برآورد تبخیر- تعرق مرجع در شرایط کمبود داده (مطالعه موردی: استان خراسان شمالی)

احسان توکلی*، بیژن قهرمان، کامران داوری و حسین انصاری[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۷/۲۶ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۱/۱۶)

چکیده

ارزیابی کمی تبخیر- تعرق در سطح منطقه‌ای، به منظور مدیریت منابع آب، تولید محصول و ارزیابی‌های زیست محیطی در مناطق فاریاب، ضروری است. در این مطالعه، برای تخمین ET_0 در استان خراسان شمالی با اقلیم خشک و نیمه‌خشک، به‌دلیل کمبود تعداد ایستگاه‌های سینوپتیک و نیز داده‌های ثبت شده هواشناسی، از ۷ ایستگاه در استان‌های مجاور استفاده شد. تبخیر- تعرق گیاه مرجع با استفاده از ۶ روش با نیاز به داده‌های کم شامل: تشت تبخیر کلاس A، هارگریوز- سامانی، پریستلی- تیلور، تورک، مکینک و روش پیشنهادی نشریه فائو ۵۶ برای محاسبه تبخیر- تعرق در شرایط کمبود داده، به همراه روش استاندارد فائو- پنمن- مانتیث برای ارزیابی روش‌های بیان شده (به‌دلیل عدم وجود داده‌های لایسیمتری) محاسبه شد. به‌دلیل عدم توافق در مورد روش مناسب محاسبه ET_0 در ایستگاه‌های مورد بررسی، با استفاده از آزمون معنی‌داری خطوط رگرسیونی و در هر ماه از سال، یک معادله رگرسیونی خطی برای تبدیل بهترین روش محاسبه تبخیر- تعرق به روش استاندارد به‌دست آمد. ارزیابی این معادلات نشان‌دهنده دقت قابل قبول آنها در مقایسه با مطالعات انجام شده به‌ویژه در ماه‌های سرد سال (مقادیر MAE بین ۰/۳ تا ۱/۴ میلی‌متر در روز) است.

واژه‌های کلیدی: اقلیم خشک و نیمه‌خشک، رگرسیون، فائو- پنمن- مانتیث، هارگریوز- سامانی

۱. گروه آبیاری و زه‌کشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: ehsan.diamond@gmail.com

مقدمه

یکی از مهم‌ترین روش‌های بهبود مدیریت مصرف آب در مزرعه، برنامه‌ریزی آبیاری است. برنامه‌ریزی آبیاری شامل فرآیندهای پیش‌بینی زمان و مقدار آبیاری است و نقش مهمی در برنامه‌ریزی های آینده در کشاورزی، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه ایفا می‌کند؛ و می‌تواند به روش‌های مختلف انجام شود. یکی از متداول‌ترین روش‌ها، استفاده از نیاز آبی برآورد شده گیاه براساس محاسبه تبخیر- تعرق گیاه مرجع است. ارزیابی کمی تبخیر- تعرق در سطح منطقه‌ای، به منظور مدیریت منابع آب، تولید محصول و ارزیابی‌های زیست محیطی در مناطق فاریاب، ضروری است. افزایش رقابت بر سر استفاده از آب در میان مصرف کنندگان این ماده حیاتی، ضرورت تخمین دقیق‌تر نیاز آبی و تبخیر- تعرق را بیشتر نشان می‌دهد.

در پنج دهه اخیر، عمده مطالعات پژوهشگران روی توسعه روش‌های برآورد تبخیر- تعرق و بهبود بخشیدن به عملکرد روش‌های موجود متمرکز شده است. با این وجود، هنوز معتبرترین روش تعیین تبخیر- تعرق گیاه مرجع، استفاده از لایسیمتر است؛ به‌طوری‌که دقت سایر روش‌ها با آن سنجیده می‌شود. محققان زیادی این مقایسه را انجام داده‌اند (۴، ۶، ۸، ۱۲، ۱۹و۲۳). جمع‌بندی نتایج این پژوهشگران حاکی از آنست که فائو- پنمن- مانتیث بهترین روش محاسبه تبخیر- تعرق می‌باشد. اهمیت و مقبولیت این روش تا اندازه‌ای است که در شرایط عدم دسترسی به داده‌های لایسیمتری، در مطالعات انجام شده در اقلیم‌های گوناگون، دقت سایر روش‌ها را نسبت به آن می‌سنجند. سازمان غذا و کشاورزی سازمان ملل متحد (FAO) نیز پس از تحلیل روش‌های مختلف، معادله فائو- پنمن- مانتیث را به‌عنوان روش استاندارد تعیین تبخیر- تعرق گیاه مرجع پیشنهاد نموده است. پژوهشگران دیگری نیز این معادله را در مطالعات خود در بازه‌های زمانی روزانه (۱، ۳ و۲۰)، ماهانه (۱۳، ۱۴و۱۶) و فصلی و سالانه (۹) مبنای مقایسه سایر روش‌ها قرار داده‌اند. از بررسی روش‌های مقایسه شده- که نیاز به داده‌های کمتری داشته و در شرایط کمبود داده قابلیت کاربرد دارند- با معادله استاندارد، می‌توان عملکرد مطلوب روش هارگریوز- سامانی را به‌ویژه در اقلیم خشک و نیمه خشک (مثلاً ۱۴) نتیجه گرفت. در طول ماه‌های بارانی و مرطوب نیز معادلات بلانی- کریدل اصلاح شده فائو و تورنت- وایت مناسب تشخیص داده شده‌اند (به‌عنوان مثال ۹ و ۲۲). معادلات مکینک، تورک، روش پیشنهادی نشریه فائو ۵۶ (۷) برای تخمین تبخیر- تعرق در شرایط کمبود داده و شبکه‌های عصبی مصنوعی نیز در برخی مطالعات (مانند ۲۰) نتایج مطلوبی ارائه داده‌اند. با این وجود، نظر به تجربی بودن این معادلات و استخراج آنها بدون در نظر گرفتن قوانین فیزیکی حاکم بر تبخیر- تعرق، عملکرد مناسب یک روش در اقلیمی خاص را تنها از طریق تحلیل آماری مجموعه داده‌ها در آن اقلیم می‌توان توضیح داد.

به‌طورکلی، داده‌های مورد نیاز برای تخمین تبخیر- تعرق مرجع شامل دمای هوا، سرعت باد، تشعشع خورشیدی و رطوبت نسبی هستند. به منظور تعیین مقدار دقیق ET_0، نیاز به داده‌های هواشناسی مناسب می‌باشد که در ایستگاه‌های سینوپتیک تهیه و گزارش می‌شوند. در استان خراسان شمالی تنها ۴ ایستگاه سینوپتیک بجنورد، اسفراین، جاجرم و مهمانک (مانه) وجود دارد که با توجه به پهناور بودن این استان (۲۸۴۳۴ کیلومترمربع مساحت)، برای رسیدن به یک نتیجه‌گیری مناسب کافی نیست. افزون بر این، تعداد سال‌های آماری ایستگاه‌های موجود نیز بسیار کم است، به‌عنوان مثال ایستگاه‌های اسفراین و جاجرم هر یک تنها ۴ سال آمار دارند و آمار ثبت شده به‌ویژه در ایستگاه بجنورد با وجود سال‌های آماری زیاد (۳۳ سال)، کامل نیست. بنابراین هدف از این مطالعه، بررسی روش‌های مختلف محاسبه تبخیر- تعرق مرجع در استان خراسان شمالی و انتخاب بهترین روش برآورد تبخیر- تعرق مرجع که نیاز به کمترین داده ورودی داشته باشد و بهترین تطابق و کمترین انحراف را نیز نسبت به روش استاندارد فائو- پنمن- مانتیث (در شرایط عدم دسترسی به داده‌های لایسیمتری در استان) نشان دهد، است.

شکل ۱. منطقه مورد مطالعه و پراکندگی ایستگاه‌های مورد استفاده در استان‌های خراسان رضوی و سمنان

مواد و روش‌ها

الف) منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، استان خراسان شمالی واقع در شمال شرقی ایران است (شکل ۱). به‌دلیل کمبود تعداد ایستگاه‌های سینوپتیک در استان خراسان شمالی (تنها ۴ ایستگاه) و نیز تعداد سال‌های آماری اندک ۳ ایستگاه از ۴ ایستگاه موجود (ایستگاه‌های اسفراین، جاجرم و مهمانک (مانه) هر یک بین ۴ تا ۵ سال داده ثبت شده دارند)، از ایستگاه‌های سینوپتیک استان‌های مجاور تا فاصله ۱۱۰ کیلومتری از مرزهای استان خراسان شمالی به منظور افزایش دقت در تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع استفاده گردید (به‌دلیل عدم دسترسی به داده‌های روزانه ایستگاه سینوپتیک گنبدکاووس در استان گلستان، این ایستگاه در محاسبات استفاده نشد). طول دوره آماری مقادیر میانگین پارامترهای هواشناسی مورد استفاده برای محاسبه ET_0 در ایستگاه‌های سینوپتیک مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است.

ب) روش‌های محاسبه تبخیر- تعرق مرجع

برای محاسبه تبخیر- تعرق مرجع از روش‌های فائو- پنمن- مانتیث (PM)، تشت تبخیر کلاس A (Pan)، هارگریوز- سامانی (HG) و روش پیشنهادی نشریه فائو ۵۶ (۷) برای محاسبه تبخیر- تعرق مرجع در شرایط کمبود داده (EPM) براساس معادلات ارائه شده به‌وسیله آلن و همکاران (۷) و پریستلی- تیلور (PT)، مکینک (Mk) و تورک (Turc) براساس معادلات ارائه شده توسط برمن و پاچاپ (۱۰) استفاده شد. محاسبات در مقیاس روزانه انجام شد و تحلیل‌های پایانی در بازه ماهانه صورت گرفت. برای محاسبه ضریب تشت از فرمول ارائه شده در نشریه فائو ۵۶ با پوشش سبز پیرامون (برای ایستگاه‌های استان‌های پیرامونی) و با پوشش خشک پیرامون (برای ایستگاه‌های استان خراسان شمالی) استفاده شد. داده‌های مورد استفاده برای محاسبه این ضریب عبارت‌اند از : میانگین رطوبت نسبی (برحسب درصد) و طولی که باد از روی پوشش سبز یا خشک طی می‌کند تا به تشت برسد (FET) (برحسب متر)، که بنا بر توصیه نشریه فائو ۵۶ (۷) بین ۱ تا ۱۰۰۰ متر متغیر می‌باشد. مقدار FET مطابق بازدید انجام شده، برای ایستگاه بجنورد و جاجرم ۱۰۰۰ متر و برای ایستگاه اسفراین ۳۰۰ متر انتخاب شده است. برای سایر ایستگاه‌های مورد بررسی، برابر اطلاعات دریافتی از مسئولان محلی، این مقدار برابر ۵۰ متر فرض شد. داده‌های مورد نیاز روش‌های منتخب برای محاسبه تبخیر- تعرق در جدول ۲ ارائه شده است.

پ) معیار و چگونگی گزینش بهترین معادله در هر ماه

ملاک گزینش، بیشترین ضریب همبستگی بین معادله PM

جدول ۱. طول دوره آماری و مقادیر میانگین روزانه پارامترهای هواشناسی مورد استفاده در ایستگاه‌های سینوپتیک مورد استفاده

ردیف	نام ایستگاه	ارتفاع (متر)	سال‌های دارای آمار	Tmax	Tmin	RHmax	RHmin	Sunshine	U_2	E
۱	بجنورد	۱۰۹۱	۱۳۷۵–۱۳۸۹	۱۹/۹	٦/۹	۷۵/۸	۳۸/۷	۸/۲	۲	۷/٦
۲	اسفراین	۱۲٦۰	۱۳۸۵–۱۳۸۹	۲۰/۹	۸/۰	٦۹/۵	۳۲/۲	۹/۰	۱/۹	۹/۵
۳	جاجرم	۹۴۴	۱۳۸۵–۱۳۸۹	۲۰/۹	۸/۸	۷۱/۵	۳۳/۹	۸/۴	۱/۹	۹/۹
۴	مهمانک	۸۹۰	۱۳۸۴–۱۳۸۹	۲۱/۵	۹/۰	۸۲/۳	۳۸/۳	۸/۳	۱/۹	–[×]
۵	قوچان	۱۲۸۷	۱۳۷۷–۱۳۸۹	۱۹/۵	٦/۴	٦۷/۷	۳۴/۹	۸/۲	۱/۴	٦/۳
٦	گلمکان	۱۱۷٦	۱۳۷۷–۱۳۸۹	۲۰/۳	٦/۷	۷٦/٦	۳۱/۱	۸/۳	۲/۴	۷/۴
۷	نیشابور	۱۲۱۳	۱۳۷۷–۱۳۸۹	۲۲/۰	٦/۸	۷۰	۲۸/۴	۸/۸	۱/۴	۸/۷
۸	سبزوار	۹۷۷/٦	۱۳۷۷–۱۳۸۹	۲۴/۷	۱۱/۸	۵۸/۹	۲۵/٦	۸/۸	۲/۳	۹/۴
۹	درگز	۳۹۰	۱۳۷۷–۱۳۸۹	۲۲/۵	۱۰/۱	٦۲/۹	۳٦/۷	۱۰/۱	۲/۱	۷/٦
۱۰	بیارجمند	۱۱۰٦/۲	۱۳۷۸–۱۳۸۹	۲۳/۰	۹/۹	٦۴/۵	۲۵/۵	۹/۱	۱/۹	۱۰/۷
۱۱	شاهرود	۱۳۴۵/۳	۱۳۷۸–۱۳۸۹	۲۱/۳	۱۰/۲	٦۴/۰	۲۸/۲	۸/۴	۱/۵	۷/۴
	CV	–	–	۰/۰۷	۰/۲۱	۰/۱۰	۰/۱۵	۰/۰۷	۰/۱۸	۰/۱٦

ردیف ۱ تا ۴ استان خراسان شمالی، ردیف ۵ تا ۹ استان خراسان رضوی، ردیف ۱۰ و ۱۱ استان سمنان. E میزان تبخیر اندازه‌گیری شده از تشت تبخیر (ایستگاه مهمانک فاقد آمار) (میلی‌متر در روز)، RHmin رطوبت نسبی حداقل (درصد)، RHmax رطوبت نسبی حداکثر (درصد)، U_2 سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (متر در ثانیه)، Sunshine ساعات آفتابی (ساعت)، Tmin دمای حداقل (درجه سلسیوس)، Tmax دمای حداکثر (درجه سلسیوس).

جدول ۲. داده‌های مورد نیاز روش‌های مورد استفاده برای محاسبه تبخیر- تعرق مرجع در مقیاس روزانه

نام روش برآورد تبخیر- تعرق مرجع	داده‌های مورد نیاز
هارگریوز- سامانی (HG)	Tmax, Tmin
روش پیشنهادی نشریه فائو ٥٦ در شرایط کمبود داده (EPM)	Tmax, Tmin
فائو- پنمن- مانتیث (PM)	Tmax, Tmin, Sunshine, U_2, RHmax, RHmin
تشت تبخیر (Pan)	E, RHmean, U_2, Fetch
پریستلی- تیلور (PT)	Tmax, Tmin, Sunshine
مکینک (Mk)	Tmean, U_2, RHmean
تورک (Turc)	Tmax, Tmin, Sunshine

E میزان تبخیر اندازه‌گیری شده از تشت تبخیر، RHmin رطوبت نسبی حداقل، RHmax رطوبت نسبی حداکثر، RHmean رطوبت نسبی متوسط، U_2 سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین، Sunshine ساعات آفتابی، Tmean دمای متوسط، Tmin دمای حداقل، Tmax دمای حداکثر و Fetch طولی که باد از روی پوشش سبز یا خشک طی می‌کند تا به تشت برسد.

(به‌عنوان متغیر مستقل) و هریک از دیگر معادلات بیان شده در جدول ۲ (به‌عنوان متغیر وابسته) بود. بر این اساس، با یک رابطه خطی به‌صورت $y = ax + b$ می‌توان متغیر وابسته را به PM تبدیل کرد. بهترین معادله محاسبه تبخیر- تعرق مرجع، در ایستگاه‌های مختلف و نیز در ماه‌های مختلف سال، احتمالاً با هم متفاوت است؛ از سوی دیگر، ضرایب a و b نیز در ایستگاه‌ها و ماه‌های مختلف با یکدیگر تفاوت دارند. بنابراین، در تحلیلی، خطوط رگرسیون در هر ماه با یکدیگر مقایسه شدند و مناسب‌ترین معادله منطقه‌ای در هر ماه از سال به‌دست آمد. به منظور انجام این تحلیل، مقادیر تبخیر- تعرق مرجع محاسبه شده به روش‌های مختلف، در ایستگاه‌های مورد بررسی و در طول دوره آماری مورد نظر، وارد برنامه‌ای که در نرم‌افزار MATLAB R2010a برای آزمون موسوم به "آزمون معنی‌داری خطوط رگرسیونی" نوشته شد، گردید. در این آزمون (که شرح کامل آن در منبع شماره ۱۷ ارائه شده است) در سطوح آماری مختلف، میزان معنی‌دار بودن شیب (a) و عرض از مبدا (b) خطوط رگرسیونی سنجیده شده و برای هر ماه از سال یک معادله رگرسیونی خطی به‌صورت $y = ax + b$ ، پیشنهاد می‌شود.

به منظور ارزیابی دقت معادلات پیشنهاد شده در هر ماه از آماره میانگین قدرمطلق خطا (MAE) استفاده شد. این آماره با توجه به معادله ۱ محاسبه می‌شود:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left| ETO_{PMi} - ETO_{PMei} \right|}{n} \qquad [1]$$

که در آن: ET_{oPMi} تبخیر- تعرق گیاه مرجع به روش فائو- پنمن- مانتیث (میلی‌متر در روز)، ET_{oPMei} تبخیر- تعرق گیاه مرجع به روش پیشنهادی در مطالعه حاضر (میلی‌متر در روز) و n تعداد روزهای مورد بررسی است.

نتایج و بحث

الف) مقایسه مقادیر محاسبه شده ET_o به‌وسیله سایر روش‌ها با روش استاندارد فائو- پنمن- مانتیث

معادله فائو- پنمن- مانتیث (PM) امکان محاسبه تبخیر- تعرق گیاه مرجع حتی در صورت عدم وجود داده‌های ساعت آفتابی و سرعت باد را داراست، هرچند، مقادیر به‌دست آمده دقت کمتری خواهند داشت. بنابراین، حتی در روزهای فاقد آمار سرعت باد و ساعت آفتابی، که در ایستگاه‌های مورد استفاده به وفور یافت می‌شود، نیز مقادیر ET_o به روش استاندارد محاسبه شد. مقادیر میانگین ماهانه و سالانه ET_o با این روش، برای تمامی ایستگاه‌های مورد بررسی، محاسبه و با نتایج سایر روش‌ها مقایسه گردید. از آنجا که هدف این مطالعه برآورد دقیق معادله استاندارد با معادلات موجود، با استفاده از داده‌های کمتر و براساس ضریب تعیین (R^2) مناسب، صرف نظر از بیش یا کم‌برآوردهاست، روشی که با بیشترین R^2 توان تخمین روش استاندارد را داشته باشد روش مطلوب خواهد بود. در ماه‌های مختلف و برای ایستگاه‌های ۱۱گانه مورد بررسی، روش یکسانی که قادر به تخمین PM به شکل مطلوب و با همبستگی بالا باشد، مشاهده نمی‌شود. این غیریکسان بودن که می‌تواند ناشی از تفاوت در فراهم بودن داده‌های مورد نیاز روش‌های مختلف و شرایط متفاوت آب و هوایی در ماه‌های گوناگون باشد، انتخاب روش مطلوب محاسبه تبخیر- تعرق مرجع نسبت به روش استاندارد را با مشکل مواجه می‌نماید؛ بنابراین استفاده از آزمون‌هایی چون آزمون معنی‌داری خطوط رگرسیونی ناگزیر است. بنابراین با استفاده از این آزمون، اقدام به انتخاب معادله منتخب در هر ماه از سال گردید.

ب) معادلات پایانی منتخب در هر ماه

برای هر ماه از سال شمسی و براساس تمامی مقادیر تبخیر- تعرق مرجع محاسبه شده در ایستگاه‌های مختلف، یک معادله رگرسیونی به منظور تبدیل روش منتخب تخمین ET_o به روش استاندارد به‌دست آمد. معادلات به‌دست آمده در ماه‌های مختلف با توجه به ایستگاه‌های متفاوتی حاصل شده‌اند (جدول ۳). به منظور زیر پوشش قرار دادن تمامی ایستگاه‌های سینوپتیک استان خراسان شمالی، در ماه‌های فروردین و مهر، ۲ معادله انتخاب شد. بنابراین، تمامی معادلات ارائه شده در

جدول ۳. معادلات پیشنهادی برای تعیین تبخیر- تعرق گیاه مرجع در هر ماه از سال

ماه	معادله پیشنهادی	شماره معادله	ایستگاه‌های مورد استفاده
فروردین (معادله ۱)	PM = 1.21*(EPM) + 0.003	۲	۱،۲،۴،۵،۶،۸،۹
فروردین (معادله ۲)	PM = 1.35*(EPM) + 0.005	۳	۳،۱۰،۱۱
اردیبهشت	PM = 1.185*(HG) - 0.826	۴	۱،۲،۳،۴،۶،۷،۱۰،۱۱
خرداد	PM = 1.139*(HG) - 0.324	۵	۱،۲،۳،۴،۸،۹،۱۰،۱۱
تیر	PM = 1.204*(HG) - 0.273	۶	۱،۲،۳،۴،۹،۱۰،۱۱
مرداد	PM = 1.031*(HG) + 0.775	۷	۱،۲،۳،۴،۶،۷،۸،۹،۱۰،۱۱
شهریور	PM = 1.057*(HG) + 0.411	۸	۱،۲،۳،۴،۶،۸،۹،۱۰،۱۱
مهر (معادله ۱)	PM = 1.49*(EPM) + 0.004	۹	۲،۳،۴،۶،۸
مهر (معادله ۲)	PM = 1.09*(EPM) + 0.008	۱۰	۱،۵،۷
آبان	PM = 1.07*(HG) + 0.022	۱۱	۱،۲،۳،۴،۵،۶،۷،۸،۹
آذر	PM = 0.96*(HG) + 0.01	۱۲	۱،۲،۳،۴،۵،۶،۷،۸،۹
دی	PM = 1.04*(HG) + 0.009	۱۳	۱،۲،۳،۴،۵،۶،۷،۸
بهمن	PM = 1.32*(EPM) + 0.001	۱۴	۱،۲،۳،۴،۵،۶،۸،۹
اسفند	PM = 0.953*(HG) - 0.06	۱۵	۱،۲،۳،۴،۷،۹،۱۰،۱۱

عدد ۱ بیانگر ایستگاه بجنورد، ۲ اسفراین، ۳ جاجرم، ۴ مهمانک، ۵ نیشابور، ٦ سبزوار، ۷ قوچان، ۸ گلمکان، ۹ درگز، ۱۰ شاهرود و ۱۱ بیارجمند می‌باشد.

جدول ۳ به‌جز معادله‌های ۲، ۳، ۹ و ۱۰ در کل پهنه استان خراسان شمالی قابل استفاده هستند، ولی معادله ۲ برای تمام استان به‌جز محدوده شهرستان جاجرم، معادله ۳ تنها برای محدوده شهرستان جاجرم، معادله ۹ برای تمام استان به‌جز محدوده شهرستان بجنورد و فاروج و شیروان و معادله ۱۰ تنها برای محدوده شهرستان‌های بجنورد، فاروج و شیروان پیشنهاد می‌شود. چنانکه از جدول ۳ پیداست در یک سوی معادلات پیشنهادی، روش HG و یا EPM و در سوی دیگر معادله استاندارد فائو- پنمن- مانتیث قرار دارد. اکنون، با استفاده از معادلات رگرسیونی خطی پیشنهاد شده، پس از محاسبه تبخیر- تعرق به یکی از روش‌های HG و یا EPM، مقدار ET_o به روش استاندارد تبدیل می‌شود. به‌جز ماه‌های فروردین، مهر و بهمن که روش منتخب EPM است، در تمامی ماه‌های سال معادله هارگریوز- سامانی به‌عنوان مطلوب‌ترین و مناسب‌ترین فرمول تخمین تبخیر- تعرق معرفی شده است. این نتیجه با نتایج مطالعه لوپز- یورا و همکاران (۱۹) در منطقه نیمه خشک اسپانیا، کوچک‌زاده و نیکبخت (۵) در مناطق نیمه خشک ایران، وانگ و همکاران (۲۲) در کشور مالاوی، باتیستا و همکاران (۹) در اقلیم نیمه خشک مکزیک، دهقانی سانیج و همکاران (۱۲) در اقلیم نیمه خشک کرج، دین پژوه (۱۳)، رحیمی خوب و همکاران (۲) در منطقه گرم و خشک خوزستان و جبلون و سهلی (۱۸) در کشور تونس همخوانی دارد.

بیان این نکته ضروری است که در مطالعات یاد شده، HG و EPM به‌عنوان معادله برتر برای محاسبه تبخیر- تعرق مرجع پیشنهاد شده‌اند ولی در این پژوهش، این معادلات تنها با توجه به میزان همبستگی خوب با روش استاندارد، با معادله‌ای رگرسیونی و خطی به این روش تبدیل شده‌اند. در حقیقت در این مطالعه، معادله‌های HG و EPM معادله استاندارد را برای

جدول ۴. میانگین قدرمطلق خطا (MAE) و ضریب تعیین (R^2) معادلات پیشنهادی برای تعیین تبخیر- تعرق مرجع در ایستگاه‌های استان خراسان شمالی (میلی‌متر در روز)

شماره معادله*		فروردین		اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر		آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
		۲	۳	۴	۵	٦	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
بجنورد	MAE	۰/۹	–	۰/۷	۰/۹	۰/۹	۱/۲	۱/۱	–	۰/۹	۰/۷	۰/۴	۰/۴	۰/۵	۰/۴
	R^2	۰/٦۴	–	۰/۷۸	۰/۸۱	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/٦۷	–	۰/۷۱	۰/۷٦	۰/۳۰	۰/۱۹	۰/۵۵	۰/۸۷
اسفراین	MAE	۰/۹	–	۱/۲	۲/۰	۱/۵	۲/۰	۲/۰	۰/۹	–	۱/۰	۰/۳	۰/۳	۰/۴	۰/۵
	R^2	۰/۱۴	–	۰/۳۲	۰/۳۲	۰/۱۱	۰/۱۴	۰/۱۰	۰/۲۹	–	۰/۲۴	۰/۴۲	۰/۵۰	۰/۴۱	۰/۷۸
جاجرم	MAE	–	۰/۹	۰/۹	۱/۲	۱/۴	۱/۲	۰/۹	۰/۹	–	۰/۷	۰/۳	۰/۳	۰/۴	۰/٦
	R^2	–	۰/۲۲	۰/۴۵	۰/۳۴	۰/۳۵	۰/۳۳	۰/۱۵	۰/۳۰	–	۰/۲۵	۰/٦۱	۰/۴۹	۰/۵۵	۰/۷۸
مهمانک	MAE	۰/۹	–	۱/۴	۲/۳	۲/۳	۲/۵	۱/۹	۱/۴	–	۰/۸	۰/۳	۰/۳	۰/۵	۰/۵
	R^2	۰/۳۴	–	۰/٦۷	۰/۵۲	۰/۵۳	۰/۳۳	۰/۳۱	۰/۳۲	–	۰/۵۷	۰/۳۲	۰/۳٦	۰/۵۸	۰/۷۱
میانگین	MAE	۰/۹	۰/۹	۱/۱	۱/۷	۱/۵	۱/۷	۱/۵	۱/۱	۰/۹	۰/۸	۰/۳	۰/۳	۰/۴	۰/۵

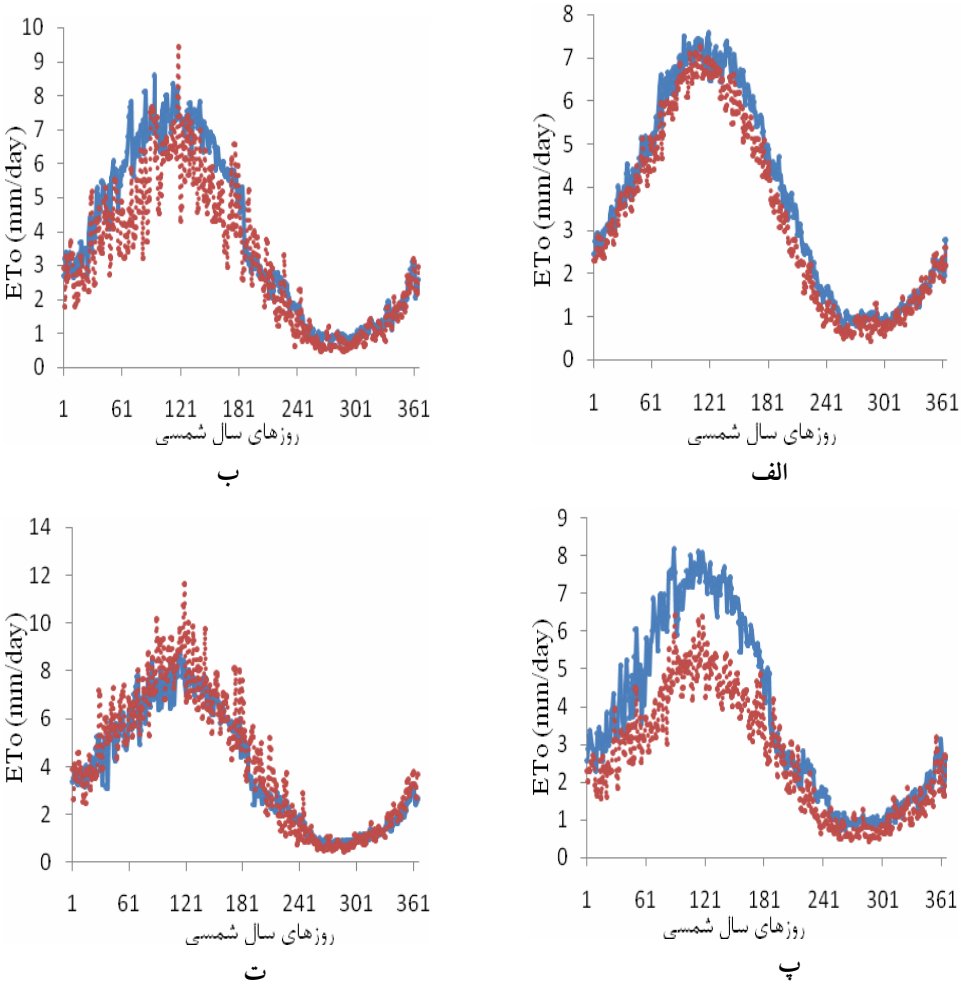
*: شماره معادله براساس شماره معادلات جدول ۳ است.

شرایط کمبود داده در استان خراسان شمالی تصحیح کرده‌اند. البته انتخاب این دو روش از میان ۶ روش مورد بررسی، خود گواه مطلوب بودن آنهاست. روش‌های HG و یا EPM برای محاسبه تبخیر- تعرق مرجع تنها نیاز به دمای حداکثر و حداقل به‌عنوان داده ورودی دارند، بنابراین با استفاده از این معادلات در هر ماه از سال می‌توان فقط با استفاده از داده‌های دمای هوا (Tmax, Tmin) که در تمامی ایستگاه‌های سینوپتیک، کلیماتولوژی و تبخیرسنجی به‌صورت روزانه و حتی ساعتی ثبت می‌شوند، به تعیین تبخیر- تعرق مرجع پرداخت.

پ) ارزیابی معادلات پیشنهادی

برای تعیین میزان دقت فرمول‌های پیشنهادی، آماره میانگین قدرمطلق خطا برای هر معادله و هریک از ایستگاه‌های سینوپتیک استان خراسان شمالی، محاسبه شد (جدول ۴). مطابق جدول ۴ خطای محاسبه تبخیر-تعرق برای معادلات پیشنهادی، در ایستگاه‌های سینوپتیک استان خراسان شمالی شامل بجنورد، اسفراین، جاجرم و مهمانک بین ۰/۳ تا ۲/۵ میلی‌متر در روز متغیر است. در ایستگاه‌های سینوپتیک استان خراسان شمالی بیشترین میزان خطا در ایستگاه بجنورد برای مرداد ماه و کمترین آن برای دی ماه روی می‌دهد. کمترین و بیشترین میزان خطا در ایستگاه اسفراین به‌ترتیب در آذر و خرداد ماه، جاجرم به‌ترتیب در آذر (و دی ماه) و تیر ماه و مهمانک به‌ترتیب آذر و مرداد دیده می‌شود. با توجه به این‌که معادلات پیشنهادی از فرمول-های دمایی HG و EPM استفاده می‌نمایند، تفاوت مشاهده شده بین ماه‌های رخداد کمترین و بیشترین میزان خطا، می‌تواند ناشی از روندهای متفاوت تغییرات دما در ایستگاه‌های استان خراسان شمالی نسبت به سایر ایستگاه‌های استفاده شده باشد. به‌طورکلی کمترین میزان خطا در محاسبه تبخیر- تعرق مرجع، در ایستگاه‌های بجنورد و جاجرم و بیشترین میزان آن در ایستگاه مهمانک مشاهده می‌شود (جدول ۴).

نتایج جدول ۴ برای مقادیر ضریب تعیین بیانگر آنست که ماه‌های خرداد، تیر، مرداد و شهریور به‌طور میانگین بیشترین مقدار خطا را دارند. به‌طورکلی در فصل پاییز و زمستان، میزان همبستگی بین مقادیر تبخیر- تعرق محاسبه شده به روش استاندارد فائو- پنمن- مانتیث و معادلات پیشنهادی در تمام ایستگاه‌ها بیشتر از نیمه اول سال است. این نتیجه با توجه به



شکل ۲. مقایسه مقادیر میانگین تبخیر- تعرق مرجع به‌دست آمده در کل دوره آماری به‌کار رفته با استفاده از روش استاندارد فائو- پنمن- مانتیث (نمودار نقطه چین) و معادلات پیشنهادی (نمودار خط) (الف) برای ایستگاه بجنورد، (ب) برای ایستگاه اسفراین، (پ) برای ایستگاه جاجرم و (ت) برای ایستگاه مهمانک

شکل۲ نیز قابل استنباط است. مقادیر R^2 برای ماه‌هایی که میانگین قدرمطلق خطا در آنها بیشتر است عموماً کمتر به‌دست آمده است. با این وجود، در برخی ماه‌ها هرچند مقدار عددی ضریب تعیین بالاست ولی میزان خطا نیز چندان اندک نمی‌باشد. بنابراین، ارزیابی میزان خطای معادلات پیشنهادی تنها با یک شاخص (MAE یا R^2) امکان‌پذیر نیست و این دو شاخص باید در کنار یکدیگر مورد استفاده قرار گیرند. با لحاظ کردن این مطلب، معادلات پیشنهادی برای ایستگاه بجنورد (به‌جز تیر، مرداد و دی)، برای ایستگاه اسفراین (به‌جز فروردین، خرداد، تیر، مرداد، شهریور و آبان)، برای ایستگاه جاجرم (به‌جز فروردین، خرداد، تیر، مرداد و شهریور) و برای ایستگاه مهمانک (به‌جز مرداد، شهریور و مهر) کاملاً قابل قبول است. توصیه می‌شود از معادلات پیشنهادی در ماه‌های مشخص شده در پرانتز برای هر ایستگاه، با احتیاط استفاده شود.

فولادمند و حقیقت (۱۶) پس از واسنجی معادله HG در ۷ ایستگاه سینوپتیک استان فارس در تمامی ماه‌های سال، مقادیر خطای محاسبات را به شرح جدول ۵ ارائه نمودند. در این جدول، مقایسه‌ای میان مقادیر خطا در مطالعه حاضر و مقاله فولادمند و حقیقت (۱۶) ارائه شده است. مقادیر خطای ارائه شده در مطالعه حاضر، به‌ویژه در ماه‌های سرد سال کمتر از

جدول ۵. مقایسه محدوده مقادیر خطای محاسبات ارائه شده توسط فولادمند و حقیقت پس از واسنجی معادله هارگریوز- سامانی و مقادیر خطا در مطالعه حاضر (میلی‌متر در روز)

ماه میلادی/ ماه شمسی	فولادمند و حقیقت	مطالعه حاضر
ژانویه/دی	۰/۲–۱/۰	۰/۲–۱/۰
فوریه/بهمن	۰/۲–۱/۰	–*
مارس/اسفند	۰/۲–۱/۳	۰/۴–۰/۶
آوریل/فروردین	۰/۲–۱/۵	–*
می/اردیبهشت	۰/۶–۲/۲	۰/۷–۱/۴
ژوئن/خرداد	۰/۸–۲/۷	۱/۰–۲/۳
جولای/تیر	۰/۷–۲/۸	۱/۰–۲/۳
آگوست/مرداد	۰/۷–۲/۷	۱/۲–۲/۵
سپتامبر/شهریور	۰/۵–۲/۱	۱/۰–۲/۰
اکتبر/مهر	۰/۵–۱/۷	–*
نوامبر/آبان	۰/۳–۱/۳	۰/۷–۰/۹
دسامبر/آذر	۰/۲–۱/۰	۰/۳–۰/۴

*: معادله ارائه شده در این ماه‌ها، EPM است نه HG.

آنچه توسط فولادمند و حقیقت (۱۶) بیان شده است، می‌باشد. مقادیر به‌دست آمده برای میانگین قدرمطلق خطا در این مطالعه در ماه‌های آذر، دی و اسفند در ایستگاه‌های بجنورد و اسفراین، در ماه‌های آذر و دی در ایستگاه جاجرم و مهمانک، با نتایج مطالعه چن و همکاران (۱۱) در تایوان همخوانی دارد. این پژوهشگران پس از واسنجی معادله هارگریوز- سامانی در ۴ ایستگاه هواشناسی کشور تایوان، به مقادیر میانگین قدرمطلق خطای بین ۰/۲ تا ۰/۴ میلی‌متر در روز دست یافتند. نتایج مطالعه حاضر هم‌چنین، با نتایج مطالعه سپاسخواه و رزاقی (۲۱)، لوپز- یورا و همکاران (۱۹) و بختیاری و همکاران (۸) به‌ویژه در ماه‌های سرد سال، هماهنگی بسیار زیادی دارد.

برای مقایسه بهتر نتایج محاسبه تبخیر- تعرق با معادلات پیشنهادی و روش استاندارد، این اعداد برای ایستگاه‌های سینوپتیک استان خراسان شمالی برای میانگین ET_o در کل سال‌های آماری موجود در مقابل یکدیگر رسم شده است (شکل ۲).

به‌طورکلی، معادلات ارائه شده همبستگی خوبی با معادله استاندارد دارند و نوسانات کمتری نسبت به آن نشان می‌دهند (در ۳ ایستگاه، نوسانات زیادی مشاهده می‌شود که ناشی از طول دوره آماری کمتر نسبت به ایستگاه بجنورد است) که می‌تواند به‌دلیل تعدد داده‌های ورودی به معادله فائو- پنمن- مانتیث و اثر نوسانات تک تک این داده‌ها بر تبخیر- تعرق محاسبه شده با این روش باشد. با توجه به این‌که روش‌های HG و EPM مبتنی بر دما هستند، نوسانات تبخیر- تعرق به‌ویژه در ماه‌های گرم سال می‌تواند ناشی از نوسانات دمایی باشد. همان‌طورکه در شکل ۲ مشاهده می‌شود این تغییرات در ماه‌های سرد که تغییرات دما کمتر است، کاهش یافته است. نظر به سادگی استفاده از معادلات ارائه شده، به‌دلیل در دسترس بودن داده‌های دمای هوا، و نیز دقت خوب این معادلات، کاربرد آنها در شرایط استان خراسان شمالی توصیه می‌شود.

نتیجه‌گیری

برای تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع در استان خراسان شمالی،

به‌دلیل کمبود تعداد و داده‌های ثبت شده ایستگاه‌های سینوپتیک هواشناسی، از ۷ ایستگاه در استان‌های مجاور استفاده شد. تبخیر- تعرق گیاه مرجع با استفاده از ٦ روش شامل تشت تبخیر کلاس A، هارگریوز- سامانی، پریستلی- تیلور، تورک، مکینک و روش پیشنهادی نشریه فائو ۵۶ (۷) برای محاسبه تبخیر- تعرق در شرایط کمبود داده، به همراه روش استاندارد فائو- پنمن- مانتیث برای ارزیابی روش‌های بیان شده (به‌دلیل عدم وجود داده‌های لایسیمتری) محاسبه شد. به‌دلیل عدم توافق بر سر روش مناسب محاسبه ET_0 در ایستگاه‌های مورد بررسی، با استفاده از آزمون معنی‌داری خطوط رگرسیونی و در هر ماه از سال، یک معادله رگرسیونی خطی برای تبدیل بهترین روش محاسبه تبخیر- تعرق به روش استاندارد به‌دست آمد. ارزیابی این معادلات نشان‌دهنده دقت قابل قبول آنها در مقایسه با مطالعات انجام شده به‌ویژه در ماه‌های سرد سال (مقادیر MAE بین ۰/۳ تا ۱/۴ میلی‌متر در روز) است.

منابع مورد استفاده

۱. احمدزاده قره گویز، ک.، س.م. میرلطیفی و ک. محمدی. ۱۳۸۹. مقایسه سیستم‌های هوش مصنوعی (ANN و ANFIS) در تخمین میزان تبخیر- تعرق گیاه مرجع در مناطق بسیار خشک ایران. نشریه آب و خاک ۲۴(۴): ۶۷۹-۶۸۹.

۲. رحیمی خوب، ع. س.م.ر. بهبهانی و م.ه. نظری فر. ۱۳۸۵. بررسی استفاده از حداقل داده‌های هواشناسی در معادله پنمن- مانتیث مطالعه موردی استان خوزستان. مجله علوم کشاورزی ۱۲(۳): ۵۹۱-۶۰۰.

۳. شریفان، ح.، ب. قهرمان، ا. علیزاده و س.م. میرلطفی. ۱۳۸۴. ارزیابی روش‌های مختلف تشعشعی و رطوبتی جهت برآورد تبخیر- تعرق مرجع و اثرات خشکی هوا بر آن در استان گلستان. مجله علوم آب و خاک ۱۹(۲): ۲۸۰-۲۹۰.

۴. علیزاده، ا.، م. خانجانی، ح. تراز، و م. رهنورد. ۱۳۸۵. بررسی اثرات اصلاح داده‌های دما بر دقت محاسبات تبخیر و تعرق و مقایسهٔ آن با نتایج به‌دست آمده از لایسیمتر وزنی. مجله جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای ۶: ۹۱-۹۹.

۵. کوچک‌زاده، م. و ج. نیکبخت. ۱۳۸۴. مقایسه روش‌های مختلف تبخیر- تعرق مرجع برای اقلیم‌های مختلف ایران با روش استاندارد پنمن- مانتیث- فائو. مجله علوم کشاورزی ۱۰(۳): ۴۳-۵۷.

۶. موسوی بایگی، م.، م. عرفانیان و م. سرمد. ۱۳۸۸. استفاده از حداقل داده‌های هواشناسی برای برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع و ارائه ضرایب اصلاحی (مطالعه موردی: استان خراسان رضوی). مجله آب و خاک(علوم و صنایع کشاورزی) ۲۳(۱): ۹۱-۹۹.

7. 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 Agric. Org. of the United Nations, Rome, Italy.
8. Bakhtiari, B., N. Ghahreman, A.M. Liaghat and G. Hoogenboom. 2011. Evaluation of reference evapotranspiration models for a semiarid environment using lysimeter measurements. J. Agric. Sci. Technol. 13: 223-237.
9. Bautista, F., D. Bautista and C. Delgado-Carranza. 2009. Calibration of the equations of Hargreaves and Thornthwaite to estimate the potential evapotranspiration in semi-arid and subhumid tropical climates for regional applications. Atmósfera 22(4): 331-348.
10. Burman, R. and L.O. Pochop. 1994. Evaporation, Evapotranspiration and Climate Data. Elsevier Pub., Amsterdam, Netherlands.
11. Chen, J.F., H.F. Yeh, C.H. Lee and W.C. Lo. 2005. Optimal comparison of empirical equations for estimating potential evapotranspiration in Taiwan. 31th IAHR Congress, Seoul, Korea, September 11-16.
12. Dehghanisanij, H., T. Yamamoto and V. Rasiah. 2004. Assesment of evapotranspiration estimation models for use in semiarid environments. Agric. Water Manage. 64: 91-106.
13. Dinpashoh, Y. 2006. Study of reference crop evapotranspiration in I.R. of Iran. Agric. Water Manage. 84 : 123-129.
14. Fooladmand, H.R. and A.R. Sepaskhah. 2005. Evaluation and calibration of three evapotranspiration equations in a semiarid region. Iran-Water Resour. Res. 1(2):1–6.

15. Fooladmand, H.R., H. Zandilak and M.R. Ravanan. 2008. Comparison of different types of Hargreaves equation for estimating monthly evapotranspiration in the south of Iran. Arch. Agron. Soil Sci. 54 (3) : 321–330.
16. Fooladmand, H.R. and M. Haghighat. 2007. Spatial and temporal calibration of Hargreaves equation for calculating monthly ETo based on Penman-Monteith method. Irrig. and Drain. 56: 439-449.
17. Holder, R.H. 1985. Multiple Regression In Hydrology. Institute of Hydrol., Wallingford, England.
18. Jabloun, M. and A. Sahli. 2008. Evaluation of FAO-56 methodology for estimating reference evapotranspiration using limited climatic data: Application to Tunisia. Agric. Water Manage. 95: 707–715.
19. Lopez-Urrea, R., F. Martin de Santa Olalla, C. Fabeiro and A. Moratalla. 2006. Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate. Agric. Water Manage. 85: 15-26.
20. Rahimikhoob, A. 2008. Comparative study of Hargreaves's and artificial neural network's methodologies in estimating reference evapotranspiration in a semiarid environment. Irrig. Sci. 26 : 253-259.
21. Sepaskhah, A.R. and F. Razzaghi. 2009. Evaluation of the adjusted Thornthwaite and Hargreaves-Samani methods for estimation of daily evapotranspiration in a semi-arid region of Iran. Arch. Agron. Soil Sci. 55(1): 51-66.
22. Wang, Y.M., W. Namaona, S. Traore and Z.C. Zhang. 2009. Seasonal temperature-based models for reference evapotranspiration estimation under semi-arid condition of Malawi. Afric. J. Agric. Res. 4 (9): 878-886.
23. Yoder, R.E., L.O. Odhiambo and W.C. Wright. 2005. Evaluation of methods for estimating daily reference crop evapotranspiration at a site in the humid southeast United States. Appl. Eng. Agric. 21(2):197-202.

Estimation of Reference Evapotranspiration with Incomplete Data (A Case Study: North Khorasan Province)

E. Tavakoli*, B. Ghahraman, K. Davari and H. Ansari[1]

(Received : Oct. 18-2011 ; Accepted : Feb. 04 -2013)

Abstract

Quantitative evaluation of evapotranspiration on a regional scale is necessary for water resources management, crop production and environmental assessments in irrigated lands. In this study, in order to estimate ET_o and because of few synoptic stations and also little recorded meteorological data in North Khorasan Province, Iran, with arid and semi-arid climate, 7 stations from neighboring provinces were used. Reference evapotranspiration was calculated using 6 different methods which required a small amount of input data, including Class A pan, Hargreaves-Samani, Priestly-Tailor, Turc, Makkink and the method proposed by Allen et al (1998) to estimate ET_o with missing climate data. Besides, the standard FAO-Penman-Monteith was used (because there was no Lysimetric data in the region) to evaluate the applied formulas. Since there was no agreement over the appropriate method to calculate ET_o in the selected stations, by using significance test of regression lines, a linear regression equation was computed for each month, in order to convert the best calculating method to FAO-Penman-Monteith formula. Evaluations of these equations showed their acceptable accuracy, in comparison with the previous researches, specifically for cold months (MAE values ranged from 0.3 to 1.4 mm/day).

Keywords: Arid and Semi-Arid Climate, FAO-Penman-Monteith, Hargreaves-Samani, Regression.

1. Dept. of Irrig. and Drain., College of Agric., Ferdowsi Univ. of Mashhad, Mashhad, Iran.
*: Corresponding Author, Email: ehsan.diamond@gmail.com