

ارزیابی شبکه عصبی مصنوعی و مدل‌های فیزیکی تجربی تخمین تبخیر - تعرق گیاه مرجع در آب‌وهوای نیمه‌خشک

همایون فقیه*

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۹/۳۰ تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۳/۲۰

پژوهشگر، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی کردستان، سنندج، ایران

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: hfkuir@gmail.com

چکیده

برآورد دقیق تبخیر-تعرق، به‌عنوان یکی از اجزای اصلی چرخه هیدرولوژی، در مدیریت منابع آب، برنامه‌ریزی آبیاری و مطالعه‌های زیست‌محیطی اهمیت فراوان دارد. اندازه‌گیری میزان واقعی این مؤلفه بسیار مشکل است، بنابراین به‌کارگیری مدل‌هایی که بر استفاده از داده‌های هواشناسی موجود استوار هستند می‌تواند به‌عنوان جایگزینی برای اندازه‌گیری مستقیم در نظر گرفته شود. این پژوهش با هدف بررسی کارایی شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه و ۱۶ مدل رایج برای برآورد تبخیر-تعرق روزانه گیاه مرجع چمن، در منطقه سنندج انجام شد. برای این منظور داده‌های لایسی‌متری به‌عنوان داده‌های مرجع انتخاب گردید و نتایج سایر روش‌ها با آن مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که روش تشت تبخیر اصلاح‌شده به‌وسیله FAO، تبخیر-تعرق مرجع را نسبت به سایر روش‌های بررسی‌شده دقیق‌تر تخمین می‌زند. همچنین شبکه عصبی مصنوعی در برآورد تبخیر-تعرق مرجع دقت بالایی دارد. در میان روش‌ها، روش تشت تبخیر و شبکه عصبی مصنوعی مقدار تبخیر-تعرق مرجع را در منطقه مورد مطالعه به‌ترتیب ۰/۲۸ درصد کمتر و ۳/۳۷ درصد بیشتر از مقدار واقعی برآورد نمودند.

واژه‌های کلیدی: آب‌وهوای نیمه‌خشک، تبخیر-تعرق، شبکه عصبی مصنوعی، لایسی‌متر

Evaluating Artificial Neural Network and Physical-Empirical Models of Reference Crop Evapotranspiration Estimation in Semi-Arid Climate

H Faghieh*

Received: 21 December 2013

Accepted: 10 June 2015

Researcher, Agriculture and Natural Resources Research Center of Kurdistan, Sanandaj, Iran

*Corresponding Author, Email: hfkuir@gmail.com

Abstract

Accurate estimation of evapotranspiration (ET), which is one of the main components of hydrologic cycle, is very important in water resources management, irrigation planning and environmental studies. Accurate measurement of this component is very difficult, so the application of the models relying on available meteorological variables might be an alternative to direct measurement. This study aimed at evaluating multilayer perceptron artificial neural network as well as sixteen reference crop ET estimation models in Sanandaj. To achieve this object, lysimetric ET values were considered as standard values for evaluating the applied models. The results showed that the FAO improved pan evaporation method provides more accurate results than other applied methods. In addition, the results indicated that the artificial neural network produces more accurate results for estimating reference evapotranspiration (ET_0). Among others, the pan evaporation and artificial neural network models showed, respectively, 0.28% and 3.37% under-estimation and over-estimation in the studied region.

Keywords: Artificial neural network, Evapotranspiration, Lysimeter, Semi-arid climate

مقدمه

رطوبتی به گیاه شده و در نتیجه کاهش محصول را به- همراه خواهد داشت (کوچکزاده و بهمنی ۱۳۸۴). اندازه‌گیری تبخیر- تعرق واقعی بسیار مشکل است. در ایستگاه‌های تحقیقاتی برای اندازه‌گیری تبخیر- تعرق مرجع از لایسی‌متر استفاده می‌شود. لایسی‌مترها انواع مختلف دارند که دقیق‌ترین آن‌ها لایسی‌متر وزنی است (علیزاده ۱۳۸۱). ساخت این نوع لایسی‌متر پرهزینه است و تنها برای مقایسه نتایج سایر روش‌ها با آن و کارهای پژوهشی به‌کار می‌رود. بنابراین برای محاسبه تبخیر- تعرق مرجع از روش‌های تجربی استفاده می‌شود (شریفیان و همکاران ۱۳۸۵). دقت هریک از این

مجموع تبخیر از سطح مرطوب خاک و تعرق از پوشش گیاهی، تبخیر- تعرق نامیده می‌شود. فرآیند تبخیر- تعرق یکی از اجزای اصلی چرخه هیدرولوژی است. برآورد دقیق آن در طراحی و مدیریت سیستم‌های آبیاری، مطالعه بیلان آب و مدیریت منابع آب اهمیت زیادی دارد. تخمین بیش از حد آب موردنیاز گیاه ضمن هدر دادن آب آبیاری باعث ماندابی شدن اراضی، شستن مواد غذایی خاک و آلوده کردن منابع آب زیرزمینی می‌شود. هم‌چنین تخمین کم آن موجب اعمال استرس

ارپن‌بک (۱۹۸۱) در منطقه پروسر واشنگتن، با لایسی‌متر وزنی مقدار تبخیر- تعرق گیاه مرجع را به- دست آورد و در مقایسه با روش‌های تجربی، روش تشت تبخیر را توصیه کرد. آلن و همکاران (۱۹۸۹) مقدار تبخیر- تعرق گیاه مرجع برآورد شده با معادله‌های پنمن کیمبرلی، پنمن، پنمن اصلاح‌شده و پنمن مانتیث را با نتایج لایسی‌متر مقایسه نموده و گزارش کردند که روش پنمن مانتیث بیش‌ترین همخوانی را با نتایج اندازه‌گیری شده از لایسی‌متر دارد. سانتوس و همکاران (۱۹۹۴) روش جنسن هیز اصلاح‌شده را مناسب‌ترین روش برای تعیین تبخیر- تعرق گیاه مرجع در برزیل توصیه کردند. دهقانی‌سانج و همکاران (۲۰۰۴) مقدار تبخیر- تعرق چمن در کرج را با روش‌های پنمن مانتیث فائو، پنمن، پنمن رایت، بلانی کریدل، تابش و هارگریوز برآورد نمودند و با نتایج لایسی‌متر مقایسه کردند. نتایج نشان داد که روش پنمن مانتیث فائو مناسب‌ترین روش برای منطقه کرج است. بنلی و همکاران (۲۰۰۶) در ترکیه برای تعیین مقدار تبخیر- تعرق گیاه مرجع و همچنین یافتن بهترین فرمول برآورد آن از لایسی‌متر وزنی استفاده نمودند. نتایج نشان داد که رابطه‌های پنمن و مک‌کینک بهترین تطبیق را با داده‌های لایسی‌متری دارند. لویزا- یورا و همکاران (۲۰۰۶) در منطقه آلبست اسپانیا تبخیر- تعرق گیاه مرجع را با روش‌های پنمن مانتیث فائو ۵۶، پنمن فائو ۲۴، بلانی کریدل فائو ۲۴، تابش فائو و هارگریوز- سامانی محاسبه کردند و با داده‌های لایسی- متری مورد مقایسه قرار دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد مدل پنمن مانتیث فائو ۵۶ تبخیر- تعرق گیاه مرجع را با دقت بیش‌تری نسبت به سایر مدل‌های بررسی شده تخمین می‌زند.

امروزه پژوهشگران، با ابداع و پیشرفت علمی مانند روش‌های هوش مصنوعی در جست‌وجوی راه- هایی برای پیشرفت در شناخت و پیش‌بینی عامل‌های مهم هواشناسی می‌باشند. یکی از روش‌های هوش مصنوعی، شبکه‌های عصبی مصنوعی^۱ است که توانایی محاسبه و تقریب هر تابع حسابی و منطقی را دارند

روش‌ها با توجه به پارامترهای استفاده شده و شرایط آب و هوایی منطقه متفاوت هست. بنابراین لازم است در هر منطقه، معادله سازگار با آن محل انتخاب شود، که نیازمند ارزیابی دقیق معادله با استفاده از لایسی‌متر در آن محل است.

میلانی‌عنابی (۱۳۸۵) مقدار تبخیر- تعرق چمن در تبریز را با لایسی‌متر زهکش‌دار تعیین کرد و با روش- های بلانی کریدل، هارگریوز، مک‌کینک، پنمن، پنمن مانتیث و تشت تبخیر مقایسه نمود. نتایج نشان داد که روش تشت تبخیر بیش‌ترین همبستگی را با نتایج لایسی‌متر دارد. نوروزی (۱۳۸۵) مقدار تبخیر- تعرق چمن را در بوشهر با لایسی‌متر زهکش‌دار تعیین نمود و با نتایج روش‌های تجربی مورد مقایسه قرار داد. نتایج نشان داد که روش هارگریوز مناسب‌ترین روش در بوشهر است و روش‌های پنمن مانتیث، بلانی کریدل و تشت تبخیر در مراتب بعدی قرار دارند. رزاقی و سپاسخواه (۱۳۸۶) در ارزیابی روش‌های مختلف تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع به کمک داده‌های اندازه‌گیری شده لایسی‌متر وزنی در منطقه کوشک نتیجه گرفتند که روش تابش فائو دقت بیش‌تری نسبت به سایر روش‌ها دارد و روش‌های هارگریوز سامانی، پنمن مانتیث، پنمن فائو در مراتب بعدی هستند. ابراهیمی پاک (۱۳۸۹) در ارزیابی روش‌های مختلف برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع با استفاده از اندازه‌گیری‌های لایسی‌متری در قزوین گزارش کرد که روش هارگریوز سامانی (۱۹۸۲) همبستگی بالایی با نتایج اندازه‌گیری شده توسط لایسی- متر دارد و بعداز آن روش بلانی کریدل اصلاح‌شده به- وسیله سازمان فائو (FAO²⁴) روش مناسبی برای اندازه- گیری تبخیر- تعرق گیاه مرجع است. ابراهیمی پاک (۱۳۹۰) در ارزیابی روش‌های مختلف برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع با استفاده از مشاهدات لایسی‌متری در شهرکرد گزارش کرد که روش پنمن مانتیث اصلاحی توسط کوئینکا همبستگی بالایی با نتایج اندازه‌گیری شده با لایسی‌متر دارد و بعداز آن روش‌های هارگریوز سامانی (۱۹۸۲) و بلانی کریدل اصلاح شده به‌وسیله فائو (FAO²⁴) روش‌های مناسب برای اندازه‌گیری تبخیر- تعرق گیاه مرجع هستند.

¹ Artificial neural networks (ANN)

برتر معرفی نمودند. هژبر و همکاران (۱۳۹۳) تبخیر- تعرق گیاه مرجع را با شبکه عصبی مصنوعی و مدل‌های تجربی در منطقه کهریز ارومیه برآورد نمودند و نتایج آن‌ها را با داده‌های لایسی‌متری مقایسه کردند. دقت روش‌ها به ترتیب شامل شبکه عصبی مصنوعی، تورک، جنسن هیز، پنمن مانتیث فائو ۵۶ و بلانی کریدل بود.

این پژوهش با هدف مقایسه نتایج شبکه عصبی مصنوعی و ۱۶ روش تجربی رایج برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع (چمن) با داده‌های لایسی‌متری در منطقه سنندج با آب‌وهوای نیمه‌خشک انجام شد. نتایج حاصل از این بررسی می‌تواند به پژوهشگران در ارزیابی اولیه و نگرشی بهتر، در انتخاب روش مناسب برای برآورد نیاز آبی گیاه مرجع و یا ارائه معادله‌های اصلاحی در شرایط آب و هوایی و محیطی مشابه، که داده‌های لایسی‌متری و یا داده‌های هواشناسی لازم برای تعیین تبخیر- تعرق به روش پنمن مانتیث ممکن نباشد، کمک کند.

مواد و روش‌ها

مشخصات منطقه، ایستگاه سینوپتیک و لایسی‌متر

منطقه سنندج بر اساس روش دومارتن دارای آب‌وهوای نیمه‌خشک است و بر اساس آب‌وهوای نمای آمبرژه در منطقه نیمه‌خشک سرد قرار دارد. بیشینه دمای روزانه در گرم‌ترین ماه سال ۴۴ و کمینه آن در سردترین ماه سال ۳۱- درجه سلسیوس است. میانگین بارش سالانه آن در حدود ۴۶۳ میلی‌متر است. برای محاسبه تبخیر- تعرق مرجع با استفاده از روش‌های تجربی، داده‌های آب و هوایی موردنیاز، شامل میزان تبخیر از تشت کلاس A، بیشینه، میانگین و کمینه درجه حرارت، بیشینه، میانگین و کمینه رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی روزانه، از ایستگاه سینوپتیک سنندج تهیه شد. میانگین عوامل جوی در سه سال اجرای آزمایش در جدول ۱ ارائه شده است. ایستگاه سینوپتیک سنندج دارای مختصات، طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۲۰ صفر دقیقه شرقی، عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۲۰ دقیقه شمالی و ارتفاع ۱۳۷۳/۴ متر از سطح دریا هست.

(منهاج ۱۳۸۴). شبکه‌های عصبی مصنوعی با کمینه تعداد متغیرهای مستقل اندازه‌گیری شده، پیش‌بینی مناسبی از متغیرهای وابسته با دقت قابل قبول ارائه می‌دهند. داده‌های ورودی نادرست یا ناقص در توابع ریاضی باعث خطای زیاد در نتایج خروجی می‌شوند، در صورتی که در شبکه‌های عصبی مصنوعی تا حد زیادی این خطاها اثر خود را از دست می‌دهند (بشیر و حاجمیر ۲۰۰۰). بدین‌جهت شبکه عصبی مصنوعی در حل مسائل غیرخطی، موازی، حجیم و خطادار روشی توانمند به شمار می‌آید (جین و همکاران ۲۰۰۴).

کومار و همکاران (۲۰۰۲) با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی تبخیر- تعرق گیاه مرجع چمن را در منطقه دیویس کالیفرنیا برآورد نموده و با روش پنمن مانتیث مقایسه کردند. آن‌ها روش شبکه عصبی را به عنوان روش توانمندتر معرفی نمودند. کیسی (۲۰۰۶) برای پیش‌بینی تبخیر- تعرق مرجع روزانه از شبکه عصبی مصنوعی و داده‌های هواشناسی استفاده نمود و نتایج آن را با مدل‌های ریاضی پنمن و هارگریوز مقایسه کرد. نتایج نشان داد که شبکه عصبی مصنوعی تبخیر- تعرق را با دقت بالاتری نسبت به دو روش دیگر پیش‌بینی می‌نماید. زانتی و همکاران (۲۰۰۷) از شبکه عصبی مصنوعی با کمینه داده‌های هواشناسی برای تخمین تبخیر- تعرق در شهر ریودوژانیروی برزیل استفاده کردند. نتایج به دست آمده نشان داد شبکه عصبی با دمای بیشینه و کمینه هوا به عنوان ورودی، قابلیت پیش‌بینی تبخیر- تعرق را با دقت قابل قبول دارد. شایان‌نژاد و همکاران (۱۳۸۶) برآوردهای حاصل از دو روش شبکه عصبی مصنوعی و پنمن مانتیث فائو را با نتایج لایسی‌متری مقایسه کردند. آن‌ها روش شبکه عصبی را دقیق‌تر و مزیت آن را نیاز به پارامترهای کم‌تر نسبت به روش پنمن مانتیث دانستند. بیات‌ورکشی و همکاران (۱۳۸۸) برای تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع در منطقه همدان از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی، استنتاج فازی عصبی تطبیقی، پنمن مانتیث فائو ۵۶ و بلانی کریدل استفاده نمودند و نتایج آن‌ها را با داده‌های لایسی‌متری مقایسه کردند. آن‌ها شبکه عصبی مصنوعی را به عنوان روش

جدول ۱- میانگین عوامل جوی و میانگین تبخیر- تعرق مرجع روزانه اندازه‌گیری شده با لایسی‌متر در سه سال اجرای آزمایش (۱۳۷۴ تا ۱۳۷۶).

ماه							عوامل جوی
آبان	مهر	شهریور	مرداد	تیر	خرداد	اردیبهشت	
۳/۵۰	۷/۲۳	۱۱/۶۳	۱۷/۰۲	۱۶/۸۵	۱۱/۷۰	۷/۷۸	کمینه درجه حرارت (T_{min})، بر حسب ($^{\circ}C$)
۱۸/۰۳	۲۶/۳۰	۳۳/۵۰	۳۸/۰۷	۳۵/۴۶	۲۹/۹۷	۲۳/۲۱	بیشینه درجه حرارت (T_{max})، بر حسب ($^{\circ}C$)
۱۰/۷۷	۱۶/۷۷	۲۲/۵۷	۲۷/۵۵	۲۶/۱۶	۲۰/۸۴	۱۵/۵۰	میانگین درجه حرارت (T_{mean})، بر حسب ($^{\circ}C$)
۶/۸۵	۹/۱۹	۱۰/۹۲	۱۱/۷۱	۱۱/۵۴	۱۱/۴۲	۸/۹۶	ساعات آفتابی (n)، بر حسب (hr)
۳۴/۸۸	۱۷/۷۲	۱۱/۱۲	۹/۹۶	۱۲/۰۲	۱۷/۷۱	۲۵/۴۲	کمینه رطوبت نسبی (RH_{min})، بر حسب (%)
۷۷/۵۳	۶۰/۶۵	۵۱/۵۵	۴۴/۰۵	۴۷/۰۳	۶۶/۹۲	۷۶/۵۶	بیشینه رطوبت نسبی (RH_{max})، بر حسب (%)
۵۶/۲۱	۳۹/۱۸	۳۱/۳۴	۲۷/۰۱	۲۹/۵۳	۴۲/۳۱	۵۰/۹۹	میانگین رطوبت نسبی (RH_{mean})، بر حسب (%)
۱۰۹/۴۰	۱۳۳/۹۰	۱۳۶/۹۰	۱۴۴/۲۰	۱۶۲/۴۰	۱۵۵/۰۰	۱۵۱/۸۰	سرعت باد (U)، بر حسب ($km\ day^{-1}$)
۵/۵۹	۷/۶۷	۹/۸۲	۱۱/۱۰	۱۱/۳۸	۱۱/۳۲	۹/۶۹	تابش خالص (R_n)، بر حسب ($mm\ day^{-1}$)
۲/۷۳	۵/۱۶	۷/۱۱	۹/۲۸	۸/۷۳	۴/۹۳	۳/۰۶	تبخیر- تعرق مرجع (ET_0)، بر حسب ($mm\ day^{-1}$)

گذاشته شد. قبل از کاشت چمن، برای تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک (جدول ۲) و نیاز غذایی گیاه از خاک درون لایسی‌متر و حاشیه آن تا عمق ۶۰ سانتی-متری نمونه‌های خاک تهیه شد. همه عملیات زراعی از قبیل آماده‌سازی زمین، کاشت بذر (در بهار سال اول آزمایش)، مصرف کود، کوتاه کردن چمن، آبیاری و مراقبت‌های زراعی در داخل و خارج لایسی‌متر یکسان و هم‌زمان صورت گرفت.

داده‌های لایسی‌متری از نتایج آزمایش لایسی‌متر زهکش‌دار ایستگاه تحقیقات گریزه به‌دست آمد (توشیح ۱۳۷۸). ایستگاه تحقیقات گریزه در یک کیلومتری ایستگاه سینوپتیک سندانج واقع شده است. خاک محل احداث لایسی‌متر عمیق، دارای بافت لوم رسی، رژیم رطوبتی زیرک و رژیم حرارتی ترمیک بود. لایسی‌متر اندازه‌گیری تبخیر- تعرق گیاه مرجع چمن از نوع لایسی‌متر زهکش-دار، به ابعاد ۲×۲ مترمربع و عمق ۱/۵ متر بود. لایسی-متر در مرکز محدوده‌ای به وسعت ۴۰×۴۰ مترمربع کار

جدول ۲- نتایج تجزیه خاک محل اجرای آزمایش قبل از کاشت (۱۳۷۴).

چگالی ظاهری ($gr\ cm^{-3}$)	بافت	فسفر		مواد		هدایت الکتریکی ($dS\ m^{-1}$)	درجه اشباع (%)	عمق (cm)
		پتاسیم قابل‌جذب (ppm)	فسفر قابل‌جذب (ppm)	ازت کل (%)	کربن آلی (%)			
۱/۴۱	CL	۳۵۶	۷/۴۰	۰/۱۱	۱/۰۹	۷/۳۰	۰/۸۳	۳۰ تا ۰
۱/۳۳	CL	۱۸۷	۲/۳۰	۰/۰۸	۰/۶۵	۷/۴۰	۰/۵۳	۶۰ تا ۳۰

کنترل شد. از آنجاکه تانسیومتر فقط زمان آبیاری را مشخص می‌نماید، بنابراین برای تعیین مقدار آب آبیاری از منحنی رطوبتی خاک استفاده شد. به‌منظور تعیین منحنی رطوبتی از خاک نمونه برداری شد و با روش خشک‌کردن خاک در گرم‌خانه رطوبت اشباع آن اندازه‌گیری شد. هم‌چنین در آزمایشگاه به‌وسیله دستگاه صفحات فشاری میزان رطوبت خاک در ظرفیت زراعی (۳/۰- بار)، نقطه پژمردگی دائم (۱۵- بار) و پتانسیل-

برای اندازه‌گیری تبخیر- تعرق گیاه مرجع در شرایط استاندارد، نباید به گیاه تنش آبی وارد گردد. بر این اساس آبیاری داخل لایسی‌متر کمی بعد از ظرفیت زراعی انجام شد. با انجام این کار علاوه بر رعایت شرایط استاندارد، تغییرات رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه (DW) برابر صفر شده و می‌توان آن را از معادله بیلان آبی لایسی‌متر (معادله ۱) حذف نمود. فاصله آبیاری‌ها در دوره رشد به‌وسیله قرائت تانسیومتر

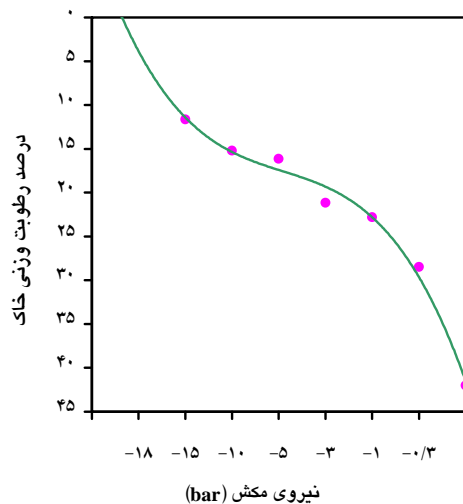
استفاده از بیلان آبی در لایسی متر (معادله ۱) و اندازه-گیری مقادیر آب ورودی، زه آب، بارش و رطوبت خاک در هر روز، میزان تبخیر- تعرق چمن اندازه گیری شد.

$$ET_0 = P + I - D \pm DW \quad [1]$$

در معادله ۱، ET_0 تبخیر- تعرق چمن ($mm \ day^{-1}$)، P میزان بارش ($mm \ day^{-1}$)، I میزان آب آبیاری ($mm \ day^{-1}$)، D میزان آب زهکشی شده ($mm \ day^{-1}$) و DW تغییرات رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه ($mm \ day^{-1}$) است.

های آب ۱-، ۳-، ۵- و ۱۰- بار اندازه گیری شد و سپس منحنی رطوبتی (شکل ۱) رسم شد. با توجه به شکل ۱ حد ظرفیت زراعی (FC) و نقطه پژمردگی دائم (PWP) خاک ناحیه آزمایش به ترتیب برابر ۲۸/۵ و ۱۱/۷ درصد رطوبت وزنی به دست آمد.

آبیاری داخل لایسی متر به گونه ای انجام شد تا مقداری از آب داخل لایسی متر از خروجی کف آن خارج شود. بدین ترتیب اطمینان حاصل شد که آبیاری به طور کامل انجام گرفته است. به این دلیل میزان آب مصرفی در هر نوبت آبیاری بیش تر از نیاز آبی گیاه و ظرفیت نگهداری رطوبت خاک در نظر گرفته شد تا پس از هر آبیاری لایسی متر خروجی داشته باشد. در نهایت با

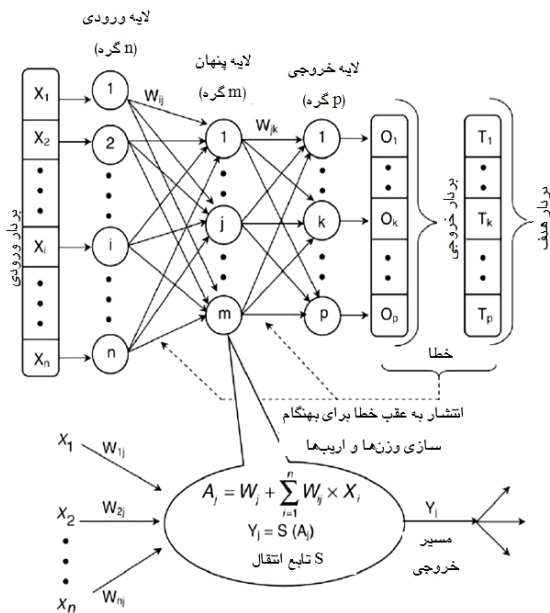


شکل ۱- منحنی رطوبتی خاک محل اجرای آزمایش.

روش شبکه عصبی مصنوعی

معمولاً از توابع انتقال خطی، سیگموئیدی و تانژانت هیپربولیک استفاده می شود. توپولوژی هر شبکه، وضعیت نسبی (تعداد، گروه بندی و اتصالات) سلول ها را در شبکه نشان می دهد. توپولوژی در واقع سیستم اتصال تبادلاتی نرون ها به یکدیگر است که توأم با نرم-افزار مربوطه (یعنی روش ریاضی جریان اطلاعات و محاسبه وزن ها) نوع عملکرد شبکه عصبی را تعیین می کند. ساده ترین نوع شبکه، دارای توپولوژی پیش خور هست که در آن جریان اطلاعات همیشه از ورودی به خروجی است. توپولوژی شبکه های چندلایه پرسپترون

در اغلب مدل های شبکه عصبی مصنوعی، از مدل ریاضی سلول عصبی که نرون یا پرسپترون نامیده می شود، استفاده می گردد. نرون کوچک ترین واحد سازنده شبکه عصبی است. هر شبکه از یک لایه ورودی، یک لایه خروجی و یک یا چند لایه میانی (پنهان) تشکیل شده است. در داخل هر یک از لایه های یاد شده، تعدادی نرون قرار دارند که با اتصالات وزن دار به هم مربوط می شوند. طی فرآیند آموزش شبکه، این وزن ها به طور پیاپی تغییر می کنند تا خطا به کم ترین مقدار خود برسد. برای انتقال خروجی های هر لایه به لایه های بعدی



شکل ۲- ساختار کلی شبکه‌های عصبی مصنوعی.

داده‌های ورودی و خروجی مدل شبکه عصبی

مصنوعی

ابتدا داده‌های هواشناسی روزانه شامل بیشینه، میانگین و کمینه درجه حرارت، بیشینه، میانگین و کمینه رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی به صورت ستون‌های مجزا وارد یک پوشه از صفحه گسترده اکسل و به‌عنوان داده‌های ورودی برای مدل تعریف شدند. سپس داده‌های لایسی‌متری روزانه به صورت ستونی وارد همان پوشه و تحت عنوان داده‌های مطلوب برای مدل تعریف شدند. به‌طورکلی ارتباط بین ورودی-ها و خروجی مدل به صورت معادله ۳ قابل‌ارائه است. بعد از مشخص نمودن داده‌های ورودی و مطلوب، عمل چیدن تصادفی ردیف‌ها روی صفحه گسترده انجام شد. در ادامه ۵۵ درصد از ردیف‌های هر ستون برای آموزش، ۱۵ درصد برای ارزیابی و ۳۰ درصد برای آزمون جدا شدند.

$$y_t = f((x_t)_1, \dots, (x_t)_n) \quad [3]$$

در معادله ۳، y_t مقدار تبخیر- تعرق روزانه گیاه مرجع در یک محل در روز t ، x_t عامل (متغیر) هواشناسی آن محل در روز t و n تعداد متغیرها هست.

با قانون آموزش انتشار به عقب خطا، که دارای الگوریتم‌های مختلف آموزش، از قبیل شیب مزدوج، مومنتوم و لونبرگ مارکارت است، تکمیل می‌شود (پرورش‌ریزی و همکاران ۱۳۸۵).

قبل از به‌کار بردن مدل شبکه عصبی، وزن‌ها و اریب‌های ارتباط دهنده نرون‌های شبکه تعیین می‌شوند. به این منظور تمام داده‌ها برای تدوین ساختار مدل به سه گروه تقسیم می‌شوند (کولی‌بالی و همکاران ۲۰۰۰). اولین گروه داده‌ها، به‌عنوان داده‌های آموزش، برای تعیین وزن‌ها و اریب‌های شبکه به‌کار می‌روند. دومین گروه از داده‌ها، که داده‌های اعتباری نامیده می‌شوند، برای ارزیابی نتایج مرحله آموزش و تصمیم‌گیری در خصوص توقف آموزش شبکه استفاده می‌شوند. تعیین دقت مدل، و یا به عبارتی آزمون مدل، با استفاده از سومین گروه داده‌ها، یعنی داده‌های آزمون که در تدوین مدل استفاده نشده‌اند، انجام می‌شود. در آموزش شبکه‌های عصبی علاوه بر روش آموزش، روند آموزش نیز در سرعت یادگیری و دقت شبکه عصبی مؤثر هست. معمولاً یکی از دو روند آموزش الگو به الگو و آموزش گروهی در تدوین مدل‌های شبکه عصبی به‌کار می‌رود (اسمعیلی‌ورکی و همکاران ۱۳۸۴). یک شبکه عصبی مصنوعی در حالت کلی ساختاری مشابه شکل ۲ دارد. شکل ریاضی شبکه عصبی مصنوعی با n ورودی، m لایه مخفی و p خروجی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$O_k = S.(\sum_{j=1}^m W_{jk} \times S.(\sum_{i=1}^n W_{ij} \times X_i)) \quad [2]$$

در معادله ۲، X_i و O_k مقادیر خروجی و ورودی شبکه، W_{ij} وزن‌های ارتباطی بین لایه ورودی و لایه مخفی، W_{jk} وزن‌های ارتباطی بین لایه مخفی و لایه خروجی و S تابع انتقال است.

ساختار شبکه عصبی مصنوعی

تر باشند، نشان دهنده مطابقت بیشتر تبخیر-تعرق برآورده شده و اندازه‌گیری شده است (کارآموز و عراقی‌نژاد ۱۳۸۴).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n ((y_{est})_i - (y_{obs})_i)^2}{n}} \quad [۴]$$

$$PE = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{est})_i}{\sum_{i=1}^n (y_{obs})_i}\right) \times 100 \quad [۵]$$

در معادله‌های ۴ و ۵، y_{est} مقدار تبخیر-تعرق روزانه برآورده شده با روش‌های تجربی و شبکه عصبی مصنوعی، y_{obs} مقدار تبخیر-تعرق اندازه‌گیری شده با لایسی‌متر و n تعداد داده‌ها (یا تعداد روزهای دوره اندازه‌گیری تبخیر-تعرق) هست.

نتایج و بحث

اندازه‌گیری تبخیر-تعرق با لایسی‌متر زهکش‌دار

نتایج اندازه‌گیری ده روزه لایسی‌متر زهکش‌دار در سه سال اجرای آزمایش برای ماه‌های مختلف در جدول ۳ ارائه شده است. با بررسی میانگین سه ساله در این جدول مشاهده می‌شود بیشینه تبخیر-تعرق چمن مربوط به مردادماه برابر ۹/۲۸ و کمینه آن در آبان ماه برابر ۲/۷۳ میلی‌متر در روز بوده است. میزان تبخیر-تعرق در کل دوره رشد به‌طور میانگین ۱۲۰۵ میلی‌متر بوده است (توشیح ۱۳۷۸). این مقدار با مقادیر حاصله از نتایج آزمایش‌ها لایسی‌متری در مناطق مختلف کشور از جمله میاندوآب ۱۱۸۶/۷ (سلطانی ۱۳۷۸)، ارومیه ۹۶۴/۵ (رضوی ۱۳۸۰)، تبریز ۱۲۲۶/۹ (میلانی-عنابی ۱۳۸۵)، همدان ۱۰۵۸ (رحیمی ۱۳۷۸) و اراک ۱۳۰۳/۵ میلی‌متر (رستمی ۱۳۷۴) هم‌خوانی دارد.

با توجه به نتایج به‌دست آمده، در سال اول به دلیل توزیع مناسب بارندگی و ادامه آن تا اواخر دهه دوم خرداد، میزان تبخیر کم‌تر و در نتیجه نیاز آبی گیاه نیز کم‌تر شده، به طوری که آبیاری در مقایسه با سال‌های دوم و سوم یک ماه دیرتر شروع شده که در نهایت میزان آب مصرفی در سال اول نسبت به سال‌های دوم

در این بررسی از مدل شبکه عصبی مصنوعی با ساختار پیش‌خور چندلایه برای برآورد تبخیر-تعرق روزانه گیاه مرجع در منطقه سنندج استفاده شد. در طراحی ساختار مدل، ابتدا تعداد نرون‌های لایه‌های ورودی و خروجی به ترتیب با توجه به تعداد متغیرهای ورودی (متغیرهای هواشناسی) و خروجی مدل (تبخیر-تعرق مرجع) انتخاب شد. سپس برای انتخاب پارامترهای قابل تنظیم و در نتیجه تعیین بهترین ساختار شبکه عصبی، تعداد زیادی شبکه عصبی با ساختار مختلف طراحی و ارزیابی شد. این شبکه‌های عصبی با تغییر پارامترهای قابل تنظیم (شامل تابع انتقال، قانون یادگیری، مقدار مومنتوم، تعداد لایه میانی، تعداد نرون‌های لایه میانی، تعداد الگوها و متغیرهای ورودی)، ساخته و اجرا شدند. دقت این شبکه‌ها به وسیله معیارهای آماری محاسبه شده در مرحله آزمون، بررسی گردید و در نهایت شبکه‌ای که نزدیک‌ترین نتیجه را با واقعیت داشت به‌عنوان شبکه اصلی انتخاب شد.

روش‌های تجربی

علاوه بر اندازه‌گیری تبخیر-تعرق گیاه مرجع با لایسی‌متر زهکش‌دار، مقادیر تبخیر-تعرق مرجع روزانه با ۱۶ روش تجربی که به‌عنوان روش‌های رایج برآورد تبخیر-تعرق، در نرم افزار REF-ET، لحاظ شده‌اند، محاسبه شد. اسامی این روش‌ها در قسمت نتایج در زیر جدول ۵ ارائه شده است.

معیارهای آماری

برای ارزیابی دقت و مقایسه روش‌ها، از معیارهای آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و درصد خطا (PE) استفاده شد. ریشه میانگین مربعات خطا دقت مدل را بر اساس تفاضل بین مقادیر واقعی و مقادیر برآورد شده ارزیابی می‌کند. این معیار از معادله ۴ به‌دست می‌آید. مقدار آن از صفر تا مثبت بی‌نهایت تغییر می‌کند. معیار درصد خطا از معادله ۵ به‌دست می‌آید. مقدار درصد خطا از منفی تا مثبت بی‌نهایت تغییر می‌کند. هرچه مقدار RMSE و PE به صفر نزدیک-

ترتیب در ماه‌های خرداد، تیر و مرداد روندی افزایشی نشان داده، به طوری که در مردادماه به اوج خود رسیده است. در شهریورماه به دلیل کاهش دما، تابش و سرعت باد و همچنین افزایش رطوبت نسبی، میزان ET_0 کاهش پیدا کرده و این کاهش تا اواخر دهه دوم آبان ماه که اندازه‌گیری‌ها انجام گرفته، ادامه داشته است.

و سوم کم بوده است. مقایسه جدول‌های ۱ و ۳ نشان می‌دهد که بین تبخیر- تعرق از لایسی‌متر و متغیرهای جوی (شامل دما، تابش، سرعت باد و رطوبت نسبی) وابستگی زیادی وجود دارد. به این ترتیب که در اردیبهشت ماه میزان تبخیر- تعرق پایین بوده، اما با افزایش هم‌زمان دما و تابش و کاهش رطوبت نسبی به-

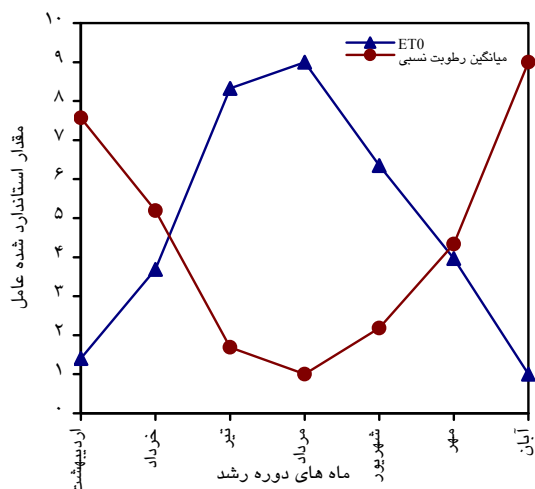
جدول ۳- نتایج اندازه‌گیری ده روزه تبخیر- تعرق چمن با لایسی‌متر و میانگین روزانه آن در سه سال اجرای آزمایش (توشیح ۱۳۷۸).

تبخیر- تعرق (mm)				ماه	دهه
سال ۱۳۷۴	سال ۱۳۷۵	سال ۱۳۷۶	میانگین (سه‌ساله)		
--	--	--	--	اردیبهشت	اول (10 days)
--	--	--	--		دوم (10 days)
--	--	--	--		سوم (11 days)
۳/۰۶	۳/۳۴	۲/۷۸	--		میانگین روزانه ($mm\ day^{-1}$)
۴۳/۵۴	۳۹/۵۰	۴۷/۵۷	--	خرداد	اول (10 days)
۵۱/۶۵	۶۸/۲۷	۵۶/۶۸	۳۰/۰۰		دوم (10 days)
۵۷/۶۸	۷۴/۰۰	۵۱/۸۰	۴۷/۲۴		سوم (11 days)
۴/۹۳	۵/۸۶	۵/۰۳	۳/۶۸		میانگین روزانه ($mm\ day^{-1}$)
۸۰/۴۶	۹۰/۹۹	۷۴/۱۴	۷۶/۲۵	تیر	اول (10 days)
۸۵/۳۳	۸۷/۶۳	۹۳/۳۸	۷۴/۹۹		دوم (10 days)
۱۰۴/۷۰	۱۱۹/۴۰	۱۱۴/۶۹	۸۰/۰۰		سوم (11 days)
۸/۷۳	۹/۶۱	۹/۱۰	۷/۴۶		میانگین روزانه ($mm\ day^{-1}$)
۸۱/۱۲	۱۰۶/۲۴	۸۸/۸۲	۴۸/۳۰	مرداد	اول (10 days)
۹۷/۵۸	۹۶/۷۰	۱۰۰/۴۰	۹۵/۶۴		دوم (10 days)
۱۰۹/۰۷	۱۰۰/۰۰	۱۱۱/۲۷	۱۱۵/۹۳		سوم (11 days)
۹/۲۸	۹/۷۷	۹/۶۹	۸/۳۸		میانگین روزانه ($mm\ day^{-1}$)
۷۱/۹۶	۶۹/۸۲	۸۲/۹۵	۶۳/۱۰	شهریور	اول (10 days)
۷۳/۷۶	۵۹/۴۶	۸۱/۵۶	۸۰/۲۵		دوم (10 days)
۷۴/۵۵	۶۵/۶۴	۸۰/۱۱	۷۷/۹۰		سوم (11 days)
۷/۱۱	۶/۲۹	۷/۸۹	۷/۱۴		میانگین روزانه ($mm\ day^{-1}$)
۶۰/۱۷	۵۵/۷۴	۵۶/۲۸	۶۸/۵۰	مهر	اول (10 days)
۵۳/۱۰	۴۷/۳۰	۶۲/۰۰	۵۰/۰۰		دوم (10 days)
۴۱/۴۸	۴۵/۳۰	۳۴/۱۴	۴۵/۰۰		سوم (10 days)
۵/۱۶	۴/۹۵	۵/۰۸	۵/۴۵		میانگین روزانه ($mm\ day^{-1}$)
۲۹/۶۶	۱۴/۵۳	۴۰/۰۰	۳۴/۴۵	آبان	اول (10 days)
۲۴/۹۲	۱۳/۰۰	۲۴/۸۶	۳۶/۹۰		دوم (10 days)
--	--	--	--		سوم (10 days)
۲/۷۳	۱/۳۸	۳/۲۴	۳/۵۷		میانگین روزانه ($mm\ day^{-1}$)
۱۲۰۵/۰۸	۱۲۲۳/۷۴	۱۲۵۹/۱۲	۱۰۲۴/۴۵		مقدار تبخیر- تعرق در دوره رشد (mm)
۶/۱۸	۶/۲۸	۶/۴۶	۶/۲۵		میانگین روزانه تبخیر- تعرق در طول دوره رشد ($mm\ day^{-1}$)

مربوط به همه عامل‌ها در محدوده ۱ تا ۹ استاندارد شده‌اند.

$$X_{iStd} = (0.1 + 0.8 \times \frac{X_i - X_{imin}}{X_{imax} - X_{imin}}) \times 10 \quad [۶]$$

در معادله ۶، X_{iStd} معرف داده استاندارد شده، X_i داده اصلی، X_{imax} و X_{imin} به ترتیب مقدار بیشینه و کمینه داده اصلی می‌باشند.



شکل ۴- رابطه معکوس ET_0 با رطوبت نسبی.

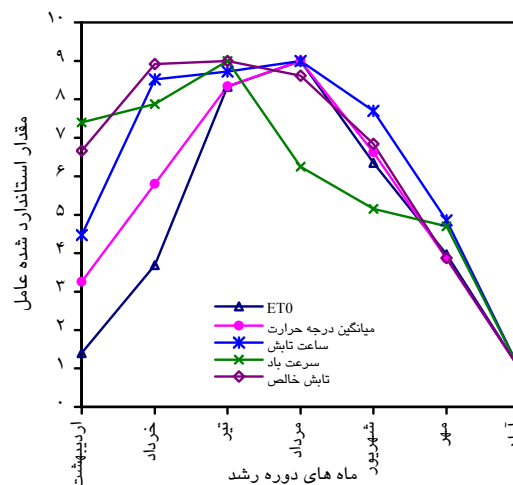
هیپربولیک و قانون آموزش لونیبرگ مارکارت حاصل می‌شود. به علاوه بهترین ساختار دارای یک لایه پنهان با ۲ نرون یا عنصر پردازشگر است (شکل ۵). در این پژوهش از نرم‌افزار NeuroSolutions5 برای تدوین مدل-های شبکه عصبی مصنوعی و انجام محاسبات مربوط به آن استفاده شد.

جدول ۴- ساختار و نتایج آماری مناسب‌ترین شبکه عصبی آموزش داده شده.

ساختار ورودی خروجی	تعداد لایه پنهان	تعداد لایه نرون لایه تابع انتقال	تابع انتقال		قانون آموزش	مقدار بیشینه تکرار مونتوم	مقدار بیشینه آموزش	دوره اعتبارسنجی	دوره آموزش	RMSE (mm day ⁻¹) کل داده‌ها
			Tanh	Tanh						
۴۰	۸	۱	۱	۲	Tanh	۱۰۰۰	-	۰/۷۷۹	۰/۷۶۰	۱/۴۲۵

در جدول ۴ از کلمه Tanh به جای تابع انتقال تانژانت هیپربولیک استفاده شده است.

بنابراین با توجه به موارد فوق ملاحظه می‌شود که رابطه تنگاتنگی بین عوامل جوی و نیاز آبی گیاه وجود داشته و هرگونه تغییر در عوامل فوق بر روی تبخیر-تعرق گیاه اثر گذاشته و این اثر به طور دقیق به وسیله لایسی متر قابل اندازه گیری بوده است (شکل ۳ و ۴). از آنجاکه واحد سنجش عامل‌های مؤثر بر تبخیر-تعرق یکسان نبودند در ترسیم شکل‌های ۳ و ۴، داده‌ها به وسیله معادله ۶ بدون بعد شده‌اند. بنابراین داده‌های



شکل ۳- رابطه مستقیم ET_0 با عوامل جوی دما، تابش و باد.

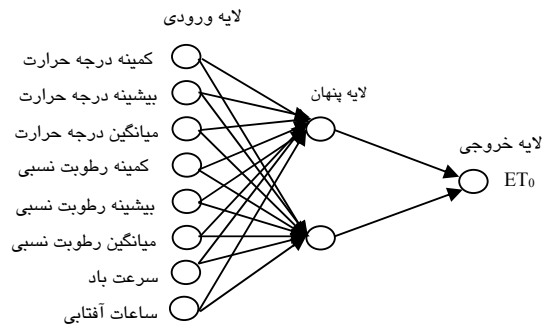
تدوین مدل و انتخاب ساختار شبکه عصبی مصنوعی برای انتخاب بهترین ساختار شبکه عصبی مصنوعی، با تغییر پارامترهای قابل تنظیم ۴۷ شبکه عصبی با ساختار مختلف طراحی و ارزیابی شد. برای اختصار فقط ساختار و نتایج آماری مناسب‌ترین شبکه در جدول ۴ ارائه شده است. با بررسی این جدول مشاهده می‌شود که در مسئله برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع دقیق‌ترین مدل با استفاده از تابع انتقال تانژانت

۱/۸۰، ۳/۱۱، ۳/۳۷- و ۶/۲۴ درصد در رتبه‌های اول تا ششم قرار داشتند.

نتایج نشان داد مرتبه روش‌ها بر اساس معیار آماری درصد خطا برای هر سال و دوره سه ساله کاملاً یکسان نیست. از آنجاکه تعداد مشاهده‌های دوره سه ساله (۵۵۴ روز داده) بیش‌تر از داده‌های دوره سالانه (۱۹۵ روز داده) بود، بنابراین نتایج دوره سه ساله قابل‌اعتمادتر و به این دلیل انتخاب اولویت استفاده از روش بر اساس نتایج آماری دوره سه ساله قابل توصیه است.

برای دوره سه ساله به‌جز دو روش مک‌کینک (۱۹۵۷) و پرستلی تیلر (۱۹۷۲) با مقدار خطای ۳۵/۰۳ و ۳۲/۸۰ درصد، ۱۵ روش دیگر دارای خطایی کم‌تر از ۱۵ درصد بودند. از این ۱۵ روش، خطای دو روش تابش (FAO₂₄) و بلانی کریدل (FAO₂₄) به‌ترتیب ۱۴/۰۷- و ۱۲/۶۲- درصد و ۱۳ روش دیگر دارای خطایی کم‌تر از ۹ درصد بودند. بنابراین با توجه به داده‌های مورد نیاز هر روش و داده‌های موجود در منطقه از این ۱۳ روش با اطمینان می‌توان استفاده نمود. از این ۱۳ روش، روش پنمن مانتیث اصلاح‌شده به‌وسیله ASCE (آلن و همکاران ۱۹۸۹)، پنمن مانتیث ASCE (بی‌نام ۲۰۰۵) و روش پنمن مانتیث فائو (FAO₅₆) دارای دقت تقریباً برابر بودند.

نتایج اولویت‌بندی روش‌ها حاکی از آن است که روش تشت تبخیر FAO₂₄ در بین روش‌های تجربی بررسی شده در رتبه اول قرار دارد. در شکل ۶ مقادیر تبخیر-تعرق ده روزه برآورد شده با روش تشت تبخیر FAO₂₄ در مقابل تبخیر-تعرق اندازه‌گیری شده با لایسی‌متر نشان داده شده است. از این شکل مشاهده می‌شود که اختلاف مقدار تبخیر-تعرق برآورد شده با این روش با تبخیر-تعرق اندازه‌گیری شده در ابتدای دوره رشد یعنی اردیبهشت‌ماه زیاد و به‌طور میانگین ۱/۹۳ میلی‌متر در روز بوده است. اختلاف مقدار برآورد شده و مشاهده‌شده در طول دوره رشد به‌تدریج کم شده و در انتهای دوره رشد به ۰/۴۷ میلی‌متر در روز رسیده است. همچنین این شکل حاکی از رابطه معنی‌دار تبخیر-تعرق برآورد شده با این روش و اندازه‌گیری شده با لایسی‌متر هست. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در سنجش روش تشت تبخیر FAO₂₄ در برآورد تبخیر-



شکل ۵- ساختار شبکه عصبی مصنوعی انتخاب شده.

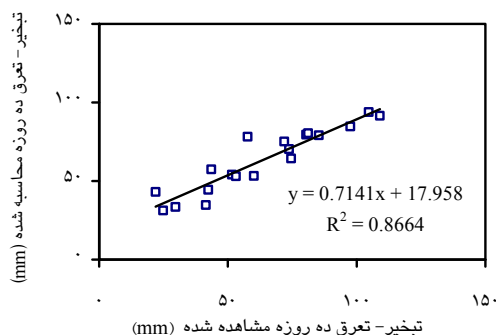
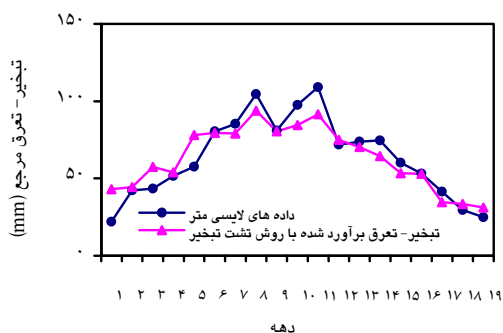
مقایسه تبخیر-تعرق مرجع حاصل از لایسی‌متر با روش‌های تجربی

مقادیر تبخیر-تعرق مرجع برای ۱۶ روش با استفاده از نرم‌افزار REF-ET3.1.15 محاسبه شد. برای بررسی کارایی این روش‌ها و شبکه عصبی مصنوعی در برآورد تبخیر-تعرق روزانه گیاه مرجع در آب و هوای نیمه‌خشک سنجش نتایج آن‌ها با داده‌های لایسی‌متری مقایسه شد. نتایج آماری این مقایسه در جدول ۵ ارائه شده است.

بر اساس معیار آماری درصد خطا در سال اول روش‌های شبکه عصبی مصنوعی، تشت تبخیر FAO₂₄ و پنمن FAO₂₄ به‌ترتیب با مقدار خطایی برابر ۰/۰۴- و ۱/۷۶- و ۲/۸۳ درصد در رتبه‌های اول تا سوم قرار داشتند. در سال دوم سه روش پنمن مانتیث ASCE (آلن و همکاران ۱۹۸۹)، پنمن مانتیث ASCE و پنمن مانتیث فائو ۵۶ با مقدار خطا ۰/۱۵ درصد به‌صورت مشترک در رتبه اول و روش‌های پنمن (۱۹۴۸)، پنمن مانتیث ASCE (بی‌نام ۲۰۰۵) و شبکه عصبی مصنوعی با ۰/۲۸، ۰/۳۹ و ۰/۶۸- درصد خطا به‌ترتیب در رتبه‌های دوم، سوم و چهارم قرار داشتند. در سال سوم روش‌های پنمن کیمبرلی (رایت و جنسن ۱۹۷۲)، تشت تبخیر FAO₂₄، پنمن کیمبرلی (رایت ۱۹۸۲) و شبکه عصبی مصنوعی به‌ترتیب با مقدار خطای ۰/۳۱، ۰/۶۴، ۰/۷۸ و ۲/۸۴- درصد در رتبه‌های اول تا چهارم قرار داشتند. برای دوره سه ساله روش‌های تشت تبخیر FAO₂₄، پنمن کیمبرلی (رایت و جنسن ۱۹۷۲)، پنمن کیمبرلی (رایت ۱۹۸۲)، پنمن (۱۹۴۸)، شبکه عصبی مصنوعی و پنمن مانتیث فائو ۵۶ به‌ترتیب با مقدار خطای ۰/۲۸، ۱/۴۹،

تعرق مرجع از توانایی بالایی برخوردار است و داده‌های برآورد شده به‌وسیله‌ی این روش دارای جورشدگی و

انطباق بسیار خوبی با داده‌های واقعی می‌باشند.



شکل ۶- پراکنش و مقدار تبخیر- تعرق اندازه‌گیری شده با لایسی‌متر و برآورد شده با روش تشت تبخیر FAO₂₄.

(میلانی‌عنابی ۱۳۸۵، نوروزی ۱۳۸۵، ارپن‌بک ۱۹۸۱، سانتوس و همکاران ۱۹۹۴).

نتیجه‌گیری کلی

در این بررسی نتایج نشان داد که روش‌های پنمن مانیتیت اصلاح شده به‌وسیله‌ی ASCE (آلن و همکاران ۱۹۸۹)، پنمن مانیتیت ASCE (بی‌نام ۲۰۰۵)، پنمن مانیتیت FAO₅₆ (آلن و همکاران ۱۹۹۸)، هارگریوز سامانی (۱۹۸۵) و تورک (۱۹۶۱) مقدار تبخیر- تعرق را در کل دوره رشد به‌ترتیب ۶/۳۷، ۶/۵۷، ۶/۲۴، ۸/۲۸ و ۷/۶۵ درصد کم‌تر از واقعیت برآورد می‌نمایند، بنابراین در صورت مدنظر قرار دادن شیوه کم‌آبیاری در منطقه، برای کاهش مصرف آب و کم کردن هزینه اجرای پروژه‌ها، روش‌های مذکور برای محاسبه نیاز آبی قابل توصیه می‌باشند. همچنین از آنجاکه عامل‌های موردنیاز برای انجام محاسبات در هر روش متفاوت است و با توجه به این نکته که دقت روش‌های مذکور تقریباً برابر است، بنابراین بر اساس اطلاعات موجود و داده‌های لازم برای انجام محاسبات، این روش‌ها می‌توانند جایگزینی برای یکدیگر باشند.

طراح‌های سیستم‌های آبیاری در سنندج برای محاسبه نیاز آبی گیاه از روش پنمن مانیتیت فائو استفاده می‌نمایند. نتایج این بررسی نشان داد که این روش تبخیر- تعرق را در سنندج ۶/۲۴ درصد کم‌تر از داده‌های

سازمان فائو روش پنمن مانیتیت فائو را به‌دلیل دقت آن به‌عنوان استاندارد برای محاسبه نیاز آبی گیاهان معرفی نموده است. همچنین روش بلانی کریدل به‌دلیل ساده بودن و نیاز به داده‌های کم‌تر و روش تشت تبخیر به‌دلیل در اختیار بودن اطلاعات آن همواره مورد توجه پژوهشگران بوده‌اند. بنابراین در بیشتر موارد نتایج این سه روش در مناطق مختلف با داده‌های لایسی-متری مقایسه شده‌اند. نتایج این پژوهش نشان داد که در سنندج با آب و هوای نیمه‌خشک، روش‌های تشت تبخیر فائو (FAO₂₄)، پنمن مانیتیت فائو (FAO₅₆) و بلانی کریدل فائو (FAO₂₄) تبخیر- تعرق را در طول دوره رشد به-ترتیب ۰/۲۸ درصد کم‌تر، ۶/۲۴ درصد کم‌تر و ۱۲/۶۲ درصد بیش‌تر از مقدار واقعی محاسبه می‌کنند. برای دوره سه ساله روش‌های تشت تبخیر فائو (FAO₂₄)، پنمن مانیتیت فائو (FAO₅₆) و بلانی کریدل فائو (FAO₂₄) به-ترتیب در رتبه‌های ۱، ۶ و ۱۴ جدول مقایسه روش‌ها قرار گرفتند. همخوانی بیش‌تر نتایج روش تشت تبخیر نسبت به پنمن مانیتیت فائو و بلانی کریدل با داده‌های لایسی‌متری در سایر مناطق ایران و جهان نیز گزارش شده است (توشیح ۱۳۷۸، میلانی‌عنابی ۱۳۸۵، ارپن‌بک ۱۹۸۱). نتایج این بررسی و گزارش بسیاری از پژوهشگران در نقاط مختلف دنیا نشان داده است که همواره روش پنمن مانیتیت فائو دقیق‌ترین روش در یک منطقه خاص نیست و سایر روش‌ها را نباید نادیده گرفت

لایسی متری محاسبه می‌نماید. بنابراین با توجه به این مقدار خطا و ضرورت استفاده از روش کم‌آبیاری در منطقه برای کاهش مصرف آب، انتخاب این روش منطقی به نظر می‌رسد.

جدول ۵- تبخیر- تعرق حاصل از لایسی متر و روش‌های بررسی شده و معیارهای آماری محاسبه شده برای مقایسه روش‌ها.

اولویت کاربرد	درصد خطا نسبت به لایسی متر			میانگین تبخیر- تعرق روزانه (mm)			تبخیر- تعرق مرجع در کل دوره رشد (mm)			شماره روش*			
	سال	سال	سال	سال	سال	سال	سال	سال	سال				
۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۶/۱۸	۶/۲۸	۶/۴۶	۶/۲۵	۱۲۰۵/۰۶	۱۲۲۳/۷۴	۱۲۵۹/۱۲	۱۰۲۴/۴۵	۱	
۷	۶/۳۷	۴/۷۸	۰/۱۵	۲۰/۴۴	۵/۷۹	۵/۹۸	۶/۴۵	۴/۹۷	۱۱۲۸/۲۷	۱۱۶۵/۲۰	۱۲۵۷/۲۲	۸۱۵/۰۷	۲
۸	۶/۳۷	۴/۷۸	۰/۱۵	۲۰/۴۳	۵/۷۹	۵/۹۸	۶/۴۵	۴/۹۷	۱۱۲۸/۳۲	۱۱۶۵/۲۵	۱۲۵۷/۲۸	۸۱۵/۱۱	۳
۹	۶/۵۷	۴/۹۸	۰/۳۹	۲۰/۶۳	۵/۷۷	۵/۹۶	۶/۳۳	۴/۹۶	۱۱۲۵/۸۶	۱۱۶۲/۸۲	۱۲۵۴/۲۶	۸۱۳/۱۲	۴
۶	۶/۲۴	۴/۷۲	۰/۱۵	۲۰/۰۹	۵/۷۹	۵/۹۸	۶/۴۵	۴/۹۹	۱۱۲۹/۹۳	۱۱۶۶/۰۳	۱۲۵۷/۱۸	۸۱۸/۶۵	۵
۳	۱/۸۰	۰/۷۸	-۳/۴۷	۱۴/۰۷	۶/۰۷	۶/۲۳	۶/۶۸	۵/۳۷	۱۱۸۳/۳۶	۱۲۱۴/۲۵	۱۳۰۲/۸۵	۸۸۰/۳۲	۶
۲	۱/۴۹	-۰/۳۱	-۵/۹۰	۱۶/۶۵	۶/۰۹	۶/۳۰	۶/۸۴	۵/۲۱	۱۱۸۷/۱۱	۱۲۲۷/۵۵	۱۳۳۳/۴۳	۸۵۳/۸۳	۷
۴	۳/۱۱	۳/۰۱	۰/۲۸	۱۲/۶۸	۵/۹۹	۶/۰۹	۶/۴۴	۵/۴۶	۱۱۶۷/۵۳	۱۱۸۶/۸۹	۱۲۵۵/۶۴	۸۹۴/۵۸	۸
۱۲	-۸/۵۶	-۹/۱۲	-۱۱/۵۰	۲/۸۳	۶/۷۱	۶/۸۵	۷/۲۰	۶/۰۷	۱۳۰۸/۱۹	۱۳۳۵/۳۱	۱۴۰۳/۹۰	۹۹۵/۴۶	۹
۱۳	-۸/۹۶	-۱۰/۱۱	-۱۴/۲۶	۴/۴۱	۶/۷۳	۶/۹۱	۷/۳۸	۵/۹۷	۱۳۱۳/۰۹	۱۳۴۷/۴۱	۱۴۳۸/۶۷	۹۷۹/۲۸	۱۰
۱۵	-۱۴/۰۷	-۱۲/۹۱	-۱۲/۱۰	-۱۱/۰۶	۷/۰۵	۷/۰۹	۷/۲۴	۶/۹۴	۱۳۷۴/۶۷	۱۳۸۱/۷۵	۱۴۱۱/۴۲	۱۱۳۷/۷۴	۱۱
۱۴	-۱۲/۶۲	-۱۲/۹۳	-۱۴/۲۳	-۶/۲۵	۶/۹۶	۷/۰۹	۷/۳۸	۶/۶۴	۱۳۵۷/۱۲	۱۳۸۱/۹۷	۱۴۳۸/۳۰	۱۰۸۸/۴۷	۱۲
۱	۰/۲۸	-۰/۶۴	۶/۲۶	-۱/۷۶	۶/۱۶	۶/۳۲	۶/۰۵	۶/۳۶	۱۲۰۱/۷۲	۱۲۳۱/۵۵	۱۱۸۰/۳۰	۱۰۴۲/۴۹	۱۳
۱۱	۸/۳۸	۹/۴۰	۱۲/۱۵	۸/۷۶	۵/۶۶	۵/۶۹	۵/۶۷	۵/۷۰	۱۱۰۴/۰۹	۱۱۰۸/۶۸	۱۱۰۶/۱۰	۹۳۴/۷۱	۱۴
۱۶	۳۲/۸۰	۳۴/۴۹	۳۶/۸۱	۳۳/۵۸	۴/۱۵	۴/۱۱	۴/۰۸	۴/۱۵	۸۰۹/۸۶	۸۰۱/۷۰	۷۹۵/۶۰	۶۸۰/۴۰	۱۵
۱۷	۳۵/۰۳	۳۶/۶۲	۳۸/۲۵	۳۴/۵۹	۴/۰۲	۳/۹۸	۳/۹۹	۴/۰۹	۷۸۲/۹۴	۷۷۵/۵۷	۷۷۷/۴۷	۶۷۰/۱۴	۱۶
۱۰	۷/۶۵	۸/۷۲	۱۰/۳۱	۷/۷۲	۵/۷۱	۵/۷۳	۵/۷۹	۵/۷۶	۱۱۱۲/۸۶	۱۱۱۷/۰۶	۱۱۲۹/۳۴	۹۴۵/۳۷	۱۷
۵	-۳/۳۷	-۲/۸۴	-۰/۶۸	-۰/۰۴	۶/۳۹	۶/۴۵	۶/۵۰	۶/۲۵	۱۲۴۵/۶۷	۱۲۵۸/۴۶	۱۲۶۷/۷۱	۱۰۲۴/۸۷	۱۸

علامت منفی نشان‌دهنده برآورد بیش‌تر از مقدار واقعی تبخیر- تعرق است.

*: شماره و اسم روش‌ها در جدول ۵

1- Drainage Lysimeter	10- FAO-PPP-17 Penman (Frere and Popov, 1979)
2- "Full" ASCE Penman-Monteith with resistances (Allen <i>et al.</i> , 1989)	11- FAO-24 Radiation Method (Doorenbos and Pruitt, 1975, 1977)
3- "Full" ASCE Penman-Monteith with user supplied surf. Resistance	12- FAO-24 Blaney-Criddle (Doorenbos and Pruitt, 1975, 1977)
4- Standardized form of the ASCE Penman-Monteith (Anonymous 2005)	13- FAO-24 Pan Evaporation Method (Doorenbos and Pruitt, 1977)
5- FAO 56 Penman-Monteith with resistance for 0.12 m grass (Allen <i>et al.</i> , 1998)	14- Hargreaves Temperature Method (Hargreaves and Samani, 1985)
6- 1982 Kimberly Penman (Wright, 1982)	15- Radiation and Temperature Method (Priestley and Taylor, 1972)
7- 1972 Kimberly Penman (fixed wind func.) (Wright and Jensen 1972)	16- Radiation and Temperature Method (Makkink, 1957)
8- 1948 or 1963 Penman (Penman, 1948, 1963)	17- Radiation and Temperature Method (Turc, 1961)
9- FAO-24 Corrected Penman (Doorenbos and Pruitt, 1975, 1977)	18- Artificial Neural Network

اول، دوم، سوم و دوره سه ساله با مقدار خطای ۰/۰۴، ۰/۶۸، ۰/۸۴ و ۳/۳۷- درصد به ترتیب در رتبه اول، چهارم، چهارم و پنجم کاربرد قرار گرفته است. در کل بر اساس میانگین سه ساله، این روش برتری خود را نسبت به ۱۲ روش از ۱۶ روش بررسی شده نشان داده است. نتایج سایر پژوهشگران نیز حاکی از برتری شبکه

در ارائه نتایج سعی شد که کارایی شبکه عصبی مصنوعی در برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع (چمن) بررسی و نتایج آن با داده‌های لایسی متر زه‌کش‌دار و سایر روش‌ها مقایسه شود. به‌طور کلی می‌توان گفت که در این مسئله نیز، مانند بسیاری از مسائل مهندسی، شبکه عصبی مصنوعی موفق است. این روش در سال

با توجه به ادامه پژوهش‌ها در این زمینه و به تبع آن ارائه و اصلاح روش‌ها، شایسته است در بررسی‌های جدیدتر تعداد بیشتری از این روش‌ها ارزیابی شوند، تا بدین‌وسیله روش مناسب، با دقت و صحت بیشتری انتخاب شود. در نهایت می‌توان گفت چون بیشترین میزان مصرف آب در بخش کشاورزی است، برآورد دقیق‌تر نیاز این بخش اثر قابل‌توجهی در کاهش مصرف و افزایش بهره‌وری این منبع اصلی زندگی خواهد داشت.

عصبی مصنوعی بر روش‌هایی نظیر پنمن مانیتیت و بلانی کریدل بوده است (شایان‌نژاد و همکاران ۱۳۸۶، بیات‌ورکشی و همکاران ۱۳۸۸، هژبر و همکاران ۱۳۹۳، بهاکار و همکاران ۲۰۰۶، کیسی ۲۰۰۶، کومار و همکاران ۲۰۰۲).

پژوهشگران در ارزیابی روش‌های تجربی محاسبه تبخیر- تعرق، به دلیل بررسی فقط تعداد کمی از روش‌ها، ممکن است روش‌های مناسب برآورد تبخیر- تعرق را برای یک منطقه خاص نادیده گرفته باشند. بنابراین

منابع مورد استفاده

- ابراهیمی‌پاک ن، ۱۳۸۹. تعیین تبخیر- تعرق گیاه مرجع (چمن) و مقایسه با روش‌های تجربی در قزوین. گزارش نهایی طرح تحقیقاتی، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، کرج.
- ابراهیمی‌پاک ن، ۱۳۹۰. تعیین تبخیر- تعرق پتانسیل گیاه مرجع (چمن) به روش لایسی‌متر و مقایسه با روش‌های تجربی در شهرکرد. گزارش نهایی طرح تحقیقاتی، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، کرج.
- اسمعیلی‌ورکی م، امید م و امید ح، ۱۳۸۴. برآورد مشخصات هیدرولیکی واگرا با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی. علوم کشاورزی ایران، جلد ۱۳، شماره ۳، صفحه‌های ۲۱ تا ۳۲.
- بیات‌ورکشی م، زارع‌ابیانه ح، معروفی ص، سبزی‌پرور ع و سلطانی ف، ۱۳۸۸. شبیه‌سازی تبخیر- تعرق روزانه گیاه مرجع به روش هوش مصنوعی و روش‌های تجربی در مقایسه با اندازه‌گیری‌های لایسی‌متری در اقلیم نیمه‌خشک سرد همدان. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد ۱۶، شماره ۴، صفحه‌های ۷۹ تا ۱۰۰.
- پرورش‌ریزی ع، کوچک‌زاده ص و امید ح، ۱۳۸۵. برآورد مشخصات پرش هیدرولیکی متحرک با کاربرد شبکه عصبی مصنوعی و روش تلفیقی شبکه عصبی- الگوریتم ژنتیک. علوم کشاورزی ایران، جلد ۳۷، شماره ۱، صفحه‌های ۱۸۷ تا ۱۹۶.
- توشیح و، ۱۳۷۸. تعیین آب مصرفی پتانسیل گیاه مرجع (چمن) و مقایسه آن با فرمول‌های تجربی. مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی ایران، شماره ۷۸/۵۳ مورخ ۷۸/۲/۱۸. ناشر مؤسسه تحقیقات خاک و آب، کرج.
- رزاقی ف و سپاسخواه ع، ۱۳۸۶. ارزیابی روش‌های مختلف تخمین تبخیر- تعرق بالقوه سطوح گیاهی مرجع به کمک داده‌های اندازه‌گیری شده لایسی‌متر وزنی. مجموعه مقالات نهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر. ۱۶ تا ۱۸ بهمن، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان.
- رحیمی م، ۱۳۷۸. تعیین تبخیر- تعرق گیاه مرجع (چمن) و مقایسه آن با معادله‌های تجربی و تعیین مناسب‌ترین معادله برای منطقه همدان. مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی ایران، شماره ۷۸/۶۷۰، ناشر مؤسسه تحقیقات خاک و آب، کرج.
- رستمی ا، ۱۳۷۴. تعیین تبخیر- تعرق گیاه مرجع با استفاده از لایسی‌متر و مقایسه آن با معادله‌های تجربی. مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی ایران، شماره ۶۵۳، ناشر مؤسسه تحقیقات خاک و آب، کرج.
- رضوی ر، ۱۳۸۰. تعیین تبخیر- تعرق پتانسیل گیاه مرجع (چمن) با استفاده از لایسی‌متر در ارومیه. مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی ایران، شماره ۸۰/۴۰۹، ناشر مؤسسه تحقیقات خاک و آب، کرج.
- سلطانی ک، ۱۳۷۸. تعیین میزان تبخیر- تعرق پتانسیل گیاه مرجع (چمن) با استفاده از لایسی‌متر. مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی ایران، شماره ۷۸/۴۱۰، ناشر مؤسسه تحقیقات خاک و آب، کرج.

- شایان‌نژاد م، ساداتی‌نژاد س ج و فهمی ه، ۱۳۸۶. تعیین تبخیر- تعرق بالقوه با استفاده از روش رگرسیون فازی. تحقیقات منابع آب، جلد ۳، شماره ۳، صفحه‌های ۹ تا ۱۹.
- شریفیان ح، قهرمان ب، علیزاده ا و میرلطیفی س م، ۱۳۸۵. مقایسه روش‌های مختلف تبخیر- تعرق مرجع (ترکیبی و دمایی) با روش استاندارد و بررسی اثرات خشکی هوا بر آن. علوم کشاورزی و منابع طبیعی، جلد ۱۳، شماره ۱، صفحه‌های ۱۹ تا ۳۰.
- علیزاده ا، ۱۳۸۱. اصول هیدرولوژی کاربردی. چاپ چهاردهم، انتشارات آستان قدس رضوی، مشهد.
- کارآموز م و عراقی‌نژاد، ۱۳۸۴. هیدرولوژی پیشرفته. چاپ اول، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.
- کوچک‌زاده م و بهمنی ع، ۱۳۸۴. ارزیابی عملکرد شبکه‌های عصبی مصنوعی در کاهش پارامترهای مورد نیاز، برای برآورد تبخیر- تعرق مرجع. علوم کشاورزی، جلد ۱۱، شماره ۴، صفحه‌های ۸۷ تا ۹۷.
- منهاج م ب، ۱۳۸۴. مبانی شبکه‌های عصبی (هوش محاسباتی). مرکز نشر پرفسور حسابی، جلد اول.
- میلانی‌عنابی ا، ۱۳۸۵. ارزیابی روش‌های مستقیم و غیرمستقیم برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع (چمن) در تبریز. مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی ایران، شماره ۸۵/۱۱۳۵، ناشر مؤسسه تحقیقات خاک و آب، کرج.
- نوروزی م، ۱۳۸۵. تعیین تبخیر- تعرق گیاه مرجع (چمن) و گوجه فرنگی با استفاده از مطالعات لایسی‌متری در استان بوشهر. مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی ایران، شماره ۸۵/۱۳۲۲، ناشر مؤسسه تحقیقات خاک و آب، کرج.
- هژبر ح، معاضده و شکری‌کوچک س، ۱۳۹۳. برآورد تبخیر- تعرق مرجع با استفاده از مدل‌های تجربی، مدل‌سازی آن با شبکه عصبی مصنوعی و مقایسه آن‌ها با داده‌های لایسی‌متری در ایستگاه کهریز ارومیه. مهندسی آبیاری و آب، سال ۴، شماره ۱۵، صفحه‌های ۱۳ تا ۲۵.
- Allen RG, Gensen ME, Wright JL and Burman RD, 1989. Operational estimates of reference evapotranspiration. *Agron J* 18: 154-171.
- Allen RG, Pereira LS, Raes D and Smith M, 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Irrigation and Drainage Paper No 56, FAO, Rome, Italy, 300p.
- Anonymous, 2005. The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation. Task Committee on Standardization of Calculation of Reference ET, Environment and Water Resources Institute of ASCE, 200p.
- Basheer IA and Hajmeer M, 2000. Artificial neural networks: fundamentals, computing, design, and application. *J Microbiologic Meth* 43: 3-31.
- Benli B, Kodal S, Ilbeyi A and Ustun H, 2006. Determination of evapotranspiration and basal crop coefficient of alfalfa with a weighting lysimeter. *Agric Water Manage* 81(3): 358-370.
- Bhakar SR, Ojha S, Singh RV and Ansari A, 2006. Estimation of evapotranspiration for wheat crop using artificial neural network. Pp. 305-314. Proceedings of the 4th World Congress on Computers in Agriculture. Orlando, Florida, USA.
- Coulibaly P, Anctil F and Bobee B, 2000. Daily reservoir inflow forecasting using artificial neural networks with stopped training approach. *J Hydrol* 230: 244-257.
- Dehghani Sanij H, Yamamoto T and Rasiah V, 2004. Assessment of evapotranspiration estimation models for use in semi-arid environments. *Agric Water Manage* 64: 91-106.
- Doorenbos J and Pruitt WO, 1975. Guidelines for Predicting Crop Water Requirements. Irrigation and Drainage Paper 24, (1st Ed), Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 179p.
- Doorenbos J and Pruitt WO, 1977. Guidelines for Predicting Crop Water Requirements. Irrigation and Drainage Paper 24, (2nd Ed), Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 144p.
- Erpenbeck JM, 1981. Methodology to estimate crop water requirements in Washington State. MSc Thesis, Washington State University. Pullman.
- Frere M and Popov GF, 1979. Agrometeorological Crop Monitoring and Forecasting. FAO Plant Production and Protection Paper 17, FAO, United Nations, Rome, 64p.
- Hargreaves GH and Samani ZA, 1982. Estimating potential evapotranspiration. *J Irr and Drain Eng ASCE* 108(3): 223-230.
- Hargreaves GH and Samani ZA, 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Appl Eng in Agric* 1(2):96-99.
- Jain SK, Singh VP and Van Genuchten MTh, 2004. Analysis of soil water retention data using artificial neural networks. *J Hydrol Eng ASCE* 9(5): 415-420.
- Kisi O, 2006. Evapotranspiration estimation using feed-forward neural network. *Nord Hydrol* 37(3): 247-260.

- Kumar MN, Raghuwanshi S, Singh R, Wallender WW and Pruitt WO, 2002. Estimating evapotranspiration using artificial neural networks. *J Irr and Drain Eng ASCE* 128(4): 224-233.
- López-Urrea R, Martín de Santa Olalla F, Fabeiro C and Moratalla A, 2006. Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semi-arid climate. *Agric Water Manage* 85:15-26.
- Makkink GF, 1957. Testing the Penman formula by means of lysimeters. *J Inst Water Engg* 11(3): 277-288.
- Penman HL, 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc Roy Soc London*, A193:120-145.
- Penman HL, 1963. *Vegetation and Hydrology*. Tech Comm No 53, Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, England, 125p.
- Priestley CHB and Taylor RJ, 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Mon Weather Rev* 100:81-92.
- Santos AO, Bergamaschi H and Cunha Gr, 1994. Evaluation of method for estimation of maximum evapotranspiration in Lucene. *CAB Abstracts* 1945.
- Turc L, 1961. Evaluation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration, climate simplified formula and commissioning. *J Ann Agron* 12(1):13-49 (in French).
- Wright JL and Jensen ME, 1972. Peak water requirements of crops in Southern Idaho. *J Irr and Drain Div ASCE* 96(1):193-201.
- Wright JL, 1982. New evapotranspiration crop coefficients. *J Irr and Drain Div ASCE* 108:57-74.
- Zanetti SS, Sousa EF, Olivera VPS, Almeida FT and Bernardo S, 2007. Estimating evapotranspiration using artificial neural network and minimum climatological data. *J Irr and Drain Eng ASCE* 133 (2): 83-89.