

Relative Humidity Zoning of Sistan-Baluchestan Province Using MODIS Satellite Images

MASIHOLAH MOHAMMADI¹, BEHROOZ SOBHANI^{1*}

1. Department of Climatology, Faculty of Humanities, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
(Received: May. 10, 2020- Revised: July. 23, 2020- Accepted: July. 29, 2020)

ABSTRACT

The purpose of this research is to present a method based on global and experimental algorithms for estimating relative humidity in Sistan and Baluchestan province. For this purpose, Terra MODIS images and products (MOD05, MOD07) of 10-years (1-Jan-2009 to 31-Dec-2018) under cloudless conditions were used as selected data. To validate the obtained layers (near ground surface temperature, ground surface pressure, total perceptible water, TPW, and relative humidity), the ground station and the radio sound data were used. The R2 and REMS values of the recorded layers from the sensor and the ground data were acceptable and the sensed data were in good agreement with ground station measurements. Results show that the altitude factor play an important role in temperature measurement. The minimum amount of TPW has been recorded to be 6 mm in the Khash, Mir Java and Saravan regions in the cold season and the maximum amount of TPW has been recorded to be 49 mm in the coastal areas in the warm season. The average relative humidity in the province is in equilibrium in the cold season, while it is out of equilibrium in the hot season, so that it is above 60% on the coast of Oman and less than 10% in the central province (Khash, Mir Java and Zahedan).

Keywords: Experimental Algorithm, MODIS Measurement, Relative Humidity, Sistan-Baluchestan, Zoning.

پهنه‌بندی رطوبت نسبی استان سیستان بلوچستان با استفاده از تصاویر سنجنده MODIS

مسیح‌اله محمدی^۱، بهروز سبحانی^{۱*}

۱. گروه آب و هواشناسی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۲/۲۱ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۵/۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۵/۸)

چکیده

هدف این پژوهش ارائه روشی بر مبنای الگوریتم‌های جهانی و تجربی جهت برآورد رطوبت نسبی در استان سیستان و بلوچستان است. بدین منظور از تصاویر ترا مودیس و از محصولات (MOD05, MOD07) مربوط به بازده زمانی ۱۰ ساله (۱ ژانویه ۲۰۰۹ تا ۳۱ دسامبر ۲۰۱۸) در شرایط بدون ابر به‌عنوان داده‌های منتخب استفاده شد. برای اعتبار سنجی لایه‌های به‌دست‌آمده (دمای نزدیک سطح زمین، فشار سطح زمین، آب قابل بارش TPW و رطوبت نسبی)، داده‌های ایستگاه زمینی و رادیوساند مورد استفاده قرار گرفت. مقدار R^2 و REMS لایه‌های ثبت‌شده از سنجنده و داده‌های زمینی قابل قبول بودند و داده‌های سنجنده هم‌خوانی مناسبی با اندازه‌گیری‌های ایستگاه‌های زمینی داشتند. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از این هستند که عامل ارتفاع نقش تعیین‌کننده‌ای در فرا سنج دما دارد. حداقل مقدار آب قابل بارش، ۶ میلی‌متر در مناطق خاش، میر جاوه و سراوان در فصل سرد سال و حداکثر آن با ۴۹ میلی‌متر در مناطق ساحلی در فصل گرم سال ثبت شده است. میزان متوسط رطوبت نسبی در فصل سرد سال در کل استان در حالت تعادل قرار دارد ولی در فصل گرم سال از حالت تعادل خارج می‌شود که در سواحل دریای عمان بالای ۶۰ درصد و در مرکز استان (خاش، میر جاوه و زاهدان) کمتر از ۱۰ درصد است.

واژه‌های کلیدی: پهنه‌بندی، رطوبت نسبی، سیستان و بلوچستان، الگوریتم تجربی، سنجنده MODIS.

مقدمه

رطوبت یکی از مهم‌ترین عناصر آب‌وهوایی ایران به‌شمار می‌رود. برای اینکه میزان بارندگی و در نتیجه وضعیت حیات را در کشور کنترل می‌کند (Alijani., 2008). در جو همیشه مقداری آب به‌صورت بخار، قطرات ریز آب و بلورهای کوچک یخ وجود دارد. منشأ اصلی بخار آب در طبیعت، تبخیر آب در دریاها و اقیانوس‌ها است؛ اما از طریق تبخیر از سایر سطوح آزاد آب و سطح خاک‌های مرطوب و همچنین تعریق گیاهان نیز، مقدار بخار آب در هوا آزاد می‌شود. مقدار بخار آب در هوا ناچیز است و هرگز از ۴ درصد وزن آن تجاوز نمی‌کند (Mousavi Baigi and Ashraf., 2011) توزیع بخار آب شدیداً تابع زمان، مکان و ارتفاع است. به همین دلیل می‌بایست تغییرات آن از نظر زمانی و مکانی با قدرت تفکیک بالا مورد پایش قرار گیرد (Nilsson and Gradinarsky., 2006). پایش پیوسته تغییرات پارامترها در مقیاس جهانی با استفاده از امکانات موجود در سال‌های دور مشکل بود. تصویربرداری یا دقت تفکیک متوسط (MODIS) فرصت جدیدی را برای بهبود پایش جهانی دما، رطوبت و ازن و تغییرات آن‌ها ارائه نمود (King et al., 1992). این سنجنده که برای اولین بار بر روی ماهواره Terra نصب شده است در دسامبر سال ۱۹۹۹ به‌وسیله ناسا به فضا پرتاب

گردید. دومین سنجنده MODIS که بر روی ماهواره Aqua نصب گردید در تاریخ ۴ مه سال ۲۰۰۲ به فضا فرستاده شد. سنجنده MODIS دارای رزولوشن زمانی مناسب است و در طول روز ۴ تصویر از هر نقطه زمین تهیه می‌کند، (<http://modis.gsfc.nasa.gov/about>). همچنین دارای تعداد باندهای مناسب برای نظارت و پایش رطوبت و دما در مناطق مختلف جهان در محدوده باندهای طیفی حدود ۰/۵۰۴ و $14/385 \mu\text{m}$ و با قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومتر است (King et al., 1992). در سال‌های اخیر مطالعات در زمینه تعیین رطوبت با استفاده از تصاویر MODIS توسط پژوهشگران مختلفی از جمله: مریخ پور و رحیم زادگان برای ارزیابی و مقایسه کارایی الگوریتم بخار آب قابل بارش جو MODIS و AMSR2 در سطح خشکی در نیمه غربی ایران، الگوریتم برآورد TPW در محدوده امواج ماکروویو با به‌کارگیری داده‌های رادیو متر اسکن‌کننده پیشرفته ماکروویو AMSR2 در روزهای ابری و فاقد ابر و محصول TPW مادون قرمز نزدیک اسپکترو رادیومتر تصویر بردار با قدرت تفکیک متوسط MODIS با نام (MOD05) تنها در روزهای فاقد ابر مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند؛ زیرا این محصول در روزهای ابری کارایی ندارد. نتایج ارزیابی با استفاده از داده‌های رادیوساند در روزهای

۲۰۰۷ صورت گرفته است. مقدار ضریب تعیین R^2 و خطای RMSE در روزهای فاقد ابر به ترتیب ۰/۹۲ و ۴/۱۹ میلی‌متر و در روزهای ابری ۰/۹۱ و ۴/۴۱ میلی‌متر محاسبه شده است (Ji and Shi., 2014). ژئو بر اساس دماهای درخشندگی در ۵ باند ۱۰/۱۰، ۱۸/۷، ۲۳/۸، ۳۶/۵ و ۸۹ گیگاهرتز در قطبیدگی‌های افقی و قائم حاصل از سنجنده چینی F-Y-3B الگوریتمی را توسعه دادند که مقادیر بخار آب قابل بارش در سطح زمین را برآورد می‌کند. نتایج نشان‌دهنده آن است که در ژانگی چین و در روزهای بدون ابر مقدار RMSE ۴/۳۹ میلی‌متر و خطای BIAS ۰/۳۶ میلی‌متر محاسبه شده و در روزهای ابری مقدار RMSE ۴/۸۴ و خطای BIAS ۰/۵۲ میلی‌متر به دست آمده و در مناطق دلانزدگید مغولستان و سنگاپور و در روزهای فاقد ابر مقادیر RMSE و BIAS در برآورد بخار آب قابل بارش به ترتیب ۴/۷۳ و ۰/۸۴ میلی‌متر محاسبه شده است (Zhou., 2016). هدف از این مطالعه، ارائه الگوریتمی محلی جهت برآورد رطوبت نسبی از سنجنده MODIS بر روی سکوی Terra بر مبنای محصولات MOD05 و MOD07 در استان سیستان و بلوچستان در روزهای فاقد ابر است. محصول MOD05 شامل مقادیر بخار آب قابل بارش حاصل از سنجنده MODIS در محدوده امواج مادون قرمز نزدیک و محصول MOD07 شامل مقادیر بخار آب، دما و فشار سطح زمین در محدوده امواج مادون قرمز در سراسر دنیا است. آموزش و ارزیابی دقت این الگوریتم، توسط TPW اندازه‌گیری شده در ایستگاه رادیوساند زاهدان و ایستگاه‌های سینوپتیک در جنوب شرق ایران در لحظه گذر ماهواره Terra انجام شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

استان سیستان و بلوچستان با وسعت ۱۸۷۵۰۲ کیلومترمربع معادل ۱۱/۵ درصد مساحت کشور را به خود اختصاص داده است. این استان بین ۲۵ درجه و ۳ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۲۸ دقیقه عرض شمالی و ۵۸ درجه و ۴۹ دقیقه تا ۶۳ درجه و ۲۰ دقیقه طول شرقی واقع شده است و از شمال به استان خراسان جنوبی، از جنوب به دریای عمان، از شرق به کشورهای افغانستان و پاکستان و از غرب به استان‌های کرمان و هرمزگان محدود شده است. کوه‌های سیستان و بلوچستان جزء رشته‌ی کوه‌های مرکزی ایران است، بلندترین نقطه‌ی آن در کوه تفتان دارای ۴۰۴۲ متر ارتفاع و پست‌ترین منطقه آن در کناره‌های دریای عمان قرار گرفته و شامل ناهمواری‌های مشرق چاله لوت و ارتفاعات دیواره شرقی چاله جازموریان است. آب‌وهوای استان از نوع آب‌وهوای بیابانی است. حداکثر دمای سالانه آن بالای ۴۰ درجه سانتی‌گراد است.

فاقد ابر نشان‌دهنده دقت بالاتر محصول MODIS نسبت به الگوریتم AMSR2 بود، طوری که ضریب تعیین (R^2) در TPW حاصل از سنجنده AMSR2 و محصول MODIS به ترتیب ۰/۵۱۶ و ۰/۶۵۰ و مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) به ترتیب ۵/۱۲۹ و ۴/۵۴۲ میلی‌متر بود (Merrikhpour and Rahimzadegan., 2019) برای برآورد مقدار TPW سراسر ایران با استفاده از شیدسنج خورشیدی بیات و مشهدی زاده ملکی از داده‌های شیدسنج در بازه زمانی دسامبر ۲۰۰۹ تا دسامبر ۲۰۱۳ و داده‌های سنجنده AIRS و ۲۹ ایستگاه سینوپتیک از سپتامبر ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۵ برای برآورد TPW استفاده کردند. در این پژوهش برای اعتبار سنجی داده‌های سنجنده AIRS از اندازه‌گیری شیدسنج خورشیدی استفاده شده است که همبستگی بین آن‌ها ۹۰ درصد بوده است. میانگین TPW اندازه‌گیری شده با شیدسنج خورشیدی و سنجنده AIRS به ترتیب برابر با ۹/۸ و ۱۰/۸ میلی‌متر است. بیش‌ترین مقدار TPW در سواحل دریای عمان، خلیج فارس و دریای خزر و کمترین مقدار در داخل ایران و در بالای رشته‌کوه‌های زاگرس است (Bayat and Mashhadizadeh and Maleki., 2019). برای اعتبار سنجی اندازه‌گیری‌های TPW سنجنده AIRS پراسا با استفاده از اندازه‌گیری‌های بخار آب قابل بارش توسط شبکه جی‌پی‌اس و شبکه Aeronet را اعتبار سنجی کردند و به ترتیب ۰/۹۱ و ۰/۹۵ ضریب همبستگی بین اندازه‌گیری‌های جی‌پی‌اس و شید خورشیدی به دست آوردند؛ بنابراین ماهواره AIRS ابزار مناسب و دقیقی برای مطالعه بخار آب در یک منطقه دانست (Prasa et al., 2009). مغربی و الدجانی با استفاده از فشار بخار و دمای هوا مقادیر بخار آب قابل بارش را در منطقه ریاض پایتخت عربستان برآورد کردند. بر اساس ارزیابی که در بازه زمانی ۲۰۰۷-۱۹۸۵ در برابر مقادیر بخار آب قابل بارش ایستگاه‌های رادیوساند در آن منطقه انجام دادند مقدار ضریب تعیین R^2 ۰/۸۱ و خطای RMSE ۲/۸ میلی‌متر محاسبه شد. در ارزیابی دیگر در بازه زمانی ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۲ دو دسته داده به دست آمده از رادیوساند و سان فتومترها مورد بررسی قرار گرفته‌اند و مقدار خطای RMSE برای این دو دسته داده به ترتیب ۳/۲۱ و ۲/۵ میلی‌متر به دست آمد (Maghrabi and Al Dajani., 2013). برای توسعه الگوریتم بخار آب جی و شی با استفاده از نسبت اختلاف دمای درخشندگی در قطبیدگی‌های افقی و قائم باندهای ۱۸/۷ و ۲۳/۸ گیگاهرتز سنجنده (AMSR-E)، محصولات دمای سطح و بخار آب قابل بارش سنجنده MODIS در روزهای فاقد ابر، الگوریتمی در برآورد بخار آب قابل بارش در کشور آمریکا توسعه دادند و آن را به روزهای ابری نیز تعمیم دادند. ارزیابی با مقادیر حاصل از ایستگاه‌های زمینی GPS در ماه‌های ژانویه و جولای

الگوریتم استخراج بخار آب قابل بارش از سنجنده MODIS در محدوده باند مادون قرمز نزدیک

مقدار بخار آب جو، بر اساس مقایسه بین انرژی بازتابیده شده در سه باند جذبی ضعیف، متوسط و قوی بخار آب به مرکزیت‌های به ترتیب ۰/۹۰۵، ۰/۹۴۰ و ۰/۹۳۶ میکرومتر و دو باند غیر جذبی بخار آب (روزنه جوی) ۰/۸۶۵ و ۱/۲۴ میکرومتر محاسبه می‌شود. کارایی این الگوریتم در شرایط آسمان صاف و غیر ابری است (Merrikhpour and Rahimzadegan., 2019). دقت برآورد آب قابل بارش ماهواره‌ای در این الگوریتم بستگی به دقت محاسبه شفافیت جو (T_w) با همان قابلیت عبور بخار آب دارد که به صورت زیر محاسبه می‌شود (Pour bagher et al., 2009).

قابلیت عبور جو در باند جذبی ضعیف بخار آب:

(رابطه ۱)

$$T_w(950/865) = p_{0/89-0/92}^* / p_{0/845-0/885}^*$$

قابلیت عبور جو در باند جذبی متوسط بخار آب:

(رابطه ۲)

$$T_w(940/865) = p_{0/915-0/965}^* / p_{0/845-0/885}^*$$

قابلیت عبور جو در باند جذبی قوی بخار آب:

(رابطه ۳)

$$T_w(936/865) = p_{0/93-0/94}^* / p_{0/845-0/885}^*$$

که در آن p^* بازتابندگی ظاهری محاسبه شده در بالای جو برای هر باند، T_w قابلیت عبور یا شفافیت جوی برای بخار آب است. بازتابندگی ظاهری عبارت از نسبت بین رادینانس واقعی رو به بالا به رادینانس یک سطح کاملاً لامبرتی که میزان بازتابندگی آن جسم ۱۰۰ درصد است (Kaufman and Gao, 1992). بازتابندگی ظاهری را به صورت زیر ارائه می‌دهند (Kaufman and Gao., 1992):

$$P^*(\lambda) = \frac{L(Sensor)(\lambda)}{L(Sun)(\lambda)} \quad \text{(رابطه ۴)}$$

بنابراین نسبت رادینانس طیفی رسیده به سنجنده به رادینانس طیفی فرودی خورشیدی در بالای جو را بازتابندگی ظاهری گویند.

میزان رادینانس رسیده به سنجنده را می‌توان به صورت زیر

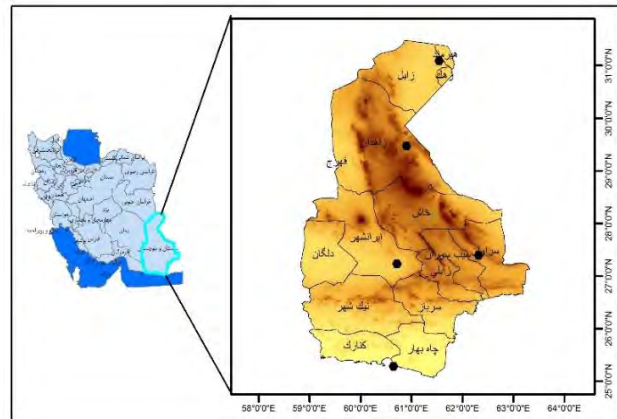
نوشت:

(رابطه ۵)

$$L(Sensor)(\lambda) = L(Sun)(\lambda) \cdot T(\lambda) \cdot P(\lambda) + L(P_{Ath})(\lambda)$$

که در آن λ طول موج، $L(Sensor)(\lambda)$ رادینانس طیفی رسیده به سنجنده و $L(Sun)(\lambda)$ تابش طیفی خورشیدی در بالای جو است. $P(\lambda)$ بازتابندگی دو راستایی سطح و $L(Sun)(\lambda)$ تابش پراکنده شده توسط هواویزها در مسیر اپتیکی سنسور-خورشید-زمین بوده، که میزان آن تقریباً ۱۰ درصد $L(Sensor)(\lambda)$ است.

زاهدان سردترین و ایرانشهر گرم‌ترین شهرهای استان است. نوسانات رطوبت، وجود بادهای موسمی همچون بادهای معروف به (صدویست روزه) و باد هفتم یا (گاو کش) و ریزش جوی و اختلاف دما در ۲۴ ساعت به استثنای نواحی معتدل سواحل دریای عمان، شرایط خاص اقلیمی، پوشش گیاهی، جانوری، مناظر بدیعی را به وجود آورده است. شکل (۱) موقعیت استان را نشان داده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

روش پژوهش

داده‌های سنجنده MODIS

برای برآورد مقدار رطوبت نسبی در این پژوهش، نیاز به تصاویر داریم که پیکسل‌های آن خالی از ابر باشند، زیرا ابر بازتابش و جذب زیادی دارد و حضور آن‌ها عدم قطعیت فراوانی وارد محاسبات می‌کند. برای کسب اطمینان عدم حضور ابر در تصویر مورد استفاده، از تست ابر استفاده شده است، در این تست از محصولات سطح دو MODIS با عنوان MOD35 با قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومتر به منظور شناسایی پیکسل‌های فاقد ابر با احتمال بالاتر از ۹۵ درصد در محدوده زمانی و مکانی ذکر شده، استفاده شده است. از محصول MOD05 سنجنده MODIS در محدوده امواج مادون قرمز نزدیک با قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومتر جهت استخراج آب قابل بارش (TPW) و از محصول MOD07 سنجنده MODIS در محدوده امواج مادون قرمز با قدرت تفکیک مکانی ۵ کیلومتری جهت استخراج فشار سطح زمین و دمای هوای استفاده شده است. بازه زمانی انتخابی در این پژوهش روزانه با بازه ۱۰ ساله از ۱ ژانویه ۲۰۰۹ تا ۳۱ دسامبر ۲۰۱۸ بود. در مجموع از هر کدام یک از محصولات حدود ۳۶۵۰ تصویر از سایت ناسا (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>) دانلود شد که با انجام تست ابر حدود ۲۱۹۰ تصویر بدون ابر برای پردازش برای محصولات (MOD05 و MOD07) شناسایی شد.

(Pourbagher., 2009).

و ضرب ثابتی که بستگی به نوع پوشش سطحی دارد.

استخراج دمای درخشندگی

دمای درخشندگی مقدار تابندگی اشعه الکترومغناطیسی است که از ناحیه بالای اتمسفر به سمت ماهواره در حال حرکت است و معادل دمای جسم سیاه تعریف می‌شوند (Mather., 1999). دمای درخشندگی با استفاده از رابطه پلانک به صورت زیر محاسبه می‌شود که در آن میزان بازتاب ثبت شده در یک پیکسل به صورت عدد رقومی به عامل دمای روشنایی تبدیل می‌شود.

$$BT = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_Y} + 1\right)} \quad (\text{رابطه ۶})$$

که در آن BT دمای درخشندگی برحسب کلونین، L_Y رادیانس طیفی $(-w - M^{-2} - \text{steradian}^{-1} - \mu^{-1})$ ، K_1 ضریب ثابت اول $(3/741775 \times 10^{-22} W - M^3 - \mu^{-1})$ ، K_2 ضریب ثابت دوم $(0/00143877 - m^0 K)$.

برای تصحیح مقادیر دمای درخشندگی اندازه‌گیری شده توسط ماهواره از رابطه زیر استفاده می‌گردد.

$$\text{Reflectance} = \text{scale} * (\text{DN} - \text{Offset}) \quad (\text{رابطه ۷})$$

محاسبه میزان شفافیت بخار آب

رابطه بین شفافیت بخار آب (T_w) و بخار آب قابل بارش کلی (TPW) را می‌توان به صورت رابطه زیر نشان داد. علاوه بر این به خاطر اشباع بودن جذب بخار آب، ریشه دوم \sqrt{W} به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شده است (Kaufman and Gao., 1992).

$$T_w (940/865) = \exp(a - \beta \sqrt{W}) \quad (\text{رابطه ۸})$$

a و β ضریب ثابت منطقه‌ای هستند که بستگی به نوع پوشش منطقه و نوع دید ماهواره دارد.

در مرحله بعد باید شفافیت بخار آب جو را که بیانگر میزان بخار آب در مسیر اپتیکی سنسور-خورشید-زمین است به آب قابل بارش کلی تبدیل کرد. برای این کار می‌توان از روابط زیر بهره برد:

$$LhT_w = \alpha - \beta \sqrt{W} \quad (\text{رابطه ۹})$$

و در نتیجه

$$W = \left(\frac{\alpha - LhT_w}{\beta}\right)^2 \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

با توجه به زوایای سمت الراس خورشید و ماهواره می‌توان مقدار W را در مسیر اپتیکی سنسور-خورشید-زمین ماهواره تعریف کرد:

$$W^* = \left(\frac{\alpha - LhT_w}{\beta}\right)^2 \times \left(\frac{1}{\cos \theta_0} + \frac{1}{\cos \theta}\right) \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

که در آن θ زاویه سمت الراس ماهواره، θ_0 زاویه سمت الراس خورشید است و W^* همان TPW یا آب قابل بارش کلی در مسیر اپتیکی سنسور-خورشید-زمین برحسب سانتی متر است. α

الگوریتم استخراج دمای جو از سنجنده MODIS

الگوریتم کاربردی سنجنده MODIS برای استخراج توزیع دما، برای سکوی Terra با نام MOD07 شناخته می‌شود. این الگوریتم با استفاده از تابش‌های آسمان صاف (آسمان بدون ابر) که در یک میدان دید 5×5 (تقریباً قدرت تفکیک مکانی ۵ کیلومتر) بر روی خشکی یا اقیانوس برای هر دو حالت روز و شب، عمل می‌کند. الگوریتم (MOD07) با استفاده از آرشیوی داده‌های مرکز Seemann et al., (GDAAC) کاربردی شده است (2006).

الگوریتم استخراج پروفیل جوی MODIS، بر پایه یک رگرسیون خطی با در نظر گرفتن گزینه‌ای برای استخراج فیزیکی غیرخطی پارامترهای مانند دما و رطوبت بنا نهاده شده است. روش استخراجی که این الگوریتم بر پایه آن قرار داده شده است، از ترکیب ۱۶ باند مادون قرمز استفاده می‌کند (Smith et al., 1991; Hayden, 1988; Li., 1994).

برای تعیین پروفیل دما می‌توان رابطه زیر را در نظر گرفت:

$$L(F_j) = \sum_{i=1}^N P [F_j, T(P_i)] W(F_j, P_i) \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

$J=1,2,\dots,M$

در این معادله، $W(F_j, P_i)$ یک تابع وزن دهی برای در نظر گرفتن شرکت هر لایه، $F_j, T(P_i)$ چگالی شار پلانک در بسامد F_j و دمای T در لایه فشار P_i است. درحالی‌که همبستگی فشار به ارتفاع حتمی فرض می‌شود. تابع وزن دهی، اثر گسیلمندی ϵ و عبور دهی τ بالای جو تا سطح i در باند j را ترکیب می‌نماید و می‌تواند توسط رابطه پایین نشان داده شود (Seemann et al., 2006):

$$W(F_j, P_i) = \epsilon(F_j, P_i) \tau(F_j, 0 \rightarrow P_i) \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

درواقع در رابطه (۱۳) هدف تعیین دما و رطوبت در N سطح جو توسط M مشاهده تابش است. هر چند به علت اینکه M مشاهده تابش از یکدیگر مستقل نیستند، برای این رابطه راه‌حل منحصر به فردی وجود ندارد. یک راه‌حل برای این مشکل توسط اسمیت و همکاران ارائه شد که در آن از اختلاف از یک پروفایل از قبل تعریف شده استفاده می‌گردد (Seemann et al., 2006).

(رابطه ۱۴)

$$L(F_i) - L_0(F_j) = \sum_{i=1}^N \{P [F_j, T(P_i)] - P [F_j, T_0(P_i)]\} W(F_j, P_i) + e(F_j)$$

در رابطه بالا $e(F_j)$ خطای مشاهدات تابش است. با فرض رفتار خطی تابع پلانک با بسامد در محدوده مادون قرمز، می‌توان رابطه (۱۴) را برای پیدا نمودن پروفیل‌های دمایی معکوس نمود.

$$T(P_i) - T_0(P_j) = \sum_{i=1}^N A (F_j, P_i) [L(F_i) - L_0(F_j)] \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

معادله فوق در فرم ماتریس به شکل زیر است:

$$T=AR \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

که در آن A اپراتور خطی است که اثرات تابع وزن دهی و همچنین عبور دهی جوی را برای باندهای طیفی استفاده شده در بردارد. درواقع ماتریس A ماتریسی است که تابش R را به دمای جوی تبدیل می‌کند. نحوه کار این روش به صورت ماتریسی به ترتیب زیر است:

اگر هدف تعیین دما در m سطح از جو با استفاده از تابش در n باند حرارتی باشد، معادلات ماتریس به ترتیب زیر خواهد بود:

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} \quad (\text{رابطه ۱۷})$$

این رابطه به این معنا است که دما در لایه i می‌تواند با استفاده از تابش‌های دریافت شده در n باند حرارتی طبق رابطه زیر محاسبه شود.

$$T_i = a_{i1}R_1 + a_{i2}R_2 + \dots + a_{in}R_n \quad (\text{رابطه ۱۸})$$

اگر بتوان پروفیل‌های دما T و T_0 را از داده‌های رادیوساند هم‌مکان و تابش‌های L و L_0 متناظر با آن‌ها را از اندازه‌گیری‌های ماهواره‌ای جمع‌آوری نمود، ماتریس اپراتور A می‌تواند با استفاده از روش کمترین مربعات محاسبه گردد. مطمئناً این ماتریس ممکن است یک محدوده جغرافیایی به دیگری تغییر نماید. لازم به ذکر است چنین روشی شامل هیچ محاسبه انتقال انرژی نبوده و محاسبات ساده و کارآمد یکی از مزایای چنین روشی است.

الگوریتم محاسبه فشار سطح زمین

در این پژوهش از معادلات جوی هیدرواستاتیک و پروفیل‌های دما و رطوبت که نحوه به دست آوردن آن در بالا ذکر شد به منظور استخراج پروفیل فشار سطح زمین استفاده گردید. معادلات هیدرواستاتیک بر پایه فرض هیدرواستاتیک است. این فرض یکی از فرض‌های اولیه در مدل‌های عددی پیش‌بینی آب‌وهوا است. در این معادلات نیروهای قائم غالب وارد بر بسته هوا تنها شامل نیروی جاذبه و نیروی گرادیان قائم فشار فرض می‌گردد که در حالت تعادل است (Haji gholami et al., 2017) در ادامه این معادلات توزیع داده می‌شود. بر طبق فرض هیدرواستاتیک گرادیان قائم فشار به صورت رابطه (۱۶) است.

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -Pg \quad (\text{رابطه ۱۹})$$

که در این رابطه P چگالی هوا و g شتاب گرانش است. در گازهای موجود در جو به علت فشار پایین و کمتر از یک اتمسفر می‌توان آن‌ها را با دقت خوبی گازهای ایدال فرض کرد (Bani Hashem et al., 1998). با در نظر گرفتن این فرض رابطه بین

چگالی p، فشار P و دمای هوا T به صورت رابطه زیر است.

$$P = p \frac{R}{M} T \quad (\text{رابطه ۲۰})$$

که در رابطه (۱۷) ثابت جهانی گازها و M جرم مولکولی هوا است. از آنجایی که بخار آب تنها گاز موجود در جو است که میزان قابل‌ملاحظه‌ای از نظر حجم تغییر می‌کند، جرم مولکولی هوا ثابت نخواهد بود. برای حل این مشکل در رابطه (۱۸) به جایی دما واقعی هوا از دمای مجازی استفاده می‌کنند (Bani Hashem et al., 1998). دمای مجازی را می‌توان در قالب دمای هوای خشک تعریف کرد که فشار و چگالی کل آن برابر با فشار و چگالی هوای مرطوب بوده که آب دما هوای واقعی به صورت زیر در رابطه است (Bani Hashem et al., 1998).

$$T^* = \frac{T}{1-\frac{3}{5}q} \quad (\text{رابطه ۲۱})$$

در رابطه بالا q رطوبت ویژه است که با استفاده از پروفایل رطوبت به دست می‌آید. با در نظر گرفتن فرض هیدرواستاتیک و قرار دادن آن در رابطه (۲۱)، معادله فرض هیدرواستاتیک به صورت معادله دیفرانسیل زیر درمی‌آید.

$$\frac{dp}{p} = \frac{Mgdz}{RT} \quad (\text{رابطه ۲۲})$$

با حل معادله دیفرانسیل (۲۲) و فرض معلوم بودن فشار سطح زمین (P_0)، پروفیل دما و رطوبت ویژه، معادله فشار به صورت رابطه (۲۳) درمی‌آید

$$P = p_0 e^{-\frac{Mg}{R} \int_{z_0}^z \frac{dz}{T^*}} \quad (\text{رابطه ۲۳})$$

معادله (۲۳) معادله فشار هیدرواستاتیک است. در معادله فشار هیدرواستاتیک، M جرم مولکولی هوای خشک و g شتاب گرانش منطقه است که با تبدیل ارتفاع هندسی به ارتفاع ژئوپتانسیل شتاب گرانش تبدیل به شتاب گرانش استاندارد در سطح متوسط دریا ($g_0 = 9.80665 \text{ m/s}^2$) می‌گردد (Bani Hashem et al., 1998) با توجه به اینکه نزدیک ۹۸ درصد گازهای موجود در جو گازهای ازت و اکسیژن است، تغییرات جرم مولکولی هوای خشک کوچک است. در نتیجه مقدار تغییرات جرم مولکولی هوا در محدوده خطاهای کار این پژوهش قرار گرفته و در این پژوهش جرم مولکولی هوای ثابت و برابر با $28/9$ گرم بر مول در نظر گرفته شد. پروفیل دمای مجازی با استفاده از پروفایل دما و رطوبت توسط رابطه (۱۸) به دست می‌آید. در این پژوهش برای محاسبه عددی انتگرالی موجود در رابطه (۲۲) از روش ذوزنقه‌ای استفاده گردید که معادله عددی فشار به صورت رابطه زیر است.

$$P = p_0 e^{-\frac{Mg}{2R} \sum (\frac{1}{T_j} + \frac{1}{T_{j+1}}) \Delta h_j} \quad (\text{رابطه ۲۴})$$

که با داشتن پروفایل دما و رطوبت و با حل عددی رابطه (۲۴) هر ارتفاعی می‌توان فشار هوا را به دست آورد.

روش محاسبه رطوبت نسبی

در این پژوهش از داده‌های سنجنده MODIS برای محاسبه رطوبت نسبی سطح استان سیستان و بلوچستان بر اساس روابط تجربی (رابطه ۲۵ تا ۲۸) و فاکتورهای: آب قابل بارش، دما نزدیک سطح زمین و فشار سطح زمین، یک روش کارآمد و عملی برای برآورد رطوبت نسبی با استفاده از داده‌های سنجنش‌ازدور است، استفاده گردیده است.

رطوبت نسبی از نسبت فشار جزئی بخار آب (e) در یک دما، به فشار اشباع بخار آب (e_s) در همان دما به صورت رابطه (۲۵) به دست می‌آید. فشار جزئی بخار آب به فشار سطح و رطوبت ویژه بستگی دارد و فشار اشباع بخار آب به دمای هوا بستگی دارد (Peng et al., 2006).

$$RH = \frac{e}{e_s} \times 100 \quad (\text{رابطه } 25)$$

e_s فشار بخار اشباع برحسب میلی بار است و تابعی از دمای هوا است و با رابطه زیر تعریف می‌شود (Mousavi Baigi and Ashraf., 2001).

(رابطه ۲۶)

$$e_s = 33.8639[(0.00738 \bar{T} + 0.8072)^8 - 0/000019(1.8 \bar{T} + 48) + 0.0001316]$$

در این رابطه \bar{T} دمای متوسط هوا برحسب درجه سانتی

گراد است.

فشار جزئی بخار آب (e) به فشار سطح زمین P_a و رطوبت ویژه بستگی دارد که با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$e = Q \times P_a / 0.622 \quad (\text{رابطه } 27)$$

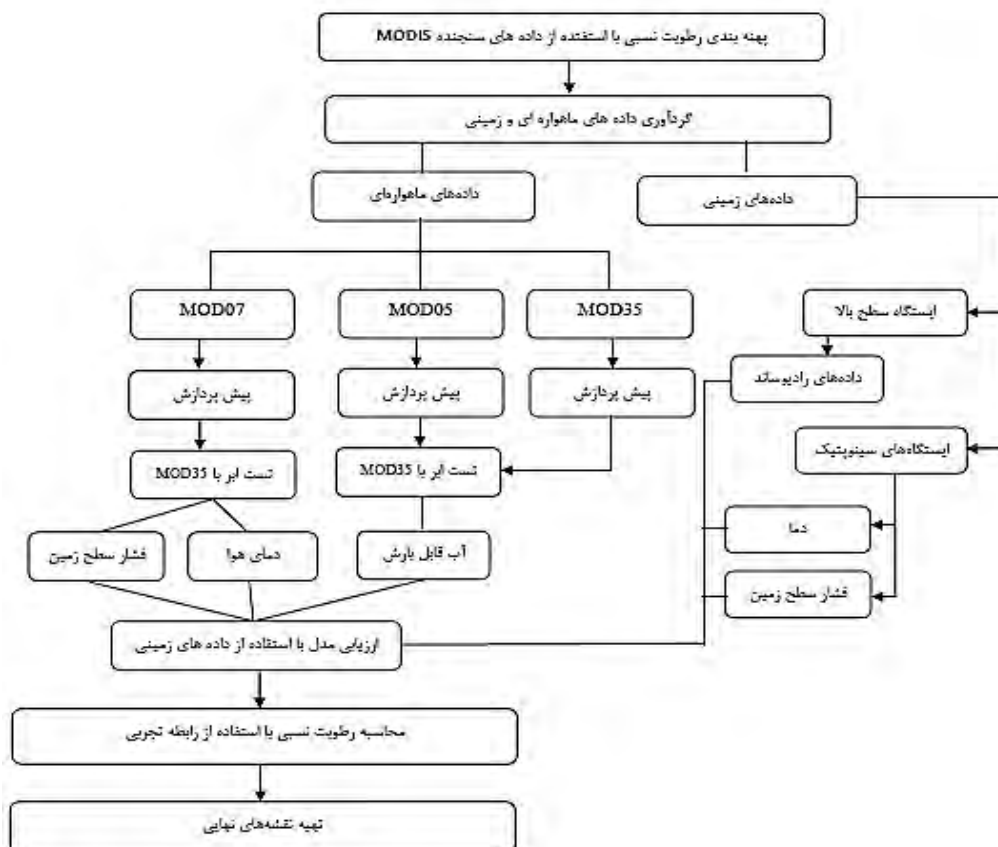
که در آن ۰/۶۲۲ نسبت وزن مول بخار آب در هوای خشک است.

در این پژوهش از آب قابل بارش کلی (TPW) و رطوبت ویژه ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه، برای یافتن رابطه رگرسیونی پلی نومینال بین آن‌ها استفاده شده و با استفاده از ایستگاه‌های ارزیابی، بهترین ضرایب این رابطه برای استان سیستان و بلوچستان به دست آمده است. رابطه پلی نومینال بین فرآورده آب قابل بارش کلی (TPW) و رطوبت ویژه به صورت زیر است.

(رابطه ۲۸)

$$Q = 0.021 \times (-0.0745 \times TPW^2 + 1.753 \times TPW + 12.405) \times 0.1$$

حال با استفاده از توان‌ها و ضرایب به دست آمده و فرآورده آب قابل بارش کلی می‌توان رطوبت ویژه (Q) برای تمام پیکسل‌ها محاسبه نمود. سپس با استفاده از رطوبت ویژه محاسباتی، فرآورده‌های فشار سطح MODIS و رابطه ۱، فشار جزئی بخار آب با قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومتر در ۱ کیلومتر به روش سنجنش‌ازدور قابل محاسبه است.



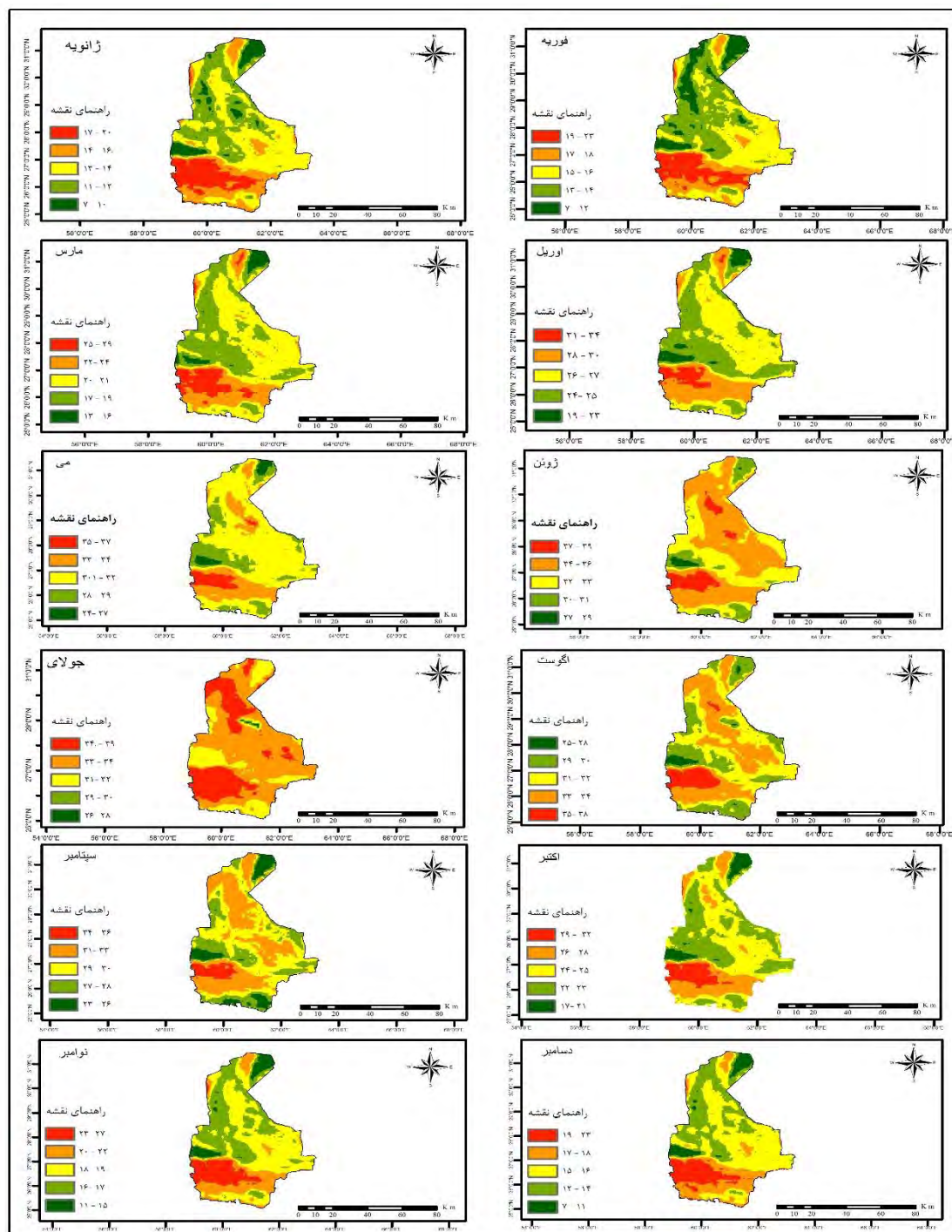
شکل ۲- فرایند پژوهش جهت پهنه‌بندی رطوبت نسبی استان سیستان بلوچستان با استفاده از سنجنده MODIS

نتایج و بحث

تخمین دمای جوی

به منظور تخمین رطوبت نسبی باید ابتدا دمای هوا را برآورد کرد. به منظور پیاده سازی مدل (الگوریتمی که در بالا اشاره شد) ابتدا پیش پردازش های هندسی و رادیو متری بر روی تصاویر MOD07 MODIS صورت گرفت. همچنین به منظور اطمینان از عاری بودن

تصاویر از ابر، آزمون ابر با MOD35 صورت گرفت و پیکسل های بدون ابر با درجه اطمینان بیش از ۹۵ درصد انتخاب شد و برای هر پیکسل تصویر، میانگین پنجره ۵ در ۵ به مرکزیت پیکسل مورد بررسی، محاسبه شد. برای اطمینان از درستی برآورد دما، میانگین داده های دمای ایستگاه های هواشناسی پراکنده در سطح استان در بازه ۱۰ ساله از ۱ ژانویه ۲۰۰۹ تا ۳۱ دسامبر ۲۰۱۸ مورد ارزیابی قرار گرفت.



شکل ۳- نقشه پهنه بندی میانگین دمای استان سیستان بلوچستان (ژانویه ۲۰۰۹ تا ۳۱ دسامبر ۲۰۱۸) با استفاده از الگوریتم سنجنده MODIS

آن با استفاده از داده‌های رادیوساند ایستگاه زاهدان در بازه ۱۰ ساله که با تصاویر ماهواره‌ای یکسان است، تغییرات مکانی و نیز مقادیر آماری بخار آب اتمسفر (TPW) برای پیکسل به پیکسل استان سیستان و بلوچستان را برای بازه ۱۰ ساله به دست آورده شد. در ارزیابی مدل، مقدار ضرایب تعیین R^2 و RMSE به ترتیب $0/878$ و $2/702$ میلی‌متر محاسبه شدند. شکل (۴) نقشه پهنه بندی بخار آب قابل بارش محصول مادون قرمز نزدیک MODIS MOD05 در دوازده ماه سال را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل (۴) نشان می‌دهد مقدار TPW در سواحل بیشترین مقدار را دارد. بیشترین مقدار TPW در ماه جولای با $49/12$ میلی‌متر در کنار سواحل مکران و کمترین آن در ماه ژانویه با $8/58$ میلی‌متر در منطقه کوهستانی قرار دارد. با توجه به نقشه‌های به‌دست‌آمده مقدار TPW در طول سال از نواحی ساحلی به سمت شمال و در درون فلات کاهش می‌یابد که این امر بیانگر تأثیر ورود بخار آب از سمت جنوب یعنی دریای عمان و اقیانوس هند به این استان است. همچنین مقدار TPW در فصل زمستان در عرض جغرافیایی 25 تا 27 درجه از غرب به شرق کاهش پیدا می‌کند که علت آن را می‌توان کاهش اثر جریان‌های غربی و سیستم‌های آن به‌طرف شرق استان دانست. از عرض 27 درجه به بالا در این استان به علت کوهستانی بودن و شرایط باد پناهی که کوه‌های زاگرس به وجود می‌آورند در تمام طول سال کمتر از 10 میلی‌متر است و تنها در طول تابستان آن هم به علت گرم شدن هوا و افزایش گنجایش بخار آب مقدار TPW به 11 میلی‌متر می‌رسد. در نهایت می‌توان این‌گونه بیان کرد توزیع فضایی آب قابل بارش در استان در فصل گرم حساسیت بالاتری به دوری و نزدیکی به پهنه‌های آبی دارد و توزیع آب قابل بارش همگون‌تر است ولی در فصل سرد به‌علت ورود سیستم‌های بادهای غربی به استان این همگنی به‌هم‌خورده و توزیع آن از غرب به شرق کاهش پیدا می‌کند.

فشار سطح زمین

در این پژوهش نتایج به‌دست‌آمده (فشار سطح زمین) از مدل هیدرو استاتیک همخوانی خوبی با داده‌های فشار ثبت‌شده در ایستگاه‌های زمینی دارد که نشانگر کارایی این مدل در استخراج فشار سطح زمین از پروفیل‌های دما و رطوبت ماهواره‌ای در شرایط جوی مختلف دارد. فشار سطحی استخراج‌شده با استفاده از پروفایل‌های دما و رطوبت الگوریتم MODIS به ترتیب دارای RMSE متوسط $1/8$ و $R2$ متوسط $0/9$ هکتوپاسکال است. شکل (۵) نقشه پهنه‌بندی فشار سطح زمین با الگوریتم MOD07 MODIS و جوی هیدرو استاتیک را برای دوازده ماه سال نمایش

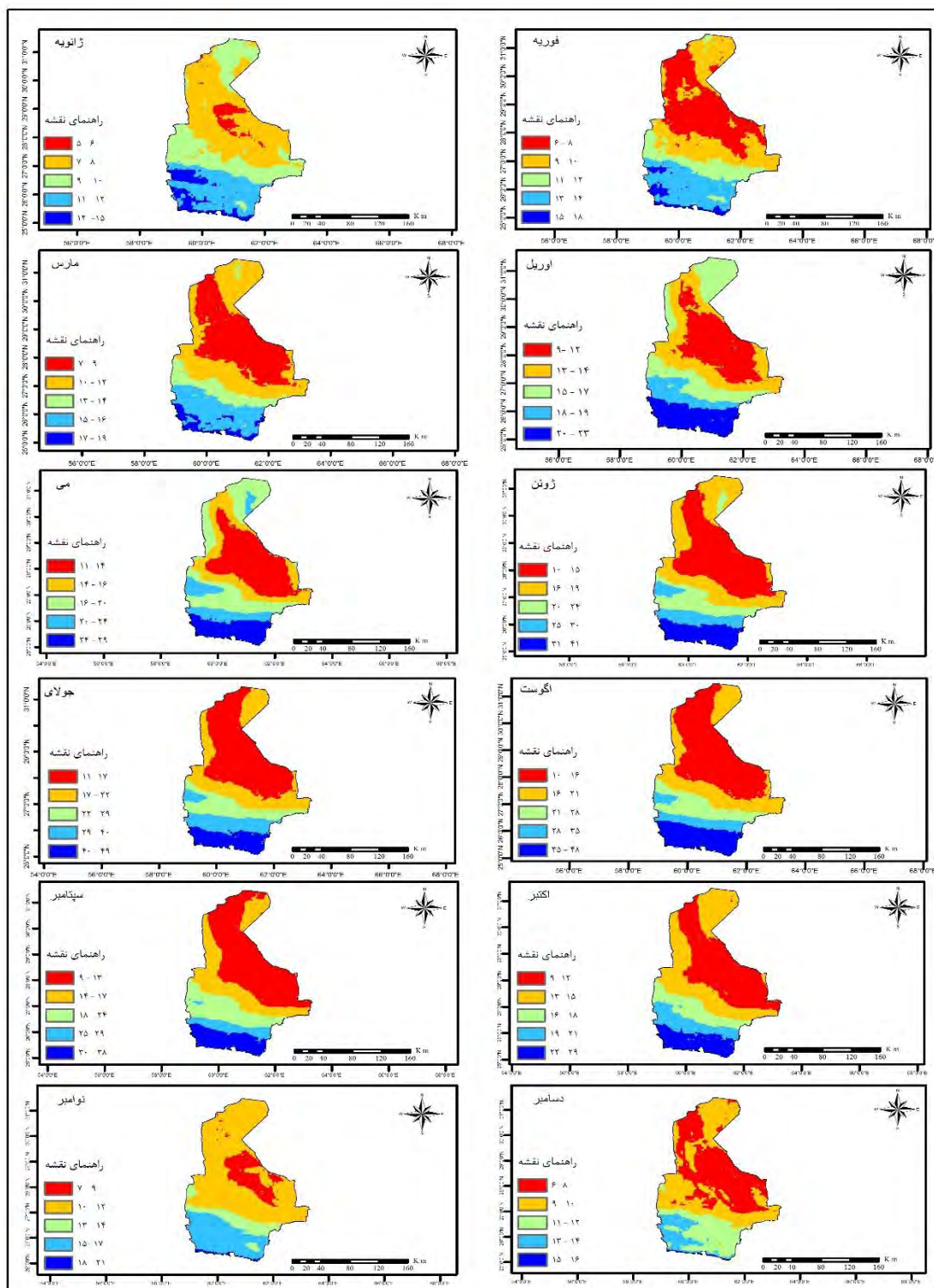
نتایج ارزیابی، ضریب تعیین R^2 برابر با $0/992$ و RMSE را برابر با $3/172$ نشان می‌دهد. در نهایت بعد از اطمینان از نتایج برآورد دما نقشه‌های پهنه‌بندی دما برای کل استان سیستان و بلوچستان تهیه گردید. با توجه به نقشه‌های تهیه‌شده (شکل ۳) تفاوت مکانی دما در استان سیستان و بلوچستان بسیار چشمگیر است. دمای حداقل ثبت‌شده توسط سنجنده MODIS نشان می‌دهد که از شمال به جنوب از حداقل دما کاسته می‌شود و در فصل سرد سال (ژانویه، فوریه و مارس) ریزش هوای سرد سبیری به‌سوی شمال شرق کشور تا نواحی شرقی استان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. یخبندان در محدوده استان به‌ندرت رخ می‌دهد ولی به دلیل کوهستانی بودن قسمتی از استان و ریزش هوای سرد سبیری، احتمال بروز آن در برخی از روزها وجود دارد. در فصل سرد استان سیستان و بلوچستان کمتر تحت تأثیر بادهای غربی و سیستم ناشی از آن قرار دارد. به همین دلیل در فصل بهار، جزء اولین مناطقی هستند که کم‌کم تحت تأثیر پرفشار حرارتی قرار می‌گیرد، به‌طوری‌که در ماه آخر فصل بهار (ژوئن) این استان به‌طور کامل تحت تسلط پرفشار جنب‌حاره‌ای قرار دارد اما نکته قابل توجه این است که پرفشار جنب‌حاره‌ای حالت اریب است که این امر باعث تأثیر جریان مانسون در جنوب استان در فصل تابستان می‌شود. تأثیر مانسون از شرق به غرب و از جنوب به سمت شمال کاهش می‌یابد. در فصل گرما مناطق ساحلی و نواحی پیرامونی آن تا فاصله 100 کیلومتری از خط ساحل تحت تأثیر رطوبت دریا قرار دارد و با تأثیر مانسون در جنوب شرق استان باعث کاهش دما سواحل و جنوب شرقی استان نسبت به عرض‌های بالاتر می‌شود. با پیشروی به سمت شمال استان تغییرات دما هم در فصل گرم وهم سرد مشاهده می‌شود. علت این پدیده را می‌توان این‌گونه بیان داشت که حرکت به سمت شمال استان از تأثیر دریا و از شدت تأثیر مانسون کاسته می‌شود و روند رژیم حرارتی مشابه دشت و کوهستان فلات مرکزی ایران است. از دیگر عواملی که پارامتر دما را تحت تأثیر قرار می‌دهد عامل ارتفاعات است. به‌طوری‌که قسمت‌های شرقی استان (کوه‌های تفتان) و مرکز استان (بزمان و بشاگرد) از دمای کمتری نسبت به غرب استان که ارتفاعات کمتری دارد برخوردار است.

محاسبه آب قابل بارش

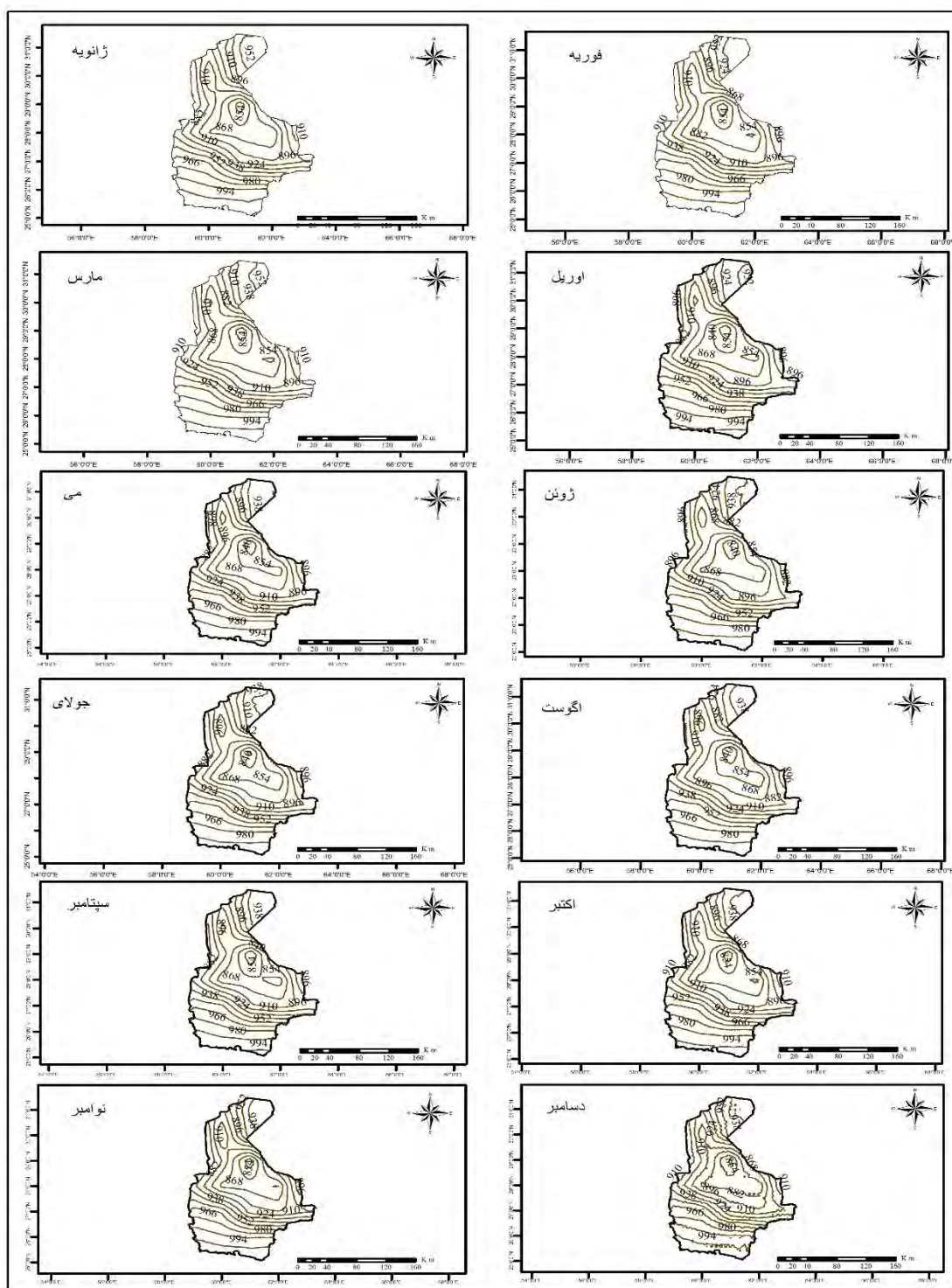
محاسبه دقیق آب قابل بارش کلی (TPW) مستلزم آگاهی دقیق از حجم بخار آب در جوی است (Alizadeh., 2015) در این پژوهش جهت برآورد میزان بخار اتمسفر با استفاده از تکنیک‌های سنجش‌از‌دور از الگوریتم مادون‌قرمز نزدیک حرارتی (که قبلاً توضیحات آن داده‌شده است) استفاده شد. سپس باعتبار سنجی

به‌طور میانگین (۸۴۵ هکتوپاسکال) و سواحل دریا مکران نواحی پرفشار هستند تا جایی که ما در سواحل فشار ۹۹۰ هکتوپاسال را نیز داریم.

می‌دهد. از نقشه‌های به‌دست‌آمده در این پخش پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که فشار سطح زمین رابطه بسیار نزدیکی با ارتفاع و دما دارند. همان‌طور که نقشه‌ها بیانگر آن هستند در طول سال ارتفاعات استان (کوه تفتان) در نزدیکی زاهدان مراکز کم‌فشار



شکل ۴- نقشه پهنه‌بندی آب قابل بارش در استان سیستان و بلوچستان (۱ ژانویه ۲۰۰۹ تا ۳۱ دسامبر ۲۰۱۸) با استفاده از الگوریتم سنجنده MODIS



شکل ۵- نقشه فشار سطح زمین در استان سیستان و بلوچستان (۱ ژانویه ۲۰۰۹ تا ۳۱ دسامبر ۲۰۱۸) با استفاده از الگوریتم سنجنده MODIS

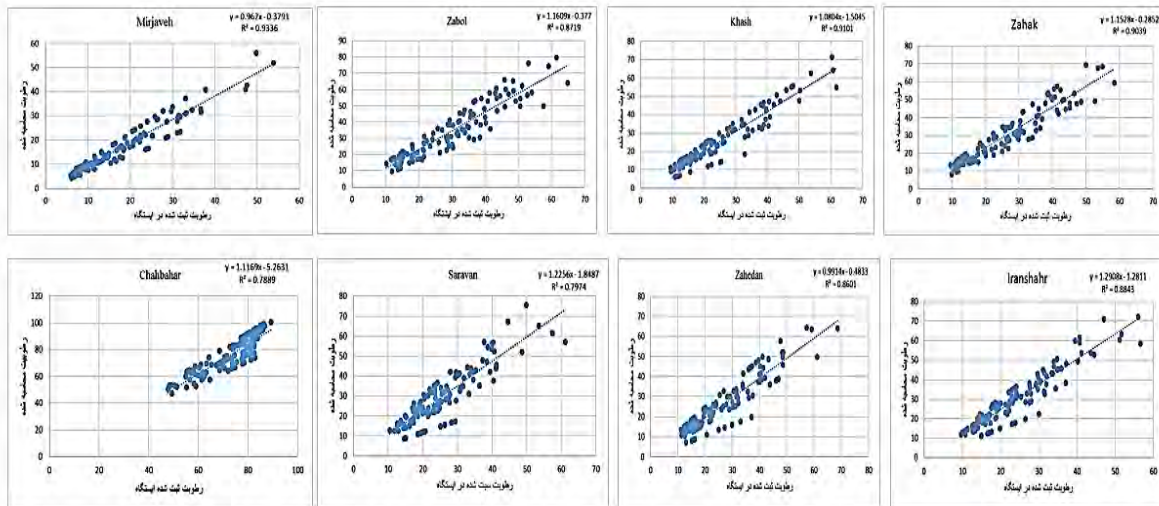
محاسبه رطوبت نسبی

سنجش‌ازدور و ثبت‌شده توسط ایستگاه‌های زمینی تطابق خوبی باهم دارند؛ بنابراین می‌توان با داده‌های به‌دست‌آمده از سنجش‌ازدور به پهنه‌بندی استان سیستان و بلوچستان از نظر رطوبت نسبی پرداخت. همان‌طور که (نقشه شماره ۷) مشاهده می‌شود، توزیع مکانی رطوبت نسبی در نیمه جنوبی استان در طول سال بیشتر از شمال است که علت آن ورود رطوبت از دریای

در این پژوهش به‌منظور ارزیابی مقادیر رطوبت نسبی حاصل از روابط بالا در برابر مقادیر استخراج‌شده از داده‌های هشت ایستگاه سینوپتیک (ایران‌شهر، زابل، زاهدان، سراوان، چابهار، خاش، میرجاوه، زهک) استفاده‌شده است. همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود مقادیر رطوبت نسبی به‌دست‌آمده از

یک منطقه بسیار خشک و بیشترین رطوبت نسبی با ۸۴ درصد در منطقه چابهار که معرف یک منطقه ساحلی است، ثبت شده است.

عمان و اقیانوس هند از سمت جنوب استان است. کمترین رطوبت نسبی با ۵ درصد در ماه جولای در منطقه زاهدان و زابل که معرف



شکل ۶- نتایج ارزیابی مقادیر رطوبت نسبی در هشت ایستگاه سینوپتیک در برابر رطوبت نسبی محاسبه شده با استفاده از سنجنده MODIS

مناطق زیاد بوده در نتیجه دما این مناطق افزایش می یابد که در نقشه دما نزدیک سطح (نقشه شماره ۳) به خوبی قابل مشاهده است؛ از آنجایی که رطوبت نسبی با دما رابطه معکوسی دارد با افزایش دما رطوبت نسبی کاهش می یابد که کمترین رطوبت نسبی را می توان در این مناطق (خاش، میر جاوه، سراوان، زاهدان و زابل) مشاهده کرد. با گذر فصل گرم به سوی فصل سرد (ژانویه، فوریه و مارس) با پیشروی بادهای غربی سیستم پرفشار جنب حاره ای آזור از عرض های ۴۰ درجه شمالی به سوی عرض های پایین جغرافیایی نفوذ نموده و بر روی بحرین و بالای خلیج فارس قرار می گیرد. با خارج شدن سیستم پرفشار از استان سیستم های که از جنوب غرب و یا غرب وارد می شوند پس از عبور از مرکز عربستان سعودی و با گذر از روی خلیج فارس و جذب رطوبت به سوی بندرعباس، جاسک، کنارک و چابهار منتقل شده و این مناطق را تحت تأثیر قرار می دهد. همان طور که نقشه (شکل ۷) برای ماه های (ژانویه، فوریه و مارس) نشان می دهد بیشتر رطوبت نسبی ثبت شده در قسمت جنوب غرب استان است که این نشان دهنده تأثیر بادهای غربی و کاهش قدرت سیستم مانسون در فصل زمستان است.

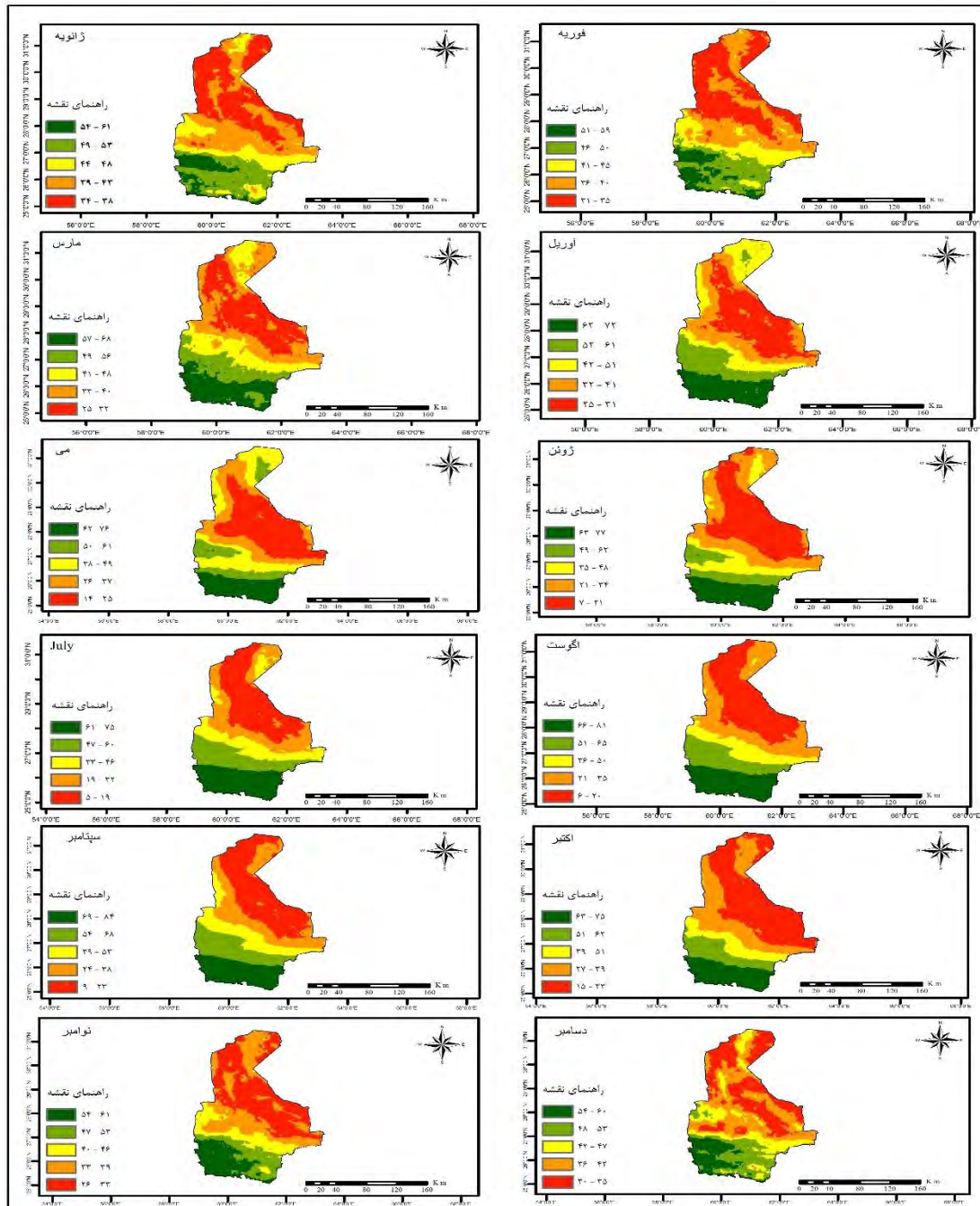
در عرض های بالای استان (بالای ۲۷ درجه) به علت قرارگیری این قسمت در حالت باد پناهی از رطوبت بالای برخوردار نیست ولی شرایط نسبت به فصل گرم بهتر است (حداقل رطوبت نسبی ۳۰ درصد) که این به علت کاهش درجه دما و کاهش گنجایش هوا و نزدیک شدن هوا به نقطه شبنم است. در فصل پاییز نحوه پراکندگی رطوبت نسبی شرایط گذر از فصل گرم

توزیع فصلی رطوبت نسبی در استان بیانگر آن است که در فصل گرم (بهار و تابستان) به علت گرم بودن سطح زمین (نقشه شماره ۲) در داخل استان مراکز کم فشاری تشکیل می شود که این امر باعث ایجاد جریان های جنوبی و جنوب شرقی می شود که عامل انتقال هوای مرطوب به سوی سواحل استان می شود که از منطقه چابهار و کنارک تا نیک شهر را تحت تأثیر قرار می دهد همچنین در این فصل همان گونه که در بخش آب قابل بارش کلی توزیع داده شد (نقشه شماره ۳) به علت مورب بودن پرفشار جنب حاره آזור استان در تابستان تحت تأثیر جبهه مانسون قرار گیرید که سبب افزایش رطوبت در جنوب استان می گردد که منشأ آن توده هوای حاره ای و جنب حاره ای است از طرف دیگر جریان پادساعت گرد در این سامانه رطوبت دریای عمان را به درون خشکی می راند و باعث افزایش رطوبت و شرایط شرعی در کرانه های جنوبی استان می گردد. با افزایش عرض جغرافیایی از رطوبت نسبی کاسته می شود که این امر خود به دو دلیل است.

۱- با حرکت به سمت شمال این مناطق از رطوبت آب های دریای عمان و اقیانوس هند محروم می شوند و این دو منبع عظیم رطوبت از عرض ۲۷ درجه به بالا تأثیر چندانی ندارند و در داخل استان نیز منبع رطوبتی (رودخانه و دریاچه) جهت تأمین رطوبت وجود ندارد و از طرف دیگر با حاکم بودن پرفشار جنب حاره ای آזור در فصل گرم هیچ سیستم نمی تواند رطوبت را وارد مناطق شمالی استان کند. ۲- مناطق کوهستانی استان: وجود کوه های بلند در ارتفاعات میانی (بزمان و بشاگرد) و شرقی (تفتان) که به سبب آسمانی صاف و کاهش ضخامت جو انرژی دریافتی این

تنها سواحل دریا رطوبت نسبی بالای ۵۰ درصد دارد و بیشتر رطوبت نسبی در جنوب غرب استان و جای که سیستم‌های بادهای غربی می‌توانند در آنجا نفوذ کرده و رطوبت خلیج فارس را به آنجا انتقال دهند رطوبت بالای مشاهده می‌شود.

به فصل سرد است به صورتی که در ماه اکتبر شرایط مانند فصل گرم است و با دور شدن از سواحل رطوبت نسبی کاسته می‌شود. در ماه‌های نوامبر و دسامبر با کاهش قدرت سیستم مانسون رطوبت نسبی جنوب شرق استان کاهش پیدا می‌کند به طوری که



شکل ۷- نقشه میانگین رطوبت نسبی در استان سیستان و بلوچستان (ژانویه ۲۰۰۹ تا ۳۱ دسامبر ۲۰۱۸) با استفاده از روابط تجربی

زمین توسط (Haji gholami., 2017) در منطقه جنوب شرق ایران مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه بیانگر آن است که با توجه به زمان گذر ماهواره (۹ تا ۱۱ صبح) از روی استان هیچ

نتیجه‌گیری در این مطالعه الگوریتم‌های توسعه داده‌شده برآورد بخار آب قابل بارش و دمای هوا توسط (Rahimzadegan., 2013) و فشار سطح

زمانی دما در مناطق مختلف استان زیر ۱۳ درجه سانتی‌گراد ثبت نشده و دمای هوا در برخی از روزهای جولای و آگوست بالای ۴۰ درجه سانتی‌گراد توسط سنجنده MODIS ثبت شده است و نتایج ارزیابی توسط ضریب تعیین R^2 و RMSE به ترتیب ۰/۹۹۲ و ۱/۱۷۲ است. مقدار آب قابل بارش TPW ثبت شده توسط سنجنده MODIS بیانگر آن است که این پارامتر با دوری و نزدیکی و توده‌های هوای ورودی به استان همبستگی بالایی دارد. بیشترین مقدار TPW در ماه جولای با ۴۹/۱۲ میلی‌متر در کنار سواحل مکران و کمترین آن در ماه ژانویه با ۸/۵۸ میلی‌متر در شرق و شمال استان در مناطق کوهستانی قرار دارد. در ارزیابی مدل، مقدار ضرایب تعیین R^2 و RMSE ۰/۸۷۲ و ۲/۷۰۲ میلی‌متر محاسبه شدند. فشار سطحی استان با توجه به نقشه‌های فشار سطح زمین (شکل ۵) با عامل ارتفاع همبستگی بالایی دارد و با افزایش ارتفاع از فشار سطح کاسته می‌شود که کمترین فشار ثبت شده ۸۴۵ هکتوپاسکال در ماه ژوئن در ارتفاعات تفتان توسط سنجنده MODIS ثبت شده و مقدار ضرایب تعیین R^2 ۰/۸۷۲ و

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Alijani, B. (2008) *Iran's Weather* (8th Ed). Tehran. Payam Noor University. (In Farsi)
- Alizadeh, A. (2015) *Principles of Applied Hydrology* (40th Ed). Imam Reza University Press. (In Farsi)
- Bayat A., Mashhadizadeh Maleki S. (2019) Analysis of temporal and spatial correlation between perceptible water vapor retrievals from AIRS satellite sensor and 29 synoptic station measurements in Iran. *Researches in Geographical Sciences*, 19 (53), 19-32. (In Farsi)
- Haji gholami, H., Mobasheri M R., Rahimzadegan M. (2017) Producing atmospheric pressure profile based on Hydrostatic hypothesis and using MODIS thermal images. *Journal of researches in Geographical Sciences*, 4 (4), 21-32. (In Farsi)
- Bani Hashem, T., Hajbi, B., Behroozian, A.R. (1998) *General Meteorology*, Universit Publishing Center. (In Farsi)
- Hayden, C. M. (1988) GOES-VAS simultaneous temperature-moisture retrieval algorithm. Review of. *Journal of Applied Meteorology*, 27, 705-733.
- Ji, D., Shi, J. (2014) Water vapor retrieval over cloud cover area on land using AMSR-E and MODIS. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(7), 3105-3116.
- Kaufman, Y. J., Gao, B. C. (1992) Remote sensing of water vapor in the near IR from EOS/MODIS, *IEEE Transaction on Geosciences and Remote Sensing*, 30, 871-884.
- King, M. D., Kaufman, Y. J., Menzel, W. P., Tanre, D. (1992) Remote sensing of cloud, aerosol, and water vapor properties from the Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS). *Review of IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30 (1), 2-27.
- Li, J., (1994) Temperature and water vapor weighting functions from radiative transfer equation with surface emissivity and solar reflectivity. Review of. *Advances in Atmospheric Sciences*, 11 (4), 421-426.
- Maghrabi, A., Al Dajani, H. (2013) Estimation of precipitable water vapour using vapour pressure and air temperature in an arid region in central Saudi Arabia. *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences*, 14(1), 1-8.
- Mather, P.M. (1999) *Computer Processing of Remotely Sensed Images*. 2nd Edition, John Wiley & Sons
- Merrikhpour, M.h., Rahimzadegan, M. (2019) Evaluation and Comparison of the Of the MODIS and AMSR2 Total Precipitable Water Vapor Algorithm Over Lands in the Western Part of IRAN. *Journal of Iran-Water Resources Research*, 14 (5), 327.-338. (In Farsi)
- Mousavi Baigi, M., Ashraf, B. (2011) *Weateher & Climate in Agriculture*, Ferdowsi University of Mashhad Pres. (In Farsi)
- NASA Website. (2016). Available at: <https://ladsweb.nascom.nasa.gov>.
- NASA Website. (2019). Available at: <http://modis.gsfc.nasa.gov/about>.
- Nilsson, G., Gradinarsky, L. (2006) Water Vapor Tomography Using GPS Phase Observations: Simulation Results, *Ieee Transactions On Geoscimnce And Remote Sensing*, 44, 2927-2941.
- Peng, G., Li, J., Chen, Y., Norizan, A. P., & Tay, L (2006) High-resolution surface relative humidity computation using MODIS image in Peninsular Malaysia. *Chinese Geographical Science*, 16(3).

- 260-264.
- Pour Bagher, S. M., Askari, Q., Momenzadeh, H., Manzl, P (2009) Radio Rainwater Calculation Using MODIS Satellite Data in Joe Gorganrood, *Journal of Water Science Research*,(1) 55-49. (In Farsi)
- Rahimzadegan, M. (2013) Improvement of algorithms for extraction of local atmospheric temperature and moisture profiles using MODIS images, Ph. D. dissertation, K.N. Toosi University of Technology. (In Farsi)
- Rahimzadegan, M., Mobasheri. M.R. (2013) Preparation of atmospheric temperature and humidity isopleths maps using thermal bands of MODIS satellite images. *Journal of the Earth and Space Physics*, 39 (3), 159-176. (In Farsi)
- Seemann, S. W., Borbas, E. E., Li, J., Menzel, W. P., Gumley, L. E. (2006) MODIS *Atmospheric Profile Retrieval Algorithm Theoretical Basis Document* (version 6). University of Wisconsin-Madison.
- Smith, W. L., Woolf, H. M., Revercomb, H. E. (1991) Linear simultaneous solution for temperature and absorbing constituent profiles from radiance spectra. *Review of Applied optics*. 30 (9), 1117-1123.
- Zhou, F.-C. (2016) An Algorithm for Retrieving Precipitable Water Vapor over Land Based on Passive Microwave Satellite Data. *Advances in Meteorology*.