

استفاده از تجزیه علیت در تعیین پارامترهای هواشناسی غالب بر تبخیر و تعرق گیاه مرجع در استان آذربایجان شرقی

یعقوب دین‌پژوه* - دانشیار گروه مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
معصومه فروغی - دکتری آب و هواشناسی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۲/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۴/۲۹

چکیده

در این پژوهش اثرهای مستقیم و غیرمستقیم پارامترهای هواشناسی بر روی ET_0 در استان آذربایجان شرقی با استفاده از تجزیه علیت بررسی شده است. برای برآورد ET_0 از فرمول فائو- پنمن مانتیث استفاده شد. مهم‌ترین پارامترهای هواشناسی مؤثر بر ET_0 با استفاده از رگرسیون گام به گام شناسایی، به منظور ارزیابی عملکرد مدل رگرسیونی، از آماره‌های $MAPE$ ، R^2 ، $RMSE$ و MAE استفاده شد و اثرهای مستقیم و غیرمستقیم هر یک از پارامتر بر ET_0 با استفاده از تجزیه علیت محاسبه شد. مقدار $MAPE$ مابین 0.43 و 0.87 ، R^2 مابین 0.97 و 0.99 ، $RMSE$ مابین 0.42 و 0.92 ، و MAE مابین 0.33 و 0.57 به دست آمد. سرعت باد در ایستگاه‌های مورد مطالعه (به جز ایستگاه اهر) همبستگی معنی‌داری با ET_0 نشان داد. با توجه به نتایج تجزیه علیت، بیشترین مقدار اثر مستقیم پارامترهای هواشناسی بر ET_0 در همه ایستگاه‌ها به جز اهر متعلق به سرعت باد بود که مقدار آن برای تبریز 0.37 ، جلفا 0.787 ، سهند 0.877 ، سراب، 0.578 ، مراغه، 0.85 ، و میانه 0.78 است و در ایستگاه اهر متعلق به پارامتر T_{max} معادل 0.398 بود. کمترین مقدار اثر مستقیم پارامترهای هواشناسی بر ET_0 در منطقه مورد مطالعه متعلق به حداقل درجه حرارت هوا بوده است.

واژگان کلیدی: پارامترهای هواشناسی، تبخیر- تعرق گیاه مرجع، تجزیه علیت، رگرسیون گام به گام.

مقدمه

با توجه به مطالعات انجام‌گرفته، میانگین درجه حرارت در ۱۵۰ سال گذشته تا $1/5$ درجه فارنهایت در نزدیک سطح زمین افزایش یافته است (فاستر و رامستورف، ۲۰۱۱؛ هوبر و ناتی، ۲۰۱۱). افزایش دمای کره زمین سبب افزایش تبخیر و تعرق شده و ظرفیت اتمسفر را برای جذب بخار آب بیشتر کرده است. به همین دلیل، افزایش دمای هوا اجزای چرخه هیدرولوژیکی را تغییر داده و در نتیجه توزیع منابع آب دنیا در مقیاس زمانی و مکانی دگرگون شده است (اسدزاده و همکاران، ۱۳۹۶: ۲۱۷). تبخیر- تعرق گیاه مرجع (ET_0) به‌عنوان یکی از پارامترهای مهم در حفظ تعادل آب و انرژی اکوسیستم زمین است (جارویس و مک‌ناتون، ۱۹۸۶؛ خینگ و همکاران، ۲۰۱۶) که به‌طور گسترده‌ای در موارد مختلف منابع آب مانند استراتژی آبیاری کشاورزی، تعادل آب در زمین‌های کشاورزی، و برنامه‌ریزی آبیاری و غیره استفاده شده است (هاج و همکاران، ۱۹۹۹؛ جاکوبسن و همکاران، ۲۰۱۲؛ نام و همکاران، ۲۰۱۵). بنابراین، بررسی ابعاد مختلف ET_0 می‌تواند برای تعیین آب مصرفی گیاهان و ایجاد استراتژی مدیریت منابع آب مفید باشد (پنگ و همکاران، ۲۰۱۷).

مالیک و کومار (۲۰۱۵) با استفاده از مدل MLR در منطقه پانتاگار^۱ به بررسی تبخیر روزانه از تشت پرداختند و سپس به ارزیابی عملکرد مدل‌ها با استفاده از R^2 و RMSE پرداختند. نتایج تحقیقات ایشان نشان داد که روش MLR از کارایی زیادی در برآورد ET_0 برخوردار است. ماهیدا و پاتل (۲۰۱۵) تأثیر پارامترهای اقلیمی بر روی ET_0 را با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه (MLR) تجزیه و تحلیل کردند. ایشان برای تخمین ET_0 از روش فائو-پنمن-مانیت (FAO 56-PM) استفاده کردند. در MLR مقدار ET_0 به‌عنوان متغیر پیش‌بینی‌شونده و حداکثر درجه حرارت هوا (T_{max})، ساعات آفتابی (n)، رطوبت نسبی (RH)، و سرعت باد (U) به‌عنوان متغیرهای مستقل مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که T_{max} عاملی غالب در برآورد مقدار ET_0 است، ولی RH در پیش‌بینی ET_0 در این منطقه نقش چندان مهمی ندارد. خدکار و همکاران (۲۰۱۶) به مطالعه و تخمین ET_0 با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه پرداختند. براساس نتایج، همه انواع رگرسیون خطی چندگانه نتایج قابل قبولی برای تخمین ET_0 برای ایستگاه دوهه^۲ هند ارائه داد. خینگ و همکاران (۲۰۱۲) به مطالعه ET_0 در جنوب چین طی دوره آماری ۱۹۶۹ تا ۲۰۱۰ پرداختند. ایشان در مطالعه خود از روش‌های FAO 56-PM و تجزیه علیت استفاده کردند. نتایج نشان داد که در جنوب چین، براساس تئوری تجزیه علیت، ساعات آفتابی با ضریب همبستگی ۰/۸۴ و ضریب مسیر ۰/۵۶ اثر قوی‌تری بر ET_0 دارد و T_{min} و RH در رده‌های بعدی قرار دارند. مانیکوماری و ویوندهینی (۲۰۱۶) به پیش‌بینی ET_0 در هند در طول دوره آماری ۱۹۹۸-۲۰۰۸ با استفاده از مدل رگرسیونی MLR پرداختند و نتایج به‌دست‌آمده را با ET_0 به‌دست‌آمده از FAO-56-PM مقایسه کردند. نتایج نشان داد که مقادیر ET_0 به‌دست‌آمده از مدل‌ها با مقادیر به‌دست‌آمده از FAO-56-PM دارای ارتباط نزدیکی است. مقدار ضریب تعیین در مطالعه ذکر شده $R^2=0/98$ است که بیانگر ارتباط نزدیک مقادیر مشاهداتی و به‌دست‌آمده از مدل است. لیو و همکاران (۲۰۱۶) به مطالعه ET_0 در جنوب چین پرداختند و استفاده از تئوری تجزیه علیت اثرات مستقیم و غیرمستقیم پارامترهای هواشناسی مؤثر در ET_0 را مشخص کردند. برای تخمین ET_0 از روش FAO-PM56 استفاده کردند. سپس، نتیجه را با خروجی روش‌های هارگریوز سامانی و پرستلی تیلور مقایسه کردند. برای ارزیابی عملکرد مدل‌های مورد استفاده شامل شبکه‌های عصبی مصنوعی ANN و WNN، از MAE، RMSE، MAPE، N-SH، و R2 استفاده کردند. مقدار به‌دست‌آمده برای RMSE معادل ۰/۳۲ میلی‌متر در روز، برای MAE معادل ۵/۵ درصد، و برای آماره N-SH معادل ۰/۹ به‌دست آمد. ایشان دریافتند که این مدل‌ها می‌توانند با دقت بیشتری در مناطق دیگر به کار برده شوند. ژانگ و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از تجزیه علیت به بررسی عوامل مؤثر در ET_0 در چین پرداختند. نتایج نشان داد که درجه حرارت محیط و تابش خورشیدی بیشترین اثر مستقیم بر ET_0 را دارد که از این بین تأثیر درجه حرارت در افزایش ET_0 بیشتر از تابش خورشیدی است.

در ایران گرچه مطالعات متعددی روی ET_0 شامل روند تغییرات آن، واسنجی روش‌های تخمین آن، و مقایسه روش‌های مختلف تجربی با مدل FAO 56-PM (یا اندازه‌گیری مستقیم از لایسیمتر) انجام شده است، تاکنون مطالعه‌ای مبنی بر یافتن رابطه علت و معلولی بین پارامترهای هواشناسی و ET_0 انجام نشده است. به عنوان مثال، جهان‌بخش اصل و همکاران (۱۳۸۰) با استفاده از روش‌های ترکیبی، دمایی، تابشی، و همبستگی چندگانه و رطوبتی به برآورد ET_0 در شهر تبریز پرداختند و نتایج به‌دست‌آمده را با روش تشت تبخیر مقایسه کردند. نتایج نشان می‌دهد که روش هارگریوز نسبت به سایر روش‌ها تطابق بهتری با روش تشت تبخیر دارد. سیفی و همکاران (۱۳۸۹) به برآورد ET_0 با استفاده از مدل ترکیبی رگرسیون چندگانه و تحلیل مؤلفه‌های اقلیمی طی دوره ۱۹۹۶-۲۰۰۵ در ایستگاه کرمان پرداختند و

1. Pantnagar

2. Dhule

به‌منظور اهمیت نسبی متغیرهای مؤثر در محاسبات رگرسیونی از الگوریتم گام به گام استفاده کردند و برای ارزیابی عملکرد مدل از معیارهای RMSE و MEA استفاده کردند. نتایج نشان داد متغیرهای شدت تابش، RH، T_{max} و n بیشترین تأثیر را در ET_0 دارند و مقادیر ضریب همبستگی روش‌های MLR-PCA و MLR براساس مبنای مقایسه‌ی نتایج FAO 56-PM در مرحله‌ی آزمون به‌ترتیب ۰/۸۲۰ و ۰/۸۴۰ را گزارش کردند. کردوانی و قلعه‌ای (۱۳۹۲) با استفاده از مدل FAO 56-PM و به‌کارگیری پارامترهای U، RH، و تابش خورشیدی به برآورد ET_0 در حوضه‌ی آیدوغموش پرداختند. در مطالعات ایشان مقادیر RMSE و MBE به‌ترتیب معادل ۰/۲۲۷ تا ۰/۹۷۱ و -۰/۲۷۱ تا ۰/۷۲۴ به‌دست آمد. جعفری و دین‌پژوه (۱۳۹۵) به مطالعه‌ی کاربرد مدل رگرسیون چندمتغیره‌ی تیغه‌ای در برآورد تشت تبخیر از دشت در ایستگاه تبریز پرداختند. در این مطالعه، برای شبیه‌سازی تبخیر از تشت از مدل رگرسیون چندمتغیره استفاده شده است. مقادیر RMSE برای MLR معادل ۲/۵۸ میلی‌متر در روز و برای رگرسیون چندگانه غیرخطی ۰/۶۵ به‌دست آمد. ایشان نشان دادند که روش‌های رگرسیونی از توانایی زیادی در تخمین تبخیر از تشت در ایستگاه تبریز برخوردارند.

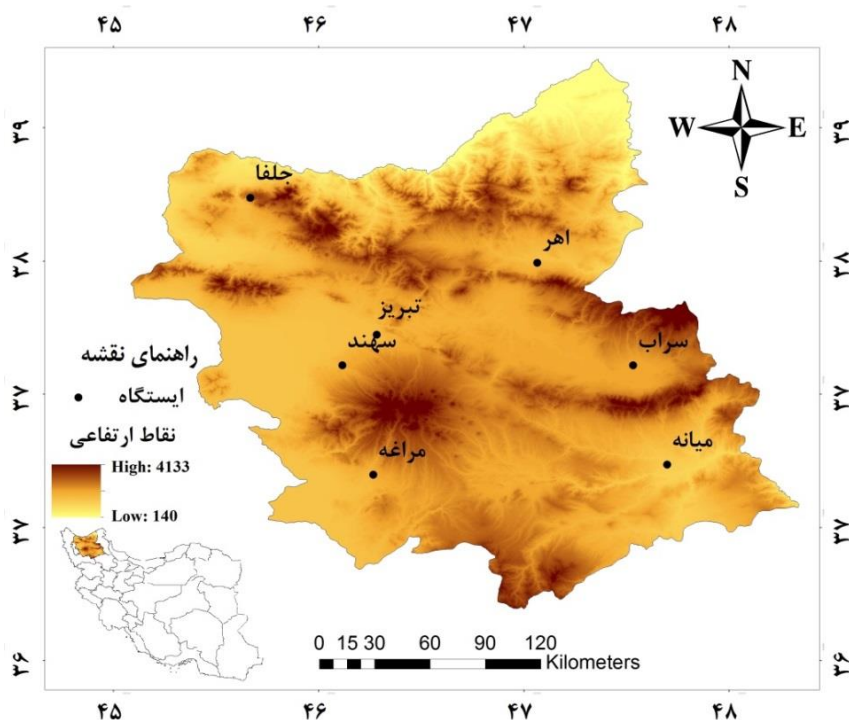
مرور پیشینه‌ی تحقیق‌ها نشان می‌دهد که تاکنون به‌طور جامع به اثرهای مستقیم و غیرمستقیم پارامترهای هواشناسی ET_0 پرداخته نشده است. گرچه از روش تجزیه‌ی علیت در سایر زمینه‌های کشاورزی استفاده شده است، در زمینه‌ی ارتباط پارامترهای هواشناسی با ET_0 به روش تجزیه‌ی علیت تعداد مطالعات در سطح جهانی بسیار محدود و انگشت‌شمار است. استفاده از این روش برای اولین بار در مطالعات اقلیمی یا هیدرولوژیکی نوآوری مطالعه‌ی حاضر محسوب می‌شود. بنابراین، هدف اصلی از پژوهش حاضر بررسی اثرهای مستقیم و غیرمستقیم پارامترهای هواشناسی روی ET_0 با استفاده از روش تجزیه‌ی علیت (تحلیل مسیر) در ایستگاه‌های منتخب در استان آذربایجان شرقی است. برای تخمین ET_0 از روش MLR و برای مقایسه‌ی دقت آن از خروجی روش FAO 56-PM استفاده شد.

مواد و روش‌ها

منطقه‌ی مورد مطالعه: استان آذربایجان شرقی با مساحت ۴۶۹۲۹/۹ کیلومتر مربع در عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۹ درجه و ۲۶ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۵ درجه و ۵ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۲۲ دقیقه شرقی در شمال غربی ایران قرار گرفته است. در این مطالعه، برای تخمین ET_0 با روش (FAO-56 PM) از پارامترهای هواشناسی شامل میانگین حداکثر درجه‌ی حرارت هوا (T_{max})، میانگین حداقل درجه‌ی حرارت هوا (T_{max})، میانگین حداقل رطوبت نسبی هوا (RH_{min})، میانگین حداکثر رطوبت نسبی هوا (RH_{min})، میانگین سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری به نات (U)، و تعداد ساعات آفتابی واقعی (n) استفاده شد. جدول ۱ مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی منتخب و طول دوره‌ی آماری آن و شکل ۱ موقعیت ایستگاه‌ها را بر روی منطقه‌ی مورد مطالعه نشان می‌دهد.

جدول ۱. مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی منتخب در استان آذربایجان شرقی (منبع، سایت هواشناسی کشور)

| ردیف | ایستگاه | دوره‌ی آماری | ارتفاع (متر) | عرض جغرافیایی | | طول جغرافیایی | |
|------|---------|--------------|--------------|---------------|-------|---------------|-------|
| | | | | درجه | دقیقه | درجه | دقیقه |
| ۱ | اهر | ۱۹۸۶-۲۰۱۵ | ۱۳۹۰/۵ | ۲۶ | ۳۸ | ۰۴ | ۴۷ |
| ۲ | تبریز | ۱۹۸۰-۲۰۱۵ | ۱۳۶۱ | ۰۵ | ۳۸ | ۱۷ | ۴۶ |
| ۳ | جلفا | ۱۹۸۶-۲۰۱۵ | ۷۳۶/۲ | ۴۵ | ۳۸ | ۴۰ | ۴۵ |
| ۴ | سراب | ۱۹۸۷-۲۰۱۵ | ۱۶۸۲ | ۵۶ | ۳۷ | ۳۲ | ۴۷ |
| ۵ | سهند | ۱۹۹۶-۲۰۱۵ | ۱۶۴۱ | ۵۶ | ۳۷ | ۰۷ | ۴۶ |
| ۶ | مراغه | ۱۹۸۴-۲۰۱۵ | ۱۴۷۷/۷ | ۲۴ | ۳۷ | ۱۶ | ۴۶ |
| ۷ | میانه | ۱۹۸۷-۲۰۱۵ | ۱۱۱۰ | ۲۷ | ۳۷ | ۴۲ | ۴۷ |



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های منتخب در استان آذربایجان شرقی (منبع: نگارندگان)

مدل رگرسیون خطی چندگانه^۱ (MLR)

ارتباط خطی بین متغیرهای مستقل X_1, X_2, \dots, X_n و متغیر Y در مدل رگرسیون چندگانه خطی به شرح زیر فرض شد:

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n + e \quad (1)$$

در رابطه ۱، a_0 عرض از مبدأ و a_1, a_2, \dots, a_n ضرایب رگرسیونی، و e میزان خطا است (بالان و همکاران، ۱۹۹۵). مدل رگرسیون چندگانه خطی در حالت ماتریسی به شرح زیر در نظر گرفته شد:

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (2)$$

در رابطه ۲، β بردار ضرایب رگرسیون، ε ماتریس خطای برازش، Y بردار نظیر متغیر وابسته، و X ماتریس متغیرهای مستقل است که به شرح زیر تعریف شدند:

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1p} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{np} \end{bmatrix} \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_p \end{bmatrix} \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

حل رابطه ۳ برحسب بردار β با استفاده از رابطه ماتریسی زیر (رابطه ۴) انجام شد:

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1}(X'Y) \quad (4)$$

در رابطه ۴، X' ترانزپوز ماتریس X است. برای محاسبه معکوس ماتریس $(X'X)$ ، لازم است دترمینان عبارت فوق صفر نشود. در این مطالعه از مدل رگرسیون خطی برای متغیرهای مشاهده‌ای استفاده شد.

تجزیه علیت^۱

رایت در سال ۱۹۲۱ برای اولین بار تجزیه علیت را ارائه کرد. امروزه، از این روش به‌طور گسترده در مطالعات کشاورزی و تقاضای انرژی برای آشکارکردن اثرهای مستقیم و غیرمستقیم بین برخی ویژگی‌های مؤثر در پارامتر وابسته استفاده می‌شود (یو و همکاران، ۲۰۱۲؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۶). با این حال، مطالعات کمی در مورد استفاده از این روش جهت بررسی عوامل مؤثر بر ET_0 وجود دارد. تجزیه علیت (تحلیل مسیر) یکی از انواع تحلیل‌های آماری چندگانه برای مطالعه روابط بین متغیرهاست. براساس این تحلیل، می‌توان به میزان تأثیر متغیرهای مستقل (مستقیم و غیرمستقیم) روی متغیر وابسته پی برد (کای و همکاران، ۲۰۰۸). در این روش ضرایب همبستگی (بین دو صفت) به اجزایی که اثرهای مستقیم و غیرمستقیم را اندازه‌گیری می‌کنند تفکیک می‌شود (زکی‌زاده و همکاران، ۲۰۱۰: ۲۳). در اثر مستقیم، اثر هر پارامتر هواشناسی بر تبخیر-تعرق گیاه مرجع به صورت مستقیم محاسبه می‌شود. در اثر غیرمستقیم اثر هر پارامتر هواشناسی از طریق تأثیر سایر پارامترها محاسبه می‌شود. به عبارت بهتر، اثر مستقیم در رابطه با میزان همبستگی موجود میان متغیر وابسته (در مطالعه حاضر: تبخیر-تعرق) با یک متغیر مستقل مانند رطوبت نسبی هوا است. اثر غیرمستقیم میزان همبستگی موجود بین متغیر وابسته (در این مطالعه تبخیر و تعرق) با متغیر مستقل رطوبت نسبی هوا از طریق مسیر دیگر (غیر از مسیر اصلی) است. مثلاً، تغییر در میزان پارامتر دیگر هواشناسی (مانند دمای هوا) خود موجب تغییر در رطوبت نسبی هوا می‌شود و، در نتیجه، به‌طور غیرمستقیم تغییر در میزان دمای هوا با اثر بر میزان رطوبت نسبی هوا موجب تغییر در مقدار تبخیر-تعرق می‌شود. میزان تأثیر غیرمستقیم در رابطه با میزان همبستگی جزئی موجود بین دو پارامتر دمای هوا و رطوبت نسبی هوا است. یعنی بخشی از افزایش تبخیر-تعرق ناشی از اثر این افزایش دما بر کاستن از میزان رطوبت نسبی هوا و در نتیجه افزایش تبخیر-تعرق است. به طوری که اشاره شد، تجزیه علیت می‌تواند اثرهای مستقیم و غیرمستقیم متغیرهای مستقل را بر روی متغیر وابسته به‌طور کمی معین کند. در مطالعه حاضر، متغیر وابسته مقدار ET_0 در ماه اوت (گرم‌ترین ماه سال) و متغیرهای مستقل شامل پارامترهای T_{max} ، T_{min} ، RH_{max} ، RH_{min} ، U ، و n در نظر گرفته شدند.

ضریب علیت^۲

ضرایب علیت (یا ضرایب مسیر که با نماد P_{y,x_i} نمایش داده می‌شود) روابط علت و معلولی را برای متغیرها توصیف می‌کند. همچنین، این ضریب همبستگی جزئی ساده بین متغیر وابسته و هر یک از متغیرهای مستقل را در نظر می‌گیرد (کای و همکاران، ۲۰۰۸).

برای یک سامانه همبسته با یک متغیر وابسته به نام y (مانند ET_0 در این مطالعه) و n متغیر مستقل به نام x_i رابطه ۵ در نظر گرفته شد (یو و همکاران، ۲۰۱۲):

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad (5)$$

برای تعیین ضرایب مسیر $P_{y x_i}$ ($i = 1, 2, \dots, n$) دستگاه n معادله n مجهولی به شرح زیر تشکیل شد. پس از جای‌گذاری مقادیر ضرایب همبستگی جزئی ساده، متغیرهای مستقل با همدیگر $(r_{i,j})$ در ماتریس مربعی $n \times n$ و مقادیر ضرایب همبستگی جزئی ساده بین هر یک از متغیرهای مستقل با متغیر وابسته $(r_{y x_i})$ در بردار $n \times 1$ (طرف راست تساوی) مقادیر مجهولات (یا ضرایب مسیر یا $P_{y x_i}$) به‌دست آمد.

$$\begin{bmatrix} 1 & r_{x_n x_1} & \dots & r_{x_1 x_n} \\ r_{x_2 x_1} & 1 & \dots & r_{x_1 x_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{x_n x_1} & r_{x_n x_2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{y x_1} \\ P_{y x_2} \\ \vdots \\ P_{y x_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{x_1 y} \\ r_{x_2 y} \\ \vdots \\ r_{x_n y} \end{bmatrix} \quad (6)$$

که در آن ضریب همبستگی ساده بین دو متغیر مستقل x_i و x_j است و $P_{y x_i}$ ضرایب مسیر است که از رابطه ۷ نیز قابل برآورد است:

$$P_{y x_i} = b_i \frac{\sigma_{x_i}}{\sigma_y}, \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

که در آن b_i ($i = 1, 2, \dots, n$) ضرایب رگرسیون خطی جزئی y نسبت به x_i (ضرایب رابطه ۱) است. در رابطه ۲، σ_{x_i} و σ_y به‌ترتیب انحراف‌معیار سری‌های نظیر x_i و y می‌باشند (به‌عنوان مثال، σ_{x_1} انحراف‌معیار اولین متغیر مستقل هواشناسی است و σ_y انحراف‌معیار مقادیر ET_0 در ماه اوت است). عبارت $P_{y x_i}$ عبارت است از اثر مستقیم ضریب مسیر x_i روی y و نیز حاصل ضرب $r_{x_i x_j}$ در $P_{y x_i}$ را می‌توان برای توصیف ضریب علیت غیرمستقیم x_i از طریق x_j برای y استفاده کرد. ذکر این نکته لازم است که برای استفاده از معادله ۳ لازم است که نخست مقادیر b_i ($i = 1, 2, \dots, n$) با روش MLR (رابطه ۱) به‌دست آید. آنگاه به ازای b های به‌دست‌آمده مقادیر $P_{y x_i}$ را حساب کرد. هر دو روش یعنی حل دستگاه معادلات (به شکل ماتریسی) در رابطه ۲ و استفاده از فرمول ۳ به یک پاسخ منتهی می‌شوند. واضح است چنانچه ماتریس مربعی ضرایب همبستگی جزئی با درایه‌های $r_{x_i x_j}$ منفرد باشد (یعنی دترمینان آن صفر باشد)، در این صورت، ماتریس ذکرشده در فرمول ۲ عکس نخواهد داشت. در صورت برخورد با چنین شرایطی، اثرهای مستقیم متغیرهای مستقل روی متغیر وابسته (ET_0) با استفاده از رابطه ۳ به‌دست آمد (خینگ و همکاران، ۲۰۱۶).

تئوری تجزیه علیت تحت شرایط زیر قابل کاربرد است:

۱. رابطه بین متغیرهای مستقل به همدیگر پیچیده و تعداد آن‌ها نسبتاً زیاد باشد.
۲. برخی از متغیرهای مستقل هواشناسی اثر غیرمستقیم روی متغیر وابسته (از طریق دیگر متغیرهای مستقل یا پارامترهای هواشناسی دیگر) بر روی متغیر وابسته (ET_0) داشته باشند، ولی اندرکنش بین متغیرهای مستقل غیرقابل اغماض باشد. بنابراین، هر متغیر هواشناسی هم دارای اثر مستقیم روی ET_0 است هم از طریق متغیر(های) دیگر اثر غیرمستقیم بر آن دارد. اثرهای مستقیم با استفاده از تجزیه علیت با ضرایب مسیر ($P_{y x_i}$) قابل تشخیص است.

در مطالعه حاضر، نه‌تنها اثرهای مستقیم همه پارامترهای هواشناسی روی متغیر وابسته (ET_0) محاسبه شد، بلکه با روش تجزیه علیت اندرکنش متغیرهای مستقل هواشناسی با یکدیگر (که غیرقابل چشم‌پوشی است) لحاظ شد و اثرهای غیرمستقیم هر پارامتر هواشناسی از طریق پارامتر هواشناسی دیگر بر مقدار ET_0 به‌دست آمد. در مطالعه حاضر، ماه اوت

به‌عنوان نماینده گرم‌ترین ماه سال برای بررسی انتخاب شد. دلیل انتخاب ماه اوت به این سبب است که در ایستگاه‌های مذکور بیشترین مقدار ET_0 در ماه اوت اتفاق افتاده است. نخست، برای برآورد ET_0 ، از فرمول FAO-56-PM استفاده شد. در ادامه مقدار ET_0 با استفاده از رگرسیون گام به گام نیز تخمین زده شد. در روش گام به گام، برای برآورد ET_0 ، از پارامترهای ورودی به مدل رگرسیون گام به گام استفاده شد. سپس، ضریب همبستگی r بین ET_0 و هر یک از پارامترهای هواشناسی به‌دست آمد. در ادامه، تأثیر اثرهای مستقیم (P) و غیرمستقیم هر یک از پارامترهای هواشناسی بر روی ET_0 با استفاده از روش تجزیه علیت محاسبه شد و، در نهایت، مقدار نرخ سهم مشارکت R_{dc} هر یک از پارامترهای هواشناسی روی ET_0 به‌دست آمد. برای محاسبه نرخ سهم مشارکت (R_{dc}^i) پارامتر i ام در مقدار ET_0 از رابطه ۸ استفاده شد:

$$R_{dc}^i = r_i P_i \quad (۸)$$

معیارهای ارزیابی عملکرد مدل‌ها

به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل رگرسیون گام به گام از آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین قدر مطلق خطا (MAE)، متوسط درصد خطای مطلق (MAPE)، و ضریب تعیین (R^2) به‌شرح زیر استفاده شد:

- جذر میانگین مربعات خطا (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (E_i - C_i)^2} \quad (۹)$$

- ضریب تعیین (R^2):

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^M (C_i - \bar{C})(E_i - \bar{E})]^2}{\sum_{i=1}^M (C_i - \bar{C})^2 \sum_{i=1}^M (E_i - \bar{E})^2} \quad (۱۰)$$

- میانگین قدر مطلق خطا (MAE):

$$MAE = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |E_i - C_i| \quad (۱۱)$$

- متوسط درصد خطای مطلق (MAPE):

$$MAPE = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left| \frac{E_i - C_i}{E_i} \right| \times 100 \quad (۱۲)$$

که در آن:

M تعداد داده‌ها، C_i مقدار تبخیر-تعرق به‌دست‌آمده از فرمول FAO-56-PM (میلی‌متر بر روز)، \bar{C} میانگین مقدار تبخیر-تعرق به‌دست‌آمده از فرمول FAO-56-PM (میلی‌متر بر روز)، E_i مقدار تبخیر-تعرق تخمین‌زده‌شده از مدل رگرسیون چندگانه خطی (میلی‌متر بر روز)، و \bar{E} میانگین مقدار تبخیر-تعرق تخمین‌زده‌شده از مدل رگرسیون چندگانه خطی (میلی‌متر بر روز) است (لیو و همکاران، ۲۰۱۶).

در این مطالعه، واحد مقادیر RMSE و MAE میلی‌متر بر روز، MAPE درصد، و R^2 بی‌بعد است. هرچه R^2 به عدد یک نزدیک شود، عملکرد مدل خوب ارزیابی می‌شود. در این حالت، معمولاً مقادیر RMSE و MAE به سمت صفر میل

می‌کند. مقدار آماره MAPE بین صفر و یک درصد تغییر می‌کند و هر چه به سمت صفر میل کند بیانگر عملکرد بهتر مدل است.

یافته‌های پژوهش

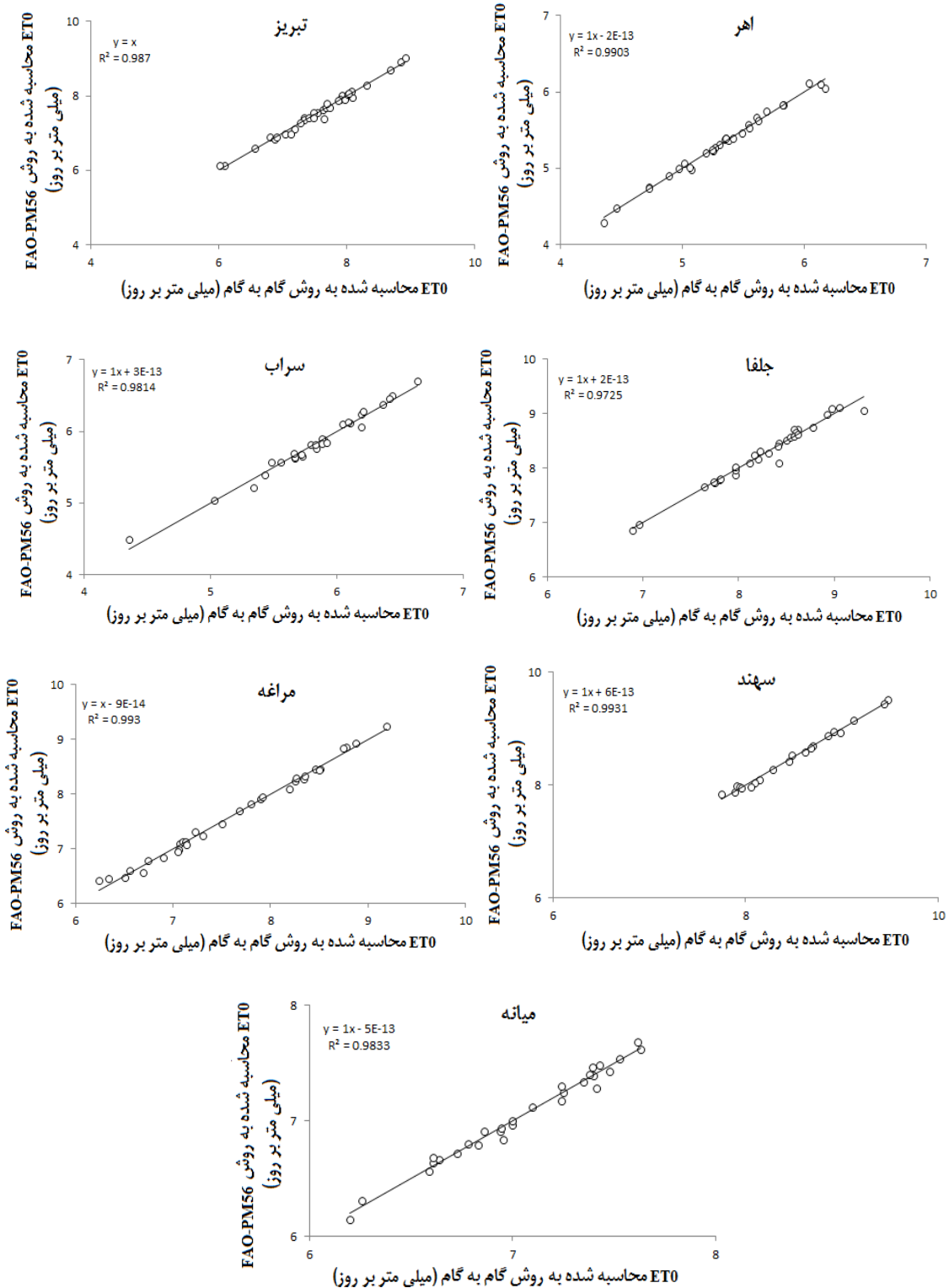
جدول ۲ نتایج ارزیابی عملکرد مدل رگرسیون گام به گام را برای ایستگاه‌های منتخب نشان می‌دهد. همان‌گونه که از جدول مشخص است، در ایستگاه‌های تبریز، جلفا، سهند، مراغه، و میانه، پارامتر سرعت باد به‌عنوان اولین پارامتر مهم ورودی، وارد مدل شد. در ایستگاه اهر RH_{max} و در سراب پارامتر T_{max} به‌عنوان اولین پارامتر مهم ورودی به مدل، بود. از بین شش پارامتر هواشناسی مؤثر بر ET_0 ، معلوم شد که در ایستگاه میانه چهار پارامتر و در سایر ایستگاه‌ها پنج پارامتر در مدل MLR معنی‌دار بود. پارامتر T_{max} در همه ایستگاه‌ها یکی از پارامترهای ورودی به مدل MLR بود. پارامتر ذکرشده در سراب اولین پارامتر و در تبریز، مراغه، و میانه به‌عنوان دومین پارامتر ورودی به مدل شناخته شد. درحالی‌که در جلفا و سهند سومین پارامتر و در اهر چهارمین پارامتر ورودی شناخته شد. پارامترهای RH_{min} ، RH_{max} ، و n در همه ایستگاه‌ها به‌عنوان پارامتر تأثیرگذار بر ET_0 در مدل شناخته شدند. مقدار آماره R^2 در بین ایستگاه‌ها از حداقل ۰/۹۷ در جلفا تا حداکثر ۰/۹۹ میلی‌متر در روز در سهند و مراغه تغییر می‌کند. مقدار RMSE نیز از حداقل ۰/۰۴۳ در سهند تا ۰/۰۹۲ میلی‌متر در روز در جلفا تغییر می‌کند. آماره MAPE در بین ایستگاه‌ها، از حداقل ۰/۴۳ در سهند تا حداکثر ۰/۸۷ در سراب تغییر می‌کند و MAE از حداقل ۰/۰۳۳ در اهر تا حداکثر ۰/۰۵۷ در مراغه و جلفا تغییر می‌کند. با توجه به جدول ۲، اعداد و ارقام به‌دست‌آمده برای معیارهای ارزیابی عملکرد مدل بیانگر کارایی خوب مدل رگرسیون گام به گام است.

شکل ۲ نمودار نقاط پراکنش مقادیر ET_0 مشاهده‌شده در ازای مقادیر حاصل از مدل رگرسیونی گام به گام را نشان می‌دهد؛ به‌طوری‌که از این شکل می‌توان استنباط کرد در ایستگاه‌های مورد مطالعه پراکنش نقاط حول خط روند است و این بیانگر آن است که مقدار ET_0 محاسبه‌شده به روش گام به گام با مقدار محاسبه‌شده به روش فائو-پنمن مانیتیت تفاوت محسوسی نشان نمی‌دهد.

در مطالعه حاضر، از شش پارامتر حداکثر درجه حرارت هوا (T_{max})، حداقل درجه حرارت هوا (T_{min})، حداکثر رطوبت نسبی (RH_{max})، حداقل رطوبت نسبی (RH_{min})، سرعت باد (U)، و ساعات آفتابی (n) برای تخمین اثرهای مستقیم هر پارامتر روی ET_0 استفاده شد. تعیین اثرهای مستقیم هر پارامتر بر روی ET_0 بسیار دشوار است. بنابراین، در این مواقع می‌توان از تجزیه علیت به‌عنوان یک روش مؤثر برای مشخص کردن اثرهای مستقیم و غیرمستقیم هر پارامتر روی ET_0 استفاده کرد.

جدول ۲. ارزیابی عملکرد مدل رگرسیون خطی چندگانه با روش گام به گام در ماه اوت (منبع: نگارندگان)

| ردیف | ایستگاه | پارامترهای ورودی | R_{dc} | RMSE | MAE | MAPE | R^2 |
|------|---------|---|----------|-------|-------|------|-------|
| ۱ | اهر | RH_{max} , n , U , T_{max} , RH_{min} | ۱/۰۰۲ | ۰/۰۴۴ | ۰/۰۳۳ | ۰/۶۲ | ۰/۹۹ |
| ۲ | تبریز | U , T_{max} , RH_{min} , n , RH_{max} | ۰/۹۷۸ | ۰/۰۷۵ | ۰/۰۵۵ | ۰/۷۳ | ۰/۹۹ |
| ۳ | جلفا | U , RH_{max} , T_{max} , n , RH_{min} | ۰/۹۴۰ | ۰/۰۹۲ | ۰/۰۵۷ | ۰/۶۸ | ۰/۹۷ |
| ۴ | سراب | T_{max} , U , RH_{min} , n , RH_{max} | ۰/۹۷۲ | ۰/۰۶۱ | ۰/۰۵۰ | ۰/۸۷ | ۰/۹۸ |
| ۵ | سهند | U , RH_{max} , T_{max} , n , RH_{min} | ۰/۹۳۷ | ۰/۰۴۳ | ۰/۰۳۶ | ۰/۴۳ | ۰/۹۹ |
| ۶ | مراغه | U , T_{max} , Rh_{min} , n , Rh_{ma} | ۱/۰۷۲ | ۰/۰۶۹ | ۰/۰۵۷ | ۰/۷۷ | ۰/۹۹ |
| ۷ | میانه | U , T_{max} , n , RH_{min} | ۱/۰۲۵ | ۰/۰۵۰ | ۰/۰۳۹ | ۰/۵۶ | ۰/۹۸ |



شکل ۲. نمودارهای نقاط پراکنش ET₀ محاسبه شده به روش فائو- پنمن مانیتیت (میلی متر بر روز) و ET₀ محاسبه شده به روش مدل رگرسیون خطی چندگانه گام به گام (میلی متر بر روز) در ایستگاه‌های مورد مطالعه در ماه اوت.

جدول ۳. اثرهای مستقیم و غیرمستقیم پارامترهای هواشناسی بر روی ET₀ در ایستگاه‌های مورد مطالعه

| اهر | | | | | | | | | | |
|-----------------|--------|------------------|--------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|---------------|--------|---------------------|
| Rd _c | مجموع | اثرهای غیرمستقیم | | | | | | اثرهای مستقیم | | پارامترهای هواشناسی |
| | | n | U | RH _{max} | RH _{min} | T _{min} | T _{max} | P | r | |
| ۰٫۳۳۴ | ۰٫۸۱۵ | ۰٫۲۳۳ | -۰٫۱۰۸ | ۰٫۱۸۶ | ۰٫۱۲۴ | -۰٫۰۱۷ | ۰٫۳۹۸ | ۰٫۳۹۸ | ۰٫۸۱۵ | T _{max} |
| -۰٫۰۱۲ | ۰٫۴۸۹ | ۰٫۱۱۹ | -۰٫۰۳۳ | ۰٫۰۹۸ | ۰٫۰۵۰ | -۰٫۰۲۴ | ۰٫۲۷۹ | -۰٫۰۲۴ | ۰٫۴۸۹ | T _{min} |
| ۰٫۱۲۱ | -۰٫۸۲۸ | -۰٫۲۰۸ | ۰٫۰۶۷ | -۰٫۲۱۴ | -۰٫۱۴۷ | ۰٫۰۰۸ | -۰٫۳۳۵ | -۰٫۱۴۷ | -۰٫۸۲۸ | RH _{min} |
| ۰٫۲۰۹ | -۰٫۸۵۲ | -۰٫۱۹۹ | ۰٫۰۱۲ | -۰٫۲۴۵ | -۰٫۱۲۸ | ۰٫۰۱۰ | -۰٫۳۰۱ | -۰٫۲۴۵ | -۰٫۸۵۲ | RH _{max} |
| ۰٫۰۹۱ | ۰٫۲۲۹ | -۰٫۰۳۰ | ۰٫۲۹۷ | -۰٫۰۰۷ | -۰٫۰۲۵ | ۰٫۰۰۲ | -۰٫۱۰۸ | ۰٫۳۹۷ | ۰٫۲۲۹ | U |
| ۰٫۲۵۷ | ۰٫۸۱۵ | ۰٫۳۱۵ | -۰٫۰۲۸ | ۰٫۱۵۵ | ۰٫۰۹۷ | -۰٫۰۰۹ | ۰٫۲۹۴ | ۰٫۳۱۵ | ۰٫۸۱۵ | n |
| تبریز | | | | | | | | | | |
| Rd _c | مجموع | اثرهای غیرمستقیم | | | | | | اثرهای مستقیم | | پارامترهای هواشناسی |
| | | n | U | RH _{max} | RH _{min} | T _{min} | T _{max} | P | r | |
| ۰٫۲۰۶ | ۰٫۷۴۰ | ۰٫۰۱۲ | -۰٫۱۸۹ | ۰٫۱۳۳ | ۰٫۱۱۶ | ۰٫۰۱۲ | ۰٫۲۷۸ | ۰٫۲۷۸ | ۰٫۷۴۰ | T _{max} |
| ۰٫۰۰۹ | ۰٫۶۹۱ | ۰٫۰۰۶ | -۰٫۱۸۳ | ۰٫۱۲۵ | ۰٫۱۰۲ | ۰٫۰۱۲ | ۰٫۲۶۳ | ۰٫۰۱۲ | ۰٫۶۹۱ | T _{min} |
| ۰٫۱۰۶ | -۰٫۶۲۸ | -۰٫۰۱۰ | -۰٫۱۲۰ | -۰٫۱۳۱ | -۰٫۱۶۹ | -۰٫۰۰۷ | -۰٫۱۹۱ | -۰٫۱۶۹ | -۰٫۶۲۸ | RH _{min} |
| ۰٫۱۲۷ | -۰٫۷۶۷ | -۰٫۰۰۲ | -۰٫۲۳۲ | -۰٫۱۶۶ | -۰٫۱۳۴ | -۰٫۰۰۹ | -۰٫۲۲۴ | -۰٫۱۶۶ | -۰٫۷۶۷ | RH _{max} |
| ۰٫۵۲۳ | ۰٫۸۲۱ | ۰٫۰۰۶ | ۰٫۶۳۷ | ۰٫۰۶۰ | ۰٫۰۳۲ | ۰٫۰۰۴ | ۰٫۰۸۳ | ۰٫۶۳۷ | ۰٫۸۲۱ | U |
| ۰٫۰۱۶ | ۰٫۱۹۷ | ۰٫۰۸۱ | ۰٫۰۴۸ | ۰٫۰۰۵ | ۰٫۰۲۲ | ۰٫۰۰۱ | ۰٫۰۳۹ | ۰٫۰۸۱ | ۰٫۱۹۷ | n |
| جلفا | | | | | | | | | | |
| Rd _c | مجموع | اثرهای غیرمستقیم | | | | | | اثرهای مستقیم | | پارامترهای هواشناسی |
| | | n | U | RH _{max} | RH _{min} | T _{min} | T _{max} | P | r | |
| ۰٫۲۰۷ | ۰٫۵۰۲ | ۰٫۰۱۴ | -۰٫۲۳۴ | ۰٫۱۲۹ | ۰٫۱۴۰ | ۰٫۰۴۲ | ۰٫۴۱۲ | ۰٫۴۱۲ | ۰٫۵۰۲ | T _{max} |
| ۰٫۰۳۳ | ۰٫۶۹۱ | ۰٫۰۲۵ | ۰٫۰۲۴ | ۰٫۱۲۰ | ۰٫۱۱۳ | ۰٫۰۴۸ | ۰٫۳۶۱ | ۰٫۰۴۸ | ۰٫۶۹۱ | T _{min} |
| ۰٫۰۷۹ | -۰٫۴۰۱ | -۰٫۰۰۲ | -۰٫۲۵۴ | -۰٫۱۳۶ | -۰٫۱۹۷ | -۰٫۰۲۸ | -۰٫۲۹۳ | -۰٫۱۹۷ | -۰٫۴۰۱ | RH _{min} |
| ۰٫۱۱۵ | -۰٫۶۵۵ | -۰٫۰۱۴ | ۰٫۰۲۲ | -۰٫۱۷۵ | -۰٫۱۵۳ | -۰٫۰۳۳ | -۰٫۳۰۳ | -۰٫۱۷۵ | -۰٫۶۵۵ | RH _{max} |
| ۰٫۴۹۳ | ۰٫۶۲۷ | ۰٫۰۳۰ | ۰٫۷۸۷ | -۰٫۰۰۵ | -۰٫۰۶۴ | ۰٫۰۰۱ | -۰٫۱۲۳ | ۰٫۷۸۷ | ۰٫۶۲۷ | U |
| ۰٫۰۴۷ | ۰٫۴۰۲ | ۰٫۱۱۶ | ۰٫۲۰۱ | ۰٫۰۲۱ | ۰٫۰۰۴ | ۰٫۰۱۰ | ۰٫۰۴۹ | ۰٫۱۱۶ | ۰٫۴۰۲ | n |
| سراب | | | | | | | | | | |
| Rd _c | مجموع | اثرهای غیرمستقیم | | | | | | اثرهای مستقیم | | پارامترهای هواشناسی |
| | | n | U | RH _{max} | RH _{min} | T _{min} | T _{max} | P | r | |
| ۰٫۲۱۹ | ۰٫۷۳۵ | ۰٫۰۱۸ | ۰٫۰۴۴ | ۰٫۰۹۷ | ۰٫۲۶۶ | ۰٫۰۱۱ | ۰٫۲۹۹ | ۰٫۲۹۹ | ۰٫۷۳۵ | T _{max} |
| ۰٫۰۱۰ | ۰٫۵۹۶ | -۰٫۰۱۷ | ۰٫۱۸۶ | ۰٫۰۸۰ | ۰٫۱۳۹ | ۰٫۰۱۶ | ۰٫۲۰۲ | ۰٫۰۱۶ | ۰٫۵۹۶ | T _{min} |
| ۰٫۲۲۴ | -۰٫۷۲۱ | ۰٫۰۰۳ | -۰٫۰۵۰ | -۰٫۱۰۱ | -۰٫۳۱۱ | -۰٫۰۰۷ | -۰٫۲۵۵ | -۰٫۳۱۱ | -۰٫۷۲۱ | RH _{min} |
| ۰٫۰۹۱ | -۰٫۶۳۰ | ۰٫۰۳۲ | -۰٫۰۸۹ | -۰٫۱۴۴ | -۰٫۲۱۹ | -۰٫۰۰۹ | -۰٫۲۰۱ | -۰٫۱۴۴ | -۰٫۶۳۰ | RH _{max} |
| ۰٫۳۹۷ | ۰٫۶۸۸ | ۰٫۰۳۳ | ۰٫۵۷۸ | ۰٫۰۲۲ | ۰٫۰۲۷ | ۰٫۰۰۵ | ۰٫۰۲۳ | ۰٫۵۷۸ | ۰٫۶۸۸ | U |
| ۰٫۰۴۰ | ۰٫۲۷۴ | ۰٫۱۴۵ | ۰٫۱۳۱ | -۰٫۰۲۲ | -۰٫۰۰۵ | -۰٫۰۰۲ | ۰٫۰۳۸ | ۰٫۱۴۵ | ۰٫۲۷۴ | n |
| سهند | | | | | | | | | | |
| Rd _c | مجموع | اثرهای غیرمستقیم | | | | | | اثرهای مستقیم | | پارامترهای هواشناسی |
| | | n | U | RH _{max} | RH _{min} | T _{min} | T _{max} | P | r | |
| ۰٫۰۸۴ | ۰٫۴۱۱ | -۰٫۰۴۵ | -۰٫۲۰۴ | ۰٫۱۸۵ | ۰٫۱۱۱ | ۰٫۱۵۸ | ۰٫۲۰۶ | ۰٫۲۰۶ | ۰٫۴۱۱ | T _{max} |
| ۰٫۰۵۷ | ۰٫۳۵۰ | -۰٫۰۵۶ | -۰٫۲۵۹ | ۰٫۱۹۳ | ۰٫۱۱۰ | ۰٫۱۶۴ | ۰٫۱۹۸ | ۰٫۱۶۴ | ۰٫۳۵۰ | T _{min} |
| ۰٫۰۹۳ | -۰٫۴۶۲ | ۰٫۰۰۹ | ۰٫۱۲۷ | -۰٫۱۹۵ | -۰٫۲۰۲ | -۰٫۰۸۹ | -۰٫۱۱۳ | -۰٫۲۰۲ | -۰٫۴۶۲ | RH _{min} |
| ۰٫۰۸۴ | -۰٫۳۵۷ | ۰٫۰۴۰ | ۰٫۳۰۰ | -۰٫۲۳۷ | -۰٫۱۶۵ | -۰٫۱۳۴ | -۰٫۱۶۱ | -۰٫۲۳۷ | -۰٫۳۵۷ | RH _{max} |
| ۰٫۶۳۸ | ۰٫۷۲۷ | ۰٫۰۵۷ | ۰٫۸۷۷ | -۰٫۰۸۱ | -۰٫۰۲۹ | -۰٫۰۴۹ | -۰٫۰۴۸ | ۰٫۸۷۷ | ۰٫۷۲۷ | U |
| ۰٫۰۳۷ | ۰٫۲۸۵ | ۰٫۱۳۰ | ۰٫۳۸۳ | -۰٫۰۷۳ | -۰٫۰۱۴ | -۰٫۰۷۱ | -۰٫۰۷۱ | ۰٫۱۳۰ | ۰٫۲۸۵ | n |
| مراغه | | | | | | | | | | |
| Rd _c | مجموع | اثرهای غیرمستقیم | | | | | | اثرهای مستقیم | | پارامترهای هواشناسی |
| | | n | U | RH _{max} | RH _{min} | T _{min} | T _{max} | P | r | |
| ۰٫۲۱۲ | ۰٫۶۵۱ | -۰٫۰۰۳ | -۰٫۳۸۸ | ۰٫۱۰۲ | ۰٫۰۴۱ | -۰٫۱۰۲ | ۰٫۳۲۵ | ۰٫۳۲۵ | ۰٫۶۵۱ | T _{max} |
| -۰٫۰۷۸ | ۰٫۷۰۸ | -۰٫۰۱۵ | ۰٫۳۸۸ | ۰٫۱۰۵ | ۰٫۰۳۷ | -۰٫۱۱۰ | ۰٫۳۰۳ | -۰٫۱۱۰ | ۰٫۷۰۸ | T _{min} |
| ۰٫۰۲۱ | -۰٫۳۲۳ | -۰٫۰۰۱ | ۰٫۰۱۴ | -۰٫۱۲۹ | -۰٫۰۶۵ | ۰٫۰۶۲ | -۰٫۲۰۴ | -۰٫۰۶۵ | -۰٫۳۲۳ | RH _{min} |
| ۰٫۰۶۵ | -۰٫۴۳۱ | ۰٫۰۱۷ | -۰٫۰۹۹ | -۰٫۱۵۲ | -۰٫۰۵۵ | ۰٫۰۷۶ | -۰٫۲۱۹ | -۰٫۱۵۲ | -۰٫۴۳۱ | RH _{max} |
| ۰٫۷۷۹ | ۰٫۹۱۶ | -۰٫۰۱۰ | ۰٫۸۵۰ | ۰٫۰۱۸ | -۰٫۰۰۱ | -۰٫۰۵۰ | ۰٫۱۱۰ | ۰٫۸۵۰ | ۰٫۹۱۶ | U |
| -۰٫۰۰۵ | -۰٫۰۷۲ | ۰٫۰۷۲ | -۰٫۱۲۰ | -۰٫۰۳۷ | ۰٫۰۰۱ | ۰٫۰۲۳ | -۰٫۰۱۱ | ۰٫۰۷۲ | -۰٫۰۷۲ | n |

ادامه جدول ۳. اثرهای مستقیم و غیرمستقیم پارامترهای هواشناسی بر روی ET₀ در ایستگاه‌های مورد مطالعه

| Rd _c | مجموع | میان | | | | | | اثرهای مستقیم | | پارامترهای هواشناسی |
|-----------------|--------|--------|--------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|---------------|--------|---------------------|
| | | n | U | RH _{max} | RH _{min} | T _{min} | T _{max} | P | r | |
| ۰/۳۰۶ | ۰/۵۸۳ | ۰/۰۴۲ | -۰/۰۲۳ | ۰/۰۳۱ | ۰/۰۸۸ | -۰/۰۸۰ | ۰/۵۲۵ | -۰/۵۲۵ | ۰/۵۸۳ | T _{max} |
| -۰/۰۵۳ | ۰/۵۹۲ | ۰/۰۰۸ | ۰/۱۲۴ | ۰/۰۲۴ | ۰/۰۶۰ | -۰/۰۹۰ | ۰/۴۶۶ | -۰/۰۹۰ | ۰/۵۹۲ | T _{min} |
| ۰/۰۵۶ | -۰/۴۳۷ | -۰/۰۱۲ | -۰/۰۵۸ | -۰/۰۳۶ | -۰/۱۲۹ | ۰/۰۴۲ | -۰/۳۵۸ | -۰/۱۲۹ | -۰/۴۳۷ | RH _{min} |
| ۰/۰۱۳ | -۰/۲۹۷ | ۰/۰۱۴ | ۰/۱۷۹ | -۰/۰۴۳ | -۰/۱۱۱ | ۰/۰۵۰ | -۰/۳۸۷ | -۰/۰۴۳ | -۰/۲۹۷ | RH _{max} |
| ۰/۵۸۷ | ۰/۷۵۳ | -۰/۰۲۲ | ۰/۷۸۰ | -۰/۰۱۰ | -۰/۰۱۰ | -۰/۰۱۴ | -۰/۰۱۵ | ۰/۷۸۰ | ۰/۷۵۳ | U |
| ۰/۰۷۶ | ۰/۳۹۸ | ۰/۱۹۰ | ۰/۰۹۱ | -۰/۰۰۳ | ۰/۰۰۸ | -۰/۰۰۴ | ۰/۱۱۵ | ۰/۱۹۰ | ۰/۳۹۸ | n |

ماتریس نتایج حاصل از تجزیه علیت پارامترهای هواشناسی مهم با ET₀ در جدول ۳ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است، سرعت باد در ایستگاه‌های تبریز، جلفا، سهند، مراغه، و میانه بیشترین همبستگی را با ET₀ دارا می‌باشند. در ایستگاه اهر، ساعات آفتابی و در ایستگاه سراب حداکثر درجه حرارت هوا بیشترین همبستگی را با ET₀ نشان می‌دهند. بیشترین مقدار P (اثر مستقیم پارامترهای هواشناسی بر ET₀) در همه ایستگاه‌ها (به جز ایستگاه اهر) متعلق به U است که مقدار آن برای تبریز ۰/۶۳۷، جلفا ۰/۷۸۷، سهند ۰/۸۷۷، سراب ۰/۵۷۸، مراغه ۰/۸۵۰، و میانه ۰/۷۸۰ است. دومین متغیر مؤثر در ایستگاه‌های ذکر شده T_{max} است.

Rd_c یکی از شاخص‌های مهم تجزیه علیت است که سهم اثر مستقیم هر یک از پارامترهای هواشناسی روی ET₀ را نشان داد. همان‌گونه که در ستون آخر جدول ۳ مشخص است، بیشترین میزان Rd_cⁱ در همه ایستگاه‌ها (به جز ایستگاه اهر) متعلق به U است و این نشان می‌دهد که در منطقه مورد مطالعه در همه ایستگاه‌ها (به جز ایستگاه اهر) سهم اثر باد بر روی ET₀ در ماه اوت بیشتر است. در ایستگاه اهر، بیشترین مقدار P متعلق به پارامتر T_{max} است و در برخی پارامترها (RH_{min}، RH_{max}، T_{min}) منفی است. برای ایستگاه اهر دومین پارامتر مؤثر و مهم بر ET₀ پارامتر U است. مقدار Rd_c نظیر T_{max} نیز در ایستگاه اهر (معادل ۰/۳۲۴) از پارامترهای دیگر بیشتر است. بنابراین، متغیر T_{max} به‌عنوان مهم‌ترین متغیر مؤثر بر ET₀ در اهر شناخته می‌شود. مجموع اثرهای غیرمستقیم (ستون‌های چهارم تا نهم جدول ۴) در ستون ماقبل آخر درج شده است. به‌طوری‌که از این ارقام می‌توان نتیجه گرفت مجموع اثرهای غیرمستقیم دقیقاً برابر با مقدار ضریب همبستگی هر پارامتر هواشناسی با ET₀ است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، می‌توان نتیجه گرفت دو پارامتر مهم T_{max} و U مؤثرترین پارامترهای اقلیمی روی ET₀ در ایستگاه‌های مورد مطالعه محسوب می‌شوند.

بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه، با استفاده از تجزیه علیت، اثرهای مستقیم و غیرمستقیم پارامترهای هواشناسی بر روی ET₀ در هفت ایستگاه منتخب در استان آذربایجان شرقی در ماه اوت (نماینده گرم‌ترین ماه سال) به‌دست آمد و پس از تجزیه و تحلیل آن نتایج زیر حاصل شد:

با استفاده از مدل رگرسیون گام به گام مشخص شد که در ایستگاه‌های تبریز، جلفا، سراب، سهند، مراغه، و میانه پارامتر سرعت باد مهم‌ترین پارامتر ورودی به مدل است و در ایستگاه‌های اهر و سراب به‌ترتیب حداکثر رطوبت نسبی و حداکثر دمای هوا به‌عنوان مهم‌ترین پارامتر ورودی به مدل شناخته شد. پارامتر حداقل دمای هوا نیز به‌عنوان بی‌تأثیرترین پارامتر از طریق مدل MLR شناخته شده و در نتیجه از همه ایستگاه‌ها حذف شد. ماهیبا و پاتل (۲۰۱۵) تأثیر پارامترهای اقلیمی بر روی ET₀ را با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه تجزیه و تحلیل کردند. براساس نتایج تحقیقات ایشان، مدل

MLR درجه حرارت به‌عنوان عامل غالب در برآورد مقدار ET_0 شناخته شد. ولی رطوبت نسبی در پیش‌بینی ET_0 در این منطقه نقش چندان مهمی نداشت. در تحقیق حاضر پارامتر حداکثر درجه حرارت هوا در ایستگاه سراب پارامتری مهم شناخته شد و در سایر ایستگاه‌ها در اولویت بعدی قرار گرفت. پارامتر رطوبت نسبی در ایستگاه‌های مورد مطالعه پارامتری تأثیرگذار در بیشتر ایستگاه‌ها شناخته شد؛ درحالی که در تحقیق ماهیدا و پاتیل کم‌اثرترین پارامتر شناخته شد.

مقدار MAPE در ایستگاه‌های مورد مطالعه مابین ۰/۴۳۳ و ۰/۸۷۴، R^2 مابین ۰/۹۷۲ و ۰/۹۹۳، RMSE مابین ۰/۰۴۲ و ۰/۰۹۲، و MAE مابین ۰/۰۳۳ و ۰/۰۵۷ به‌دست آمد. جعفری و همکاران (۱۳۹۴) مقدار RMSE و R^2 برای مدل‌های منتخب MLR برای تخمین ET_0 را به‌ترتیب ۲/۳۷ میلی‌متر بر روز و ۰/۶۷۶ به‌دست آوردند. در تحقیق جعفری و دین‌پژوه (۱۳۹۵) مقادیر RMSE برای رگرسیون خطی چندگانه ۲/۵۸ میلی‌متر در روز و برای رگرسیون چندگانه غیرخطی ۰/۶۵ به‌دست آمد. نشان داد که مقادیر تبخیر به‌دست‌آمده از مدل رگرسیون چندگانه خطی به‌طور قابل ملاحظه‌ای با مقادیر اندازه‌گیری‌شده مشابهت دارد. سیلوا و همکاران (۲۰۱۶) در تحقیق خود مقدار RMSE را مابین ۰/۰۴ و ۰/۱۳ (میلی‌متر در روز) به‌دست آوردند. مانی‌کوماری و ویوندینی (۲۰۱۶) مقدار ضریب تعیین (R^2) را در مطالعه خود $R^2=0.98$ به‌دست آوردند که اعداد و ارقام گزارش‌شده قابل مقایسه با یافته‌های مطالعه حاضر است.

براساس نتایج حاصل از تجزیه علیت، مشخص شد که در همه ایستگاه‌ها دو پارامتر سرعت باد و حداکثر درجه حرارت هوا بیشترین اثر مستقیم مثبت و رطوبت نسبی بیشترین اثر مستقیم منفی را بر ET_0 داراست. نتایج حاصل با نتایج به‌دست‌آمده از یافته‌های لیو و همکاران (۲۰۱۶) مطابقت ندارد. در مطالعه ایشان همه پارامترهای هواشناسی در چین، به‌جز سرعت باد، بیشترین همبستگی را با ET_0 دارا بودند. درحالی که در مطالعه حاضر در بیشتر ایستگاه‌ها سرعت باد بیشترین همبستگی را با ET_0 داشته است. از طرفی، در دو ایستگاه اهر و جلفا T_{max} بیشترین همبستگی را با ET_0 نشان داد که با مطالعات لیو و همکاران (۲۰۱۶) همخوانی دارد. در تحقیق حاضر مشخص شد که بیشترین مقدار P (اثر مستقیم پارامترهای هواشناسی بر ET_0) در همه ایستگاه‌ها (به‌جز ایستگاه اهر) متعلق به U است. این بخش از مطالعه با نتایج حاصل از تحقیق لیو و همکاران (۲۰۱۶) کاملاً مغایرت دارد. ایشان در تحقیق خود نشان دادند که بیشترین میزان اثر مستقیم یا P متعلق به n است. در تحقیق ایشان، پارامتر RH در کل ایستگاه‌های مورد بررسی بیشترین اثر منفی را داشته است که این بخش از تحقیقات ایشان کاملاً با نتایج مطالعه حاضر همخوانی دارد. در تحقیق حاضر، برای همه ایستگاه‌های مورد مطالعه رطوبت نسبی اثر منفی بر ET_0 را نشان می‌دهد.

در حالت کلی، می‌توان اظهار کرد که رابطه بین متغیرهای هواشناسی با همدیگر پیچیده است و در نتیجه هر متغیر هم از راه مستقیم هم به‌صورت غیرمستقیم یعنی از طریق اثر بر متغیر هواشناسی دیگر روی ET_0 تأثیر می‌گذارد. این مطالعه اثرهای مستقیم و غیرمستقیم را در هر ایستگاه واقع در استان آذربایجان شرقی از هم جدا کرد.

سپاسگزاری

از سازمان هواشناسی کل کشور که داده‌های مورد نیاز این پژوهش را در اختیار پژوهشگران این مطالعه قرار دادند سپاس‌گزاری می‌شود. ضمناً از داوران محترم که با صرف وقت ارزشمند خود و ارائه نکات مهم باعث بهتر شدن کیفیت این مقاله شدند صمیمانه قدردانی می‌شود.

منابع

- اسدزاده، ف؛ کاکي، م. و شکيبا، س. (۱۳۹۶). بررسی و تحلیل روند تبخیر و تعرق گیاه مرجع با استفاده از آزمون اسپیرمن در ایستگاه‌های سینوپتیک استان کردستان، تحقیقات منابع آب ایران، ۱۱۳(۱): شماره ۱، ۲۱۶-۲۲۲.
- جهان‌بخش اصل، س؛ موحد دانش، ع. ا. و مولوی، و. (۱۳۸۰). تحلیل مدل‌های برآورد تبخیر- تعرق برای ایستگاه هواشناسی تبریز، مجله دانش کشاورزی، ۱۱(۲): ۵۱-۶۶.
- سیفی، ا؛ میرلطفی، م. و ریاحی، ح. (۱۳۸۹). توسعه مدل ترکیبی رگرسیون چندگانه- تحلیل مؤلفه‌ها و عامل‌های اصلی (MLR-PCA) در پیش‌بینی تبخیر- تعرق مرجع؛ مطالعه موردی: ایستگاه کرمان، نشریه آب و خاک، ۲۴(۶): ۱۱۸۶-۱۱۹۶.
- کردوانی، پ. و قلعه‌ای، م.ح. (۱۳۹۲). تخمین مقادیر تبخیر- تعرق مرجع با استفاده از مدل فائو پنمن ۵۶ در حوضه رودخانه آیدوغموش، فصل‌نامه علمی- پژوهشی اکوبیولوژی تالاب، دانشگاه آزاد اسلامی اهواز، ۵(۱۵): ۱۵-۲۲.
- جعفری، م. و دین‌پژوه، ی. (۱۳۹۵). ارزیابی مدل رگرسیون چندمتغیره تیغه‌ای در برآورد تبخیر از تشت، نشریه علوم و مهندسی آبیاری، ۴۰(۱): ۸۳-۹۷.
- Asadzadeh, F.; Kaki, M. and Shakiba, S. (2017). Trend analysis of reference evapotranspiration in the synoptic sites of Kurdistan Province using Spearman's test, Iran-Water Resources Research, 13(1): 222-256. In Persian.
- Balan, B.; Mohaghegh, S. and Ameri, S. (1995). State- of- art- in permeability determination from well log data: Part 1- A comparative study, Model Development, SPE Technical Report 30978: 17-25.
- Cai, J.; Liu, Y.; Xu, D. and Shi, B. (2008). Sensitivity analysis on water deficit indicator of winter wheat based on path analysis theory, J. Hydraul. Eng., 39(1): 83-90.
- Dewey, D.R. and Lu, K.H. (1959). A correlation and path-coefficient analysis of components of crested wheatgrass Seed Production, Agronomy Journal, 51(9): 515-518.
- Foster, G. and Rahmstorf, S. (2011). Global temperature evolution 1979-2010, Environmental Research Letters, 6(4): 044022.
- Hatch, U.; Jagtap, S.; Jones, J. and Lamb, M. (1999). Potential effects of climate change on agricultural water use in the southeast US., J. Am. Water Resour., 35: 1551-1561.
- Huber, M. and Knutti, R. (2011). Anthropogenic and natural warming inferred from changes in earth's energy balance, Nature Geosciences, 5(1): 31-36.
- Jacobsen, S.E.; Jensen, C.R. and Liu, F. (2012). Improving crop production in the arid Mediterranean climate, Field Crop Res., 128: 34-47.
- Jafari, M. and Dinpashoh, Y. (2015). Evaluation of multiple ridge regression model to estimation of pan evaporation, Journal of Irrigation Science and Engineering, 40(1): 83-97. In Persian
- Jarvis, P.G. and McNaughton, K. (1986). Stomatal control of transpiration: Scaling up from leaf to region, Adv. Ecol. Res., 15: 1-49.
- Jahanbakhsh, S.; Rezaee Banafshe, M.; Esmaeelpour, M. and Tadayoni, M. (2012). The evaluation of potential evapotranspiration estimation models and its spatial distribution in the Southern Basin of Aras River, Journal of Geography and Planning, 16(40): 25-46. In Persian.
- Kardavani, P. and Qalehe, M.H. (2013). Estimating the reference evapotranspiration values by using FAO-56PM in Aydohmush River basin, Journal of Wetland Ecobiology, 5(1): 15-22. In Persian.

- Khdkar, D.D.; Singh, P.K.; Bhakar, S.R.; Kothari, M.; Jain, H.K. and Mudgal, V.D. (2016). Modeling of Reference Evapotranspiration using Regression Techniques, *International Journal of Agriculture Sciences*, 8(26): 3529-3532.
- Liu, Y.; Yu, M.; Ma, X. and Xing, X. (2016). Estimating models for reference evapotranspiration with core meteorological parameters via path analysis, *Hydrology Research*, 48(6): 1-15.
- Mahida, H.R. and Patel, V.N. (2015). Impact of climatological parameters on reference crop evapotranspiration using multiple linear regression analysis, *SSRG International Journal of Civil Engineering (SSRG-IJCE)*, 2(1): 22-25.
- Malik, A. and Kumar, A. (2015). Pan evaporation simulation based on daily meteorological data using soft computing techniques and multiple linear regression, *Water Resources Management*, 29: 1859-1872.
- Manikumari, N. and Vinodhini, G. (2016). Regression models for predicting reference evapotranspiration, *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, 38(3): 134-139.
- Nam, W.H.; Hong, E.M. and Choi, J.Y. (2015). Has climate change already affected the spatial distribution and temporal trends of reference evapotranspiration in South Korea? *Agric. Water Manag.*, 150: 129-138.
- Peng, Q.; Guanxin, Zh. and Xu, Y.J. (2017). Spatiotemporal changes of reference evapotranspiration in the highest-latitude region of china, *Water*, 9(7): 493; Doi:10.3390/w9070493.
- Seifi, A.; Mirlatifi, S.M. and 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 Persian.
- Silva, H.J.F.D.; Santos, M.S.D.; Junior, J.B.C.; Spyrides, M.H.C. (2016). Modeling of reference evapotranspiration by multiple linear regression. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*. 6(1): 44-58.
- Wever, L.A.; Flanagan, L.B. and Carlson, P.J. (2002). Seasonal and interannual variation in evapotranspiration, energy balance and surface conductance in a northern temperate grassland, *Agr. Forest. Meteorol.*, 112: 31-49.
- Xing, X.; Liu, Y.; Zhao, W.G.; Kang, D.G.; Yu, M. and Ma, X. (2016). Determination of dominant weather parameters on reference evapotranspiration by path analysis theory, *Computers and Electronics in Agriculture*, 120: 10-16.
- Yu, S.W.; Zhu, K.J. and Zhang, X. (2012). Energy demand projection of China using a path-coefficient analysis and PSO-GA approach, *Energy Convers. Manage*, 53(1): 142-153.
- Zakizadeh, M.; Esmailzadeh Moghaddam, M. and Kahrizi, D. (2010). Study on genetic variation and relationship between plant characteristics and grain yield in long spike bread wheat (*Triticum Aestivum L.*) genotypes using multivariate analysis, *Iranian Journal of Crop Science*, 12: 18-30.
- Zhang, B.Z.; Xu, D.; Liu, Y.; Li, F.S.; Cai, J.B. and Du, L.J. (2016). Multi-scale evapotranspiration of summer maize and the controlling meteorological factors in north China, *Agric. Forest Meteorol.*, 216: 1-12.
- Zhang, X.S.; Yan, Y.l. and Hu, Z.H. (2017). Using path analysis to identify impacting factors of evapotranspiration at different time scales in farmland, *Chinese Journal of Agro-meteorology*, 38(4): 201-210.