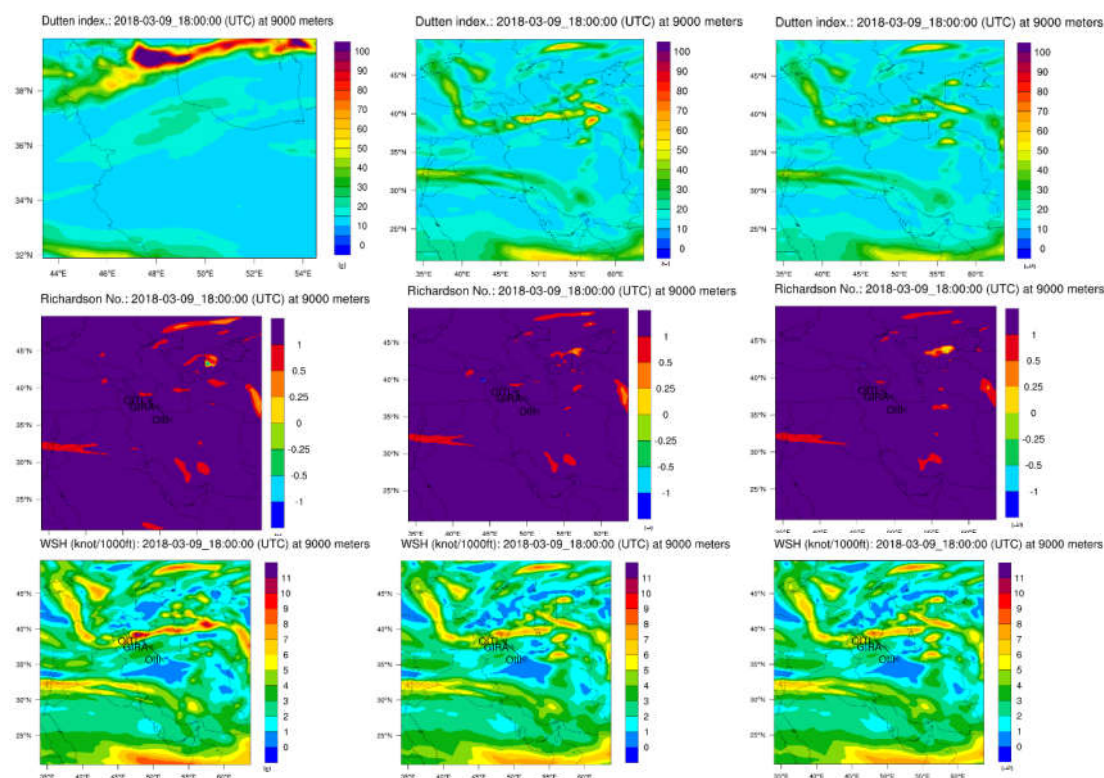
شکل ۳- ج سطح ۲۰۰ هکتوپاسکالی رودباد را با سرعت بیش از ۷۰ نات نشان می‌دهد که از عرض‌های بالاتر به عرض‌های پایین‌تر و منطقه خاورمیانه جریان دارد و گرادیان شدید ارتفاع ژئوپتانسیلی و سرعت‌های باد با



شکل ۴. شاخص‌های تلاطم هوای صاف با توجه به Phys01 (جدول ۲) در تاریخ ۹ مارس ۲۰۱۸ در ساعت ۱۸:۰۰ جهانی با فاصله قائم ۵۰۰ متر در (الف) ۴۸ تراز عمودی جو در اجرای مدل (ب) ۶۰ تراز قائم جو در اجرای مدل (ج) ۸۴ تراز قائم جو در اجرای مدل، برای سه شاخص پیش‌بینی تلاطم هوای صاف (داتن، عدد ریچاردسون و ناپایداری چینش قائم باد).

به سه تراز ۴۸، ۶۰ و ۸۴ در اجرای مدل، در ۴- الف و ۴- ب یعنی با تفکیک قائم ۴۸ و ۶۰ تراز، بهترین تفکیک برای پیش‌بینی تلاطم برای این شاخص انتخاب می‌شود. برای شاخص عدد ریچاردسون، تلاطم در محدوده تهران و مسیر پروازی و عرض‌های بالاتر از محدوده اردبیل، تفکیک قائم ۴۸ تراز با تلاطم سبک و عدد ۵/۰، که در گزارش‌های خلبان نیز وجود دارد، هم‌خوانی دارد و بهترین تفکیک است. استفاده از شاخص چینش قائم باد در این محدوده، تلاطم هوای صاف با شدت سبک و حدود ۴ متر بر ثانیه در کیلومتر، وجود چینش قائم و تلاطم را نشان می‌دهد. این شاخص با

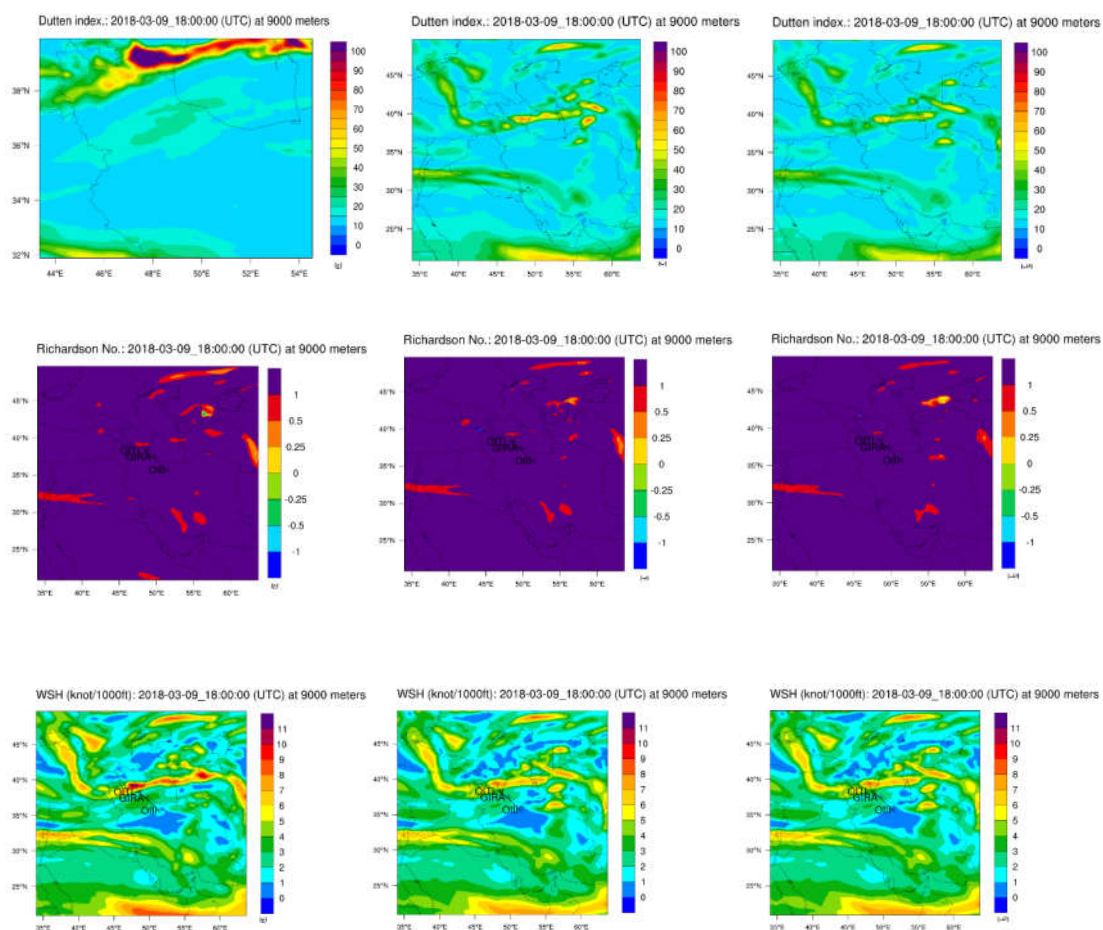
ج) به‌وضوح، تلاطم هوای صاف در محدوده اردبیل با شدت ملایم مشاهده می‌شود. این موضوع در گزارش‌های خلبان نیز وجود داشته است. شدت‌های تلاطم متوسط و شدید در عرض‌های بالاتر و خارج از محدوده کشور ایران دیده می‌شود. در شکل‌های مربوط به شاخص داتن، که ترکیبی از چینش افقی باد (متر بر ثانیه در ۱۰۰ کیلومتر) و چینش قائم باد (متر بر ثانیه بر کیلومتر) است، مناطق با عدد بزرگ‌تر از ۴۰ و با احتمال وقوع CAT مشاهده می‌شود. با افزایش به سمت اعداد بزرگ‌تر، تلاطم با شدت‌های بیشتر وجود دارد. در منطقه اردبیل و با این شاخص، شدت تلاطم سبک تا متوسط مشاهده می‌شود. با تقسیم‌بندی جو



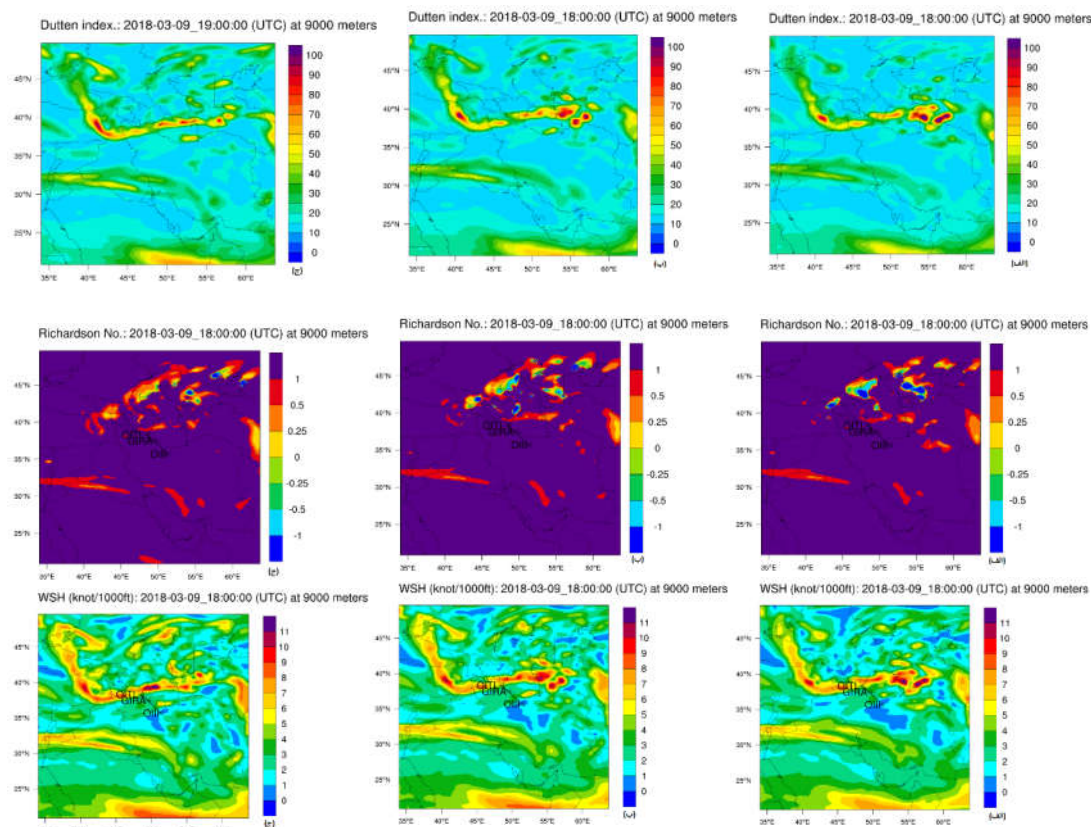
شکل ۵. شاخص‌های تلاطم هوای صاف با توجه به Phys02 (جدول ۲) در تاریخ ۹ مارس ۲۰۱۸ در ساعت ۱۸۰۰ جهانی با فاصله قائم ۵۰۰ متر در (الف) ۴۸ تراز قائم جو در اجرای مدل (ب) ۶۰ تراز قائم جو در اجرای مدل (ج) ۸۴ تراز قائم جو در اجرای مدل، برای سه شاخص پیش‌بینی تلاطم هوای صاف (داتن، عدد ریچاردسون و ناپایداری چینش قائم باد).

تراز (شکل ۶- الف) بهترین هم‌خوانی را با گزارش تلاطم در روز ۹ مارس ۲۰۱۸ نشان می‌دهد. شکل ۷ که با فیزیک Phys03 (جدول ۲) اجرا شده است، شاخص داتن را در ۴۸ و ۸۴ تراز، شاخص عدد ریچاردسون را در ۶۰ تراز و شاخص چینش قائم باد را در ۴۸ تراز تفکیک قائم با تلاطم سبک نشان می‌دهد که خلبان گزارش کرده است. شکل ۸ وضعیت جوی مربوط به سطوح ۵۰۰، ۳۰۰ و ۲۰۰ هکتوپاسکالی و تصویر فروسرخ ماهواره‌ای را در روز ۲۴ آوریل ۲۰۱۸ در ساعت ۱۸۰۰ جهانی (ساعتی که خلبان و کادر پروازی تلاطم را گزارش کرده‌اند) در مسیر پروازی اهواز به تهران نشان می‌دهد. در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۸- الف)، منطقه اهواز در بالاسو و در

تفکیک قائم ۴۸ تراز بهترین هم‌خوانی را با گزارش خلبان دارد. شکل ۵ شاخص داتن را در ۴۸ و ۶۰ تراز، شاخص ریچاردسون را در ۸۴ تراز و شاخص چینش قائم باد را در ۴۸ و ۶۰ تراز و اجرای مدل را با فیزیک‌های Phys02 (جدول ۲) نشان می‌دهد که بهترین تفکیک قائم را برای پیش‌بینی تلاطم، به ترتیب شاخص‌های داتن، عدد ریچاردسون و چینش قائم باد در این مسیر پروازی دارند. شکل ۶ شاخص داتن را با اجرای مدل با فیزیک Phys03 (جدول ۲)، در هر سه تفکیک قائم به‌خوبی نشان می‌دهد. عدد ریچاردسون با تفکیک ۸۴ تراز و به فواصل میان‌یابی ۵۰۰ متر به ۵۰۰ متر، بهترین تفکیک را برای پیش‌بینی تلاطم هوای صاف نشان می‌دهد. چینش قائم باد در ۴۸



شکل ۵. شاخص‌های تلاطم هوای صاف با توجه به Phys02 (جدول ۲) در تاریخ ۹ مارس ۲۰۱۸ در ساعت ۱۸۰۰ جهانی با فاصله قائم ۵۰۰ متر در (الف) ۴۸ تراز قائم جو در اجرای مدل (ب) ۶۰ تراز قائم جو در اجرای مدل (ج) ۸۴ تراز قائم جو در اجرای مدل، برای سه شاخص پیش‌بینی تلاطم هوای صاف (داتن، عدد ریچاردسون و ناپایداری چینش قائم باد).

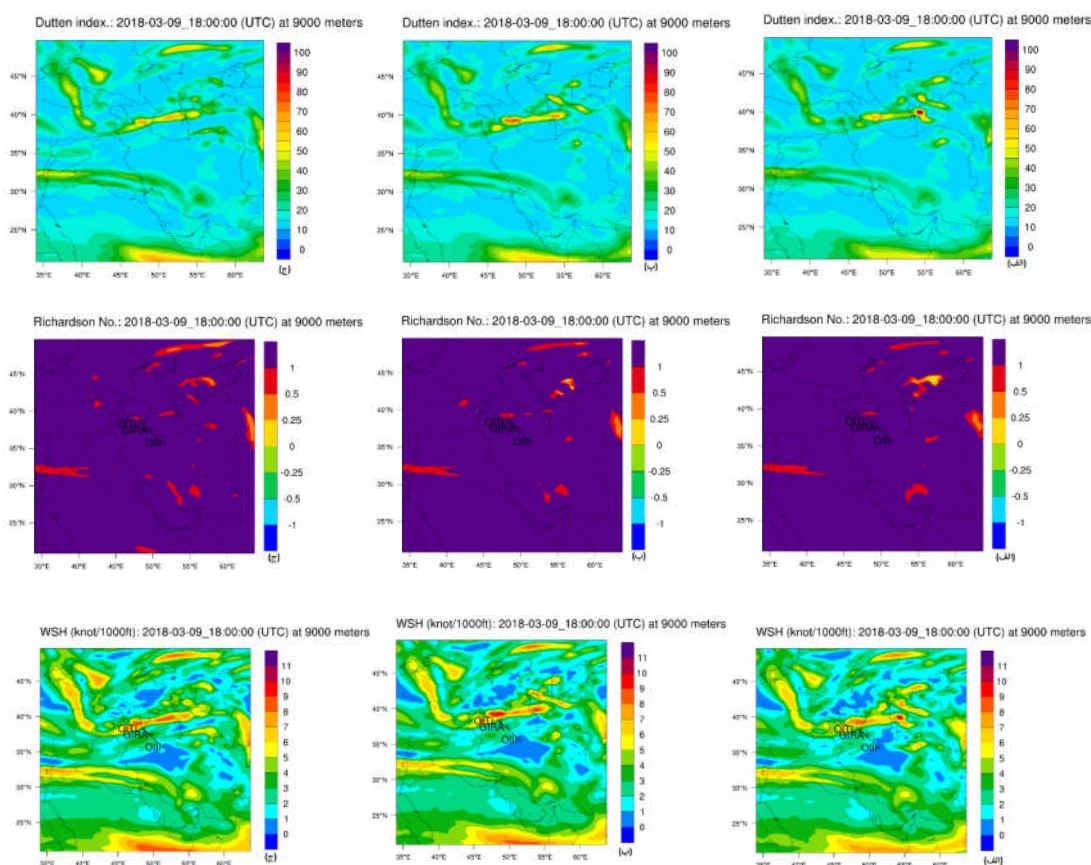


شکل ۶. شاخص‌های تلاطم هوای صاف با توجه به Phys03 (جدول ۲) در تاریخ ۹ مارس ۲۰۱۸ در ساعت ۱۸۰۰ جهانی با فاصله قائم ۵۰۰ متر در (الف) ۴۸ تراز قائم جو در اجرای مدل (ب) ۶۰ تراز قائم جو در اجرای مدل (ج) ۸۴ تراز قائم جو در اجرای مدل، برای سه شاخص پیش‌بینی تلاطم هوای صاف (داتن، عدد ریچاردسون و ناپایداری چینش قائم باد).

تصویر فروسرخ سطح ۳۰۰ هکتوپاسکالی ماهواره EUMETRAIN را در ساعت ۱۸۰۰ جهانی روز ۲۴ آوریل ۲۰۱۸ در مسیر تهران به اهواز بدون هیچ‌گونه ابرناکی و پدیده جو در فراسوی پشته ارتفاعی همراه با رودباد جنب حاره نشان می‌دهد که با گزارش خلبان نیز سازگار است. در شکل ۹، نمایه قائم جو در مسیر پروازی تهران به اهواز برای شهرهای تهران، دزفول و اهواز ترسیم شده است.

شکل‌های ۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳ هم‌مقدارهای شاخص‌های عدد ریچاردسون، داتن و چینش قائم باد را نشان می‌دهد

جهت جریان اصلی محور پشته قرار دارد. خطوط پربند سیاه معرف هم‌مقدارهای ژئوپتانسیل است و خطوط پربند قرمز وضعیت دمایی را در این سطح نشان می‌دهد. سرعت‌های باد بیشتر از ۶۰ نات در این سطح وجود دارد. در سطح ۳۰۰ هکتوپاسکالی (شکل ۸-ب)، منطقه گذار دو رودباد قطبی و جنب حاره دیده می‌شود که سرعت‌های بیشتر از ۷۰ نات در آن منطقه وجود دارد. شکل ۸-ج وضعیت رودبادهای قطبی و جنب حاره را در سطح ۲۰۰ هکتوپاسکالی نشان می‌دهد که با سطح ۳۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکالی همخوانی زیادی دارد. شکل ۸-د

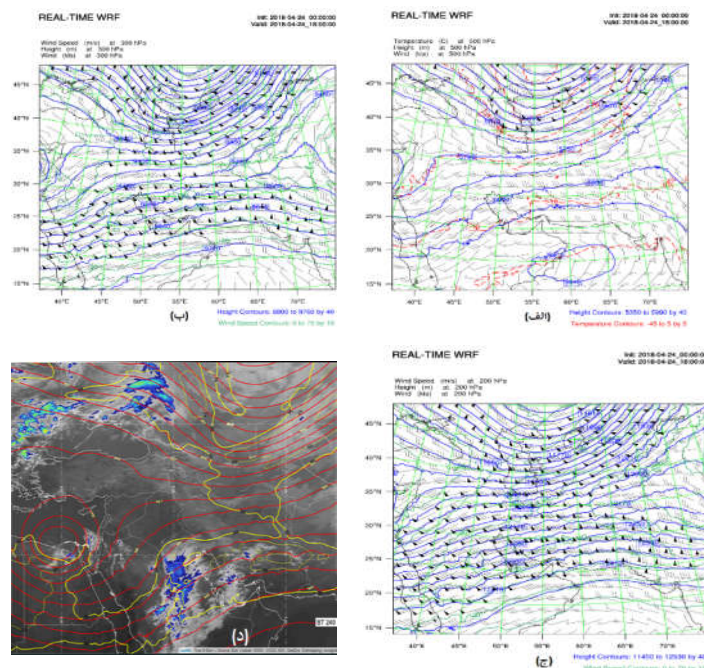


شکل ۷. شاخص‌های تلاطم هوای صاف با توجه به Phys04 (جدول ۲) در تاریخ ۹ مارس ۲۰۱۸ در ساعت ۱۸۰۰ جهانی با فاصله قائم ۵۰۰ متر در (الف) ۴۸ تراز قائم جو در اجرای مدل (ب) ۶۰ تراز قائم جو در اجرای مدل (ج) ۸۴ تراز قائم جو در اجرای مدل، برای سه شاخص پیش‌بینی تلاطم هوای صاف (داتن، عدد ریچاردسون و ناپایداری چینش قائم باد).

که بر اساس معیارهای راستی‌آزمایی مشخص شده و با تفکیک‌های ۴۸ تراز (الف)، ۶۰ تراز (ب) و ۸۴ تراز قائم جو (ج) شبیه‌سازی شده‌اند. وضعیت تلاطم با شدت سبک تا متوسط در محدوده آهواز و عرض‌های پایین‌تر با شدت بیشتر مشاهده می‌شود. فیزیک‌های به کاررفته در اجرای مدل شامل طرح‌واره‌های Phys01، Phys02، Phys04، Phys05 (جدول ۲) بود که بیشترین همخوانی را با نوع شدت تلاطم دیدبانی شده دارد.

۷ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

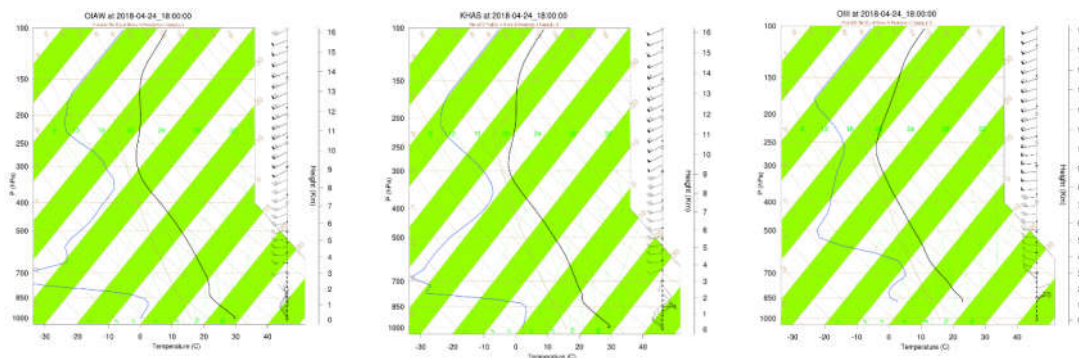
برای دستیابی به اهداف این پژوهش، از مدل هواشناسی میان‌مقیاس WRF برای شبیه‌سازی تلاطم هوای صاف در دو مسیر پروازی غرب کشور ایران (مسیر پروازی تهران به اردبیل و مسیر پروازی تهران به آهواز) استفاده شد. در هر دو مسیر، توپوگرافی پیچیده کوهستانی شمال غرب (رشته‌کوه البرز) و جنوب غرب کشور (رشته‌کوه زاگرس) وجود دارد. گزارش‌های خلبان و کادر پروازی در این دو مسیر طی سه ماه فوریه، مارس و آوریل سال ۲۰۱۸ جمع‌آوری شد و با توجه به اینکه تلاطم هوای صاف بیشتر در فصل زمستان و بهار و با گذر رودبادها



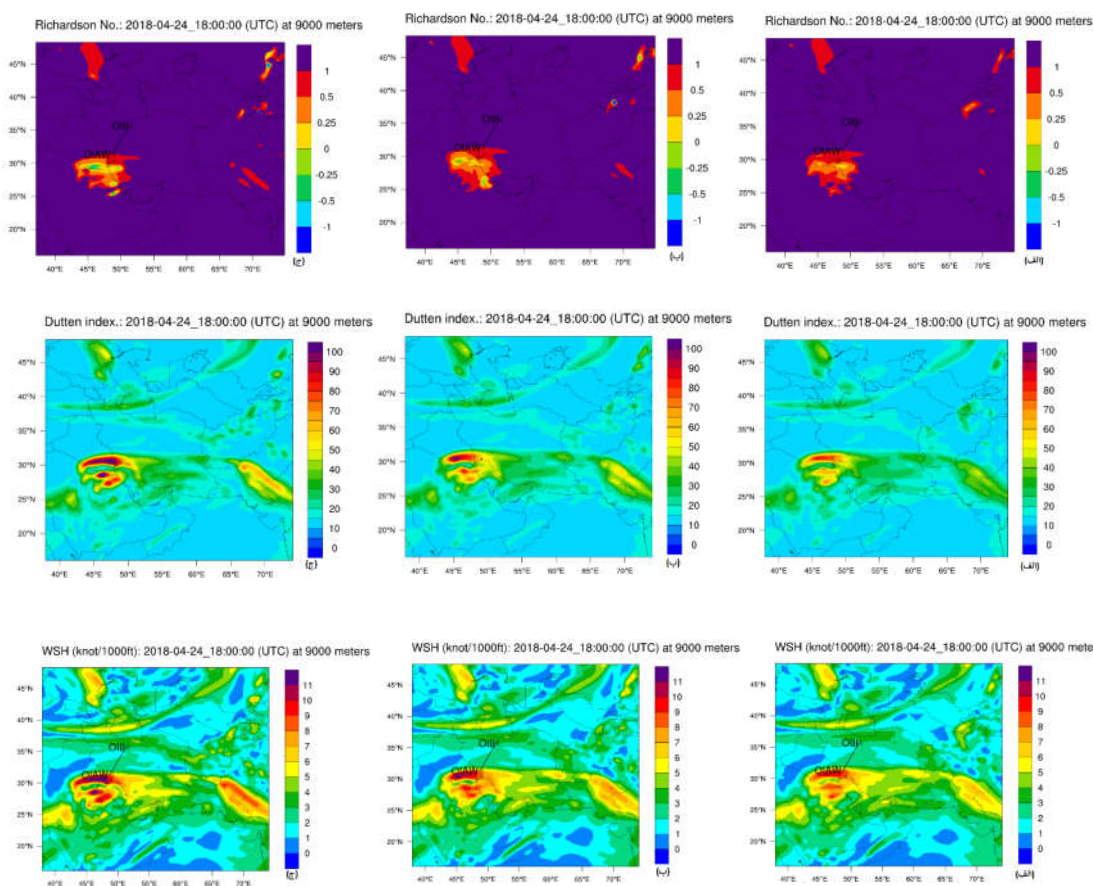
شکل ۸. نقشه‌های فشاری سطح (الف) ۵۰۰ هکتوپاسکالی (ب) ۳۰۰ هکتوپاسکالی (ج) ۲۰۰ هکتوپاسکالی (د) تصویر ماهواره فروسرخ ساعت ۱۸۰۰ جهانی روز ۲۴ آوریل ۲۰۱۸.

روز، ساعت گزارش تلاطم هوای صاف در این دو مسیر نزدیک به ساعت ۱۸ جهانی و در سطح ۳۰۰ هکتوپاسکالی (۳۰۰۰ پا) بود. برای انجام اجراهای مدل WRF از پنج پیکربندی متفاوت مدل بر اساس طرح‌واره‌های متفاوت پارامترسازی فیزیکی استفاده شد

روی منطقه و ایران همراه است، برای هر مسیر پروازی یک روز با بیشترین دیدبانی تلاطم در نظر گرفته شد. در مسیر پروازی تهران به اردبیل، روز ۹ مارس ۲۰۱۸ و برای مسیر پروازی تهران به اهواز، روز ۲۴ آوریل ۲۰۱۸ مطالعه و بررسی شد. با توجه به گزارش‌های خلبان در این دو



شکل ۹. نمودار نمایه قائم جو در مسیر پروازی تهران به اهواز در روز ۲۴ آوریل ۲۰۱۸ برای شهرهای تهران (OIII)، دزفول (KHAS) و اهواز (OIAW) در ساعت ۱۸۰۰ جهانی.

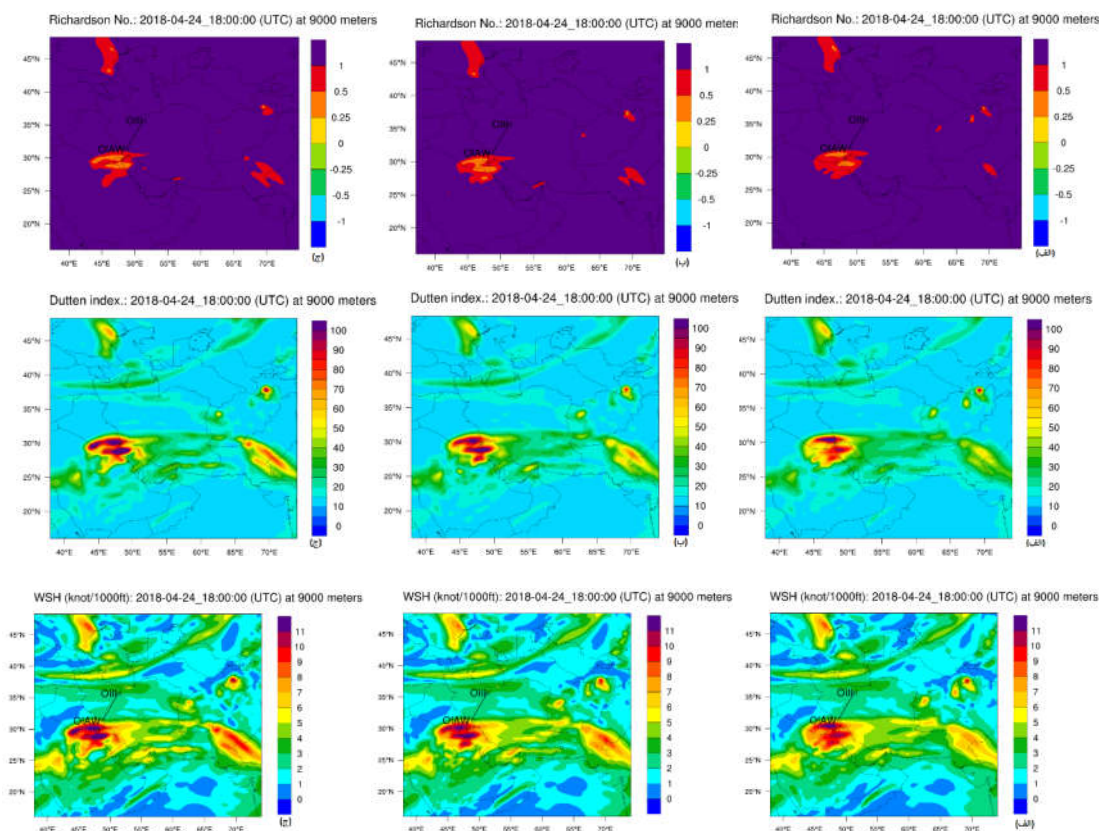


شکل ۱۰. شاخص‌های تلاطم هوای صاف با توجه به Phys01 (جدول ۲) در تاریخ ۲۴ آوریل ۲۰۱۸ (گزارش تلاطم هوای صاف در مسیر تهران به اهواز)، در ساعت ۱۸۰۰ جهانی و با فاصله قائم ۵۰۰ متر در (الف) ۴۸ تراز قائم جو در اجرای مدل (ب) ۶۰ تراز قائم جو در اجرای مدل (ج) ۸۴ تراز قائم جو در اجرای مدل، برای سه شاخص پیش‌بینی تلاطم هوای صاف (عدد ریچاردسون، داتن و ناپایداری چینش قائم باد).

که شامل پنج طرح‌واره متفاوت خردفیزیکی نیز هست. برای یافتن بهترین تفکیک افقی مدل برای شبیه‌سازی شفاف تلاطم هوای صاف روی خطوط پروازی و با توجه به رشته ارتفاعات که مسبب تولید انواع تلاطم هستند، مدل با سه تفکیک افقی مختلف ۱۸، ۶ و ۲ کیلومتر اجرا و تفکیک افقی مطلوب‌تر تعیین شد. شایان ذکر است که برای انجام اجراهای مدل از تعداد ترازهای متفاوت در راستای قائم نیز استفاده شد.

پس از اجرای مدل، برای راستی‌آزمایی، با در نظر گرفتن داده‌های مشاهداتی گزارش خلبان، با استفاده از سنجه‌های POD، FBI، FAR و عملکرد مدل

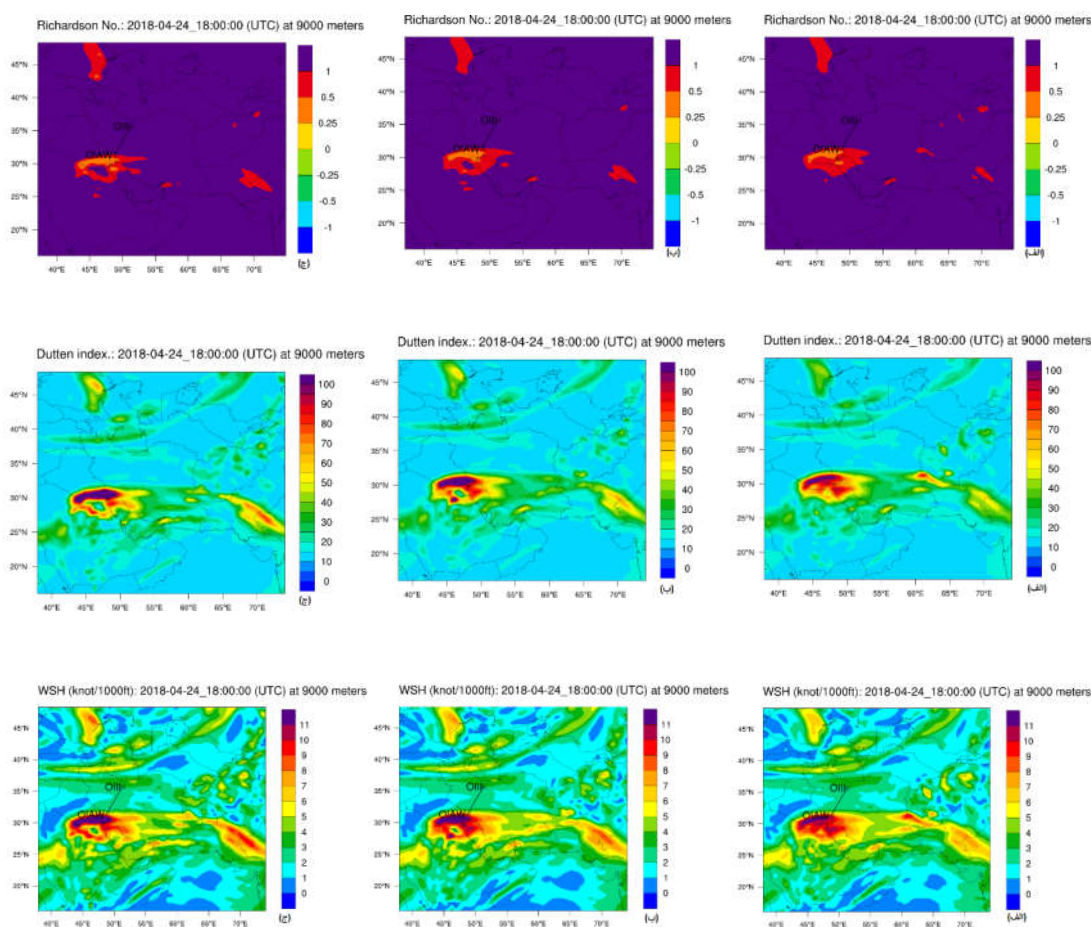
شبیه‌سازی WRF راستی‌آزمایی شد (جدول ۳). بررسی و مقایسه تفکیک افقی بین ۱۸، ۶ و ۲ کیلومتر در محدوده مسیر پروازی تهران به اردبیل و ۱۸ و ۶ کیلومتر برای مسیر پرواز تهران به اهواز، وضعیت تلاطم هوای صاف را در شبیه‌سازی‌ها، در تفکیک افقی شبکه ۶ کیلومتری خیلی بهتر از شبکه ۱۸ کیلومتری نشان می‌دهد. با توجه به اینکه در گام‌های مکانی و زمانی کوچک‌تر، حجم محاسبات خیلی زیاد است؛ بنابراین تفکیک افقی ۱۸ کیلومتر، محدوده وسیع‌تری در منطقه مورد مطالعه را پوشش می‌دهد و گسترش رودبادهایی را نشان می‌دهد که منجر به چینش قائم باد با ارتفاع می‌شوند. برای هر دو مسیر، فاصله



شکل ۱۱. شاخص‌های تلاطم هوای صاف با توجه به Phys02 (جدول ۲) در تاریخ ۲۴ آوریل ۲۰۱۸ (گزارش تلاطم هوای صاف در مسیر تهران به اهواز) در ساعت ۱۸۰۰ جهانی و با فاصله قائم ۵۰۰ متر در (الف) ۴۸ تراز قائم جو در اجرای مدل (ب) ۶۰ تراز قائم جو در اجرای مدل (ج) ۸۴ تراز قائم جو در اجرای مدل، برای سه شاخص پیش‌بینی تلاطم هوای صاف (عدد ریچاردسون، داتن و ناپایداری چینش قائم باد).

داتن به‌ترتیب بهترین شاخص‌ها برای پیش‌بینی تلاطم هوای صاف روی منطقه ایران هستند. سطح تلاطم هوای صاف با توجه به گزارش خلبران و کادر پروازی که در حدود ۳۰۰ هکتوپاسکالی (۳۰۰۰ پایی) بود، بین سطح فشاری ۳۰۰ تا ۲۵۰ هکتوپاسکالی است (شکل‌های ۸ و ۹). الگوهای جوّی همدیدی متعددی با تلاطم هوای صاف همراهی می‌کنند که در تاریخ ۲۴ آوریل ۲۰۱۸ تلاطم روی محور منحنی و اچ‌رندی رودباد جنب حاره با دامنه بلند تقویت می‌شود و هنگام چرخندزایی در سمت چپ محور اصلی و در جهت شمال و در انتهای مسیر چرخندی رودباد است. در تاریخ ۹ مارس ۲۰۱۸ الگوی جوّی

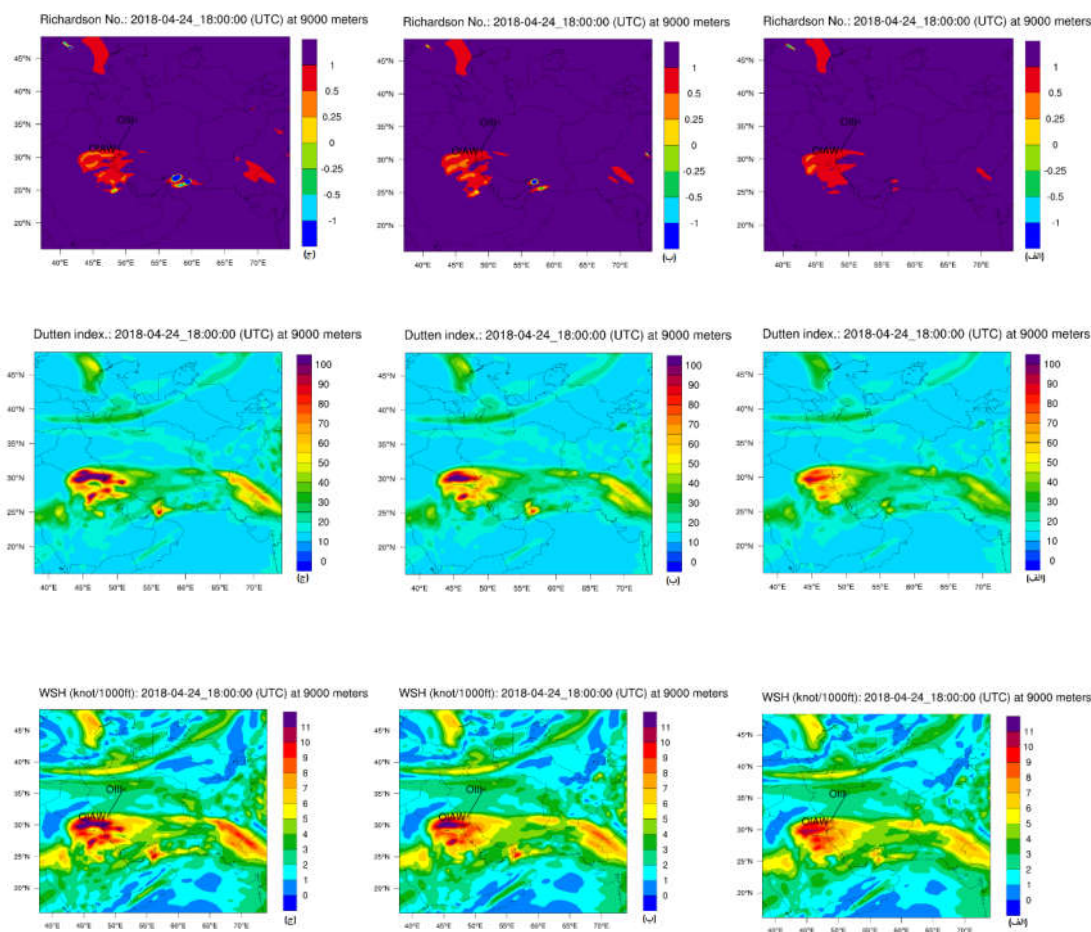
شبکه افقی بهینه انتخاب شد. از میان پنج پیکربندی فیزیکی آزمایش‌شده، مناسب‌ترین فیزیک‌ها برای شبیه‌سازی تلاطم هوای صاف در منطقه ایران، طرح‌واره‌های خردفیزیک NEW Thompson، wsm3 و kessler، لایه مرزی سیاره‌ای YSU و MYJ، طرح‌واره همرفت Kain-Fritsch، طرح‌واره تابش طول موج بلند RRTM، تابش طول موج کوتاه Dudhia، طرح‌واره لایه سطحی MM5 و ETA و طرح‌واره سطح زمین Noah و 5-Layer بود که بهترین عملکرد را در پارامترسازی‌ها در دوره زمانی مورد مطالعه داشتند. بررسی جدول ارزیابی شاخص‌ها نشان می‌دهد شاخص ریچاردسون و شاخص



شکل ۱۲. شاخص‌های تلاطم هوای صاف با توجه به Phys04 (جدول ۲) در تاریخ ۲۴ آوریل ۲۰۱۸ (گزارش تلاطم هوای صاف در مسیر تهران به اهواز) در ساعت ۱۸۰۰ جهانی و با فاصله قائم ۵۰۰ متر در (الف) ۴۸ تراز قائم جو در اجرای مدل (ب) ۶۰ تراز قائم جو در اجرای مدل (ج) ۸۴ تراز قائم جو در اجرای مدل، برای سه شاخص پیش‌بینی تلاطم هوای صاف (عدد ریچاردسون، داتن و ناپایداری چینش قائم باد).

۵۰۰ متر، نشان‌دهنده تلاطم هوای صاف با شدت سبک تا متوسط است که با گزارش خلبان همخوانی دارد. نتایج در بخش ارزیابی با داده‌های SKEW-T و ماهواره‌ای، حاکی از عملکرد مناسب برای تلاطم هوای صاف در تراز فشاری ۳۰۰ تا ۲۰۰ هکتوپاسکالی است. طرح‌واره‌های فیزیکی خردفیزیک Lin، لایه مرزی سیاره‌ای YSU، طرح‌واره همرفت Kain-Fritsch، طرح‌واره تابش طول موج بلند RRTM، تابش طول موج کوتاه Dudhia، طرح‌واره لایه سطحی MM5 و طرح‌واره سطح زمین Noah در

همدیدی همراه با تلاطم هوای صاف، در شکل ۸-ب نشان‌دهنده منطقه وقوع تلاطم هوای صاف با بسط و توسعه کم‌فشار سطح زمین و محور رودباد سطوح فوقانی (شاخه جنوبی رودباد قطبی) است. منطقه تلاطم هوای صاف در مرکز رودباد با سرعت بیشینه ۷۰ نات وجود دارد که از شمال غرب ایران در حال گذر است. چینش قوی مؤلفه قائم باد (بیشتر از ۵ متر بر ثانیه) و سرعت باد بیشتر از ۴۰ متر بر ثانیه در ناحیه انحنای شدید رودباد سطح ۳۰۰ هکتوپاسکالی در شاخص چینش قائم باد و فاصله قائم



شکل ۱۳. شاخص‌های تلاطم هوای صاف با توجه به Phys05 (جدول ۲) در تاریخ ۲۴ آوریل ۲۰۱۸ (گزارش تلاطم هوای صاف در مسیر تهران به اهواز) در ساعت ۱۸۰۰ جهانی و با فاصله قائم ۵۰۰ متر در (الف) ۴۸ تراز قائم جو در اجرای مدل (ب) ۶۰ تراز قائم جو در اجرای مدل (ج) ۸۴ تراز قائم جو در اجرای مدل، برای سه شاخص پیش‌بینی تلاطم هوای صاف (عدد ریچاردسون، داتن و ناپایداری چینش قائم باد).

عمودی باد و الگوهای جوی و وجود رودبادهای جنب حاره و قطبی که در فصل سرد سال و در عرض جغرافیایی ایران هستند، بسیار مهم و امیدوارکننده است. همچنین استفاده از فیزیک‌های مناسب، تفکیک افقی، تفکیک قائم و انتخاب بهترین شاخص شناسایی تلاطم هوای صاف روی ایران، در به‌دست‌آوردن این نتایج مؤثر بوده است. نتایج به منطقه غرب ایران با توپوگرافی پیچیده کوهستانی و تاریخ‌های موردی بررسی شده محدود است. پیش‌بینی CAT با استفاده از شاخص داتن و طرح‌واره لایه مرزی

شبیه‌سازی تلاطم هوای صاف مناسب‌تر عمل کرده‌اند. در ارزیابی با توجه به گزارش‌های خلبان، بهترین شبیه‌سازی به‌ترتیب برای شاخص‌های عدد ریچاردسون، داتن و چینش قائم باد در تراز ۳۰۰۰۰ پای و با فاصله قائم ۳۰۰ متر انجام شده است. در جمع‌بندی کلی و با توجه به سنجه‌های آماری محاسبه‌شده، مقایسه کیفی تلاطم هوای صاف با گزارش‌های خلبان و شبیه‌سازی‌ها سازگاری خوبی نشان می‌دهد، به‌خصوص هم‌خوانی تلاطم هوای صاف با ناپایداری‌های ناشی از امواج کوهستان، چینش

بادپناه) بر فراز رشته کوه‌های زاگرس و ناشی از آن (CAT) تلاطم هوای صاف: مجله فیزیک زمین و فضا، ۲(۴۳)، ۴۵۱-۴۵۹.

- Baughman, E., 1946, Turbulence with the stable lapse rate., Bull. American Meteorology. Soc., 27, 459-462.
- Bresch, J. F., Power, J. G., and Manning, K., 2000, On the use of MM5 in an aviation weather forecast system: 9th international conference on aviation, range and aerospace meteorology, Florida, AMS, Boston, 105-109.
- Colson, D. C., 1968: Clear Air Turbulence and Upper Level Meteorological Patterns, Plenum Press, N. Y. 337-360.
- Donaldson, O., and Connor, V., 1975, Retelling a Classic and Finding Some Revisionist History: Semantic scholar, 194, 301-498.
- Dutton, J., and Panofsky, H. A., 1970, Clear Air Turbulence: A mystery may be unfolding: Science, 167, 937-944.
- Dutton, M. J. O., 1980, Probability forecasts of clear-air turbulence based on numerical model output: Meteorological Magazine, 109, 293-304.
- Ellrod, G. P., and Knapp, D. I., 1992, An objective clear-air turbulence forecasting technique: Verification and operational use: Weather Forecasting, 7, 150-165.
- Fairal, C. W., and White, A. B., 1991, A stochastic model of gravity wave induced clear air turbulence: Journal of Atmospheric Sciences, 48, 1771-1790.
- Jeffrey, E. P., and Knapp, D. I., 2007, Using WRF-ARW data to forecast turbulence at small scales: Battlefield Environment Division U.S. Army Research Laboratory White Sands Missile Range, New Mexico 88002.
- Jung, H. K., and Hye, Y. C., 2010, A numerical study of Clear-Air Turbulence (CAT) encounters over South Korea on 2 April 2007: Journal of Applied Meteorology and Climatology, 49(12), 2381-2403.
- Lester, P. F., 1993, Turbulence: Jepson Sanderson, Inc., 236 pp.
- Madala, S., Srinivas, C. V., and Satyanarayana, A. N. V., 2018, Performance of WRF for simulation of mesoscale meteorological characteristics for air quality assessment over tropical coastal city, Chennai: Pure and Applied Geophysics, 175, 501-518.
- Mancuso, R. L., and Endlich, R. M., 1966, Clear-air turbulence frequency as a function of wind

YSU، طرح‌واره‌های کومولوسی KF و طرح‌واره‌های میکروفیزیکی Lin و Kessler؛ با استفاده از شاخص چینش قائم باد و طرح‌واره لایه مرزی MYJ، طرح‌واره کومولوسی KF و طرح‌واره میکروفیزیکی WSM3 و با استفاده از شاخص ریچاردسون و طرح‌واره لایه مرزی MYJ و YSU، طرح‌واره کومولوسی KF و طرح‌واره فیزیکی Lin و WSM3 بهترین عملکرد را برای این دو مسیر پروازی داشته است. علاوه بر این، با توجه به سنجه‌های راستی آزمایی، بهینه‌ترین تفکیک افقی ۱۸ کیلومتر است. همچنین از بین شاخص‌های معرف تلاطم هوای صاف، برای مسیر پروازی تهران به اردبیل، شاخص‌های داتن، عدد ریچاردسون و چینش قائم باد و برای مسیر پروازی اهواز به تهران شاخص‌های عدد ریچاردسون، داتن و چینش قائم باد بهترین کیفیت پیش‌بینی تلاطم هوای صاف با شدت سبک تا متوسط را در نزدیکی رودبادهای همراه با ناوه و پشته‌های جوئی سطوح ۳۰۰ تا ۲۰۰ هکتوپاسکالی دارند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از مرکز کنترل ترافیک هوایی سازمان هواپیمایی کشوری، بخش پروازهای نظامی و دانشگاه تهران به دلیل حمایت از این کار پژوهشی تشکر و قدردانی می‌کنند.

منابع

- آزادی، م.، تاج بخش، س.، عربلی، پ.، علی اکبری بیدختی، ع.، ۱۳۸۵، مطالعه موردی تلاطم صاف روی ایران به کمک برخی از شاخص‌های تلاطم در یک دوره ۵ ماهه (ژانویه-مه ۲۰۰۴): مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۲(۱)، ۸۵-۱۰۲.
- کلانتری، ب.، علی اکبری بیدختی، ع.، مبارک حسن، ا.، ۱۳۹۵، بررسی شکل‌گیری امواج کوهستان (امواج

- Review, **94**, 581–585.
- McCann, D. W., 1993, An evaluation of clear-air turbulence indices: 5th international conference on aviation weather systems, Vienna, Virginia, American Meteorological Society, 449-453.
- Miles, J. W., 1961, On the stability of heterogeneous shear flows: *Journal of Fluid Mechanics*, **10**, 496–508.
- Passner, D., and Knapp, I., 2007, Using WRF-ARW data to forecast turbulence at small scales: 13th Conference on Aviation.
- Passner, J., 2003, Post-Processing for the Battlescale Forecast Model and Mesoscale Model Version 5, ARL-TR-2988, White Sands Missile Range, 43pp.
- Passner, J., 2014, Low-Level Turbulence Forecasts from Fine-Scale Models, ARL-TR-6847, White Sands Missile Range, NM 88002-5501, 55PP.
- Sharman, R., Tebaldi, C., Wiener, G., and Wolff, J., 2006, An integrated approach to mid- and upper-level turbulence forecasting: *Weather Forecasting*, **21**, 268–287.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhi, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X.-Y., Wang, W., and Powers, J. G., 2008, A Description of the Advanced Research WRF Version 3: NCAR Technical note -475+STR.
- Sousounis, P. J., and Fritsch, M., 1994, Lake-aggregate mesoscale disturbances. Part II: A shear and deformation: Monthly Weather case study of the effects on regional and synoptic-scale weather systems: *Bulletin of the American Meteorological Society*, **75**(10), 1793–1812.
- Stull, R. B., 1988, *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*: Kluwer Academic Publisher, London, pp. 666.
- Tajbakhsh, S., Aliakbari Bidokhti, A., and Azadi, M., 2006, Study of clear air turbulence over Iranian plateau: *Journal of Aerospace Science and Technology*, **3**(2), 87-95.
- Trier, S. B., Sharman, R. D., Fovell, R. G., and Freilich, R. D., 2010, Numerical simulation of radial cloud bands within the upper-level outflow of an observed mesoscale convective system: *Journal of Atmospheric Sciences*, **67**(9), 2990-2999.
- Venkatesh, T. N., Mathew, J., and Ravi, S. N., 2014, Secondary instability as a possible mechanism for clear air turbulence: a case study: *Meteorology and Atmospheric Physics*, **126**, 139–160.
- Wilks, D., 2011, *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, **100**, 3rd Edition: Academic Press.
- Zavarina, M. V., and Yundi, M. I., 1960, An accurate definition and use of the Richardson number of identification of zone of aircraft bumpiness: *Meteorology and Hydrology*, **2**, 3-10.

Prediction of the clear air turbulence over western Iran (Tehran–Ahwaz and Tehran–Ardebil) using the WRF model simulations

Mohammad Mahdi Aryamanesh¹, Sarmad Ghader^{2*}, Abbasali Ali Akbari Bidokhti³ and Omid Alizadeh⁴

¹ Ph.D. Candidate, Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran

² Associate Professor, Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran

³ Professor, Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, University

⁴ Associate Professor, Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran

(Received: 14 June 2020, Accepted: 07 September 2020)

Summary

The clear air turbulence (CAT) is one of the atmospheric phenomena that can endanger the flights, and may create restrictions in the flight surveillance. CAT can be defined as all turbulences in the free atmosphere (about >10000m AGL) of interest in aerospace operations that is not in or adjacent to visible convective activity. As Iran is located in the gate of southwest Asia and Eastern Europe, investigation of the occurrence of the CAT in Iran is essential. To this end, the CAT indices such as Richardson number, vertical wind shear and Dutton's index are calculated via post processing of outputs of the WRF model. Using the Global Forecast System (GFS) data as input to the Weather Research and Forecasting (WRF) model, prediction of the CAT is provided for a 24-hour lead time. The GFS data with 0.5 degree horizontal resolution are used as the initial and boundary conditions for running the WRF model, while reports of pilots and aviation maps are used to evaluate the model performance. The WRF model was run with a three nested domains with horizontal resolutions of 18, 6 and 2 km, respectively. The CAT is diagnosed for two flight routes over Iran area: Tehran to Ardabil on 9 March 2018 and Ahwaz to Tehran on 24 April 2018. Both of routes are embedded in the Alborz and Zagros mountains. Results indicate that the CAT can be better predicted using the Dutton when the YSU planetary boundary layer scheme, the KF Cumulus schemes and Lin and Kessler microphysics schemes are used in WRF model setup. Prediction of the CAT based on wind shear index is better achieved when the MYJ planetary boundary layer scheme, the KF Cumulus scheme and the WSM3 are employed in WRF model. Based on the Richardson index, the CAT is better predicted using the MYJ and YSU planetary boundary layer schemes, the KF cumulus scheme and the WSM3 and Lin microphysics schemes. Based on the results of the evaluations, for the horizontal resolution of 18 km, the best indices for the weak to moderate CAT are Richardson number index, vertical wind shear index and Dutton's index for the Tehran to Ardabil flight route, and Richardson number index, Dutton's index and vertical wind shear index for the Ahwaz to Tehran flight route. The CAT in these routes is accompanied with the upper-tropospheric (200 to 300 hPa) jet streams and troughs and ridges.

Keywords: Numerical weather prediction, WRF model, Richardson number, Clear Air Turbulence

*Corresponding author:

sghader@ut.ac.ir