

اعتبارسنجی تولیدات سنجش از دوری تبخیر و تعرق پتانسیل سنجنده مادیس ماهواره ترا با روش های تجربی برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل برای مناطق کوهستانی ایران (مطالعه موردي: استان کردستان)

هیرش سليم پور^۱، محمود خسروی^۲، پیمان محمودی^{۳*}

۱- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
heresh.salimpour@gmail.com

۲- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
khosravi@gep.usb.ac.ir

۳- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
p_mahmoudi@gep.usb.ac.ir

چکیده

هدف از این پژوهش اعتبارسنجی تولیدات سنجش از دوری تبخیر و تعرق پتانسیل سنجنده مادیس ماهواره ترا در مقایسه با روش های تجربی در مناطق کوهستانی می باشد . برای رسیدن به این هدف ۴۷ تصویر از محصولات تبخیر و تعرق سنجنده مادیس ماهواره ترا در یک مقیاس زمانی ۸ روزه به نام (MOD16A2) از وبگاه سازمان زمین شناسی ایالات متحده (USGS) برای سال ۲۰۰۸ برای محدوده جغرافیایی استان کردستان دانلود شدند . همچنین داده های روزانه دمای حداقل و حداکثر، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی ۸ ایستگاه همدید استان کردستان برای همان سال ۲۰۰۸ میلادی از اداره کل هواشناسی استان کردستان اخذ و سپس با استفاده از معادله پنمن-مانتیث-فائقه مقدار روزانه تبخیر- تعرق پتانسیل برای تمامی ایستگاه های مورد مطالعه محاسبه شدند . از روی مقدار روزانه نیز مجموع مقدار ۸ روزه آنها به دست آمد. نتایج نشان دادند که میزان برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل تجربی همواره کمتر از میزان برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل ماهواره ای می باشد. در ماه های گرم سال به خصوص در فصل تابستان بین مقدار برآورده شده تجربی و ماهواره ای، فاصله به بیشترین مقدار خود می رسد . به طوریکه در دو ایستگاه مریوان و سقز این فاصله به حداقل خود می رسد.

واژه های کلیدی: تبخیر و تعرق، سنجنده مادیس، ضریب همبستگی پیرسون، پنمن-مانتیث-فائقه



١ - مقدمه

انتقال آب از سطح خاک به هوا را تبخیر و خارج شدن آن از روزنه برگ گله ان را تعرق می‌گویند. تبخیر و تعرق یکی از بخش‌های مهم چرخه آب است و تخمین دقیق آن جهت برآورد بعلان آبی، طراحی سیستم‌های آبیاری و مدیریت منابع آب بسیار مورد رکذ است (Linsly, 1982). برداشت آب از منابع آبی موجود در سرتاسر جهان دارای محدودیت‌های زیادی است. با نگاهی به آمار و ارقام منتشر شده مشاهده می‌شود که بیش از دو میلیارد نفر در سرتاسر جهان به سبب توزع ناعادلانه منابع آبی، در مناطق کم آب می‌توانند از نظر آب زندگی می‌کنند (Oki and Kanae, 2006). بسیاری از بیشترینها حاکی از آن است که بیش از ۵۹ درصد از مردم جهان تا سال ۲۰۵۸ کمبود آب را تجربه خواهد کرد (Rockstrom et al., 2009). در بسیاری از مناطق ایان نیز حقیقت در مناطق توسعه ظرفی شهری هم کمبود آب آشامیدری سالم بسیار محسوس است، از این رو در چنین مناطقی، یک ارزشی صحیح از توزع و میزان تقاضای آب می‌تواند در راستای بهبود مدیریت و اجتناب از کمبود آب بسیار تعیین کننده باشد (Maeda et al., 2010). بطور کلی ۷۰ درصد از برداشت‌های آب شرکتی صرف مصارف کشاورزی می‌شود (FAO, 2005). در بیشتر مناطق ایان، کشاورزی در کنار صنعت یکی از مهمترین فعالیت‌های اقتصادی به شمار می‌آید. در مناطق گرم و خشک جنوب، غرب و شمال شرق ایران، کشاورزی از رونق خاصی برخوردار است. اما با این تفاصیل، کمبود آب حقیقت برای مصارف خانگی هم در این مناطق قابل لمس است. بنابراین مدیریت منابع آب برای مصارف کشاورزی و تعیین صحیح و دقیق آب مورد رکذ برای اعیان منظور، دارای ارزش حقیقت است. یکی از رکذمندی‌های برخی از براورد مقدار آب مورد رکذ محصولات کشاورزی دانستن روابط بین شرایط آب و هوایی و تبخیر و تعرق است (Maeda et al., 2010). همانطور که پیشتر بدان اشاره شده است تبخیر و تعرق یکی از پارامترهای مهم چرخه آب می‌باشد و به طور متوسط حدود ۶۴ درصد بارش سالانه زمین در اثر فراتر از تبخیر و تعرق به اتمسفر بر می‌گردد (Nikam et al., 2014). لذا برآورد دقیق آن در بسیاری از مطالعات همچون مطالعات تبخیر اقلیم جهانی، تکامل محیطی و کنترل منابع آب نقش مهمی بازی می‌کند (Liu et al., 2010). معمولاً برای اندازه گیری مستقیم مقدار تبخیر و تعرق از لا بیمهتر استفاده می‌شود، با این حال اندازه گیری آن بسیار پرهزینه و رکذمند صرف وقت زیادی است. از این رو غالباً روش‌های غیر مستقیم برای برآورد تبخیر و تعرق مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش‌های غیر مستقیم طیف وسیعی از مدل‌های ساده تجربی تا روش‌های پیچیده ترکیبی را که بر قوانین فیزیکی استوار است را شامل می‌شود (معصوم پور سماکوش و همکاران، ۱۳۹۳؛ اسماعیل پور و دین پژوه، ۱۳۹۱؛ قمرنیا و همکاران، ۱۳۹۰). در روش‌های غیر مستقیم مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل گله مرجع تخمین زده می‌شود و با استفاده از آن، نظر آبی گله مورد نظر محاسبه می‌شود (هاشمی نسب خبیصی و همکاران، ۱۳۹۶؛ خوشحال و همکاران، ۱۳۹۴؛ طالی و همکاران، ۱۳۸۹) سازمان خوار و بار جهانی، فائز، معادله پنمن-مانتیس-فائز را به عنوان روشی استاندارد جهت تعیین تبخیر و تعرق توصیع نموده‌اند (Wegehenkel and Gerke, 2013؛ Benli et al., 2006). بختیاری و همکاران (۱۳۹۲) در یک مطالعه تطبیقی، مقادیر تبخیر و تعرق به دست آمده از شش مدل تجربی را داده‌های یک لایسنس‌تر و زیری در یکی از مناطق ریشه خشک استان کرمان با یکدیگر مقایسه نمودند. نتایج کار این محققین نشان داد که از بین شش مدل تجربی منتخب، مدل تجربی فائز ۲۴ نتایج بسیار دقیق‌تری را با داده‌های لایسنس‌تر وزنی در اختیار قرار می‌دهد. عابدی کوپایی و همکاران (۱۳۸۷) نیز در یک مطالعه تطبیقی سه روش تجربی پنمن - مانتیس - فائز، هارگریوز و همچنین داده‌های به دست آمده از تشت تبخیر را با داده‌های لایسنس‌تر نصب شده در ایستگاه تحقیقاتی ترک، هارگریوز و نتیجه گرفتند که روش پنمن - مانتیس - فائز از دقت بیشتری نسبت به دیگر روش‌ها برخوردار است. کبوتر آباد مقایسه و نتیجه گرفتند که روش پنمن - مانتیس - فائز از دقت بیشتری نسبت به دیگر روش‌ها برخوردار است. نکو آمال کرمانی و میرعباسی نجف آبادی (۱۳۹۵) با توسعه یک مدل سیستم استنتاج فازی-عصبی (ANFIS)، مقدار تبخیر و تعرق گیاه مرجع چمن را برای اقلیم نیمه خشک ساحلی هرمزگان پیش‌بینی نمودند.

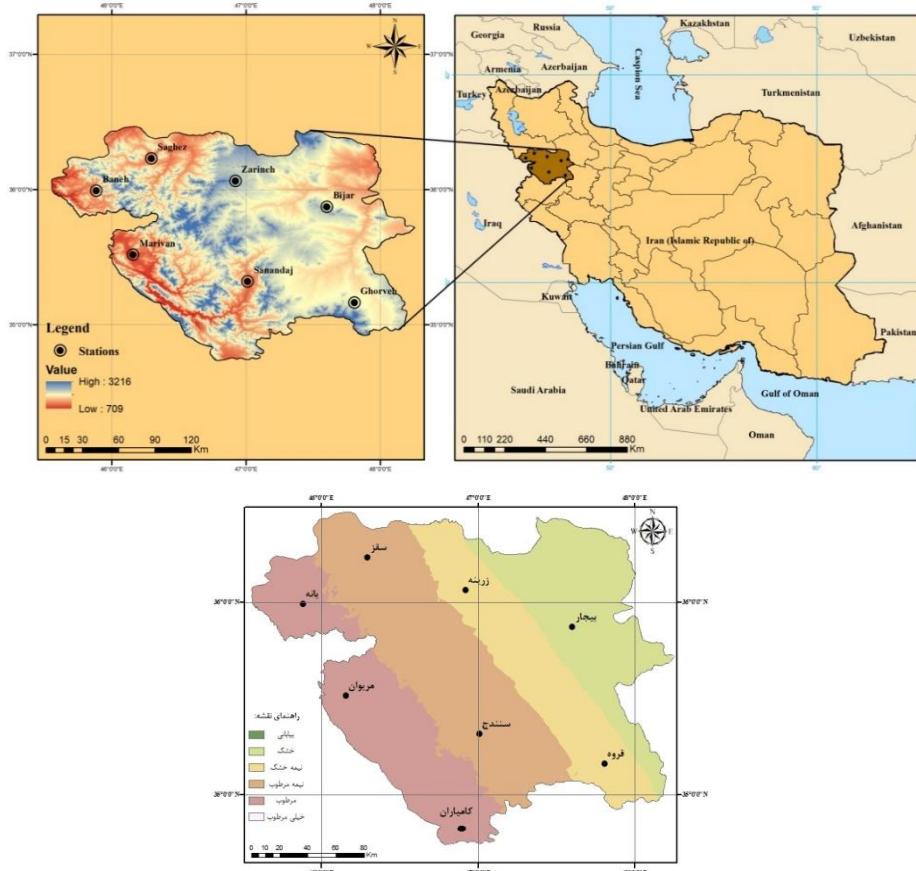
اما امروزه جدای از روش های تجربی برآورد تبخیر و تعرق، استفاده از داده های سنجش از دور در برآورد میزان تبخیر و تعرق نیز بسیار توسعه پیدا کرده است . محمد ابراهیم و همکاران (۱۳۹۶) با استفاده از مدل بیلان انرژی سطحی (SEBS)،

میزان تبخیر و تعرق واقعی را از روی تصاویر سنجنده مادیس ماهواره ترا برای دشت سیستان در شرق ایران برآورد و عملکرد مناسب این مدل را مورد تایید قرار دادند. رستمی و رائینی سرجاز (۱۳۹۵) با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس و مدل سبال اقدام به برآورد تبخیر و تعرق و ضریب گیاهی محصول سیب در دشت اهر در اذربایجان شرقی پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که تبخیر و تعرق واقعی از اغاز فصل (با $59/0$ میلی‌متر بر روز) تا نیمه‌های تابستان روندی افزایشی داشته، به گونه‌ای که در ۲۷ تیر ۹۳ مقدار آن به بیشینه $11/0$ میلی‌متر بر روز رسیده است. مرادی و همکاران (۱۳۹۴) به ارزیابی محصول تبخیر و تعرق پتانسیل از سنجنده MODIS با استفاده از آمار ایستگاه‌های همدیدی در استان زنجان پرداختند. نتایج بررسی-ها در این پژوهش نشان داد که محصول سنجنده مادیس (MOD16A2) میزان تبخیر و تعرق پتانسیل را در تمامی ایستگاه-های استان زنجان بجز ایستگاه خرم دره کمتر از میزان محاسبه شده به روش پنم-مانتیث-فاؤ بروآورد کرده است. نظری و کاویانی (۱۳۹۵) به برآورد تبخیر و تعرق واقعی در دشت قزوین با استفاده از تصاویر ماهواره ای و الگوریتم متريک پرداختند. نتایج آماره‌های ارزیابی شده در این تحقیق نشان داد که سنجنده ETM+ لندست ۷ از تطابق قابل قبولی با داده‌های لایسیمتری در مقایسه با سنجنده MODIS برخوردار می‌باشد و به عنوان سنجنده برتر در این تحقیق برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی گیاهان دشت قزوین توصیه شد.

لذا با توجه به ادبیات بسیار غنی در زمینه برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از روش‌های تجربی مختلف و با توجه به نوپا بودن روش‌های برآورد تبخیر و تعرق سنجش از دوری، در این مطالعه هدف اصلی بر آن است که در یک مطالعه تطبیقی، تولیدات تبخیر و تعرق سنجنده مادیس ماهواره ترا با مدل‌های برآورد تبخیر و تعرق تجربی در یکی از استان‌های کوهستانی ایران یعنی استان کردستان با یکدیگر مقایسه شوند.

۲- مواد و روش‌ها

استان کردستان با وسعتی حدود 28235 کیلومتر مربع، شانزدهمین استان کشور از لحاظ وسعت است که در غرب ایران بین 34 درجه و 44 دقیقه تا 36 درجه و 30 دقیقه عرض شمالی و 45 درجه و 31 دقیقه تا 48 درجه و 30 دقیقه شرقی از نصف النهار گرینویچ قرار دارد (شکل ۱) (نجفی، ۱۳۶۹). بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی آبرژه (علیزاده، ۱۳۹۴)، استان کردستان دارای چهار طبقه اقلیمی مرطوب، نیمه مرطوب، نیمه خشک و خشک می‌باشد. شهرستان‌های بانه، مریوان و کامیاران دارای اقلیم مرطوب، شهرستان‌های سندج و سقز دارای اقلیم نیمه مرطوب، شهرستان‌های زرینه اوپاتو و قروه دارای اقلیم نیمه خشک و در نهایت شهرستان بیجار دارای اقلیم خشک می‌باشند (شکل ۱) میانگین سالانه دما در ارتفاعات منطقه حدود 8 درجه سانتی گراد و در محدوده‌های پست جنوبی و جنوب غربی، حدود 13 درجه سانتی گراد است. حداکثر متوسط بارندگی سالانه در ارتفاعات غرب و شمال غربی منطقه به میزان 800 میلی‌متر و حداقل آن در نواحی دره ای شمال شرقی به 300 میلی‌متر می‌رسد. عمدۀ بارندگی‌های استان کردستان متأثر از جریانهای مدیترانه‌ای است که از سمت غرب وارد این منطقه می‌شوند. رشته کوه‌های زاگرس همچون دیواره‌ای، باعث ریزش بخش قابل توجه ای از ابرهای باران زای این جبهه شده، از این رو این استان در زمرة مناطق نیمه مرطوب و مرطوب کشور محسوب می‌شود (محمودی و علیجانی، ۱۳۹۲).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی استان کردستان در چهارچوب جغرافیای سیاسی ایران (نقشه بالا) و طبقه بندی اقلیمی استان کردستان بر اساس طبقه بندی اقلیمی آمبرژه (نقشه پایین)

برای دستیابی به هدف اصلی این پژوهش که همانا اعتبارسنجی تولیدات سنجش از دوری تبخیر و تعرق سنجنده مادیس ماهواره ترا برای استان کردستان می باشد، به دو پایگاه داده ای مختلف تیاز است . پایگاه داده ای اول مربوط به داده های روزانه حداقل و حداکثر دما، سرعت باد، ساعت آفتابی و رطوبت نسبی ۸ ایستگاه هواشناسی همدید برای سال ۲۰۰۸ میلادی است که از اداره کل هواشناسی استان کردستان دریافت شد . موقعیت جغرافیایی ایستگاه های منتخب در شکل ۱ آورده شده است. پایگاه داده ای دوم نیز مربوط به تولیدات سنجش از دوری تبخیر و تعرق سنجنده مادیس $MOD16A2$ (MOD16A2) است که از وبگاه سازمان زمین شناسی ایالات متحده به آدرس <https://earthexplorer.usgs.gov/> دسترسی می باشد. قدرت تفکیک مکانی این نوع از تولیدات سنجنده مادیس ماهواره ترا ۱ در ۱ کیلومتر و قدرت تفکیک زمانی آن نیز ۸ روزه می باشد (NASA MODIS Brochures, 2019). لذا با توجه به قدرت تفکیک زمانی این تولیدات در مجموع ۴۷ تصویر برای سال ۲۰۰۸ دانلود شد. لازم به اشاره است که برای تمامی این تولیدات، تصحیحات رادیومتریک و اتمسفریک انجام شده است.

بعد از اخذ داده ها، در گام اول، مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل ایستگاه های مورد مطالعه در یک مقیاس روزانه برای سال ۲۰۰۸ میلادی با استفاده از معادله پنم- مانتیث- فائو، برآورد گردید . معادله پنم- مانتیث- فائو که یکی از روش های مورد تایید سازمان خاروبار و کشاورزی جهانی (فائو) می باشد به شکل معادله ۱ تعریف می شود (مرادی و همکاران، ۱۳۹۳):

$$ETo = \frac{0.408(R_n - G) + y \frac{900}{T + 273} u_2(e_s - e_a)}{\Delta + y(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

که ETo تبخیر و تعرق سطح مرتع (میلی‌متر بر روز)، R_n شعشع خالص در سطح زمین (مگاژول بر متر مربع بر روز)، G شار گرما به داخل خاک (مگاژول بر متر مربع بر روز)، y ضریب ثابت سایکرومتری (کیلوپاسکال بر سانتیگراد)، T میانگین دمای هوای (سانتی‌گراد)، u_2 سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (متر بر ثانیه)، $(e_s - e_a)$ کمیود فشار بخار اشباع (کیلوپاسکال)، e_s فشار بخار اشباع (کیلوپاسکال)، e_a فشار بخار واقعی (کیلوپاسکال)، Δ شیب منحنی تغییرات فشار بخار اشباع با دمای هوای (هکتوپاسکال بر سانتی‌گراد) می‌باشد (مرادی و همکاران، ۱۳۹۳):

در گام دوم، مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل استان کردستان برای سال ۲۰۰۸ میلادی با استفاده از تولیدات سنجش از دوری تبخیر و تعرق سنجنده مادیس ماهواره ترا با نام اختصاری (MOD16A2) استخراج گردیدند. لازم به اشاره است که قدرت تفکیک مکانی این تولیدات تقریباً ۱ کیلومتر و مقیاس زمانی آنها ۸ روزه می‌باشد.

برای بررسی رابطه بین مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل به دست آمده از معادله پنمن-مانثیث-فائو با مقادیر تبخیر و تعرق سنجش از تولیدات سنجنده مادیس ماهواره ترا از ضریب همبستگی گشتاوری پیرسون استفاده شد. ضریب همبستگی گشتاوری پیرسون به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود.

$$r_i \quad (2)$$

ضریب همبستگی پیرسون بین -1 و 1 تغییر می‌کند. اگر $r_i = 1$ باشد بیانگر رابطه مستقیم کامل بین دو متغیر است، $r_i = -1$ نیز وجود یک رابطه معکوس کامل بین دو متغیر را نشان خواهد داد. زمانی که ضریب همبستگی برابر صفر بوده است بین دو متغیر رابطه خطی وجود نداشته است.

در نهایت نیز برای اندازه‌گیری دقت برآوردهای تبخیر و تعرق پتانسیل به دست آمده از معادله پنمن-مانثیث-فائو با مقادیر تبخیر و تعرق پتابسیل استخراج شده از تولیدات سنجش از دوری تبخیر و تعرق سنجنده مادیس ماهواره ترا از سه معیار اندازه‌گیری خطای میانگین قدر مطلق درصد خطای (MSD)، میانگین قدر مطلق انحرافات (MAD) و میانگین مربع انحرافات (MAPE) استفاده شد که فرمول محاسباتی آنها در معادلات ۳-۵ آورده شده اند.

$$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^n \left| \left(x_t - \bar{x}_t \right) / \bar{x}_t \right|}{n} \times 100 \quad (3)$$

$$MAD = \frac{\sum_{t=1}^n |x_t - \bar{x}_t|}{n} \quad (4)$$

$$MSD = \frac{\sum_{t=1}^n \left(x_t - \bar{x}_t \right)^2}{n} \quad (5)$$

در این معادلات x_t مقدار واقعی سری زمانی، \bar{x}_t مقدار پیش‌بینی شده متناظر با آن می‌باشد و n تعداد پیش‌بینی‌ها می‌باشد.

۳- نتایج و بحث

۱-۱- توزیع فضایی میزان تبخیر و تعرق به دست آمده از تولیدات ماهواره ای سنجنده مادیس ماهواره ترا

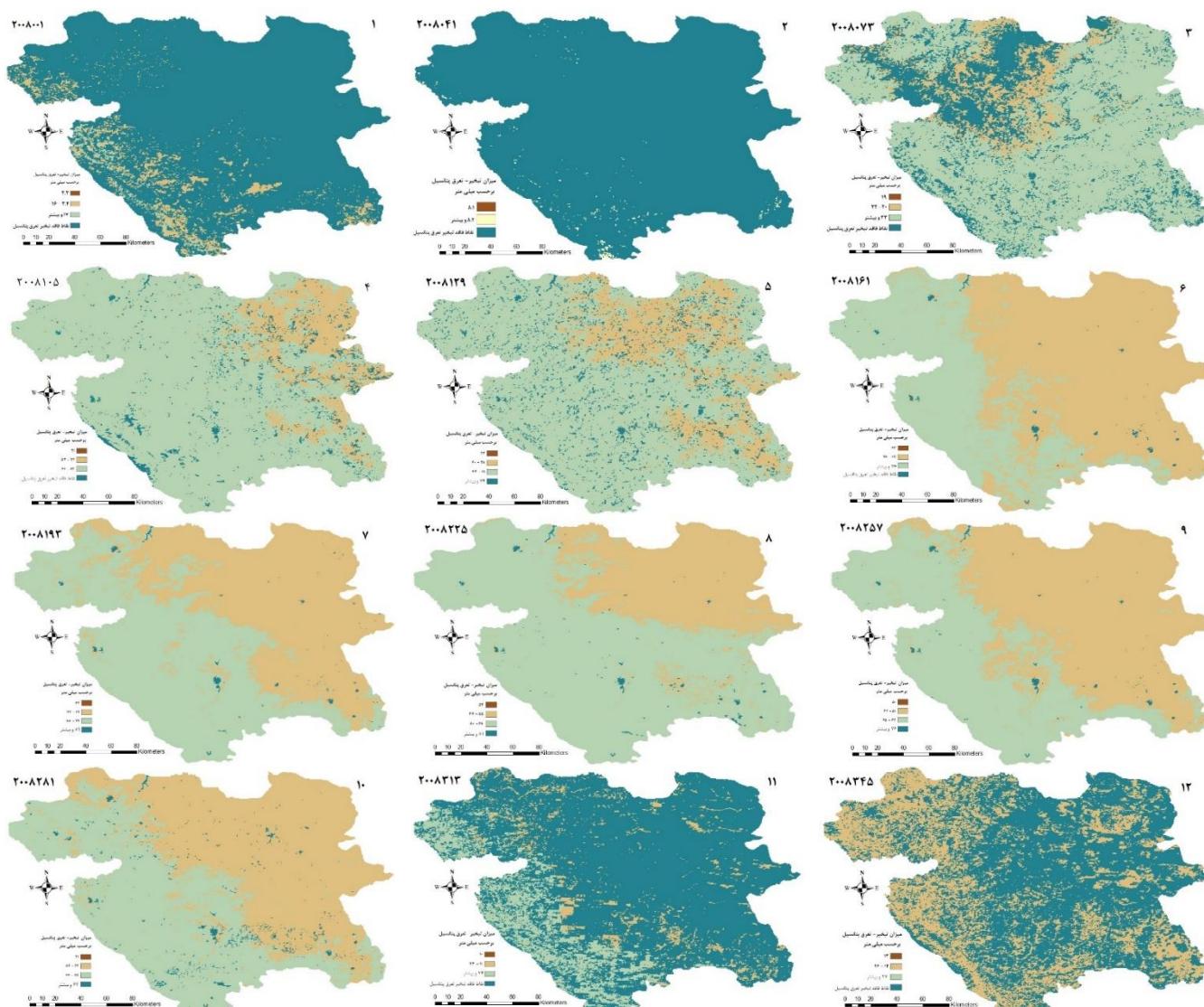
با توجه به اینکه تولیدات سنجش از دوری تبخیر و تعرق به دست آمده از سنجنده مادیس ماهواره ترا به نام (MOD16A2) در یک مقیاس زمانی ۸ روزه تولید می شوند، لذا مجموع نقشه های تبخیر و تعرق به دست آمده برای سال ۲۰۰۸ به ۴۷ نقشه رسید. هر کدام از این نقشه ها در واقع مجموع میزان تبخیر و تعرق را در ۸ روز نشان می دهند که با جمع مقدار تمامی این ۴۷ نقشه می توان مجموع تبخیر و تعرق سالانه را به دست آورد. با توجه به اینکه تعداد نقشه های تهیه شده در این مرحله نسبتاً زیاد بودند (۴۷ نقشه) لذا تصمیم بر این گرفته شد که از هر ماه یک نقشه به عنوان نمونه آورده شوند.

اکنون با بررسی دقیق این نقشه ها، می توان به روشنی نحوه توزیع فضایی مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل در سطح استان کردستان در مقیاس های زمانی ۸ روزه را در اختیار داشت (شکل ۲). همانگونه که در شکل ۲ به وضوح قابل مشاهده است در ماه های فصل زمستان بیشتر گستره استان کردستان دارای تبخیر و تعرق پتانسیل بسیار پایینی می باشند. کوهستانی بودن، بالا بودن عرض جغرافیایی و همچنین کم بودن میانگین دمای روزانه در این ماه ها می توانند مهمترین و مشخص ترین دلایل این کاهش باشند. لازم به اشاره است که در اینجا منظور از ماه های فصل زمستان ماه های دسامبر، ژانویه و فوریه می باشد. پس بر اساس نحوه چینیدمان نقشه ها در شکل ۲ نقشه های ۱، ۱۲ و ۲ به ترتیب بیانگر ماه های دسامبر، ژانویه و فوریه می باشد.

با ورود به فصل بهار مشاهده می شود که مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل افزایش چشمگیری به خود می گیرد. تغییر زاویه تابش خورشید و افزایش دما مطمئناً مهمترین عواملی هستند که در این افزایش بیشترین نقش را بازی می کنند. با مشاهده نقشه های ۳، ۴ و ۵ در شکل ۲ که به ترتیب نماینده های ۸ روزه ای از ماه های مارس، آوریل و می هستند این افزایش و گستردگی فضایی آن قابل مشاهده است. در ماه مارس ابتدا شمال شرق، در ماه آوریل شرق و در نهایت در ماه می شرق و مرکز استان کردستان دارای بیشترین میزان تبخیر و تعرق پتانسیل می باشند. دلیل اینکه این افزایش ابتدا از شرق و سپس به مرکز استان گسترش می یابد مطمئناً به نحوه آرایش ارتفاعات و نوع طبقه اقلیمی آن ها بر می گردد. در غرب استان کردستان ناهمواری ها فشرده تر و مرتفع تر هستند در حالیکه در شرق استان هم ارتفاع ناهمواری ها کاهش و هم از فشردگی آنها به شدت کاسته می شود به طوریکه مهمترین دشت های استان کردستان در شرق و مرکز آن قرار گرفته اند. علاوه بر این، اقلیم استان از سمت غرب که دارای اقلیمی مرطوب تر به سمت شرق که دارای اقلیمی خشک تر هستند تغییر ماهیت می دهند. لذا با توجه به اینکه تبخیر- تعرق پتانسیل به شدت به متغیر دما و بارش و تغییرات آنها وابسته است مشاهده می شود که بالاترین دمای ها و پایین ترین بارش ها در شرق و مرکز استان مشاهده می شود. محمودی و علیجانی (۱۳۹۲ الف) با ناحیه بندی بارش های استان کردستان به سه ناحیه بارشی: ناحیه پربارش غربی، ناحیه میان بارش مرکزی و ناحیه کم بارش شرقی و نقش بسیار قوی ارتفاعات و طول جغرافیایی در نحوه آرایش این ناحیه بندی ها (محمودی و علیجانی، ۱۳۹۲ ب) می تواند تایید کننده این مطلب باشد. اما با تمام این تفاصیل بایستی به یک نکته بسیار بزرگ دیگری در این خصوص توجه کرد و آن هم مربوط به نوع پوشش زمین در این فصل در استان کردستان است. در این فصل نقش غالب پوشش زمین در شرق و مرکز استان کردستان به واسطه دشت های وسیع و غنی آن پوشش زمین زراعی است که مرحله رشد خود را سپری و در کامل ترین شکل خود قرار دارند. حالیکه در غرب استان چنین شرایطی حاکمیت کامل ندارد.

در فصل تابستان که خشک ترین فصل استان کردستان به شمار می رود میزان تبخیر- تعرق پتانسیل به بالاترین مقدار خود می رسد. نکته جالب توجه در این فصل جایه جا شدن مراکز حداکثری تبخیر- تعرق پتانسیل از شرق به غرب استان در مقایسه با فصل بهار است. در ماه های فصل تابستان که شامل ماه های ژوئن، ژولای و آگوست است و در شکل ۲ به ترتیب با نقشه های شماره ۶، ۷ و ۸ مشخص شده اند، این جایه جایی به روشنی قابل مشاهده است. دلیل این جایه جایی را بایستی در نوع پوشش زمین در استان کردستان جستجو کرد. در غرب استان کردستان نوع پوشش زمین عمدهاً مراتع و بوته زار و در مساحت محدودتری جنگل می باشد. در حالیکه در شرق استان نوع پوشش غالب زمین های کشاورزی است که در این فصل با برداشت محصول، زمین های لخت و فاقد پوشش گیاهی مساحت بیشتری را به خود اختصاص می دهند. لذا با توجه اینکه

تبخیر- تعرق پتانسیل محاسبه شده توسط این نوع از تولیدات سنجنده مودیس ماهواره ترا به شدت وابسته به نوع پوشش زمین است، این جا به جایی می‌تواند توسط نوع پوشش زمین و تقاضت آن‌ها در غرب و شرق استان تبیین شود. در نهایت در فصل پاییز و با آغاز فصل سرما انتظار کاهش تبخیر- تعرق پتانسیل در سطح استان کردستان یک انتظار به جا و منطقی می‌باشد. نقشه‌های ماه‌های سپتامبر، اکتبر و نوامبر که به ترتیب در شکل ۲ شماره‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ را به خود اختصاص داده‌اند تایید کننده این مطلب می‌باشند. در این نقشه‌ها به استثنای نقشه ماه سپتامبر، نقشه ماه‌های اکتبر و نوامبر نظم فضایی مشخصی در مقادیر تبخیر- تعرق آن‌ها مشاهده نمی‌شود که مطمئناً به شرایط گذار اقلیمی این فصل از یک فصل گرم به یک فصل سرد نشات می‌گیرد. علاوه بر این باستی به پوشش زمین این فصل هم توجه ویژه‌ای شود. چون در این فصل بعد از فصل تابستان پوشش زمین در طبقات مختلف آن در کمترین مساحت‌های خود واقع شده‌اند.

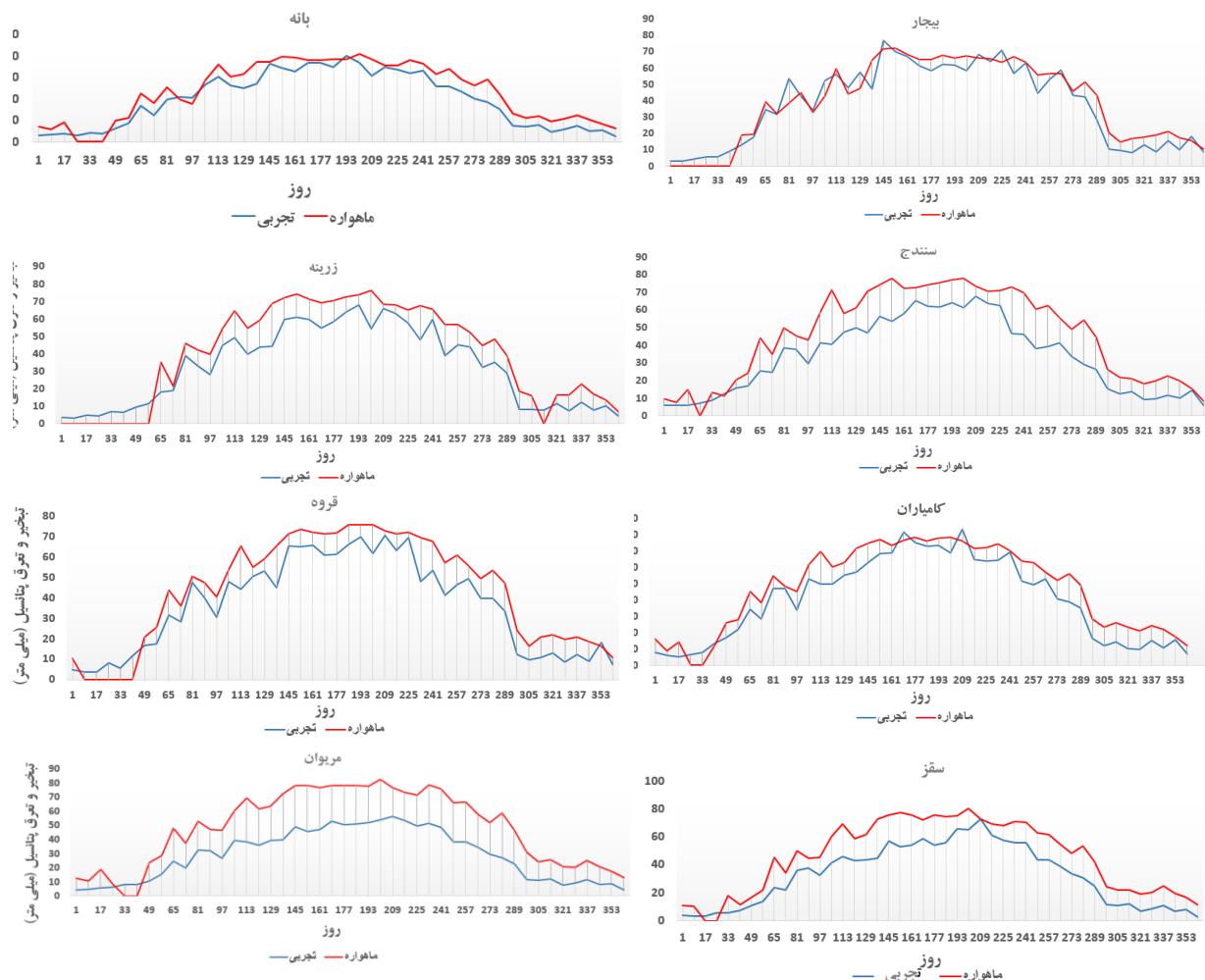


شکل ۲- نقشه‌های توزیع فضایی میزان تبخیر- تعرق پتانسیل استان کردستان به دست آمده از تولیدات تبخیر- تعرق پتانسیل سنجنده مودیس ماهواره ترا برای سال ۲۰۰۸. نقشه شماره ۱ مجموع تبخیر- تعرق پتانسیل یک دوره ۸ روزه در ماه ژانویه و نقشه شماره ۱۲ مربوط به مجموع تبخیر- تعرق پتانسیل یک دوره ۸ روزه در ماه دسامبر

۲-۳- مقایسه بین نتایج تبخیر- تعرق پتانسیل ماهواره‌ای و روش تجربی پنمن- ماننتیث- فاؤ-

ابتدا در یک مقیاس نقطه‌ای، میزان تبخیر- تعرق پتانسیل نقاط منطبق بر ایستگاه‌های سندنج، سقز، قروه، بیجار، مریوان، بانه، زرینه و کامیاران از روی نقشه‌های تهیه شده در یک مقیاس زمانی ۸ روزه استخراج شدند. نمودار تغییرات درون سالانه آن‌ها برای سال ۲۰۰۸ برای تمامی نقاط منطبق بر موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه ترسیم شدند. این نمودارها به تفکیک برای تمامی نقاط منطبق بر موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه در شکل‌های ۳ (خط قرمز رنگ) آورده شده‌اند. در این نمودارها به روشی یک رفتار دوره‌ای درون سالانه در میزان تبخیر- تعرق پتانسیل برای تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه مشاهده می‌شود. به عبارت دیگر می‌توان گفت که تغییرات زمانی مقادیر تبخیر- تعرق پتانسیل تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه تقریباً از الگوهای زمانی مشابه‌ی پیروی می‌کنند. در فصل زمستان کمترین و در فصل تابستان بالاترین مقدار تبخیر- تعرق پتانسیل به وقوع می‌پیوندد. بیشترین مقدار تبخیر- تعرق پتانسیل سالانه به دست آمده از تولیدات سنجش از دوری (MOD16A2) در استان کردستان مربوط به ایستگاه مریوان با ۲۲۱۴/۸۶ میلی‌متر و کمترین آن مربوط به ایستگاه بیجار با ۱۸۲۱/۰۵ میلی‌متر بوده است (جدول ۱). همچنین با استفاده از معادله پنمن- ماننتیث- فاؤ- مقادیر روزانه تبخیر- تعرق پتانسیل برای تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه برای سال ۲۰۰۸ میلادی محاسبه شدند. از روی مقادیر روزانه، مجموع مقادیر ۸ روزه آن‌ها به دست آمد. تغییرات زمانی تبخیر- تعرق پتانسیل به دست آمده از معادله پنمن- ماننتیث- فاؤ برای سال ۲۰۰۸ میلادی برای تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه در نمودارهای مربوط به شکل ۳ (خط آبی رنگ) آورده شده‌اند. در یک نگاه کلی به این نمودارها و در مقایسه آن‌ها با نمودارهای تبخیر- تعرق پتانسیل به دست آمده از تولیدات سنجش از دوری سنجنده مودیس ماهواره ترا مشاهده می‌شود که رفتار زمانی آن‌ها تقریباً مشابه ولی مقادیر تبخیر- تعرق آن‌ها با هم‌دیگر بسیار متفاوت می‌باشد. علاوه بر این، نوسانات ۸ روزه تبخیر- تعرق به دست آمده از معادله پنمن- ماننتیث- فاؤ بیشتر از تبخیر- تعرق پتانسیل به دست آمده از تولیدات ماهواره‌ای بوده است. بر اساس این روش کمترین میزان تبخیر- تعرق سالانه مربوط به ایستگاه مریوان (۱۳۲۸/۹۱ میلی‌متر) و بیشترین آن متعلق به ایستگاه بیجار (۱۸۳۲/۸۵ میلی‌متر) بوده است (جدول ۱).

در یک مطالعه تطبیقی مشاهده شد که در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه میزان تبخیر- تعرق پتانسیل تجربی کمتر از میزان تبخیر- تعرق پتانسیل ماهواره‌ای می‌باشد (شکل ۳). در حالیکه (مرادی و هم‌کاران، ۱۳۹۴) در یک مطالعه مشابه برای استان زنجان نتیجه عکس را گرفته یعنی میزان تبخیر- تعرق پتانسیل تجربی بیشتر از میزان تبخیر- تعرق پتانسیل ماهواره‌ای بوده که علت آن می‌تواند کوهستانی بودن استان کردستان نسبت به استان زنجان باشد. علاوه بر این، نکته مهمی که در این قسمت می‌توان بدان اشاره نمود این است که در ماه‌های سرد فصل زمستان تبخیر- تعرق پتانسیل به دست آمده از تولیدات ماهواره‌ای برای بعضی از دوره‌های ۸ روزه صفر بوده است در حالیکه برای تبخیر- تعرق تجربی برای هیچ‌کدام از دوره‌های ۸ روزه صفر، در اختیار گذاشته نشده است. همچنین در ماه‌های گرم سال به خصوص فصل تابستان مقادیر برآورده شده تجربی و ماهواره‌ای، به استثنای دو ایستگاه بیجار (شکل ۳) و کامیاران (شکل ۳)، از هم فاصله بیشتری می‌گیرند به طوریکه در دو ایستگاه مریوان (شکل ۳) و سقز (۳) این فاصله به حداقل خود می‌رسد.



شکل ۳- نمودار تطبیقی بین تغییرات درون سالانه میزان تبخیر- تعرق پتانسیل تجربی (معادله پمن ماننتیث-فائو) و تولید تبخیر- تعرق پتانسیل ماهواره ای برای سال ۲۰۰۸ در یک مقیاس زمانی ۸ روزه برای ایستگاه های مورد مطالعه

جدول ۱- میزان مجموع تبخیر- تعرق سالانه (میلی متر) ایستگاه های استان کردستان بر اساس روش های تجربی (پمن- ماننتیث-فائو) و ماهواره ای (سنجدنه مودیس ماهواره ترا) برای سال ۲۰۰۸ میلادی

نام ایستگاه	میزان تبخیر- تعرق	اختلاف (میلی متر)	میزان تبخیر- تعرق	
			پتانسیل ماهواره ای	پتانسیل تجربی
بیجار	۸۸/۶۵	۱۸۲۱/۰۵	۱۷۷۲/۴	
کامیاران	۳۴۲/۴۳	۲۱۷۵/۲۸	۱۸۳۲/۸۵	
مریوان	۸۸۵/۹۵	۲۲۱۴/۸۶	۱۳۲۸/۹۱	
قروه	۳۴۵/۴۱	۲۰۱۲/۲۳	۱۶۶۶/۸۲	
سنندج	۵۵۷/۷۴	۲۰۹۹/۲۴	۱۰۴۱/۵	

۶۰/۹/۸۵	۲۰/۹/۰/۵۵	۱۴۸/۰/۷	سقز
۳۴۱/۷۷	۱۸۲۶/۴۲	۱۴۸۴/۶۵	زرینه
۳۴۶/۱۹	۲۱۴۸/۳۰	۱۸۰۲/۱۱	بانه

تحلیل همبستگی بین مقادیر تبخیر- تعرق پتانسیل به دست آمده از دو مدل تجربی و ماهواره‌ای برای تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه حاکی از بالابودن ضرایب همبستگی برای تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه می‌باشد (جدول ۲). بر اساس جدول ۲ مشاهده می‌شود که ضرایب همبستگی بین مقادیر تبخیر- تعرق پتانسیل تجربی و ماهواره‌ای برای تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه بالای ۰/۹۵ می‌باشد که نشان دهنده هماهنگی زمانی بسیار خوب نتایج این دو روش با یکدیگر است.

جدول ۲- نتایج تحلیل همبستگی بین مقادیر تبخیر- تعرق پتانسیل تجربی و ماهواره‌ای برای سال ۲۰۰۸ میلادی برای

ایستگاه‌های استان کردستان

ایستگاه	سنندج	زرینه	مریوان	کامیاران	قروه	بیجار	بانه	سقز
همبستگی	۰/۹۵**	۰/۹۶**	۰/۹۷**	۰/۹۷**	۰/۹۶**	۰/۹۵**	۰/۹۶**	۰/۹۶**

* سطح معناداری ۹۵ درصد، ** سطح معناداری ۹۹ درصد

در نهایت از سه معیار خطای میانگین قدر مطلق درصد خطا (MAPE)، میانگین قدر مطلق انحرافات (MAD) و میانگین مربع انحرافات (MSD) برای بررسی دقت برآوردهای تبخیر- تعرق پتانسیل تجربی و ماهواره‌ای استفاده شد که نتایج آن برای تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه در استان کردستان در جدول ۳ آورده شده است. در جدول ۳ مشاهده می‌شود که هر سه خطای برای ایستگاه سقز کمترین برآورد را داشته است و بیشتر میزان برآورد برای خطای میانگین قدر مطلق درصد خطا و میانگین قدر مطلق انحرافات در ایستگاه بیجار بوده است.

جدول ۳- نتایج سه معیار خطای میانگین قدر مطلق درصد خطا (MAPE)، میانگین قدر مطلق انحرافات (MAD) و میانگین مربع انحرافات (MSD) برای ارزیابی دقت برآوردهای تبخیر- تعرق تجربی و ماهواره‌ای سال ۲۰۰۸ میلادی ایستگاه‌های کردستان

ایستگاه	سنندج	زرینه	مریوان	کامیاران	قروه	بیجار	بانه	سقز
MAPE	۶۲/۰۷	۲۶/۵۱	۱۹/۴۰	۶۹/۳۳	۲۹/۳۷	۱۲۹/۱۸	۳۷/۷۴	۱۶/۸۲
MAD	۰/۲۴	۰/۱۹	۰/۱۸	۰/۲۱	۰/۱۹	۰/۲۷	۰/۲۰	۰/۱۶
MSD	۰/۱۱	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۰۶	۰/۱۲	۰/۰۷	۰/۰۴

۴- نتیجه‌گیری

طبق مقایسه‌ای که انجام شد با مشاهده و روی هم قرار دادن نمودارهای تغییرات زمانی مقادیر روزه تبخیر- تعرق پتانسیل تجربی و ماهواره‌ای در تمامی ایستگاه‌های استان کردستان مشاهده شد میزان تبخیر- تعرق پتانسیل تجربی کمتر از میزان تبخیر- تعرق پتانسیل ماهواره‌ای می‌باشد. در ماه‌های گرم سال به خصوص فصل تابستان مقادیر برآورده شده تجربی و ماهواره‌ای، به استثنای دو ایستگاه بیجار و کامیاران از هم فاصله بیشتری می‌گیرند به طوریکه در دو ایستگاه مریوان و سقز این فاصله به حداقل خود می‌رسد. در ماه‌های فصل زمستان بیشتر گستره استان کردستان دارای تبخیر- تعرق پتانسیل بسیار پایینی می‌باشند. کوهستانی بودن، بالابودن عرض جغرافیایی و همچنین کم بودن میانگین دمای روزانه در این ماه‌ها می‌تواند مهمترین و مشخص‌ترین دلایل این کاهش باشند. به طور کلی با توجه به مقایسه‌های انجام شده می‌توان دید که میزان تطابق تبخیر- تعرق در تصاویر ماهواره‌ای با روش تجربی پمن- مانتیث- فائو در دوره گرم سال بیشتر می‌باشد به طوریکه در بعضی ایستگاه‌ها در فصل زمستان میزان تبخیر- تعرق در تصاویر ماهواره‌ای صفر می‌باشد در حالیکه در روش تجربی پمن- مانتیث- فائو برای تمامی ایستگاه‌ها تبخیر- تعرق بالای صفر می‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده، می‌توان نتیجه گرفت که روش‌های ماهواره‌ای می‌توانند در مناطق اقلیمی کوهستانی مثل استان کردستان جایگزین مناسبی برای روش‌های مستقیم و تجربی

اندازه‌گیری تبخیر - تعرق بالقوه باشند . در راستای نتایج بدست آمده پیشنهادهای می گردد با توجه به وجود الگوریتم های مختلف برای محاسبه تبخیر- تعرق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای همچون SEBAL, SEBS, METRIC و ... بهتر است این روش‌ها مورد توجه قرار گیرد و نتایج آن‌ها با این تولیدات از سنجنده مودیس مقایسه گردد.

مراجع

- ۱- اسماعیل‌پور، م. و دین‌بژوه، م. ۱۳۹۱. تحلیل روند بلند مدت تبخیر و تعرق پتانسیل در حوضه جنوبی رود ارس . جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی. (۲۳(۳). ۱۰-۲۳-۱۹۳.
- ۲- خرمی، م.، شیاسی ارانی، م.، انصاری، ح. و مرادی، ح. ۱۳۹۲. ارزیابی تطابق نتایج روش‌های مختلف برآورده تبخیر و تعرق با روش فائق پنمن مانتبث. دومین کنفرانس بین‌المللی مدل سازی گیاه، آب، خاک و هوا. اردیبهشت ماه. دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان.
- ۳- خوشحال، ج.، زارع آبیانه، ح. و جوشنی، ع. ۱۳۹۴. ارزیابی روش‌های مختلف برآورده تبخیر و تعرق مرجع با روش تست تبخیر فائق در حوضه آبریز شرق و جنوب شرق کشور. جغرافیای طبیعی. (۲۸(۸). ۱۶-۱.
- ۴- رستمی، ا. و رائینی سرجاز، م. ۱۳۹۵. دورسنجدی تبخیر - تعرق واقعی و ضریب گیاهی سیب با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس و مدل سبال (مطالعه موردی : دشت اهر، ایران). هواشناسی کشاورزی. (۱(۴). ۴۳-۴۲.
- ۵- طالی، ع.، پورمحمدی، س. و رحیمیان، م. ح. ۱۳۸۹. بررسی عوامل موثر در تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از آنالیز حساسیت معادله فائق-پنمن-مانتبث(مطالعه موردی: ایستگاه‌های یزد، طبس و مروست). پژوهش‌های جغرافیای طبیعی. ۷۳. ۱۱۰-۹۷.
- ۶- عابدی کوپایی، ج.، اسلامیان، س. و امیری، م. س. ۱۳۸۷. مقایسه چهار روش تبخیر و تعرق سطح مرجع با داده میکرولایسیمتری در منطقه اصفهان. دومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی. بهمن ماه. دانشگاه چمران اهواز.
- ۷- علیزاده، ا. ۱۳۹۴. اصول هیدرولوژی کاربردی. انتشارات دانشگاه امام رضا. ۹۴۲ ص.
- ۸- قمرنیا، ه.، جعفری‌زاده، م.، میری، ا. و قبادی، م. ا. ۱۳۹۰. برآورده ضریب گیاهی گشنیز (cotiandrum sativum L.) در منطقه‌ای با اقلیم نیمه خشک. مدیریت آب و آبیاری. (۱۲(۱). ۸۳-۷۳.
- ۹- محمد ابراهیم، م.، محمدرضاپور، ا. ب. و اکبرزاده مقدم سه قلعه، ه. ۱۳۹۶. ارزیابی مدل SEBS در برآورده تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS در مقیاس منطقه‌ای (مطالعه موردی: دشت سیستان). اکوهیدرولوژی. (۴(۴). ۱۱۵۰-۱۱۴۱.
- ۱۰- محمودی، پ. و علیجانی، ب. ۱۳۹۲. مدل‌بندی رابطه بارش‌های سالانه و فصلی با عوامل زمین اقلیم در کردستان. تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی. (۳۱(۱۳). ۱۱۲-۹۳.
- ۱۱- محمودی، پ. و علیجانی، ب. ۱۳۹۲. ناحیه‌بندی بارش استان کردستان با استفاده از روش‌های آماری چند متغیره. پژوهش آب ایران. (۱۳(۷). ۲۱۳-۲۰۹.
- ۱۲- مرادی، ف.، کمالی، غ. ع. و وظیفه‌دوست، م. ۱۳۹۴. ارزیابی محصول تبخیر و تعرق پتانسیل از سنجنده MODIS با استفاده از آمار ایستگاه‌های همدیدی در استان زنجان. پژوهش‌های اقلیم‌شناسی. (۲۴(۲۳-۲۲). ۴۶-۴۷.
- ۱۳- مرادی، ف. و کمالی، غ. ع. ۱۳۹۳. ارزیابی خشکسالی کشاورزی RDI محاسبه شده با داده‌های زمینی و تولیدات ماهواره‌ای برای گندم دیم(مطالعه موردی استان زنجان). پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران.
- ۱۴- معمصوم‌پور سماکوش، ج.، رجایی، س. و یگانه‌فر، م. ۱۳۹۵. تغییرپذیری زمانی- مکانی و روند تبخیر و تعرق گیاه مرجع در ایران . تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی. (۳۴(۱۴). ۲۵-۷.
- ۱۵- نجفی، س. ی. ۱۳۶۹. جغرافیای عمومی استان کردستان. انتشارات امیرکبیر. ۶۵۸ ص.

- ۱۶- نظری، ر. و کاویانی، ع. ۱۳۹۵. برآورد تبخیر - تعرق واقعی در دشت قزوین با استفاده از تصاویر ماهواره ای و الگوریتم متربک . هواشناسی کشاورزی. ۴۲(۴). ۷۶ - ۷۱.
- ۱۷- نکو آمال کرمانی، م. و میرعباسی نجف آبادی، ر. ۱۳۹۵. تعیین بهترین مدل سیستم استنتاج انطباقی فازی - عصبی (Anfis) در تخمین تبخیر - تعرق مرجع چمن در اقلیم نیمه خشک ساحلی هرمزگان. دانش آب و خاک. ۲۶(۱/۲). ۲۵۸-۲۳۹.
- ۱۸- هاشمی نسب خبیصی، ف. س، موسوی بیگی، م. و بختیاری، ب. ۱۳۹۶. برآورد تبخیر و تعرق واقعی ضرایب یک جزئی و دو جزئی گیاه دارویی همیشه بهار در منطقه کرمان. علوم و مهندسی آبیاری. ۴۰(۳). ۱۲۱ - ۱۰۹.
- 19- Bakhtiari, B., Ghahreman, N., Liaghat, A.M. and G. Hoogenboom. 2011. Evaluation of reference evapotranspiration models for a semiarid environment using lysimeter measurements. Journal of Agriculture Science Technology,13:223-237.
- 20- Benli, B., Kodal, S., Ilbeyi, A. and H. Ustun. 2006. Determination of evapotranspiration and basal crop coefficient of alfalfa with a weighing lysimeter. Agricultural Water Management, 81: 358–370.
- 21- FAO-Food and Agriculture Organization of the United Nation, Land and Water Development Division. 2005. AQUASTAT information system on water and agriculture: Online database. Rome: FAO.
- 22- Linsly RK, Kohler MA and Poulhus JLH, 1982. Hydrology for Engineers. Mc Graw-Hill, London. 210.
- 23- Liu, S., Bai, J., Jia, Z., Jia, L., Zhou, H., & Lu, L. 2010. Estimation of evapotranspiration in the Mu Us Sandland of China. Hydrology and Earth System Sciences,14(3),573-584.
- 24- Maeda, E.E., Wiberg, D.A., Pellikka, P.K.E. 2010. Estimating reference evapotranspiration using sensing empirical models in a region with limited data availability in Kenya. Applied Geography. 31: 251-258.
- 25- NASAMODISBrochures,2019.(https://modis.gsfc.nasa.gov/about/media/modis_brochure.pdf).
- 26- Nikam, B. R., Kumar, P., Garg, V., Thakur, P. K., & Aggarwal, S. P. 2014. Comparative Evaluation of Different Potential Evapotranspiration Estimation Approaches. International Journal of Research in Engineering and Technology, 3(06), 544-552.
- 27- Oki, T, Kanae, S. 2006 Global hydrological cycle and world water resources. Science. 313: 1068-1072.
- Rockstrom, J., Falkenmark, M., Karlberg, L., Hoff, H., Rost, S., Gerten, D,2009, Future water availability for global food production: The potential of green water for increasing resilience to global change. Water Resources Research, 45.
- 28- Wegehenkel, M and H.H. Gerke. 2013. Comparison of real evapotranspiration measured by weighing lysimeters with 29- simulations based on the Penman formula and a crop growth model. Journal of Hydrology and Hydromechanics,61(2): 161-172.