



Evaluation and Comparison of Different Methods of Reference Evapotranspiration Based on Mass Transmission Methods in Iran and Its Zoning by Using GIS

H. Ghamarnia^{1*} and Z. Niazi²

Abstract

The present study aimed the evaluation and zoning the evapotranspiration based on mass transfer methods in different climates of Iran and presented it in the form of zoning maps as a basic tool for water management. For this purpose, the long-term means of climate variables were used for 150 synoptic stations in Iran during 15-years of statistical period (1990 to 2013). De Martonne method was used for climate zoning in different parts of the country. The results of the study showed that dry, semi-arid, Mediterranean, semi-humid, moist, and very humid climates were covering 75.7, 21, 0.8, 0.6, 0.8 and 1% of the country's land area. Evapotranspiration of the reference plant was calculated based on the climatic information of each station using the methods of mass transfer including Dalton, Trabert, Meyer, Rohwer, Penman, Albrecht, Romanenko, Brockamp and Wenner, World Meteorological Organization, and Mahringer. The most appropriate and inappropriate computational methods in each climate were selected among the abovementioned methods, compared to the FAO-Penman-Monteith equation as a reference method. Based on the calculations and statistical analysis conducted for dry climates by the World Meteorological Organization and Albert, the semi-dry methods of the Meyer and Romanenko, Mediterranean methods of the World Meteorological Organization and Albert, the semi-wet and wet methods of Rohwer and Romanenko methods the very humid methods of Brockamp and Wenner and Penman were chosen as the most appropriate and inappropriate methods respectively. Meanwhile, the resulting lysimetric data confirmed the selection of suggested methods in a semi-arid climate.

Keywords: Iran, Evapotranspiration, Mass Transfer, Lysimeter.

Received: December 28, 2017

Accepted: May 13, 2018

ارزیابی و مقایسه روش‌های مختلف برآورد تبخیر-تعرق مرجع بر اساس روش‌های انتقال جرم در ایران و پهنه‌بندی آن با استفاده از GIS

هوشنگ قمرنیا^{۱*} و زهرا نیازی^۲

چکیده

پژوهش حاضر سعی در ارزیابی و پهنه‌بندی تبخیر-تعرق مرجع (ET_o) بر اساس روش‌های مبتنی بر انتقال جرم در اقلیم‌های مختلف ایران و همچنین ارائه آن در قالب نقشه‌های پهنه‌بندی به عنوان ابزاری اساسی برای مدیریت آب دارد. برای این منظور، از میانگین‌های دراز مدت متغیرهای اقلیمی ۱۵۰ ایستگاه سینوپتیک کشور ایران در طی دوره آماری ۱۵ ساله (۱۹۹۰ تا ۲۰۱۳) استفاده شد. برای اقلیم‌بندی سطح کشور، از روش دومارتن استفاده شد که نتایج حاصل نشان دادند که اقلیم‌های خشک، نیمه‌خشک، مدیترانه‌ای، نیمه‌مرطوب، مرطوب و بسیار مرطوب به ترتیب ۷۵/۷، ۲۱، ۰/۸، ۰/۶، ۰/۸ و ۱ درصد از مساحت کشور را به خود اختصاص داده‌اند. تبخیر-تعرق مرجع بر مبنای اطلاعات اقلیمی هریک از ایستگاه‌ها و با استفاده از روش‌های مبتنی بر انتقال جرم شامل دالتون، ترابرت، مییر، روهور، پنمن، آلبرت، روماننکو، بروکمپ و ونر، سازمان جهانی هواشناسی و ماهرینگر، محاسبه شدند. مناسب‌ترین و نامناسب‌ترین روش‌های محاسباتی در هر اقلیم از بین روش‌های ذکر شده، در مقایسه با معادله فائو-پنمن-مانتیث به عنوان روش مرجع، انتخاب گردیدند. بر اساس محاسبات و تجزیه و تحلیل‌های آماری به عمل آمده برای اقلیم‌های خشک روش‌های سازمان جهانی هواشناسی و آلبرت، نیمه‌خشک روش‌های مییر و روماننکو، مدیترانه‌ای روش‌های سازمان جهانی هواشناسی و آلبرت، نیمه‌مرطوب و مرطوب روش‌های روهور و روماننکو و بسیار مرطوب روش‌های بروکمپ و ونر و پنمن، به ترتیب به عنوان مناسب‌ترین و نامناسب‌ترین روش‌ها انتخاب شدند. ضمناً نتایج لایسی‌متری به‌دست آمده انتخاب روش‌های پیشنهادی در اقلیم نیمه‌خشک را تأیید کردند.

کلمات کلیدی: ایران، تبخیر-تعرق، مبتنی بر انتقال جرم، لایسی‌متر.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۱۰/۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۲/۲۳

1- Professor, Department of Water Resources Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran. Email: hghamarnia@razi.ac.ir

2- MSc. Graduate, Department of Water Resources Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.

*- Corresponding Author

۱- استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۳۹۷ امکانپذیر است.

۱- مقدمه

یکی از راه‌های کاهش بحران آب در کشاورزی به واسطه پایین بودن راندمان مصرف آن و استفاده بیش از حد منابع موجود، مدیریت آب در تأمین نیاز آبی گیاهان زراعی است. در این زمینه تبخیر-تعرق، در واقع شاخص تعیین‌کننده‌ای در فرآیند رشد است که معادل آب مورد نیاز زراعی قلمداد می‌شود. به همین دلیل تخمین دقیق‌تر آن با توجه به شرایط آب و هوایی و گیاه در هر منطقه صورت می‌گیرد. لحاظ عوامل جوی و فیزیولوژی گیاه در فرآیند تبخیر-تعرق سبب پیچیدگی این فرایند و ارائه روش‌های متعددی برای تخمین آن شده است (Kouchakzadeh and Bahmani., 2005).

لایسی متر روش مستقیم برآورد تبخیر-تعرق است. هر چند هزینه سنگین نصب و نگهداری، استفاده از آن را مشکل ساخته است، لیکن به هر حال معتبرترین روش در واسنجی مدل‌های تبخیر-تعرق است. تاکنون بیش از ۵۰ روش تخمین تبخیر-تعرق مرجع (ET_0^1) در قالب روش‌های ترکیبی، اُترودینامیک و تجربی ارائه شده است، که اغلب با توجه به داده‌های هواشناسی نتایج متفاوتی داشته‌اند (Grismar et al., 2002).

از بین روش‌های تجربی متعدد ارائه شده برای محاسبه تبخیر-تعرق مرجع، در سال ۱۹۹۰ از سوی کمیسیون بین‌المللی آبیاری و زهکشی (ICID²) و سازمان خوارو بارجهانی (FAO³) روش فائو-پنمن-مانتیت به عنوان روش استاندارد برای محاسبه تبخیر-تعرق مرجع از روی داده‌های اقلیمی و همچنین برای ارزیابی سایر روش‌ها پیشنهاد شده است (Hargreaves, 1994). این روش نیازمند داده‌های تابش، دما، رطوبت و سرعت باد بوده و با اعتماد بالایی در دامنه وسیعی از مناطق و اقلیم‌ها برآورد صحیحی از تبخیر-تعرق مرجع ارائه می‌کند (Allen et al., 1998). همچنین روش مناسب تعیین ET_0 در هر منطقه بستگی به شرایط اقلیمی، داده‌های مورد نیاز و هزینه‌های مربوط به آن دارد (Sabziparvar et al., 2008).

روش‌های مبتنی بر انتقال جرم از مفهوم انتقال گرادی بخرآب از سطح تبخیر به اتمسفر استفاده می‌کنند، همه این روش‌ها بر اساس قانون گاز دالتون می‌باشند. بطور کلی، روش‌های مبتنی بر انتقال جرم عبارتند از دالتون (۱۸۰۲)، ترابرت (۱۸۹۶)، مییر (۱۹۲۶)، روهور (۱۹۳۱)، پنمن (۱۹۴۸)، آلبرت (۱۹۵۰)، ایوانف رومانکو (۱۹۶۱)، بروکمپ و ونر (۱۹۶۳)، سازمان جهانی هواشناسی (WMO⁴) (۱۹۶۶) و ماهرینگر (۱۹۷۰) (Xu and Singh, 1997).

Valipour (2014) در این زمینه، به مقایسه مدل‌های مبتنی بر روش‌های انتقال جرم برای تعیین بهترین مدل تحت شرایط آب و هوایی متفاوت در کشور ایران پرداخت. بدین منظور آمار هواشناسی ۱۸۱ ایستگاه سینوپتیک در ۳۱ استان کشور جمع‌آوری و سپس تبخیر-تعرق مرجع را با استفاده از مدل‌های مبتنی بر انتقال جرم برآورد نمود و با مدل پنمن مانیتیت مقایسه کرده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده مدل‌هایی که مبتنی بر روش انتقال جرم می‌باشند در استان‌های شرقی ایران برآورد دقیق‌تری از تبخیر-تعرق مرجع را نسبت به سایر استان‌ها می‌دهند. همچنین در اکثر استان‌های ایران برآورد تبخیر-تعرق مرجع با استفاده از مدل پنمن بهتر از سایر مدل‌ها بوده است. در این تحقیق بدون توجه به اقلیم‌های مختلف و موجود برای هر استان مدلی جداگانه ارائه شده است.

Zareabayneh et al. (2010) نیز طی مطالعه‌ای با استفاده از اطلاعات ۶۱ ایستگاه هواشناسی در سطح کشور، مقادیر تبخیر ماهانه را با استفاده از مدل‌های مختلف انتقال جرم و تجربی برآورد نمودند. در این تحقیق، مقایسه تبخیر برآوردی با مقادیر اندازه‌گیری شده از تشت تبخیر کلاس A نشان داد که روش ایوانف در بین روش‌های مورد مطالعه هم‌خوانی بهتری با داده‌های اندازه‌گیری شده دارا بوده است. بنا به گزارشات ارائه شده، بیشترین فراوانی نسبی در روش ایوانف با پوششی در حدود ۵۶ درصد از ایستگاه‌ها و کمترین آن در روش ماریانو با پوشش ۱/۶ درصد ایستگاه‌ها گزارش شده است. بدین ترتیب، نتایج این تحقیق نشانگر آن است که روش ایوانف دقت لازم در پیش‌بینی تبخیر در نواحی مختلف ایران را داشته است. Hayati et al. (2012) در طی مطالعه‌ای در ایستگاه هواشناسی زهک در منطقه سیستان ضمن ارزیابی پنج معادله مبتنی بر انتقال جرم، در نهایت روش‌های پنمن و فیتزجرالد را در منطقه مناسب تشخیص داده‌اند. Babamiri and Dinpazhoh (2016) ضمن مقایسه و واسنجی نه روش تخمین تبخیر-تعرق مرجع مبتنی بر انتقال جرم در حوضه آبریز دریاچه ارومیه به ترتیب روش‌های مییر و دالتون را به عنوان اولین و دومین روش‌های مناسب در حوضه دریاچه ارومیه گزارش نمودند. Xu and Singh (1997) سه مدل بر مبنای انتقال جرم شامل مییر، دالتون و روهور در چهار ایستگاه هواشناسی در شمال غربی ایالت انتاریوی کانادا را بررسی و نتایج قابل قبولی با نتایج مشاهده شده گزارش کرده‌اند. Xu and Singh (2002) پنج روش تخمین ET را از بین سه روش بر مبنای انتقال جرم، تابش و درجه حرارت را انتخاب و در ایستگاه چانگیز سویس واسنجی کردند. Zhai et al. (2010) در استان گانسو در شمال چین،

نتایج برآورد ET یازده مدل تجربی (مدل روهور بر مبنای انتقال جرم) با داده‌های تبخیر از تشتک، در ده ایستگاه هواشناسی را مقایسه کردند. (Tabari et al. (2011 تعداد ۳۱ مدل ET، که ۱۰ مدل آن بر مبنای انتقال جرم بود را در ایستگاه رشت مقایسه کردند. (Azhar and Perera (2011 مدل میبر و همچنین نه مدل تجربی دیگر بر اساس درجه حرارت و تشعشع را برای جنوب شرقی استرالیا کالیبره نمودند.

از آنجائی که، تعیین میزان تبخیر-تعرق در مقیاس منطقه‌ای پیش‌نیاز برنامه‌های توسعه کشاورزی پایدار می‌باشد و برای نیل به این هدف تعیین نقشه توزیع مکانی تبخیر-تعرق در سطح هر منطقه ضروری می‌باشد (Martinez-Cob, 1996). روش‌های زمین‌آماری با پهنه‌بندی مناسب می‌توانند تخمین صحیحی از توزیع مکانی ET_0 را در پهنه‌ای وسیع به کمک تکنیک درون‌یابی به‌دست دهند (Mardikis et al. 2005). مطالعات زیادی در به‌کارگیری روش زمین‌آمار برای تخمین توزیع مکانی پارامترهای اقلیمی صورت گرفته‌است، که همگی در جهت تأیید توانایی و دقت آن بوده است که در این رابطه می‌توان به مطالعه (Ganjizade et al. (2013 اشاره داشت که برای تهیه نقشه تبخیر-تعرق مرجع در استان گلستان از روش‌های زمین‌آمار استفاده کردند. با بررسی آن‌ها روش کریجینگ به عنوان بهترین روش انتخاب شد. (Nazarifar et al. (2007 در تحقیقی برای بررسی تغییرات منطقه‌ای تبخیر-تعرق پتانسیل در استان همدان، روش کریجینگ در مقیاس ماهانه و روش وزن‌دهی عکس فاصله در مقیاس سالانه را پیشنهاد کردند. (Bolhasani and zarei (2016 طی تحقیقی با استفاده از اطلاعات روزانه ۲۴ ایستگاه سینوپتیک اطراف حوضه آبریز بختگان به تعیین مناسب‌ترین روش زمین‌آماری برای تخمین تبخیر-تعرق مرجع و پهنه‌بندی آن با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS پرداختند. (Sharghi et al. (2010 تبخیر-تعرق مرجع را با استفاده از روش فائو-پنمن-مانتیت در ۲۹ ایستگاه کلیماتولوژی و سینوپتیک انتخاب شده در استان یزد را محاسبه و سپس با برقراری ارتباط بین پارامتر تبخیر-تعرق با ارتفاع و همچنین روش عکس مجذور فاصله نقشه‌های مقادیر تبخیر-تعرق مرجع در سطح استان را پهنه‌بندی کردند. نتایج نشان داد که مناطق مرکزی، جنوبی و برخی از نواحی غربی استان از شدت تبخیر-تعرق بیشتری نسبت به مناطق شمالی و شرقی برخوردار هستند.

هدف اصلی از تحقیق حاضر ضمن تعیین اقلیم نقاط مختلف کشور براساس آخرین داده‌ها و پارامترهای ایستگاه‌های هواشناسی با استفاده

از روش دمارتن، تعیین بهترین روش برآورد تبخیر-تعرق مرجع (پتانسیل) در بین روش‌های مبتنی بر انتقال جرم برای اقلیم‌های مختلف کشور ایران، تهیه نقشه پهنه‌بندی تبخیر-تعرق در سراسر کشور و مشخص نمودن نقاط هم‌تبخیر-تعرق برای اقلیم‌های متفاوت با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS مورد نظر می‌باشد. همچنین هدف دیگر این تحقیق در آن است که با برداشت روزانه داده‌های لایسی‌متری در شهر کرمانشاه با اقلیم نیمه‌خشک و مقایسه آن با مدل‌های وضع شده براساس روش‌های مبتنی بر انتقال جرم، جهت تعیین بهترین روش برآورد تبخیر-تعرق مرجع اقدام و صحت آنها با روش‌های انتخابی مورد بررسی قرار گیرد.

۲- مواد و روش‌ها

در انجام این پژوهش داده‌های هواشناسی مورد نیاز شامل، دمای حداکثر، دمای حداقل، میانگین دما، میانگین رطوبت نسبی، بارندگی، سرعت باد و ساعت آفتابی به صورت روزانه از ایستگاه‌های سینوپتیک سازمان‌های هواشناسی واقع در ۳۱ استان ایران از بدو تأسیس تا سال ۲۰۱۵ میلادی از اداره کل هواشناسی جمع‌آوری شد. با توجه به اینکه دوره‌های آماری انتخاب شده برای تمام ایستگاه‌ها می‌بایستی یکسان باشند، یعنی در آن بازه آماری ایستگاه‌ها داده برداری داشته باشند. پس از بررسی‌های لازم، بازه زمانی ۱۹۹۹/۱/۱ تا ۲۰۱۳/۱۲/۳۱ برای ۱۵ سال آماری، کل ایستگاه‌های سینوپتیک کشور انتخاب شد. سپس خلأ آماری هر ایستگاه مشخص گردیده و بازسازی آماری آن‌ها با رگرسیون گیری، نسبت به موقعیت ایستگاه‌های مجاور، انجام گرفت. شکل ۱ موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک انتخابی در کشور را نشان می‌دهد.

در ابتدا با توجه به آخرین پارامترهای ایستگاه‌های هواشناسی و استفاده از روش دمارتن اقلیم‌های متفاوت در نقاط مختلف کشور دسته‌بندی شدند. برای محاسبه تبخیر-تعرق مرجع روش‌های غیرمستقیمی که بر اساس انتقال جرم پایه‌ریزی شده‌اند، در جدول ۱ ارائه شده‌اند. در این مطالعه روش فائو-پنمن-مانتیت به عنوان یک روش مبنای مقایسه و واسنجی سایر مدل‌های بر مبنای انتقال جرم انتخاب گردید. همچنین در قسمت دوم این تحقیق با برداشت روزانه داده‌های لایسی‌متری در شهر کرمانشاه با اقلیم نیمه‌خشک و مقایسه آن با مدل‌های وضع شده بر اساس انتقال جرم جهت تعیین و مقایسه با بهترین روش برآورد تبخیر-تعرق مرجع اقدام شد. برای این منظور آزمایش‌های صحرائی در مزرعه تحقیقاتی گروه مهندسی آب دانشگاه رازی واقع در کرمانشاه با طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۹ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۴

درجه و ۲۱ دقیقه شمالی و در ارتفاع ۱۳۱۹ متری از سطح دریا انجام گرفت.

لایسی مترها شیب‌دار بوده و به منظور سهولت در زهکشی تا ارتفاع ۱۵ سانتی‌متری داخل آنها شن درشت ریخته و سپس روی آنها یک صفحه توری فلزی قرار گرفت و سپس بقیه حجم داخلی لایسی مترها توسط خاک مزرعه توأم با کود حیوانی در چند مرحله پر و در هر مرحله نسبت به فشرده‌سازی خاک اقدام گردید. بافت خاک محل مورد استفاده سیلتی رسی بوده و میزان رطوبت آن در محدوده ظرفیت زراعی خاک ۳۳ درصد وزنی، نقطه پژمردگی دائم ۱۷ درصد وزنی و جرم مخصوص ظاهری آن ۱/۳ گرم بر سانتی متر مکعب اندازه‌گیری شد. جهت اندازه‌گیری دقیق محتوای آب خاک، هر ۳ لایسی متر در سه عمق مختلف ۲۰، ۴۰ و ۶۰ سانتی متری توسط سنسورهای سنجنده رطوبت (TDR⁵) مجهز شدند (شکل‌های ۲ و ۳). قبل از هر آبیاری میزان آب موجود در داخل پروفیل خاک به وسیله دستگاه (TDR) اندازه‌گیری می‌شد. برای اندازه‌گیری تبخیر-تعرق گیاهی توسط لایسی متر زهکش دار در دوره زمانی معین، از رابطه بیلان آبی خاک (۱) استفاده شد. برای محاسبات بیلان آبی می‌بایستی پارامترهای عمق آبیاری (I)، بارندگی (P)، تغییرات رطوبت خاک (ΔS) و میزان آب زهکشی شده (D) اندازه‌گیری شوند. لذا، در این رابطه، میزان آب خروجی از هر لایسی متر از طریق جمع‌آوری آب اضافی که از طریق لوله‌های زهکش به محل جمع‌آوری زه‌آب هدایت شده، به دست آمد. برای اندازه‌گیری آب زهکش شده در هر لایسی متر، ظروفی در محل خروجی قرار داده شد و بعد از هر آبیاری یا بارندگی، میزان حجم آب زهکش شده بر حسب لیتر اندازه‌گیری و سپس با تقسیم آن بر سطح مقطع لایسی متر به عمق آب تبدیل گردید. در لایسی مترها کشت چمن صورت گرفته و در طی یک سال به صورت روزانه تبخیر-تعرق مرجع به طور مستقیم و از طریق معادله بیلان آبی معادله (۱) برآورد گردید:

$$ETC = I + P - D \pm \Delta S \quad (1)$$

در معادله (۱) پارامترهای ETC، تبخیر-تعرق پتانسیل، I، عمق آب آبیاری، P، میزان بارندگی، D، میزان آب زهکشی شده و ΔS تغییرات رطوبت خاک می‌باشند.



Fig. 2- Lysimeter cultivated with grass and water drain chamber

شکل ۲- لایسی مترهای کشت شده با چمن، اتاقک جمع‌آوری زه‌آب

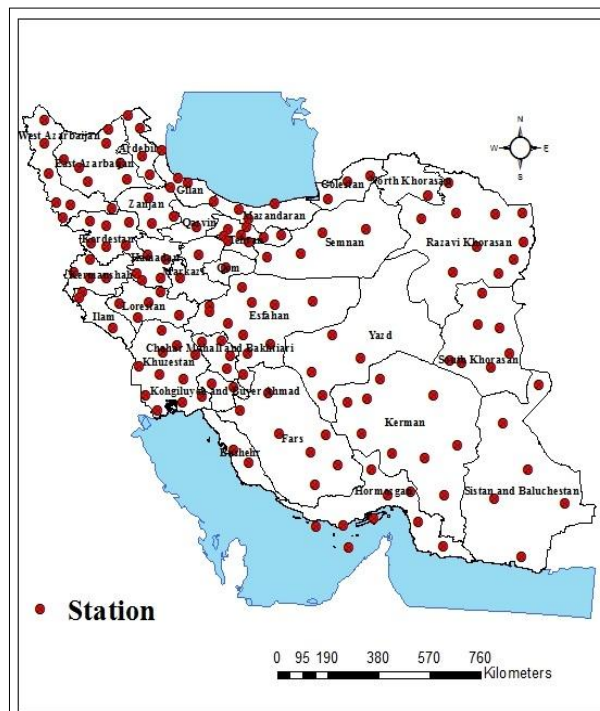


Fig. 1- Geographic location of Iran synoptic stations (not to scale)

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های سینوپتیک ایران (بدون مقیاس)

همچنین برای اجرای این آزمایش از ۳ دستگاه لایسی متر استوانه‌ای زهکش دار با قطر ۱/۲ متر و ارتفاع ۱/۴ متر استفاده گردید. در هر سه لایسی متر گیاه مرجع (چمن) کشت شد. لایسی مترها از کولهای سیمانی ساخته شده و جداره داخلی و خارجی آنها جهت جلوگیری از نشست آب و محافظت در مقابل واکنش‌های شیمیایی از داخل با ملات و از بیرون با ایزوگام عایق گردیدند (شکل‌های ۲ و ۳). کف

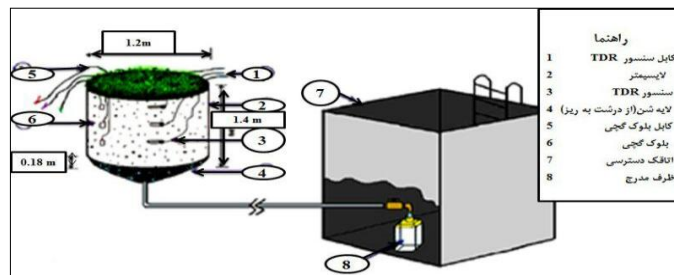


Fig. 3- Schematic of lysimeter and water drain chamber

شکل ۳- شماتیک لایسی متر و اتاقک جمع آوری زه آب

۱-۲- اقلیم بندی به روش دومارتن

که در آن λ گرمای نهان تبخیر (MJ kg^{-1}) و T دمای هوا ($^{\circ}\text{C}$) است.

$$\Delta = \frac{2504 \exp[17.27 T / (T + 237.7)]}{(T + 237.3)^2} \quad (5)$$

که Δ شیب منحنی فشار بخار ($^{\circ}\text{C}^{-1} \text{Kpa}$) است.

$$\gamma = 0.00163 P / \lambda \quad (6)$$

γ = ضریب سایکرومتری رطوبتی ($^{\circ}\text{C}^{-1} \text{Kpa}$) و P = فشار هوا (Kpa) که از رابطه زیر به دست می آید:

$$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065 Z}{293} \right)^{5.26} \quad (7)$$

که در آن Z = ارتفاع محل از سطح دریا (m) است.

$$R_a = 37.6 \text{ dr} (W_s \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \sin W_s) \quad (8)$$

$$W_s = \arccos(-\tan \phi \cdot \tan \delta) \quad (9)$$

$$\text{dr} = 1 + 0.033 \cos(0.0172 J) \quad (10)$$

$$\delta = 0.409 \sin(0.0172 J - 1.39) \quad (11)$$

$$J = \text{integer} (275 M/9 - 30 + D) \quad (12)$$

در این فرمول ها R_a = تابش برون زمینی ($\text{MJm}^{-2} \text{d}^{-1}$)، dr = فاصله نسبی زمین تا خورشید، δ = زاویه میل خورشید (رادیان)، ϕ = عرض جغرافیایی (رادیان)، W_s = زاویه ساعتی غروب خورشید (رادیان)، M = شماره ماه میلادی سال که تبخیر-تعرق برای آن محاسبه می شود، J = شماره روز ژولیوسی از ابتدای سال مسیحی و D = شماره روز از ماه است:

$$N = 7.64 W_s \quad (13)$$

که N حداکثر ساعات روشنایی در روز J از سال (ساعت) است.

$$R_n = 0.77 (0.25 + 0.50 n/N) R_a - 2.45 \times 10^{-9} (0.9 n/N + 0.1)(0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) (T_{kx}^4 + T_{kn}^4) \quad (14)$$

$$e_a = 0.611 \exp(17.27 T_d / (T_d + 237.3)) \quad (15)$$

روش دومارتن یکی از ساده ترین و پرکاربردترین روش های اقلیم بندی است که در اغلب پروژه های اقلیم شناسی، به ویژه در سدسازی، کشاورزی و غیره استفاده می شود. روش دومارتن به دو علت کاربرد بیشتری در ایران دارد. اول این که برای محاسبه ی پارامتر ضریب خشکی در این فرمول به دو عامل متوسط بارش سالانه و متوسط دمای سالانه نیاز است که هر دو در دسترس ترین عامل ها هستند. دوم اینکه این فرمول طبقه بندی بیشتری را در نظر گرفته که می تواند اقلیم های متنوع تری را نشان دهد. این روش بر اساس معادله (۲) بنا شده است:

$$I = P / (T + 10) \quad (2)$$

پارامترهای این رابطه عبارتند از: I ، ضریب خشکی دومارتن، P ، متوسط بارش سالانه (میلی متر)، T ، متوسط دمای سالانه (سانتی گراد).

۲-۲- مدل های تخمین تبخیر-تعرق مرجع

۱-۲-۲- مدل پنمن-مانتیث-فائو ۵۶ (PMF 56):

معادله کاربردی برای این مدل به قرار ذیل نشان داده شده است (Allen et al. 1998):

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \left(\frac{900}{T + 273} \right) U_2 (e_a - e_s)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (3)$$

که در آن، ET_0 ، تبخیر-تعرق پتانسیل مرجع (mm/day)، Δ شیب منحنی فشار بخار نسبت به درجه حرارت ($^{\circ}\text{C}^{-1} \text{Kpa}$)، R_n ، تابش خالص ($\text{MJ.m}^{-2} \text{d}^{-1}$)، G ، شار گرما به داخل خاک است که معمولاً صفر در نظر گرفته می شود، γ ضریب رطوبتی ($^{\circ}\text{C}^{-1} \text{Kpa}$)، T متوسط دمای روزانه ($^{\circ}\text{C}$)، e_a و e_s به ترتیب فشار بخار اشباع و فشار واقعی بخار آب (Kpa)، U_2 سرعت باد در روز در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین با واحد (m/s) میباشد. برای به دست آوردن اجزای معادله فائو-پنمن-مانتیث به ترتیب زیر عمل می شود:

$$\lambda = 2.501 - (2.361 \times 10^{-3}) \quad (4)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2}} \quad (17)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}} \quad (18)$$

$$MBE = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{n} \quad (19)$$

$$t = \sqrt{\frac{(n-1)MBE^2}{RMSE^2 - MBE^2}} \quad (20)$$

که در آنها، X مقادیر اندازه‌گیری شده تبخیر-تعرق، میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده تبخیر-تعرق، Y مقادیر برآورد شده، میانگین مقادیر برآورد شده، d_i اختلاف بین مقادیر برآورد شده با مقادیر اندازه‌گیری شده و n تعداد مشاهدات می‌باشد. هر چه مقدار RMSE و قدرمطلق MBE کوچک‌تر باشند، دقت مدل بالاتر است. مقادیر مثبت MBE نشان دهنده آن است که مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل بیشتر از مقدار واقعی و مقادیر منفی نشانگر آن است که مقادیر پیش‌بینی شده از مقادیر واقعی کمتر می‌باشند. عملکرد هر یک از روش‌ها بر اساس مقدار t سنجیده می‌شود. هر چقدر که مقدار t پایین‌تر باشد، به معنی کمتر بودن اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده‌است و آن روش عملکرد بهتری داشته است (Jacovides, 1997). با توجه به این که در برخی از موارد ممکن است، نتایج یک مدل دارای ضریب R بالایی بوده باشد، ولی نمایه‌های RMSE و MBE خطای زیادی را نشان دهند، با به کارگیری معیار خطای جدید مشکل انتخاب مدل بهینه به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود بخشیده می‌شود. بدین صورت که مقادیر R/t بالاتر، بیانگر سازگاری بهتر مدل با واقعیت می‌باشد (Sabziparvar, 2008).

که در این معادلات، n، تعداد ساعات واقعی آفتاب (ساعت)، e_d فشار واقعی بخار آب (Kpa)، T_{kn} و T_{kx} حداکثر و حداقل دمای روزانه (کلوین) و T_d دمای نقطه شبنم می‌باشد.

۲-۲-۲- معادلات مبتنی بر انتقال جرم

فرم کلی این معادلات به صورت زیر می‌باشد:

$$E = C \times U \times (e_s - e_a) \quad (16)$$

که در آن C، ضریب انتقال جرم، U، سرعت باد، e_s فشار بخار اشباع، e_a فشار واقعی بخار است. در جدول ۱ کلیه معادلات برآورد تبخیر-تعرق مرجع بر اساس انتقال جرم آمده است.

پارامترهای به کار رفته در معادلات مندرج در جدول شماره ۱ به همراه واحدهای آنها به شرح زیر می‌باشند:

e_s = فشار بخار اشباع (کیلوپاسکال)، e_a = فشار واقعی بخار هوا (کیلوپاسکال)، U = سرعت متوسط روزانه باد در ارتفاع دو متری از سطح زمین (متر بر ثانیه)، RH = میانگین رطوبت نسبی هوا (درصد)، T_a = میانگین دمای روزانه هوا (درجه سانتی گراد).

۳-۲- آنالیز آماری

نتایج به دست آمده از برآوردهای تبخیر-تعرق پتانسیل حاصل از مدل‌های تجربی تحت چهار شاخص آماری با نتایج حاصله از روش مرجع (پنمن-مانتیث-فائو) مقایسه شدند. این شاخص‌ها که توسط جاکوویدز (Jacovides 1997) پیشنهاد گردیده عبارتند از: ضریب رگرسیونی (R)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، متوسط خطای تخمین‌ها (MBE) و معیار جاکوویدز (t):

Table 1- Methods calculating reference evapotranspiration based on mass transmission

جدول ۱- روش‌های محاسبه تبخیر-تعرق مرجع بر اساس انتقال جرم

References	Formula
Dalton (1802)	$ET_O = (0.3648 + 0.07223 \times U_2) \times (e_s - e_a)$
Trabert (1896)	$ET_O = 3.075 \times (U_d)^{0.5} \times (e_s - e_a)$
Meyer (1926)	$ET_O = (3.75 + 0.5026 \times U_2) \times (e_s - e_a)$
Rohwer (1931)	$ET_O = (3.3 + 0.891 \times U_2) \times (e_s - e_a)$
Penman (1948)	$ET_O = [2.625 + (0.000479 / U_2)] \times (e_s - e_a)$
Albrecht (1950)	$ET_O = (1.005 + 2.97 \times U_2) \times (e_s - e_a)$
Romanenko (1961)	$ET_O = 0.00006 \times (T_a + 25)^2 \times (100 - RH)$
Brockamp and Wenner (1963)	$ET_O = 5.43 \times (U_2)^{0.456} \times (e_s - e_a)$
WMO (1966)	$ET_O = (1.298 + 0.934 \times U_2) \times (e_s - e_a)$
Mahringer (1970)	$ET_O = 2.859 \times (U_2)^{0.5} \times (e_s - e_a)$

در این تحقیق بر اساس آمارهای یاد شده، مناسب‌ترین روش برای هر ایستگاه پیشنهاد گردیده و به عنوان روش مبنا برای سایر ایستگاه‌های هم اقلیم فاقد مقادیر لایسی‌متری در نظر گرفته شد.

۴-۲- پهنه‌بندی تبخیر-تعرق

بعد از انتخاب مناسب‌ترین روش برآورد تبخیر-تعرق، جهت پهنه‌بندی تبخیر-تعرق سالیانه و رسم نقشه هم تبخیر-تعرق (ISOETO) از روش Kriging در محیط نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد. روش کریجینگ بر پایه همبستگی مکانی مشاهدات در قالب ایجاد یک مدل ریاضی به نام واریوگرام استوار است که به کمک آن مقدار تبخیر در نقاط فاقد نمونه‌برداری تخمین زده می‌شود (Zareabayneh et al., 2010).

۳- یافته‌های تحقیق

تبخیر-تعرق برای تمام ایستگاه‌های سینوپتیک کشور با استفاده از معادلات مبتنی بر انتقال جرم مندرج در جدول شماره ۱، محاسبه و با مقایسه این روش‌ها با روش پنمن مانیتث و بهره‌گیری از پارامترهای آماری، روش برتر در هر ایستگاه و در نهایت برای هر اقلیم مشخص گردید. نتایج به‌دست آمده از بررسی بهترین روش‌های برآورد تبخیر-تعرق مرجع مبتنی بر روش‌های انتقال جرم در کل ایستگاه‌های کشور نشانگر آن است که با لحاظ کلیه پارامترهای مختلف آماری در اقلیم خشک به ترتیب روش‌های سازمان جهانی هواشناسی و ترابرت با پوششی در حدود ۳۲٪ و ۱۷٪ کل ایستگاه‌ها به عنوان بهترین اولویت‌های اول و دوم روش‌های برآورد تبخیر-تعرق، و روش‌های آلبرت و رومانکو نیز به ترتیب با در حدود ۳٪ و صفر٪ پوشش ایستگاه‌ها به عنوان بدترین اولویت‌های اول و دوم روش‌های برآورد تبخیر-تعرق می‌باشند.

تبخیر-تعرق می‌باشند. در جدول ۲، نتایج محاسبات تبخیر-تعرق و به عنوان نمونه برای اقلیم خشک شاخص‌های آماری ایستگاه بافت آورده شده است. همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، ضریب همبستگی (R) تمامی معادلات به ۰/۹ نزدیک می‌باشند، لذا، برای انتخاب روش مناسب شاخص‌های آماری RMSE و MBE در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج مندرج در جدول شماره ۲ مشاهده می‌شود که روش میسر و روش دالتون^۷ در مقایسه با سایر روش‌ها کمترین RMSE را داشته است. شاخص بعدی که از آن می‌توان برای انتخاب روش مناسب استفاده کرد معیار جاکوویدز (t) است، که مقدار پایین این معیار نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل می‌باشد، در روش دالتون این معیار مقدار کمتری داشته، در نتیجه با توجه به موارد گفته شده می‌توان به این نتیجه رسید که برای ایستگاه بافت می‌توان روش دالتون را روش مناسب جهت اندازه‌گیری تبخیر-تعرق معرفی کرد و روش رومانکو را بدترین روش محاسباتی تبخیر-تعرق برای این ایستگاه در نظر گرفت. همچنان که در شکل ۴ دیده می‌شود، نمودار روش رومانکو به عنوان بدترین روش بیشترین فاصله را از نمودار پنمن-مانیتث دارا می‌باشد.

نتایج به‌دست آمده نشانگر آن هستند که با لحاظ کلیه پارامترهای مختلف آماری از میان روش‌های مناسبی که برای برآورد تبخیر-تعرق در هر ایستگاه انتخاب شد، در اقلیم‌های نیمه‌خشک به ترتیب روش‌های میسر و ترابرت با پوششی در حدود ۳۷٪ و ۲۳٪ کل ایستگاه‌های این اقلیم به عنوان بهترین اولویت‌های اول و دوم روش‌های برآورد تبخیر-تعرق و از میان روش‌های نامناسب منتخب برای هر ایستگاه روش‌های رومانکو و آلبرت نیز به ترتیب با صفر٪ و صفر٪ پوشش ایستگاه‌ها (اقلیم نیمه‌خشک) به عنوان بدترین اولویت‌های اول و دوم روش‌های برآورد تبخیر-تعرق می‌باشند.

Table 2- Statistical results of Baft station (dry climate)
جدول ۲- نتایج محاسبات آماری ایستگاه بافت (اقلیم خشک)

Models	Mean (mm/day)	R	RMSE	MBE	t	R/t
Dalton (1802)	3.53	0.95	0.71	0.04	3.77	0.25
Trabert (1896)	2.97	0.93	0.90	-0.52	52.81	0.02
Meyer (1926)	3.26	0.95	0.65	-0.23	27.51	0.03
Rohwer (1931)	3.55	0.94	0.78	0.06	5.63	0.17
Penman (1948)	1.76	0.90	1.98	-1.73	132.94	0.01
Albrecht (1950)	5.16	0.86	3.16	1.67	46.00	0.02
Romanenko (1961)	7.01	0.92	4.17	3.51	115.42	0.01
Brockamp & Wenner (1963)	5.06	0.93	2.35	1.56	66.05	0.01
WMO (1966)	2.28	0.91	1.41	-1.21	123.20	0.01
Mahringer (1970)	2.76	0.93	1.00	-0.73	79.36	0.01
FAO-Penman	3.49	.....	.....	.....	.....	.....

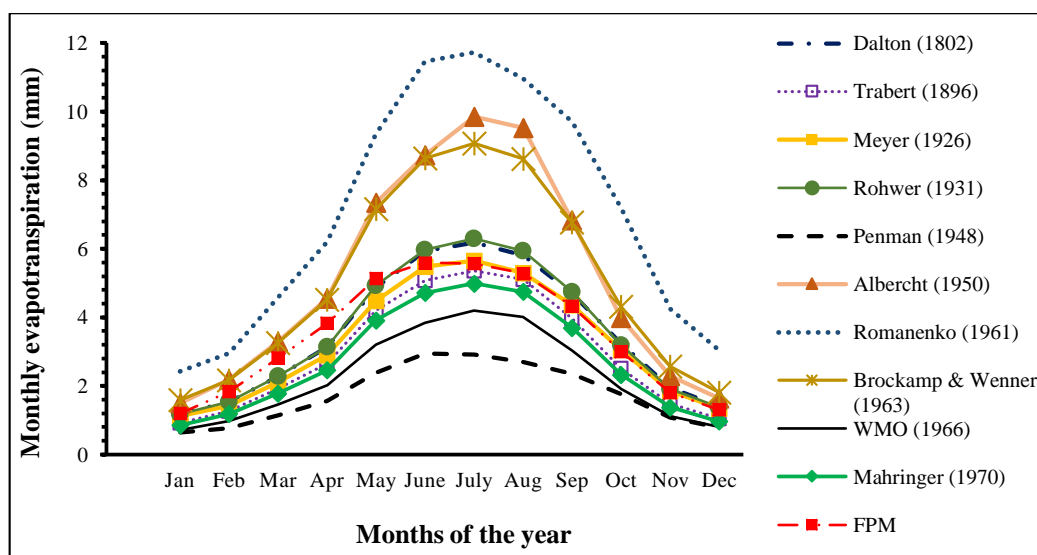


Fig. 4- Evapotranspiration diagram based on mass transfer methods (Baft station)

شکل ۴- نمودار تبخیر-تعرق بر اساس روش‌های انتقال جرم (ایستگاه بافت)

بودند از پنمن و سازمان جهانی هواشناسی هر کدام با پوشش صفر٪. خلاصه نتایج حاصله برای تمامی اقلیم‌های ذکر شده در جدول ۳ آمده‌اند.

در جدول ۴ که نمونه‌ای از آن مربوط به ایستگاه داران (جهت اقلیم نیمه‌خشک) ارائه شده با توجه به مقادیر RMSE به ترتیب روش‌های دالتون، میبیر، روهور گزینه‌های مناسبی بودند. همچنین با توجه به شاخص MBE روش دالتون با داشتن کمترین مقدار برای این پارامتر، مناسب‌تر از دو گزینه دیگر می‌باشد. ضمناً در روش دالتون، معیار t کمترین مقدار و پارامتر R/t بیشترین مقدار را دارا بوده که نشان‌دهنده عملکرد بهتر آن روش نسبت به دو روش دیگر می‌باشد. در این ایستگاه، روش آلبرت با وجود آنکه مقدار معیار جاکوویدز آن نسبت به سایر روش‌ها پایین‌تر می‌باشد، اما با توجه به بالا بودن مقدار RMSE و همچنین همپوشانی نامناسب نمودار این روش با روش فائو-پنمن-مانیت، نمی‌توان آن را به عنوان روش برتر انتخاب نمود.

در رابطه با اقلیم مدیترانه‌ای نیز نتایج حاکی از آن است که روش‌های سازمان جهانی هواشناسی و پنمن هر کدام با پوششی در حدود ۵۰٪ ایستگاه‌ها (اقلیم مدیترانه‌ای) به عنوان بهترین اولویت‌های اول و دوم روش‌های برآورد تبخیر-تعرق و روش‌های آلبرت و رومانکو و نیز با پوششی در حدود صفر درصد ایستگاه‌های این اقلیم به عنوان بدترین اولویت‌های اول و دوم روش‌های برآورد تبخیر-تعرق می‌باشند. همچنین نتایج نشان داد که در اقلیم‌های نیمه‌مرطوب و مرطوب نیز به ترتیب دو اولویت بهترین و بدترین روش‌های برآورد تبخیر-تعرق عبارت بودند از روهور و بروکمپ و ونر با پوششی در حدود (۵۰٪ و ۲۵٪) و (۶۷٪ و ۳۷٪) به عنوان بهترین (از میان ایستگاه‌های مربوط به این اقلیم) و رومانکو و پنمن در هر دو اقلیم مرطوب و نیمه‌مرطوب هر کدام با پوششی به ترتیب معادل صفر٪ و صفر٪ پوشش به عنوان بدترین اولویت‌های اول و دوم شناخته شدند. ترتیب بهترین اولویت‌های اول و دوم در اقلیم‌های بسیار مرطوب نیز عبارت بودند از بروکمپ و ونر با ۴۳٪ و رومانکو با ۲۹٪ و بدترین اولویت‌های اول و دوم عبارت

Table 3- The best and worst method for estimating evapotranspiration in different climates of Iran

جدول ۳- بهترین و بدترین روش برآورد تبخیر-تعرق در اقلیم‌های مختلف ایران

Climate	Best methods		Worst methods	
	First	Second	First	Second
Dry	WMO	Trabert	Albrecht	Romanenko
Semi - arid	Meyer	Trabert	Romanenko	Albrecht
Mediterranean	WMO	Penman	Albrecht	Romanenko
Semi-humid	Rohwer	Brockamp and Wenner	Romanenko	Penman
Humid	Rohwer	Brockamp and Wenner	Romanenko	Penman
Very humid	Brockamp and Wenner	Romanenko	Penman	WMO

همبستگی ۰/۸۵، جذر میانگین مربعات خطا ۴/۷۳ و مقدار متوسط خطای تخمین ۳/۷۱ به عنوان بدترین روش انتخاب گردید. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده، روش پنمن نزدیکترین نمودار به نمودار روش مرجع و نمودار روش رومانکو دورترین نمودار به روش مرجع است.

در جدول ۶، برای ایستگاه ابعلی (اقلیم نیمه مرطوب)، نیز با توجه به کلیه شاخص‌های آماری روش (Rohwer (1931) و Romanenko (1961) به ترتیب بهترین و بدترین روش‌های انتخابی برای ایستگاه ابعلی (اقلیم نیمه مرطوب) می‌باشد. ضمناً همچنان که در شکل ۷ پیداست، این روش‌ها به ترتیب همپوشانی مناسب و نامناسب روش‌های انتخابی با روش فائو-پنمن-مانتیت را نشان می‌دهند.

در نتیجه با توجه به مطالب ذکر شده برای ایستگاه داران، روش دالتون گزینه مناسب انتخاب و روش رومانکو با داشتن بالاترین مقدار RMSE و MBE بدترین گزینه برآورد تبخیر-تعرق در این ایستگاه انتخاب شده‌است. در شکل ۵، روش دالتون بیشترین انطباق و همپوشانی را با نمودار فائو-پنمن-مانتیت داشته و نمودار روش رومانکو به عنوان بدترین روش بیشترین فاصله را از نمودار پنمن-مانتیت دارد.

در جدول ۵، برای ایستگاه لردگان (اقلیم مدیترانه‌ای)، از میان مدل‌های بررسی شده، روش پنمن با داشتن ضریب همبستگی ۰/۸۵، جذر میانگین مربعات خطا ۱/۱۷ و مقدار متوسط خطای تخمین ۰/۵۷- به عنوان بهترین روش انتخاب گردید. روش رومانکو با داشتن ضریب

Table 4- Statistical results of Daran station (Semi-arid)

جدول ۴- نتایج محاسبات آماری ایستگاه داران (اقلیم نیمه خشک)

Models	Mean(mm/day)	R	RMSE	MBE	t	R/t
Dalton (1802)	2.79	0.94	0.71	-0.16	16.94	0.06
Trabert (1896)	2.05	0.90	1.20	-0.90	83.22	0.01
Meyer (1926)	2.66	0.94	0.72	-0.28	31.96	0.03
Rohwer (1931)	2.73	0.94	0.72	-0.22	24.00	0.04
Penman (1948)	1.59	0.91	1.65	-1.36	108.47	0.01
Albrecht (1950)	3.13	0.85	1.56	0.19	8.92	0.10
Romanenko (1961)	5.59	0.93	3.48	2.64	86.02	0.01
Brockamp & Wenner (1963)	3.56	0.90	1.65	0.61	29.28	0.03
WMO (1966)	1.57	0.92	1.61	-1.38	121.33	0.01
Mahringer (1970)	1.91	0.90	1.31	-1.04	97.35	0.01
FAO-Penman	2.95	.....	.....	.....	.....	.....

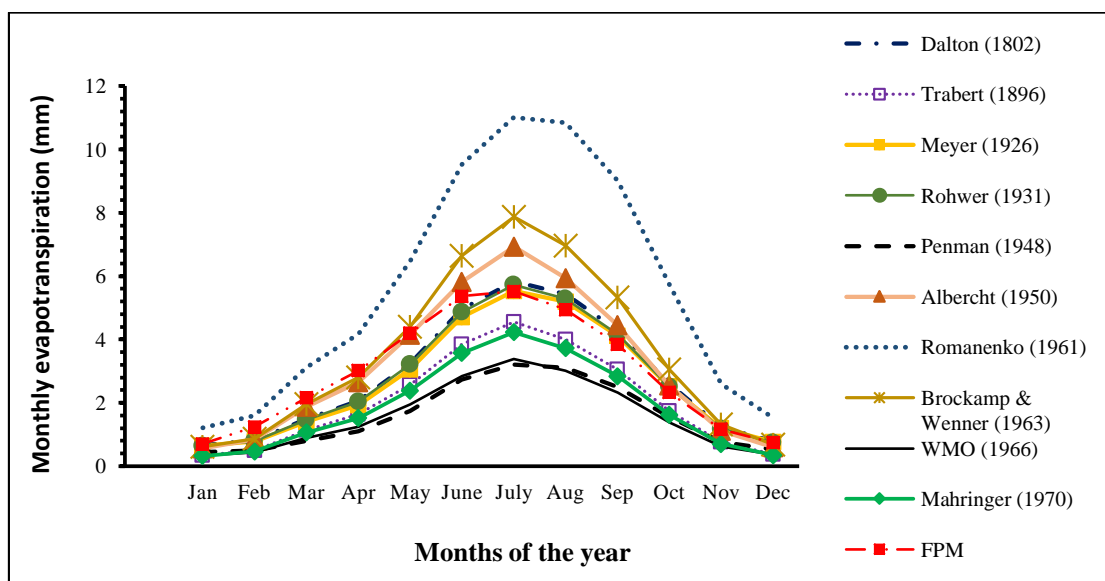


Fig. 5- Evapotranspiration diagram based on mass transfer methods (Daran station)

شکل ۵- نمودار تبخیر-تعرق بر اساس روش‌های انتقال جرم (ایستگاه داران)

Table 5- Statistical results of Lordegan station (Mediterranean)
 جدول ۵- نتایج محاسبات آماری ایستگاه لردگان (اقلیم مدیترانه‌ای)

Models	Mean(mm/day)	R	RMSE	MBE	t	R/t
Dalton (1802)	4.18	0.92	1.67	0.93	49.85	0.02
Trabert (1896)	2.45	0.82	1.57	-0.80	43.71	0.02
Meyer (1926)	4.09	0.92	1.58	0.85	46.96	0.02
Rohwer (1931)	3.99	0.93	1.49	0.74	42.20	0.02
Penman (1948)	2.67	0.85	1.17	-0.57	41.69	0.02
Albrecht (1950)	3.53	0.81	2.30	0.29	9.27	0.09
Romanenko (1961)	6.96	0.85	4.73	3.71	93.61	0.01
Brockamp & Wenner (1963)	4.33	0.83	2.97	1.08	28.83	0.03
WMO (1966)	2.07	0.90	1.43	-1.18	108.30	0.01
Mahringer (1970)	2.28	0.82	1.59	-0.97	57.15	0.01
FAO-Penman	3.25	.....	.....	.....	.....	.....

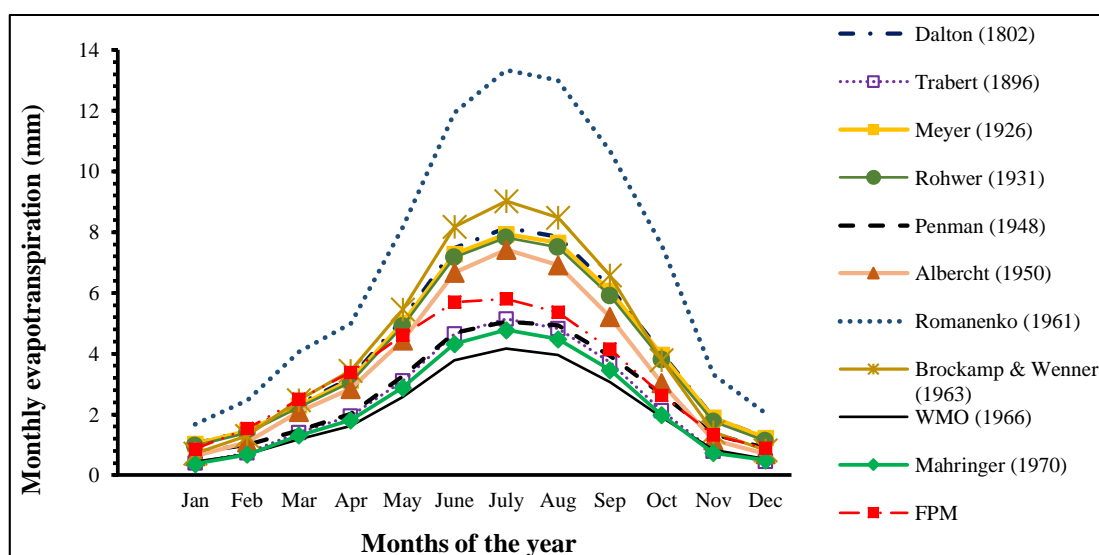


Fig. 6- Evapotranspiration diagram based on mass transfer methods (Lordegan station)
 شکل ۶- نمودار تبخیر-تعرق بر اساس روش‌های انتقال جرم (ایستگاه لردگان)

Table 6- Statistical results of Ab Ali station (Semi-humid climate)
 جدول ۶- نتایج محاسبات آماری ایستگاه ابعلی (اقلیم نیمه مرطوب)

Models	Mean(mm/day)	R	RMSE	MBE	t	R/t
Dalton (1802)	2.40	0.94	0.72	-0.33	37.98	0.02
Trabert (1896)	1.95	0.91	1.07	-0.77	77.80	0.01
Meyer (1926)	2.23	0.94	0.79	-0.50	59.73	0.02
Rohwer (1931)	2.40	0.93	0.75	-0.33	35.89	0.03
Penman (1948)	1.23	0.92	1.83	-1.49	105.28	0.01
Albrecht (1950)	3.35	0.85	1.99	0.62	24.34	0.03
Romanenko (1961)	4.84	0.92	2.97	2.11	74.73	0.01
Brockamp & Wenner (1963)	3.34	0.92	1.53	0.61	32.05	0.03
WMO (1966)	1.51	0.90	1.49	-1.22	104.85	0.01
Mahringer (1970)	1.82	0.91	1.17	-0.91	91.24	0.01
FAO-Penman	2.73	.....	.....	.....	.....	.....

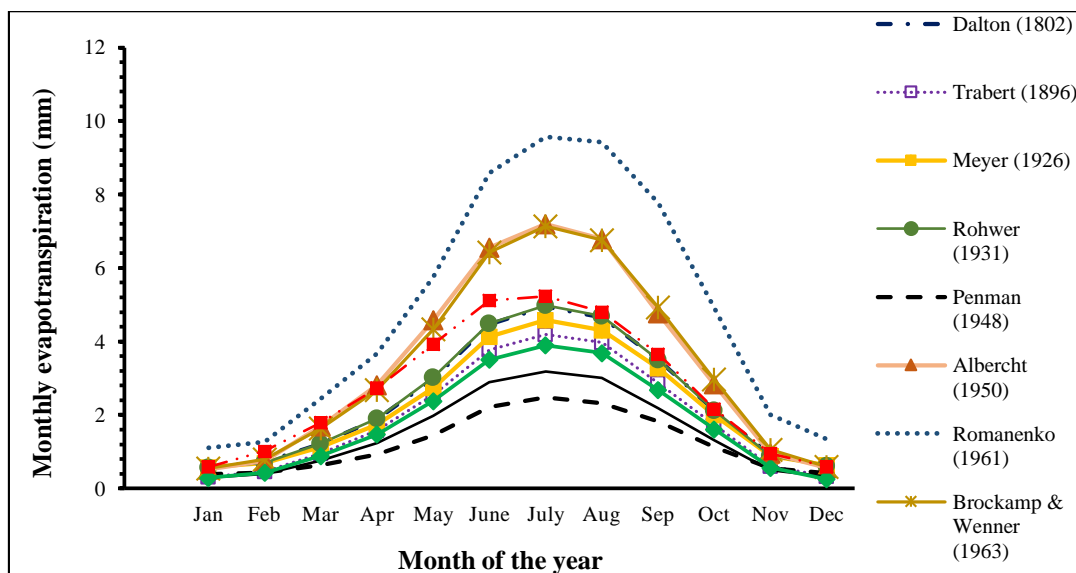


Fig. 7- Evapotranspiration diagram based on mass transfer methods (Ab Ali station)

شکل ۷- نمودار تبخیر-تعرق بر اساس روش‌های انتقال جرم (ایستگاه ابعلی)

۳-۱- پهنه‌بندی تبخیر-تعرق کشور ایران براساس بهترین روش بر پایه انتقال جرم

از آنجا که تبخیر-تعرق متغیری است پیوسته که به موقعیت جغرافیایی نقاط ایستگاهی وابسته است، لذا دارای پراکنش مکانی بوده و این موضوع اهمیت مدیریت مکانی تبخیر-تعرق را تأیید می‌کند. با توجه به همبستگی بالای تبخیر-تعرق نسبت به مکان به دلیل تفاوت‌های اقلیمی هر ناحیه با ناحیه دیگر، تهیه نقشه تبخیر-تعرق با دقت مناسب بر اساس نتایج حاصل از روش کریجینگ در شکل ۱۰ انجام و پهنه‌بندی تبخیر-تعرق کشور با روش مرجع نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱۰ قابل مشاهده است، با طبقه‌بندی فضایی کشور پهنه‌هایی که کمترین شدت خشکی را دارند، منطبق بر نوار ساحلی شمال ایران و نیز ارتفاعات زاگرس کردستان در شمال غرب می‌باشند. یعنی کمترین میزان شدت تبخیر-تعرق محدود به سواحل جنوبی دریایی خزر، به خصوص سواحل جنوب‌غربی آن در استان گیلان و هم چنین حاشیه‌ی مرزی شمال‌غرب و غرب ایران تا جنوب استان کرمانشاه می‌باشد. به عبارتی، می‌توان گفت مرطوب‌ترین نقاط کشور در میانگین سالانه، استان‌های گیلان، مازندران و بخش غربی استان‌های آذربایجان غربی، کردستان، کرمانشاه و بعضی قسمت‌های آذربایجان شرقی می‌باشند. در کلاس‌های پایین‌تر، می‌توان به نواحی زاگرس میانی و مناطق مرتفع آذربایجان که استان‌های لرستان، همدان، چهارمحال و بختیاری، کهگیلویه و بویر احمد و بخش‌های شمالی استان هرمزگان را شامل می‌شود، اشاره کرد.

با در نظر گرفتن جدول ۷، دو روش رومانکو و بروکمپ وونر هر دو کمترین مقدار RMSE را دارا هستند. اما در روش بروکمپ وونر مقدار MBE و t نسبت به روش رومانکو کمتر می‌باشد. در نتیجه این روش به عنوان روش برتر برای ایستگاه بابلسر (اقلیم مرطوب) و روش پنمن به‌عنوان گزینه نامناسب جهت برآورد تبخیر-تعرق انتخاب گردید. ضمناً در شکل ۸ تطابق مناسب و نامناسب روش‌های انتخابی با روش پنمن مانیت نشان داده شده است.

با در نظر گرفتن نتایج جدول ۸ و بررسی مدل‌ها برای ایستگاه بندرانزلی (اقلیم بسیار مرطوب)، مشاهده می‌گردد که با توجه به ضرایب و پارامترهای آماری مورد نظر، دو روش رومانکو و بروکمپ وونر هر دو کمترین مقدار RMSE را به خود اختصاص داده‌اند. اما در روش بروکمپ وونر مقدار MBE و t نسبت به روش رومانکو کمتر می‌باشد در نتیجه روش بروکمپ وونر عملکرد بهتری دارد.

روش پنمن در این ایستگاه به عنوان گزینه نامناسب جهت برآورد تبخیر-تعرق در این ایستگاه انتخاب شد. ضمناً در شکل ۹ تطابق مناسب و نامناسب روش‌های انتخابی با روش پنمن مانیت نشان داده شده است.

در جدول ۹، نتایج انتخاب بهترین روش‌های بر پایه انتقال جرم برای ایستگاه‌های سینوپتیک کشور (ایران) ارائه شده است.

Table 7- Statistical results of Babolsar station (Humid climate)

جدول ۷- نتایج محاسبات آماری ایستگاه بابلسر (اقلیم مرطوب)

Models	Mean(mm/day)	R	RMSE	MBE	t	R/t
Dalton (1802)	1.88	0.84	1.07	-0.61	51.40	0.02
Trabert (1896)	1.42	0.84	1.41	-1.07	86.97	0.01
Meyer (1926)	1.80	0.83	1.13	-0.69	57.36	0.01
Rohwer (1931)	1.84	0.84	1.09	-0.65	55.57	0.02
Penman (1948)	1.06	0.81	1.80	-1.43	95.77	0.01
Albrecht (1950)	2.09	0.80	1.11	-0.40	28.71	0.03
Romanenko (1961)	2.42	0.86	0.82	-0.07	6.02	0.14
Brockamp & Wenner (1963)	2.46	0.84	0.99	-0.03	2.13	0.40
WMO (1966)	1.05	0.84	1.78	-1.44	101.28	0.01
Mahringer (1970)	1.32	0.84	1.50	-1.17	92.39	0.01
FAO-Penman	2.49	.....	.....	.....	.....	.....

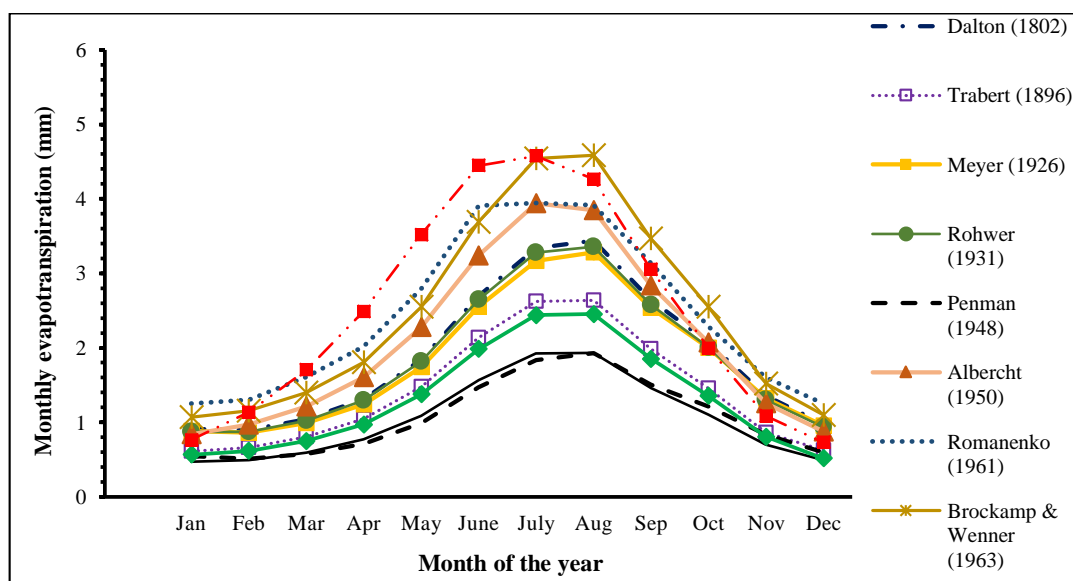


Fig. 8- Evapotranspiration diagram based on mass transfer methods (Babolsar station)

شکل ۸- نمودار تبخیر-تعرق بر اساس روش‌های انتقال جرم (ایستگاه بابلسر)

Table 8- Statistical results of Bandar Anzali station (Very-humid climate)

جدول ۸- نتایج محاسبات آماری ایستگاه بندر انزلی (اقلیم بسیار مرطوب)

Models	Mean(mm/day)	R	RMSE	MBE	t	R/t
Dalton (1802)	1.56	0.75	1.32	-0.81	56.67	0.01
Trabert (1896)	1.24	0.70	1.61	-1.13	72.63	0.01
Meyer (1926)	1.46	0.77	1.37	-0.90	63.84	0.01
Rohwer (1931)	1.54	0.74	1.35	-0.82	56.38	0.01
Penman (1948)	0.83	0.76	1.95	-1.53	94.92	0.01
Albrecht (1950)	2.00	0.59	1.59	-0.36	17.23	0.03
Romanenko (1961)	1.94	0.78	1.13	-0.39	27.01	0.03
Brockamp & Wenner (1963)	2.13	0.71	1.27	-0.24	13.99	0.05
WMO (1966)	0.94	0.68	1.88	-1.42	86.00	0.01
Mahringer (1970)	1.15	0.70	1.68	-1.21	77.27	0.01
FAO-Penman equation	2.36	.....	.....	.....	.....	.....

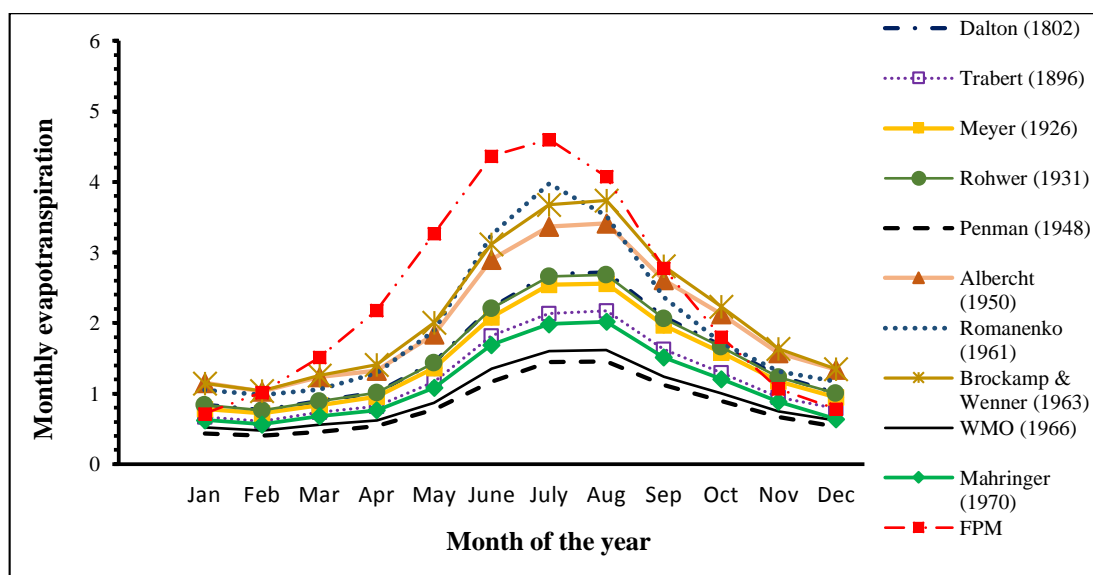


Fig. 9- Evapotranspiration diagram based on mass transfer methods (Bandar Anzali station)
 شکل ۹- نمودار تبخیر-تعرق بر اساس روش‌های انتقال جرم (ایستگاه بندرانزلی)

Table 9- Results of selection of the best methods based on mass transfer at Iran synoptic stations of the country (Iran)

جدول ۹- نتایج انتخاب بهترین روش‌های بر پایه انتقال جرم در ایستگاه‌های سینوپتیک کشور ایران

Climate	ETo (FAO)(mm/day)	ETO (mm/day)	Best Methods	Station
Dr	3.40	3.35	Me	Mehr abad
Dr	3.24	3.32	Da	Doshan
Dr	4.04	4.18	Roh	Airport (Boshehr)
Dr	4.51	4.42	WMO	Dehloran
Dr	3.80	3.38	WMO	Airport (Esfahan)
Dr	3.33	3.42	Al	Kashan
Dr	2.69	3.54	Me	Natanz
Dr	3.60	3.72	Tr	Shahreza
Dr	3.49	2.97	Tr	Esfahan
Dr	4.24	4.67	WMO	Naen
Dr	3.54	3.49	Al	Khor
Dr	3.58	3.46	Ma	Golpaygan
Dr	3.63	3.66	Tr	Kabutarabad
Dr	2.87	2.58	Tr	Sahand
Dr	3.03	2.92	Tr	Jolfa
Dr	3.36	3.66	Me	Kashmar
Dr	3.28	3.22	Tr	Mashhad
Dr	3.61	3.24	Ma	Gonabad
Dr	3.40	3.29	Tr	Sarakhs
Dr	2.82	3.80	WMO	Torbat jam
Dr	3.26	3.31	Me	Torbat heydar
Dr	3.74	3.40	WMO	Sabzevar
Dr	3.94	3.63	Tr	Tabas
Dr	4.79	3.75	Pe	Khor birjand
Dr	3.64	3.44	Ma	Birjand
Dr	3.80	3.53	WMO	Boshruye
Dr	3.57	3.44	Ma	Ghaen
Dr	3.86	3.96	Ma	Ferdos
Dr	4.16	3.88	WMO	Nehbandan
Dr	4.40	4.75	WMO	Ardestar
Dr	2.97	2.82	Da	Shahrod
Dr	3.77	3.88	Ma	Garmsar
Dr	3.41	3.39	Tr	Biarjmand

Table 9- Results of selection of the best methods based on mass transfer at Iran synoptic stations of the country (Iran)

ادامه جدول ۹- نتایج انتخاب بهترین روش‌های بر پایه انتقال جرم در ایستگاه‌های سینوپتیک کشور ایران

Climate	ETo (FAO)(mm/day)	ETO (mm/day)	Best Methods	Station
Dr	3.44	3.56	Me	Semnan
Dr	3.28	2.82	Tr	Neysabor
Dr	4.47	4.30	WMO	Ahvaz
Dr	4.58	4.33	Pe	Ramhormoz
Dr	4.78	5.24	WMO	Mahshahr
Dr	4.70	5.22	WMO	Omidiye
Dr	4.74	5.03	WMO	Abadan
Dr	3.82	3.65	Pe	Dezful
Dr	4.60	4.33	Pe	Shushtar
Dr	4.14	3.71	Pe	Behbahan
Dr	4.85	3.91	Pe	Bustan
Dr	3.72	3.71	WMO	Golmaka
Dr	4.40	4.86	WMO	Anar
Dr	3.83	3.86	Ma	Shahrbabak
Dr	3.86	3.83	Tr	Sirjan
Dr	3.50	3.53	Da	Baft
Dr	4.49	4.63	Ma	Bam
Dr	3.75	3.24	WMO	Ghom
Dr	4.55	4.33	WMO	Lar
Dr	4.23	4.13	Pe	Darab
Dr	3.92	3.76	Ma	Dorodzan
Dr	5.34	4.19	Pe	Zahak
Dr	2.88	3.93	WMO	Saravan
Dr	4.47	4.31	WMO	Khash
Dr	4.52	4.85	WMO	Iranshahr
Dr	5.00	3.83	WMO	Zahedan
Dr	4.22	3.01	Pe	Zabol
S-a	3.31	3.31	Tr	Karaj
S-a	2.95	2.79	Da	Daran
S-a	2.29	1.95	Roh	Meshkin
S-a	2.97	2.52	Me	Pars abad
S-a	2.55	2.57	Da	Ardabil
S-a	2.47	2.30	Da	Maku
S-a	2.87	2.94	Da	Oromiye
S-a	2.97	2.92	Me	Takab
S-a	2.93	2.99	Me	Mahabad
S-a	2.70	2.86	Me	Khoy
S-a	3.06	2.96	Me	Tabriz
S-a	3.06	2.87	Me	Maraghe
S-a	2.99	3.24	Me	Miyane
S-a	2.66	2.76	Da	Sarab
S-a	2.62	2.57	Roh	Ahar
S-a	3.09	3.09	Tr	Saghez
S-a	3.84	3.82	Tr	Fasa
S-a	3.40	2.98	Tr	Abade
S-a	2.88	2.96	M	Khoram dare
S-a	2.88	2.93	M	Zanjan
S-a	2.99	2.80	M	Khodabande
S-a	2.86	2.96	M	Ghochan
S-a	4.05	4.17	Ma	Masjed soleyman
S-a	4.40	4.28	Pe	Izeh
S-a	2.80	2.85	M	Bujnord
S-a	3.06	3.42	M	Sharekurd
S-a	3.21	3.52	M	Burojen
S-a	3.40	3.35	M	Zheofizik
S-a	2.86	2.65	Da	Shemiran
S-a	3.05	2.85	Ma	Firozkuh
S-a	3.58	3.01	WMO	Khoram abad
S-a	3.07	3.10	Tr	Gonbad kavos
S-a	2.78	2.78	Me	Gorgan

Table 9- Results of selection of the best methods based on mass transfer at Iran synoptic stations of the country (Iran)

ادامه جدول ۹- نتایج انتخاب بهترین روش‌های بر پایه انتقال جرم در ایستگاه‌های سینوپتیک کشور ایران

Climate	ETo (FAO)(mm/day)	ETO (mm/day)	Best Methods	Station
S-a	3.02	3.06	Da	Marave Tape
S-a	3.92	3.92	Tr	Dogonbadan
S-a	3.27	3.16	Ma	Ealam Abad
S-a	3.64	3.78	Ma	Sarpole Zahab
S-a	3.32	3.29	Tr	Ravansar
S-a	2.96	3.10	Me	Ghazvin
S-a	3.83	3.59	Ma	Shiraz
S-a	3.72	3.65	Pe	Zarghan
S-a	3.45	3.02	WMO	Kermanshah
S-a	3.06	2.72	Tr	Kangavar
S-a	3.09	3.04	Me	Bijar
S-a	3.13	3.08	Me	Ghorve
S-a	3.09	3.28	Me	Arak
S-a	4.15	3.74	WMO	Poldokhtar
S-a	3.53	3.15	WMO	Aligodarz
S-a	3.42	3.48	Tr	Burojerd
S-a	2.88	2.70	Me	Zarine
S-a	3.44	3.28	Tr	Ilam
S-a	1.62	3.39	Ma	Kuhdasht
S-a	3.18	3.11	Tr	Sanandaj
S-a	2.55	2.41	Roh	Khal khal
S-a	3.14	3.06	Ma	Nuzhe
S-a	3.31	3.38	Tr	Malayer
S-a	3.04	2.77	Tr	Airport (Hamedan)
Dr	4.04	4.00	WMO	Saveh
Dr	4.03	4.05	Ma	Yazd
Dr	4.48	4.65	WMO	Robat
Dr	2.49	3.24	Roh	Jask
Dr	4.35	4.21	Me	Gheshm
Dr	4.45	4.04	Tr	Minab
Dr	4.45	4.55	Tr	Bandar Abas
Dr	4.38	3.91	Roh	Sirik
Dr	4.55	4.50	Me	Bandar Lenge
Dr	4.28	4.04	Roh	Kish
Dr	4.29	3.72	Roh	Abumosa
Dr	5.05	4.76	Pe	Haji abad
Dr	3.07	3.15	Me	Manjil
Dr	5.10	5.77	WMO	Kahnuj
Dr	3.93	4.23	Ma	Kerman
V-h	2.24	2.21	B&W	Ramsar
V-h	2.35	2.27	Al	Nushahr
V-h	3.31	2.24	Ro	Astara
V-h	3.31	2.25	Ro	Rasht
V-h	2.36	2.13	B&W	Bandar Anzali
V-h	3.04	2.86	Tr	Marivan
V-h	2.74	2.65	B&W	Kuhrang
S-h	2.46	2.40	Roh	Ghrakhil
S-h	2.40	2.81	B&W	Chitgar
S-h	2.73	2.40	Roh	Ab ali
S-h	3.00	3.07	Me	Piranshahr
H	3.27	3.42	Roh	Yasuj
H	2.49	2.46	B&W	Babolsar
H	2.96	2.41	Roh	Sardast
Dr	2.53	4.86	WMO	Marvest
M	3.25	2.67	Pe	Lordegan
M	3.88	3.62	WMO	Eyvan

Climate : Dr (Dry) , S-a (Semi- arid) , M (Mediterranean) , H (Humid) , S-h (Semi- humid) , V-h (Very humid)
 Best Methods: Da (Dalton), Tr (Trabert), M (Meyer), Roh (Rohwer), Pe (Penman), Al (Albrecht), Ro (Romanenko), B & W(Brockamp & Wenner), Ma (Mahringer)

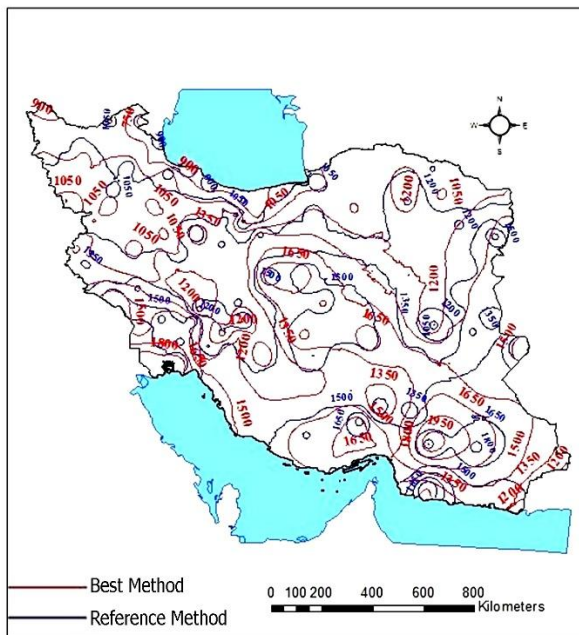


Fig. 12- Map of the comparing reference method with the best method (mm/year)
 شکل ۱۲- نقشه مقایسه روش مرجع با بهترین روش (mm/year)

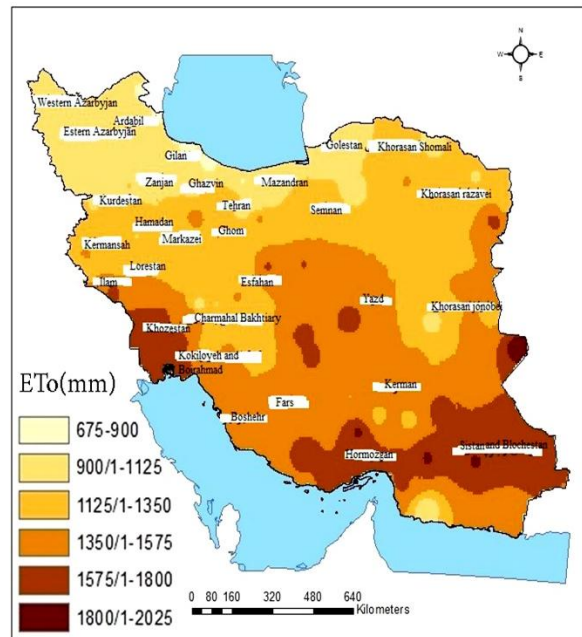


Fig. 10- Evapotranspiration zoning map of the country using the reference method (PMF)
 شکل ۱۰- نقشه پهنه‌بندی تبخیر-تعرق کشور با روش مرجع (پنمن-مانیتث-فائو)

در شکل ۱۱ نقشه پهنه‌بندی تبخیر-تعرق روش‌های منتخب، پتانسیل بیشتری از ETo در نیمه‌جنوبی کشور در مقابل نیمه‌شمالی را نشان می‌دهد. افزایش تبخیر-تعرق پتانسیل در عرض‌های جنوبی کشور می‌تواند ناشی از تابش زیاد خورشید و گرمایش سطح زمین به دلیل ضعف نسبی پوشش گیاهی باشد. در شکل ۱۲ با مقایسه نقشه می‌توان به این نتیجه رسید که در اکثر نقاط کشور روش‌های منتخب برآورد تبخیر-تعرق مرجع بر اساس معادلات مبتنی بر انتقال جرم به مقادیر تبخیر-تعرق حاصل از معادله فائو-پنمن-مانیتث نزدیک می‌باشند.

۲-۳- نتایج لایسی‌متری

شکل ۱۳، مقادیر متوسط تبخیر-تعرق حاصل از لایسی‌مترها در طی یک دوره آماری یکساله نشان داده شده است. همچنان که در شکل پیداست در سه ماهه اولیه برداشت داده‌ها، تبخیر-تعرق به‌دست آمده بیشترین و در شش ماه بعدی کمترین مقادیر به‌دست آمده است. برداشت داده‌ها از خرداد ماه شروع و در سه ماهه اول برداشت که مصادف با فصل تابستان بوده است تبخیر-تعرق بیشترین مقدار و در شش ماه بعدی کمترین مقدار را داشته است.

با استفاده از پارامترهای هواشناسی اخذ شده از ایستگاه هواشناسی واقع در فاصله ۱۰۰ متری ایستگاه لایسی‌متری، در یک دوره آماری یک

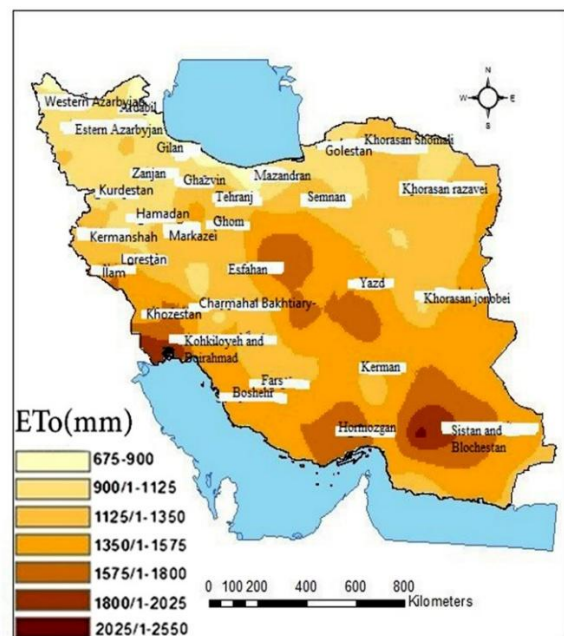


Fig. 11- Evapotranspiration zoning map based on best practice method (mm/year)
 شکل ۱۱- نقشه پهنه‌بندی تبخیر-تعرق بر اساس بهترین روش (mm/year)

عبارتنداز : فائو-پنمن، سازمان جهانی هواشناسی (WMO) و پنمن با کمترین مقدار، گزینه‌های مناسبی می‌باشند. با مقایسه نتایج کمترین مقادیر برای MBE و t، بهترین روش‌ها به ترتیب فائو پنمن-مانتیت، سازمان جهانی هواشناسی و پنمن می‌باشند. ضمناً شکل ۱۴ نیز صحت انتخاب این روش‌ها را تأیید می‌نمایند.

لازم به ذکر است که بر اساس محاسبات انجام شده از داده‌های ایستگاه سینوپتیک در ایستگاه کرمانشاه با اقلیم نیمه‌خشک بهترین روش انتخابی روش سازمان جهانی هواشناسی (WMO) می‌باشد که با نتایج حاصل از بررسی داده‌های هواشناسی در این ایستگاه تطابق دارد.

ساله، تبخیر-تعرق مرجع با استفاده از معادلات مبتنی بر انتقال جرم و همچنین فائو-پنمن-مانتیت محاسبه و در جدول ۱۰ همراه با مقادیر تبخیر-تعرق به دست آمده از روش مستقیم (لایسی‌متری) به صورت ماهانه آورده شده است.

در جدول ۱۱ نتایج آنالیز آماری نشان داده شده است. با توجه به نتایج مندرج در جدول ۱۱، بالا بودن ضریب R در روش‌های مبتنی بر انتقال جرم و فائو پنمن-مانتیت نشان از همبستگی خوب حاصل از نتایج این مدل‌ها با تبخیر-تعرق به دست آمده از لایسی‌مترها دارد. مقایسه مقادیر RMSE نشانگر آن است که بهترین روش‌های موجود

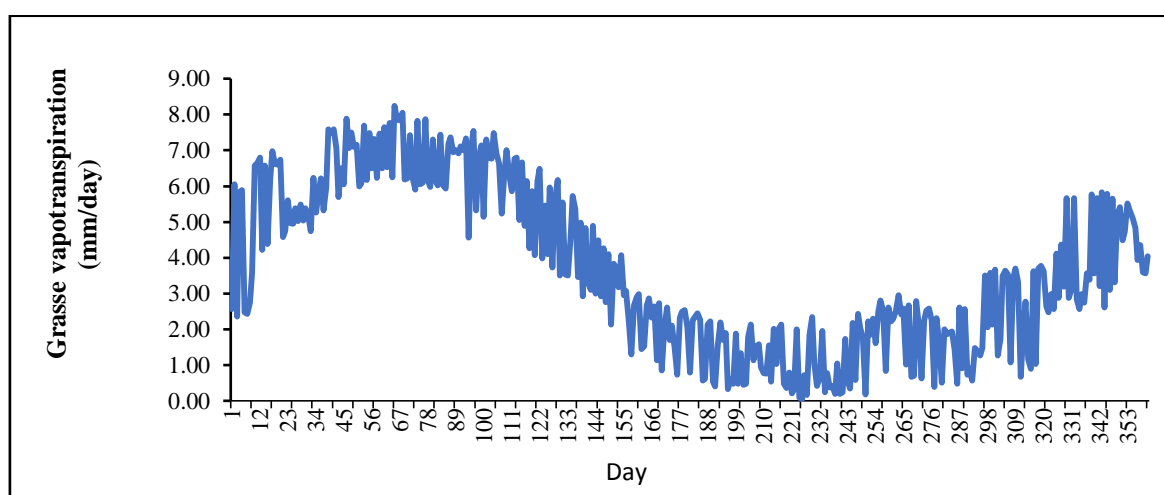


Fig. 13- Evapotranspiration of reference plant (grass)

شکل ۱۳- تبخیر- تعرق مرجع

Table 10- The results of estimated evapotranspiration and measurements from Lysimeter

جدول ۱۰- نتایج حاصل از تبخیر-تعرق برآوردی و اندازه‌گیری شده از لایسی‌متر

Month	Dalton (1802)	Trabert (1896)	Meyer (1926)	Rohwer (1931)	Penman (1948)	Albrecht (1950)	Romanenko (1961)	Brockamp & Wenner (1963)	WMO (1966)	Mahringer (1970)	FPM	Lysimeter
Jan	1.77	1.44	1.66	1.76	0.93	2.34	2.47	2.48	1.08	1.34	1.27	1.36
Feb	1.62	1.34	1.52	1.62	0.84	2.19	2.97	2.29	1.00	1.24	1.56	1.83
Mar	2.37	2.05	2.19	2.39	1.17	3.52	3.58	3.49	1.54	1.91	2.41	2.30
Apr	4.60	4.06	4.20	4.69	2.16	7.40	6.72	6.87	3.14	3.78	4.14	3.86
May	6.18	5.44	5.68	6.26	2.98	9.53	8.54	9.24	4.11	5.06	4.84	4.62
June	9.29	8.12	8.57	9.38	4.56	13.91	12.87	13.81	6.08	7.55	6.21	5.95
July	11.18	9.84	10.30	11.30	5.45	16.91	14.88	16.72	7.36	9.15	6.88	6.98
Aug	10.77	9.37	9.98	10.83	5.38	15.60	14.73	15.97	6.92	8.71	6.35	6.61
Sep	8.11	7.07	7.49	8.17	4.00	12.01	11.71	12.03	5.27	6.57	4.98	5.25
Oct	3.80	3.19	3.55	3.79	1.96	5.16	5.94	5.64	2.36	2.96	2.64	3.00
Nov	1.49	1.19	1.41	1.47	0.80	1.83	2.67	2.05	0.88	1.10	1.26	1.61
Dec	1.35	1.04	1.29	1.32	0.75	1.53	1.85	1.80	0.76	0.96	0.98	1.07

Table 11- Statistical analysis results

جدول ۱۱- نتایج آنالیز آماری

Models	Mean(mm/day)	R	RMSE	MBE	t
Dalton (1802)	5.22	0.88	2.67	1.83	17.82
Trabert (1896)	4.52	0.87	2.04	1.13	12.53
Meyer (1926)	4.83	0.88	2.22	1.43	15.99
Rohwer (1931)	5.26	0.88	2.74	1.86	17.65
Penman (1948)	2.59	0.88	1.56	-0.81	11.42
Albrecht (1950)	7.67	0.84	5.97	4.28	19.50
Romanenko (1961)	7.43	0.89	4.93	4.03	26.97
Brockamp & Wenner (1963)	7.70	0.87	5.71	4.30	21.78
WMO (1966)	3.38	0.86	1.36	-0.01	1.70
Mahringer (1970)	4.20	0.87	1.75	0.81	9.86
FAO-Penman equation	3.63	0.90	1.00	-0.08	1.52
Lysimeter	3.70	.....	.....	.....	.....

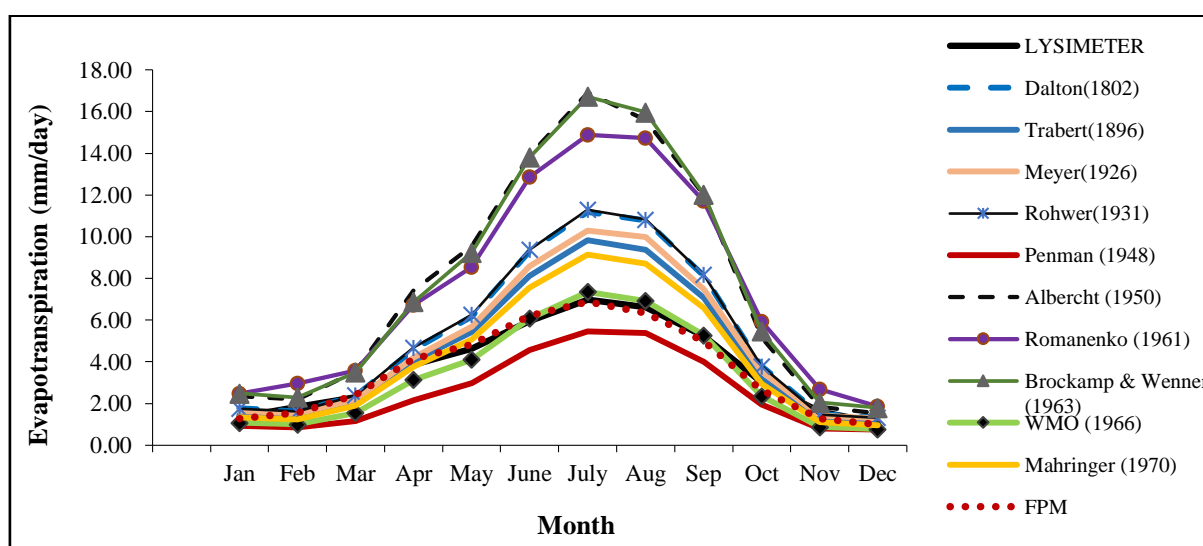


Fig. 14 - Evapotranspiration diagrams of mass transfer methods and lysimeters

شکل ۱۴- نمودار تبخیر-تعرق روش‌های مبتنی بر انتقال جرم و لایسی‌مترها

در این پژوهش با بهره‌گیری از اطلاعات هواشناسی ۱۵۰ ایستگاه سینوپتیک کشور در ابتدا تبخیر-تعرق با استفاده از فرمول‌های مربوط به روش‌های مبتنی بر انتقال جرم محاسبه شده و سپس با مقایسه این روش‌ها با روش پنمن-مانتیت و بهره‌گیری از پارامترهای آماری، روش برتر در هر منطقه مشخص شده و در نهایت روش منتخب برای هر اقلیم مشخص و پیشنهاد گردید. بررسی نتایج نشانگر آن است که بیشترین مقدار تبخیر-تعرق در ایستگاه‌های کهنوج و ماهشهر و امیدیه و کمترین مقدار تبخیر-تعرق در ایستگاه‌های ناحیه شمالی کشور یعنی بندرانزلی، رامسر و آستارا برقرار است. با توجه به نتایج به‌دست آمده، برای هر اقلیم دو روش به عنوان بهترین و دو روش به عنوان بدترین روش برآورد تبخیر-تعرق مرجع، به ترتیب اولویت ذکر گردید. نتایج به‌دست آمده در این تحقیق نشانگر آن هستند که: ۱- در اقلیم‌های خشک به ترتیب روش‌های سازمان جهانی هواشناسی و تراپرت به

۴- بحث و نتیجه‌گیری

از آنجائی که آگاهی از مقدار تبخیر-تعرق به عنوان یکی از متغیرهای هیدرولوژیکی در تحقیقات کشاورزی و حفاظت آب و خاک، مدل‌سازی آن و همچنین در برنامه‌ریزی و توسعه آبیاری در مناطق با اقلیم‌های مختلف از اهمیت زیادی برخوردار است. لذا، در این تحقیق تعداد ده معادله بر مبنای انتقال جرم برای محاسبه تبخیر-تعرق مرجع با استفاده از داده‌های هواشناسی روزانه برای کل کشور (ایران) و همچنین مطالعات لایسی‌متری در شرایط آب و هوای نیمه‌خشک (در غرب ایران) محاسبه و بررسی و مقادیر برآورد شده توسط این مدل‌ها با مقادیر اندازه‌گیری شده در لایسی‌مترها مقایسه و دقت و صحت هر کدام مشخص گردید.

به دست آمده از این تحقیق متفاوت است. همچنین نتایج به دست آمده در این تحقیق با نتایج ارائه شده توسط (Zareabayneh et al. 2010) اختلاف دارد. این اختلافات گزارش شده با تحقیقات حاضر در این مقاله، می‌تواند به علت تفاوت در تعداد سال‌های آماری و یا تفاوت در ایستگاه‌های مورد استفاده در پژوهش‌های انجام شده باشد. در نهایت، نتایج حاصل از این تحقیق که ناشی از بررسی داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های سرتاسر کشور در یک دوره زمانی طولانی و قابل قبول است، می‌تواند منبع مناسبی جهت برآورد تبخیر-تعرق پتانسیل در مناطق مختلف با کمبود داده و وجود داده‌های کافی در اقلیم‌های مختلف براساس بهترین روش‌های مبتنی بر انتقال جرم برای برنامه‌ریزان و مهندسين منابع آب و آبیاری باشد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Reference Evapotranspiration
- 2- International Commission on Irrigation and Drainage
- 3- Food and Agriculture Organization
- 4- World Meteorological Organization
- 5- Time-Domain Reflectometry
- 6- Meyer
- 7- Dalton

۵- مراجع

- Albrecht F (1950) Die methoden zur Bestimmung Verdunstung der natürlichen Erdoberfläche. Arch Meteor Geoph Biokl Ser B.2:1-38
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998) Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper, 56, Rome, Italy, 300 p
- Azhar A, Perera B (2011) Evaluation of reference evapotranspiration estimation methods under southeast Australian conditions. J Irrig Drain Eng. 137:268-279
- Babamiri O, Dinpazhoh Y (2016) Comparison and evaluation of twenty methods for estimating reference evapotranspiration based on three general categories: air temperature, solar radiation and mass Transfer in the basin of lake Urmia. Journal of Water and Soil Sci. (Sci. & Technol. Agric. & Natur. Resour) 20 (77):145-161 (In Persian)
- Bolhasani k, Zarei H (2016) Estimation of location and zoning of reference evapotranspiration using statistical methods and geographic information systems. Journal of Aquatic Sciences and Engineering, Ahwaz Islamic Azad University 11(13):7-21 (In Persian)

عنوان بهترین و آلبرت و رومانکو به عنوان بدترین اولویت‌های اول و دوم انتخاب شدند. ۲- در اقلیم‌های نیمه‌خشک به ترتیب روش‌های میسر و ترابرت به عنوان بهترین اولویت‌های اول و دوم و روش‌های رومانکو و آلبرت نیز به عنوان بدترین اولویت‌های اول و دوم روش‌های برآورد تبخیر-تعرق می‌باشند. ۳- در رابطه با اقلیم مدیترانه‌ای نیز نتایج حاکی از آن است که روش‌های سازمان جهانی هواشناسی و پنمن به عنوان بهترین اولویت‌های اول و دوم و روش‌های آلبرت و رومانکو به عنوان بدترین اولویت‌های اول و دوم روش‌های برآورد تبخیر-تعرق می‌باشند. ۴- در اقلیم‌های نیمه‌مرطوب و مرطوب به ترتیب دو اولویت بهترین و بدترین روش‌های برآورد تبخیر-تعرق عبارت بودند از (روهور و بروکمپ و ونر به‌عنوان بهترین و رومانکو و پنمن) به عنوان بدترین اولویت‌های اول و دوم شناخته شدند. ۵- در اقلیم‌های بسیارمرطوب نیز ترتیب بهترین اولویت‌های اول و دوم و همچنین بدترین آنها عبارت بودند از (بروکمپ و ونر و رومانکو) و (پنمن و سازمان جهانی هواشناسی). ۶- نتایج به دست آمده از تحقیقات لایسی‌متری، انتخاب روش‌های به دست آمده در منطقه نیمه‌خشک کرمانشاه را تأیید نمودند. بررسی‌ها نشانگر آن است که نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج گزارش شده توسط (Valipour 2014) که مدل پنمن را در اکثر استان‌های ایران جهت برآورد تبخیر-تعرق مرجع بهتر از سایر مدل‌ها تشخیص داده است متفاوت می‌باشد. ضمناً طبق نتایج گزارش شده توسط (Babamiri and Dinpazhoh 2016) میسر و دالتون در حوضه آبریز دریاچه ارومیه با اقلیم نیمه‌خشک به عنوان بهترین روش معرفی گردیده است که این نتایج با نتایج به دست آمده در این تحقیق در رابطه با اولویت اول (روش میسر) برای مناطق با اقلیم نیمه‌خشک هماهنگی داشته ولی برای اولویت دوم معرفی شده (روش دالتون) با نتایج این تحقیق هماهنگی ندارد. همچنین نتایج بدست آمده در این تحقیق با نتایج گزارش شده توسط (Hayati et al. 2012) در اقلیم خشک که روش پنمن را به عنوان اولویت معرفی نموده‌اند، تطابق دارد. (Tabari et al. 2011) ضمن بررسی ۳۱ روش برآورد تبخیر-تعرق پتانسیل در مناطق مرطوب ایران، از میان روش‌های انتقال جرم روش رومانکو را به عنوان بهترین روش معرفی نموده است. (Xu and Singh 2002) ضمن بررسی روش‌های مختلف برآورد تبخیر-تعرق پتانسیل در کشور سوئیس (با اقلیم مرطوب) روش روهور را از میان روش‌های دیگر به عنوان بهترین روش انتخاب نمودند که با نتایج این تحقیق هماهنگی دارد. (Tomar 2015) ضمن بررسی روش‌های مختلف بر مبنای انتقال جرم در منطقه نیمه‌مرطوب سینگ ناگار در هند روش سازمان جهانی هواشناسی را به عنوان بهترین روش سفارش نموده است که با نتایج

- Nazarifar M, Seifi K, Momeni R (2007) Estimation of geostatistical and Tissen methods in estimating regional variations of potential evapotranspiration (Case study: Hamadan). In: Proc. Ninth Irrigation Seminar and Evaporation Reduction, Kerman: Shahid Bahonar Kerman University (In Persian)
- Penman HC (1948) Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc R Soc Lond Ser A. 193:120-145
- Rohwer C (1931) Evaporation from free water surface. USDA Tech Null. 217:1-96
- Romanenko VA (1961) Computation of the autumn soil moisture using a universal relationship for a large area. Proceedings, Ukrainian Hydrometeorological Research Institute, no. 3. Kiev
- Sabziparvar AA, Bayatvarkeshi M, Ghasemi A (2008) Evaluation of different methods for estimating evapotranspiration in two different climates (Case study: Hamadan, Karaj, Gorgan). In: Proc. Third National Conference on Integrated Water Resources Management. Tabriz. 7p. https://www.civilica.com/Paper-WRM03-WRM03_178.html (In Persian)
- Sharghi T, Bari Abarghuei H, Asadi MA, Kousari MR (2010) Estimation of reference evapotranspiration using FAO-Penman-Monteith method and its zonation in Yazd province. Journal of Arid Biom Scientific and Research 1(1):25-32 (In Persian)
- Tabari HM, Grismer E, Trajkovic S (2011) Comparative analysis of 31 reference evapotranspiration methods under humid conditions. Irrig. Sci. 31(2):107-117
- Trabert W (1896) Neue Beobachtungen u'ber Verdampfungsgeschwindigkeiten. meteorol Z, 13:261-263
- Tomar AS (2015) Performance evaluation of mass transfer-based reference evapotranspiration equations with FAO-56 pm model as index at tarairegion of uttarakhand, India. International Journal of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine 3(4) 12p
- Valipour M (2014) Application of new Mass transfer formulae for Computation of Evapotranspiration. Journal of Applied Water Engineering and Research 2(1):33-46
- WMO (1966) Measurement and estimation of evaporation and evapotranspiration. Tech Pap. (CIMO-Rep) 83
- Xu C Y, Singh V P (1997) Sensitivity of mass transfer-based evaporation equations to errors in daily and monthly input data. Hydrological Process 11:1465-1473
- Brockamp B, Wenner H (1963) Verdunstungsmessungen aufden Steiner See bei M'ünster. Dt Gewasserkundl Mitt 7:149-154
- Dalton J (1802) Experimental essays on the constitution of mixed gases; on the force of steam of vapour from waters and other liquids in different temperatures, both in a torricellian vacuum and in air on evaporation and on the expansion of gases by heat. Mem Manch Lit Philos Soc. 5:535-602
- Ganjizadeh R, Boromand Nasab S, Soltani Mahmoudi A, Ganjizadeh H (2013) Determination of reference evapotranspiration by using interpolation methods and comparing it with empirical methods (Case study: Golestan). In: Proc. First Conference-National Water Crisis, Isfahan (In Persian)
- Grismer M, Orang M, Matyac S (2002) Pan evaporation to evapotranspiration conversion methods. J. Irrig. Drain. Eng. 128(3):180-184
- Hargreaves GH (1994) Defining and using reference evapotranspiration. Journal of Irrig. and Drain Eng., ASCE 120(6):1132-1139
- Hayati H, Haghightajou P, Samiee M (2012) Evaluation mass transfer methods for calculating evaporation in Sistan plain .In: Proc. Third National Conference on Integrated Water Resources Management, 10p (In Persian)
- Jacovides CP (1997) Reply to comment on statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration models. Journal of Agricultural water management 3:95-97
- Kouchakzadeh M, and Bahmani A (2005) Assessment of artificial neural networks revenue in reducing required parameters for estimation of reference evapotranspiration. Journal of Agricultural sciences Islamic Azad University 4:87-97
- Mahringer W (1970) Verdunstungsstudien am neusiedler see. Arch Met Geoph Biokl Ser B .18:1-20
- Mardikis MG, Kalives DP, Kollias V J (2005) Comparison of interpolatiob methods for the prediction of reference evapotranspiration-An application in Greece. Journal Water Resources Management, Publisher Springer Netherlands 19(3)
- Martinez-Cob A (1996) Multivariate geostatistical analysis of evaporation and precipitation in mountainous terrain. Journal of Hydrology 174(1-2):19-35
- Meyer A (1926) Uber einige Zusammenhnge zwischen Klima und Boden in Europa. Chemie der Erde. 2:209-347

- zonings in Iran. *Journal of Physical Geography Research Quarterly* 42(74):95-109 (In Persian)
- Zhai LQ, Feng Q Li, Xu CY (2010) Comparison and modification of equations for calculating evapotranspiration (ET) with data from Gansu province, northwest China. *Irrig. Drain* 59:477-490
- Xu CY, Singh VP (2002) Cross comparison of empirical equations for calculating potential evapotranspiration with data from Switzerland. *Water Resources Manage* 16:197-219
- Zareabayneh H, Bayat Varkeshi M, Sabziparvar AA, Marofi S, Ghasemi A (2010) Evaluation of different reference evapotranspiration methods and their