

Satellite Estimation of Precipitable Water Vapor (PWV) in Iran Atmosphere of Iran and the Analysis of its Spatial Correlation with Meteorological Variables

KOOHZAD RAISPOUR*

1. Department of Geography, Faculty of Humanities, University of Zanjan, Zanjan, Iran.
(Received: May. 27, 2020- Revised: July. 25, 2020- Accepted: Aug. 1, 2020)

ABSTRACT

Precipitable Water Vapor (PWV) is one of the most important quantities in meteorology, atmospheric physics, hydrology and climate change studies, which its estimation is useful in predicting precipitation, flood occurrence and other hydrological parameters. Today, satellite imagery is widely used to estimate PWV and analyze its correlation with other meteorological Variables. The objective of this study was to estimate the amount of PWV and to investigate its relationship with six climatic variables such as; temperature, pressure, relative humidity, cloudiness ratio, precipitation and wind speed in the geographical area of Iran using satellite-based data. The proposed data with monthly time steps and $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ spatial resolution were selected in the climatic range of Iran's atmosphere for the period of 2003-2019. Pearson correlation coefficient was used to investigate the relationship between PWV and the above mentioned climatic variables. Digital data extracted after qualitative control and pre-processing were used by specialized software such as ENVI, ArcGIS and Grads to build raster layers based on the geographical boundary of Iran. According to the results, the average PWV in the atmosphere of Iran is 12.7 mm, which shows a lower amount as compared to the global average (21.6 mm). On the other hand, the amount of PWV in the Atmosphere of Iran does not have a temporal and spatial homogeneous distribution. So that the highest amount of PWV is concentrated in the coastal area of south and north and the lowest amount is concentrated over the Zagros mountain range, parts of northeast and east of Iran and in the next priority in the desert areas of central Iran. The Pearson correlation coefficients between PWV and the meteorological variables were 86% for air temperature, -89% for pressure, -88% for relative humidity, -32% for cloudiness ratio, -64% for precipitation and 67% for wind speed.

Keywords: Satellite Estimation, Precipitable Water, AIRS Sensor, Pearson Correlation, Atmosphere of Iran.

برآورد ماهواره‌ای بخار آب قابل بارش (PWV) در جو ایران و تحلیل همبستگی مکانی آن با فراسنج‌های آب و هواشناختی

کوهزاد رئیس‌پور*

۱. گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۳/۷ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۵/۴ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۵/۱۱)

چکیده

بخار آب قابل بارش یکی از کمیت‌های مهم هواشناسی، فیزیک جو، هیدرولوژی و تغییرات اقلیمی است که برآورد آن در پیش‌بینی مقدار بارش، وقوع سیلاب و سایر پارامترهای هیدرولوژیکی مفید می‌باشد. امروزه از تصاویر ماهواره‌ای به‌طور گسترده‌ای برای برآورد بخار آب قابل بارش و تحلیل همبستگی آن با سایر فراسنج‌های آب و هواشناختی استفاده می‌شود. هدف از پژوهش حاضر برآورد مقدار بخار آب قابل بارش و بررسی رابطه‌ی آن با شش متغیر اقلیمی از قبیل دما، فشار، رطوبت نسبی، درصد ابرناکی، بارش و سرعت باد در گستره‌ی جغرافیایی ایران با استفاده از داده‌های ماهواره مینا می‌باشد. داده‌های مورد استفاده با گام‌های زمانی ماهانه و مکانی $1^\circ \times 1^\circ$ در گستره‌ی اقلیمی جو ایران برای دوره‌ی داده‌برداری ۲۰۰۳-۲۰۱۹ انتخاب گردید. برای بررسی رابطه‌ی بین بخار آب قابل بارش با متغیرهای اقلیمی، از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد. داده‌های رقومی استخراج شده پس از کنترل کیفی و پیش‌پردازش، توسط نرم‌افزارهای تخصصی از قبیل ENVI، ArcGIS و Grads برای ساخت لایه‌های رستری بر اساس مرز جغرافیایی کشور ایران به‌کار گرفته شد. بر اساس نتایج، میانگین آب قابل بارش در جو ایران $12/7 \text{ mm}$ است که در مقایسه با میانگین جهانی ($21/6 \text{ mm}$)، کم بودن مقدار آب قابل بارش در جو ایران را نشان می‌دهد. از سویی دیگر مقدار آب قابل بارش در جو ایران از توزیع زمانی و مکانی همگنی برخوردار نیست. به‌طوری که بیش‌ترین مقدار آن در ناحیه‌ی ساحلی جنوب و شمال و کمترین مقدار آن بر فراز سلسله جبال زاگرس، بخش‌هایی از شمال شرق و شرق ایران و در اولویت بعدی در نواحی بیابانی ایران مرکزی متمرکز است. میانگین همبستگی آماری (پیرسون) بین pwv با دما ($R=86\%$)، با فشار ($R=89\%$)، با رطوبت نسبی ($R=88\%$)، با ابرناکی ($R=32\%$)، با بارش ($R=64\%$) و سرعت باد ($R=67\%$) بوده‌است.

واژه‌های کلیدی: برآورد ماهواره‌ای، آب قابل بارش، سنجنده AIRS، همبستگی پیرسون، اتمسفر ایران.

مقدمه

منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان و از جمله ایران اهمیت حیاتی دارد. داده‌ها نشان می‌دهد، ایران به دلیل بارش سالانه کمتر از یک‌سوم متوسط جهانی، در زمره‌ی کشورهای با محدودیت منابع آب قلمداد می‌شود. آب در فرآیند توسعه اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی هر منطقه، نقش عمده و کلیدی دارد و در ایران به دلیل کمبود منابع آب، مدیریت صحیح آن برای رسیدن به توسعه پایدار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بنابراین کشوری مانند ایران که با کمبود آب مواجه است، مدیریتی به روز از منابع آب در آن امری انکارناپذیر می‌باشد. یکی از ابزار مدیریتی در این زمینه، آگاهی از میزان بخار آب قابل بارش در جو است. به تمامی بخار آب موجود در ستونی از جو که در صورت مهیایی شرایط، قابلیت تبدیل به بارش را دارد، بخار آب قابل بارش جو گویند (Asakereh et al., 2015). این ستون عمودی جو از سطح

زمین آغاز و تا نقطه پایانی حضور بخار آب در جو ادامه پیدا می‌کند (Maghrabi et al., 2012; Fujita et al., 2017). پیش‌بینی آب قابل بارش جو از مسائل مشترک هواشناسی و هیدرولوژی است که اگر با دقت قابل قبولی صورت بگیرد، می‌تواند راهگشای بسیاری از مسائل هواشناسی در پیش‌بینی دقیق وضعیت جو و نیز بسیاری از مسائل در تخمین بارش و رواناب باشد (Jade et al., 2008; Hausmann et al., 2017). هیدرولوژیست‌ها برای تخمین حداکثر بارش محتمل که فاکتور مهمی در تعیین محاسبات مربوط به مخازن و سرریز سدها و نیز پیش‌بینی وقوع سیلاب می‌باشد، آب قابل بارش جو را در محاسبات لحاظ می‌نمایند (Rasooli et al., 2005; Ghasemi, 2012; Dehghani et al., 2015). البته، مقدار بخار آب قابل بارش به مفهوم نزولات جوی نیست. زیرا که مقدار بارش به متغیرهای متعدد دیگری از قبیل تراکم و نوع هواویزها، نمایه‌ی دما و فشار جو، رطوبت نسبی، جهت

بخار آب قابل بارش و تخمین مقدار آن در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف با کمک باندهای جذبی بخار آب و باندهای حرارتی امکان‌پذیر شده‌است (Gao *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2013; Ning *et al.*, 2016; You *et al.*, 2016; Gui *et al.*, 2017; Vaquero-Martínez *et al.*, 2018; Jiang *et al.*, 2019). برآورد مبتنی بر داده‌های سنجنش از دور بخار آب قابل بارش در ابتدا در دهه ۱۹۸۰ برای سطوح وسیع اقیانوسی به‌ویژه اقیانوس‌های مناطق حاره‌ای انجام گردید (Kleespies *et al.*, 1990). روند استفاده از تولیدات ماهواره‌ای برای تخمین بخار آب قابل بارش از دهه‌ی ۱۹۹۰ سیر صعودی به خود گرفته به‌طوری که در شرایط کنونی، تولیدات بخار آب قابل بارش ماهواره‌ای بیشترین کاربرد را در برآورد این متغیر در مقیاس‌های منطقه‌ای و جهانی دارد. از جمله تحقیقات پیشرو در این زمینه می‌توان به مطالعات (Gao *et al.*, 2002; Vermote *et al.*, 2002; Plantin *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2006) اشاره نمود. در این میان استفاده از داده‌های ماهواره مبنای سنجنده‌ی AIRS مستقر بر روی ماهواره‌ی Aqua مورد توجه محققین متعددی از قبیل (Bedka *et al.*, 2010; Hagan *et al.*, 2004; Gettelman *et al.*, 2006; Lambrigtsen *et al.*, 2003; Lambrigtsen *et al.*, 2004; Le Marshall *et al.*, 2006; McNally *et al.*, 2006; Raja *et al.*, 2008; Prasad *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2013) قرار گرفته‌است. گام‌های زمانی - مکانی مناسب و جهانی بودن داده‌های سنجنده‌ی AIRS، آن را در ردیف یکی از پرکاربردترین سنجنده‌ها در زمینه‌ی تخمین متغیرهای محیطی از جمله بخار آب قابل بارش، دما، رطوبت نسبی، درصد ابرناکی و... قرار داده است (Aumann *et al.*, 2003; Hagan *et al.*, 2004; Raja *et al.*, 2009; Prasad and Singh, 2008). به نظر می‌رسد، کشور ایران به دلیل موقعیت و ویژگی‌های خاص جغرافیایی، از توزیع آب قابل بارش با رفتار زمانی و مکانی ویژه‌ای برخوردار باشد. علیرغم مطالعات متعدد انجام شده در زمینه‌ی شناخت ویژگی‌ها و توزیع زمانی-مکانی بخار آب قابل بارش در جو ایران (Mobashri *et al.*, 2010; Hosseini *et al.*, 2014; Mohammadiyah *et al.*, 2010; Sadeghi *et al.*, 2017; Bayat *et al.*, 2015; Asakereh *et al.*, 2014)، بررسی داده‌های به‌کار رفته در اغلب مطالعات، بیانگر استفاده از داده‌های مشاهده‌ای، گمانه‌زنی‌های رادیوساوند و داده‌های بازکاوی مجدد پایگاه‌هایی از قبیل NCEP/NCAR، ECMWF، و غیره بوده است که دقت و صحت آن‌ها به مراتب از پیش‌های مبتنی بر تولیدات ماهواره‌ای کمتر است. بررسی سری‌های زمانی سالانه، فصلی و ماهانه‌ی میانگین بخار آب قابل بارش که در بازه‌ی زمانی سال‌های ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۴ به تفکیک برای کل جهان، نواحی حاره‌ای، معتدل و قطبی با استفاده از داده‌های ECMWF و NCEP بر روی خشکی و اقیانوس تخمین زده شد، به خوبی حاکی از روند افزایشی مقدار

و سرعت باد و ... بستگی دارد (Mobashri *et al.*, 2008). بنابراین بخار آب جو یکی از مهم‌ترین اجزای جو زمین است که اندازه‌گیری دقیق و گسترده‌ی آن در جو زمین کاربرد زیادی در مدل‌های انتقال تابش جوی و پیش‌بینی هوا (Gendt *et al.*, 2004)، برآورد آب قابل بارش کلی، پیش‌بینی مقدار بارش (Bretherton *et al.*, 2004; Bennitt *et al.*, 2012; Fujita *et al.*, 2012) سنگین و پیش‌بینی وقوع سیلاب (Willoughby *et al.*, 2008; Sun Lee *et al.*, 2010; Loriaux *et al.*, 2013; Fujibe *et al.*, 2016)، ردیابی و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی (Bengtsson *et al.*, 2004; Lee, MI *et al.*, 2007; Sherwood *et al.*, 2010) ابر و قابلیت بارورسازی ابرها (Lenderink *et al.*, 2010; Moteki *et al.*, 2013) محاسبه‌ی دقیق این فراسنج مستلزم آگاهی دقیق از حجم بخار آب موجود در جو می‌باشد که خود تحت تأثیر عوامل دیگری از قبیل غلظت جو، دما، جهت و سرعت باد، عوامل محلی و از همه مهم‌تر مقدار وزش و همگرایی رطوبت تغییر می‌نماید (Asakereh *et al.*, 2014). بر همین اساس بررسی مقدار آب قابل بارش و تغییرات آن از جنبه‌های مختلف اهمیت دارد. مطالعه‌ی ویژگی‌های آب قابل بارش از جنبه‌های مختلف توسط پژوهشگران پرشماری در جهان انجام شده‌است. از جمله‌ی این مطالعات می‌توان به (Bolsenga *et al.*, 1965; Elgered *et al.*, 1998; Bock *et al.*, 2005; Campmany *et al.*, 2010; Lu *et al.*, 2011; Chang-Geun *et al.*, 2012; Sharifi *et al.*, 2015; Kumar *et al.*, 2015; Benevides *et al.*, 2015; van der Ent *et al.*, 2017; Oluwasesan *et al.*, 2018) اشاره کرد. البته هنگامی که پوشش مکانی وسیعی برای واکاوی فراسنج آب قابل بارش مورد نیاز باشد، توزیع نامساوی ابزارهای سنجنش بخار آب (ایستگاه‌های هواشناسی، رادارها، لیدارها و سوندارها) به‌خصوص در نواحی خشک و بیابانی یکی از مشکلات اساسی است (Li *et al.*, 2018). از سویی دیگر مقدار آب قابل بارش در میان دیگر فراسنج‌های هواشناسی، به خاطر نوسان زیاد زمانی - مکانی، یکی از مشکل‌ترین متغیرها از نظر اندازه‌گیری می‌باشد (Kanemaru *et al.*, 2013). پایش آب قابل بارش توسط داده‌های ماهواره‌ای که در برگیرنده‌ی پوشش زمانی و مکانی متفاوت می‌باشد، ابزار مناسبی برای غلبه بر محدودیت‌های فوق است و اهمیت روش‌های دقیق سنجنش از دوری را در برآورد بخار آب قابل بارش نشان می‌دهد (Bevis *et al.*, 1992; Adeyemi and Joerg, 2012; Diedrich *et al.*, 2016; Vaquero-Martínez *et al.*, 2017; Campos-Arias *et al.*, 2019). در چند دهه‌ی اخیر، داده‌های سنجنش از دور بخار آب قابل بارش و شگردهای مبتنی بر روش‌های دورکاوی مورد توجه دانشمندان علوم مختلف جوی قرار گرفته و با توسعه‌ی ماهواره‌های هواشناسی، شناخت ویژگی‌های

تفکیک عمودی یا قائم آن ۱ کیلومتر می‌باشد. فراسنج‌های مشاهداتی توسط این سنجنده در راستای دید ماهواره و در دو عبور بالارو (Ascending) و پایین‌رو (Descending) دریافت می‌گردد. داده‌های AIRS از امواج اپتیکی و مادون قرمز حرارتی تشکیل شده و ویژگی‌های تابشی فراسنج‌های مختلف سطح زمین، جو و اقیانوس را در ۲۳۷۸ کانال تابشی مادون قرمز با دامنه‌ی طول موج ($15/4 \mu\text{m} - 3/7 \mu\text{m}$) و چهار کانال تابشی مرئی با دامنه‌ی طول موج ($0/94 \mu\text{m} - 0/4 \mu\text{m}$) جمع‌آوری می‌نماید (Pagano et al., 2003). در این مطالعه نیز از تولیدات فراسنج‌های بخار آب قابل بارش (PWV)، رطوبت نسبی، دما و درصد ابرناکی سنجنده‌ی AIRS مستقر بر ماهواره‌ی آکوا (AIRS3STM v006) که از وبگاه https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/AIRS3STM_006 قابل دریافت است استفاده گردید.

داده‌های ماهواره‌ی TRMM

برای دستیابی به داده‌های بارش، از تولیدات بارش ماهواره‌ی TRMM استفاده شد. ماهواره‌ی TRMM برای مطالعه‌ی بارش از عرض جغرافیایی ۵۰ درجه‌ی جنوبی تا ۵۰ درجه‌ی شمالی فعالیت دارد. داده‌های این ماهواره با گام‌های مکانی و زمانی متفاوتی قابل دسترسی است که بالاترین قدرت تفکیک مکانی آن $0/25^{\circ} \times 0/25^{\circ}$ درجه و قدرت تفکیک زمانی داده‌های آن چهار بار در روز (از سال ۲۰۰۰ میلادی تاکنون) ارائه می‌شود. در این تحقیق نیز از داده‌های روزانه‌ی سطح ۳ نسخه‌ی ۷ ماهواره TRMM که از طریق آدرس <https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/TRMM> قابل دریافت است، استفاده گردید.

داده‌های ماهواره مبنای مدل MERRA-2

همچنین برای اخذ داده‌های فشار سطح دریا و سرعت باد، از تولیدات مربوط به مدل ماهواره مبنای MERRA-2 استفاده شد. مدل The Modern-Era Retrospective Analysis for (Research and Applications, Version 2) که به مدل (MERRA-2) معروف است، یکی از قابل اعتمادترین مدل‌هایی می‌باشد که با هدف کمک به محققین مختلف از جمله اقلیم‌شناسی و محیط‌زیست برای پاسخگویی به مسائل مربوط به تحقیقات آب‌وهوایی و تغییرات اقلیمی برای بهره‌برداری بهینه از مشاهدات ماهواره‌ای، به کار گرفته شد. این مدل استفاده از داده‌های نسخه‌ی ۵ سیستم مشاهدات زمین‌گودارد سازمان فضایی ناسا (GEOS-5) به همراه داده‌های سیستم Assimilation Data Accident (ADAS) پشتیبانی می‌شود (Wu et al., 2002).

بخار آب قابل بارش در نواحی مورد مطالعه بوده است (Chen et al., 2016). همچنین در تحقیقات مشابه که با استفاده از داده‌های رادیوسوند، میکروویو ماهواره‌ی (۲۰۱۱ - ۱۹۸۸) و تصاویر مودیس (۲۰۱۸ - ۲۰۰۴) انجام گرفت روند افزایشی بخار آب قابل بارش جهانی تأیید شده‌است (Alraddawi et al., 2017; Wang, et al., 2017). در پژوهش حاضر که با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، ضمن برآورد بخار آب قابل بارش در جو ایران، به تحلیل همبستگی مکانی آن با برخی از متغیرهای آب و هواشناختی و بررسی روند آن پرداخته شد، نتایج حاصله با مطالعات جهانی هم راستا بوده‌است.

مواد و روش‌ها

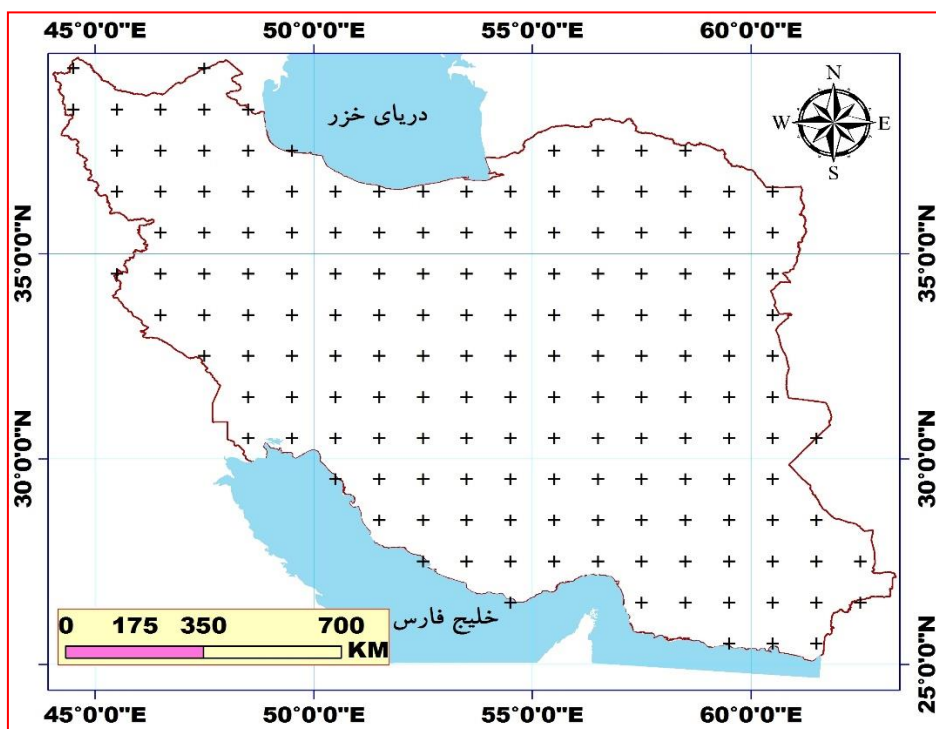
هدف از انجام پژوهش حاضر، در وهله‌ی اول برآورد ماهواره‌ای بخار آب قابل بارش جو ایران و در وهله‌ی دوم تحلیل همبستگی مکانی آن با برخی از فراسنج‌های آب و هواشناختی (دما، بارش، رطوبت نسبی، درصد ابرناکی، فشار هوا در سطح آزاد دریا و سرعت باد) است. بنابراین از سه مجموعه داده از جمله: ۱- تولیدات بخار آب قابل بارش، رطوبت نسبی، دما و درصد ابرناکی مربوط به سنجنده AIRS ماهواره‌ی Aqua ۲- داده‌های بارش مربوط به ماهواره TRMM و ۳- تولیدات مربوط به فشار هوا در سطح آزاد دریا و سرعت باد سطحی مدل MERRA-2 استفاده گردید که در ادامه به تشریح آن‌ها پرداخته شد.

داده‌های سنجنده‌ی AIRS

سازمان فضایی ناسا در راستای اجرای برنامه‌های فضایی آمریکا به منظور پایش، تحقیق و تحلیل سطح زمین، اقیانوس‌ها و جو و واکنش‌های بین آنها سیستمی را تحت عنوان سیستم پایش زمین (EOS) راه‌اندازی کرد (Chahine et al., 2006; Fishbein et al., 2007). سنجنده‌ی AIRS به عنوان عضوی از این سیستم در تاریخ چهار می سال ۲۰۰۲ بر روی ماهواره‌ی آکوا مستقر و راه‌اندازی گردید (Aumann et al., 2003). این سنجنده یکی از شش سنجنده‌ی ماهواره‌ی آکوا (MODIS, AIRA, AMSU, CERES, AMSR-E, HSB) می‌باشد که با هدف کمک به محققین تغییر اقلیم و بهبود پیش‌بینی وضعیت هوا ساخته شد (Parkinson, 2003). سنجنده‌ی AIRS از بازه‌ی طیفی بسیار گسترده‌ای برخوردار است که قدرت تفکیک آن ده‌ها برابر بیشتر از ابزارهای مشابه قبل از خود می‌باشد (Gottelman et al., 2004; Fishbein et al., 2007). قدرت تفکیک افقی این سنجنده در برخی از باندهای طیفی برابر با ۱۳,۵ کیلومتر در نقطه نادیر و قدرت

مذکور و اعمال الگوریتم‌های لازم، تبدیل به داده‌های رستری شده و خروجی‌های لازم بر اساس مرز جغرافیایی کشور ایران استخراج گردید. به‌طور کلی خروجی‌های حاصله نتیجه‌ی اعمال محاسبات بر روی ماتریس ماهانه به ابعاد 204×162 (۲۰۴ معرف تعداد مشاهدات در ماه‌های پیاپی از ۱۷ سال مورد مطالعه (۱۲ × ۱۷) و ۱۶۲ معرف تعداد نقاط شبکه‌بندی شده‌ی داده‌های ماهواره‌ی مبنای مورد استفاده در پهنه‌ی ایران) است (شکل ۱). به‌عبارتی دیگر، میانگین ماهانه از میانگین روزانه‌ی مربوط به هر یک از متغیرها برای کل گستره‌ی ایران منتج گردید. به لحاظ مکانی نیز، مقادیر هر پیکسل بیانگر میانگین ماهانه‌ی مقدار هر متغیر در طول دوره‌ی داده‌برداری است که برای درک هرچه بهتر رفتار آنها، نتایج به صورت تصاویر، گراف و نمودار ارائه گردید. بررسی مقادیر همبستگی (مبتنی بر رابطه‌ی رگرسیون خطی پیرسون) میان بخار آب قابل بارش جو ایران (متغیر پاسخ) با برخی از فراسنج‌های هواشناختی (متغیرهای مستقل) از قبیل؛ دما، فشار هوا، رطوبت نسبی، درصد ابرناکی، بارش و سرعت باد در گستره‌ی جغرافیایی ایران، از دیگر اهداف تحقیق است. واکاوی، تفسیر و استنباط‌های استدلالی یافته‌ها برای دست‌یابی به هدف پژوهش (برآورد ماهواره‌ای بخار آب قابل بارش (PWV) در جو ایران و تحلیل همبستگی مکانی آن با فراسنج‌های آب و هواشناختی) در گام نهایی جای گرفت.

(Randles et al., 2017). پروژه MERRA که بر روی تجزیه و تحلیل آب و هوای تاریخی (روند بلند مدت) شرایط آب‌وهوایی تمرکز نموده‌است، برای طیف وسیعی از مقیاس‌های آب‌وهوا، مجموعه‌ای از مشاهدات و نتایج اتمسفری بازکاوی شده‌ی مبتنی بر پایش‌های ماهواره‌ای و الگوریتم‌های سنجش از دور را در اختیار پژوهشگران قرار می‌دهد (Molod et al., 2012; Inness et al., 2019). در این تحقیق نیز از محصولات این مدل (M2T1NXSLV: MERRA-2) که از وبگاه Earth data (tavgl_2d: V5.12.4) https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/M2TMNXSLV_5.12.4 قابل دریافت است، استفاده شد. داده‌های مورد نیاز از هر سه پایگاه فوق، با فرمت NetCDF با گام‌های مکانی $1^\circ \times 1^\circ$ و زمانی ماهانه در بازه‌ی زمانی ۲۰۱۹-۲۰۰۳ استخراج گردید و پس از کنترل کیفی و پیش‌پردازش، توسط نرم افزارهای تخصصی (ENVI, ArcGIS و Grads) مورد پردازش قرار گرفت. فرمت NetCDF یا NC فرمتی از داده‌ها برای نگهداری داده‌های چندبعدی می‌باشد که با استفاده از امکاناتی که نرم افزارهای فوق در اختیار کاربر قرار می‌دهد، برای ساخت لایه‌های اطلاعاتی به کار گرفته شد. داده‌های مورد استفاده به صورت رقومی بوده و مقادیر آنها بر حسب ارزش عددی پیکسل‌ها یا یاخته‌های مربوط به متغیرهای مورد مطالعه (بخار آب قابل بارش، دما، فشار، رطوبت نسبی، ابرناکی، بارش و باد) است. داده‌ها با انتقال به محیط نرم‌افزارهای



شکل ۱- پراکنش نقاط شبکه‌بندی شده داده‌های ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی $1^\circ \times 1^\circ$ در گستره‌ی جغرافیایی ایران

نتایج و بحث

تجزیه و تحلیل آماری

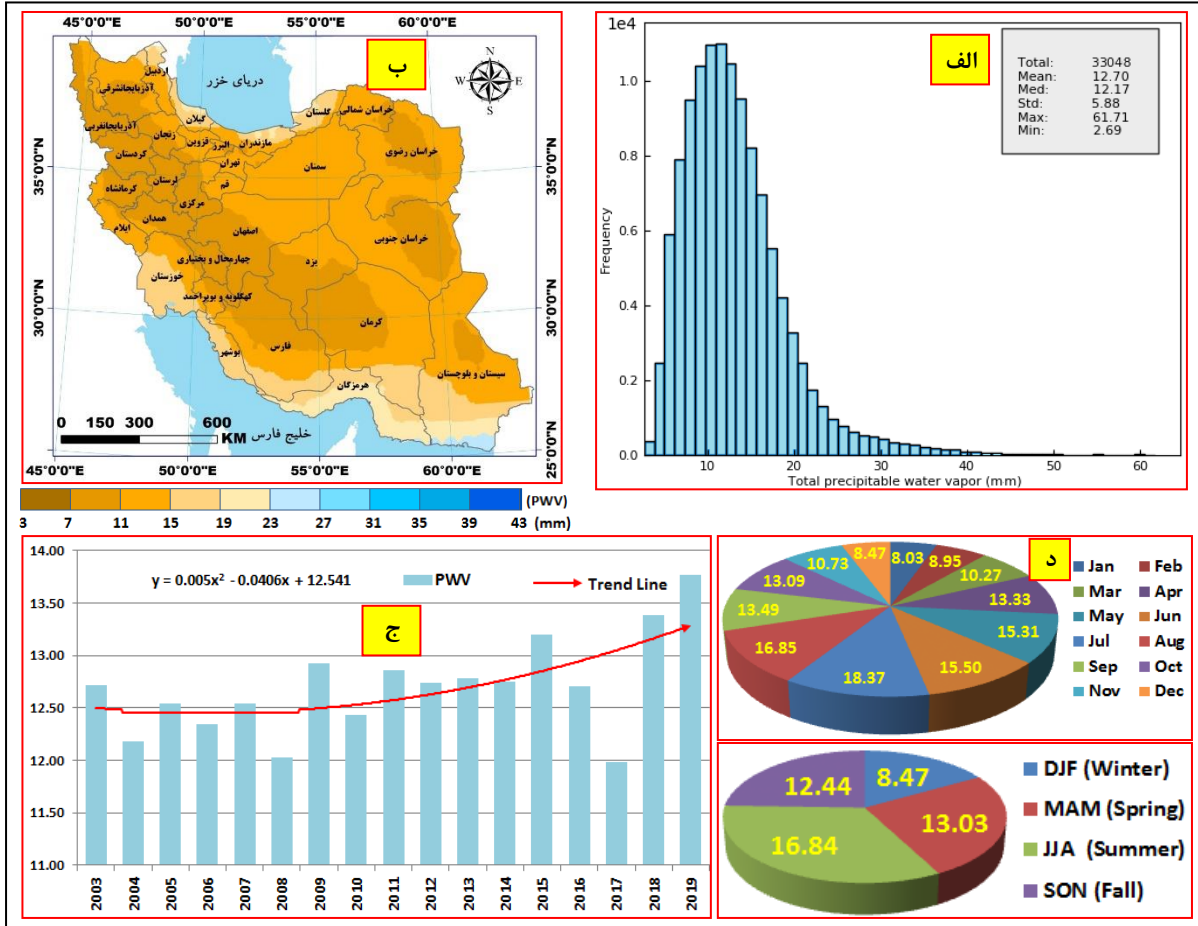
شکل (۲) برخی از پارامترهای آماری مربوط به بخار آب قابل بارش جو ایران را بر اساس تولیدات سنجنده‌ی AIRS (۲۰۱۹-۲۰۰۳) نشان می‌دهد. با توجه به هیستوگرام مربوطه میانگین بخار آب قابل بارش در جو ایران ۱۲/۷۰ mm، میانه ۱۲/۱۷ mm، حداکثر ۶۱/۷۱ mm و حداقل آن ۲/۶۹ mm است (شکل ۲-الف). میانگین بخار آب قابل بارش جو ایران در مقایسه با میانگین جهانی که حدود ۲۱/۶ mm است (Chen et al., 2016) به خوبی از کم بودن مقدار بخار آب قابل بارش جو ایران حکایت دارد. از سویی دیگر همین مقدار بخار آب قابل بارش جو ایران از توزیع مکانی همگنی برخوردار نیست، به طوری که بیشترین مقدار آن در ناحیه‌ی ساحلی جنوب و شمال و کمترین مقدار آن بر فراز سلسله جبال زاگرس، بخش‌هایی از شمال شرق و شرق ایران و در اولویت بعدی در نواحی بیابانی ایران مرکزی متمرکز است (شکل ۲ ب). سری زمانی مبتنی بر داده‌های آب قابل بارش سنجنده‌ی AIRS در جو ایران (۲۰۱۹-۲۰۰۳) حاکی از افزایشی بودن روند آن می‌باشد به طوری که میانگین بخار آب قابل بارش در طی دوره حدود ۱ mm افزایش یافته‌است (شکل ۲ ج). روند افزایشی بخار آب قابل بارش در جو ایران به طور آشکاری از سال ۲۰۱۱م آغاز گردیده و تا انتهای دوره (سال ۲۰۱۹م) استمرار داشته است. به نظر می‌رسد روند افزایشی بخار آب قابل بارش در جو ایران (به‌خصوص در دهه‌ی دوم دوره‌ی داده‌برداری) می‌تواند در پاسخ به افزایش دمای عمومی کره‌ی زمین و به تبع آن افزایش دمای ایران رخ داده باشد (یعنی ظرفیت نگهداری بخار آب اتمسفر بر فراز ایران افزایش یافته است). بنابراین می‌توان آن را به‌عنوان نمایه‌ی تغییر اقلیم در ایران مدنظر قرار داد. زیرا که افزایش دما خود می‌تواند به افزایش تبخیر و تعرق (افزایش بخار آب) کمک نموده و به تمرکز بیشتر بخار آب قابل بارش در اتمسفر بیانجامد. البته مقادیر سالانه دارای افت و خیزهایی نیز بوده‌است که در میان سال‌های مورد مطالعه، بیشترین مقدار آن در سال ۲۰۱۹ (۱۱/۹۹ mm) و کمترین مقدار آن در سال ۲۰۱۷ (۸/۴۷ mm) گردید (شکل ۲ ج). میانگین بخار آب قابل بارش در فصول چهارگانه‌ی زمستان (DJF)، بهار (MAM)، تابستان (JJA) و پاییز (SON) از توزیع آماری متفاوتی برخوردار است. بر اساس آنالیزهای انجام شده، بیشترین مقدار بخار آب قابل بارش جو ایران در فصل تابستان (۱۶/۸۴ mm) و کمترین مقدار آن در فصل زمستان (۸/۴۷ mm) برآورد گردید (شکل ۲ د). میانگین بخار آب قابل بارش در فصول بهار ۱۳/۰۳ mm و پاییز ۱۲/۴۴ mm به‌دست

آمد. از آن جایی که افزایش دمای هوا و به تبع آن افزایش ضخامت جو، پتانسیل لازم را برای تبخیر بیشتر و گنجایش بیشتر رطوبت اتمسفر فراهم می‌نماید، بنابراین فراهم بودن چنین شرایطی در دوره‌ی گرم سال (تابستان و بهار)، افزایش مقدار بخار آب قابل بارش را در جو ایران به دنبال دارد. در مقیاس زمانی ماهانه نیز بیشترین مقدار آب قابل بارش در جو ایران مربوط به ماه‌های گرم (Jul, Aug, Jun, May) و کمترین مقدار آن مربوط به ماه‌های سرد (Jan, Dec, Feb, Mar, Nov) است (شکل ۲ د). با شروع فصل گرم (آوریل) و متناسب با افزایش دما، روند افزایشی بخار آب قابل بارش در جو ایران آغاز گردیده و در ماه ژوئیه (تیر و مرداد) به اوج خود می‌رسد. سپس از ماه سپتامبر به بعد مجدداً روند کاهشی به خود گرفته و در فصل زمستان به کمترین مقدار خود تقلیل می‌یابد. افزایش تدریجی بخار آب قابل بارش در ماه‌های مربوط به فصل انتقالی بهار و به اوج رسیدن آن در در ماه‌های مربوط به فصل تابستان، در مرحله‌ی اول به معنای افزایش دما که خود افزایش تبخیر را به دنبال دارد و در مرحله‌ی دوم به دلیل افزایش ضخامت جو و گنجایش ظرفیت رطوبتی آن می‌باشد. زیرا در این دوره از سال، به دلیل حاکمیت دمای بالا بر کل گستره‌ی ایران، شرایط محیطی برای افزایش تبخیر در راستای تغذیه‌ی هر چه بیشتر بخار آب قابل بارش جو مهیاتر است.

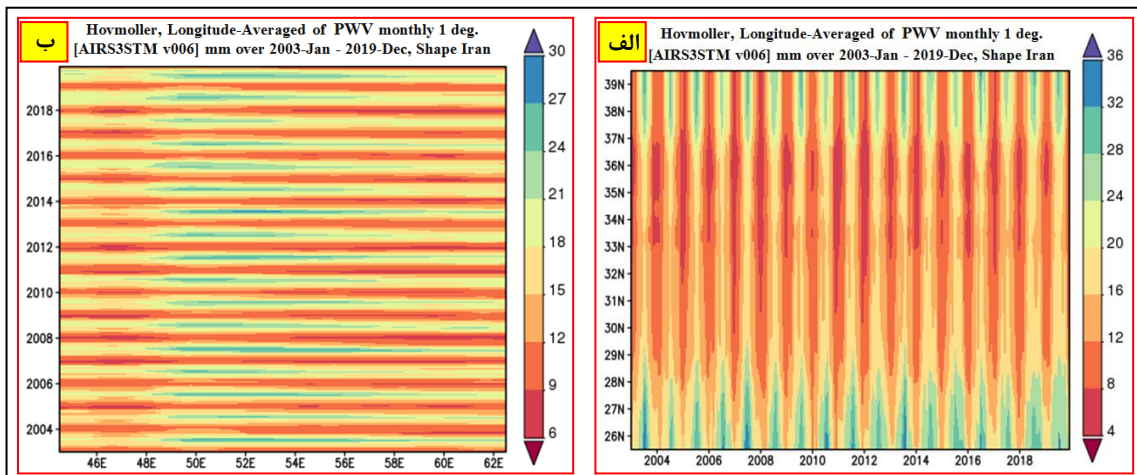
توزیع جغرافیایی بخار آب قابل بارش جو ایران در راستای طول و عرض جغرافیایی، بر اساس نمودار هوف مولر در شکل (۳) آمده‌است. نمودارهای هوف مولر نمودارهایی هستند که برای نشان دادن تغییرات یک فراسنج جوی در ابعاد طول جغرافیایی و زمان یا عرض جغرافیایی و زمان به کار می‌روند. همان طوری که در نمودار مربوط به توزیع مداری مشخص است، مقدار آب قابل بارش در کرانه‌های ساحلی جنوب از بیشترین مقدار برخوردار می‌باشد که با دور شدن از کرانه‌های ساحلی و پیشروی به درون خشکی ها از محتوای رطوبتی جو کاسته می‌شود. به طوری که در حدفاصل مدارهای ۳۲° تا ۳۷° عرض شمالی به کمترین مقدار خود می‌رسد. سپس با رسیدن به نواحی ساحلی شمال مجدداً به مقدار آب قابل بارش جو افزوده می‌شود (شکل ۳ ب). دلیل تمرکز بیشترین مقدار آب قابل بارش در جو حاکم بر نواحی ساحلی جنوب و شمال، دسترسی به منابع رطوبتی خلیج فارس، دریای عمان و دریای خزر می‌باشد. با نگاهی دقیق‌تر در می‌یابیم که توزیع مکانی میانگین آب قابل بارش در لایه‌های مجاور سطح زمین اتمسفر ایران، به شدت تحت تأثیر توپوگرافی زمین (ناهمواری و ارتفاع) می‌باشد. زیرا که به دلیل فاصله گرفتن از توده‌های رطوبتی و همچنین کاهش دمای هوا که خود می‌تواند عاملی برای کاهش گنجایش رطوبتی و همچنین کاهش ضخامت

به طوری که کمترین مقدار بخار آب قابل بارش در دو محدوده‌ی ۴۴° تا ۴۹° درجه و ۵۸° تا ۶۴° درجه‌ی طول شرقی مشهود می‌باشد. در این میان، میانگین بخار آب قابل بارش در جو نواحی مرکزی ایران با وجود دوری از منابع رطوبتی از ناحیه‌ی مرتفع زاگرس (به دلیل افزایش ارتفاع و کاهش ضخامت جو) بیشتر است.

ستون هوا باشد، مقدار آب قابل بارش با افزایش ارتفاع از سطح زمین کاهش می‌یابد. بنابراین مقدار آب قابل بارش بر فراز ارتفاعات ناچیز و به حداقل مقدار خود می‌رسد. توزیع نصف النهاری میانگین بخار آب قابل بارش جو ایران نیز به خوبی بیانگر تأثیر پهنه‌های آبی و اثر ارتفاعات در توزیع این فراسنج می‌باشد.



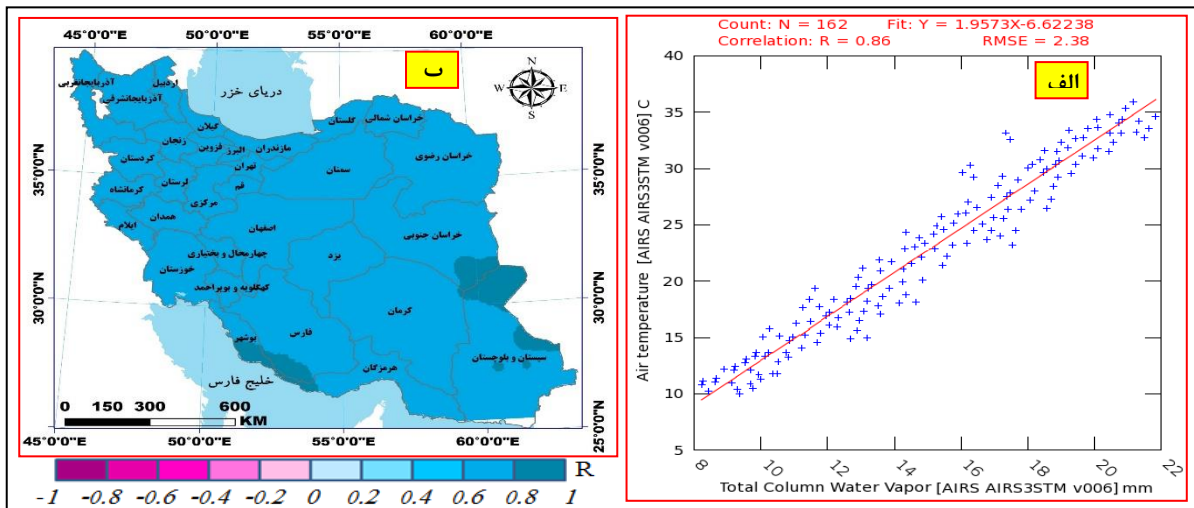
شکل ۲- هیستوگرام (الف)، توزیع مکانی (ب)، توزیع سالانه (ج)، توزیع فصلی و ماهانه (د) PWV در بازه‌ی زمانی (۲۰۰۳ - ۲۰۱۹)



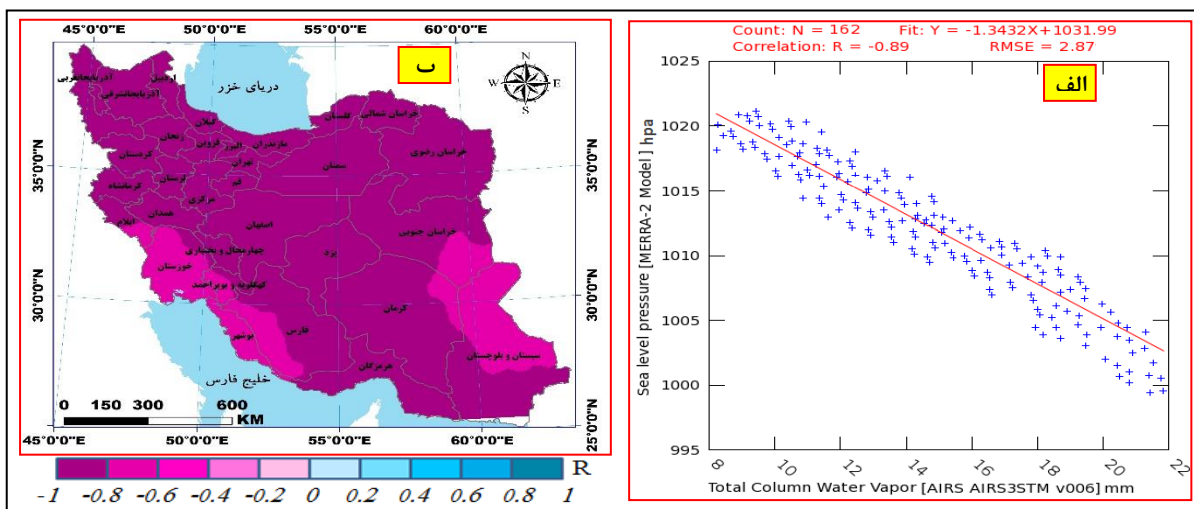
شکل ۳- توزیع جغرافیایی بخار آب قابل بارش جو ایران (PWV) در راستای طول و عرض جغرافیایی بر اساس نمودار هوف مولر در بازه‌ی زمانی (۲۰۰۳ - ۲۰۱۹)

مقدار بخار آب قابل بارش نیز افزایش می یابد. به لحاظ فیزیکی، افزایش دما منجر به انبساط هوا شده و موجب کاهش چگالی هوا می شود. این شرایط منجر به کاهش فشار هوا نیز می شود. بنابراین دمای بالا از یک سو منجر به افزایش ضخامت جو و از سوی دیگر، افزایش ظرفیت رطوبتی آن را به دنبال دارد. با این تفاسیر، برقراری رابطه مثبت معناداری میان بخار آب قابل بارش با فراسنج دما، مورد انتظار است. از سویی دیگر با کاهش دمای هوا در دوره سرد سال، مقدار بخار آب قابل بارش جو کاهش می یابد. در مجموع توزیع مقدار بخار آب قابل بارش در جو ایران حاکمیت شرایط حرارتی را نشان می دهد. یعنی اینکه هر جای ایران که هوا گرمتر است مقدار بخار آب قابل بارش نیز بیشتر است. به همین دلیل در طول سال بیشترین مقدار بخار آب قابل بارش جو ایران در تیرماه و کمترین آن در آذرماه می باشد که باز به دلیل کاهش دمای هوا، گنجایش بخار آب جو کاهش می یابد.

تحلیل همبستگی میان PWV با متغیرهای آب و هواشناختی در آمار، وابستگی هر نوع رابطه آماری علی یا غیر علی بین دو متغیر تصادفی یا داده های دو متغیره می باشد. اما همبستگی در وسیع ترین معنای خود، هر نوع پیوند آماری را شامل می شود، اگرچه بیشتر از این اصطلاح برای درجه ای ارتباط خطی بین یک جفت متغیر استفاده می شود. همبستگی مفهوم مفیدی است، چرا که می تواند بیانگر رابطه قابل پیش بینی بوده و در عمل از این پیش بینی پذیر بودن می توان بهره جست. نقشه و نمودار همبستگی میان بخار آب قابل بارش جو ایران با متغیر دمای هوا در شکل (۴) آمده است. بر اساس نمودار مربوطه، ضریب همبستگی میان این دو متغیر (R= %86) است که بیانگر همبستگی مثبت معنادار میان بخار آب قابل بارش جو با دما در گستره ایران می باشد. زیرا که با بالا رفتن دما، مقدار تبخیر نیز افزایش یافته و به تبع آن با افزایش فشار بخار آب موجود در جو



شکل ۴- نمودار همبستگی (الف) و نقشه همبستگی مکانی (ب) میان PWV با دما در بازه زمانی ۲۰۱۹ - ۲۰۰۳

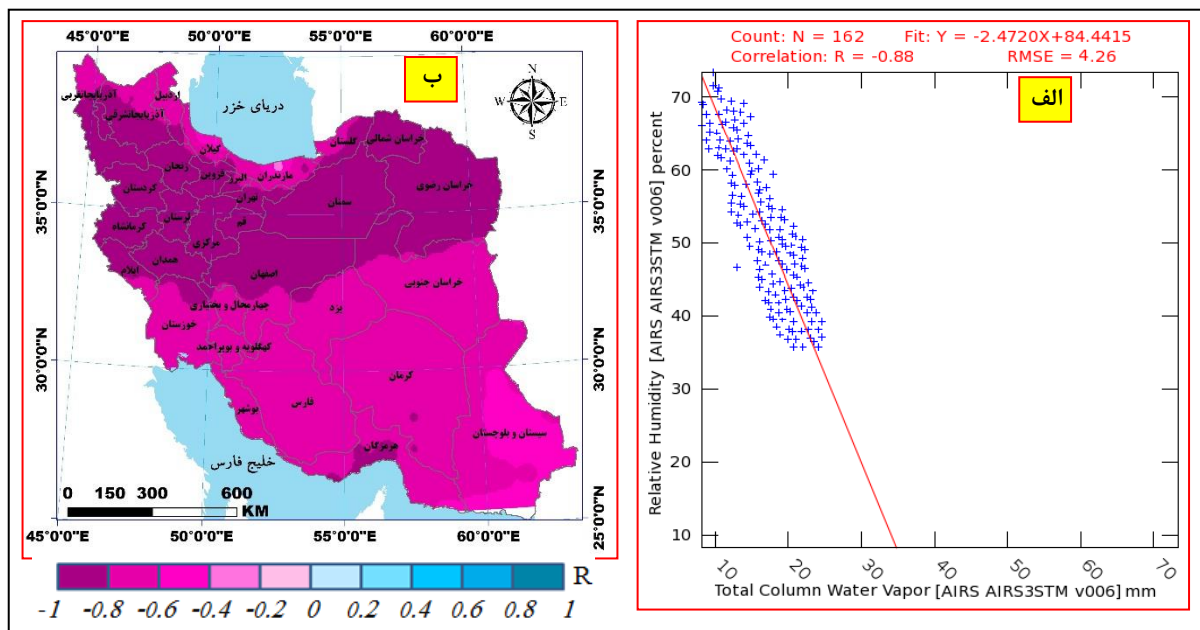


شکل ۵- نمودار همبستگی (الف) و نقشه همبستگی مکانی (ب) میان PWV با فشار هوا در سطح آزاد در بازه زمانی ۲۰۱۹ - ۲۰۰۳

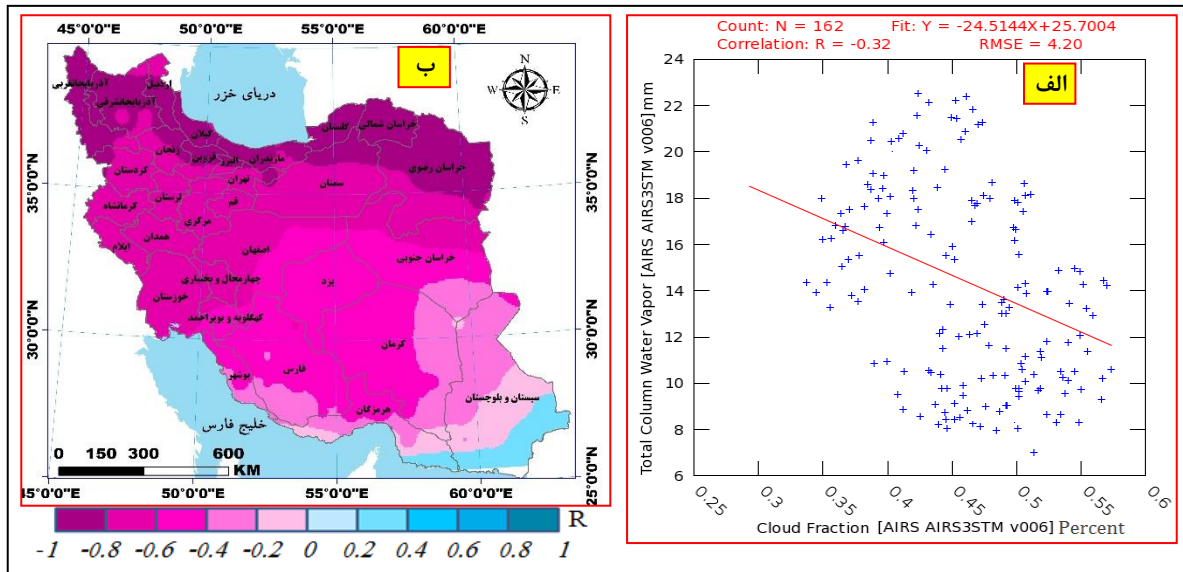
برای انتقال بخار آب به درون جو و همچنین افزایش ظرفیت رطوبتی جو فراهم گردد. به همین دلیل در دوره‌ی گرم سال که منطبق با شرایط کم‌فشار در لایه‌های پایین جو ایران می‌باشد، مقدار بخار آب قابل بارش جو بیش از دوره‌ی سرد سال است که همزمان با حاکمیت شرایط پرفشار است.

در شکل (۶) مقدار همبستگی میان بخار آب قابل بارش جو ایران با رطوبت نسبی ارائه شده‌است. بر اساس این شکل مقدار همبستگی میان این دو متغیر ($R = -0.88$) برآورد گردید. به لحاظ مکانی بیشترین مقدار همبستگی (منفی قوی) در ناحیه‌ای گسترده و پیوسته از شمال‌غرب تا شمال‌شرق و کمترین مقدار آن در ناحیه‌ی ساحلی شمال ایران و پس از آن در جنوب شرق مشهود است. رطوبت نسبی بیانگر نسبت بخار آب موجود در هوا به مقدار بخار آبی که در همان دما می‌تواند داشته باشد، است. بنابراین برخلاف مقادیر بخار آب قابل بارش جو، بیشترین مقدار رطوبت نسبی در دی ماه (دوره‌ی سرد) و کمترین مقدار آن در تیرماه (دوره‌ی گرم) است. از توزیع رطوبت نسبی چنین استنباط می‌شود که هوا در فصل تابستان علیرغم داشتن مقدار بخار آب قابل بارش بیشتر، خشک‌تر از فصل زمستان است. به طور کلی هم در مقدار بخار آب قابل بارش و هم رطوبت نسبی جو ایران، نقش اصلی را شرایط حرارتی بازی نموده که در دوره‌ی گرم، ظرفیت بخار آب قابل بارش جو را بالا برده و درصد رطوبت نسبی را پایین می‌آورد. بنابراین وجود چنین رفتاری میان این دو متغیر، تبیین‌کننده‌ی رابطه‌ی معنادار قوی منفی (همبستگی منفی) میان آنها می‌باشد که در شکل (۶) ترسیم گردید.

شکل (۵) نقشه و نمودار همبستگی میان بخار آب قابل بارش جو ایران را با فشار هوای تراز دریا نشان می‌دهد. بر اساس این شکل رابطه‌ی میان دو متغیر با میانگین ($R = -0.89$) معکوس بوده که حاکی از وجود رابطه‌ی معنادار منفی قوی میان آن‌ها در گستره‌ی ایران است. مقادیر همبستگی در کل گستره‌ی ایران منفی بوده البته در دو ناحیه جنوب‌غرب و جنوب‌شرق از مقدار کمتری برخوردار است. در دیگر نواحی ایران که در دوره‌ی سرد سال تحت حاکمیت بیشتر سیستم‌های پرفشار می‌باشد همبستگی منفی قویتری میان این دو متغیر برآورد شده است. الگوهای فشار در دوره‌ی سرد سال که ایران تحت سیطره‌ی بادهای غربی است عمدتاً تابعی از آرایش سامانه‌های همید سیاره‌ای است. ولی در دوره‌ی گرم سال با پسروری بادهای غربی، شرایط محلی به همراه سامانه‌های همید بیرونی الگوهای فشار هوا را تعیین می‌نماید. بر همین اساس، عملکرد این سامانه‌ها منجر به تشکیل الگوهای پرفشار در دوره‌ی سرد سال و الگوهای کم‌فشار در دوره‌ی گرم سال می‌شوند. البته در دوره‌ی سرد سال گذشته از گسترش پرفشار سیبری و دیگر سامانه‌های پرفشار، زمان عبور سامانه‌های کم‌فشاری نیز است که تحت بادهای غربی وارد کشور می‌شود. همچنین در دوره‌ی گرم سال، با گسترش پرفشار آזור بر اغلب کشور ایران (صرف‌نظر از لایه‌ی کم‌فشار نازک مجاور سطح زمین)، جو ایران اساساً پرفشار است. به‌عبارت دیگر جو حاکم بر فراز ایران ساختاری دو لایه دارد بدین صورت که در بخش پایینی جو به دلیل گرمایش سطح زمین، شرایط کم‌فشار بر اغلب ایران حاکم است. این ویژگی باعث می‌شود تا شرایط



شکل ۶- نمودار همبستگی (الف) و نقشه‌ی همبستگی مکانی (ب) میان بخار PWV با رطوبت نسبی در بازه‌ی زمانی ۲۰۱۹ - ۲۰۲۰



شکل ۷- نمودار همبستگی (الف) و نقشه‌ی همبستگی مکانی (ب) میان PWV با درصد ابرناکی در بازه‌ی زمانی ۲۰۱۹ - ۲۰۰۳

وقوع بارش در این فصل بسیار کمتر از زمستان (فصل پربارش) می‌باشد. از سویی دیگر، مقایسه نقشه‌های توزیع مقدار بخار آب قابل بارش با مقدار رطوبت نسبی نشان می‌دهد؛ در نواحی مرتفع (به‌خصوص زاگرس) برخلاف مقدار بخار آب قابل بارش کمتر (حتی کمتر از نواحی پست ایران مرکزی)، مقدار رطوبت نسبی بالا و از مقدار بارش بسیار خوبی نسبت به سایر نواحی ایران برخوردار می‌باشد. چنین پراکنشی از توزیع بخار آب قابل بارش جو ایران در مقایسه با میانگین بارش سالانه‌ی ارتفاعات زاگرس (حدود ۵۰۰ میلی‌متر) و ایران مرکزی (کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر) بیانگر عدم ارتباط معنادار میان مقدار بارندگی با بخار آب قابل بارش جو می‌باشد. دلیل بالاتر بودن میانگین بخار آب قابل بارش در ایران مرکزی، در وهله‌ی اول به دلیل بالاتر بودن دمای حاکم بر این نواحی نسبت به ارتفاعات زاگرس و در وهله‌ی دوم ضخامت بیشتر ستون جو در مقایسه با جو حاکم بر ارتفاعات زاگرس می‌باشد. اما این ناحیه به لحاظ بارشی در قلمرو خشک‌ترین نواحی کشور ایران قلمداد می‌شود.

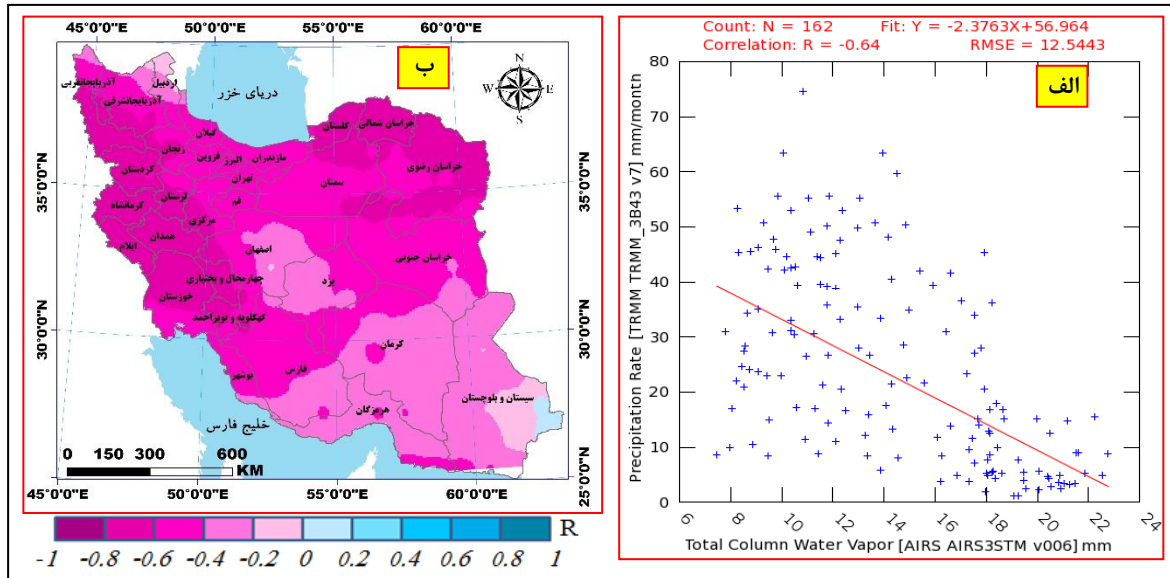
برای تبیین ارتباط میان مقدار بخار آب قابل بارش با کمیت باد، بررسی فشار هوا ضرورت پیدا می‌کند. فشار جو یکی از فراسنج‌های هواشناختی است که تغییرات آن عامل اصلی شکل‌گیری باد می‌باشد. با شکل‌گیری الگوهای فشار متأثر از تغییرات دمای هوا، جریان هوا از محلی به محل دیگر برقرار گردیده و جریان باد به وجود می‌آید. با این تفاسیر، فشار هوا با دما و سرعت باد با فشار هوا رابطه دارد. بر حسب رابطه‌ی رگرسیون خطی پیرسون، در ایران سرعت باد با دمای هوا رابطه‌ی مستقیم و با فشار هوا رابطه‌ی معکوس دارد. از سویی دیگر فشار تبخیر رابطه‌ی مستقیمی با سرعت باد و دمای هوا دارد. در فرایند تحقیق مشخص گردید، در

شکل (۷) بیانگر مقدار و نوع همبستگی میان بخار آب قابل بارش جو ایران با درصد ابرناکی جو می‌باشد. ابرناکی نماینده‌ی درصدی از آسمان است که پوشیده از ابر می‌باشد. بر اساس این شکل، بخار آب قابل بارش جو ایران با درصد ابرناکی جو فاقد رابطه‌ی معناداری (R = -32%) می‌باشد. این بدان معناست که فرایند تشکیل ابر در جو ایران با دما رابطه‌ی معکوس داشته و عمدتاً منشأ دینامیکی دارد. در دوره‌ی سرد سال که سامانه‌های کم‌فشار دینامیکی، جبهه‌ها و بادهای غربی جو کشور ایران را در برمی‌گیرند، مقدار ابرناکی از دوره‌ی گرم سال (بیشینه‌ی بخار آب قابل بارش) که سامانه‌های پرفشار دینامیکی بر آن غلبه دارند، بیشتر است. از سویی دیگر ابرناکی با رطوبت نسبی در ارتباط مستقیم می‌باشد. زیرا در دوره‌ی سرد سال مقدار رطوبت نسبی به حداکثر مقدار ممکن خود می‌رسد. بیشترین مقدار ابرناکی در جو ایران مربوط به فصل زمستان (کمترین مقدار بخار آب قابل بارش) و کمترین مقدار آن مربوط به فصل تابستان (بیشترین مقدار بخار آب قابل بارش) می‌باشد. این وضعیت به خوبی عدم ارتباط خطی معنادار میان دو متغیر را تبیین می‌نماید که در نمودار (الف-۷) ترسیم شده‌است.

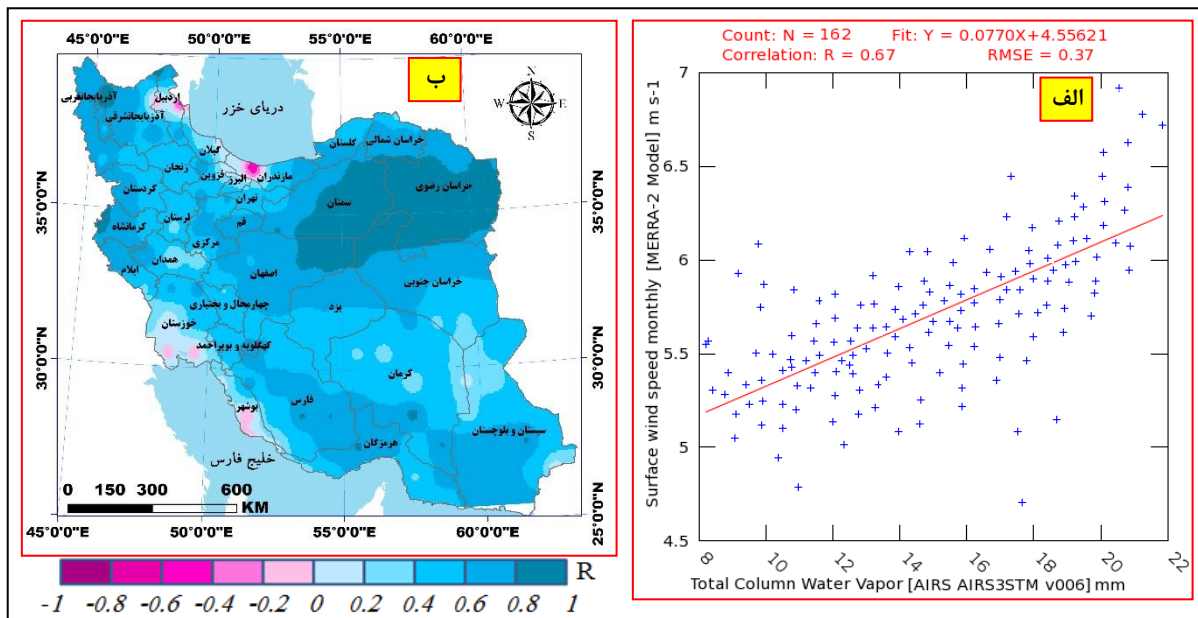
نمودار و همبستگی فضایی میان بخار آب قابل بارش جو ایران با بارش، بیانگر عدم وجود رابطه‌ی معنادار قوی (R = -64%) بین آن‌ها است. گرچه مقدار بخار آب قابل بارش جو از مهم‌ترین عناصر آب و هوایی جو به‌شمار می‌آید، ولی به لحاظ اثرگذاری بر مکانیسم بارش، علیرغم مقدار کم یا زیاد آن، زمانی می‌تواند منجر به بارندگی شود که رطوبت نسبی بالا رفته و به درجه اشباع برسد. به همین دلیل علیرغم مقادیر بالای بخار آب قابل بارش جو ایران در فصل تابستان، خشک‌ترین فصل سال به‌شمار آمده و احتمال

بخار آب قابل بارش جو نیز ارتباط مثبت نسبتاً معناداری ($R=0.67\%$) پیدا می‌نماید (شکل ۹). بدین مفهوم که رابطه‌ی میان بخار آب قابل بارش با سرعت باد خطی و مستقیم است. یعنی با افزایش سرعت باد تبخیر شدت یافته و منجر به افزایش بخار آب قابل بارش می‌شود.

ماه‌های گرم سال که مقدار سرعت باد و دمای هوا بالا می‌باشد، مقدار بخار آب قابل بارش جو ایران به حداکثر مقدار ممکن خود می‌رسد. ولی در ماه‌های سرد سال که افت قابل ملاحظه دما و سرعت باد بر گستره‌ی ایران مستولی می‌شود، شار تبخیر کاهش یافته و مقدار بخار آب قابل بارش نیز تقلیل می‌یابد. بنابراین سرعت باد با شار تبخیر رابطه‌ی مستقیم داشته و به تبع آن با



شکل ۸- نمودار همبستگی (الف) و نقشه‌ی همبستگی مکانی (ب) میان PWV با بارش در بازه‌ی زمانی ۲۰۱۹ - ۲۰۰۳



شکل ۹- نمودار همبستگی (الف) و نقشه‌ی همبستگی مکانی (ب) میان PWV با سرعت باد در بازه‌ی زمانی ۲۰۱۹ - ۲۰۰۳

گردد. در همین راستا، داده‌های ماهواره‌ای بخار آب قابل بارش با استفاده از داده‌های سنجنده‌ی AIRS طی بازه‌ی زمانی ۱۷ ساله (۲۰۱۹ - ۲۰۰۳) مورد بررسی قرار گرفته و آنالیزهای آماری و تحلیل‌های استنباطی انجام گرفت. نتایج نشان داد که تفاوت‌های زمانی و مکانی قابل ملاحظه‌ای در مقدار بخار آب قابل بارش جو

نتیجه‌گیری

برآورد مقدار بخار آب قابل بارش جو با وضوح زمانی و مکانی بالا می‌تواند نقش مهمی را در مطالعات هواشناسی و اقلیم‌شناسی ایفا نموده و در شناسایی توانمندی‌های آب کشور ایران مفید واقع

باشد که نظم تأثیر عرض جغرافیایی بر آب قابل بارش را بر هم زده است. به لحاظ نصف‌النهاری نیز، مقدار بخار آب قابل بارش جو ایران از توزیع همگنی برخوردار نبوده به طوری که کمترین مقدار بخار آب قابل بارش در دو محدوده‌ی 44° تا 49° درجه و 58° تا 64° درجه‌ی طول شرقی مشهود می‌باشد. در این میان، میانگین بخار آب قابل بارش جو نواحی ایران مرکزی با وجود دوری از منابع رطوبتی، از ناحیه‌ی مرتفع زاگرس (به دلیل افزایش ارتفاع و کاهش ضخامت جو) بیشتر می‌باشد. تحلیل مقادیر همبستگی مبتنی بر رابطه‌ی رگرسیون خطی پیرسون میان بخار آب قابل بارش جو ایران (متغیر پاسخ) با برخی از فراسنج‌های هواشناختی (متغیرهای مستقل) از قبیل؛ دمای هوا، فشار هوا، رطوبت نسبی، درصد ابرناکی، بارش و سرعت باد در گستره‌ی جغرافیایی ایران، به خوبی بیانگر شدت و ضعف مقدار همبستگی میان این متغیر با فراسنج‌های مذکور است. به طوری که در این میان؛ مقدار همبستگی بین مقدار بخار آب قابل بارش جو ایران با دمای هوا حاکی از وجود رابطه‌ی معنادار مثبت قوی ($R=86\%$)، با فشار هوا رابطه‌ی معنادار منفی قوی ($R=89\% -$)، با رطوبت نسبی رابطه‌ی معنادار منفی قوی ($R=88\% -$)، با درصد ابرناکی عدم رابطه‌ی معنادار ($R=32\% -$)، با بارش ارتباط نسبتاً معنادار منفی ($R=64\% -$) و سرعت باد نیز رابطه‌ی نسبتاً معنادار مثبت ($R=67\%$) بوده است. این بدان معناست که مقدار بخار آب قابل بارش جو ایران، از یک سو تحت تأثیر توپوگرافی زمین (ناهمواری و ارتفاع) و مقدار همجواری با منابع رطوبتی و از سویی دیگر متأثر از متغیرهای متعدد محیطی می‌باشد. بنابراین برآیند چنین شرایطی ارائه‌ی الگوی مکانی نسبتاً پایدار از توزیع مکانی بخار آب قابل بارش جو ایران را غیرممکن می‌نماید.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

ایران وجود دارد. علاوه بر این، سری زمانی سالانه‌ی مقدار بخار آب قابل بارش جو ایران، ضمن برخورداری از افت‌وخیزهای سالانه، حاکی از افزایشی بودن روند آن است. روند افزایشی این فراسنج به طور بارزی از سال ۲۰۱۱ م آغاز و تا پایان دوره استمرار داشته است. روند افزایشی بخار آب قابل بارش جو ایران، نه تنها می‌تواند نوعی بازخورد به افزایش دما در پهنه‌ی ایران باشد، بلکه بررسی رفتار آن را از منظر تغییر اقلیم قابل توجه می‌نماید. بررسی بخار آب قابل بارش جو ایران در بازه‌های زمانی فصلی و ماهانه نیز، نتایج جالبی را ارائه نموده است. در میان فصول، بیشترین/کمترین مقدار آب قابل بارش مربوط به فصول تابستان/زمستان و در میان ماه‌ها؛ بیشترین/کمترین مقدار بخار آب قابل بارش جو ایران مربوط به ماه‌های ژوئیه/ژانویه است. از سویی دیگر پایین بودن مقدار بخار آب قابل بارش برآورد شده در جو ایران (در مقایسه با میانگین جهانی)، حاکی از حاکمیت جو خشک ایران در بازه‌های زمانی و گستره‌های مکانی است. در این میان، عوامل محلی از جمله دوری و نزدیکی به منابع رطوبتی، نقش مهمی در توزیع بخار آب قابل بارش جو ایران بازی می‌نماید. بر اساس مشاهدات، جو منطبق بر ارتفاعات (به‌خصوص ارتفاعات زاگرس) از تمرکز آب قابل بارش بسیار کمی برخوردار است و در مقابل جو کرانه‌های ساحلی خلیج فارس، دریای عمان و دریای خزر به دلیل برخورداری از منابع عظیم تغذیه رطوبت، در ردیف نواحی با بیشترین مقدار بخار آب قابل بارش جو ایران قرار دارند. با این وجود، مقدار آب قابل بارش در جو ایران بیش از آن که با عرض جغرافیایی (بر خلاف توزیع جهانی) ارتباط داشته باشد بیشتر تابع توپوگرافی و دوری و نزدیکی از منابع رطوبتی است. دلیل این تبعیت‌ناپذیری آب قابل بارش جو ایران از عرض جغرافیایی، وجود منبع عظیم رطوبتی دریای خزر در شمال می

REFERENCES

- Adeyemi, B., and Joerg, S. (2012). Analysis of water vapor over Nigeria using radiosonde and satellite data. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 51(10):1855-1866.
- Alraddawi, D., Keckhut, P., Sarkissian, A., and Abdanour Irbah., O. (2017). Enhanced MODIS Atmospheric Total Water Vapour Content Trends in Response to Arctic Amplification. *Atmosphere.* 8(12): 241.
- Asakereh, H., and Dostkamian, M. (2015). Investigation of the role of spatial factors on distribution - Distribution of rainfall maximum water in Iran. *Journal of Applied Research in Geographical Sciences.* 15(32):7 - 24. (In Farsi).
- Asakereh, H., Dostkamian, M., and Ghaemi, H. (2014). Analysis of changes in anomalies and water cycles capable of precipitation in Iran. *Journal of Natural Geographical Research.* 46(4): 435 - 444. (In Farsi).
- Asakereh, H., Doostkamian, M., and Sadrafshary, S. (2015). Anomalies and cycles of precipitable water over Iran in recent decades. *Arabian Journal of Geosciences.* 8(11): 9569-9576.
- Aumann, H. H., and Coauthors, B. (2003). AIRS/AMSU/HSB on the Aqua mission: Design, science objectives, data products, and processing. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 41:253-264.
- Bayat, A., and Mashhadi Zadeh, S. (2019). Analysis of spatial and temporal correlation between AIRS precipitable water vapor and data of 29 synoptic

- stations of Iran: *Journal of Applied Research in Geographical Sciences*. 19(35): 19-32. (In Farsi).
- Bedka, S., Knuteson, R., Revercomb, H., Tobin, D., and Turner, D. (2010). An assessment of the absolute accuracy of the Atmospheric Infrared Sounder v5 precipitable water vapor product at tropical, midlatitude, and arctic ground-truth sites: September 2002 through August 2008. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 115(17): 241-256.
- Benevides, P., Catalao, J., and Miranda, P.M.A. (2015). On the inclusion of GPS precipitable water vapor in the nowcasting of rainfall. *Nat. Hazards Earth Syst.* 5 (21): 2605–2616.
- Bengtsson, L., Hagemann, S., and Hodges, K. I. (2004). Can climate trends be calculated from reanalysis data?. *J. Geophys. Res.-Atmos.* 109:1024-1032.
- Bennitt, G. V., and Jupp, A. (2012). Operational assimilation of GPS zenith total delay observations into the met office numerical weather prediction models. *Weather Rev.* 140: 2706–2719.
- Bevis, M., Businger, S., Herring, T. A., Rocken, C., Anthes, R. A., and Ware, R. H. (1992). GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. *J. Geophys. Res.-Atmos.* 97 (8):15787–15801.
- Bock, O., Keil, C., Richard, E., Flamant, C., and Bouin, M. N. (2005). Validation of precipitable water from ECMWF model analyses with GPS and radiosonde data during the MAP SOP. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* 131:3013–3036.
- Bolsenga, S. J. (1965). The relationship between total atmospheric water vapor and surface dew point on a mean daily and hourly basis: *J. Appl. Meteorol.* 4:430–432.
- Bretherton, H.S., Matthew, E.P., and Larissa, E.B. (2004). Relationships between Water Vapor Path and Precipitation over the Tropical Oceans. *J. Climate*. 17:1517-1528.
- Campmany, E., Bech, J., Rodríguez-Marcos, J., Sola, Y., and Lorente, J. (2010). A comparison of total precipitable water measurements from radiosonde and sunphotometers. *Atmospheric Research*. 97: 385-392.
- Campos-Arias, P., Esquivel-Hernández, G., Valverde-Calderon, J.F., Rodríguez-Rosales, S., Moya-Zamora, J., Sanchez-Murillo, R., and Boll, J. (2019). GPS Precipitable Water Vapor Estimations over Costa Rica: A Comparison against Atmospheric Sounding and Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS). *Climate*. 7: 63-76.
- Chahine, M. T., and Coauthors, F. (2006) AIRS: Improving weather forecasting and providing new data on greenhouse gases. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 87:911–926.
- Chang-Geun, P., Kyoung-Min, R., and Jungho, C. (2012). Radiosonde sensors bias in precipitable water vapor from comparisons with global positioning system measurements: *J. Astron. Space Sci.* 29 (3):295-303.
- Chen, B., and Liu, Z. (2016). Global water vapor variability and trend from the latest 36-year (1979 to 2014) data of ECMWF and NCEP reanalyses, radiosonde, GPS, and microwave satellite. *JGR Atmospheres*. 121(19): 11,442-11,462.
- Dehghani, T., Saligheh, M., and Alijani, B. (2015). The effect of climate change on rainfall in the northern coasts of the Persian Gulf. *Applied Research in Geographical Sciences*. 18 (49): 75 - 91. (In Farsi).
- Diedrich, H., Wittchen, F., Preusker, R., and Fischer, J. (2016). Representativeness of total column water vapour retrievals from instruments on polar orbiting satellites. *Atmos. Chem. Phys.* 16: 8331–8339.
- Elgered, G., and Jarlemark, P. O. (1998). Ground-based microwave radiometry and long-term observations of atmospheric water vapor: *Radio Sci.* 33(7):707–717.
- Fishbein, E., S. Y. Lee, E. Manning, E. Maddy, and W. W. McMillan. (2007). AIRS/AMSU/HSB version 5 level 2 product levels, layers and trapezoids. User Doc., Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA, 11 pp.
- Fujibe, F. (2016). Annual variation of extreme precipitation intensity in Japan: Assessment of the validity of Clausius-Clapeyron scaling in seasonal change. *SOLA*. 12:106–110.
- Fujita, M., and Sato, T. (2017). Observed behaviours of precipitable water vapour and precipitation intensity in response to upper air profiles estimated from surface air temperature. *Sci Rep.* 7(3-4): 4233.
- Fujita, M., Wada, A., Iwabuchi, T., and Rocken, C. (2012). GPS Precipitable water vapor dataset for climate science, Proceedings of the 25th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation. 19:3454–3458.
- Gao B.C and Kaufman, Y.J. (2002). The MODIS Near-IR Water Vapor Algorithm"; *IEEE Transaction on Geosciences and Remote Sensing*. 56: 2123-2134.
- Gao, B.C., and Kaufman, Y.J. (2003). Water vapor retrievals using moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) near-infrared channels. *J. Geophys. Res. Atmos.* 108:1007–1021.
- Gendt, G., Dick, G., Reigber, C., Tomassini, M., Liu, Y., and Ramatschi, M. (2004). Near real time GPS water vapor monitoring for numerical weather prediction in Germany: *J. Meteor. Soc. Jpn.* 82:361–370.
- Gettelman, A., and Coauthors. (2004). Validation of *Aqua* satellite data in the upper troposphere and lower stratosphere with in-situ aircraft instruments. *Geophys. Res. Lett.* 31: 22107.
- Gettelman, A., W. D. Collins, E. J. Fetzer, A. Eldering, F. W. Irion, P. B. Duffy, and G. Bala. (2006). Climatology of upper-tropospheric relative humidity from the Atmospheric Infrared Sounder and implications for climate. *J. Climate*. 19: 6104–6121.
- Ghasemi, A. R. (2012). Modeling the temporal and spatial changes of cloud cover, with emphasis on rainy days in Iran. PhD thesis in Natural Geography, Climatology. Tabriz University. (In

- Farsi).
- Gui, K., Che, H., Chen, Q., Zeng, Z., Liu, H., Wang, Y., Zheng, Y., Sun, T., Liao, T., and Wang, H. (2017). Evaluation of radiosonde, MODIS-NIR-Clear, and AERONET precipitable water vapor using IGS ground-based GPS measurements over China. *Atmos. Res.* 197: 461–473.
- Hagan, D. E., Webster, C. R., Farmer, C. B., May, R. D., Herman, R. L., Weinstock, E. M., and Newman, P. A. (2004). Validating AIRS upper atmosphere water vapor retrievals using aircraft and balloon in situ measurements: Geophysical research letters. 31(21): 217-242.
- Hausmann, P., Sussmann, R., Trickl, T., and Schneider, M. (2017). A decadal time series of water vapor and D=H isotope ratios above Zugspitze: transport patterns to central Europe. *Atmos. Chem. Phys.* 17: 7635–7651.
- Heise, S., Dick, G., Gendt, G., Schmidt, T., and Wickert, J. (2009). Integrated water vapor from IGS ground-based GPS observations: initial results from a global 5-min data set: *Ann. Geophys.* 27: 2851–2859.
- Inness, A., Inness, A., Ades, M., Agustipanareda, A., Barre, J., Benedictow, A., Blechschmidt, A.M., and Dominguez, J.J. (2019). The CAMS reanalysis of atmospheric composition. *Atmospheric Chemistry Physics*. 9:3515-3556.
- Jade, S., and Vijayan, M. (2008). GPS-based atmospheric precipitable water vapor estimation using meteorological parameters interpolated from NCEP global reanalysis data: *J. Geophys. Res.-Atmos.* 113(10):1029.
- Jiang, J., Zhou, T., and Zhang, W. (2019). Evaluation of Satellite and Reanalysis Precipitable Water Vapor Data Sets Against Radiosonde Observations in Central Asia. *Earth and Space Science.* 10:1029.
- Kanamaru, K., and Masunaga, H. A. (2013). Satellite study of the relationship between sea surface temperature and column water vapor over tropical and subtropical oceans. *J. Climate.* 26: 4204–4218.
- Kleespies T.J., McMillin, L.M. (1990). Retrieval of precipitable water from observations in the split window over varying surface temperatures. *Journal of Applied Meteorology.* 29: 1236-1247.
- Kumar, S., Allan, R.P., Zwiers, F., Lawrence, D.M., and Dirmeyer, P.A. (2015). Revisiting trends in wetness and dryness in the presence of internal climate variability and water limitations over land. *Geophys. Res. Lett.* 42:10867–10875.
- Lambrigtsen, B. H. (2003). Calibration of the AIRS microwave instruments. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 41: 369–378.
- Lambrigtsen, B. H., and Lee, S. Y. (2003). Coalignment and synchronization of the AIRS instrument suite. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 41: 343–351.
- Lambrigtsen, B. H., E. J. Fetzer, E. Fishbein, S. Y. Lee, and T. Pagano. (2004). AIRS-the Atmospheric Infrared Sounder. *Proc. Int. Geoscience and Remote Sensing Symp.* 3: 2204–2207.
- Le Marshall, J., and Coauthors, M. (2006). Improving global analysis and forecasting with AIRS. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 87: 891–894.
- Lee, M.I., Schubert, S.D., Suarez, M.J. Held, I.M., Lau, N.C., Plushy, J.J., Kumar, A., Kim, H.K., and Schema, J.K.E. (2007). An analysis of the warm-season diurnal cycle over the continental United States and northern Mexico in general circulation models. *J. Hydrometeor.* 8(3): 344–366.
- Lenderink, G., and van Meijgaard, E. V. (2010). Linking increases in hourly precipitation extremes to atmospheric temperature and moisture changes: *Environ. Res. Lett.* 5: 136 -148.
- Li, X., Tan, H., Dick, G., Wickert, J., and Schuh, H. (2018). Real-time sensing of precipitable water vapor from BeiDou observations: Hongkong and CMONOC networks. *J. Geophys. Res. Atmos.* 123: 212-221.
- Loriaux, J. M., Lenderink, G., Roode, S. R. D., and Siebesma, A. P. (2013). Understanding convective extreme precipitation scaling using observations and an entraining plume model: *J. Atmos. Sci.* 70:3641–3655.
- Lu, N., Qin, J., Yang, K., Gao, Y., Xu, X., and Koike, T. (2011). On the use of GPS measurements for moderate resolution imaging spectrometer precipitable water vapor evaluation over southern Tibet: *J. Geophys. Res.* 10: 116, 1–7.
- Maghrabi, A., and Al Dajani, H.M. (2012). Estimation of precipitable water vapour using vapour pressure and air temperature in an arid region in central Saudi Arabia. *J. Assoc. Arab Uni. Basic Appl. Sci.* 14:1-8.
- McNally, A. P., P. D. Watts, J. A. Smith, R. Engelen, G. A. Kelly, J. N. Thépaut, and M. Matricardi. (2006) The assimilation of AIRS radiance data at ECMWF. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 132: 935–957.
- Mobasheri, M., Purbagher, S., Kordi, M., Farajzadeh, M., and Sadeghi Naeini, A. (2008). Improvement of remote sensing techniques in TPW assessment using radiosonde data. *Journal of Applied Sciences.* 8: 480-488. (In Farsi).
- Mobashri, M. R., Purbagher Kurdi, S. M., Farajzadeh Asl, M., and Sadeghi Naeini, A. (2010). Estimation of total precipitation using MODIS satellite images and radio data (study area: Tehran region). *Journal of Humanities Teacher.* 65(2):107 - 126. (In Farsi).
- Mohammadiyah, A., Memarian, M. H., Azadi, M., and Reyhani Parvari, M. (2014). Investigation of WRF model forecasts for rainwater and its relationship with rainfall estimation using Tehran radar data. *Iranian Geophysical Journal.* 3(22):1- 13. (In Farsi).
- Molod, A., Takacs, L., Suarez, M., Bacmeister, J., Song, I.S and Eichmann, A. (2012). The GEOS-5 Atmospheric General Circulation Model: Mean Climate and Development from MERRA to Fortuna; NASA Technical Report Series on Global Modeling and Data Assimilation. *Greenbelt.* 117: 28-45.
- Moteki, N., and Kondo, Y. (2013). A new theoretical method for calculating temperature and water vapor saturation ratio in an expansion cloud

- chamber. *J. Geophys. Res. Atmos.* 118: 6627-6633.
- Ning, T., Wickert, J., Deng, Z., Heise, S., Dick, G., Vey, S., and Schone, T. (2016). Homogenized time series of the atmospheric water vapor content obtained from the GNSS reprocessed data. *J. Climate*. 29:2443–2456.
- Oluwasesan, A., Falaiye, J., Abimbola- Rachel, T., and Pinker, D. (2018). Multi-Technique Analysis of Precipitable Water Vapor Estimates in the sub-Sahel West Africa. *Heliyon*. 4:756-768.
- Paganò, T. S., Aumann, H. H., Hagan, D., and Overoye, K. (2003). Pre-launch and in-flight radiometric calibration of the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS), *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 41:265–273.
- Parkinson, C. L. (2003). Aqua: an earth-observing satellite mission to examine water and other climate variables. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 41: 173-183.
- Plantin S., King M. D., Ackerman S. A., Menzel W. P., Baum B. A., Riedi J.C., and Fery R.A. (2003). The MODIS products: Algorithms and examples from Terra. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*. 41:241-257.
- Prasad, A. K., and Singh, R. P. (2009). Validation of MODIS Terra, AIRS, NCEP/DOE AMIP-II Reanalysis-2, and AERONET Sun photometer derived integrated precipitable water vapor using ground-based GPS receivers over India. *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*. 114:1232-1245.
- Raja, M. R. V., Gutman, S. I., Yoe, J. G., McMillin, L. M., and Zhao, J. (2008). The validation of AIRS retrievals of integrated precipitable water vapor using measurements from a network of ground-based GPS receivers over the contiguous United States. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 25(3):416-428.
- Randles, C.A., Dasilva, A., Buchar, V., Colarco, P.R., Darmenov, A.S., Govindaraju, R.C., Smirnov, A., Ferrare, R.A., Hair, J.W. and Shinozuka, Y. (2017). The MERRA-2 Aerosol Reanalysis, 1980-onward, Part I: System Description and Data Assimilation Evaluation. *Journal Climatology*. 30: 6823-6850.
- Rasooli, A. A., Jahanbakhsh, S., and Ghasemi, A. R. (2014). Investigation of the relationship between important parameters of cloud and daily rainfall in Iran: *Journal of Geographical Research*. 29 (1): 23-42.
- Sadeghi Hosseini, S. A., Hjam, S., and Tophang saz, P. (2005). The relationship between cloudy rainwater and observed rainfall in Tehran region. *Journal of Earth and Space Physics*. 31(2): 13 -21. (In Farsi).
- Sharifi, M.A., Khaniani, A.S., and Joghataei, M. (2015). Comparison of GPS precipitable water vapor and meteorological parameters during rainfalls in Tehran: *Meteorol. Atmos. Phys.* 127 (6): 701-710.
- Sherwood, S.C., Roca, R., Weckwerth, T.M., and Andronova, N.G. (2010). Tropospheric Water Vapor, Convection, and Climate. *Rev. Geophys.* 48 (15): 2001-2017.
- Sun, L., Shen, B., and Sui, B. (2010). A study on water vapor transport and budget of heavy rain in northeast China: *Advances in Atmospheric Sciences*. 27 (6): 1399–1414.
- van der Ent, R.J., and Tuinenburg, O.A. (2017). The residence time of water in the atmosphere revisited., *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21: 779–790.
- Vaquero-Martínez, J., Anton, M., Ortiz de Galisteo, J., Cachorro, V., Costa, M., Roman, R., and Bennouna, Y. (2017). Validation of MODIS integrated water vapor product against reference GPS data at the Iberian Peninsula: *Int. J. Appl. Earth Obs.* 63: 214–221.
- Vaquero-Martínez, J., Anton, M., Ortiz de Galisteo, J.P., Cachorro, V.E., Alvarez-Zapatero, P., Roman, R., Loyola, D., Costa, M.J., Wang, H., and Gonzalez Abad, G. (2018). Inter-comparison of integrated water vapor from satellite instruments using reference GPS data at the Iberian Peninsula. *Remote Sens. Environ.* 204: 729–740.
- Vermote, E. F., Saleous, N. Z. El., and Justice, C.O. (2002). Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared. First results, *Remote Sensing Environ.* 83: 1236-1248.
- Wang, H., Wei, M., Li, G., Zhou, S., and Zeng, Q. (2013). Analysis of precipitable water vapor from GPS measurements in Chengdu region: Distribution and evolution characteristics in autumn. *Adv. Space Res.* 52: 656–667.
- Wang, J., and Dai, A. (2016). Global Water Vapor Trend from 1988 to 2011 and Its Diurnal Asymmetry Based on GPS, Radiosonde, and Microwave Satellite Measurements. *J. Climate*. 29 (14): 5205–5222.
- Wang, W., Sun, X., Zhang, R., and Su, H. (2006). Multi-layer perceptron neural network based algorithm for estimating precipitable water vapour from MODIS NIR Data. *International Journal of Remote Sensing*. 27(3): 789-796.
- Willoughby, A.A., Adimula, I.A., Aro, T.O., and Owolabi, I.E. (2008). Analysis of radiosonde data on tropospheric water vapor in Nigeria. *J. Phys.* 20 (2): 299-308.
- Wu, W.S., Purser, R.J. and Parrish, D.F. (2002). Three-dimensional variational analysis with spatially inhomogeneous covariances. *Monthly Weather Review*. 130: 2905-2916.
- You, Q., Jiang, Z., Bao, Y., Pepin, N., and Fraedrich, K. (2016). Trends in upper tropospheric water vapour over the Tibetan Plateau from remote sensing *Int. J. Climatol.* 36: 4862-4874.
- Zhang, X., Li, M., and Sun, T. (2013). Spatiotemporal variation of water vapor in upper troposphere over Central Asia based on AIRS satellite retrieval (in Chinese). *Arid Zone Research*. 30(6): 951–957.
- Zhang, Y., Wang, D., Zhai, P., and Gu, G. (2012). Applicability of AIRS monthly mean atmospheric water vapor profiles over the Tibetan Plateau region. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 29 (11):1617–1628.