

تعیین ضرایب تبخیر - تعرق ماهانه گندم زمستانه با استفاده از روشهای مختلف تخمین تبخیر - تعرق و تشت تبخیر در دشت قزوین

نیازعلی ابراهیمی پاک^۱، آرش تافته^۲، اصلان اگدرنژاد^۳، صفورا اسدی کپورچال^۴

چکیده

با توجه به اهمیت تعیین نیاز آبی در مدیریت آب در مزرعه یکی از کلیدی ترین پارامترها در تعیین نیاز آبی، ضرایب تبخیر-تعرق در هر منطقه می باشد. از این رو در این پژوهش سعی بر آن شد که با استفاده از داده های چهار ساله لایسیمتری چمن و اطلاعات سه ساله تبخیر - تعرق گندم و اطلاعات هواشناسی موجود در مرکز تحقیقات کشاورزی اسماعیل آباد قزوین روش های مختلف تعیین تبخیر-تعرق پتانسیل نسبت به داده های لایسیمتری واسنجی شوند تا با استفاده از این نتایج نیاز آبی گیاه گندم در ماه های مختلف قابل محاسبه باشد. نتایج نشان داد که تبخیر-تعرق سالانه چمن ۱۲۹۶ میلی متر و تبخیر سالانه از تشت تبخیر برابر با ۱۷۰۳ میلی متر و میزان تبخیر-تعرق گندم هم برابر با ۵۵۰ میلی متر در طول دوره رشد می باشد. در بین روش های تخمینی نیز روش FAO 56 از دقت بیشتری نسبت به سایر روش ها برخوردار بود. همچنین نشان داد که با واسنجی این روش ها می توان نتایج قابل قبولی را در تخمین تبخیر - تعرق گندم بدست آورد. از دیگر سو روش تشت تبخیر که ساده ترین و عملی ترین روش می باشد با استفاده از ضرایب و اصلاحاتی که بر روی آن انجام شد توانست با دقت قابل قبولی میزان تبخیر - تعرق گندم را تخمین بزند. مقادیر ضریب تبخیر-تعرق گندم (K_c) بین ۰/۲۹ تا ۱/۰۹ و ضریب تشت تبخیر مرجع (K_p) بین ۰/۵۸ تا ۰/۸۸ و ضریب تشت تبخیر گندم (K_{cp}) بین ۰/۲۶ تا ۰/۹۹ بدست آمد.

واژه های کلیدی: تبخیر-تعرق، ضریب تشت تبخیر، گندم، لایسیمتر، واسنجی

¹ دانشیار، بخش آبیاری، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. ۰۹۱۲۱۸۱۷۱۶۹.Nbrahimipak@yahoo.com (نویسنده مسئول)

^۲ استادیار، بخش آبیاری، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. ۰۹۱۲۵۶۵۲۶۰۱. Arash_tafteh@yahoo.com

³ استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران. ۰۹۱۶۳۱۱۱۲۶۹. A_eigder@ymail.com

⁴ استادیار، گروه علوم خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. ۰۹۱۲۶۸۷۳۳۶۷. Safooraasadi@guilan.ac.ir

مقدمه

گندم (*Triticum aestivum* L.) یکی از مهم‌ترین محصولات زراعی در دنیا محسوب می‌شود. ایران با مصرف سرانه ۱۹۴ کیلوگرم گندم در سال، رتبه هفتم جهان را به خود اختصاص داده است. با توجه به روند افزایش سریع جمعیت و تقاضای روز افزون جامعه برای تأمین منابع غذایی به ویژه نان، این محصول نقشی محوری در امنیت غذایی کشور دارد. با توجه به وضعیت اقلیمی خشک و نیمه خشک ایران و خشک‌سالی‌های پیاپی، تأمین آب مورد نیاز گندم و نیز واردات حدود ۵ تا ۶ میلیون تنی این محصول برای تأمین نیاز غذایی داخل کشور، اهمیت تعیین نیاز آبی گندم را بیش از پیش روشن می‌کند (امیدی و همایی، ۱۳۹۴).

عوامل مختلفی در افزایش تولید محصول گندم مؤثر می‌باشند. یکی از این عوامل اصلی، آب می‌باشد. تعیین آب مصرفی واقعی گیاهان زراعی به ویژه گندم از اهمیتی روز افزون به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک برخوردار است و استفاده اقتصادی از آب نیز یک مسئله جدی و بسیار مهمی است که کشاورزان و محققان در مناطقی که گندم به صورت آبی کشت می‌شود. با آن مواجه هستند و نیل به این هدف مستلزم تولید حداکثر عملکرد بر اساس واحد آب است (Taftteh and Sepaskhah, 2012). از سوی دیگر در بعضی مناطق به علت محدود بودن آب آبیاری، تعیین زمان مناسب آبیاری برای استفاده از آب جهت حصول حداکثر محصول با کیفیت بالا یکی از ضروریات است. بنابراین تعیین تبخیر-تعرق مرجع (چمن) و گیاهان زراعی به‌ویژه گندم در هر منطقه برای استفاده از روش‌های تعیین تبخیر-تعرق بسیار پر اهمیت است. فرایند تبخیر و تعرق، یکی از مولفه‌های اصلی چرخه آب در طبیعت است که نقشی اساسی در تحقیقات کشاورزی، هیدرولوژی، هواشناسی، بهره برداری مخازن، طراحی سامانه های آبیاری و زهکشی و برنامه ریزی آبیاری و مدیریت منابع آب ایفا می‌کند (Gundekar et al., 2008).

تحقیقات مربوط به تعیین نیاز آبی گیاهان بیش از یک قرن است که شروع شده و کماکان ادامه دارد و در حال حاضر روش‌های متعددی اعم از روش‌های مستقیم لایسیمتری و روش‌های غیرمستقیم حاصل از معادلات تجربی و نیمه تجربی برای تعیین تبخیر-تعرق گیاه مرجع انجام می‌گیرد که هر کدام از آنها دارای معایب و محاسنی می‌باشند (Allen et al., 1998).

روش‌های مستقیم اگرچه نیاز به ابزار خاص خود داشته و هزینه بر هستند لیکن از روش‌های غیر مستقیم که بر اساس اطلاعات هواشناسی به دست می‌آیند دقیق‌تر می‌باشند (Taftteh and Sepaskhah., 2012). در میان روش‌های مستقیم، دقیق‌ترین روش اندازه‌گیری تبخیر-تعرق گیاهان، استفاده از لایسیمتر است. لایسیمتر یا جعبه‌ی کشت، وسیله‌ای است که قسمتی از خاک مزرعه را از خاک اطراف جدا نموده و در آن گیاه مورد مطالعه کشت می‌شود. بنابراین لایسیمتر در حکم مخزنی از خاک با حجم و وزن ثابت است و میزان آب ورودی (آب آبیاری و باران) و آب خروجی از لایسیمتر (آب زهکشی) و همچنین ظرفیت نگهداری رطوبت خاک داخل آن کاملاً مشخص می‌باشد. بدین ترتیب در معادله ی بیلان آب خاک، پارامترهای بارندگی P ، آبیاری I ، و زهکشی D ، و تغییرات رطوبت خاک، مشخص بوده و فقط تبخیر و تعرق ET ، مجهول است که می‌توان آن را از طریق محاسبه، به کمک معادله‌ی بیلان بدست آورد. بنابراین این روش به عنوان مرجع اصلی اندازه‌گیری شناخته شده و روش‌های دیگر را با این روش می‌توان کالیبره کرد. از روش‌های غیرمستقیم می‌توان به روش تشت تبخیر، روش‌های دمایی، تشعشعی، آئرودینامیکی و ترکیبی اشاره کرد که دقت این روش‌ها را می‌توان با استفاده از روش اول سنجید. نیشابوری و همکاران (۱۳۸۴) در ارزیابی روش‌های پیشنهادی FAO برای برآورد میزان تبخیر-تعرق از گیاه مرجع در منطقه کرکج تبریز بیان کردند که میزان تبخیر-تعرق پتانسیل حاصل از لایسیمتر زهکش‌دار برابر با ۵۹۸/۵ میلی‌متر و از روش‌های تجربی پنمن-مانتیث، بلینی کریدل اصلاح

مقدار تبخیر- تعرق گندم بین ۶۵۰ تا ۸۰۰ میلی‌متر اعلام شده است (Musick et al., 1994). برای ناحیه‌ای از عربستان سعودی با درجه حرارت بالا و آب با شوری یک میلی‌موس بر سانتی‌متر بین ۷۵۷ تا ۸۸۲ میلی‌متر و اگر چنانچه غلظت املاح آب به ۴ میلی‌موس بر سانتی‌متر برسد بین ۱۰۲۴ تا ۸۳۴ میلی‌متر (Alomran et al., 1992)، برای منطقه فصیل آباد و پیشاور و جام پاکستان با خاک سطحی شنی لومی تا رسی لومی بین ۵۶۲ تا ۱۱۹۵ میلی‌متر (Yasin et al., 1990)، برای ناحیه (ماهراشتر) بین ۵۲۲-۴۹۳ میلی‌متر (Roth et al., 1989) و با استفاده از روش پنمن اصلاح شده برابر با ۶۰۰ میلی‌متر (Ghadekar et al., 1994)، برای منطقه‌ای از ایتالیا اگر چنانچه گندم در تناوب چغندر قند باشد برابر با ۴۸۶/۸ میلی‌متر (Rizzo et al., 1990)، در ناحیه‌ای در آریزونا بین ۶۵۰ تا ۷۰۰ میلی‌متر (Erie et al., 1989)، برای ناحیه‌ای از استرالیا برابر با ۸۱۸ میلی‌متر (Cooper, 1980)، در بوش لند تکزاس برابر با ۷۰۰ میلی‌متر (Jensen and Musick, 1960)، برای منطقه آکران آمریکا برابر با ۵۰۳ میلی‌متر (Shawcroft, 1983) و در منطقه کانزاس آمریکا، این میزان برابر با ۶۱۰ میلی‌متر (Musick et al., 1963) بدست آمده است. سبزی پرور و شادمانی (۱۳۹۰) با مقایسه روش‌های مختلف در برآورد ضرایب تشت تبخیر نشان دادند که روش عصبی- فازی (ANFIS) نسبت به روش‌های دیگر نتایج بهتری در برآورد ضریب تشت و تبخیر و تعرق مرجع به‌دست می‌دهد. از بین روش‌های تجربی برآورد ضریب تشت، روش‌های کوینکا و اشناپدر بعد از روش‌های شبکه عصبی در اقلیم‌های گرم و خشک توصیه می‌شود. کابوسی (۱۳۹۰) در تحقیقی نشان داد که استفاده از داده‌های روزانه تشت تبخیر جهت برآورد ETo به دلیل خطای زیاد در ثبت داده‌های تبخیر توصیه نمی‌گردد. در عین حال هر چه دوره زمانی محاسبات بزرگتر باشد، خطای مثبت و منفی یکدیگر را پوشش داده و در نتیجه K(p) منطقی‌تر شده و می‌توان اظهار داشت که برآورد ETo به روش تشت دقیق‌تر خواهد بود. نتایج نشان

شده، تشعشع، پنمن اصلاح شده و تشت تبخیر به ترتیب ۶۰۵/۲، ۶۱۹/۸، ۶۳۷/۵، ۷۲۳/۳ و ۴۵۱/۲ میلی‌متر بوده و روش پنمن-مانتیت را با حداقل خطا بهترین روش قابل توصیه عنوان کردند. رحیمی (۱۳۷۸) با استفاده از لایسیمتر زهکش‌دار میزان تبخیر- تعرق پتانسیل گیاه مرجع را در همدان برابر با ۱۰۵۸ میلی‌متر گزارش کرد و در منطقه همدان از بین ۱۴ روش مورد مطالعه روش بلینی-کریدل را بهترین روش اعلام کرد. رستمی (۱۳۷۷) با استفاده از یک لایسیمتر زهکش‌دار، میزان تبخیر- تعرق پتانسیل گیاه مرجع (چمن) در اراک را برابر با ۱۳۰۳/۵ و آب زهکش شده را برابر با ۳۰۱/۴ و تبخیر از تشت کلاس A را برابر با ۱۷۸۲/۸ میلی‌متر تعیین کرد و مقدار تبخیر- تعرق از روش‌های تشعشع، پنمن-مانتیت، تشت تبخیر و بلینی-کریدل را به ترتیب ۱۲۳۷/۳، ۱۰۸۹/۵، ۱۲۵۰/۱ و ۱۰۶۶/۷ میلی‌متر گزارش نمود و روش تشعشع را مناسب‌ترین روش اعلام کرد. Amatya et al. 1995 روش‌های پنمن-مانتیت، مکینک، پرسیتلی، تورک، هارگریوز-سامانی و تورنت ویت را برای محاسبه تبخیر- تعرق پتانسیل در سه منطقه شرق کارولینای شمالی بکار بردند. سپس روش پنمن-مانتیت را با نتایج حاصل از تبخیر- تعرق گیاه مرجع چمن به عنوان استاندارد مقایسه قرار دادند و مشاهده کردند که همبستگی خوبی بین روش‌های فوق و روش پنمن-مانتیت وجود دارد. Allen et al. 1998 مقدار تبخیر- تعرق گیاه مرجع از معادله‌های پنمن، پنمن-کیمبرلی، پنمن اصلاح شده و پنمن-مانتیت را با نتایج لایسیمتری مورد مقایسه قرار دادند و نتیجه گرفتند که روش پنمن-مانتیت بیشترین همخوانی با نتایج اندازه‌گیری از لایسیمتر دارد. تبخیر و تعرق گندم زمستانه با فصل بلند بین ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ میلی‌متر در سطح ایران و دنیا اندازه‌گیری شده است. این مقدار برای منطقه کرکج تبریز برابر با ۶۹۴/۱ میلی‌متر (ابراهیمی پاک، ۱۳۷۲) و برای ناحیه‌ای از هندوستان با خاک متوسط بین ۶۴۱-۵۸۶ میلی‌متر (Mishra et al., 1995) گزارش شده است. در منطقه بوشلند تکزاس

بر متر و $7/5$ در لایه $50-100$ سانتی‌متری بوده است. یونهای غالب عصاره اشباع خاک تا عمق یک متر نیز به طور متوسط پتاسیم، و کلسیم در درجه نخست و پس از آن به ترتیب نیترات، منیزیم، سدیم و فسفر بوده است. محل نصب لایسیمتر برای چمن بر حسب درجه یکنواختی زمین و موقعیت مکانی مزرعه صورت گرفته و تعداد 5 لایسیمتر به فاصله 50 متری از یکدیگر نصب گردید. هر کدام از لایسیمترها در وسط قطعه زمینی به ابعاد 50×50 متر (2500 متر مربع) نصب گردید بطوری که پوشش گیاهی در جهت شمال به جنوب و غرب به شرق حدود 50 متر بود. لایسیمتر نصب شده دارای ابعاد 1×2 و به عمق $1/5$ متر، مساحتی برابر با 2 متر مربع را می‌پوشاند. برای گندم نیز سه لایسیمتر به ابعاد $2/4 \times 1/2$ متر مربع و عمق $1/5$ متر از سطح زمین اجرا شد. هر لایسیمتر به منظور تاثیر یکنواختی میکرو کلیما و حرکت افقی گرما در مرکز قطعه زمینی به ابعاد 40×40 متر واقع شد و مساحتی در حدود $2/8$ متر مربع را پوشانید. به منظور اندازه‌گیری آب زهکش لایسیمتر، چاهک مشاهده‌ای در کنار لایسیمتر حفر گردید. عملیات زراعی، آبیاری، تراکم بوته داخل و خارج از لایسیمتر به طور یکسان و با تراکم 450 بوته در متر مربع صورت پذیرفت.

می‌دهد که استفاده از معادله های تجربی جهت برآورد $K(p)$ و نهایتاً محاسبه ETo، منجر به بیش برآورد این پارامتر نسبت به روش استاندارد FPM می‌گردد. در عین حال روش sinder نزدیکی بیشتری با $K(p)$ حاصل از داده‌های تشت نشان داد.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود با توجه به عوامل اقلیمی، خاک و ویژگی‌های گیاهی مقادیر تبخیر- تفرق بسیار متغیر بوده و در مطالعات انجام شده روش‌های متفاوت بهتر عمل کرده‌اند. لذا روش‌های مختلف برای هر منطقه با توجه به شرایط اقلیمی به صورت جداگانه باید مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد. هدف از پژوهش حاضر واسنجی و ارزشیابی روش‌های مختلف تبخیر- تفرق مرجع (چمن) و گیاه گندم با استفاده از اطلاعات لایسیمتری در دشت قزوین می‌باشد.

مواد و روش‌ها

مشخصات منطقه و لایسیمترها

منطقه مورد مطالعه واقع در ایستگاه تحقیقاتی اسماعیل‌آباد قزوین با مختصات جغرافیایی 50 درجه و 15 دقیقه طول شرقی و 36 درجه و 8 دقیقه عرض شمالی با ارتفاع 1278 متر از سطح دریا بود. گیاه چمن به مدت چهار سال زراعی 1389 لغایت 1393 و گیاه گندم در سه سال زراعی 1390 الی 1393 در لایسیمتر کشت شدند. مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک منطقه مورد آزمایش به ترتیب در جدول‌های 1 و 2 نشان داده شده است. بررسی مندرجات جدول‌های فوق بیانگر آن است که بافت لایه‌های مختلف خاک نسبتاً سنگین تا سنگین بوده و رطوبت خاک در حد ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی به ترتیب از حداقل $0/20$ و $0/11$ تا حداکثر $0/24$ و $0/13$ متغیر بوده و جرم ویژه ظاهری خاک نیز از حداقل $1/42$ تا حداکثر $1/60$ گرم بر سانتی‌متر مکعب متغیر بود. همچنین، میزان هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک و اسیدیته خاک به ترتیب $0/86$ دسی‌زیمنس بر متر و $7/3$ در لایه $50-0$ سانتی‌متری و $1/1$ دسی‌زیمنس

جدول (۱): برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک محل اجرا

عمق	رس	سیلت	شن	چگالی ظاهری	رطوبت در ظرفیت	رطوبت در نقطه
Cm	%	%	%	g/cm ³	مزرعه	پژمردگی
۰-۲۵	۵۱	۳۴	۱۵	۱/۴۴	۰/۲۱	۰/۱۱
۲۵-۵۰	۳۵	۵۰	۱۵	۱/۴۲	۰/۲۰	۰/۱۱
۵۰-۷۵	۴۷	۳۸	۱۵	۱/۴۷	۰/۲۳	۰/۱۲
۷۵-۱۰۰	۳۹	۵۴	۷	۱/۵۳	۰/۲۳	۰/۱۲
۱۰۰-۱۲۵	۳۷	۵۴	۹	۱/۵۵	۰/۲۳	۰/۱۳
۱۲۵-۱۵۰	۳۹	۴۲	۱۹	۱/۶	۰/۲۴	۰/۱۳

جدول (۲): برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک محل اجرا

عمق	pH	EC	NO ₃	K	P	Ca	Na	Mg
cm	-	dS/m	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l
۰-۵۰	۷/۳	۰/۸۶	۰/۷	۵/۷	۰/۲۵	۱/۸	۰/۲۷	۰/۴۸
۵۰-۱۰۰	۷/۵	۱/۱	۱/۲	۶/۱	۰/۳۲	۱/۲	۰/۳۱	۰/۵۲

جدول (۳): متوسط سه ساله داده های تبخیر- تعرق در منطقه مورد مطالعه

	دماي حداکثر	دماي حداقل	رطوبت هوا	سرعت باد	ساعات آفتابی
	C	C	%	m/s	h
فروردین	۱۸	۴	۴۹	۲۰	۶/۴۸
اردیبهشت	۲۶/۵	۹/۹	۵۲/۵	۲۰	۶/۹۶
خرداد	۳۱/۷	۱۳/۷	۴۲/۵	۱۵	۸/۸
تیر	۳۶/۳	۱۷/۹	۴۰	۲۰	۸/۸۸
مرداد	۳۵/۳	۱۷/۶	۴۴/۵	۷	۹/۲
شهریور	۳۴	۱۵/۸	۴۶	۱۰	۸/۳۶
مهر	۲۲/۸	۹/۲	۵۳/۵	۱۰	۸/۲
آبان	۱۶/۲	۴	۵۵	۱۰	۷/۱۲
آذر	۸/۹	۰/۶	۶۳/۵	۷	۵/۷۴۴
دی	۱۰/۵	-۱/۵	۵۸	۷	۵/۳۸۴
بهمن	۶/۱	-۳/۷	۶۲	۱۵	۵/۷۸۴
اسفند	۱۵/۵	۱	۵۳/۵	۱۰	۶/۳۲

روش‌های محاسبه تبخیر تعرق

که در آن، ET_0 تبخیر- تعرق پتانسیل گیاه مرجع (چمن)،

E_p تبخیر از تشت تبخیر کلاس A و K_p ضریب تشت تبخیر است.

با استفاده از روش‌های مختلف برآورد تبخیر- تعرق و

داده‌های هواشناسی موجود در هر سال که متوسط آن در

جدول ۳ نشان داده شده است تبخیر- تعرق ماهانه تخمین

زده شد. بر اساس جدول ۳، گرم‌ترین و خنک‌ترین ماه‌های

سال به ترتیب تیر ماه با دمای حداکثر ۳۶/۳ و بهمن ماه با

با استفاده از داده‌های لایسیمتری مقادیر تبخیر- تعرق

پتانسیل گیاه چمن و گندم با استفاده از معادله بیلان آب

بدست آمد:

$$ET = I + P - D \pm (\sum (\theta_1 - \theta_2) \Delta S) \quad (1)$$

که در آن، ET میزان تبخیر- تعرق (mm)، I مقدار آب

آبیاری (mm)، P میزان بارندگی (mm)، D مقادیر نفوذ

عمقی (mm)، θ_1 رطوبت خاک پیش از آبیاری (mm) و θ_2

دمای حداقل ۳/۷- درجه سانتیگراد می‌باشد. رطوبت هوا و سرعت باد نیز به ترتیب از حداقل ۴۰٪ و ۷ متر بر ثانیه تا حداکثر ۶۳/۵٪ و ۲۰ متر بر ثانیه متغیر می‌باشد. روش‌های تخمین تبخیر- تعرق پتانسیل بکار برده شده به شرح زیر می‌باشند:

اگر R_s برحسب میلی‌متر آب تبخیر شده بیان گردد، عدد ۵۸/۵ به ۱ تبدیل می‌گردد، Δ شیب منحنی فشار بخار (kpa/mbar) و γ ثابت سایکرومتری (kpa یا mbar) می‌باشد. فرمول مک‌کینک چندان به محک تجربه در نیامده است.

روش پریستلی تیلور (۱۹۷۲)

پریستلی تیلور (۱۹۷۲) معادله ساده شده‌ای از روش ترکیبی را برای مناطقی که انتقال بخار از طریق باد اندک و ناچیز است، ارائه دادند. این روش بر مبنای تشعشعات خورشیدی و درجه حرارت استوار است.

$$ET_0 = 1.26 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n - G}{\gamma} \quad (5)$$

که در آن، R_n تشعشع خالص خورشیدی ($MJm^{-2}d^{-1}$)، Δ شیب منحنی فشار بخار ($KPa.C^{-1}$)، γ ضریب رطوبتی ($KPa.C^{-1}$) و G شار گرما به داخل خاک ($MJm^{-2}d^{-1}$) است.

روش هارگریوز و سامانی (۱۹۸۵)

این روش برای محاسبه تبخیر و تعرق در دوره‌های یک تا چند روز، هفتگی، ۱۰ روزه و یا ماهانه به کار برده می‌شود. لیکن بهترین نتیجه را برای دوره‌های هفتگی و ۱۰ روز داده است. چنانچه اگر میانگین دمای روزانه در دوره مورد نظر، T_m (بر حسب سانتی‌گراد) و میانگین دامنه تغییرات دمای روزانه (اختلاف حداکثر و حداقل دما) در دوره مذکور، TR باشد، تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع (چمن) بر اساس روش پیشنهادی هارگریوز - سامانی از معادله زیر محاسبه می‌شود:

رطوبت خاک پس از آبیاری (mm)، است. سپس داده‌های تبخیر از تشت تبخیر کلاس A نیز تعیین و با استفاده از معادله زیر ضرایب تشت تبخیر برای ماه‌های مختلف بدست آمد:

$$ET_0 = K_p \cdot E_p \quad (2)$$

روش تورک (۱۹۶۱)

تورک در سال ۱۹۶۱ معادله‌ای برای محاسبه و تخمین تبخیر-تعرق روزانه ارائه کرد. این روش نیز مانند روش مک‌کینک بر پایه اندازه‌گیری تشعشع خورشید و درجه حرارت می‌باشد.

$$ET_0 = a_r * 0.013 \frac{T_{mean}}{T_{mean} + 15} \frac{23.8856 * R_s + 50}{\lambda} \quad (3)$$

که در آن، ET_0 تبخیر و تعرق روزانه (میلی‌متر بر روز)، T_{mean} دمای متوسط روزانه ($^{\circ}C$)، ضریب a_r زمانی که میانگین رطوبت نسبی روزانه بیشتر از ۵۰ درصد باشد برابر ۱ و زمانی که کمتر از ۵۰ درصد باشد برابر با $1 + (50 - RH_{mean})/70$ می‌باشد. R_s تشعشع خورشیدی ($Mj.m^{-2}.d^{-1}$) و λ گرمای نهان تبخیر ($Mj.kg^{-1}$) است.

روش مک‌کینک (۱۹۵۷)

معادله مک‌کینک (۱۹۵۷)، بر پایه اندازه‌گیری تشعشع خورشید و درجه حرارت می‌باشد. بر اساس نظر مک‌کینک هرچه درجه حرارت بیشتر باشد، مقادیر بیشتری از انرژی خورشید در تبخیر-تعرق مصرف می‌شود. مک‌کینک فرمول خود را در کشور هلند و با استفاده از ارقام تبخیر-تعرق لایسیمتر برای چمن و در دوره‌های ۱۰ روزه بدست آورد:

$$ET_0 = 0.61 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \times \frac{R_s}{58.5} - 0.12 \quad (4)$$

که در آن، ET_0 تبخیر-تعرق پتانسیل (mm/day)، R_s تشعشع خورشیدی (موج کوتاه) رسیده به زمین

روی معادله Penman (1948) بعمل آوردند که به روش اصلاح شده FAO 24- Penman معروف گردید. فرمول اصلاحی به صورت زیر است:

$$ET_o = C \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_n + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(u) \Delta e \right] \quad (10)$$

که در آن ET_o تبخیر و تعرق گیاه مرجع (چمن) (mm/day) و C ضریب اصلاحی است که خود تابعی از عوامل هواشناسی است (ضریب FAO):

$$C = f \left(RH_{\max}, \frac{U_{day}}{U_{night}}, R_s, U_{2day} \right) \quad (11)$$

که در آن $\frac{U_{day}}{U_{night}}$ نسبت سرعت باد در روز (ساعت) ۷ صبح تا ۷ بعد از ظهر) به سرعت باد در شب، R_s تابش خورشیدی، برحسب معادل تبخیر آب (mm/d)، U_{2day} سرعت باد در روز در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین RH_{\max} ، (m/s) رطوبت نسبی ماکزیمم است.

روش فائو- پنمن- مانیتث (-FAO 56-Penman) (Monteith):

Allen et al. (1998) روش فائو- پنمن- مانیتث را بعنوان یکی از معتبرترین روش‌ها، برای تخمین ET_o مورد استفاده متخصصان قرار دادند. سازمان فائو بر اساس این معادله، نرم‌افزاری به نام CROPWAT را برای محاسبات نیاز آبی منتشر ساخته است. در این روش، گیاه مرجع یک پوشش چمن فرضی است که به طور خلاصه ارتفاع گیاه را ۰/۱۲ متر و مقاومت روزنه‌ای ۷۰ ثانیه بر متر و ضریب بازتاب ۰/۲۳ فرض می‌کند. با این فرض که شاخص سطح برگ آن ۲۴ برابر ارتفاع گیاه باشد، معادله ای به نام فائو - پنمن - مونیتث ارائه گردید که در حال حاضر اساس محاسبات نیاز آبی قرار می‌گیرد. با توجه به این فرضیات معادله فائو - پنمن - مانیتث به صورت زیر می‌باشد:

$$ET_o = 0.0023 R_a (T_m + 17.8) \sqrt{TR} \quad (6)$$

در معادله فوق، R_a تابش برون زمینی، T_m میانگین دمای روزانه $(T_{\max} + T_{\min}/2)$ و TR اختلاف دمای حداقل و حداکثر بر حسب درجه سلسیوس است.

روش بلانی و کریدل (۱۹۵۰) اصلاح شده توسط FAO

با توجه به مشکلات روش بلانی و کریدل (۱۹۵۰)، متخصصین FAO درصدد برآمدند تا نارسائی‌های این روش را مرتفع سازند. (Doorenbos and Pruitt (1977) داده‌های هواشناسی و نیاز آبی گیاهان را در ۱۳ وضعیت آب و هوایی مختلف مورد بررسی قرار دادند و سرانجام به این نتیجه رسیدند که روش بلانی-کریدل می‌تواند نسبت به سایر پارامترهای هواشناسی، مانند رطوبت نسبی هوا، ساعات آفتابی و سرعت باد اصلاح گردد. فرمول پیشنهادی به شرح زیر است:

$$ET_o = a + b[p(0.46T + 8.13)] \quad (7)$$

$$a = 0.0043RH - \frac{n}{N} - 1.41 \quad (8)$$

$$b = f(RH_{\min}, \frac{n}{N}, U_a) \quad (9)$$

که در آنها، ET_o تبخیر و تعرق گیاه مرجع (چمن) (mm/d)، P ضریب مربوط به طول روز یا درصد سالانه تابش آفتاب در ماه که به صورت روزانه توصیف شده است (متوسط ساعات روشنایی هر روز در ماه مورد نظر، تقسیم بر کل ساعات روشنایی سال، ضرب در ۱۰۰)، T متوسط روزانه درجه حرارت ($^{\circ}C$)، a و b ضرایب اقلیمی، RH درصد رطوبت نسبی، n/N نسبت ساعات آفتابی به مدت روشنایی روز و RH_{\min} درصد رطوبت نسبی حداقل هستند.

روش پنمن اصلاح شده توسط FAO (FAO 24 - Penman):

دورن بوث و پروت، بر اساس مقایسه نتایج حاصله از روش اولیه پنمن (۱۹۴۸) و نتایج لایسیمتری، تغییراتی

شده بوده و مقدار آماره NRMSE نسبت اختلاف بین داده‌های برآورد شده و اندازه‌گیری شده به میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. شاخص آماری d نیز دارای مقداری بین صفر و یک بوده که هرچه به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده نزدیکی مقادیر برآورد شده به مقادیر اندازه‌گیری شده و در نتیجه کارایی بهتر مدل می‌باشد (Soler et al., 2007).

واسنجی و ارزشیابی

پس از مقایسه آماری روش‌های تخمین تبخیر-تعرق چمن، هر یک از روش‌ها و روش تشت تبخیر برای تعیین تبخیر-تعرق گیاه گندم در دشت قزوین واسنجی شدند. مقادیر ضریب K_C و K_{CP} ماهانه با استفاده از هر روش با داده‌های دو ساله تعیین و در نهایت جهت ارزشیابی روش‌ها با توجه به ضرایب بدست آمده میزان تبخیر-تعرق گندم در سال سوم تخمین زده شد و روش‌های به‌کار رفته مورد بررسی مجدد آماری قرار داده شدند.

نتایج و بحث

در این پژوهش، متوسط سالانه تبخیر-تعرق چمن با استفاده از داده‌های لایسیمتری ۱۲۹۶ میلی‌متر بدست آمد که با مقادیر گزارش شده توسط رضوی (۱۳۸۰) ۱۳۲۰ میلی‌متر، سلطانی (۱۳۷۸) ۱۱۸۶ میلی‌متر، حاجی‌آذر (۱۳۷۶) ۱۲۱۶ میلی‌متر و مصطفوی (۱۳۷۹) ۱۲۸۵ میلی‌متر مطابقت می‌کند. از سوی دیگر متوسط تبخیر از تشت تبخیر برابر با ۱۷۰۳ میلی‌متر بود که آن هم با نتایج مداحیان و فرزام‌نیا (۱۳۸۳) ۱۷۸۸ میلی‌متر، نوروزی (۱۳۸۵) ۱۷۳۳ میلی‌متر، میلانی عنابی (۱۳۸۵) ۱۸۴۷ میلی‌متر و رستمی (۱۳۷۷) ۱۷۰۳ میلی‌متر مطابقت دارد. میزان تبخیر-تعرق متوسط گندم هم برابر با ۵۵۰ میلی‌متر بدست آمد که با نتایج ابراهیمی‌پاک (۱۳۷۲)، Mishra et al. (1995) ۶۴۱ میلی‌متر، Yasin et al. (1994) ۶۸۰ میلی‌متر،

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \left[\frac{900}{\frac{T_{min} + T_{max}}{2} + 273} \right] U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (12)$$

که در آن، ET_0 تبخیر تعرق گیاه مرجع R_n ، (mm/day) تابش خالص در سطح پوشش گیاهی T ، ($MJm^{-2}d^{-1}$) متوسط دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین U_2 ، ($^{\circ}C$) سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین $(e_s - e_a)$ ، (ms^{-1})، کمبود فشار بخار در ارتفاع ۲ متری ($KPaC^{-1}$)، Δ شیب منحنی فشار بخار γ ضریب رطوبت سنجی و G شار گرما به داخل خاک ($MJm^{-2}d^{-1}$) است.

تحلیل آماری

مقادیر تبخیر-تعرق گیاه چمن با استفاده از روش‌های بیان شده محاسبه و با مقادیر لایسیمتری مقایسه شد به منظور مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده تبخیر-تعرق از آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطا^۱ (RMSE)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده^۲ (NRMSE) و شاخص توافق^۳ (d) استفاده شد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (13)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}}{\bar{O}} \quad (14)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (15)$$

که در آنها، n تعداد داده‌ها، P_i و O_i به ترتیب مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده، \bar{O} میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده، می‌باشد. شاخص آماری RMSE بیانگر میانگین تفاوت بین داده‌های برآورد شده و اندازه‌گیری

^۱ Root Mean Square Error

^۲ Normalized Root Mean Square Error

^۳ D-Index

نموده و داده‌های ماه‌های آذر تا اسفند موجود نیست. در بین سایر ماه‌ها کمترین مقدار متوسط ضریب تشت تبخیر برابر با ۰/۵۸ در خرداد ماه و بیشترین آن برابر با ۰/۸۸ در فروردین ماه بوده که این مقادیر با ضریب ۰/۷۵ که توسط Allen et al. (1989) به عنوان متوسط سالانه ضریب تشت تبخیر بیان شد مطابقت دارد. با استفاده از این ضرایب می‌توان تبخیر- تعرق گیاه مرجع (چمن) را در ماه‌های بدون یخبندان با استفاده از تشت تبخیر تخمین زد.

(1990) ۵۴۱ میلی‌متر، Roth et al. (1989) ۴۸۸ میلی‌متر و Erié et al. (1989) ۶۵۰ میلی‌متر مطابقت دارد. بنابراین نتایج در بازه قابل قبول قرار دارند.

پس از اطمینان از صحت داده‌ها با توجه به داده‌های تشت تبخیر کلاس A و تبخیر- تعرق چمن لایسیمتری ضرایب تشت تبخیر محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۴ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که تشت تبخیر در ماه‌های سرد بدلیل یخ زدگی، تبخیر را اندازه‌گیری

جدول (۴): مقادیر تبخیر- تعرق چمن و تشت تبخیر کلاس A و ضرایب ماهانه تشت تبخیر در دشت قزوین

ET ₀												
سال	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
۱	۷۱/۶	۱۳۳/۲	۱۶۵/۳	۲۱۴/۸	۲۷۲	۱۸۴/۷	۱۶۱/۱	۶۵	۳۱/۱	۳/۱	۲۰/۳	۵/۳
۲	۶۵/۸	۱۴۳/۱	۱۴۷/۹	۲۰۰/۳	۲۵۹/۶	۱۴۹/۵	۱۲۱/۹	۷۲/۳	۱۲/۷	۱۲/۴۴	۹/۵	۱۶/۵
۳	۶۱/۴	۱۴۹/۶	۱۵۶/۴	۲۰۶/۹۵	۲۶۴/۲	۱۶۳/۰۸	۱۳۶/۵	۷۳/۲۵	۴۶/۵۲	۹/۵۷	۲۴/۶	۱۷
E _p												
سال	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
۱	۷۸/۱	۲۰۲/۳	۲۸۱	۳۱۶/۸	۳۵۹/۸	۲۴۰/۸	۱۹۲/۹	۹۱/۲	.	.	.	.
۲	۷۳/۸	۱۷۹/۳	۲۷۵/۱	۳۲۱/۱	۳۴۴/۸	۲۲۳/۵	۱۸۰	۸۸/۱	.	.	.	.
۳	۷۲/۸	۱۸۵/۵	۲۵۰/۵	۲۸۷/۴	۳۱۷/۵	۲۰۹/۲	۱۸۰/۱	۹۰/۹	.	.	.	.
K _p												
سال	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
۱	۰/۹۲	۰/۶۶	۰/۵۹	۰/۶۸	۰/۷۶	۰/۷۷	۰/۸۴	۰/۷۱	-	-	-	-
۲	۰/۸۹	۰/۸۰	۰/۵۴	۰/۶۲	۰/۷۵	۰/۶۷	۰/۶۸	۰/۸۲	-	-	-	-
۳	۰/۸۴	۰/۸۱	۰/۶۲	۰/۷۲	۰/۸۳	۰/۷۸	۰/۷۶	۰/۸۱	-	-	-	-
AVE	۰/۸۸	۰/۷۶	۰/۵۸	۰/۶۷	۰/۷۸	۰/۷۴	۰/۷۶	۰/۷۸	-	-	-	-

مذکور دارای بیشترین خطا است لیکن در کل عملکرد مناسبی داشته و بعد از روش FAO 56 بهترین عملکرد را داشته است. روش Hargreaves Samani در رتبه سوم قرار می‌گیرد که نسبت به سایر روش‌های مورد بررسی بهتر عمل نموده است. بیشترین خطا مربوط به روش مک‌کینک است که نشان می‌دهد این روش به هیچ عنوان برای محاسبه تبخیر- تعرق مناسب نیست. به منظور تصحیح خطا و استفاده از هر یک از روش‌های

جهت مقایسه بین روش‌های مختلف تعیین تبخیر- تعرق چمن این مقادیر با مقادیر اندازه‌گیری شده در سال چهارم مقایسه و نتایج آماری آن در جدول ۵ نشان داده شد. نتایج بیانگر آن است که کمترین خطا متعلق به روش FAO 56 با ۲۴ درصد خطای نرمال بوده و این روش از سایر روش‌ها بهتر عمل می‌کند. روش تشت تبخیر هم بدلیل عدم پاسخگویی در ماه‌های آذر تا اسفند (این ماه‌ها را برابر با صفر در نظر می‌گیرد) که در ماه‌های

نتایج آن در جدول ۶ ارائه گردید.

مذکور مقادیر ماهانه ضریب تبخیر- تعرق گندم برای هر روش با استفاده از داده‌های دو ساله گندم واسنجی و

جدول (۵): مقادیر آماره‌های مورد بررسی در روش‌های مختلف تخمین تبخیر- تعرق چمن

روش	FAO 56	FAO24	Blaney Criddle	Hargreaves Samani	Priestly Taylor	Makkink	Turc	Pan
RMSE	۵۱	۶۷	۷۱	۶۲	۷۷	۸۱	۶۵	۵۷
NRMSE	۰/۲۴	۰/۳۱	۰/۳۲	۰/۲۹	۰/۳۵	۰/۳۸	۰/۲۹	۰/۲۷
d	۰/۸۵	۰/۷۴	۰/۸۶	۰/۸۶	۰/۷۶	۰/۷۸	۰/۸۳	۰/۹۲

جدول (۶): مقادیر ضریب تبخیر- تعرق گندم Kc بدست آمده از هر روش

روش	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
FAO 56	۰/۷۱	۰/۷۰	۰/۸۴	۰/۳۷	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۳۴	۰/۳۱	۰/۱۹	۰/۱۸	۰/۲۰
FAO24	۰/۵۷	۰/۶۲	۰/۷۸	۰/۳۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۲۹	۰/۲۴	۰/۱۵	۰/۱۴	۰/۱۷
Balaney Criddle	۰/۷۰	۰/۶۲	۰/۶۹	۰/۲۹	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۳۰	۰/۳۶	۰/۲۲	۰/۲۴	۰/۲۱
Hargreaves Samani	۰/۹۵	۰/۶۴	۰/۸۰	۰/۳۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۳۴	۰/۳۴	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۹
Priestly Taylor	۰/۶۷	۰/۷۰	۰/۹۴	۰/۴۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۳۳	۰/۲۶	۰/۱۷	۰/۱۴	۰/۱۹
Makkink	۰/۸۰	۰/۸۴	۱/۰۹	۰/۵۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۳۹	۰/۳۲	۰/۲۱	۰/۱۸	۰/۲۳
Turc	۰/۸۸	۰/۷۳	۰/۵۵	۰/۴۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۳۵	۰/۲۶	۰/۳۰	۰/۶۴	۰/۸۰
Pan	۰/۹۹	۰/۵۹	۰/۶۱	۰/۲۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۵۲	-	-	-	-

کاهش داده است و مقدار خطا را به کمتر از ۱۰ درصد رسانده است. بنابراین این ضرایب برای هر یک از روش‌ها جهت تخمین نیاز آبی گندم در دشت قزوین پیشنهاد

می‌شوند. از طرفی روش تشت تبخیر بدلیل ضعف در تخمین تبخیر در ماه‌های سرد باز هم خطایی حدود ۲۷ درصد داشت که نسبت به سایر روش‌ها زیاد است. اگر ماه‌های سرد را در نظر نگیریم میزان خطا به ۱۰ درصد کاهش می‌یابد که نشان می‌دهد در سایر ماه‌ها خوب جواب داده و برای ماه‌های بدون یخ زدگی که آبیاری نیز در آن ماه‌ها انجام می‌پذیرد ضرایب بدست آمده قابل استفاده است.

جهت افزایش دقت تشت تبخیر سعی بر آن شد که بین تبخیر از تشت و تبخیر- تعرق گیاه رابطه معنی داری ارائه شود تا با استفاده از تشت تبخیر که روش ساده‌ای است و نیاز به امکانات کمتری دارد، بتوان تبخیر- تعرق را محاسبه نمود. رابطه بین تبخیر تعرق گندم و تبخیر از تشت با استفاده از رابطه (۱۶) بدست آمد:

این نتایج با ضرایب تبخیر و تعرق پیشنهادی FAO 56 که در ابتدای رشد ضریب ۰/۴ تا ۰/۷، در مرحله رشد ۱/۱۵ و در مرحله نهایی مقادیر ۰/۲۵ الی ۰/۴ را پیشنهاد می‌کند مطابقت دارد. از طرف دیگر با آنچه که Howell et al. (1995) به عنوان ضریب تبخیر - تعرق گندم (Kc) در مرحله رشد بین ۰/۸ تا ۱ گزارش کردند نیز منطبق است. این نتایج نشان می‌دهد که با تغییر نوع روش ضرایب تبخیر و تعرق متفاوتی حاصل می‌گردد که این اختلاف بدلیل متغیر بودن تخمین تبخیر - تعرق چمن توسط هر روش است. بنابراین با استفاده از ضرایب تبخیر تعرق به دست آمده و روش‌های ذکر شده می‌توان تخمین مناسبی از برآورد تبخیر- تعرق گندم داشت. برای اثبات این ادعا به بررسی این روش‌ها با استفاده از ضرایب به دست آمده شد و ارزشیابی با استفاده از داده‌های سال سوم گندم انجام شد. نتایج حاصله در جدول ۷ آورده شده است. نتایج نشان داد که ضرایب تبخیر تعرق ارائه شده، میزان خطا را در تمامی روش‌ها

ماه‌های آذر تا اسفند برابر با ۲۰/۱۴ میلیمتر فرض شد. راه حل دیگر این بود که رابطه میزان تبخیر- تعرق پتانسیل و تبخیر از تشت را مورد بررسی قرار داده و عرض از مبدا آن را به عنوان میزان تبخیر از آذر تا اسفند در نظر گرفت تا ضرایب تشت در این ماه‌ها هم بدست آید که رابطه آن به صورت زیر بدست آمد:

$$ET_0 = 0.661 Ep + 12.02 \quad (۱۷)$$

$$R^2 = 0.949, SE = 19.30, p < 0.01$$

بنابراین در جدول ۴ مقدار تبخیر از تشت از آذر ماه تا اسفند ماه برابر با ۱۲/۰۲ جایگزین شد. سپس با استفاده از داده‌های ۲ ساله گندم K_{cp} واسنجی شد و مقدار ضریب ماهانه تشت تبخیر برای برآورد تبخیر- تعرق گندم در جدول ۸ ارایه شد.

سپس برای ارزشیابی این ضرایب از داده‌های سال سوم گندم استفاده شد تا تاثیر این فرضیات بررسی شود. نتایج واسنجی نشان داد که میزان خطا به ۱۰ درصد کاهش یافته است. بنابراین این روش خطای کمتری داشته و به همین دلیل ضرایب جدول ۸ برای تخمین میزان تبخیر- تعرق گیاه گندم با استفاده از داده‌های تشت تبخیر در دشت قزوین پیشنهاد شدند.

$$ET_c = 0.16 Ep^2 + 1.66E^{-05} Ep^3 - 5.60E^{-08} Ep^4 + 20.14 \quad (۱۶)$$

$$R^2 = 0.85, SE = 19.87, p < 0.01$$

جهت ارزشیابی این روش نیز از داده‌های سال سوم گندم استفاده شد که نشان داد این معادله هم دارای خطا ۲۹ درصد است که این مقدار زیاد است و قابل مقایسه با روش واسنجی شده قبل نیست. با افزایش درجه معادله تا ۱۲ هم میزان خطا تغییر چندانی نکرد. بنابراین روش معادله مستقیم کاملاً رد شد. کار دیگری که انجام شد این بود که به جای سه ماهی که اطلاعاتشان موجود نیست از مقدار عرض از مبدا بدست آمده در معادله ۱۶ استفاده گردید و این کار باعث شد که میزان تبخیر از آذر ماه تا اسفند ماه برابر با ۲۰/۱۴ میلی متر فرض شود و برای سایر ماه‌ها با استفاده از ضرایب جدول ۴ محاسبه شود که این کار تکمیلی سبب کاهش خطا به ۱۲ درصد شد و نتیجه قابل قبولی حاصل گردید. بنابراین تبخیر- تعرق گندم با استفاده از روش تشت تبخیر از فروردین ماه تا آبان با ضرایب جدول ۴ امکان پذیر بود و برای

جدول (۷): مقادیر آماره‌های مورد بررسی در روش‌های مختلف تخمین تبخیر- تعرق گندم

روش	FAO 56	FAO24	Blaney Criddle	Hargreaves Samani	Priestly Taylor	Makkink	Turc	Pan
RMSE	۴/۱۸	۴/۱۸	۴/۱۸	۴/۱۹	۴/۴۶	۴/۴۶	۴/۴۶	۱۲/۷۴
NRMSE	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۹۶	۰/۰۹۶	۰/۰۹۶	۰/۲۷۴
d	۰/۸۵	۰/۷۴	۰/۸۶	۰/۸۶	۰/۷۶	۰/۷۸	۰/۸۳	۰/۹۲

جدول (۸): مقادیر ضریب تشت تبخیر ماهانه برای تعیین تبخیر - تعرق گندم K_{cp}

اسفند	بهمن	دی	آذر	آبان	مهر	شهریور	مرداد	تیر	خرداد	اردیبهشت	فروردین
۱/۷۳	۱/۰۱	۱/۲۹	۲/۰۴	۰/۵۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۲۶	۰/۶۱	۰/۵۹	۰/۹۹

نتیجه گیری

با توجه به نتایج به دست آمده از بین روش‌های مختلف تخمین میزان تبخیر- تعرق پتانسیل چمن در دشت قزوین، روش FAO 56 با ۲۴ درصد خطای نرمال از سایر روش‌ها بهتر عمل کرد. جهت اصلاح این خطا در تخمین تبخیر- تعرق گندم این نتایج با نتایج لایسیمیتری واسنجی و سپس ارزشیابی شدند که نتایج نشان داد که ضرایب K_c ماهانه بدست آمده برای گندم بسیار خوب عمل کرده و نتایج تخمین را تا خطای ۱۰ درصد کاهش دادند. بنابراین با توجه به ضرایب پیشنهادی می‌توان نتایج قابل قبولی را بدست آورد. لیکن در مورد تشت

تبخیر بدلیل عدم امکان اندازه‌گیری در ماه‌های سرد سال مشکل ماه‌های آذر تا اسفند وجود داشت که برای حل آن روش عرض از مبدا استفاده شد و با استفاده از رابطه تبخیر- تعرق پتانسیل ET_0 و تبخیر از تشت E_p عرض از مبدا محاسبه و جایگزین تبخیر از تشت در ماه‌های بدون داده شد و این روش باعث بهبود تخمین شد و خطا را به اندازه سایر روش‌ها که با استفاده از ضرایب جدول ۶ اصلاح شده اند، کاهش داد. همچنین در جدول ۸ ضرایب تعیین نیاز آبی گیاه مرجع برای برآورد نیاز آبی سایر گیاهان زراعی نیز ارائه شده است.

منابع

- ابراهیمی پاک، ن.ع. ۱۳۷۲. برآورد تبخیر و تعرق گیاهان و تعیین نیاز آبی گندم پائیزه با استفاده از لایسیمتر. پایان نامه کارشناسی ارشد گروه آبیاری، دانشگاه تبریز.
- امیدی، ف. و م. همایی. ۱۳۹۴. اشتقاق توابع تولید محصول برای برآورد آب مجازی و قیمت آب آبیاری گندم. تحقیقات غلات، سال پنجم، شماره دوم، ص ۱۴۳-۱۳۱.
- حاجی آذر، م. ۱۳۷۶. گزارش نهایی طرح تعیین تبخیر- تعرق پتانسیل چمن با روش لایسیمتری. مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی ایران، شماره ۷۶/۹۱، مؤسسه تحقیقات خاک و آب.
- رحیمی، م.ب. ۱۳۷۸. تعیین تبخیر- تعرق پتانسیل گیاه مرجع (چمن) و مقایسه آن با فرمول‌های تجربی و تعیین مناسب‌ترین فرمول برای منطقه همدان. مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی ایران، شماره ۷۸/۶۷۰، مؤسسه تحقیقات خاک و آب.
- رستمی، ا. ۱۳۷۷. گزارش نهایی تعیین تبخیر- تعرق پتانسیل گیاه مرجع با استفاده از لایسیمتر و مقایسه آن با فرمول‌های تجربی. مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی ایران، شماره ۶۵۳، مؤسسه تحقیقات خاک و آب.
- رضوی، ر. ۱۳۸۰. گزارش نهایی تعیین تبخیر- تعرق پتانسیل گیاه مرجع (چمن) با استفاده از لایسیمتر در ارومیه. مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی ایران، شماره ۸۰/۴۰۹، مؤسسه تحقیقات خاک و آب.
- سبزی پرور، ع. ا.، شادمانی، م. ۱۳۹۰. تحلیل روند تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از آزمون من-کندال و اسپیرمن در مناطق خشک ایران. مجله آب و خاک. دوره ۲۵ شماره ۴: ۸۳۴-۸۲۳.

سلطانی، ک. ۱۳۷۸. تعیین میزان تبخیر- تعرق پتانسیل گیاه مرجع (چمن) با استفاده از لایسیمتر. مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی ایران، شماره ۷۸/۴۱۰، مؤسسه تحقیقات خاک و آب.

کابوسی، ک. ۱۳۹۰، برآورد ضریب تشت تبخیر با استفاده از داده‌های تشت و مقایسه آن با روابط تجربی، اولین کنفرانس ملی هواشناسی و مدیریت آب کشاورزی، تهران، دانشگاه تهران، گروه مهندسی آبیاری.

مداحیان، ح. و م. فرزام‌نیا. ۱۳۸۳. گزارش نهایی تبخیر- تعرق پتانسیل گیاه مرجع چمن در یزد. شماره ۸۳/۷۱۴، مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی، مؤسسه تحقیقات خاک و آب.

مصطفوی، م.ح. ۱۳۷۹. گزارش نهایی تعیین تبخیر- تعرق پتانسیل (ETO) با استفاده از لایسیمتر چمن. مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی ایران، شماره ۷۹/۶۷۸، مؤسسه تحقیقات خاک و آب.

میلانی عنابی، ا. ۱۳۸۵. ارزیابی روش‌های مستقیم و غیرمستقیم برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع (چمن) در تبریز. مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی ایران، شماره ۸۵/۱۱۳۵، مؤسسه تحقیقات خاک و آب.

نوروزی، م. ۱۳۸۵. گزارش نهایی تعیین تبخیر- تعرق پتانسیل گیاه مرجع (چمن) و گوجه‌فرنگی با استفاده از مطالعات لایسیمتری در استان بوشهر. مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی ایران، شماره ۸۵/۱۳۲۲، مؤسسه تحقیقات خاک و آب.

نیشابوری، م.، ا. مرادی دالینی، ع. ا. جعفرزاده و س. صادقی. ۱۳۸۴. ارزیابی روش‌های پیشنهادی FAO برای برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع در منطقه کرکج تبریز. مجله علمی-پژوهشی دانش کشاورزی (دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز)، سال ۱۵، شماره ۴، ص ۶۳-۷۲.

Yasin, M., S. Ahmad and Z. Hussain. 1990. Seasonal crop Evapotranspiration - Moisture stress function for Major climatic zones in Pakistan. Soil physics: applications under stress environments. Pakistan Agriculture Research Council, Islamabad. 276-285.

Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes and M. Smith. 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper No 56. Food and Agriculture Organization, Land and Water. Rome, Italy.

Alomran, A. M., and A.A. Shalaby. 1992. Calculation of water requirements for some crops in the eastern and central regions of kingdom of Saudi Arabia. Journal of King Saud university Agricultural sciences, 4(1): 95-114.

Amatya, D.M., R. W. Skaggs and J. D. Gregory. 1995. Comparison of methods for estimating REF-ET. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 121 (6): 427-432.

Blaney, H.F., and W.D. Criddle. 1950. Determining water requirements in irrigated area from climatologically irrigation data. US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Tech. Paper No. 96.

Cooper, J.L. 1980. The effect of nitrogen fertilizer and irrigation frequency on a semi -dwarf wheat in southeast Australia. 1. Growth and yield. Australian journal of experimental agriculture and animal husbandry. 20: 359-364.

Doorenbos, J., and W.O. Pruitt. 1977 Guidelines for predicting crop water requirements. FAO, Rome, Irrigation and Drainage. Engineering. Paper No. 24, p 144.

Erie, L.J., O.F. French, D.A. Bucks and K, Harris. 1989. Consumptive use of water by Major crops in the Southwestern United States. United States Department of Agriculture. Report Number 29.

FAO 56. 1990. Richard, G. Allen, Luis S. Pererira, D. Reas and M. Smith. FAO Irrigation and Drainage paper, NO. 56.

Ghadekar, S. R., R.B. Miskin, P.D. korde and S.B. Suroshe. 1994. Water requirement of crops in kharif , rabi and summer in sub- humid region of chandrapur . Journal of soils and crop, 4(1): 41-43.

Gundekar, H.G., U.M. Khodke, S. Sarkar, and R.K. Rai. 2008. Evaluation of pan coefficient for reference crop evapotranspiration for semi-arid region. Irrig. Sci. 26:169-175.

Hargreaves, G.H. and Z.A. Samani. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering Agriculture*, 1(2): 96-99.

Howell, T.A., J.L. steiner, A. D. Schneider and S. R. Evelt. 1995. Evapotranspiration of Irrigated Winter Wheat-Southern high plains. *Transactions of the ASAE [Trans ASAE]*, 38(3): 745-759.

Jensen, M. E. and J. T. Musick. 1960. The effects of irrigation treatment on evapotranspiration and production of sorghum and wheat in the southern Great Plains. *Trans. 7th International Congress of Soil Sciences. Madison, Wis. I: 386-393.*

Makkink, G.F. 1957. Testing the Penman formula by means of lysimeters. *Journal of the Institute of Water Engineers*, 11(3): 277-288.

Mishra, H.S., T.R. Rathore and V.S. Tomar. 1995. Water use efficiency of irrigate wheat in the Tavai Region of India. *Irrigation science*, 16(2): 75-80.

Musick, J.T., O.R. Jones, B. A. Stewart and D.A. Dusek. 1994. Water – yield relationships for Irrigated and dry land wheat in the U. S. southern plains. *Agronomy journal*, 86(6): 980-986.

Musick, J.T., O.W. Grime and G. M. Herron. 1963. Water management, consumptive use and nitrogen fertilization of Irrigated winter wheat in Western Kansas: U. S Department Agricultural, Prod- RES, Rep 75.

Penman, H.L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. *Mathematical and Physical Sciences*, 193(1032): 120-145.

Priestley, C.H. B., and R.J. Taylor. 1972. On the assessment of the surface heat flux and evaporation using large scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100: 81-92.

Rizzo, V., M. maiorana, A. castrignano, M. Stelluti, D. Ventre Ila and G. corlone. 1990. First evaluations of water balance in crops in rotation. *Annali dell' Istituto Sperimentale Agronomico* 21(Supplemento 2): 95-106.

Roth, D., R. Gunther, G. Breitschuv. 1989. Investigation on water consumption of winter wheat, spring barley and sugar beet and potatoes under field conditions on a deep calcic chernozem. *Bodenkultur*, 40(4): 305-319.

Shawcroft, R. W. 1983. Limited irrigation may drop yield, up profit, Colorado Rancher-farmer, 37(4): 35-38.

Soler, C.M.T., P.C., Sentelhas and G. Hoogenboom. 2007. Application of the CSM-CERES-Maize model for planting date evaluation and yield forecasting for maize grown off-season in a subtropical environment. *European Journal Agronomy*, 27: 165-177.

Tafteh, A., and A. R. Sepaskhah. 2012. Application of HYDRUS-1D model for simulating water and nitrate leaching from continuous and alternate furrow irrigated rapeseed and maize fields. *Agricultural water management*, 113: 19-29.

Turk, L. 1961. Estimation of irrigation water requirement, potential evapotranspiration: a simple climatic formula evolved up to date. *Annals of Agronomy*, 12: 13-49.

Determination of monthly evapotranspiration coefficients of winter wheat by different methods of estimating evapotranspiration and evaporation pan in Qazvin plain

Niaz Ali Ebrahimipak^۱, Arash Tafteh^۲, Aslan Egdernezhad^۳, Safoora Asadi Kapourchal^۴

Abstract

Determination of water requirement in irrigation and drainage projects and water management is important and plant coefficients are one of the key parameters in determining the water requirement. Therefore, in this study, Four-year lysimeter data of grass and three-year lysimeter data of winter wheat and weather data were in Esmail Abad in the Qazvin Agricultural Research Center applied to calibrate different methods of estimating evapotranspiration. So with use of these results winter wheat water requirement in each month was Available. Results indicated that annual evapotranspiration of grass, annual evaporation from pan evaporation and winter wheat evapotranspiration respectively were equal to 1296 mm, 1703 mm and 550 mm during growth period. FAO 56 method was the best method compare to methods of Turc, Makkink, Priestly_Taylor, Hargreaves and Samani, FAO Blaney and Criddle and FAO 24. Also results showed that calibration of methods can provide acceptable result in estimates of evapotranspiration of winter wheat. On the other hand, pan evaporation method which is the easiest and most practical method, with use of coefficients and some modifications could estimate evapotranspiration of winter wheat with acceptable accuracy. The value of Plant evapotranspiration coefficient (K_c) was determined equal to 0.29-1.09 and value of evaporationpan coefficient (K_p) was determined equal to 0.58-0.88 and value of evaporationpan coefficient (K_{cp}) was determined equal to 0.26 -0.99.

Keyword: Calibration, Evapotranspiration, Evaporation pan coefficient, lysimeter, wheat

^۱ Assoc. Prof. Irrigation Department, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Tehran, Iran. 09121817169. nebrahimipak@yahoo.com (Corresponding author)

^۲ Assist. Prof. Irrigation Department, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Tehran, Iran. 09125652601. Arash_tafteh@yahoo.com

^۳ Assist. Prof, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran. 09163111269. a_eigder@ymail.com

^۴ Assistant Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, University Of Guilan, Rasht, Iran. 09126873367. safooraasadi@guilan.ac.ir