

## بررسی موردی چگالی هوا و فشار بخار آب سطح زمین روی ایران

محمد مرادی<sup>۱\*</sup>، عباس رنجبر سعادت آبادی<sup>۲</sup>

۱- دانشیار و عضو هیات علمی پژوهشگاه هواشناسی

۲- دانشیار، عضو هیات علمی و رئیس پژوهشگاه هواشناسی

(تاریخ دریافت: ۹۸/۱۱/۲۹، تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۴/۱۷)

### چکیده

در این مطالعه با نگاهی کوتاه به مبانی نظری محاسبه کمیت‌های چگالی و فشار بخار آب، این دو کمیت بطور موردی در سال‌های ۲۰۰۴، ۲۰۰۵ و ۲۰۱۵ برای ۱۸۴ ایستگاه همدیدی هواشناسی محاسبه شد. نتایج نشان داد که متوسط ماهانه، فصلی و سالانه چگالی هوا در سواحل دریای خزر و سواحل جنوبی ایران بیشینه و در ارتفاعات زاگرس و البرز مرکزی کمینه می‌باشد. این شرایط با مبانی نظری مبنی بر کاهش نمائی چگالی با ارتفاع، هماهنگ است. بررسی‌ها نشان داد که متوسط ماهانه، فصلی و سالانه چگالی هوا در سواحل دریای خزر از مقدار متناظر آن در سواحل جنوبی ایران بیشتر است. این شرایط به سبب تغییرات فشار هوا رخ می‌دهد به طوری که در ماه‌های سرد و فصل سرد که پر فشار سرد سبیری توسعه می‌یابد و پشته آن مناطق مختلف ایران را تحت تاثیر قرار می‌دهد، فشار هوا در سواحل دریای خزر بیشتر از سواحل جنوبی ایران افزایش می‌یابد. بنابراین در این شرایط متوسط چگالی هوا در ماه ژانویه و فصل زمستان در سواحل دریای خزر بیشتر از مقادیر متناظر آن در سواحل جنوبی ایران می‌باشد. از بررسی متوسط فشار بخار آب نیز دیده شد که مقادیر متوسط ماهانه فشار بخار آب در سواحل دریای خزر، خلیج فارس و دریای عمان بیشینه و در مناطق کوهستانی کمینه می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** چگالی هوا، فشار بخار آب، رابطه تینتز، معادله کلاوسیوس کلاپیرون.

### مقدمه

که در سال ۱۹۹۱ مجدداً بررسی و بطور جزئی تغییر کرد، بر اساس فشار، دما، نم نسبی و تابعی از غلظت دی اکسید کربن، بنا شده است. یکی از معایب رابطه پیشنهادی کمیت فوق که سبب کاهش کارائی آن در ایستگاه‌های هواشناسی می‌شد، وجود غلظت دی اکسید کربن در آن بود. این کمیت در جو با زمان و مکان تغییر می‌کند و در ایستگاه‌های هواشناسی در دسترس نمی‌باشد. چون هوای خشک، بخار آب و هوای مرطوب مانند گاز ایده‌آل عمل می‌کنند، از این رو در ایستگاه‌های هواشناسی می‌توان یک رابطه کاربردی مناسب ارائه کرد که بر اساس معادله حالت برای هوای مرطوب بنا شده باشد (سلیبی<sup>۴</sup>، ۲۰۱۲).

از آنجائی که چگالی هوا در محاسبه توان باد نقش مهمی دارد، از این رو برای محاسبه چگالی هوا برخی پژوهشگران با در نظر گرفتن شرایط استاندارد، مقدار چگالی را ۱/۲۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر می‌گیرند و برخی نیز از یک رابطه خطی بر حسب ارتفاع استفاده می‌کنند. این رابطه برای ارتفاع‌های زیر

چگالی هوا و فشار بخار آب فراسنج‌هایی هستند که اندازه گیری و نحوه محاسبه آن‌ها از دیرباز مورد توجه پژوهشگران هواشناسی، اقلیم‌شناسی و رشته‌های مختلف مهندسی قرار گرفته است. این پژوهشگران برای محاسبه این کمیت‌ها روابط تجربی مختلفی را به کار می‌بردند. به منظور یکسان سازی این روابط، در سال ۱۹۸۱، کمیته‌ای بنام سی‌آی‌پی‌ام<sup>۱</sup> تشکیل شد و توصیه کرد که برای محاسبه چگالی هوا از فرمول‌هایی استفاده شود که بر اساس ترکیبات هوای خشک و کمیت‌های محیطی مانند فشار هوا، دمای هوا، غلظت دی اکسید کربن و فشار بخار آب بنا شده باشد. این کمیته پیشنهاد کرد که از این پس برای محاسبه چگالی هوا از روابطی استفاده شود که در آن شرایط حاکم بر گازهای غیر ایده‌آل در نظر گرفته شده باشد و برای محاسبه چگالی هوای خشک، موسسه‌ها می‌توانند از روابط تجربی استفاده نمایند (جیاکومو<sup>۲</sup>، ۱۹۸۲ و دیویس<sup>۳</sup>، ۱۹۹۲). معادله پیشنهادی این کمیته برای محاسبه چگالی هوا

1. Comité International des Poids et Mesures  
3. Davis

2. Giacomo  
4. Salby

که در آن  $\phi$  نم نسبی بر حسب درصد و  $p_{sat}$  یک چند جمله‌ای درجه شش بر حسب دما است (ایوانسن<sup>۵</sup>، ۲۰۰۵). هدف از این تحقیق بررسی نحوه محاسبه چگالی هوا و فشار بخار آب در ایستگاه‌هایی است که در آنها کمیت‌های هواشناسی در دسترس است. این مقاله می‌تواند در برآورد انرژی حاصل از میدان باد (ستور<sup>۶</sup>، ۲۰۰۷) مورد توجه قرار گیرد. برای این منظور در ماه‌های ژانویه و ژولای و فصول مختلف در چند حالت موردی فشار بخار آب و چگالی هوا در روی ایران محاسبه شد و سپس نتایج بررسی شد.

### مواد و روش‌ها

در این پژوهش در دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ تغییرات سالانه میانگین ماهانه الگوی فشاری سطح متوسط دریا و ارتفاع تراز میانی جو برای چند نقطه انتخابی در دو ماه ژانویه و ژولای بررسی شد. از بررسی این مقادیر دیده شد که در ژانویه سال ۲۰۰۴ در دو نقطه انتخابی به ترتیب در شمال و جنوب ایران، میانگین فشار نسبت به سال‌های دیگر کمتر است. به‌علاوه در سال ۲۰۰۵ نیز دامنه تغییرات میانگین ماهانه این کمیت‌ها در نقاط فوق در ماه‌های ژانویه و ژولای کاهش یافته است. از این رو میدان چگالی و فشار بخار آب در ماه‌های ژانویه و ژولای این دو سال برای بررسی انتخاب شد. به‌علاوه بطور موردی در عبور سامانه‌های همدیدی در ماه ژانویه سال ۲۰۱۵ نیز میدان چگالی در ترازهای مختلف فشاری محاسبه و بررسی شد. در این پژوهش برای محاسبه چگالی هوا از رابطه زیر استفاده شد (پیکارد<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۰۸):

$$\rho = \frac{P_d}{R_d T} + \frac{P_v}{R_v T} \quad (1)$$

در این معادله  $P_d$  و  $P_v$  به ترتیب فشار بخار آب و فشار هوای خشک بر حسب پاسکال است و ثابت‌های  $R_d = 287.05 \text{ JK}^{-1} \text{ kg}^{-1}$  و  $R_v = 461.9 \text{ JK}^{-1} \text{ kg}^{-1}$  به ترتیب ثابت ویژه گازها برای هوای خشک و بخار آب می‌باشند.  $T$

۵۰۰ متری از دقت مناسبی برخوردار می‌باشد. از جمله این پژوهشگران می‌توان به انتظاری و همکاران (۱۳۹۱) و خسروی و همکاران (۱۳۹۵) اشاره کرد.

انتظاری و همکاران (۱۳۹۱) در ارزیابی پتانسیل انرژی باد و امکان سنجی احداث نیروگاه بادی در سبزوار چگالی هوا را  $1/225$  کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفتند و با استفاده از آن در سبزوار انرژی قابل استحصال را برآورد نمودند. خسروی و همکاران (۱۳۹۵) در بررسی وضعیت انرژی باد در استان خوزستان به منظور استفاده از توربین‌های بادی، با محاسبه چگالی باد از روش رابطه خطی با ارتفاع، نشان دادند که در ایستگاه‌های دزفول، اهواز و آبادان می‌توان توربین‌های بادی نصب کرد.

مجرد و همی (۱۳۹۲) در ارزیابی قابلیت‌های انرژی باد در استان‌های کرمانشاه و کردستان، برای محاسبه چگالی از روابط مختلفی استفاده کردند و نشان دادند که ایستگاه بیجار از ارتفاع تقریبی پنجاه متری (ارتفاع معمول دکل یک توربین بادی) و ایستگاه زرینه اوباتو، از ارتفاع صد متری به بعد برای نصب توربین‌های تجاری به صورت مزرعه بادی مناسب تشخیص داده شدند. آنها برای مناطقی که فقط ارتفاع ایستگاه در دسترس است از رابطه خطی چگالی با ارتفاع استفاده کردند و در مناطقی که فشار و دمای ایستگاه در دسترس بود از معادله حالت برای هوای خشک استفاده نمودند. برای محاسبه فشار بخار آب نیز طی دهه‌های پیش، روابط زیادی ارائه شده است. تیتنز<sup>۱</sup> (۱۹۳۰)، گف و گراچ<sup>۲</sup> (۱۹۴۶) و گف (۱۹۵۷)، از جمله پژوهشگرانی بودند که برای محاسبه فشار بخار آب و فشار بخار اشباع بر اساس شیب خطوط این کمیت‌ها در دماهای مختلف روابطی ارائه کردند که بعدها نیز توسط پژوهشگران دیگر اصلاح یا تایید گردید. از جمله این پژوهشگران می‌توان به فوکوتا<sup>۳</sup> (۲۰۰۳) و مورفی<sup>۴</sup> (۲۰۰۵) اشاره کرد. بیشتر طراحان نرم افزارهای مهندسی برای محاسبه فشار بخار آب و در نتیجه چگالی هوا، از رابطه  $P_v = \phi \times p_{sat}$  استفاده می‌کنند

1. Tetens  
3. Fukuta  
5. Ivansen  
7. Picard

2. Goff and Gratch  
4. Murphy  
6. Sutour

$$P_v(T_d) = 6.11 \exp\left[\frac{A \times (T_d - 273.16)}{T_d - B}\right] \quad (۴)$$

در این رابطه  $T_d$  دمای نقطه شبنم بر حسب کلونین و  $P_v$  فشار بخار آب بر حسب هکتوپاسکال می باشد. مقادیر ضرایب ثابت  $A$  و  $B$  برای دماهای مختلف متفاوت است. در صورتی که دمای نقطه شبنم از ۲۶۳ کلونین کمتر باشد،  $A = 21.8745584$  و  $B = 7.66$  در غیر این صورت مقدار این ضرایب به صورت  $A = 17.2693882$  و  $B = 35.86$  در نظر گرفته می شوند. در رابطه فوق از جانشانی دما به جای دمای نقطه شبنم، می توان فشار بخار اشباع را بدست آورد (بابو، ۱۹۹۶). شایان ذکر است که از معادله کلاوسیوس کلاپیرون نیز می توان فشار بخار آب را بدست آورد (استال، ۲۰۱۱).

### روش شناسی پژوهش

در این مقاله با انتخاب معادله های ۱ و ۴ به ترتیب، چگالی هوا و فشار بخار آب برای سال های ۲۰۰۴ و ۲۰۰۵ و به طور موردی برای ژانویه ۲۰۱۵ محاسبه و بررسی شد. رابطه تیتنز از برای محاسبه فشار بخار اشباع یا فشار بخار آب، از آن جهت انتخاب شد که در سال ۱۹۴۷ بوسیله سازمان هواشناسی جهانی توصیه شد و شکل جدید آن نیز در سال ۱۹۶۳ مجدداً مورد تایید سازمان هواشناسی جهانی قرار گرفت. این رابطه در یک دوره چهل ساله در ایستگاه های هواشناسی مورد استفاده قرار گرفت (سمیعی، ۱۳۶۲).

داده های مورد نیاز محاسبات که در ایستگاه های همدیدی ثبت می شوند، از سازمان هواشناسی کشور گرفته شد. این داده ها در هشت نوبت در روز در بازه زمانی سه ساعته در ۱۸۴ ایستگاه همدیدی هواشناسی دیدبانی شده بود. پس از بررسی کیفی داده ها و اطمینان از نبود خطای فاحش در آن ها، ابتدا فشار بخار آب و سپس چگالی هوا بطور ماهانه و سالانه محاسبه و الگوی این کمیت ها با بکارگیری روش های متداول هواشناسی ایجاد و بررسی شد که برای کاستن از حجم مطالب فقط به ارائه چند شکل کلیدی اکتفا شده است. شکل ۱ موقعیت

دما بر حسب کلونین و  $\rho$  چگالی بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب می باشد (پیکارد و فنگ<sup>۱</sup>، ۲۰۰۲ و ۲۰۰۳).

شایان ذکر است که در برخی ایستگاه ها که ارتفاع ایستگاه و دما در دسترس است ولی فشار ایستگاه ثبت نمی شود، می توان بر اساس دما و ارتفاع ایستگاه از سطح متوسط دریا، مقدار چگالی را از رابطه زیر برآورد نمود (سلیبی، ۱۹۹۶):

$$\rho = \left(\frac{p_0}{R_d T}\right) \exp\left[-\frac{gz}{R_d T}\right] \quad (۲)$$

در این رابطه،  $p_0$  فشار سطح متوسط دریا، ۱۰۱۳۲۵ پاسکال،  $g$  شتاب ثقل، ۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه و  $Z$  ارتفاع بر حسب متر است. یکی دیگر از روش های تجربی برای برآورد چگالی هوا به صورت زیر استفاده می شود (همان منبع):

$$\rho = 1.225 - 0.0001194Z \quad (۳)$$

در این رابطه  $Z$  ارتفاع بر حسب متر از سطح دریا می باشد. از این رابطه زمانی استفاده می شود که فقط ارتفاع ایستگاه در دسترس است.

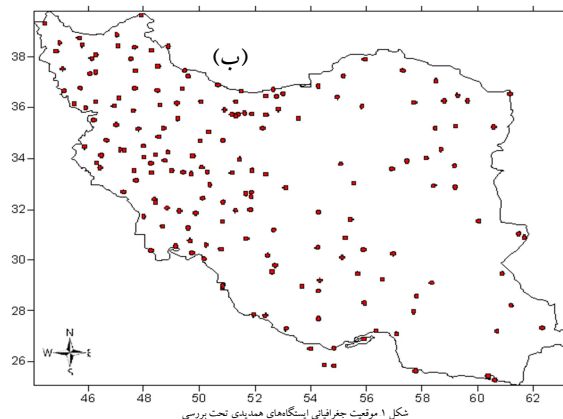
از معادله (۱) دیده می شود که چگالی هوا به دما، فشار بخار آب و فشار هوای خشک بستگی دارد. بررسی ها نشان داده است که در بازه دمائی ۴۰- تا ۴۰+ درجه سلسیوس، فشار بخار آب از ۰/۲ تا ۷۴ هکتوپاسکال و فشار هوای خشک از سطح متوسط دریا تا ارتفاع ۱۶ کیلومتری تقریباً از ۱۰۱۳/۲۵ هکتوپاسکال تا ۱۰۰ هکتوپاسکال تغییر می کند. بنابراین فشار هوای خشک از فشار بخار آب در جو بیشتر است، از این رو جمله اول در معادله ۱ مهمتر از جمله دوم می باشد (سلیبی، ۱۹۹۶). این بحث نشان می دهد که حتی زمانی که دما با ارتفاع تغییر نکند، چون فشار با ارتفاع بطور لگاریتمی کاهش می یابد، بنابراین چگالی هوای خشک نیز با ارتفاع بطور لگاریتمی کاهش می یابد.

در این پژوهش برای محاسبه فشار بخار آب روی سطوح مختلف آب و یخ از رابطه تیتنز به صورت زیر استفاده شد (میورای<sup>۲</sup>، ۱۹۶۷):

1. Picard and Fang  
3. Babu

2. Murray  
4. Stull

جغرافیائی ایستگاه‌های همدیدی هواشناسی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. از این شکل دیده می‌شود که ایستگاه‌ها به جز در استان سیستان و بلوچستان و مناطق کویری، از پراکندگی مناسبی برخوردار می‌باشند. شایان ذکر است که برای بررسی موردی الگوی چگالی هوا در مقیاس مکانی بزرگتر نیز از داده‌های بایگانی NCAR/NCEP با تفکیک افقی ۲/۵ درجه، در یک ناحیه محدود به طول جغرافیائی صفر تا هشتاد درجه شرقی و عرض جغرافیائی ده تا شصت درجه شمالی استفاده شده است. برای ایران از داده‌های مشاهداتی و برای خاورمیانه از داده‌های بازتحلیل استفاده شده است.



کمیت نیز در ارتفاعات البرز مرکزی و به صورت نوار باریکی از زاگرس مرکزی تا غرب استان آذربایجان غربی را در بر گرفته است. این مقادیر کمتر از چهار هکتوپاسکال است. در ماه ژولای به سبب افزایش دما و در نتیجه افزایش دمای نقطه شبنم، مقدار فشار بخار آب در سطح کشور افزایش داشته است. بطوریکه مقادیر بیشینه در سواحل دریای خزر بین ۲۵ تا ۳۰ هکتوپاسکال و در سواحل خلیج فارس و دریای عمان بیشتر از ۳۰ هکتوپاسکال تغییر یافته است. مقادیر کمینه نیز در مناطق کوهستانی بین ۵ تا ۱۰ هکتوپاسکال تغییر کرده است.

از بررسی میانگین ماهانه مشابه در دو سال ۲۰۰۴ و ۲۰۰۵ دیده می‌شود که در سال ۲۰۰۴ که میانگین فشار در سطح کشور در ماه‌های ژانویه و ژولای کمتر از مقادیر مشابه در سال‌های دیگر از جمله ۲۰۰۵ است. از آنجائی که کاهش فشار سبب افزایش فاصله بین مولکول‌های تشکیل دهنده هوا می‌شود، از این رو ظرفیت پذیرش بخار آب نیز افزایش می‌یابد و در نتیجه میدان میانگین فشار بخار آب نیز افزایش نشان داده است.

در شکل‌های ۴ و ۵ میانگین سالانه فشار بخار آب در سال‌های به ترتیب ۲۰۰۴ و ۲۰۰۵ بر حسب هکتوپاسکال نشان داده شده است. از این شکل‌ها نیز مشابه شکل‌های قبل دیده می‌شود که مقادیر بیشینه این کمیت در هر دو سال، بر سواحل جنوبی و

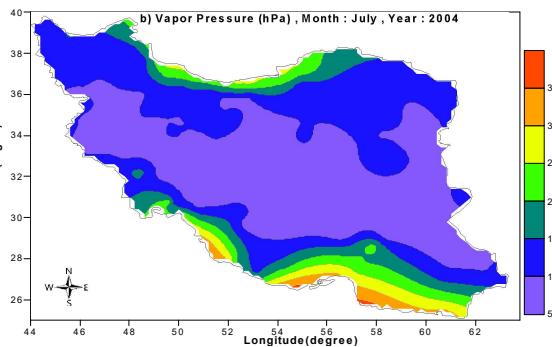
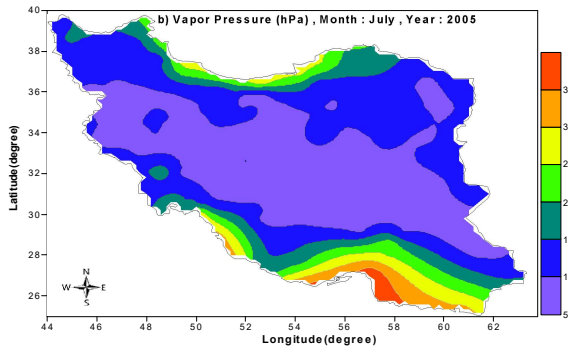
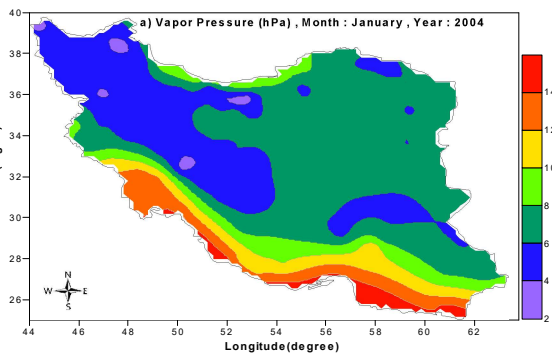
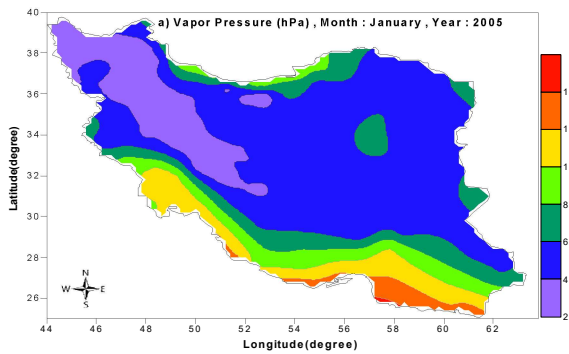
## بحث و نتایج

شکل‌های ۲ و ۲ الگوی میانگین ماهانه فشار بخار آب بر حسب هکتوپاسکال در ماه‌های ژانویه (شکل a) و ژولای (شکل b) به ترتیب در سال‌های ۲۰۰۴ و ۲۰۰۵ را نشان می‌دهد. شکل ۲ نشان می‌دهد که در ماه ژانویه سال ۲۰۰۴، فشار بخار آب در سواحل دریای خزر و جنوب ایران بیشینه و در ارتفاعات البرز و زاگرس کمینه می‌باشد. در سواحل دریای خزر مقادیر این کمیت بین ۸ تا ۱۰ هکتوپاسکال است ولی در سواحل جنوبی ایران بین ۱۲ تا ۱۵ هکتوپاسکال می‌باشد. در ماه ژانویه دیده می‌شود که مقادیر بیشتر از ۳۰ هکتوپاسکال در سواحل جنوبی و مقادیر بیشتر از ۲۵ هکتوپاسکال در سواحل شمالی ایران قرار گرفته است. در بقیه نقاط مقادیر این کمیت کمتر از ۱۵ هکتوپاسکال و در ارتفاعات البرز و زاگرس مقادیر آن کمتر از ۱۰ هکتوپاسکال می‌باشد.

از شکل ۳ دیده می‌شود که بیشینه مقادیر فشار بخار آب در ژانویه ۲۰۰۵ در سواحل شمالی و جنوبی کشور قرار دارد. در این ماه در سواحل دریای خزر فشار بخار آب بین ۸ تا ۱۰ هکتوپاسکال، در سواحل غربی خلیج فارس ۱۰ تا ۱۲ هکتوپاسکال و در غرب تنگه هرمز و سواحل دریای عمان بین ۱۲ تا ۱۲ هکتوپاسکال تغییر کرده است. مقادیر کمینه این

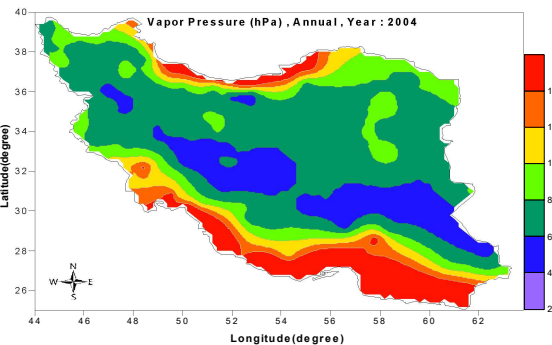
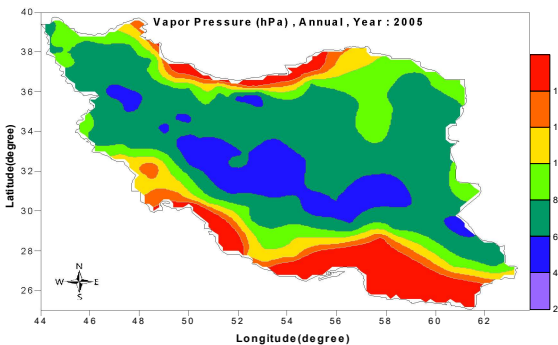
مقادیر کمینه نیز در ارتفاعات البرز مرکزی و زاگرس قرار دارد. در مناطق مرتفع کشور به سبب نبود منابع رطوبتی و نیز پایین بودن دما، مقدار بخار آب کم و در نتیجه فشار بخار آب نیز کمتر است. وجود مقادیر کمتر فشار بخار آب در سال ۲۰۰۵ نسبت به سال ۲۰۰۴ به سبب کاهش دمای نقطه شبنم در سال ۲۰۰۵ است. شایان ذکر است که اختلاف دو الگوی میانگین سالانه فشار بخار آب در سال‌های ۲۰۰۴ و ۲۰۰۵ بسیار جزئی است.

شمالی ایران قرار گرفته است و مقادیر این کمیت در سواحل جنوبی بیشتر از سواحل شمالی می‌باشد. چون فشا بخار آب تابعی از دمای نقطه شبنم است، پس این نتیجه معرف بیشتر بودن مقادیر دمای نقطه شبنم در سواحل جنوبی نسبت به سواحل شمالی است. این نتایج با وجود منابع آبی دریای خزر در شمال ایران و خلیج فارس و دریای عمان در جنوب کشور هماهنگ می‌باشد.



شکل ۳- میانگین ماهانه فشار بخار آب بر حسب هکتوپاسکال در ماه‌های (a) ژانویه ۲۰۰۵ و (b) ژولای ۲۰۰۵. محورهای مختصات طول جغرافیایی شرقی و عرض جغرافیایی شمالی بر حسب درجه می‌باشند.

شکل ۲- میانگین ماهانه فشار بخار آب بر حسب هکتوپاسکال در ماه‌های (a) ژانویه ۲۰۰۴ و (b) ژولای ۲۰۰۴. محورهای مختصات طول جغرافیایی شرقی و عرض جغرافیایی شمالی بر حسب درجه می‌باشند.

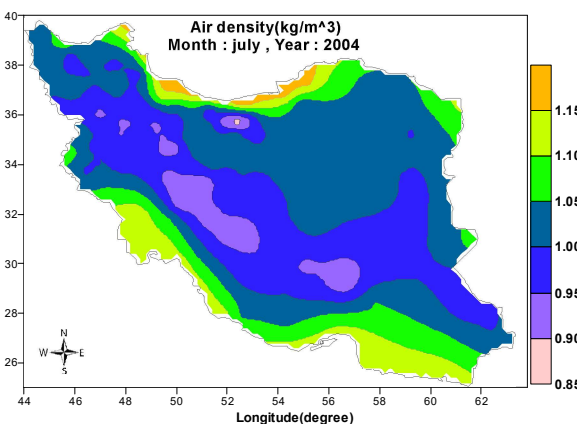
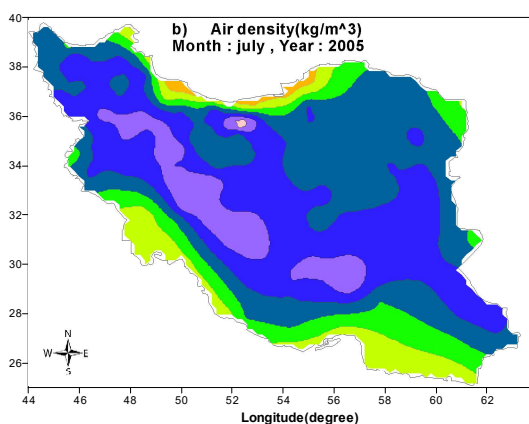
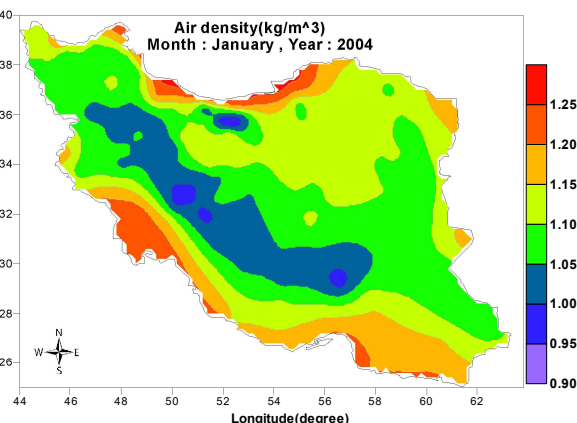
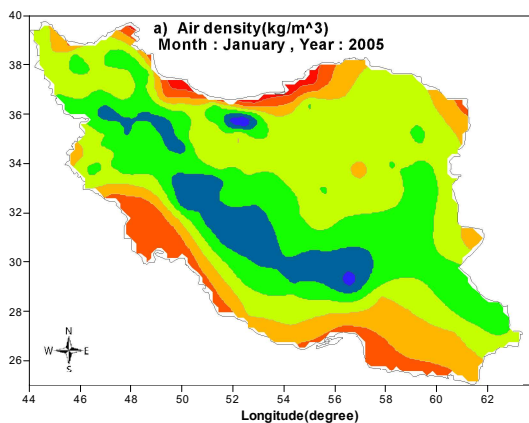


شکل ۵- میانگین سالانه ماهانه فشار بخار آب بر حسب هکتوپاسکال در سال ۲۰۰۵. محورهای مختصات طول جغرافیایی شرقی و عرض جغرافیایی شمالی بر حسب درجه می‌باشند.

شکل ۴- میانگین سالانه ماهانه فشار بخار آب بر حسب هکتوپاسکال در سال ۲۰۰۴. محورهای مختصات طول جغرافیایی شرقی و عرض جغرافیایی شمالی بر حسب درجه می‌باشند.

که پرفشار سرد سبیری توسعه می‌یابد، پشته فشاری این سامانه به مناطق شمالی ایران کشیده می‌شود و سبب می‌شود تا در مناطق جنوبی نیز فشار هوا افزایش یابد. فراوانی این وضعیت در این سال به گونه‌ای بوده است که در میانگین ماهانه فشار در ماه ژانویه که در شکل‌های ۸ و ۹، شکل a، آورده شده است، خود را نشان می‌دهد. در این ماه اختلاف متوسط فشار هوای دریای خزر نسبت به مناطق جنوبی ۵ هکتوپاسکال می‌باشد. بنابراین اگر چه سواحل جنوبی و شمالی ایران ارتفاع یکسانی دارند، ولی به سبب افزایش فشار هوای دریای خزر نسبت به فشار هوای سواحل جنوبی، چگالی هوا در سواحل دریای خزر بیشتر است. از مقایسه شکل‌های مربوط به میانگین فشار ماهانه در سال‌های ۲۰۰۴ و ۲۰۰۵ دیده می‌شود که میانگین فشار در ماه ژانویه سال ۲۰۰۴ در روی ایران نسبت به میانگین فشار در سال ۲۰۰۵ کمتر بوده است.

شکل‌های ۶ و ۷ میانگین ماهانه چگالی هوا در ماه‌های ژانویه (شکل a) و ژولای (شکل b) به ترتیب برای سال‌های ۲۰۰۴ و ۲۰۰۵ را نشان می‌دهد. از این شکل‌ها دیده می‌شود که در ماه ژانویه مقادیر بیشینه مقادیر چگالی هوا در سواحل دریای خزر و سواحل دریای عمان و خلیج فارس قرار گرفته است به طوری که مقادیر چگالی هوا در سواحل دریای خزر از سواحل جنوبی ایران بیشتر می‌باشد. در ارتفاعات البرز مرکزی و زاگرس نیز مقادیر چگالی هوا کمینه است. از آنجائی که مقدار چگالی هوا با ارتفاع بطور نمائی کاهش می‌یابد، از این رو کاهش این کمیت در ارتفاعات، با مبانی تئوری ارائه شده در بندهای پیش هماهنگ است. وجود مقادیر بیشینه در سطح دریا نیز به دلیل پایین بودن ارتفاع در این مناطق است. وجود اختلاف در سواحل دریای خزر و آبهای واقع در نوار جنوبی کشور، به سبب افزایش فراوانی پرفشارهای است که در این ماه از سال، دریای خزر را تحت تاثیر قرار داده‌اند. در ماه ژانویه

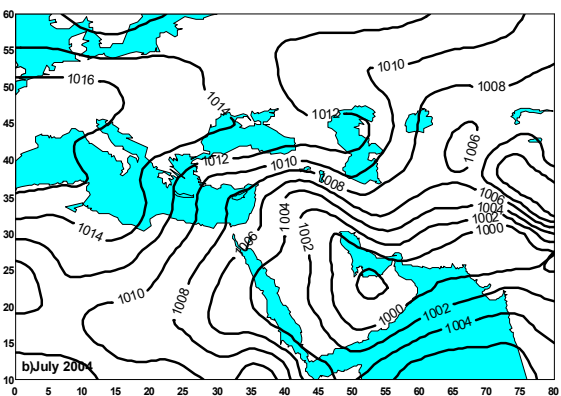
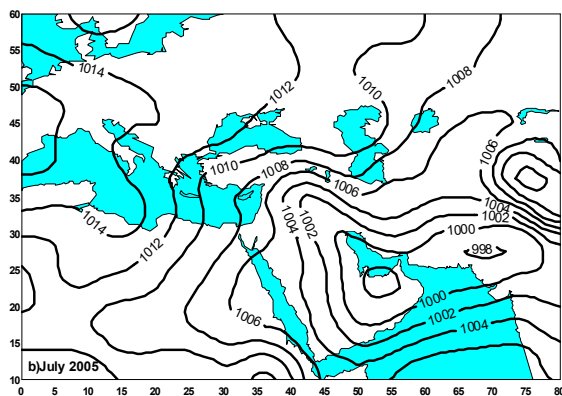
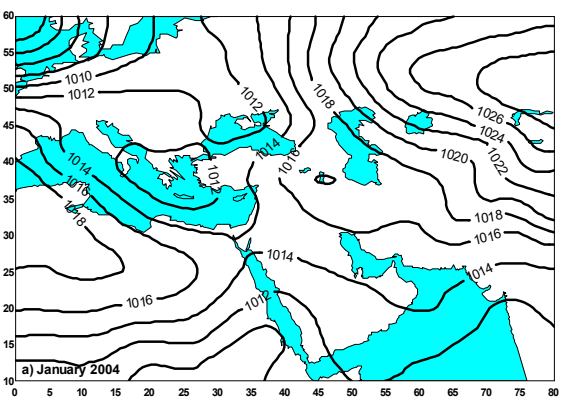
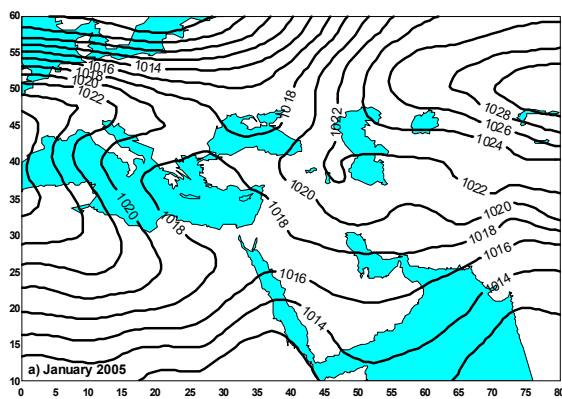


شکل ۷- میانگین ماهانه چگالی هوا بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب در ماه‌های (a) ژانویه ۲۰۰۵ و (b) ژولای ۲۰۰۵. محورهای مختصات طول جغرافیایی شرقی و عرض جغرافیایی شمالی بر حسب درجه است.

شکل ۶- میانگین ماهانه چگالی هوا بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب در ماه‌های (a) ژانویه ۲۰۰۴ و (b) ژولای ۲۰۰۴. محورهای مختصات طول جغرافیایی شرقی و عرض جغرافیایی شمالی بر حسب درجه است.

متوسط فشار ماه ژولای در سواحل دریای خزر نسبت به سواحل جنوبی، ۱۲ هکتوپاسکال بیشتر می‌باشد (شکل‌های ۸ و ۹، b). بنابراین وجود اختلاف فشار سواحل جنوبی و شمالی در این ماه از سال، سبب شده است تا چگالی هوا در سواحل جنوبی کمتر از سواحل دریای خزر باشد. به علاوه تغییر الگوی فشار هوا در ماه ژولای نسبت به ماه ژانویه، سبب شده است تا چگالی هوا در این ماه از سال نسبت به ماه ژانویه در سطح کشور کمتر باشد.

در ماه ژولای نیز الگوی چگالی هوا مشابه ماه ژانویه است با این تفاوت که مقادیر نسبت به ماه ژانویه کاهش یافته است. این اختلاف به سبب شرایط فشاری حاکم بر منطقه ایجاد می‌شود. در این ماه از سال که کم فشار گرمائی توسعه می‌یابد، دو هسته مرکزی یکی در روی پاکستان و دیگری در جنوب خلیج فارس ایجاد می‌شود و سراسر سواحل جنوبی ایران تحت تاثیر این سامانه قرار می‌گیرد و فشار هوا در این ماه در این مناطق کاهش می‌یابد. در این ماه در سواحل دریای خزر فشار هوا کماکان تحت تاثیر سامانه‌های پرفشار می‌باشد. بطوریکه



شکل ۹: میانگین ماهانه فشار هوا بر حسب هکتوپاسکال در ماه‌های (a)

شکل ۸: میانگین ماهانه فشار هوا بر حسب هکتوپاسکال در ماه‌های (a)

ژاویه ۲۰۰۵ و (b) ژولای ۲۰۰۵. محورهای مختصات طول جغرافیایی شرقی و عرض جغرافیایی شمالی بر حسب درجه می‌باشند.

ژاویه ۲۰۰۴ و (b) ژولای ۲۰۰۴. محورهای مختصات طول جغرافیایی شرقی و عرض جغرافیایی شمالی بر حسب درجه می‌باشند.

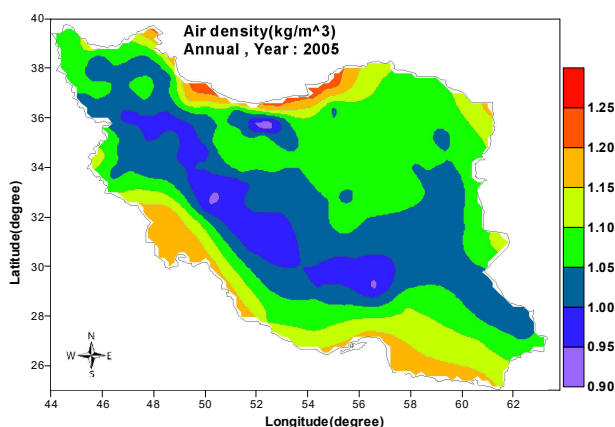
از این شکلها دیده می‌شود که الگوی چگالی هوا در تابستان مشابه الگوی این کمیت در ماه ژولای و الگوی چگالی هوا در زمستان مشابه الگوی این کمیت در ماه ژانویه است. در زمستان متوسط چگالی از ۰/۹۵ کیلوگرم بر متر مکعب در ارتفاعات زاگرس و البرز مرکزی تا ۱/۲۵ واحد در سواحل دریای خزر

از آنجائیکه در میانگین فصلی و سالانه چگالی هوا در سالهای ۲۰۰۴ و ۲۰۰۵ تفاوت قابل توجهی دیده نمی‌شود، از این رو میانگین فصلی و سالانه چگالی هوا فقط در سال ۲۰۰۵ بررسی می‌شود. شکل ۱۰ متوسط چگالی هوا در فصل‌های زمستان (شکل a) و تابستان (شکل b) در سال ۲۰۰۵ را نشان می‌دهد.

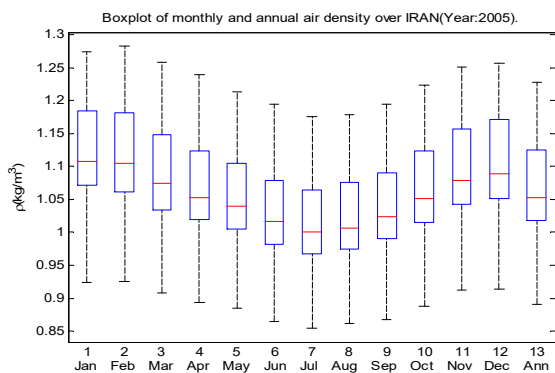
شکل ۱۲ نمودار جعبه‌ای برای متوسط ماهانه و سالانه چگالی هوا در سال ۲۰۰۵ برای سطح کشور را نشان می‌دهد. از این شکل دیده می‌شود که متوسط ماهانه چگالی هوا در سطح کشور از ۱/۱۱ کیلوگرم بر متر مکعب در ژانویه تا ۱/۰۱ کیلوگرم بر متر مکعب در ماه ژوئیه کاهش داشته است. این کمیت سپس طی ماه‌های سپتامبر تا دسامبر افزایش نشان داده و به حدود ۱/۱۰ کیلوگرم بر متر مکعب رسیده است. متوسط سالانه چگالی هوا در سطح کشور نیز ۱/۰۵ کیلوگرم بر متر مکعب برآورد شده است.

تغییر کرده است. در تابستان تغییرات متوسط چگالی از ۰/۸۵ کیلوگرم بر متر مکعب در ارتفاعات زاگرس و البرز مرکزی تا ۱/۱۵ واحد در سواحل دریای خزر در نوسان بوده است.

شکل ۱۱ متوسط سالانه چگالی هوا در سال ۲۰۰۵ را نشان می‌دهد. از این شکلها دیده می‌شود که در این سالها، متوسط چگالی هوا در قله‌های مرتفع زاگرس جنوبی و مرکزی و البرز مرکزی بین ۰/۹۵-۰/۹۰ واحد، در بقیه ارتفاعات ایران بین ۱/۰۰-۰/۹۵، در سواحل دریای خزر بیشتر از ۱/۲۰ و در سواحل جنوبی ایران بین ۱/۲۰-۱/۱۵ واحد تغییر کرده است.

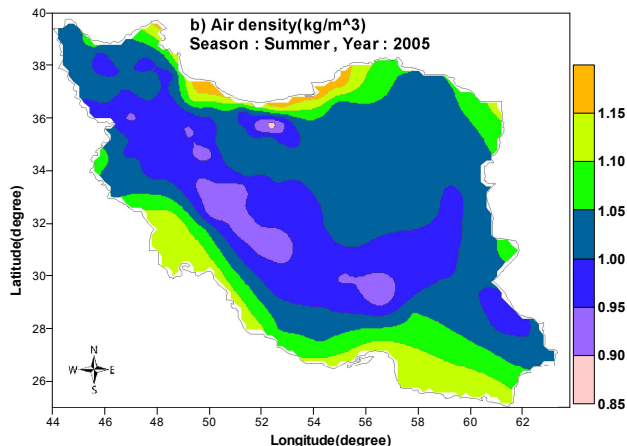
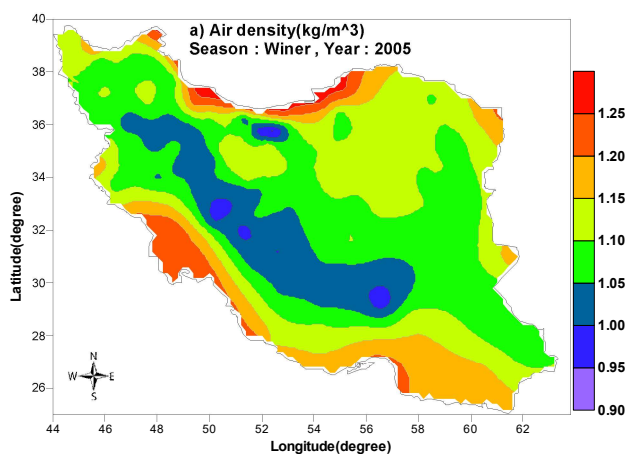


شکل ۱۱: میانگین سالانه چگالی هوا بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب در سال ۲۰۰۵. محورهای مختصات طول جغرافیایی شرقی و عرض جغرافیایی شمالی بر حسب درجه می‌باشند.



شکل ۱۲: نمودار جعبه‌ای برای متوسط ماهانه و سالانه چگالی هوای سطح ایران بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب در سال ۲۰۰۵.

ژانویه مقدار میانگین چگالی این تراز از استوا به سوی قطب افزایش می‌یابد و مقادیر کمینه آن در روی سودان و بیشینه آن در روی سیبری جای گرفته است. در ماه ژوئیه نیز در این تراز



شکل ۱۰: میانگین فصلی چگالی هوا بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب در ماه‌های (a) زمستان ۲۰۰۵ و (b) تابستان ۲۰۰۵. محورهای مختصات طول جغرافیایی شرقی و عرض جغرافیایی شمالی بر حسب درجه می‌باشند.

شکل‌های ۱۳ و ۱۴ میانگین چگالی هوا در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در ماه‌های به ترتیب ژانویه و ژوئیه در سال ۲۰۱۵ را نشان می‌دهد. از این شکلها دیده می‌شود که در ماه



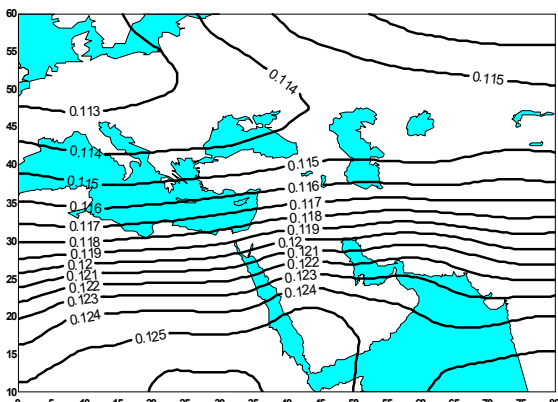
در ماه ژولای نیز در این تراز مقادیر بیشینه در روی نوار جنوبی ایران و غرب خلیج فارس قرار گرفته است و مقادیر کمینه آن در عرض‌های جغرافیایی بالاتر جای دارد. این وضعیت نشان می‌دهد که در ماه ژولای منطبق بر منطقه کم فشار گرمائی، هوای عرض‌های جنوبی نسبت به عرض‌های شمالی در این تراز گرمتر است.

تفاوت دو ماه ژانویه و ژولای در این تراز در مقادیر میانگین چگالی هوا می‌باشد به طوری که مقادیر بیشینه در این تراز در ماه ژولای کمتر از مقدار مشابه در ماه ژانویه است.

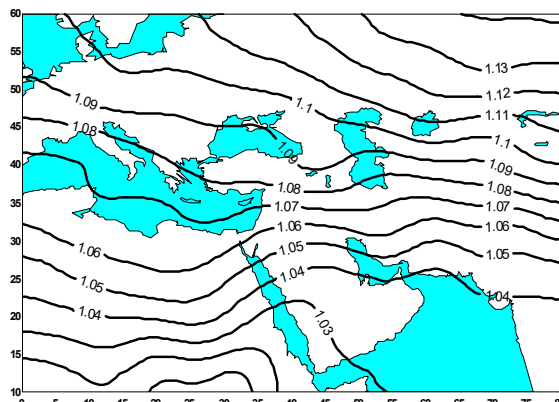
شکل ۱۷ میدان ارتفاع ژئوپتاسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در ساعت ۰۰۰۰ روز ۱۸ ژانویه ۲۰۱۵ را نشان می‌دهد. از این شکل دیده می‌شود که یک کم‌فشار بریده با هسته سرد در شرق دریای خزر قرار گرفته است و ناوه عمیق آن به صورت شمالشرقی-جنوبغربی تا روی عراق امتداد دارد. مناطق مختلف ایران در این روز تحت تاثیر این ناوه ارتفاعی قرار دارند. در این روز میدان چگالی منطبق بر این سامانه است به گونه‌ای که مقادیر بیشینه این کمیت بر هسته سرد سامانه قرار گرفته است و ناوه ارتفاعی این تراز بر مقادیر زیاد و پشته ارتفاعی نیز بر مقادیر کم این فراسنج منطبق می‌باشد. از این رو از چگالی هوا برای ردگیری مسیر حرکت ناوه‌ها و پشته‌ها می‌توان استفاده کرد.

مقادیر کمینه در روی صحرای عربستان و ایران قرار گرفته است و مقادیر بیشینه آن در عرض‌های جغرافیایی بالاتر جای دارد. این وضعیت نشان می‌دهد که در ماه‌های ژانویه و ژولای منطبق بر منطقه کم‌فشارهای گرمائی، مقادیر کمینه قرار گرفته است که چون عمق کم‌فشار گرمائی تابستان بیشتر از زمستان است، از این رو مقادیر میانگین چگالی هوا نیز در منطقه کم‌فشار گرمائی ماه ژولای کمتر از مقدار مشابه آن در ماه ژانویه می‌باشد. همچنین مقادیر بیشینه این کمیت در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در ماه ژانویه در عرض‌های نزدیک قطب نیز بیشتر از مقدار مشابه در همان منطقه در ماه ژولای می‌باشد. این تفاوت در اثر سرد بودن دمای هوا در ماه ژانویه در مناطق فوق می‌باشد.

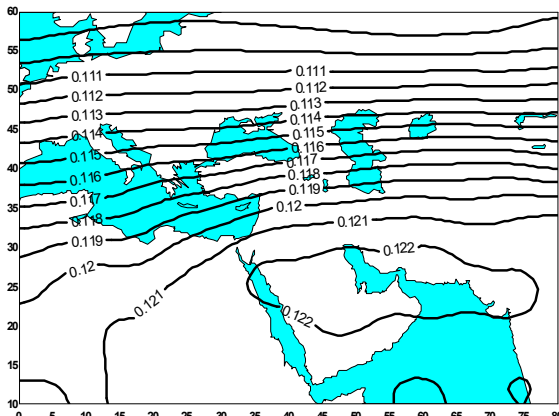
شکل‌های ۱۵ و ۱۶ میانگین چگالی هوا در تراز ۰۷۰ هکتوپاسکال در ماه‌های به ترتیب ژانویه و ژولای ۲۰۱۵ را نشان می‌دهد. از این شکلها دیده می‌شود که در ماه ژانویه مقدار میانگین چگالی این تراز از استوا به سوی قطب کاهش می‌یابد و مقادیر بیشینه آن در روی سودان و کمینه آن در عرض‌های جغرافیایی بالاتر جای گرفته است. از آنجائیکه در این تراز فشاری نم‌نسبی زیادی وجود ندارد، از این رو این وضعیت نشان می‌دهد که در تراز ۷۰ هکتوپاسکال عرض‌های پایین نزدیک سودان سردتر از مناطق عرض‌های بالا در این سال است.



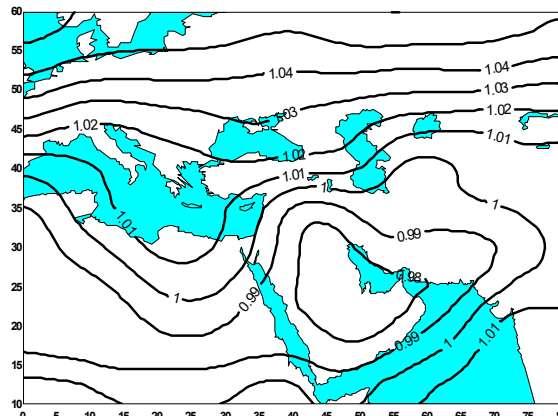
شکل ۱۵: میانگین ماهانه چگالی هوا بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب در تراز ۰۷۰ هکتوپاسکال در ژانویه ۲۰۱۵. محورهای مختصات طول جغرافیایی شرقی و عرض جغرافیایی شمالی بر حسب درجه می‌باشند.



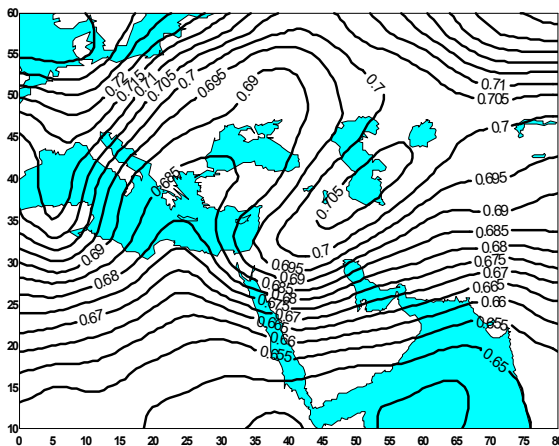
شکل ۱۶: میانگین ماهانه چگالی هوا بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در ژانویه ۲۰۱۵. محورهای مختصات طول جغرافیایی شرقی و عرض جغرافیایی شمالی بر حسب درجه می‌باشند.



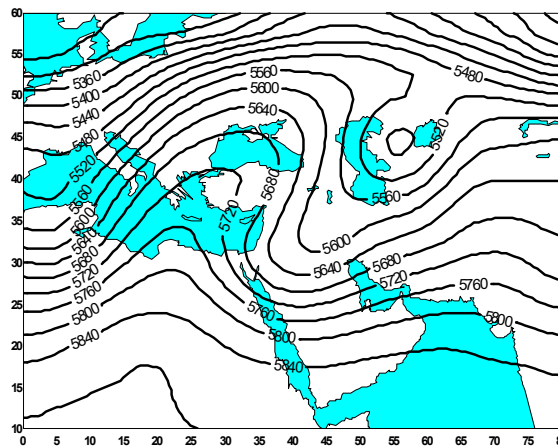
شکل ۱۶: میانگین ماهانه چگالی هوا بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب در تراز ۰.۷۰ هکتوپاسکال در ژوئیه ۲۰۱۵. محورهای مختصات طول جغرافیایی شرقی و عرض جغرافیایی شمالی بر حسب درجه می‌باشند.



شکل ۱۴: میانگین ماهانه چگالی هوا بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در ژوئیه ۲۰۱۵. محورهای مختصات طول جغرافیایی شرقی و عرض جغرافیایی شمالی بر حسب درجه می‌باشند.



شکل ۱۸: میدان چگالی هوا (کیلوگرم بر متر مکعب) در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، در ساعت ۰۰۰۰ گرینویچ روز ۱۸ ژانویه ۲۰۱۵. محورهای مختصات طول و عرض جغرافیایی بر حسب درجه است.



شکل ۱۷: میدان ارتفاع تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (ژئوپتانسیل متر) در روز ۱۸ ژانویه ۲۰۱۵ در ساعت ۰۰۰۰ گرینویچ. محورهای مختصات طول جغرافیایی شرقی و عرض جغرافیایی شمالی بر حسب درجه است.

## نتیجه گیری

بر پایه بررسی مطالب بندهای پیش، علاوه بر شکل‌های مربوط به متوسط ماهانه فشار بخار آب و چگالی بند ۳ به عنوان نتایج این تحقیق، موارد زیر نیز به عنوان نتایج موردی ارائه می‌شود:

۱- از مقایسه میانگین فشار ماهانه در سالهای ۲۰۰۴ و ۲۰۰۵ دیده می‌شود که میانگین فشار در ماه ژانویه سال ۲۰۰۴ در روی ایران نسبت به میانگین فشار در سال ۲۰۰۵ کمتر است در حالیکه در ماه ژوئیه میانگین فشار در سال ۲۰۰۵ کمتر از سال ۲۰۰۴ بوده است. این شرایط می‌تواند به سبب افزایش فراوانی سامانه‌های کم‌فشار عبوری در ماه ژانویه و تقویت کم‌فشار گرمایی در ماه ژوئیه سال ۲۰۰۴ باشد.

۲- مقادیر متوسط ماهانه فشار بخار آب در سواحل دریای خزر در شمال و سواحل خلیج فارس و دریای عمان در جنوب ایران بیشینه و در مناطق کوهستانی کمینه می‌باشد. متوسط ماهانه فشار بخار آب در سواحل دریای عمان و خلیج فارس در ماه‌های سرد و گرم از مقادیر متوسط فشار بخار آب در سواحل دریای خزر که هر دو دارای منابع آبی هستند، بیشتر می‌باشد. مقادیر متوسط چگالی هوا در ماه‌های سرد و گرم، متوسط فصلی چگالی هوا در فصل زمستان و تابستان و متوسط سالانه آن در سال ۲۰۰۵، در سواحل دریای خزر در شمال و سواحل خلیج فارس و دریای عمان در جنوب ایران بیشینه و در مناطق

مقادیر کمینه قرار گرفته است و چون عمق کم فشار گرمائی تابستان بیشتر از زمستان است، از این رو مقادیر میانگین چگالی هوا نیز در منطقه کم فشار گرمائی ماه ژولای کمتر از مقدار مشابه آن در ماه ژانویه می‌باشد. همچنین مقادیر بیشینه این کمیت در ماه ژانویه در عرض‌های نزدیک قطب نیز بیشتر از مقدار مشابه در همان منطقه در ماه ژولای است. این تفاوت در اثر سرد بودن دمای هوا در ماه ژانویه در مناطق فوق می‌باشد.

۶- در ترازهای فشاری زیرین جو، در ماه ژانویه مقدار میانگین چگالی این تراز از استوا به سوی قطب کاهش می‌یابد و مقادیر بیشینه آن در روی سودان و کمینه آن در عرض‌های جغرافیائی بالاتر جای گرفته است. از آنجائیکه در ترازهای فوقانی جو، نم نسیبی زیادی وجود ندارد، از این رو این وضعیت نشان می‌دهد که در ترازهای بالای وردایست، عرضهای پایین نزدیک سودان سردتر از مناطق عرض‌های بالا در این سال می‌باشد. در ماه ژولای نیز مقادیر بیشینه میانگین چگالی در روی نوار جنوبی ایران و غرب خلیج فارس قرار گرفته است و مقادیر کمینه آن در عرضهای جغرافیائی بالاتر جای دارد. این وضعیت نشان می‌دهد که در ماه ژولای منطبق بر منطقه کم فشار گرمائی، هوای عرض‌های جنوبی نسبت به عرضهای شمالی در این تراز گرمتر است.

۷- از آنجائی که مقادیر بیشینه (کمینه) چگالی بر مرکز سامانه های سرد(گرم) قرار دارد، از این کمیت برای ردگیری مسیر حرکت این سامانه‌ها می‌توان استفاده کرد.

۸- برای محاسبه چگالی و فشار بخار آب، توصیه می‌شود که در ایستگاه‌های همدیدی که در آنها داده‌های دما، فشار سطح متوسط دریا و دمای نقطه شبنم ثبت می‌شود، از معادله‌های به ترتیب (۱) و (۴) استفاده شود. برای ایستگاه‌هایی که فقط دما را اندازه‌گیری می‌کنند، می‌توان چگالی را از رابطه (۲) برآورد نمود که دقت آن نسبت به معادله (۱) کمتر است. همچنین در مناطقی که کمیت‌های هواشناسی در دسترس نیست، استفاده از معادله (۳) در محاسبه چگالی هوا می‌تواند برآورد غیر دقیقی بدست دهد که با روش‌های مختلفی می‌توان آنرا اصلاح نمود.

کوهستانی کمینه می‌باشد. نتایج این بند با مبانی نظری هماهنگ است و نتیجه محاسبات انجام شده را تایید می‌کند.

۳- متوسط ماهانه، فصلی و سالانه چگالی هوا در سواحل دریای خزر از مقدار متناظر آن در سواحل جنوب ایران بیشتر است. این شرایط به سبب تغییرات فشار هوا که به سبب وجود سامانه‌های فشاری تغییر می‌کنند، رخ می‌دهد. در ماه‌های سرد و نیز فصل سرد که پرفشار سرد سیبری توسعه می‌یابد و پشته آن مناطق مختلف ایران را تحت تاثیر قرار می‌دهد، فشار هوا در سواحل دریای خزر بیشتر از سواحل جنوبی ایران افزایش می‌یابد. بنابراین در این شرایط متوسط چگالی هوا در ماه ژانویه و فصل زمستان در سواحل دریای خزر بیشتر از مقادیر متناظر آن در سواحل جنوبی ایران می‌باشد. در ماه‌های گرم و نیز فصل گرم سال که کم فشار گرمائی در نوار جنوبی ایران توسعه می‌یابد و سراسر سواحل جنوبی ایران تحت تاثیر این سامانه فشاری قرار می‌گیرد، فشار هوا در این ماه‌ها و این فصل در این مناطق کاهش می‌یابد و در سواحل دریای خزر فشار هوا کماکان تحت تاثیر سامانه‌های پرفشار می‌باشد. بنابراین در فصل گرم متوسط چگالی هوا در سواحل جنوبی کمتر از سواحل دریای خزر است.

۴- متوسط چگالی هوا در ماه‌های گرم یا فصل گرم در همه نقاط کشور، نسبت به فصل سرد و یا ماه‌های سرد کمتر است. این اختلاف نیز به دلیل عملکرد متفاوت سامانه‌های فشاری در ماه‌ها و فصلهای مختلف روی مناطق مختلف می‌باشد. بطوریکه افزایش دما و کاهش فشار هوا که با کم فشار گرمائی در فصل گرم همراهی دارد و افزایش فشار و کاهش دما که با حاکمیت پرفشار سرد در فصل سرد همراهی می‌کند، عامل این تغییرات است.

۵- در ترازهای فشاری زیرین در ماه ژانویه مقدار میانگین چگالی از استوا به سوی قطب افزایش می‌یابد. مقادیر کمینه میانگین چگالی در روی سودان و بیشینه آن در روی سیبری جای دارد. در ماه ژولای نیز مقادیر کمینه در روی صحرای عربستان و ایران قرار گرفته است و مقادیر بیشینه آن در عرض‌های جغرافیائی بالاتر جای دارد. نتایج نشان داد که در ماه‌های ژانویه و ژولای منطبق بر منطقه کم فشارهای گرمائی،

- meeting of the American society of heating and ventilating engineers, Murray Bay, Que. Canada.
- 10-Ivansen, H. and Sorensen, T., 2005, Modelling of the Variation of Air Density with Altitude through Pressure, Humidity and Temperature. EMD International A/S Denmark.
- 11-Murray, F., W., 1967, On the computation of saturation vapor pressure, J. Appl. Meteorol., No 6, pp. 203-204.
- 12-Murphy, D., M. and Koop, T., 2005, Review of the vapour pressures of ice and supercooled water for atmospheric applications, Quart. J. Royal Met. Soc., 131, pp. 1539-1565.
- 13-Salby, M., L., 2012. Physics of the atmosphere and climate, Cambridge University Press, 666pp.
- 14-Salby, M., L., 1996. Fundamentals of atmospheric physics. Elsevier Science, 661pp.
- 15-Picard, A. and Fang, H., 2002. Three methods of determining the density of moist air during mass comparisons, Metrologia No 39, pp. 31-40.
- 16-Picard, A. and Fang, H., 2003. Methods to determine the density of moist air IEEE. Trans. Instrum. Meas. No 52 pp. 504-506.
- 17-Picard, A., Davis, R., Glaser, M. and Fujii, K., 2008, Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007), Metrologia, No 45, pp. 149-155.
- 18-Sutour, C., Stumpf, C., Kosinski, J., P., Surget, A., Hervouet, G., Yardin, C., Madec, T. and Gosset, A., 2007, Determination of the argon concentration in ambient dry air for the calculation of air density, Metrologia, No 44, pp. 448-52.
- 19-Stull, R. B., 2011, Meteorology for Scientists and Engineers. 3rd Edition. Brooks/Cole Thomson Learning. Discount Textbooks, 924 pp.
- 20-Tetens, V., O., 1930, Uber einige meteorologische Begriffe, Zeitschrift fur Geophysik, No 6, pp. 297-309.
- منابع**
- ۱- انتظاری، ع.، ر.، امیر احمدی، ا.، عرفانی، ع. و برزویی، ا.، ۱۳۹۱. ارزیابی پتانسیل انرژی باد و امکان‌سنجی احداث نیروگاه بادی در سبزوار. مطالعات جغرافیایی مناطق خشک. سال سوم، شماره‌های نهم و دهم، صفحات ۴۶-۳۳.
- ۲- خسروی، م.، ابراهیمی، م. و بهروزی، م.، ۱۳۹۵. بررسی وضعیت انرژی باد در استان خوزستان به منظور استفاده از توربین‌های بادی. فصلنامه برنامه‌ریزی منطقه‌ای، سال ۶، شماره ۲۲، صفحات ۴۲-۲۲.
- ۳- مجرد، ف. و همتی، ش.، ۱۳۹۲، ارزیابی قابلیت‌های انرژی باد در استاهای کرمانشاه و کردستان. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال ۱۳، شماره ۲۹، صفحات ۱۵۷-۱۳۷.
- 4-Babu, C., A., 1996, Evaluation of thermodynamic parameters of the atmosphere by a Fortran program. Computers & Geoscience Vol. 22, No.8, pp.877-881.
- 5-Davis, R., S., 1992, Equation for the determination of the density of moist air, Metrologia, Vol. 29, pp. 67-70.
- 6-Fukuta, N. and Gramada, C., M., 2003, Vapor pressure measurement of super cooled water, J. Atmos. Sci., No, 60, pp. 1871-1875.
- 7-Giacomo, P., 1982, Equation for the determination of the density of moist air, Metrologia, Vol. 18, pp. 33-40.
- 8-Goff, J., A., and Gratch, S., 1946. Low-pressure properties of water from -160 to 212 F, in Transactions of the American society of heating and ventilating engineers, pp 95-122, presented at the 52nd annual meeting of the American society of heating and ventilating engineers, New York.
- 9-Goff, J., A., 1957, Saturation pressure of water on the new Kelvin temperature scale, Transactions of the American society of heating and ventilating engineers, pp 347-354, presented at the semi-annual