Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(7) (2021) 997-1000
DOI: 10.22060/mej.2021.18770.6886

Diagnostical and observational analysis of clear air turbulence over the middle east and Iran

R. JavanNezhad[1*] , M. Safar[2], S. Ghader[3]

[1]Aerospace Department, Graduate Center, Shahid Sattari Aeronautical University, Tehran, Iran
[2]Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran

ABSTRACT: Turbulence forecasting started in World War II when scientists and individuals in the field of aviation began attempting to correlate observed clear air turbulence events with large scale synoptic features. Encounters with significant turbulence or simply bumpiness in flight, are a major concern not only for passenger comfort but also for safe, efficient, and cost-effective aircraft operations. Clear air turbulence represents disorganized fluid motions in the form of micro scale eddies that can take place within cloud-free or limited cloud patches in the free atmosphere, which causes in-flight bumpiness of aircraft. This study aims to present two case studies and comparison of the report of clear air turbulence over center, east and south east crossings over Iran region. Regional weather predictions are carried out using an ensemble forecasting system. In addition, the initial and lateral boundary conditions are taken from the global forecast system. For each member of the ensemble system, two nested computational domains with spatial resolutions of 27000 meters and 9000 meters are used. Case study of the predicted clear air turbulence indicates the proper performance of the predicted meteorological parameters.

Review History:

Received: Jun. 25, 2020
Revised: Nov. 11, 2020
Accepted: Dec. 24, 2020
Available Online: Jan. 26, 2021

Keywords:

Clear air turbulence
Turbulence index
Flight levels
WRF model
Ensemble forecasting

1. INTRODUCTION

Turbulence or simply bumpiness in flight [1], is a major concern not only for passenger comfort but also for safe, efficient, and cost-effective aircraft operations. The magnitude of aircraft bumpiness depends on the magnitude and size of the encountered atmospheric turbulent eddies as well as the aircraft response to those eddies. Aircraft bumpiness is felt mainly for a range of eddy sizes between 100 m and 1 km. Larger eddies cause only slow variations in the flight path while the effect of very small eddies is integrated over the surface of the aircraft.

Cleat Air Turbulence (CAT) represents disorganized fluid motions in the form of micro scale eddies that can take place within cloud-free (clear air) or limited cloud patches in the free atmosphere, which causes in-flight bumpiness of aircraft. CAT forecasts are typically derived from the output of Numerical Weather Prediction (NWP) models. Almost all these algorithms diagnose turbulence by identifying large values in computed horizontal or vertical gradients of different atmospheric state variables (velocity, temperature) from the NWP model output and then threshold these gradients empirically to correspond to light, moderate, and severe turbulence (e.g., see [2]).

While most early studies related turbulence to wind shear and temperature gradients, late studies suggested that one more atmospheric feature, i.e. deformation, may play an important role in turbulence production. Mancuso and Endlich [3] used statistical methods to show that turbulence occurred in areas with large vertical wind shear and deformation values. Roach [4] also found that large scale shearing and stretching deformation may play a role in turbulence production. Several studies comparing satellite imagery and PIREPs (e.g., Schwartz [5]) supported the hypothesis that turbulence frequently occurs along deformation zones [6-8].

Considering the theory that wind shear and deformation are important factors in turbulence production, Ellrod and Knapp [8] suggested the Turbulence Index (TI), which presents turbulence by highlighting areas that have large vertical wind shear and deformation values. The TI is derived from Petterssen's frontogenesis intensity equation, which relates frontogenesis to an increase in vertical wind shear [8, 9].

This research work aims to present two case studies and comparison of the report of CAT over Middle East with emphasis on Iran region. Weather predictions are carried out using an ensemble forecasting system developed for the Weather Research and Forecasting (WRF) model.

2. METHODOLOGY

To construct the ensemble members of the ensemble forecasting system developed for the WRF model a combination of perturbed initial condition and model perturbations, using multi physical parameterization

*Corresponding author's email: sghader@ut.ac.ir

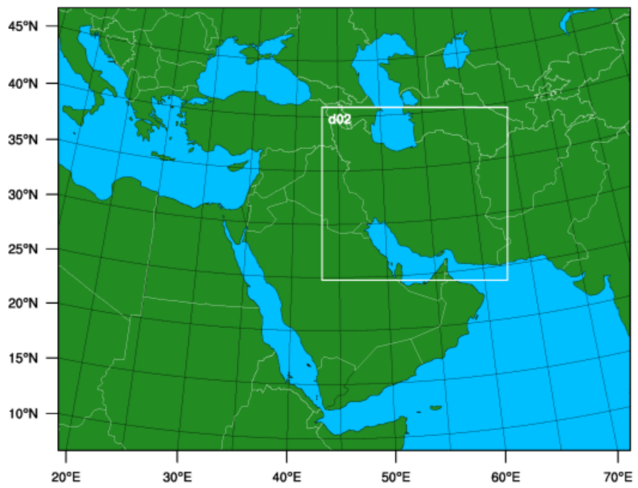


Fig. 1. Domains used for the WRF model in the present work

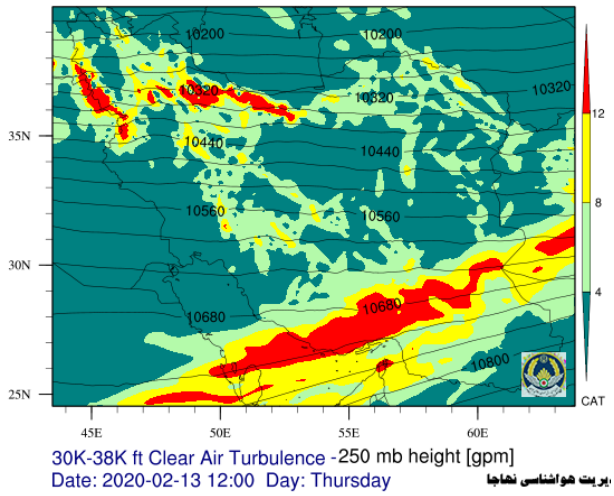


Fig. 2. Prediction of clear air turbulence for 30K-38K ft level at 12 UTC on February 13, 2020

schemes, is employed. Here, an ensemble prediction system with 25 members including five physical parameterization configurations and five initial condition perturbations for each one, is used to generate the meteorological field predictions over the study area. The Global Forecast System (GFS) data is used to provide the initial and boundary condition of the control run of the developed ensemble prediction system.

In the present work, to diagnose clear air turbulence the index suggested by Ellrod and Knapp [8] which is known as the turbulence index (TI) is employed. The formulation of the index is as bellow:

$$TI = VWS \times \left[DEF + CVG \right] \tag{1}$$

In which

$$VWS = \frac{\left(\Delta u^2 + \Delta v^2 \right)^{1/2}}{\Delta z},$$
$$DEF = \left(DST^2 + DSH^2 \right)^{1/2},$$
$$DST = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y},$$
$$DSH = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y},$$
$$CVG = -\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \tag{2}$$

where VWS is the vertical wind shear, u and v are wind component from the model forecast data, Δz is the thickness between the pressure level. DEF is the deformation term, stretching deformation is denoted by DST, DSH is shearing deformation term and CVG is the convergence.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Fig. 1 presents the main domain of the WRF model. As an example of obtained results, Fig. 2 shows prediction of CAT for main domain at 30K-38K ft level. Similarly, Fig. 3 presents CAT at 22K-30K ft level. From results present in Fig. 2 it can be seen that CAT is occurred in south-east, south and south-west regions of Iran on February 13, 2020 (12:00UTC). Based on this prediction any flight crossing these regions needs to modify its flight path to avoid CAT.

4. CONCLUSIONS

This research work aimed to present predictions of the CAT over Middle East with emphasis on Iran region. Weather predictions were carried out using an ensemble forecasting system developed for the WRF model. To diagnose the CAT the index suggested by Ellrod and Knapp [8], namely, the turbulence index (TI) was employed. A case study of the predicted CAT indicates the proper performance of the predicted meteorological parameters.

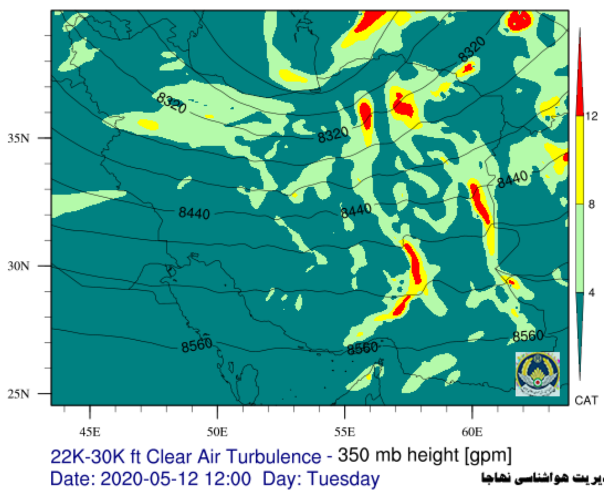


Fig. 3. Prediction of clear air turbulence for 22K-30K ft level at 12 UTC on May 12, 2020

REFERENCES

[1] P. Lester, Turbulence: A new perspective for pilots. Jeppesen Sanderson, 1993.

[2] R. Sharman, C. Tebaldi, G. Wiener, J. Wolff, An integrated approach to mid-and upper-level turbulence forecasting, Weather and forecasting, 21(3) (2006) 268-287.

[3] R. Mancuso, R. Endlich, Clear air turbulence frequency as a function of wind shear and deformation, Monthly weather review, 94(9) (1966) 581-585.

[4] W. Roach, On the influence of synoptic development on the production of high level turbulence, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 96(409) (1970) 413-429.

[5] B. Schwartz, The quantitative use of PIREPs in developing aviation weather guidance products, Weather and Forecasting, 11(3) (1996) 372-384.

[6] R. Anderson, J. Gurka, S. Steinmetz, Application of VAS multispectral imagery to aviation forecasting, in: Preprint., 9th Conf. on Weather Forecasting and Analysis, 1982, pp. 227-234.

[7] G.P. Ellrod, Detection of high level turbulence using satellite imagery and upper air data, NOAA Technical Memorandum NESDIS 10, U.S. Department of Commerce, Washington, DC., 1985.

[8] G.P. Ellrod, D.I. Knapp, An objective clear-air turbulence forecasting technique: Verification and operational use, Weather and Forecasting, 7(1) (1992) 150-165.

[9] S. Petterssen, Weather Analysis and Forecasting. Vol. 1 Motion Motion Systems, McGraw-Hill, 1956.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

R. JavanNezhad, M. Safar, S. Ghader, Diagnostical and observational analysis of clear air turbulence over the middle east and Iran, Amirkabir J. Mech Eng., 53(7) (2021) 997-1000.

DOI: 10.22060/mej.2021.18770.6886

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ۷، سال ۱۴۰۰، صفحات ۴۲۰۳ تا ۴۲۲۰
DOI: 10.22060/mej.2021.18770.6886

تحلیل تشخیصی و پیش‌بینی توربولانس هوای صاف منطقه خاورمیانه به ویژه ایران

رضا جوان نژاد[۱]، محمود صفر[۲]، سرمد قادر[۲*]

۱- دکترای تخصصی هواشناسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۲- گروه فیزیک فضای مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

خلاصه: مواجه‌شدن با توربولانس هوایی یا در اصطلاح عامیانه چاله‌های هوایی نه‌تنها به‌منظور احساس آسایش برای مسافران از اهمیت بالایی برخوردار بوده بلکه برای ایجاد ایمنی، کارایی و اقتصادگرایی شرکت‌های هواپیمایی نیز دارای اهمیت فراوانی است. بدین منظور برای رسم نقشه‌ها ازسامانه پیش‌بینی همادی توسعه‌داده‌شده برای مدل میان مقیاس با دو حوزه محاسباتی تودرتو (لانه‌ای) و با فواصل شبکه‌ای افقی ۲۷ و ۹ کیلومتر همراه با ۴۹ تراز قائم استفاده شده‌است. جهت بررسی نحوه عملکرد شاخص مورد استفاده در پیش‌بینی توربولانس هوای صاف به طور انتخابی و برای دو مورد از رویدادهای اتفاق‌افتاده طی فصول زمستان (بهمن ۱۳۹۸) و بهار (اردیبهشت ۱۳۹۹) رسم شده‌است. در همین راستا پژوهش حاضر با استفاده از تحلیل نقشه‌های همدیدی و محاسبه شاخص الرود و ناپ که بر پایه چینش قائم باد، تغییر شکل و همگرایی انجام شده‌است. نقشه‌های مختلف هواشناسی از جمله ۵۰۰ هکتوپاسکال، میدان باد، شاخص ناپایداری جو و همچنین نقشه نمایه قائم دما گویای وجود توربولانس هوای صاف در مسیر پروازی بوده‌است. نتیجه پارامتر آماری حاصل از میانگین پیش‌بینی سامانه همادی حاصل از ۵۴ ایستگاه و تاریخ‌های منتخب برای ضریب همبستگی میدان باد سطحی در تراز ۱۰متری بالاتر از ۰/۷ و ضریب همبستگی میدان دما در تراز ۲ متری بالاتر از ۰/۹۸ محاسبه شده‌است. از طرفی بررسی و تحلیل نتایج حاصل از کار حاضر با استفاده از شاخص شدت آشفتگی، گویای مقادیر ۸ تا ۱۲ که نشان‌دهنده توربولانس متوسط و بالاتر از ۱۲ که نشان‌دهنده توربولانسی شدید در حین پرواز بوده‌است. در نهایت مقایسه پیش‌بینی‌های صادرشده سامانه مذکور با گزارش خلبان حاکی از وجود توربولانس با همان شدت مطرح شده بوده که حاکی از عملکرد مناسب سامانه پیش‌بینی همادی و شاخص انتخابی جهت پیش‌بینی توربولانس هوای صاف است.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۰۴
بازنگری:۱۳۹۹/۰۸/۲۱
پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۰۴
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۱/۰۷

کلمات کلیدی:
توربولانس هوای صاف
شاخص شدت آشفتگی
سطوح پروازی
مدل میان مقیاس
پیش‌بینی همادی.

۱- مقدمه

نحوه مواجه‌شدن با توربولانس[۱] یا در اصطلاح عامیانه چاله‌های هوایی [۱] نه تنها به‌منظور احساس آسایش برای مسافران از اهمیت بالایی برخوردار بوده بلکه برای ایجاد ایمنی، کارایی و اقتصادگرایی شرکت‌های هواپیمایی نیز دارای اهمیت فراوانی است [۲] یکی از انواع توربولانس جوی مربوط به هوای صاف بوده که سبب تکان‌هایی بر روی هواپیما در آسمان بدون ابر (هوای صاف) یا کم‌ابرمی‌شود [۱, ۳, ۴] توربولانس هوای صاف معمولاً در مناطقی که چینش افقی و قائم باد و همچنین پایداری ایستایی در جو وجود داشته‌باشد، اتفاق می‌افتد. بنابراین توربولانس هوای صاف در ناوه[۲] و پشته[۳] امواج سیاره‌ای، وردایست[۴] (منطقه وردایست نزدیک جریان‌های رودباد[۵] از منابع اصلی توربولانس هوای صاف بوده و اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (به طور مثال [۲, ۵] و مناطق پایدار ایستای پوشن سپهر که امکان نفوذ رودبادها وجود دارد، مشاهده می‌شود [۶, ۷].

1 Turbulence
2 Trough
3 Ridge
4 Tropopause
5 Jet stream

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: sghader@ut.ac.ir

در واقع، شکست موج با دامنه بزرگ در جو باعث ایجاد آشفتگی و توربولانس می‌شود (به طور مثال [۶-۸]). البته رودبادهای سطوح فوقانی جو شاهد چینش قوی باد بوده (به طور مثال [۹]) که مناطق مستعدی برای وقوع توربولانس هوای صاف نیز هستند.

پیش‌بینی توربولانس‌های جوی به دوران جنگ جهانی برمی‌گردد. در آن زمان دانشمندان و افراد مرتبط با حمل‌ونقل هوایی جهت یافتن ارتباطی مابین توربولانس هوای صاف با ویژگی‌های همدیدی[1] بزرگ مقیاس جو تلاش‌های بسیاری انجام دادند. در کارهای اولیه بیشتر ویژگی‌های مربوط به مناطق جبهه‌زایی در جو مورد توجه بود [۲] که در همین راستا باگمن [۱۰] طی مطالعه موردی بر فراز اقیانوس اطلس شمالی نشان داد توربولانس هوای صاف در نواحی با تقابل شدید توده‌های هوا و چینش باد امکان‌پذیر خواهدبود. حدوداً یک دهه بعد چمبرز [۳] چندین مورد آشفتگی متوسط تا شدید را بر فراز اقیانوس اطلس شمالی به ثبت رساند و متوجه شد تعداد زیادی از توربولانس‌های جوی در مناطقی با تغییرات شدید سرعت باد رخ داده‌است. چند سال بعد، داتن و پانوفسکی [۷] گزارش دادند توربولانس هوای صاف به احتمال زیاد در مناطقی که چینش قائم باد و گرادیان افقی شدید دما وجود داشته‌باشد، اتفاق خواهدافتاد. در ابتدا با اینکه اکثر مطالعات اولیه، توربولانس جوی را با چینش قائم باد و گرادیان افقی دما مرتبط می‌دانستند ولی در مطالعات بعدی مشخص شد که یکی دیگر از ویژگی‌های مهم جو در شکل‌گیری توربولانس، تغییر شکل[2] است. مانچوسو و اندلیش [۱۱] نیز از روش‌های آماری برای نشان‌دادن توربولانس جوی در مناطقی با مقادیر زیاد چینش قائم باد و تغییر شکل بهره بردند. سپس رُچ [۱۲] دریافت تغییر شکل و چینش قائم باد نقش مهمی در تولید توربولانس جوی ایفا می‌کند. از طرفی مطالعات دیگری همچون اَندرسن و همکاران [۱۳]، اِلرود [۱۴] و الرود و ناپ [۱۵] که با استفاده از مقایسه تصاویر ماهواره‌ای و گزارشات خلبانان[3] انجام شد، فرضیه تغییر شکل و ایجاد توربولانس جوی را تأیید کرد.

الرود و ناپ [۱۵] با درنظرگرفتن نظریه تغییرشکل و چینش قائم باد، شاخص شدت آشفتگی[4] را معرفی و به پیش‌بینی توربولانس پرداختند. این شاخص با برجسته‌کردن مقادیر بالایی از تغییر شکل و چینش قائم باد به پیش‌بینی توربولانس می‌پردازد. این شاخص از معادله شدت جبهه‌زایی پیترسن مشتق شده که بین جبهه‌زایی و افزایش تغییرات چینش قائم باد ارتباط برقرار می‌کند (به طور مثال [۱۵, ۱۶]). این روش پیش‌بینی در تحقیقات اولیه مورد تأیید قرار گرفته و نشان داد نتیجه تغییرشکل و چینش قائم باد توربولانس متوسط تا شدیدی را ایجاد می‌کند [۱۱]. در ادامه با بهره‌گیری از دو مطالعه موردی جهت نشان‌دادن توانایی شاخص شدت آشفتگی مشخص شد حدود دو سوم تا سه چهارم رخدادهای توربولانس توسط این شاخص پیش‌بینی می‌شود در حالی که نسبت هشدارهای کاذب نیز در طی پیش‌بینی این شاخص کم است [۱۵]. گرچه شاخص شدت آشفتگی به هنگام پیش‌بینی توربولانس در مناطقی که جبهه‌زایی اتفاق می‌افتد بسیار خوب عمل کرده ولی توربولانس‌های ایجادشده توسط فرایندهای دیگر جوی را از دست می‌دهد [۲, ۱۷] با افزودن جمله واگرایی به شاخص شدت آشفتگی سعی در حل این مشکل کرده و موقعیت‌های غیر از جبهه‌زایی را نیز به حساب آوردند. آنها شاخص شدت آشفتگی اصلاح‌شده واگرایی[5] را پیشنهاد دادند.

علیرغم پیشرفت‌های قابل توجه کماکان پیش‌بینی توربولانس هوای صاف در محیطی که با امواج گرانی توسط جت‌ها تولید شده‌است دشوار است [۲] .تحقیقاتی نیز در خصوص نحوه انتشار امواج گرانی حاصل از جت‌ها و جبهه‌ها طی چند دهه گذشته (به طور مثال پلوگونون و ژنگ [۱۸] و منابع موجود در آن) انجام شده‌است که نشان می‌دهد امواج گرانی حاصل از جبهه‌ها با تغییراتی در چینش باد و پایداری جو در مقیاس کوچک سبب توربولانس هوای صاف می‌شوند (به طور مثال [۴, ۱۱]). به‌لحاظ نظری یک دلیل مهم دشواری توصیف امواج گرانی حاصل از جت‌ها و جبهه‌ها به علت ساده‌سازی و فیلترشدن این امواج در مدل‌ها است. مدل‌سازی این امواج یک مسئله چالش‌برانگیز بوده که انگیزه‌های نظری متعددی را ایجاد کرده‌است (به طور مثال وانستی [۱۹] و منابع موجود در آن). از طرفی امواج گرانی اطراف رودباها و جبهه‌ها نیز متأثر از منابع دیگری همچون سامانه‌های همرفتی تقویت، تضعیف یا توسعه می‌یابند [۱۸, ۲۰, ۲۱].

در همین راستا تاجبخش و همکاران [۲۲] و آریامنش و همکاران [۲۳] توربولانس هوای صاف را مورد بررسی قرار دادند. یکی از نتایج

1 synoptic
2 Deformation
3Pilot Report (PIREP)
4 Turbulence Index (TI)
5Divergence Turbulence Index (DTI)

تاجبخش و همکاران [۲۲] حاکی از وقوع توربولانس در جریان سوی ناوه ژئوپتانسیلی با بیشترین مقادیر عددی شاخص‌های همراه با توربولانس هوای صاف است.

هرساله صنعت هوایی با خطرات تلاطم هوایی بسیاری دست و پنجه نرم می‌کند که در این بین تلاطم هوای صاف نیز موجب خسارات جدی به مسافران، تجهیزات و هواپیماها می‌شود. باوجود این انگیزه‌ها، کیفیت و دقت پیش‌بینی وقایع هواشناسی در صنایع هوایی به‌منظور پیشگیری کافی نبوده و همواره نیازمند پیشرفت و نوآوری می‌باشد. در این رابطه تعیین میدان‌های هواشناسی و از جمله میدان‌های باد، دما، بارش و غیره کاربرد فراوانی در صنعت هوانوردی دارند. از جمله نوآوری‌های کار حاضر پیش‌بینی و شبیه‌سازی میدان‌های هواشناسی در محدوده خاورمیانه و ایران با تفکیکی در حد چند ده کیلومتر (چند دهم درجه) اشاره کرد که با استفاده از سامانه همادی مدل میان مقیاس[۱] و به صورت عملیاتی انجام شده‌است. از طرفی پیکربندی مدل استفاده‌شده در این کار نیز مناسب برای منطقه خاورمیانه و به ویژه ایران در نظر گرفته‌شده‌است که خود اهمیت بسزایی در صدور پیش‌بینی صحیح و با دقت داشته و نتایج قابل قبولی را نیز کسب کرده‌است.

در ادامه این پژوهش به معرفی شاخص شدت آشفتگی الرود و ناپ [۱۵] پرداخته خواهد شد. همچنین معرفی سامانه همادی مدل میان مقیاس مورد استفاده به همراه پیکربندی آن نیز مطرح خواهد شد. به منظور نشان‌دادن توانایی این شاخص دو مورد گزارش خلبانان در خصوص توربولانس هوای صاف به همراه تحلیل همدیدی نیز مورد بررسی قرار خواهدگرفت. از طرفی با توجه به استفاده از شاخص ناپایداری جوی[۲] در کار حاضر مطالبی در این خصوص نیز بیان خواهدشد.

۲- شاخص شدت آشفتگی هوای صاف

بزرگی چاله‌های هوایی به‌اندازه‌ی آن‌ها، شرایط جو حاضر و نوع پیچک‌هایی[۳] که هواپیما در آن می‌افتد بستگی دارد. اگرچه طیف وسیعی از پیچک‌ها در جو وجود دارد اما چاله‌های هوایی عمدتاً با اندازه‌های صد تا هزار متر مشهودتر است. پیچک‌های بزرگ‌تر سبب تغییر مسیر هواپیما می‌شوند در حالی که پیچک‌های کوچک ممکن است فقط روی بدنه هواپیما احساس شوند. ازآنجایی‌که ابعاد گفته‌شده فقط بر روی هواپیماهای در حال پرواز تأثیرگذار هستند، در صنایع هوایی آن‌ها را توربولانس‌های هوایی می‌نامند [۲]. به خوبی روشن است که تنها با تکیه بر تصاویر ماهواره‌ای و لحظه‌ای نمی‌توان تشخیص دقیقی در خصوص توربولانس‌های هوایی ارائه کرد، اما تجارب به‌دست‌آمده و نیز استفاده از الگوریتم‌های عددی می‌تواند کمک شایانی به تایید تشخیص توربولانس و همچنین پیش‌بینی توربولانس‌ها بکند. با توجه به مقیاس فضایی و زمانی در هوانوردی پیش‌بینی توربولانس به صورت واضح و عملیاتی به طوری که بتواند تمام نواحی هوایی را پوشش دهد امری غیرممکن است. با این وجود از آنجایی که منابع انرژی مرتبط با توربولانس‌ها در مقیاسی بزرگ قرار دارند، نتیجه‌گیری در خصوص احتمال وقوع توربولانس نیازمند بررسی‌ها و آزمایشات دقیقی در مقیاس بزرگ به ویژه در سطوح بالا است. برخی از این الگوهای بزرگ مقیاس توسط محققانی نظیر هاپکینز و همکاران [۲۴]، لی و همکاران [۲۵] و لستر [۱] مورد بررسی قرار گرفته‌است. در گذشته این الگوها توسط کارشناسان هواشناسی مراکز و دپارتمان‌های هواشناسی انجام می‌شد که در سال‌های اخیر این شیوه‌ها به سمت الگوریتم‌های اتوماتیک تغییر یافته‌است به طوری که امروزه پیش‌بینی توربولانس توسط سرویس‌های هواشناسی انجام می‌شوند.

همانطور که می‌دانیم توربولانس باعث تغییرات ناگهانی و نامنظم سمت و سرعت باد، دمای هوا و چگالی می‌شود و به عوامل ناپایدارکننده مثل گرادیان‌های سرعت باد، ناهمواری سطح زمین، گرمایش سطح زمین و آزادشدن گرمای نهان در جو نیز بستگی دارد. تلاطم حالتی از حرکت هوا است که در آن بردار سرعت باد کاملاً متغیر و تصادفی است. در جوّ انحراف از سمت و سرعت باد میانگین در راستای افقی و قائم همواره وجود دارد که می‌تواند ناشی از سه عامل تلاطم اصطکاکی[۴] (مکانیکی)، تلاطم همرفتی (گرمایی[۵]) و تلاطم لختی[۶] باشد. تلاطم مکانیکی بر اثر چینش سرعت باد (که اغلب در نزدیک سطح زمین شدید است) و سطح زمین ناهموار، ایجاد می‌شود. کوه‌ها، ساختمان‌ها و درختان علاوه بر ایجاد تلاطم

1 Weather Research and Forecasting (WRF)
2 K-index
3 Eddies

4Frictional turbulence
5Thermal turbulence
6Inertial turbulence

مکانیکی در نزدیک سطح زمین، سبب صعود بسته هوا می‌شوند و در صورت وجود رطوبت کافی سبب تشکیل ابر و ایجاد ناپایداری همرفتی و یا تشدید آن می‌شوند. تلاطم گرمایی، در اثر گرمایش سطح زمین به دلیل دریافت انرژی خورشیدی و صعود گرما از سطح زمین رخ می‌دهد و بیشتر روی خشکی‌ها به وجود می‌آید. پیچک‌های کوچک‌تر می‌توانند توسط پیچک‌های بزرگ‌تر نیز ایجاد شوند که این فرایند آبشار تلاطمی نامیده می‌شود که طی آن بخشی از انرژی لختی پیچک‌های بزرگ‌تر از بین می‌رود و به پیچک‌های کوچک‌تر منتقل می‌شود. تلاطم لختی، شکلی از تلاطم است که در آن چینش توسط پیچک‌های بزرگ‌تر ایجاد می‌شود. عوامل اصلی ایجاد تلاطم نیز شامل همرفت[1]، ناهمواری سطح[2]، امواج گرانی[3] و چینش باد[4] می‌باشد (به طور مثال [۱, ۲]).

بنا به نظریه پیشنهادی مانچوسو و اندلیش [۱۱, ۱۲][۱۱]، روچ [۱۲] و الرود و ناپ [۱۵] تغییر شکل عاملی مهم در ایجاد توربولانس بوده به عبارت دیگر چینش قائم مولفه‌های افقی باد سبب ایجاد توربولانس شده به طوری که مقایسه تصاویر ماهواره و گزارش خلبانان (به طور مثال شوارتز [۲۶]) حاکی از ایجاد توربولانس در این مناطق است [۱۳, ۱۴]. در همین راستا در ادامه شاخص الرود و ناپ [۱۵] جهت تشخیص توربولانس هوای صاف معرفی می‌گردد:

$$TI = VWS \times \left[DEF + CVG \right] \qquad (۱)$$

که در رابطه بالا TI شاخص شدت آشفتگی و VWS چینش قائم باد و به صورت زیر است:

$$VWS = \frac{\left(\Delta u^2 + \Delta v^2\right)^{1/2}}{\Delta z} \qquad (۲)$$

در رابطه بالا z ضخامت بین لایه‌های فشاری، u سرعت در راستای محور x و v سرعت در راستای محور y است. از طرفی در رابطه (۱) DEF تغییر شکل بوده و به صورت زیر است:

1Convection
2Surface roughness
3Gravity Waves
4Wind shear

$$DEF = \left(DST^2 + DSH^2\right)^{1/2} \qquad (۳)$$

که در رابطه بالا DST تغییر شکل کششی و به صورت زیر است:

$$DST = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \qquad (۴)$$

و DSH تغییر شکل چینشی بوده و به صورت زیر است:

$$DSH = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \qquad (۵)$$

همچنین در رابطه (۱) CVG همگرایی می‌باشد و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$CVG = -\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right) \qquad (۶)$$

مقادیر ۴ تا ۸ این شاخص نشان‌دهنده توربولانسی سبک تا متوسط در هنگام پرواز است. مقادیر ۸ تا ۱۲ نیز توربولانس متوسط و مقادیر بالاتر از ۱۲ نشان‌دهنده توربولانسی شدید در حین پرواز خواهند بود. در ادامه به بررسی و تحلیل دو مورد توربولانس هوای صاف با استفاده از شاخص شدت آشفتگی الرود و ناپ [۱۵] پرداخته‌شده‌است.

۳- شاخص ناپایداری جوی

این شاخص برای ارزیابی پتانسیل همرفت براساس افت محیطی دما و صعود عمودی می‌باشد. این شاخص با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} K\text{-}index &= T\,(850\ mb) + Td\,(850\ mb) \\ &- T\,(500\ mb) - TDD\,(700\ m) \end{aligned} \qquad (۷)$$

که در رابطه (۷) T دما، Td دمای نقطه شبنم، و TDD اختلاف بین دما و دمای نقطه شبنم است. به طور کلی زمانی که این شاخص حدود ۲۵ و کمتر از آن باشد پتانسیل همرفتی کم و زمانی که ۲۶ تا

جدول ۱. نتایج پارامترهای آماری میدان باد تراز ۱۰ متر و دمای تراز ۲ متر حاصل از میانگین پیش‌بینی سامانه همادی برای تعدادی ایستگاه‌ها (۵۴ ایستگاه) و تاریخ‌های منتخب (قادر و همکاران [۲۹])

Table 1. Results of the statistical parameters of the 10 meters level wind field and the temperature at 2 meters level resulted from the ensemble system (ensemble mean) for a number of synoptic stations (54 stations) and some dates (Ghader et al. [29])

ردیف	تاریخ	ضریب همبستگی برای میدان باد سطحی در تراز ۱۰ متر	جذر مربعات میانگین خطا برای میدان باد سطحی در تراز ۱۰ متر	ضریب همبستگی اندازه مؤلفه باد شرق سوی تراز ۱۰ متری	جذر مربعات میانگین خطا اندازه مؤلفه باد شرق سوی تراز ۱۰ متری	ضریب همبستگی اندازه مؤلفه باد شمال سوی تراز ۱۰ متری	جذر مربعات میانگین خطا اندازه مؤلفه باد شمال سوی تراز ۱۰ متری	ضریب همبستگی میدان دما در تراز ۲ متری	جذر مربعات میانگین خطا میدان دما در تراز ۲ متری	تعداد نقاط
۱	۲۰۱۸-۱۰-۰۶	۰/۷	۲/۰	۰/۶	۳/۶	۰/۶	۳/۰	۰/۹۸	۱/۶	۷۶۳
۲	۲۰۱۸-۱۰-۰۷	۰/۸	۱/۹	۰/۷	۳/۱	۰/۸	۲/۴	۰/۹۸	۱/۵	۷۶۴
۳	۲۰۱۸-۱۰-۰۹	۰/۸	۱/۹	۰/۷	۲/۳	۰/۸	۲/۲	۰/۹۹	۱/۵	۷۳۳
۴	۲۰۱۸-۱۰-۱۰	۰/۷	۱/۴	۰/۷	۲/۵	۰/۷	۲/۳	۰/۹۸	۱/۵	۷۲۷

۳۹ باشد پتانسیل همرفتی متوسط و برای مقادیر بالای ۴۰ پتانسیل شدید همرفتی در جو پیش‌بینی می‌شود.

۴- کاربرد عملیاتی

۴-۱- پیکربندی مدل

تعیین میدان‌های هواشناسی و از جمله میدان‌های باد، دما، بارش و غیره کاربرد فراوانی در صنعت هوانوردی دارند. در کار حاضر پیش‌بینی عملیاتی توربولانس هوای صاف با استفاده از روش الرود و ناپ [۱۵] انجام شده‌است. برای این منظور، پژوهش حاضر با استفاده از سامانه پیش‌بینی همادی[1] توسعه‌داده‌شده برای مدل میان مقیاس ([۲۷, ۲۸]) هواشناسی نهاجا انجام شده‌است [۲۹]. برای طرح واره‌های فیزیکی در مدل میان مقیاس انتخاب‌های متعددی وجود دارد که از جمله آنها می‌توان برای پارامترسازی خُردفیزیک طرح‌واره‌های لین، فِریر[2] و تامسون را نام برد که از جمله طرح‌واره‌های پرکاربرد هستند. برای پارامترسازی لایه مرزی سیاره‌ای[3] نیز دو طرح‌واره دانشگاه یانگ استون[4] و ملور-یامادا-جانیک[5] بیشتر در موارد عملیاتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. طرح‌واره‌های کین فریج، بتس-میلر-جانیک[6] و گرل-دونجی نیز برای پارامترسازی کومه‌ای (کومولوس) مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین برای سطح زمین[7] نیز دو طرح‌واره سطح زمین نوا[8] و سطح زمین ۵ لایه‌ای مدل میان مقیاس نسخه ۵[9] بیشترین استفاده را دارند. برای لایه سطحی[10] نیز می‌توان به طرح واره‌های شباهتی مدل میان مقیاس نسخه ۵ [11] و شباهتی اِتا[12] و برای تابش

1 Ensemble

2 Ferrire
3 Planetary Boundary layer
4 Youngstown State University (YSU)
5 Mellor-Yamada- Janjic(MYJ)
6 Betts-Miller-Janjic (BMJ)
7Land Surface
8 Noah land surface model (LSM)
9 MM5 5-layer LSM
10 Surface Layer
11 MM5 similarity
12 Eta similarity

جدول ۲. جمع‌بندی پارامترهای آماری بارش تجمعی ۲۴ ساعته برای آستانه‌های بارش ۱۰ میلی‌متر(۰-۱۰)، ۵۰ میلی‌متر (۱۰-۵۰) و بیشتر از ۵۰ میلی‌متر حاصل از پیش‌بینی ۷۲ ساعته (تاریخ شروع پیش‌بینی ۲۳ - ۰۳ - ۲۰۱۹) سامانه همادی کار حاضر و ایستگاه‌های استان‌های مازندران، گلستان، لرستان و خوزستان (قادر و همکاران [۲۹])

Table 2. Results of the statistical parameters of the 10 meters level wind field and the temperature at 2 meters level resulted from the ensemble system (ensemble mean) for a number of synoptic stations (54 stations) and some dates (Ghader et al. [29])

مدل و آستانه بارش	تاریخ شروع سیکل پیش‌بینی	بازه پیش‌بینی (ساعت)	اریبی	نسبت هشدار کاذب	نرخ موفقیت	شاخص بحرانی قابل قبول	نرخ هشدار کاذب	نسبت صحیح
مدل میان مقیاس همادی(۰-۱۰)	۲۰۱۹-۳-۲۳	۷۲	۲/۳۶	۰/۵۸	۱/۰۰	۰/۴۲	۰/۵۱	۰/۶۳
مدل میان مقیاس همادی (۱۰-۵۰)	۲۰۱۹-۳-۲۳	۷۲	۰/۵۲	۰/۳۱	۰/۳۵	۰/۳۱	۰/۵۲	۰/۵۱
مدل میان مقیاس همادی (بیشتر از ۵۰)	۲۰۱۹-۳-۲۳	۷۲	۰/۳۳	۰/۵۰	۰/۱۷	۰/۱۴	۰/۰۲	۰/۸۸

جدول ۳. مشابه جدول ۲ برای عضو کنترل مدل پیش‌بینی جهانی و میانگین همادی مدل مذکور (قادر و همکاران [۲۹])

Table 3. Similar to Table 2 but for the GFS global model including control and ensemble mean (Ghader et al. [29])

مدل و آستانه بارش	تاریخ شروع سیکل پیش‌بینی	بازه پیش‌بینی (ساعت)	اریبی	نسبت هشدار کاذب	نرخ موفقیت	شاخص بحرانی قابل قبول	نرخ هشدار کاذب	نسبت صحیح
مدل پیش‌بینی جهانی (۰-۱۰۰)	۲۰۱۹-۳-۲۳	۷۲	۲/۰۰	۰/۶۴	۰/۷۱	۰/۳۱	۰/۴۹	۰/۵۷
مدل پیش‌بینی جهانی (۱۰-۵۰)	۲۰۱۹-۳-۲۳	۷۲	۰/۶۵	۰/۴۵	۰/۳۵	۰/۲۸	۰/۴۵	۰/۴۳
مدل پیش‌بینی جهانی (بیشتر از ۵۰)	۲۰۱۹-۳-۲۳	۷۲	۰/۵۰	۱/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۷	۰/۸۲
میانگین همادی مدل پیش‌بینی جهانی (۰-۱۰۰)	۲۰۱۹-۳-۲۳	۷۲	۱/۷۱	۰/۵۸	۰/۷۱	۰/۳۶	۰/۳۸	۰/۶۵
میانگین همادی مدل پیش‌بینی جهانی (۱۰-۵۰)	۲۰۱۹-۳-۲۳	۷۲	۰/۸۷	۰/۳۷	۰/۵۵	۰/۴۱	۰/۵۰	۰/۵۳
میانگین همادی مدل پیش‌بینی جهانی (بیشتر از ۵۰)	۲۰۱۹-۳-۲۳	۷۲	۰/۰۰	-	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۸۸

موج بلند[1] می‌توان به طرحواره تابش طول موج بلند و برای تابش موج کوتاه[2] نیز می‌توان به طرحواره دادهی آ[3] اشاره نمود. در کار حاضر از پنج پیکربندی فیزیکی مشخص با ایجاد پریشیدگی در شرایط اولیه استفاده شده‌است به طوری که مجموع اعضای سامانه ترکیبی از فیزیک‌های متفاوت و شرایط اولیه متفاوت است. در اینجا پیش‌بینی سامانه همادی با ۲۵ عضو انجام شده‌است که شامل پنج پیکربندی فیزیکی مدل همراه با چهار پریشیدگی مثبت و منفی برای هر یک از آنها می باشد که در مجموع ۲۵ عضو را تشکیل می‌دهند. برای تامین شرایط اولیه و مرزی سامانه نیز از داده‌های مدل جهانی پیش‌بینی[4] با تفکیک افقی نیم درجه استفاده شده‌است. بعلاوه همان‌گونه که اشاره شد محاسبات کار حاضر بر اساس خروجی‌های سامانه همادی که همه روزه مورد استفاده قرار می‌گیرد و مشخصات آن در مرجع [۲۹] ذکر شده، انجام شده‌اند. لازم به ذکر است که در کار مذکور مواردی همچون انجام آزمون‌های صحت‌سنجی و تحلیل حساسیت به موارد متفاوت از جمله تفکیک‌های افقی و قائم به انجام رسیده‌اند و البته گزارش همه آنها خارج از حوصله کار حاضر می‌باشد.

بررسی عملکرد سامانه پیش‌بینی به صورت کمی در جدول ۱

1 Long wave Radiation
2 Shortwave Radiation
3 Dudhia
4 Global Forecast System (GFS)

نشان داده‌شده‌است. نتایج مربوط به پارامترهای آماری حاصل از میانگین پیش‌بینی همادی برای تعدادی از ایستگاه‌های مشاهداتی و برای میدان باد سطحی و دمای تراز ۲ متری در چند تاریخ منتخب انجام‌شده‌است. پارامترهای آماری مورد استفاده شامل ضریب همبستگی[1]، جذر مربعات میانگین خطا[2] برای میدان باد سطحی در تراز ۱۰ متر، اندازه مؤلفه افقی باد شرق سو و شمال سوی تراز ۱۰ متری و همچنین میدان دما در تراز ۲ متری ارائه شده‌است. مقدار ضریب همبستگی و همچنین جذر مربعات میانگین خطا با مقادیر کم بسیار قابل توجه هستند که عملکرد مناسب سامانه همادی مذکور را به نمایش می‌گذارد. ارزیابی‌های سامانه فوق توسط قادر و همکاران [۲۹, ۳۰] ارائه شده‌است.

در ادامه به صورت موردی به ارائه نتایج سامانه پریشیدگی-فیزیکی شامل ۲۵ عضو (۵ پیکربندی فیزیکی و ۴ پریشیدگی برای هر عضو شامل ۲ مثبت و ۲ منفی) برای پیش‌بینی بارش می‌پردازیم. جدول ۲ پارامترهای آماری را برای پیش‌بینی ۷۲ ساعته بارش تجمعی ۲۴ ساعته حاصل از سامانه همادی مدل میان مقیاس و برای آستانه‌های بارش ۱۰ میلی‌متر، ۵۰ میلی‌متر و بیشتر از ۵۰ میلی‌متر برای تاریخ ۶ فروردین ۱۳۹۸ (۲۰۱۹/۳/۲۶) برای ایستگاه‌های استان‌هایی که تحت تاثیر سامانه بارشی بوده‌اند، ارائه می‌کند. برای ایجاد امکان مقایسه جدول ۳ پارامترهای آماری حاصل از عضو کنترل مدل جهانی پیش‌بینی و همچنین میانگین همادی مدل مذکور برای همین تاریخ ارائه می‌کند. می‌توان عملکرد مناسب‌تر سامانه همادی کار حاضر را در مقایسه با نتایج حاصل از مدل جهانی پیش‌بینی و به ویژه برای آستانه بارش بیشتر از ۵۰ میلی‌متر مشاهده نمود. برای انجام ارزیابی‌ها از سنجه‌های آماری پیوسته و گسسته همچون اریبی[3]، جذر میانگین مربعات خطا، ضریب همبستگی، نسبت صحیح[4]، شاخص بحرانی قابل قبول[5]، نسبت هشدار کاذب[6]، نرخ موفقیت[7] و نرخ هشدار کاذب[8] استفاده شده‌است. توضیحات مربوط به هر یک از این سنجه‌ها توسط ویلکس [۲۹, ۳۰] ارائه شده‌است.

1 Correlation Coefficient (CORR)
2 Root Mean Square Error (RMSE)
3 Bias (B)
4 proportion correct (PC)
5 Threat Score (TS)
6 False Alarm Ratio (FAR)
7 Hit Rate (H)
8 False Alarm Rate (F)

۲-۴- حوزه محاسباتی

حوزه محاسباتی کار حاضر محدوده‌ای شامل خاورمیانه و ایران را در بر می‌گیرد. این حوزه محاسباتی از ۲ شبکه تودرتو (لانه‌ای) با فواصل شبکه‌ای افقی ۲۷ و ۹ کیلومتر همراه با ۴۹ تراز قائم تشکیل شده‌است. حوزه مذکور در شکل ۱ نشان داده شده‌است. در کار حاضر برای تحلیل سامانه‌های همدیدی و تشخیص چگونگی شکل‌گیری توربولانس هوای صاف از نقشه‌های هر دو شبکه استفاده شده‌است.

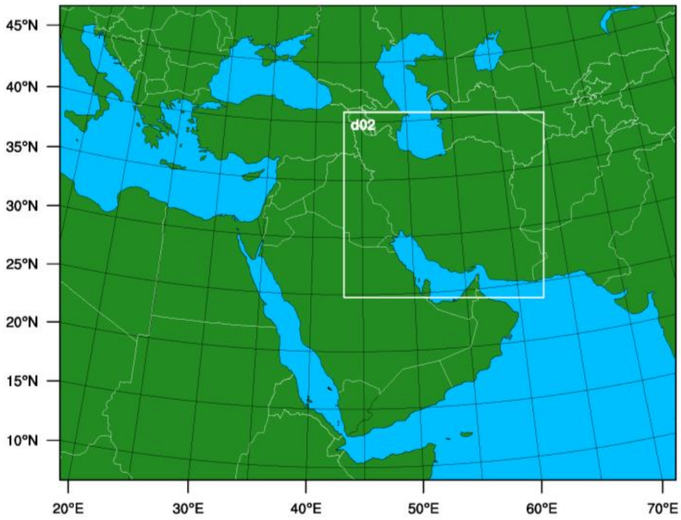
۵- مطالعه موردی

۱-۵- شرح رویداد اول

گزارش پروازهای عبوری نواحی شرق (تا حدودی)، جنوب شرق و بخشهایی از جنوب کشور (سکتور ۵ و ۶) در بعد از ظهر پنجشنبه مورخه ۲۴ بهمن ۹۸ تا ساعات اولیه شب حاکی از وجود توربولانس هوای صاف سبک و سبک تا متوسط و در برخی مناطق متوسط تا شدید بوده که بعضاً منجر به درخواست تغییر سطح پروازی از سوی خلبان شده‌است. توربولانس مذکور، آسمان استان‌های فارس، هرمزگان، سیستان و بلوچستان، کرمان و جنوب یزد را در برگفته و سطوح پروازی ۲۸ تا ۴۰ هزار پایی را تحت تاثیر خود قرار داده‌است. در ادامه نقشه‌های پیش‌بینی وضعیت جوی سطوح مختلف طی ساعات پایانی این روز آورده‌شده‌است.

۱-۱-۵- تفسیر همدیدی

برای مطالعه توربولانس هوای صاف ابتدا الگوی همدیدی جو برای منطقه خاورمیانه مورد بررسی قرار می‌گیرد. نقشه‌های پیش‌بینی مورد استفاده مربوط به برونداد مدل برای ساعت ۱۲ به وقت هم آهنگ جهانی ۱۳ فوریه ۲۰۲۰ میلادی (۲۴ بهمن ۱۳۹۸) است. با استفاده از نقشه ۵۰۰ هکتو پاسکال مسیر حرکت سامانه‌های جوی تشخیص داده می‌شود که در صورت استفاده همزمان از نقشه رطوبت نسبی ترازهای ۸۰۰، ۵۰۰ و ۳۰۰ هکتو پاسکال نیز امکان تشخیص رطوبت سامانه جوی عبوری فراهم می‌شود. با استفاده از نقشه شاخص ناپایداری جوی نحوه حرکات قائم نیز مشخص شده و از احتمال وقوع ابرهای همرفتی و جریانات صعودی هوا نیز مطلع خواهیم شد. حال در صورت داشتن سرعت باد در سطوح پروازی مختلف امکان اظهار نظر در خصوص احتمال وقوع توربولانس هوای صاف وجود دارد. این



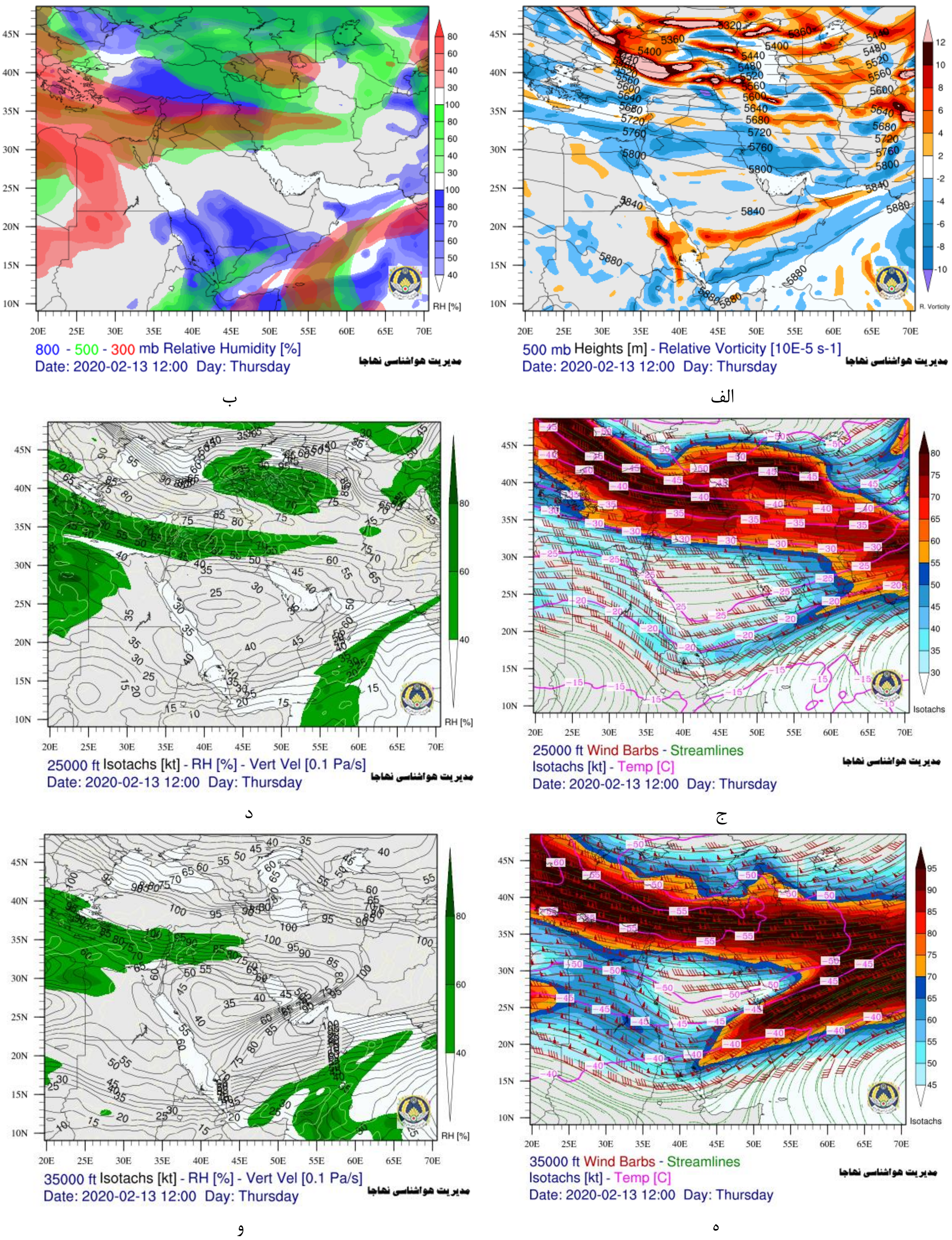
شکل ۱. نمایی از حوزه محاسباتی مدل میان مقیاس در کار حاضر.

Fig. 1. Domains used for the WRF model in the present work

روش تخمین توربولانس هوای صاف با توجه به آگاهی از تغییرات دما، رطوبت و سرعت باد در امتداد افق و قائم جو به نوعی تجربی بوده و البته با شاخص های مطرح شده نیز همخوانی دارد. بر این اساس در ادامه ابتدا نقشه‌های کانتور تراز ۵۰۰ هکتو پاسکال، رطوبت نسبی ترازهای ۸۰۰، ۵۰۰ و ۳۰۰ هکتوپاسکالی، میدان باد و به همراه دما برای سطح پروازی ۲۵ هزار پایی و رطوبت نسبی برحسب درصد همراه خطوط هم تندی باد سطح پروازی ۲۵ هزار پایی و شاخص ناپایداری جوی آورده شده و سپس به بررسی شاخص شدت آشفتگی می‌پردازیم.

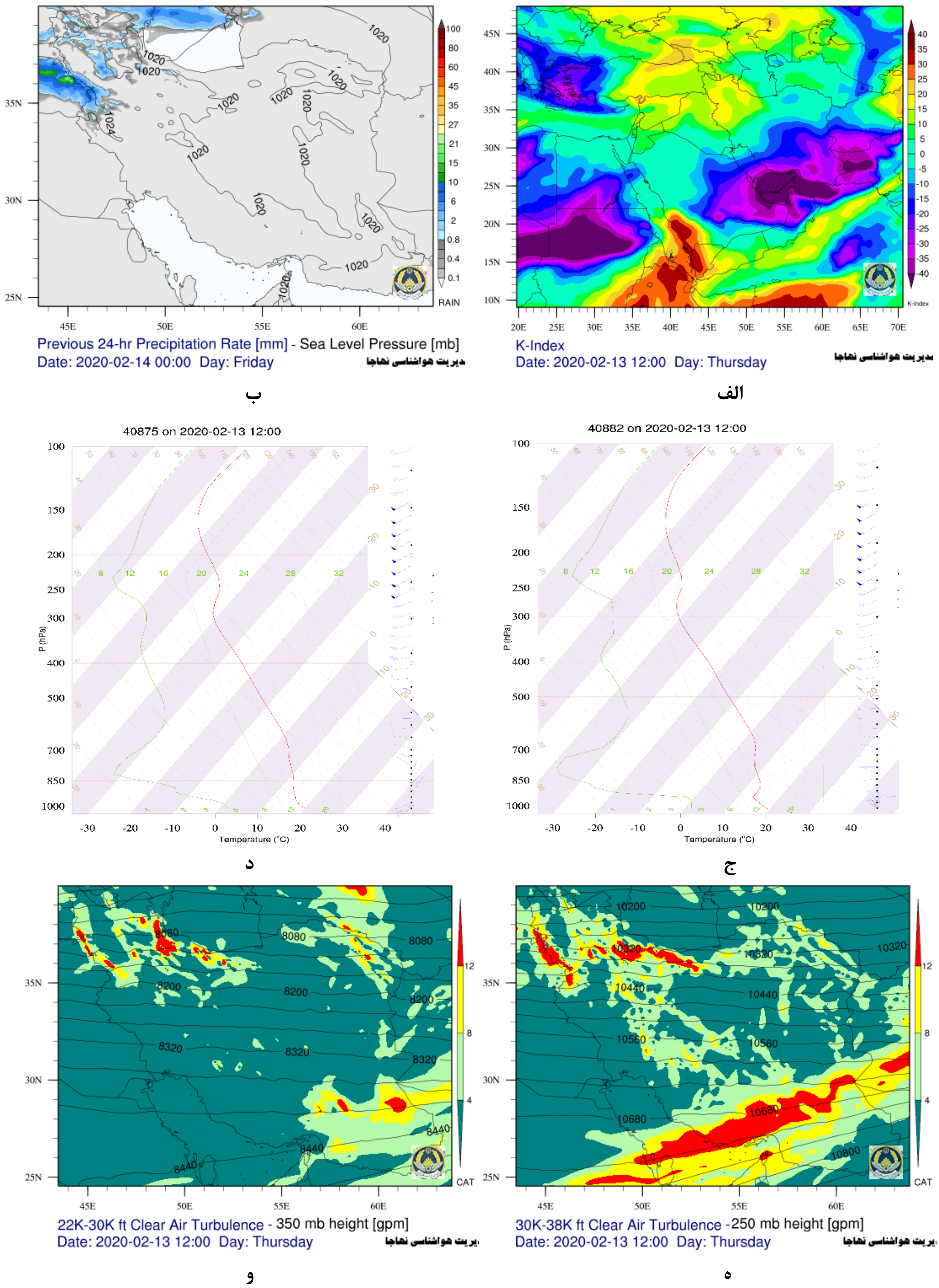
در شکل ۲ (الف) پیش‌بینی کانتور تراز ۵۰۰ هکتو پاسکال به همراه تاوایی نسبی نشان داده‌شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود موج کم ارتفاعی از نیمه شمالی کشور در حال عبور بوده که فرود موج آن نواحی شمال غرب، شمال و بخش‌هایی از مرکز کشور را تحت تاثیر قرارداده‌است. تاوایی نسبی مثبت نیز که با رنگ قرمز نشان داده‌شده‌است با این فرود موج همراهی می‌کند. بخش‌های جنوب غرب، جنوب و جنوب شرق نیز با تاوایی منفی (رنگ آبی) شاهد امواج مداری می‌باشد. خطوط کانتور در نقشه ۵۰۰ هکتو پاسکال به نوعی سمت باد را نشان داده و از طرفی فشردگی این خطوط نیز گویای شدت تندی باد هستند. حال با استفاده از رابطه‌های (۴) و (۵) مشاهده می‌شود سامانه جوی ورودی از شمال غرب کشور دارای سرعت باد زیادی در این نواحی بوده که خود نشان‌دهنده تغییرات مولفه های افقی باد در این راستاها می‌باشد. از طرفی برای نواحی جنوبی در این ارتفاع تغییر شکل چینشی و کششی زیادی مشاهده نمی‌شود که با افزایش ارتفاع و همانطور که در نقشه های ۲۵ و ۳۵ هزار پایی تغییرات مولفه های افقی باد در راستای افق مشاهده شده و این تغییر شکل‌ها چینشی و کششی بهتر دیده می‌شود. شکل ۲ (ب) نیز مربوط به رطوبت نسبی ترازهای ۸۰۰، ۵۰۰ و ۳۰۰ هکتو پاسکالی است. همانطور که ملاحظه می‌شود برای نواحی جنوبی، جنوب شرقی و برخی مناطق شرق کشور ابرناکی خاصی متصور نمی‌باشد. شکل ۲ (ج) مربوط به میدان باد و به همراه دما برای سطح پروازی ۲۵ هزار پایی است. همانطور که مشاهده می‌شود رودبادی درنیمه شمالی کشور وجود دارد. مرکز این رودباد بر روی دریای سیاه و ترکیه قرار داشته که تا نواحی شمال غرب و غرب کشور نیز کشیده‌شده‌است. همانطور که ملاحظه می‌شود با حرکت از نیمه شمالی به سمت نیمه جنوبی کشور شاهد افزایش دما و کاهش سرعت باد در مناطق جنوب غرب، جنوب و خلیج فارس هستیم که حاکی از چینش افقی باد در این سطح پروازی و احتمال وقوع توربولانس جوی است. شکل ۲ (د) رطوبت نسبی برحسب درصد همراه خطوط هم تندی باد سطح پروازی ۲۵ هزار پایی را نشان می‌دهد. این شکل نیز گویای عدم وجود ابرناکی خاص و کاهش تندی باد برای نواحی جنوب غرب، جنوب و جنوب شرق کشور است.

شکل ۲ (ه – ز) نیز مانند دو شکل قبلی بوده با این تفاوت که برای



شکل ۲. پیش‌بینی الف) تاوایی نسبی به همراه کانتور تراز ۵۰۰ هکتو پاسکال و ب) رطوبت نسبی ترازهای ۸۰۰، ۵۰۰ و ۳۰۰ هکتو پاسکالی و ج) میدان باد به همراه خطوط هم دما سطح پروازی ۲۵ هزار پایی و د) خطوط هم تندی، رطوبت نسبی و سرعت قائم سطح پروازی ۲۵ هزار پایی و ه) میدان باد به همراه خطوط هم دما سطح پروازی ۳۵ هزار پایی و و) خطوط هم تندی، رطوبت نسبی و سرعت قائم سطح پروازی ۳۵ هزار پایی برای مورخه ۱۳ فوریه ۲۰۲۰ ساعت ۱۲ به وقت هم‌آهنگ جهانی

Fig. 2. Prediction of a) relative vorticity at 500 hPa level b) relative humidity at 800, 500 and 300 hPa levels c) Wind barbs and stramlines at 25000 ft level d) relative humidity and vertical velocity at 25000 ft level e) relative humidity and vertical .velocity at 35000 ft level, at 12 UTC on February 13, 2020



شکل۳. پیش‌بینی الف) شاخص ناپایداری و ب) بارش تجمعی ۲۴ ساعته پنج شنبه تا صبح جمعه به همراه خطوط هم فشار تصحیح شده به سطح دریا آزاد ج) نقشه نمایه قائم دما کیش د) نقشه نمایه قائم دما بندر عباس، ه) توربولانس هوای صاف مابین سطوح پروازی ۲۲ تا ۳۰ هزار پایی و) توربولانس هوای صاف مابین سطوح پروازی ۳۰ تا ۳۸ هزار پایی و برای مورخه ۱۳ فوریه ۲۰۲۰ ساعت ۱۲ به وقت هم‌آهنگ جهانی.

Fig. 3. Prediction of a) K-Index b) 24 hour accumulated precipitation c) Skew-T at Kish d) Skew-T at Bandar Abbas e) clear air turbulence at 22K-30K f) clear air turbulence at 30K-38K, at 12 UTC on February 13, 2020.

سطح پروازی ۳۵ هزار پایی می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود مرکز رودباد نیمه شمالی کشور و بخش‌هایی از شرق و جنوب شرق را دربرگرفته که خود حاکی از چینش قابل ملاحظه باد هم در راستای قائم و هم در این سطح پروازی برای مناطق جنوبی کشور است.

در شکل ۳ (الف) شاخص ناپایداری جوی نشان داده‌شده‌است. با توجه به اینکه شاخص ناپایداری به نوعی گویای فعالیت همرفتی در جو می‌باشد، همانطور که مشاهده می‌شود در نواحی جنوب غرب، جنوب و جنوب شرق کشور این شاخص منفی بوده و منجر به عدم رشد ابرهای کومه‌ای خواهد در این مناطق خواهدشد.

با توجه به اینکه در کار حاضر توربولانس هوای صاف مورد بررسی قرار گرفته‌است لازم است مناطقی از کشور که طی این مدت زمانی شاهد عبور سامانه های بارشی و ابرناکی بوده‌است مشخص شود در همین راستا در شکل ۳ (ب) نیز بارش ۲۴ ساعته شبانه روز پنج‌شنبه است. همانطور که ملاحظه می‌شود با توجه به افزایش مقدار بارش تجمعی شبانه روزی از رنگ خاکستری به رنگ قرمز سامانه بارشی در حال عبور برای نواحی شمالی، شمال غرب و بخش‌هایی از غرب بارش‌هایی را به همراه داشته که برای نواحی شمال غرب و نواحی مرزی غرب این بارش‌ها از شدت بیشتری برخوردار بوده‌است و سایر مناطق کشور در طی این مدت بارشی نداشته‌است. شکل‌های ۳ (ج -د) نقشه نمایه قائم دما[1] شهرهای کیش و بندرعباس است. همانطور که ملاحظه می‌شود بین ارتفاع ۳۰۰ تا ۲۰۰ هکتو پاسکالی شاهد تغییراتی در تندی باد و همچنین نمایه قائم دما هستیم. این چینش قائم باد و دما نیز گویای وجود توربولانس‌هایی برای هواپیماهای عبوری از این ناحیه است. در ادامه پیش‌بینی توربولانس هوای صاف در مناطق شرق، جنوب شرق و جنوب کشور با استفاده از شاخص الرود و ناپ [۱۵] آورده‌شده‌است.

۲-۱-۵- پیش‌بینی صادرشده

با توجه به گزارش خلبانان، اهمیت پروازی لایه‌های پروازی ۲۲ تا ۳۰ و ۳۰ تا ۳۸ هزارپایی و کاربرد عملیاتی این لایه‌های پروازی جهت پیش‌بینی توربولانس هوای صاف بر روی منطقه ایران در سامانه فوق الذکر با استفاده از شاخص مطرح‌شده الرود و ناپ [۱۵] توربولانس هوای صاف برای این لایه‌ای پروازی محاسبه شده‌است. همانطور که در شکل ۳ (ه-و) مشاهده می‌شود توربولانس هوای صاف برای مناطق جنوب شرق، جنوب و جنوب غرب وجود دارد. البته با افزایش ارتفاع پروازی این توربولانس شدیدتر شده و از توربولانس سبک تا متوسط به توربولانس متوسط تا شدید رسیده‌است. در این مواقع جهت برنامه ریزی پروازی به خلبان پیشنهاد تغییر مسیر یا کاهش ارتفاع در این مناطق داده می‌شود.

۲-۵- شرح رویداد دوم

گزارش پروازهای عبوری مسیر کرمان-چابهار (ناحیه‌ای مابین سکتورهای ۴، ۵ و ۶) سه‌شنبه مورخه ۲۳ اردیبهشت ۹۹ حاکی از وجود توربولانس هوای صاف سبک و سبک تا متوسط و در برخی مناطق متوسط تا شدید بوده‌است. این توربولانس بیشتر آسمان استان‌های کرمان، شمال هرمزگان و جنوب یزد را تحت تاثیر خود قرار داده‌است. در ادامه نقشه‌های همدیدی پیش‌بینی وضعیت جوی و توربولانس هوای صاف برای سطوح مختلف پروازی و طی این ساعات آورده‌شده‌است.

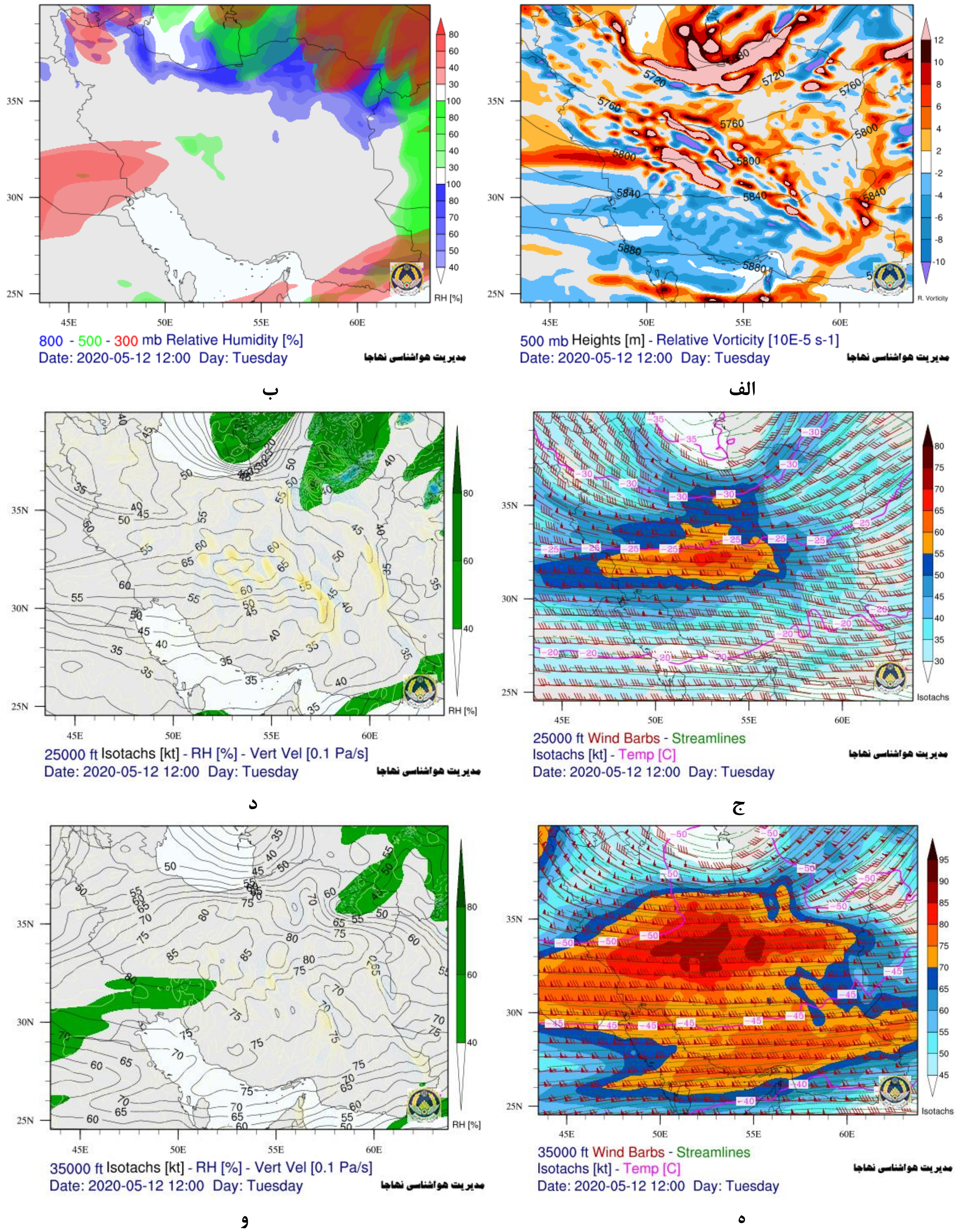
۱-۲-۵- تفسیر همدیدی

برای بررسی توربولانس هوای صاف ابتدا الگوی همدیدی جو و برای منطقه خاورمیانه را مورد بررسی قرارخواهیم‌داد. نقشه‌های پیش‌بینی مورد استفاده نیز مربوط به برونداد مدل برای ساعت ۱۲ به وقت هم آهنگ جهانی ۱۲ می ۲۰۲۰ میلادی (۲۳ اردیبهشت ۱۳۹۹) است.

در شکل ۴ (الف) پیش‌بینی کانتور تراز ۵۰۰ هکتو پاسکال به همراه تاوایی نسبی این سطح نشان داده‌شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود موج کم ارتفاعی در حال عبور بوده که زبانه فرود موج آن تا نواحی مرکزی کشور کشیده‌شده‌است. از طرفی زبانه کم ارتفاع کوچکی نیز نواحی کرمان را تحت تاثیر خود قرارداده‌است. تاوایی نسبی مثبت نیز که با رنگ قرمز و صورتی با این فرود موج همراهی می‌کند.

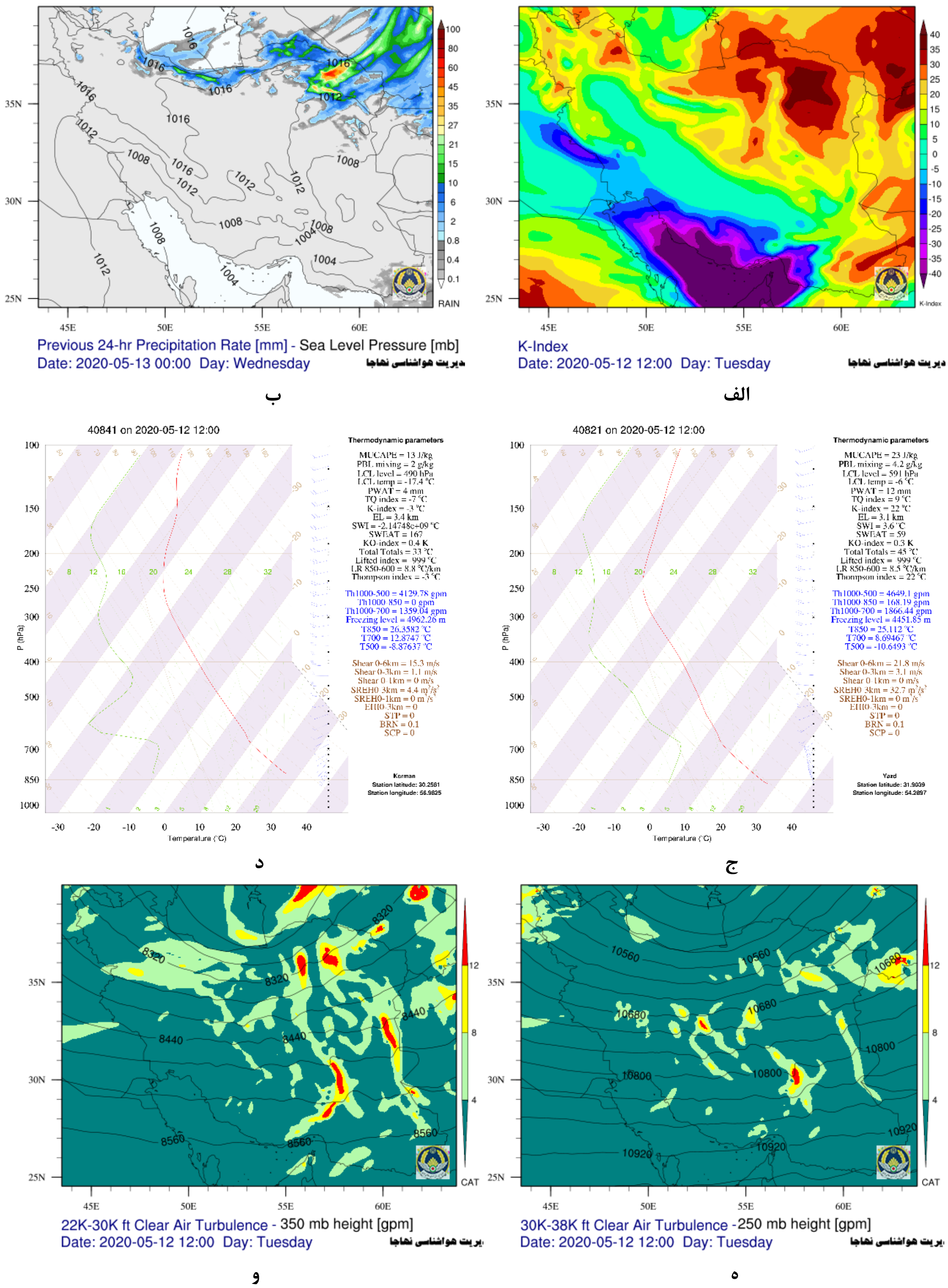
با استفاده از رابطه‌های (۴) و (۵) مشاهده می‌شود سامانه جوی در حال عبور دارای سرعت باد زیادی در نواحی مرکزی کشور بوده که سبب تغییراتی در مولفه‌های افقی باد در امتداد افقی شده و تغییر شکل چینشی و کششی را برای این نواحی شاهد خواهیم بود.

1 Skew-T



شکل ۴. پیش‌بینی الف) تاوایی نسبی به همراه کانتور تراز ۵۰۰ هکتو پاسکال و ب) رطوبت نسبی ترازهای ۸۰۰، ۵۰۰ و ۳۰۰ هکتو پاسکالی و ج) میدان باد به همراه خطوط هم دما سطح پروازی ۲۵ هزار پایی و د) خطوط هم تندی، رطوبت نسبی و سرعت قائم سطح پروازی ۲۵ هزار پایی و ه) میدان باد به همراه خطوط هم دما سطح پروازی ۳۵ هزار پایی و و) خطوط هم تندی، رطوبت نسبی و سرعت قائم سطح پروازی ۳۵ هزار پایی برای مورخه ۱۲ می ۲۰۲۰ ساعت ۱۲ به وقت هم‌آهنگ جهانی.

Fig. 4. Prediction of a) relative vorticity at 500 hPa level b) relative humidity at 800, 500 and 300 hPa levels c) Wind barbs and stramlines at 25000 ft level d) relative humidity and vertical velocity at 25000 ft level e) relative humidity and vertical velocity at 35000 ft level, at 12 UTC on May 12, 2020.



شکل۵. پیش‌بینی الف) شاخص ناپایداری و ب) بارش تجمعی ۲۴ ساعته سه‌شنبه تا صبح چهارشنبه به همراه خطوط هم فشار تصحیح شده به سطح دریا آزاد ج) نقشه نمایه قائم دما یزد، د) نقشه نمایه قائم دما کرمان ه) توربولانس هوای صاف مابین سطوح پروازی ۲۲ تا ۳۰ هزار پایی و) توربولانس هوای صاف مابین سطوح پروازی ۳۰ تا ۳۸ هزار پایی و برای مورخه ۱۲ می ۲۰۲۰ ساعت ۱۲ به وقت هم‌آهنگ جهانی.

Fig. 5. Prediction of a) K-Index b) 24 hour accumulated precipitation c) Skew-T at Yazd d) Skew-T at Kerman e) clear air turbulence at 22K-30K f) clear air turbulence at 30K-38K, at 12 UTC on May 12, 2020.

شکل ۴ (ب) نیز مربوط به رطوبت نسبی ترازهای ۸۰۰، ۵۰۰ و ۳۰۰ هکتوپاسکالی است. همانطور که ملاحظه می‌شود برای نواحی مرکزی کشور ابرناکی خاصی متصور نمی‌باشد. شکل ۲ (ج) مربوط به میدان باد و به همراه دما برای سطح پروازی ۲۵ هزارپایی است. همانطور که مشاهده می‌شود رودبادی درنواحی مرکزی وجود داشته که مرکز آن از غرب تا بخش‌های مرکزی کشور کشیده‌شده‌است. از طرفی فرود موج دمایی نیز همزمان بر روی کشور مشاهده می‌شود. شکل ۴ (د) رطوبت نسبی برحسب درصد، خطوط هم سرعت باد و سرعت قائم بر حسب پاسکال بر ثانیه (با خطوط ممتد قرمز و آبی) برای سطح پروازی ۲۵ هزار پایی را نشان می‌دهد. این شکل نیز گویای عدم وجود ابرناکی خاص است. از طرفی بر خلاف رویداد قبلی در این مورد افزایش تغییرات در سرعت قائم و برای نواحی مرکزی کشور مشهود بوده که نشان‌دهنده چینش قائم سرعت باد نیز می‌باشد.

شکل ۴ (ه - ز) نیز مانند دو شکل قبلی بوده با این تفاوت که برای سطح پروازی ۳۵ هزارپایی می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود رودباد این سطح به دو نیمه شمالی و جنوبی تقسیم شده که نیمه شمالی آن نواحی مرکزی و نیمه جنوبی آن نواحی جنوی کشور را تحت تاثیر خود قرار داده که مرکز رودباد نواحی مرکزی کشور دارای سرعت باد بیشتری است که حاکی از چینش قابل ملاحظه باد برای نواحی مرکزی و جنوبی کشور است.

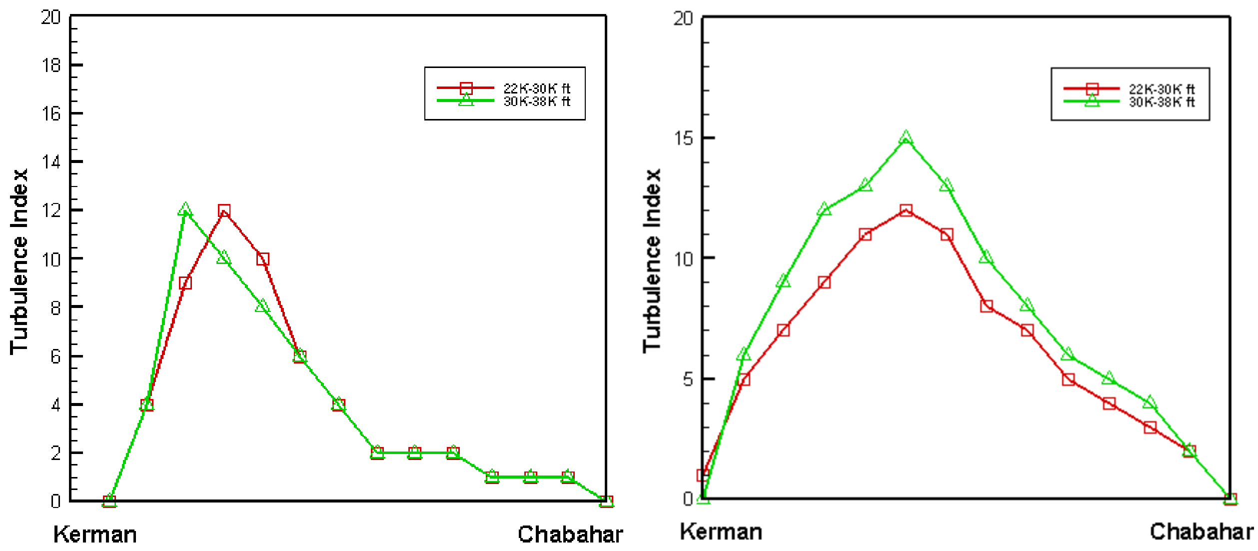
در شکل ۵ (الف) شاخص ناپایداری جوی نشان داده‌شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود برای نواحی مرکزی کشور احتمال تشکیل ابرهای همرفتی وجود ندارد. شکل ۵ (ب) نیز بارش ۲۴ ساعته شبانه روز سه‌شنبه است. همانطور که ملاحظه می‌شود طی این مدت شاهد عبور سامانه های بارشی از نواحی شمال و شمال شرقی کشور و ابرناکی این سامانه نیز برای این نواحی می باشد. با توجه به افزایش مقدار بارش تجمعی شبانه روزی از رنگ خاکستری به رنگ قرمز سامانه بارشی برای نواحی شمالی، شمال شرقی بارش‌هایی را به همراه داشته که برای برخی نواحی شمال شرق این بارش‌ها از شدت بیشتری برخوردار بوده‌است و نواحی مرکزی کشور بارش خاصی مشاهده نمی‌شود. شکل‌های ۵ (ج -د) نقشه نمایه قائم دما شهرهای یزد و کرمان است. همانطور که ملاحظه می‌شود بین ارتفاع ۳۰۰ تا ۲۰۰ هکتو پاسکالی شاهد افزایش سرعت باد هستیم. همانطور که در شکل ۵ (ه-و) مشاهده می‌شود توربولانس هوای صاف برای نواحی مرکزی (استان‌های کرمان، یزد، شمال هرمزگان و غرب سیستان بلوچستان) وجود دارد. البته براساس پیش‌بینی صورت‌گرفته وسعت ناحیه تحت پوشش این توربولانس با افزایش ارتفاع پروازی کم شده ولی شدت آن تغییری نکرده‌است.

۶- نتیجه‌گیری

الگوهای اولیه پیش‌بینی توربولانس هوای صاف بر اساس شواهد تجربی و پویایی جو[1] بوده که از آن جمله می‌توان بکارگیری شاخص ریچاردسون در دهه ۶۰ میلادی برای پیش‌بینی و تشخیص این توربولانس اشاره کرد. پس از آن رویکردهای جنبشی- پویایی[2] و با هدف بهبود پیش‌بینی و تاثیر امواج و ناپایداری‌های جوی در تولید این توربولانس از دهه ۹۰ میلادی و با تاکید بر شاخص الرود و ناپ ادامه پیدا کرد. در چند سال اخیر نیز استفاده از روش‌های آماری و تشخیص چندگانه حاصل از روش‌های مختلف برای پیش‌بینی توربولانس هوای صاف متداول شده‌است. امروزه این روش با نام راهنمای گرافیکی توربولانس[3] شناخته می‌شود[۲].

در کار حاضر تحلیل تشخیصی به صورت مشاهداتی و پیش‌بینی انجام شده‌است. نقشه‌های مختلف هواشناسی از جمله ۵۰۰ هکتوپاسکال، میدان باد، شاخص ناپایداری جو، نقشه نمایه قائم دما، میزان بارش شبانه روز و همچنین گزارش پرواز برای دو مورد از رویدادهای اتفاق‌افتاده طی فصول زمستان (بهمن ۱۳۹۸) و بهار (اردیبهشت ۱۳۹۹) رسم شده‌است. از نتایج کار حاضر همخوانی گزارش‌های خلبان و پیش‌بینی‌های صادرشده می‌باشد. در شکل ۶ نمودار پیش‌بینی شاخص شدت آشفتگی با استفاده از روش الرود و ناپ [۱۵] در مسیر پروازی کرمان به چابهار برای دو سطح پروازی ۲۲ تا ۳۰ و ۳۰ تا ۳۸ هزارپایی آورده‌شده‌است. همانطور که در شکل ۶ الف مربوط به رویداد اول مطرح ملاحظه می‌شود، با افزایش ارتفاع و در اوایل مسیر بر شدت توربولانس افزوده می‌شود. گزارش خلبان نیز حاکی از وجود توربولانس هوای صاف سبک و سبک تا متوسط و در برخی مناطق متوسط تا شدید بوده که بعضاً منجر به درخواست تغییر سطح پروازی از سوی خلبان شده گویای تشخیص درست شدت توربولانس می‌باشد. شکل ۶ ب نیز به همین ترتیب گویای انطباق

1 Dynamic
2 Kinematic-Dynamical
3 Graphical Turbulence Guidance (GTG)



ب الف

شکل۶: نمودار پیش‌بینی شاخص شدت آشفتگی با استفاده از روش الرود و ناپ [۱۵] برای مسیر پروازی کرمان به چابهار الف) رویداد اول و ب) رویداد دوم.

Fig. 6. Prediction of turbulence index using Ellrod and Knapp [15] method for Kerman-Chabahar flight path a) first case b) second case

گزارش خلبان از مسیر پروازی کرمان به چابهار و توربولانس‌های واقع شده می‌باشد. در رویداد دوم گزارش خلبان نشان‌دهنده وجود توربولانس هوای صاف سبک تا متوسط و در برخی مناطق متوسط تا شدید بوده‌است ولی باتوجه به شدت کمتر این توربولانس نسبت به مورد رویداد اول خلبان تقاضای تغییر سطح پروازی نداشته‌است.

بررسی و تحلیل نتایج حاصله گویای وجود توربولانس هوای صاف با مقیاس سبک تا متوسط در مناطق پروازی یادشده می‌باشد. پیش‌بینی توربولانس هوای صاف نیز بر اساس شاخص الرود و ناپ [۱۵] به صورت عملیاتی انجام شده‌است. این شاخص بر پایه محاسبه چینش قائم باد، تغییر شکل و همگرایی جو مورد استفاده قرار می‌گیرد. بر همین اساس نقشه پیش‌بینی توربولانس هوای صاف برای مناطق مورد مطالعه رسم شده‌است. نتایج حاکی از وجود توربولانس با همان شدت گزارش‌شده در این نواحی بوده که خود گواهی بر عملکرد مناسب سامانه پیش‌بینی همادی و شاخص درنظرگرفته‌شده جهت پیش‌بینی می‌باشد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از نیروی هوایی ارتش جمهوری اسلامی ایران، صنایع قطعات الکترونیک ایران و دانشگاه تهران برای حمایت از کار حاضر قدردانی می‌نمایند.

فهرست علائم

CVG	همگرایی
DSH	تغییر شکل چینشی
DST	تغییر شکل کششی
z	ضخامت بین لایه های فشاری
u	سرعت در راستای محور x
v	سرعت در راستای محور y
DEF	تغییر شکل
TI	شاخص شدت آشفتگی
VWS	چینش قائم باد
T	دما
Td	دمای نقطه شبنم
TDD	اختلاف بین دما و دمای نقطه شبنم

منابع

[1] P. Lester, Turbulence: A new perspective for pilots. Jeppesen Sanderson, 1993.

[2] R. Sharman, T. Lane, Aviation Turbulence. Processes, Detection, Prediction, Springer, 2016.

[3] E. Chambers, Clear air turbulence and civil jet operations, The Aeronautical Journal, 628-613 (1955) (537)59.

[4] J.A. Knox, Possible mechanisms of clear-air turbulence in strongly anticyclonic flows, Monthly weather review, 1259-1251 (1997) (6)125.

[5] J.-H. Kim, H.-Y. Chun, Statistics and possible sources of aviation turbulence over South Korea, Journal of applied meteorology and climatology, 324-311 (2011) (2)50.

[6] D. Colson, Summary of high level turbulence over United States, Monthly Weather Review, 609-605 (1963) (10)91.

[7] J.A. Dutton, H.A. Panofsky, Clear air turbulence: A mystery may be unfolding, Science, (1970) (3920)167 944-937.

[8] D.C. Fritts, C. Bizon, J.A. Werne, C.K. Meyer, Layering accompanying turbulence generation due to shear instability and gravity□wave breaking, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 108(D2003) (8).

[9] P. Kennedy, M. Shapiro, Further encounters with clear air turbulence in research aircraft, Journal of the Atmospheric Sciences, 993-986 (1980) (5)37.

[10] E.E. Baughman, Turbulence with a stable lapse rate, Bulletin of the American Meteorological Society, (8)27 462-459 (1946).

[11] R. Mancuso, R. Endlich, Clear air turbulence frequency as a function of wind shear and deformation, Monthly weather review, 585-581 (1966) (9)94.

[12] W. Roach, On the influence of synoptic development on the production of high level turbulence, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, -413 (1970) (409)96 429.

[13] R. Anderson, J. Gurka, S. Steinmetz, Application of VAS multispectral imagery to aviation forecasting, in: Preprint., 9th Conf. on Weather Forecasting and Analysis, 1982, pp. 234-227.

[14] G.P. Ellrod, Detection of high level turbulence using satellite imagery and upper air data, NOAA Technical Memorandum NESDIS 10, U.S. Department of Commerce, Washington, DC., 1985.

[15] G.P. Ellrod, D.I. Knapp, An objective clear-air turbulence forecasting technique: Verification and operational use, Weather and Forecasting, 165-150 (1992) (1)7.

[16] S. Petterssen, Weather Analysis and Forecasting. Vol. 1 Motion Motion Systems, McGraw-Hill, 1956.

[17] G.P. Ellrod, J.A. Knox, Improvements to an operational clear-air turbulence diagnostic index by addition of a divergence trend term, Weather and forecasting, (2)25 798-789 (2010).

[18] R. Plougonven, F. Zhang, Internal gravity waves from atmospheric jets and fronts, Reviews of Geophysics, (1)52 76-33 (2014).

[19] J. Vanneste, Balance and spontaneous wave generation in geophysical flows, Annual Review of Fluid Mechanics, 2013) 45).

[20] M. Mirzaei, C. Zülicke, A.R. Mohebalhojeh, F. Ahmadi-Givi, R. Plougonven, Structure, energy, and parameterization of inertia–gravity waves in dry and moist simulations of a baroclinic wave life cycle, Journal of the Atmospheric Sciences, 2414-2390 (2014) (7)71.

[21] J. Wei, F. Zhang, Mesoscale gravity waves in moist baroclinic jet–front systems, Journal of the Atmospheric Sciences, 952-929 (2014) (3)71.

[22] S. Tajbakhsh, A. Aliakbari Bidokhti, M. Azadi, Study of Clear Air Turbulence over Iranian Plato, Journal of Aerospace Science and Technology, Vol. 3(no. (2006) (2 95-87.

[23] M.M. Aryamanesh, S. Gadder, A.A.A. Bidokhti, O.A. choobari4, Prediction of the clear air turbulence over western Iran (Tehran – Ahwaz & Tehran – Ardebil) using the WRF model simulations, in: 19th Iranian Geophysics Conference, Tehran, iran. in Persian, 2020.

[24] R.H. Hopkins, Forecasing Techniques of Clear-Air Turbulence Induding That Associated With Mountain Waves, (1977).

[25] D. Lee, R. Stull, W. Irvine, Clear air turbulence forecasting techniques. Air Force Weather Service Report AFGWC, TN001-79- (REV), 1984.

[26] B. Schwartz, The quantitative use of PIREPs in developing aviation weather guidance products, Weather and Forecasting, 384-372 (1996) (3)11.

[27] W.C. Skamarock, J.B. Klemp, D. J, G.D. O, B.D. M, D.M. G, H. X, W. W, P. J, A description of the advanced research WRF version 3: NCAR/TN+475-STR., 2008.

[28] W. Wang, C. Bruyère, D. M, J. Dudhia, G. D, H. Lin, J. Michalakes, R. S, Z. X, J.D. Beezley, J.L. Coen, M. J, User's Guide for the Advanced Research WRF (ARW) Version 3.6, NCAR., 2014.

[29] S. Ghader, M. Safar, R. JavanNezhad, Forecasting of some meteorological fields using a developed ensemble for the WRF model: case study, in: First International Conference on Numerical Weather and Climate Prediction, Tehran, Iran. in Persian, 2018.

[30] S. Ghader, M. Safar, R. JavanNezhad, Evaluation of members of an ensemble forecasting system developed for the WRF model, in: 19th Iranian Geophysics Conference, Tehran, iran. in Persian, 2020.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

R. JavanNezhad, M. Safar, S. Ghader, Diagnostical and observational analysis of clear air turbulence over the middle east and Iran, Amirkabir J. Mech Eng., 53(7) (2021) 4203-4220.

DOI: 10.22060/mej.2021.18770.6886

این صفحه عمداً خالی است