

حساسیت تبخیر و تعرق گیاه مرجع به تغییر در پارامترهای هواشناسی (مطالعه موردی: سنندج و سبزوار)

یعقوب دین پژوه^{1*} و علیرضا شریفی²

تاریخ دریافت: 90/06/12 تاریخ پذیرش: 91/06/14

¹ - دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

² - دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: dinpashoh@yahoo.com

چکیده

به منظور تحلیل حساسیت تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET_0) به تغییرات هر یک از پارامترهای هواشناسی در دو ایستگاه هواشناسی سنندج و سبزوار از داده‌های ماهانه هواشناسی در دوره آماری 1961-2005 استفاده شد. ابتدا میزان ET_0 در هر ماه و ایستگاه با استفاده از روش فائو-پنمن-مانتیت برآورد شد. سپس مقدار هر یک از پارامترهای هواشناسی شامل میانگین درجه حرارت هوا، سرعت باد، فشار بخار واقعی هوا و تابش خالص در دامنه ± 20 درصد تغییر داده شدند و میزان تغییر در ET_0 محاسبه گردید. این تغییر هم به صورت انفرادی برای یکایک پارامترها و هم به صورت ترکیبی انجام شد. نتایج نشان داد که در هر دو ایستگاه، هم در مقیاس سالانه و هم در مقیاس ماهانه، بیشترین حساسیت ET_0 مربوط به پارامتر T_{mean} می‌باشد. در حالی که کمترین حساسیت در هر دو ایستگاه، در مقیاس سالانه و ماهانه، نسبت به پارامتر فشار واقعی بخار هوا (e_a) است. در ایستگاه‌های سنندج و سبزوار و در مقیاس سالانه، افزایش 20 درصد در مقدار متوسط T_{mean} به ترتیب موجب افزایش 11/23 و 12/68 درصد در ET_0 شد. در این دو ایستگاه و در مقیاس زمانی مذکور، 20 درصد افزایش در میانگین e_a موجب کاهش ET_0 به اندازه 3/29 (در سنندج) و 3/53 درصد (در سبزوار) گردید. در مقیاس ماهانه نیز همواره سنندج در مقایسه با سبزوار حساسیت کمتری در مقابل تغییرات پارامترهای هواشناسی روی ET_0 نشان داد. در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت که در دو ایستگاه مورد مطالعه میانگین درجه حرارت هوا بیشترین حساسیت را روی ET_0 داشت.

واژه‌های کلیدی: پارامترهای هواشناسی، تبخیر و تعرق مرجع، تحلیل حساسیت، سبزوار، سنندج.

Sensitivity of Reference Crop Evapotranspiration to Changes in Meteorological Parameters (Case study: Sanandaj and Sabzevar)

Y Dinpashoh^{*1} and AR Sharifi²

Received: 3 September 2011 Accepted: 4 September 2012

¹-Assoc. Prof., Dept. of Water Eng., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz. Iran

²-M.Sc. student, Dept. of Water Eng., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz. Iran

*Corresponding Author Email: dinpashoh@yahoo.com

Abstract

In this study sensitivity of reference crop evapotranspiration (ET_o) to the changes in meteorological parameters at two weather stations namely Sanandaj and Sabzevar were analyzed. For this purpose monthly data of meteorological parameters were used in the period 1964-2005. The amount of each meteorological parameter including mean air temperature, wind speed, actual vapor pressure and net radiation was changed in the range of $\pm 20\%$ and the corresponding change in ET_o was calculated. This was accomplished either for the individual or for the combination of the parameters. Results showed that at both stations the maximum sensitivity of ET_o belonged to T_{mean} , at both annual and monthly time scales. However, the less sensitive parameter in both time scales was actual vapor pressure. At the annual time scale, 20% increase in T_{mean} increased ET_o for about 11.23% and 12.68% at Sanandaj and Sabzevar stations, respectively. However, 20% increase in e_a decreased ET_o for about 3.29% and 3.59% respectively at the same stations. At monthly time scale, Sanandaj ET_o was less sensitive to weather parameters variations than that of Sabzevar station. In general, it could be concluded that at both stations the most influential parameter on ET_o was the mean air temperature.

Keywords: Meteorological parameters, Reference evapotranspiration, Sabzevar, Sanandaj, Sensitivity analysis

توزیع زمانی و مکانی بارش در کره‌ی زمین و دیگر پارامترهای مختلف هیدرومتئورولوژیک نظیر درجه حرارت هوا، سمت و سرعت باد، رطوبت نسبی هوا و میزان تابش خورشیدی داشته است. یکی از پارامترهای مهم هواشناسی که محققین از آن برای بررسی تغییر

مقدمه

در حال حاضر تغییر اقلیم موضوع پژوهش بسیاری از دانشمندان مختلف جهان می‌باشد. گرمایش جهانی به علت افزایش غلظت CO_2 و دیگر گازهای حاصل از سوخت‌های فسیلی در آتمسفر تغییرات زیادی بر روی

مختلفی روی آنالیز حساسیت ET_0 به متغیرهای هواشناسی در نقاط مختلف دنیا انجام شده و اغلب آن-ها نیز تنها در یک ایستگاه خاص و یا با تعداد محدود سالهای آماری انجام شده است (بون 1979، ساکستون 1975، رانا و کاترجی 1998 و 2000، گویال 2004، آیرماک و همکاران 2006، استیوز و همکاران 2009، آیدین و قوچه سیواغلو 2010، لیو و همکاران 2010). هووارد و لوید (1979) حساسیت پارامترهای موثر در مدل تبخیر پنمن را در ناحیه لینکلن شایرچاک¹ بررسی کردند. سینگ و زو (1997) حساسیت 20 مدل مختلف تبخیر را به خطای پارامترهای ورودی مدل در ناحیه ایالت واد² کشور سوئیس بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند که مقدار تبخیر به گرادیان فشار بخار حساسیت زیادی دارد و برعکس، به درجه حرارت هوا حساسیت زیادی نشان نمی‌دهد. گویال (2004) حساسیت پارامترهای هواشناسی را روی ET_0 منطقه جاپور³ در ایالت راجستان هند که یک ناحیه خشک و نیمه خشک محسوب می‌شود، در دوره آماری (1960-2002) بررسی نمود. نامبرده تغییرات چهار پارامتر هواشناسی شامل میانگین دمای هوا (T_{mean})، تعداد ساعات آفتابی (n)، سرعت باد (WS) و فشار بخار هوا (e_a) را به اندازه $\pm 20\%$ تغییر داده و حساسیت ET_0 را نسبت به تغییرات مذکور در منطقه راجستان بررسی کرد. وی ET_0 را با روش PMF-56 محاسبه نموده و تحلیل حساسیت پارامترهای مذکور را در دو مقیاس سالانه و فصلی بررسی کرد. گویال حساسیت ET_0 به تغییر توام پارامترهای هواشناسی (به صورت ترکیبی) را نیز بررسی نمود. وی نشان داد که T_{mean} مهمترین پارامتر موثر بر ET_0 منطقه مذکور بوده و سرعت باد کمترین حساسیت را در مورد تغییرات ET_0 منطقه مذکور دارد. در شرایط اقلیم خشک راجستان معلوم شد که بیشترین افزایش ET_0 با افزایش دادن سه پارامتر T_{mean} ، n و

اقلیم هم در مقیاس جهانی و هم در مقیاس منطقه‌ای استفاده می‌کنند، میانگین دراز مدت درجه حرارت هوا (T_{mean}) می‌باشد. هر تغییر در مقدار این پارامتر به تغییرات دیگر پارامترهای هواشناسی بستگی داشته و می‌تواند منجر به تغییر میزان نرمال تبخیر و تعرق مرجع (ET_0) یک ناحیه گردد. مولفه ET_0 پس از بارش یکی از مهمترین پارامترهای سیکل هیدرولوژیک محسوب می‌شود. میزان ET_0 را می‌توان با استفاده از داده های اقلیمی برآورد کرد (آلن و همکاران 1998). ET_0 مقدار تبخیر و تعرق از گیاه فرضی چمن سبز به ارتفاع 12 سانتی‌متر می‌باشد که در حالت رشد فعال است. مقدار ET_0 به متغیرهای هواشناسی منطقه بستگی دارد. تبخیر و تعرق گیاه مرجع اساس محاسبه تبخیر و تعرق واقعی در گیاه (ET_c) بوده و با توجه به نوع گیاه و ضریب گیاهی در مراحل مختلف رشد مقدار ET_c بدست می‌آید (شاتل ورث 1993، رانا و کاترجی 2000، کایت و دروجرز 2000).

تاکنون مدل‌های زیادی برای محاسبه‌ی ET_0 در کتب و مقالات علمی (مانند تورنت وایت 1948، بلانی کریدل 1950، بروترارت 1982، هارگریوز و سامانی 1985، شاتل ورث 1993، آلن و همکاران 1998) ارائه شده است. زو و سینگ (2002) برخی از مدل‌های تجربی را با مدل پنمن مانتیث در سوئیس مقایسه کردند. در بین مدل‌های مختلف، مدل فائو پنمن-مانتیث (PMF-56) که هم بیلان انرژی و هم تئوری آئروپنایمیکی را در مدل در نظر گرفته به عنوان مناسب‌ترین مدل برای تخمین ET_0 شناخته شده و توسط سازمان خوار و بار جهانی (FAO) برای محاسبه‌ی ET_0 در تمام اقلیم مختلف جهان توصیه شده است (آلن و همکاران 1998، زو و همکاران 2006).

تحلیل حساسیت روشی برای درک اهمیت نسبی متغیرهای مختلف اقلیمی در ET_0 هر ناحیه است. شاید بتوان ادعا کرد که بدون آنالیز مذکور استفاده علمی از منابع آب هر منطقه امکان پذیر نباشد. تاکنون مطالعات

¹ Lincolnshire Chalk

² Vaud

³ Jaipur

به ترتیب به تغییرات کوتاه مدت و داراز مدت پارامترهای تابش و دما نشان می‌دهند. طالبی و همکاران (1389)، حساسیت معادله‌ی فائو پنمن-ماتیت را در ایستگاه‌های کویری شامل یزد، طبس و مروست با مدل کراپ وات بررسی نمودند. نتایج آنها نشان داد که تغییرات دو پارامتر بیشنه دما و سرعت باد در یال بیشترین تاثیر را در نوسانات تبخیر و تعرق در هر سه ایستگاه داشته است. ایشان همچنین بیان داشتند که اولویت بندی عوامل موثر در تبخیر و تعرق در فصول مختلف متفاوت‌اند.

با توجه به اطلاعات بدست آمده از بررسی منابع به نظر می‌رسد مطالعه جامعی در زمینه تحلیل حساسیت ET_0 در دو ایستگاه سنندج و سبزوار که دارای اقلیم-های کاملاً متفاوت در ایران است به انجام نرسیده است. بنابراین، هدف از این مطالعه تجزیه و تحلیل حساسیت مقدار ET_0 بدست آمده از PMF-56 نسبت به چهار پارامتر هواشناسی شامل T_{mean} ، e_a ، WS و Rn (تابش خالص رسیده به سطح زمین) در دو ایستگاه سنندج و سبزوار در دو مقیاس زمانی ماهانه و سالانه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه دو ایستگاه هواشناسی سنندج و سبزوار برای تحلیل حساسیت ET_0 در نظر گرفته شدند. جدول 1 مشخصات جغرافیایی و اقلیمی این دو ایستگاه را نشان می‌دهد. از نظر جغرافیایی ایستگاه سنندج در ناحیه‌ی کوهستانی غرب کشور و ایستگاه سبزوار در حاشیه فلات مرکزی ایران واقع شده است. داده‌های هواشناسی شامل حداکثر دمای متوسط ماهانه (T_{max})، حداقل دمای متوسط ماهانه (T_{min})، میانگین رطوبت نسبی ماهانه (RH)، میانگین ماهانه‌ی سرعت باد (WS) و مجموع ساعات آفتابی ماهانه (n) ایستگاه-های مورد مطالعه از سایت رسمی سازمان هواشناسی ایران⁴ در مقیاس ماهانه بدست آمد. برای بررسی

WS از یک طرف و کاهش دادن e_a از طرف دیگر حاصل شد. طوری که اگر هر کدام از پارامترهای مذکور به اندازه 10% در جهت افزایش ET_0 تغییر کند، مقدار ET_0 راجستان حداکثر به میزان 18/84% افزایش می‌یابد. گونگ و همکاران (2006) آنالیز حساسیت مدل PMF-56 را به متغیرهای هواشناسی (T_{mean} ، سرعت باد (WS)، رطوبت نسبی (RH) و تابش‌های با طول موج کوتاه) در حوضه چانگ چین انجام داد. ژانگ و همکاران (2010) مقادیر ET_0 را در 32 ایستگاه شمال غرب چین با مدل PMF-56 محاسبه نموده و حساسیت ET_0 ماهانه را به متغیرهای هواشناسی در چهار ایستگاه مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که در مقیاس سالانه درجه حرارت هوا کمترین حساسیت را به ET_0 منطقه دارد. در ماه‌های سرد سال (ژانویه، فوریه، نوامبر و دسامبر) مقدار ET_0 در ایستگاه‌ها کم بوده و تغییرات مکانی آن نیز کم می‌باشد. در حالی‌که در ماه‌های گرم سال (مه، ژوئن، ژوئیه و اوت) علاوه بر زیاد بودن مقدار ET_0 در ایستگاه‌ها، تغییرات مکانی آن نیز قابل ملاحظه است. همچنین آن‌ها نشان دادند که در ماه‌های سرد سال و در بخش‌های کوهستانی منطقه، حساس‌ترین پارامتر به تغییر ET_0 ، کمبود فشار بخار اشباع ($e_s - e_a$) می‌باشد. در صورتی که در ناحیه‌ی خشک و نیمه خشک در تابستان مقدار انرژی قابل دسترس به عنوان حساس‌ترین پارامتر به تغییرات ET_0 منطقه گزارش شده است. در ایران نیز در زمینه تحلیل حساسیت تبخیر و تعرق به پارامترهای هواشناسی مطالعاتی انجام شده است. به عنوان مثال سبزی‌پرور و همکاران (1387) با استفاده از آمار 35 ساله هواشناسی (1350-1384) حساسیت نسبی 7 مدل مختلف ET_0 را نسبت به پارامترهای هواشناسی در ایستگاه همدان بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد که در شرایط اقلیمی همدان، اغلب مدل‌های برآورد ET_0 بیشترین حساسیت را (تا 10/8 درصد به ازای 10 درصد تغییر در ورودی)

¹ www.irimet.net

جدول 1- مشخصات جغرافیایی و اقلیمی ایستگاه‌های مورد مطالعه برای تحلیل حساسیت.

ایستگاه	دوره‌ی آماری	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع (متر)	میانگین بارش سالانه (mm)	CV بارش سالانه (%)	میانگین درجه حرارت سالانه (°C)	ضریب خشکی دومارتن*
سنندج	1961-2005	35° 20'	47° 00'	1373/4	450	26	13/42	19/2
سبزوار	1961-2005	36° 12'	57° 43'	977/6	189	33	17/67	6/8

* توجه: برای مطالعه‌ی روش ضریب خشکی دومارتن به منبع علیزاده و همکاران (1374) ص 384 مراجعه شود.

پاسکال)، Δ : شیب منحنی فشار بخار اشباع (کیلو پاسکال بر درجه سلسیوس) و γ : ثابت سایکرومتر (کیلو پاسکال بر درجه سلسیوس) می‌باشند.

برای محاسبه پارامترهای مورد نیاز در مدل PMF-56 از روابط ارائه شده در نشریه‌ی FAO56 (آلن و همکاران 1998) استفاده شد. برای اختصار این روابط در اینجا ارائه نشده است. محاسبات ET_0 بر حسب میلی‌متر بر روز برای روز میانی هر یک از ماه‌های میلادی انجام شد و سپس با ضرب رقم حاصله در تعداد روزهای هر ماه، مقدار ET_0 بر حسب میلی‌متر بر ماه بدست آمد. این کار برای هر دو ایستگاه و برای تمام سال‌های مربوط به دوره‌ی آماری تکرار شد.

برای تحلیل حساسیت تبخیر و تعرق به پارامترهای هواشناسی گرچه روش‌های متفاوتی وجود دارد، با این حال در این مطالعه از روش ارائه شده توسط ژانگ و همکاران (2010) استفاده شد. علت این تصمیم سادگی روش می‌باشد. ابتدا مقدار ضریب حساسیت از رابطه زیر بدست آمد (ژانگ و همکاران 2010):

$$SC' = \Delta ET_0 / \Delta V \quad [2]$$

که در آن SC' ضریب حساسیت، ΔV میزان تغییر در یک متغیر هواشناسی مشخص (مانند WS) و ΔET_0 میزان تغییر در ET_0 ناشی از تغییر پارامتر هواشناسی مورد نظر می‌باشد. چون مقیاس پارامترهای هواشناسی یکسان نیست بنابراین، می‌توان استنباط کرد که مقدار SC' حساس به نوع متغیرهای هواشناسی و یا ET_0

کیفیت داده‌ها، سری زمانی هر متغیر به صورت نمودار رسم و در صورتی که داده‌ای بطور قابل ملاحظه‌ای از داده‌های مشاهداتی مجاور انحراف نشان می‌داد، داده مذکور حذف و میانگین نظیر همان ماه به جای آن استفاده می‌شد. برای بررسی همگنی داده‌ها، روش ران تست نیز روی یکایک سری‌ها اعمال گردید. نتایج نشان داد که همه سری‌های مورد مطالعه همگن می‌باشند. داده‌های اندازه‌گیری شده پس از برخی تبدیلات لازم (مانند تبدیل سرعت باد از ارتفاع 10 متر به ارتفاع 2 متر، تبدیل واحد نات به متربرثانیه و تبدیل مجموع ساعات آفتابی ماهانه به روزانه) به عنوان ورودی مدل ET_0 با روش PMF-56 استفاده شد.

چنانچه اشاره شد، در این مطالعه از روش PMF-56 که به عنوان یک روش استاندارد برای محاسبه ET_0 شناخته شده است، برای محاسبه‌ی ET_0 ماهانه دو ایستگاه سنندج و سبزوار استفاده شد. پر کاربردترین فرم مدل PMF-56 برای محاسبه ET_0 به شرح زیر است (آلن و همکاران 1998):

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + g \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + g (1 + 0.34 u_2)} \quad [1]$$

که در آن ET_0 : تبخیر و تعرق گیاه مرجع (میلی‌متر بر روز)، R_n : تابش خالص در سطح گیاه مرجع (مگا ژول بر متر مربع بر روز)، G : جریان گرمای خاک (مگا ژول بر متر مربع بر روز)، T : درجه حرارت (سلسیوس) هوا در ارتفاع دو متری، u_2 : سرعت باد در ارتفاع دو متری (متر بر ثانیه)، $(e_s - e_a)$: کمبود فشار بخار اشباع (کیلو

تغییر در مقدار T_{mean} ، ممکن است باعث تغییر در میزان e_a ، WS و Rn گردد)، لذا در گام بعدی یا سناریوی دوم علاوه بر بررسی اثر پارامترها بر ET_0 به صورت جداگانه، اثر ترکیبی آنها نیز مورد مطالعه قرار گرفت. بنابراین، تحلیل حساسیت هم به صورت جداگانه و هم به صورت ترکیبی از دو یا چند پارامتر (که همزمان مقدار آنها تغییر داده می‌شد) برای هر دو ایستگاه سنندج و سبزوار بررسی گردید.

نتایج و بحث

شکل‌های 1 تا 6 میانگین دراز مدت پارامترهای هواشناسی مورد استفاده در مدل PMF-56 و ET_0 بدست آمده از رابطه‌ی PMF-56 در طول دوره آماری و در مقیاس زمانی ماهانه را به ترتیب در ایستگاه‌های سنندج و سبزوار نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل‌ها می‌توان استنباط کرد، بیشترین و کمترین مقدار ET_0 در هر دو ایستگاه سنندج و سبزوار بترتیب در ماه‌های ژوئیه و ژانویه می‌باشد و همزمان با آن در هر دو ایستگاه بیشترین و کمترین میانگین درجه حرارت هوا تجربه می‌شود. همچنین میانگین درجه حرارت هوای سبزوار در تمام ماه‌ها بیشتر از مقدار نظیر در ایستگاه سنندج می‌باشد. حداکثر ساعات آفتابی در هر دو ایستگاه سنندج و سبزوار در ماه ژوئیه تجربه می‌شود، در صورتی که حداکثر مقدار Rn در هر دو ایستگاه در ماه ژوئن اتفاق می‌افتد. همچنین مجموع ساعات آفتابی ماهانه در ایستگاه سنندج در تمام ماه‌ها به جز ماه‌های ژوئن و ژوئیه بیشتر از مجموع ساعات آفتابی در ایستگاه سبزوار می‌باشد. مقدار میانگین دراز مدت Rn نیز در تمام ماه‌ها (به جز ماه اوت) در ایستگاه سنندج بیشتر از ایستگاه سبزوار می‌باشد. در صورتی که مقدار دراز مدت مولفه ET_0 در ایستگاه سبزوار در تمام سال بیشتر از ET_0 در ایستگاه سنندج است که احتمالاً دلیل آن بیشتر بودن میانگین درجه حرارت هوا و میانگین سرعت باد در سبزوار نسبت به سنندج می‌-

خواهد بود، لذا برای حل این مشکل به جای آن از شاخص بی بعد SC به شرح زیر استفاده گردید:

$$SC = \frac{\Delta ET_0 / ET_0}{\Delta V / V} \quad [3]$$

که در آن SC ضریب بی بعد حساسیت می‌باشد. در این رابطه ET_0 و V به ترتیب مقادیر پایه ET_0 و متغیر هواشناسی مورد نظر برای تحلیل حساسیت قبل از اعمال تغییر می‌باشند. در این مطالعه مقادیر پایه برای V ، میانگین دراز مدت آن پارامتر در دوره آماری در نظر گرفته شد. به عنوان مثال ضریب SC معادل با $0/4$ این مفهوم را دارد که اگر مقدار V به اندازه 10 درصد نسبت به حالت پایه خود افزایش یابد حاصل این تغییر، افزایش ET_0 به اندازه 4 درصد خواهد بود (ژانگ و همکاران 2010).

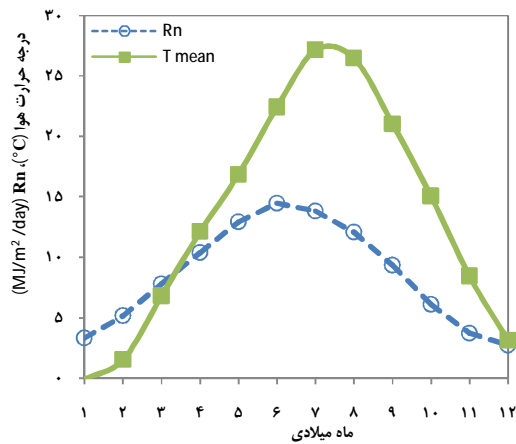
در این مطالعه مقدار متغیر هواشناسی یا V در دامنه $\pm 20\%$ درصد (با گام‌های 5 درصد) تغییر داده شد، مقدار تغییر در ET_0 و در نتیجه ضریب حساسیت SC محاسبه گردید. این کار در گام اول بطور مجزا برای هر پارامتر و در هر ماه و سال انجام شد. برای تحلیل حساسیت یک برنامه در محیط Matlab نوشته شد. در این برنامه ابتدا مقادیر ET_0 با استفاده از رابطه PMF-56 در مقیاس زمانی ماهانه و در تمام سال‌های مربوط به دوره‌ی آماری محاسبه گردید. آن‌گاه سناریوهای مختلفی برای تغییر پارامترهای هواشناسی اجرا شد. مثلاً در سناریوی اول با ثابت نگه داشتن همه پارامترها (در وضعیت نرمال اقلیمی) هر یک از پارامترهای میانگین دمای هوا (T_{mean})، e_a ، WS و تابش خالص ورودی به زمین (Rn) به طور جداگانه در هر ایستگاه از -20% تا $+20\%$ (با گام‌های 5 درصد در هر سناریو) تغییر داده شدند و میزان تغییر ET_0 محاسبه شد. سپس با استفاده از رابطه 3 مقدار ضریب حساسیت SC محاسبه گردید. چون اغلب پارامترهای هواشناسی با هم در ارتباط هستند و بر روی همدیگر اثر می‌گذارند (مثلاً

(با ثابت نگه داشتن دیگر پارامترها در مقدار نرمال) مقدار ET_0 ماه ژانویه تنها به اندازه $3/92$ درصد افزایش پیدا کرده است، در حالی که در سبزواری این رقم $6/39$ درصد می‌باشد. می‌توان نتیجه گرفت که ET_0 در ایستگاه سبزواری بیشتر از سنندج به تغییرات میانگین درجه حرارت هوا حساس است.

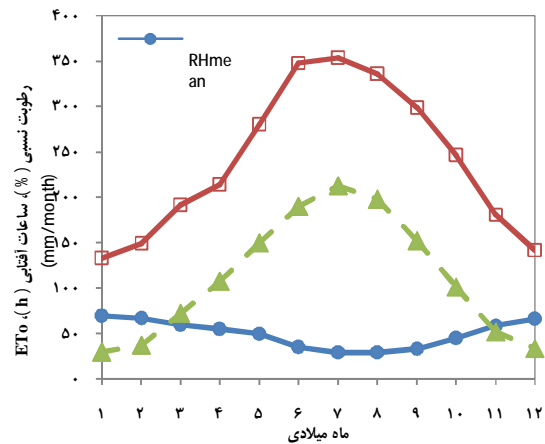
به طور خلاصه در مقیاس سالانه و در هر دو ایستگاه، پارامترهای T_{mean} و e_a به ترتیب بیشترین و کمترین تاثیر را روی تغییرات ET_0 نشان دادند. در هر دو ایستگاه شیب تغییرات e_a در ماه ژانویه بیشتر از ماه ژوئیه می‌باشد. با این حال شیب تغییرات R_n در هر دو ایستگاه در تمام ماه‌ها و سال یکسان است. شیب تغییرات T_{mean} در گرم‌ترین ماه سال بیشتر از سردترین ماه سال (برای هر دو ایستگاه) می‌باشد. شیب تغییرات سرعت باد نیز در هر دو ایستگاه در ماه ژوئیه اندکی بیشتر از ماه ژانویه است. جدول‌های 2 و 3 به ترتیب مقدار SC محاسبه شده از رابطه 3 را برای ایستگاه‌های سنندج و سبزواری نشان می‌دهد. به طوری‌که از جداول 2 و 3 می‌توان استنباط کرد، در مقیاس سالانه در ایستگاه سنندج اگر به هر یک از متغیرهای T_{mean} ، e_a و WS مقدار بطور جداگانه 20 درصد افزایش نسبت داده شود، مقدار SC به دست آمده برای پارامترهای مذکور به ترتیب معادل $0/561$ ، $-0/164$ ، $0/305$ و $0/549$ می‌گردد. این ارقام برای ایستگاه سبزواری نیز معادل $0/634$ ، $-0/177$ ، $0/387$ و $0/43$ می‌باشد. می‌توان نتیجه گرفت که 20 درصد افزایش در T_{mean} مقدار ET_0 سنندج را به اندازه $11/2$ درصد و سبزواری را $12/7$ درصد افزایش خواهد داد. بنابراین، ایستگاه سبزواری نسبت به سنندج به تغییرات T_{mean} ، e_a و WS روی ET_0 حساسیت بیشتری نشان می‌دهد. با این حال سبزواری در مقایسه با سنندج نسبت به تغییرات R_n حساسیت کمتری روی ET_0 دارد.

باشد. کمترین میزان RH در ایستگاه سنندج در ماه ژوئیه و در ایستگاه سبزواری در ماه اوت تجربه می‌شود در صورتی که بیشترین میزان RH در هر دو ایستگاه در ماه ژانویه (مصادف با سردترین ماه سال) می‌باشد. بیشترین مقدار میانگین سرعت باد در ایستگاه سنندج در ماه آوریل (حدود $1/95$ متر بر ثانیه) و در ایستگاه سبزواری در ماه ژوئیه (حدود 3 متر بر ثانیه) اتفاق می‌افتد. در غالب ماه‌های سال سرعت باد در سنندج از مقدار نظیر در سبزواری کمتر است.

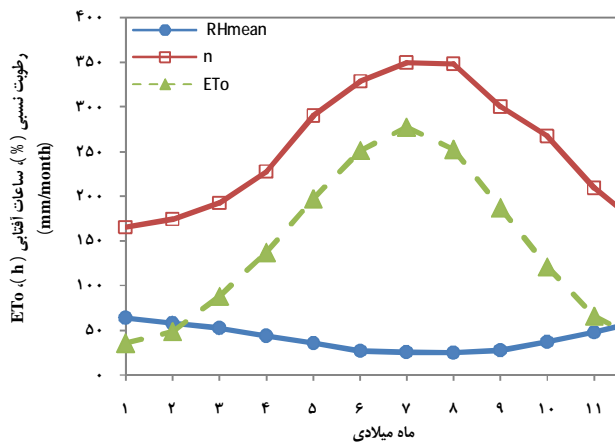
شکل‌های 7 و 8 اثر تغییرات هر یک از پارامترهای هواشناسی بر مقدار ET_0 را به ترتیب در ایستگاه‌های سنندج و سبزواری نشان می‌دهد. گرچه این نمودارها برای تمام ماه‌ها تهیه شده‌اند ولی برای نمونه تنها در مورد ماه‌های ژانویه (به عنوان سردترین ماه)، ژوئیه (به عنوان گرم‌ترین ماه) و مقیاس سالانه به منظور امکان مقایسه نتایج نشان داده شده است. به طوری‌که از شکل‌های 7 و 8 می‌توان استنباط کرد در مقیاس سالانه، ET_0 کمترین حساسیت را به تغییرات پارامتر e_a در هر دو ایستگاه نشان می‌دهد. طوری که 20% افزایش در e_a تنها منجر به $3/29$ درصد کاهش در ET_0 سنندج و $3/53$ درصد کاهش در ET_0 سبزواری می‌شود. در مقیاس سالانه افزایش 20 درصدی میانگین درجه حرارت هوا (با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها در مقدار نرمال آن‌ها) سبب افزایش $11/23$ درصدی و $12/68$ درصدی ET_0 ایستگاه‌های سنندج و سبزواری شده است. در ایستگاه سنندج بیشترین اثر افزایش میانگین درجه حرارت هوا بر روی ET_0 مربوط به ماه‌های سپتامبر و اکتبر به میزان $13/57$ درصد است. در ایستگاه سبزواری نیز بیشترین اثر مربوط به همان دو ماه به میزان $14/02$ درصد می‌باشد. در مقیاس ماهانه، در ایستگاه سنندج و با افزایش 20 درصدی مقدار T_{mean}



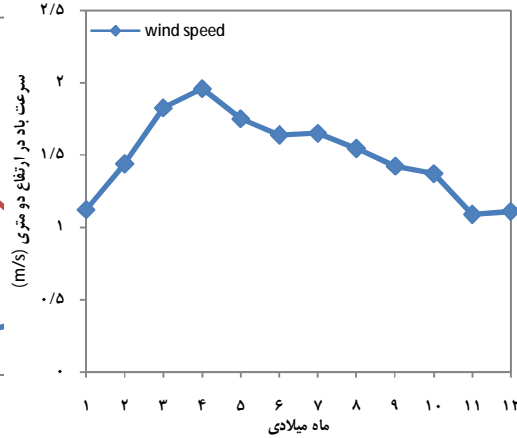
شکل 2- میانگین ماهانه دمای هوا و تابش خالص ورودی به زمین در سنندج (1962 - 2005).



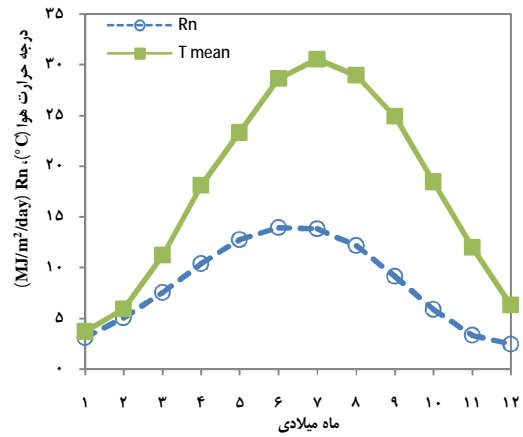
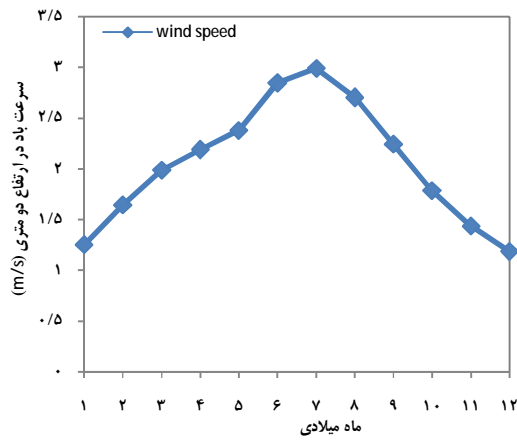
شکل 1- میانگین ماهانه مجموع ساعات آفتابی، میانگین رطوبت نسبی هوا و ET_0 در سنندج (1962 - 2005).



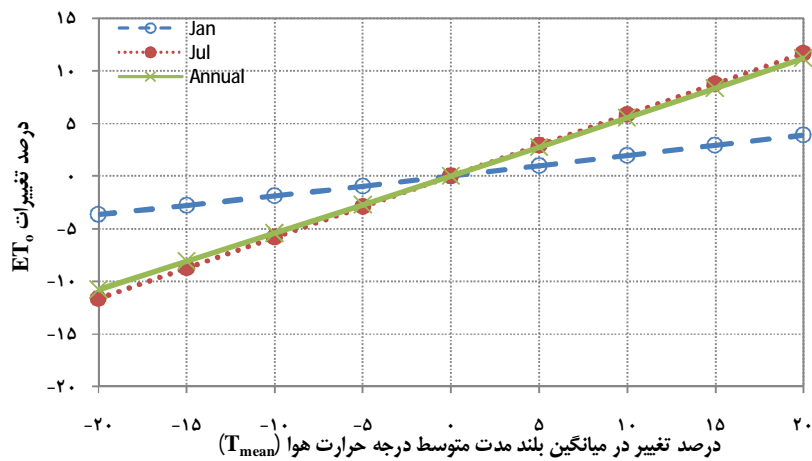
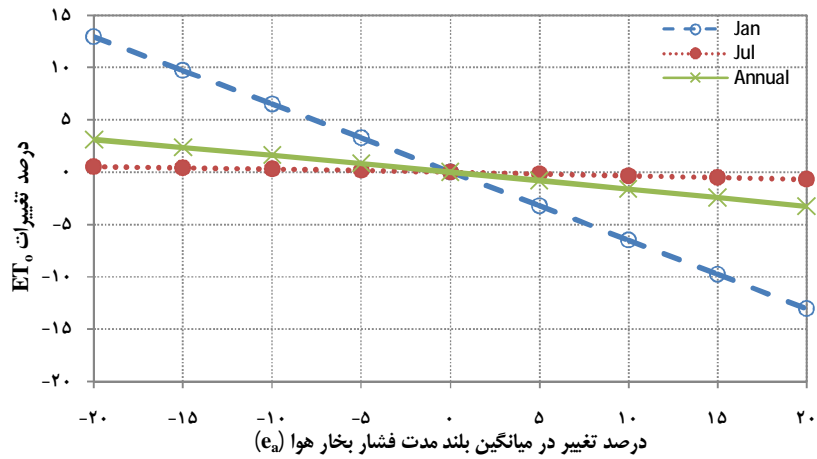
شکل 4- میانگین ماهانه مجموع ساعات آفتابی، میانگین رطوبت نسبی هوا و ET_0 در سبزوار (1962 - 2005).

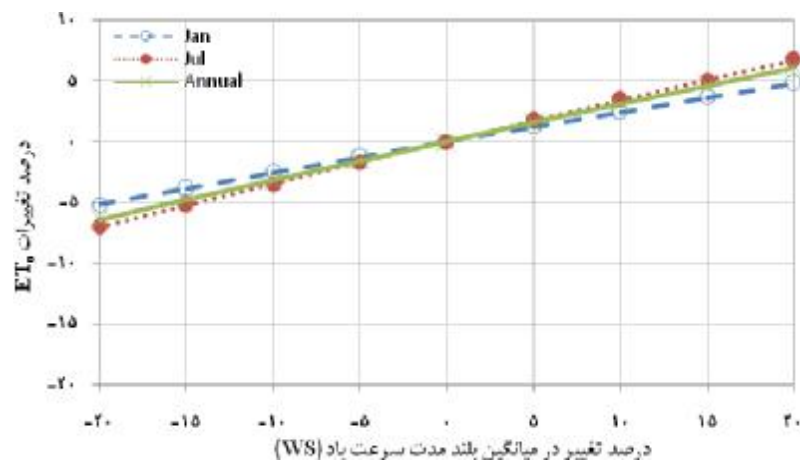
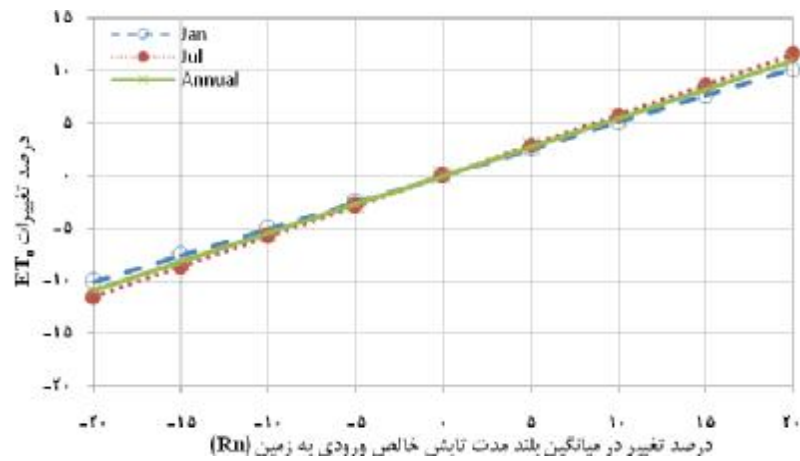


شکل 3- میانگین ماهانه سرعت باد در ارتفاع دو متری در سنندج (1962 - 2005).

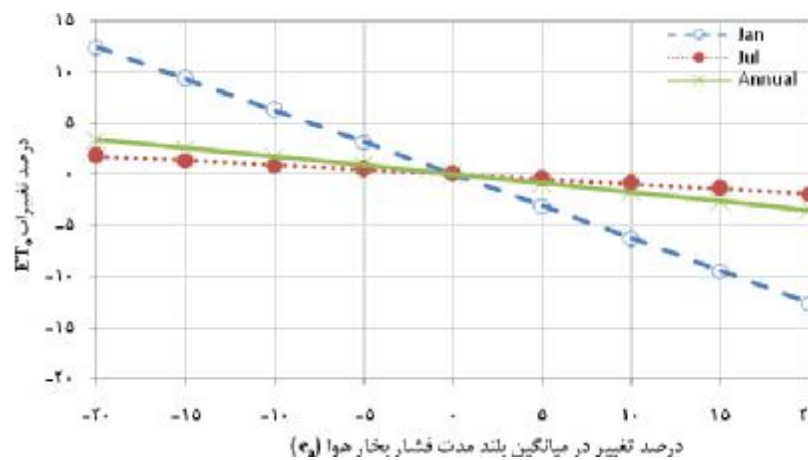


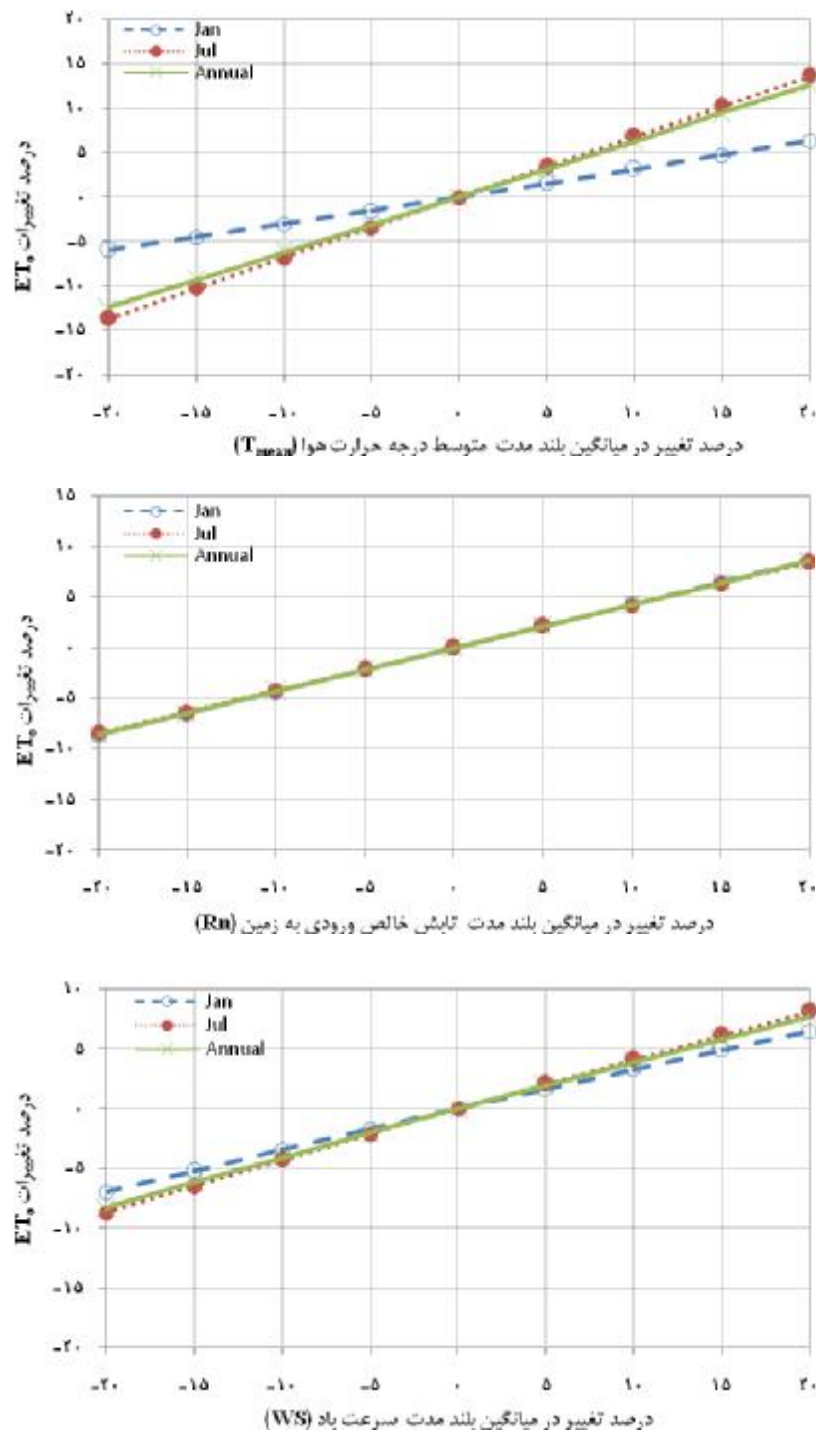
شکل 5- میانگین ماهانه دمای هوا و تابش خالص ورودی به زمین در سبزواری (1962 - 2005).
 شکل 6- میانگین ماهانه سرعت باد در ارتفاع دو متری در سبزواری (1962 - 2005).





شکل 7- درصد تغییرات ET_0 تابعی از درصد تغییرات برخی از متغیرهای هواشناسی در ایستگاه سنندج.





شکل 8- درصد تغییرات ET_0 تابعی از درصد تغییرات برخی از متغیرهای هواشناسی در ایستگاه سبزوار.

جدول 2- مقادیر SC بازای درصد تغییرات هر یک از پارامترهای هواشناسی به صورت منفرد (با ثابت نگاه داشتن سایر پارامترها) در مقیاس ماهانه و سالانه برای ایستگاه سنندج.

درصد تغییرات فرضی برای پارامترهای هواشناسی									پارامتر	
-20	-15	-10	-5	0.0	5	10	15	20	ماه	هواشناسی
-0.183	-0.185	-0.186	-0.188	0.000	0.191	0.193	0.194	0.196	Jan	T _{mean}
-0.169	-0.171	-0.173	-0.176	0.000	0.180	0.182	0.184	0.187	Feb	
-0.336	-0.339	-0.343	-0.346	0.000	0.352	0.356	0.359	0.363	Mar	
-0.476	-0.479	-0.483	-0.487	0.000	0.494	0.498	0.502	0.506	Apr	
-0.540	-0.544	-0.547	-0.550	0.000	0.556	0.559	0.562	0.566	May	
-0.572	-0.574	-0.575	-0.577	0.000	0.580	0.582	0.584	0.585	Jun	
-0.582	-0.582	-0.582	-0.582	0.000	0.583	0.583	0.584	0.585	Jul	
-0.607	-0.608	-0.610	-0.611	0.000	0.614	0.615	0.617	0.619	Aug	
-0.640	-0.645	-0.650	-0.654	0.000	0.664	0.669	0.673	0.678	Sep	
-0.623	-0.630	-0.636	-0.643	0.000	0.657	0.664	0.672	0.679	Oct	
-0.518	-0.523	-0.529	-0.535	0.000	0.547	0.553	0.559	0.565	Nov	
-0.356	-0.360	-0.363	-0.366	0.000	0.373	0.376	0.379	0.383	Dec	
-0.539	-0.542	-0.544	-0.547	0.000	0.553	0.555	0.558	0.561	Annual	
0.645	0.646	0.648	0.649	0.000	-0.651	-0.652	-0.653	-0.654	Jan	e _a
0.581	0.582	0.583	0.584	0.000	-0.586	-0.587	-0.588	-0.588	Feb	
0.421	0.422	0.422	0.423	0.000	-0.425	-0.426	-0.426	-0.427	Mar	
0.299	0.300	0.301	0.302	0.000	-0.303	-0.304	-0.304	-0.305	Apr	
0.174	0.175	0.176	0.177	0.000	-0.179	-0.179	-0.180	-0.181	May	
0.054	0.055	0.056	0.057	0.000	-0.059	-0.060	-0.061	-0.062	Jun	
0.027	0.028	0.029	0.030	0.000	-0.032	-0.033	-0.034	-0.035	Jul	
0.022	0.023	0.024	0.025	0.000	-0.028	-0.029	-0.030	-0.030	Aug	
0.042	0.043	0.045	0.046	0.000	-0.048	-0.049	-0.050	-0.051	Sep	
0.155	0.156	0.157	0.159	0.000	-0.161	-0.162	-0.163	-0.164	Oct	
0.329	0.331	0.332	0.334	0.000	-0.337	-0.338	-0.340	-0.341	Nov	
0.579	0.580	0.582	0.583	0.000	-0.586	-0.587	-0.588	-0.589	Dec	
0.156	0.157	0.158	0.160	0.000	-0.162	-0.162	-0.163	-0.164	Annual	
-0.259	-0.256	-0.254	-0.252	0.000	0.247	0.245	0.243	0.241	Jan	WS
-0.249	-0.247	-0.244	-0.242	0.000	0.237	0.234	0.232	0.230	Feb	
-0.270	-0.267	-0.264	-0.261	0.000	0.255	0.252	0.250	0.247	Mar	
-0.264	-0.261	-0.259	-0.256	0.000	0.251	0.248	0.246	0.244	Apr	
-0.257	-0.255	-0.252	-0.250	0.000	0.246	0.244	0.243	0.241	May	
-0.309	-0.307	-0.305	-0.303	0.000	0.300	0.298	0.296	0.294	Jun	
-0.351	-0.349	-0.347	-0.345	0.000	0.342	0.340	0.338	0.336	Jul	
-0.359	-0.357	-0.355	-0.353	0.000	0.350	0.348	0.346	0.344	Aug	
-0.371	-0.369	-0.367	-0.365	0.000	0.361	0.359	0.357	0.355	Sep	
-0.378	-0.376	-0.373	-0.370	0.000	0.365	0.363	0.360	0.358	Oct	
-0.333	-0.331	-0.328	-0.326	0.000	0.322	0.319	0.317	0.315	Nov	
-0.321	-0.319	-0.316	-0.314	0.000	0.309	0.306	0.304	0.301	Dec	
-0.322	-0.320	-0.318	-0.316	0.000	0.312	0.309	0.307	0.305	Annual	
-0.505	-0.505	-0.505	-0.505	0.000	0.505	0.505	0.505	0.505	Jan	Rn
-0.578	-0.578	-0.578	-0.578	0.000	0.578	0.578	0.578	0.578	Feb	
-0.576	-0.576	-0.576	-0.576	0.000	0.576	0.576	0.576	0.576	Mar	
-0.586	-0.586	-0.586	-0.586	0.000	0.586	0.586	0.586	0.586	Apr	
-0.623	-0.623	-0.623	-0.623	0.000	0.623	0.623	0.623	0.623	May	
-0.606	-0.606	-0.606	-0.606	0.000	0.606	0.606	0.606	0.606	Jun	
-0.577	-0.577	-0.577	-0.577	0.000	0.577	0.577	0.577	0.577	Jul	
-0.541	-0.541	-0.541	-0.541	0.000	0.541	0.541	0.541	0.541	Aug	
-0.482	-0.482	-0.482	-0.482	0.000	0.482	0.482	0.482	0.482	Sep	
-0.435	-0.435	-0.435	-0.435	0.000	0.435	0.435	0.435	0.435	Oct	
-0.431	-0.431	-0.431	-0.431	0.000	0.431	0.431	0.431	0.431	Nov	
-0.414	-0.414	-0.414	-0.414	0.000	0.414	0.414	0.414	0.414	Dec	
-0.549	-0.549	-0.549	-0.549	0.000	0.549	0.549	0.549	0.549	Annual	

جدول 3- مقادیر SC بازای درصد تغییرات هر یک از پارامترهای هواشناسی به صورت منفرد (با ثابت نگاه داشتن سایر پارامترها) در مقیاس ماهانه و سالانه برای ایستگاه سبزوار.

درصد تغییرات پارامترهای هواشناسی									پارامتر	هواشناسی
-20	-15	-10	-5	0.0	5	10	15	20	ماه	
-0.298	-0.300	-0.303	-0.306	0.000	0.311	0.314	0.317	0.319	Jan	T _{mean}
-0.318	-0.321	-0.324	-0.327	0.000	0.333	0.336	0.339	0.342	Feb	
-0.445	-0.449	-0.452	-0.456	0.000	0.462	0.466	0.469	0.473	Mar	
-0.560	-0.562	-0.565	-0.568	0.000	0.573	0.575	0.578	0.580	Apr	
-0.618	-0.619	-0.621	-0.622	0.000	0.624	0.626	0.627	0.628	May	
-0.661	-0.661	-0.661	-0.661	0.000	0.660	0.660	0.660	0.660	Jun	
-0.683	-0.683	-0.683	-0.682	0.000	0.682	0.682	0.682	0.682	Jul	
-0.682	-0.683	-0.684	-0.685	0.000	0.686	0.687	0.688	0.689	Aug	
-0.676	-0.679	-0.682	-0.685	0.000	0.692	0.695	0.698	0.701	Sep	
-0.653	-0.659	-0.665	-0.671	0.000	0.683	0.689	0.695	0.701	Oct	
-0.582	-0.588	-0.595	-0.601	0.000	0.615	0.621	0.628	0.635	Nov	
-0.447	-0.452	-0.456	-0.461	0.000	0.470	0.475	0.479	0.484	Dec	
-0.619	-0.621	-0.623	-0.625	0.000	0.628	0.630	0.632	0.634	Annual	
0.621	0.623	0.625	0.626	0.000	-0.629	-0.630	-0.632	-0.633	Jan	e _a
0.498	0.500	0.501	0.502	0.000	-0.504	-0.505	-0.506	-0.507	Feb	
0.378	0.379	0.379	0.380	0.000	-0.382	-0.383	-0.384	-0.384	Mar	
0.238	0.239	0.240	0.241	0.000	-0.243	-0.244	-0.244	-0.245	Apr	
0.149	0.150	0.151	0.152	0.000	-0.153	-0.154	-0.155	-0.156	May	
0.098	0.099	0.100	0.101	0.000	-0.103	-0.103	-0.104	-0.105	Jun	
0.089	0.090	0.091	0.092	0.000	-0.094	-0.095	-0.096	-0.097	Jul	
0.076	0.077	0.078	0.079	0.000	-0.081	-0.082	-0.082	-0.083	Aug	
0.089	0.090	0.091	0.092	0.000	-0.094	-0.095	-0.096	-0.097	Sep	
0.160	0.161	0.162	0.164	0.000	-0.166	-0.167	-0.169	-0.170	Oct	
0.299	0.301	0.303	0.305	0.000	-0.307	-0.309	-0.310	-0.311	Nov	
0.533	0.535	0.537	0.539	0.000	-0.542	-0.543	-0.545	-0.546	Dec	
0.169	0.170	0.171	0.172	0.000	-0.174	-0.175	-0.176	-0.177	Annual	
-0.349	-0.346	-0.343	-0.340	0.000	0.334	0.331	0.328	0.325	Jan	WS
-0.356	-0.352	-0.348	-0.344	0.000	0.337	0.334	0.330	0.327	Feb	
-0.349	-0.345	-0.342	-0.338	0.000	0.331	0.327	0.324	0.321	Mar	
-0.360	-0.356	-0.353	-0.349	0.000	0.343	0.340	0.336	0.333	Apr	
-0.368	-0.365	-0.362	-0.359	0.000	0.353	0.350	0.347	0.344	May	
-0.423	-0.419	-0.415	-0.412	0.000	0.405	0.402	0.398	0.395	Jun	
-0.435	-0.431	-0.428	-0.424	0.000	0.417	0.414	0.411	0.407	Jul	
-0.440	-0.437	-0.433	-0.430	0.000	0.423	0.419	0.416	0.413	Aug	
-0.452	-0.448	-0.444	-0.441	0.000	0.434	0.431	0.427	0.424	Sep	
-0.448	-0.444	-0.440	-0.437	0.000	0.430	0.427	0.423	0.420	Oct	
-0.457	-0.453	-0.449	-0.446	0.000	0.439	0.435	0.432	0.428	Nov	
-0.400	-0.397	-0.394	-0.390	0.000	0.384	0.381	0.378	0.375	Dec	
-0.414	-0.411	-0.407	-0.404	0.000	0.397	0.394	0.391	0.387	Annual	
-0.431	-0.431	-0.431	-0.431	0.000	0.431	0.431	0.431	0.431	Jan	Rn
-0.476	-0.476	-0.476	-0.476	0.000	0.476	0.476	0.476	0.476	Feb	
-0.500	-0.500	-0.500	-0.500	0.000	0.500	0.500	0.500	0.500	Mar	
-0.512	-0.512	-0.512	-0.512	0.000	0.512	0.512	0.512	0.512	Apr	
-0.500	-0.500	-0.500	-0.500	0.000	0.500	0.500	0.500	0.500	May	
-0.447	-0.447	-0.447	-0.447	0.000	0.447	0.447	0.447	0.447	Jun	
-0.423	-0.423	-0.423	-0.423	0.000	0.423	0.423	0.423	0.423	Jul	
-0.407	-0.407	-0.407	-0.407	0.000	0.407	0.407	0.407	0.407	Aug	
-0.383	-0.383	-0.383	-0.383	0.000	0.383	0.383	0.383	0.383	Sep	
-0.353	-0.353	-0.353	-0.353	0.000	0.353	0.353	0.353	0.353	Oct	
-0.311	-0.311	-0.312	-0.312	0.000	0.312	0.312	0.311	0.311	Nov	
-0.338	-0.338	-0.338	-0.338	0.000	0.338	0.338	0.338	0.338	Dec	
-0.430	-0.430	-0.430	-0.430	0.000	0.430	0.430	0.430	0.430	Annual	

همدان افزایش 20% در متوسط درجه حرارت هوا منجر به افزایش حداکثر 11/8 درصد در ET_0 (مدل PMF-56) ماه مهر می‌گردد. این رقم برای ماه‌های دیگر کمتر از رقم گزارش شده است. رقم گزارش شده برای همدان حدود 0/57 درصد بیشتر از رقم نظیر برای سنندج و 0/88 درصد کمتر از رقم بدست آمده برای سبزوار می‌باشد.

به طوری که اشاره شد، در این مطالعه حساسیت ET_0 به تغییرات پارامترها نه تنها بصورت منفرد، بلکه در حالت ترکیبی نیز بررسی گردید. به عنوان مثال در حالت ترکیبی در سناریوی اول افزایش به میزان 20 درصد در T_{mean} (با ثابت بودن سایر پارامترها) مقدار سرعت باد نیز در دامنه $\pm 20\%$ با فواصل 5% تغییر داده شد و حساسیت ET_0 ماهانه محاسبه گردید. جدول 4 نتایج این سناریو را برای ایستگاه سنندج نشان می‌دهد. به طوری که از جدول مذکور می‌توان استنباط کرد، اگر هر یک از پارامترهای T_{mean} و WS به طور همزمان به میزان 20 درصد افزایش یابند مقدار ET_0 از 8/88 درصد در ماه فوریه تا 22/40 درصد در ماه سپتامبر افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که افزایش 20 درصدی T_{mean} توأم با کاهش 20 درصدی WS سبب تغییر ET_0 از 1/86- درصد در ماه فوریه تا 4/76 درصد در ماه مه می‌شود. در سناریوی دوم T_{mean} ایستگاه سنندج به میان 20 درصد کاهش داده شد و درصد تغییر ET_0 با تغییر WS بررسی گردید.

نتایج نشان داد (جدول ارائه نشده است) که در این ایستگاه کاهش همزمان 20 درصدی T_{mean} و WS موجب می‌شود که مقدار ET_0 حداکثر به میزان 18/63- درصد در ماه سپتامبر کاهش یابد. در صورتی که اگر T_{mean} 20 درصد کاهش و WS 20 درصد افزایش یابد مقدار ET_0 بین 7/28- درصد در ماه سپتامبر تا 0/83 درصد در ماه ژانویه تغییر می‌کند.

دو سناریوی اجرا شده برای سنندج در مورد ایستگاه سبزوار هم بررسی شد. جدول 5 نتایج

نتایج مطالعه در مقیاس ماهانه نشان داد که در ایستگاه سنندج 20 درصد افزایش در هر یک از متغیرهای T_{mean} ، e_a ، WS و Rn به ترتیب منجر به حداکثر مقدار SC ماهانه به میزان 0/679+ (در ماه‌های اکتبر)، 0/654- (در ماه ژانویه)، 0/358+ (در ماه اکتبر) و 0/623+ (در ماه مه) شده است. در صورتی که این مقادیر برای ایستگاه سبزوار به ترتیب برابر 0/701+ (در ماه‌های سپتامبر و اکتبر)، 0/633- (در ماه ژانویه)، 0/428+ (در ماه نوامبر) و 0/512+ (در ماه آوریل) می‌باشد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت در مقیاس ماهانه میانگین درجه حرارت هوا، e_a و سرعت باد در سبزوار حساسیت بیشتری روی میزان ET_0 (نسبت به سنندج) داشته است. در حالی که ET_0 سبزوار حساسیت کمتری نسبت به سنندج در مقابل تغییرات Rn داشته است.

به نظر می‌رسد اگر دو مطالعه مربوط به تحلیل حساسیت با دو روش متفاوت صورت گیرد مقایسه نتایج این دو مطالعه تقریباً بی‌معنا خواهد بود. بنابراین لازم است به این نکته توجه شود که نتایج حاصل از دیگران را نباید با نتایج این تحقیق مقایسه کرد. طالبی و همکاران (1389) نیز دو پارامتر T_{max} و WS را به عنوان مهمترین پارامترهای موثر بر ET_0 سالانه ایستگاه‌های یزد، طبس و مروست گزارش نمودند که با نتیجه بدست آمده از این مطالعه برای سنندج و سبزوار همخوانی دارد. با این حال آن‌ها نتیجه گرفتند که اولویت بندی عوامل مختلف موثر بر تبخیر و تعرق در فصول مختلف، متفاوت است که با نتیجه بدست آمده برای ماه‌های مختلف سال در مورد سنندج و سبزوار همخوانی ندارد. همچنین گونگ و همکاران (2006) نشان دادند که ET_{ref} در زمستان بسیار حساس به تغییرات درجه حرارت هوای رودخانه یانگ می‌باشد. در حالی که ET_0 در سنندج و سبزوار در گرم‌ترین ماه سال (ژوئیه) حساس‌تر از سردترین ماه سال (ژانویه) است و در نتیجه با نتایج مطالعه حاضر همخوانی ندارد. سبزی-پرور و همکاران (1389) نشان دادند که در ایستگاه

ژانویه و فوریه تا 3/42 درصد در ماه مه شد. همچنین کاهش 20 درصدی T_{mean} همراه با افزایش 20 درصدی WS سبب شد که مقدار ET_0 از 7/45- درصد در ماه ژوئیه تا 0/02- درصد در ماه ژانویه (در جدول ارائه نشده است) تغییر کند. اما زمانی که در ایستگاه سبزواری هر دو پارامتر T_{mean} و WS به میزان 20 درصد کاهش داده شدند مقدار ET_0 حداکثر به میزان 20/71- درصد در ماه سپتامبر کاهش یافت.

سناریوی اول را برای سبزواری نشان می‌دهد. در سناریوی اول افزایش 20 درصدی برای هر دو پارامتر T_{mean} و WS در سبزواری سبب افزایش ET_0 از 13/5 درصد در ماه ژانویه تا 24/43 درصد در ماه سپتامبر شد. این ارقام نسبت به مقادیر نظیر بدست آمده برای سنندج اندکی بیشتر هستند. در حالی که افزایش 20 درصدی T_{mean} و کاهش 20 درصدی WS در ایستگاه سبزواری سبب تغییر ET_0 از 1-25 درصد در ماه‌های

جدول 4- درصد تغییرات ET_0 با در نظر گرفتن 20 درصد افزایش در میانگین درجه حرارت هوا و درصدهای مختلف تغییر در میانگین سرعت باد در ایستگاه سنندج.

ماه	20	15	10	5	0.0	-5	-10	-15	-20
Jan	9.09	7.83	6.55	5.25	3.92	2.57	1.19	-0.21	-1.64
Feb	8.88	7.63	6.36	5.06	3.73	2.38	0.99	-0.42	-1.86
Mar	13.18	11.74	10.28	8.78	7.25	5.69	4.10	2.47	0.80
Apr	16.25	14.76	13.24	11.69	10.12	8.51	6.87	5.20	3.50
May	17.49	15.98	14.45	12.89	11.31	9.71	8.08	6.44	4.76
Jun	19.18	17.34	15.48	13.61	11.71	9.79	7.85	5.89	3.91
Jul	20.05	17.99	15.91	13.81	11.70	9.56	7.41	5.24	3.04
Aug	20.89	18.79	16.67	14.54	12.38	10.21	8.01	5.80	3.57
Sep	22.40	20.22	18.02	15.81	13.57	11.30	9.02	6.71	4.37
Oct	22.31	20.17	18.00	15.80	13.57	11.32	9.04	6.73	4.38
Nov	18.64	16.84	15.01	13.17	11.30	9.40	7.48	5.53	3.56
Dec	14.29	12.67	11.02	9.35	7.65	5.93	4.18	2.39	0.58
Annual	18.77	16.92	15.04	13.15	11.23	9.29	7.32	5.34	3.32

جدول 5- درصد تغییرات ET_0 با در نظر گرفتن 20 درصد افزایش در میانگین درجه حرارت هوا و درصدهای مختلف تغییر در میانگین سرعت باد در ایستگاه سبزواری.

ماه	20	15	10	5	0.0	-5	-10	-15	-20
Jan	13.50	11.77	10.01	8.21	6.39	4.53	2.64	0.71	-1.25
Feb	14.31	12.50	10.65	8.77	6.85	4.89	2.88	0.84	-1.25
Mar	17.16	15.29	13.38	11.44	9.46	7.43	5.37	3.26	1.11
Apr	19.88	17.86	15.81	13.72	11.60	9.44	7.25	5.01	2.74
May	21.17	19.06	16.92	14.76	12.56	10.32	8.06	5.76	3.42
Jun	23.08	20.66	18.21	15.72	13.20	10.65	8.05	5.43	2.76
Jul	23.78	21.30	18.78	16.22	13.64	11.01	8.36	5.66	2.93
Aug	24.01	21.50	18.96	16.39	13.78	11.14	8.47	5.75	3.01
Sep	24.43	21.88	19.29	16.67	14.02	11.33	8.60	5.84	3.04
Oct	24.14	21.66	19.15	16.60	14.02	11.40	8.74	6.04	3.31
Nov	22.67	20.23	17.76	15.25	12.70	10.11	7.49	4.82	2.12
Dec	18.02	15.98	13.91	11.81	9.68	7.51	5.31	3.07	0.79
Annual	22.18	19.86	17.50	15.11	12.68	10.22	7.72	5.19	2.61

شرایط به میزان 28/6 درصد (در ماه دسامبر) افزایش می‌یابد. در حالی که تغییر در سه پارامتر مذکور در جهت کاهش ET_0 مقدار آن را در بهترین شرایط به

نتایج نشان داد که در ایستگاه سنندج تغییر توام سه پارامتر T_{mean} ، e_a ، WS (با ثابت نگه داشتن R_n) به میزان 20% در جهت افزایش ET_0 مقدار آن در بدترین

نتیجه گیری کلی

در این مطالعه حساسیت پارامترهای هواشناسی به تغییرات ET_0 در دو ایستگاه سنندج و سبزوار در دو مقیاس ماهانه و سالانه بررسی شد. مقدار ET_0 در ماه-های مختلف در خلال دوره آماری (1961-2005) با روش فائو پنمن-مانتیث بدست آمد. آنگاه حساسیت ET_0 به تغییر هر یک از پارامترهای هواشناسی با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها در میزان نرمال دوره آماری بررسی شد. در سناریوی دیگر تغییرات توام پارامترها به صورت دوتایی و چندتایی در دامنه ± 20 درصد مقدار نرمال و در گام‌های 5 درصد روی ET_0 بررسی شد. نتایج نشان داد که هر دو ایستگاه سنندج و سبزوار نسبت به درجه حرارت هوا حساسیت بیشتری در مقایسه با دیگر پارامترهای دارد. با این حال سبزوار در قبال تغییرات T_{mean} حساس‌تر از سنندج بوده و در نتیجه آسیب پذیرتر از سنندج در قبال تغییرات دمایی هوا محسوب می‌شود. با افزایش 20% در مقدار T_{mean} مقدار ET_0 در سنندج تا 11/23 درصد و در سبزوار تا 12/68 درصد افزایش می‌یابد. همچنین کمترین حساسیت در هر دو ایستگاه متعلق به پارامتر فشار بخار واقعی هوا بوده است. طوری که افزایش 20 درصدی e_a موجب کاهش حدوداً 3 درصدی ET_0 در سنندج و سبزوار شده است. حالت‌های ترکیبی در تغییر پارامترها مانند تغییر توام T_{mean} و سرعت باد به صورت دوتایی و سه تایی نیز بررسی گردد. نتایج نشان داد که در بدترین حالت، تغییر توام پارامترهای WS ، T_{mean} و e_a به اندازه 20 درصد که در جهت افزایش ET_0 اعمال می‌شد موجب افزایش ET_0 در سنندج به اندازه 28/6 درصد و در سبزوار به اندازه 31/5 درصد گردیده است. در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت که ایستگاه سبزوار در مقایسه با سنندج نسبت به تغییرات پارامترهای موثر بر ET_0 حساس‌تر می‌باشد. مطالعه حساسیت پارامترهای هواشناسی روی تغییرات ET_0 در دیگر ایستگاه‌های ایران توصیه می‌شود.

میزان 22/1 درصد (در ماه دسامبر) کاهش می‌دهد. تغییرات مذکور در سبزوار در بدترین شرایط ET_0 را به میزان 31/5 درصد (در ماه دسامبر) افزایش و در بهترین شرایط، ET_0 به میزان 24/4 درصد (در ماه دسامبر) کاهش می‌دهد. این نتایج نشان می‌دهد که سبزوار نسبت به تغییرات توام پارامترهای هواشناسی روی ET_0 حساس‌تر از سنندج می‌باشد.

سبزی‌پرور و همکاران (1387) نشان دادند که در اقلیم همدان در مقیاس سالانه با افزایش 20 درصد مقدار RS مقدار ET_0 حدود 15/4 درصد افزایش می‌یابد. پور محمدی و همکاران (1388) نشان دادند که در ناحیه خشک یزد حداکثر درجه حرارت هوا و سرعت باد به ترتیب حساسیت زیادی به ET_0 دارند. این نتیجه در مورد درجه حرارت هوا با نتایج بدست آمده برای سنندج و سبزوار همخوانی دارد ولی در مورد سرعت باد همخوانی ندارد. متأسفانه نامبردگان حالت ترکیبی تغییرات پارامترهای هواشناسی را در تحلیل حساسیت بررسی نکرده‌اند.

هووارد و لوید (1979) نشان دادند که میزان تبخیر محاسبه شده از رابطه‌ی پنمن (در ناحیه‌ی لینکلن شایر چاک شمالی) حساسیت زیادی به ضریب انعکاس و در مرحله بعد به تابش آفتاب و درجه حرارت تر هوا بود. سینگ و زو (1997) نشان دادند که میزان تبخیر در ایالت واد سوئیس بیشتر به گرادیان فشار بخار هوا حساسیت دارد. ایشان ثابت کردند که در منطقه مذکور تبخیر کمترین حساسیت را در اولویت اول به درجه حرارت هوا و در اولویت دوم به سرعت باد دارد. ژانگ و همکاران (2010) نیز نشان دادند که ET_0 حوضه‌ی رودخانه‌ی شیانگ در چین در تابستان به انرژی قابل دسترس حساسیت زیادی دارد. در حالی که در زمستان ET_0 به سرعت باد بیشترین حساسیت را نشان داده می‌دهد.

سپاسگزاری

از داوران محترم که با ارائه نکات ارزشمند در ارتقای کیفیت این مقاله تلاش کردند صمیمانه سپاسگزاری می-نماید.

بدینوسیله از اداره کل هواشناسی استان آذربایجان شرقی به خاطر تامین داده های مورد نیاز و

منابع مورد استفاده

پورمحمدی س، طالبی علی و رحیمیان م ح، 1388. انجام آنالیز حساسیت عوامل موثر بر تبخیر و تعرق به کمک معادله فائو- پنمن- مانتیث (مطالعه‌ی موردی: ایستگاه یزد). دهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر 19 تا 21 بهمن 1388، کرمان.

سبزی پرورع، تفضلی ف، زارع ابیانه ح، بانژاد، ح، غفوری م، موسوی بایگی م و مریانجی ز، 1387. ارزیابی حساسیت مدل‌های مختلف تبخیر و تعرق مرجع (ET_0) به سیگنال‌های تغییر اقلیم در اقلیم سرد نیمه خشک همدان. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، شماره 46. صفحه‌های 581 تا 592.

طالبی ع، پورمحمدی س و رحیمیان م ح، 1389. بررسی عوامل موثر در تبخیر و تعرق مرجع، با استفاده از آنالیز حساسیت معادله فائو پنمن- مانتیث مطالعه‌ی موردی: ایستگاه‌های یزد، طبس و مروست. پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی، شماره 73. صفحه‌های 97 تا 110.

علیزاده ا، موسوی ف، کمال غ و موسوی بایگی م، 1374. هوا و اقلیم شناسی. انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، 384 صفحه.

Allen RG, Pereira LS, Raes D and Smith M, 1998. Crop Evapotranspiration (Guidelines for Computing Crop Water Requirements). FAO Irrigation and Drainage Paper No.56. FAO: Rome, Italy.

Aydin M and Kececioglu SF, 2010. Sensitivity analysis of the evaporation module of the E-DiGOR model. Turk J Agric For 34:497-507.

Beven K, 1979. A sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration estimates. Journal of Hydrology 44: 169-190.

Blaney HF and Criddle WD, 1950. Determining Water Requirements in Irrigated Areas from Climatological and Irrigation Data. USDA (SCS) TP-96 Washington.

Brutsaert W, 1982. Evaporation into the Atmosphere. Redial Publishing Company, Dordrecht, the Netherlands.

Esteves J, Gavilan P and Berengena J, 2009. Sensitivity analysis of a Penman-Monteith type equation to estimate reference evapotranspiration in southern Spain. Hydrological Processes 23: 3342-3353.

Gong L, Xu C, Chen D, Halldin S and Chen YD, 2006. Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin. Journal of Hydrology 329: 620-629.

Goyal RK, 2004. Sensitivity of evapotranspiration to global warming: A case study of arid zone of Rajasthan (India). Agricultural Water Management 69: 1-11.

Hargreaves GH and Samani ZA, 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. Appl. Eng. Agric. 1(2): 96-96.

Howard KWF and Lloyd JW, 1979. The sensitivity of parameters in the Penman evaporation equations and direct recharge balance. Journal of Hydrology 41: 329-344.

Irmak S, Payero JO, Martin DL, Irmak A and Terry A, 2006. Sensitivity analysis and sensitivity coefficients of standardized daily ASCE-Penman-Monteith equation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 132(6): 564-578.

Kite GW and Droogers P, 2000. Comparing evapotranspiration estimations from satellites, hydrological models and field data. Journal of Hydrology 229: 3-18.

Liu Q, Yang Z, Cui B and Sun T, 2010. The temporal trends of reference evapotranspiration and its sensitivity to key meteorological variables in the Yellow River basin, China. Hydrological Processes 24: 2171-2181.

- Rana G and Katerji N, 1998. A measurement based sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration model for crops of different height and in contrasting water status. *Theor. App. Climatology*, 60: 141-149.
- Rana G and Katerji N, 2000. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. *European Journal of Agronomy* 13: 125-153.
- Saxton KE, 1975. Sensitivity analysis of the combination evapotranspiration equation. *Agricultural and Meteorology* 15: 343-353.
- Shuttleworth WJ, 1993. Evaporation (Chapter 4) in "Handbook of Hydrology". Edited by Maidment D. Publisher McGraw-Hill New York.
- Singh VP and Xu CY, 1997. Sensitivity of mass transfer based evaporation equations to errors in daily and monthly input data. *Hydrological Processes* 11: 1465-1473.
- Thornthwait CV, 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review* 38: 55-94.
- Xu CY, Gong LB, Jiang T, Chen DL and Sing VP, 2006. Analysis of spatial distribution and temporal reference evapotranspiration and pan evaporation in Chang Jiang (Yangtze River) catchment. *Journal of Hydrology* 327: 81-93.
- Xu CY and Singh VP, 2002. Cross comparison of empirical equations for calculating potential evapotranspiration with data from Switzerland. *Water Resources Management* 16: 197-219.
- Zhang X, Kang S, Zhang L and Lu J, 2010. Spatial variation of climatology monthly crop reference evapotranspiration and sensitivity coefficients in Shiyang river basin of northwest China. *Agriculture Water Management* 97: 1506-1516.