

مطالعه موردی تلاطم هوای صاف روی ایران به کمک برخی از شاخص‌های تلاطم در یک دوره ۵ ماهه (ژانویه- مه ۲۰۰۴)

سحر تاج‌بخش*، مجید آزادی**، عباسعلی علی‌اکبری بیدختی*** و پروین عربلی****

*دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، صندوق پستی ۷۷۵-۱۴۵۱۵

** پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، صندوق پستی ۶۴۶۶-۱۴۱۸۵

*** مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، صندوق پستی ۶۴۶۶-۱۴۱۵۵

**** سازمان هواشناسی کشور، صندوق پستی ۶۴۶۶-۱۴۱۸۵

(دریافت مقاله: ۱۳۸۳/۱۲/۱۱، پذیرش مقاله: ۱۳۸۳/۱۲/۹)

چکیده

در این مقاله کوشش شده است به کمک محاسبه، برخی از مهم‌ترین شاخص‌های تلاطم هوای صاف، با استفاده از پارامترهای مرتبط از جمله چینش باد در یک دوره ۵ ماهه (ژانویه تا مه ۲۰۰۴)، مقادیر آستانه شاخص‌های وقوع تلاطم با شدت‌های سبک تا متوسط و متوسط، مشخص شود و الگوهای جوی متداول همراه با این پدیده در سطوح فوقانی جو و در منطقه ایران مورد بررسی قرار گیرد. برای محاسبه شاخص‌ها از داده‌های مدل جهانی AVN (داده‌های عینی) استفاده شده است و نتایج به دست آمده با گزارش‌های دریافتی از خلبانان (داده‌های ذهنی) پروازهای عبوری بر فراز آسمان ایران مقایسه شده است. این مطالعه نشان می‌دهد که وقوع تلاطم هوای صاف (clear Air turbulence, CAT) با شدت‌های بیشتر از متوسط در ایران نادر است. آستانه عددی وقوع تلاطم هوای صاف با شدت متوسط در ایران به کمک شاخص‌های عینی الود-۲ و داتن، با وجود اینکه شرایط اقلیمی در ایران و دیگر نقاط دنیا از جمله اروپا و آمریکا یکسان نیست، تطبیق قابل قبولی با مقادیر آستانه‌ای معرفی شده در اروپا و آمریکا دارد و با گزارش‌های دریافتی از خلبانان نیز همخوانی خوبی را نشان می‌دهد. بیشترین تلاطم‌ها در لایه ۳۰۰-۲۵۰ میلی باری رخ داده است و در جریان سوی ناوه ژئوپتانسیلی بیشترین مقادیر عددی شاخص‌ها همراه با تلاطم هوای صاف دیده شده است.

واژه‌های کلیدی: تلاطم هوای صاف (CAT)، شاخص تلاطم، چینش باد، مدل جهانی AVN، تکانش

۱ مقدمه

هوایم یا هر وسیله پرنده دیگر، در برابر جریان‌های جوی تولید کننده آن اطلاق می‌شود. به عبارت ساده‌تر تلاطم عبارت است از تکانش در پرواز (لستر، ۱۹۹۳). CAT غالباً در ورود سپهر زیرین و پوش سپهر زیرین رخ می‌دهد. در برخی شرایط نیز این پدیده تحت تأثیر شرایط مناطق کوهستانی در سطوح زیرین جو رخ می‌دهد که خارج از بحث این مقاله است. اثر CAT به صورت تکانه‌های شدید هوایم در حال پرواز در ارتفاعات زیاد و در مناطقی که فاقد ابر قابل توجه یا توفان‌های تندی‌اند، ظاهر می‌شود (چمبرز، ۱۹۷۳). علت دقیق وقوع تلاطم هوای صاف تا سال‌های اخیر نیز به درستی روشن نشده بود (تبالدی و همکاران، ۲۰۰۳). این پدیده نخستین بار در دهه ۱۹۴۰

تلاطم از دیدگاه هوایم‌ی در چهار گروه طبقه‌بندی می‌شود: تلاطم تراز زیرین (low level turbulence, LLT) تلاطم در توفان‌های تندی و یا در نزدیکی آنها (turbulence near thunder storm, TNT)، تلاطم هوای صاف (CAT) و تلاطم امواج کوهستان (mountain wave turbulence, MWT). تلاطم هوای صاف یکی از بدیهی‌ترین مخاطرات پرواز است و تفاوت‌های بارزی با دیگر انواع تلاطم همراه با فعالیت‌های همرفتی (مثل ابرهای همرفتی) دارد. از آنجا که CAT و علت وقوع آن غالباً غیر قابل مشاهده است، از این رو خلبان به سادگی شناسایی آن نیست. در مطالعات هوانوردی و به‌ویژه بخش هوایم‌ی، تلاطم به تکانه‌های

(باگمن، ۱۹۴۶) معرفی شد و در دهه ۱۹۶۰ که ارتش و هواپیمایی ایالات متحد دهها میلیون دلار خسارت وارد شده به هواپیماها را ناشی از این پدیده اعلام کرد، به صورت خطری مهم برای سلامت پرواز مطرح شد (داتن و پانوفسکی، ۱۹۷۰). اندلیچ (۱۹۶۴) در مقاله خود به مطالعه تلاطم هوای صاف در سه الگوی متفاوت سطوح فوقانی جو پرداخت و نشان داد که CAT با شدت بالا با تغییرات جهت باد در ناهها و پشته‌های بسیار قوی و CAT متوسط با تغییرات تندی باد و به‌ویژه در جت استریم‌های مستقیم رخ می‌دهد. داتن و پانوفسکی (۱۹۷۰) روشن ساختند که چینش باد و CAT ارتباط نزدیکی با یکدیگر دارند. تلاطم هوای صاف غالباً در لایه‌های پایداری که به شدت چینه‌بندی شده‌اند رخ می‌دهد و یکی از مهم‌ترین علل جوی که می‌تواند باعث وقوع تلاطم هوای صاف شود امواج گرانی چینه‌ای شده است (لستر، ۱۹۹۳). توجه ناکس در ۱۹۹۵ بر سازوکارهای CAT و تشخیص آن در مناطق جریان واچرخندی که همراهی طولانی مدتی با وقوع CAT دارند متمرکز شد. از سال‌های دور تاکنون شاخص‌های متعددی برای تعیین کردن شدت تلاطم معرفی شد و به‌کار رفته است و از آن جمله می‌توان به شاخص‌های براون (براون، ۱۹۷۳)، داتن و پانوفسکی (داتن و پانوفسکی، ۱۹۷۰)، عدد ریچاردسن، الود-۱ و ۲ (الود و نپ، ۱۹۹۲) و شاخص‌های DTF3، DTF2 و (diagnostic turbulence forecasting) DTF4 (ماروکوئین، ۱۹۹۵ و ۱۹۹۸) و شاخص IFTA (integrated forecasting turbulence algorithm) (شارمن و همکاران، ۲۰۰۰) اشاره کرد. تلاش‌های زیادی برای پیش‌بینی صحیح این پدیده صورت گرفته و همچنان نیز ادامه دارد اما تا سال‌های اخیر نیز پیش‌بینی صحیح و دقیق وقوع تلاطم هوای صاف در مراکز بزرگ پیش‌بینی وضع هوا در دنیا همچنان با مشکل روبرو بوده است (الود و همکاران، ۱۹۹۲؛ تیالدی و نپ، ۲۰۰۳). متأسفانه در

ایران تاکنون نتایج بررسی در این زمینه منتشر نشده است. به‌رحال وقوع تلاطم هوای صاف اگرچه امروزه در مقایسه با تعداد پروازها سهم کوچکی دارد اما گاهی ممکن است خسارت‌های جبران‌ناپذیری را برای سلامت و ایمنی پرواز به‌وجود آورد. به‌طوری‌که بررسی مسیر حرکت یک هواپیما نشان می‌دهد، CAT شدید می‌تواند یک هواپیمای سنگین را تا ۲۰۰۰ پا و با سرعت قائمی معادل ۲ متر بر ثانیه به سمت بالا جابه‌جا کند (اندلیچ، ۱۹۶۴؛ لستر، ۱۹۹۳). با توجه به تأثیر این پدیده جوی در امر هوانوردی از نقطه نظر سلامت مسافران، خدمه و پرواز، بررسی منطقه‌ای، این پدیده روی کشور از اهمیت زیادی برخوردار است. از طرفی اعلام مواجهه با برخی پدیده‌های جوی از جمله تلاطم، امواج گرانی و ... از سوی خلبان، محدودیت‌هایی را در امر مراقبت پرواز نیز ایجاد می‌کند، به‌طوری‌که هنگام وقوع CAT با شدت متوسط و بیشتر، برای جلوگیری از برخورد احتمالی هواپیماها با یکدیگر در راستای قائم و افزایش ایمنی، بایستی فاصله آنها که در شرایط عادی ۱۰۰۰ پا (حدود ۳۳۰ متر) است به ۲۰۰۰ پا (حدود ۶۶۰ متر) افزایش یابد. در نتیجه در ارتفاعات ۲۸ تا ۴۰ هزارپایی (حدود ۹۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰ متری) یا سطوح معمول پرواز هواپیماها، ۶ سطح پرواز حذف و کنترل ترافیک هوایی با مشکل روبرو می‌شود. ایکائو (International Civil Aviation Organization, ICAO)، (۲۰۰۳). از این رو به‌نظر می‌رسد که بررسی وقوع و پیش‌بینی وقوع تلاطم هوای صاف روی کشور، ضروری باشد. به همین منظور مطالعه موردی ۵ ماهه‌ای روی این پدیده صورت گرفته است که در ادامه به معرفی آن می‌پردازیم.

۲ داده‌ها

داده‌های مورد نیاز برای این مطالعه شامل اطلاعات دریافتی از خلبانان (ذهنی، subjective) و داده‌های مدلی عددی (عینی، objective) برای محاسبات است که به

تفضیل بررسی می‌شوند.

۱-۲ داده‌های دیدبانی

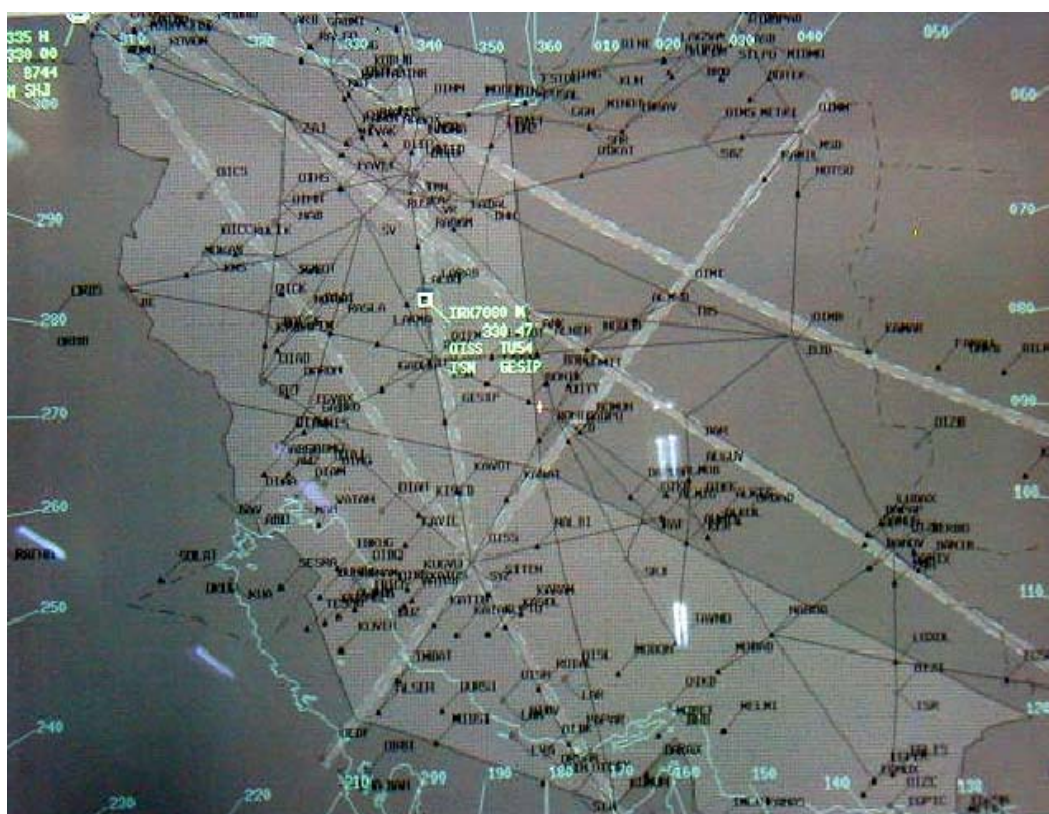
یکی از معضلاتی که مطالعه تلاطم هوای صاف را در دنیا و به‌ویژه در ایران با مشکل روبرو کرده است، کمبود داده‌های واقعی در دسترس است. این داده‌ها برای اندازه‌گیری شدت تلاطم به دو شکل کمی و کیفی در دسترس است. تعیین شدت کمی تلاطم با دستگاه آشکارسازی داده‌های هواشناسی نصب شده در هواپیما (aircraft meteorological data relay, AMDAR) صورت می‌گیرد. تلاطم در این دستگاه ممکن است به شیوه‌های متعددی، از جمله برحسب شتاب جاذبه زمین می‌تواند معرفی شود (سازمان جهانی هواشناسی World Meteorological Organization, WMO)، اگرچه در سال‌های اخیر با نصب این دستگاه روی هواپیماهای برخی از خطوط خارجی و افزایش تعداد پروازها روی اروپا و آمریکا، مشکل کمبود داده تاحدی در این مناطق حل شده است اما همچنان در غالب نقاط به‌ویژه ایران که دستگاه AMDAR روی هواپیماهای خطوط هوایی آن نصب نیست، مشکل کمبود داده وجود دارد. تعیین شدت کیفی تلاطم برحسب عکس‌العمل‌های هواپیما، مسافران و وسایل داخل هواپیما هنگام مواجهه خلبان با تلاطم (air report, AIREP) اعلام می‌شود. طبیعتاً این اندازه‌گیری معیایی به همراه دارد. در واقع اعلام شدت تلاطم از سوی خلبان، به‌ویژه در حالت‌های بحرانی کاملاً کیفی است. ضمن اینکه گزارش شدت تلاطم کاملاً منطبق با نظر خلبان و برحسب تجربه او است. به‌هرحال و در هر دو شکل کیفی و کمی، شدت تلاطم با عناوین سبک (light)، سبک تا متوسط (light-moderate)، متوسط (moderate)، متوسط تا شدید (moderate-sever) و شدید و بیشتر از آن (sever or more) بیان می‌شود. مشکل داده‌های معرفی شده فوق در ایران بیشتر است؛

اطلاعات در دسترس سامانه AMDAR برای منطقه پروازی ایران، فقط به پروازهای عبوری خارجی از روی کشور و عمدتاً به ۲ تا ۳ مسیر هوایی مشخص، محدود می‌شود و از این رو محدوده جغرافیایی کوچکی را در برمی‌گیرد (شکل ۱). همچنین، از آنجا که گزارش وقوع تلاطم با دستگاه AMDAR، بسته به نوع دستگاه، جزو پارامترهای اختیاری است، گاه برخی از اطلاعات مربوط به تلاطم در پروازهای عبوری گزارش نمی‌شود و لذا تعداد داده‌های در دسترس رخدادهای تلاطم به مراتب کمتر می‌شود. از طرف دیگر با توجه به اینکه داده‌های مورد نیاز برای به انجام رساندن محاسبات (داده‌های مدل جهانی AVN که در ادامه به آنها پرداخته می‌شود) در ساعت‌های مشخصی وجود دارد (ساعت‌های UTC ۰۰، ۰۶، ۱۲ و ۱۸)، فقط اطلاعاتی از این سامانه مورد استفاده است که در آن ساعت‌ها رخ داده و ثبت شده باشد. از این رو عملاً داده‌های مورد نیاز و در دسترس دستگاه AMDAR بسیار محدود می‌شود. متأسفانه، اغلب خلبانان نیز گزارش‌های AIREP به مرکز کنترل ترافیک هوایی ارسال نمی‌کنند و یا در صورت ارسال، این گزارش‌ها در جایی ثبت نمی‌شود. به این ترتیب دسترسی به داده‌های واقعی در منطقه ایران با مشکلات زیادی مواجه است. از این رو برای دستیابی به اطلاعات واقعی و کم و بیش منظم تلاطم هوای صاف، جدولی برای جمع‌آوری آمار وقوع CAT تهیه شده که در اختیار بخش مرکز کنترل منطقه‌ای (area control center, ACC) سازمان هواپیمایی کشوری قرار داده شده است تا با پرسش از خلبانان خطوط هوایی داخلی و خارجی در این زمینه، آمار مربوط به رخداد این پدیده طی ماه‌های ژانویه تا مه ۲۰۰۴ جمع‌آوری شود. این جدول ارتفاعات پروازی ۲۸ تا ۳۹ هزارپایی را در برمی‌گیرد که ترافیک هوایی پرواز در آنها بیشتر است و محدوده موقعیت استقرار جت‌استریم‌ها است. در این جدول برای هر ارتفاعی که خلبان با CAT مواجه

از این تعداد، جمعاً ۴۱۷ گزارش شامل تلاطم با شدت متوسط و سبک تا متوسط است. از آنجا که چند گزارش دریافتی می‌تواند در یک مورد بررسی شده (مثلاً روز ۲۸ فوریه ساعت UTC ۰۰:۰۰) اعلام شده باشد، مجموع ۴۱۷ گزارش، ۱۲۶ مورد بررسی شده (شامل گردهای جوی و پارامترهای محاسبه شده) را در برمی‌گیرد. این گزارش‌ها از خلبانان هواپیماهای سنگین و متوسط بوئینگ، ایرباس، توپولوف، ایلوشین، آنتونوف و فوکر در مسیرهای پروازی روی ایران و در ساعت‌های UTC ۰۰:۰۰، ۰۶:۰۰، ۱۲:۰۰ و ۱۸:۰۰ دریافت شده است. لازم به ذکر است که خلبانان شرکت‌های هواپیمایی، گزارش‌های خود را فقط

می‌شود، شاخص‌های موقعیت جغرافیایی، شدت تلاطم، نوع هواپیما، ارتفاع پروازی و ساعت رخداد در نظر گرفته شده که بایستی ثبت شود. این جدول همه‌روزه با همکاری کارکنان مراقبت پرواز سازمان هواپیمایی کشوری، حین ارتباط با خلبانان در ساعت‌های مورد نظر تکمیل شده است. از این رو منبع قابل اعتماد اما نه چندان کاملی برای دوره‌ای پنج ماهه در دسترس است.

اطلاعات دریافتی از خلبانان (داده‌های مشاهداتی یا ذهنی) در این دوره پنج ماهه شامل ۹۳ روز (اطلاعات دیگر روزها در دسترس نیست) و ۵۵۴۱ گزارش است که



شکل ۱. مسیرهای هوایی موجود بر فراز آسمان ایران. خطوط توپر سفید رنگ، معرف مسیرهای بین‌المللی مستقیم ایجاد شده از سال ۲۰۰۱ و خطوط نازک مشکی، معرف دیگر مسیرهای پروازی‌اند. نقاط حک شده روی نقشه نمایانگر نقاط زمینی واقعی و قراردادی غیرواقعی گزارش خلبان به مرکز کنترل ترافیک هوایی کشور است. (اطلاعات هوانوردی اداره کل مراقبت پرواز ایران، ۲۰۰۴).

۲-۲ خروجی‌های مدل عددی AVN

برای محاسبه شاخص‌های تلاطم هوای صاف که در ادامه معرفی می‌شوند، از داده‌های مدل جهانی AVN استفاده شده است. فاصله نقاط شبکه برای این داده‌ها حدود ۱۰۰ کیلومتر (۱ درجه طول و عرض جغرافیایی) است و در راستای قائم ۱۷ تراز فشاری را در بر می‌گیرد. از آنجا که تلاطم از جمله پدیده‌های میان‌مقیاس جوی است، داده مدل‌هایی که فاصله نقاط شبکه کمتری داشته باشند، مناسب‌تر است. داده‌های مورد نیاز در محدوده جغرافیایی ۲۰ تا ۴۵ درجه شمالی در راستای نصف‌النهاری و ۳۰ تا ۷۰ درجه شرقی در راستای مداری در نظر گرفته شده است که محدوده جغرافیایی ایران را پوشش می‌دهد. این داده‌ها شامل سمت و سرعت باد، دما و ارتفاع ژئوپتانسیلی است که در سطوح ۳۵۰، ۳۰۰، ۲۵۰ و ۲۰۰ میلی‌باری، به دلیل قرار گرفتن جت استریم در محدوده این ترازها و وقوع CAT با احتمال بیشتر در این مناطق، انتخاب شده‌اند. لازم به ذکر است، از آنجا که این داده‌ها فقط در ساعت‌های UTC ۰۶، ۱۲ و ۱۸ موجود است، همان‌طور که پیش از این مطرح شد، تنها آن بخش از گزارش‌های خلبانان قابل استفاده است که در ساعت‌های فوق دریافت شده باشد.

۳ روش کار

در این بررسی برای مطالعه رخداد CAT در منطقه ایران، ابتدا شاخص‌های تلاطم به کمک روابطی که در زیر معرفی می‌شوند محاسبه شده است، سپس برای ارزیابی نتایج به دست آمده، این محاسبات با داده‌های واقعی موجود مقایسه شده و مقادیر آستانه هریک از شاخص‌ها برای وقوع تلاطم هوای صاف در منطقه ایران معرفی شده است. همچنین برخی از پارامترهای مرتبط با این پدیده از جمله چینش باد در این مطالعه بررسی شده‌اند. ضمن این بررسی، الگوهای متداول جوی همراه با این پدیده نیز مطالعه شده است.

در نقاط مشخص شده نقشه راه‌های هوایی کشور (شکل ۱) اعلام می‌کنند و این نقاط بر اساس نام‌های مناطق جغرافیایی زمینی مثلاً سبزوار (SBZ) یا اصفهان (ISN) و یا نقاط تعریف شده غیرواقعی (مانند MESVI یا ALTAX) مشخص شده‌اند (ICAO، ۲۰۰۵). این گزارش‌ها شامل ۱۸۰ گزارش تلاطم با شدت متوسط و ۲۳۷ گزارش تلاطم با شدت سبک تا متوسط‌اند. محدوده زمانی در نظر گرفته شده برای هریک از ساعت‌های بالا ± 1 ساعت است. روزانه به‌طور میانگین جمعاً ۵۰ پرواز عبوری یا داخلی در منطقه پروازی تهران (Tehran flight information region, FIR) ثبت می‌شود. حدود ۲۵ درصد این پروازها در زیر ارتفاع ۲۸ هزارپایی است که ممکن است به علت نزدیکی فرودگاه‌های مبدأ و مقصد یا نداشتن تجهیزات لازم برای ورود به فضای بالاتر از ۲۸ هزارپایی (reduced vertical separation minimum, RVSM) باشد. از آنجا که این پروازها جزو داده‌های مورد نیاز این مقاله نیستند در عمل از لیست تعداد پروازهای روزانه خارج می‌شوند. همچنین ممکن است در بسیاری از حالت‌ها، عبور پروازها در ساعت‌های موردنظر برای به انجام رساندن محاسبات، یعنی ساعت‌های UTC ۰۶، ۱۲ و ۱۸ نباشد. ضمن اینکه به علت هم‌موقعیت بودن برخی از پروازها و بالا بودن ترافیک هوایی، در یک زمان نمی‌توان از همه پروازها اطلاعات مورد نیاز را در ساعت‌های مورد نظر تهیه کرد و عملاً دریافت گزارش از برخی پروازها از دست می‌رود. به این ترتیب اطلاعات مورد نیاز، روزانه حدوداً از ۲۵ درصد کل پروازها دریافت می‌شود. شمار زیادی از این اطلاعات باقی‌مانده، شامل شرایط بدون تلاطم و یا تلاطم سبک است که قاعداً از لیست داده‌های مورد بررسی حذف می‌شوند. از این رو عملاً تعداد گزارش‌های بسیار کم اما با ارزشی، در مقایسه با تعداد کلی پروازها قابل بررسی و مطالعه است.

آهنگ تغییرات نمایی Ri به دست آمده است. با اعمال این تغییرات و اصلاحات، اثر افت و خیزهای جهتی بردار چینش قائم باد حذف و در نهایت شاخص براون به شکل زیر تعریف می‌شود. (براون، ۱۹۷۳):

$$\Phi_m = (0.3\xi_a^2 + D_s^2 + D_T^2)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

که $\xi_a = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} + f$ مؤلفه قائم تاوایی مطلق،

$D_s = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$ میدان تغییر شکل حاصل از چینش

مؤلفه‌های بردار باد افقی و $D_T = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}$ میدان تغییر

شکل حاصل از کشش است (ساوسیر، ۱۹۵۵؛ الرود و نپ، ۱۹۹۲). براون در چند مطالعه موردی نشان داد که به کمک این شاخص، تلاطم با شدت متوسط در آستانه عددی 10 s^{-1} و بیشتر رخ می‌دهد.

شاخص داتن: این شاخص بر اساس برازش خطی تحلیل گزارش تلاطم هواپیماهای پرنده بر فراز اقیانوس اطلس شمالی و شمال غرب اروپا در ۱۹۷۶ به دست آمده است. به دنبال مطالعه روچ (۱۹۷۰) در این زمینه و به منظور تحلیل تلاطم هوای صاف، شاخص تجربی E برای پیش‌بینی CAT به شکل زیر معرفی شد که براساس آن، ترکیب چینش‌های افقی و قائم، بهترین همخوانی را با گزارش تلاطم نشان می‌دهد (داتن، ۱۹۸۰).

$$E = 1.25S_H + 0.25S_V^2 + 10.5 \quad (4)$$

که S_H و S_V به ترتیب معرف چینش‌های افقی و قائم باد افقی (V) اند و به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$S_H = \frac{1}{V^2} \left(uv \frac{\partial u}{\partial x} - u^2 \frac{\partial u}{\partial y} + v^2 \frac{\partial v}{\partial x} - uv \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (5)$$

$$S_V = \frac{\partial V}{\partial p} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \quad (6)$$

پنج شاخصی که در اینجا معرفی و محاسبه می‌شوند، در حال حاضر در برخی از مراکز مهم هواشناسی دنیا مورد استفاده قرار دارند، به طوری که شاخص‌های الرود-۱ و ۲، عدد ریچاردسن و براون در مرکز NOAA و شاخص‌های داتن و ریچاردسن در مرکز هواشناسی انگلستان استفاده می‌شود. این پنج شاخص به شرح زیر تعریف می‌شوند:

عدد ریچاردسن: همان‌طور که بررسی‌ها نشان می‌دهد، در بیشتر موارد، بسته‌های تلاطمی هوای صاف با ناپایداری‌های K-H ایجاد شده‌اند (استال، ۱۹۸۸)، از این رو مناطقی با Ri کوچک (کم‌تر از ۲۵ درصد)، مناطق مناسب وقوع تلاطم‌اند. (کرون‌بیچ، ۱۹۶۴؛ داتن و پانوفسکی، ۱۹۷۰). معادله معروف ریچاردسن به شکل زیر تعریف می‌شود:

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

در این معادله $\bar{\theta}$ معرف میانگین دمای پتانسیل در لایه مفروض و u و v مؤلفه‌های سرعت افقی بادند. به منظور مقایسه نتایج حاصل از محاسبه این شاخص در دستگاه مختصات فشاری و همدرگاشت، شاخص ریچاردسن در مختصات همدرگاشت نیز برحسب رابطه زیر برآورد شده است (کلر، ۱۹۹۰).

$$Ri = \frac{RT_0}{P_0 \theta_0} \frac{\Delta P}{\Delta \theta} \left(\frac{\Delta V}{\Delta \theta} \right)^{-2} \quad (2)$$

در این رابطه، R ثابت عمومی گازها، T_0 ، P_0 و θ_0 مقادیر متوسط دما، فشار و دمای پتانسیل، ΔP ، ΔV و $\Delta \theta$ اختلاف فشار، اختلاف سرعت افقی باد و اختلاف دمای پتانسیل در لایه مورد نظرند.

شاخص براون: این شاخص، با اعمال تغییرات و اصلاحاتی در شاخص روچ ($\Phi \equiv -\frac{D}{Dt} \ln Ri$) یا معادله

زیر تعریف کرد (الرود و نپ، ۱۹۹۲):

$$TI1 = DEF \times VWS \quad (۷)$$

که در این معادله $DEF = (DST^2 + DSH^2)^{\frac{1}{2}}$ است. VWS چینش قائم باد است و می توان آن را به شکل زیر معرفی کرد (الرود و نپ، ۱۹۹۲):

$$VWS = \frac{[(\Delta u)^2 + (\Delta v)^2]^{\frac{1}{2}}}{\Delta z} \quad (۸)$$

که در این معادله Δz ضخامت لایه ای است که در آن CAT بررسی می شود (برای مثال ضخامت لایه ۲۰۰ تا ۲۵۰ میلی باری). در برخی مطالعات موردی دیده شده است که همگرایی (CVG) می تواند اثر قابل ملاحظه ای روی پتانسیل CAT داشته باشد (کائو و سیزو، ۱۹۶۶؛ الرود، ۲۰۰۳). از این رو و با بازگشت به معادله پیترسن (در بالا معرفی شده است) می توان شاخص مناسب تری برای CAT پیدا کرد که به شکل زیر تعریف می شود و آن را شاخص الرود-۲ می نامند. (الرود و نپ، ۱۹۹۲):

$$TI2 = VWS \times (DEF + CVG) \quad (۹)$$

مقدار آستانه وقوع CAT با شدت متوسط در شاخص تلاطم الرود-۲ حدود $(2 \times 10^{-7} s^{-2})$ تا ۴ در نظر گرفته می شود (الرود و نپ، ۱۹۹۲). لازم به یادآوری است که محاسبه پارامتر پایداری ایستایی به کمک رابطه $\frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z}$ و پارامترهای چینش افقی و قائم باد به کمک روابط (۵) و (۶) صورت گرفته است. محاسبه همه شاخص ها در لایه هایی با ضخامت ۵۰ میلی بار به انجام رسیده است. این لایه ها شامل (۳۰۰ تا ۳۵۰)، (۲۵۰ تا ۳۰۰) و (۲۰۰ تا ۲۵۰) میلی باری اند. محاسبات در ابتدا با در نظر گرفتن موقعیت جت استریم در سقف هر لایه صورت گرفته است اما از آنجا که بیشینه چینش باد در نزدیکی موقعیت جت استریم قطبی و به ویژه در فصل سرد سال ممکن است کل هریک

در این معادلات u و v به ترتیب مؤلفه های افقی بادند. آستانه تجربی وقوع تلاطم متوسط با این شاخص در منطقه اروپا حدود ۲۰ است (داتن، ۱۹۸۰).

شاخص الرود: این شاخص با در نظر گرفتن معادله جبهه زایی پیترسن به شکل زیر

$$I_f = |\nabla \theta| (0.5) [DEF (\cos 2\beta) + CVG]$$

است. در این معادله I_f معرف شدت جبهه زایی، $|\nabla \theta|$ بزرگی گرادیان دمای پتانسیل، DEF میدان تغییر شکل یا مجموع جملات DSH و DST و

$$\underbrace{\left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right)}_{DST}$$

DSH میدان تغییر شکل حاصل از چینش مؤلفه های افقی بردار باد است. پارامتر CVG معرف همگرایی است و با

$$\text{رابطه } \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \text{نمایش داده می شود و } \beta \text{ زاویه بین}$$

محور انبساطی و هم دماها است. با فرض اینکه I_f یا شدت جبهه زایی معادل A_T یا آهنگ زمانی تغییرات

$$\text{گرادیان دما در یک سطح فشار ثابت و } |\nabla \theta| = \frac{\partial T}{\partial n}$$

در آن T معرف دما و n فاصله افقی عمود بر خطوط هم دما است و همچنین با اعمال رابطه باد گرمایی و فرض وقوع جبهه زایی بیشینه ($\cos 2\beta = 1$)، معادله جبهه زایی به شکل زیر تعریف می شود:

$$A_T = 0.5 (f \frac{T}{g}) (VWS) [DEF + CVG]$$

که VWS چینش قائم باد، g شتاب گرانی و f پارامتر کریولیس است. بنابراین جبهه زایی با افزایش چینش قائم باد و احتمال وقوع CAT همراهی می شود و به بزرگی گرادیان دمای پتانسیل، میدان تغییر شکل حاصل از چینش و کشش و همچنین عامل همگرایی (CVG) بستگی دارد. الرود در ابتدا شاخص تلاطم الرود-۱ (TI1) را به صورت

متوسط یا بیشتر و تلاطم با شدت سبک تا متوسط تقسیم‌بندی شده‌اند. از آنجا که امکان نمایش همه ۱۲۶ مورد وجود ندارد، فقط به ذکر یک نمونه از روش کار می‌پردازیم.

۴-۱ بررسی همدیدی

نمونه‌ای از الگوهای جوی و پارامترهای محاسبه شده شامل شاخص‌های تلاطم، چینش باد و پایداری ایستایی (روز ۱۶ ژانویه ۲۰۰۴ ساعت UTC ۰۰:۰۰، لایه ۲۰۰ تا ۲۵۰ میلی‌باری) از ۱۲۶ مورد بررسی شده در ادامه آورده شده است (شکل‌های ۲، ۳ و ۴). در این نمونه موردی، در این تاریخ ۴ گزارش در مناطق تهران (۲ گزارش) و انارک (۱ گزارش) در ارتفاعات ۳۶، ۳۸ و ۳۸ هزارپایی در ساعت UTC ۰۰:۰۰ دریافت شده است که همگی با شدت سبک تا متوسط‌اند. گزارشی دیگر نیز در منطقه زاهدان دریافت شده است که در ارتفاع ۳۶ هزارپایی و با شدت متوسط است. از آنجا که ارتفاعات گزارش تلاطم در لایه ۲۰۰ تا ۲۵۰ میلی‌باری است از این رو همه محاسبه‌ها و بررسی‌ها در این لایه صورت می‌گیرد.

لایه ۲۰۰ تا ۲۵۰ میلی‌باری ساعت UTC ۰۰:۰۰:

در این تاریخ ناوهای عمیق در شرق کشور دیده می‌شود و در نیمه غربی پشته‌ای ژئوپتانسیلی شکل گرفته است و جریان‌های شمال‌غربی در این نیمه حاکم شده است. در عین حال، بسته‌هوای گرمی در مرکز ناوه ژئوپتانسیلی در تراز ۲۰۰ میلی‌باری دیده می‌شود (شکل‌های ۲-c و ۲-d). در این شکل و در پاد جریانسوی ناوه فرافت هوای سرد دیده می‌شود و مناطق تهران و انارک در جریانسوی پشته مستقر شده است که جت‌استریم نسبتاً ضعیفی با آن همراهی می‌شود (شکل‌های ۲-a و ۲-b). اما منطقه زاهدان با گزارش تلاطم متوسط تقریباً روی خط ناوه واقع شده است و با جت‌استریم نسبتاً قوی (با محور ۱۲۰ نات) در این ناحیه همراهی می‌شود (شکل‌های ۲-a تا ۲-d). چینش

از لایه‌های معرفی شده در بالا را در برگرد (الرود و نپ، ۱۹۹۲)، از این رو نه تنها دمای پتانسیل بلکه دیگر پارامترها از جمله مؤلفه‌های سرعت باد در کل لایه‌ها میانگین‌گیری شده است. علاوه بر محاسبه شاخص‌های معرفی شده در بالا، گرته‌های ارتفاع ژئوپتانسیلی، دما و سمت و سرعت باد برای بررسی ارتباط CAT با موقعیت جت، ناوه‌ها و پشته‌ها، جبهه‌های سطوح فوقانی و فرارفت هوای سرد نیز ترسیم شده‌اند. همچنین برای به‌دست آوردن نتایج بهتر، برخی پارامترهای مرتبط با CAT شامل چینش افقی و قائم باد و نیز پایداری ایستایی محاسبه شده‌اند. برای ترسیم گرته‌های معرفی شده فوق از نرم‌افزار GrADS (grid analysis and display system) و برای بررسی آماری نتایج، از نرم‌افزار Excel استفاده شده است. همچنین برای نمایش مناسب‌تر موقعیت CAT روی ایران، علامت اختصاری سه حرفی برخی از شهرهای مهم کشور روی نقشه‌ها نشان داده شده است که به ترتیب زیر معرف شهرهای مقابل آنها است. علامت سه حرفی TRN، معرف تهران؛ TBZ، تبریز؛ MSD، مشهد؛ ISN، اصفهان؛ AWZ، اهواز؛ SYZ، شیراز؛ KER، کرمان؛ ZDN، زاهدان؛ KIS، کیش؛ KRD، خرم‌آباد؛ SNJ، سنندج و CHB معرف چابهار است. از آنجا که شاخص الود-۲، دقیق‌تر و کامل‌تر از شاخص الود-۱ است، از این رو از بین پنج شاخص محاسبه شده فوق، فقط به رسم شاخص‌های عدد ریچاردسن، براون، الود-۲ و داتن اکتفا شده است. برای نمایش بهتر شاخص‌ها، عدد ریچاردسن در محدوده ۰/۲۵ تا ۰/۵- رسم شده است.

۴ تحلیل مطالعه موردی از دیدگاه همدیدی و آماری در دوره پنج ماهه

همه گزارش‌های وقوع تلاطم از دیدگاه همدیدی بررسی شده و نتایج خلاصه شده آنها در جدول‌های ویژه‌ای درج شده است. این جدول‌ها به دو گروه تلاطم با شدت

کوچکی است (شکل ۶). تلاطم با شدت‌های متوسط و سبک تا متوسط در ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس به نسبت یکسانی رخ داده است، اما در ماه آوریل با وجودی که گزارش‌های بیشتری دریافت شده، تلاطم با شدت متوسط، کمتر از تلاطم با شدت سبک تا متوسط است، و در ماه مه تعداد وقوع تلاطم به شدت افت می‌کند (شکل ۷). همچنین بیشترین تلاطم‌ها شامل تلاطم متوسط و تلاطم سبک تا متوسط، در لایه ۲۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌باری رخ داده است (شکل ۸). این عامل را شاید بتوان به ادغام جت استریم‌های قطبی و جنب حاره‌ای در این محدوده نسبت داد. شایان ذکر است که خلاصه شکل‌های ۶ تا ۸ برای نمایش بهتر نتایج آماری، در جدول‌های ۱ و ۲ خلاصه شده‌اند.

بررسی الگوهای جوی همراه با تلاطم هوای صاف روی کشور در این دوره ۵ ماهه (۴۱۷ گزارش) نمایانگر همراهی تلاطم صاف در بخشی از جت استریم است که با ناو‌ها و پشته‌های کم‌عمق و تقریباً مستقیم همراهی می‌شود. بیشینه سرعت جت‌ها در شرایط رخداد تلاطم، بین ۹۰ تا ۱۳۰ نات است. این مطالعه نشان می‌دهد که از ۱۲۶ گرده جوی بررسی شده همراه با تلاطم (هر مورد ممکن است شامل چند گزارش باشد)، ۶۴ مورد در بخش جریان‌سوی ناوه، ۳۴ مورد در بخش جریان‌سوی پشته، ۱۵ مورد در فرارفت هوای سرد همراه با بخشی از جت که به شکل مستقیم و بدون ناوه و پشته است و ۱۳ مورد در قلّه پشته‌ها رخ داده است. به نظر می‌رسد به علت ایجاد شرایط مناسب در شرق ناوه که منجر به شکل‌گیری ناپایداری‌های دینامیکی و به دنبال آن تقویت چینش قائم باد می‌شود، تلاطم هوای صاف با احتمال بیشتری به وقوع می‌پیوندد. در واقع ایجاد شرایط مناسب برای شکل‌گیری کژفشاری در جریان‌سوی ناوه که غالباً با تقویت گرادیان افقی دما و طبق رابطه باد گرمایی با تقویت چینش قائم باد در بخش جبهه جت‌استریمی همراه است، شرایط مناسب ایجاد

قائم و افقی باد بیشینه مقادیر خود را در منطقه زاهدان به ترتیب با حدود $6 \times 10^{-5} s^{-1}$ و $10 \times 10^{-3} s^{-1}$ نشان می‌دهند که مقادیر قابل توجهی‌اند. پارامتر پایداری ایستایی نیز در این منطقه حدود $3/5 \times 10^{-4} s^{-2}$ است (شکل‌های ۳-a تا ۳-c). الگوهای تلاطم (شکل‌های ۴-a تا ۴-d) نیز در نقاط تهران و انارک مقدار عددی قابل توجهی را نمایش نمی‌دهد که ممکن است علت آن، وجود جت ضعیف در این ناحیه باشد. اما در این الگو موقعیت مناطق تلاطمی در منطقه زاهدان قابل تعمق است که بیشینه مقادیر عددی این شاخص‌ها کاملاً در زیر خط ناوه قرار گرفته و به‌طور مورب تا روی کشور ترکیه گسترده شده است. مقادیر عددی این شاخص‌ها در منطقه زاهدان عبارت‌اند از: شاخص داتن حدود ۴۵، شاخص البرود-۲ حدود $12 \times 10^{-7} s^{-2}$ و شاخص براون $10 \times 10^{-5} s^{-1}$. کمترین مقدار عددی شاخص ریچاردسن نیز که معرف ناپایداری‌ترین شرایط است در پشت فرارفت سرد به چشم می‌خورد که مقدار عددی آن حدود ۰/۲- است. مقایسه الگوی این شاخص‌ها با الگوی چینش قائم باد، وضعیت پربندی مشابهی را نشان می‌دهد و با گزارش دریافتی در منطقه یاد شده هماهنگ است. از این رو به نظر می‌رسد که شرایط وقوع تلاطم در این ناحیه مناسب است. به این ترتیب برای همه ۴۱۷ گزارش دریافتی از خلبانان، کلیه الگوها مطابق مورد معرفی شده ترسیم و بررسی شده‌اند که مهم‌ترین نتایج آن در بخش پنجم این نوشتار آمده است.

۴-۲ بررسی آماری

مطالعه ۴۱۷ گزارش این مقاله نشان می‌دهد که از مجموعه گزارش‌های تلاطمی، حدود ۵۷ درصد تلاطم با شدت سبک تا متوسط و ۴۳ درصد تلاطم با شدت متوسط است (شکل ۵). تعداد تلاطم‌های گزارش شده حدود ۸ درصد مجموع گزارش‌های دریافتی است که مجموعه نسبتاً

همدرگاشت ۳۳۰ و ۳۴۰ انتخاب شده‌اند و شاخص ریچاردسن طبق رابطه در این لایه محاسبه شده است. همان‌طور که در شکل ۱۱ دیده می‌شود، الگوی پربندی عدد ریچاردسن در مختصات همدرگاشت، مشابه الگوی شاخص داتن (شکل ۴-b) است و با الگوی ریچاردسن در دستگاه مختصات فشاری (شکل ۴-d) کم و بیش همخوانی دارد و مقادیر عددی آنها در منطقه مورد نظر تقریباً با هم مشابه است. چنانچه در مختصات فشاری نیز ضخامت لایه کمتر در نظر گرفت شود، عدد ریچاردسن با دقت بهتری به دست خواهد آمد. اما از آنجا که سایر شاخص‌ها در لایه‌ای به ضخامت ۵۰ میلی‌بار محاسبه شده‌اند؛ در مقالات متعددی از جمله الود و نپ (۱۹۹۲) این ضخامت در نظر گرفته شده؛ در نتیجه برای مقایسه نتایج شاخص‌ها با یکدیگر، عدد ریچاردسن نیز در همین ضخامت محاسبه شده است.

۵ نتیجه‌گیری

نتایج ۱۲۶ مورد بررسی شده در این مطالعه نشان می‌دهد که منطقه ایران در این دوره مطالعه، غالباً با جت استریم‌هایی که با ناو‌ها و پشته‌های کم عمق همراهی می‌شوند و یا کم و بیش مستقیم‌اند، همراه است. لذا اثر انحنا جریانی برای تقویت میدان تغییر شکل ضعیف شده و از آنجا که تلاطم شدید هوای صاف غالباً با ناو‌ها و پشته‌های عمیق سطوح فوقانی جو همراهی می‌شوند (اندلیچ، ۱۹۶۴)، ایران به ندرت منطقه وقوع CAT با شدت‌های بیشتر از متوسط است. این نتیجه‌گیری را می‌توان در گزارش‌های دریافتی از خلبانان نیز مشاهده کرد، چرا که فقط ۳ مورد گزارش تلاطم با شدت بیشتر از متوسط دریافت شده است. همان‌طور که مطالعات پیشین (الود و نپ ۱۹۹۲؛ داتن، ۱۹۸۰) نشان می‌دهد و در شکل‌های ۳-b و شکل ۴ دیده می‌شود، گرته چینش باد با

چینش قائم باد را فراهم می‌کند. محاسبات نشان می‌دهد که مقادیر عددی وقوع تلاطم هوای صاف با شدت متوسط برای شاخص براون بین ۲ و $20 S^{-1}$ ، شاخص داتن بین ۵ و ۹۰، الود-۲ بین ۱ و $20 S^{-2}$ و ریچاردسن بین $0.2-0.25$ است. مقادیر پارامتر چینش قائم باد نیز بین ۱ تا $16 S^{-1}$ با تلاطم متوسط محاسبه شده است (شکل ۹). همین محاسبات برای گزارش‌های تلاطم هوای صاف با شدت سبک تا متوسط نیز به گونه‌ای است که مقادیر عددی شاخص براون بین ۱ و $20 S^{-1}$ ، الگوریتم داتن بین ۱۲ و $70 S^{-1}$ ، الود-۲ بین ۱ و $10 S^{-2}$ و ریچاردسن بین $0.05-0.25$ است که نتایج آن در شکل ۱۰ دیده می‌شود.

نکته دیگر که در این جدول‌ها می‌توان اشاره کرد مقادیر عدد ریچاردسن برای تلاطم هوای صاف است. همان‌طور که پیش از این بیان شد، شاخص ریچاردسن برای شرایط تلاطمی، مقادیر کوچک‌تر از 0.25 است، در صورتی که به‌ویژه برای تلاطم هوای صاف با شدت سبک تا متوسط این مقادیر در محدوده بزرگ‌تری است (شکل ۱۰-d). همان‌طور که کلر در ۱۹۹۰ نیز بیان کرد این امر نشان می‌دهد که عدد ریچاردسن به تنهایی شاخص مناسبی برای بررسی تلاطم هوای صاف نیست. ضمن اینکه لایه‌های جوی بررسی شده در این جا با ضخامت ۵۰ میلی‌باری است که برای بررسی عدد ریچاردسن محلی ضخامت زیادی است لذا مقادیر این شاخص چندان قابل اعتماد نیست. از این رو کوشش شده است تا در موردی ذکر شده در این مقاله (۱۶ ژانویه) این شاخص در دستگاه همدرگاشت نیز محاسبه شود (شکل ۱۱). به همین منظور برای مقایسه با نتایج حاصل در دستگاه فشاری، در مختصات همدرگاشت لایه‌ای در نظر گرفته شده است که در محدوده سطوح فشاری ۲۰۰ و ۲۵۰ میلی‌باری باشند. لذا سطوح

دارد. همچنین با توجه به شکل ۸، مشاهده می‌شود که لایه ۲۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌باری تلاطم‌های بیشتری را در بر گرفته است. با در نظر گرفتن تساوی نسبی تعداد کل گزارش‌های (۵۵۴۱ مورد) در این سه لایه (تقریباً حدود ۱۸۰۰ گزارش در هر لایه)، این امر را می‌توان احتمالاً به ادغام جت‌استریم‌های قطبی و جنب حاره‌ای و تقویت سرعت باد در این لایه نسبت داد. این مقادیر، به‌ویژه برای گزارش‌های تلاطم هوای صاف با شدت متوسط با آستانه‌های معرفی شده در مناطق اروپا و امریکا تطابق قابل قبولی را نشان می‌دهد که البته با دریافت اطلاعات بیشتر می‌توان به نتایج دقیق‌تری در این زمینه دست یافت. اما با اتکا به مشاهدات این مقاله، دیدبانی‌ها نتایج به‌دست آمده را تأیید می‌کنند. با ضخامت مفروض در این مقاله شاخص ریحاردسن به تنهایی نمی‌تواند شاخص قابل اعتمادی برای تلاطم هوای صاف به حساب آید.

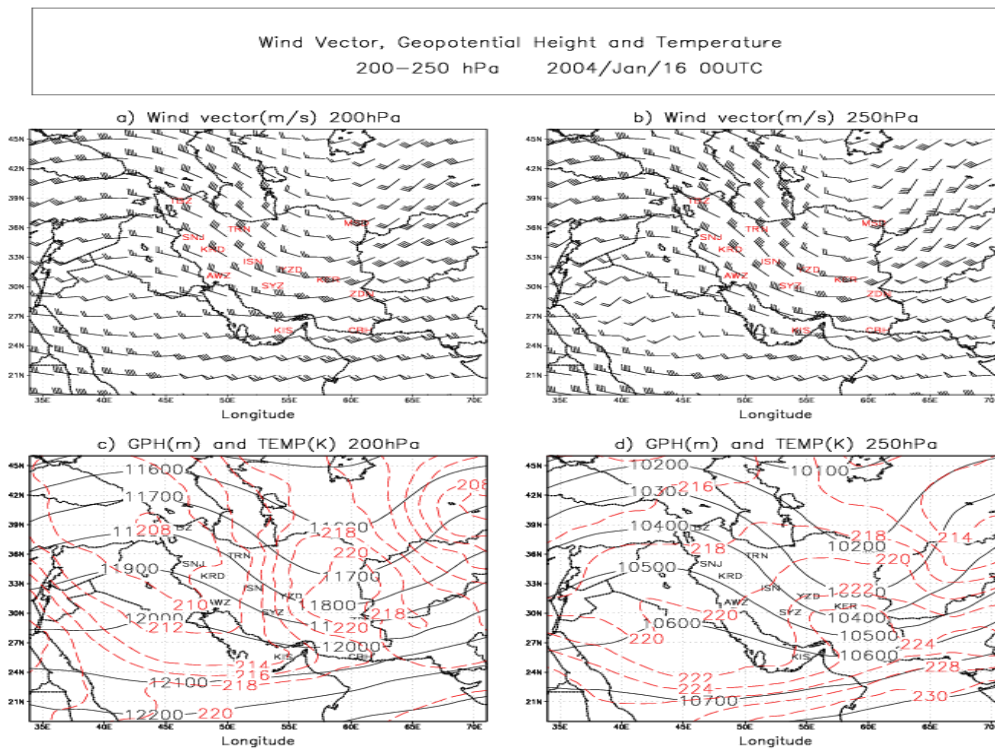
گرفته شاخص‌های تلاطم همخوانی خوبی دارد به طوری که الگو و موقعیت جغرافیایی وقوع آنها با یکدیگر هماهنگ است. آمار وقوع تلاطم هوای صاف در این مطالعه نشان می‌دهد که جریان‌سوی ناوه ژئوپتانسیلی، جریان‌سوی پشته ژئوپتانسیلی، جت‌های مستقیم همراه با فرافت هوای سرد و قله پشته‌های ژئوپتانسیلی به ترتیب با بیشترین آمار، مناسب‌ترین مکان‌ها برای وقوع تلاطم هوای صاف‌اند. با توجه به موقعیت جت‌استریم قطبی در فصل زمستان و اوایل بهار روی ایران و با در نظر گرفتن شکل‌های ۶ و ۷، دیده می‌شود که شدیدترین و بیشترین تلاطم متوسط در این زمان از سال رخ می‌دهد و از اواسط فصل بهار و با نزدیک شدن به فصل تابستان که با تضعیف جت قطبی در منطقه همراه است، به نظر می‌رسد به علت کاهش سرعت باد در محور جت و کاهش انحنای خطوط جریان (تضعیف ناوه‌ها و پشته‌ها)، تعدد وقوع تلاطم به سمت تلاطم با شدت سبک تا متوسط و کمتر از آن گرایش

جدول ۱. آمار تلاطم با شدت متوسط و سبک تا متوسط برای ماه‌های ژانویه تا مه ۲۰۰۴.

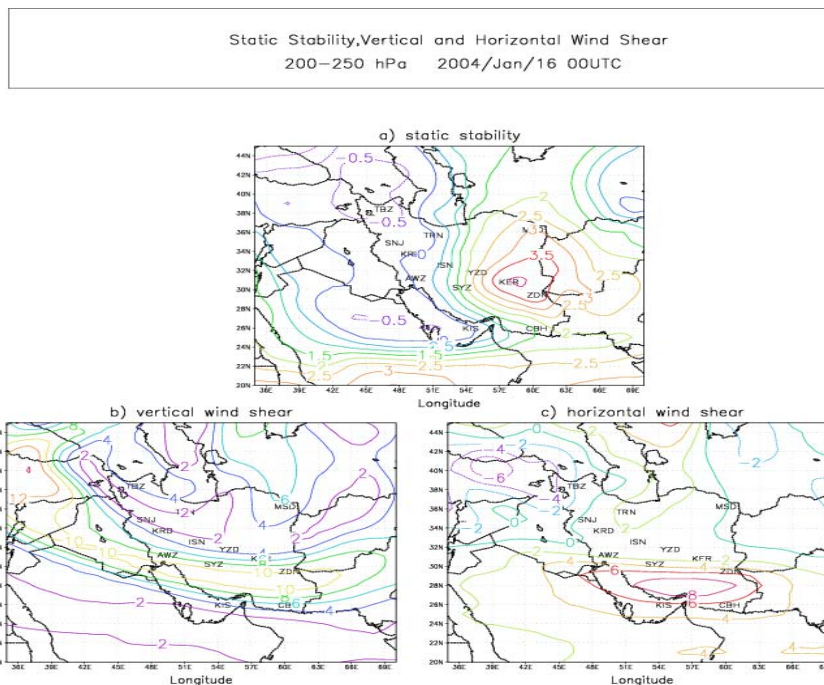
| مجموع | شدت سبک تا متوسط (L-M) | شدت متوسط (M) | تلاطم هوای صاف (CAT) |
|-------|------------------------|---------------|----------------------|
| ۱۱۴ | ۶۲ | ۵۲ | ژانویه |
| ۷۰ | ۳۷ | ۳۳ | فوریه |
| ۸۹ | ۵۰ | ۳۹ | مارس |
| ۱۲۳ | ۷۸ | ۴۵ | آوریل |
| ۲۱ | ۱۰ | ۱۱ | مه |
| ۴۱۷ | ۲۳۷ | ۱۸۰ | مجموع |

جدول ۲. آمار تلاطم با شدت متوسط و سبک تا متوسط برای ماه‌های ژانویه تا مه ۲۰۰۴ بر حسب لایه‌های بررسی شده.

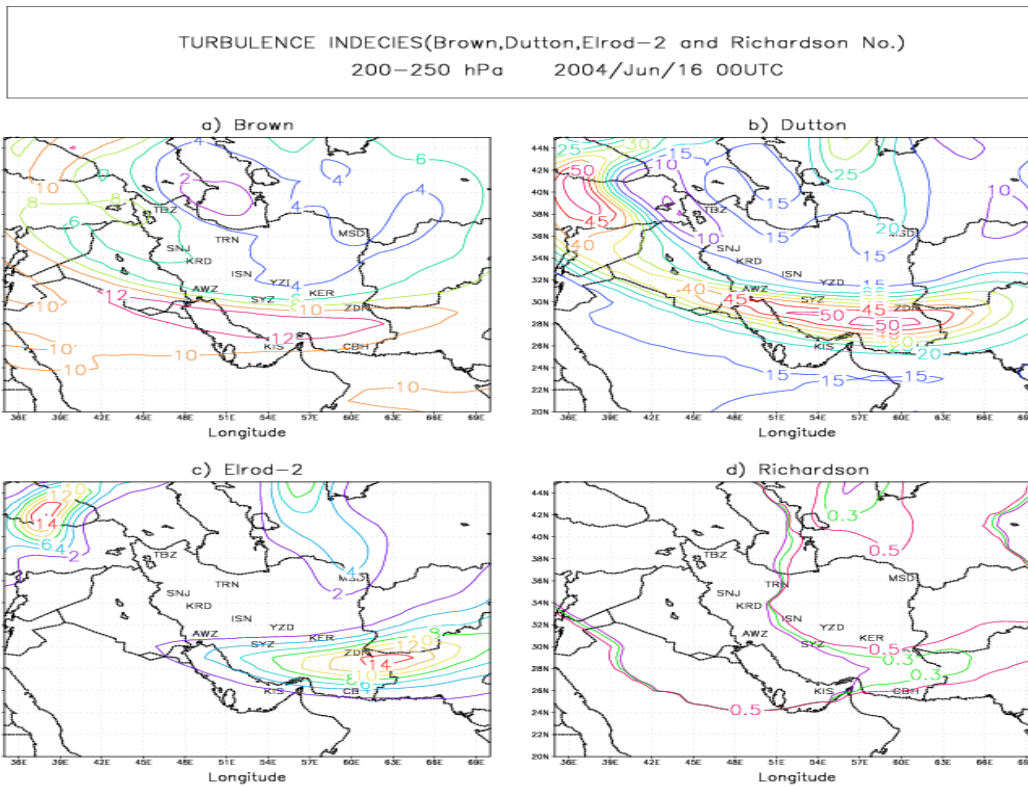
| مجموع | شدت سبک تا متوسط (L-M) | شدت متوسط (M) | تلاطم هوای صاف (CAT) |
|-------|------------------------|---------------|----------------------|
| ۱۰۸ | ۶۵ | ۴۳ | ۲۰۰-۲۵۰ میلی باری |
| ۲۱۲ | ۱۲۲ | ۹۰ | ۲۵۰-۳۰۰ میلی باری |
| ۹۷ | ۵۰ | ۴۷ | ۳۰۰-۳۵۰ میلی باری |
| ۴۱۷ | ۲۳۷ | ۱۸۰ | مجموع |



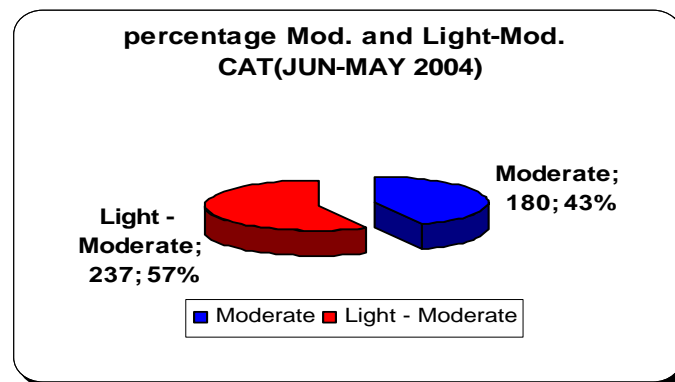
شکل ۲. گره‌های باد، دما و ژئوپتانسیل، ۱۶ ژانویه ۲۰۰۴ ساعت ۰۰:۰۰ UTC (a و b) گره‌ته سمت و سرعت باد (ms^{-1}) در تراز ۲۰۰ و ۲۵۰ میلی‌باری، (c و d) گره‌ته پربندهای ژئوپتانسیل (خط پر بر حسب m) و دما (خط چین بر حسب K) در تراز ۲۰۰ و ۲۵۰ میلی‌باری.



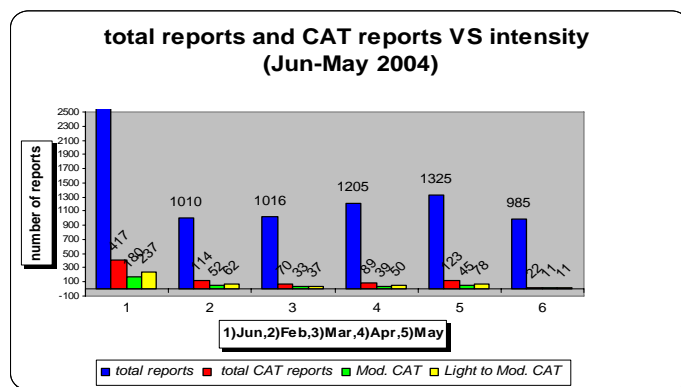
شکل ۳. گره‌های (a) پایداری ایستایی ($s^{-2} \times 10^{-4}$)، (b) چینش قائم باد ($s^{-1} \times 10^{-3}$) و (c) چینش افقی باد ($s^{-1} \times 10^{-5}$) در لایه ۲۰۰ تا ۲۵۰ میلی‌باری، ۱۶ ژانویه ۲۰۰۴ ساعت ۰۰:۰۰ UTC.



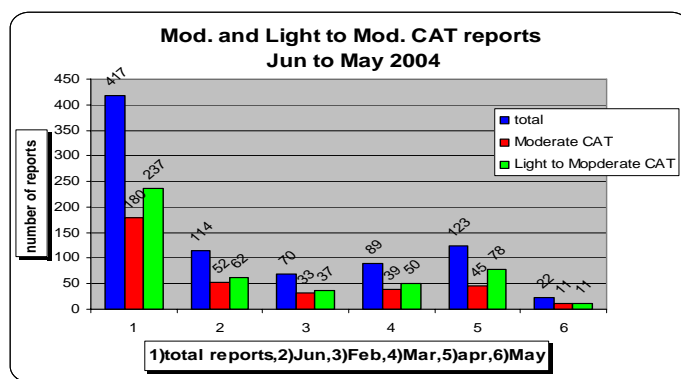
شکل ۴. گرتته‌های شاخص تلاطم هوای صاف در لایه ۲۰۰ تا ۲۵۰ میلی‌باری، ۱۶ ژانویه ۲۰۰۴ ساعت ۰۰:۰۰ UTC (a) شاخص براون ($s^{-1} \times 10^{-5}$), (b) شاخص دانتن، (c) شاخص الرود-۲ ($s^{-2} \times 10^{-7}$) و (d) عدد ریچاردسن.



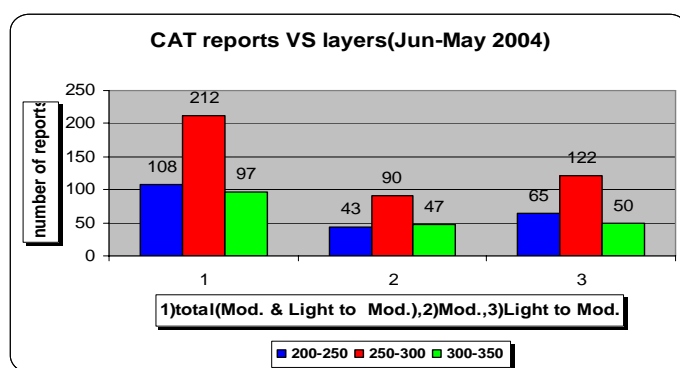
شکل ۵. مقایسه تعداد کل گزارش‌های دریافتی و تعداد وقوع CAT با شدت متوسط و سبک تا متوسط در دوره پنج ماهه (ژانویه تا مه ۲۰۰۴).



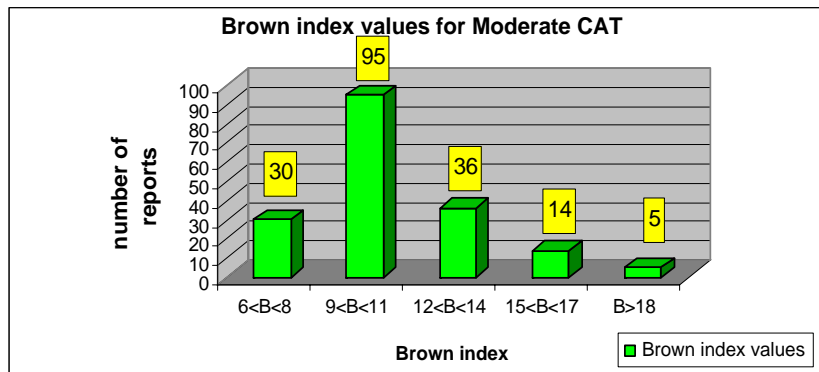
شکل ۶. مقایسه وقوع موارد تلاطم با شدت متوسط و سبک تا متوسط و مجموعه گزارش‌های دریافتی در دوره پنج ماهه (ژانویه تا مه ۲۰۰۴).



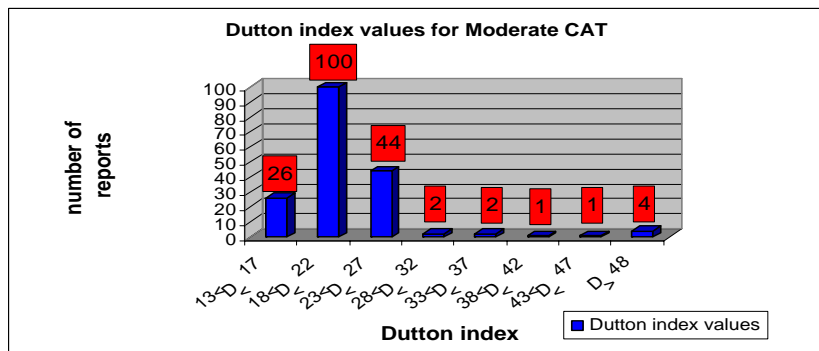
شکل ۷. مقایسه وقوع تلاطم با شدت‌های متفاوت بر حسب زمان وقوع تلاطم.



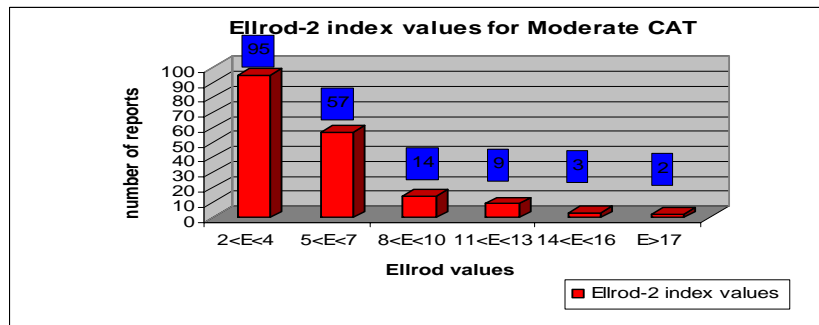
شکل ۸. مقایسه وقوع تلاطم با شدت‌های متفاوت بر حسب لایه‌های جوی.



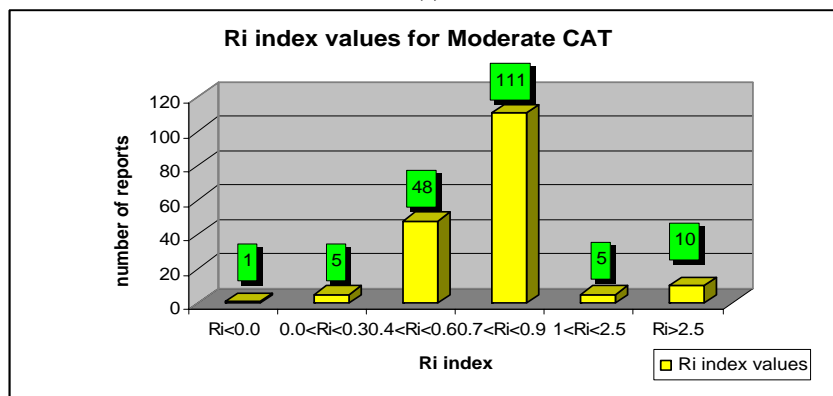
(a)



(b)

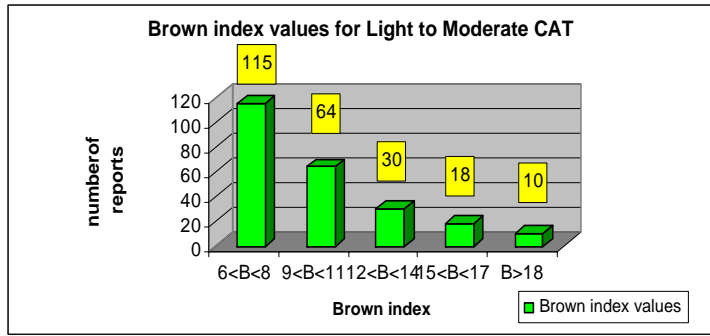


(c)

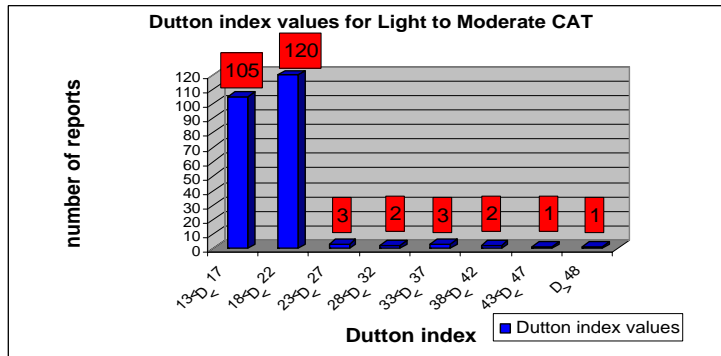


(d)

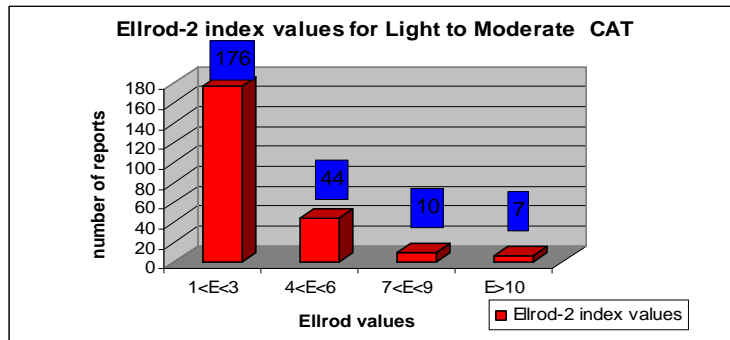
شکل ۹. محدوده مقادیر عددی شاخص‌های (a) براون، (b) داتن، (c) الود-۲ و (d) عدد ریچاردسن برای تلاطم هوای صاف با شدت متوسط (ژانویه تا مه ۲۰۰۴).



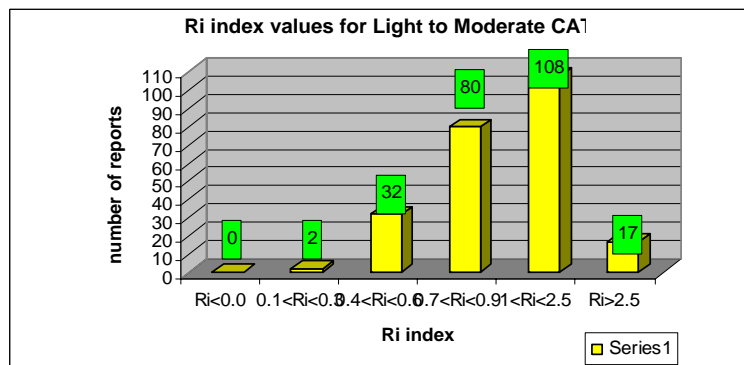
(a)



(b)

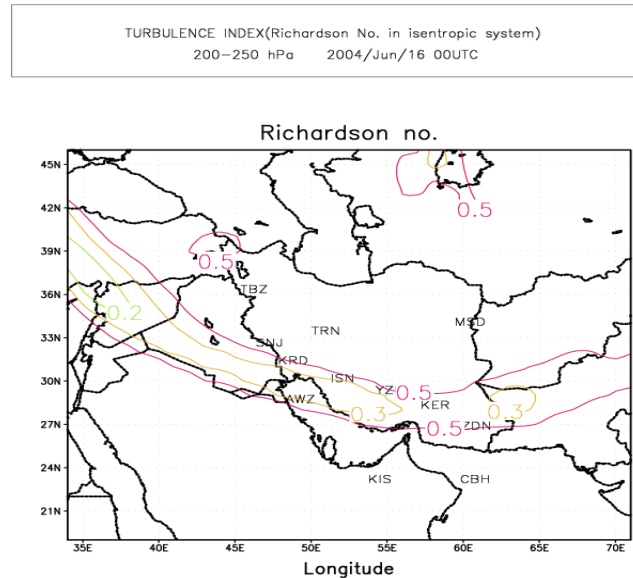


(c)



(d)

شکل ۱۰. محدوده مقادیر عددی شاخص‌های (a) براون، (b) داتن، (c) ال‌رود-۲ و (d) عدد ریچاردسن برای تلاطم هوای صاف با شدت سبک تا متوسط (ژانویه تا مه ۲۰۰۴).



شکل ۱۱. شاخص ریچاردسن در مختصات همدرگاشت در لایه ۲۰۰ تا ۲۵۰ میلی‌باری مورخ ۱۶ ژانویه ۲۰۰۴ ساعت ۰۰:۰۰ UTC.

ICAO Reference, 2003, ATC operation Manual for Reduced Vertical Separation Minimum (RVSM): Secretariat of the International Civil Aviation Organization (ICAO), Montreal, Canada.

Kao, S. K., and Sizoo, A. H., 1966, Analysis clear air turbulence near the jet stream: J. Geophys. Res., **71**, 3799-3805.

Keller, J. L., 1990, Clear air turbulence as response to meso and synoptic scale dynamic processes., Mon. Wea. Rev., **118**, 2228-2243.

Knox, J. A., 1995, Possible mechanisms of Clear-Air Turbulence in strongly anticyclonic flows: Mon. Weather, Rev., **125**, 1251-1259.

Kronebach, G. W., 1964, An automated procedure for forecasting clear air turbulence: J. Appl. Meteorol., **3**, 119-125.

Lester, P. F., 1993, Turbulence: Jepson Sanderson, Inc., 236 pp.

Marroquin, A., 1995, an integrated algorithm to forecast CAT from gravity wave breaking, upper fronts and other atmospheric deformation region: 6th Conference on Aviation Weather Systems, Dallas, and Am. Meteorol. Soc.

Marroquin, A., 1998, An advance algorithm to diagnose atmospheric turbulence using numerical model output: 16th Conference of Weather Forecast, AMS.

Peterson, S., 1956, Weather Analysis and Forecasting., McGraw-Hill, 428 pp.

منابع

Baughman, E., 1946, Turbulence with the stable lapse rate: Bull. Am. Meteorol. Soc., **27**, 459-462.

Brown, R., 1973, New indices to locate Clear-Air turbulence: Met. Mag., **102**, 347-359.

Chambers, E., 1973, BOAC experience with turbulence: AGA conference proceeding No.140. NATO., 6-1 to 6-13.

Dutton, J., 1980, Probability forecasts of clear-air turbulence based on numerical model outputs: Meteorol. Mag., 109, 1980.

Dutton, J., and Panofsky, H. A., 1970, Clear Air Turbulence: A mystery may be unfolding, Science, **167**, 937-944.

Ellrod, G. P., 2003, Detection of high level turbulence using satellite imagery and upper air data NOAA Tech. Memo. NESDIS 10, U. S. Dept. of Commerce, 30 pp.

Ellrod, G. P., and Knapp, D. I., 1992, An objective clear air turbulence forecasting technique: verification and operational use: Weather Forecast, **17**, 150-165.

Endlich, M., 1964, The meso-scale structure of some regions of clear-air turbulence: J. Appl. Meteorol., **3**, 261-276.

ICAO Guide, 2005, Annex11 No. 964, Air navigation rules: Secretariat of the International Civil Aviation Organization (ICAO), Montreal, Canada.

- Am. Meteorolo. Soc., (Boston).
- Stull, R. B., 1988, An Introduction to Boundary Layer Meteorology: Kluwer Academic Publisher, London, 666 pp.
- Tebaldi, C., Nychka, D., Brown, B., and Sharman, R., 2003, Non-parametric, flexible models for forecasting clear-air turbulence: *Environmetrics*, **13(8)**, 859-878.
- WMO Guide, No. 958, 2003, Aircraft Meteorological Data Relay (AMDAR) Reference Manual, Secretariat of the World Meteorological Organization (WMO), Geneva, Switzerland.
- Roach, W. T., 1970, On the influence of synoptic development on the production of high level turbulence: *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **96**, 413-429.
- Sawsier, J. S., 1955, The vertical circulation and meteorological fronts and its relation to frontogenesis: *Proc. Roy. Soc. Lond.*, **A234**, 346-362.
- Sharman, R. C., Brown, B. G., and Detting, S., 2000, Preliminary results of the NCAR integrated Turbulence Forecasting Algorithm (IFTA) to forecast CAT: 9th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology,