



Geographic Notion  
Vol 15. Autumn and winter 2017  
Zanjan University  
No.105

اندیشه جغرافیایی  
سال هشتم، شماره پانزدهم، پاییز و زمستان ۱۳۹۵  
دانشگاه زنجان  
مقاله شماره ۱۰۵

## ارزیابی روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق مرجع با روش تست تبخیر FAO در حوضه آبریز شرق و جنوب شرق کشور

علیرضا جوشنی<sup>۱</sup>، جواد خوشحال<sup>۲</sup>، حمید زارع ایبانه<sup>۳</sup>

### چکیده

برآورد تبخیر و تعرق مرجع جهت برآورد نیاز آبی گیاهان، مدیریت طرح‌های آبی و زهکشی و زمان آبیاری گیاهان از ضروریات بخش کشاورزی می‌باشد. لذا در این پژوهش به منظور یافتن بهترین مدل برآورد تبخیر و تعرق مرجع برای حوضه آبریز شرق و جنوب شرقی کشور، با تکیه بر روش خوشه بندی با لحاظ اطلاعات هواشناسی ۶۶ ایستگاه هواشناسی، تبخیر و تعرق مرجع حاصل از تست تبخیر با مقادیر تبخیر و تعرق مستخرج از ۸ معادله تبخیر و تعرق بر اساس پارامترهای آماری  $NRMSE, MAE, MBE, d, t, r$  مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج حاصله روش‌های هارگریوز-سامانی، بلانی کریدل-۲۴، تورک و پرستلی-تیلور با توجه به ابعاد زمانی متفاوت، بهترین انطباق را با مقادیر تبخیر و تعرق مرجع حاصل از تست تبخیر داشتند. همچنین نتایج تحقیق نشان داد در مقیاس فصلی، فصل تابستان کمترین خطا و فصل زمستان بیشترین خطای برآورد  $ET_0$  را دارا بودند. از طرفی مقیاس ماهانه کمترین خطا را نسبت به مقیاس فصلی داشت. این نتیجه بیانگر کاهش خطای برآورد  $ET_0$  در مقیاس‌های زمانی کوچک می‌باشد.

**واژگان کلیدی:** خوشه بندی، هارگریوز-سامانی، بلانی کریدل-۲۴، تورک، پرستلی-تیلور.

## مقدمه

رشد روزافزون جمعیت، نیاز به مواد غذایی بیشتر و استفاده منطقی از منابع محدود آب و خاک لزوم پایداری در توسعه کشاورزی را در شرایط اقلیمی ایران آشکار می‌سازد. بر همین اساس با عنایت به اهمیت بخش کشاورزی و آب مصرفی در این بخش، تعیین نیاز آبی گیاهان به‌عنوان یکی از عوامل چرخه هیدرولوژی از ضروریات اساسی در طرح‌های آبیاری و زهکشی است. لازمه تعیین نیاز آبی گیاهان، برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل ( $ET_0$ ) سطوح گیاهی جهت برنامه‌ریزی آبیاری و افزایش عملکرد محصولات زراعی می‌باشد. تبخیر و تعرق پتانسیل معادل حداکثر مقدار تبخیر و تعرق از یک پوشش کامل گیاهی فاقد محدودیت آب مانند چمن در یک وضعیت آب و هوایی است (فائو ۵۶). روش‌های گوناگونی از جمله روش‌های لایسیمیتری در قالب روش‌های مستقیم برای اندازه‌گیری تبخیر و تعرق پیشنهاد شده است. لیکن استفاده از لایسیمتر به دلیل هزینه بر بودن و زمان بر بودن داده‌برداری از آن‌ها در همه مناطق امکان‌پذیر نمی‌باشد. به همین دلیل محققین سعی در استفاده از روش‌های غیر مستقیم برآورد  $ET_0$  از مقادیر تشت تبخیر یا برخی داده‌های هواشناسی داشته‌اند. در کانادا دو محقق مدل‌های برآورد  $ET_0$  را با روش تشت تبخیر در یک ایستگاه ساحلی مرکز تحقیقات کشت سیب زمینی کانادا مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاکی از آن بود که مدل تشت تبخیر برآورد کمتری از  $ET_0$  نسبت به رابطه‌های پنمن - مانتیث و پریستلی - تیلور داشت (سینگ<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۸: ۱۳۴). در ایتالیا نیز اعتبار ساده سازی روش - های مبتنی بر تشت تبخیر بطور مستقیم برای برآورد  $ET_0$  بدون نیاز به داده‌های رطوبت نسبی و سرعت باد مورد ارزیابی قرار گرفت. در این پژوهش معادله‌های مبتنی بر تشت با داده‌های روزانه لایسیمتر (گیاه چمن) مقایسه شدند. در این مطالعه موفقیت معادله اشنایدر در تخمین  $ET_0$  نسبت به معادله پنمن - مانتیث گزارش شد (تراجکویچ و کولاکویچ<sup>۲</sup>، ۲۰۱۰: ۱۴۰). در منطقه ایگدیر ترکیه تبخیر و تعرق پتانسیل برآوردی با

1. Xing, Z

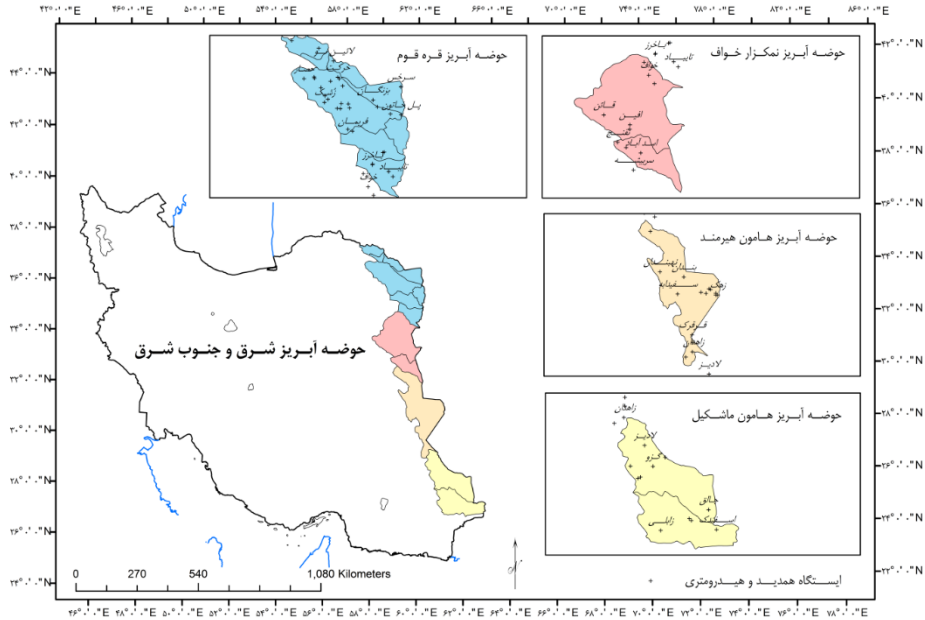
2. Trajkovic, S., Kolakovic, S

معادلات گوناگون تشت تبخیر در مقایسه با معادله فائو - پنمن - مانیتث مورد ارزیابی قرار گرفت و برتری روش اشنایدر در مقیاس ماهانه گزارش گردید (کایا سباحتین و صالح<sup>۱</sup>، ۲۰۱۲: ۹۸۷). مقادیر تبخیر و تعرق از روش‌های مختلف تجربی در محل دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا محاسبه و نتایج آنها با داده‌های لایسیمتر مقایسه شدند. این مقایسه نشان داد که فرمول‌های تشت تبخیر و بلانی کریدل در برآورد  $ET$  مناطقی که دارای اطلاعات تبخیر از تشت و یا دما هستند مناسب می‌باشند (ناصری و همکاران، ۱۳۷۸: ۴۶). برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل سالانه بر اساس دو روش تورنت وایت و بلانی کریدل در منطقه بلوچستان نشان داد روش تورنت وایت نتایج صحیحی برای فصول مختلف ارائه نمی‌دهد، ولی روش بلانی کریدل همبستگی خوبی با روش اندازه‌گیری مستقیم (تشت) دارد (فرهودی و شمسی پور، ۱۳۷۹: ۱۰۵). محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل (ترکیبی، دمایی، تابشی، همبستگی چندگانه و رطوبتی) با استفاده از آمار دراز مدت ۲۰ ساله ایستگاه هواشناسی تبریز و مقایسه آن‌ها با روش تشت تبخیر نشان داد روش کریستین - هارگریوز نسبت به سایر روش‌ها تطابق بهتری با روش تشت تبخیر دارد (جهانبخش اصل و همکاران، ۱۳۸۰: ۵۱). در منطقه اهر دو محقق به ارزیابی مدل‌های برآورد تبخیر و تعرق بالقوه نسبت به تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه حاصل از تشت تبخیر اقدام نمودند. بر اساس نتایج حاصل مشخص گردید روش‌های تورک، تورنت وایت، کریستین سن، هارگریوز و بلانی کریدل پس از اعمال ضرایب اصلاحی، بهترین تطابق را با مقادیر  $ET$  ماهانه حاصل از تشت تبخیر دارند (شفیعی فسقندیس و همکاران، ۱۳۸۶: ۶۵). در استان خوزستان بررسی و مقایسه تبخیر و تعرق پتانسیل منطقه هوفل بر اساس روش‌های بلانی کریدل اصلاح شده، پنمن مانیتث، تورنت وایت و تشت تبخیر صورت پذیرفت. نتایج به دست آمده حاکی از این بود که تشت تبخیر نسبت به سایر روش‌ها ضریب همبستگی بیشتری با روش مرجع پنمن مانیتث دارد و اولویت روش‌های دیگر نسبت به پنمن مانیتث به ترتیب تورنت وایت و بلانی کریدل بود

(شاهین‌زاده و همکاران، ۱۳۸۷: ۷). در منطقه کرمان نیز برآورد میزان تبخیر و تعرق گیاه مرجع و مقایسه آن با تبخیر از تشت تبخیر انجام و نتایج حاکی از ضریب همبستگی بالا بین میزان تبخیر و تعرق حاصل از روش پنمن مانیتث و تشت تبخیر بود (کریمی گوغری و رضایی، ۱۳۹۰: ۱). بررسی منابع بیان‌گر اهمیت برآورد تبخیر و تعرق با حداقل داده‌های قابل دسترس می‌باشد. لذا در این تحقیق اولاً با توجه به اهمیت موضوع که در اوایل این قسمت مطرح گردید و ثانیاً به دلیل اینکه در ایران مقایسه روش‌های تجربی با برآورد تبخیر و تعرق به روش تشت تبخیر خیلی محدود (از نظر تعداد ایستگاه و وسعت حوضه) صورت پذیرفته، بر آن شدیم تا به ارزیابی و مقایسه روش‌های محاسبه تبخیر و تعرق بر اساس داده‌های هواشناسی و تبخیر و تعرق حاصل از تشت تبخیر پردازیم.

### مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه یکی از حوضه‌های آبریز هشت‌گانه کشور در منطقه شرق ایران است که بین محدوده‌های طول  $58^{\circ}10'59''E$  تا  $63^{\circ}18'23''E$  و عرض  $26^{\circ}43'10''N$  تا  $37^{\circ}42'26''N$  قرار دارد. حوضه آبریز فوق شامل چهار زیر حوضه قره‌قوم ( $44502 \text{ Km}^2$ )، نمک‌زار خواف ( $35000 \text{ Km}^2$ )، هامون- هیرمند ( $34437 \text{ Km}^2$ ) و هامون- ماشکیل ( $36875 \text{ Km}^2$ ) می‌باشد. این حوضه آبریز از شمال و شمال شرق به مرز کشور ترکمنستان، از شرق به کشورهای افغانستان و پاکستان، از جنوب به حوضه آبریز دریای عمان و خلیج فارس و از غرب و شمال غرب به حوضه آبریز مرکزی محدود می‌گردد (وزارت دفاع و پشتیبانی نیروهای مسلح، ۱۳۸۴: ۱) شکل ۱، موقعیت جغرافیایی منطقه جنوب شرق ایران را به همراه پراکنش ایستگاه‌های مستقر در حوضه‌های آبریز نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه های آبریز شرق - جنوب شرق و ایستگاه های مستقر در منطقه

در مجموع در این مطالعه اطلاعات ۱۵ ایستگاه همدید و ۵۱ ایستگاه وزارت نیرو (تبخیرسنجی - باران سنجی) از بدو تاسیس تا سال ۱۳۸۸ انتخاب گردید. متغیرهای هواشناسی به کار گرفته شده در این پژوهش شامل دمای حداقل - حداکثر - میانگین، رطوبت نسبی حداقل - حداکثر - میانگین، دمای تر روزانه، دمای خشک روزانه، دمای نقطه شبنم روزانه، متوسط سرعت روزانه باد در ارتفاع ۲ متری، داده های تشت تبخیر، ساعات آفتابی و بارش سالانه می باشد. مختصات و ویژگی های اقلیمی ایستگاه های مستقر در این حوضه در جدول (۱) درج گردیده است.

پس از جمع آوری داده ها اقدام به بررسی و کنترل کیفیت داده ها شد. بدین منظور در هر ایستگاه هر یک از پارامترهای مورد استفاده از نظر همگنی، نرمال بودن، قرار داشتن در جایگاه درست، حد های بالا و پایین، مقایسه با ایستگاه های مجاور، مورد بررسی قرار گرفتند. در خصوص داده های پرت، مشاهداتی که قدر مطلق مقدار استاندارد شده آن ها بزرگتر از ۳ بودند، به عنوان مشاهده دور افتاده (پرت) در نظر گرفته

شد (عساکره، ۱۳۹۰: ۱۴۸). همچنین در مورد ضرایب تشت تبخیر بر اساس جدول شماره ۴ مندرج در صفحه ۷۶۲ نشریه ۲۴ فائو، ضرایب تشت بزرگتر از یک و مقادیر تبخیر از تشت برابر با صفر از مجموعه داده‌ها حذف گردیدند. سپس ایستگاه‌های انتخابی بر اساس مقدار تبخیر تشت تبخیر، با استفاده از روش آماری تحلیل خوشه‌ای، خوشه‌بندی شدند. برای انجام گروه‌بندی ایستگاه‌ها بر اساس فاصله آن‌ها (مجذور فاصله اقلیدسی) از روش سلسله مراتبی و قاعده اتصال وارد (Ward) استفاده گردید. سپس با استفاده از تحلیل واریانس یکطرفه (آزمون فیشر - نشان‌دهنده نسبت واریانس بین گروهی به واریانس درون گروهی، مومنی، ۱۳۸۹: ۷۲)، آزمون Tukey و LSD (بازگو کننده وجود تفاوت‌های معنی‌دار به صورت دو به دو بین گروه‌های مختلف، مومنی، ۱۳۸۹: ۸۲)، تعداد خوشه‌ها و اعضای آنها شناسایی شدند (جداول ۲، ۳). پردازش داده‌ها با استفاده از نرم افزارهای Surfer، Matlab، Excel، SPSS انجام گرفت.

جدول ۱- مختصات جغرافیایی و ویژگی‌های اقلیمی ایستگاه‌های مستقر در حوضه آبریز

میانگین پارامترهای هواشناسی				موقعیت جغرافیایی			نام ایستگاه			
سرعت باد(متر بر ثانیه)	ساعت آفتابی	تبخیر(میلیمتر بر روز)	بارش (میلیمتر بر ماه)	رطوبت نسبی (%)	دما (درجه سانتی-گراد)	نوع اقلیم (دمازنن)		ارتفاع (متر)	طول جغرافیایی (درجه)	عرض جغرافیایی (درجه)
۱/۷	-	۶/۲	۲۲/۸	۵۴/۵	۱۳/۶	نیمه خشک	۱۳۲۰	۵۹/۳۹	۳۶/۲۹	ارداک(بندساروج)
۲/۶	-	۱۲/۹	۷/۸	۳۸/۲	۲۳/۶	خشک	۱۰۷۳	۶۲/۸۴	۲۷/۱۲	اسفندک
۲/۳	-	۸/۸	۱۵/۸	۴۲	۱۴/۸	خشک	۱۴۱۵	۵۹/۷۹	۲۳/۵۲	افین
-	-	۵/۹	۲۱/۳	۴۷	۱۲	نیمه خشک	۱۲۰۲	۵۸/۹۸	۶۳/۸۳	امامزاده
۱/۶	-	۱۰/۷	۵/۷	۳۴/۸	۲۳/۲	خشک	۷۴۹	۶۱/۴۹	۳۱/۰۲	امور آب سیستان
۲/۶	-	۷/۹	۱۷/۱	۷۴/۱	۱۴/۱	خشک	۹۱۴	۵۹/۸۱	۳۶/۲۵	النک اسدی
-	-	۶	۲۳/۴	۴۷/۸	۱۶	نیمه خشک	۸۷۱	۶۰/۸۵	۳۶/۰۰	آق دریند
۲	-	۷/۳	۱۴/۷	۴۳/۵	۱۴/۳	خشک	۱۳۰۶	۶۰/۳۲	۳۴/۹۹	باخرز بالا
۰/۹	-	۵/۴	۲۹/۲	۴۸/۵	۱۲/۹	خشک	۱۶۱۸	۵۸/۷۱	۳۶/۴۶	باراریه
۱/۶	-	۷/۷	۱۴/۱	۴۳	۱۵/۶	خشک	۹۳۸	۶۰/۵۵	۳۵/۲۲	باغ سنگان
۳/۱	-	۷/۲	۲۵/۵	۴۹	۱۴/۹	نیمه خشک	۱۰۰۹	۶۰/۴۴	۳۶/۳۰	بزرگان
۳/۶	-	۱۴/۶	۵	۲۸/۹	۲۳/۱	خشک	۷۲۳	۶۰/۷۷	۳۱/۳۶	بندان
۲/۱	۷/۹	۱۰/۲	۱۳/۷	۳۵/۵	۱۶/۴	خشک	۱۴۹۱	۵۹/۲۰	۳۲/۸۷	بیرجند
۱/۲	-	۷/۳	۲۴/۲	۴۹/۴	۱۷/۶	نیمه خشک	۴۰۶	۶۱/۱۱	۳۶/۰۰	پل خاتون
۳/۱	۸/۷	۹/۹	۱۳/۹	۴۷/۱	۱۵/۵	خشک	۹۵۰	۶۰/۶۳	۳۵/۲۳	تربت جام
۰/۶	-	۷/۶	۱۲/۵	۳۳	۱۸/۹	خشک	۱۴۲۰	۶۱/۱۸	۲۸/۱۹	تصفیه خانه خاش
۱/۳	-	۱۲/۴	۳/۶	۳۵/۳	۲۳/۵	خشک	۷۴۸	۶۱/۷۵	۲۸/۶۳	تلخ آب(تهلاب)
۲/۸	-	۱۶/۹	۶/۷	۴۱/۸	۲۴/۸	خشک	۸۵۲	۶۲/۶۷	۲۷/۵۳	جائق
۲/۴	۷/۸	۷/۴	۱۴/۶	۵۳	۱۲/۳	خشک	۱۳۵۰	۵۹/۱۴	۳۶/۶۱	چناران

-	-	۵/۶	۲۵/۵	۴۹/۳	۱۲/۶	نیمه خشک	۱۳۱۰	۵۸/۷۳	۳۶/۸۱	حصار(شغل آباد)
۲/۵	۹/۳	۱۰/۴	۱۲/۶	۳۰/۷	۱۹/۹	خشک	۱۴۳۰	۶۱/۲۳	۲۸/۲۲	خاش
۱/۲	-	۵/۵	۴۰	۵۳/۴	۷	مدیترانه ای	۱۴۵۰	۵۹/۵۸	۳۶/۸۰	خرکت
۴/۴	۹/۱	۱۲/۸	۶/۷	۴۰/۳	۱۸/۱	خشک	۹۹۸	۶۰/۱۸	۳۴/۵۵	خواف
-	-	۸/۱	۱۳/۴	۴۶/۴	۱۵/۵	خشک	۸۹۱	۶۰/۰۹	۳۴/۸۲	خیرآباد خاف
۰/۷	-	۵/۲	۲۲/۴	۶۵/۳	۱۶/۵	نیمه خشک	۵۰۰	۵۹/۱۳	۳۷/۴۱	درگز- وزارت نیرو
-	-	۷/۷	۱۹/۵	۵۵/۸	۱۳/۸	خشک	۱۲۶۳	۶۰/۳۳	۳۵/۰۱	ده منج
۳/۹	۸/۷	۱۴/۳	۴/۹	۳۸/۷	۲۲	خشک	۴۸۹/۲	۶۱/۵۳	۳۱/۰۰	زابل
۱/۹	-	۱۱	۱۱/۶	۴۲/۵	۲۲	خشک	۱۲۸۳	۶۱/۶۶	۲۷/۱۰	زابلی
۲/۸	۸/۸	۱۰/۲	۷/۵	۳۱/۶	۱۸/۴	خشک	۱۳۷۰	۶۰/۸۸	۲۹/۴۷	زاهدان
۱/۲	-	۵/۳	۳/۹	۵۰/۹	۱۱/۹	خشک	۱۸۸۰	۵۹/۲۱	۳۶/۳۱	ژشک
۳/۶	۹/۲	۱۲/۹	۴	۳۵/۳	۲۲/۷	خشک	۴۹۵	۶۱/۷۲	۳۰/۸۵	زهک
۱/۸	-	۱۲/۳	۴/۷	۳۵/۴	۲۲/۲	خشک	۴۸۸	۶۱/۶۸	۳۰/۹۰	سد زهک
۰/۶	-	۴/۸	۲۴	۵۶/۴	۱۴/۱	نیمه خشک	۱۲۴۰	۵۹/۶۱	۳۶/۱۶	سد طرق
۰/۷	-	۵	۲۳/۳	۵۸/۷	۱۲/۶	نیمه خشک	۱۲۶۵	۵۹/۶۹	۳۶/۶۲	سد کارده
۳	-	۱۳/۲	۴/۴	۳۸/۱	۲۳/۴	خشک	۵۰۶	۶۱/۶۷	۳۰/۸۵	سدچاه نیمه
۲/۶	۹/۴	۱۱/۹	۸/۹	۲۸/۸	۲۲	خشک	۱۱۹۵	۶۲/۳۱	۲۷/۳۱	سراوان
۲/۱	-	۹/۳	۱۵/۷	۴۴/۷	۱۲/۶	خشک	۱۸۳۳	۵۸/۸۶	۳۲/۵۶	سربیشه
۱/۷	۹	۸/۴	۱۵/۵	۴۹/۵	۱۷/۹	خشک	۲۷۳	۶۱/۱۶	۳۶/۵۳	سرخس
۲	-	۱۲/۵	۸/۶	۲۷/۱	۲۳/۱	خشک	۸۴۴	۶۰/۵۶	۳۰/۹۴	سفیدابه
۳/۵	-	۱۰/۸	۹/۱	۳۶/۱۳	۱۹/۱	خشک	۸۸۴	۶۰/۳۱	۳۴/۳۷	سنگان
۱/۳	-	۷	۳۲/۶	۴۵/۶	۱۱	نیمه خشک	۱۴۲۳	۵۹/۳۰	۳۶/۳۷	شاندیز
-	-	۵/۴	۲۸/۴	۶۰	۹/۶	نیمه خشک	۱۴۸۹	۵۸/۴۵	۲۷/۵۹	شمخال
۳/۳	-	۱۲/۹	۴/۱	۳۶/۴	۲۲/۵	خشک	۴۷۰	۶۱/۳۹	۳۰/۹۱	شهرک علی اکبر
-	-	۱۴/۳	۱۳/۹	۳۳/۳	۲۳/۵	خشک	۸۷۶	۶۰/۳۷	۳۴/۸۳	شهرنو باخرز
۰/۳	-	۵/۶	۲۲/۸	۴۶/۱	۱۱/۸	نیمه خشک	۱۵۰۰	۵۹/۷۶	۳۵/۴۰	فرهادگرد
۳/۳	۸/۴	۷/۹	۰/۶	۵۳	۱۱/۳	خشک	۱۴۰۰	۵۹/۷۴	۳۵/۷۰	فریمان
۱/۷	۹/۱	۹/۸	۱۳/۸	۴۰/۷	۱۴/۳	خشک	۱۴۴۶	۵۹/۲۳	۳۳/۷۱	قائن
۲/۲	-	۷	۱۷/۹	۵۳/۸	۱۳/۴	خشک	۱۱۷۵	۵۹/۰۰	۳۶/۸۱	قدیرآباد
-	-	۹/۹	۴/۳	۲۸/۲	۲۱/۱	خشک	۹۴۸	۶۰/۹۰	۲۹/۸۹	قرقرک
-	-	۵/۷	۲۳/۹	۵۶/۳	۱۳/۴	نیمه خشک	۱۲۵۵	۵۹/۵۲	۳۶/۱۷	کرتیان
۲/۴	-	۹/۸	۱۸/۱	۳۲/۴	۱۶/۴	خشک	۲۱۲۱	۶۱/۰۲	۲۸/۴۵	کوشه خاص
۳/۴	-	۱۱	۸	۴۸/۵	۱۷/۸	خشک	۴۷۰	۶۱/۲۵	۳۰/۹۵	کوه خواجه
۲/۱	-	۱۰/۹	۱۲/۹	۵۳/۲	۱۹/۷	خشک	۱۰۰۰	۶۱/۴۹	۲۸/۴۴	کزو
۲/۴	۷/۸	۷/۴	۱۵/۳	۵۲/۹	۱۲/۳	خشک	۱۱۷۶	۵۹/۶۶	۳۶/۴۴	گل مکان
۲/۴	-	۹/۴	۱۳/۳	۳۱/۹	۱۷/۹	خشک	۱۷۵۵	۶۰/۶۸	۲۹/۳۴	گوربند
۱/۴	-	۱۰/۱	۵	۳۰/۲	۲۰/۴	خشک	۱۲۰۸	۶۱/۳۲	۲۸/۸۸	لادیز
۱/۷	-	۱۱/۱	۶/۸	۴۵/۱	۱۸/۹	خشک	۱۱۴۵	۶۰/۹۰	۲۹/۷۱	لار پایین
-	-	۴/۲	۲۶/۲	۶۶/۱	۱۶/۳	نیمه خشک	۸۶۴	۵۹/۴۹	۳۷/۱۳	لائین نو
۱/۶	-	۶/۳	۲۶/۷	۴۷/۳	۱۰	نیمه خشک	۱۸۱۸	۵۹/۶۲	۳۶/۷۰	مارشک
۲/۹	-	۷/۷	۱۷/۶	۴۹/۲	۱۴/۷	خشک	۹۱۷	۶۰/۵۳	۳۶/۱۶	مزدوران
۱/۸	۷/۸	۷/۸	۲۱	۵۴/۷	۱۴/۱	نیمه خشک	۹۹۹/۲	۵۹/۶۳	۳۶/۲۷	مشهد
۱/۹	-	۸/۹	۱۳/۹	۳۸	۱۳/۲	خشک	۱۹۲۱	۵۹/۷۱	۳۳/۰۳	منصور آباد

۱/۷	-	۶/۷	۱۵/۲	۳۴/۳	۱۱/۵	خشک	۲۱۱۱	۵۹/۵۳	۳۳/۱۴	نقنج
۲/۱	۹/۲	۱۱	۱۰/۴	۳۳/۱	۱۹/۷	خشک	۱۲۱۱	۶۰/۰۸	۳۱/۵۳	نهندان
۱	۸/۵	۸/۲	۱۹/۵	۵۰/۳	۱۴/۲	خشک	۱۲۱۳	۵۸/۸۰	۳۶/۲۷	نیسابور
۱/۱	-	۹/۷	۸	۴۰/۸	۲۱/۲	خشک	۱۱۷۸	۶۲/۲۶	۲۷/۳۵	هوشک سراوان

به منظور برآورد  $ET_0$  از روش‌های تعریف شده در نرم افزار Ref-ET استفاده شد. در این نرم افزار روش‌های محاسباتی با توجه به نوع داده‌های ورودی (دمای حداقل، دمای حداکثر، دمای میانگین روزانه، رطوبت نسبی حداقل، رطوبت نسبی حداکثر، میانگین رطوبت نسبی روزانه، سرعت باد، میزان بارش، ارتفاع و مختصات جغرافیایی هر ایستگاه) شامل ۷ روش ترکیبی بر پایه پنمن، دو روش دمایی، یک روش تشعشعی و سه روش ترکیبی تشعشعی دمایی است. در این مطالعه از دو روش ترکیبی پنمن-مانیت-فانو ۵۶ و کیمبرلی-پنمن (۱۹۸۲)، دو روش دمایی بلانی-کریدل-فانو ۲۴ و هارگریوز-سامانی و سه روش تشعشعی-دمایی شامل معادلات پریستلی-تیلور، مکینک (۱۹۵۷)، تورک (۱۹۶۱) و روش تشعشعی فانو ۲۴ استفاده شد. در نهایت روش تشت تبخیر FAO-24 نیز بعنوان معادله محاسبه  $ET_0$  مورد استفاده قرار گرفت. روش محاسبه هر کدام از روش‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- روش‌های محاسبه تبخیر و تعرق مرجع و پارامترهای مورد نیاز

ردیف	نام روش محاسبه	شکل معادله
$ET_0$		
۱	تشت تبخیر فانو ۲۴	$ET_0 = k_p \cdot E_{pan}$
۲	هارگریوز-سامانی	$ET_0 = 0.0023 R_n (T_{mean} + 17.8) T_D^{0.5}$
۳	بلانی-کریدل-فانو ۲۴	$ET_0 = a + b[P(0.46T_{mean} + 8.13)]$
۴	مکینک	$ET_0 = 0.61 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{R_s}{2.45} - 0.12$
۵	تورک - ۱۹۶۱	$ET_0 = a_T \times 0.013 \frac{T_{mean}}{T_{mean} + 15} \times \frac{23.8856R_s + 50}{\lambda}$
۶	پریستلی - تیلور	$ET_0 = 1.26 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{R_n - G}{\lambda}$
۷	پنمن - مانیت-فانو ۵۶	$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma(\frac{890}{T + 273})[u_2(e_a - e_d)]}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$



$$ET_o = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + k_w \frac{\gamma}{\gamma + \Delta} (a_w + b_w u_v)(e_s - e_a) / \lambda$$

۸ معادله اصلاح شده پنمن توسط کیمرلی ۱۹۸۲

$$ET_o = a + b \left( \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot R_s \right)$$

۹ تابشی - فانو ۲۴

پارامترهای مورد استفاده در معادلات و واحد اندازه گیری آنها

$ET_o$ : تبخیر و تعرق گیاه مرجع چمن (mm/day)	$P$ : فشار هوا ( $kp_a$ )
$\lambda$ : گرمای نهان تبخیر (MJ/kg)	$k_p$ : ضریب تشش
$G$ : جریان حرارتی زمین (MJ/m <sup>2</sup> .day)	$\Delta$ : شیب منحنی فشار بخار
$T_{mean}$ : میانگین درجه حرارت روزانه (°C)	$\left( \frac{kp_a}{^\circ C} \right)$
$T_D$ : اختلاف درجه حرارت حداکثر و حداقل روزانه (°C)	$e_a - e_d$ : کمبود فشار بخار در ارتفاع ۲ متری ( $kp_a$ )
$R_n$ : تشعشعات خالص خورشیدی بر حسب میلی متر آب تبخیر پذیر	$u_2$ : سرعت باد در طول روز در ارتفاع دو متری از سطح زمین ( $\frac{m}{s}$ )
$k_w$ : ضریب ثابت برابر ۶/۴۳ برای $ET_o$ بر حسب (mm/day)	$R_{nl}$ : تابش طول موج بلند خالص خروجی ( $\frac{MJ}{m^2 \cdot day}$ )
$P$ : متوسط ساعت روشنایی هر روز در ماه مورد نظر تقسیم بر کل ساعات روشنایی سال ضربدر ۱۰۰	
$a_w$ و $b_w$ : ضرایب تجربی می باشند که بنا بر پیشنهاد اولیه پنمن در صورتی که سرعت باد بر حسب ( $\frac{m}{s}$ ) باشد مقادیر عددی آنها به ترتیب برابر واحد و ۰/۵۳۷ می باشد.	
$R_s$ : تشعشع خورشیدی رسیده به زمین (موج کوتاه) ( $\frac{MJ}{m^2 \cdot day}$ )	

## آماره های عملکرد مدل ها

به منظور مقایسه روش های برآورد  $ET_o$ ، نتایج حاصل از هر یک از روش ها نسبت به روش تشش تبخیر، رسم گردید. سپس با رگرسیون گیری بین مقادیر تبخیر و تعرق مرجع بدست آمده از هر روش و مقادیر تبخیر و تعرق حاصل از تشش تبخیر، روش های مذکور مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در تجزیه و تحلیل نتایج از آماره های ضریب همبستگی پیرسون ( $r$ )، ضریب تعیین ( $R^2$ ) و آزمون معنی داری این آماره ها، میانگین خطای مطلق (MAE)، میانگین خطای سوگیری (MBE)، مجذور

میانگین مربعات خطای نرمال (NRMSE)، شاخص توافق ویلموت (d) و معیار t (شاخص ژاکویدز ۱۹۹۷، به نقل از رام کاران سینگ، ۲۰۱۱: ۷۸۶۴) بهره‌گیری شد (روابط ۱ تا ۶).

$$\begin{aligned}
 1) \quad NRMSE &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\frac{N}{\bar{O}}}} & 4) \quad t &= \sqrt{\frac{(N-1)MBE^2}{RMSE^2 - MBE^2}} \\
 2) \quad MAE &= \frac{\sum_{i=1}^N |P_i - O_i|}{N} & 5) \quad MBE &= \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)}{N} \\
 3) \quad d &= 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} & 6) \quad R^2 &= \frac{\left[ \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}) \right]^2}{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}
 \end{aligned}$$

در روابط فوق،  $P_i$ : مقدار برآورد شده تبخیر و تعرق،  $O_i$ : مقدار اندازه‌گیری شده توسط تست تبخیر،  $N$ : تعداد مشاهدات  $\bar{O}$ : میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده تبخیر و تعرق توسط تست تبخیر،  $t$  شاخص ژاکویدز می‌باشند.

حالت بهینه آماره‌های ذکر شده بدین صورت است:

$$RMSE, MAE, MBE, t \rightarrow 0$$

$$d, r \rightarrow 1$$

به منظور تعیین تعداد خوشه‌های مناسب جهت تحلیل برآورد تبخیر و تعرق، از تحلیل واریانس یکطرفه (آزمون فیشِر) و آزمون توکی (نشانه تفاوت معنی‌داری بین گروه‌ها) استفاده شد (جداول ۳ و ۴). جدول ۳ نتایج آزمون تحلیل واریانس یک طرفه را در شناسایی تعداد خوشه‌ها نشان می‌دهد. در این جدول تعداد ۲، ۳، ۴ و ۵ خوشه مورد ارزیابی قرار گرفت. در مجموع با توجه به مقدار  $F$  و با در نظر گرفتن این نکته که مناسبترین مرحله برای انتخاب تعداد خوشه‌ها مرحله‌ای است که مقدار  $F$  افزایش ناگهانی پیدا می‌کند (علیجانی، ۱۳۸۱: ۱۷۸)، تعداد ۳ خوشه در نظر گرفته شد. همان‌گونه که در مواد و روش آورده شد برای انجام گروه‌بندی ایستگاه‌ها از روش سلسله

مراتبی و قاعده اتصال وارد (Ward) استفاده گردید. در نهایت تعداد ایستگاه‌های هر خوشه انتخاب شد. نتایج آزمون توکی در جدول ۴ بیان‌گر معنی‌دار بودن اختلاف تبخیر بین خوشه‌ها می‌باشد. مشخصات اعضای هر یک از خوشه‌ها در جدول ۵ آورده شد.

جدول ۳ - تحلیل واریانس یک طرفه

تعداد خوشه	مقدار خطا	F مقدار	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	تعداد خوشه
			۳۸۰/۱۶۰	۱	۳۸۰/۱۶۰	میان گروهی
۲	۰/۰۰۰	۱۵۴/۶۳۷	۲/۴۵۸	۶۴	۱۵۷/۳۳۸	درون گروهی
					۵۳۷/۴۹۸	کل
۳	۰/۰۰۰	۱۹۴/۱۲۴	۲۳۱/۲۳۸	۲	۴۶۲/۴۵۷	میان گروهی
			۱/۱۹۱	۶۳	۷۵/۰۴۲	درون گروهی
					۵۳۷/۴۹۸	کل
۴	۰/۰۰۰	۲۶۴/۱۷۶	۱۶۶/۱۶۷	۳	۴۹۸/۵۰۰	میان گروهی
			۰/۶۲۹	۶۲	۳۸/۹۹۸	درون گروهی
					۵۳۷/۴۹۸	کل
۵	۰/۰۰۰	۳۳۶/۴۷۶	۱۲۸/۵۴۸	۴	۵۱۴/۱۹۴	میان گروهی
			۰/۳۸۲	۶۱	۲۳/۳۰۵	درون گروهی
					۵۳۷/۴۹۸	کل

جدول ۴ - تست توکی

متغیر وابسته: مقدار تبخیر از تشت							
	حد پایین	حد بالا	مقدار خطا	خطای استاندارد	میانگین اختلاف (۱-۲)	روش وارد (۲)	روش وارد (۱)
تست Tukey	-۲/۳	-۴/۲	۰/۰۰۰	۰/۳۹	-۳/۲	۲	۱
	+۴/۳	+۲/۸	۰/۰۰۰	۰/۳۱	۳/۵	۳	
	+۴/۲	+۲/۳	۰/۰۰۰	۰/۳۹	۳/۲	۱	۲
	+۷/۶	+۵/۹	۰/۰۰۰	۰/۳۶	۶/۸	۳	
تست LSD	-۲/۸	-۴/۳	۰/۰۰۰۰	۰/۳۱	-۳/۵	۱	۳
	-۵/۹	-۷/۶	۰/۰۰۰	۰/۳۶	-۶/۸	۲	
	-۲/۵	-۴/۰	۰/۰۰۰	۰/۳۹	-۳/۲	۲	۱
	+۴/۱	+۲/۹	۰/۰۰۰	۰/۳۱	۳/۵	۳	
تست LSD	+۴/۰	+۲/۵	۰/۰۰۰	۰/۳۹	۳/۲	۱	۲
	+۷/۵	+۶/۰	۰/۰۰۰	۰/۳۶	۶/۸	۳	
	-۲/۹	-۴/۱	۰/۰۰۰	۰/۳۱	-۳/۵	۱	۳
	-۶/۰	-۷/۵	۰/۰۰۰	۰/۳۶	-۶/۸	۲	

\*: معنی داری در سطح ۰/۰۵

پس از شناسایی خوشه‌ها، اقدام به برآورد تبخیر و تعرق ایستگاه‌های هر خوشه شد. نتایج آماره‌های خطاسنجی و مقایسه روش‌های دمایی، تشعشعی و ترکیبی برآورد تبخیر

و تعرق مرجع با تبخیر و تعرق مرجع حاصل از داده های تشت تبخیر کلاس A به تفکیک سه خوشه مورد مطالعه در جداول ۶، ۷ و ۸ آورده شد.

جدول ۵- اسامی ایستگاه‌های متعلق به هر یک از خوشه ها

خوشه ۱	خوشه ۲	خوشه ۳
قرقرک	اسفندک	شاندیز
کوشه خاص	بندان	شمخال
کوه خواجه	تلخ آب (تهلاب)	فرهادگرد
گزو	جالق	فریمان
گوربند	خواف	قدیرآباد
لادیز	زابل	کرتیان
لار پایین	زهک	گل مکان
منصور آباد	سد زهک	لاین نو
نهبندان	سدچاه نیمه	مارشک
هوشک سراوان	سراوان	مزدوران
***	سفیدابه	درگز- وزارت نیرو
***	شهرک علی اکبر	***
***	شهرنو باخرز	***

بررسی روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق در خوشه ۱ مشتمل بر ۲۰ ایستگاه (جدول ۴) در سه مقیاس ماهانه، فصلی و سالانه در جدول ۶ بیانگر آن است که در مقیاس ماهانه دو روش بلانی کربدل - فائو ۲۴ و هارگریوز- سامانی به ترتیب اولویت، تطابق بهتری با تبخیر و تعرق برآوردی از تشت تبخیر دارند. کمترین خطای NRMSE در ماه تیر معادل ۰/۱۷ اتفاق افتاده است که معمولاً گرم‌ترین ماه سال در منطقه می‌باشد. این نتیجه بیانگر آن است که در ماه‌های گرم مناطق با اقلیم خشک، تبخیر و تعرق برآوردی از روش‌های دمایی و تشعشعی قابل اعتمادتر بوده و خطای کمتری دارند. مطلوبیت روش‌های دمایی و تشعشعی این مناطق در مطالعات نساجی زواره و صادقی فر (۱۳۸۶: ۵) و زارع ایبانه و همکاران (۱۳۸۹: ۱۰۱) نیز اشاره شده است که با نتیجه تحقیق حاضر مبنی بر توصیه روش‌های دمایی و تشعشعی هم‌خوانی دارد. به‌طوری که

جدول ۶ نشان می‌دهد در ماه‌های خرداد، مرداد و شهریور نیز که دمای بیشتری دارند خطا نسبت به ماه‌های دیگر کمتر می‌باشد ( $NRMSE = 0/18$ ). بیشترین خطا در ماه دی برابر  $0/46$  قابل مشاهده است. نتایج مقیاس فصلی نیز همسو با مقیاس ماهانه می‌باشد. به طوری که کمترین خطا در فصل تابستان ( $NRMSE=0/20$ ) و بیشترین خطا معادل  $0/43$  در فصل زمستان ملاحظه می‌گردد. متوسط خطای سالانه خوشه ۱ برابر  $0/36$  است. بنابراین می‌توان اظهار داشت تبخیر و تعرق برآوردی در مقیاس ماهانه دقت بیشتری نسبت به مقیاس‌های فصلی و سالانه دارد. به عبارت دیگر با کوچک تر شدن مقیاس زمانی، تبخیر و تعرق‌های برآوردی قابل اعتمادتر بوده و اختلاف کمتری با تبخیر و تعرق پتانسیل دارد.

جدول ۶ - نتایج برآورد مدل‌های بهینه برآورد تبخیر و تعرق در مقایسه با روش تشت تبخیر در خوشه ۱

$t$	$d$	MBE	MAE	NRMSE	$r_{max}$	روش محاسبه $ET_0$	زمان
۰/۰۰۰۰	۰/۷۷	۰/۰۰	۰/۱۵	۰/۲۰	+۰/۶۶	هارگریوز-سامانی	فروردین
۰/۰۰۰۰	۰/۶۶	۰/۰۰	۰/۱۵	۰/۲۰	+۰/۵۴	هارگریوز-سامانی	اردیبهشت
۰/۰۰۰۰	۰/۵۲	۰/۰۰	۰/۱۴	۰/۱۸	-۰/۴۲	بلانی کریدل- فائو ۲۴	خرداد
۰/۰۰۰۰	۰/۶۲	۰/۰۰	۰/۱۲	۰/۱۷	-۰/۵۲	بلانی کریدل- فائو ۲۴	تیر
۰/۰۰۰۰	۰/۵۷	۰/۰۰	۰/۱۳	۰/۱۸	-۰/۴۷	بلانی کریدل- فائو ۲۴	مرداد
۰/۰۰۰۰	۰/۵۸	۰/۰۰	۰/۱۳	۰/۱۸	-۰/۴۸	بلانی کریدل- فائو ۲۴	شهریور
۰/۰۰۰۰	۰/۳۳	۰/۰۰	۰/۱۷	۰/۲۵	-۰/۲۸	بلانی کریدل- فائو ۲۴	مهر
۰/۰۰۰۰	۰/۳۲	۰/۰۰	۰/۲۳	۰/۳۰	+۰/۲۶	هارگریوز-سامانی	آبان
۰/۰۰۰۰	۰/۵۲	۰/۰۰	۰/۲۲	۰/۳۰	+۰/۴۱	هارگریوز-سامانی	آذر
۰/۰۰۰۰	۰/۷۸	۰/۰۰	۰/۲۷	۰/۴۶	+۰/۶۸	تورک- ۱۹۶۱	دی
۰/۰۰۰۰	۰/۸۱	۰/۰۰	۰/۲۳	۰/۳۷	+۰/۷۱	تورک- ۱۹۶۱	بهمن
۰/۰۰۰۰	۰/۷۳	۰/۰۰	۰/۱۹	۰/۲۶	+۰/۶۱	هارگریوز-سامانی	اسفند
۰/۰۰۰۰	۰/۸۳	۰/۰۰	۰/۱۶	۰/۲۰	+۰/۷۳	هارگریوز-سامانی	بهار
۰/۰۰۰۰	۰/۵۶	۰/۰۰	۰/۱۵	۰/۲۰	-۰/۴۶	بلانی کریدل- فائو ۲۴	تابستان
۰/۰۰۰۰	۰/۷۸	۰/۰۰	۰/۲۳	۰/۳۱	+۰/۶۸	هارگریوز-سامانی	پاییز
۰/۰۰۰۰	۰/۶۵	۰/۰۰	۰/۲۹	۰/۴۳	+۰/۵۵	بلانی کریدل- فائو ۲۴	زمستان
۰/۰۰۰۰	۰/۷۸	۰/۰۰	۰/۲۹	۰/۳۶	+۰/۶۷	هارگریوز-سامانی	سالانه

نتایج برآوردهای تبخیر و تعرق در خوشه ۲ مشتمل بر ۱۳ ایستگاه (جدول ۴) به تفکیک مقیاس‌های زمانی ماهانه، فصلی و سالانه در جدول ۷ ارائه شده است. بررسی روش‌ها بیانگر آن است که در مقیاس ماهانه روش‌های پریستلی-تیلور، بلانی کریدل -

فائو ۲۴، تورک ۱۹۶۱، تابشی فائو ۲۴ و هارگریوز - سامانی به ترتیب اولویت، تطابق بهتری با تبخیر و تعرق برآوردی از تشت تبخیر دارند. کمترین خطای NRMSE در ماه اردیبهشت معادل ۰/۱۳ اتفاق افتاده است. این نتیجه بیان گر آن است که در ماه‌های گرم مناطق با اقلیم خشک، تبخیر و تعرق برآوردی از روش‌های دمایی و تشعشی قابل اعتمادتر بوده و خطای کمتری دارند. بیشترین خطا در ماه دی برابر ۰/۲۹ قابل مشاهده است. نتایج مقیاس فصلی نیز همسو با مقیاس ماهانه می‌باشد. به طوری که کمترین خطا در فصل تابستان ( $NRMSE = 0/18$ ) و بیشترین خطا معادل ( $NRMSE = 0/30$ ) در فصل زمستان ملاحظه می‌گردد. متوسط خطای سالانه این خوشه برابر ۰/۳۶ است. نتایج این خوشه نیز همسو با خوشه ۱ می‌باشد. به طوری که بیشترین دقت برآورد تبخیر و تعرق به مقیاس زمانی ماهانه و کمترین دقت به مقیاس فصلی و سالانه تعلق دارد.

جدول ۷ - نتایج برآورد مدل‌های بهینه برآورد تبخیر و تعرق در مقایسه با روش تشت تبخیر در خوشه ۲

$t$	$d$	MBE	MAE	NRMSE	$r_{max}$	روش محاسبه $ET_0$	زمان
۰/۰۰۰۰	۰/۶۶	۰/۰۰	۰/۱۲	۰/۱۶	+۰/۵۵	پرستلی - تیلور	فروردین
۰/۰۰۰۰	۰/۷۰	۰/۰۰	۰/۱۰	۰/۱۳	+۰/۵۹	پرستلی - تیلور	اردیبهشت
۰/۰۰۰۰	۰/۷۲	۰/۰۰	۰/۱۱	۰/۱۴	-۰/۶۱	بلانی کریدل - فائو ۲۴	خرداد
۰/۰۰۰۰	۰/۶۶	۰/۰۰	۰/۱۲	۰/۱۶	-۰/۵۶	بلانی کریدل - فائو ۲۴	تیر
۰/۰۰۰۰	۰/۶۸	۰/۰۰	۰/۱۳	۰/۱۷	-۰/۵۷	تورک - ۱۹۶۱، تابشی فائو ۲۴	مرداد
۰/۰۰۰۰	۰/۷۲	۰/۰۰	۰/۱۱	۰/۱۴	-۰/۶۱	تورک - ۱۹۶۱	شهریور
۰/۰۰۰۰	۰/۷۰	۰/۰۰	۰/۱۲	۰/۱۵	-۰/۵۹	تورک - ۱۹۶۱	مهر
۰/۰۰۰۰	۰/۲۴	۰/۰۰	۰/۲۰	۰/۲۷	-۰/۲۰	تورک - ۱۹۶۱	آبان
۰/۰۰۰۰	۰/۴۴	۰/۰۰	۰/۲۴	۰/۳۲	+۰/۳۴	بلانی کریدل - فائو ۲۴	آذر
۰/۰۰۰۰	۰/۷۰	۰/۰۰	۰/۲۱	۰/۲۹	+۰/۵۸	بلانی کریدل - فائو ۲۴	دی
۰/۰۰۰۰	۰/۷۰	۰/۰۰	۰/۱۹	۰/۲۵	+۰/۵۷	بلانی کریدل - فائو ۲۴	بهمن
۰/۰۰۰۰	۰/۷۸	۰/۰۰	۰/۱۳	۰/۱۹	+۰/۶۷	هارگریوز - سامانی	اسفند
۰/۰۰۰۰	۰/۸۱	۰/۰۰	۰/۱۵	۰/۲۱	+۰/۷۱	هارگریوز - سامانی	بهار
۰/۰۰۰۰	۰/۶۲	۰/۰۰	۰/۱۴	۰/۱۸	-۰/۵۲	بلانی کریدل - فائو ۲۴	تابستان
۰/۰۰۰۰	۰/۸۶	۰/۰۰	۰/۲۰	۰/۲۹	+۰/۷۷	پرستلی - تیلور	پاییز
۰/۰۰۰۰	۰/۷۸	۰/۰۰	۰/۲۳	۰/۳۰	+۰/۶۷	بلانی کریدل - فائو ۲۴	زمستان
۰/۰۰۰۰	۰/۸۵	۰/۰۰	۰/۲۹	۰/۳۶	+۰/۷۶	هارگریوز - سامانی	سالانه

جدول ۸ مقایسه روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق در خوشه ۳ با بیشترین تعداد ایستگاه (۳۳ عدد) را نشان می‌دهد. در این خوشه، مانند دو خوشه ۱ و ۲، ماه‌های گرم سال کمترین خطا ( $NRMSE = 0/26 - 0/22$ ) و ماه‌های سرد سال بیشترین مقدار

NRMSE (۰/۴۸ - ۰/۲۵) را به خود اختصاص داده‌اند. به طوری که روش هارگریوز-سامانی در ماه خرداد کمترین خطا و بیشترین دقت (NRMSE= ۰/۲۲) و روش بلانی کرایدل- فائو ۲۴ در ماه بهمن به عنوان روش بهینه برآورد تبخیر و تعرق این ماه، بیشترین خطا (NRMSE= ۰/۵۷) را دارد. در مقیاس فصلی نیز فصل تابستان کمترین خطا و فصل زمستان بیشترین خطای برآورد  $ET_0$  را دارا می‌باشند. لیکن میانگین خطا در مقیاس فصلی به مراتب بیش از مقیاس ماهانه است. در مقیاس سالانه میانگین خطا ۰/۴۱ با ضریب همبستگی ۰/۷۸ قابل مشاهده است.

جدول ۸ - نتایج برآورد مدل‌های بهینه برآورد تبخیر و تعرق در مقایسه با روش تشت تبخیر در خوشه ۳

$t$	$d$	MBE	MAE	NRMSE	$r_{max}$	روش محاسبه $ET_0$	زمان
۰/۰۰۰۰	۰/۶۵	۰/۰۰	۰/۱۹	۰/۲۶	+۰/۵۳	هارگریوز- سامانی	فروردین
۰/۰۰۰۰	۰/۶۷	۰/۰۰	۰/۱۹	۰/۲۵	+۰/۵۵	هارگریوز- سامانی	اردیبهشت
۰/۰۰۰۰	۰/۵۸	۰/۰۰	۰/۱۸	۰/۲۲	+۰/۴۶	هارگریوز- سامانی	خرداد
۰/۰۰۰۰	۰/۳۴	۰/۰۰	۰/۱۸	۰/۲۲	+۰/۲۶	هارگریوز- سامانی	تیر
۰/۰۰۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۱۸	۰/۲۲	+۰/۱۸	هارگریوز- سامانی	مرداد
۰/۰۰۰۰	۰/۳۶	۰/۰۰	۰/۱۸	۰/۲۲	+۰/۲۸	هارگریوز- سامانی	شهریور
۰/۰۰۰۰	۰/۵۱	۰/۰۰	۰/۲۰	۰/۲۵	+۰/۴۰	هارگریوز- سامانی	مهر
۰/۰۰۰۰	۰/۵۷	۰/۰۰	۰/۲۵	۰/۳۲	+۰/۴۵	هارگریوز- سامانی، بلانی کرایدل- فائو ۲۴	آبان
۰/۰۰۰۰	۰/۶۲	۰/۰۰	۰/۳۲	۰/۴۵	+۰/۵۱	بلانی کرایدل- فائو ۲۴	آذر
۰/۰۰۰۰	۰/۷۳	۰/۰۰	۰/۳۸	۰/۵۱	+۰/۶۲	بلانی کرایدل- فائو ۲۴	دی
۰/۰۰۰۰	۰/۷۰	۰/۰۰	۰/۳۶	۰/۴۸	+۰/۵۷	بلانی کرایدل- فائو ۲۴	بهمن
۰/۰۰۰۰	۰/۷۲	۰/۰۰	۰/۲۵	۰/۳۴	+۰/۶۰	هارگریوز- سامانی	اسفند
۰/۰۰۰۰	۰/۸۸	۰/۰۰	۰/۱۹	۰/۲۵	+۰/۷۹	هارگریوز- سامانی	بهار
۰/۰۰۰۰	۰/۱۷	۰/۰۰	۰/۲۰	۰/۲۵	+۰/۱۳	هارگریوز- سامانی	تابستان
۰/۰۰۰۰	۰/۸۷	۰/۰۰	۰/۲۵	۰/۳۳	+۰/۷۸	هارگریوز- سامانی	پاییز
۰/۰۰۰۰	۰/۷۰	۰/۰۰	۰/۳۸	۰/۴۹	+۰/۵۹	بلانی کرایدل- فائو ۲۴	زمستان
۰/۰۰۰۰	۰/۸۶	۰/۰۰	۰/۳۱	۰/۴۱	+۰/۷۸	بلانی کرایدل- فائو ۲۴	سالانه

### نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج حاصله بطور کلی می‌توان گفت روش‌های هارگریوز- سامانی، بلانی کرایدل- فائو ۲۴، تورک و پریستلی- تیلور بیشترین تطابق را با تبخیر و تعرق حاصل از اطلاعات تشتک تبخیر داشتند. همچنین نتایج تحقیق نشان داد در مقیاس فصلی، فصل تابستان کمترین خطا و فصل زمستان بیشترین خطای برآورد  $ET_0$  را دارا بودند. از طرفی مقیاس ماهانه کمترین خطا را نسبت به مقیاس زمانی فصلی داشت. این نتیجه بیان‌گر

کاهش خطای برآورد  $ET$  در مقیاس‌های زمانی کوچک می‌باشد. به منظور نتیجه گیری بهتر، روش‌های بهینه برآورد  $ET$  هر یک از خوشه‌ها در سه مقیاس زمانی در جدول ۹ درج گردیده، ضمن آن که میانگین پارامترهای هواشناسی هر یک از خوشه‌ها نیز ارائه شده است.

جدول ۹ - خلاصه روش‌های بهینه برآورد  $ET$  هر یک از خوشه‌ها

خوشه ۳	خوشه ۲	خوشه ۱	
هارگریوز- سامانی	پریستلی- تیلور	هارگریوز- سامانی	فروردین
هارگریوز- سامانی	پریستلی- تیلور	هارگریوز- سامانی	اردیبهشت
هارگریوز- سامانی	بلانی کریدل- فائو ۲۴	بلانی کریدل- فائو ۲۴	خرداد
هارگریوز- سامانی	بلانی کریدل- فائو ۲۴	بلانی کریدل- فائو ۲۴	تیر
هارگریوز- سامانی	تورک، تابشی فائو ۲۴	بلانی کریدل- فائو ۲۴	مرداد
هارگریوز- سامانی	تورک- ۱۹۶۱	بلانی کریدل- فائو ۲۴	شهریور
هارگریوز- سامانی	تورک- ۱۹۶۱	بلانی کریدل- فائو ۲۴	مهر
هارگریوز- سامانی، بلانی کریدل- فائو ۲۴	تورک- ۱۹۶۱	هارگریوز- سامانی	آبان
بلانی کریدل- فائو ۲۴	بلانی کریدل- فائو ۲۴	هارگریوز- سامانی	آذر
بلانی کریدل- فائو ۲۴	بلانی کریدل- فائو ۲۴	تورک- ۱۹۶۱	دی
بلانی کریدل- فائو ۲۴	بلانی کریدل- فائو ۲۴	تورک- ۱۹۶۱	بهمن
هارگریوز- سامانی	هارگریوز- سامانی	هارگریوز- سامانی	اسفند
هارگریوز- سامانی	هارگریوز- سامانی	هارگریوز- سامانی	بهار
هارگریوز- سامانی	بلانی کریدل- فائو ۲۴	بلانی کریدل- فائو ۲۴	تابستان
هارگریوز- سامانی	پریستلی- تیلور	هارگریوز- سامانی	پاییز
بلانی کریدل- فائو ۲۴	بلانی کریدل- فائو ۲۴	بلانی کریدل- فائو ۲۴	زمستان
بلانی کریدل- فائو ۲۴	هارگریوز- سامانی	هارگریوز- سامانی	سالانه
۱۳/۱	۲۲/۷	۱۸/۱	دمای هوا ( $^{\circ}C$ )
۵۱/۵	۳۵/۲	۳۸/۴	رطوبت نسبی (%)
۲۰/۴	۶/۴	۱۱	بارش (mm)
۶/۴	۱۳/۴	۱۰/۱	تبخیر (mm)
۸/۲	۹/۱	۸/۸	ساعت آفتابی (hr)
۱/۶	۲/۷	۲/۲	سرعت باد (m/s)

بررسی روش‌های بهینه در خوشه ۱، نشان از برتری دو روش بلانی کریدل - فائو ۲۴ و هارگریوز- سامانی است. در خوشه ۱، به جز دو ماه دی و بهمن، در کلیه مقیاس‌های ماهانه، فصلی و سالانه دو روش هارگریوز- سامانی و بلانی کریدل- فائو ۲۴ مناسب-ترین روش می‌باشد. این امر در خوشه ۲ و ۳ نیز حاکم است لیکن در خوشه ۲، روش‌های تشعشی تورک و پریستلی تیلور نیز مشهود می‌باشد. دلیل این امر را می‌توان بالا بودن ساعات آفتابی در این خوشه به میزان ۹/۱ ساعت در روز دانست که نسبت به دو



خوشه دیگر بیشترین مقدار را دارد. خوشه ۲ بالاترین دمای هوا و ساعات آفتابی را دارد بنابراین برتری روش‌های تشعشعی - دمایی در این خوشه منطقی به نظر می‌رسد. نکته قابل توجه در جدول ۹، عدم برتری روش‌های ترکیبی در همه خوشه‌ها است. به عبارت دیگر روش‌های ترکیبی پنمن در مقایسه با روش‌های دمایی و تشعشعی بیشترین اختلاف را در برآورد تبخیر و تعرق از تشت تبخیر دارند. این در حالی است که محققان زیادی روش پنمن مانیتث را به دلیل جامع بودن آن، به عنوان روشی مناسب در بیشتر مناطق دنیا پیشنهاد داده اند که حاصل آن در مطالعات سان و سونگ (۲۰۰۸: ۳۵۲)، رحیمی خوب (۲۰۰۹: ۲۹۵)، گانگ و همکاران (۲۰۰۶: ۶۲۰) و فیشر و پرینگل (۲۰۱۳: ۵۱) منتشر شده است. اما همان‌گونه که سبزی‌پرور و همکاران (۱۳۸۷: ۳۲۹) نیز اظهار داشتند روش مناسب برآورد  $ET_0$  در هر منطقه بستگی به اقلیم حاکم بر منطقه دارد. مطالعه کمار و همکاران (۲۰۰۸: ۵۳۱)، شاهین زاده و همکاران (۱۳۸۷)، دادیور و همکاران (۱۳۸۷: ۵)، بختیاری و همکاران (۲۰۱۱: ۲۳۷)، علیزاده و همکاران (۱۳۸۳: ۱۰۴) نیز بیان‌گر برتری روش‌های دمایی و تشعشعی در مناطق با اقلیم خشک بود. با توجه به مطالب اشاره شده در فوق پیشنهاد می‌گردد در مکان‌هایی از این حوضه که داده‌های تشت تبخیر در اختیار نیست می‌توان از معادلات تجربی (دمایی و تشعشعی) مورد قبول در این مقاله با توجه به بعد زمانی و مقدار خطای ارائه شده بهره جست.

## منابع و ماخذ

۱. جهانبخش اصل، سعید و موحد دانش، علی اصغر (۱۳۸۰). تحلیل مدل‌های برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل برای ایستگاه هواشناسی تبریز، مجله دانش کشاورزی، ۱۱(۲)، تبریز.
۲. دادیور، مسعود (۱۳۸۷). گزارش نهایی تعیین تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع (چمن) به روش لایسیمتری در ایستگاه تحقیقات کشاورزی اراک، مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی، شماره مصوب ۲۱-۸۱-۱۵-۱۲۱، موسسه تحقیقات خاک و آب.
۳. زارع ایبانه، حمید و بیات ورکشی، مریم و سبزی‌پرور، علی اکبر و معروفی، صفر و قاسمی، عادل (۱۳۸۹). ارزیابی روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع و پهنه بندی آن در ایران، مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره ۷۴، تهران.

۴. سبزی پرور، علی اکبر و زارع ایبانه، حمید، تفضلی، فرزین و موسوی بایگی، محمد و غفوری، محمد و محسنی موحد، اسدالله و مریانجی، زهره (۱۳۸۷). مقایسه چند مدل برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع در یک اقلیم سرد نیمه خشک، به منظور استفاده بهینه از مدل‌های تابش، مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۲، شماره ۲، مشهد.
۵. شاهین زاده، شیدا و پاپن، پیوند و رادمنش، فریدون (۱۳۸۷). مقایسه روش‌های تعیین تبخیر و تعرق پتانسیل به روش‌های پنمن، تورنت و ایت، بلاتی کریدل و تشت تبخیر در منطقه هوفل در جنوب خوزستان، دومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز.
۶. شفیع‌ی فسقندیس، ابراهیم و ساری صراف، بهروز (۱۳۸۶). ارزیابی مدل‌های برآورد تبخیر و تعرق بالقوه برای منطقه اهر، مجله فضای جغرافیایی، سال هفتم، شماره ۲۰، اهر.
۷. عساکره، حسین (۱۳۹۰). مبانی اقلیم‌شناسی آماری، دانشگاه زنجان، چاپ اول، زنجان.
۸. عزیززاده، امین و کمالی، غلام‌علی (۱۳۸۳). ارزیابی روش‌های برآورد تبخیر و تعرق در مناطق خشک، فصل‌نامه تحقیقات جغرافیایی، شماره ۷۳، اصفهان.
۹. فرهودی، رحمت‌ا... و شمسی‌پور، علی اکبر (۱۳۷۹). برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل منطقه بلوچستان جنوبی، مجله پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۲۹، تهران.
۱۰. کریمی گوغری، شهرام و رضایی، نسیم (۱۳۹۰). برآورد میزان تبخیر و تعرق گیاه مرجع و مقایسه آن با تبخیر از تشت تبخیر در استان کرمان، یازدهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر، دانشگاه شهید باهنر، کرمان.
۱۱. مومنی، منصور (۱۳۸۹). تحلیل‌های آماری با استفاده از SPSS، چاپ سوم، تهران، انتشارات کتاب‌نو.
۱۲. ناصری، عبدعلی و محسنی موحد، اسدا... (۱۳۷۸). ارزیابی روش‌های تجربی برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل در منطقه همدان. مجله پژوهش کشاورزی، شماره ۱، همدان.
۱۳. نساجی زواره، مجتبی و صادقی فر، رحیم (۱۳۸۶). برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع با استفاده از روش‌های مختلف (مطالعه موردی ایستگاه هواشناسی کرج)، نهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر، دانشگاه شهید باهنر، کرمان.
۱۴. فرهنگ جغرافیایی رودهای کشور - حوضه. وزارت دفاع و پشتیبانی نیروهای مسلح (۱۳۸۴). آبریز شرق ایران و قره قوم، جلد پنجم، چاپ اول، تهران، انتشارات سازمان جغرافیایی.



15. Bakhtiyari ,B., and Ghahreman,N (2011). Evaluation of Reference Evapotranspiration models for a Semiarid Environment Using Lysimeter measurements.J.Agr.Sci.Tech.Vol.13.223-237.England.
16. Fisher, D.K., and Pringle. H.C (2013). Evaluation of Alternative Methods for Estimating Reference Evapotranspiration.Agricultural Sciences.Vol.4, No.8A,51-60.Berlin Germany.
17. Gong, Lebing, Xu, Chong-yu, Chen, Deliang, Halldin, Sven and Chen, Yongqin David(2006).Sensitivity of the Penman–Monteith Reference Evapotranspiration to Key Climatic Variables in the Changjiang (Yangtze River) Basin, Journal of Hydrology, 329: 620–629.America.
18. Kaya, S., and Salih, E (2012).Evaluation of Pan coefficient for reference crop evapotranspiration for igdir region of Turkey .Journal of food,Agricultural & environment Vol.10(3-4),987-991.Finland.
19. Kumar M., Bandyopadhyay A., Raghuwanshi N.S., and Singh R(2008). Comparative study of conventional and artificial neural network-based ET<sub>0</sub> estimation models. J. Irrigation Science. 26 (6). 531-545. Springer Berlin Heidelberg.
20. Rahimikhob, A(2009). An evaluation of common pan coefficient equations to estimate reference evapotranspiration in a subtropical climate (north of Iran).Irrig Sci.Vol.27.289-296. Springer Berlin Heidelberg.
21. Singh,K.R.,and Pauer,P.S(2011).Comparative study of reference crop evapotranspiration(ET<sub>0</sub>)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. Singapore.
22. Sun, Li and Song, Changchun (2008). Evapotranspiration from a Freshwater Marsh in the Sanjiang Plain, Northeast China, Journal of Hydrology, 352, 202– 210. America.
23. Trajkovic, S., Kolakovic, S (2010). Comparison of Simplified Pan -Based Equations for Estimating Reference Evapotranspiration. J.Irrig. Drain. Eng., 136 (2),137-140. America.
24. Xing, Z., Chow, L., Meng, F., Rees, H.W., Monteith, J., and Lionel, S (2008). Testing Reference Evapotranspiration Estimation Methods Using Evaporation Pan and Modeling in Maritime Region of Canada. J.Irrig. Drain. Eng., 134(4),417-424. America.