



## ارزیابی حساسیت مدل‌های برآورد تبخیر تعرق فائو ۵۶ و هارگریوز به پارامترهای بیشینه و کمینه دمای هوا در نواحی مرطوب شمال کشور

\*علی‌اکبر سبزی‌پرور<sup>۱</sup>، سامره سلیمانی<sup>۲</sup> و سیده‌شقایق میرمسعودی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشیار گروه آبیاری، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، <sup>۲</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد گروه آبیاری، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان  
تاریخ دریافت: ۸۸/۹/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۸۹/۵/۱۶

### چکیده

این پژوهش با هدف ارزیابی حساسیت مدل‌های برآورد تبخیر و تعرق پنمن-مانتیث-فائو ۵۶ (PMF-۵۶) و هارگریوز (HG) نسبت به متوسط بیشینه و کمینه دمای هوا در نواحی مرطوب شمال کشور تحت شرایط تغییر اقلیم انجام شد. به این منظور، با به‌کارگیری داده‌های هواشناسی ۵۰ ساله ۶ ایستگاه سینوپتیک بندرانزلی، رشت، رامسر، نوشهر، بابلسر و گرگان، مقادیر ET ماهانه با دو مدل بالا برآورد گردید. سپس مقادیر متوسط بیشینه و کمینه دمای هوا تحت سناریوهای مختلف به‌میزان ۱۰-۲ درصد تغییر داده شد و تغییرات ET در ازای این سناریوها محاسبه گردید. نتایج نشان داد که بیش‌ترین افزایش ET مربوط به مدل PMF-۵۶ به‌میزان ۲۳ درصد، به‌ازای افزایش ۱۰ درصد بیشینه دمای هوا، در ماه‌های رشد گیاه بوده است. برعکس، ۱۰ درصد افزایش نسبی در دمای کمینه هوا منجر به ۷ درصد کاهش در مقادیر ET در ماه‌های تابستان در ایستگاه‌های مورد مطالعه گردید. به‌طورکلی حساسیت دو مدل ذکر شده نسبت به بیشینه دمای هوا بیش‌تر از کمینه دمای هوا بود. نتایج نشان داد در مقادیر کم نوسانات دمایی (کم‌تر از ۸ درصد)، رفتار هر دو مدل تقریباً خطی بوده، ولی در نوسانات شدیدتر دمایی (بالای ۱۰ درصد) تغییرات ET غیرخطی می‌شود. مقایسه نتایج دو مدل نشان داد که به‌دلیل لحاظ شدن اثر پس‌خورد مؤلفه تابش خالص طول موج بلند و کمبود فشار بخار آب در مدل آیرودینامیکی پنمن، این مدل حساسیت منطقی‌تری را به نوسانات اقلیمی دمای بیشینه و دمای کمینه هوا از خود نشان می‌دهد. در ضمن، حساسیت مدل‌های به‌کار رفته نسبت به کمینه و بیشینه دمای هوا

\* مسئول مکاتبه: swsabzi@basu.ac.ir

متفاوت بوده و تا حدودی به موقعیت جغرافیایی و فصل سال بستگی دارد. در بررسی اثر پدیده‌های فرا اقلیمی مانند پدیده انسو، نوسانات اطلس شمالی و نوسانات مدیترانه‌ای بر دامنه تبخیر و تعرق گیاهی، استفاده از مدل‌های ساده مانند مدل هارگریوز توصیه نمی‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** تبخیر تعرق گیاه مرجع، سناریوهای تغییر اقلیم، بیشینه و کمینه دمای هوا، اقلیم مرطوب ساحلی

### مقدمه

تبخیر تعرق گیاه مرجع (ET<sub>c</sub>) یکی از مهم‌ترین اجزای چرخه هیدرولوژیکی است که تخمین صحیح آن در طراحی و مدیریت سیستم‌های آبیاری و زه‌کشی، زمان‌بندی آبیاری و مطالعات زیست‌محیطی و منابع آب از اهمیت به‌سزایی برخوردار می‌باشد. عوامل اصلی که بر تبخیر تعرق و آب مورد نیاز گیاه مؤثرند، به پارامترهای اقلیمی مانند دما، بارش، رطوبت، تابش خورشیدی و غیره وابسته می‌باشند. میزان تأثیر هر یک از این پارامترها بر میزان ET<sub>c</sub>، به شرایط جغرافیایی و آب و هوایی هر منطقه بستگی دارد. هر تغییری در پارامترهای اقلیمی، به‌علت افزایش دمای هوا، بر میزان تبخیر تعرق و آب مورد نیاز گیاه تأثیر خواهد گذاشت (هوارو و لی‌هوارو، ۱۹۹۳). بنابراین آگاهی از میزان تغییرات تبخیر تعرق، برای مدیریت و برنامه‌ریزی آینده منابع آبی و محصولات کشاورزی، الزامی خواهد بود. تاکنون مدل‌های مختلفی برای برآورد ET<sub>c</sub> ارائه شده که تفاوت عمده آن‌ها در تعداد پارامترهای هواشناسی مورد نیاز می‌باشد. این مدل‌ها از معادله‌های ساده و تجربی مانند تورنت‌ویث<sup>۱</sup> و بلانی‌کریدل<sup>۲</sup> که تنها به پارامتر دمای هوا نیاز دارند تا معادله‌های پیچیده‌تر مانند پنمن-مانتیث فائو<sup>۳</sup> (PMF-۵۶) که علاوه بر دمای هوا به تابش خورشیدی، سرعت باد و رطوبت نسبی نیازمند می‌باشند، متغیر هستند. این معادلات برای استفاده در شرایط اقلیمی مختلف، نیاز به واسنجی و ارزیابی دارند که این امر از طریق تحلیل حساسیت<sup>۴</sup> این مدل‌ها به پارامترهای هواشناسی، امکان‌پذیر می‌باشد (ایرماک و همکاران، ۲۰۰۶). نتایج پایپر (۱۹۸۹) نشان داد که درجه حرارت هوا بیش‌ترین اثر را در

- 1- Thornthwaite
- 2- Blaney-Criddle
- 3- Penman-Monteith FAO 56
- 4- Sensitivity Analysis

مدل پنمن دارد. مک کنی و روزنبرگ (۱۹۹۳) با بررسی حساسیت ۷ مدل برآورد ET نسبت به پارامترهای اقلیمی در آمریکا نتیجه گرفتند که حساسیت مدل‌ها نسبت به پارامترهای اقلیمی متفاوت بوده و بستگی به مکان و زمان از سال دارد. لی و همکاران (۱۹۹۴) حساسیت مدل پنمن-رایت را نسبت به پارامترهای اقلیمی مورد بررسی قرار داده و نتیجه گرفتند که بیشترین حساسیت مدل یاد شده نسبت به بیشینه و کمینه دمای هوا بوده است.

تغییرات تبخیر تعرق در نتیجه تغییرات دمایی توسط بسیاری از محققان (طبری و همکاران، ۲۰۰۹؛ زو و همکاران، ۲۰۰۶؛ وانگ و همکاران، ۲۰۰۷) به اثبات رسیده است. در خصوص حساسیت مدل‌های مختلف ET به پارامترهای هواشناسی نیز پژوهش‌هایی انجام گرفته است که از نقطه نظرهای مختلفی به بررسی موضوع پرداخته‌اند. در زیر به چند مورد از این بررسی‌ها اشاره می‌گردد. مطالعه سبزی پرور و همکاران (۲۰۰۸) بر روی حساسیت مدل‌های برآورد ET شامل PMF-۵۶، جنسن-هیز و هارگریوز<sup>۱</sup> (HG) به پارامترهای هواشناسی نشان داد که بیشترین حساسیت مدل‌های تبخیر تعرق به ترتیب به پارامترهای تابش خورشیدی و دمای هوا می‌باشد.

به اعتقاد محمود (۱۹۹۷) به‌ازای ۱ درجه سانتی‌گراد افزایش و کاهش دما در منطقه بنگلادش، تبخیر تعرق تمامی فصول به ترتیب ۵ درصد افزایش و ۴ درصد کاهش داشته است. هوپت و ونکلوزتر (۲۰۰۱) با بررسی تأثیر پارامترهای اقلیمی بر برآورد ET با استفاده از مدل PMF-۵۶ در بلژیک نتیجه گرفتند که تابش خورشیدی و سرعت باد به ترتیب مؤثرترین پارامترها در تعیین ET بوده‌اند. گویال (۲۰۰۴) مطالعه‌ای روی حساسیت تبخیر تعرق به گرمایش جهانی در منطقه راجستان هند انجام داد. بررسی انجام شده نشان داد که افزایش تابش خورشیدی تا ۲۰ درصد، موجب افزایش تبخیر تعرق به میزان ۱۱ درصد شده است. همچنین افزایش هم‌زمان ۱۰ درصدی درجه حرارت و فشار بخار آب و کاهش ۱۰ درصدی تابش خورشیدی، موجب کاهش تبخیر تعرق تا ۳ درصد گردید. نتایج وی همچنین نشان داد که افزایش هم‌زمان ۱۰ درصدی درجه حرارت و کاهش ۱۰ درصدی تابش خورشیدی، فشار بخار و سرعت باد موجب کاهش تبخیر تعرق تا ۰/۳۶ درصد شده است.

گه و همکاران (۲۰۰۶) با استفاده از داده‌های ۵۰ ساله، تغییرات مکانی و زمانی ET برآورد شده با مدل PMF-۵۶ و همچنین حساسیت آن را نسبت به پارامترهای اقلیمی در چین مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند و نتیجه گرفتند که ساعات آفتابی و سرعت باد به ترتیب مؤثرترین پارامترها بر ET

1- Hargreaves

بوده‌اند. ایرماک و همکاران (۲۰۰۶) حساسیت مدل پنمن-مانتیت انجمن مهندسان عمران آمریکا<sup>۱</sup> (ASCE) را به سرعت باد در ارتفاع ۲ متری، بیشینه و کمینه دمای هوا، کمبود فشار هوا و تابش خورشیدی در اقلیم‌های نیمه‌خشک، مدیترانه‌ای، مرطوب، مرطوب ساحلی، نیمه‌مرطوب و جزیره‌ای مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که بیش‌ترین حساسیت مدل مورد مطالعه به کمبود فشار هوا در تمامی نمونه‌های اقلیمی بوده است. لیکیاوو و همکاران (۲۰۰۸) با به‌کارگیری داده‌های ۴۵ ساله ایستگاه‌های واقع در حوضه رودخانه تائوئر در چین، حساسیت مدل PMF-۵۶ را نسبت به بیشینه، کمینه و میانگین دمای هوا، سرعت باد، ساعات آفتابی و رطوبت نسبی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد مؤثرترین پارامترها در تخمین ET با مدل PMF-۵۶ بوده‌اند.

مدل‌های خانواده پنمن دقیق‌ترین مدل‌ها برای محاسبه تبخیر تعرق در هر اقلیمی می‌باشند (کیو و همکاران، ۲۰۰۲). مدل PMF-۵۶، دقیق‌ترین مدل برای محاسبه ET می‌باشد که توسط سازمان خواروبار و کشاورزی جهانی (FAO<sup>۲</sup>) به‌عنوان مدل استاندارد معرفی شده است (آلن و همکاران، ۱۹۹۸). حتی در بسیاری از مطالعات به‌عنوان جایگزین لایسیمتر، این فرمول را به‌عنوان روش معادل در نظر می‌گیرند. مدل هارگریوز و سامانی (۱۹۸۲) (HG) نیز یکی از ساده‌ترین و دقیق‌ترین معادلات تجربی به‌کار رفته برای برآورد ET می‌باشد (جنسن و همکاران، ۱۹۹۷). برای مناطقی که پارامترهای هواشناسی اندکی در اختیار است می‌توان از روش HG به‌عنوان روشی مناسب جهت تخمین ET استفاده نمود. در ایران که با کمبود و نقص اطلاعات به‌خصوص کمبود داده‌های تابش مواجه هستیم مدل HG نیز مناسب ارزیابی شده است. کاربرد مدل‌های پیچیده که از داده‌های تابش استفاده می‌کند به‌علت تراکم و پراکنش نامناسب شبکه‌های تابش‌سنجی و کیفیت پایین داده‌ها، در بیش‌تر ایستگاه‌های کشور، محدود می‌شود (سبزی‌پرور و شتایی، ۲۰۰۷). بر این اساس، در این پژوهش از دو مدل PMF-۵۶ و HG جهت تخمین تبخیر تعرق گیاه مرجع چمن استفاده شده است. در این مطالعه، فرض شده که افزایش دمای بیشینه به افزایش تبخیر و تعرق گیاه و افزایش دمای کمینه به کاهش ET به‌صورت خطی منجر گردد. در مورد علت کاهش ET در زمان افزایش دمای کمینه باید پذیرفت که در مدل PMF-۵۶

1- American Society of Civil Engineering

2-Food and Agriculture Organization of the United Nations

افزایش دمای حداقل منجر به افزایش سهم تابش طول موج بلند (رابطه ۱۰) و افزایش فشار بخار اشباع (رابطه ۱۳) در مدل می‌شود. با افزایش مؤلفه موج بلند، سهم تابش خالص دریافت شده در سطح کاهش می‌یابد (به‌خصوص در ماه‌های فصل رشد گیاهان). در ضمن دامنه کمبود اشباع نیز افزایش و به‌دنبال آن طبق رابطه ۱ مقدار تبخیر و تعرق مرجع نیز کاهش می‌یابد.

با توجه به اهمیت تغییرات دمای بیشینه ( $T_{max}$ ) روزانه و دمای کمینه شبانه هوا ( $T_{min}$ ) که در مطالعات مختلف تغییر اقلیم گزارش شده و به‌دنبال خود تغییرات احتمالی در مؤلفه‌های چرخه هیدرولوژیکی از جمله تبخیر و تعرق گیاهی را موجب گردیده است، بررسی تغییرپذیری ET در صورت وقوع نوسانات دمای بیشینه و کمینه ضروری به‌نظر می‌رسد. با تغییر دماهای حداکثر و حداقل امکان تغییر دیگر پارامترهای هواشناسی وجود دارد. ثابت فرض نمودن دیگر پارامترهای هواشناسی در هنگام تغییر دما به‌خاطر مشاهده اثر مستقیم دما در نیاز آبی گیاه مرجع صورت گرفت تا امکان بحث براساس سناریوهای تغییر اقلیم فراهم گردد.

هدف از این پژوهش، بررسی حساسیت مدل‌های برآورد پهن مانیت استاندارد و هارگریوز به تغییرات میانگین دمای بیشینه و میانگین دمای کمینه می‌باشد. نتایج پژوهش می‌تواند دامنه تغییرات نیاز آبی گیاه مرجع را در صورت وقوع تغییر در میانگین‌های دمای بیشینه و دمای کمینه در شرایط آب و هوای مدیترانه‌ای پیش‌بینی نماید.

## مواد و روش‌ها

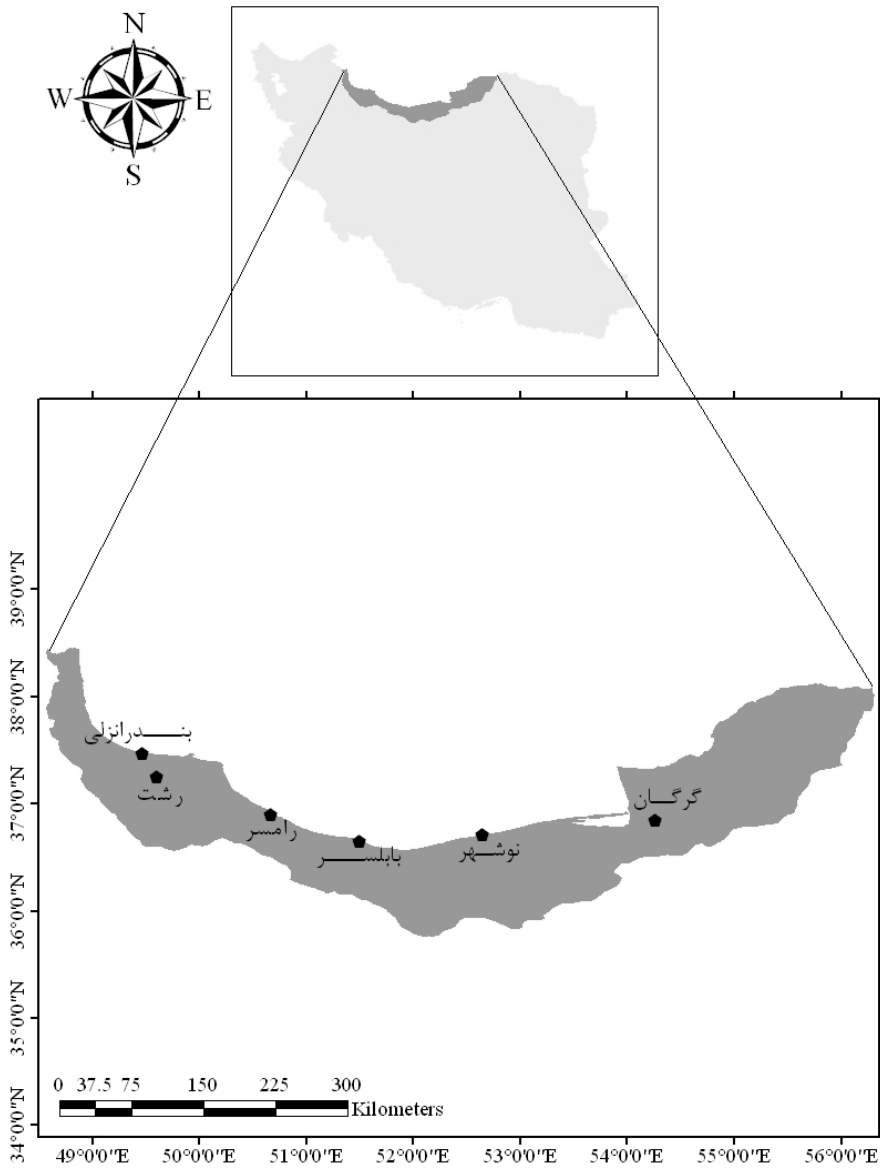
**منطقه مورد مطالعه:** منطقه مورد مطالعه شامل استان‌های گیلان، مازندران و گلستان می‌باشد که در شمال ایران واقع شده است. این منطقه با مساحت تقریبی ۵۹۰۱۹ کیلومتر مربع، در مختصات جغرافیایی ۴۸ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۵۶ درجه و ۱۹ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۴۶ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۲۷ دقیقه عرض شمالی قرار دارد (شکل ۱). این منطقه دارای اقلیم مدیترانه‌ای و آب و هوای معتدل و مرطوب معروف به آب و هوای معتدل خزری است. از جمله عوامل مؤثر بر آب و هوای این منطقه می‌توان به‌وجود کوه‌های البرز، جهت قرار گرفتن آن‌ها، ارتفاع از سطح دریا، نزدیکی به دریا، پوشش گیاهی، بادهای محلی، عرض جغرافیایی و ورود توده هوای مدیترانه‌ای دریای سیاه، اطلس

شمالی و سیبری- خزری اشاره نمود. میزان بارش سالانه در این نواحی به‌طور متوسط ۱۰۰۰ میلی‌متر بوده که بیش‌ترین آن در قسمت‌های غربی (آستارا ۱۳۸۰/۸ میلی‌متر، بندرانزلی ۱۸۵۳/۵ میلی‌متر) و کم‌ترین آن در نواحی شرقی (گرگان ۶۰۱ میلی‌متر، گنبد کاووس ۴۵۶/۲ میلی‌متر) است. همچنین درجه حرارت متوسط سالانه این منطقه بین ۱۵-۱۸ درجه سانتی‌گراد در نوسان می‌باشد.

در این پژوهش، از داده‌های روزانه ایستگاه‌های سینوپتیک رشت، بندرانزلی، رامسر، نوشهر، بابلسر و گرگان استفاده شد. قبل از به‌کارگیری داده‌ها، کیفیت آن‌ها مورد آزمون قرار گرفت. به این منظور ابتدا به‌صورت تجربی برخی داده‌های پرت با توجه به مقادیر حدی در هر ایستگاه شناسایی و از مجموعه داده‌ها حذف و سپس همگنی داده‌ها با استفاده از آزمون ساده ران (Run-test) مورد آزمون قرار گرفت. مشخصات جغرافیایی این ایستگاه‌ها در جدول ۱ و شکل ۱ ارایه شده است. پارامترهای اقلیمی مورد استفاده شامل بیشینه دمای هوا (درجه سانتی‌گراد)، کمینه دمای هوا (درجه سانتی‌گراد)، دمای نقطه شبنم (درجه سانتی‌گراد)، فشار بخار آب (هکتوپاسکال)، بیشینه رطوبت نسبی (درصد)، کمینه رطوبت نسبی (درصد)، سرعت باد (نات) و بارندگی (میلی‌متر) می‌باشد. میانگین ماهانه این پارامترها و همچنین نوع اقلیم و میانگین تبخیر تعرق (میلی‌متر بر روز) در دوره آماری مورد مطالعه در جدول ۲ درج شده است. در مواردی که خلاءهای آماری کوتاه‌مدت وجود داشت، نواقص آماری با روش‌های آماری توصیه شده تکمیل گردید.

جدول ۱- مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه.

دوره آماری به‌کار رفته	ارتفاع (متر)	مختصات جغرافیایی		نام ایستگاه	ردیف
		عرض	طول		
۱۹۵۶-۲۰۰۵	-۲۶/۲	۳۷ درجه و ۲۸ دقیقه	۴۹ درجه و ۲۸ دقیقه	بندرانزلی	۱
۱۹۵۶-۲۰۰۵	-۶/۹	۳۷ درجه و ۱۵ دقیقه	۴۹ درجه و ۳۶ دقیقه	رشت	۲
۱۹۵۶-۲۰۰۵	-۲۰	۳۶ درجه و ۵۴ دقیقه	۵۰ درجه و ۴۰ دقیقه	رامسر	۳
۱۹۷۷-۲۰۰۵	-۲۰/۹	۳۶ درجه و ۳۹ دقیقه	۵۱ درجه و ۳۰ دقیقه	نوشهر	۴
۱۹۵۶-۲۰۰۵	-۲۱	۳۶ درجه و ۴۳ دقیقه	۵۲ درجه و ۳۹ دقیقه	بابلسر	۵
۱۹۵۶-۲۰۰۵	۱۳/۳	۳۶ درجه و ۵۱ دقیقه	۵۴ درجه و ۱۶ دقیقه	گرگان	۶



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های به کار رفته.

جدول ۲- میانگین‌های اقلیمی سالانه ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره آماری ذکر شده.

نوع اقلیم (طبقه‌بندی کوپن)	ET <sub>0</sub> (PMF-۵۶) (میلی‌متر بر سال)	سرعت باد (Knot)	بارندگی (میلی‌متر بر سال)	کمینه نسبی رطوبت (درصد)	رطوبت نسبی (درصد)	نسبی (درصد)	فشار بخار (hPa)	دمای نقطه شبنم (درجه سانتی‌گراد)	دمای هوا (درجه سانتی‌گراد)	متوسط کمیته	متوسط بیشینه	نام ایستگاه
مدیترانه‌ای	۲/۱	۳/۹	۱۸۵۳/۵	۷۲/۸	۹۳/۳	۱۳/۱	۱۶/۴	۱۳/۲	۱۹/۲	۱۳/۲	۱۹/۲	پندرازنلی
مدیترانه‌ای	۲/۳	۲/۵	۱۳۵۹	۶۷	۹۶	۱۲/۶	۱۵/۹	۱۱/۳	۲۰/۶	۱۱/۳	۲۰/۶	رشت
جیب‌خارهای مرطوب	۲/۰۴	۳/۲	۱۲۱۷/۸	۷۲	۹۴	۱۳	۱۶/۳	۱۲/۶	۱۹/۴	۱۲/۶	۱۹/۴	رامسر
مدیترانه‌ای	۲/۰۳	۳/۲۳	۱۲۹۳/۵	۷۲/۱	۹۳/۳	۱۳/۳	۱۶/۷	۱۲/۷	۱۹/۵	۱۲/۷	۱۹/۵	نوشهر
مدیترانه‌ای	۲/۲	۲/۷	۸۹۴/۴	۶۷	۹۵	۱۳/۴	۱۶/۷	۱۳/۱	۲۰/۸	۱۳/۱	۲۰/۸	بابلسر
مدیترانه‌ای	۲/۶	۲/۱	۶۰۱	۵۳/۲	۸۴/۶	۱۱/۴	۱۴/۸	۱۲/۷	۲۲/۷	۱۲/۷	۲۲/۷	گرگان



روش انجام پژوهش: از آنجا که پارامتر دما نقش مهمی بر فرآیند تبخیر تعرق دارد، بنابراین در این مطالعه با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف، میزان حساسیت مدل‌های برآورد ET، سنجیده شده است. این سناریوها شامل افزایش و کاهش ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصدی  $T_{min}$ ،  $T_{max}$  و همچنین  $T_{min}$  و  $T_{max}$  به‌طور هم‌زمان می‌باشد. جهت تخمین ET، از نرم‌افزار REF-ET استفاده گردید. این نرم‌افزار توسط آلن (۲۰۰۰) ارایه شده و توانایی محاسبه ET، به ۱۷ روش برای گیاه مرجع چمن و یونجه را داراست. در این مطالعه، ET، با مدل‌های PMF-۵۶ و HG محاسبه شده است. نحوه به‌کارگیری داده‌ها در مدل REF-ET به این صورت بود که ابتدا همه داده‌های هواشناسی مورد نیاز به‌صورت روزانه اخذ و سپس میانگین ماهیانه آن‌ها محاسبه گردید. سپس این میانگین ماهیانه در ورودی REF-ET به‌کار گرفته شد تا میانگین ماهیانه ET، ها به‌دست آید. با احتساب این پارامترها در سناریوهای یاد شده، ET، دوباره توسط نرم‌افزار برآورد شده و نتایج با نتایج اولیه مورد مقایسه قرار گرفته است. به‌منظور بررسی حساسیت مدل‌های برآورد ET، نسبت به پارامتر دمایی، در هر مرحله متغیر مورد نظر را به اندازه ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد افزایش و یا کاهش داده و سایر پارامترها، ثابت نگه داشته شده تا به این صورت مشخص گردد که این افزایش یا کاهش، موجب چه تغییری در مقادیر ماهانه و سالانه ET، می‌گردد. سپس تفاوت مقادیر ET، به‌دست آمده از تغییر پارامترهای دمایی و ET، اولیه به‌صورت درصد تغییرات محاسبه گردید. در این پژوهش، ثابت فرض نمودن دیگر پارامترهای هواشناسی در هنگام تغییر دما به‌خاطر مشاهده اثر مستقیم دما در نیاز آبی گیاه مرجع صورت گرفت تا امکان بحث براساس سناریوهای تغییر اقلیم فراهم گردد. البته براساس مطالعات بی‌شمار انجام شده در زمینه تغییر اقلیم، از بین پارامترهای هواشناسی حداکثر تغییرات برای پارامتر دما به وقوع پیوسته و دامنه تغییرات دیگر پارامترها نسبت به دما بسیار کم‌تر بوده است (براساس گزارش‌های متعدد IPCC). لازم به ذکر است که در سناریوهای تعریف شده توسط هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم، محور اصلی سناریوها نیز تغییرات دما می‌باشد.

#### مدل‌های به‌کار رفته

۱- مدل پنمن - مانیتث فائو ۵۶: شکل نهایی معادله PMF-۵۶ به‌صورت زیر می‌باشد:

$$ET_c = \frac{0.4 \cdot \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (1)$$

در رابطه بالا، ET: تبخیر تعرق گیاه مرجع (میلی متر بر روز)،  $T_a$ : دمای هوا (درجه سانتی‌گراد)،  $U_2$ : سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (متر بر ثانیه)،  $R_n$ : تابش خالص خورشیدی (مگاژول بر مترمربع در روز)،

$(e_s - e_a)$ : کمبود فشار بخار اشباع هوا (کیلوپاسکال)،  $G$ : شار حرارتی خاک (مگاژول بر مترمربع در روز)،  $\Delta$ : شیب منحنی فشار بخار اشباع با دما (کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد) و  $\gamma$ : ثابت سایکرومتری (کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد) می‌باشند (آلن و همکاران، ۱۹۹۸). جزئیات محاسبه رابطه پنمن - مانتیث فائو ۵۶ توسط رابطه‌های ۲ تا ۱۹ ارایه شده است.  $R_{nl}$  و  $R_{ns}$  به ترتیب مؤلفه‌های طول موج کوتاه و طول موج بلند حرارتی تابش خالص می‌باشند. دیگر متغیرها به ترتیب عبارتند از:  $R_a$  (تابش برون‌جوی)،  $dr$  (ضریب تصحیح فاصله زمین تا خورشید)،  $\omega_s$  (زاویه ساعتی)،  $\delta$  (زاویه میل خورشید)،  $N$  (حداکثر طول روز)،  $e_s$  (فشار بخار آب در حالت اشباع)، و  $e_a$  (فشار بخار آب در دمای معمولی).

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (2)$$

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s = (1 - 0.23) R_s = 0.77 R_s \quad (3)$$

$$R_s = \left( a + b \frac{n}{N} \right) R_a \quad (4)$$

$$R_a = 37/6 d_r (\omega_s \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin \omega_s) \quad (5)$$

$$d_r = 1 + 0.23 \cos \left( \frac{2\pi}{365} \right) \quad (6)$$

$$\omega_s = \text{Arc cos}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (7)$$

$$\delta = 0.409 \sin \left( \frac{2\pi}{365} J - 1/39 \right) \quad (8)$$

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (9)$$

$$R_{nl} = \sigma \left( \frac{T_{\max}^i + T_{\min}^i}{2} \right) \left( 0.34 - 0.14 \sqrt{e_a} \right) \left( 1/35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \quad (10)$$

$$R_{so} = (a + b) R_a \quad (11)$$

$$e_a = \frac{RH_{mean}}{100} \times e_s \quad (12)$$

$$e_s = \frac{e^o(T_{\max}) + e^o(T_{\min})}{2} \quad (13)$$

$$e^o(T) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.62T}{T + 237.3}\right) \quad (14)$$

$$\Delta = \frac{250.4 \exp(17.62T / (T + 237.3))}{(T + 237.3)^2} \quad (15)$$

$$\gamma = 0.665 \times 10^{-T} P \quad (16)$$

$$P = 101/3 \left( \frac{293 - 0.065H}{293} \right)^{5/26} \quad (17)$$

$$U_r = \frac{4/87}{\ln(67/8z - 5/42)} u_z \quad (18)$$

$$G_{month_i} = 0.14(T_{month_i} - T_{month_{i-1}}) \quad (19)$$

$T_{month_i}$ : متوسط دمای هوا در ماه  $i$  (درجه سانتی گراد)، و  $T_{month_{i-1}}$ : متوسط دمای هوا در ماه قبلی (درجه سانتی گراد) می باشد.

مدل هارگریوز: این مدل توسط هارگریوز و آلن (۲۰۰۳) به رابطه ۲۰ پیشنهاد گردید. در این پژوهش، از این مدل تحت عنوان مدل هارگریوز (HG) نام برده می شود.

$$ET_c = 0.023 R_a (T_a + 17/8)(T_{\max} - T_{\min})^{1/5} \quad (20)$$

در معادله بالا،  $ET_c$ : تبخیر تعرق گیاه مرجع (میلی متر بر روز)،  $R_a$ : آب معادل تابش برون جوی (میلی متر بر روز)،  $T_a$ ،  $T_{\max}$  و  $T_{\min}$ : به ترتیب متوسط دما، متوسط بیشینه و متوسط کمینه دمای هوا (درجه سانتی گراد) می باشند. نحوه محاسبه تابش برون جوی در رابطه های ۵ تا ۹ ارایه شده است. لازم به ذکر است که در دماهای معمولی هر  $2/47$  مگاژول معادل ۱ میلی متر تبخیر روزانه در نظر گرفته می شود.

### نتایج و بحث

حساسیت مدل PMF-۵۶ به تغییرات بیشینه و کمینه دمای هوا: در جدول ۳، تغییرات  $ET_c$  برآورد شده با مدل PMF-۵۶ به ازای ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد افزایش و کاهش پارامترهای  $T_{\min}$  و  $T_{\max}$  در

ایستگاه بندرانزلی ارایه شده و براساس نتایج درج شده در این جدول، با افزایش  $T_{max}$ ، مقادیر ET در تمامی ماه‌ها در ایستگاه بندرانزلی افزایش یافته است. بیش‌ترین افزایش ET، در ماه‌های ژوئیه و اوت مشاهده گردید. با کاهش  $T_{max}$ ، ET در تمامی ماه‌ها به استثنای ژانویه کاهش یافته و بیش‌ترین کاهش در ماه‌های سپتامبر، اوت و ژوئیه در ایستگاه نام برده رخ داده است. با افزایش  $T_{min}$ ، ET در فصول پاییز و زمستان افزایش یافته و این در حالی است که مقادیر ET با افزایش  $T_{min}$  در فصول بهار و تابستان تقلیل یافته است. همچنین با کاهش  $T_{min}$ ، مقادیر ET ماه‌های فصل پاییز و همچنین ماه فوریه کاهش یافته، در حالی که مقدار ET با کاهش  $T_{min}$  در بقیه ماه‌ها در این ایستگاه افزایش داشته است. با افزایش  $T_{max}$  و  $T_{min}$  به‌طور هم‌زمان، مقادیر ET در تمامی ماه‌ها افزایش یافته و این امر بیانگر آن است که تأثیر  $T_{max}$  بر ET برآوردی توسط مدل PMF-۵۶ بیش از  $T_{min}$  می‌باشد. بیش‌ترین افزایش ET، در ماه‌های اکتبر، نوامبر و ژانویه و کم‌ترین افزایش ET، در ماه‌های فوریه و مارس رخ داده است. همچنین با کاهش هم‌زمان  $T_{max}$  و  $T_{min}$ ، مقادیر ET در تمامی ماه‌ها به استثنای ماه ژانویه به‌ازای کاهش ۲ و ۴ درصدی  $T_{max}$  و  $T_{min}$ ، کاهش یافته و بیش‌ترین کاهش ET در ماه‌های اکتبر و نوامبر رخ داده است. در ایستگاه بندرانزلی، بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار ET به‌ترتیب به‌ازای افزایش و کاهش ۱۰ درصدی  $T_{max}$  در ماه‌های سپتامبر، اوت و ژوئیه مشاهده شده است.

تغییرات ET برآورد شده با مدل PMF-۵۶ به‌ازای ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد افزایش و کاهش پارامترهای  $T_{max}$  و  $T_{min}$  برای ایستگاه رشت نیز ارزیابی شد. با افزایش  $T_{max}$ ، ET در تمامی ماه‌ها در ایستگاه رشت افزایش یافته است. بیش‌ترین افزایش ET، در ماه‌های سپتامبر، اوت و ژوئیه مشاهده گردید به‌طوری‌که با کاهش  $T_{max}$ ، ET در تمامی ماه‌ها به‌استثنای ماه ژانویه در ایستگاه نام برده کاهش یافته و بیش‌ترین کاهش در ماه‌های سپتامبر، اوت و ژوئیه در این ایستگاه رخ داده است. با افزایش  $T_{min}$ ، مقدار ET در فصول پاییز و زمستان افزایش یافته، در حالی که مقادیر ET با افزایش  $T_{min}$  در فصول بهار و تابستان کم شده است. همچنین کاهش  $T_{min}$  موجب تقلیل مقادیر ET در ماه‌های فصل پاییز و ماه فوریه شده است. با افزایش  $T_{max}$  و  $T_{min}$  به‌طور هم‌زمان، مقادیر ET در تمامی ماه‌ها در ایستگاه رشت افزایش داشته و بیش‌ترین افزایش ET، در ماه ژانویه و کم‌ترین افزایش ET، در ماه فوریه رخ داده است. با کاهش هم‌زمان  $T_{max}$  و  $T_{min}$ ، مقادیر ET در تمامی ماه‌ها به‌استثنای ماه ژانویه به‌ازای کاهش ۲، ۴ و ۶ درصدی  $T_{max}$  و  $T_{min}$ ، کاهش یافته و بیش‌ترین کاهش ET، در ماه‌های نوامبر و اکتبر در این ایستگاه مشاهده شده است. به‌طورکلی، بیش‌ترین و کم‌ترین تغییرات ET به‌ترتیب به‌ازای افزایش و کاهش ۱۰ درصدی  $T_{max}$  در ماه اوت در ایستگاه رشت به‌دست آمده است.

جدول ۳- برآورد تغییرات نسبی ET (بر حسب درصد) توسط مدل PMF-۵۶ به ازای ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد افزایش و کاهش پارامترهای دمایی در ایستگاه بندرانزلی.

تغییرات دما (درصد)	پارامتر	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مه	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
+۲	T <sub>max</sub>	۸	۲	۳	۴	۴	۵	۵	۵	۵	۵	۴	۲
	T <sub>min</sub>	۸	۰	۰	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	۰	۱	۱
	T <sub>max</sub> و T <sub>min</sub>	۹	۳	۴	۴	۴	۳	۳	۳	۳	۳	۴	۴
-۲	T <sub>max</sub>	۵	-۲	-۲	-۳	-۳	-۴	-۴	-۵	-۵	-۴	-۴	-۲
	T <sub>min</sub>	۵	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۰	-۱	-۱	-۱
	T <sub>max</sub> و T <sub>min</sub>	۴	-۲	-۲	-۳	-۳	-۳	-۳	-۴	-۴	-۵	-۴	-۴
+۴	T <sub>max</sub>	۹	۴	۶	۸	۹	۹	۹	۹	۹	۹	۷	۶
	T <sub>min</sub>	۹	۱	۰	-۱	-۲	-۲	-۲	-۳	-۲	-۱	۱	۳
	T <sub>max</sub> و T <sub>min</sub>	۱۲	۵	۵	۶	۶	۶	۷	۷	۷	۹	۱۰	۹
-۴	T <sub>max</sub>	۴	-۴	-۵	-۷	-۹	-۹	-۹	-۹	-۱۰	-۱۰	-۹	-۷
	T <sub>min</sub>	۵	-۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۱	۰	-۲	-۲
	T <sub>max</sub> و T <sub>min</sub>	۱	-۵	-۵	-۶	-۷	-۷	-۷	-۸	-۹	-۹	-۱۰	-۱۰
+۶	T <sub>max</sub>	۱۰	۷	۸	۱۰	۱۳	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۱۳	۱۱
	T <sub>min</sub>	۹	۱	۰	-۲	-۳	-۴	-۴	-۴	-۳	-۲	۲	۴
	T <sub>max</sub> و T <sub>min</sub>	۱۴	۸	۹	۹	۹	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۲	۱۳	۱۱
-۶	T <sub>max</sub>	۳	-۶	-۸	-۱۰	-۱۳	-۱۴	-۱۴	-۱۴	-۱۵	-۱۵	-۱۳	-۱۱
	T <sub>min</sub>	۴	-۱	۰	۲	۳	۳	۳	۳	۳	۱	-۲	-۴
	T <sub>max</sub> و T <sub>min</sub>	-۱	-۷	-۸	-۹	-۱۰	-۱۰	-۱۰	-۱۰	-۱۲	-۱۳	-۱۴	-۱۴
+۸	T <sub>max</sub>	۱۲	۹	۱۲	۱۵	۱۷	۱۸	۱۸	۱۸	۱۸	۱۷	۱۶	۱۳
	T <sub>min</sub>	۱۰	۱	۰	-۲	-۴	-۵	-۵	-۶	-۵	-۲	۲	۴
	T <sub>max</sub> و T <sub>min</sub>	۱۷	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۱۷	۱۹	۱۴
-۸	T <sub>max</sub>	۱	-۹	-۱۰	-۱۴	-۱۸	-۱۹	-۱۹	-۱۹	-۲۰	-۲۰	-۱۷	-۱۱
	T <sub>min</sub>	۳	-۱	۱	۳	۴	۴	۴	۴	۳	۰	-۳	-۵
	T <sub>max</sub> و T <sub>min</sub>	-۴	-۱۰	-۱۰	-۱۱	-۱۳	-۱۴	-۱۴	-۱۴	-۱۵	-۱۸	-۱۹	-۱۵
+۱۰	T <sub>max</sub>	۱۷	۱۱	۱۳	۱۷	۲۱	۲۳	۲۳	۲۳	۲۳	۲۳	۲۱	۱۸
	T <sub>min</sub>	۱۲	۲	۰	-۳	-۶	-۷	-۷	-۷	-۶	-۳	۳	۶
	T <sub>max</sub> و T <sub>min</sub>	۲۱	۱۳	۱۵	۱۵	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶	۱۷	۱۸	۲۲	۱۹
-۱۰	T <sub>max</sub>	۰	-۱۱	-۱۳	-۱۸	-۲۲	-۲۴	-۲۴	-۲۴	-۲۵	-۲۵	-۲۲	-۱۳
	T <sub>min</sub>	۱	-۲	۰	۳	۴	۵	۵	۴	۶	۴	-۳	-۶
	T <sub>max</sub> و T <sub>min</sub>	-۶	-۱۲	-۱۳	-۱۵	-۱۷	-۱۷	-۱۷	-۱۷	-۱۸	-۱۹	-۲۴	-۱۹

براساس نتایج ارایه شده در جدول ۴، ET در تمامی ماه‌ها به‌ازای افزایش  $T_{max}$  در ایستگاه رامسر افزایش یافته و بیش‌ترین افزایش ET در ماه‌های اوت و ژوئیه در این ایستگاه رخ داده است. همچنین با کاهش  $T_{max}$ ، ET در تمامی ماه‌ها به‌استثنای ژانویه کاهش یافته که بیش‌ترین مقدار آن در ماه‌های اوت و ژوئیه مشاهده شده است. با افزایش  $T_{min}$ ، ET در فصول پاییز و زمستان در ایستگاه رامسر افزایش یافته و این در حالی است که مقادیر ET با افزایش  $T_{min}$  در فصول بهار و تابستان کاسته شده و با کاهش  $T_{min}$ ، مقادیر ET در ماه‌های فصل پاییز و همچنین در ماه‌های فوریه و مارس به‌ازای کاهش ۶، ۸ و ۱۰ درصدی  $T_{min}$ ، کاهش یافته است. افزایش هم‌زمان  $T_{max}$  و  $T_{min}$ ، موجب افزایش مقادیر ET در تمامی ماه‌ها در ایستگاه رامسر شده و بیش‌ترین افزایش ET در ماه‌های سپتامبر، اکتبر و ژانویه و کم‌ترین آن در ماه فوریه مشاهده شده است. با کاهش  $T_{max}$  و  $T_{min}$  به‌طور هم‌زمان، مقادیر ET در تمامی ماه‌ها به‌استثنای ماه ژانویه به‌ازای کاهش ۲ و ۴ درصدی  $T_{max}$  و  $T_{min}$ ، کاسته شده و بیش‌ترین کاهش ET در ماه اکتبر و سپتامبر به‌دست آمده است. به‌طورکلی، بیش‌ترین و کم‌ترین تغییرات ET به‌ترتیب به‌ازای افزایش و کاهش ۱۰ درصدی  $T_{max}$  در ماه اوت در ایستگاه رامسر به‌دست آمده است که مشابه الگوی مشاهده شده در ایستگاه رشت می‌باشد.

تغییرات ET برآورد شده با مدل PMF-۵۶ به‌ازای ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد افزایش و کاهش پارامترهای  $T_{min}$  و  $T_{max}$  برای ایستگاه نوشهر نیز نشان داد که در این ایستگاه نیز به‌ازای افزایش  $T_{max}$  در تمامی ماه‌ها ET افزایش یافته و بیش‌ترین افزایش ET به‌ازای افزایش  $T_{max}$  در ماه‌های اوت و ژوئیه و ژوئن مشاهده شده است. با کاهش  $T_{max}$ ، مقادیر ET در تمامی ماه‌ها به‌استثنای ژانویه کاسته شده که بیش‌ترین کاهش در ماه‌های اوت و ژوئیه رخ داده است. با افزایش  $T_{min}$ ، ET در فصول پاییز و زمستان افزایش و در فصل‌های بهار و تابستان کاهش یافته و کاهش  $T_{min}$  موجب کم شدن مقادیر ET، ماه‌های فصل پاییز و همچنین ماه فوریه به‌ازای کاهش ۱۰ درصدی  $T_{min}$ ، شده است. روند افزایشی مقادیر ET در تمامی ماه‌ها به‌ازای افزایش توأمان  $T_{max}$  و  $T_{min}$  در ایستگاه نوشهر نیز مشاهده گردید. بیش‌ترین افزایش ET در ماه‌های اکتبر، نوامبر و ژانویه و کم‌ترین افزایش در ماه فوریه رخ داده است. همچنین با کاهش  $T_{max}$  و  $T_{min}$  به‌طور هم‌زمان، مقادیر ET در تمامی ماه‌ها به‌استثنای ماه ژانویه به‌ازای کاهش ۲، ۴ و ۶ درصدی  $T_{max}$  و  $T_{min}$ ، کاسته شده و بیش‌ترین کاهش ET در ماه‌های اکتبر و سپتامبر مشاهده شده است. به‌طورکلی، بیش‌ترین تغییرات ET به‌ازای افزایش ۱۰ درصدی  $T_{max}$  در ماه‌های اوت و ژوئیه و ژوئن و کم‌ترین تغییرات ET به‌ازای کاهش ۱۰ درصدی  $T_{max}$  در ماه‌های اوت و ژوئیه در ایستگاه نوشهر به‌دست آمده است.

جدول ۴- برآورد تغییرات نسبی ET (بر حسب درصد) توسط مدل PMF-۵۶ به ازای ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد افزایش و کاهش پارامترهای دمایی در ایستگاه رامسر.

تغییرات دما (درصد)	پارامتر	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مه	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
+۲	T <sub>max</sub>	۶	۲	۲	۳	۴	۴	۴	۵	۴	۴	۳	۲
	T <sub>min</sub>	۸	۰	۰	۰	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	۰	۱	۱
	T <sub>max</sub> و T <sub>min</sub>	۹	۲	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۲
-۲	T <sub>max</sub>	۵	-۲	-۳	-۳	-۳	-۳	-۳	-۳	-۳	-۳	-۳	-۲
	T <sub>min</sub>	۶	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۰	-۱	۰
	T <sub>max</sub> و T <sub>min</sub>	۴	-۲	-۳	-۳	-۳	-۳	-۳	-۳	-۳	-۳	-۳	-۲
+۴	T <sub>max</sub>	۸	۴	۶	۶	۷	۸	۹	۹	۹	۸	۶	۴
	T <sub>min</sub>	۸	۰	۰	-۱	-۲	-۲	-۲	-۳	-۲	-۲	۱	۲
	T <sub>max</sub> و T <sub>min</sub>	۱۰	۵	۵	۶	۶	۶	۷	۷	۷	۷	۷	۶
-۴	T <sub>max</sub>	۴	-۴	-۶	-۶	-۷	-۸	-۹	-۱۰	-۱۰	-۹	-۷	-۵
	T <sub>min</sub>	۵	۰	۱	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۰	-۱	-۱
	T <sub>max</sub> و T <sub>min</sub>	۳	-۵	-۶	-۶	-۷	-۷	-۷	-۷	-۷	-۸	-۷	-۶
+۶	T <sub>max</sub>	۹	۷	۷	۷	۱۰	۱۲	۱۳	۱۴	۱۴	۱۳	۱۱	۸
	T <sub>min</sub>	۹	۱	۰	-۱	-۳	-۳	-۳	-۴	-۴	-۲	۱	۲
	T <sub>max</sub> و T <sub>min</sub>	۱۳	۷	۹	۹	۹	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۹
-۶	T <sub>max</sub>	۴	-۶	-۸	-۸	-۱۰	-۱۳	-۱۴	-۱۵	-۱۵	-۱۴	-۱۱	-۸
	T <sub>min</sub>	۴	-۱	-۱	-۱	۲	۳	۳	۳	۳	۲	-۱	-۲
	T <sub>max</sub> و T <sub>min</sub>	۰	-۷	-۸	-۹	-۱۰	-۱۰	-۱۰	-۱۰	-۱۱	-۱۱	-۱۱	-۹
+۸	T <sub>max</sub>	۱۰	۸	۸	۱۱	۱۶	۱۶	۱۸	۱۸	۱۸	۱۶	۱۳	۹
	T <sub>min</sub>	۹	۱	۰	-۱	-۴	-۴	-۵	-۶	-۵	-۴	۱	۳
	T <sub>max</sub> و T <sub>min</sub>	۱۶	۸	۱۰	۱۰	۱۴	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳	۱۴	۱۲
-۸	T <sub>max</sub>	۳	-۸	-۱۱	-۱۱	-۱۳	-۱۷	-۱۹	-۲۰	-۲۰	-۱۹	-۱۴	-۹
	T <sub>min</sub>	۴	-۱	-۱	-۱	۳	۳	۳	۴	۴	۲	-۲	-۲
	T <sub>max</sub> و T <sub>min</sub>	-۱	-۸	-۱۱	-۱۱	-۱۲	-۱۲	-۱۳	-۱۴	-۱۴	-۱۵	-۱۴	-۱۱
+۱۰	T <sub>max</sub>	۱۴	۱۰	۱۰	۱۲	۱۶	۱۶	۲۰	۲۲	۲۲	۲۲	۱۸	۱۱
	T <sub>min</sub>	۱۰	۱	۰	-۲	-۴	-۴	-۷	-۷	-۷	-۷	۱	۴
	T <sub>max</sub> و T <sub>min</sub>	۱۷	۱۱	۱۴	۱۴	۱۶	۱۶	۱۶	۱۷	۱۷	۱۷	۱۸	۱۵
-۱۰	T <sub>max</sub>	۱	-۱۰	-۱۳	-۱۳	-۱۷	-۲۱	-۲۴	-۲۵	-۲۶	-۲۴	-۱۸	-۱۱
	T <sub>min</sub>	۳	-۱	-۱	۱	۳	۳	۵	۵	۵	۳	-۱	-۴
	T <sub>max</sub> و T <sub>min</sub>	-۴	-۱۱	-۱۳	-۱۵	-۱۷	-۱۷	-۱۸	-۱۹	-۱۹	-۲۰	-۱۸	-۱۵

مشابه سایر ایستگاه‌ها، در ایستگاه بابلسر نیز با افزایش  $T_{max}$ ، مقادیر ET، در تمامی ماه‌ها افزایش یافته و بیش‌ترین افزایش ET در ماه‌های اوت و ژوئیه و ژوئن می‌باشد. مقادیر ET به‌ازای کاهش  $T_{max}$ ، در تمامی ماه‌ها به‌استثنای ژانویه کاسته شده، به‌طوری‌که بیش‌ترین کاهش در ماه‌های اوت و ژوئیه و ژوئن در ایستگاه نام برده مشاهده شده است. مشابه با دیگر ایستگاه‌های منطقه، مقادیر ET در فصول بهار و تابستان و ماه مارس به‌ازای افزایش  $T_{min}$  کاهش یافته و با کاهش  $T_{min}$ ، مقادیر ET در فصل پاییز و همچنین ماه فوریه به‌ازای کاهش ۸ و ۱۰ درصدی  $T_{min}$ ، در ایستگاه بابلسر کاسته شده و با افزایش هم‌زمان  $T_{max}$  و  $T_{min}$ ، مقادیر ET در تمامی ماه‌ها افزایش یافته که مشابه با الگوی مشاهده شده در ایستگاه‌های منطقه می‌باشد. بیش‌ترین افزایش ET به‌ازای افزایش هم‌زمان  $T_{max}$  و  $T_{min}$ ، در ماه ژانویه و کم‌ترین افزایش در ماه فوریه رخ داده است. با کاهش هم‌زمان  $T_{max}$  و  $T_{min}$ ، مقادیر ET در تمامی ماه‌ها به‌استثنای ماه ژانویه به‌ازای کاهش ۲، ۴ و ۶ درصدی  $T_{max}$  و  $T_{min}$  کاهش یافته و بیش‌ترین کاهش نسبی ET در ماه‌های سپتامبر و اوت در این ایستگاه مشاهده شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان چنین نتیجه گرفت که بیش‌ترین و کم‌ترین تغییرات مشاهده شده تبخیر و تعرق مرجع در ایستگاه بابلسر به‌ترتیب به‌ازای افزایش و کاهش ۱۰ درصدی  $T_{max}$  در ماه‌های اوت و ژوئیه بوده است.

براساس نتایج به‌دست آمده برای گرگان (جهت کاهش حجم مقاله جدول‌های مربوطه ارایه نگردید) می‌توان چنین استنباط نمود که حساسیت ET برآورد شده با مدل PMF-۵۶ تحت سناریوهای مختلف (افزایش و کاهش پارامترهای  $T_{max}$  و  $T_{min}$ ) از الگویی مشابه با دیگر ایستگاه‌های منطقه پیروی می‌نماید. نتایج نشان داد که مقادیر ET به‌ازای افزایش  $T_{max}$  در تمامی ماه‌ها در ایستگاه نام برده روند صعودی داشته و بیش‌ترین افزایش ET در ماه‌های اوت و ژوئیه می‌باشد. با کاهش  $T_{max}$ ، مقدار ET برای ایستگاه گرگان در تمامی ماه‌ها به‌استثنای ژانویه کاسته شده و بیش‌ترین کاهش در ماه‌های اوت و ژوئیه رخ داده است.

با افزایش  $T_{min}$ ، مقدار تبخیر و تعرق مرجع در فصول بهار و تابستان و همچنین در ماه مارس به‌ازای افزایش ۶، ۸ و ۱۰ درصدی  $T_{min}$  در ایستگاه گرگان کاسته شده و با کاهش  $T_{min}$ ، مقادیر ET در فصل پاییز کاهش داشته و بیش‌ترین کاهش در ماه نوامبر مشاهده شده است. با افزایش هم‌زمان  $T_{max}$  و  $T_{min}$ ، مقادیر ET در تمامی ماه‌ها افزایش یافته و کم‌ترین افزایش ET در ایستگاه گرگان در ماه فوریه رخ داده است. همچنین با کاهش هم‌زمان  $T_{max}$  و  $T_{min}$ ، مقادیر ET در تمامی ماه‌ها به‌استثنای ماه ژانویه کاسته شده و بیش‌ترین کاهش نسبی ET در این ایستگاه مربوط به ماه‌های اوت و ژوئیه می‌باشد. بیش‌ترین و کم‌ترین تغییرات ET در ایستگاه گرگان، به‌ترتیب به‌ازای افزایش و کاهش ۱۰ درصدی  $T_{max}$  در ماه‌های اوت و ژوئیه به‌دست آمده است.



نتایج کلی برای همه ایستگاه‌ها نشان داد که با افزایش  $T_{max}$ ، مقادیر ET، در تمامی ماه‌ها افزایش یافته و بیش‌ترین افزایش نسبی ET در ماه‌های اوت و ژوئیه مشاهده شده است. سبزی پرور و همکاران (۲۰۰۸) نیز در پژوهش خود دریافتند که در ایستگاه همدان بیش‌ترین حساسیت مدل PMF-۵۶ نسبت به پارامترهای دما و تابش در ماه‌های اوت و ژوئیه به وقوع پیوسته است.

حساسیت مدل هارگریوز به تغییرات بیشینه و کمینه دمای هوا: در این بخش، از بحث در مورد حساسیت ET برآورد شده توسط مدل هارگریوز نسبت به تغییرات  $T_{min}$  و  $T_{max}$  در تک‌تک ایستگاه‌ها خودداری می‌گردد. به‌عنوان نمونه، تغییرات نسبی ET برآورد شده توسط مدل هارگریوز به‌ازای ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد افزایش و کاهش پارامترهای دمایی در ایستگاه‌های بندر انزلی و رامسر در جدول‌های ۵ و ۶ ارائه شده است. نتایج بیانگر آن است که در ایستگاه‌های ذکر شده (و بقیه ایستگاه‌ها که نتایج آن‌ها به‌دلیل کاهش حجم مقاله ارائه نگردیده است) با افزایش  $T_{max}$ ، مقادیر ET در همه ماه‌ها افزایش یافته و بیش‌ترین افزایش نسبی ET در ماه‌های اوت و ژوئیه مشاهده شده است. سبزی پرور و همکاران (۲۰۰۸) نیز در پژوهش خود نتیجه گرفتند که بیش‌ترین حساسیت مدل HG به پارامتر دما در ایستگاه همدان در ماه‌های اوت و ژوئیه می‌باشد.

نتایج نیز نشان داد که کاهش  $T_{min}$  تحت سناریوهای ذکر شده، موجب افزایش مقادیر ET در تمامی ماه‌ها شده است و بیش‌ترین میزان افزایش مربوط به ماه‌های اوت و ژوئیه می‌باشد (به‌طور مثال برای بندرانزلی تا ۱۲ درصد به‌ازای ۱۰ درصد کاهش دمای کمینه). با افزایش  $T_{min}$ ، مقادیر ET در همه ماه‌ها کاهش یافته است (جدول‌های ۴ و ۵). به‌طور مثال، برای شهر بندرانزلی، به‌ازای ۱۰ درصد افزایش دمای  $T_{min}$  مقدار تبخیر و تعرق حدود ۱۵/۳- درصد کاهش از خود نشان داد. بررسی مقادیر کاهش یا افزایش یافته ET بیانگر خطی بودن روند در مقادیر کم نوسانات (زیر ۸ درصد) می‌باشد. البته برای نوسانات شدید (۱۰ درصد و بالاتر) رفتار تغییرات ET غیرخطی شده به‌طوری‌که افزایش ۱۰ درصدی دمای بیشینه در ماه‌های گرم سال ۴/۶ برابر تأثیر افزایش ۲ درصدی دما می‌باشد. با افزایش هم‌زمان  $T_{min}$  و  $T_{max}$ ، مقادیر ET در تمامی ماه‌ها افزایش یافته و با کاهش هم‌زمان  $T_{min}$  و  $T_{max}$ ، مقادیر ET در تمامی ماه‌ها کاسته شده و در ایستگاه‌های رشت، رامسر، نوشهر و گرگان، بیش‌ترین و کم‌ترین تغییرات ET به‌ترتیب به‌ازای افزایش و کاهش ۱۰ درصدی  $T_{max}$  در ماه اوت مشاهده شده، در حالی‌که در ایستگاه‌های بابلسر و بندرانزلی، بیش‌ترین و کم‌ترین تغییرات ET به‌ترتیب به‌ازای افزایش و کاهش ۱۰ درصدی  $T_{max}$  در ماه ژوئیه به‌دست آمده است.

جدول ۵- برآورد تغییرات نسبی ET (بر حسب درصد) توسط مدل هارگریوز به‌ازای ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد افزایش و کاهش پارامترهای دمایی در ایستگاه بندرانزلی.

تغییرات													
دما	پارامتر	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مه	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
+۲	$T_{max}$	۲/۲	۲/۶	۲/۶	۳/۷	۴/۲	۴/۶	۴/۹	۵	۴/۷	۴	۳/۱	۳/۲
	$T_{min}$	-۱/۱	-۰/۹	-۱/۳	-۱/۷	-۲/۴	-۲/۷	-۲/۷	-۲/۵	-۲/۷	-۲	-۱/۶	۰
و	$T_{max}$	۱/۱	۱/۷	۲/۶	۲/۵	۲/۱	۲/۲	۲/۲	۲	۱/۴	۱	۰/۸	۲/۱
	$T_{min}$	-۲/۲	-۱/۷	-۲/۶	-۳/۳	-۴/۵	-۴/۸	-۴/۹	-۴/۷	-۴/۷	-۴	-۳/۱	-۲/۱
-۲	$T_{max}$	۱/۱	۰/۹	۰/۶	۱/۷	۲/۱	۲/۴	۲/۷	۲/۷	۲/۷	۲	۱/۶	۱/۱
	$T_{min}$	-۱/۱	-۱/۷	-۱/۹	-۱/۷	-۲/۱	-۲/۲	-۲	-۲/۲	-۲	-۲	-۱/۶	-۱/۱
+۴	$T_{max}$	۴/۴	۴/۳	۶/۵	۷/۵	۸/۷	۹/۲	۹/۴	۹/۲	۸/۵	۷	۵/۵	۵/۳
	$T_{min}$	-۱/۱	-۰/۹	-۱/۹	-۳/۳	-۴/۸	-۵/۳	-۵/۶	-۵/۵	-۵/۴	-۴	-۳/۱	-۱/۱
و	$T_{max}$	۳/۳	۳/۴	۳/۲	۳/۷	۳/۹	۴/۳	۴/۷	۴/۷	۴/۴	۴	۳/۹	۴/۳
	$T_{min}$	-۴/۴	-۴/۳	-۵/۸	-۷/۱	-۹	-۹/۶	-۹/۹	-۹/۹	-۹/۵	-۸	-۶/۳	-۴/۳
-۴	$T_{max}$	۱/۱	۱/۷	۲/۶	۳/۷	۴/۵	۴/۸	۴/۹	۴/۷	۴/۱	۳	۱/۶	۲/۱
	$T_{min}$	-۳/۳	-۳/۴	-۳/۴	-۳/۷	-۴/۲	-۴/۳	-۴/۳	-۴/۲	-۴/۲	-۴	-۳/۹	-۳/۲
+۶	$T_{max}$	۶/۶	۶/۸	۷/۷	۱۰/۴	۱۲/۳	۱۳/۷	۱۴/۴	۱۴/۴	۱۴/۴	۱۳/۹	۹/۴	۸/۵
	$T_{min}$	-۲/۲	-۱/۷	-۳/۲	-۵	-۷/۲	-۸/۲	-۸/۵	-۸/۴	-۸/۱	-۸/۱	-۴/۷	-۲/۱
و	$T_{max}$	۴/۴	۵/۱	۵/۸	۶/۲	۶/۳	۶/۵	۶/۷	۶/۵	۶/۵	۵/۸	۴/۷	۵/۳
	$T_{min}$	-۶/۶	-۶/۸	-۸/۴	-۱۰/۸	-۱۳/۵	-۱۴/۷	-۱۵/۳	-۱۵/۱	-۱۵/۱	-۱۲/۶	-۱۰/۲	-۷/۴
-۶	$T_{max}$	۲/۲	۱/۷	۲/۶	۳/۷	۴/۵	۴/۸	۴/۹	۴/۷	۴/۱	۳	۱/۶	۲/۱
	$T_{min}$	-۳/۳	-۳/۴	-۳/۴	-۳/۷	-۴/۲	-۴/۳	-۴/۳	-۴/۲	-۴/۲	-۴	-۳/۹	-۳/۲
+۸	$T_{max}$	۸/۸	۸/۵	۸/۸	۱۱/۶	۱۴/۱	۱۶/۸	۱۸/۱	۱۸/۷	۱۸/۴	۱۷/۳	۱۴/۶	۱۰/۶
	$T_{min}$	-۲/۲	-۲/۶	-۴/۵	-۶/۶	-۹/۹	-۹/۹	-۹/۹	-۹/۹	-۹/۹	-۹	-۶/۳	-۳/۲
و	$T_{max}$	۶/۶	۶/۸	۶/۵	۷/۹	۸/۱	۸/۷	۹/۲	۹/۲	۹/۲	۸/۸	۷/۸	۷/۴
	$T_{min}$	-۸/۸	-۸/۵	-۱۱	-۱۴/۵	-۱۸/۳	-۱۴/۷	-۱۵/۳	-۱۵/۱	-۱۵/۱	-۱۲/۶	-۱۰/۲	-۷/۴
-۸	$T_{max}$	۲/۲	۱/۷	۲/۶	۳/۷	۴/۵	۴/۸	۴/۹	۴/۷	۴/۱	۳	۱/۶	۲/۱
	$T_{min}$	-۶/۶	-۶/۸	-۶/۵	-۷/۵	-۸/۴	-۸/۷	-۸/۸	-۸/۷	-۸/۸	-۸	-۷/۸	-۶/۴
+۱۰	$T_{max}$	۱۱	۱۱/۱	۱۲/۹	۱۷	۲۰/۴	۲۲/۴	۲۳/۴	۲۳/۳	۲۳/۳	۲۲/۷	۱۶/۴	۱۳/۸
	$T_{min}$	-۳/۳	-۳/۴	-۵/۸	-۸/۷	-۱۲/۶	-۱۴/۵	-۱۵/۳	-۱۵/۱	-۱۵/۱	-۱۴/۶	-۱۱/۱	-۴/۳
و	$T_{max}$	۷/۷	۷/۷	۹	۱۰/۴	۱۰/۵	۱۱/۱	۱۱/۲	۱۰/۹	۱۰/۲	۹/۵	۸/۶	۹/۶
	$T_{min}$	-۱۱	-۱۱/۱	-۱۴/۲	-۱۸/۳	-۲۳/۱	-۲۵/۳	-۲۶/۵	-۲۶/۳	-۲۵/۴	-۲۱/۶	-۱۷/۲	-۱۳/۸
-۱۰	$T_{max}$	۳/۳	۳/۴	۵/۲	۷/۵	۹/۹	۱۱/۱	۱۱/۹	۱۱/۹	۱۱/۵	۹/۵	۶/۳	۴/۳
	$T_{min}$	-۷/۷	-۷/۷	-۸/۴	-۹/۱	-۱۰/۲	-۱۰/۸	-۱۰/۸	-۱۰/۹	-۱۰/۵	-۱۰/۱	-۹/۴	-۸/۵

جدول ۶- برآورد تغییرات نسبی ET (بر حسب درصد) توسط مدل هارگریوز به‌ازای ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد افزایش و کاهش پارامترهای دمایی در ایستگاه رامسر.

تغییرات													
دما (درصد)	پارامتر	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مه	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
+۲	T <sub>max</sub>	۱/۹	۱/۵	۳	۳/۱	۳/۸	۴/۴	۴/۸	۴/۸	۴/۷	۳/۷	۲/۸	۲/۸
	T <sub>min</sub>	-۰/۹	-۰/۷	-۰/۶	-۱/۱	-۲	-۲/۴	-۲/۷	-۲/۸	-۲/۷	-۱/۹	-۱/۴	۰
+۲	T <sub>max</sub> و T <sub>min</sub>	۰/۹	۱/۵	۳	۲/۳	۲/۳	۲/۲	۲/۱	۱/۸	۱/۳	۰/۹	۱/۴	۱/۸
	T <sub>max</sub>	-۲/۸	-۲/۲	-۲/۴	-۳/۱	-۴/۱	-۴/۶	-۴/۸	-۵/۱	-۵	-۳/۷	-۲/۸	-۱/۸
-۲	T <sub>min</sub>	۰	۰	۱/۲	۱/۱	۱/۷	۲/۲	۲/۵	۲/۵	۲/۳	۱/۹	۰/۷	۰/۹
	T <sub>max</sub> و T <sub>min</sub>	-۱/۹	-۱/۵	-۱/۲	-۱/۹	-۲	-۲/۲	-۲/۳	-۲/۳	-۲/۳	-۱/۹	-۲/۱	-۱/۸
+۴	T <sub>max</sub>	۳/۷	۳/۷	۶	۶/۵	۷/۸	۸/۸	۹/۲	۹/۱	۸/۴	۶/۵	۴/۸	۴/۶
	T <sub>min</sub>	-۰/۹	-۰/۷	-۱/۲	-۲/۷	-۳/۸	-۴/۹	-۵/۵	-۵/۶	-۵/۴	-۳/۷	-۲/۱	-۰/۹
+۴	T <sub>max</sub> و T <sub>min</sub>	۲/۸	۳	۳/۶	۳/۸	۴/۱	۴/۴	۴/۳	۴/۶	۴/۴	۴/۲	۳/۴	۳/۷
	T <sub>max</sub>	-۴/۷	-۴/۵	-۴/۸	-۶/۵	-۸/۱	-۹	-۹/۸	-۱۰/۱	-۹/۷	-۷/۹	-۶/۲	-۴/۶
-۴	T <sub>min</sub>	۰	۰/۷	۳	۲/۷	۳/۸	۴/۴	۴/۶	۴/۶	۴	۲/۳	۱/۴	۰/۹
	T <sub>max</sub> و T <sub>min</sub>	-۳/۷	-۳	-۳	-۳/۸	-۴/۱	-۴/۴	-۴/۳	-۴/۳	-۴/۴	-۴/۲	-۳/۴	-۳/۷
+۶	T <sub>max</sub>	۵/۶	۶	۷/۷	۹/۲	۱۱/۳	۱۳/۱	۱۴	۱۴/۲	۱۳/۸	۱۱/۲	۹	۷/۳
	T <sub>min</sub>	-۱/۹	-۱/۵	-۲/۴	-۳/۸	-۵/۸	-۷/۳	-۸/۲	-۸/۹	-۸/۴	-۵/۶	-۳/۴	-۱/۸
+۶	T <sub>max</sub> و T <sub>min</sub>	۴/۷	۴/۵	۶	۶/۱	۶/۴	۶/۶	۶/۴	۶/۳	۶/۳	۵/۱	۴/۸	۵/۵
	T <sub>max</sub>	-۶/۵	-۶	-۷/۷	-۹/۵	-۱۱/۹	-۱۳/۹	-۱۴/۹	-۱۵/۴	-۱۴/۸	-۱۱/۷	-۹	-۶/۴
-۶	T <sub>min</sub>	۰/۹	۰/۷	۳	۳/۴	۴/۹	۶/۶	۷/۱	۷/۶	۷	۵/۱	۲/۸	۱/۸
	T <sub>max</sub> و T <sub>min</sub>	-۵/۶	-۵/۲	-۴/۸	-۵/۷	-۶/۱	-۶/۳	-۶/۶	-۶/۶	-۶/۴	-۶/۱	-۵/۵	-۴/۶
+۸	T <sub>max</sub>	۷/۵	۷/۵	۱۱/۳	۱۲/۶	۱۵/۱	۱۷/۳	۱۸/۱	۱۸/۵	۱۷/۱	۱۳/۶	۱۰/۳	۹/۲
	T <sub>min</sub>	-۱/۹	-۲/۲	-۳/۶	-۵/۳	-۸/۱	-۱۰/۲	-۱۱/۴	-۱۱/۹	-۱۱/۴	-۷/۵	-۴/۱	-۱/۸
+۸	T <sub>max</sub> و T <sub>min</sub>	۵/۶	۶	۷/۱	۷/۶	۸/۱	۸/۸	۸/۹	۹/۱	۸/۷	۸/۴	۷/۶	۷/۳
	T <sub>max</sub>	-۸/۴	-۸/۲	-۱۰/۱	-۱۲/۶	-۱۶/۲	-۱۸/۷	-۲۰/۱	-۲۰/۸	-۲۰/۱	-۱۵/۹	-۱۱/۷	-۹/۲
-۸	T <sub>min</sub>	۰/۹	۱/۵	۴/۲	۵	۷	۸/۵	۹/۲	۹/۴	۸/۴	۵/۶	۲/۸	۲/۸
	T <sub>max</sub> و T <sub>min</sub>	-۶/۵	-۶/۷	-۶/۵	-۷/۶	-۸/۱	-۸/۵	-۸/۷	-۸/۹	-۸/۷	-۷/۹	-۷/۶	-۶/۴
+۱۰	T <sub>max</sub>	۹/۳	۹/۷	۱۲/۵	۱۴/۹	۱۸/۶	۲۱/۴	۲۲/۹	۲۳/۳	۲۲/۵	۱۸/۲	۱۴/۵	۱۱/۹
	T <sub>min</sub>	-۲/۸	-۲/۲	-۴/۲	-۶/۵	-۱۰/۱	-۱۳/۱	-۱۴/۶	-۱۵/۴	-۱۴/۸	-۹/۸	-۵/۵	-۲/۸
+۱۰	T <sub>max</sub> و T <sub>min</sub>	۷/۵	۷/۵	۹/۵	۹/۹	۱۰/۴	۱۰/۹	۱۱	۱۰/۹	۱۰/۹	۹/۳	۹	۹/۲
	T <sub>max</sub>	-۱۰/۳	-۱۰/۴	-۱۳/۱	-۱۶	-۲۰/۳	-۲۳/۸	-۲۵/۹	-۲۶/۶	-۲۵/۵	-۲۰/۱	-۱۵/۲	-۱۱/۹
-۱۰	T <sub>min</sub>	۱/۹	۲/۲	۴/۲	۵/۷	۸/۱	۱۰/۵	۱۱/۴	۱۱/۹	۱۱/۹	۷/۹	۴/۸	۲/۸
	T <sub>max</sub> و T <sub>min</sub>	-۸/۴	-۸/۲	-۹/۵	-۱۰/۱	-۱۰/۷	-۱۱	-۱۰/۹	-۱۰/۹	-۱۰/۷	-۱۰/۳	-۹/۷	-۸/۳

از نتایج به دست آمده می‌توان چنین استنباط نمود که مقادیر ET ایستگاه‌های نوشهر و بندرانزلی دارای بیش‌ترین حساسیت نسبت به تغییرات دمایی در منطقه مورد مطالعه بوده‌اند. شاید بتوان این امر را به کم‌تر بودن اختلاف بیشینه و کمینه دمای هوا در این ایستگاه‌ها نسبت به سایر ایستگاه‌های مورد مطالعه مرتبط دانست. این در حالی است که مقادیر ET ایستگاه گرگان، کم‌ترین حساسیت را نسبت به تغییرات  $T_{min}$  و  $T_{max}$  از خود نشان داد. علت این امر را نیز می‌توان به خشک‌تر بودن اقلیم این ایستگاه و همچنین بیش‌تر بودن اختلاف بیشینه و کمینه دمای هوا نسبت به سایر ایستگاه‌های مورد مطالعه، نسبت داد.

در مدل هارگریوز (HG) افزایش دمای کمینه منجر به کاهش دامنه دما در رابطه هارگریوز (رابطه ۲۰) منجر می‌شود. این امر کاهش ET را در همه ماه‌ها به دنبال خواهد داشت. بررسی‌ها نشان می‌دهد که مدل PMF-۵۶ در مقابل تغییرپذیری دمای کمینه حساسیت واقعی‌تری را در مقایسه با مدل HG نشان می‌دهد زیرا مدل استاندارد PMF-۵۶ یک مدل ترکیبی آیرودینامیکی است که مقاومت گیاهی و برخی فیدبک (پس‌خورد) های طبیعی گیاه در آن در نظر گرفته است. در حالی که در مدل HG در صورت وقوع نوسانات ناگهانی پارامترهای جوی کنترل خاصی روی تبخیر و تعرق وجود ندارد و کوچک‌ترین تغییرات دمایی ممکن است به تغییرات قابل ملاحظه‌ای در مقدار تبخیر و تعرق منجر گردد.

### نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش  $T_{max}$  در شهرهای مرطوب ساحلی مقادیر ET با هر دو مدل PMF-۵۶ و HG در تمامی ماه‌ها افزایش یافته و بیش‌ترین افزایش نسبی ET در ماه‌های گرم ژوئیه و اوت (تیر- مرداد) مشاهده شده است. این افزایش غیرخطی و به‌طور متوسط ۴/۵ درصد به‌ازای ۲ درصد افزایش  $T_{max}$  بود. در این رابطه هر دو مدل حساسیت به‌نسبت مشابهی در مقابل نوسانات بیشینه دما از خود نشان دادند. با کاهش  $T_{max}$ ، مقادیر ET در تمامی ماه‌ها به‌استثنای ژانویه کاسته شده و بیش‌ترین کاهش در تمامی ایستگاه‌ها در ماه‌های گرم ژوئیه و اوت رخ داد. همچنین، افزایش هم‌زمان  $T_{min}$  و  $T_{max}$  به‌دلیل بالا بردن دمای متوسط به افزایش مقادیر ET در تمامی ماه‌ها منجر گردید. در تمامی ایستگاه‌ها در هر دو مدل با افزایش دمای شبانه  $T_{min}$ ، مقادیر ET در فصول رشد بهار و تابستان کاهش از خود نشان داد. مقدار این کاهش برای مدل هارگریوز در ایستگاه بندرانزلی به‌دلیل حساس‌تر بودن آن به دما در حدود ۲/۱ برابر مدل پنمن به‌دست آمد (در مدل پنمن

هر ۱۰ درصد افزایش  $T_{min}$  حدود ۷ درصد کاهش ET. و در مدل هارگریوز هر ۱۰ درصد افزایش  $T_{min}$  حدود ۱۵ درصد کاهش ET. البته مدل استاندارد PMF-۵۶ در ماه‌های سرد پاییز و زمستان بر خلاف مدل هارگریوز رفتار افزایشی در محاسبه ET نشان داد. با کاهش  $T_{min}$  مقدار ET در ماه‌های فصل پاییز کاسته شده و بیش‌ترین افزایش ET به میزان ۲۳ درصد، به‌ازای افزایش ۱۰ درصدی  $T_{max}$  در ایستگاه‌های بندرانزلی و نوشهر، در ماه‌های ژوئیه، اوت و سپتامبر و در ایستگاه رامسر، در ماه اوت بوده و بیش‌ترین کاهش ET به میزان ۲۶- درصد، به‌ازای کاهش ۱۰ درصدی  $T_{max}$  در ماه اوت در ایستگاه رامسر و ماه‌های اوت و ژوئیه در ایستگاه نوشهر به‌دست آمده است.

نتایج حساسیت مدل هارگریوز نسبت به پارامترهای حرارتی  $T_{min}$  و  $T_{max}$  در ۶ ایستگاه بندرانزلی، رشت، رامسر، نوشهر، بابلسر و گرگان تقریباً یکسان به‌دست آمد. در مدل هارگریوز، بیش‌ترین تغییرات ET به‌ازای افزایش و کاهش ۱۰ درصدی  $T_{max}$  در ایستگاه نوشهر در ماه اوت به‌ترتیب به میزان ۲۳/۵ و ۲۶/۸- درصد مشاهده شد. نتایج بیانگر آن است که حساسیت مدل‌های به‌کار رفته نسبت به پارامتر دمای هوا متفاوت بوده و تا اندازه‌ای بستگی به موقعیت ایستگاه و زمان از سال دارد. به‌طورکلی، نتایج حساسیت مدل‌های PMF-۵۶ و HG نسبت به دماهای بیشینه و کمینه در منطقه مورد مطالعه نشان داد که این مدل‌ها به کاهش و افزایش دمای بیشینه حساس‌تر از دمای کمینه می‌باشند.

فصل رشد در مناطق مورد مطالعه، از اوایل مه، شروع و تا اواسط اکتبر، ادامه دارد. در ماه‌های فصل رشد، نیاز آبی گیاهان، نسبت به سایر ماه‌ها، بیش‌تر می‌باشد. در ایستگاه‌های انزلی، رشت، رامسر، نوشهر، بابلسر، بیش‌ترین نیاز آبی در ماه ژوئیه و در ایستگاه گرگان در ماه ژوئن، مشاهده شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده، حساسیت نیاز آبی گیاه در ماه‌های فصل رشد نسبت به تغییرات  $T_{max}$  و  $T_{min}$  نسبت به سایر ماه‌ها، بیش‌تر بوده است. بنابراین تحت شرایط سناریوهای مختلف تغییر اقلیم، ضرورت بررسی دقیق‌تر نیاز آبی گیاهان در ماه‌های گرم سال که نیاز آبی بالاتر و حساسیت گیاه به پارامترهای حرارتی بیش‌تر می‌باشد در مطالعات آینده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

نظر به این‌که در این پژوهش، فقط حساسیت مدل‌های پنمن-مانتیت فائو ۵۶ و هارگریوز نسبت به متوسط بیشینه و کمینه دمای هوا مورد بررسی قرار گرفت، ارزیابی حساسیت دیگر مدل‌های برآورد تبخیر تعرق نسبت به پارامترهای دمایی توصیه می‌گردد. همچنین تأثیر نوع اقلیم بر دامنه حساسیت مدل‌های تبخیر تعرق به پارامترهای هواشناسی را نیز می‌توان در بررسی‌های آتی مورد تجزیه و تحلیل

قرار داد. لازم به ذکر است که افزایش دمای شبانه  $T_{min}$  توسط هیات بین‌الدول تغییر اقلیم اثبات شده ولی با توجه به این‌که بالا رفتن دمای کمینه در شب یا اوایل صبح که گیاه فعالیت فتوسنتز چندانی ندارد اتفاق می‌افتد، ارزیابی واکنش فیزیولوژیکی واقعی گیاه در طول شب به این افزایش دمای شبانه به بررسی‌های بیش‌تری نیازمند است.

## منابع

1. Allen, R.G., Periera, L.S., Raes, D. and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration: Guideline for computing crop water requirement. FAO Irrigation and drainage. Paper No. 56. FAO. Rome. Italy, 301p.
2. Allen, R.G. 2000. Manual REF-ET Version Windows 2.0 Available online at WWW.Kimberly.Idaho.edu.
3. Dingman, S.L. 1994. Physical Hydrology, Upper Saddle River, N.J. Prentice Hall, 89p.
4. Ge, G., Deliang, C., Guoyu, R., Chen, Y. and Liao, Y. 2006. Spatial and temporal variations and controlling factors of potential evapotranspiration in China: 1956-2000, J. Geograph. Sci.
5. Goyal, R.K. 2004. Sensitivity of evapotranspiration to global warming a case study of arid zone of Rajasthan. Agric. Wat. Manage. 69: 1-11.
6. Hargreaves, G.H. and Samani, Z.A. 1982. Estimating potential evapotranspiration (Tech. Note). J. Irrig. and Drain. Engin. ASCE, 108: 3. 225-230.
7. Hargreaves, G.H. and Allen, R.G. 2003. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation, J. Irrig. and Drain. Engin. ASCE, 129: 1. 53-62.
8. Houerou, H.N.Le. and Le Houerou, H.N. 1993. Climatic changes and desertification. Secheresse. 4: 2. 95-111.
9. Hupet, F. and Vanclooster, M. 2001. Effect of the sampling frequency of meteorological variables on the estimation of the reference evapotranspiration. J. Hydro. 243: 192-204.
10. Irmak, S., Payero, J.O., Martin, D.L., Irmak, A. and Howell, T.A. 2006. Sensitivity Analyses and Sensitivity Coefficients of Standardized Daily ASCE-Penman-Monteith Equation, J. Irrig. and Drain. Engin. 132: 6-564.
11. Jensen, D.T., Hargreaves, G.H., Temesgen, B. and Allen, R.G. 1997. Computation of  $ET_0$  under nonideal conditions, J. Irrig. and Drain. Engin. ASCE, 123: 5. 394-400.
12. Ley, T.W., Hill, R.W. and Jensen, D.T. 1994. Errors in Penman-Wright alfalfa reference evapotranspiration estimates. II: Effects of weather sensor measurement variability. Trans. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 37: 6. 1863-1870.

13. Liqiao, L., Lijuan, L., Li, Z., Jiuyi., L. and Bin, L. 2008. Sensitivity of Penman-Monteith Reference Crop Evapotranspiration in Tao'er River Basin of Northeastern China, *Chin. Geogra. Sci.* 18: 4. 340-347.
14. Mahmood, R. 1997. Impacts of air temperature variations on the bororice phenology in Bangladesh: implications for irrigation requirements. *Agric. and Forest Meteorol.* 84: 3-4. 233-308.
15. Mckenney, M.S. and Rosenberg, N.J. 1993. Sensitivity of some potential evapotranspiration estimation methods to climate change, *Agric. and Forest Meteorol.* 64: 1-2. 81-110.
16. Piper, B.S. 1989. Sensitivity of Penman estimates of evapotranspiration to errors in input data. *Agricultural Water Management*, 15: 3. 179-300.
17. Qiu, G.Y., Miyamoto, K., Sase, S., Gao, Y., Shi, P. and Yano., T. 2002. Comparison of the Three Temperature model and conventional models for estimating transpiration, *Japanese Agricultural Research Quarterly*, 36: 2. 73-82.
18. Sabziparvar, A.A. and Shetaee, H. 2007. Estimation of global solar radiation in arid and semi-arid climates of East and West Iran. *Energy*, 32: 649-655. (In Persian)
19. Sabziparvar, A.A., Tafazoli, F., Zare Abyaneh, H., Banejad, H., Mousavi Byegi, M., Ghafouri, M., Mohseni Movahed, A.A. and Maryanj, Z. 2008. Comparison of Some Existing Crop Reference Evapotranspiration Models in a Cold Semi-arid Climate for the Best Use of Radiation Models. *Agric. Sci. and Food Technol.* 22: 2. 327-340. (In Persian)
20. Tabari, H., Sabziparvar, A.A. and Marofi, S. 2009. Investigating trends of annual meteorological parameters in cold and warm climates of Iran. *Agricultural Research.* (In Persian)
21. Wang, Y., Jiang, T., Bothe, O. and Fraedrich, K. 2007. Changes of pan evaporation and reference evapotranspiration in the Yangtze River basin, *Theoretical and Applied Climatology*, 90: 13-23.
22. Xu, C.Y., Gong, L., Jiang, T., Chen, D. and Singh, V.P. 2006. Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Changjiang (Yangtze River) catchment, *J. Hydro.* 327: 81-93.



## **Evaluating sensitivity of PMF-56 and Hargreaves reference evapotranspiration models to maximum and minimum air temperatures in humid regions of Iran**

**\*A.A. Sabziparvar<sup>1</sup>, S. Soleymani<sup>2</sup> and S.Sh. Mirmasoudi<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Associate Prof., Dept. of Irrigation, Bu-Ali Sina University, Hamedan,

<sup>2</sup>M.Sc. Student, Dept. of Irrigation, Bu-Ali Sina University, Hamedan

Received: 2009/12/15; Accepted: 2010/08/07

### **Abstract**

The main aim of this study was to evaluate sensitivity of  $ET_0$  values estimated by Penman-Monteith FAO 56 (PMF-56) and Hargreaves (HG) models to the mean maximum ( $T_{max}$ ) and mean minimum air temperatures ( $T_{min}$ ) in humid regions of northern Iran. For this purpose, a 50-year meteorological quality controlled data from 6 synoptic stations were applied and their daily  $ET_0$  values were estimated by PMF-56 and HG methods for the same period. The average  $T_{max}$  and  $T_{min}$  values were then altered from 2 to 10 percents under various scenarios and the corresponding  $ET_0$  values were recalculated and compared with the initial  $ET_0$  values. The results showed that the maximum relative increase of  $ET_0$  values is observed in summer months by 10% increase in  $T_{max}$ . In general, the sensitivity of both  $ET_0$  models to the maximum temperature was higher than minimum temperature. In contrast, a 10% increase in  $T_{min}$  during summer months caused up to 7% drop in  $ET_0$ . It is shown that in small temperature variations (less than 8%), the response of the  $ET_0$  models is linear. However, higher temperature variations (more than 10%) caused non-linear results. The comparison of HG and PMF-56 results revealed that the sensitivity of PMF-56 aerodynamic model to the  $T_{min}$  and  $T_{max}$  fluctuations was more realistic than the HG model, because of considering outgoing long-wave radiation and vapor pressure deficit in PMF-56 model. The results indicated that the sensitivity of the HG and PMF-56 models to the temperature parameters depend on the geographical location and the season. When the effect of teleconnection events (ENSO, NAO, MJO) on  $ET_0$  variability is studied, the application of Hargreaves model is not recommended.

**Keywords:** Reference evapotranspiration, Climate change scenarios, Maximum and minimum air temperature, Coastal humid climate

---

\* Corresponding Author; Email: [swsabzi@basu.ac.ir](mailto:swsabzi@basu.ac.ir)