

## شبیه‌سازی تبخیر تعرق روزانه گیاه مرجع با استفاده از روش هوش مصنوعی و مقایسه آن با روش‌های تجربی (مطالعه موردی: آذربایجان شرقی)

منیر شیرزاد<sup>۱</sup>

هاجر فیضی<sup>۲</sup>

مجید رضایی بنفشه<sup>۳</sup>

### چکیده

کشور ایران از جمله مناطق خشک و نیمه خشک جهان است و با محدودیت شدید منابع آب مواجه است. تعیین تبخیر و تعرق که یکی از اجزای اصلی چرخه هیدرولوژی می‌باشد، در بسیاری از مطالعات از جمله توازن هیدرولوژیک آب، طراحی و مدیریت سیستم‌های آبیاری، شبیه‌سازی میزان محصول و مدیریت منابع آب از اهمیت بالایی برخوردار است. در پژوهش حاضر از روش شبکه عصبی مصنوعی ANN و سه روش تجربی پنمن مانتیت فائو (PMF56) و بلانی کریدل (BC) کمبرلی پنمن (K-P) برای مدل‌سازی سیستم غیرخطی تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET<sub>0</sub>) که داده‌های ورودی - خروجی آن به صورت روزانه بودند، استفاده شد. سپس نتایج بدست آمده از روش‌های مذکور با داده‌های تبخیر اندازه‌گیری شده در منطقه آذربایجان شرقی (ایستگاه مراغه، میانه، اهر و جلفا) تحت واسنجی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که روش شبکه عصبی مصنوعی دارای دقت و سرعت بهتر در مدل‌سازی ET<sub>0</sub> در مقایسه با روش‌های کلاسیک می‌باشد. از دیگر نتایج مطالعه می‌توان به مناسب تر بودن روش دمایی BC نسبت به دیگر مدل‌های تجربی اشاره کرد. همچنین این پژوهش نشان داد مدل ANN با قانون یادگیری لوبنبرگ مارکوارت نتایج ET<sub>0</sub> بهتری را در شرایط اقلیمی مورد مطالعه ارائه می‌دهد.

**واژگان کلیدی:** آذربایجان شرقی، بلانی کریدل، پنمن مانتیت فائو، تبخیر-تعرق، شبکه عصبی مصنوعی.

### مقدمه

تبخیر و تعرق مرجع یکی از عناصر مهم چرخه هیدرولوژی است که نقش مهمی را در مطالعات کشاورزی، طرح‌های مدیریت منابع آب، طراحی شبکه‌های آبیاری و زهکشی و سازه‌های آبی، بازی می‌کند (نوری و همکاران، ۱۳۹۲، جلد بیستم شماره پنجم، ص ۱۲). با توجه به میزان اندک نزولات جوی و محدودیت منابع آب در ایران، مدیریت صحیح منابع آب از اهمیت زیادی برخوردار بوده و لازم است که در استفاده از آب دقت لازم به عمل آید. در این راستا تعیین نیاز آبی قدم اساسی در هر طرح آبیاری و زه‌کشی است و لازمه آن محاسبه تبخیر-تعرق پتانسیل سطوح گیاهی برای منطقه طرح می‌باشد (نوری و همکاران، ۱۳۹۲، جلد بیستم شماره پنجم ص ۱۲). برای تعیین نیاز آبی گیاهان روش‌های متعددی وجود دارد. از جمله روش‌های استفاده شده برای تعیین تبخیر تعرق گیاه مرجع (ET<sub>0</sub>) استفاده از مدل‌های ترکیبی نظیر پنمن مانتیت، مدل‌های تجربی مثل بلانی کریدل و سنجش‌های مستقیم لایسیمتری می‌باشد. ایران کشوری است که به لحاظ اقلیمی جزو کشورهای خشک و نیمه خشک جهان محسوب شده، بطه، بکه از یک سه مته‌سط نا، ندگ.

<sup>۱</sup>. دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور، دانشگاه تبریز (نویسنده مسئول)

Email : monir\_shirzad@yahoo.com -Tel: 09142925221

<sup>۲</sup>. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه تبریز

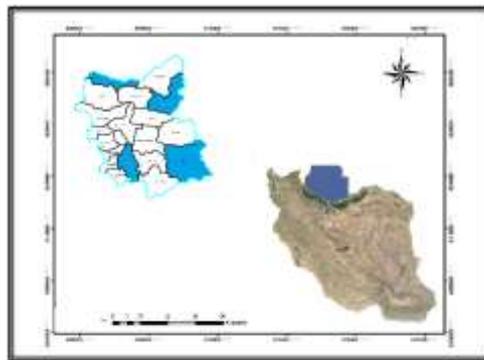
<sup>۳</sup>. استاد گروه آب و هواشناسی، دانشگاه تبریز

سالانه آن، حدود یک سوم متوسط بارندگی خشکی‌ها و کمتر از یک سوم بارندگی متوسط کره زمین و از سوی دیگر میزان تبخیر آن حدود سه برابر تبخیر خشکی‌های زمین می‌باشد (جهانبخش و همکاران، ۱۳۸۰، جلد ۱۱، صص ۶۵-۵۱). مدل‌سازی شبکه‌های هوشمند یکی دیگر از روش‌های مورد استفاده است. از اوایل دهه ۱۹۹۰ و اندکی پس از فراگیر شدن کاربرد شبکه‌های عصبی کاربرد روش‌های هوشمند آغاز شد و در زمینه مدل‌سازی تبخیر و تعرق پژوهش‌های زیادی صورت گرفته از جمله در خارج از کشور: (Chauhan and Shryvastava, 2008) با کاهش تعداد نرون‌های ورودی شبکه به دو نرون حداقل و حداکثر دمای هوا در کشور هند، دریافتند که ANN کمترین اختلاف با نتایج پنمن مانیتیت در مقایسه با روش‌های تشعشی فائو، پنمن اصلاحی و تشت تبخیر کلاس A دارد. (Shayannejad et al, 2008) تبخیر تعرق بالقوه را از روش‌های رگرسیون فازی، شبکه عصبی مصنوعی و روش پنمن مانیتیت تعیین نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل رگرسیون فازی با ورودی‌های دمای حداقل و حداکثر، میانگین رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد مدلی برتر در تخمین  $ET_0$  است. (Lander et al, 2008) در پژوهشی انجام شده در شمال چین، مقدار نیاز آبی گیاه در طول دوره رشد ۵۶۰ میلی متر و ضریب گیاهی آن را در مرحله اول رشد ۱/۰۷، مرحله ۱/۲ و مرحله چهارم ۰/۸۷ گزارش شد. (Jensen, 1990) طی پژوهشی ۲۰ روزه متفاوت برآورد تبخیر-تعرق پتانسیل را با اندازه‌گیری‌های لایسی متری به دست آمده از ۱۱ ایستگاه در مناطق مختلف در سرتاسر جهان مقایسه نمودند و در نهایت دریافتند که روش پنمن-مانیتیت بهترین روش در همه مناطق اقلیمی بوده است. (Allen et al, 1988)، ضریب گیاهی برنج بر اساس پیشنهاد فائو، برای مرحله ابتدایی رشد ۱/۰۵، مرحله میانی ۱/۲ و مراحل پایانی رشد ۰/۹، با عنوان ضرایب جدولی توصیه شده است. از آنجا که تبخیر-تعرق پدیده‌ای غیر خطی و پیچیده است و پارامترهای هواشناسی بسیاری در برآورد آن موثرند و از طرفی به علت اندازه‌گیری نکردن برخی از این متغیرها در بعضی نقاط، امروزه کارشناسان تمایل دارند از روش‌هایی که بتوانند برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل را با حداکثر دقت و حداقل تعداد پارامترهای مورد نیاز انجام دهند، استفاده نمایند. (Wang et al, 1984) در مقاله‌ای ۲۳ روزه محاسبه تبخیر-تعرق را در قسمت‌های مرکزی عربستان مورد ارزیابی قرار دادند، آن‌ها روش‌ها را به ۵ گروه روش‌های دمائی، روش‌های مبتنی بر رطوبت، روش‌های تابشی، روش‌های ترکیبی و روش‌های تشتک تبخیر تقسیم نمودند و نتیجه گرفتند که روش جنسی-هیز از گروه روش‌های تابشی در مکان اول و روش تشتک کلاس A در مکان دوم قرار می‌گیرند. در مجموع روش‌های ترکیبی در حد متوسط و روش‌های دمایی در پایین‌ترین مکان قرار گرفتند (Salih et al, 1984). در مقاله‌ای چند روش مختلف برآورد تبخیر-تعرق را با لایسیمتری مقایسه کرده و نتیجه گرفتند که معادله هارگریز-سامانی برای اراضی خشک بهترین برآورد را می‌کند. (Samani et al, 1986). در مقاله‌ای از مقایسه معادلات پرسیلی-تایلور و فائو-پنمن با لایسیمتر مشاهده نمودند که تبخیر-تعرق روزانه محاسبه شده با این معادلات به ترتیب ۱۵ تا ۲۰ درصد خطا دارند آنها متذکر شدند که معادله پرسیلی-تایلور به علت سادگی داده‌های ورودی ترجیح داده می‌شوند. در داخل کشور نیز پژوهش‌های انجام گرفته از جمله: (بیات و رکشی و همکاران، ۱۳۸۸، جلد ۱۶، شماره چهار، صص ۱۰-۱۲) در مقاله‌ای تحت عنوان مقایسه‌ی روش پنمن و تشت تبخیر کلاس A با داده‌های لایسیمتری در برآورد تبخیر و تعرق گیاه برنج در منطقه امل، در این مطالعه تبخیر و تعرق گیاه برنج در قالب طرحی دو ساله، با کشت دو رقم خزر و طارم به دو روش مستقیم (لایسیمتری) و غیره مستقیم (فائو) مورد بررسی قرار گرفت. در راستای اندازه‌گیری‌های لایسیمتری و محاسبه‌های فوق، تبخیر و تعرق گیاه مرجع از اندازه‌گیری‌های روزانه تشت تبخیر کلاس A و تعیین ضرایب اصلاحی تشت تبخیر به دست آمد، به این نتیجه رسیدند: استفاده از روش فائو در محاسبه‌ی تبخیر و تعرق گیاه مرجع و اعمال ضریب گیاهی تبخیر و تعرق برنج در این منطقه، ۴/۵ درصد برآورد بیشتری نسبت به مقادیر اندازه‌گیری لایسیمتری دارد. (جهانبخش و همکاران، ۱۳۸۷) روش تشت تبخیر را به عنوان یک روش ساده و مناسب در برآورد تبخیر-تعرق پتانسیل برای ایستگاه هواشناسی تبریز معرفی می‌نماید. در این تحقیق که از روش‌های ترکیبی، دمایی، تابش، همبستگی چندگانه و رطوبتی استفاده شده است روش کریستینسن-هارگریوز RA نسبت به سایر روش‌ها تطابق بهتری را نشان داده است. (زاهدی و خطیبی، ۱۳۸۷) در مقاله‌ای به تفضیل در مورد تبخیر-تعرق پتانسیل بحث نموده و به صورت عملی محاسبه برخی از این روش‌ها را ارائه نموده است و همچنین ایشان با ارائه جدول و نمودارهای لازم برای محاسبات امکان اجرای این محاسبات را برای هر مکانی امکان‌پذیر نموده است. با توجه به اکثر پژوهش‌های انجام شده در زمینه تبخیر و تعرق در داخل و خارج کشور می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌های هوش مصنوعی نسبت به روش‌های تجربی دقت و

قدرت بیشتری در شبیه سازی و پیش بینی تبخیر و تعرق گیاه مرجع دارند. با توجه به اینکه تبخیر-تعرق یکی از مولفه های اصلی بیلان آبی هر منطقه و همچنین یکی از عوامل کلیدی برای برنامه ریزی درست و مناسب آبیاری برای بهبود راندمان آب مصرفی در منطقه می باشد (گرانگر، ۱۹۹۹). و از طرف دیگر تبخیر و تعرق نقش قابل ملاحظه ای در اقلیم جهانی از طریق چرخه هیدرو لوژی ایفا کرده و تخمین آن کاربردهای مهمی در پیش بینی رواناب، پیش بینی عملکرد محصول و طراحی کاربری اراضی، طراحی کانال های آبیاری و ابنیه تقسیم آب داشته و همچنین بر روی بلایای نظیر خشکسالی موثر است (مباشری و همکاران، ۱۳۸۴) بنابراین در این تحقیق اقدام به مدلسازی تبخیر و تعرق چهار ایستگاه آذربایجان شرقی (مراغه، میانه، جلفا و اهر) با استفاده از روش هوش مصنوعی ANN و روشهای تجربی شامل پنمن مانیتث فائو، بلانی کریدل BC، کمبرلی پنمن و تورک شده و نتایج باهم مقایسه شده است.

### منطقه مورد مطالعه

استان آذربایجان شرقی با وسعتی معادل ۴۶ هزار کیلومتر مربع در شمال غرب ایران و در موقعیت ۳۹ درجه و ۲۶ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۴۵ دقیقه عرض شمالی و ۴۵ درجه ۰۵ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۲۲ دقیقه طول شرقی واقع شده است این استان به لحاظ وسعت یازدهمین استان کشور است (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

### داده ها و روش شناسی

برای انجام این پژوهش داده های روزانه اقلیمی طی سال های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۵ آذربایجان شرقی (چهار ایستگاه مراغه، میانه، جلفا و اهر) از سازمان هواشناسی منطقه تهیه شده است. لازم به ذکر است منظور از Eto واقعی در کل پژوهش حاضر مقدار تبخیر و تعرق اندازه گیری شده ایستگاه های مورد مطالعه به وسیله سازمان هواشناسی منطقه می باشد. داده ها بعد از نرمال شدن (داده ها با استفاده از رابطه ۱، بین صفر تا یک استاندارد شده اند) و تعیین همبستگی در نرم افزار متلب با روش شبکه عصبی مصنوعی با آموزش لونیگ-مارکوارت به ترکیب ۷۰-۳۰ جهت آموزش و شبیه سازی به کار گرفته شدند. داده ورودی برای شبیه سازی تبخیر و تعرق (دما، ساعت آفتابی، رطوبت، سرعت باد) مدل MLP در شبکه عصبی با سه حالت ۴ نرون، ۸ نرون و ۹ نرون پیاده شد. روش انتخاب نرون های لایه پنهان به صورت I، 2I، 2I + 1 و معیار ارزیابی کار هم RMSE (میانگین مجذور خطا)، R<sup>2</sup> (ضریب همبستگی) و خطای مطلق میانگین (MAE) می باشد که الویت را به داده های با خطای کمتر دادیم. با توجه به معیار ارزیابی ذکر شده برای شبکه عصبی مصنوعی جدول ۱ بهترین مدل از بین مدل های شبکه عصبی می باشد. سپس مقدار تبخیر و تعرق اندازه گیری شده ایستگاه های مورد مطالعه به وسیله سازمان هواشناسی منطقه با تبخیر تعرق محاسبه شده توسط روش شبکه عصبی مصنوعی باهم مقایسه شدند (شکل ۲). در گام بعدی مقدار تبخیر و تعرق اندازه گیری شده ایستگاه های مورد مطالعه به وسیله سازمان هواشناسی منطقه با تبخیر تعرق شبیه سازی شده توسط روش های پنمن مانیتث فائو، بلانی کریدل و کمبرلی پنمن باهم مقایسه شده (شکل ۳، ۴، ۵ و ۶) و میزان صحت روش های

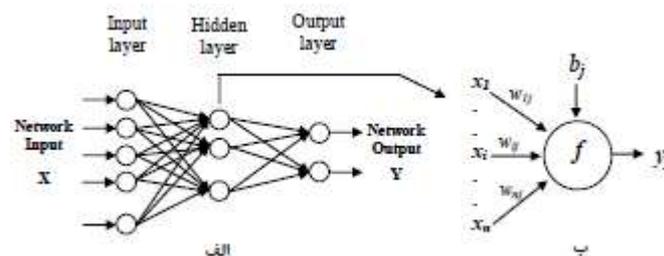
مذکور برای هر ایستگاه محاسبه (جدول ۲، ۳، ۴ و ۵) و در نهایت نتایج بهترین مدل انتخاب شده تجربی (بالانی کریدل) با بهترین مدل شبکه عصبی مقایسه شدند (شکل ۷، ۸، ۹، ۱۰).

### شبکه های عصبی مصنوعی با آموزش لونیگ-مارکواریت

ANN یک سیستم پردازشگر توزیعی اطلاعات است که خصوصیات عملکرد آن شبیه به ساختار عصبی مغز انسان بوده و گسترش آن براساس قواعد زیر است.

- پردازش اطلاعات در عناصر منفردی به نام گره انجام و این گره‌ها در دسته‌هایی به نام لایه مرتب می‌شوند.
  - سیگنال‌ها بین گره‌ها از طریق اتصالات منتقل می‌شود.
  - هر اتصال وزنی دارد که نشان دهنده نیروی اتصال آن است.
  - هر گره مجموعه وزنی سیگنال‌ها را با به کار بردن یک تبدیل غیرخطی که تابع محرک<sup>۱</sup> نامیده می‌شود به سیگنال خروجی تبدیل می‌کند (زیلاند و همکاران ۱۹۹۹ و ASCE ۲۰۰۰).
- می‌توان گفت که حدود ۹۰٪ از مدل‌های شبکه عصبی که در مسائل هیدرولوژی به کار گرفته شده‌اند از نوع شبکه‌های عصبی پیشرو<sup>۲</sup> هستند (نجفی و همکاران، ۱۳۹۴) که مدل MLP با الگوریتم آموزش لونیگ-مارکواریت (LM<sup>۳</sup>) از مهمترین آنها به شمار می‌رود. معماری معمول این شبکه متشکل از سه بخش لایه ورودی، پنهان و خروجی می‌باشد. تعداد نرون‌های موجود در لایه ورودی و خروجی بستگی به نوع مسئله دارد ولی تعداد گره‌های لایه پنهان با سعی خطا بدست می‌آید.

در شبکه پیشرو، اتصالات میان گره‌هایی وجود دارد که در لایه‌های متفاوت قرار دارند. همچنین ورودی‌ها در لایه ورودی شبکه نمایش داده شده و عمل تحریک از ورودی به سمت خروجی شبکه شروع می‌شود (علیزاده، ۱۳۹۰). ساختار کلی شبکه عصبی مصنوعی در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲- الف) شمایی کلی از شبکه‌های عصبی پیشرو سه لایه، ب) ساختار گره زام از این شبکه (ASCE ۲۰۰۰).

در شکل ۲ (ب)،  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  بردار ورودی‌ها،  $W_{ij}$  وزن اتصالی از آامین گره به زامین گره در لایه بعد،  $b_j$  بایاس مربوط به گره زام،  $y_j$  خروجی‌های هر لایه،  $y$  خروجی نهایی ANN است. همچنین  $f$  تابع محرک هر نرون بوده که اطلاعات ورودی از نرون‌های لایه قبلی به نرون‌های لایه بعد نگاشت می‌کند. در شبکه‌های پیشرو، اتصالات میان گره‌هایی وجود دارد که در لایه‌های متفاوت قرار دارند. همچنین ورودی‌ها در لایه ورودی شبکه نمایش داده شده و عمل تحریک از ورودی به سمت خروجی شبکه شروع می‌شود (ASCE ۲۰۰۰).

1- Activation Function

2- Feed Forward Neural Networks

3- Levenberg-Marquardt

$$X_n = \frac{X_{Max} - x}{x_{Max} - x_{Min}} \quad (1)$$

که در رابطه بالا  $X$  داده معمولی،  $X_n$  داده استاندارد،  $X_{Max}$  ماکزیمم داده‌ها در هر سطر یا ستون و  $X_{Min}$  مینیمم هر سطر یا ستون. در پژوهش حاضر از روش پنمن مانتیت-فائو (رابطه ۲)، بلانی کریدل (رابطه ۳) و کیمبرلی پنمن (رابطه ۴) استفاده شد.

### روش پنمن-مانتیت-فائو

در اغلب نقاط دنیا و از جمله ایران روش پنمن-مانتیت-فائو (1965) به عنوان تنها روش استاندارد برای محاسبه تبخیر-تعرق گیاه مرجع با استفاده از داده های هواشناسی معتبر می‌باشد.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_s - G) + Y \frac{900}{T+273} U_2 (e_1 - e_s)}{\Delta + \gamma(1+0.34u_2)} \quad (2)$$

$$ET_0 = a + b(p(0.46\bar{T} + 8/13)) \quad (3)$$

که در آن:

$ET_0$ : تبخیر-تعرق گیاه مرجع [ $mm \ day^{-1}$ ];  $R_n$ : تابش خالص در سطح پوشش گیاهی [ $MJ \ m^{-2} \ day^{-1}$ ];  $G$ : جرم مخصوص شار گرمایی داخل خاک [ $MJ \ m^{-2} \ day^{-1}$ ];  $T$ : متوسط درجه حرارت هوا (درجه سانتی گراد)، [ $^{\circ}C$ ];  $U_2$ : سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین [ $m \ s^{-1}$ ];  $e_s$ : فشار بخار اشباع [ $KPa$ ];  $e_a$ : فشار بخار واقعی [ $KPa$ ];  $(e_a - e_s)$ : کمبود فشار بخار اشباع در ارتفاع ۲ متری [ $KPa$ ];  $\Delta$ : شیب منحنی فشار بخار در مقابل حرارت [ $KPa \ ^{\circ}C^{-1}$ ];  $\gamma$ : ضریب ثابت سایکرومتریک (ضریب رطوبتی) [ $KPa \ ^{\circ}C^{-1}$ ];  $P$ : ضریب مربوط به طول روز،  $a$  و  $b$ : ضرایب اقلیمی.

### کمبرلی پنمن

معادلات متنوع دیگری نیز، دانشمندان با ساده سازی‌ها بدست آوردند که یکی از مهمترین آن‌ها معادله کمبرلی فائو است که به صورت رابطه ۴ برای تبخیر و تعرق گیاه مرجع در نظر گرفته شده است. که در آن  $E_{TS}$ : تبخیر-تعرق گیاه مرجع برحسب  $G \ mm/day$ ; شار گرمای خاک،  $R_n$ : تابش خالص خورشیدی رسیده به سطح زمین در یک سطح افقی،  $\gamma$ : ثابت سایکرومتر،  $\Delta$ : شیب منحنی فشار بخار اشباع.

$$E_{rc} = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \frac{6.43WFD}{\gamma} \quad (4)$$

### معیارهای ارزیابی:

با استفاده از روش‌های مختلفی می‌توان عملکرد مدل‌ها را مورد ارزیابی و مقایسه قرار داد، یکی از این روش‌ها استفاده از معیارهای ارزیابی می‌باشد. از جمله معیارهای ارزیابی پرکاربرد ضرایب همبستگی<sup>(1)</sup> ( $CC$ ) و ریشه میانگین مربعات خطا<sup>(2)</sup> ( $RMSE$ ) و خطای مطلق میانگین<sup>(3)</sup> ( $MAE$ ) می‌باشند که به ترتیب در روابط ۵، ۶ و ۷ آورده شده‌اند. دقیق‌ترین مدل با توجه به این معیارها، مدلی خواهد بود که مقدار آن برای دو معیار اول نزدیک به +۱ یا -۱ و برای معیار سوم نزدیک به صفر باشد.

1- Correlation Coefficient

2- Root Mean Square Error

3-Mean Absolute Error

$$CC = \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}))^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2} \quad (7)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |(y_i) - (x_i)| \quad (8)$$

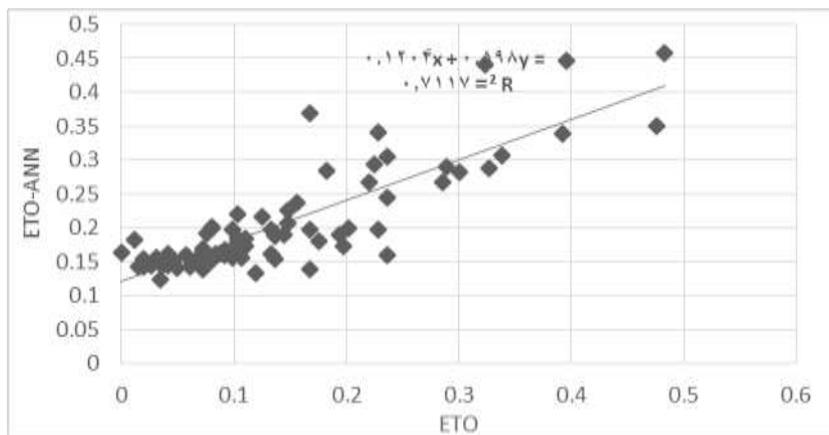
در روابط بالا  $x_i$  و  $\bar{x}$  به ترتیب مقادیر مشاهداتی جریان و میانگین مقادیر مشاهداتی،  $y_i$  مقدار محاسباتی جریان،  $\bar{y}$  میانگین مقادیر محاسباتی و N تعداد داده‌ها می‌باشد (میسرا و همکاران، ۲۰۰۹).

### بحث و یافته‌ها

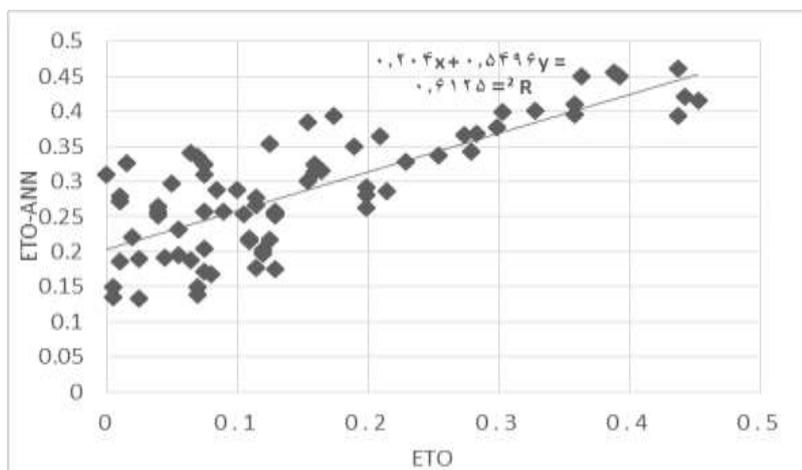
در این پژوهش از روش مبتنی بر هوش مصنوعی (ANN) و سه مدل تجربی (پنمن مانیتیت فائو (PMF56)، بلانی کریدل (B-C) و کمبرلی پنمن (K-P) برای مدل‌سازی سیستم غیر خطی تبخیر تعرق گیاه مرجع استفاده شد. نتایج نشان داد که روش هوش مصنوعی دارای دقت و سرعت بهتری در تخمین  $ET_0$  در مقایسه با روش‌های تجربی می‌باشد. همچنین می‌توان به مناسب تر بودن روش دمایی B-C نسبت به مدل ترکیبی PMF56 اشاره کرد. در این پژوهش برای هر چهار ایستگاه از سه مدل ۱-۴-۴، ۱-۸-۴، ۱-۹-۴ استفاده شده که مدل‌های بهینه در جدول (۱) ارائه و جهت تخمین قابل اعتماد بودن مقادیر تبخیر شبیه سازی شده از رابطه‌های (۶، ۷ و ۸) استفاده شده و نتایج در جداول (۱، ۲، ۳، ۴ و ۵) ارائه شده است. داده‌ها بعد از نرمال شدن با رابطه (۱) توسط روش شبکه عصبی مصنوعی (ANN) شبیه سازی و نتایج در شکل (۲) ارائه شد. مقایسه مقادیر تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده (پتانسیل) ایستگاه‌های مورد مطالعه به وسیله سازمان هواشناسی منطقه با تبخیر و تعرق محاسبه شده روش‌های تجربی برای چهار ایستگاه اهر، جلفا، مراغه و میانه در شکل (۳، ۴، ۵ و ۶) ارائه شد که در هر چهار ایستگاه مدل تجربی بلانی کریدل (BC) نسبت به دو روش دیگر تجربی بیشترین نزدیکی را با مقادیر تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده (پتانسیل) ایستگاه‌های مورد مطالعه به وسیله سازمان هواشناسی منطقه دارد. مقایسه روش بلانی کریدل (بهترین مدل تجربی) با روش شبکه عصبی مصنوعی (شکل‌های ۷، ۸، ۹ و ۱۰) نشان دهنده دقت بیشتر روش شبکه عصبی می‌باشد.

جدول ۱- نتایج تخمین تبخیر و تعرق با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

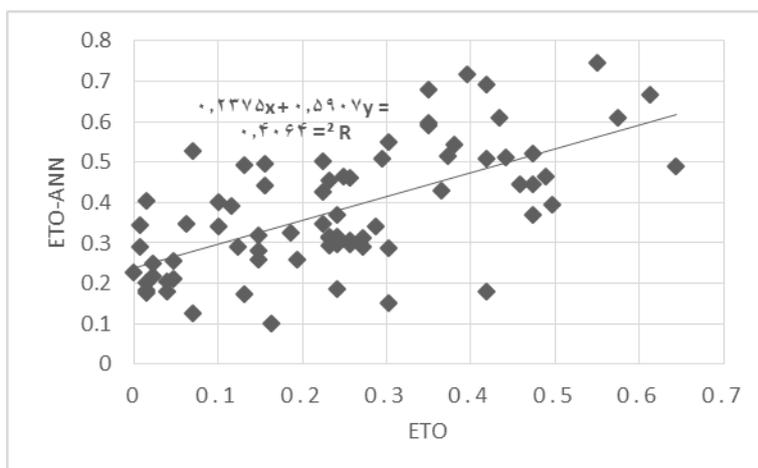
نام ایستگاه	مدل بهینه	صحت‌سنجی		
		CC	RMSE(mm)	MAE
میانه	۱-۸-۴	۰/۳۳	۰/۲۳	۰/۱۹
اهر	۱-۹-۴	۰/۶۳	۰/۱۹	۰/۱۶
مراغه	۱-۴-۴	۰/۷۸	۰/۱۵	۰/۱۳
جلفا	۱-۹-۴	۰/۸۴	۰/۰۸	۰/۰۷



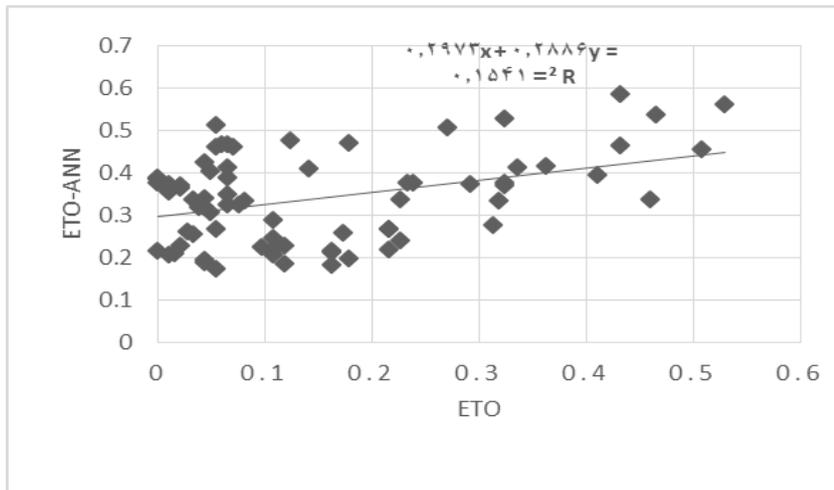
شکل ۲- الف) مقادیر تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده به وسیله سازمان هواشناسی منطقه (پتانسیل) و محاسبه شده با روش شبکه عصبی ایستگاه جلفا



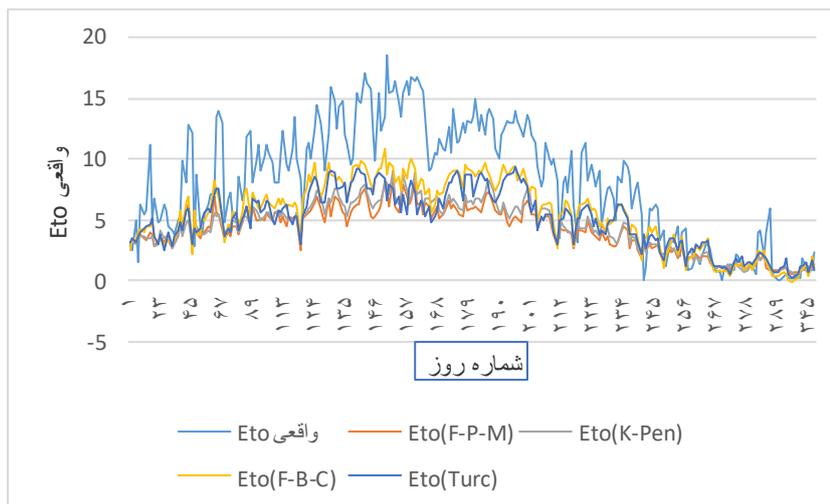
ب) مقادیر تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده به وسیله سازمان هواشناسی منطقه و محاسبه شده با روش شبکه عصبی ایستگاه مراغه



پ) مقادیر تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده به وسیله سازمان هواشناسی منطقه و محاسبه شده با روش شبکه عصبی ایستگاه اهر



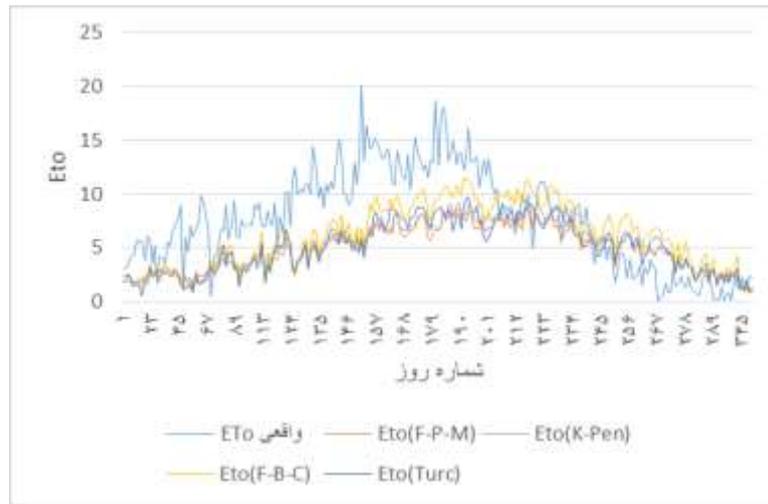
ت) مقادیر تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده به وسیله سازمان هواشناسی منطقه و محاسبه شده با روش شبکه عصبی ایستگاه میانه



شکل ۳- مقایسه روش های بلانی کریدل، پنمن مانیتث فائو و کمبرلی پنمن با مقادیر تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده به وسیله سازمان هواشناسی منطقه (پتانسیل) در ایستگاه میانه

جدول ۲- نتایج تخمین تبخیر و تعرق با استفاده از روش‌های تجربی ایستگاه میانه

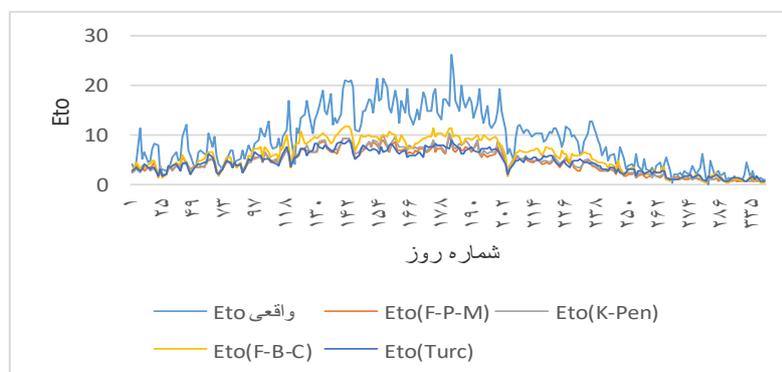
نام ایستگاه	روش‌ها	صحت‌سنجی		
		CC	RMSE(mm)	MAE
میانه	پنمن مانیتث فائو	۰/۷۸	۲/۲۳	۱/۵۳
	کمبرلی پنمن	۰/۷۹	۲/۱۱	۱/۴۷
	بلانی کریدل	۰/۷۹	۱/۷۷	۱/۲۴
	تورک	۰/۷۶	۱/۸۴	۱/۳۴



شکل ۴- مقایسه روش های بلانی کریدل، پنمن مانیتث فائو و کمبرلی پنمن با مقادیر تبخیر و تعرق اندازه گیری شده به وسیله سازمان هواشناسی منطقه (پتانسیل) در ایستگاه مراغه

جدول ۳- نتایج تخمین تبخیر و تعرق با استفاده از روش های تجربی ایستگاه مراغه

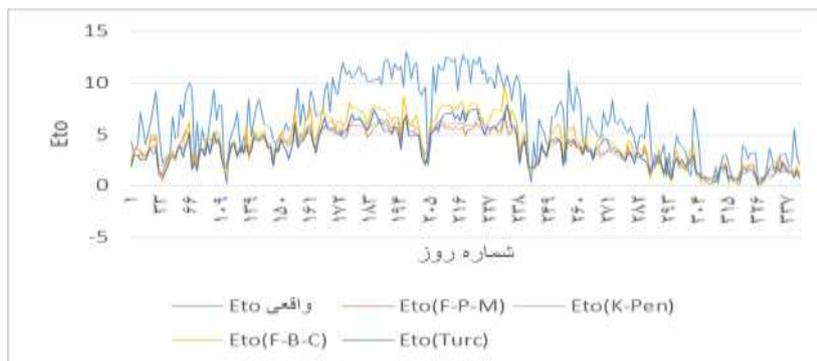
نام ایستگاه	روش ها	صحت سنجی		
		CC	RMSE(mm)	MAE
مراغه	پنمن مانیتث فائو	۰/۶۶	۲/۸۸	۲/۴۴
	کمبرلی پنمن	۰/۷۰	۲/۰۶	۱/۷۲
	بلانی کریدل	۰/۷۴	۲/۰۳	۱/۷۱
	تورک	۰/۶۶	۲/۲	۱/۸۵



شکل ۵- مقایسه روش های بلانی کریدل، پنمن مانیتث فائو و کمبرلی پنمن با مقادیر تبخیر و تعرق اندازه گیری شده به وسیله سازمان هواشناسی منطقه در ایستگاه جلفا

جدول ۴- نتایج تخمین تبخیر و تعرق با استفاده از روش های تجربی ایستگاه جلفا

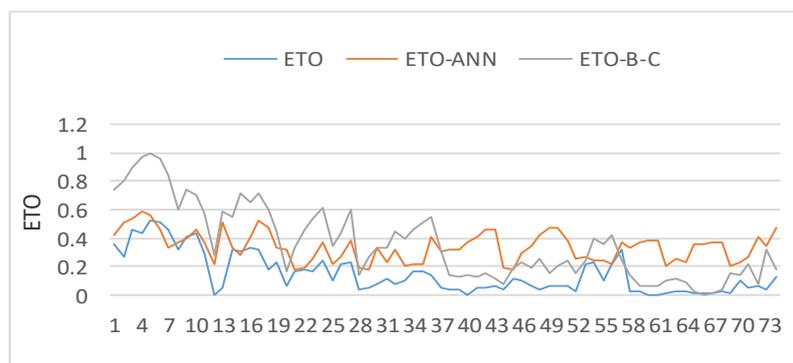
نام ایستگاه	روش ها	صحت سنجی		
		CC	RMSE(mm)	MAE
جلفا	پنمن مانیتث فائو	۰/۷۸	۲/۲	۱/۵۳
	کمبرلی پنمن	۰/۷۹	۲/۱۱	۱/۴۷
	بلانی کریدل	۰/۷۹	۱/۷۷	۱/۲۲
	تورک	۰/۷۹	۱/۸۴	۱/۳۴



شکل ۶- مقایسه روش های بلانی کریدل، پنمن مانیتیت فائو و کمبرلی پنمن با مقادیر تبخیر و تعرق اندازه گیری شده به وسیله سازمان هواشناسی منطقه (پتانسیل) در ایستگاه اهر

جدول ۵- نتایج تخمین تبخیر و تعرق با استفاده از روش های تجربی ایستگاه اهر

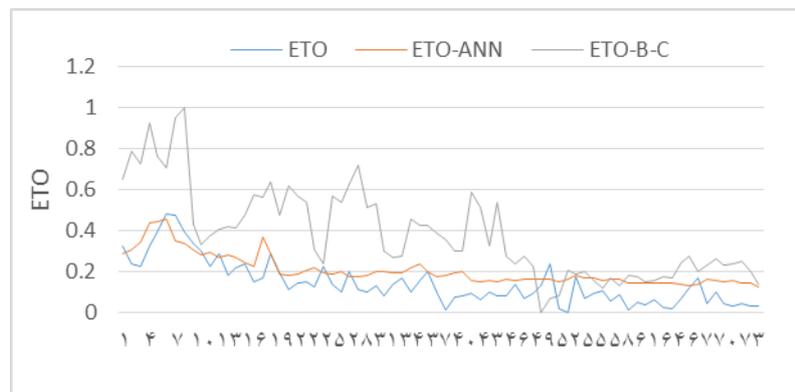
نام ایستگاه	روش‌ها	صحت‌سنجی		
		CC	RMSE(mm)	MAE
اهر	پنمن مانیتیت فائو	۰/۷۲	۲/۱۱	۱/۴۵
	کمبرلی پنمن	۰/۴۹	۲/۱۹	۱/۷۸
	بلانی کریدل	۰/۷۰	۱/۹۱	۱/۴۴
	تورک	۰/۴۹	۲/۱	۱/۴۴



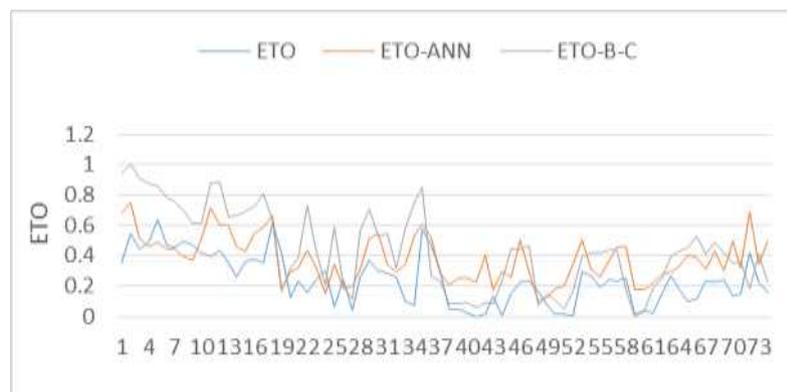
شکل ۷-مقایسه مقادیر تبخیر و تعرق اندازه گیری شده به وسیله سازمان هواشناسی منطقه (پتانسیل) با داده‌های شبیه سازی شده ANN و BC ایستگاه میانه



شکل ۸-مقایسه مقادیر تبخیر و تعرق اندازه گیری شده به وسیله سازمان هواشناسی منطقه (پتانسیل) با داده‌های شبیه سازی شده ANN و BC ایستگاه مراغه



شکل ۹-مقایسه مقادیر تبخیر و تعرق اندازه گیری شده به وسیله سازمان هواشناسی منطقه (پتانسیل) با داده های شبیه سازی شده ANN و BC ایستگاه جلفا



شکل ۱۰-مقایسه مقادیر تبخیر و تعرق اندازه گیری شده به وسیله سازمان هواشناسی منطقه (پتانسیل) با داده های شبیه سازی شده ANN و BC ایستگاه اهر

### نتیجه گیری و پیشنهادات

در این پژوهش از روش مبتنی بر هوش مصنوعی (ANN) و سه مدل تجربی (پنمن مانیتث فائو (PMF56)، بلانی کریدل (B-C) و کمبرلی پنمن (K-P) برای مدل سازی سیستم غیر خطی تبخیر تعرق گیاه مرجع استفاده شد. نتایج نشان داد که روش هوش مصنوعی دارای دقت و سرعت بهتری در تخمین  $ET_0$  در مقایسه با روش های تجربی می باشد. همچنین می توان به مناسب تر بودن روش دمایی B-C نسبت به مدل ترکیبی PMF56 اشاره کرد. با توجه به توصیه بسیاری از محققین مبنی بر مینا بودن روش پنمن-مانیتث-فائو ۵۶، در تمامی اقلیمها، نتایج این تحقیق نشان میدهد که روش مذکور در منطقه مورد مطالعه نتایج قابل قبولی ارائه نمیدهد و ضرورت واسنجی و ارزیابی روشهای تجربی را اثبات میکند. همچنین در مقایسه روش شبکه های عصبی مصنوعی با روشهای کالسیک، نتایج بر مناسب بودن عملکرد شبکه های عصبی مصنوعی حکایت دارد. بنابراین در صورت موجود بودن اطلاعات واقعی شبکه های عصبی مصنوعی برای برآورد دقیق تبخیر و تعرق و آب مورد نیاز گیاهان جهت برنامه ریزی صحیح آبیاری، کاهش تلفات آب و جلوگیری از کاهش محصول توصیه میشود.

## منابع

- ثنایی‌نژاد، حسن. نوری، سعید. هاشمی‌نیا، محمد، برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در منطقه مشهد. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). (۳)۲۵، ۱۳۹۰، ۵۴۷-۵۴۰.
- جهانبخش، سعید، موحد دانش، علی، مولوی، احسان. (۱۳۸۰)، تحلیل مدل‌های برآورد تبخیر - تعرق برای ایستگاه هواشناسی تبریز، دانش کشاورزی، شماره ۲، جلد ۱۱، صص ۶۵-۵۱.
- خوشحال، محسن. علیزاده، احمد. ثنایی، علی، کاربرد شبکه عصبی مصنوعی در شبیه‌سازی عناصر اقلیمی و پیش‌بینی سیکل خشکسالی، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ش ۳۹، ۱۳۸۹، صص ۱۲۰-۱۰۷.
- زارع ابیانه، حسن، نوری، حسین، لیاقت، علی، نوری، حسن، کریمی، وحید، مقایسه روش پنمن مانتیث فائو و تست تبخیر کلاس A با داده‌های لایسیمتری در برآورد تبخیر و تعرق گیاه برنج در منطقه آمل. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره ۷۶، تابستان ۱۳۹۰، صص 71-83.
- زارع ابیانه، حسن؛ قاسمی، علی؛ بیات ورکشی، محمد؛ معروفی، محمد. ارزیابی دقت شبکه عصبی در پیش‌بینی تبخیر - تعرق گیاه سیر بر اساس داده‌های لایسیمتری در منطقه همدان، دانش آب و خاک، دوره ۲۳، شماره ۳، ۱۳۸۸، صفحات ۱۸۵-۱۷۶.
- زاهدی، م، بیاتی خطیبی، مریم. (۱۳۸۷)، هیدرولوژی، انتشارات سمت.
- سلطانی، جمشید. مقدم‌نیا، علی. پیری، جمال. میرمراذهی، جواد، مقایسه کارایی مدل‌های تلفیقی NN-ARX و ANFIS با GA-GT جهت تخمین تبخیر روزانه از تست در شرایط اقلیمی خشک و گرم بلوچستان. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). جلد ۲۷، شماره ۲، ۱۳۹۱، صص ۳۹۳-۳۸۱.
- Allen, R.G and W.O. Perot. (1998). Closure to Relational Use of the FAO Blaney-Criddle Formula. J.Irrig and Drian Eng . 114(2):375- 380.
- Allen, R.G., M. *Tatsumi*, A. Morse. (2005). Satellite-based Evapotranspiration by METRIC and Landsat for Western Estates Water Management, US Bureau Reclamation Evapotranspiration Workshop.
- Cai J., and Santos L. (2007). Estimation reference evapotranspiration with the FAO Penman-Monteith equation using daily weather forecast messages. Agricultural and Forest Meteorology, 145: 22-35.
- *Clothier*, B.E., J.P. Kerr, J.S. *Talbot* and D.R. Scott.(1982). Measured and Evapotranspiration from Well-Watered Crops”, New Zealand, J.Agr.Res ., 25: 301-307.
- Goyal, R.K. (2004). Sensitivity of evapotranspiration to global warming: a case study of arid zone of Rajasthan (India). Agricultural Water Management, 69: 1-11.
- Grange r, R. J.(1999) Satellite -derived estimation of evapotranspiration in Gediz bas in, Journal of Hydrology 229, 70 -76.
- Gundekar, H. G., Khodke, U. M, & Sarkar, S. (2008). Evaluation of pan coefficient for reference crop evapotranspiration for semi-arid region. Irrigation Science 26:169-175.
- Jensen, N.E.R.D and R.G. Allen. (1990). Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices , No. 70: 354-358.
- Kumar, M., Raghuwanshi., N.S., Singh, R., Wallender, W.W.and Pruitt, W.O. (2002). "Estimating evapotranspiration using artificial net work". J Irrig. Drain. Eng., 128(4), 224-233.

- Landeras, G., Ortiz- Barredo, A., and López, J.J. (2008), Comparison of artificial neural network models and empirical and semi-empirical equations for daily reference evapotranspiration estimation in the Basque Country (Northern Spain). *J. Agric. Water Manage* 65:553-565.
- Lopez-Urrea, R., Martín de Santa Olalla, F., Fabeiro, C. & Moratalla A. (2006). Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semi-arid climate. *Agric Water Management* 85:15-26.
- Misra D, Oommen T, Agarwal A and Mishra SK, (2009). Application and analysis of Support Vector machine based simulation for runoff and sediment yield. *Journal of Bio Systems Engineering*, 103(9) 527-535.
- Paulo C., Terry J., and Eduardo A. (2009). Evaluation of FAO Penman-Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada. *Agricultural Water Management*, 97: 635-644.
- Piri, J. Amin, S. Moghaddamnia, A. Keshavarz, A. Han, D. Remesan, R. 2009. Daily Pan Evaporation Modeling in a Hot and Dry Climate. *Journal of Hydrologic Engineering*.
- Salih, A.M.A. and U. Sendil. 2005. Evapotranspiration under Extremely Arid Climates, *J. Irrig., and Drain, Eng., ASCE*, 110(3): 289-303.
- Samani, Z.A., and M. Pessarakli. 1986. Estimating Potential Crop Evapotranspiration with Minimum Data in Arizona, *Trans, ASAE* , 29: 522-524.
- Sudheer, K.P., Gosain, A.K., and Ramasastri, K.S. (2003). Estimating actual evapotranspiration from limited climatic data using neural computing technique. *J. of Irrig. Drain. Eng. ASCE*. 129: 3. 214-218.
- Trajkovic, S., B. Todorovic and M. Standkovic. (2003). Forecasting of reference evapotranspiration by artificial neural network. *J. Irrig. And Drain. ASCE*. 129(6):454-457.
- Tzimopoulos, C., Mpallas, L., and Papaevangelou, G. (2008). *Environmental Science and Technology*. 1:4. 181-186.
- Tezel, G. Buyukyildiz, M. 2015. Monthly evaporation forecasting using artificial neural networks and support vector machines. *Theor Appl Climatol*.
- Wang, Y.M, Traore, S., and Kerh, T. (2008). 28- Neural network approach for estimating reference evapotranspiration from limited climatic data in Burkina Faso. *WSEAS Transactions on Computers*. 7: 704-713.