

Analysis of Precipitable Water and Relationship with Moisture Advection in Iran

Manizheh Kianipour¹, Seyed Abolfazl Masoodian²✉, Hosein Asakereh³

1. Ph.D Student of Climatology, Isfahan University, Isfahan, Iran
E-mail: Manizhh_k@yahoo.com
2. Professor of Climatology, Isfahan University, Isfahan, Iran
✉ E-mail: s.a.masoodian@geo.ui.ac.ir
3. Professor of Climatology, Zanjan University, Zanjan, Iran
E-mail: asakereh@znu.ac.ir



How to Cite: Kianipour, M; Masoodian, S. A; & Asakereh, H. (2022). Analysis of Precipitable Water and Relationship with Moisture Advection in Iran. *Geography and Development*, 20 (66), 107-130.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22111/J10.22111.2022.6698>

Received:

23 July 2020

Received in revised form:

24 September 2020

Accepted :

26 November 2020

Published online:

15 January 2022

ABSTRACT

In this study, the specific humidity, zonal, and meridional wind components data at 850 hPa and PW(PW) data of Modis Aqua for 15-year period (2002-2017) were used; Then, the days that the average amount of PW was 2 standard deviations from the mean were selected and moisture flux was calculated for these days and two days ago.

The results showed when the average PW is high (July and August), southwestern parts of the Caspian Sea coasts and northwest of the country, moisture flux is maximum. The northeast and east currents, which pass through the Caspian Sea due to the low pressure in the northeast of the Caspian Sea, cause the maximum PW to occur with the transfer of moisture to the Caspian Sea and northwest. Sub Tropical high pressure over the Arabian Sea and a thermal low pressure over the southeast of Arabian Peninsula, increases moisture flux from the Arabian Sea, the Aden Gulf, the Oman Sea and the Persian Gulf to the country's southern and southwestern coasts, as a result, the amount of PW is also increased. Occasionally, currents entering to the country from the northeast and south converge on the Lut and Central Desert Plains; and increase the atmospheric moisture. Based on the results, the presence of low pressure over the western Kazakhstan and high pressure over the Arabian Sea and low pressure in eastern Arabian Peninsula, play key roles in moisture penetration into Iran and increasing atmospheric moisture.

Keywords:

Precipitable Water,
Moisture Flux,
Modis, Iran.



© the Author(s).

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

Extended Abstract

1. Introduction

Water vapour has a very short life cycle in atmosphere and this rapid turn over, joined to temperature variations with altitude and geography, causes an irregular water vapour distribution in atmosphere, both horizontally and vertically. Moisture advection is one of the factors that cause changes in the amount and variations of precipitable water in a place; Thus, understanding the relationship between them is important in predicting thunderstorms and heavy rainfall. The spatial

distribution of atmospheric humidity in Iran is controlled by the height above the sea level, distance to sea and moisture advection. Since moisture advection is a function of the atmospheric circulation at the local and regional scales in different seasons, hence the amount and spatiotemporal variations of precipitation water is also affected by it. Understanding the mechanism of these atmospheric circulations and sources of atmospheric moisture from the surrounding water

bodies, plays an important role in our awareness of the occurrence of heavy rainfall or subsequent droughts.

In recent years, many studies have been done on humidity region, how to transfer moisture, and the role of surrounding water bodies in providing the country's humidity. In the present study, were studied advection moisture from different sources and its role in precipitable water variations.

2. Methods and Material

In this study, moisture advection at 850 hPa was investigated in order to obtain moisture conditions of Iran and its sources. For this purpose, the specific humidity (q), zonal (u) and meridional (v) wind components data with 2.5° spatial resolution in the range of 0° to 80°E and 0° to 50°N were used. Precipitable water data with 1 km spatial resolution and daily temporal resolution have been extracted from MODIS Aqua data (MYD05_L2.AV06). Then, the Mean, maximum and minimum amounts of precipitable water were obtained for 5459 days in the country. Then, the days that the average amount of Precipitable water was 2 standard deviations (9.7 mm) from the mean (12 mm) were selected; Accordingly, 167 days of the whole period were extracted and moisture advection was calculated for these days and two days ago to identify the sources of moisture supplies in Iran.

3. Results and Discussion

The results showed when the average precipitable water is high (July and August), the Caspian Sea coasts, especially in the southwestern parts and northwest of the country, moisture flux is maximum. The northeast and east currents, which pass through the Caspian Sea as a result of the low pressure in the northeast of the Caspian Sea, cause the maximum precipitable water to occur with the transfer of moisture to the Caspian Sea and northwest coasts. Sub Tropical high pressure

deployment over the Arabian Sea and a thermal low pressure over the southeast of Arabian Peninsula, increases moisture flux from the Arabian Sea, the Gulf of Aden, the Oman Sea and the Persian Gulf to the country's southern and southwestern coasts, as a result, the amount of precipitable water is also increased. Occasionally, currents entering to the country from the northeast and south converge on the Lut and Central Desert Plains; and increase the atmospheric moisture of these areas.

4. Conclusion

According to the results, atmospheric circulation outside the country's borders, such as low pressure over the western Kazakhstan and high pressure over the Arabian Sea and low pressure in eastern Arabian Peninsula, play key roles in moisture penetration into Iran and increasing atmospheric moisture in country. As noted above, the Caspian Sea coasts, Tarom Valley, Ardebil Province, North West and East Azarbaijan provinces also have maximum precipitable water. Moisture fluxes occur more in these areas than in the Caspian Sea and in some cases in the Black Sea. The investigations also showed that from the 7th and the two days ago to the 10th of August 2013 which was the highest precipitable water on both days, Southwest currents from the Gulf of Aden and the Arabian Sea have more speed and moisture than other days; Also on July 21th and two days ago to July 23th 2003 the Arabian Sea had more moisture flows than the Gulf of Aden. According to the results, it can be said that the Arabian Sea has more role in providing moisture to the southern coast of Iran than other sources. Regarding the role of moisture flux in precipitable water variations and its consequent effects on precipitation variations, it is suggested to pay special attention to the role of moisture advection in the different seasons and its sources. .

Keywords: Precipitable water, Moisture Flux, Modis, Iran.

5. References

- Barati, G.R., Moradi, M., Saber, G. (2014). Moisture Flux Heviest rainfall winter in Iran. *Journal of Earth Science Researches*, 5(19), 60-70.
<https://doi.net/dor/20.1001.1.20088299.1393.5.3.5.6>
- Bock, O., Bouin, M.N., Walpersdorf, A., Lafore, J.P., Janicot, S., Guichard, F. and Agusti-Panareda, A (2007). Comparison of ground-based GPS precipitable water vapour to independent observations and NWP model reanalyses over Africa, *Quarterly Journal_ of the Royal Meteorological Society*, No 133, 2011-2027.
<https://doi.org/10.1002/qj.185>
- Bock, O., Bouin, M. N., Doerflinger, E., Collard, P., Masson, F., Meynadier, R., & Ouedraogo, D (2008). West African Monsoon observed with ground-based GPS receivers during African Monsoon Multidisciplinary Analysis (AMMA). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, NO 113(D21).
<https://doi.org/10.1029/2008JD010327>
- Chakraborty, S. Adhikar, A. Maitra A. (2016). Rainfall Estimation from Liquid Water Content and Precipitable Water Content Data Over Land, Ocean and Plateau. *Atmospheric Research*, 167, 265–274.
- Chakraborty, A., Behera, S. K., Mujumdar, M., Ohba, R., and Yamagata, T (2006). Diagnosis of tropospheric moisture over Saudi Arabia and influences of IOD and ENSO, *Monthly Weather Review*, No 134, 598-617.
<https://doi.org/10.1175/MWR3085.1>
- D'Abreton, P. C., and Lindesay, J. A (1993). Water vapour transport over southern Africa during wet and dry early and late summer months, *International Journal of Climatology*, No 13, 151-170.
<https://doi.org/10.1002/joc.3370130203>
- Doustkamian, M., Jalali, M., Taherian, A.M. (2018). Analysis of Moisture Flux Convergence and Precipitation Spring Precipitable Water in Iran. *Geography and Environmental Hazard*, 7(25), 131-152.
<https://dx.doi.org/10.22067/geo.v7i1.64076>
- Fallah Ghalhari, Gh., Asadi, M., Dadashi Roudbari, A.A. (2016). Spatial Analysis of Humidity Propagation over Iran. *Physical Geography Research Quarterly*, 47(4), 637-650.
<https://dx.doi.org/10.22059/jphgr.2015.56053>
- Fathurochman, I., Lubis, S. W., & Setiawan, S (2017). Impact of Madden-Julian Oscillation (MJO) on global distribution of total water vapor and column ozone. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* No 54, 012034.
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/54/1/012034>
- Groves, D. G., & Francis, J. A (2002). Variability of the Arctic atmospheric moisture budget from TOVS satellite data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(D24), ACL-18.
<http://dx.doi.org/10.1029/2002JD002285>
- Karimi, M., Farajzadeh, M. (2012). Moisture Flux and Spatio-Temporal Patterns Precipitations of Iran Source of Moisture. *Scientific Journals Management System*, 11(22), 109-127.
<https://jgs.khu.ac.ir/article-1-630-fa.html>
- Khodadi, M.M., Azadi, M., Rezazadeh, P. (2013). Moisture sources and transport over Iran and its interaction with Indian monsoon and subtropical high. *Iranian Journal of Geophysics*, 7(2), 96-113.
http://www.ijgeophysics.ir/article_40589.html
- Masoodian, S.A., Ghaedi, S., Mohamadi, B. (2006). Moisture Region of Iran. *Geography and planning*, 20, 1-14.
<https://www.noormags.ir/view/fa/articlepage/330071>
- Mofidi, A., & Zarrin, A. (2005). Synoptic Analysis of the Nature of Sudan Low Pressure Systems (Case Study: December 2001 Storm). *Territory*, 2(6), 26-50.
<https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=39446>
- Hadjimitsis, D., Mitraka, Z., Gazani, I., Retalis, A., Chrysoulakis, N., and Michaelides, S (2011). Estimation of spatio-temporal distribution of precipitable water using MODIS and AVHRR data: a case study for Cyprus, *Advances in Geosciences*, No 30, 23–29.
<https://doi.org/10.5194/adgeo-30-23-2011>
- Kaufman, Y. J., & Gao, B. C. (1992). Remote sensing of water vapor in the near IR from EOS/MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, No 30, 871-884.
<https://doi.org/10.1109/36.1753211>
- Krichak, S. O., Feldstein, S. B., Alpert, P., Gualdi, S., Scoccimarro, E., and Yano, J.-I (2016). Discussing the role of tropical and subtropical moisture sources in cold season extreme precipitation events in the Mediterranean region from a climate change perspective, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, No 16, 269–285.
<https://doi.org/10.5194/nhess-16-269-2016>
- Lélé, M. I., Leslie, L. M., and Lamb, P. J (2015). Analysis of low-level atmospheric moisture transport associated with the West African Monsoon, *Journal of Climate*, No 28, 4414-4430.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00746.1>

- Li, C., Zuo, Q., Xu, X., and Gao, S (2016). Water vapor transport around the Tibetan Plateau and its effect on summer rainfall over the Yangtze River valley, *Journal of Meteorological Research*, No 30, 472-482.
<https://dx.doi.org/10.1007/s13351-016-5123-1>
- Lu, N., Qin, J., Gao, Y., Yang, K., Trenberth, K. E., Gehne, M., and Zhu, Y (2015). Trends and variability in atmospheric precipitable water over the Tibetan Plateau for 2000–2010, *International Journal of Climatology*, No 35, 1394-1404.
<http://dx.doi.org/10.1002/joc.4064>
- Malmusi, S., and Boccolari, M (2010). Upper and middle precipitable water calculated from Meteosat - 8/-9 tropospheric humidity and NCEP/NCAR temperatures, *Atmospheric Research*, No 95, 8-18.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.08.010>
- Puviarasan, N. Sharma, A. K. Manish Ranalkar, and Giri R. K (2014). Onset, Advance and Withdrawal of Southwest Monsoon Over Indian Subcontinent. A Study from Precipitable Water Measurement Using Ground Based GPS Receivers, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, No 122, 45-57.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2014.10.010>
- Ross, R. J., & Elliott, W. P (2001). Radiosonde-based Northern Hemisphere tropospheric water vapor trends. *Journal of Climate*, No.14,1602-1612.
[https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014%3C1602:RBNHTW%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014%3C1602:RBNHTW%3E2.0.CO;2)
- Sapucci, L. Machado, L. t. Monico, J. F. G. and Plana-Fattori, A (2007). Intercomparison of Integrated Water Vapor Estimates from Multisensors in the Amazonian Region, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, No 24,1880-1894.
<https://doi.org/10.1175/JTECH2090.1>
- Trenberth, K. E., Fasullo, J., & Smith, L (2005). Trends and variability in column-integrated atmospheric water vapor. *Climate dynamics*, No 24, 741-758.
<http://dx.doi.org/10.1007/s00382-005-0017-4>
- Torres, B., Cachorro, V. E., Toledano, C., Ortiz de Galisteo, J.P., Berjón, A., de Frutos, A. M., Bennouna, Y., and Laulainen, N (2010). Precipitable water vapor characterization in the Gulf of Cadiz region (southwestern Spain) based on Sun photometer, GPS, and radiosonde data, *Journal of Geophysical Research*, No 115, D18103, 1-11.
<http://dx.doi.org/10.1029/2009JD012724>
- Wang, H., Wei, M., Li, G., Zhou, S., & Zeng, Q (2013). Analysis of precipitable water vapor from GPS measurements in Chengdu region: Distribution and evolution characteristics in autumn. *Advances in Space Research*, No 52, 656-667.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2013.04.005>
- Wang, H., and He, J (2017). Temporal and Spatial Evolution Features of Precipitable Water in China during a Recent 65-Year Period (1951-2015), *Advances in Meteorology*, No 2017,1-11.
<https://doi.org/10.1155/2017/9156737>
- Wong, M. S., Jin, X., Liu, Z., Nichol, J., and Chan, P. W (2014). Multi-sensors study of precipitable water vapour over mainland China, *International Journal of Climatology*, No 35, 3146-3159.
<http://dx.doi.org/10.1002/joc.4199>
- Wu, G., and Zhang, Y (1998). Tibetan Plateau forcing and the timing of the monsoon onset over South Asia and the South China Sea, *Monthly weather review*, No 126, 913-927.
[https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1998\)126%3C0913:TPFATT%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1998)126%3C0913:TPFATT%3E2.0.CO;2)
- Zhai, P., and Eskridge, R. E (1997). Atmospheric water vapor over China, *Journal of Climate*, No10, 2643-2652.
[https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1997\)010%3C2643:AWVOC%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1997)010%3C2643:AWVOC%3E2.0.CO;2)
- Zhang, D., Huang, J., Guan, X., Chen, B., and Zhang, L (2013). Long-term trends of precipitable water and precipitation over the Tibetan Plateau derived from satellite and surface measurements, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, No 122, 64-71.
https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2013JQSR.T.122...64Z/doi:10.1016/j.jqsrt.2012.11.028
- Xu, X. D., Miao, Q., Wang, J., and Zhang, X (2003). The water vapor transport model at the regional boundary during the meiyu period, *Advances in Atmospheric Science*, No.20,333-342.
<http://dx.doi.org/10.1007/BF02690791>



واکاوی پیوند آب بارش‌پذیر با فرارفت رطوبت در ایران زمین

منیژه کیانی‌پور^۱، دکتر سید ابوالفضل مسعودیان^{۲*}، دکتر حسین عساکره^۳

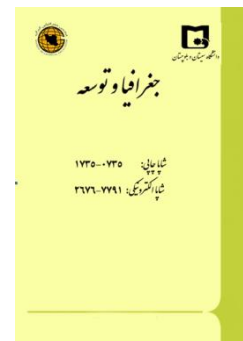
مقاله پژوهشی

چکیده

از آنجایی که فرارفت رطوبت از جمله عواملی است که باعث تغییر در مقدار و وردش‌های آب بارش‌پذیر جو یک محل می‌شود؛ از این رو در این پژوهش پیوند میان رطوبت جو و فرارفت رطوبت واکاوی شد. برای این منظور از داده‌های نم مطلق (Ah)، مؤلفه مداری (u) و نصف‌النهاری (v) جریان باد در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال، همچنین از داده‌های روزانه آب بارش‌پذیر سنجنده مودیس آکوا در بازه زمانی ۱۵ ساله (۲۰۰۲-۲۰۱۷) استفاده شد؛ سپس در طول این دوره روزهایی که متوسط آب بارش‌پذیر آن‌ها دو انحراف معیار از میانگین دوره فاصله داشت، انتخاب و برای این روزها و دو روز قبل از آن فرارفت رطوبت محاسبه و بررسی شد.

یافته‌ها نشان می‌دهد در روزهایی که متوسط آب بارش‌پذیر بالاست (تیر و مرداد)، کرانه‌های دریای خزر به‌ویژه در بخش‌های جنوب‌غربی سواحل دریای خزر و شمال‌غرب کشور، شار رطوبت نیز بیشینه است. جریانات شمال‌شرقی و شرقی که در نتیجه استقرار یک کم فشار در شمال شرق دریای خزر از روی دریای خزر می‌گذرند، با تراپد رطوبت به کرانه‌های خزر و شمال‌غرب وقوع بیشینه آب بارش‌پذیر را باعث می‌شوند. استقرار پرفشار جنب حاره بر روی دریای عرب از یک سو و یک کم فشار حرارتی بر جنوب شرق عربستان، فرارفت رطوبت را از دریای عرب، خلیج عدن، دریای عمان و خلیج فارس به سوی کرانه‌های جنوبی و جنوب‌غرب کشور افزایش می‌دهند و در نتیجه مقدار آب بارش‌پذیر نیز افزایش می‌یابد. در پاره‌ای از موارد مشاهده شد، جریاناتی که از شمال شرق و جنوب وارد کشور می‌شوند، در دشت لوت و کویر مرکزی همگرا شده و رطوبت جو این نواحی را نیز افزایش می‌دهند. براساس نتایج به‌دست آمده، گردش سامانه‌های جو در خارج از مرزهای کشور همچون حضور کم‌فشار در غرب قزاقستان و استقرار پرفشار در دریای عرب و کم‌فشار در شرق عربستان نقش کلیدی در فرارفت رطوبت به ایران و افزایش رطوبت جو در ایران دارند. با در نظر گرفتن نقش فرارفت رطوبت در وردش‌های آب بارش‌پذیر و به دنبال آن اثراتی که در وردش‌های بارش در کشور دارد، پیشنهاد می‌شود به نقش فرارفت رطوبت در فصول مختلف و منابع آن توجه ویژه شود.

جغرافیا و توسعه، شماره ۶۶، بهار ۱۴۰۱
تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۰۲
تاریخ بازنگری داوری: ۱۳۹۹/۰۷/۰۳
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۰۶
صفحات: ۱۳۰-۱۰۷



واژه‌های کلیدی:

آب بارش‌پذیر، فرارفت رطوبت، مودیس، ایران.

مقدمه

و... در ارتباط است؛ به طوری که بی‌نظمی در توزیع آن، هم در راستای افقی و هم در راستای عمودی دیده می‌شود (8: *Malmusi & Boccolari, 2010*)؛ بر این اساس الگوهای رطوبتی در یک بازه زمانی بلندمدت تحت تعامل عوامل محلی و عناصر گردش جو شکل می‌گیرد؛ اما عملکرد متفاوتی دارد (فلاح قاهره‌ری و همکاران، ۱۳۹۴: ۶۴۸). الگوی کلی انتقال رطوبت وابستگی شدیدی به الگوی جریان و گردش جو در ایام مختلف سال داشته و تأثیر زیادی از مناطق پرفشار مستقر در ترازهای پایین وردسپهر می‌پذیرند (کریمی و فرج‌زاده، ۱۳۹۰: ۱۰۹). بر همین اساس فرارفت بخار آب توسط گردش عمومی جو، نقش اصلی را در بیلان

بخار آب جو متغیر کلیدی اقلیم کره زمین و چرخه آب است. این متغیر وردش‌پذیری آشکاری هم در مکان و هم در زمان در نتیجه اندرکنش فرایندهای بین جو، سطح زمین و اقیانوس دارد (*Bock et al, 2007:1*). این متغیر می‌تواند در مدل‌سازی آب‌شناختی، زیست‌کره‌ای و هواشناختی در مقیاس‌های محلی و منطقه‌ای بسیار مؤثر باشد؛ همچنین به‌طور گسترده‌ای در مطالعات مربوط به بیلان انرژی و تبخیر و تعرق نیز استفاده می‌شود (*Hadjimitsis et al, 2011: 23*). بخار آب در جو (آب بارش‌پذیر) چرخه زندگی کوتاهی دارد که این ویژگی با وردش‌های دما با ارتفاع، سمت و سرعت باد

همچنانکه در زمان حاکمیت موسمی‌های ضعیف مقدار آن به ۴۰ میلی‌متر هم کاهش می‌یابد. ژای و اسکریچ^۷ (۱۹۹۷: ۲۶۴۵) توزیع رطوبت جو در چین را تحت تأثیر ویژگی‌های توپوگرافی، عرض جغرافیایی و موسمی‌های می‌دانند. وانگ و هی^۸ (۲۰۱۷: ۴) نیز رطوبت موجود در جو چین را ناشی از انتقال بخار آب از دریای چین جنوبی با گسترش زبانه مرطوب جنوب‌غربی-شمال شرقی، عنوان کردند.

کریچاک و همکاران^۹ (۲۰۱۶: ۲۸۰) وقوع بارش‌های فرین در فصل سرد منطقه مدیترانه را تحت تأثیر خروج هوای مرطوب از مناطق حاره و جنب حاره به مناطق برون حاره می‌دانند.

لو و همکاران^{۱۰} (۲۰۱۵: ۱۳۹۴) با مقایسه شار عمودی رطوبت و واگرایی آن بین مرطوب‌ترین و خشک‌ترین فصول موسمی، نشان دادند بردش‌پذیری مکانی آب بارش‌پذیر در فصول موسمی فلات تبت تحت تأثیر گردش بزرگ مقیاس جو است.

ژانگ و همکاران^{۱۱} (۲۰۱۳: ۶۷) نشان دادند در فصل زمستان حضور یک واچرخند بر روی دریای عرب، بخار آب را از طریق بادهای غربی به فلات تبت انتقال می‌دهد و در فصل تابستان این فلات همچون «پمپ دینامیکی»^{۱۲} قوی عمل می‌کند که هوای گرم مرطوب را از اقیانوس‌های عرض پایین به درون فلات می‌مکد (Wu & Zhang, 1998: 919).

لی و همکاران^{۱۳} (۲۰۱۶: ۴۷۲) در پژوهش خود نشان دادند ناهنجاری شرق‌سوی (غرب‌سوی) مداری بخار آب از موسمی جنوب آسیا که از گوشه جنوب شرقی فلات تبت ترابرد می‌شود، سبب افزایش (کاهش) مقدار بارش تابستانه رودخانه یانگ‌تسه می‌شود.

نصف‌النهاری انرژی بازی می‌کند (Torres et al, 2010: 1)؛ از سویی فرارفت بخار آب و رهایی گرمای نهان، پایداری در راستای عمودی و ساختار و تکامل طوفان‌های جو را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Sapucci et al, 2007: 1880). از آنجایی که فرارفت رطوبت از جمله عواملی است که باعث تغییر در مقدار و بردش‌های آب بارش‌پذیر جو یک محل می‌شود و از طرفی شناخت این ارتباط در پیش‌بینی توفان‌های تندری و بارش‌های سنگین اهمیت زیادی دارد؛ از این رو در ادامه به مطالعاتی که پیرامون آب بارش‌پذیر و عوامل مؤثر بر آن به‌ویژه فرارفت رطوبت توسط اقلیم‌شناسان صورت گرفته‌است، اشاره می‌شود. آبرتون و تایسون عنوان کردند، تغییرات مهم شار رطوبت که بین اکتبر (آغاز تابستان) و ژانویه (پایان تابستان) آفریقای جنوبی اتفاق می‌افتد، در نتیجه تغییر در شدت و موقعیت سلول هدلی/فرل^۱ (گردش نصف‌النهاری) و واکر^۲ (گردش مداری) در ماه‌های خشک و مرطوب است (D'Abreton & Lindesay, 1993: 151,167). همان‌طور که چاکرابورتی و همکاران نیز بردش‌های درون سالانه شار رطوبت در عربستان را با پدیده‌هایی همچون رویداد گرم انسو^۳ و رویداد مثبت دو قطبی اقیانوس هند^۴ بسیار وابسته می‌دانند (Chakraborty et al, 2006: 615). ژو^۵ و همکاران (۲۰۰۳: ۳۴۱) نیز بادهای جنوب‌غربی پرفشار جنب حاره در آرام غربی را در انتقال رطوبت به دریای چین جنوبی مؤثر می‌دانند. پویراسان^۶ و همکاران (۲۰۱۵: ۵۳) نشان دادند با ورود سامانه موسمی به جنوب غرب هند، مقدار آب بارش‌پذیر افزایش می‌یابد و به مقدار متوسط ۶۰ میلی‌متر و بیشتر می‌رسد؛ در حالی که مقدار آن قبل از ورود موسمی‌ها ۳۰ تا ۵۵ میلی‌متر در نوسان است؛

7-Zhai & Eskridge

8-Wang & He

9-Krichak et al

10-Lu et al

11-Zhang, Huang, Guan, Chen & Zhang

12-Dynamic Pump

13-Li, Zuo, Xu, & Gao

1-Hadley/Ferrel Cell

2-Walker

3-EL NINO/Sothern Oscillation (ENSO)

4-Indian Ocean Dipole (IOD)

5-Xu, Miao, Wang, Zhang.

6-Puviarasan, Sharma, Manish Ranalkar, Giri

همین اساس دست‌یابی به چگونگی توزیع بخار آب در جو و وردش‌های زمانی و مکانی آن در مقیاس‌های متوسط و خرد و همچنین تغییر اقلیم در مقیاس جهانی ضروری می‌نماید (Wang et AL, 2013: 656).

پژوهشگران به بررسی روند و وردش‌پذیری آب بارش‌پذیر به دلیل اهمیت آن نیز توجه ویژه داشته‌اند؛ راس و الیوت^۸ (۲۰۰۱: ۱۶۰۲) روند بخار آب وردسپهر را با استفاده از داده‌های رادیوگمانه در طول دو دوره زمانی ۱۹۷۳ تا ۱۹۹۵ و ۱۹۵۸ تا ۱۹۹۵ در نیم‌کره شمالی مطالعه کردند. روند آب بارش‌پذیر از رویه تا تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و برای فراسنج‌های نم ویژه، نقطه شبنم و دما در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال به دست آمد. نتایج ایشان نشان داد در کل دوره در بیشتر ایستگاه‌ها آب بارش‌پذیر، نم ویژه و دمای نقطه شبنم همراه با دما افزایش یافته‌است (به جز در اروپا که دما افزایش یافته، اما رطوبت اندکی کاهش داشته‌است). افزایش بخار آب جو در آمریکای شمالی نسبت به اوراسیا بیشتر، مشخص‌تر و یکنواخت‌تر بوده‌است، ضمن اینکه تفاوت‌ها در بزرگی و علامت روند بین دو منطقه ممکن است نتیجه تغییرات در اواخر دهه ۱۹۷۰ باشد که آمریکای شمالی را بیشتر از اوراسیا تحت‌تأثیر قرار داده‌است. روند نم ویژه برای سال‌های ۱۹۵۸ تا ۱۹۹۵ افزایش اندکی نشان می‌دهد و بیشترین افزایش احتمالاً از ۱۹۷۳ اتفاق افتاده‌است.

باک و همکاران^۹ (۲۰۰۸: ۱) نوسان‌های مشخصی با دوره‌های ۱۰ تا ۱۵ و ۱۵ تا ۲۰ روزه در مقدار آب بارش‌پذیر حاصل از GPS در آفریقای غربی مشاهده کردند. این نوسان‌ها تأثیر قوی یک گردش جوی را بر رطوبت و بارش نشان می‌دهد. براساس یافته‌های ایشان به نظر می‌رسد، وردش‌های مکانی و زمانی در آب بارش‌پذیر ردیاب خوبی برای گردش جوی هم در ترازهای پایین (شار رطوبت موسمی) و هم ترازهای بالایی (جریان برگشتی و رودباد شرقی آفریقا) باشد.

لله و همکاران^۱ (۲۰۱۵: ۴۴۲۷) منشأ و سازوکار انتقال و همگرایی رطوبت را برای تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در طول فصل موسمی تابستان آفریقای غربی مطالعه و تأثیر آن را بر وردش‌پذیری بارندگی در این منطقه بررسی کردند؛ براساس یافته‌های آنان تکامل فصلی شار رطوبت، همگرایی آن، جابه‌جایی جبهه درون حاره‌ای^۲ و ارتباطش با بارندگی، قویاً تحت‌تأثیر موقعیت مداری و قدرت زبانه سرد اطلس استوایی^۳، سازوکار پرفشار اطلس^۴، کم‌فشار گرم صحرا^۵ و رودباد رودباد غربی آفریقای غربی^۶ است.

چاکرابورتی و همکاران^۷ (۲۰۰۶: ۶۱۵) آب بارش‌پذیر بارش‌پذیر و شار رطوبت تراز پایین، میانی و بالای جو عربستان را در فصول پاییز و زمستان مطالعه کردند. نتایج نشان داد در ترازهای پایین شار رطوبت از دریاهای مجاور عربستان و در ترازهای میانی شار رطوبت از اقیانوس اطلس، اقیانوس هند و دریای عرب، به ترتیب باعث افزایش آب بارش‌پذیر به مقدار بیش از ۱۵ و بیش از ۲۵ میلی‌متر می‌شود. در ترازهای بالایی جو شار رطوبت ضعیف است و نقش اندکی در همگرایی رطوبت و در نتیجه آب بارش‌پذیر کمتر از ۳ میلی‌متر دارد.

وقوع بارش‌های فرین، سیل و خشک‌سالی را افزایش می‌دهد و تغییراتی که در وقوع و شدت دارند، تأثیر بزرگی بر محیط و اجتماع می‌گذارد؛ بنابراین وردش در مقادیر بخار آب، تعیین‌کننده اصلی ویژگی تغییر اقلیم است (Trenberth et al, 2005: 742)؛ بنابراین پایش تغییرات فصلی و سالانه آب بارش‌پذیر در مقیاس‌های منطقه‌ای به منظور پایش شرایط خشکی و فرایندهای بیابان‌زدایی، دارای اهمیت ویژه‌ای است (Kaufman & Gao, 1992: 871, Hadjimitsis et al, 2011: 23).

1-Lélé et al

1- Intertropical Front (ITF)

2-Equatorial Atlantic cold

3-Atlantic semipermanent high pressure systems

4- Saharan Heat Low (SHL)

5- West African Westerly Jet (WAWJ)

6-Chakraborty, Behera, Mujumdar, Ohba, & Yamagata

8-Ross&Elliot

9-Bock et al

بررسی کردند. نتایج نشان داد توزیع مکانی رطوبت و به تبع آن آرایش جغرافیایی نواحی رطوبتی به پیکربندی ناهموازی‌ها، شرایط دمایی در دریاها و اقیانوس‌ها و وزش رطوبتی وابسته است؛ بر این اساس ایران دارای شش ناحیه رطوبتی است که عمده رطوبت این نواحی از سطوح آبی اطراف تأمین می‌شود (مسعودیان و همکاران، ۱۳۸۵: ۵). دوستکامیان و همکاران (۱۳۹۷: ۱۵۰) در پژوهشی به نقش همگرایی شار رطوبت در تغذیه رطوبتی سامانه‌های بارانزای بهاره پرداختند. یافته‌های آنان نشان داد در میزان شار همگرایی رطوبت به سمت ایران نوسانات و تغییراتی در ترازهای مختلف جو مشاهده می‌شود؛ به گونه‌ای که نقش دریای عرب، خلیج فارس و دریای سرخ در تراز ۸۵۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال به شکل بارزتری در شار بارش‌های بهاره ایران قابل‌رصدی است و دریای خزر علاوه بر تأمین رطوبت نواحی ساحلی در تراز دریا از منابع رطوبتی اصلی بارش‌های بهاره شمال‌غربی و شمال‌شرقی در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکالی به شمار می‌رود.

مفیدی و زرین (۱۳۸۴: ۲۴) به بررسی الگوی سینوپتیکی حاکم در زمان رخداد توفان دسامبر ۲۰۰۱ و نقش سامانه‌های کم‌فشار سودانی در تأمین رطوبت و نحوه فرارفت آن در ایران پرداختند. یافته‌ها نشان داد استقرار و تقویت پشته پرفشار بر روی دریای عرب امکان انتقال مستقیم رطوبت از دریای عرب به درون سامانه‌های کم‌فشار را در زمان گسترش کم‌فشارهای منطقه دریای سرخ به ایران فراهم می‌سازد. کریمی و فرج‌زاده (۱۳۹۰: ۱۰۹) نیز در پژوهش خود پیرامون شار رطوبت و الگوهای فضایی-زمانی منابع تأمین رطوبت بارش‌های ایران دریافتند شار رطوبت از دریا‌های عرب و مدیترانه نقش بیشتری در تأمین رطوبت بارش‌های ایران نسبت به دریا‌های سرخ، خزر، عمان و خلیج فارس دارد.

تغییرات آب و هوایی و الگوهای گردشی جو در طول سال‌های متمادی در مناطق مختلف جهان بر پدیده‌های مختلف از جمله عناصر جو اثرگذار بوده است. در این بین بخار آب جو و نقش کلیدی که در جو دارد و از طرفی تغییرات زمانی و مکانی زیادی که دارد، از این اثرگذاری بی‌نصیب نمانده است. در این راستا پژوهشگران در تلاش هستند ارتباط بین آب بارش‌پذیر و نمایه‌های پیوند از دور را مطالعه کنند. در پژوهشی فادوراچمان و همکاران^۱ (۲۰۱۷: ۲) به واکاوی اثر نمایه MJO^۲ بر توزیع بخار آب جو و اوزون در مناطق حاره‌ای برای بازه زمانی ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۳ پرداختند. نتایج نشان داد وردش‌های فصلی آب بارش‌پذیر که توسط MJO تنظیم می‌شود، در مناطق حاره بین ۱۰ درجه شمالی و ۱۰ درجه جنوبی در طول زمستان به بیشترین حد خود رسید. سازوکار اصلی اثر MJO بر آب بارش‌پذیر، عمدتاً مرتبط با وردش همرفت حاره‌ای است که توسط MJO تنظیم شده است. گراوس و فرانسیس^۳ (۲۰۰۲: ۱) نیز به بررسی پیوند بین آب بارش‌پذیر و نمایه نوسان شمالگان^۴ (AO)، پرداختند. نتایج نشان داد هنگام برقراری نمایه مثبت AO، شار خالص آب بارش‌پذیر در زمستان در امتداد عرض ۷۰ درجه شمالی، ۶ برابر بزرگ‌تر از روزهایی است که نمایه منفی برقرار است. در تابستان انتقال آب بارش‌پذیر در روزهای همراه با نمایه مثبت AO دو برابر بزرگ‌تر و بارش خالص نیز ۲۷ درصد بالاتر از روزهایی است که نمایه AO منفی است.

در سال‌های اخیر مطالعات بسیاری پیرامون نواحی رطوبتی، چگونگی انتقال رطوبت و نقش سطوح آبی اطراف در تأمین رطوبت جو کشور، صورت گرفته است. مسعودیان و همکاران با استفاده از داده‌های فشار بخار آب ۶۲ ایستگاه همدید کشور، نواحی رطوبتی ایران را

1-Fathurochman etal
2-Moden-Julian Oscillation (MJO)
3-Goss&Brooks
4-Arctic Oscillation (AO)

رطوبتی و آهنگ تغییرات رطوبت در طول زمان مؤثر است (فلاح قاهره و همکاران، ۱۳۹۴: ۶۴۸).

از آنجایی که مطالعات صورت گرفته در کشور پیرامون آب بارش پذیر و عوامل اثرگذار بر آن محدود به بخشی از کشور و تنها بررسی نقش یک یا دو عامل همچون ارتفاع و عرض جغرافیایی بر آب بارش پذیر بوده و از سویی در این پژوهش‌ها از داده‌های دورسنجی آب بارش پذیر استفاده نشده است؛ از این رو ضرورت واکاوی پیوند داده‌های دورسنجی آب بارش پذیر و فرارفت رطوبت که از عوامل بسیار اثرگذار بر رطوبت جو کشور است، احساس شد و دستمایه بررسی این رابطه در قالب مقاله حاضر شد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش برای دستیابی به شرایط رطوبتی جو ایران و منابع تأمین آن، فرارفت رطوبت در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال بررسی شد. برای این منظور از داده‌های نم مطلق (P_p)، مؤلفه مداری (U) و نصف‌النهاری (V) جریان باد در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال با تفکیک مکانی ۲/۵ درجه در محدوده صفر تا ۸۰ درجه شرقی و صفر تا ۵۰ درجه شمالی، استفاده شده است. این ناحیه خاورمیانه، آسیای میانه، بخش‌هایی از شبه‌جزیره هند، جنوب و شرق اروپا و شمال و شرق قاره آفریقا همچنین سطوح آبی (دریای عمان، عرب، سرخ، مدیترانه، خزر، خلیج فارس و سیاه) واقع در این محدوده را دربر می‌گیرد.

برای به دست آوردن نم مطلق، از داده‌های دمای جو و نم نسبی در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال استفاده شد. همچنین داده‌های نسخه شش آب بارش پذیر فرسرخ نزدیک مودیس آکوا MYD05_L2.AV06 از ۱۳۸۱/۰۴/۱۳ تا ۱۳۹۶/۰۵/۰۳ به مدت ۵۵۰۱ روز از تارنمای ناسا^۱ دریافت شد. در دوره مورد مطالعه ۴۲ روز نبود داده وجود داشت. تفکیک مکانی این داده‌ها

خدادی و همکاران (۱۳۹۲: ۱۰۴ و ۱۱۱) منابع رطوبت و ترابرد ماهانه آن روی ایران و برهم‌کنش آن بامونسون هندوستان و پراارتفاع جنب‌حاره را بررسی کردند. ایشان رطوبت جو بخش‌های شرقی، جنوب شرق و مرکز ایران در ماه‌های خرداد تا مرداد را ناشی از ترابرد رطوبت از روی اقیانوس هند و دریای عرب به سوی شبه‌قاره هند می‌دانند. نتایج ایشان نشان داد در لایه‌های زیرین جو در ماه‌های خرداد تا مرداد با حرکت شمال‌سوی پراارتفاع جنب‌حاره‌ای روی جنوب، مرکز و شرق ایران و شمال شبه‌قاره هند و هم‌زمان تقویت گردش کلی اقیانوس هند (وابسته به ENSO, IOD)، شارش رطوبت روی شمال اقیانوس هند شرق سو می‌شود و ترابری رطوبت به شبه‌قاره هند، جنوب و جنوب شرق ایران مشاهده می‌شود.

براتی و همکاران (۱۳۹۳: ۶۰) نیز با مطالعه الگوهای شار افقی نم ویژه در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال در زمان رخداد سنگین‌ترین بارندگی زمستانی در ایران مرکزی، نشان دادند هسته‌های تغذیه‌کننده از نم، پس از دورشدن از جنوب شرقی دریای مدیترانه و جنوب میانی دریای سرخ، به تدریج با نزدیک شدن به خلیج فارس، همگرا شدند و از سمت جنوب غرب، ایران مرکزی را پوشش دادند.

نوری و همکاران (۱۳۹۲: ۱) به تحلیل فراوانی تابع شار همگرایی رطوبت در سواحل جنوبی دریای خزر در زمان رخداد بارش‌های سنگین و فوق سنگین پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد گروه بارشی فوق سنگین با منشأ همرفت، بیشترین مقدار همگرایی رطوبت را نسبت به سایر گروه‌ها دارد. براساس پژوهش فلاح قاهره و همکاران آرایش جغرافیایی الگوهای رطوبتی در کشور نخست تحت تأثیر عوامل محلی (ارتفاعات و عرض جغرافیایی) است؛ باین حال نقش عوامل عوامل بیرونی در شکل‌گیری الگوهای رطوبتی را نباید نادیده گرفت؛ چراکه عوامل بیرونی یا تلویحاً همان عناصر گردش عمومی جو، در تعیین رژیم

$$e_s = e_0 \cdot \exp \left[\frac{b \cdot (T - T_1)}{T - T_2} \right] \quad (2)$$

e_0 فشار جزئی بخار آب در دمای صفر درجه و برابر است با ۰/۶۱۱ کیلوپاسکال، b برابر با ۱۷/۲۶۹۴، T دمای هوا در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال، T_1 برابر با ۲۷۳/۱۶ کلوین و مقدار T_2 ۳۵/۸۶ درجه کلوین است. در این فرمول باید از دمای مطلق بهره برد. در گام بعد برای محاسبه فشار بخار هوا از فشار بخار آب اشباع به دست آمده از فرمول ۲ و جانمایی آن در فرمول زیر استفاده شد:

$$\frac{RH}{100} = \frac{e}{e_s} \quad (3)$$

که در آن RH درصد رطوبت نسبی در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال، e_s فشار بخار آب اشباع و e فشار بخار هواست. در گام آخر نیز مقادیر نم مطلق از فرمول زیر به دست آمد:

$$\rho_v = \frac{e_0}{R_v \cdot T} \quad (4)$$

که در آن R_v ثابت گازها برای بخار آب و برابر با ۴۶۱/۵ ژول بر (کیلوگرم. کلوین) و ρ_v نم مطلق و گرم بر مترمکعب است.

بحث و نتایج

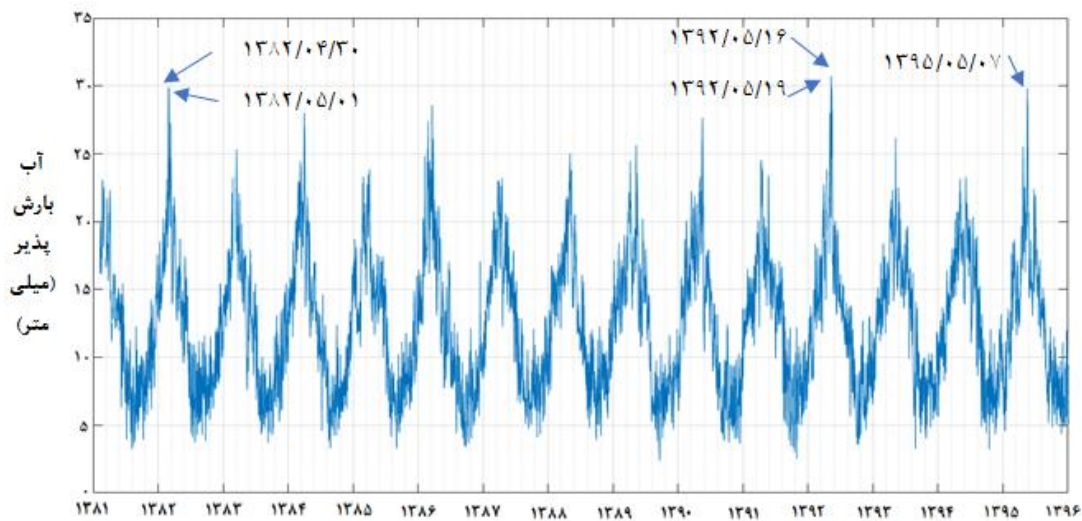
بررسی‌ها نشان داد از میان ۱۶۷ روز که متوسط آب بارش پذیر آن دو انحراف معیار از میانگین کل دوره (۱۲ میلی‌متر) بالاتر بود، ۶۶ روز در تیر، ۸۲ روز در مرداد و ۱۹ روز در شهریور رخ نمود داشتند.

شکل ۱ سری زمانی و شکل ۲ متوسط بلندمدت ماهانه آب بارش پذیر را در دوره مورد مطالعه (۱۳۹۶-۱۳۸۱) نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، رطوبت جو کشور در کل دوره با نزدیک شدن به فصل تابستان و به‌ویژه در تیر و مرداد افزایش می‌یابد و در فصل زمستان به‌ویژه در دی و بهمن به کمترین مقدار خود می‌رسد.

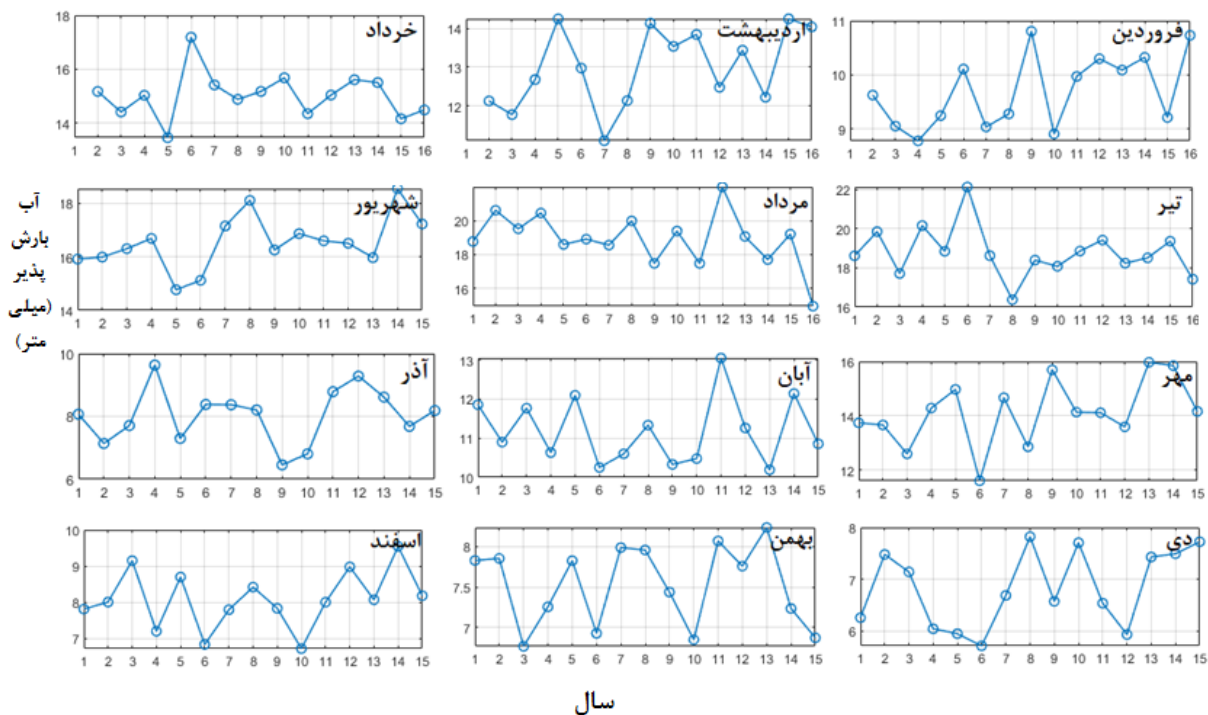
یک کیلومتر و تفکیک زمانی دو مشاهده در روز است. در گام بعد داده‌ها از سطح دو (swath data) به سطح سه (grid data) تبدیل و مقدار آب بارش پذیر بر روی شبکه‌ای با سیستم تصویر سینوسی به ابعاد ۱۸۰۰×۲۷۰۰ و تفکیک مکانی یک کیلومتر و تفکیک زمانی روزانه میان‌یابی شد. یاخته‌های بیرون از مرز ایران از این آرایه حذف شد و آرایه‌ای به ابعاد ۵۴۵۹×۱۸۸۴۰۸۰ به دست آمد که سطرها نماینده مکان (یاخته‌ها) و ستون‌ها نماینده زمان (روزها) بود؛ با استفاده از این آرایه، مقادیر میانگین، بیشینه و کمینه آب بارش پذیر برای ۵۴۵۹ روز در کشور استخراج شد؛ سپس روزهایی که مقدار متوسط آب بارش پذیر آن‌ها ۲ انحراف معیار (۹/۷ میلی‌متر) از میانگین (۱۲ میلی‌متر) فاصله داشتند، انتخاب شد؛ بر این اساس ۱۶۷ روز از کل دوره این شرط را دارا بودند؛ سپس برای واکاوی پیوند آب بارش پذیر با فرارفت رطوبت، اقدام به محاسبه فرارفت رطوبت به کمک داده‌های نم مطلق و مؤلفه‌های مداری و نصف‌النهاری باد، برای این ۱۶۷ روز و با استفاده از عبارت زیر شد.

$$-\vec{V} \cdot \nabla \rho_v \quad (1)$$

که ρ_v نم مطلق برحسب گرم بر مترمکعب و \vec{V} بردار باد برحسب متر بر ثانیه و $\nabla \rho_v$ شیو نم مطلق است؛ بنابراین یکای فرارفت رطوبت گرم بر مترمکعب در ثانیه به دست خواهد آمد که در این تحقیق به دلیل بررسی روزانه، یکای فرارفت رطوبت به گرم بر مترمکعب در روز تبدیل شد. برای دست‌یابی به مقادیر نم مطلق ابتدا لازم بود فشار بخار آب اشباع و سپس فشار بخار هوا محاسبه شود؛ برای این منظور از فرمول تنن^۱ که عبارتی تجربی است و فشار بخار اشباع را نسبت به سطح آب به دست می‌دهد و در آن تغییرات گرمای نهان با دما لحاظ شده است، استفاده شد (مسعودیان و همکاران، ۱۳۹۲: ۱۸۸).



شکل ۱: سری زمانی آب بارش پذیر (میلی متر) در دوره مورد مطالعه (۱۳۸۱-۱۳۹۶)
تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۸



شکل ۲: متوسط بلندمدت ماهانه آب بارش پذیر (میلی متر) در دوره مورد مطالعه (۱۳۸۱-۱۳۹۶)
تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۸

انتخاب شد. در شکل ۱ این روزها علامت گذاری شده‌اند. جدول ۱ نیز ویژگی‌های آماری این پنج روز را نشان می‌دهد.

در گام بعد برای واکاوی پیوند فرارفت رطوبت و وقوع بیشینه‌های آب بارش‌پذیر، ۵ روز نخست که بیشترین فاصله را از متوسط آب بارش‌پذیر داشتند،

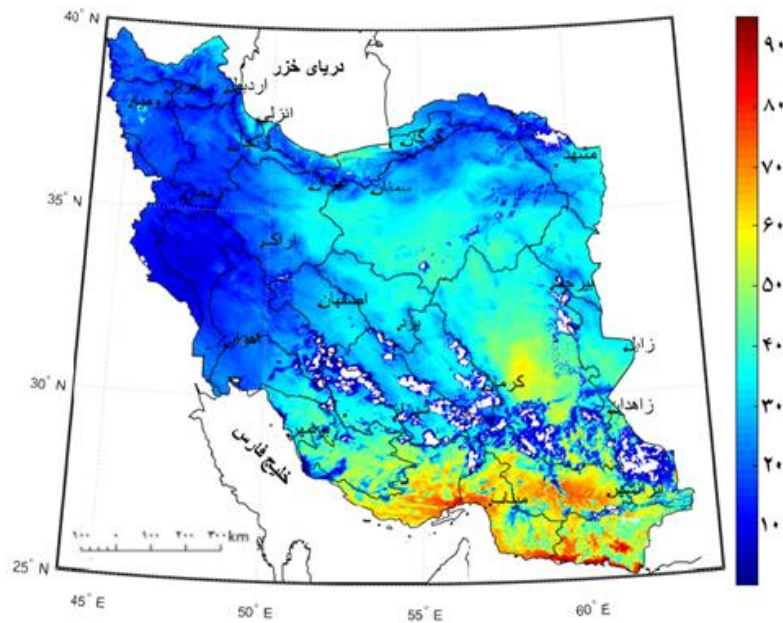
جدول ۱: ویژگی‌های آماری آب بارش‌پذیر روزهای انتخابی (میلی‌متر)

روز	کمینه	بیشینه	میانگین
۱۳۹۲/۰۵/۱۶	۰/۲	۹۵/۰۶	۳۰/۷۲
۱۳۸۲/۰۵/۰۱	۰/۳	۸۵/۹۶	۲۹/۸۸
۱۳۹۲/۰۵/۱۹	۰/۳	۸۵/۰۴	۲۹/۸۷
۱۳۸۲/۰۴/۳۰	۰/۵۱	۱۰۰/۲۸	۲۹/۸۳
۱۳۹۵/۰۵/۰۷	۰/۱۱	۷۵/۳۳	۲۹/۸۲

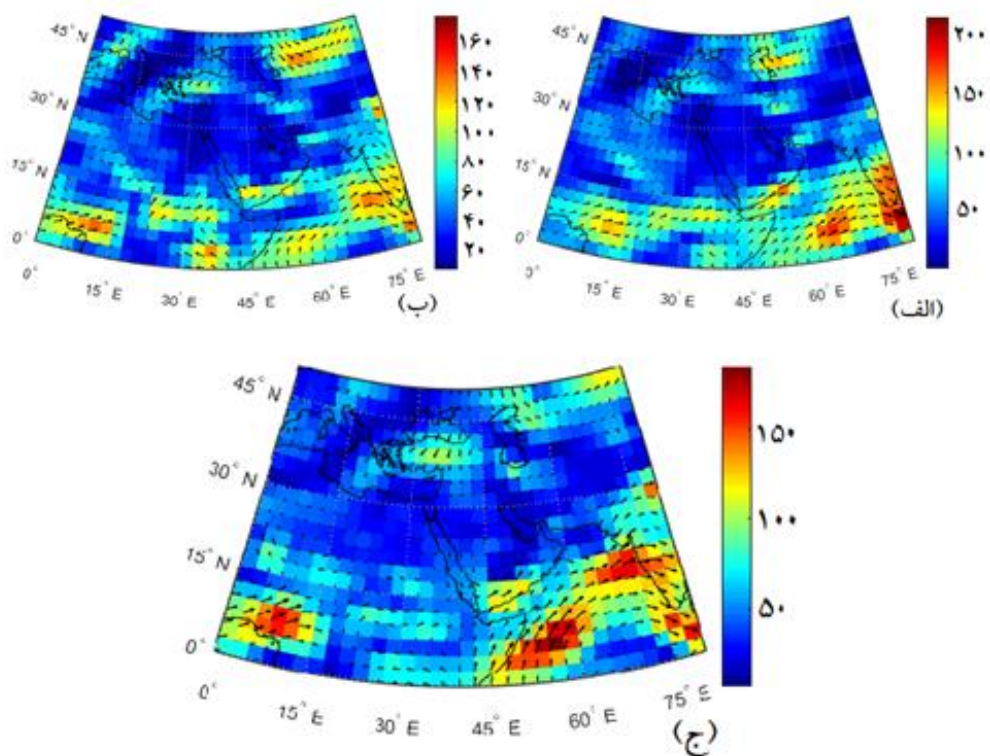
مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۸

استقرار کم‌فشار در شرق دریای خزر (قزاقستان) موجب انتقال رطوبت دریای خزر از طریق جریانات غربی این کم‌فشار به ایران مرکزی و ایجاد یک هسته بیشینه شار رطوبت با تقریباً ۱۰۰ گرم بر مترمکعب در روز در این ناحیه شده‌است. حرکت چرخندی بر روی شرق عربستان و عبور جریانات جنوب‌غربی این سامانه از روی خلیج فارس و دریای عرب، از یک سو باعث افزایش فرارفت رطوبت در شرق تنگه هرمز و سواحل دریای عمان (۱۰۰ گرم بر مترمکعب در روز) و از سوی دیگر همگراشدن رطوبت در ایران مرکزی و به‌دنبال آن افزایش نسبی بخار آب جو (شکل ۱) این نواحی نسبت به سایر نقاط شده‌است. در روز شانزدهم تنها در بخش مرکزی سواحل دریای خزر مقدار فرارفت رطوبت (۱۰۰ گرم بر مترمکعب در روز) بیشینه است. فرارفت رطوبت به این ناحیه نیز همچون دو روز قبل از شمال شرق دریای خزر صورت گرفته‌است.

شکل ۳ و ۴ به ترتیب آب بارش‌پذیر، فرارفت رطوبت روز شانزدهم مرداد ۱۳۹۲ با بالاترین متوسط آب بارش‌پذیر (۳۰/۷ میلی‌متر) را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، آب بارش‌پذیر سواحل دریای عمان و پس‌کرانه‌های آن، بخش‌های شرقی خلیج فارس، تنگه هرمز و لوت مرکزی، بیشینه است. بخش‌های شرقی سواحل خزر و ایران مرکزی نیز نسبت به سایر نقاط کشور، آب بارش‌پذیر ۶۰ تا ۸۵ میلی‌متر را در این روز تجربه می‌کنند. به‌منظور شناسایی منابع رطوبت جو در این روز، فرارفت رطوبت این روز و دو روز قبل بررسی شد. شکل ۴ فرارفت رطوبت دو روز قبل و روز شانزدهم را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود فرارفت رطوبت دارای دو هسته بیشینه در خارج از مرزهای ایران است. یک هسته بر روی شرق دریای خزر با تقریباً ۱۵۰ گرم بر مترمکعب در روز و هسته دیگر با تقریباً ۱۷۰ گرم بر مترمکعب در روز بر روی دریای عرب قرار دارد.



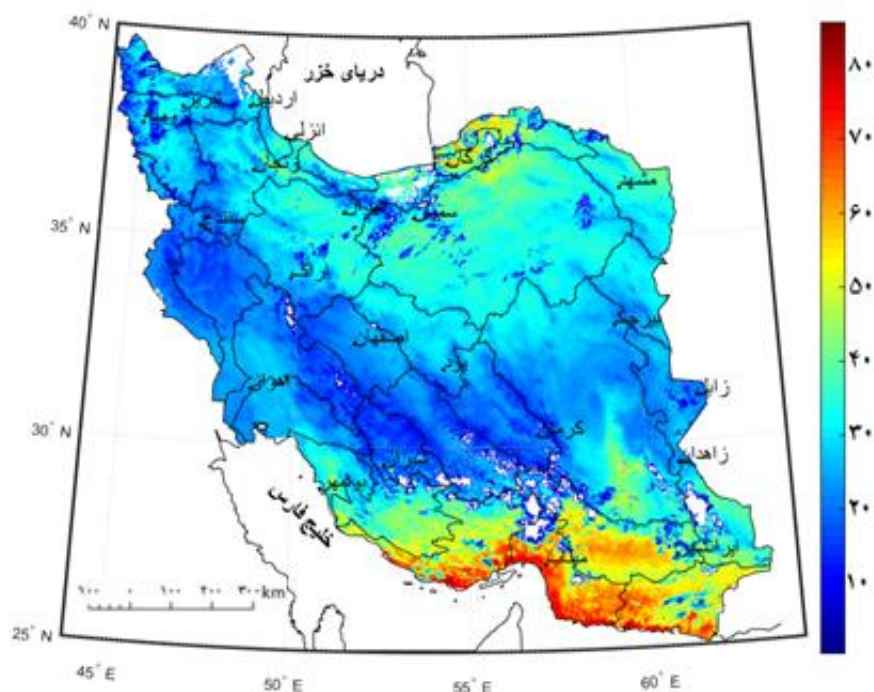
شکل ۳: آب بارش پذیر (میلی‌متر) ۱۶ مرداد ۱۳۹۲
تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۸



شکل ۴: فرارفت رطوبت (گرم بر مترمکعب در روز) در روزهای چهاردهم (الف)، پانزدهم (ب) و شانزدهم (ج) مرداد ۱۳۹۲
تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۸

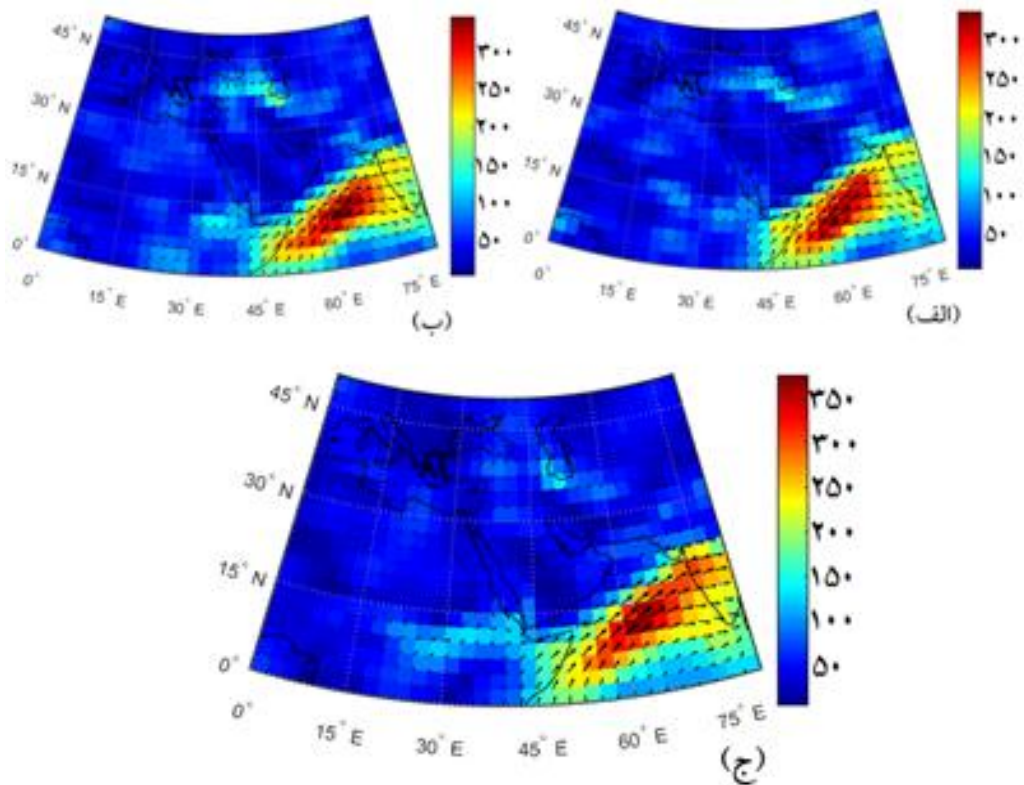
است. وجود حرکات چرخندی در شمال شرق دریای خزر و گذر بادهای جنوبی این سامانه از روی دریای خزر، موجب انتقال رطوبت به بخش‌هایی از ایران مرکزی، کرانه میانی و جنوب غربی دریای خزر شده است. استقرار یک پرفشار بر روی دریای عرب با فرارفت رطوبت ۳۰۰ تا ۳۵۰ گرم بر مترمکعب در روز به اطراف موجب انتقال رطوبت از طریق بادهای جنوب غربی به کرانه‌های دریای عمان می‌شود؛ ضمن اینکه نقش رژیم محلی نسیم دریا-خشکی را در تراپد رطوبت به کرانه‌های دریای عمان نباید از نظر دور داشت (شکل ۴).

شکل ۵ و ۶ به ترتیب آب بارش‌پذیر، فرارفت رطوبت روز اول مرداد ۱۳۸۲ با متوسط آب بارش‌پذیر ۲۹/۸۸ میلی‌متر را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در سواحل دریای عمان و بخش‌های میانی و شرقی خلیج فارس، جنوب استان‌های فارس، کرمان، سیستان و بلوچستان، همچنین استان‌های گرگان، خراسان شمالی و دره طارم (شکل ۷) آب بارش‌پذیر ۵۵ تا ۸۵ میلی‌متر است. بررسی فرارفت رطوبت در این روز و دو روز قبل از آن نشان داد، در کرانه‌های میانی و جنوب غربی دریای خزر فرارفت رطوبت روزهای سی‌ام، سی‌ویکم تیر و اول مرداد به ترتیب ۱۶۰، ۲۰۰ و ۱۵۰ گرم بر مترمکعب در روز

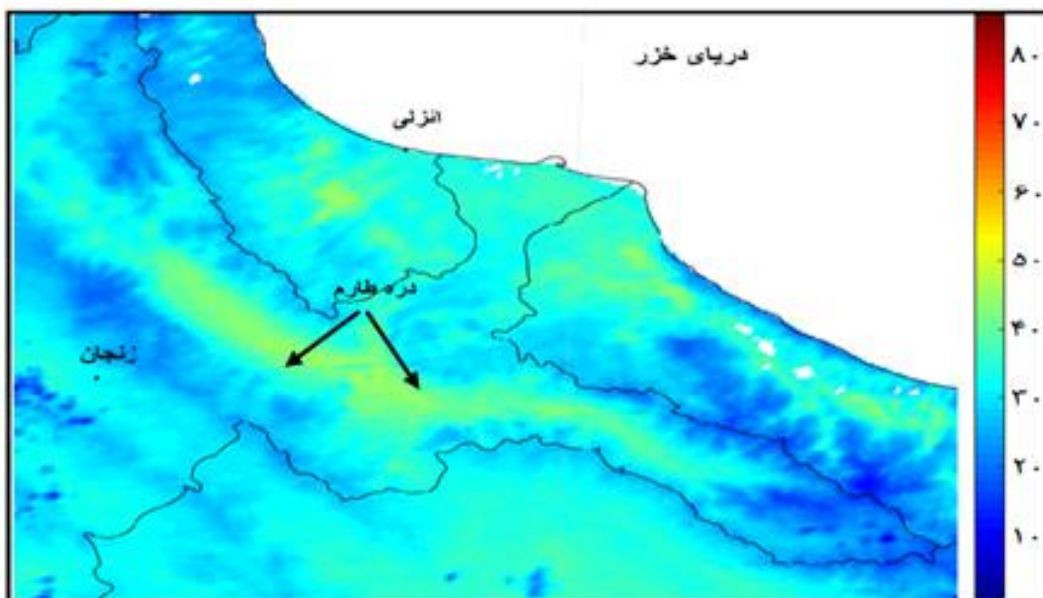


شکل ۵: آب بارش‌پذیر (میلی‌متر) ۱ مرداد ۱۳۸۲

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۸



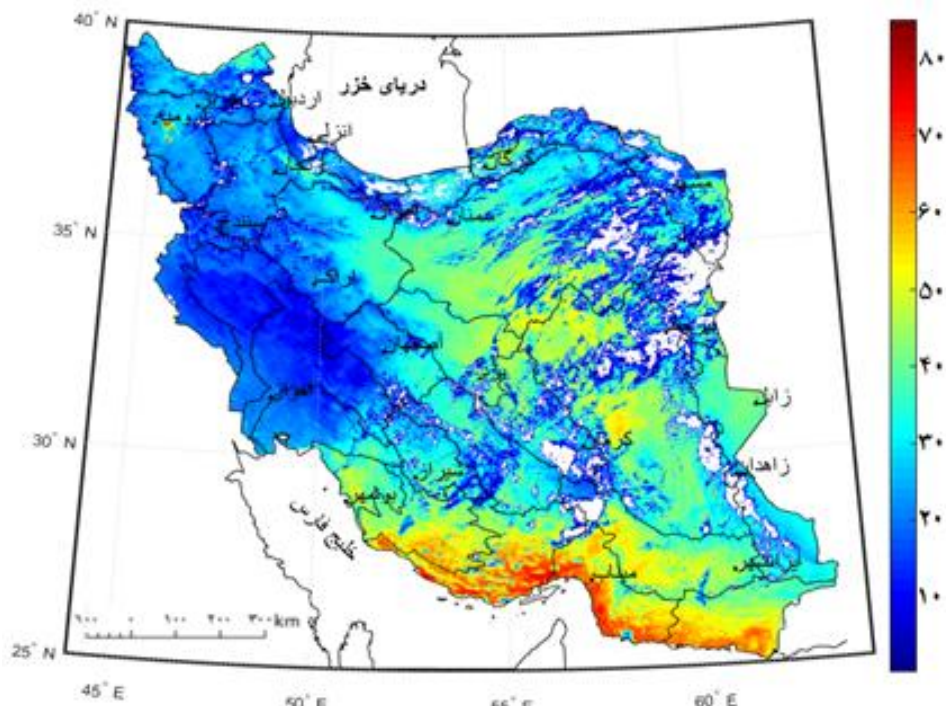
شکل ۶: فرارفت رطوبت (گرم بر مترمکعب در روز) در روزهای (الف) سی ام، (ب) سی و یکم تیر و (ج) اول مرداد ۱۳۸۲ تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۸



شکل ۷: آب بارش پذیر (میلی متر) ۱ مرداد ۱۳۸۲ در دره طارم تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۸

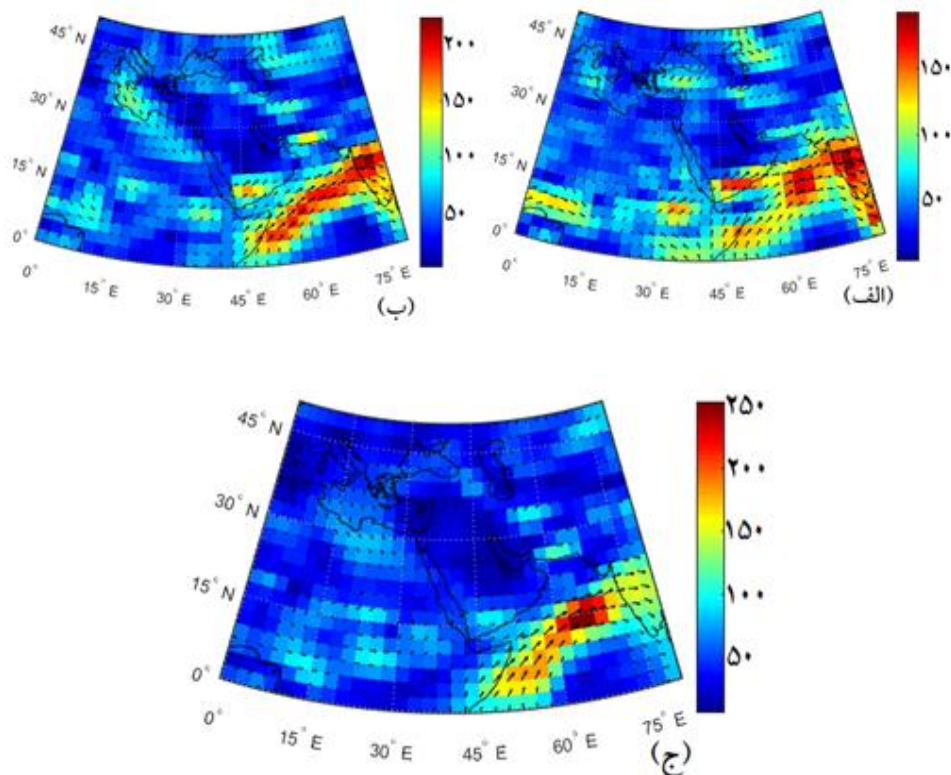
در این دو روز نیز در نتیجه وزش بادهای شمال شرقی است که از زبانه جنوبی کم فشار حاکم بر شمال شرق دریای خزر سرچشمه گرفته‌اند. در روزهای هفدهم و هجدهم همگراشدن رطوبت جریانات شمالی (پرفشار شمال آفریقا) و جنوب غربی (کم فشار سودانی) در خلیج عدن، برون داد رطوبت از این مناطق را به مقدار ۱۰۰ تا ۲۰۰ گرم بر مترمکعب در روز موجب شده است. این شار رطوبت با شار رطوبت از سوی دریای عرب ادغام و با جهت جنوب غربی و رطوبت ۱۰۰ تا ۱۵۰ گرم بر مترمکعب در روز بر کرانه‌های دریای عمان و خلیج فارس وزیده‌اند. در روز نوزدهم فرارفت رطوبت اندکی ضعیف تر است؛ به گونه‌ای که رژیم محلی نسیم دریا- خشکی بخشی از رطوبت جو این نواحی را به مقدار ۱۰۰ گرم بر مترمکعب در روز تأمین می‌کند.

شکل ۸ و ۹ به ترتیب آب بارش پذیر، فرارفت رطوبت روز نوزدهم مرداد ۱۳۹۲ با متوسط آب بارش پذیر ۲۹/۸۷ میلی متر را نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود، بخش‌های وسیعی از ایران مرکزی، شرق خراسان رضوی، استان گلستان، شمال استان اردبیل، دره طارم، دریاچه ارومیه و کرانه‌های جنوبی، آب بارش پذیر ۵۰ تا ۸۵ میلی متر دارند. همانند روزهای گذشته، حرکات چرخندی در شمال شرق دریای خزر و ترابرد رطوبت دریای خزر از طریق بادهایی که از روی دریا می‌گذرند، باعث افزایش فرارفت رطوبت در کرانه‌های جنوب غربی دریای خزر شده است. فرارفت رطوبت که مقدار آن حدود ۱۰۰ گرم بر مترمکعب در روز است، در روز هفدهم بیشتر از دو روز دیگر است. در روزهای هجدهم و نوزدهم، فرارفت رطوبت در بخش‌های ایران مرکزی ۱۰۰ تا ۱۵۰ گرم بر مترمکعب در روز است. فرارفت رطوبت



شکل ۸: آب بارش پذیر (میلی متر) ۱۹ مرداد ۱۳۹۲

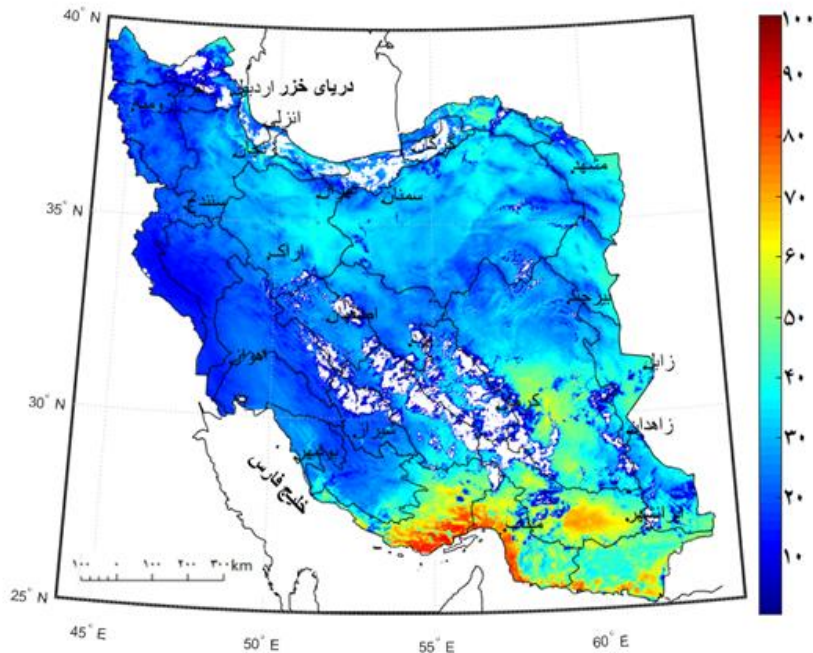
تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۸



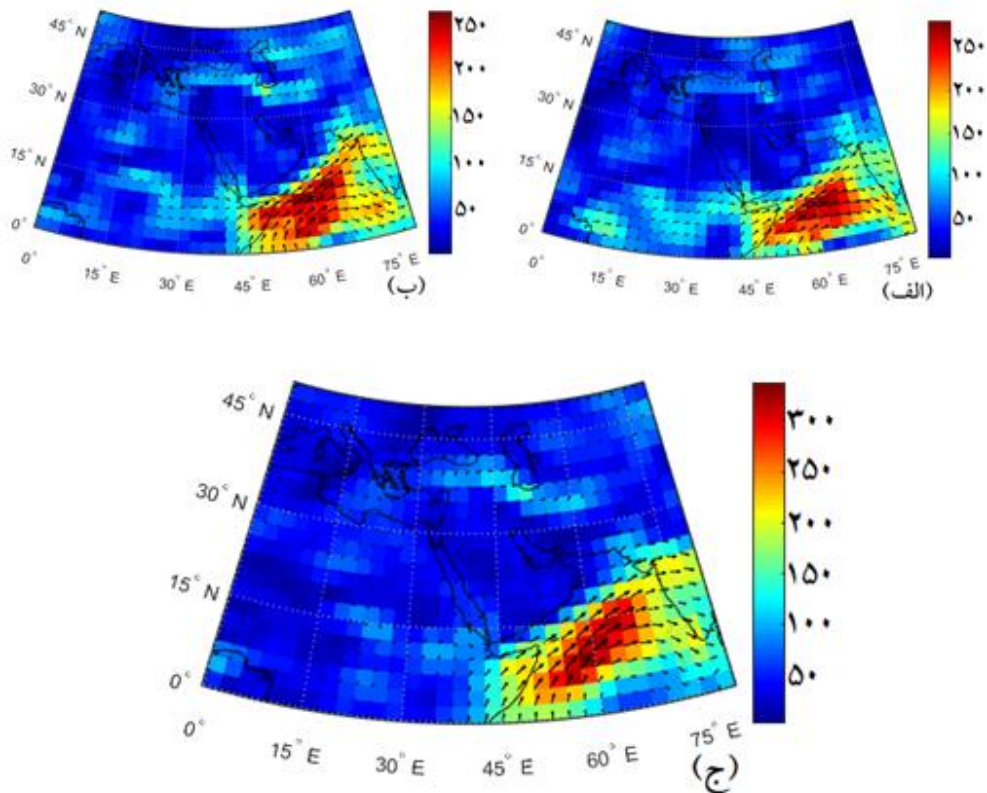
شکل ۹: فرارفت رطوبت (گرم بر مترمکعب در روز) در روزهای (الف) هفدهم، (ب) هجدهم و (ج) نوزدهم مرداد ۱۳۹۲
تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۸

شده است. فرارفت رطوبت در جنوب غرب دریای خزر در این روز و دو روز قبل تقریباً بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ گرم بر مترمکعب در روز است. فرارفت رطوبت از طریق وزش بادهای شمال شرقی بر روی دریای خزر صورت می گیرد. در نتیجه همگراشدن جریانات غرب سو و جنوب سو در منطقه خلیج عدن و گذر این جریانات از دریای عرب و تغذیه رطوبتی، فرارفت رطوبت در کرانه های جنوبی به ویژه کرانه های دریای عمان ۱۰۰ تا ۱۵۰ گرم بر مترمکعب در روز است. این مقدار در روز بیست و نهم نسبت به روز قبل و بعد بیشتر است.

شکل ۱۰ و ۱۱ به ترتیب آب بارش پذیر، فرارفت رطوبت روز سی ام تیر ۱۳۸۲ با متوسط آب بارش پذیر ۲۹/۸۳ میلی متر را نشان می دهد. در کرانه های جنوبی به ویژه در دو طرف تنگه هرمز مقدار رطوبت جو ۷۰ تا ۸۰ میلی متر است. در دشت لوت و چاله جازموریان نیز آب بارش پذیر ۶۰ تا ۷۰ میلی متر است. در کرانه های شمالی اطلاعات مربوط به رطوبت جو تنها در بخش های کوچکی وجود دارد. رطوبت دریای خزر نیز از طریق تنگه منجیل وارد دره طارم شده و مقدار آب بارش پذیر آن نسبت به محیط اطراف بیشتر



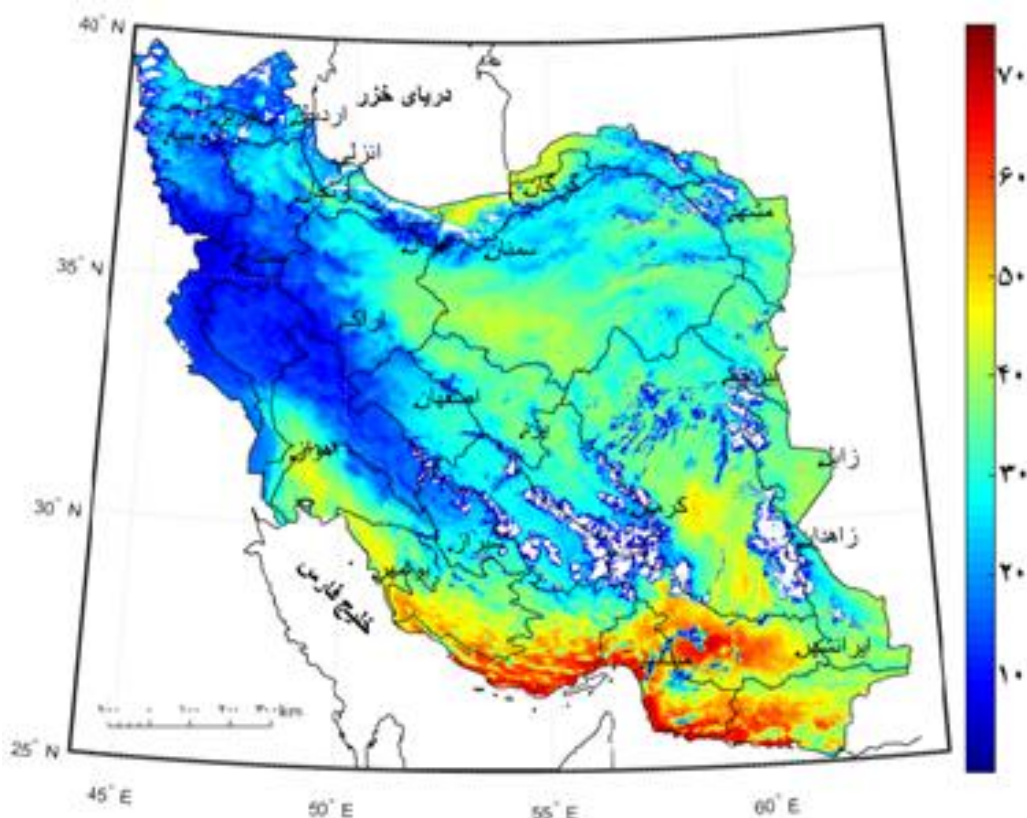
شکل ۱۰: آب بارش پذیر (میلی‌متر) ۳۰ تیر ۱۳۸۲
تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۸



شکل ۱۱: فرارفت رطوبت (گرم بر مترمکعب در روز) در روزهای (الف) بیست‌وهشتم، (ب) بیست‌ونهم و (ج) سی‌ام تیر ۱۳۸۲
تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۸

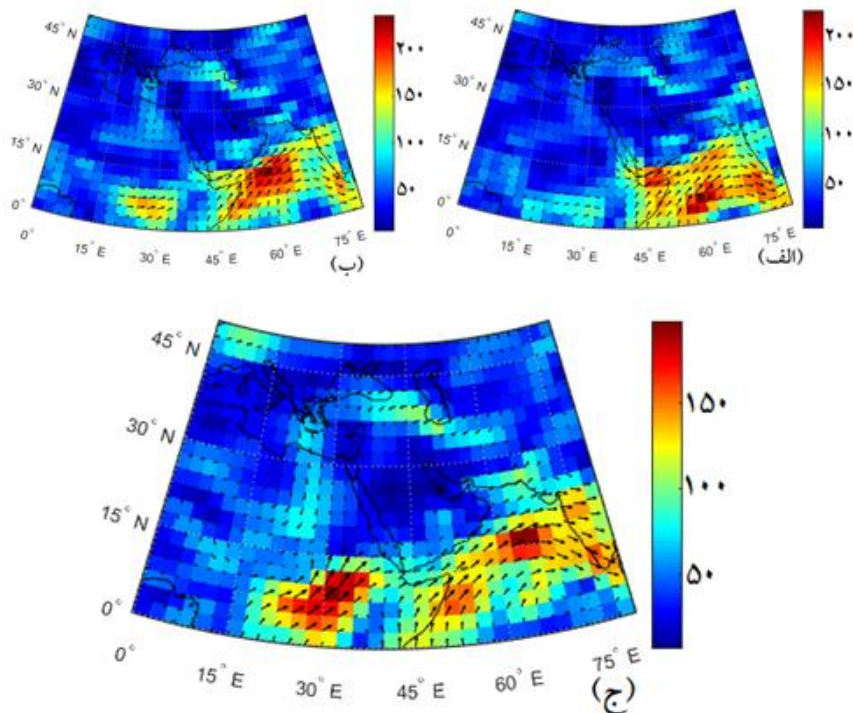
شرقی و غربی از طریق گذر بادهای شمال شرقی و شرقی از روی دریای خزر صورت گرفته است. مقدار فرارفت رطوبت توسط این بادهای تقریباً ۸۰ تا ۱۳۰ گرم بر مترمکعب در روز است. حرکت چرخندی بر روی شرق عربستان و همگراشدن جریانات شرقی این سامانه با جریانات غربی و اچرخند حاکم بر دریای عرب، فرارفت رطوبت را در خلیج عدن و دریای عرب افزایش داده است. فرارفت رطوبت با جهت جنوبی و جنوب غربی از دریای عرب، در کرانه های خلیج فارس و دریای عمان حدوداً ۱۰۰ تا ۱۲۵ گرم بر مترمکعب در روز است.

شکل ۱۲ و ۱۳ به ترتیب آب بارش پذیر، فرارفت رطوبت روز هفتم مرداد ۱۳۹۵ با متوسط آب بارش پذیر ۲۹/۸۲ میلی متر را نشان می دهد. در سرتاسر کرانه های جنوبی از گوشه شمال غربی خلیج فارس تا کرانه های شرقی دریای عمان و پس کرانه ها، جلگه خوزستان، چاله جازموریان، دشت لوت، کویر مرکزی، مرزهای شرقی، استان های مازندران و گلستان و دره طارم مقدار آب بارش پذیر ۳۰ تا ۷۰ میلی متر بوده است. فرارفت رطوبت در این روز و دو روز قبل در کرانه های جنوبی دریای خزر و استان های اردبیل، زنجان، آذربایجان



شکل ۱۲: آب بارش پذیر (میلی متر) ۷ مرداد ۱۳۹۵

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۸



شکل ۱۳: فرارفت رطوبت (گرم بر مترمکعب در روز) در روزهای (الف) پنجم، (ب) ششم و (ج) هفتم مرداد ۱۳۹۵
تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۸

نتیجه

باتوجه به اینکه مقدار رطوبت در جو ارتباط مستقیمی با سامانه‌های جوی دارد و با تغییر این سامانه‌ها در طول زمان و مکان، مقدار رطوبت جو نیز تغییر می‌یابد، بر همین اساس فرارفت رطوبت مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار دارد. در این پژوهش فرارفت رطوبت در روزهایی که متوسط آب بارش‌پذیر دو انحراف معیار از میانگین کل دوره فاصله داشت و دو روز قبل از آن بررسی شد. بررسی‌ها نشان می‌دهد استقرار یک سامانه پرفشار بر روی غرب دریای عرب (شرق عربستان) و سامانه کم‌فشار بر روی شرق آفریقا، در خلیج عدن و دریای عرب یک مرکز همگرایی شار رطوبت به‌وجود می‌آورد که در بسیاری از اوقات، رطوبت از این مرکز با جهت جنوب‌غربی به کرانه‌های جنوبی کشور می‌رسد و آب بارش‌پذیر را در این نواحی افزایش می‌دهد. این

جریان‌های مرطوب در پاره‌ای اوقات تا نواحی مرکزی ایران نیز پیشروی می‌کنند و با جریان‌های مرطوبی که از سوی شمال‌شرق می‌وزند، همگرا شده و باعث افزایش رطوبت جو این نواحی می‌شوند. همان‌طور که اشاره شد، در کرانه‌های دریای خزر، دره طارم، استان اردبیل، شمال استان‌های آذربایجان غربی و شرقی نیز آب بارش‌پذیر بیشینه است. فرارفت رطوبت در این مناطق بیشتر از دریای خزر و در برخی موارد از دریای سیاه اتفاق می‌افتد. بررسی‌ها همچنین نشان داد، از روز شانزدهم و دو روز قبل تا نوزدهم مرداد ۱۳۹۲ که در هر دو روز آب بارش‌پذیر بیشینه است، جریان‌های جنوب‌غربی از سوی خلیج عدن و دریای عرب سرعت و رطوبت بیشتری نسبت به سایر روزها دارا هستند؛ همچنین در روز ۳۰ تیر و دو روز قبل از آن تا ۱ مرداد ۱۳۸۲ فرارفت رطوبت از سوی

- کریمی، مصطفی؛ منوچهر فرج‌زاده اصل (۱۳۹۰). شار رطوبت و الگوهای فضایی- زمانی منابع تأمین رطوبت بارش‌های ایران، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی. شماره ۲۲. صفحات ۱۲۷-۱۰۹.

<https://jgs.khu.ac.ir/article-1-630-fa.html>

- مسعودیان، سید ابولفضل؛ سهراب قائدی؛ بختیار محمدی (۱۳۸۵). نواحی رطوبتی ایران، جغرافیا و برنامه‌ریزی دانشگاه تبریز. شماره ۲۰. صفحات ۱-۱۴.

<https://www.noormags.ir/view/fa/articlepage/330071>

- مسعودیان، سید ابولفضل؛ بختیار محمدی؛ محمد دارند (۱۳۹۲). هواشناسی، چاپ اول. انتشارات دانشگاه اصفهان.

- مفیدی، عباس؛ آذر زرین (۱۳۸۴). تحلیل سینوپتیکی ماهیت سامانه‌های کم‌فشار سودانی (مطالعه موردی؛ توفان دسامبر ۲۰۰۱)، فصل‌نامه جغرافیایی سرزمین. شماره ۶. صفحات ۴۸-۲۴.

<https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=39446>

- نوری، حمید؛ حسنعلی غیور؛ سید ابولفضل مسعودیان؛ مجید آزادی (۱۳۹۲). تحلیل فراوانی تابع همگرایی شار رطوبت و منابع رطوبتی بارش سواحل جنوبی خزر، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی. ۲۴. صفحات ۱-۱۴.

https://gep.ui.ac.ir/article_18614.html

References

- Bock, O., Bouin, M.N., Walpersdorf, A., Lafore, J.P., Janicot, S., Guichard, F. and Agustí-Panareda, A (2007). Comparison of ground-based GPS precipitable water vapour to independent observations and NWP model reanalyses over Africa, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, No 133, 2011-2027.
<https://doi.org/10.1002/qj.185>
- Bock, O., Bouin, M. N., Doerflinger, E., Collard, P., Masson, F., Meynadier, R., & Ouedraogo, D (2008). West African Monsoon observed with ground-based GPS receivers during African Monsoon Multidisciplinary Analysis (AMMA). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, NO 113(D21).
<https://doi.org/10.1029/2008JD010327>

دریای عرب قوی‌تر از خلیج عدن بوده‌است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان گفت، دریای عرب نسبت به سایر منابع نقش بیشتری در تأمین رطوبت جو کرانه‌های جنوبی و وقوع بیشینه‌های آن دارند.

پژوهش دوستکامیان و همکاران (۱۳۹۷)، کریمی و فرج‌زاده (۱۳۹۰) نیز نتایج این تحقیق را تأیید می‌کند. با توجه به نقش فرارفت رطوبت در وردش‌های آب بارش‌پذیر و به دنبال آن وردش در بارش‌های دریافتی و تبعات ناشی از آن، پیشنهاد می‌شود علاوه بر توجه به نقش عوامل محلی در وردش‌های آب بارش‌پذیر به نقش فرارفت رطوبت در فصول مختلف و منابع تأمین آن توجه ویژه شود.

منابع

- براتی، غلامرضا؛ محمد مرادی؛ قربان صابر (۱۳۹۳). شار رطوبت سنگین‌ترین بارندگی زمستانی در ایران مرکزی. پژوهش‌های دانش زمین. شماره ۱۹. صفحات ۷۰-۶۰.

<https://dorl.net/dor/20.1001.1.20088299.1393.5.3.5.6>

- خدادی، محمد مهدی؛ مجید آزادی؛ پرویز رضازاده (۱۳۹۲). منابع رطوبت و تراپردماخانه آن بر روی ایران و برهم‌کنش آن با مونسون هندوستان و پراارتفاع جنب حاره، *مجله ژئوفیزیک ایران*. شماره ۲. صفحات ۱۱۳-۹۶.

http://www.ijgeophysics.ir/article_40589.html

- دوستکامیان، مهدی؛ مسعود جلالی؛ الله‌مراد طاهریان (۱۳۹۷). واکاوی شار همگرایی رطوبت و آب قابل‌بارش جو بارش‌های بهاره ایران. جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره ۲۵. صفحات ۱۵۲-۱۳۱.

<https://dx.doi.org/10.22067/geo.v7i1.64076>

- فلاح قالهری، غلام‌عباس؛ مهدی اسدی؛ عباسعلی داداشی رودباری (۱۳۹۴). تحلیل فضایی پراکنش رطوبت در ایران، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی. شماره ۴. صفحات ۶۵۰-۳۷.

<https://dx.doi.org/10.22059/jphgr.2015.56053>

- Lélé, M. I., Leslie, L. M., and Lamb, P. J (2015). Analysis of low-level atmospheric moisture transport associated with the West African Monsoon, *Journal of Climate*, No. 28, 4414-4430. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00746.1>
- Li, C., Zuo, Q., Xu, X., and Gao, S (2016). Water vapor transport around the Tibetan Plateau and its effect on summer rainfall over the Yangtze River valley, *Journal of Meteorological Research*, NO. 30, 472-482. <https://dx.doi.org/10.1007/s13351-016-5123-1>
- Lu, N., Qin, J., Gao, Y., Yang, K., Trenberth, K. E., Gehne, M., and Zhu, Y (2015). Trends and variability in atmospheric precipitable water over the Tibetan Plateau for 2000-2010, *International Journal of Climatology*, No. 35, 1394-1404. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.4064>
- Malmusi, S., and Boccolari, M (2010). Upper and middle precipitable water calculated from METEOSAT-8/-9 tropospheric humidity and NCEP/NCAR temperatures, *Atmospheric Research*, No. 95, 8-18. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.08.010>
- Puviarasan, N. Sharma, A. K. Manish Ranalkar, and Giri R. K (2014). Onset, Advance and Withdrawal of Southwest Monsoon Over Indian Subcontinent. A Study from Precipitable Water Measurement Using Ground Based GPS Receivers, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, No.122, 45-57. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2014.10.010>
- Ross, R. J., & Elliott, W. P (2001). Radiosonde-based Northern Hemisphere tropospheric water vapor trends. *Journal of Climate*, No.14,1602-1612. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014%3C1602:RBNHTW%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014%3C1602:RBNHTW%3E2.0.CO;2)
- Sapucci, L. Machado, L. t. Monico, J. F. G. and Plana-Fattori, A (2007). Intercomparison of Integrated Water Vapor Estimates from Multisensors in the Amazonian Region, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, NO.24, 880-1894. <https://doi.org/10.1175/JTECH2090.1>
- Trenberth, K. E., Fasullo, J., & Smith, L (2005). Trends and variability in column-integrated atmospheric water vapor. *Climate dynamics*, No 24, 741-758. <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-005-0017-4>
- Chakraborty, A., Behera, S. K., Mujumdar, M., Ohba, R., and Yamagata, T (2006). Diagnosis of tropospheric moisture over Saudi Arabia and influences of IOD and ENSO, *Monthly Weather Review*, No.134, 598-617. <https://doi.org/10.1175/MWR3085.1>
- Chakraborty, S. Adhikar, A. and Maitra A (2016). Rainfall Estimation from Liquid Water Content and Precipitable Water Content Data Over Land, Ocean and Plateau, *Atmospheric Research*, No. 167, 265-274.
- Fathurochman, I., Lubis, S. W., & Setiawan, S (2017). Impact of Madden-Julian Oscillation (MJO) on global distribution of total water vapor and column ozone. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science No. 54, 012034. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/54/1/012034>
- D'Abreton, P. C., and Lindesay, J. A (1993). Water vapour transport over southern Africa during wet and dry early and late summer months, *International Journal of Climatology*, No. 13, 151-170. <https://doi.org/10.1002/joc.3370130203>
- Groves, D. G., & Francis, J. A (2002). Variability of the Arctic atmospheric moisture budget from TOVS satellite data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(D24), ACL-18. <http://dx.doi.org/10.1029/2002JD002285>
- Hadjimitsis, D., Mitraka, Z., Gazani, I., Retalis, A., Chrysoulakis, N., and Michaelides, S (2011). Estimation of spatio-temporal distribution of precipitable water using MODIS and AVHRR data: a case study for Cyprus, *Advances in Geosciences*, No 30, 23-29. <https://doi.org/10.5194/adgeo-30-23-2011>
- Kaufman, Y. J., & Gao, B. C. (1992). Remote sensing of water vapor in the near IR from EOS/MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, No. 30, 871-884. <https://doi.org/10.1109/36.175321>
- Krichak, S. O., Feldstein, S. B., Alpert, P., Gualdi, S., Scoccimarro, E., and Yano, J.-I (2016). Discussing the role of tropical and subtropical moisture sources in cold season extreme precipitation events in the Mediterranean region from a climate change perspective, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, No. 16, 269-285. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-269-2016>

- Wu, G., and Zhang, Y (1998). Tibetan Plateau forcing and the timing of the monsoon onset over South Asia and the South China Sea, Monthly weather review, No. 126, 913-927. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1998\)126%3C0913:TPFATT%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1998)126%3C0913:TPFATT%3E2.0.CO;2)
- Zhai, P., and Eskridge, R. E (1997). Atmospheric water vapor over China, Journal of Climate, No.10, 2643-2652. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1997\)010%3C2643:AWVOC%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1997)010%3C2643:AWVOC%3E2.0.CO;2)
- Zhang, D., Huang, J., Guan, X., Chen, B., and Zhang, L (2013). Long-term trends of precipitable water and precipitation over the Tibetan Plateau derived from satellite and surface measurements, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, No.122, 64-71. https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2013JQSRT.122...64Z/doi:10.1016/j.jqsrt.2012.11.028
- Xu, X. D., Miao, Q., Wang, J., and Zhang, X (2003). The water vapor transport model at the regional boundary during the meiyu period, Advances in Atmospheric Science, No.20,333-342. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02690791>
- Torres, B., Cachorro, V. E., Toledano, C., Ortiz de Galisteo, J.P., Berjón, A., de Frutos, A. M., Bennouna, Y., and Laulainen, N (2010). Precipitable water vapor characterization in the Gulf of Cadiz region (southwestern Spain) based on Sun photometer, GPS, and radiosonde data, Journal of Geophysical Research, No.115, D18103, 1-11. <http://dx.doi.org/10.1029/2009JD012724>
- Wang, H., Wei, M., Li, G., Zhou, S., & Zeng, Q (2013). Analysis of precipitable water vapor from GPS measurements in Chengdu region: Distribution and evolution characteristics in autumn. Advances in Space Research, N0.52, 656-667. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2013.04.005>
- Wang, H., and He, J (2017). Temporal and Spatial Evolution Features of Precipitable Water in China during a Recent 65-Year Period (1951-2015), Advances in Meteorology, No. 2017,1-11. <https://doi.org/10.1155/2017/9156737>
- Wong, M. S., Jin, X., Liu, Z., Nichol, J., and Chan, P. W (2014). Multi-sensors study of precipitable water vapour over mainland China, International Journal of Climatology, No. 35, 3146-3159. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.4199>

