

مدلسازی رابطه تبخیر و تعرق پتانسیل سالانه و فصلی گیاه مرجع با عوامل اقلیمی در حوضه آبریز فلات مرکزی ایران

حسین بهزادی کریمی^{۱*}، احمد مزیدی^۲

۱. دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، دانشگاه یزد،

۲. دانشیار آب و هواشناسی، دانشگاه یزد

چکیده:

تخمین دقیق تبخیر و تعرق نقش مهمی در مدیریت منابع آب، برنامه‌ریزی آبیاری و تأمین نیاز آبی گیاهان به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک و خشک دارد. هدف از این تحقیق ارائه‌ی یک مدل رگرسیونی است که با مینا قرار دادن روش فائو-پنمن-مانتیت بتوان مقدار تبخیر و تعرق گیاه مرجع را با عوامل اقلیمی برآورد کرد. در این پژوهش ابتدا با استفاده از داده‌های ماهانه‌ی حداکثر و حداقل دما، متوسط رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و متوسط سرعت باد ایستگاه‌های سینوپتیک واقع در حوضه‌ی آبریز فلات مرکزی ایران در یک دوره‌ی آماری ۱۸ ساله (۲۰۱۲-۱۹۹۵)، مقادیر تبخیر و تعرق سالانه و فصلی به روش *FAO-56-PM* محاسبه شد. سپس با استفاده از نرم‌افزار *SPSS* رابطه‌ی بین عوامل اقلیمی فوق با مقدار تبخیر و تعرق از طریق رگرسیون خطی چندمتغیره مدلسازی گردید. صحت دقت مدل‌ها نیز با آزمودن چهار فرضیه‌ی خطی بودن رابطه، نرمال بودن باقیمانده‌ها، ثابت بودن واریانس باقیمانده‌ها و ناهمبسته بودن خطای مدل سنجیده شد. نتایج حاصل از اجرای مدل مبتنی آن است که رابطه‌ی قوی بین *ETo* حاصل از رگرسیون چندمتغیره با عوامل اقلیمی وجود دارد؛ بطوریکه در مقطع زمانی سالانه و فصول بهار و تابستان حدود ۹۸ درصد تغییرات *ETo* توسط این پنج متغیر تبیین می‌شود و در فصول پاییز و زمستان به ترتیب حدود ۹۷ و ۹۶ درصد از پراش تبخیر و تعرق با پراش پنج عامل اقلیمی مشترک است. معادلات رگرسیون استاندارد حاکی از آن است که سهم متغیرهای سرعت باد و حداکثر دما در میزان تبخیر و تعرق سالانه و فصلی بیش از سایر عوامل اقلیمی است. مقایسه‌ی نقشه‌های هم تبخیر سالانه و فصلی حوضه‌ی آبریز فلات مرکزی نشان داد که از لحاظ مکانی نیز ارتباط نزدیک و قابل قبولی بین روش فائو-پنمن-مانتیت و مدل رگرسیون وجود دارد و شمال غرب حوضه از کمترین و مناطق جنوبی از بیشترین میزان تبخیر و تعرق سالانه و فصلی برخوردار می‌باشند.

واژگان کلیدی: تبخیر و تعرق گیاه مرجع، روش فائو-پنمن-مانتیت، مدل رگرسیون چندمتغیره، حوضه‌ی آبریز فلات مرکزی ایران.

مقدمه

تعرق پتانسیل گیاه مرجع (ET_o)^۶ در یک منطقه خاص، روش معمول استفاده از داده‌های لایسیمتری در مقیاس‌های زمانی متفاوت است. در صورت نبود داده‌های لایسیمتری مناسب می‌توان از روش‌های تجربی برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل استفاده نمود که هر یک تابع متغیرهای اقلیمی خاصی می‌باشند و اغلب این روش‌ها تحت واسنجی محلی به‌دست آمده‌اند و اعتبار جهانی محدودی دارند (Allen and Pruitt, 1998). تاکنون معادله‌های تجربی زیادی برای محاسبه مقدار تبخیر و تعرق ارائه شده است. در سال ۱۹۹۰ از سوی کمیسیون بین‌المللی آبیاری و زهکشی و سازمان خواروبار جهانی (ICID)^۸، روش فائو-پنمن-مانتیث^۹ به عنوان تنها روش استاندارد برای محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع از روی داده‌های اقلیمی و همچنین برای ارزیابی سایر روش‌ها پیشنهاد شده است (Allen et al., 1998). اهمیت و مقبولیت این روش تا اندازه‌ای است که در شرایط عدم دسترسی به داده‌های لایسیمتری در مطالعات انجام شده در اقلیم‌های گوناگون، دقت سایر روش‌ها را نسبت به آن می‌سنجند. آماتیا و همکاران (Amatya et al., 1995) در یک تحقیق مشخص کردند که روش تخمین تبخیر و تعرق پنمن-مانتیث نسبت به دیگر روش‌های معمول از یک پایه تئوریک قوی برخوردار است؛ بنابراین نتایج قابل‌اعتمادی از کاربرد این روش به دست می‌آید. سینگ و همکاران (Sing et al., 2011) مدل‌های برآورد ET_o را با روش تشت تبخیر^{۱۰} در یک ایستگاه ساحلی مرکز پژوهش‌های کشت سیب زمینی کانادا مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاکی از آن بود که مدل تشت تبخیر، برآورد کمتری از ET_o نسبت به روش‌های فائو-پنمن-مانتیث و پرستیلی-تیلور^{۱۱} داشت. لیو و همکاران (Liu et al., 2011) تعداد ۱۶ مدل برآورد تبخیر و تعرق را با لایسیمتر وزنی در پکن چین مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد که مدل پنمن-مانتیث-فائو برای

تبخیر و تعرق^۲ یکی از مهم‌ترین راه‌های مصرف یا هدر رفت آب در یک حوضه آبخیز است که پایش و بررسی تغییرات آن در دوره‌های زمانی معین می‌تواند ضمن نشان دادن میزان آب مصرفی در هر کاربری اراضی، در مدیریت آب در مقیاس حوضه و تعیین میزان آب مورد نیاز جهت تخصیص به هر کاربری اراضی، مورد استفاده واقع شود. تبخیر و تعرق بیانگر مجموع حجم آب استفاده شده به وسیله گیاه (تعرق) و تبخیر از سطح خاک می‌باشد. در واقع تبخیر و تعرق شاخص تعیین‌کننده فرایند رشد است که معادل آب مورد نیاز گیاهان زراعی می‌باشد. به همین علت تخمین آن با توجه به شرایط آب و هوایی هر منطقه و محصول، ضروری و مهم است (Martinez-cob, 1996). تقریباً ۶۴ درصد از بارش‌های جو به دلیل تبخیر و تعرق از سطح زمین است و در واقع تبخیر و تعرق مرتبط کننده سه جزء مهم زیست‌کره^۳، آب‌کره^۴ و هواکره^۵ به شمار می‌آید (Su et al., 2006). روش‌های برآورد تبخیر و تعرق به دو دسته مستقیم و غیر مستقیم تقسیم می‌شوند. در روش مستقیم، بخش کوچکی از مزرعه را جدا کرده و مقدار تبخیر و تعرق در یک دوره زمانی، به طور مستقیم اندازه‌گیری می‌شود. معمولی‌ترین روش مستقیم، تعیین تبخیر و تعرق با استفاده از اصل بیلان جرمی در یک حجم کنترل شده از خاک، (لایسیمتر)^۵ می‌باشد. در روش‌های غیر مستقیم از عوامل اقلیمی و گیاهی استفاده شده است و با استفاده از ارتباط آن‌ها با تبخیر و تعرق و یا از معادلاتی که قبلاً از روش‌های مستقیم واسنجی شده‌اند، تبخیر و تعرق پوشش گیاهی مورد نظر تخمین زده می‌شود (علیزاده، ۱۳۸۳). این پدیده، متأثر از متغیرهای اقلیمی زیادی می‌باشد که می‌توان به بارندگی، درجه حرارت، سرعت باد، ساعات آفتابی، فشار سطح، رطوبت نسبی، سطح ابرناکی، خصوصیات خاک و گیاه و کیفیت آب اشاره نمود. به منظور تعیین بهترین معادله تجربی برای محاسبه تبخیر و

6-Reference Evapotranspiration
7-International Commission on Irrigation & Drainage
8-FAO-Penman-Monteith
9-Evaporation Pan
10-Priestly- Taylor

1-Evapotranspiration
2-Biosphere
3-Hydrosphere
4-Atmosphere
5-Lysimeter

مبصر (۱۳۹۶) به ارزیابی ۱۸ مدل تبخیر و تعرق مرجع در شرایط آب و هوایی دشت اردبیل پرداختند. در این تحقیق علاوه بر نتایج مربوط به لایسیمترها، تبخیر و تعرق به دست آمده از مدل پنمن-مانتیت-فائو نیز به عنوان مرجع مقایسه کارایی مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد که تناسب نتایج مدل‌ها نسبت به نتایج مدل پنمن-مانتیت-فائو در مقایسه با نتایج آنها نسبت به لایسیمتر قابل قبول‌تر است. در عین حال محققان زیادی روش فائو-پنمن-مانتیت را به دلیل جامع بودن آن به عنوان روشی مناسب در بیشتر مناطق دنیا پیشنهاد داده‌اند که حاصل آن در مطالعات جاکوبز و همکاران (Jacobs et al., 2002)، راتو و همکاران (Rao et al., 2001)، لویز اورا و همکاران (Lo'pez-Urrea et al., 2006)، Djaman et al., 2016)، طالبی و همکاران (۱۳۸۹)، شرقی و همکاران (۱۳۸۹)، میرموسوی و همکاران (۱۳۹۱)، بختیاری و همکاران (۱۳۹۴) و محمدی و همکاران (۱۳۹۵) منتشر شده است.

رگرسیون^۷ یک فن آماری-ریاضی و تحلیلی برای بیان رابطه، برآورد و پیش‌بینی است؛ به‌گونه‌ای که با آن بتوان کمیت متغیری نامعلوم را با استفاده از متغیرهای معلوم تعیین کرد (عساکره، ۱۳۹۰). در چند دهه اخیر یکی از روش‌های مهم برای شناخت ارتباط درونی متغیرها و تعیین رابطه همبستگی بین تبخیر و تعرق و مجموعه‌ای از عوامل اقلیمی، رگرسیون چندمتغیره^۸ می‌باشد. در این روش، تبخیر و تعرق به عنوان متغیر وابسته و عناصر اقلیمی مختلف به عنوان متغیرهای مستقل به مدل معرفی می‌شوند. بهترین مدل انتخابی، مدلی است که بتواند تخمین بهتری را از دو یا چند متغیر وابسته دیگر ارائه دهد. در زمینه استفاده از مدل رگرسیون چندمتغیره، پژوهش‌های متعددی در زمینه‌های هیدرولوژی صورت گرفته است. لابودی و همکاران (Laaboudi et al., 2012) در یک منطقه خشک از آفریقا به محاسبه تبخیر و تعرق با استفاده از شبکه عصبی و رگرسیون چندمتغیره پرداختند. داده‌های ورودی عبارت بود از رطوبت نسبی، سرعت باد، دما و ساعات آفتابی و

محاسبه تبخیر و تعرق مرجع به عنوان یک روش محاسباتی استاندارد قابل پذیرش است. در ایران، علیزاده و همکاران (۱۳۸۳) در مطالعه‌ای به ارزیابی روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق در مناطق خشک اقدام کردند. نتایج مقایسه روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع با اندازه‌گیری با لایسیمتر وزنی نشان داد که روش فائو-پنمن-مانتیت دارای بهترین برآورد و روش جنسن هیز دارای کمترین دقت است. عابدی کویایی و همکاران (۱۳۸۷) مقادیر تبخیر و تعرق گیاه مرجع را با استفاده از معادلات پنمن-مانتیت، تورک^۲، هارگریوز^۳ و تشت تبخیر برای منطقه اصفهان محاسبه کردند و نتیجه گرفته شد که معادله پنمن-مانتیت از دقت بیشتری نسبت به سایر معادلات در تخمین تبخیر و تعرق روزانه برخوردار بوده است. جامعی و موسوی بایگانی (۱۳۹۲) با استفاده از داده‌های هواشناسی ۴۲ ایستگاه، مقادیر تبخیر و تعرق گیاه مرجع را با روش فائو-پنمن-مانتیت در استان خوزستان برآورد کردند و با استفاده از هفت روش درونیابی اقدام به پهنه‌بندی تبخیر و تعرق گیاه مرجع نمودند. معصوم پور سماکوش و همکاران (۱۳۹۳) مقادیر روزانه تبخیر و تعرق پتانسیل مربوط به ۵۰ ایستگاه محدوده کشور را طی دوره آماری ۲۹ ساله، از طریق روش پنمن-مانتیت محاسبه نمودند و با استفاده از آزمون من کندال^۴ و در محدوده اطمینان ۹۵٪ روند ماهانه و سالانه تبخیر و تعرق را مشخص کردند؛ نتایج ایشان نشان داد که روند تبخیر و تعرق در سراسر کشور رو به افزایش است. خوشحال و همکاران (۱۳۹۴) به ارزیابی روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق مرجع با روش تشت تبخیر فائو در حوضه آبریز شرق و جنوب شرقی کشور پرداختند. بر اساس نتایج حاصله، روش‌های هارگریوز-سامانی^۵، بلانی کریدل^۶، فائو^{۲۴}، تورک و پرستیلی-تیلور با توجه به ابعاد زمانی متفاوت، بهترین انطباق را با مقادیر تبخیر و تعرق مرجع حاصل از تشت تبخیر داشتند. رئوف و عزیزی

1-Jensen-Haise

2-Turk

3-Hargreaves

4-Mann-Kendall

5-Hargreaves-Samani

6-Blaney Criddle

7-Regression

8-Multivariate Regression

مبنای معادله FAO-56-PM از اهداف اصلی این تحقیق است.

مواد و روش‌ها

ابتدا داده‌های مورد نیاز شامل حداکثر و حداقل دماهای ماهانه، متوسط رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد از سازمان هواشناسی کشور اخذ گردید. با بررسی داده‌ها و به‌منظور تعیین سال‌های مشترک آماری، مشخص گردید که می‌توان از بین ۶۲ ایستگاه موجود تعداد ۴۵ ایستگاه را که طول دوره‌ی آماری آن‌ها بیش از ۱۸ سال است، انتخاب نمود. داده‌های مفقود به روش تفاضل و نسبت‌ها بازسازی گردید. همگن بودن داده‌ها با استفاده از آزمون ران تست^۴ مورد بررسی قرار گرفت و از همگنی داده‌ها اطمینان حاصل شد. در محدوده مورد مطالعه و در مقطع زمانی سالانه، متوسط دمای حداقل و حداکثر به ترتیب ۱۰/۵ و ۲۴/۴ درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۳۹ درصد، سرعت باد ۸/۳ کیلومتر بر ساعت و ساعات آفتابی ۸/۸ ساعت در روز می‌باشد.

در اغلب آزمون‌های پارامتری، مفروضات مقدماتی بسیاری وجود دارد که تا این مفروضات تأمین نشوند؛ نتایج به‌دست‌آمده از آزمون، نامعتبر خواهد بود. در میان این مفروضات مهم‌ترین و شایع‌ترین فرض، فرض نرمال بودن داده‌هاست. نتایج حاصل از نرمال بودن داده‌های اقلیمی بعد از تبدیل لگاریتمی در مقیاس‌های زمانی سالانه و فصلی با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف در جدول ۱ نشان داده شده است. با توجه به اینکه سطح معنی‌داری داده‌ها بیش از ۵ درصد است، می‌توان از نرمال بودن داده‌ها اطمینان حاصل نمود.

خروجی مدل به کمک مدل فائو-پنمن-مانتیث ۵۶ محاسبه گردید. نتایج حاکی از برتری مدل شبکه عصبی نسبت به رگرسیون چندمتغیره و روش‌های تجربی بود. عزیزی و همکاران (۱۳۸۸) در برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل از طریق رگرسیون چندمتغیره در استان اصفهان نشان دادند که مدل رگرسیون چندمتغیره همخوانی نزدیکی با تبخیر اندازه‌گیری شده با تشت دارد و در این استان از غرب به شرق و از شمال به جنوب بر میزان تبخیر و تعرق افزوده می‌شود. عرب سلغار و همکاران (۱۳۸۹) به پیش‌بینی تبخیر و تعرق سالانه با استفاده از رگرسیون چندمتغیره در شماری از ایستگاه‌های مناطق نیمه‌خشک ایران پرداختند که نتایج نشان از توافق خوب بین تبخیر و تعرق مرجع تخمین زده شده با استفاده از معادله‌ی پنمن-مانتیث و روش مذکور با خطای نسبی کم است. شیخ الاسلامی و همکاران (۱۳۹۳) با استفاده از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی و مدل رگرسیون خطی چندگانه به پیش‌بینی مقدار تبخیر و تعرق گیاه مرجع در ایستگاه مشهد پرداختند. ایشان در این تحقیق تأثیر پارامترهای دما (حداقل، متوسط و حداکثر دما)، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد را بر این پدیده مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که مولفه‌های دما و رطوبت نسبی از اهمیت بیشتری نسبت به سایر عناصر اقلیمی در تخمین تبخیر و تعرق گیاه مرجع برخوردار بودند. فلات مرکزی ایران با متوسط بارش سالانه ۱۱۵ میلی‌متر و قرارگیری در منطقه خشک و نیمه‌خشک با کمبود شدید منابع آب مواجه است. تبخیر و تعرق به عنوان یکی از ارکان مهم چرخه هیدرولوژیکی، نقش مهمی در طراحی مدیریت و برنامه‌ریزی سیستم‌های آبیاری، مطالعات بیلان آبی و زیست‌محیطی، مطالعات کشاورزی و به ویژه تأمین نیاز آبی گیاهان زراعی بازی می‌کند. بنابراین محاسبه تبخیر و تعرق در ماه‌های مختلف سال و به تبع آن در مقاطع زمانی سالانه و فصلی برای ایستگاه‌های واقع در حوضه آبریز فلات مرکزی ایران طی دوره‌ی آماری ۲۰۱۲-۱۹۹۵ با استفاده از روش فائو-پنمن-مانتیث و مدلسازی و تخمین مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع با تکیه بر پنج عامل اقلیمی (حداکثر و حداقل دما، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و متوسط سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین) و بر

جدول ۱- مقادیر sig حاصل از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف برای بررسی نرمال بودن داده‌ها بعد از تبدیل لگاریتمی

مقیاس زمانی (سالانه و فصلی)	متوسط دمای حداقل C°	متوسط دمای حداکثر C°	متوسط رطوبت نسبی (درصد)	سرعت باد km/day	ساعات آفتابی hours
بهار	۰/۸۹	۰/۴۸	۰/۷۳	۰/۹۸	۰/۲۳
تابستان	۰/۹۸	۰/۶۶	۰/۳۰	۰/۹۳	۰/۲۸
پاییز	۰/۸۶	۰/۵۱	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۸۷
زمستان	۰/۸۳	۰/۳۵	۰/۶۲	۰/۱۸	۰/۴۷
سالانه	۰/۸۴	۰/۵۲	۰/۸۵	۰/۹۷	۰/۳۴

برای تخمین ETo بشمار می‌رود و مورد توجه متخصصان قرار دارد. این معادله به‌منزله تنها روش استاندارد برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل و نیز برای ارزیابی دیگر روش‌ها پیشنهاد شده است (Hargreaves, 1994). معادله‌ی فائو-پنمن-مانتیث برای محاسبه تبخیر و تعرق مرجع به‌صورت زیر است (وزیری و همکاران، ۱۳۸۷).

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \left[\frac{890}{T+273}\right]U_2(e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

و تعرق گیاه مرجع از طریق روش رگرسیون مورد استفاده قرار گرفت. از مدل‌های رگرسیونی چندمتغیره برای مدل سازی رابطه عوامل اقلیمی با تبخیر و تعرق فصلی و سالانه استفاده شد. در این مدل‌های آماری فرض بر این است که رابطه بین متغیرهای مستقل (دماهای حداکثر و حداقل ماهانه، متوسط رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین) و متغیرهای وابسته (میزان تبخیر و تعرق سالانه و فصلی) به‌صورت زیر است:

$$y = b_0 + b_1(x_1) + b_2(x_2) + \dots + b_p(x_p) \quad (2)$$

الف) فرضیه وجود رابطه خطی بین متغیرهای مستقل و وابسته: این فرضیه با استفاده از آماره F آزمون می‌شود. مقدار F بر اساس معادله زیر به دست می‌آید:

$$F = \frac{R^2}{1-R^2} \times \frac{n-P-1}{P} \quad (3)$$

که در این رابطه، P تعداد متغیرهای پیش‌بین و n تعداد موارد موجود خواهد بود. چنانچه مقدار F محاسباتی از مقدار F جدول فیشر بزرگ‌تر باشد، می‌رساند که رابطه

بعد از فراهم نمودن داده‌های مورد نیاز و اطمینان از همگنی و نرمال بودن داده‌ها، با استفاده از نرم‌افزار Cropwat مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل با روش فائو-پنمن-مانتیث در مقیاس‌های زمانی ماهانه، فصلی و سالانه برای هر یک از ایستگاه‌های واقع در حوضه آبریز فلات مرکزی محاسبه گردید. معادله فائو-پنمن-مانتیث یکی از معتبرترین روش‌ها

که در این رابطه: ETo، تبخیر و تعرق گیاه مرجع (mm/day)؛ Rn، تابش خالص در سطح پوشش گیاهی (mmj m⁻² d⁻¹)؛ T، متوسط دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از زمین (C°)؛ U2، سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از زمین (ms⁻¹)؛ ea - ed، کمبود فشار بخار در ارتفاع ۲ متری (kpa)؛ Δ، شیب منحنی فشار (kpa⁰c⁻¹)؛ γ، ضریب رطوبتی (kpa⁰c⁻¹)؛ G، شار گرما به داخل خاک (mm/day) می‌باشد.

مقادیر ETo به‌دست آمده به عنوان متغیر وابسته و پنج عامل اقلیمی به عنوان متغیرهای مستقل جهت برآورد مقادیر تبخیر

که در این معادله پارامترهای b1 و b2 و ... و bp، ضرایب رگرسیون جزئی و b0 مقدار عرض از مبدأ است که مقدار ثابت رگرسیون نیز نامیده می‌شود.

گام بعدی بررسی اندازه‌گیری دقت مدل انتخاب شده است. برای اندازه‌گیری این دقت بایستی چهار فرضیه بنیادی در مدل‌های رگرسیونی مورد بحث و بررسی قرار گیرند. این چهار فرضیه عبارت‌اند از:

بین Y و ترکیب خطی متغیرهای X_1 و X_2 و ... و XP احتمالاً نمی‌تواند ناشی از تصادف باشد. (ب) فرضیه نرمال بودن خطاها (e_i): که مهم‌ترین فرضیه بنیادی در رگرسیون است و از طریق نمودار $P.P$ plot مشاهده شده (\hat{y}_i) با مقادیر پیش‌بینی شده (\hat{y}_i) و مقادیر $\phi^{-1} \frac{(j-1/2)}{n}$ که از روی جدول توزیع نرمال محاسبه می‌شود؛ برای محور y به دست می‌آید. حال اگر نقاط حول و حوش یک خط راست قرار گیرند، حاکی از نرمال بودن e_i است.

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز فلات مرکزی ایران با مساحتی بالغ بر ۸۲۴۶۱۱ کیلومتر مربع که در حدود ۵۱٪ از مساحت کشور را در بر می‌گیرد در محدوده طول شرقی ۴۸ درجه و ۰۸ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۲۹ دقیقه و عرض شمالی ۲۶ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۲۵ دقیقه قرار دارد. میانگین بارش سالانه حوضه، ۱۱۵ میلی‌متر می‌باشد. این منطقه توسط کوه‌های البرز در شمال، زاگرس در غرب و جنوب و کوهگی مشرق ایران محدود می‌شود و تمام رودخانه‌هایی که در این حوضه جریان دارند به دریاچه‌ها، باتلاق‌ها و کویرهای بسته داخلی مثل دریاچه نمک، کویر سیرجان یا باتلاق گاوخونی منتهی می‌شود. این حوضه آبریز به ۹ زیر حوضه کوچک‌تر تقسیم می‌شود که حوضه آبخیز کویر مرکزی با مساحت ۲۲۶۵۲۳ کیلومتر مربع، وسیع‌ترین و حوضه آبریز طشک، بختگان و مهارلو با مساحت ۳۱۴۹۲ کیلومتر مربع، کوچکترین زیر حوضه فلات مرکزی محسوب می‌شود. شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه و پراکنش ایستگاه‌های سینوپتیک واقع در حوضه آبریز فلات مرکزی ایران را نشان می‌دهد.

فرضیه ثابت بودن واریانس خطاها (e_i): این فرضیه از طریق رسم نمودار (e_i و \hat{y}_i) یعنی نمودار باقیمانده‌ها علیه مقادیر پیش‌بینی شده متغیر وابسته آزمون می‌شود. اگر نقاط به دست آمده دارای روند خاصی نباشند و به‌طور کاملاً تصادفی در محور مختصات پخش شده باشند حاکی از ثابت بودن واریانس خواهد بود.

(ج) فرضیه ناهمبسته بودن خطاها (e_i): جهت اطمینان بیشتر از اینکه تا چه حد می‌توان در تخمین مقادیر بارش برحسب مدل رگرسیون چندمتغیره، تبیین مناسبی ارائه نمود، از آزمون دوربین-واتسون^۱ برای سنجش میزان خودهمبستگی خطاها استفاده شد. شاخص دوربین-واتسون (D) بین ۰ الی ۴ قرار می‌گیرد. اگر D بین ۱/۵ تا ۲/۵ قرار گیرد، نشانه عدم خودهمبستگی خطاها خواهد بود.

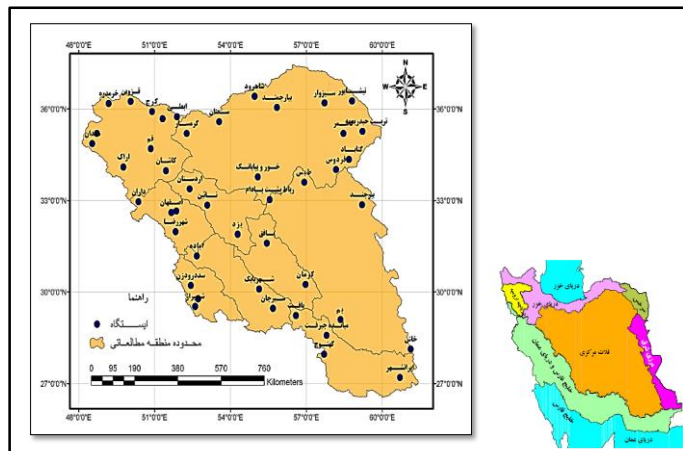
برای مشخص شدن سهم هر یک از متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته (تبخیر و تعرق) به ضرایب رگرسیون فاقد واحد نیاز است؛ چرا که واحد اندازه‌گیری متغیرهای اقلیمی متفاوت است؛ بنابراین می‌بایست از ضرایب رگرسیون استاندارد بهره گرفت.

بدین منظور دو روش استانداردسازی وجود دارد که عبارت‌اند از: نمره استاندارد Z و نمره استاندارد W (عساکره، ۱۳۹۰). در این تحقیق از نمره استاندارد Z جهت استانداردسازی رگرسیون استفاده گردید. در این روش متغیرهای مستقل و وابسته همگی به نمره استاندارد Z

1-Durbin-Watson

2-Z-Standard Score

3- Geographic Information System



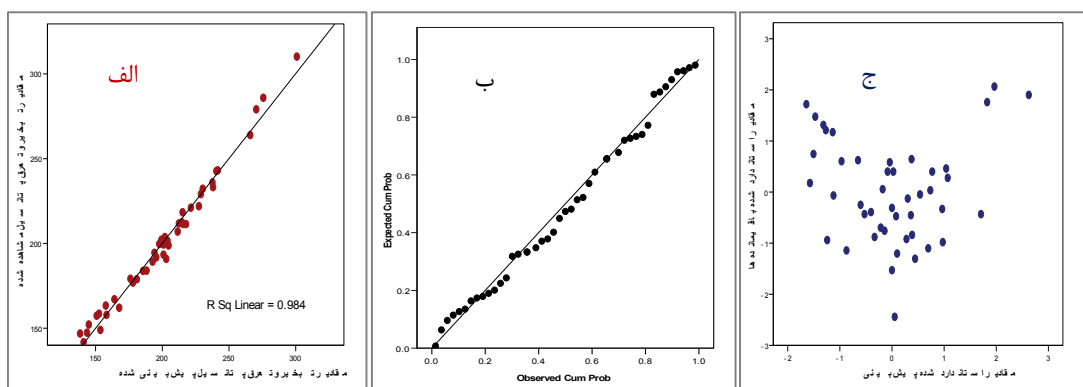
شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و پراکنش ایستگاه‌های سینوپتیک واقع در حوضه آبریز فلات مرکزی ایران

نتایج و بحث

الف) مدل تبخیر و تعرق گیاه مرجع در فصل بهار

ورود متغیرهای مورد مطالعه به مدل رگرسیونی نشان می‌دهد که میزان ضریب همبستگی این مدل با مقدار ETo فصل بهار ۰/۹۹۲ و ضریب تعیین آن ۰/۹۸۴ است. حدود ۹۸٪ تغییرات تبخیر و تعرق حوضه آبریز فلات مرکزی توسط این پنج متغیر می‌تواند تبیین شود. نرمال بودن خطاها با استفاده از نمودار P.P plot آزمون شد. در شکل (۲-ب)

چون مختصات نقاط مشاهده شده در حول و حوش خط نرمال قرار گرفته‌اند؛ پس می‌توان گفت که مانده‌ها از توزیع نرمال پیروی می‌کنند. ثابت بودن واریانس خطاها توسط نموداری که محور افقی آن مقادیر استاندارد شده پیش‌بینی و محور عمودی آن مقادیر استاندارد شده باقیمانده‌هاست، آزمون می‌شود. بر اساس شکل (۲-ج) مشاهده می‌شود که روند خاصی در این نمودار دیده نمی‌شود؛ پس ثابت بودن واریانس خطاها نیز تأیید می‌شود.



شکل ۲- نمودار همبستگی ETo تخمین شده و ETo مشاهده شده (الف)، نمودار P.P plot جهت آزمون نرمال بودن خطاها (ب) نمودار $(\hat{y}_i$ و e_i) جهت آزمون ثابت بودن واریانس خطاها (ج)

متغیرهای مستقل با متغیر وابسته با استفاده از آماره‌ی F آزمون شد و مشخص گردید که F محاسباتی بزرگ‌تر از F

با توجه به جدول ۲ فرضیه‌های مربوط به خطی بودن رابطه و ناهمبسته بودن خطاها اثبات گردید. خطی بودن رابطه بین

فاصل بین ۱/۵ تا ۲/۵ قرار می‌گیرد، پس ناهمبسته بودن خطاها نیز تأیید می‌گردد. بنابراین با توجه به نتایج آزمون فرضیات می‌توان مدل رگرسیونی پنج متغیره تبخیر و تعرق فصل بهار با عوامل اقلیمی را بر اساس جدول ۳ به شرح ذیل ارائه نمود:

$$\text{Annual ETo} = -104.21 + (1.67 \times T_{\min}) + (3.60 \times T_{\max}) + (-0.43 \times H) + (0.33 \times W) + (10.88 \times S)$$

جدول بوده و در نتیجه فرضیه خطی بودن رابطه بین متغیرهای مستقل با وابسته در این مدل تأیید می‌شود. همچنین ناهمبسته بودن خطاها نیز توسط شاخص دوربین-واتسون مورد آزمون قرار گرفت. مقدار این شاخص برای مدل تبخیر و تعرق فصل بهار ۲/۰۵ است و چون در حد

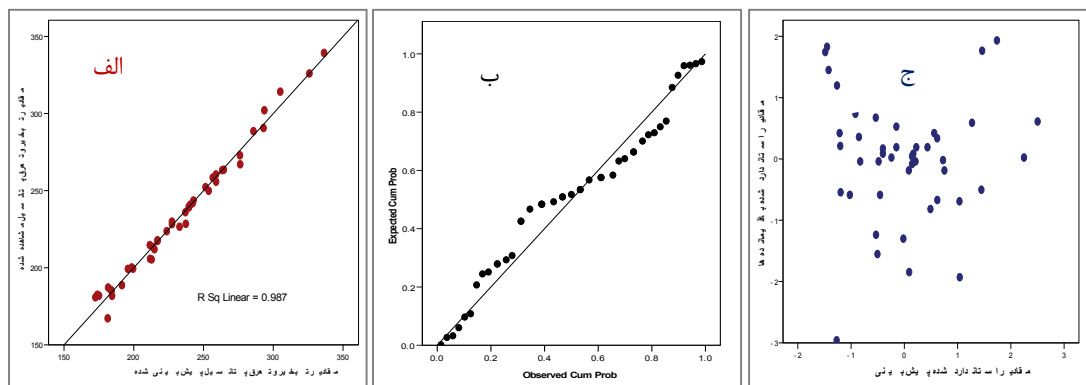
جدول ۳- آماره‌های مربوط به ضرایب رگرسیون پنج متغیره برای تبیین تبخیر و تعرق حوضه آبریز فلات مرکزی ایران در فصل بهار

مدل	مستقل	حداقل دما	حداکثر دما	رطوبت نسبی	سرعت باد	ساعات آفتابی
ضرایب B	-۱۰۴/۲۱۱	۱/۶۷۱	۳/۶۰۱	-۰/۴۳۲	۰/۳۳۷	۱۰/۸۸۶
غیراستاندارد	۳۱/۸۳۲	۰/۴۵۵	۰/۴۴۹	۰/۱۸۵	۰/۰۱۳	۲/۷۸۲
ضرایب بتا	***	۰/۱۹۲	۰/۴۱۶	-۰/۰۸۸	۰/۵۹۰	۰/۱۲۱
استاندارد						
T	-۳/۲۷۴	۳/۶۷۶	۸/۰۱۴	-۲/۳۳۸	۲۶/۶۰۹	۳/۹۱۳
سطح معنی داری	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۰/۰۲۵	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰

بنابراین حدود ۹۸٪ تغییرات تبخیر و تعرق پتانسیل حوضه آبریز فلات مرکزی توسط این پنج متغیر می‌تواند تبیین شود، نرمال بودن خطاها با استفاده از نمودار P.P plot آزمون شد. شکل (۳-ب) نشان می‌دهد که مختصات نقاط مشاهده شده در حول و حوش خط نرمال قرار گرفته‌اند؛ بنابراین مانده‌ها از توزیع نرمال پیروی می‌کنند. بر اساس شکل (۳-ج) ثابت بودن واریانس خطاها توسط نمودار \hat{y}_i و e_i آزمون شد. روند خاصی در این نمودار دیده نمی‌شود؛ پس ثابت بودن واریانس خطاها نیز تأیید می‌شود.

ضرایب استاندارد محاسبه شده نشان می‌دهد که در فصل بهار، سرعت باد و حداکثر دما به ترتیب با مقدار ۰/۵۹ و ۰/۴۱ دارای بیشترین اهمیت در تبیین تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع هستند و رطوبت نسبی کمترین تأثیر را در میزان تبخیر و تعرق این فصل دارد.

ب) مدل تبخیر و تعرق گیاه مرجع در فصل تابستان با وارد کردن پنج متغیر دماهای حداکثر و حداقل ماهانه، متوسط رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد فصل تابستان به مدل رگرسیونی مشخص گردید که میزان ضریب همبستگی این مدل با مقدار تبخیر و تعرق فصل تابستان ۰/۹۹۳ و ضریب تعیین آن ۰/۹۸۷ است؛ شکل (۳-الف).



شکل ۳- نمودار همبستگی ETo تخمین شده و ETo مشاهده شده (الف)، نمودار P.P plot جهت آزمون نرمال بودن خطاها (ب)

نمودار $(\hat{y}_i$ و $e_i)$ جهت آزمون ثابت بودن واریانس خطاها (ج)

واتسون مورد آزمون قرار گرفت. مقدار این شاخص برای مدل تبخیر و تعرق فصل تابستان ۲/۲۶ است؛ پس ناهمبسته بودن خطاها نیز تأیید می‌گردد. بنابراین با توجه به نتایج آزمون فرضیات می‌توان مدل رگرسیونی پنج متغیره تبخیر و تعرق گیاه مرجع فصل تابستان با عوامل اقلیمی را بر اساس جدول ۴ به شرح ذیل ارائه نمود:

$$\text{Annual ETo} = -34.90 + (0.70 \times T_{\min}) + (4.31 \times T_{\max}) + (-0.95 \times H) + (0.42 \times W) + (2.71 \times S)$$

جدول ۴- آماره‌های مربوط به ضرایب رگرسیون پنج متغیره برای تبیین تبخیر و تعرق حوضه آبریز فلات مرکزی ایران در فصل تابستان

مدل	مستقل	حداقل دما	حداکثر دما	رطوبت نسبی	سرعت باد	ساعات آفتابی
ضرایب B	-۳۴/۹۰۴	۰/۷	۴/۳۱۴	-۰/۹۵۸	۰/۴۲۳	۲/۷۱۸
غیراستاندارد	۲۶/۹۳۹	۰/۳۴۵	۰/۴	۰/۱۴۲	۰/۰۱	۱/۹۳۸
ضرایب استاندارد	***	۰/۰۶۹	۰/۳۶	-۰/۱۴۹	۰/۸۱۷	۰/۰۳
T	-۱/۲۶۹	۲/۰۳۱	۱۰/۷۹۴	-۶/۷۵۷	۴۱/۱۵۸	۱/۴۰۲
سطح معنی‌داری	۰/۲۰۳	۰/۰۴۹	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۱۶۹

با توجه به جدول ۲ خطی بودن رابطه بین پنج متغیر اقلیمی با تبخیر و تعرق گیاه مرجع با استفاده از آماره F آزمون شد و مشخص گردید که F محاسباتی بزرگ‌تر از F جدول (۳/۵۰) بوده و در نتیجه فرضیه خطی بودن رابطه بین متغیرهای مستقل با وابسته در این مدل تأیید می‌شود. همچنین ناهمبسته بودن خطاها نیز توسط شاخص دوربین-

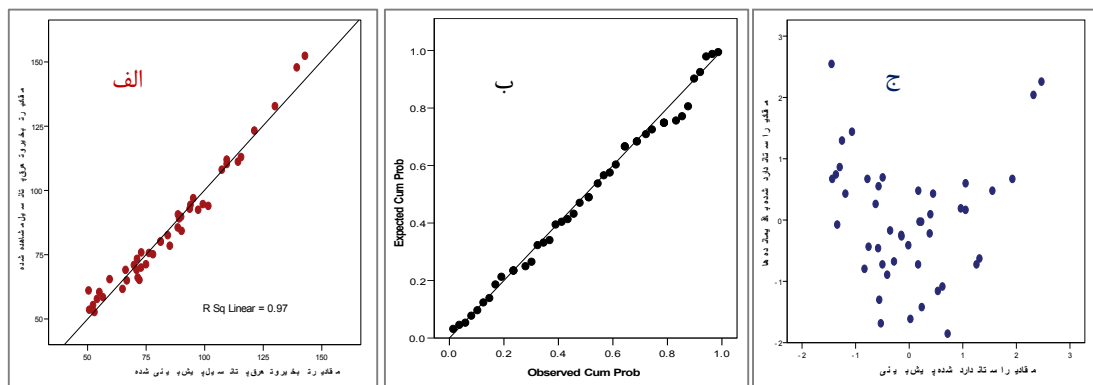
شده در حول و حوش خط نرمال قرار گرفته‌اند؛ پس می‌توان گفت که مانده‌ها از توزیع نرمال پیروی می‌کنند. مطابق شکل (۴-ج) روند خاصی در نمودار $(\hat{y}_i \text{ و } e_i)$ دیده نمی‌شود؛ پس ثابت بودن واریانس خطاها تأیید می‌شود.

با توجه به جدول ۲ فرضیه‌های مربوط به خطی بودن رابطه و ناهمبسته بودن خطاها اثبات گردید و مشخص گردید که F محاسباتی (۲۴۷/۱) بزرگ‌تر از F جدول بوده و در نتیجه فرضیه خطی بودن رابطه بین متغیرهای مستقل با وابسته تأیید می‌شود. با توجه به اینکه مقدار شاخص دوربین- واتسون برای مدل تبخیر و تعرق فصل پاییز ۲/۴۳ است؛ بنابراین ناهمبسته بودن خطاها نیز تأیید می‌گردد.

ضرایب استاندارد محاسبه شده نشان می‌دهد که در فصل تابستان، سرعت باد و حداکثر دما به ترتیب با مقدار ۰/۸۱ و ۰/۳۶ بیشترین تأثیرگذاری را در مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل دارند و ساعات آفتابی با مقدار ۰/۰۳ دارای کمترین اهمیت در تبیین تبخیر و تعرق این فصل است.

ج) مدل تبخیر و تعرق گیاه مرجع در فصل پاییز

میزان ضریب همبستگی این مدل با مقدار ETo فصل پاییز ۰/۹۸۵ و ضریب تعیین آن ۰/۹۷ است. مطابق شکل (۴-الف) حدود ۹۷٪ تغییرات تبخیر و تعرق حوضه آبریز فلات مرکزی توسط این پنج متغیر می‌تواند تبیین شود. شکل (۴-ب) آزمون نرمال بودن خطاها را با استفاده از نمودار P.P plot نشان می‌دهد. در این نمودار مختصات نقاط مشاهده



شکل ۴: نمودار همبستگی ETo تخمین شده و ETo مشاهده شده (الف)، نمودار P.P plot جهت آزمون نرمال بودن خطاها (ب) نمودار $(\hat{y}_i \text{ و } e_i)$ جهت آزمون ثابت بودن واریانس خطاها (ج)

با توجه به نتایج آزمون فرضیات می‌توان مدل رگرسیونی پنج متغیره‌ی تبخیر و تعرق گیاه مرجع فصل پاییز با عوامل اقلیمی را بر اساس جدول ۵ به شرح ذیل ارائه کرد:

$$\text{Annual ETo} = -60.14 + (0.82 \times T_{\min}) + (1.97 \times T_{\max}) + (-0.03 \times H) + (0.26 \times W) + (8.60 \times S)$$

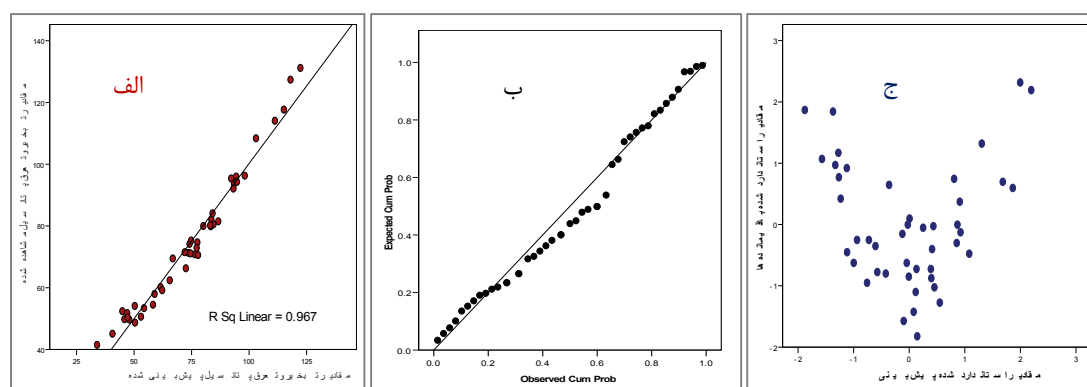
جدول ۵- آماره‌های مربوط به ضرایب رگرسیون پنج متغیره برای تبیین تبخیر و تعرق حوضه آبریز فلات مرکزی ایران در فصل پاییز

مدل	مستقل	حداقل دما	حداکثر دما	رطوبت نسبی	سرعت باد	ساعات آفتابی
ضرایب	B	۰/۸۲	۱/۹۷۸	-۰/۰۳	۰/۲۶۶	۸/۶۰۱
غیراستاندارد	انحراف معیار	۲۲/۹۰۵	۰/۳۶۸	۰/۴۳۲	۰/۰۱۴	۲/۱۷۵
ضرایب استاندارد	بتا	***	۰/۱۲۷	۰/۳۳	۰/۶۱۴	۰/۲۸۴
T		-۲/۶۲۶	۲/۲۳	۴/۵۷۵	۱۸/۸۸۶	۳/۹۵۴
سطح معنی داری		۰/۰۱۲	۰/۰۳۲	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰

ضرایب استاندارد محاسبه شده نشان می‌دهد که در فصل پاییز، سرعت باد، حداکثر دما و ساعات آفتابی به ترتیب با مقدار ۰/۶۱، ۰/۳۳ و ۰/۲۸ بیشترین تأثیرگذاری را در مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل دارند و رطوبت نسبی دارای کمترین اهمیت در تبیین تبخیر و تعرق این فصل است.

د) مدل تبخیر و تعرق گیاه مرجع در فصل زمستان

ورود متغیرهای مورد مطالعه فصل زمستان به مدل رگرسیونی نشان می‌دهد که میزان ضریب همبستگی این مدل با مقدار تبخیر و تعرق گیاه مرجع فصل زمستان ۰/۹۸۴ و ضریب تعیین آن ۰/۹۶۷ است. یعنی حدود ۹۶٪ تغییرات تبخیر و تعرق حوضه آبریز فلات مرکزی توسط این پنج متغیره می‌تواند تبیین شود. شکل (۵-ب) نشان می‌دهد که مختصات نقاط مشاهده شده در حول و حوش خط نرمال قرار گرفته‌اند؛ پس می‌توان گفت که مانده‌ها از توزیع نرمال پیروی می‌کنند. شکل (۵-ج) نمودار پراکنش مقادیر باقیمانده‌ها در مقابل مقادیر تخمین شده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود روند خاصی در این نمودار دیده نمی‌شود؛ پس ثابت بودن واریانس خطاها نیز تأیید می‌شود.



شکل ۵: نمودار همبستگی ETo تخمین شده و ETo مشاهده شده (الف)، نمودار P.P plot جهت آزمون نرمال بودن خطاها (ب)

نمودار (\hat{y}_i و e_i) جهت آزمون ثابت بودن واریانس خطاها (ج)

شد و مشخص گردید که F محاسباتی (۲۳۰/۷) بزرگ‌تر از F جدول بوده و در نتیجه فرضیه خطی بودن رابطه پنج متغیره اقلیمی با تبخیر و تعرق گیاه مرجع در این مدل تأیید

با توجه به جدول ۲ فرضیه‌های مربوط به خطی بودن رابطه و ناهمبسته بودن خطاها اثبات گردید. خطی بودن رابطه بین متغیره‌های مستقل با متغیره وابسته با استفاده از آماره F آزمون

می‌شود. ناهمبسته بودن خطاها نیز توسط شاخص دوربین-واتسون مورد آزمون قرار گرفت. مقدار این شاخص برای مدل تبخیر و تعرق فصل زمستان ۲/۴۸ است و در حد فاصل بین ۱/۵ تا ۲/۵ قرار می‌گیرد، بنابراین ناهمبسته بودن خطاها تأیید می‌گردد.

$$\text{Annual ETo} = -18.82 + (0.82 \times T_{\min}) + (2.03 \times T_{\max}) + (-0.28 \times H) + (0.15 \times W) + (6.89 \times S)$$

جدول ۶- آماره‌های مربوط به ضرایب رگرسیون پنج متغیره برای تبیین تبخیر و تعرق حوضه آبریز فلات مرکزی ایران در فصل زمستان

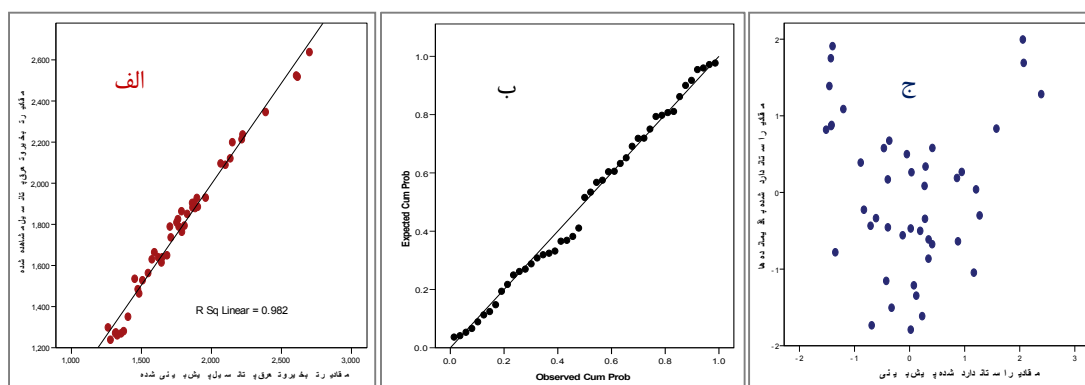
مدل	مستقل	حداقل دما	حداکثر دما	رطوبت نسبی	سرعت باد	ساعات آفتابی
ضرایب B	-۱۸/۸۲۷	۰/۸۲۷	۲/۰۳۸	-۰/۲۸۶	۰/۱۵۹	۶/۸۹۴
غیراستاندارد	۱۷/۹۷۹	۰/۴۷۹	۰/۴۷۲	۰/۱۵۲	۰/۰۱۲	۱/۸۴
ضرایب استاندارد	***	۰/۱۴۷	۰/۴۰۶	-۰/۱۰۶	۰/۴۶۱	۰/۲۱۱
T	-۱/۰۴۷	۱/۷۲۷	۴/۳۱۶	-۱/۸۸۶	۱۳/۶۹۹	۳/۷۴۶
سطح معنی‌داری	۰/۳۰	۰/۰۹۲	۰/۰۰۰	۰/۰۶۷	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱

پنج متغیره می‌تواند تبیین شود شکل (۶-الف). آزمون نرمال بودن خطاها با استفاده از نمودار P.P plot در شکل (۶-ب) نشان می‌دهد که مختصات نقاط مشاهده شده در پیرامون خط نرمال قرار گرفته‌اند؛ پس مانده‌ها از توزیع نرمال پیروی می‌کنند. ثابت بودن واریانس خطاها توسط نمودار $(\hat{y}_i \text{ و } e_i)$ که محور افقی آن مقادیر استاندارد شده پیش بینی و محور عمودی آن مقادیر استاندارد شده باقیمانده‌هاست آزمون شد. بر اساس شکل (۶-ج) مشاهده می‌شود که روند خاصی در این نمودار دیده نمی‌شود؛ پس ثابت بودن واریانس خطاها نیز تأیید می‌شود.

ضرایب استاندارد محاسبه شده نشان می‌دهد که در فصل زمستان، سرعت باد، حداکثر دما و ساعات آفتابی به ترتیب با مقدار ۰/۴۶، ۰/۴۰ و ۰/۲۱ بیشترین اهمیت را در مقدار تبخیر و تعرق دارند و رطوبت نسبی کمترین تأثیر را در تبیین تبخیر و تعرق گیاه مرجع این فصل دارد.

ه) مدل تبخیر و تعرق گیاه مرجع در مقیاس زمانی سالانه

جدول ۲ نشان می‌دهد که میزان ضریب همبستگی این مدل با مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل سالانه، ۰/۹۹۱ و ضریب تعیین آن ۰/۹۸۲ است. یعنی حدود ۹۸ درصد تغییرات تبخیر و تعرق پتانسیل حوضه آبریز فلات مرکزی توسط این



شکل ۶- نمودار همبستگی ETo تخمین شده و ETo مشاهده شده (الف)، نمودار P.P plot جهت آزمون نرمال بودن خطاها (ب)

نمودار $(\hat{y}_i \text{ و } e_i)$ جهت آزمون ثابت بودن واریانس خطاها (ج)

تعرق سالانه ۲/۴۴ محاسبه شد، پس ناهمبسته بودن خطاها نیز تأیید می‌گردد.

نتایج آزمون فرضیات می‌توان مدل رگرسیونی پنج متغیره‌ی تبخیر و تعرق گیاه مرجع سالانه با عوامل اقلیمی را بر اساس جدول ۷ به شرح ذیل ارائه کرد:

با توجه به جدول ۲ فرضیه‌ی خطی بودن رابطه بین متغیرهای اقلیمی با تبخیر و تعرق گیاه مرجع با استفاده از آماره F آزمون شد و مشخص گردید که F محاسباتی بزرگتر از F جدول بوده و در نتیجه فرضیه خطی بودن رابطه بین متغیرهای مستقل با وابسته در این مدل تأیید می‌شود. مقدار شاخص دوربین-واتسون برای مدل تبخیر و

$$\text{Annual ETo} = -794.49 + (19.14 \times T_{\min}) + (30.95 \times T_{\max}) + (-2.60 \times H) + (3.68 \times W) + (111.34 \times S)$$

جدول ۷- آماره‌های مربوط به ضرایب رگرسیون پنج متغیره برای تبیین تبخیر و تعرق حوضه آبریز فلات مرکزی در مقیاس سالانه

مدل	مستقل	حداقل دما	حداکثر دما	رطوبت نسبی	سرعت باد	ساعات آفتابی
ضرایب B	-۷۹۴/۴۹۱	۱۹/۱۴۶	۳۰/۹۵۸	-۲/۶۰۹	۳/۶۸۸	۱۱۱/۳۴۱
غیراستاندارد انحراف معیار	۳۶۱/۰۳۴	۴/۵۶۱	۴/۷۹۸	۲/۲۲۹	۰/۱۳۴	۳۴/۳۰۴
ضرایب استاندارد بتا	***	۰/۲۱۱	۰/۳۴۵	-۰/۰۵۳	۰/۶۳۸	۰/۱۴۳
T	-۲/۲۰۱	۴/۱۹۸	۶/۴۵۳	-۱/۱۷۰	۲۷/۴۹۱	۳/۲۴۶
سطح معنی داری	۰/۰۳۴	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۲۴۹	۰/۰۰۰	۰/۰۰۲

بیشترین تأثیرگذاری را در مقدار تبخیر و تعرق گیاه مرجع دارند و رطوبت نسبی کمترین اهمیت را در تبیین تبخیر و تعرق سالانه دارد.

ضرایب استاندارد محاسبه شده نشان می‌دهد که در مقطع زمانی سالانه، سرعت باد، حداکثر، حداقل دما و ساعات آفتابی به ترتیب با مقدار ۰/۶۳، ۰/۳۴، ۰/۲۱ و ۰/۱۴

جدول ۲- خلاصه آماره‌های مدل رگرسیونی تبخیر و تعرق گیاه مرجع در مقیاس زمانی سالانه و فصلی حوضه آبریز فلات مرکزی ایران

مدل رگرسیونی	ضریب همبستگی	ضریب تبیین	خطای استاندارد برآورد	آماره F محاسباتی	آماره F جدول	درجه آزادی ۱	درجه آزادی ۲	سطح معنی داری	شاخص دوربین-واتسون
بهار	۰/۹۹۲	۰/۹۸۴	۵/۲۱	۴۶۹/۳	۳/۵۰	۵	۳۹	۰/۰۰۰	۲/۰۵
تابستان	۰/۹۹۳	۰/۹۸۷	۵/۰۷	۵۷۷/۹	۳/۵۰	۵	۳۹	۰/۰۰۰	۲/۲۶
پاییز	۰/۹۸۵	۰/۹۷۰	۴/۴۶	۲۴۷/۱	۳/۵۰	۵	۳۹	۰/۰۰۰	۲/۴۳
زمستان	۰/۹۸۴	۰/۹۶۷	۴/۲۵	۲۳۰/۷	۳/۵۰	۵	۳۹	۰/۰۰۰	۲/۴۸
سالانه	۰/۹۹۱	۰/۹۸۲	۵۱/۲۵	۴۲۹/۶	۳/۵۰	۵	۳۹	۰/۰۰۰	۲/۴۴

تعرق به دست آمده از روش رگرسیون مربوط به ایستگاه ایرانشهر واقع در جنوب منطقه و به مقدار ۲۵۱۸/۲ میلی‌متر و کمترین مقدار مربوط به ایستگاه همدان واقع در شمال غرب حوضه و به مقدار ۱۲۷۴/۷ میلی‌متر است. با توجه به ضرایب استاندارد رگرسیون پارامترهای اقلیمی می‌بایست سرعت باد و دمای حداکثر بیشترین تأثیر را بر مقدار تبخیر

در جدول ۸ مقادیر به دست آمده از تبخیر و تعرق گیاه مرجع سالانه و فصلی به هر دو روش فائو-پنمن-مانیتث و رگرسیون چندمتغیره برای شهرهای همدان، سبزوار، ایرانشهر، شیراز و یزد به نمایندگی از ایستگاه‌های واقع در حوضه‌ی آبریز فلات مرکزی ایران آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین مقدار سالانه تبخیر و

و تعرق سالانه داشته باشند. متوسط حداکثر دمای سالانه ایران‌شهر ۳۴/۳ سانتی‌گراد و متوسط سرعت باد ۱۰/۲ کیلومتر بر ساعت است؛ اما در ایستگاه همدان میانگین حداکثر دمای سالانه ۱۹/۸ درجه سانتی‌گراد و متوسط سرعت باد در حدود ۶/۸ کیلومتر بر ساعت است و انتظار می‌رود که مقدار تبخیر و تعرق در ایستگاه ایران‌شهر بیشتر از همدان باشد.

جدول ۸- مقایسه مقادیر تبخیر و تعرق گیاه مرجع سالانه و فصلی به روش فائو-پنمن-مانتیت و مدل رگرسیون در ایستگاه‌های انتخابی

ایستگاه	همدان	سبزوار	ایران‌شهر	شیراز	یزد
	فائو	فائو	فائو	فائو	فائو
	روش	روش	روش	روش	روش
	رگرسیون	رگرسیون	رگرسیون	رگرسیون	رگرسیون
	چندمتغیره	چندمتغیره	چندمتغیره	چندمتغیره	چندمتغیره
	(میلی‌متر)	(میلی‌متر)	(میلی‌متر)	(میلی‌متر)	(میلی‌متر)
مقیاس زمانی					
بهار	۱۴۷/۴	۱۴۳/۶	۲۳۳/۲	۲۳۸	۲۳۰/۳
تابستان	۱۸۰/۸	۱۷۲/۵	۲۹۰/۶	۲۹۳	۲۶۳/۴
پاییز	۶۰/۵	۵۵	۹۴	۱۰۱/۵	۱۰۷/۳
زمستان	۵۰/۴	۴۷/۲	۷۰/۸	۷۶/۴	۹۴/۴
سالانه	۱۳۱۷/۳	۱۲۷۴/۷	۲۰۶۵/۷	۲۰۹۶/۵	۲۰۸۹/۹

ی) پهنه‌بندی تبخیر و تعرق سالانه و فصلی حوضه آبریز فلات مرکزی ایران

با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و با روش میان‌یابی معکوس فاصله‌ی وزنی (IDW)، پهنه‌بندی تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع سالانه و فصلی حوضه آبریز فلات مرکزی ایران انجام گرفت و نقشه‌های مربوط به مقادیر ETo حاصل از معادله فائو-پنمن-مانتیت و مدل رگرسیون چندمتغیره تهیه گردید. نتایج مربوط به ارزیابی مدل‌های تخمینی در روش معکوس فاصله‌ی وزنی با استفاده از معیار آماری ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSe) در جدول ۹ مشخص گردیده است. همانطور که مشاهده می‌شود در هر دو روش، مقدار خطا برای فصول بهار، تابستان و مقیاس زمانی سالانه نسبت به فصول پاییز و زمستان کمتر است. در فصول بهار و تابستان، بیشترین مقدار تبخیر و تعرق گیاه مرجع در هر دو روش فائو-پنمن-مانتیت و رگرسیون در منطقه جنوب حوضه آبریز فلات مرکزی مانند

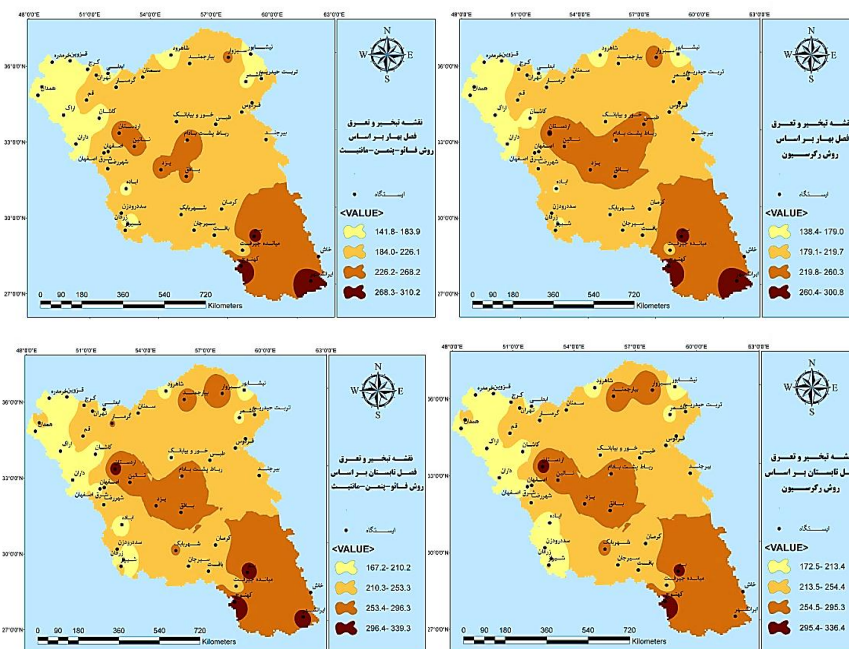
ایستگاه‌های ایران‌شهر، کهنوج، جیرفت و خاش و نیز مرکز حوضه مانند یزد، بافق، رباط پشت بادام، اردستان و نائین و کمترین میزان ETo در شمال غرب حوضه آبریز و در ایستگاه‌های کاشان، همدان، اراک، داران، قزوین و خرمدره مشاهده می‌شود؛ بنابراین می‌توان گفت که مقدار تبخیر و تعرق از شمال به جنوب منطقه مورد مطالعه دارای روند کاهشی است. در تابستان، سرعت باد و متوسط دما به ترتیب بیشترین تأثیر را در افزایش مقدار تبخیر و تعرق دارند، اما در فصل بهار هر دو عامل دما و باد به یک میزان بر مقدار تبخیر و تعرق منطقه اثر می‌گذارند. در فصول سرد سال یعنی پاییز و زمستان تقریباً همان شرایط مشاهده می‌شود با این تفاوت که، مناطق دارای کمترین مقدار تبخیر و تعرق گسترش بیشتری داشته و ایستگاه‌های شمالی مانند سمنان، شاهرود، نیشابور، تربت‌حیدریه، کاشمر و فردوس را در برمی‌گیرد. در فصل زمستان از مرکز حوضه به سمت عرض‌های پایین‌تر به دلیل افزایش نسبی دما و سرعت باد، مقدار تبخیر و تعرق روند افزایشی را نشان می‌دهد. در این فصول، سرعت باد، دمای حداکثر و ساعات آفتابی به ترتیب

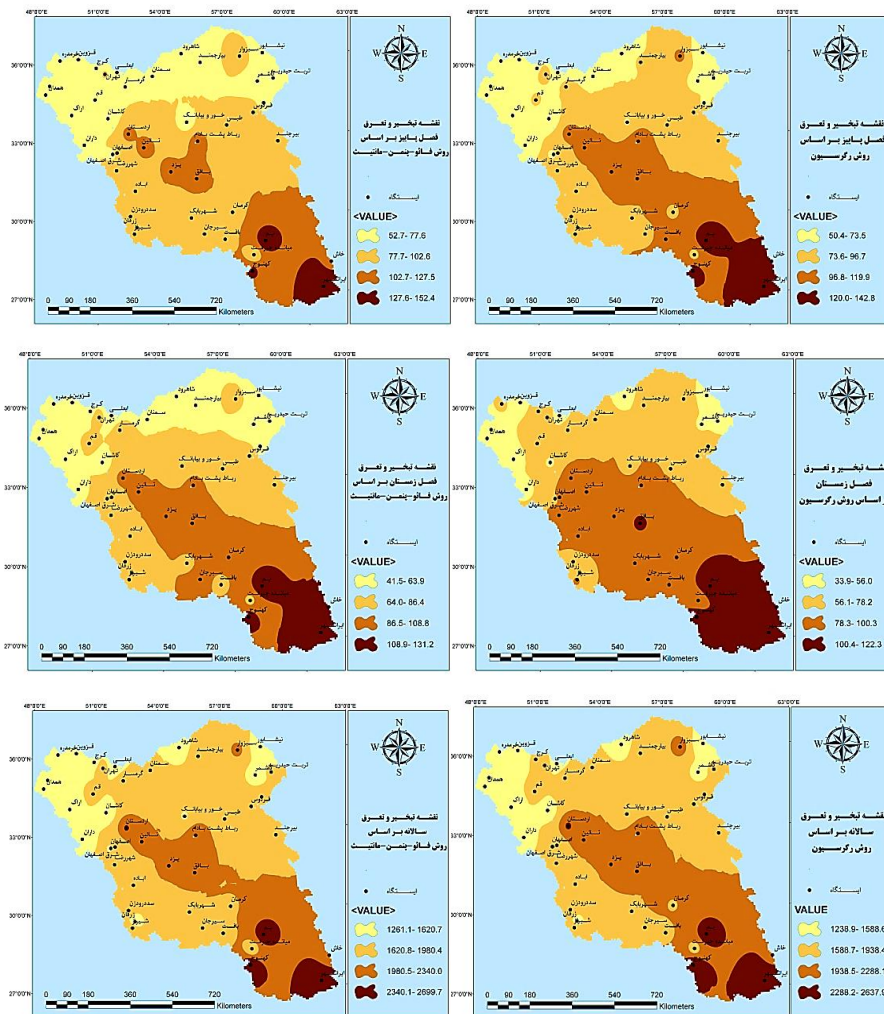
متوسط دمای حداکثر و دمای حداقل به ترتیب بیشترین تأثیر را در تشدید مقدار تبخیر و تعرق دارند.

بیشترین اثرگذاری را بر مقدار تبخیر و تعرق گیاه مرجع دارند. در مقیاس زمانی سالانه نیز مقدار ETo در نواحی شمالی کمتر و در مناطق جنوبی بیشتر می‌باشد. سرعت باد،

جدول ۹- نتایج ارزیابی مدل‌های تخمینی روش معکوس فاصله وزنی با استفاده از معیار آماری RMSe

RMSe	مدل تخمینی (روش IDW)	مقیاس زمانی	روش تخمین تبخیر و تعرق پتانسیل
۰/۷۹	بهینه با توان ۲/۶۰	بهار	روش فائو-پنمن-مانتیت
۰/۷۱	بهینه با توان ۲/۴۶	تابستان	
۱/۰۸	بهینه با توان ۲/۵۲	پاییز	
۱/۲۴	بهینه با توان ۲/۴۵	زمستان	
۰/۸۳	بهینه با توان ۲/۳۱	سالانه	
۰/۸۲	بهینه با توان ۲/۵۳	بهار	مدل رگرسیون چند متغیره
۰/۷۸	بهینه با توان ۲/۴۰	تابستان	
۱/۱۷	بهینه با توان ۲/۳۸	پاییز	
۱/۳۱	بهینه با توان ۲/۲۱	زمستان	
۰/۹۰	بهینه با توان ۲/۴۴	سالانه	





شکل ۷- پهنه‌بندی مقادیر تبخیر و تعرق سالانه و فصلی حوضه آبریز فلات مرکزی بر اساس روش پنمن-مانتیت و رگرسیون چند متغیره مستقل و وابسته از طریق آماره F ، فرضیه نرمال بودن باقیمانده‌ها از طریق نمودار P.P plot، فرضیه ثابت بودن واریانس باقیمانده‌ها از طریق رسم نمودار (e_i) و (\hat{y}_i) و فرضیه ناهمبسته بودن خطای مدل با استفاده از آزمون دوربین-واتسون مورد آزمون قرار گرفت و از درستی دقت مدل‌ها اطمینان حاصل گردید. نتایج حاصل از اجرای مدل نشان داد که رابطه قوی بین ET_o حاصل از رگرسیون چندمتغیره با پنج عامل اقلیمی وجود دارد؛ بطوریکه در مقطع زمانی سالانه و فصول بهار و تابستان حدود ۹۸ درصد تغییرات ET_o توسط این پنج متغیر تبیین می‌شود و در فصول پاییز و زمستان به ترتیب حدود ۹۷ و ۹۶ درصد از تغییرات تبخیر و تعرق با تغییرات عوامل اقلیمی مشترک است. معادلات رگرسیون استاندارد مبین آن است که سهم متغیرهای سرعت باد و دمای حداکثر در میزان تبخیر و

نتیجه‌گیری:

هدف از این تحقیق ارائه یک مدل رگرسیونی است که با مبنا قرار دادن روش فائو-پنمن-مانتیت بتوان مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع را با عوامل اقلیمی برآورد کرد. در این پژوهش با استفاده از قابلیت نرم‌افزار Cropwat و از طریق داده‌های ماهانه حداکثر و حداقل دما، متوسط رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و متوسط سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین ایستگاه‌های سینوپتیک واقع در حوضه آبریز فلات مرکزی ایران طی دوره آماری ۱۸ ساله (۲۰۱۲-۱۹۹۵)، مقادیر تبخیر و تعرق در مقیاس‌های زمانی سالانه و فصلی به روش FAO-56-PM محاسبه گردید. با استفاده از نرم‌افزار SPSS.20 رابطه بین عوامل اقلیمی فوق با مقدار تبخیر و تعرق از طریق رگرسیون چندمتغیره مدل سازی گردید. فرضیه خطی بودن رابطه خطی بین متغیرهای

microsilica data in Isfahan region. Second National Conference on Irrigation and Drainage Networks, Ahvaz Shahid Chamran University, Ahvaz.

2. Alizadeh, A. (2010). Principles of Applied Hydrology. Mashhad, Imam Reza University.

3. Alizadeh, A., Kamali., G., Khanjani, M.J., & Rahnamood, M.R. (2004). Estimation of evapotranspiration estimation methods in arid regions of Iran. Quarterly journal of geographic research, No. 73, pp. 105-97.

4. Allen, R.G., Pereira, L.S., Reas, D. & Smith, M. (1998). Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirement, FAO Irrigation and Drainage Paper No.56, Rome, Italy.

5. Arabsolagh, A.A., Dehghan, H., Sedghi, H., & Naderifar, M. (2011). Projection of annual evapotranspiration with application of meteorological data in a number of semi arid regions of Iran. Journal of Water Resources Engineering, pp. 30-21.

6. Asakereh, H. (2011). Basics of Statistical Climatology. Zanjan University of Zanjan.

7. Azizi, G., Hanafi, A., & Soltani, M. (2009). Estimation of Potential Evapotranspiration through Multivariate Regression in Isfahan Province. Quarterly Geography, No. 11, pp. 92-77.

8. Bakhtiari, B., Mohebbi Dehaghani, A.R., & Qaderi, K. (2015). Estimation of daily reference evapotranspiration with limited meteorological data in selected Iran's semi-arid climates. Iranian Water Resources Research, No. 3, pp. 144-131.

9. Burn D.H. & N.M., Hesch. (2007). Trends in Evaporation for Canadian Prairies. J. of Hydrology, 336, PP. 61-73.

10. Djaman, K.B., Balde, A., Sow, A., Muller, B., Irmak, S.K., N'Diaye, M., Manneh, B.D., Moukoubi, Y., Futakuchi, K., & Saito, K. (2015). Evaluation of sixteen reference Evapotranspiration methods under sahelian conditions in the Senegal River Valley. J. Hydrol. Region. Stud. 3: 139-159.

11. Ghahraman, B. (2006). Time Trend in the Mean Annual Temperature of Iran, Turk. J. Agric forest. 30, PP. 439-448.

12. Hargreaves, G.H. (1994). Defining and Hsing Reference Evapotranspiration, Journal of Irrigation and Drainage Engineering Vol. 120, No. 6, PP. 1132-1139.

13. Jamei, M., & Mousavi Payegi, M. (2013). Spot Estimation and Zoning of Reference Evapotranspiration in Khuzestan Province. Magazine Geography and Development Zone, No. 21, pp. 42-23.

تعرق سالانه و فصلی بیش از سایر عوامل اقلیمی است. در فصل تابستان، ساعات آفتابی و در دیگر فصول سال و نیز مقیاس زمانی سالانه، رطوبت نسبی کمترین تأثیر را بر مقدار تبخیر و تعرق دارد. همچنین بیشترین تأثیر باد و دمای حداکثر به ترتیب در فصول تابستان به مقدار ۰/۸۱ و بهار به میزان ۰/۴۱ در محدوده مورد مطالعه محاسبه شد.

مقایسه نقشه‌های هم تبخیر سالانه و فصلی حوضه آبریز فلات مرکزی نشان داد که از لحاظ مکانی نیز ارتباط نزدیک و قابل قبولی بین روش فائو-پنمن-مانتیث و مدل رگرسیون وجود دارد. شمال غرب حوضه از کمترین مقدار تبخیر و تعرق و مناطق جنوبی از بیشترین میزان تبخیر و تعرق سالانه و فصلی برخوردار می‌باشند. نتایج این تحقیق با مطالعات عزیززی و همکاران (۱۳۸۸) در برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل از طریق رگرسیون چندمتغیره در استان اصفهان، طالبی و همکاران (۱۳۸۹) در بررسی میزان حساسیت پدیده‌ی تبخیر و تعرق نسبت به تغییر پارامترهای اقلیمی مؤثر بر آن در استان یزد، عرب سلغار و همکاران (۱۳۹۰) در پیش‌بینی تبخیر و تعرق سالانه با کاربرد داده‌های هواشناسی در شماری از ایستگاه‌های مناطق نیمه‌خشک ایران، شیخ‌الاسلامی و همکاران (۱۳۹۳) در مدل سازی تبخیر و تعرق گیاه مرجع یا استفاده از داده‌های روزانه در خراسان رضوی، بختیاری و همکاران (۱۳۹۴) در برآورد تبخیر و تعرق مرجع روزانه در اقلیم‌های نیمه خشک منتخب ایران و رئوف و عزیززی مبصر (۱۳۹۶) در ارزیابی ۱۸ مدل تبخیر و تعرق مرجع در شرایط آب و هوایی دشت اردبیل، مطابقت دارد. بنابراین با توجه به نتایج قابل قبول این تحقیق در حوضه آبریز فلات مرکزی ایران پیشنهاد می‌گردد که در دیگر حوضه‌های آبریز کشور که دارای فقر یا نقص داده‌های لایسیمیتری هستند با استفاده از معادلات رگرسیون، تبخیر و تعرق گیاه مرجع را که در تعیین نیاز آبی گیاهان نقش بسیار مهمی دارند با دقتی مناسب برآورد و پیش‌بینی نمود.

منابع

1. Abedi Kupai, J., Islamiyan, S.S. & Amiri, M.J. (2008). Comparison of four methods for estimating the reference level of evapotranspiration and transpiration with

25. Mohammadi, H., Azizi, G., Khosh Akhlagh, F., & Khazei., M. (2016). Estimate of summer evapotranspiration of sugarcane plant in Khuzestan province using climatic data. *Journal of Geographical Information (Sepehr)*, Volume 25, Issue 99, pp. 153-141.
26. Molnar, P. & Ramirez, J. A. (2001). Recent Trends in Precipitation and Stream Flow in the Rio Puerco Basin, *Journal of Climate*, 14, PP. 2317-2328.
27. Nazeer, M. (2009). Simulation of maize crop under irrigated and rained conditions with CROPWAT model. *ARNP J. Agric. Biol. Sci.*, 4(2), pp 68-73.
28. Norrant, C. & A., Douguedroit. (2005). Monthly And Daily Precipitation Trends in the Mediterranean(1950-2000), *Theoretical and Applied Climatology*, 83, PP. 89-106.
29. Rao. Y., Sun, G., Ford, C.R., & Vose, J.M. (2011). Modeling Potention Evapotranspiration of Two Forested Watersheds in the Southern APPALACHIANS, *American Society of Agricultural Biological Engineers*, Vol. 54, No. 6, PP. 2067-2078.
30. Raouf, M., & Azizi Mobser, J. (2017) . Evaluation of Eight Reference Evapotranspiration Models in Ardabil Plain. *Journal of Soil and Water Research*, Vol. 24, No. 6, pp .227-241.
31. Sharghi, T., Barry Abarghouie , H., Asadi, M.A., & Kousari, M.R. (2010) . Estimation of evapotranspiration of reference plant using Penman-Monteith method and its zoning in Yazd province. *Dry Boom Journal*, No. 1, pp. 33-25.
32. Sheikholeslami, N., Ghahraman, Bijan., Azhadi, A., Davari ,K., & Mohajerpour; M. (2014). Propagation of evapotranspiration of reference plant using main component analysis method and development of multiple linear regression model (case study :Mashhad station). *Water and Soil Journal*, No. 2, pp. 429-420.
33. Singh, K. R., Pawer, P.S. (2011). Comparative Study of Reference Crop Evapotranspiration (ET_o) By Different Energy Based Method With FAO56 Penman-Monteith Method at New Delhi, India, *International Journal of Engineering Science and Technology*, Vol.3, No.10, 7861-7868.
34. Su, H.; Wood, E. F.; Wojcik, R.; McCabe, M. (2006). Sensitivity Analysis of Regional Scale. Evapotranspiration Predictions to the Forcing Data, *American Geophysical Union*, Fall Meeting 2007, abstract #H31A-02.
35. Talebi, A., Pourmohammad, S., & Rahimian, M.H. (2010). Investigation of the Factors Affecting Reference Evapotranspiration by Using the Sensitivity Analysis of the FAO-
14. Javari, Majid. (2008). Application of statistics in climatology. Tehran, Payame Noor Publications.
15. Khoshhal, J., Zarea Abyaneh, H., & Jooshni, A.R. (2015). Evaluation of different methods for estimating reference evapotranspiration using the FAO evaporation pan method in the eastern and southeastern watershed of the country. *Journal of Natural Geography* ,Vol. 8, No. 28, pp. 16-1.
16. Laaboudi A. Mouhouche, B. & Draoui B. (2012). Neural network approach to reference evapotranspiration modeling from limited climatic data in arid regions. *Int. J. Biometeorol.* 56: 831-841.
17. Ladhani I. Houichi L. Djemili L. Heddami S. & Belouz K. (2012). Modeling daily reference evapotranspiration (ET₀) in the north of Algeria using generalized regression neural networks (GRNN) and radial basis function neural networks(RBFNN): a comparative study. *Meteorol. Atmos. Phys.* 118:163-178.
18. Lashkari, H., Keykhosrowi, Q., & Rezaei, A. (2009). Analysis of the CROPWAT Model Efficiency in Estimating the Need for Wheat Crop in West Kermanshah: West Islamabad , Saripul Zahab and Ravansar. *Quarterly Journal of Humanities*, Volume 13 ,Issue 1, pp. 270-247 .
19. Liu, X., Xu, C., Zhong, X., Li, Y., Yuan, X., & Cao, J. (2017). Comparison of 16 models for reference crop Evapotranspiration against weighing Lysimeter measurement. *J. Agric. Water Manage.* 184: 145-155.
20. Lopez-Urrea, R., Martin de Santa Olalla, F., Fabeiro, C. & Moratalla, A. (2006). Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate. *Agricultural Water Management*, 85: 15-26.
21. Maasoompour, J., Rajai, S., & Yeganeh, M. (2014). Time and spatial variability of the evapotranspiration trend of reference plant in Iran. *Journal of Applied Geosciences Research*, No. 34, pp. 25-7.
22. Mahdavi, M., & TaherKhani., M. (2012). Application of statistics in geography. Tehran, Gomes publishing house.
23. Martinez-cob A. (1996). Multivariate Geo statistical Analysis of Evapotranspiration and Precipitation in Mountainous Terrain. *Journal of Hydrology*. 174: 19-35.
24. Merimosavi, H., Panahi, H., Akbari, H., & Akbarzadeh, Y. (2012) . Calibration methods of reference crop potential evapotranspiration and calculate crop water requirement olives in Kermanshah. *Journal of Geography and Environmental Sustainability*, No .3 ,pp. 64-45.

plants). Publication of Iran National Irrigation and Drainage Commission, First Edition, p. 9.

37. Zhang X., K.D., Harvey, W.D., Hogg. & T.R., Yuzyk. (2001). Trends in Canadian Stream Flow, Water Resources Research, 37(4), PP. 987-998.

Penman-Monteith Equation. Natural Geography Research, No .73 ,pp. 110-97.

36. Vaziri, J., Salamat, A., Ansari, M. R., Maschi, M., Heidari, N., Dehghani Sanić, H. (2008). Evapotranspiration of plants (instructions for calculation of required water requirements of