

## تحلیل حساسیت مدل پنمن - مونتیت - فائو در برآورد تبخیر تعرق مرجع روزانه و پهنه‌بندی ضرایب حساسیت آن در گستره ایران

فهیمه خادم پور<sup>۱</sup> - بهرام بختیاری<sup>۲\*</sup> - سودابه گلستانی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۸/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱/۲۶

### چکیده

تبخیر تعرق (ET) تابع متغیرهای مختلف اقلیمی و ویژگی‌های توپوگرافی هر منطقه است. اولویت‌بندی و تعیین شدت تأثیر هر یک از این پارامترها بر روی تبخیر تعرق کمک شایانی به مدیریت منابع آب منطقه می‌نماید. در این مطالعه، تحلیل حساسیت مدل استاندارد پنمن - مونتیت - فائو در برآورد تبخیر تعرق مرجع ( $ET_0$ ) بر اساس متغیرهای اقلیمی دمای هوا (T)، تابش خالص ( $R_n$ )، سرعت باد ( $u_2$ ) و رطوبت نسبی (RH) انجام پذیرفته است. ایستگاه‌های هواشناسی منتخب شامل ۳۱ ایستگاه سینوپتیک در گستره ایران با دوره زمانی مشترک ۲۰ ساله (۱۹۹۶-۲۰۱۵) می‌باشد. طبقه‌بندی اقلیمی ایستگاه‌ها نشان داد که از این تعداد ایستگاه مورد بررسی، ۳ ایستگاه در اقلیم فراه خشک، ۱۰ ایستگاه در اقلیم خشک، ۱۳ ایستگاه در اقلیم نیمه‌خشک، ۲ ایستگاه در اقلیم مدیترانه‌ای، ۲ ایستگاه در اقلیم مرطوب و ۱ ایستگاه در اقلیم بسیار مرطوب (الف) قرار دارند. ضرایب حساسیت برای هر یک از متغیرها در مقیاس زمانی روزانه با استفاده از روش مشتقات جزئی و تحلیل حساسیت محلی محاسبه گردید. سپس پهنه‌بندی ضرایب حساسیت با استفاده از روش عکس مجذور فاصله (IDW) تهیه شد. نتایج نشان داد که  $ET_0$  محاسبه شده در تمامی اقلیم، به میانگین  $R_n$  و پس از آن به میانگین دما حساس بوده است.  $S_{R_n}$  در ماه‌های مارس، آوریل، اکتبر و نوامبر بیشترین مقدار را داشته بنابراین، در اکثر ماه‌های بهار و پاییز بزرگتر و طی ماه‌های زمستان کوچکتر بوده است. در حالی که کمترین مقدار  $S_{u_2}$  با مقدار ۰/۰۷ در همه ماه‌ها به جزء ماه می (۱۱ اردیبهشت تا ۱۰ خرداد) و ژوئیه (۱۰ تیر تا ۱۰ مرداد) و بیشترین آن با مقدار ۰/۵۴ در ماه‌های ژانویه، ژوئیه، آگوست و سپتامبر بوده است. کمترین مقدار  $S_{RH}$  در ماه‌های مارس، آوریل و اکتبر و بیشترین آن در ماه‌های ژانویه، فوریه، می و ژوئن به ترتیب با میانگین مقادیر ۰/۲۰ و ۰/۴۵ می‌باشد.  $S_T$  طی ماه‌های تابستان بزرگتر و طی ماه‌های زمستان کوچکتر بوده است.

واژه‌های کلیدی: پنمن - مونتیت - فائو، تبخیر تعرق مرجع، تحلیل حساسیت، ET

### مقدمه

تبخیر تعرق مرجع استفاده می‌شود در دو گروه اصلی روش‌های مستقیم و محاسباتی قرار می‌گیرند. از آنجائیکه روش‌های مستقیم اندازه‌گیری تبخیر تعرق هزینه‌بر است لذا در بسیاری اوقات جهت برآورد تبخیر تعرق از روش‌های محاسباتی استفاده می‌شود. در روش‌های محاسباتی از عوامل مختلف اقلیمی و گیاهی استفاده شده و از روی ارتباط آن‌ها با تبخیر تعرق و معادله‌هایی که قبلاً با روش‌های مستقیم واسنجی شده‌اند، تبخیر تعرق پوشش گیاهی مورد نظر تخمین زده می‌شود (۱). در سال ۱۹۹۰ از سوی کمیسیون بین‌المللی آبیاری و زهکشی<sup>۵</sup> (ICID) و سازمان خوار و بار جهانی<sup>۶</sup> (FAO)، روش

در طراحی و تعیین ظرفیت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، برآورد تبخیر تعرق نقش مهمی دارد. در اغلب روش‌هایی که برای تعیین مقدار تبخیر تعرق ارائه شده‌اند، ابتدا مقدار تبخیر تعرق گیاه مرجع<sup>۴</sup> ( $ET_0$ ) تخمین زده می‌شود و سپس با استفاده از آن تبخیر تعرق گیاه مورد نظر ( $ET_c$ ) محاسبه می‌شود (۲). روش‌هایی که برای تخمین

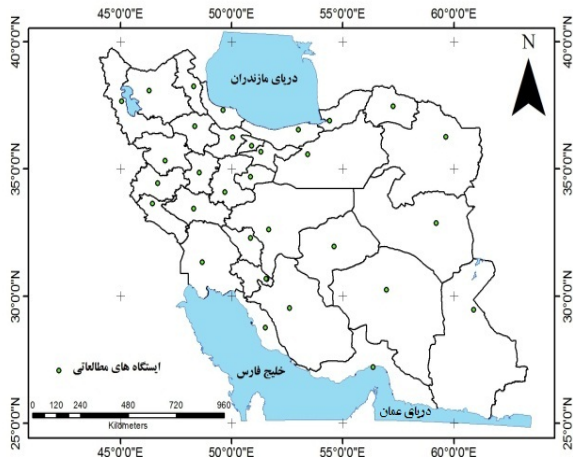
۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب و استادیاران بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان  
(\*) - نویسنده مسئول: Email: Drbakhtiari@uk.ac.ir

هوای  $(T_{mean})^7$  در شش ایستگاه در مقیاس زمانی سالانه بیشترین حساسیت و نسبت به فشار بخار واقعی  $(e_a)^8$  کمترین حساسیت را داشته است. جمع بندی پیشینه تحقیقات نشان داد که در مطالعات داخلی تأکید زیادی بر تحلیل حساسیت مدل استاندارد پنمن- مونتیت نشده، فقط در مواردی به تحلیل حساسیت خطی اشاره شده است. لذا در این مطالعه هدف اصلی، بررسی میزان تأثیرگذاری و سهم عوامل مختلف اقلیمی بر تبخیر تعرق مرجع روزانه در اقلیم های فراه خشک، خشک، نیمه خشک، مدیترانه ای، مرطوب و بسیار مرطوب (الف) در گستره ایران بوده و سپس آنالیز حساسیت مدل پنمن- مونتیت- فائو با استفاده از روش مشتقات جزئی با تأکید بر تحلیل یک عامل در یک زمان  $(OAT)^9$  بر اساس تغییرات پارامترهای اقلیمی مؤثر بر تبخیر تعرق انجام گرفته است.

## مواد و روش ها

### منطقه مطالعاتی و داده ها

ایران با متوسط بارش سالانه ۲۴۱ میلی متر در عرض جغرافیایی خشک و نیمه خشک کره زمین و بین دو نصف النهار ۴۴° و ۶۴° شرقی و دو مدار ۲۵° و ۴۰° شمالی واقع شده است. حدود ۹۴/۸ درصد از سطح آن، در زمره مناطق خشک و نیمه خشک با ریزش های جوی کم و تبخیر تعرق زیاد قرار دارد. ایستگاه های هواشناسی در این تحقیق بر اساس تنوع اقلیمی انتخاب شدند.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی ایستگاه های هواشناسی

Figure 1. The geographical location of weather stations

بدین ترتیب ایستگاه های مطالعاتی در سیستم طبقه بندی دومارتن به شش اقلیم فراه خشک، خشک، نیمه خشک، مدیترانه ای، مرطوب و

- 7- Temperature Mean
- 8- Actual Vapor Pressure
- 9- One- factor- at-a- time

پنمن- مونتیت- فائو<sup>۱</sup> به عنوان روش استاندارد محاسبه  $ET_0$  پیشنهاد شده است (۹). مدل پنمن- مونتیت، نیازمند داده های تابش، دما، رطوبت و سرعت باد بوده و با درجه اعتماد نسبتاً قابل قبولی در دامنه وسیعی از مناطق و اقلیم ها برآوردی از تبخیر تعرق گیاه مرجع ارائه می کند (۳). پیشینه تحقیقات در سایر نقاط دنیا نشان داده است که تحلیل حساسیت معادلات برآورد تبخیر تعرق امری ضروری می باشد. یانگ و همکاران (۱۲) در حوزه رودخانه زرد در چین، روند زمانی تبخیر تعرق مرجع و حساسیت آن به متغیرهای هواشناسی را با روش پنمن- مونتیت برآورد نمودند. نتایج نشان داد که تابش خورشیدی  $(R_s)$  حساس ترین متغیر برای  $ET_0$  در این منطقه بوده و به دنبال آن رطوبت نسبی، دمای هوا و سرعت باد حساس ترین پارامترها محسوب می شوند. ماماسیس و همکاران (۱۳) اثر متغیرهای هواشناسی بر روی تبخیر را با استفاده از روش پنمن در ایستگاه هواشناسی تیشیو<sup>۳</sup> در آن مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که دمای هوا بیشترین تأثیر را بر روی تبخیر سالانه داشته و پس از آن به ترتیب رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی بیشترین تأثیر را دارند. هم چنین رابطه بین ساعات آفتابی و تبخیر در مقیاس ماهانه ثابت نبوده و در طول ماه های زمستان افزایش ساعات آفتابی منجر به کاهش تبخیر می شود. ژائو و همکاران (۱۹) تنوع زمانی تبخیر تعرق مرجع و حساسیت آن به عوامل هواشناسی را در حوزه رودخانه هایه<sup>۴</sup> در چین مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که میانگین سالانه دمای هوا افزایش قابل توجهی در همه ایستگاه های هواشناسی داشته در حالی که میانگین سالانه  $ET_0$  دارای بیشترین کاهش بوده و رطوبت نسبی بیشترین حساسیت را با رعایت تنوع زمانی  $ET_0$  در حوزه مطالعاتی داشته است. بختیاری و لیاقت (۴) تحلیل حساسیت فصلی مدل پنمن- مونتیت (ASCE) نسبت به متغیرهای اقلیمی در اقلیم نیمه خشک کرمان را بررسی کردند. نتایج نشان داد که  $ET_0$  محاسبه شده در تمامی ماه ها به کمبود فشار بخار  $(VPD)^5$  حساس بوده در حالی که به سرعت باد  $(u_2)$  طی ماه های مارس تا نوامبر و به تشعشع موج کوتاه خورشید  $(R_s)$  طی ماه های فصل تابستان حساس است. شریفی و همکاران (۱۸) حساسیت مدل پنمن- مونتیت به متغیرهای آب و هوایی را در ایستگاه های منتخب ایران مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. نتایج نشان داد که  $ET_0$  نسبت به میانگین دمای

- 1- FAO Penman-Monteith
- 2- Solar Radiation
- 3- Thissio
- 4- Heihe
- 5- Vapor Pressure Deficit
- 6- Wind Speed at 2 Meter Height

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \left( \frac{900}{T + 273} \right) u_2 e_s \left( 1 - \frac{RH}{100} \right)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

که در آن  $ET_o$  تبخیر-تعرق مرجع چمن ( $\text{mmd}^{-1}$ )،  $R_n$  میزان تابش خالص بر سطح چمن ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ )،  $G$  چگالی شار حرارتی خاک ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ )،  $T$  میانگین دمای روزانه هوا در ارتفاع دو متری از سطح زمین ( $^{\circ}\text{C}$ )،  $u_2$  میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع دو متری از سطح زمین ( $\text{ms}^{-1}$ )،  $e_s$  میانگین فشار بخار اشباع در ارتفاع دو متری ( $\text{kPa}$ ) که برای گام زمانی روزانه، متوسط آن در دمای حداکثر و حداقل هوا محاسبه می‌شود،  $e_a$  میانگین فشار بخار واقعی هوا در ارتفاع دو متری ( $\text{kPa}$ )،  $\Delta$  شیب منحنی فشار بخار اشباع در دمای هوا ( $\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) و  $\gamma$  ثابت سایکرومتری ( $\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) می‌باشد.

بسیار مرطوب (الف) تقسیم شد. دوره آماری ایستگاه‌های مطالعاتی طی ۲۰ سال مشترک (۱۹۹۶-۲۰۱۵) انتخاب گردید و از داده‌های روزانه دمای هوا، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد در ارتفاع دو متری استفاده شد. مقادیر میانگین عوامل اقلیمی مذکور برای دوره مطالعاتی در جدول ۱ ارائه شده است. هم‌چنین شکل ۱ موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه را در سطح کشور نشان می‌دهد.

### محاسبه تبخیر-تعرق مرجع به روش پنمن- مونتیت- فائو

جهت برآورد  $ET_o$  روزانه از مدل ترکیبی پنمن- مونتیت استاندارد ارائه شده توسط FAO-56 استفاده شده است (۳).

(۱)

جدول ۱- مشخصات جغرافیایی، متوسط متغیرهای اقلیمی و نوع اقلیم ایستگاه‌های مورد مطالعه  
Table 1. Geographical characteristics, mean climatic variables and climate of stations

ایستگاه	طول جغرافیایی (Degree)	عرض جغرافیایی (Degree)	ارتفاع از سطح دریا (m)	دما (°C)	رطوبت نسبی (%)	سرعت باد (ms <sup>-1</sup> )	ساعات آفتابی (h)	تبخیر-تعرق (mmd <sup>-1</sup> )	نوع اقلیم (طبقه‌بندی دومارتن)
Station	Longitude (Degree)	Latitude (Degree)	Altitude (m)	Temperature (°C)	Relative humidity (%)	Wind speed (ms <sup>-1</sup> )	Sunshine hours (h)	ET <sub>o</sub> (mmd <sup>-1</sup> )	Climate in De Martonne classification
اهواز	48.667	31.333	22.5	26.5	41.3	1.7	8.7	5.2	خشک Arid
اراک	46.817	34.1	1312.5	14.4	43.8	1.1	8.2	3.3	نیمه‌خشک Semi-arid
اردبیل	48.283	38.25	1332.0	9.9	73.1	2.8	7.1	3.2	نیمه‌خشک Semi-arid
بندرعباس	56.367	27.217	9.8	27.2	63.8	2.2	8.6	4.5	فراخشک Hyper-arid
بیرجند	59.2	32.867	1491.0	16.8	35.1	1.6	9.2	4.2	خشک Arid

### ادامه جدول ۱

ایستگاه	طول جغرافیایی (Degree)	عرض جغرافیایی (Degree)	ارتفاع از سطح دریا (m)	دما (°C)	رطوبت نسبی (%)	سرعت باد (ms <sup>-1</sup> )	ساعات آفتابی (h)	تبخیر-تعرق (mmd <sup>-1</sup> )	نوع اقلیم (طبقه‌بندی دومارتن)
Station	Longitude (Degree)	Latitude (Degree)	Altitude (m)	Temperature (°C)	Relative humidity (%)	Wind speed (ms <sup>-1</sup> )	Sunshine hours (h)	ET <sub>o</sub> (mmd <sup>-1</sup> )	Climate in De Martonne classification
بجنورد	57.267	37.467	1112.0	13.6	60.7	1.8	7.8	3.1	نیمه‌خشک Semi-arid
بوشهر	50.167	28.967	9.0	25.4	64.7	2.0	8.6	4.4	خشک Arid
اصفهان	51.667	32.617	1550.4	16.9	42.3	1.2	9.3	3.7	خشک Arid
قزوین	50.05	36.25	1279.2	14.6	52.8	1.1	8.3	3.1	نیمه‌خشک Semi-arid

خشک Arid	4.1	8.6	1.7	42.1	18.6	877.4	34.7	50.85	قم Ghom
مدیترانه‌ای Mediterranean	2.6	6.4	1.4	74.1	18.1	0	36.9	54.4	گرگان Gorgan
نیمه خشک Semi-arid	3.0	8.3	1.4	50.2	12.1	1741.5	34.867	48.53	همدان Hamedan
مدیترانه‌ای Mediterranean	3.9	8.5	1.7	40.6	17.0	1337.0	33.633	46.433	ایلام Ilam
خشک Arid	3.5	8.2	1.8	46.8	15.5	1708.0	35.917	50.9	کرج Karaj
خشک Arid	3	9.2	1.9	31.7	16.7	1753.8	30.25	56.967	کرمان Kerman
نیمه خشک Semi-arid	3.8	8.0	1.8	43.3	15.6	1318.6	34.35	47.15	کرمانشاه Kermanshah
نیمه خشک Semi-arid	3.8	8.4	1.6	43.9	17.2	1748.8	33.433	48.283	خرم‌آباد Khoramabad
خشک Arid	3.6	8.2	1.8	49.5	15.8	999.2	36.267	59.633	مشهد Mashhad
نیمه خشک Semi-arid	3.5	8.1	1.6	58.8	11.9	1315.9	37.667	45.05	ارومیه Orumieh
بسیار مرطوب (الف) Very humid (a)	2.0	4.8	0.9	83.3	16.6	-8.6	37.317	49.617	رشت Rasht
نیمه خشک Semi-arid	3.5	8.3	1.5	45.0	14.4	1373.4	35.333	47.0	سنندج Sanandaj
مرطوب Humid	2.3	5.6	1.2	77.6	18.0	23.0	36.55	53.0	ساری Sari
خشک Arid	3.8	8.5	1.5	40.1	18.4	1127.0	35.583	53.417	سمنان Semnan
نیمه خشک Semi-arid	3.2	8.8	1.2	45.4	11.4	2048.9	32.283	50.85	شهرکرد Shahrekord
نیمه خشک Semi-arid	4.1	9.3	1.4	38.0	18.7	1484.0	29.533	52.6	شیراز Shiraz
نیمه خشک Semi-arid	4.4	7.9	2.5	50.2	13.6	1361.0	38.083	46.283	تبریز Tabriz
خشک Arid	3.9	8.2	1.9	40.4	18.5	1190.8	35.683	51.317	تهران Tehran
مرطوب Humid	3.3	8.8	1.0	42.0	15.3	1816.3	30.833	51.683	یاسوج Yasouj
فراخشک Hyper-arid	5.4	9.3	1.9	27.6	20.4	1237.2	30.683	51.55	یزد Yazd
فراخشک Hyper-arid	4.2	9.4	2.3	27.8	19.2	1370.0	29.467	60.883	زاهدان Zahedan
نیمه خشک Semi-arid	3.3	8.0	2.0	54.8	11.5	1663.0	36.683	48.333	زنجان Zanjan

### تعیین ضریب حساسیت

از روش‌های آنالیز حساسیت می‌توان به روش‌های درصد تغییرات، رگرسیون چند متغیره، تجزیه عاملی، تحلیل حساسیت غربالی<sup>۱</sup>، تحلیل

تحلیل حساسیت محلی<sup>۲</sup> و تحلیل حساسیت جهانی<sup>۳</sup> اشاره نمود (۱۶).

تحلیل حساسیت غربالی برای مدل‌هایی استفاده می‌شود که

2- Local Sensitivity analysis  
3- Global Sensitivity analysis

1- Screening

بالا تر آن، معادله (۵) به دست می‌آید.

$$\Delta ET_o = \frac{\partial ET_o}{\partial p_1} \Delta p_1 + \frac{\partial ET_o}{\partial p_2} \Delta p_2 + \dots + \frac{\partial ET_o}{\partial p_N} \Delta p_N \quad (5)$$

که دیفرانسیل  $\frac{\partial ET_o}{\partial P_i}$  نمایانگر حساسیت مدل به هر یک از پارامترها یا متغیرها می‌باشد. این ضرایب حساسیت خود به بزرگی نسبی  $ET_o$  و  $P_i$  حساسند.

در این مطالعه، ضریب حساسیت نسبی بدون بعد باون (۵) برای تعیین واکنش  $ET_o$  به تغییرات پارامترهای هواشناسی (جدول ۱) به صورت جداگانه از معادله (۶) به دست می‌آید.

$$SV_i = \frac{\partial ET_o}{\partial P_i} \cdot \frac{P_i}{ET_o} \quad (6)$$

که در آن  $S_i$  ضریب حساسیت بدون بعد پارامتر  $i$  ام و  $P_i$  متغیرها یا پارامترهای ورودی به مدل می‌باشند.

مثلاً مقدار  $S_i$  برابر ۰/۱ به این مفهوم است که ۱۰٪ افزایش در  $P_i$  باعث ۱٪ افزایش در  $ET_o$  می‌شود. ضریب حساسیت منفی نشان می‌دهد که افزایش در  $P_i$  باعث کاهش در  $ET_o$  شده است. کاربرد این معادله زمانی با اشکال مواجه می‌شود که مقادیر  $P_i$  یا  $ET_o$  به طور جداگانه به سمت صفر میل می‌کنند که در این حالت مقدار معنی‌داری برای  $S_i$  به دست نمی‌آید و این روش در مطالعات تبخیرتقرق زیاد مورد استفاده قرار گرفته است (۱۱ و ۱۶). به‌طور اساسی، ضریب حساسیت منفی/ مثبت یک متغیر نشان می‌دهد که تبخیرتقرق کاهش/ افزایش می‌یابد، همانطور که متغیر افزایش می‌یابد. ضریب حساسیت بزرگتر، تأثیر بیشتر متغیر مشخص را بر تبخیرتقرق مرجع نشان می‌دهد. در شکل گرافیکی، ضریب حساسیت، شیب تانژانت در مبدأ منحنی حساسیت است.

چگونگی استخراج ضرایب حساسیت محلی مربوط به متغیرهای هواشناسی مؤثر بر تبخیرتقرق مرجع شامل تابش خالص معادله (۷)، سرعت باد در ارتفاع دو متری معادله (۸)، رطوبت نسبی معادله (۹) و دمای هوا معادلات (۱۰) و (۱۱) با استفاده از روش مشتقات جزئی ارائه شده است.

$$S_{R_n} = \frac{\partial ET_o}{\partial R_n} \cdot \frac{R_n}{ET_o} = \frac{0.408 \Delta R_n}{0.408 \Delta R_n + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 e_s \left(1 - \frac{RH}{100}\right)} \quad (7)$$

$$S_{u_2} = \frac{\partial ET_o}{\partial u_2} \cdot \frac{u_2}{ET_o} = \frac{1}{\frac{0.408 \Delta R_n}{\gamma \frac{900}{T+273} u_2 e_s \left(1 - \frac{RH}{100}\right)} + 1} - \frac{0.34 u_2 \gamma}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 u_2)} \quad (8)$$

دارای محاسبات گسترده بوده و دربرگیرنده تعداد زیادی پارامتر باشند. این نوع تحلیل حساسیت تأثیرگذارترین متغیر ورودی را بر مقدار خروجی مدل مشخص می‌نماید. در این روش تنها تعداد اندکی از پارامترهای ورودی تأثیر معناداری بر خروجی مدل دارند. عیب این روش در این است که مقدار حساسیت را به صورت کیفی بیان می‌کنند. به عنوان مثال در این روش پارامترهای ورودی طبق اهمیت رتبه‌بندی شده و اهمیت هر یک از عوامل ورودی نسبت به دیگر عوامل به صورت کمی در نمی‌آید. اما در روش‌های کمی به طور مثال درصد تغییرات مقدار خروجی نسبت به تغییرات هر یک از متغیرها یا پارامترها تعیین می‌شود. در تحلیل حساسیت محلی، تأثیر محلی عوامل بر خروجی مدل نشان داده می‌شود. این گونه تحلیل، معمولاً با استفاده از محاسبات مشتقات جزئی توابع خروجی با توجه به متغیرهای ورودی انجام می‌پذیرد. در این تحلیل معمولاً از روش یک عامل در یک زمان (OAT) استفاده می‌شود، به طوری که یک عامل متغیر و عوامل دیگر ورودی ثابت نگاه داشته می‌شوند. در تحلیل حساسیت محلی معمولاً از عدم قطعیت نسبی و تحلیل‌های دیفرانسیل به صورت معادله (۲) استفاده می‌شود (۱۶).

$$S_i = \frac{x_i}{y} \cdot \frac{\partial y}{\partial x_i} \quad (2)$$

که در آن  $x_i$  متغیر ورودی به مدل،  $y$  مقدار خروجی و  $S_i$  ضریب حساسیت و بدون بعد است.

در تحلیل حساسیت جهانی که توسط سالتلی و همکاران (۱۶)، مورد بحث و بررسی قرار گرفته با استفاده از توابع توزیع احتمال، تأثیر عدم قطعیت مقادیر ورودی بر خروجی مدل مطالعه گردیده است. به عبارت دیگر روش تحلیل حساسیت جهانی، تأثیر دامنه تغییرات متغیرها و شکل تابع توزیع احتمال داده‌های ورودی را مد نظر قرار می‌دهد. به طور مثال در این روش تأثیر متغیر  $x_i$  هنگامی که دیگر متغیرها  $x_j$  ( $j \neq i$ ) تغییر می‌یابند، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. اما روش تحلیل حساسیت محلی بر مبنای مشتقات جزئی استوار بوده و تأثیر تغییر یک عامل ورودی  $x_i$  هنگامی که دیگر عوامل ( $j \neq i$ ) ثابت نگاه داشته می‌شوند، استوار است. در این مطالعه از تحلیل حساسیت محلی استفاده شده است که در این روش فرض می‌شود که حساسیت تبخیرتقرق برآورد شده توسط معادله پنمن-مونتیث ( $ET_o$ ) تابع تغییرات پارامتری یا متغیرهای ورودی هواشناسی ( $P_i$ ) باشد. لذا می‌توان معادلات (۳) و (۴) را نوشت.

$$ET_o = f(p_1, p_2, p_3, \dots, p_N) \quad (3)$$

که در آن  $N$  تعداد پارامترها و متغیرهای ورودی به مدل است.

$$ET_o + \Delta ET_o = f(p_1 + \Delta p_1, p_2 + \Delta p_2, \dots, p_N + \Delta p_N) \quad (4)$$

با بسط معادله (۴) به سری تیلور و صرف نظر از اجزاء مرتبه دوم و

$$S_T = \frac{\partial ET_o}{\partial T} \times \frac{T}{ET_o} \quad (۱۰)$$

$$S_{RH} = \frac{\partial ET_o}{\partial RH} \cdot \frac{RH}{ET_o} = \frac{-RH}{100} \cdot \frac{0.408\Delta R_n}{900} - \frac{RH}{100} + 1$$

$$S_T = \frac{T \frac{df(T)}{dT}}{0.408\Delta R_n + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 e_s (1 - \frac{RH}{100})} - \frac{T \frac{dg(T)}{dT}}{\Delta + \gamma(1+0.34u_2)} =$$

$$T \left( \frac{1021.29R_n (4098.17e^{\frac{17.27T}{T+237.3}} - 2(T+237.3)e^{\frac{17.27T}{T+237.3}})}{(T+237.3)^4} + \frac{549.72\gamma(1 - \frac{RH}{100})u_2 (\frac{4098.17(T+273)e^{\frac{17.27T}{T+237.3}}}{(T+237.3)^2} - e^{\frac{17.27T}{T+237.3}})}{(T+237.3)^2} \right)$$

$$- \frac{0.408\Delta R_n + \gamma \frac{900}{T+237.3} u_2 e_s (1 - \frac{RH}{100})}{T \left( \frac{2503.16(4098.17e^{\frac{17.27T}{T+237.3}} - 2(T+237.3)e^{\frac{17.27T}{T+237.3}})}{(T+237.3)^4} \right)} \quad (۱۱)$$

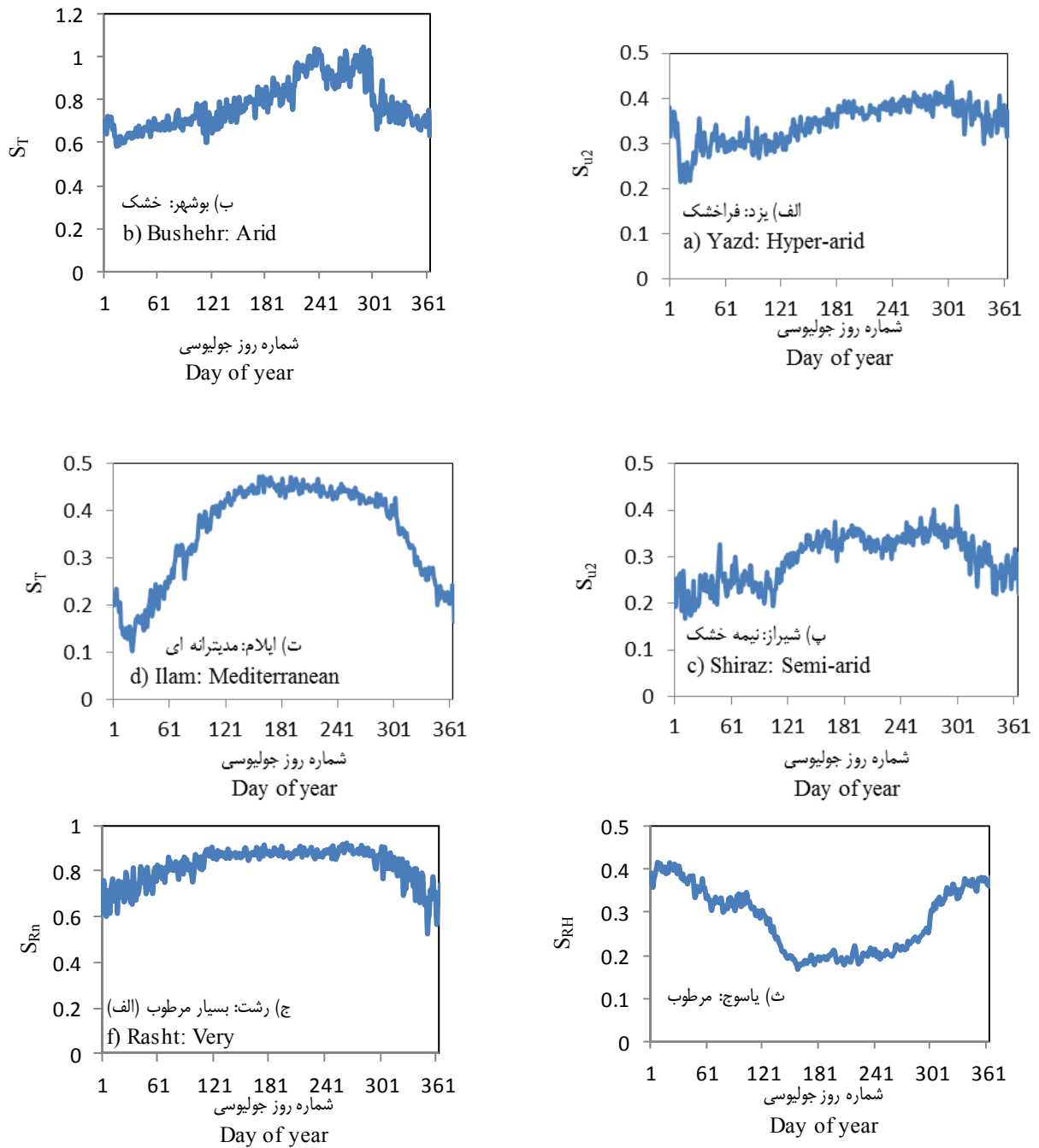
است. بنابراین مناطق ساحلی شمالی کشور با اقلیم‌های مرطوب و بسیار مرطوب (الف) به  $S_{RH}$  حساس‌تر هستند. همچنین بیشترین مقدار  $S_{RH}$  مربوط به مناطق ساحلی شمالی و کمترین آن در مناطق ساحلی جنوبی و جنوب غربی کشور می‌باشد. برخی از مطالعات دیگر نشان داد که در بسیاری از اقلیم تبخیر تعرق به تابش خالص حساس‌تر بود (۶ و ۱۷). در مطالعه حاضر نیز،  $ET_o$  بیشترین حساسیت را نسبت به متغیر  $R_n$  با مقدار ۰/۸۲ در اقلیم بسیار مرطوب (الف) که شامل ایستگاه رشت می‌باشد، در ماه‌های فوریه، مارس، آوریل، اکتبر و نوامبر داشته است. به عنوان مثال،  $S_{RH} = ۰/۸۲$  بدین مفهوم است که ۱۰۰٪ افزایش در متغیر  $R_n$  باعث ۸۲٪ افزایش در  $ET_o$  می‌شود. ایستگاه یزد در اقلیم فراخشک دارای کمترین مقدار ضریب حساسیت رطوبت نسبی ( $S_{RH}$ ) و ایستگاه رشت دارای بیشترین مقدار آن به ترتیب با میانگین مقادیر ۰/۲۰ و ۰/۴۵ می‌باشد. بنابراین مناطق ساحلی شمالی کشور با اقلیم‌های مرطوب و بسیار مرطوب (الف) به  $S_{RH}$  حساس‌تر هستند.

به دلیل تفاوت‌های اقلیمی هر ناحیه با ناحیه دیگر، پهنه‌بندی ضرایب حساسیت براساس نتایج حاصل از روش عکس مجذور فاصله<sup>۱</sup> (IDW) انجام شد. نقشه پهنه‌بندی ضرایب حساسیت دمای هوا، سرعت باد در ارتفاع دو متری، تابش خالص و رطوبت نسبی در (شکل ۳) آورده شده است.

## نتایج و بحث

در این مطالعه از مدل پنمن - مونتیث - فائو استفاده شد. این مدل مقادیر تبخیر تعرق مرجع را در تمامی مناطق و اقلیم با اعمال فرضیات مدل محاسبه می‌کند. پس از مشاهده تغییرات روزانه تبخیر تعرق مرجع در ایستگاه‌های مطالعاتی، به تحلیل حساسیت معادله پنمن - مونتیث - فائو بر اثر تغییر هر یک از متغیرهای ورودی آن (دمای هوا، سرعت باد در ارتفاع دو متری، تابش خالص و رطوبت نسبی) در ایستگاه‌های مطالعاتی پرداخته شد.

ضرایب حساسیت روزانه پارامترهای هواشناسی در ایستگاه‌های نمونه، تغییرات متفاوتی در طول دوره آماری مورد مطالعه دارند که برای نمونه ضرایب حساسیت ۶ ایستگاه بر روی شکل ۲ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که ضریب حساسیت میانگین دما ( $S_T$ ) در بین کلیه ایستگاه‌های مطالعاتی بین ۰/۲۱ تا ۰/۷۸ تغییر نموده است که بیشترین ضریب حساسیت دما مربوط به ایستگاه بوشهر در اقلیم خشک (ماه‌های آوریل، می، ژوئن، ژوئیه، اکتبر و نوامبر) بود که نشان دهنده حساسیت بیشتر  $ET_o$  به متغیر مذکور می‌باشد و کمترین آن در ایستگاه شهرکرد در اقلیم نیمه‌خشک (در ماه‌های ژانویه، مارس، آوریل و نوامبر) می‌باشد. بیشترین و کمترین مقدار ضریب حساسیت سرعت باد در ارتفاع دو متری ( $S_{u_2}$ ) به ترتیب با مقادیر ۰/۵۴ و ۰/۰۷ مربوط به ایستگاه زاهدان و اردبیل در اقلیم فراخشک و نیمه‌خشک بوده است. بیشترین مقدار ضریب حساسیت تابش خالص ( $S_{R_n}$ ) مربوط به ایستگاه رشت در اقلیم بسیار مرطوب (الف) (۰/۸۲) و کمترین آن مربوط به ایستگاه زاهدان در اقلیم فراخشک (۰/۲۸) و پس از آن ایستگاه اهواز با میانگین ۰/۳۴ بوده



شکل ۲- ضرایب حساسیت در چند ایستگاه نمونه در اقالیم مختلف برای متغیرهای: الف) تابش خالص ( $S_{R_n}$ ), ب) سرعت باد در ارتفاع دو متری

$$(\mathcal{S}_{u_2}), \text{ پ) دما } (S_T) \text{ و ت) رطوبت نسبی } (S_{RH})$$

a) net radiation ( $S_{R_n}$ ), b) Figure 2. Sensitivity coefficients in many sample stations in different climate for the parameters wind speed at a two meter height ( $S_{u_2}$ ), c) temperature ( $S_T$ ) and d) relative humidity ( $S_{RH}$ )

جدول ۲- مقادیر متوسط حداکثر، حداقل و میانگین سالانه ضرایب حساسیت براساس نوع اقلیم ایستگاه‌های مورد مطالعه  
 Table 2. Mean values of maximum, minimum and mean annual sensitivity coefficients based on the study of climate of stations

ماه Month	حداقل ضریب حساسیت Minimum sensitivity of coefficient	ماه Month	حداکثر ضریب حساسیت Maximum sensitivity of coefficient	میانگین سالانه ضریب حساسیت The mean annual sensitivity of coefficient	ضرایب حساسیت Sensitivity coefficients	ایستگاه Station
دسامبر Dec.	0.40	ژانویه Jan.	0.60	0.50	$S_{Rn}$	یزد Yazd
ژانویه Jan.	0.21	اکتبر Oct.	0.44	0.34	$S_{u2}$	
ژانویه Jan.	0.15	می May.	0.49	0.38	$S_T$	
اگوست Aug.	0.10	ژانویه Jan.	0.36	0.20	$S_{RH}$	اهواز Ahvaz
ژوئن و ژوئیه Jun. & Jul.	0.15	ژانویه Jan.	0.60	0.34	$S_{Rn}$	
ژانویه Jan.	0.24	اگوست Aug.	0.59	0.46	$S_{u2}$	
اگوست Aug.	-0.38	نوامبر Nov.	0.79	0.31	$S_T$	بوشهر Bushehr
ژوئن و ژوئیه Jun. & Jul.	0.15	ژانویه Jan.	0.43	0.28	$S_{RH}$	
نوامبر Nov.	0.29	اگوست Aug.	0.60	0.47	$S_{Rn}$	
مارس Mar.	0.21	نوامبر Nov.	0.44	0.31	$S_{u2}$	شهرکرد Shahreکرد
ژانویه Jan.	0.58	اکتبر Oct.	1.05	0.78	$S_T$	
می May.	0.34	ژانویه و دسامبر Jan. & Dec.	0.43	0.39	$S_{RH}$	
ژانویه Jan.	0.18	ژانویه Jan.	0.43	0.31	$S_{RH}$	شیراز Shiraz
اکتبر Oct.	0.52	ژانویه Jan.	0.88	0.70	$S_{Rn}$	
ژانویه Jan.	0.08	اکتبر Oct.	0.32	0.19	$S_{u2}$	
دسامبر Dec.	-0.28	می و ژوئیه May. & Jul.	0.36	0.21	$S_T$	شیراز Shiraz
اکتبر Oct.	0.48	ژانویه Jan.	0.73	0.58	$S_{Rn}$	
ژانویه Jan.	0.17	اکتبر Oct.	0.41	0.30	$S_{u2}$	
ژانویه Jan..	0.16	می May.	0.46	0.35	$S_T$	شیراز Shiraz
ژوئن Jun.	0.15	ژانویه Jan.	0.39	0.26	$S_{RH}$	



ادامه جدول ۲

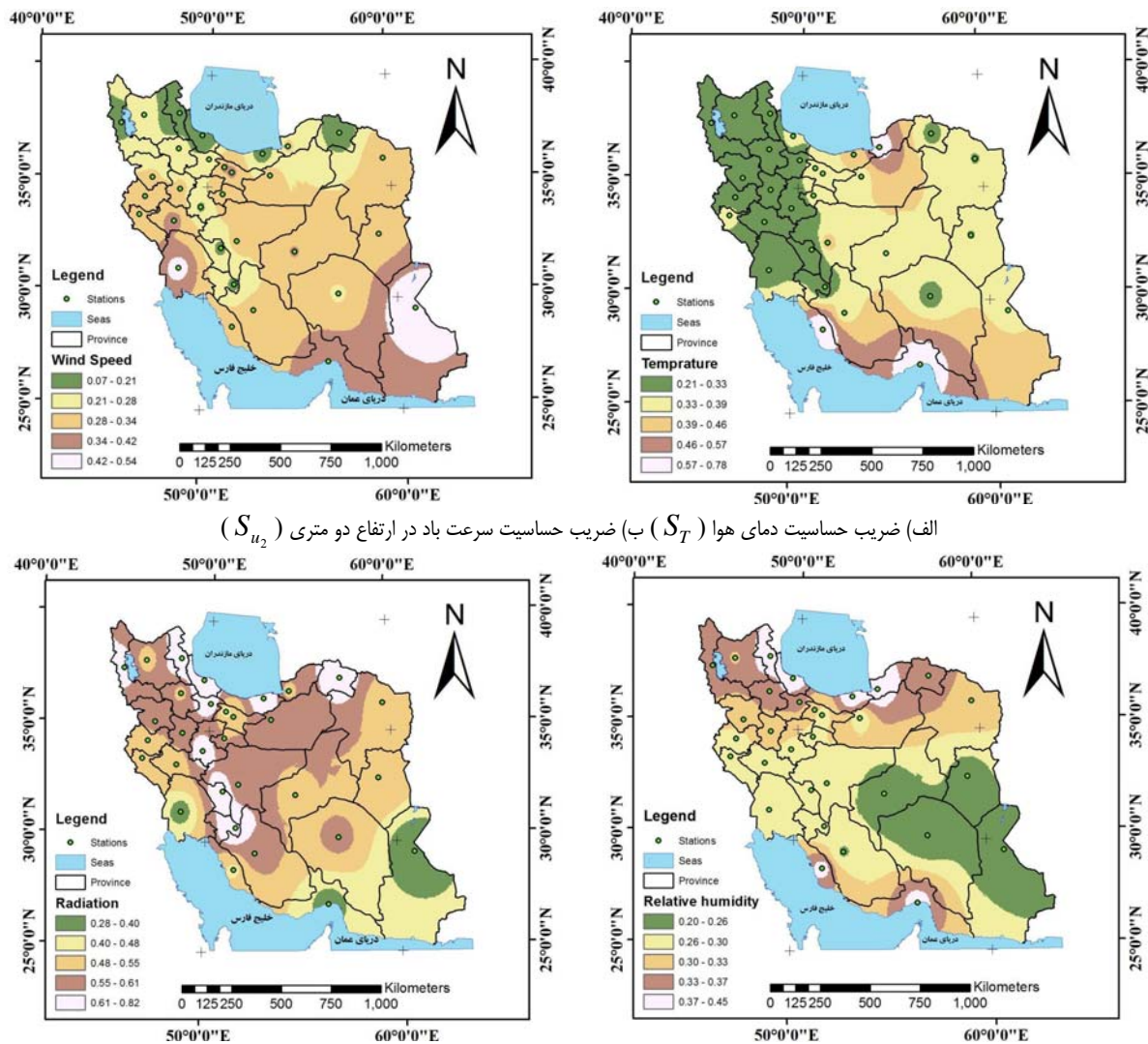
ماه Month	حداقل ضریب حساسیت Minimum sensitivity of coefficient	ماه Month	حداکثر ضریب حساسیت Maximum sensitivity of coefficient	میانگین سالانه ضریب حساسیت The mean annual sensitivity of coefficient	ضرایب حساسیت sensitivity coefficients	ایستگاه Station
دسامبر Dec.	0.35	آوریل Apr.	0.72	0.52	$S_{Rn}$	ایلام Ilam
آوریل Apr.	0.16	اکتبر Oct.	0.47	0.33	$S_{u2}$	
ژانویه Jan.	0.10	ژوئن، ژوئیه و آگوست Jun., Jul. & Aug.	0.47	0.35	$S_T$	
ژوئن، ژوئیه و آگوست Jun., Jul. & Aug.	0.15	ژانویه Jan.	0.41	0.27	$S_{RH}$	
دسامبر Dec.	0.33	آوریل Apr.	0.77	0.54	$S_{Rn}$	گرگان Gorgan
مارس و آوریل Mar. & Apr.	0.08	دسامبر Dec.	0.49	0.28	$S_{u2}$	
ژانویه Jan.	0.27	آگوست Aug.	1.07	0.67	$S_T$	
ژوئن Jun.	0.37	مارس، آوریل و دسامبر Mar., Apr. & Dec.	0.46	0.42	$S_{RH}$	
دسامبر Dec.	0.35	آوریل Apr.	0.72	0.52	$S_{Rn}$	ساری Yasouj
دسامبر Dec.	0.49	ژوئیه Jul.	0.84	0.72	$S_{u2}$	
مارس و آوریل Mar. & Apr.	0.05	دسامبر Dec.	0.38	0.16	$S_T$	
دسامبر Dec.	0.23	می، ژوئن و آگوست May., Jun. & Aug.	0.48	0.40	$S_{RH}$	
اکتبر Oct.	0.58	ژانویه Jan.	0.82	0.71	$S_{Rn}$	یاسوج Yasouj
ژانویه Jan.	0.08	اکتبر Oct.	0.32	0.20	$S_{u2}$	
ژانویه Jan.	0.04	می، ژوئیه و آگوست May., Jul. & Aug.	0.35	0.27	$S_T$	
ژوئن Jun.	0.17	ژانویه Jan.	0.42	0.8	$S_{RH}$	
دسامبر Dec.	0.53	سپتامبر Sep.	0.92	0.82	$S_{Rn}$	رشت Rasht
آوریل و اکتبر Apr. & Oct.	0.00	دسامبر Dec.	0.27	0.08	$S_{u2}$	
ژانویه Jan.	0.19	ژوئن، ژوئیه و سپتامبر Jun., Jul. & Sep.	0.44	0.36	$S_T$	
دسامبر Dec.	0.42	نوامبر Nov.	0.48	0.45	$S_{RH}$	

است. این مقدار به سمت مرکز کشور اندکی کاهش می‌یابد و به حدود ۰/۴۰ می‌رسد و سپس به سمت نواحی مرتفع ساحلی شمالی و

با توجه به شکل (۳)، بیشترین مقدار ضریب حساسیت دمای هوا در مناطق ساحلی جنوبی و جنوب غرب کشور در حدود ۰/۷۸ - ۰/۷۱

ایستگاه اردبیل و پس از آن ایستگاه رشت) داشته و بیشترین حساسیت مربوط به  $R_n$  با میانگین  $0.82$  در ایستگاه رشت بوده است. مناطق ساحلی شمالی حساسیت بیشتری نسبت به متغیر RH ( $0.42-0.45$ ) نشان داده‌اند.

شمال غرب به مقدار  $0.15$  کاهش می‌یابد. بنابراین  $S_T$  در مناطق ساحلی شمالی دارای کمترین مقدار بوده و بیشترین مقدار آن مربوط به مناطق ساحلی جنوبی و جنوب غربی کشور می‌باشد. همچنین،  $ET_0$  کمترین حساسیت را نسبت به  $u_2$  در مناطق ساحلی شمالی



الف) ضریب حساسیت دمای هوا ( $S_T$ ) ب) ضریب حساسیت سرعت باد در ارتفاع دو متری ( $S_{u_2}$ )

ج) ضریب حساسیت رطوبت نسبی ( $S_{RH}$ ) د) ضریب حساسیت تابش خالص ( $S_{R_n}$ )

شکل ۳- توزیع مکانی ضرایب حساسیت در طول دوره آماری (۱۹۹۶-۲۰۱۵)

Figure 3- Spatial distribution of sensitivity coefficient during the period (1996-2015)

نوسانات شاید به این دلیل باشد که متغیرهای هواشناسی تحت تأثیر توپوگرافی منطقه، پوشش گیاهی منطقه و خصوصیات خاک در مناطق مختلف تغییر می‌کنند.

به طور کلی، نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که  $ET_0$  نسبت به متغیرهای هواشناسی نوسانات متفاوتی در بین مناطق مختلف داشته است. به طور مشابه این نتیجه در مطالعات گونگ<sup>۱</sup>، هاپت و وانگلوستر<sup>۲</sup> (۱۰) و لیانگ<sup>۳</sup> (۱۱) مشاهده شد. دلیل اصلی

3- Liang

1- Gong  
2- Hupet and Vanclooster

## نتیجه گیری کلی

همه ایستگاه‌ها دارای بیشترین تأثیر بر روی  $ET_0$  بوده است. در نمونه‌های اقلیم مدیترانه‌ای، در ایستگاه گرگان، متغیر دما (روز جولایوسی ۱۰۷ و ۱۱۵ ماه آوریل منطبق بر ۱۷-۱۶ و ۲۵-۲۴ ام) و در ایستگاه ایلام،  $R_n$  (در ماه‌های ژانویه، مارس، می، ژوئن، ژوئیه، نوامبر و دسامبر) مؤثرترین متغیرها بودند. در هر ۲ نمونه‌های اقلیم مرطوب (ایستگاه ساری و یاسوج) و بسیار مرطوب (الف) (ایستگاه رشت) بیشترین حساسیت مربوط به  $R_n$  مشاهده شد. در ایستگاه ساری در ماه‌های فوریه، مارس، آوریل، اکتبر و نوامبر، در ایستگاه یاسوج از ماه ژانویه تا دسامبر (دی تا بهمن) و در ایستگاه رشت در ماه‌های فوریه، مارس، آوریل، اکتبر و نوامبر بیشترین حساسیت را داشته است. بنابراین  $ET_0$  محاسبه شده در تمامی اقلیم بیشترین حساسیت را نسبت به  $R_n$  و پس از آن دما داشته است. ضریب حساسیت دما در ماه‌های آوریل، می، ژوئن، ژوئیه، اکتبر و نوامبر بالاترین مقدار و  $R_n$  در ماه‌های مارس، آوریل، اکتبر و نوامبر بیشترین مقدار را داشته بنابراین، ضریب حساسیت  $R_n$  در اکثر ماه‌های بهار و پاییز بزرگتر و طی ماه‌های زمستان کوچکتر بود. در حالی که کمترین مقدار  $S_{ii_2}$  با مقدار ۰/۰۷ در همه ماه‌ها به جزء ماه می (۱۱ اردیبهشت تا ۱۰ خرداد) و ژوئیه (۱۰ تیر تا ۱۰ مرداد) و بیشترین آن با مقدار ۰/۵۴ در ماه‌های ژانویه، ژوئیه، آگوست و سپتامبر بوده است. کمترین مقدار  $S_{RH}$  در ماه‌های مارس، آوریل و اکتبر و بیشترین آن در ماه‌های ژانویه، فوریه، می و ژوئن به ترتیب با میانگین مقادیر ۰/۲۰ و ۰/۴۵ می‌باشد. ضریب حساسیت مربوط به میانگین دما طی ماه‌های تابستان بزرگتر و طی ماه‌های زمستان کوچکتر بود. مقدار افزایش  $ET_0$  با توجه به افزایش هر یک از متغیرهای اقلیمی در هر ماه تغییر نمود.

انجام تحلیل حساسیت بر روی پنمن - مونتیث - فائو از کارآمدترین روش‌ها برای شناخت درجه تأثیر پارامترهای مختلف اقلیمی بر روی تبخیرتعرق مرجع است. این کار علاوه بر شناخت بهتر پدیده تبخیرتعرق، به شناخت عوامل تأثیرگذارتر در هر منطقه کمک فراوان می‌نماید. تحلیل حساسیت محلی، تأثیر عوامل را بر خروجی مدل نشان می‌دهد. در این تحلیل، از روش مشتقات جزئی توابع خروجی با توجه به متغیرهای ورودی استفاده می‌شود. مزیت این روش نسبت به روش‌های دیگر در این است که تغییرات یک عامل را بر عوامل دیگر نشان می‌دهد به طوری که یک عامل متغیر و عوامل دیگر ورودی ثابت نگاه داشته می‌شوند. در این مطالعه، نتایج نشان داد که در نمونه‌های اقلیم فراخشک که شامل ایستگاه‌های بندرعباس، یزد و زاهدان می‌باشد،  $ET_0$  محاسبه شده در ایستگاه یزد، بیشترین حساسیت را به  $S_{RH}$  با مقدار ۰/۵۰ داشته و در ایستگاه زاهدان (در ماه‌های ژانویه، ژوئیه، آگوست و سپتامبر) بیشترین حساسیت مربوط به  $S_{ii_2}$  با مقدار ۰/۵۴ بوده و هم‌چنین در ایستگاه بندرعباس، حساس‌ترین متغیر،  $S_T$  با مقدار ۰/۷۱ بوده است. در نمونه‌های اقلیم خشک (تعداد ۱۰ ایستگاه)  $ET_0$  محاسبه شده در مرتبه اول به متغیر  $R_n$  در ۸ ایستگاه (بیرجند، اصفهان، قم، کرج، کرمان، مشهد، سمنان و تهران) بیشترین حساسیت را نشان داده و سپس در ۲ ایستگاه دیگر (اهواز و بوشهر) بیشترین حساسیت را به ترتیب به سرعت باد (در ماه‌های ژانویه، می، اکتبر و نوامبر) و دما (در ماه‌های آوریل، می، ژوئن، ژوئیه، اکتبر و نوامبر) داشته است. هم‌چنین در نمونه‌های اقلیم نیمه‌خشک که شامل ۱۳ ایستگاه می‌باشد، ضریب حساسیت  $R_n$

## منابع

1. Alizadeh A., Kamali GH.A., Khanjani M.J and Rahnavard, M.R. 2004. Evaluation of evapotranspiration in arid regions of Iran. Journal of Geographical Research, 2(73): 97-105. (in Persian)
2. Alizadeh A. 2006. Designing of Irrigation Systems. First Volume, Publishers of Astan Quds Razavi, p. 460.
3. Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., and Smith M. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and drainage paper (FAO), 56: 1- 300.
4. Bakhtiari B., and Liaghat A.M. 2011. Seasonal sensitivity analysis for climatic variables of ASCE- Penman-Monteith in a Semi-arid climate. Journal of Agricultural Science and Technology, 13: 1135-1145.
5. Beven K. 1979. A Sensitivity analysis of the Penman- Monteith actual evapotranspiration estimates. Journal of Hydrology, 44: 169-190.
6. Coleman G., and DeCoursey D.G. 1976. Sensitivity and model variance analysis applied to some evaporation and evapotranspiration models. Water Resour Research, 12: 873-879.
7. 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, Hydrology Process, 23:3342-3353.
8. Gong L.B., Xu C.Y., Chen D.L., Halldin S., and Chen Y.D. 2006. Sensitivity of the Penman- Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the changjiang (Yangtze River) basin. Journal of Hydrology, 329: 620-629.
9. Hargreaves G.H. 1994. Defining and using reference evapotranspiration. Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 120(6): 1132- 1139.

10. Hupet F., and Vanclooster M. 2001. Effect of the sampling frequency of meteorological variables on the estimation of the reference evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 243: 192-204.
11. Liang L.Q., Li L.J., Zhang L., Li, J.Y., and Li B. 2008. Sensitivity of the Penman- Monteith reference crop evapotranspiration in Tao'er River basin of Northeastern China. *Chinese Geographical Science*, 18: 340-347.
12. 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 YellowRiver Basin. *Hydrological Processes*, 24: 2171- 2181.
13. Mamassis N., Panagoulia D., Novkovic A. 2014. Sensitivity analysis of Penman evaporation method. *Global NEST*, 16(4): 628- 639.
14. McCuen R.H. 1974. A sensitivity and error analysis of procedures used for estimating evaporation. *Water Resource Bulletin*, 10: 486-498.
15. Rana G. and Katerji N. 1998. A Measurement based sensitivity analysis of the Penman- Monteith actual evapotranspiration model for crops of different heights and in contrasting water status. *Theoretical and Applied Climatology*. 60: 141-149.
16. Saltelli A., and Bolado R. 2000. An Alternative way to compute fourier amplitude sensitivity test (FAST), *Computational Statistics and Data Analysis*, 26(4): 445-460.
17. Saxton K.E. 1975. Sensitivity analysis of the combination evapotranspiration equation. *Agricultural Meteorology*, 15: 343-353.
18. Sharifi A.R., and Dinpazhoh Y. 2014. Sensitivity analysis reference crop evapotranspiration Penman-Monteith model to climatic variables in Iran. *Journal of Water Resources Management*, 28: 5465-5476. (in Persian)
19. Zhao J., Xu Z.x., Zuo D.p., and Wang X.m. 2015. Temporal variations of reference evapotranspiration and its sensitivity to meteorological factors in Heihe River Basin, china. *Water Sciences and Engineering*, p. 1-8.

## Sensitivity Analysis of FAO Penman-Monteith Model in Daily Reference Evapotranspiration Estimation and Zoning Sensitivity Coefficients across Iran

F. Khadempour<sup>1</sup>- B. Bakhtiari<sup>2\*</sup>- S. Golestani<sup>3</sup>

Received: 01-11-2016

Accepted: 14-02-2017

**Introduction:** In drainage and irrigation network capacity design and determination, reference evapotranspiration ( $ET_0$ ) plays significant role. Methods applied for estimated reference evapotranspiration classified in two direct and computational methods. Amongst computational methods it might point to Penman-Monteith method. This method requires radiation, temperature, humidity and wind speed data with high reliability rate in vast ranges of climates and areas represent precise outcome from reference plant Evapotranspiration.

**Materials and Methods:** Study stations in De Martonne classification system are divided into 6 climates such as Hyper-arid, Arid, Semi-arid, Mediterranean, Humid and Very humid (a) climates. Study stations statistical span during 19 years (1996-2015) were selected and temperature, relative humidity, sunshine hours, and wind speed in 2 meter height daily data were used. Figure 1 showed studied stations position all over the country. In this study, in order to obtain daily  $ET_0$ , Penman-Monteith standard method represented by FAO-56 was used. In local sensitivity analysis, factors local influences on model output were shown. Such an analysis usually carried out through output functions minor deviants computation due to input variables. In this analysis, usually it was used one-factor- at-a- time method (OAT), so that, one variable factor and other input factors kept constant.



Figure 1. The geographical location of weather stations

The FAO-56 PM model for estimating  $ET_0$  is as follows (3).

1, 2 and 3- M. Sc. Student in Water Resource Engineering and Assistant Professors, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran  
(\* - Corresponding Author Email: Email: Drbakhtiari@uk.ac.ir)

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma\left(\frac{900}{T + 273}\right)u_2 e_s \left(1 - \frac{RH}{100}\right)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

where  $ET_o$  is reference crop evapotranspiration ( $\text{mm day}^{-1}$ ),  $\Delta$  is the slope of vapor pressure versus temperature curve at temperature  $T_{\text{mean}}$  ( $\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$ ),  $\gamma$  is the psychometric constant ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ),  $u_2$  is the wind speed at a 2 m height ( $\text{m s}^{-1}$ ),  $R_n$  is the net radiation at crop surface ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ),  $G$  is the soil heat flux density ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ),  $T$  is the mean daily air temperature at 2 m height ( $^\circ\text{C}$ ), and  $(e_s - e_a)$  is the saturation vapor pressure deficit ( $\text{kPa}$ ).

**Results and Discussion:** Weather parameters in stations showed that mean temperature sensitivity coefficient ( $S_T$ ) in all study stations varied between 0.21 to 0.78 so that the maximum temperature sensitivity coefficient related to Bushehr station in arid climate (in April, May, June, July, October and November) and minimum temperature sensitivity coefficient related to Shahrekordstation in semi-arid climate (in January, March, April and November). Maximum and minimum net radiation sensitivity coefficient value ( $S_{R_n}$ ) related to Rasht and Zahedanstations respectively. Also, maximum and minimum wind speed sensitivity coefficient value ( $S_{u_2}$ ) related to Zahedan and Ardebilstations are 0.54 and 0.07 respectively. Yazd station in Hyper-arid climate showed minimum relative humidity sensitivity coefficient value ( $S_{RH}$ ) about 0.20 and Rasht station in very-humid (a) showed the maximum values 0.45. So the northern coastal areas are more sensitive to  $S_{R_n}$  and  $S_{RH}$ . The highest value  $S_{R_n}$  is in northern coastal areas and lowest in southern coastal and southwest areas of the country. Some other studies showed that in many climates evapotranspiration was more sensitive to  $R_n$  (6, 14 and 17). In current study, also,  $S_{R_n}$  showed the highest sensitivity in Very-humid climate (a) includes Rasht station in February, March, April, October and November. For example,  $S_{R_n} = 0.82$  means that 100% increase in  $R_n$  parameter result in 82% increase in  $ET_o$ .

**Conclusion:** Sensitivity analysis experiment on FAO Penman-Monteith standard method is one of the most efficient methods to understand various climate parameters influence on reference evapotranspiration ( $ET_o$ ). In this study, results showed that computed  $ET_o$  in all climates showed highest sensitivity to  $R_n$  and temperature respectively. Temperature sensitivity coefficient showed the highest value at April, May, June, July, October and November and  $R_n$  showed its highest value at March, April, October and November. While, minimum  $S_{u_2}$  in all of months but May and July and maximum value showed in January, July, August and September by 0.07 and 0.54 respectively. So,  $S_{R_n}$  in most months of the spring and the fall was larger and smaller during the winter months. Sensitivity coefficient related to mean temperature is higher during summer season and lower during winter season. Results of this study may be useful for assessing the response of the standardized FAO Penman-Monteith model in different climatic conditions. The results can also be used to predict changes in  $ET_o$  values with respect to climatic variable changes obtained from climate change models.

**Keywords:** FAO Penman- Monteith, Reference evapotranspiration, Sensitivity analysis, ET