

## مقایسه روش‌های تجربی برآورد تبخیر و تعرق براساس داده‌های لایسی متری (مطالعه موردی: دشت کاشان)

سید جواد ساداتی‌نژاد<sup>۱</sup>، لیلا نظری<sup>۲\*</sup>، هدی قاسمیه<sup>۳</sup>، سلمان عارفخانه کلاته<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۴/۷

### چکیده

برآورد تبخیر و تعرق در سطح منطقه‌ای، یکی از مؤلفه‌های مهم برای مدیریت بهینه منابع آب است. روش‌های تجربی زیادی برای برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع وجود دارد، ولی این روش‌ها نتایج یکسانی برای همه مناطق نشان نمی‌دهند. مطالعات لایسی متری به منظور تعیین مناسب‌ترین روش در هر منطقه به کار می‌رود. لذا در این تحقیق برای تعیین مناسب‌ترین روش برآورد تبخیر و تعرق در منطقه مورد مطالعه، آزمایشی به مدت ۶ ماه در سال آماری ۱۳۹۱-۱۳۹۲ با استفاده از ۴ دستگاه لایسی متر زهکش‌دار در دانشگاه کاشان اجرا شد. همچنین انواع روش‌های تجربی برآورد تبخیر و تعرق و تشتک تبخیر بر اساس داده‌های لایسی متری مورد مقایسه قرار گرفتند. در نهایت، نتایج برآورد مجموع تبخیر و تعرق ماهانه با استفاده از لایسی متر در منطقه طرح در ماه‌های دی، بهمن، اسفند، فروردین، اردیبهشت و خرداد به ترتیب برابر ۲۴/۴۹، ۳۸/۳۹، ۵۱/۵۲، ۷۳/۸۷، ۱۱۹/۷۷ و ۱۸۰ میلی‌متر به دست آمد. همچنین از میان روش‌های مورد بررسی، روش تورنت‌وایت به ترتیب با  $R^2$ ،  $R$ ، NSC، RMSE و MBE برابر ۰/۹۵، ۰/۹۷، ۰/۹۸۶، ۴/۲۹ و ۱/۱۵- از دقت بیشتری برخوردار بود که به عنوان مناسب‌ترین روش برآورد تبخیر و تعرق در منطقه مورد مطالعه معرفی می‌شود. پس از آن، روش‌های جنسن-هیز اصلاح‌شده، بلانی-کریدل، جنسن-هیز، هارگریوز-سامانی، تشتک تبخیر و فائو-پنمن-مانتیت در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. در نهایت روش پنمن با  $R^2$  برابر ۰/۵۸ کمترین دقت را داشت.

**کلیدواژه‌ها:** تشتک تبخیر، روش‌های تجربی، تورنت‌وایت، گیاه مرجع چمن، لایسی متر زهکش‌دار.

۱. دانشیار دانشکده علوم وفنون، دانشگاه تهران

۲. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، نویسنده

مسئول، L.nazari67@yahoo.com

۳. دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان

۴. دانشجوی دکتری مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

\* این مقاله مستخرج از پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه کاشان است.

## مقدمه

در طراحی شبکه‌های آبیاری و زهکشی مد نظر قرار گیرد (جهان‌بخش اصل و همکاران، ۲۰۰۲).

اندازه‌گیری‌های مستقیم تبخیر و تعرق به دلیل در نظر گرفتن شرایط واقعی و به دست آوردن مستقیم پارامترهای اصلی، به‌عنوان یکی از دقیق‌ترین روش‌ها شناخته شده است (شهابی‌فر و رحیمیان، ۲۰۰۷). برآورد آب مصرفی گیاه و تطبیق آن با آب مصرفی واقعی، سال‌هاست که مورد توجه محققان قرار گرفته و فرمول‌های گوناگونی توسط ایشان پیشنهاد شده است (جنسن<sup>۲</sup> و همکاران، ۱۹۹۷). فرمول‌های پیشنهادی برای هر منطقه، نیاز به کالیبره شدن طی سالیان متوالی دارد و هرگز بدون اندازه‌گیری مقدار دقیق آب مصرفی، نمی‌توان به نتایج حاصل از معادلات گوناگون اعتماد کرد. به همین دلیل ساخت لایسی‌متر و اندازه‌گیری مستقیم آب مصرفی گیاه در مراکز تحقیقاتی، به‌شدت مورد توجه قرار گرفته است (آلن و همکاران، ۱۹۹۸).

لایسی‌متر، یکی از قابل‌اعتمادترین راه‌های اندازه‌گیری مستقیم تبخیر و تعرق است (مارتین و همکاران، ۱۹۸۵). لایسی‌متر از واژه یونانی لایسیس<sup>۳</sup>، به‌معنای سست کردن گرفته شده است. لایسی‌متر دستگاهی است که از سال ۱۶۸۸، در مطالعات مربوط به آب و خاک مورد استفاده قرار گرفته است. این دستگاه، از یک تانک یا مخزن ساده تشکیل شده که پر از خاک است و با کاشت گیاه در آن و آبیاری می‌توان حجم آب تلف‌شده در اثر تبخیر و تعرق از سطح خاک و تعرق از سطح گیاه (تبخیر و تعرق) را در دوره‌های روزانه، هفتگی و یا ماهانه محاسبه کرد (علیزاده و کمالی، ۲۰۰۷).

با توجه به اهمیت زیاد موضوع تبخیر و تعرق در مناطق مختلف، تحقیقات وسیعی در این زمینه صورت گرفته است که به بعضی از آن‌ها اشاره می‌شود.

از جمله لیو<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۷) به ارزیابی ۱۶ مدل برآورد تبخیر و تعرق با لایسی‌متر وزنی در پکن چین پرداختند. نتایج حاکی از بیش‌برآوردی همه ۱۶ مدل نسبت

ایران با قرار گرفتن در کمربند خشک جهانی، بیش از بسیاری از کشورها با مسئله بحران آب روبه‌روست (پورمحمدی و همکاران، ۲۰۱۱). همچنین حجم بارندگی سالانه در ایران، حدود ۴۱۳ میلیارد مترمکعب برآورده شده است که ۲۹۶ میلیارد مترمکعب یا ۷۲٪ آن، بلافاصله توسط تبخیر و تعرق تلف شده و وارد اتمسفر می‌شود (علیزاده و همکاران، ۲۰۰۶). یکی از راه‌های کاهش بحران آب در کشاورزی به‌واسطه پایین بودن راندمان مصرف آن و استفاده بیش از حد منابع آب موجود، مدیریت آب در تأمین نیاز آبی گیاهان زراعی است. در این زمینه تبخیر و تعرق، در واقع شاخص تعیین‌کننده‌ای در فرایند رشد است که معادل آب مورد نیاز گیاهان زراعی قلمداد می‌شود (قمرنیا و سلطانی، ۲۰۱۹). تبخیر و تعرق پدیده هیدرولوژیکی چندبعدی است که تحت تأثیر چندین متغیر عمل می‌کند. به‌طور کلی، متغیرهایی که در این فرایند اثرگذار هستند بارندگی، سرعت باد، تابش خورشیدی، فشار هوا، رطوبت، ساعات آفتابی، ابرناکی، همرفت (انتقال افقی گرمای محسوس و رطوبت)، پوشش زمین، خصوصیات خاک و گیاه و آب است (صیفی و همکاران، ۲۰۱۱).

تبخیر و تعرق، یکی از اجزای اصلی چرخه هیدرولوژی است که تعیین صحیح آن در علوم آب از قبیل مطالعات توازن هیدرولوژیکی و طراحی و مدیریت سیستم‌های آبیاری، از اهمیت بالایی برخوردار است (آلن<sup>۱</sup> و همکاران، ۱۹۹۸). به‌عبارت دیگر، مقدار تبخیر و تعرق، یکی از داده‌های اساسی در طراحی شبکه‌های آبیاری و زهکشی است. طراحی شبکه‌های انتقال اعم از کانال‌های آبرسانی یا زهکشی نیز، وابسته به مقدار آب مورد نیاز برای پدیده تبخیر و تعرق است. همچنین طراحی سیستم‌های آبیاری و تعیین بهترین دور آبیاری، به تخمین مقدار آب مصرفی گیاه (که شامل میزان تبخیر از سطح خاک و تعرق از گیاه است)، نیازمند است. لذا مسئله تبخیر و تعرق باید به‌عنوان یکی از عوامل مهم و مؤثر

2. Jensen  
3. Lysis  
4. Liu

1. Allen

نتایج بر اساس استاندارد رگرسیون خطی نشان داد که تخمین تبخیر و تعرق مرجع با لایسمتری، مناسب و رضایت‌بخش است (چاروالهو<sup>۱۸</sup> و همکاران، ۲۰۰۷). طی مطالعه‌ای در انزسدرف واقع در شرق وین، به‌منظور تعیین تبخیر و تعرق مرجع از لایسمتری استفاده شد و گونه چمن در آن کشت شد. در نتیجه با اندازه‌گیری فرایندهای چرخه هیدرولوژیکی مانند بارش، نفوذ آب، اطلاعات آب‌وهوایی، تولید بیوماس و تغییرات وزن، اقدام به شبیه‌سازی داده‌ها شد و بر اساس رابطه‌های بین این پارامترها، مدلی برای تبخیر و تعرق ارائه شد (نلز و سیپدر<sup>۱۹</sup>، ۲۰۰۸). آقای رئوف و عزیزی مبصر (۲۰۱۸) طی تحقیقی در ایستگاه تحقیقاتی هانگار دانشگاه محقق اردبیلی و در شهر اردبیل، برای دستیابی به بهترین مدل تبخیر و تعرق مرجع در وضعیت آب‌وهوایی منطقه فوق با استفاده از مقایسه بین داده لایسمتری و نتایج روش‌های برآورد تبخیر و تعرق یافتند که در مقایسه با نتایج لایسمتری، در محل تحقیق مناسب‌ترین مدل‌ها، به‌ترتیب بلانی کرایدل، راوازانی و همکاران و مدل Rn و ضعیف‌ترین مدل‌ها به‌ترتیب ایرماک و مدل‌های والیانتراس است. به‌صورت کلی، تناسب نتایج مدل‌ها نسبت به نتایج مدل فائو- پنمن- مانتیث در مقایسه با نتایج آن‌ها نسبت به نتایج لایسمتری، قابل قبول‌تر بود. همچنین با توجه به محک‌های آماری در محل تحقیق نسبت به مدل فائو- پنمن- مانتیث، مناسب‌ترین مدل‌ها به‌ترتیب تورک، برتی و همکاران و تراجوکیچ و ضعیف‌ترین مدل‌ها، هارگریوز- سامانی<sup>۲۰</sup> اصلاح‌شده، ایرماک و اسکاندل تعیین شد (رئوف و عزیزی مبصر، ۲۰۱۶).

همچنین در پژوهشی در گلخانه مؤسسه تحقیقات گیاه‌پزشکی کشور واقع در تهران، هفت روش محاسباتی تبخیر و تعرق گیاه مرجع چمن (بر اساس داده‌های میکرو لایسمتری ناشی از کشت چمن)، مورد ارزیابی قرار گرفتند و در نهایت، این نتیجه حاصل شد که روش فائو- پنمن- مانتیث از دقت بیشتری برخوردار بوده و روش

به نتایج لایسمتری متر بود. در پژوهشی با استفاده از لایسمتری‌های وزنی و زهکش‌دار، میزان تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع (چمن) اندازه‌گیری و با نتایج روش پنمن- مانتیث<sup>۱</sup> و تشتک تبخیر مقایسه شد؛ در نهایت این نتیجه حاصل شد که همبستگی بین نتایج روش پنمن- مانتیث با لایسمتری‌ها مناسب بوده است (سیلوا و همکاران، ۱۹۹۹). همچنین در تحقیق دیگری با استفاده از لایسمتری‌های زهکش‌دار، تبخیر و تعرق گوجه‌فرنگی و کدو محاسبه شدند و با پنج روش منطبق بر وضعیت آب‌وهوایی شامل فائو- پنمن، بلانی- کرایدل<sup>۲</sup>، جنسن- هیز<sup>۳</sup>، تشتک تبخیر و تورنت‌وایت<sup>۴</sup> مقایسه شدند. در نهایت نتایج نشان داد که روش پنمن<sup>۵</sup> برای کدو و روش تشتک تبخیر<sup>۶</sup> برای گوجه‌فرنگی، بهترین روش است (آل عمران<sup>۷</sup>، ۲۰۰۴). طی مطالعه‌ای هفت مدل تبخیر و تعرق بر اساس داده‌های لایسمتری در ایستگاه هواشناسی- هیدرولوژیکی مانچنگ لادباچ<sup>۸</sup> آلمان مقایسه شدند. این هفت مدل عبارت‌اند از: ۱. مدل مورتون<sup>۹</sup>، ۲. مدل استریگر<sup>۱۰</sup> بر اساس تغییرات درجه خشکی (AA<sup>۱۱</sup>)، ۳. مدل ماکینگ<sup>۱۲</sup>، ۴. مدل پرستلی- تیلور<sup>۱۳</sup>، ۵. مدل GG<sup>۱۴</sup>، ۶. مدل تورنت‌وایت، ۷. مدل هارگریوز<sup>۱۵</sup>. در نهایت نتایج نشان داد که برای اندازه‌گیری تبخیر و تعرق واقعی و بالقوه، مدل‌های GG و ماکینگ دقیق‌ترند (یو و چن<sup>۱۶</sup>، ۲۰۰۶). کراوالو و همکاران در پرتغال اقدام به ساخت، نصب، کالیبره و ارزیابی لایسمتری‌های وزنی کردند؛ به طوری که لایسمتری ساخته‌شده از خاک محلی پر شده و گونه چمن باهیا<sup>۱۷</sup> در آن کشت شده بود. در نهایت،

1. FAO- Penman-Monteith
2. Balnny-Kridlle
3. Jensen- Haise
4. Thornthwaite
5. Penmann
6. Pan Evapotraspiration
7. AL-Omran
8. Moncheng Ladbach
9. Morton
10. Striger
11. Advection-Aridity
12. Makkink
13. Priestley-Taylor
14. Granger & Gray
15. Hargreaves
16. Xu & Chen
17. Seropédica region - RJ

18. Carvalho
19. Nolz & Cepuder
20. Hargreaves-Samani

بلانی - کریدل، کمترین دقت را داشته است (شهابی فر و رحیمیان، ۲۰۰۷). آقای مسعودی و همکاران طی تحقیقی با استفاده از آمار روزانه داده‌های هواشناسی سه ایستگاه سینوپتیک تهران، گرگان و کرمانشاه با وضعیت اقلیمی متفاوت (به ترتیب خشک، مدیترانه‌ای و نیمه‌خشک بر اساس روش دومارتن)، میزان تبخیر و تعرق با ۵ روش فائو-پنمن-مانتیت، هارگریوز-سامانی، تورک، پریستولی-تیلور و مک‌کینگ در دوره آماری ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۷ را محاسبه کردند. سپس با مرجع قرار دادن روش فائو-پنمن-مانتیت، معادلات فوق را برای هر سه ایستگاه در دوره آماری ۱۹۹۲ الی ۲۰۰۲ واسنجی شد و با استفاده از معیارهای آماری  $R^2$ ، RMSE و MBE، معادلات تجربی را مختلف مقایسه کردند. سپس بهترین معادله واسنجی در دوره آماری ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۷ برای هر ایستگاه تعیین شد. در نهایت، نتایج نشان داد که در ایستگاه‌های تهران، گرگان و کرمانشاه به ترتیب معادلات واسنجی شده EHS و ET از دقت بیشتری در مقایسه با EPT و EMK برخوردارند، ضمن آنکه واسنجی معادلات تجربی، سبب افزایش کارایی و کاهش خطا شده است (قبایی سوق و همکاران، ۲۰۱۰). متخصصان آب و خاک و گیاه نیز تلاش کرده‌اند معادله‌هایی هرچند ساده به منظور تخمین  $ET_0$  و یک یا چند پارامتر اساسی مؤثر بر تبخیر و تعرق در نظر بگیرند (علیزاده و کمالی، ۲۰۰۷).

برآورد تبخیر و تعرق در مناطق خشک و نیمه‌خشک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و روش‌های بسیار زیادی برای محاسبه آن وجود دارد که این روش‌ها، نتایج یکسانی برای همه مناطق نشان نمی‌دهند. دشت کاشان نیز جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور است که هیچ گونه مطالعه‌ای توسط سایر محققان در زمینه تبخیر و تعرق در آن صورت نگرفته است، لذا تحقیقات لایسی متری دقیق‌تر به منظور تعیین مناسب‌ترین روش برآورد تبخیر و تعرق در این منطقه بسیار ضروری و لازم به نظر می‌رسد که از اهداف اصلی این تحقیق به شمار می‌رود. همچنین نوآوری این تحقیق نسبت به تحقیقات انجام شده در طراحی لایسی متر در ابعاد کوچک است که در بخش روش تحقیق به تفصیل شرح داده می‌شود.

بنابراین هدف از تحقیق حاضر، برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل با استفاده از روش‌های تورنت‌وایت، بلانی-کریدل، جنسن-هیز، جنسن-هیز اصلاح شده<sup>۱</sup>، هارگریوز-سامانی، تشتک تبخیر، پنمن و فائو-پنمن-مانتیت و مقایسه آن‌ها بر اساس داده‌های لایسی متری در دشت کاشان و ارزیابی دقت بر اساس  $R^2$ ، RMSE، NSC، MBE و در نتیجه تعیین مناسب‌ترین روش برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل منطقه مذکور است.

## روش شناسی

### منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش تقریباً در مرکز دشت کاشان یعنی دانشگاه کاشان با مختصات جغرافیایی  $34^{\circ}00'18''$  عرض شمالی در  $51^{\circ}21'45''$  طول شرقی و ارتفاع این منطقه از سطح دریا، معادل ۹۹۰ متر است. از دلایل انتخاب این منطقه برای احداث لایسی متر می‌توان به مواردی از جمله نزدیک بودن به ایستگاه هواشناسی کاشان به عنوان قابل اعتمادترین ایستگاه منطقه، دارا بودن امکانات اندازه‌گیری پارامترهای تأثیرگذار بر فرایند تبخیر و تعرق از جمله رطوبت، بارندگی، دما، آزمایشگاه، ... و در نهایت، مقرون به صرفه بودن اشاره کرد. از طرفی، حوضه کاشان از دو بخش دشت و کوهستان تشکیل شده است. بنابراین تلاش شد ایستگاه مطالعاتی به گونه‌ای انتخاب شود که معرف تمام منطقه باشد. لذا منطقه طرح در حد واسط دشت و کوهستان انتخاب شد که مسلماً نتایج تحقیق به واقعیت نزدیک‌تر خواهد بود.

### روش تحقیق

#### ساخت و احداث لایسی متر در سایت تحقیقاتی دانشگاه

تحقیقات نشان می‌دهد که لایسی متر وزنی، بیشترین دقت را در تعیین آب مورد نیاز گیاهان دارد. اما به دلیل هزینه بالای احداث آن، در این پژوهش به منظور تعیین تبخیر و تعرق گیاه

جدول (۱): خصوصیات خاک داخل لایسیمتر  
Table (1): Soil properties within the lysimeter

متغیرهای اندازه‌گیری شده	لایه ۰-۳۰ سانتی‌متر
بافت خاک	شنی - رسی
رطوبت وزنی در ظرفیت زراعی	۱۴
رطوبت وزنی در نقطه پژمرگی	۷
جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۱/۱۹

## اقدامات مربوط به کشت و آبیاری گیاه مرجع چمن

پس از آماده‌سازی لایسیمتر در پاییز ۱۳۹۱، اقدام به کشت چمن اسپرت چهار تخم شد. بدین صورت که در هر لایسیمتر، ۷۰ گرم بذر چمن به صورت یکنواخت کشت شد. علت استفاده از این نوع چمن این بود که کشت چمن در فصل پاییز انجام می‌شد و در منطقه قبلاً به‌وفور انجام شده بود.

به‌منظور آبیاری گیاه مرجع چمن، در ابتدای کشت تا زمان رسیدن چمن به ارتفاع ۱۲ سانتی‌متری، آبیاری به صورت بارانی انجام شد؛ به نحوی که خاک تا عمق ۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متری کاملاً مرطوب و خیس می‌شد. پس از آن، عملیات آبیاری به صورت دستی در مقیاس روزانه به مدت ۶ ماه انجام گرفت و میزان آن به‌طور دقیق توسط مزور به واحد میلی‌لیتر محاسبه شد. همچنین مقادیر بارندگی در طول دوره رشد از طریق باران‌سنج مستقر در محل لایسیمترها قرائت و در محاسبه نیاز آبی لحاظ شد. همچنین خصوصیات آب آبیاری نیز نمونه‌برداری و مورد آزمایش قرار گرفت. در جدول (۲)، بعضی از ویژگی‌های آب آبیاری آورده شده است.

جدول (۲): خصوصیات آب آبیاری گیاه چمن  
Table (2): Characteristics of grass irrigation water

پارامتر	مقدار
EC (ds/m)	۱/۵۹۶
Ph	۷/۵۳
Ca (meq/l)	۵/۲
Mg (meq/l)	۳/۲
Cl (meq/l)	۱/۲
CO <sub>3</sub> (meq/l)	۰
HCO <sub>3</sub> (meq/l)	۲۵/۴

مرجع چمن از ۳ دستگاه لایسیمتر زهکش‌دار گیاه چمن و یک لایسیمتر شاهد استفاده شد.

لایسیمتر مورد نظر به ارتفاع ۹۰ سانتی‌متر و سطح مقطع دایره‌ای به قطر ۴۰ سانتی‌متر تهیه شد. سپس به‌منظور تعبیه زهکش، دو روزنه به قطر یک سانتی‌متر در کف لایسیمتر ایجاد شد و بدنه لایسیمتر کاملاً با عایق فوم پوشیده شد و سیم مفتول برای استحکام بیشتر مورد استفاده قرار گرفت. سپس به‌منظور طراحی پایه‌های لایسیمتر، از میله‌های آهنی به ارتفاع ۸۰ سانتی‌متر و فاصله افقی ۱۸۰ سانتی‌متر استفاده شد؛ به طوری که بر روی هر کدام از پایه‌ها، دو لایسیمتر قرار داده شد. برای زهکش بهتر آب از لایسیمتر به هنگام نصب پایه‌ها نیز شیب ۵٪ به طرف خروجی لایسیمترها داده شد و در گوشه‌ای از کف لایسیمتر بر روی دهانه روزنه زهکش، یک لایه توری قرار داده شد. در کف لایسیمتر نیز به ترتیب، پوکه و نخودی ریخته شد تا خروج آب مازاد به راحتی صورت گیرد. به‌منظور جمع‌آوری آب خروجی از زهکش‌ها نیز، ظروف ۱۰ لیتری به ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر مورد استفاده قرار گرفت که توسط پشم شیشه و فوم عایق‌بندی شدند. سپس برای انتقال آب از لایسیمتر به منبع ذخیره از سه‌راهی فلزی و لوله‌های رابط استفاده شد.

## آزمایش‌های خاک

پس از آماده شدن لایسیمتر و استقرار آن بر روی پایه‌ها، سه نمونه خاک از مناطق مختلف دشت کاشان مورد آزمایش بافت خاک قرار گرفتند و در نهایت از خاک دشت حسن‌آباد با بافت شن - رسی<sup>۱</sup> به‌منظور پر کردن لایسیمترها استفاده شد. آنگاه ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک لایسیمتر پیش از کاشت چمن با نمونه‌گیری از لایه ۰-۳۰ سانتی‌متر تعیین شد. شایان ذکر است که تعیین رطوبت وزنی در ظرفیت زراعی و پژمردگی در سازمان تحقیقات و آموزش کشاورزی مؤسسه آب و خاک تهران انجام شد. بعضی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول (۱) آورده شده است.

1. Sand Clay

اندازه گیری های لایسی متری

اندازه گیری های لایسی متری بر اساس رابطه (۱) به صورت روزانه انجام گرفت (آلن و همکاران، ۱۹۹۸).

$$ET_p = I + P - D \pm \Delta W \quad (1)$$

که در این رابطه، پارامترها عبارتند از:  $ET_p$  میزان تبخیر و تعرق پتانسیل به صورت آب تبخیر و تعرق یافته در دوره معین (mm)،  $P$  میزان بارندگی در همان دوره معین (mm)،  $I$  میزان آبیاری در همان دوره معین (mm)،  $D$  میزان آب زهکش شده در همان دوره معین (mm)،  $\Delta W$  تغییرات رطوبتی خاک تا کف لایسی متر یا تغییر در مقدار عمق آب موجود در پروفیل خاک در دوره معین (mm).

شایان ذکر است که در این پژوهش رطوبت خاک به طور روزانه توسط بلوک گچی و دستگاه رطوبت سنج مدل Eijkelkamp برحسب واحد اهم قرائت شد. آنگاه بر اساس منحنی تعیین رطوبت خاک، میزان رطوبت برحسب درصد مورد محاسبه قرار گرفت. ولی به دلیل تقریباً یکسان بودن تغییرات،  $\Delta W=0$  منظور شده است.

برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از روش تشتک تبخیر

تبخیر و تعرق گیاه مرجع ( $ET_0$ ) در همان دوره با استفاده از رابطه (۲) به دست آمد (علیزاده و کمالی، ۲۰۰۷):

$$ET_0 = K_{pan} \times (E_p) \quad (2)$$

که  $E_p$  میزان تبخیر به دست آمده از تشتک تبخیر و  $K_{pan}$  ضریب تشتک است که بستگی به وضعیت استقرار تشتک و محیط اطراف آن داشته و مقدار آن، بین ۰/۵ تا ۰/۸۵ متغیر است (علیزاده، ۲۰۱۳)

در این پژوهش براساس معادله اورنگ (رابطه ۳)، ضریب تشتک ایستگاه کاشان محاسبه شد و بر اساس رابطه (۲)، میزان تبخیر و تعرق گیاه مرجع به دست آمد (علیزاده و کمالی، ۲۰۰۷).

$$(3)$$

$$K_{pan} = 0.51206 - 3.21 \times 10^{-4}U + 0.031886 + \ln(F)0.002889451.07 \times 10^{-4}RH \times \ln(F)$$

در این رابطه، پارامترها عبارتند از:  $K_{pan}$  ضریب تشتک،  $RH$  رطوبت نسبی به درصد،  $u$  سرعت باد برحسب

کیلومتر بر ساعت،  $F$  فاصله سبزینگی در اطراف تشتک برحسب متر.

برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از انواع روش های تجربی

- روش پنمن

در سال ۱۹۶۳، رابطه (۴) برای تخمین تبخیر و تعرق پتانسیل سطوح گیاهی مرجع ارائه شد (مظاهری، ۲۰۰۶):

$$ET_0 = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) \frac{\gamma}{\gamma + \Delta} (15.39) (1 + 0.01U) (e_s - e_a) \quad (4)$$

در این رابطه، پارامترها عبارتند از:  $ET_0$  تبخیر و تعرق گیاه مرجع ( $\Delta$  (mm/day)،  $\gamma$  ضرایب معادله،  $R_n$  تابش ورودی خالص،  $G$  شدت جریان گرمای خاک،  $e_s$  فشار بخار اشباع (mbar)،  $e_a$  فشار واقعی بخار آب (mbar)،  $U$  سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (Km/day) که البته به طور کلی تابع باد برای مناطق مختلف، متفاوت است.

- روش فائو - پنمن - مانتیث

روش فائو - پنمن - مانتیث<sup>۱</sup> به عنوان یکی از معتبرترین روش ها برای تخمین  $ET_0$  مورد استفاده متخصصان قرار دارد. معادله فائو - پنمن - مانتیث به صورت رابطه (۵) است (علیزاده، ۲۰۱۳):

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \left[ \frac{1890}{(T + 273)} U_{\gamma} (e_a - e_d) \right]}{\Delta + \gamma (1 + 0.34U_{\gamma})} \quad (5)$$

در این رابطه، پارامترها عبارتند از:  $ET_0$  تبخیر و تعرق گیاه مرجع ( $\Delta$  (mm/day)،  $R_n$  تابش خالص در سطح پوشش گیاهی ( $MJm^{-2}d^{-1}$ ،  $T$  متوسط دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین ( $^{\circ}C$ ،  $U_{\gamma}$  سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (m/s)،  $e_d - e_a$  کمبود فشار بخار در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (Kpa)،  $\Delta$  شیب منحنی فشار بخار ( $Kpa^{\circ}C^{-1}$ ،  $\lambda$  ضریب رطوبتی ( $Kpa^{\circ}C^{-1}$ ،  $G$  شار گرما به داخل خاک ( $MJm^{-2}d^{-1}$ ).

در این رابطه، پارامترها عبارت‌اند از:  $T_m$  متوسط دمای هوا ( $^{\circ}\text{C}$ ) در ماه مورد نظر،  $I$  نمایه حرارتی سال که از جمع نمایه‌های حرارتی ماهانه در طول سال محاسبه می‌شود،  $N_m$  ضریب اصلاحی،  $a$ : ضریبی که از رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

$$a = (6.75 \times 10^{-7} I)^3 (7.71 \times 10^{-5} I)^2 + (1.792 \times 10^{-2} I) + 0.492 \quad (10)$$

- روش جنسن - هیز

معادله تجربی جنسن - هیز به صورت رابطه‌های (۱۱) تا (۱۵) ارائه شده است (علیزاده و کمالی، ۲۰۰۷).

$$ET_o = Cr(T - T_x)Rs \quad (11)$$

$$Cr = \frac{11}{45 - \left(\frac{h}{137}\right) + \left(\frac{365}{(e_{s,max} - e_{s,min})}\right)} \quad (12)$$

$$T_x = -2.5 - 0.14(e_{s,max} - e_{s,min}) - \frac{h}{500} \quad (13)$$

$$e_{s,max} = \exp\left(\frac{19.08T_{max} + 429.41}{T_{max} + 237.3}\right) \quad (14)$$

$$e_{s,min} = \exp\left(\frac{19.08T_{min} + 429.41}{T_{min} + 237.3}\right) \quad (15)$$

در این رابطه، پارامترها عبارت‌اند از:  $T$  میانگین دمای روزانه ( $^{\circ}\text{C}$ )،  $T_{max}$  ماکزیمم روزانه دمای هوا در گرم‌ترین ماه سال ( $^{\circ}\text{C}$ )،  $T_{min}$  مینیمم روزانه دمای هوا در گرم‌ترین ماه سال ( $^{\circ}\text{C}$ )،  $e_{s,max}$  فشار بخار اشباع به‌ازای ماکزیمم روزانه دمای هوا در گرم‌ترین ماه سال ( $\text{mbar}$ )،  $e_{s,min}$  فشار بخار اشباع به‌ازای مینیمم روزانه دمای هوا در گرم‌ترین ماه سال ( $\text{mbar}$ )،  $h$  ارتفاع از سطح دریا ( $\text{m}$ )،  $Rs$  تابش خورشیدی در دوره مورد نظر ( $\text{mm}$ ) که اگر مقدار آن برحسب کالری بر سانتی‌متر مربع در دست باشد، با تقسیم آن بر ۵۸/۴۸ به میلی‌متر تبدیل می‌شود.

- روش جنسن - هیز اصلاح شده

به‌منظور برطرف کردن مشکل تخمین تابش خالص خورشیدی در معادله جنسن - هیز، رابطه (۱۶) جایگزین آن

- روش بلانی کریدل - فائو<sup>۱</sup>

یکی از قدیمی‌ترین روش‌های تخمین تبخیر و تعرق پتانسیل، روش بلانی - کریدل است که بعدها فرمول پیشنهادی آن‌ها، مورد واسنجی قرار گرفت و برای تخمین تبخیر و تعرق گیاه مرجع چمن به‌صورت جدول ارائه شد. این روش، روش بلانی - کریدل - فائو نامیده شده است (علیزاده، ۲۰۱۳). بنابراین، میزان تبخیر و تعرق به روش بلانی - کریدل - فائو با استفاده از رابطه (۶) به دست می‌آید.

$$ET_o = a + b[P(0.46T + 8.13)] \quad (6)$$

در این رابطه، پارامترها عبارت‌اند از:  $ET_o$  تبخیر و تعرق گیاه مرجع (چمن) برحسب  $P$   $\text{mm/day}$  ضریب مربوط به طول روز یا درصد سالانه تابش آفتاب در ماه که به‌صورت روزانه توصیف شده است (متوسط ساعات روشنایی هر روز در ماه مورد نظر تقسیم بر کل ساعات روشنایی سال ضرب در ۱۰۰)،  $T$  متوسط ماهانه درجه حرارت برحسب  $^{\circ}\text{C}$ ،  $a$  و  $b$  ضرایب اقلیمی هستند که از رابطه‌های (۷) و (۸) محاسبه می‌شوند.

$$a = 0/023953\bar{T} - 0/00029EL \quad (7)$$

$$b = 0/005515Ln\bar{T}\bar{D} \quad (8)$$

در این رابطه‌ها،  $\bar{T}$  میانگین دمای متوسط ماهانه برحسب درجه سانتی‌گراد (یک میانگین برای هر ایستگاه)،  $\bar{T}\bar{D}$  میانگین اختلاف دمای متوسط حداکثر و متوسط حداقل ماهانه هوا برحسب درجه سانتی‌گراد (یک میانگین برای هر ایستگاه) و  $EL$  ارتفاع از سطح دریا برحسب متر است.

- روش تورنت وایت

در روش تورنت وایت، تبخیر و تعرق پتانسیل برای هریک از ماه‌های سال محاسبه می‌شود. اساس این محاسبه، داشتن دمای متوسط در هر ماه است که با استفاده از رابطه (۹) محاسبه می‌شود (علیزاده، ۲۰۱۳):

$$ET_p = 16N_m \left(\frac{10T_m}{I}\right)^a \quad (9)$$

شده است که به آن، روش جنس-هیز اصلاح شده می گویند (علیزاده، ۲۰۱۳).

$$ET_0 = Cr(T - T_x)K_t.R_a.TD^{0.5} \quad (16)$$

$$K_t = 0.075\left(\frac{S}{TD}\right)^{0.5} \quad (17)$$

در این رابطه‌ها، پارامترها عبارت‌اند از:  $ET_0$  تبخیر و تعرق گیاه مرجع چمن (mm/day)، S درصد ساعات تابش آفتاب، TD تفاوت متوسط دمای ماکزیمم و مینیمم روزانه،  $R_a$  تابش برون زمینی برحسب میلی‌متر آب (cm<sup>2</sup>/day) /Cal.

### روش هارگریوز-سامانی

در روش هارگریوز-سامانی نیز از معادله مشابه با روش جنسن-هیز اصلاح شده استفاده می‌شود. این معادله به صورت رابطه (۱۸) ارائه شده است (علیزاده، ۲۰۱۳).

$$ET_0 = 0.0135(K_t).R_a.TD^{0.5}(T + 17.5) \quad (18)$$

$$K_t = 0.00185(TD)^2 - 0.0433TD + 0.4023 \quad (19)$$

در این رابطه، پارامترها عبارت‌اند از:  $ET_0$  تبخیر و تعرق گیاه مرجع برحسب TD mm/day تفاوت متوسط دمای ماکزیمم و مینیمم (T<sub>max</sub>-T<sub>min</sub>) برحسب °C، T متوسط درجه حرارت برحسب °C،  $R_a$  آب معادل تابش برو جوی (برحسب میلی‌متر بر روز) گفتنی است که تمامی اطلاعات مربوط به روابط فوق از مجموعه داده‌های ایستگاه هواشناسی شهرستان کاشان استخراج شد که فاصله کمی تا سایت تحقیقاتی داشت.

### ارزیابی روش‌های تجربی

به منظور تعیین دقت نتایج تبخیر و تعرق محاسبه شده گیاه مرجع چمن، از اندازه‌گیری‌های لایسی متری استفاده شد که به عنوان داده‌های مرجع برای مقایسه این مقادیر به کار گرفته شده است. به عبارت دیگر، تمام مقایسه‌ها بر اساس مقادیر لایسی متری و معیارهای خطا بود. برای این منظور از برخی معیارهای آماری مانند  $R^2$ ، RMSE<sup>1</sup> (ریشه دوم میانگین

$$R^2 \quad (20)$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^n (X_{ci} - X_{mci})(X_{oi} - X_{moi})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{ci} - X_{mci}) \sum_{i=1}^n (X_{oi} - X_{moi})}}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{oi} - X_{ci})^2} \quad (21)$$

$$MBE = \sum_{i=1}^n (X_{oi} - X_{ci}) \quad (22)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{oi} X_{moi})(X_{ci} X_{mci})}{\sum_{i=1}^n (X_{oi} X_{moi})(X_{ci} X_{mci})^2} \quad (23)$$

$$NSC = 1 - \frac{\sum_{i=0}^n (y_o - y_e)^2}{\sum_{i=0}^n (y_o - \bar{y}_o)^2} \quad (24)$$

## نتایج

### نتایج لایسی متر

تبخیر لایسی متر شاهد در یک تکرار و تبخیر و تعرق گیاه مرجع چمن در ۳ تکرار به مدت ۶ ماه از روز ۲۸ آذر ۱۳۹۱ تا ۲۰ خرداد ۱۳۹۲ (هجدهم دسامبر ۲۰۱۲ تا یازدهم ژوئن ۲۰۱۳) به دست آمده است. به منظور گزارش بهتر و مقایسه دقیق‌تر داده‌های لایسی متر و سایر روش‌ها، میانگین متوسط ۳ تکرار چمن مورد استفاده قرار گرفت که به طور نمونه، تجزیه و تحلیل داده‌های لایسی متری ماه ژانویه در جدول (۳) آورده شده است.

### نتایج روش‌های تجربی

برای این منظور در ابتدا، آمار روزانه مورد نیاز از تاریخ ۲۸ آذر ۱۳۹۱ تا ۲۰ خرداد ۱۳۹۲ از ایستگاه هواشناسی کاشان تهیه شد. سپس با استفاده از روش‌های پنمن، فائو-پنمن-

2. MBE: Mean Bias Error

3. Nash/Sutcliffe

4. Correlation Coefficient

1. RMSE: Root Mean Square Error



ماتیت، بلانی - کریدل، تورنت وایت، جنسن - هیز، جنسن - در این مرحله، به منظور یافتن بهترین روش، از آماره‌های  $R^2$ ،  $RMSE$ ،  $R$  و  $MBE$  استفاده شد. نتایج حاصل از گیاه مرجع محاسبه شد که نتایج مربوط به برخی از روش‌ها (ماهان) در جدول (۴) ارائه شده است.

## نتایج روش‌های ارزیابی خطا

جدول (۳): برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع چمن توسط لایسیمتر در ماه ژانویه

Table (3): Estimation of Evapotranspiration of Reference Plant Grass by Lysimeter in January

روز	آبیاری (mm)	خروجی (mm)	تبخیر و تعرق گیاه مرجع (mm)	روز	آبیاری (mm)	خروجی (mm)	تبخیر و تعرق گیاه مرجع (mm)
۱	۴/۲۰	۲/۹۸	۱/۲۲	۱۶	۳/۰۵	۲/۲۱	۰/۸۴
۲	۴/۲۰	۳/۰۵	۱/۱۵	۱۷	۳/۸۲	۲/۸۲	۰/۹۹
۳	۴/۲۰	۳/۰۵	۱/۱۵	۱۸	۳/۰۵	۱/۹۸	۱/۰۷
۴	۳/۴۴	۳/۰۵	۰/۳۸	۱۹	۳/۰۵	۱/۹۱	۱/۱۵
۵	۳/۴۴	۳/۰۵	۰/۳۸	۲۰	۳/۰۵	۲/۴۴	۰/۶۱
۶	۳/۸۲	۳/۴۴	۰/۳۸	۲۱	۳/۰۵	۱/۵۳	۱/۵۳
۷	۳/۴۴	۲/۹۸	۰/۴۶	۲۲	۳/۴۴	۲/۶۷	۰/۷۶
۸	۲/۲۹	۲/۵۲	۱/۷۷	۲۳	۳/۴۴	۲/۱۴	۱/۳۰
۹	۲/۲۹	۲/۱۴	۰/۱۵	۲۴	۳/۴۴	۱/۳۷	۲/۰۶
۱۰	۱/۹۱	۱/۸۳	۰/۰۸	۲۵	۳/۴۴	۱/۱۵	۲/۲۹
۱۱	۱/۵۳	۰/۸۴	۰/۶۹	۲۶	۳/۴۴	۱/۶۰	۱/۸۳
۱۲	۲/۲۹	۱/۰۷	۱/۲۲	۲۷	۳/۸۲	۲/۲۹	۱/۵۳
۱۳	۳/۴۴	۰/۹۲	۲/۵۲	۲۸	۳/۴۴	۱/۴۵	۲/۹۸
۱۴	۳/۰۵	۲/۲۹	۰/۷۶	۲۹	۴/۵۸	۶/۴۹	۱/۰۹
۱۵	۳/۰۵	۱/۶۸	۱/۳۷	۳۰	۳/۴۴	۲/۲۹	۱/۱۵

جدول (۴): تبخیر و تعرق محاسبه‌شده گیاه مرجع با استفاده از روش‌های تجربی (میلی‌متر بر روز)

Table (4): Calculated evapotranspiration of the reference plant using experimental methods (mm / day)

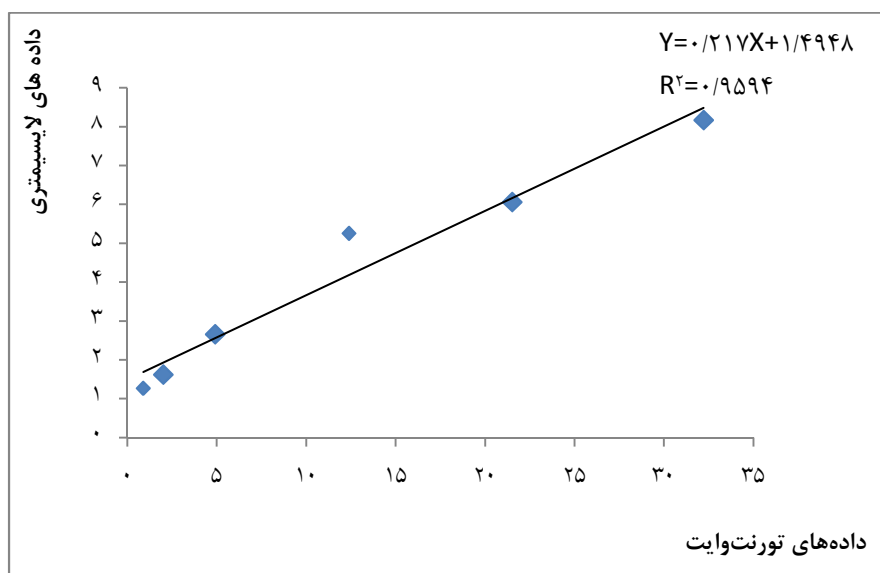
زمان (ماه)	هارگریوز سامانی	بلانی کریدل	جنسن - هیز	جنسن - هیز اصلاحی	تورنت وایت
دسامبر	۰/۹۳	۱/۱۲	۰/۷۴	۰/۴۸	۰/۸۹
ژانویه	۱/۲۶	۲/۹۰	۱/۸۸	۱/۳۰	۲/۰۱
فوریه	۲/۴۹	۴/۶۲	۳/۳۲	۲/۳۸	۴/۹۱
مارس	۳/۹۲	۷/۴۶	۶/۷۱	۴/۸۴	۱۲/۳۹
آوریل	۵/۱۱	۱۰/۹۸	۹/۰۴	۷/۵۸	۲۱/۵۳
می	۵/۹۵	۱۴/۶۳	۱۲/۲۸	۱۰/۳۴	۳۲/۲۲

جدول (۵): نتایج ارزیابی خطای روش‌های تجربی نسبت به داده‌های لایسی متر

Table (5): Results of experimental method error evaluation for Lysimeter data

ردیف	مدل	روش‌های ارزیابی خطا				
		MBE	RMSE	R	R <sup>2</sup>	NSC
۱	جنسن اصلاحی کوتاه	-۲/۳۱	۳/۲۶	۰/۹۵	۰/۹۱	۰/۹۶۱
۲	جنسن	-۳/۴۸	۴/۵۲	۰/۹۴	۰/۸۹	۰/۹۰۵
۳	هارگریز سامانی	-۱/۱۰	۱/۴۱	۰/۹۰	۰/۸۱	۰/۹۱۷
۴	بلانی-کریدل	-۴/۷۷	۵/۸۹	۰/۹۴	۰/۹۰	۰/۹۸
۵	تورنت وایت	-۱/۱۵	۴/۲۹	۰/۹۷	۰/۹۵	۰/۹۸۶
۶	پنمن	۴/۴۲	۶/۲۴	۰/۷۶	۰/۵۸	۰/۵۷
۷	فائو-پنمن-مانتیش	۵/۹۰	۸/۰۹	۰/۸۰	۰/۶۶	۰/۴۸۸
۸	تشتک تبخیر	-۰/۳۶	۱/۱۶	۰/۸۷	۰/۷۵	۰/۷۳۶

بنابراین با توجه به جدول (۵)، روش تورنت وایت با R (۱)، نمودار پراکنش تبخیر و تعرق روش تورنت وایت نسبت بالاتر به عنوان بهترین روش تجربی شناخته شد. در شکل به داده‌های لایسی متر نشان داده شده است.



شکل (۱): نمودار پراکنش تبخیر و تعرق روش تورنت وایت نسبت به داده‌های لایسی متری

Figure (1): Distribution diagram of evapotranspiration of Torrent White method to Lysimeter data

ماهه در سال آماری ۱۳۹۱-۱۳۹۲ با استفاده از انواع روش‌ها محاسبه شد و از طرفی میزان دقیق تبخیر و تعرق با استفاده از لایسی متر زهکش دار محاسبه و با سایر روش‌ها مورد مقایسه قرار گرفت و در نهایت بهترین روش تجربی برآورد تبخیر و تعرق در دشت کاشان تعیین گردید.

در این پژوهش، به منظور تعیین ضریب تشتک برای استفاده از داده‌های تشتک تبخیر برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل و مقایسه با سایر روش‌ها، از رابطه اورنگ استفاده

## بحث و نتیجه‌گیری

شهرستان کاشان یکی از مناطق خشک کشور است که با کمبود شدید منابع آبی مواجه است. از این رو ضروری است تا با برنامه‌ریزی هدفمند و مدیریت کارآمد منابع آب، تا حد ممکن از بروز مشکلات جدی ناشی از کم‌آبی در شهرستان جلوگیری شود. یکی از معیارهای مهم نمایانگر میزان خشکی در مناطق مختلف، پارامتر تبخیر و تعرق است. بنابراین در این پژوهش، میانگین تبخیر و تعرق در طول دوره آماری ۶

سامانی، تشتک تبخیر و فائو- پنمن- مانتیث در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. در نهایت روش پنمن با  $R^2$  برابر  $0/58$  کمترین دقت را داشت.

روش‌های پنمن و فائو- پنمن- مانتیث به پارامترهای هواشناسی زیادی احتیاج دارند. روش پنمن برای مناطق مرطوب آب‌وهوایی انگلستان معرفی شده است و برای شرایط خشک و نیمه‌خشک کاشان مناسب نیست. این روش‌ها به دلیل استفاده از تعداد زیادی پارامتر اقلیمی در محاسبه دارای دقت قابل قبولی هستند، ولی به دلیل اینکه همه اطلاعات مورد نیاز محاسبه نمی‌شوند، نمی‌توانند تخمین مناسبی ارائه دهند.

در پایان، پیشنهاداتی ارائه می‌شود:

۱. روش مناسب تبخیر و تعرق برای منطقه کاشان با استفاده از داده‌های ۶ ماهه به دست آمده است، لذا برای اطمینان از نتایج به دست آمده پیشنهاد می‌شود که حداقل این تحقیق طی دو یا سه سال آینده برای تأیید درستی نتایج به دست آمده ادامه پیدا کند.

۲. به علت خطای احتمالی در لایسی متر زهکش‌دار برای محاسبه تبخیر و تعرق واقعی پیشنهاد می‌شود برای تعیین دقیق‌تر مناسب‌ترین روش برآورد تبخیر و تعرق برای منطقه کاشان، تحقیقاتی با استفاده از لایسی مترهای دقیق وزنی در منطقه انجام گیرد.

شد. بعضی محققان نیز رابطه اورنگ را بهترین رابطه برای محاسبه ضریب تشتک اعلام کرده‌اند (رحیمی خوب و همکاران، ۲۰۱۲).

نتایج برآورد مجموع تبخیر و تعرق ماهانه با استفاده از لایسی متر در منطقه طرح در ماه‌های دی، بهمن، اسفند، فروردین، اردیبهشت و خرداد به ترتیب برابر  $24/49$ ،  $38/39$ ،  $51/52$ ،  $73/87$ ،  $119/77$  و  $180$  میلی‌متر به دست آمد. همچنین نتایج برآورد میانگین تبخیر و تعرق روزانه با استفاده از لایسی متر در ماه‌های دی، بهمن، اسفند، فروردین، اردیبهشت و خرداد به ترتیب برابر  $0/81$ ،  $1/28$ ،  $1/77$ ،  $2/5$ ،  $3/87$  و  $5/9$  میلی‌متر به دست آمد.

پس از بررسی و برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از روش‌های تجربی پنمن، فائو- پنمن- مانتیث، بلانی- کریدل، تورنت‌وایت، جنسن- هیز، جنسن- هیز اصلاحی و هارگریوز سامانی، فرمول تجربی تورنت‌وایت به ترتیب با  $R^2$ ،  $NSC$ ،  $R$ ،  $RMSE$  و  $MBE$  برابر  $0/95$ ،  $0/986/97$ ،  $0/0$ ،  $4/29$  و  $1/15$ - به عنوان مناسب‌ترین روش برآورد تبخیر و تعرق در دشت کاشان در طول ۶ ماه آماری از بین روش‌های مذکور شناخته شد. شایان ذکر است که نتایج به دست آمده در این بخش با نتایج تحقیقات بعضی محققین مطابقت دارد (بیگلویی و مقصودی، ۲۰۰۴). پس از آن روش‌های جنسن- هیز اصلاح‌شده، بلانی- کریدل، جنسن- هیز، هارگریوز-

## منابع

- Allen, R.G., Pereira, L.S. Raes, D. and Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage, No. 56. FAO, Rome, Italy, pp. 300.
- Allen, R.G., and Pruitt, W.O., 1991. FAO-24 Reference Evapotranspiration Factors. J. Irrig and Drain, ASCE 117 (5), 758-773.
- Alizadeh, A., Khanjani, M.C. Teraz, H. and Rahnamoud, MR., 2006. Investigating correction effects of temperature data on calculation accuracy of the evapotranspiration and its comparison with the results obtained from weighing lysimeter, Journal of Geography and Regional Development Research, 19(2), 97-105.
- Alizadeh, A. and Kamali, Gh., 2007. Water requirements of plants, 1th Edition, Astan Quds Razavi Press, first edition, pp. 228.
- Alizadeh, 2013. Principles of applied hydrology, Astan Quds Razavi, Imam-Reza University Press, 928 p.
- AL-Omran, F.S., Mohammad, H.M. AL-Ghobar and Alazba, A., 2004. Determination of transpiration of tomato and squash using lysimeters in central Saudi-Arabia, International Agricultural Engineering Journal, 182 (13), 27-36.
- Biglouei, M.H. and Maghsoudi, A., 2004. Determining the most appropriate method for estimating reference crop evapotranspiration for the Rasht region. Proceedings of 8<sup>th</sup>

- National Conference on Irrigation and Evaporation Reduction, pp. 34-43.
8. Carvalho, D.F., Silva, L.D.B. Guerra, J.C.M Gruz, F.A. and Souza, A.P., 2007. Installation, calibration and operation of a weighing lysimeter. Eng. Agríc. [online]. 27 (2), 363-372.
  9. Ghabaei Sough, M., Mosaedi, A. and Hezarjaribi, A., 2010. Evaluation and calibration of different methods to estimate evapotranspiration in three climate samples of Iran. Proceeding of 1st Iranian National Conference on Applied Research in Water Resources, 12-13/May/Spring, Kermanshah, Iran, pp. 239-248
  10. Ghamarnia, H. and Soutani, N. 2019. Evaluating the Efficiency of Empirical Estimation of Reference Evapotranspiration (Pan Based Method) in Different Climate Conditions of Iran, Journal of Iran-Water Resources Research, 14(4), 174-193.
  11. Jahanbakhsh Asl, S. Movahed danesh, A.A. and Molavi, A., 2002. Analyzing estimation models of evapotranspiration for synoptic station of Tabriz. Journal of Agricultural Science, 11, 51-66.
  12. Jensen, D.T., Hargreaves, G.H., Temesgen, B. and Allen, R.G., 1997. Computation of ET<sub>0</sub> under noni deal conditions, J. Irrig. and Drain. Engin. ASCE, 123(5), 394-400.
  13. Liu, X., Xu, C., Zhong, X., Li, Y., Yuan, X. and Cao, J., 2017. Comparison of 16 models for reference crop evapotranspiration against weighing lysimeter measurement. Agricultural water management, 184, pp.145-155.
  14. Mazaheri, M., 2006. Determining crop coefficient and zoning water requirement of potatoes in provinces of Khorasan and Semnan, MS.c Thesis, University of Mashhad Ferdowsi, pp. 40-50.
  15. Marting, D.L., Klocke, N.L. and Dehaan, D.L., 1985. Measuring eevaporation using mini-lysimeters, Proceeding of the National Conference on Advances in Evapotranspiration, 231-240.
  16. Nolz, R. and Cepuder, P., 2008. Evapotranspiration and percolation of a lysimeter, geophysical research abstracts, Vol. 10, EGU2008-A-08433, 2008SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2008-A-08433EGU General Assembly 2008.
  17. Poormohammadi, S., Dastorani, M.T Cheraghi, S.A.M. Mokhtari, M.H. and Rahimian, M.H., 2011. Evaluation and estimation of water Balance components in arid zone catchments using RS and GIS, Case study: Manshad catchment, Yazd province. Journal of Water and Wastewater, 3, 99-108.
  18. Raoof, M. and Azizi Mobaser, J, 2018. Evaluation of eighteen reference evapotranspiration models under the Ardabil climate condition, Journal of Water and Soil Conservation, Vol. 24(6),227-241, 10.22069/jwsc.2017.12528.2723
  19. Rahimi Khoob, A., Behbahani S.M.R. and Nazarifar, M.H.E., 2012. valuation of Using Minimum Meteorological Data for Penman Montieth Equation- Case Study Khuzestan Province Journal of Agriculture Science, 12(3), 591-600.
  20. Seifi A, Mirlatifi S M, Riahi H (2011) Developing a
  21. combined model of multiple linear regression-
  22. principal component and factor analysis(MLR-PCA)
  23. for estimation of reference evapotranspiration (Case study: Kerman station). Journal of Water and Soil, 24(6):1186-1196
  24. Shahabifar, M., Assari, M. Kouchakzadeh, M. and Mirlotfi, S.M., 2010. Evaluating some computational methods of evapotranspiration for Grass reference crop using lysimeter data in greenhouse conditions. Journal of Water Research in Agriculture, 24(1), 13-19.
  25. Shahabifar, M. and Rahimian, M.J., 2007. Measurement of sugar beet water requirements by lysimeter method in Mashhds. Journal of sugar beet, 23(2), 174-177.
  26. Silva, F.C., Folegatti, M.V. and Pereira, A.R., 1999. Usage of lysimeter devices for evapotranspiration reference determination Revista Barsileira de agrometeorologia. Santa Maria, 1, 19-23.
  27. Xu, C.Y. and Chen, D., 2006. Comparison of seven models for estimation of evapotranspiration and groundwater recharge using lysimeter measurement data in Germany. Hydrological Processes, 19, 3717-3734.

## Comparing Empirical Methods in Evapotranspiration Estimation based on Lysimeter Data: A Case Study of Kashan plain

Seyed Javad Sadatinezhad<sup>1</sup>, Leila Nazari<sup>2\*</sup>, Hoda Ghasemieh<sup>3</sup>, Salman Arefkhaneh Kalate<sup>4</sup>

Received: 06/04/2013

Accepted: 27/06/2020

### Extended Abstract

**Introduction:** Estimation of evapotranspiration at a regional level is an important element in efficient management of water resources. Evapotranspiration includes the evaporation from the surface of soil and water and also, the transpiration by the plant that is very important in arid and semi-arid areas. There are many empirical methods for evapotranspiration estimation of reference plants, but these methods don't produce the same results for all areas. Lysimeter studies are carried out to determine the most suitable method in each area.

**Material and Methods:** The study area in this research is located in Kashan University, based in the center of Kashan plain with geographical coordinates of  $45^{\circ} 21' 51''$  east longitude and  $34^{\circ} 00' 18''$  northern latitudes. Then, to measure the evapotranspiration of the reference grass plant, three drained lysimeters of the grass plant and one control lysimeter were made and used in the research site for 6 months within the statistical year of 2012-2013. Moreover, empirical methods of evapotranspiration estimation and evaporation pan were compared based on lysimeter data.

**Results:** Using lysimeter in the project area, the estimation results for monthly evapotranspiration were reported as being 24.49, 38.39, 51.52, 73.87, 119.77, and 180 mm in January, February, March, April, May, and June, respectively. Moreover, from among the methods investigated, Thornthwaite turned out to be the most accurate ones with  $R^2 = 0.95$ ,  $R = 0.97$ ,  $NSC = 0.986$ ,  $RMSE = 4.29$ , and  $MBE = -1.15$ , being considered as the most suitable method for evapotranspiration estimation in the study area. After that, modified Jensen Hayes, Blaney-Criddle, Jensen-Hayes, Hargreaves-Samani, evaporation pan, and FAO-Penman-Monteith were considered as other useful methods in that regard though with lower accuracy. Finally, the Penman method with  $R^2 = 0.58$  was found to have the least accuracy from among the relevant methods considered.

**Discussion and Conclusion:** Kashan is one of Iran's arid regions which faced a severe shortage of water resources. Therefore, careful planning and efficient management of water resources is required to avoid any serious problem in providing water for different purposes. The evapotranspiration parameter is considered as an important criterion in determining the extent of drought in different areas. Experimental methods for estimating

1. Faculty of New Science and Technologies, University of Tehran

2. MSC Student, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, University of Kashan; L.nazari67@yahoo.com

3. Associate Professor, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, University of Kashan

4. Ph.D. Student Water Engineering Department, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

DOI: 10.22052/deej.2020.9.27.45

evapotranspiration including the Penman and FAO-Penman-Monteith require many meteorological parameters. Penman method has been introduced for humid climates of England and is not suitable for the arid and semi-arid conditions of Kashan. As it considers a large number of climatic parameters in its calculation of evapotranspiration, this method has acceptable accuracy, but as all the required information is not calculated, it cannot provide a good estimate. In this study, the appropriate evapotranspiration method for the Kashan region was obtained, using the data gathered over six months in the statistical year of 2012-2013. Therefore, to ensure the accuracy of the results obtained, it is recommended that this research continues for at least the next two or three years. On the other hand, due to a possible error in the drainage lysimeter when calculating the actual evapotranspiration, it is recommended that the research get conducted in the region via accurate weight lysimeters so that it could identify the most appropriate method of estimating evapotranspiration in Kashan more accurately.

**Keywords:** Evaporation pan, Experimental methods, Thornthwaite, Grass reference plant, Drainage lysimeter.