

## آنالیز حساسیت و بررسی عدم قطعیت پارامترهای موثر در برآورد تبخیر- تعرق مرجع در مدل های با ساختار ریاضی متفاوت

امیر اسلامی<sup>۱\*</sup> و بیژن قهرمان<sup>۲</sup>

### چکیده

یکی از مهمترین مولفه ها برای برآورد نیاز آبی گیاهان در معادله بیلان آب، تبخیر- تعرق می باشد. برای محاسبه این مولفه علاوه بر روش های مستقیم که وقت گیر و هزینه بر است روش های تجربی زیادی مانند روش استاندارد فائو پنمن- موتیث ارائه شده که به کمک آن ها تبخیر- تعرق مرجع محاسبه می شود. تمامی مدل های برآورد  $ET_0$  با ساختار ریاضی متفاوت نسبت به پارامترهای هواشناسی در اقلیم های مختلف حساسیت و خطاهای استاندارد متفاوتی دارند. از این رو لازم است عدم قطعیت در ساختار ریاضی این مدل ها تجزیه و تحلیل گردد. در این تحقیق علاوه بر آنالیز حساسیت هفت مدل برآورد  $ET_0$  نسبت به پارامترهای هواشناسی در ایستگاه کرمان، میزان انحراف استاندارد  $ET_0$  بر اساس پراش و هم پراشی پارامترها و مشتقات جزئی مرتبه اول و دوم  $ET_0$  نسبت به این پارامترها بدست آمد. نتایج نشان داد که ناطمینانی داده ها در فصول سرد سال بیشتر از فصول گرم سال بوده و تمامی مدل های منتخب به دو پارامتر  $T_{max}$  و  $T_{min}$  حساسیت بیشتری نسبت به سایر پارامترها داشتند. همچنین بیشترین ضریب همبستگی با مقدار  $0.52(+)$  مربوط به جفت پارامتر  $Rh_{max}$  و  $Rh_{min}$  و کمترین آن با مقدار  $0.03(+)$  مربوط به جفت پارامتر  $U_2$  و  $T_{max}$  بدست آمد. دامنه تغییرات انحراف استاندارد  $ET_0$  در طی سال به ترتیب  $(0.78-5/49)$ ،  $(2/43-8/5)$ ،  $(1/75-8/61)$ ،  $(0/18-1/03)$ ،  $(0/19-1/09)$ ،  $(0/16-0/96)$  و  $(0/15-0/56)$  میلیمتر در روز در مدل های فائو پنمن- موتیث، بلینی کریدل اصلاح شده، پرستلی تیلور، هارگریوز سامانی، هارگریوز ایرماک-  $R_s$  و ایرماک-  $R_n$  حاصل شد. بر اساس داده های این پژوهش در فصول سرد سال که دمای حداقل به سمت صفر میل می کند  $\Delta ET_0$  بسیار زیاد ( $-480 \text{ mm d}^{-1}$ ) بدست آمد.

واژه های کلیدی: آنالیز حساسیت، عدم قطعیت، تبخیر- تعرق، انحراف استاندارد، پراش داده ها

### مقدمه

در علم آبیاری، برآورد دقیق نیاز آبی گیاهان زراعی و محصولات باغی از پایه ای ترین رکن طراحی و محاسبات مهندسی به شمار می رود. با توجه به صرف هزینه و وقت زیاد در استفاده از روش های مستقیم برای برآورد تبخیر- تعرق مرجع استفاده از مدل های ریاضی (ترنت وایت، ۱۹۴۸؛ بلانی کریدل، ۱۹۵۰؛ جنسن و هیز، ۱۹۶۳؛ هارگریوز و سامانی، ۱۹۸۵) با اندازه گیری های پارامترهای هواشناسی به عنوان متغیرهای مستقل اجتناب ناپذیر می باشد. پنمن (۱۹۴۸) بیلان انرژی و روش انتقال جرم را ترکیب و معادله برآورد تبخیر از سطح آزاد آب را ارائه نمود. با شبیه سازی مقاومت آئرودینامیک و مقاومت سطح گیاه به جریان بخار آب به سمت اتمسفر کاربرد این معادله برای برآورد

تبخیر و تعرق از سطح گیاه را ممکن ساخت (آلن و همکاران ۱۹۹۸). بعد از آن معادله ترکیبی پنمن- موتیث توسط آلن و همکاران (۱۹۹۸) به عنوان معادله ای استاندارد برای برآورد تبخیر- تعرق مرجع ( $ET_0$ ) بهبود یافت، و برای واسنجی سایر معادلات توسط سازمان های بین المللی مانند FAO و سایر پژوهشگران مورد استفاده قرار گرفته است (والتر و همکاران، ۲۰۰۰؛ دروگوز و آلن، ۲۰۰۲؛ جورج و همکاران، ۲۰۰۲؛ سابورایان و همکاران، ۲۰۱۱؛ زارع ایبانه و همکاران، ۱۳۸۹). این روش در مقایسه با سایر روش ها مانند بلینی- کریدل، پرستلی- تیلور، تورک، ایرماک، ماکینگ، هارگریوز و هارگریوز سامانی نیاز به پارامترهای زیادتری از قبیل حداکثر و حداقل مقادیر روزانه دمای خشک و مقادیر میانگین روزانه برای سایر متغیرهای آب و هوایی در مقیاس زمانی ۲۴ ساعته دارد (ایرماک و همکاران، ۲۰۰۳؛ لاندراوس و همکاران، ۲۰۰۸؛ احمدزاده و همکاران، ۱۳۸۹؛ فولادمند، ۲۰۱۲).

استفاده از متغیرهای آب و هوایی روزانه قابل دسترس در ایستگاه های هواشناسی برای برآورد  $ET_0$ ، همراه با منابع مختلف خطا می

۱- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد (مری پژوهشی بخش تحقیقات فنی و مهندسی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی کرمان)،

(\*نویسنده مسئول: Email: amireslami.50@gmail.com)

۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

دما نشان دادند که تغییرات زمانی پارامترهای ورودی آب و هوایی شدیداً تحت تاثیر نوع آب و هوا می باشد. بنابراین معادلات تجربی با داده های ورودی مربوطه عدم قطعیت های متفاوتی در مناطق مختلف مورد مطالعه نشان می دهند. استوز و همکاران (۲۰۰۹) در مطالعه ای حساسیت داده های دما، رطوبت نسبی، تشعشع خورشیدی و سرعت باد در معادله استاندارد ASCE پنمن-مونتیث در ۸۷ ایستگاه هواشناسی خودکار (۱۹۹۹ تا ۲۰۰۶) در اندلس اسپانیا را آنالیز نمودند. با استفاده از نمایه های آماری BIAS و SEE نتایج نشان داد که تغییرات زیادی در مقیاس روزانه و فصلی به خصوص برای دما و رطوبت نسبی وجود دارد و به طور کلی، تاثیر خطاهای تصادفی بر مقادیر  $ET_0$  نسبت به خطاهای سیستماتیک بیشتر بدست آمد. یزدان خواه و میرلطیفی (۱۳۸۹) عملکرد پنج مدل تابشی و دمایی برآورد  $ET_0$  روزانه را در نه ایستگاه با اقلیم های مختلف ارزیابی و با استفاده از روش آماری چند متغیره تحلیل عاملی اهمیت نسبی متغیرهای هواشناسی موثر بر  $ET_0$  را بررسی نمودند. بر اساس نتایج آن ها در اقلیم مرطوب، مدل های تابشی و در دو اقلیم خشک و نیمه خشک و اقلیم بسیار خشک، مدل های دمایی عملکرد بهتری داشتند. در هر سه اقلیم، داده های دمایی حداقل و دمایی حداکثر بیشترین اهمیت را در تعیین  $ET_0$  داشتند. سیفی و همکاران (۱۳۸۹) امکان برآورد  $ET_0$  با استفاده از مدل ترکیبی رگرسیون چندگانه و تحلیل مولفه های اصلی (MLR-PCA) را بررسی و اهمیت نسبی متغیرهای موثر بر  $ET_0$  با استفاده از تحلیل عاملی را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج با توجه به داده های روزانه در ایستگاه سینوپتیک کرمان نشان داد که مقادیر متغیرهای شدت تابش، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی، دمایی حداقل و دمایی حداکثر برای برآورد تبخیر-تعرق از اهمیت بیشتری نسبت به سایر متغیرها برخوردارند.

روش دوم، استفاده از ضرایب حساسیت نسبی به همراه میزان خطا بوده است. تعیین میزان خطا به دو صورت خطای یکسان (مثلاً ۱۰٪) برای تمام متغیرهای هواشناسی (کای و همکاران، ۱۹۹۸) و خطای متفاوت برای هر متغیر که تنها از انحراف معیار داده ها ناشی می شود (هاپت و وانکلاستر، ۲۰۰۱) بدست آمده بود. در نهایت، مشخص شد که در تحقیقات گذشته از مشتقات جزئی مرتبه اول و دوم  $ET_0$  نسبت به هر متغیر و هم پراشی پارامترهای هواشناسی در برآورد میزان خطای استاندارد  $ET_0$  استفاده نشده است. برای بررسی تاثیر این عوامل در میزان خطای استاندارد مدل های مختلف برآورد  $ET_0$  این تحقیق در اقلیم خشک و نیمه خشک کرمان با اهدافی به شرح زیر انجام شده است:

(۱) بررسی تغییرات مقادیر پراشی پارامترهای موثر در برآورد  $ET_0$  در طی روزهای سال، (۲) تعیین هم پراشی یا ضریب همبستگی

باشد. یک منبع خطا، خطای در خصوصیت حسگر و تنظیمات دستگاه های اندازه گیری و یا قرائت داده ها توسط تکنیسین ها است (باون ۱۹۷۹، مایر و همکاران ۱۹۸۹، ریچی و همکاران ۱۹۹۶). منبع دوم خطا در نتیجه برآورد متغیرهای جوی دیگر بر اساس داده های هواشناسی قابل دسترس می باشد. مانند تشعشع خورشیدی که از درصد ساعت آفتابی یا درصد پوشش ابر توسط تامپسون، ۱۹۷۶ و لیندزی و فانسورث، ۱۹۷۷ بدست آمده است. منبع سوم خطا مربوط به فواصل زمانی نمونه برداری از داده های آب و هوایی است. به طور مثال میانگین گیری از داده های برداشت شده در فواصل زمانی مشخص بسته به اینکه فاصله زمانی چقدر باشد متفاوت است و هر چه تعداد اندازه گیری ها بیشتر باشد مقدار میانگین محاسبه شده به واقعیت نزدیکتر است (هاپت و وانکلاستر، ۲۰۰۱؛ بختیاری و همکاران، ۱۳۸۹). این پژوهشگران (بختیاری و همکاران، ۱۳۸۹) تاثیر بازه زمانی اندازه گیری تشعشع طول موج کوتاه خورشید، سرعت باد، دمایی هوا و رطوبت نسبی در برآورد  $ET_0$  (مدل پنمن-مونتیث استاندارد ASCE) در ایستگاه هواشناسی خودکار مستقر در مزرعه دانشگاه شهید باهنر کرمان را بررسی نمودند. نتایج نشان داد که شدت تابش خورشید و سرعت باد از حساس ترین متغیرهای هواشناسی موثر بر ارزیابی در اثر بازه زمانی نمونه برداری ناکافی بوده اند. به طوری که خطای روزانه ای معادل ۱۲/۶٪ برای شدت تابش و ۱۳/۶٪ برای سرعت باد در اثر ناکافی بودن نمونه گیری متغیرها به دست آمد. به علاوه، تاثیر ناکافی بودن نمونه گیری زمانی در برآورد  $ET_0$  روزانه با توجه به حداکثر ارزیابی ۰/۴۱ میلی متر بر روز به سبب نمونه برداری ناکافی شدت تابش خورشید معنی دار بوده است. منبع چهارم خطا، که برآورد متوسط روزانه  $ET_0$  را تحت تاثیر قرار می دهد و در سوابق تحقیق به آن اشاره نشده است مربوط به پراش و هم پراشی داده ها و تاثیر مشترک آن ها در برآورد خطای استاندارد  $ET_0$  است. علاوه بر این، وابستگی پراش و هم پراشی داده ها در برآورد خطا برای هر یک از متغیرهای آب و هوایی و مدل های مختلف، متفاوت خواهد بود. به هر حال، در تحقیقات گذشته برای بررسی تاثیر خطای داده ها در برآورد  $ET_0$  دو رویکرد مورد استفاده قرار گرفته است.

روش اول، آنالیز حساسیت مدل های مختلف برآورد  $ET_0$  به خصوص مدل FPM56 در طی روزهای سال نسبت به پارامترهای مختلف هواشناسی و تعیین ضرایب حساسیت نسبی بوده است (مک کوئن، ۱۹۷۴؛ باون، ۱۹۷۹؛ رانا و کاترجی، ۱۹۹۸؛ کوئی و همکاران، ۱۹۹۸؛ بويس و همکاران، ۲۰۰۶؛ گانگ و همکاران، ۲۰۰۶؛ استوز و همکاران، ۲۰۰۹؛ یزدان خواه و میرلطیفی ۱۳۸۹). به عنوان نمونه بويس و همکاران (۲۰۰۶) با آنالیز حساسیت مدل های فائو پنمن-مونتیث، هارگریوز دمایی، پرستلی-تیلور، تورک و هاگریوز تابشی در سه منطقه اقیانوسی، نیمه حاره ای و مدیترانه ای فرانسه و برای بررسی تغییرات زمانی پارامترهای تابش، رطوبت نسبی، سرعت باد و

اندازه‌گیری‌های دمای حداقل و حداکثر، سرعت باد، ساعت آفتابی، رطوبت نسبی حداقل و حداکثر در ساعات‌های مختلف انجام می‌شود. میانگین ۲۵ ساله در دوره آماری مورد مطالعه برای پارامترهای مختلف هواشناسی این ایستگاه از جمله دما ۱۶/۱ درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۳۴/۱ درصد، بارندگی ۱۰۸ میلی‌متر در سال، تبخیر از سطح تشت ۲۶۸۱ میلی‌متر در سال (۲۵ برابر باران سالانه)، ساعت آفتابی ۹ ساعت در روز، سرعت باد (در ارتفاع دو متری) ۲ متر بر ثانیه می‌باشد.

### معادلات برآورد تبخیر - تعرق مرجع

با توجه به اینکه در این تحقیق داده‌های روزانه مورد بررسی قرار گرفته است بنابراین از بین معادلات تجربی موجود برای محاسبه  $ET_0$ ، معادلاتی انتخاب شد که اول) برای مقیاس روزانه مناسب باشند، دوم) قبلاً توسط سایر محققین مورد استفاده واقع شده باشند به عبارت دیگر رایج باشند و سوم) بعضی از آنها حداکثر و بعضی دیگر حداقل پارامتر را نیاز داشته باشند. بر این اساس هفت معادله تجربی انتخاب شد که نام و روابط ریاضی آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است. پارامترهای آب و هوایی مورد نیاز برای معادلات منتخب در جدول ۲ آورده شده است.

پارامترهای موثر در برآورد  $ET_0$ ، تجزیه و تحلیل حساسیت مدل‌های مختلف به عوامل آب و هوایی و محاسبه ضرایب حساسیت روزانه برای داده‌های آب و هوایی مورد نظر، (۴) تعیین کردن، از طریق ترکیب مراحل (۱)، (۲) و (۳)، خطای استاندارد (پراش) مدل‌های برآورد  $ET_0$  (۵) بررسی عدم قطعیت در ساختار ریاضی معادلات مختلف برآورد  $ET_0$  روزانه

### مواد و روش‌ها

#### محدوده مطالعاتی و خصوصیات آب و هوایی آن

با توجه به تاثیر بسزای مولفه تبخیر و تعرق در معادله بیلان آب خاک در مناطق خشک و نیمه خشک این مطالعه در شهرستان کرمان با وسعت ۴۵۴۰۱ کیلومتر مربع در جنوب شرقی ایران انجام گردیده است. مهمترین محصولات تحت آبیاری در این منطقه بر اساس آمار سال زراعی ۱۳۸۹-۱۳۸۸ شامل باغات پسته با ۴۶۷۰۰ هکتار، گندم ۳۲۰۰ هکتار، جو ۱۹۰۰ هکتار و یونجه ۴۰۵۰ هکتار می‌باشند (سایت سازمان جهاد کشاورزی کرمان).

در این مطالعه آمار ۲۵ سال (۲۰۰۸-۱۹۸۴ میلادی) داده‌های هواشناسی روزانه از ایستگاه سینوپتیک با مشخصات جغرافیایی ۱۵° ۳۰' عرض شمالی و ۵۸° ۵۶' طول شرقی و ارتفاع ۱۷۵۴ متر از سطح دریا در غرب شهر کرمان استفاده گردیده است. در این ایستگاه

جدول ۱- روابط ریاضی و علایم اختصاری معادلات منتخب برای برآورد  $ET_0$

معادله	مرجع	نماد اختصاری	روابط ریاضی برآورد $ET_0$
فائو پنمن - مونتیث	Allen et al. (1998)	FPM56	$\frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{ave} + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$
فائو بلانی - کریدل	Doorenbos and Pruitt (1975)	FBC	$a + b[P(0.46T_{ave} + 8.13)]$
پریستلی - تیلور	Bois et al. (2006)	PT	$\propto \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} 0.408 (R_n - G)$
هارگریوز - سامانی	Allen et al. (1998)	HS	$0.0055K_{RS}(T_{ave} + 17.8)\sqrt{T_{max} - T_{min}}R_a$
هارگریوز	Allen et al. (1998)	H	$0.0023R_a(T_{ave} + 17.8)\sqrt{T_{max} - T_{min}}$
ایرماک - $R_s$	Alkaeed et al. (2006)	Ir- $R_s$	$-0.611 + 0.149R_s + 0.079T_{ave}$
ایرماک - $R_n$	Alkaeed et al. (2006)	Ir- $R_n$	$0.489 + 0.289R_n + 0.023T_{ave}$

$ET_0$  تبخیر و تعرق گیاه مرجع ( $mm\ day^{-1}$ )،  $R_n$  تابش خالص در سطح پوشش گیاهی ( $MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$ )،  $G$  شار گرمایی خاک ( $MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$ ) که در دوره‌های زمانی روزانه مقدار  $G$  صفر فرض می‌شود،  $\gamma$  ثابت سایکرومتری ( $kPa\ ^\circ C^{-1}$ )،  $T_{ave}$  دمای متوسط در ارتفاع ۲ متری ( $^\circ C$ )،  $U_2$  سرعت باد در ارتفاع ۲ متری ( $m\ s^{-1}$ )،  $e_s$  فشار بخار اشباع ( $kPa$ )،  $e_a$  فشار بخار واقعی ( $kPa$ )،  $\Delta$  شیب منحنی فشار بخار ( $kPa\ ^\circ C^{-1}$ )،  $a$  و  $b$  ضرایب اقلیمی می‌باشند که به  $N$ ،  $R_{h_{min}}$  و  $U_2$  بستگی دارند (علیزاده، ۱۳۸۵).  $P$  درصد ساعات روشنایی برای یک روز در ماه مورد نظر در مقایسه با ساعات روشنایی روز در طول یک سال (علیزاده، ۱۳۸۵)،  $\alpha$  ضریب تجربی بدون بعد و معادل  $1/26$ ،  $K_{RS}$  ضریب اصلاحی است که مقدار آن بین  $0.16$  تا  $0.19$  تغییر می‌نماید. مقدار کمتر برای مناطق خشک و نیمه خشک و مقدار بزرگتر برای مناطق ساحلی می‌باشد.  $T_{min}$  و  $T_{max}$  حداکثر و حداقل دمای روزانه هوا ( $^\circ C$ )،  $R_a$  تابش فرا زمینی ( $MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$ ) و  $R_s$  تابش موج کوتاه ( $MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$ ) می‌باشد.  $\Delta$  به دمای حداقل و حداکثر،  $\gamma$  به دمای حداقل و حداکثر و فشار هوا،  $R_a$  به روز ژئوسوسی و عرض جغرافیایی و  $R_s$  به ساعت آفتابی بستگی دارد.

جدول ۲- مقایسه معادلات منتخب برآورد  $ET_0$  نسبت به تعداد پارامترهای مورد نیاز

پارامترها/معادلات	FPM56	FBC	PT	HS	H	Ir-Rs	Ir-Rn
$T_{min}$ (°C)	لازم	لازم	لازم	لازم	لازم	لازم	لازم
$T_{max}$ (°C)	لازم	لازم	لازم	لازم	لازم	لازم	لازم
$Rh_{min}$ (%)	لازم	لازم	لازم	-	-	-	لازم
$Rh_{max}$ (%)	لازم	-	لازم	-	-	-	لازم
n (hr)	لازم	لازم	لازم	-	-	-	لازم
$U_2$ (m s <sup>-1</sup> )	لازم	لازم	-	-	-	-	-

### بازسازی و کنترل کیفی داده ها

در طول دوره آماری داده های  $T_{min}$ ،  $T_{max}$  و n به ترتیب ۰/۰۹، ۰/۰۸ و ۱/۹ درصد دارای نقص بودند که از روش جایگزینی با میانگین بلند مدت بازسازی شدند. با توجه به اینکه  $T_{max}$  و  $T_{min}$  در تمامی مدل های منتخب اساسی ترین پارامتر برای برآورد  $ET_0$  می باشند، لذا این پارامترها با برنامه RclimDex کنترل کیفی گردیدند. این برنامه با استفاده از نرم افزار آماری R (نسخه ۱-۱۳-۲، ۲۰۱۱) اجرا گردیده و برای شناسایی داده های پرت کاربرد دارد. همچنین دسترسی به آن به صورت رایگان (<http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/software.shtml>) امکان پذیر است.

آید:

$$S_i = \frac{\partial ET_0}{\partial V_i} \frac{V_i}{ET_0} \quad (1)$$

که در آن  $S_i$ : ضریب حساسیت بدون بعد پارامتر  $i$ -ام و  $V_i$ : مقدار مثبت یا منفی بودن ضریب حساسیت هر متغیر، نشان دهنده این است که با افزایش آن، مقدار  $ET_0$  افزایش یا کاهش می یابد. کاربرد این معادله زمانی با اشکال مواجه می شود که مقادیر  $V_i$  یا  $ET_0$  به طور جداگانه به سمت صفر میل کنند که در این حالت مقدار معنی داری برای  $S_i$  بدست نمی آید (هاپت و وانکلاستر، ۲۰۰۱).

### خطای استاندارد (پراش) $ET_0$

خطای استاندارد (پراش) یک رخداد هیدرولوژی مانند تبخیر و تعرق بصورت زیر محاسبه می شود (کایت، ۱۹۸۵):

$$Var_{ET_0} = \left\{ \sum_{i=1}^{n_{max}} \left[ \left( \frac{\partial ET_0}{\partial x_i} \right)^2 Var(x_i) \right] \right\} + 2 \left\{ \sum_{i=1}^{n_{max}-1} \sum_{j=i+1}^{n_{max}} \left[ \frac{\partial^2 ET_0}{\partial x_i \partial x_j} Cov(x_i, x_j) \right] \right\} \quad (2)$$

که در آن:

کوواریانس یا هم پراشی یک شاخص آماری است که چنانچه دو متغیر همبستگی نداشته باشند (مستقل باشند) و به عبارت دیگر تحت تاثیر عوامل مشترکی نباشند، هم پراشی آن ها برابر با صفر می باشد. اگر همبستگی دو متغیر مثبت باشد هم پراشی نیز مثبت است و اگر همبستگی منفی باشد هم پراشی نیز منفی خواهد بود. در عمل از هم پراشی برای تعیین درجه همبستگی استفاده نمی گردد، زیرا مقدار هم پراشی نسبت به واحد اندازه گیری تغییر می نماید. بنابراین با استفاده از ضریب همبستگی (رابطه ۳)، هم پراشی بی بعد شده و از این طریق متغیرها با یکدیگر قابل محاسبه می باشند (رضایی، ۱۳۸۰).

$$r(x_i, x_j) = \frac{Cov(x_i, x_j)}{S_{x_i} \times S_{x_j}} \quad (3)$$

که در آن  $I(x_i, x_j)$ : ضریب همبستگی جفت متغیرها،  $S_{x_i}$  و  $S_{x_j}$ :

### تعیین ضریب حساسیت

در این مطالعه، ضریب حساسیت نسبی بدون بعد (باون، ۱۹۷۶) برای تعیین واکنش  $ET_0$  به تغییرات پارامترهای هواشناسی (جدول ۲) به صورت جداگانه و برای مدل های مختلف از رابطه زیر بدست می

$Var_{ET_0}$ : خطای استاندارد (پراش) تبخیر و تعرق مرجع ( $mm^2 d^{-2}$ )،  $x_i$  و  $x_j$ : پارامترهای مختلف هواشناسی (واحد خود پارامتر)،  $\frac{\partial ET_0}{\partial x_i}$ : مشتق جزئی  $ET_0$  نسبت به هر پارامتر،  $Var(x_i)$ : پراش هر پارامتر (مربع واحد  $x_i$ )،  $Cov(x_i, x_j)$ : هم پراشی جفت پارامترها (حاصل ضرب واحد  $x_i$  در  $x_j$ ) و  $\frac{\partial^2 ET_0}{\partial x_i \partial x_j}$ : مشتق جزئی مرتبه دوم  $ET_0$  نسبت به جفت پارامترهای غیر یکسان،  $n_{max}$ : تعداد پارامترهای مورد نیاز هر معادله (جدول ۲). در این مطالعه برای یکسان شدن واحد های  $ET_0$  و خطای آن، از انحراف معیار  $ET_0$  ( $\sigma_{ET_0}$ ) استفاده می شود. انحراف معیار مهمترین و معتبرترین شاخص آماری برای نشان دادن پراکندگی داده ها نسبت به میانگین است (رضایی، ۱۳۸۰).

روزهای سال و بررسی عدم قطعیت در ساختار ریاضی معادلات برآورد  $ET_0$ .

### تغییرات، پراش و هم پراشی داده های هواشناسی

داده های هواشناسی ایستگاه کرمان برای محاسبه  $ET_0$  با مدل های منتخب (جدول ۱) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. ابتدا با استفاده از نرم افزار Minitab روند پارامترها به مدت ۲۵ سال (۱۹۸۴ الی ۲۰۰۸ میلادی) بررسی گردید. نتایج نشان داد شیب خط روند برای پارامترهای  $T_{max}$ ،  $T_{min}$ ،  $U_2$ ،  $\Delta$ ،  $Rh_{max}$  و  $Rh_{min}$  به ترتیب  $10^{-4} \times 2/39$ ،  $10^{-4} \times 2/1$ ،  $10^{-5} \times 5/7$ ،  $10^{-6} \times 3$ ،  $10^{-5} \times 9/2$  و  $10^{-4} \times 7/6$  می باشد. با جدول آزمون  $t$  مشخص شد که این مقادیر با صفر تفاوت معنی داری ندارند و بنابراین پارامترها در طی ۹۱۲۵ روز آمار موجود دارای روند نمی باشند. در مطالعات گل کار حمزی یزد (۱۳۸۹) در ایستگاه کرمان نیز مشخص شده بود به جز ساعت آفتابی سایر پارامترها (دمای حداکثر، دمای حداقل، سرعت باد، دمای نقطه شبنم و تبخیر- تعرق) در مقیاس سالانه روند معنی داری نداشتند. بنابراین با میانگین گیری از داده های روزهای یکسان در طول سال، شکل ۱ ترسیم شده است. تغییرات  $T_{max}$  و  $T_{min}$  در طول فصول سال مشابه هم می باشد. بررسی منحنی  $\Delta$  نشان می دهد که مقدار آن در زمستان و پاییز کم و در بهار و تابستان افزایش می یابد تا به حداکثر ۱۲ ساعت در طی روز می رسد. دامنه تغییرات سرعت باد کم و از ۰/۶ تا ۳/۶ متر بر ثانیه می باشد. بیشترین دامنه تغییرات مربوط به رطوبت حداکثر بوده به طوری که در طول سال تا ۶۰ درصد نوسان دارد.

انحراف معیار متغیرها (هم واحد با واحد متغیر)

زمانی که از مشتقات مرتبه دوم و هم پراشی پارامترها صرف نظر شود، از ترکیب ضریب حساسیت و مقدار خطا در متغیرهای هواشناسی (معادله ۴)، با استفاده از اختلافات محدود خطا در  $ET_0$  محاسبه می شود (هاپت و وانکلاستر، ۲۰۰۱). در مطالعه حاضر با استفاده از معادله ۴ و بر اساس آمار موجود نیز میزان خطا محاسبه و با نتایج حاصل از معادله ۲ مقایسه شده است.

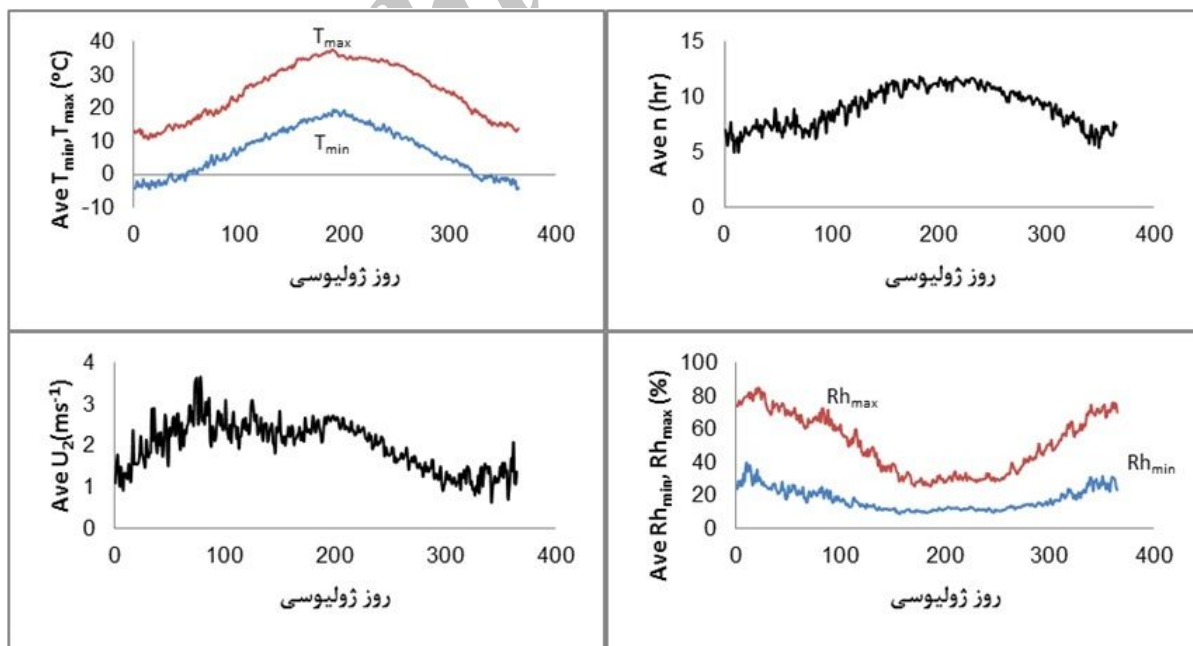
$$\Delta ET_0 = \sum_{i=1}^n S_i \frac{\Delta V_i}{V_i} ET_0 \quad (4)$$

که در آن  $\Delta ET_0$ : خطا در  $ET_0$  ( $mm \ d^{-1}$ )،  $\Delta V_i$ : انحراف معیار  $i$ -امین پارامتر و سایر پارامترها قبلاً تعریف شده اند.

بعد از مرحله بازسازی و کنترل کیفی داده های هواشناسی و اطمینان از صحت آن ها ابتدا مقدار پراش و هم پراشی پارامترها،  $ET_0$  و پراش آن (معادله ۲) در مدل های منتخب برای هر روز محاسبه گردید. سپس مقدار آن ها در روزهای هر سال تفکیک شده و میانگین مقادیر  $ET_0$  و خطای استاندارد آن ها در ۳۶۵ روز سال بدست آمد.

### نتایج و بحث

این بخش از تحقیق به سه زیر بخش تقسیم می شود: بررسی تغییرات داده های هواشناسی، پراش و هم پراشی آن ها در طول دوره آماری (۱۹۸۴-۲۰۰۸ میلادی)، بررسی تغییرات روزانه ضرایب حساسیت معادلات منتخب نسبت به پارامترهای هواشناسی در



شکل ۱- میانگین تغییرات روزانه شش پارامتر اصلی هواشناسی در ایستگاه سینوپتیک کرمان (۱۹۸۴ الی ۲۰۰۸ میلادی)

است. همانطور که از جدول ۴ مشخص است بیشترین ضریب همبستگی متوسط با مقدار  $0.52(+)$  مربوط به جفت پارامتر  $Rh_{max}$  و  $Rh_{min}$  و کمترین آن با مقدار  $0.03(+)$  مربوط به جفت پارامتر  $U_2$  و  $T_{max}$  می‌باشد.

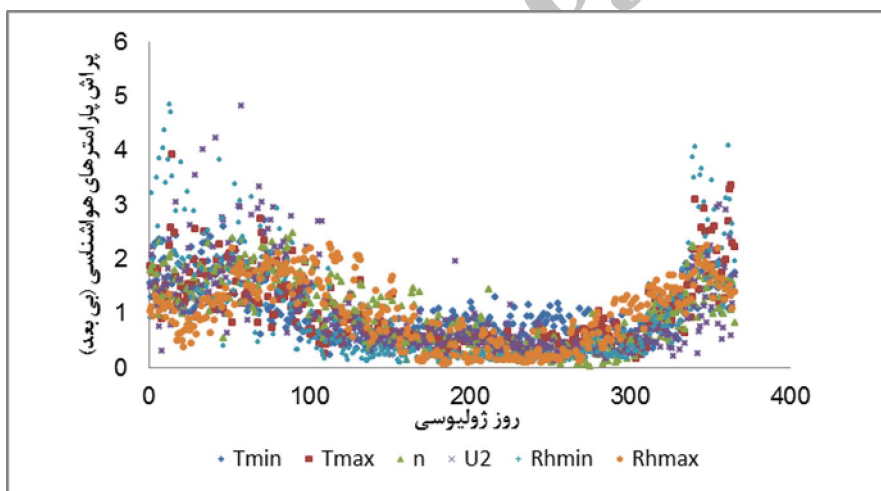
### تغییرات روزانه ضرایب حساسیت

ضرایب حساسیت روزانه پارامترهای هواشناسی در مدل‌های منتخب، تغییرات متفاوتی در طول سال دارند (شکل ۳). تحقیقات استوز و همکاران (۲۰۰۹) در مدل استاندارد ASCE پنمن-مونتیت نیز تغییرات زیاد ضرایب حساسیت در مقیاس روزانه و فصلی به خصوص برای دما و رطوبت نسبی را نشان داد.

برای بررسی نااطمینانی داده‌ها در طی روزهای سال و تعیین خطای استاندارد  $ET_0$  (معادله ۲)، پراش داده‌ها محاسبه و مقادیر متوسط، حداکثر و حداقل آن‌ها در جدول ۳ آورده شده است. همچنین برای بررسی تغییرات آن‌ها در طی روزهای سال ابتدا پراش هر پارامتر در روز به مقدار میانگین سالانه آن تقسیم گردید و سپس مقادیر بی بعد پراش شش پارامتر هواشناسی در مقابل روزهای سال در شکل ۲ ترسیم شده است. مشاهده شکل ۲ نشان می‌دهد تغییرات پراش تمام پارامترها تقریباً روند مشخصی داشته، به طوری که در زمستان و پاییز پراش داده‌ها بیشتر از بهار و تابستان می‌باشد. این بدین معنی است که نااطمینانی داده‌ها در فصول سرد سال که میزان تبخیر و تعرق کم بوده بیشتر از فصول گرم سال است. بیشترین پراش نیز مربوط به  $T_{min}$  است. پس از محاسبه مقادیر هم پراشی جفت داده‌ها، مقادیر ضریب همبستگی (معادله ۳) نیز محاسبه و نتایج آن در جدول ۴ آمده

جدول ۳- مقادیر پراش متوسط، حداکثر و حداقل شش پارامتر هواشناسی در ایستگاه کرمان (۲۰۰۸-۱۹۸۴)

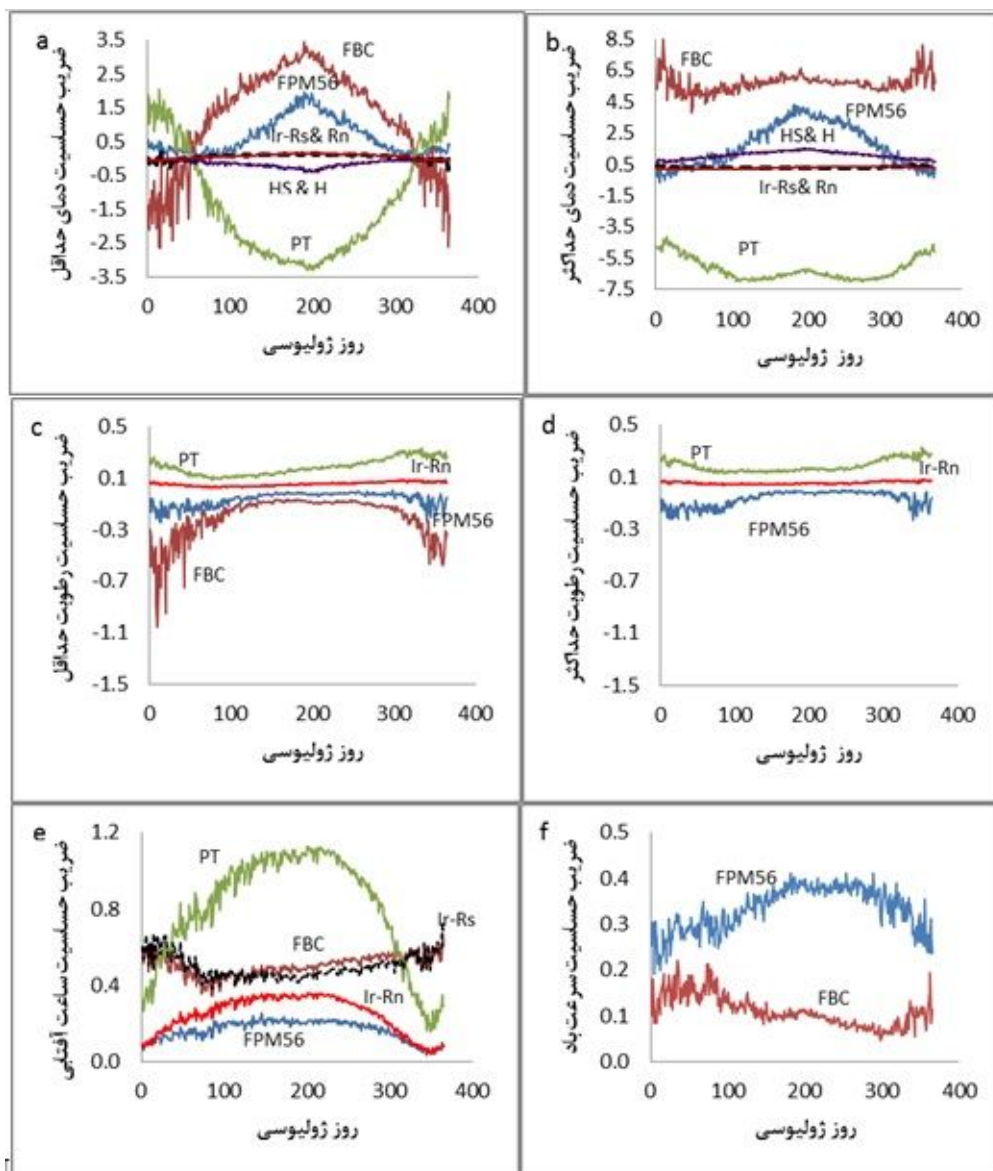
پارامترها						پراش
$T_{min}(^{\circ}C^2)$	$T_{max}(^{\circ}C^2)$	$n(hr^2)$	$U_2(m^2s^{-2})$	$Rh_{min}(\%^2)$	$Rh_{max}(\%^2)$	
۱۴/۹	۱۱/۷	۷/۳	۱/۶	۱۳۰/۲	۲۸۴/۶	متوسط
۴۰/۶	۴۶	۱۸	۷/۷	۶۳۰/۹	۶۴۳/۸	حداکثر
۳/۷	۲/۱	۰/۲	۰/۲	۱۱/۶	۲۳/۶	حداقل



شکل ۲- تغییرات مقادیر پراش پارامترهای موثر در  $ET_0$  در روزهای ژولیبوسی سال در ایستگاه کرمان

جدول ۴- ماتریس میانگین ضریب همبستگی پارامترهای هواشناسی در ایستگاه کرمان (۲۰۰۸-۱۹۸۴ میلادی)

پارامترها	$T_{min}$	$T_{max}$	$n$	$U_2$	$Rh_{min}$
$T_{max}$	۰/۳۲				
$n$	-۰/۴۳	۰/۱۵			
$U_2$	۰/۴۲	۰/۰۰۳	-۰/۱۶		
$Rh_{min}$	۰/۲۷	-۰/۳۹	-۰/۴۷	۰/۱	
$Rh_{max}$	۰/۰۲	-۰/۴۱	-۰/۳۳	-۰/۰۴۷	۰/۵۲



شکل ۳- نمودار میانگین ضریب حساسیت پارامترهای هواشناسی (a دمای حداقل، b دمای حداکثر، c رطوبت حداقل، d رطوبت حداکثر، e ساعت آفتابی و f سرعت باد در طی روزهای سال در ایستگاه کرمان در معادلات ، FBC، PT، HS & H، Ir-Rs، Ir-Rn.

و در مدل FBC منفی است. تغییرات این ضریب در چهار مدل دیگر بسیار اندک و مقدار حداکثر آن مانند سایر مدل‌ها در تابستان است. در شکل ۳b بیشترین ضریب حساسیت متغیر  $T_{max}$  به ترتیب در مدل‌های FBC، PT، FPM56، HS & H و  $Ir-R_s$  &  $R_n$  بدست آمده است. اثر متغیر  $T_{max}$  برای مدل‌های HS & H و  $Ir-R_s$  &  $R_n$  کم و مثبت می‌باشد. حساسیت مدل‌های مختلف نسبت به متغیرهای  $Rh_{min}$  و  $Rh_{max}$  نسبتاً کم و در ماه‌های سرد سال بیشتر از ماه‌های گرم می‌باشد (شکل ۳c و ۳d). تغییرات ضریب حساسیت پارامتر n در مدل‌های PT،  $Ir-R_s$ ، FBC،  $Ir-R_n$  و FPM56 مثبت بوده و تغییرات آن نسبت به فصول سال در مدل‌های  $Ir-R_s$  و FBC مشابه و

با مشاهده شکل ۳a مشخص می‌شود که حساسیت مدل‌های مختلف به پارامتر  $T_{min}$  متفاوت بوده و بیشترین حساسیت به ترتیب در مدل‌های FBC، PT، FPM56، HS & H و  $Ir-R_s$  &  $R_n$  بدست آمد. مدل FPM56 در زمستان به  $T_{min}$  حساسیت کمی دارد (حداکثر ۰/۵) و مقدار آن به تدریج افزایش می‌یابد تا اینکه در تابستان به مقدار حداکثر (۱/۷) می‌رسد. مقدار ضریب حساسیت در این مدل مثبت و با افزایش پارامتر  $T_{min}$  مقدار  $ET_0$  نیز افزایش می‌یابد. مدل‌های FBC و PT حساسیت کاملاً متفاوتی نسبت به  $T_{min}$  دارند. بطوریکه در زمستان و پاییز مقدار ضریب حساسیت در مدل PT مثبت

دامنه تغییرات انحراف استاندارد  $ET_0$  در طی سال معادل (۵/۴۹) -  $0/78$  (میلیمتر در روز) می باشد.

برای مقایسه انحراف معیار محاسبه شده از رابطه ۲ و حالتی که خطای استاندارد تنها از اختلافات محدود محاسبه می شود، با استفاده از رابطه ۴ نیز مقدار خطا در  $ET_0$  محاسبه شد. به عنوان مثال مقدار  $\Delta ET_0$  بدست آمده از مدل FPM56 در شکل ۵ آورده شده است.

همانگونه که از شکل ۵ مشخص است اشکال این رابطه در این است که در فصول سرد سال که دمای حداقل به سمت صفر میل می کند میزان خطا در  $ET_0$  بسیار زیاد ( $-480 \text{ mm d}^{-1}$ ) بدست می آید. بنابراین این رابطه تنها در حالتی مناسب می باشد که مقدار هر کدام از متغیرها به سمت صفر میل نکند. در واقع کاربرد آن نسبت به معادله (۲) محدود می باشد.

### بررسی عدم قطعیت در ساختار ریاضی معادلات پنج پارامتری

با بررسی منحنی پراش در معادله FBC (شکل ۴b)، میزان خطای استاندارد بسیار بزرگ می باشد. منحنی تغییرات انحراف معیار  $ET_0$  در طی روزهای سال دارای نوسانات زیادی بوده و حتی در ماه های زمستان که مقدار  $ET_0$  کم است، مقدار این خطا قابل توجه می باشد ( $8/5$  میلیمتر در روز). لذا به نظر می آید نحوه قرارگیری پارامترها در این معادله مناسب نمی باشد یا زمانی که خطای پارامترها ترکیب می شود تاثیر بسزایی بر روی هم می گذارند. مقدار انحراف معیار  $ET_0$  در معادله PT (شکل ۴c) در اکثر روزهای سال بیشتر از مقادیر  $ET_0$  روزانه بدست آمده است و روند مشخصی را دنبال نمی نماید. بیشترین خطای استاندارد در ماه های زمستان و اوایل بهار و کمترین آن در ماه های پاییز اتفاق افتاده است. بنابراین تاثیر خطاها در پارامترهای هواشناسی زمانی که در این معادله ترکیب می شوند زیاد می باشد. همانطور که از شکل ۴g مشخص است. در این روش پارامترها طوری قرار گرفته اند که میزان خطای آن ها بطور جداگانه و ترکیب آن ها اثر بسیار ناچیزی دارند.

### بررسی عدم قطعیت در ساختار ریاضی معادلات با پارامترهای

محدود

در هر سه معادله HS، H و  $Ir-R_s$  با توجه به حداقل پارامترهای مورد نیاز، مقدار انحراف معیار  $ET_0$  کم می باشد (شکل های ۴d، ۴e و ۴f). روند تغییرات منحنی انحراف استاندارد در دو مدل HS و H مشابه هم بوده و در فصول مختلف سال نوسان زیادی ندارد و حداکثر در روز ۲۴ اردیبهشت به  $1/09$  میلیمتر می رسد. در مدل  $Ir-R_s$  هر چند که روند تغییرات آن کمی با دو مدل دیگر تفاوت دارد ولی در طول سال نوسانات زیادی را نشان نمی دهد و حداکثر به  $0/96$  میلیمتر در روز ۸ فروردین می رسد.

برعکس مدل های  $PT$ ،  $Ir-R_n$  و FPM56 می باشد (شکل ۳e). پارامتر سرعت باد تنها در دو مدل FPM56 و FBC کاربرد دارد (شکل ۳f) و تغییرات این ضریب در مدل FPM56 بیشتر از FBC می باشد.

بطور کلی بیشترین ضریب حساسیت مربوط به دو پارامتر  $T_{max}$  و  $T_{min}$  است که در تمامی مدل های منتخب کاربرد دارند. نتایج تحقیقات یزدان خواه و میرلطیفی (۱۳۸۹) در مدل های فائو پنمن - مونتیث، پرستی - تیلور، تورک، ایرماک -  $R_s$ ، هارگریوز - سامانی و هارگریوز - سامانی اصلاح شده نشان داد که در هر سه اقلیم مرطوب، خشک و نیمه خشک و بسیار خشک داده های دمای حداقل و حداکثر بیشترین اهمیت را در تعیین  $ET_0$  داشتند.

### برآورد تبخیر و تعرق روزانه مرجع

با استفاده از معادلات منتخب (جدول ۱) ابتدا میزان  $ET_0$  روزانه در طی ۲۵ سال آمار موجود محاسبه و سپس مقادیر  $ET_0$  هر یک از روزهای سال مشخص گردید. بررسی روند این مقادیر با نرم افزار Minitab انجام و تنها به عنوان مثال، شیب خط روند مقادیر  $ET_0$  روزهای اول ژانویه که با مدل FPM56 محاسبه شده بودند، بسیار کم و معادل  $0/02$  بدست آمد. با جدول آزمون t مشخص شد که این مقادیر با صفر تفاوت معنی داری ندارند و بنابراین دارای روند نمی باشند. با اطمینان از عدم روند در داده ها، میانگین داده های  $ET_0$  برای تمامی معادلات در طی سال بدست آمد (شکل ۴). با مشاهده شکل مشخص است که معادله FBC، سایر معادلات تبخیر و تعرق را نسبت به معادله FPM56 کم برآورد می نمایند. نتیجه تحقیق جورج و همکاران (۲۰۰۲) نیز این مطلب را تصدیق می نماید.

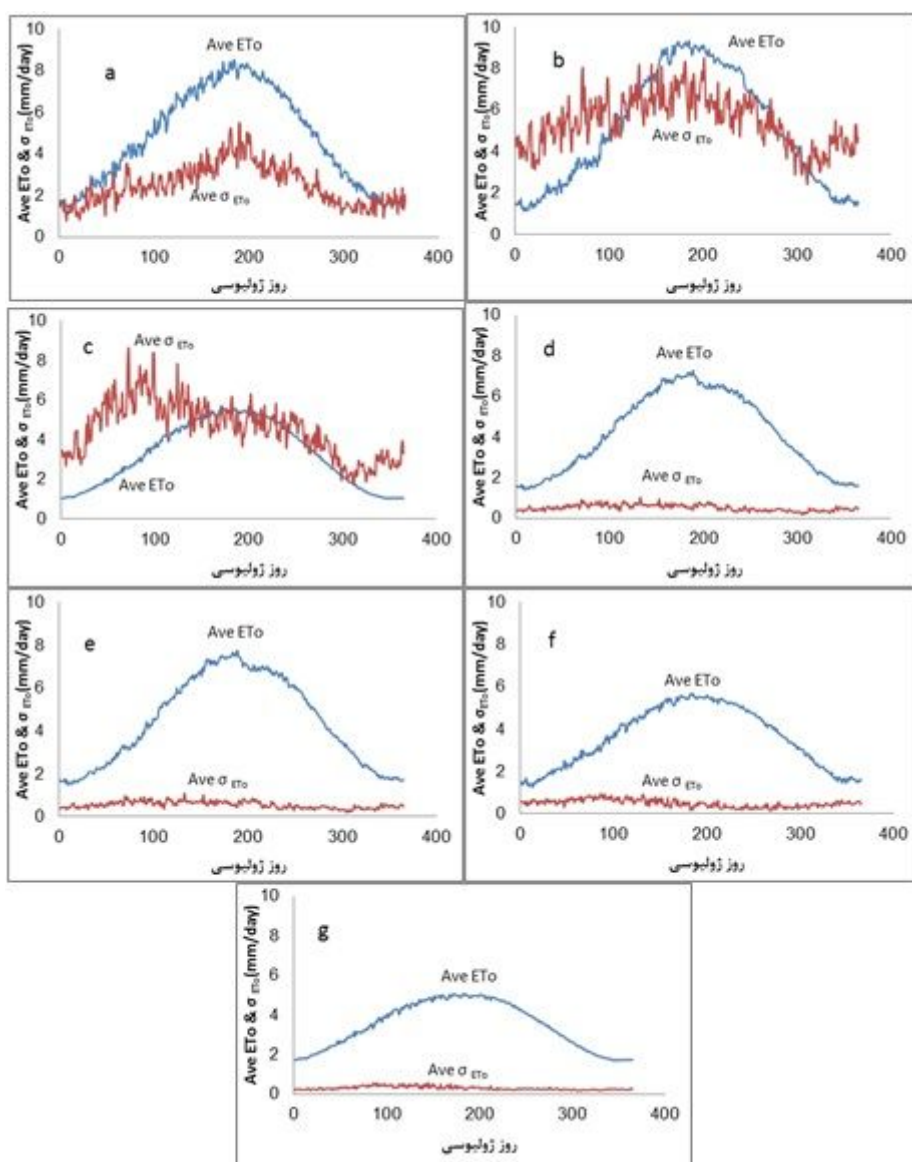
### محاسبه انحراف معیار $ET_0$

با استفاده از رابطه ۲ ابتدا  $Var_{ET_0}$  و سپس انحراف معیار  $(\sigma_{ET_0})$  در هر یک از روزهای سال در مدل های منتخب بدست آمد (شکل ۴). تجزیه و تحلیل این نمودارها با عناوین بررسی عدم قطعیت در ساختار ریاضی مدل استاندارد FPM56، مدل های پنج پارامتری و با پارامترهای محدود در قسمت های بعدی تشریح شده است.

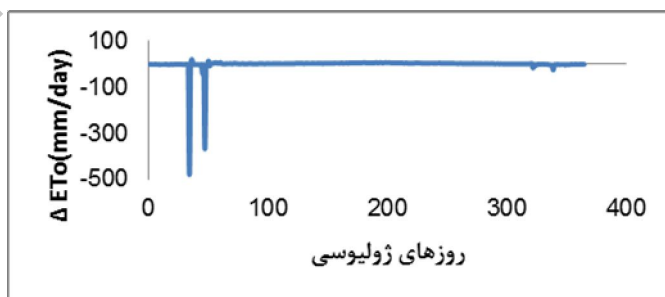
### بررسی عدم قطعیت در ساختار ریاضی معادله FPM56

تغییرات دو منحنی  $ET_0$  و  $\sigma_{ET_0}$  در طی فصول مختلف سال مشابه هم می باشد (شکل ۴a) بطوریکه در ماه های سرد سال کم و در ماه های گرم سال زیاد تعیین شده است. در گرمترین روز سال (روز ۱۹۰، نهم ماه ژولای معادل نوزدهم ماه تیر) حداکثر  $ET_0$  و  $\sigma_{ET_0}$  به ترتیب برابر  $8/5$  و  $5/5$  میلیمتر در روز بدست آمده است. هر چند که میزان انحراف معیار داده ها در ماه های گرم کمتر از ماه های سرد سال می باشد (شکل ۲) اما تاثیر بسزایی بر عدم قطعیت این معادله دارند.





شکل ۴- نمودار میانگین  $E_{T0}$  و  $\sigma_{ET0}$  (میلیمتر در روز) در طی روزهای سال در ایستگاه کرمان (۱۹۸۴-۲۰۰۸ میلادی) به ترتیب در معادلات (a) FPM56، (b) FBC، (c) PT، (d) HS، (e) H، (f)  $Ir-R_s$  و (g)  $Ir-R_n$



شکل ۵: نمودار میانگین  $\Delta E_{T0}$  (میلیمتر در روز) در طی روزهای سال در ایستگاه کرمان با استفاده از رابطه ۴

## نتیجه گیری

در تحقیق حاضر ساختار ریاضی مدل‌های مختلف برآورد  $ET_0$  از منظر حساسیت و خطای استاندارد (پراش) نسبت به ۶ پارامتر هواشناسی در مرکز استان کرمان به عنوان منطقه‌ای خشک و نیمه خشک با استفاده از ۲۵ سال آمار روزانه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تغییرات پراش تمام پارامترها تقریباً روند مشخصی دارند، بطوریکه در زمستان و پاییز پراش داده‌ها بیشتر از تابستان و بهار می‌باشد. با محاسبه هم پراشی و ضریب همبستگی پارامترها مشخص شد، بیشترین ضریب همبستگی با مقدار  $0.52$  (+) مربوط به جفت پارامتر  $Rh_{min}$  و  $Rh_{max}$  و کمترین آن با مقدار  $0.03$  (+) مربوط به جفت پارامتر  $U_2$  و  $T_{max}$  می‌باشد. تمامی مدل‌های منتخب به دو پارامتر  $T_{min}$  و  $T_{max}$  حساسیت بیشتری نسبت به سایر پارامترها دارند. این بدان معنی است که دقت در اندازه‌گیری این پارامترها بسیار مهم است. دامنه تغییرات انحراف استاندارد  $ET_0$  در طی سال به ترتیب  $(0.49-0.78)$ ،  $(0.43-0.85)$ ،  $(0.61-1.75)$ ،  $(0.03-1.18)$ ،  $(0.09-1.19)$ ،  $(0.16-0.96)$  و  $(0.56-1.55)$  میلی‌متر در روز در مدل‌های  $FPM56$ ،  $FBC$ ،  $PT$ ،  $HS$ ،  $H$ ،  $Ir-R_p$  و  $Ir-R_n$  حاصل شد. قابل توجه است که در مدل استاندارد  $FPM56$  نیز میزان انحراف استاندارد قابل توجهی وجود دارد. به هر حال، زمانی که در محاسبه میزان خطای  $ET_0$  هم پراشی پارامترها و مشتقات جزئی مرتبه اول و دوم  $ET_0$  نسبت به پارامترهای هواشناسی در نظر گرفته نشوند و تنها از اختلافات محدود ( $\Delta ET_0$ ) استفاده شود مقادیر خطای واقعی بدست نمی‌آیند. بر اساس داده‌های این پژوهش در فصول سرد سال که دمای حداقل به سمت صفر میل می‌کند  $\Delta ET_0$  بسیار زیاد ( $480 \text{ mm d}^{-1}$ ) بدست آمد.

بررسی عدم قطعیت در ساختار ریاضی مدل‌های منتخب نشان داد مدل‌های با پارامترهای محدود نسبت به مدل‌های پنج و شش پارامتری پراش کمتری داشته و تنها مدل  $Ir-R_n$  کمترین عدم قطعیت را داشت. با توجه به مباحث مطرح شده مشخص می‌شود که مقادیر پراش و هم پراشی پارامترها در مدل‌های منتخب یکسان می‌باشد در صورتیکه تعداد پارامترها و نحوه چینش آن‌ها در ساختار ریاضی مدل‌های برآورد  $ET_0$  است که سبب به وجود آمدن عدم قطعیت‌های متفاوت می‌گردد.

## مراجع

- Alizadeh, A. (2007), Irrigation system design. The first volume, published by Astan Quds Razavi. 450 pages. (in Farsi)
- Alkaeed, O., Flores, C., Jinno, K., and Tsutsumi, A. (2006), Comparison of Several Reference Evapotranspiration Methods for Itoshima Peninsula Area, Fukuoka, Japan. *Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University*, 66(1), 1-14.
- Allen, R.G., Jensen, M.E., Wright, J.L., Burman, R.D. (1989), Operational estimates of reference evapotranspiration. *Agron. J.*, 81(4), 650-662.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., and Smith, M. (1998), Crop evapotranspiration guideline for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper 56*. 1-281.
- Bakhtiari, B., Liaghat, A., and Khalili, A. (2010), Effect of period of meteorological variables measured to the estimated of grass reference crop water requirement in Kerman. *Iranian Journal of Irrigation and drainage*, 1(4), 83-89. (in Farsi)
- Beven, K., (1979), A sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration estimates. *Journal of Hydrology*, 44, 169-190.
- Blaney, H.F., Criddle, W.D. (1950), Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. *US Soil Conservation Service*, TP96.
- Bois, B., Pieri, P., Van Leeuwen, C., Gaudillere, J. P. (2006), Sensitivity analysis of the Penman-Monteith evapotranspiration formula and comparison of empirical methods used in viticulture soil water balance. [www-ecole.cnitab.fr/people/kees.vanleeuwen/articles/CI-24.pdf](http://www-ecole.cnitab.fr/people/kees.vanleeuwen/articles/CI-24.pdf). 1-6.
- Coleman, G., Decoursey, D. G. (1976), Sensitivity and Model Variance Analysis Applied to Some Evaporation and Evapotranspiration Models. *Water Resources Research*, 12(5), 873-879.
- Doorenbos, J., Pruitt, W. O. (1975), Guidelines for predicting crop water requirements. *FAO irrigation and drainage Paper 24*. FAO, (Food and Agriculture Organization of the United Nations), Rome, p. 156.
- Droogers, P., Allen, R.G. (2002), Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. *Irrig. Drain. Syst.*, 16(1), 33-45.
- Estevez J., Gavilan, P., and Berengena, J. (2009), Sensitivity analysis of a Penman-Monteith type equation to estimate reference evapotranspiration in southern Spain. Published online in *Wiley InterScience, Hydrol. Process*, 23, 3342-3353.
- Fooladmand, H. R. (2012), Comparing reference evapotranspiration using actual and estimated sunshine hours in south of Iran. *African Journal of Agricultural Research*, 7(7), 1164-1169.
- George, B. A., Reddy, B. R. S., Raghuvanshi, N. S. and Wallender, W. W. (2002), Decision support system for estimating reference evapotranspiration. *J. Irrig. Eng.*, 128(1), 1-10.
- Ahmadzadeh, K., Mirlatifi, M., and Mohammadi, K. (2000), Comparison of artificial intelligence systems (ANN AND ANIS) in the estimation of reference crop evapotranspiration in very dry areas of Iran. *J. Water and Soil*. No. 24/4, 679-689. (in Farsi)

- methodology to measure evaporation from bare soil based on comparison of surface temperature with a dry soil surface. *Journal of Hydrology*, 210, 93-105.
- Rana, G., 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. *Theoretical and Applied Climatology*, 60, 141-149.
- Rezai, A. (2001), Concepts of probability and statistics. Mashhad Publishing Co., 409 pages. (in Farsi)
- Ritchie, J.T., Howell, T.A., Meyer, W.S., Wright, J.L. (1996), Sources of biased errors in evaluating evapotranspiration equations. *Proceedings of the International Conference on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling*, San Antonio, USA, 147-157.
- Seyfi, A., Mirlatifi, S. M., Riahi, H. (2011). Developing a Combined Model of Multiple Linear Regression-Principal Component and Factor Analysis (MLR-PCA) for Estimation of Reference Evapotranspiration (Case Study: Kerman Station). *Journal of Water and Soil*, 24(6), 1186-1196. (in Farsi)
- Subburayan, S., Murugappan, A., and Mohan, S. (2011). Modified Hargreaves Equation for Estimation of ET<sub>0</sub> in a Hot and Humid Location in Tamilnadu State, India. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 3(1), 592- 600.
- Thornthwaite, C.W. (1948), An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.*, 38(1), 55-94.
- Unknown. Jahade-Agriculture Organization of Kerman. <http://www.agrijahad.kr.ir>. (in Farsi)
- Vaziri, J., Salamat, A., Entesari, M. R., Maschi, M., Heydari, N., and Dehghani Sanij, H. (2008), Evaporation- transpiration of plants. Iranian National Committee on Irrigation and Drainage, No. 122, 389 pages. (in Farsi)
- Yazdankhah, S., and Mirlatifi, S. M. (2011), Relative Importance of Meteorological Variables in Estimating Reference Evapotranspiration for Different Climatic Regions. *Iranian Journal of Irrigation and drainage*. No. 3, Vol. 4, 319-329.
- Zare Abyaneh, H., Bayate, M., Varkeshi, Sabziparvar, A. A., Marofi, S., and Ghasemi, A. (2010), Evaluation of different methods for estimating reference crop evapotranspiration and zoning in Iran. *Geography Research*, 74, 95-110. (in Farsi)
- Golkar Hamzei Yazd, H. R. (2010), Impact of climate change on time series changes of climate in Iran parameterization. *Geography Quarterly*, Third Year, 7, 91-103.
- Gong, L., Xu, C. Y., Chen, D., Halldin, S., and Chen, Y. D. (2006), Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Chanjing (Yangtze River) basin. *Journal of Hydrology*, 329, 620-629.
- Hargreaves, G.H., Samani, Z.A. (1985), Reference crop evapotranspiration from temperature. *Appl. Eng. Agric.*, 1(2), 96-99.
- Hupet, F., Vanclooster, M. (2001), Effect of the sampling frequency of meteorological variables on the estimation of the reference evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 243, 192-204.
- Irmak, S., Allen, R. G., and Whitty, E. B. (2003), Daily grass and alfalfa-reference evapotranspiration estimates and alfalfa-to-grass evapotranspiration ratios in Florida. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 129(5): 360-370.
- Jensen, M.E., Haise, H.R. (1963), Estimating evapotranspiration from solar radiation. *J. Irrig. Drain.*, 89(4), 15-41.
- Kite, G. W. (1985), Frequency and risk analyses in hydrology. Water resources publications. ISBN- 0-918334-23-3.
- Landeras, G., Barredo, A. O., and Lopez, J. J. (2008), Comparison of artificial neural network models and empirical and semi-empirical equations for daily reference evapotranspiration estimation in the Basque Country (Northern Spain). *Agricultural water management*, 95, 553 - 565.
- McCuen, R.H. (1974), A sensitivity and error analysis of procedures used for estimating evapotranspiration. *Water Resources Bulletin*, 10(3), 486-498.
- Meyer, S., Hubbard, K., and Wilhite, D. (1989), Estimating potential evapotranspiration: the effect of random and systematic errors. *Agricultural and Forest Meteorology*, 46, 285-296.
- Nandagiri, L., and Kovoov, M. G. (2006), Performance Evaluation of reference evapotranspiration equations across a range of indian climates. *Journal of Irrigation and drainage Engineering*, 132, 238-249.
- Penman, H.L. (1948), Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Royal Soc. Lond. A: Math. Phys. Sci.*, 193(1032), 120-145.
- Qui, G.Y., Yano, T., Momii, K. (1998), An improved

## Sensitivity Analysis and Uncertainty Parameters Affecting in The Estimation of Reference Evapotranspiration in Models With Different Mathematical Structure

A.Eslami<sup>1\*</sup> and B.Ghahraman<sup>2</sup>

### Abstract

Evapotranspiration is of fundamental components of water balance computations to estimate crop water requirement. To calculate this component there are a lot of direct methods which are expensive and time consuming. Many experimental methods such as FAO Penman-Monteith have been presented to calculate reference crop evapotranspiration. All  $ET_0$  estimation models with different mathematical structure relative to meteorological parameters have different sensitivities and standard errors in different climates. Hence, it is necessary to analysis uncertainty in mathematical structures of these models. In this study, in addition to sensitivity analysis of seven models of estimating  $ET_0$  relative to climatic parameters in Kerman station, also standard deviation value of  $ET_0$  was obtained based upon variance and covariance of parameters and first-and second-order partial derivatives of  $ET_0$  than these parameters. Results showed that data uncertainty in the cold seasons was more than warm seasons and all elected models had more sensitive to two parameter of  $T_{max}$  and  $T_{min}$ .

Moreover, the maximum correlation coefficient was obtained +0.52 which belongs to pair parameters of  $RH_{max}$  and  $RH_{min}$  and minimum one was +0.003 which belongs to pair parameters of  $U_2$  and  $T_{max}$ . Range of standard deviation of  $ET_0$  for FAO Penman-Monteith, Modified Blaney- Criddle, Prestly-Taylor, Hargreaves-Samani, Hargreaves, Irmak- $R_s$ , Irmak - $R_n$  were achieved 0.78-5.49, 2.43-8.5, 1.75-8.61, 0.18-1.03, 0.19-1.09, 0.16-0.96, 0.15-0.56  $mm d^{-1}$  during a year. Based on data in this research,  $\Delta ET_0$  is enormous ( $-480 mm d^{-1}$ ) in cold weather seasons when minimum temperature tends to zero.

**Key Words:** Sensitivity analysis, Uncertainty, Evapotranspiration, Standard deviation, Variance of data

1- PhD student of Ferdowsi University of Mashhad  
(\*-Corresponding Author Email: [amireslami.50@gmail.com](mailto:amireslami.50@gmail.com))  
2- Professor of Ferdowsi University of Mashhad