

## تعیین بهترین روش تجربی برآورد تبخیر از سطح آزاد در اراضی شالیزاری آمل بر پایه آنالیز حساسیت و مقایسه آن با نتایج شبکه عصبی مصنوعی

وحید یزدانی<sup>۱\*</sup>، بیژن قهرمان<sup>۲</sup> و کامران داوری<sup>۳</sup>

### چکیده

در این تحقیق برای تعیین تبخیر از سطح آزاد آب از روش‌های مه‌یر، مارسیانو، شاه‌تین، هنفر، ایوانف، تیچومیروف، سازمان عمران اراضی آمریکا و شبکه عصبی مصنوعی استفاده شده و با مقادیر تبخیر از تشت مقایسه شد. در این راستا حساسیت مدل‌های فوق به تغییرات در پارامترهای ورودی با ایجاد تغییرات  $\pm 10$ ،  $\pm 20$  و  $\pm 30$  درصد در مقادیر سرعت باد، دما و رطوبت نسبی ارزیابی شد. با استفاده از معیارهای آماری  $R^2$ ، MBE، RMSE و مقایسه نسبت به خط ۱:۱ مشخص شد که محاسبه تبخیر از سطح آزاد توسط روش ایوانف دارای بیشترین همبستگی با مقدار تبخیر از تشت در منطقه آمل است. بعد از روش ایوانف روش‌های مه‌یر و تیچومیروف نیز به ترتیب دقت زیادی را برای تعیین تبخیر از سطح آزاد دارا هستند. باید گفت در مواردی که در برداشت پارامترهای ورودی احتمال بروز خطاهای انسانی و سیستماتیک وجود دارد روش‌های ایوانف، مارسیانو و سازمان عمران اراضی آمریکا به دلیل حساسیت کمتر به تغییرات در پارامترهای ورودی نسبت به سایر روش‌ها مناسب‌ترند. نتایج این تحقیق بیانگر کارایی بالای مدل پرسپترون چند لایه در برآورد تبخیر از سطح آزاد است. شایان ذکر است که مقادیر ضریب همبستگی، جذر میانگین مربع خطا و میانگین خطای مطلق در بهترین مدل به ترتیب برابر  $0/95$ ،  $0/72$  و  $0/22$  است. لذا با محاسبه نسبتاً دقیق تبخیر از سطح آزاد می‌توان راهکارهای اساسی و مدیریتی مؤثر در جهت کاهش اثرات بحران ناشی از خشکسالی و حفاظت از منابع آب اعمال کرد.

**واژه‌های کلیدی:** تشت تبخیر، تبخیر از سطح آزاد، پارامترهای هواشناسی، آمل و آنالیز حساسیت.

**ارجاع:** یزدانی و. قهرمان ب. و داوری ک. ۱۳۸۹. تعیین بهترین روش تجربی برآورد تبخیر از سطح آزاد در اراضی شالیزاری آمل بر پایه آنالیز حساسیت و مقایسه آن با نتایج شبکه عصبی مصنوعی. مجله پژوهش آب ایران. ۴(۷): ۴۷-۵۸.

۱- دانشجوی دکتری مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

۲- استاد گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

۳- دانشیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

\* نویسنده مسئول: [v.yazdanv@yahoo.com](mailto:v.yazdanv@yahoo.com)

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۱۱/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۱۰/۱۴

## مقدمه

تبخیر یکی از فرایندهای مهم و تأثیرگذار در چرخه آب است. تبخیر سبب از بین رفتن بیش از نیمی از نزولات جوی در مناطق خشک می‌شود. فرایند تبخیر در دو شکل تبخیر از سطوح آزاد آب نظیر دریاچه‌ها و تبخیر از سطح خاک لخت اتفاق می‌افتد. تبخیر از مخازن آب با توجه به اقلیم خشک و نیمه‌خشک ایران و محدودیت منابع آب، تلفات آب را در پی خواهد داشت. تبخیر فرآیند فیزیکی بوده و رابطه مستقیم و تنگاتنگی با عوامل جوی دارد. یکی از راه‌های مهم سازگاری با خشکی در ایران، خصوصاً در بخش کشاورزی، استفاده بهینه و پایدار از منابع آب است. به این دلیل باید سعی کرد تا حد ممکن از ریزش‌های جوی، جریان آب‌های سطحی و منابع زیرزمینی آب به نحو مطلوب استفاده کرد و این کار بدون شناخت دقیق نیازهای آبیاری در بخش کشاورزی عملی نخواهد بود. یکی از مسائل مهم در بحث تبخیر، ثبت مقدار تبخیر است، به طوری که مقادیر اندازه‌گیری شده بیانگر کل تبخیر باشد. ثبت تبخیر به علت سهولت تفسیر داده‌های آن در سراسر دنیا به عنوان شاخصی برای تعیین تبخیر از دریاچه‌ها و مخازن استفاده می‌شود (ایرمیک و همکاران، ۲۰۰۲؛ فروت و همکاران، ۱۹۸۳). از طرفی مطالعه والاس و همکاران (۲۰۰۵) روی تبخیر از تشت و میزان تبخیر و تعرق گیاه مرجع نشان می‌دهد رابطه خطی و مستقیمی بین تبخیر از تشت و تبخیر و تعرق گیاه مرجع وجود دارد. بنابراین با ثبت درست مقدار تبخیر از تشت می‌توان تبخیر و تعرق گیاه مرجع را تخمین زد. به دلیل بالا بودن هزینه‌های تعمیر و نگهداری تشت‌ها و عدم امکان نصب آن‌ها در همه مناطق و مهمتر از همه برآوردهای کمتر از واقعیت تشت، این امر امکان‌پذیر نیست (رزنبرگ و پاورز، ۱۹۷۰؛ سودر، ۲۰۰۰). امروزه استفاده از روش‌های ریاضی و روابط تجربی در علوم و فنون مهندسی رواج بیشتری یافته است. بیشتر محققین با اصلاح روابط تجربی موجود و کشف روابط جدید، سعی در یافتن رابطه ساده و در عین حال با دقت زیاد، جهت جایگزینی روش‌های میدانی هستند. در این مورد تعیین تبخیر و در درجه بعدی، تبخیر و تعرق با استفاده از روابط تجربی به دلیل پیچیده بودن این دو فرایند ضروری به نظر می‌رسد. تا کنون بیش از ۵۰ رابطه تجربی برای تعیین تبخیر و تعرق توسط محققین مختلف

ارائه شده است. اما به تبخیر علی‌رغم اهمیت زیاد آن در مهندسی هیدرولوژی، کمتر توجه شده است. این درحالی است که با تخمین درستی از آن می‌توان در برنامه‌ریزی منابع آب با احتمال خطای کمتری اعمال نظر کرد و در گام بعدی به‌عنوان یکی از روش‌های تعیین تبخیر و تعرق نیاز آبی گیاهان تعیین شود. بیشتر روش‌های تجربی ارائه شده جهت تخمین تبخیر بر پایه رابطه دالتون و مبتنی بر اصل بقای جرم است. مهمترین پارامترهای هواشناسی درگیر در تبخیر شامل سرعت باد، رطوبت نسبی و دما می‌باشند. روابط تجربی ارائه شده با مدنظر قرار دادن هر یک از این پارامترها سعی در کاهش خطای برآورد تبخیر دارند. هر یک از این روابط بنا به شرایط آب و هوایی هر منطقه مورد تأیید قرار گرفته است، به‌عنوان مثال، رابطه ایوانف برای مناطقی با اقلیم خشک و نیمه خشک پیشنهاد شده است (ولایتی، ۱۳۷۴). رابطه استفان و استوارت در میان ۲۳ روش مختلف برآورد تبخیر تقارب بیشتری با نتایج تشت تبخیر در منطقه آمریکا داشت (آل شالن و صالح، ۱۹۸۷).

جهانبخش اصل و همکاران (۱۳۸۰) روش‌های ترکیبی، دمایی، تابشی و همبستگی چندگانه و رطوبتی را برای ایستگاه تبریز با آمار ۲۰ ساله محاسبه و سپس با روش تشت تبخیر مقایسه کردند. نتیجه تحقیق آن‌ها نشان داد که روش کریستینسن - هارگریوز در قیاس با سایر روش‌ها انطباق بیشتری با روش تشت تبخیر دارد. محققان توانسته‌اند با به‌کارگیری روش‌های ریاضی، تجربی و یا ترکیبی از هر دو روش، پارامتر تبخیر را تحلیل کنند (کهن و همکاران، ۲۰۰۲؛ برانسرت و پارلانژ، ۱۹۹۸؛ کولومب، ۲۰۰۱؛ گاوین، ۲۰۰۴؛ استفان و استوارت، ۱۹۶۳؛ لینیاکر، ۱۹۶۷ و بورمن، ۱۹۷۶). ارتباط بین تبخیر و پارامترهای هواشناسی توسط محققین زیادی مورد بررسی قرار گرفته است (کهن و همکاران، ۲۰۰۲؛ برانسرت و پارلانژ، ۱۹۹۸). نتایج محققین حاکی از ارتباط بین تبخیر و پارامترهای هواشناسی در هر منطقه با اقلیمی خاص است. روابط تجربی ارائه شده برای تخمین تبخیر از سطوح آزاد با در نظر گرفتن پارامترهای هواشناسی به‌عنوان ورودی، دارای تنوع زیاد است. دقت روابط تجربی در مناطق مختلف متفاوت است و در هر منطقه نیاز به واسنجی دارد (وان زیل و همکاران، ۱۹۸۹). از آنجایی که شرایط آب و هوایی در هر منطقه متفاوت است،

نیازی به توضیح صریح طبیعت فرایندها به صورت ریاضی ندارند (جین و ایندورثی، ۲۰۰۴).

با توجه به آنچه گفته شد هر کدام از روش‌های موجود برای محاسبه تبخیر از سطح آزاد مناسب یک منطقه خاص است و نمی‌توان آن را برای همه مناطق تعمیم داد. ضمن اینکه در همان منطقه خاص نیز از دقت کافی برخوردار نیستند. لذا باید به دنبال روشی مناسب با انعطاف‌پذیری بالاتری نسبت به این روش‌ها بود. با توجه به تحقیقات مشخص شد که عملکرد شبکه‌های عصبی مصنوعی در برآورد تبخیر از سطح آزاد مورد سنجش قرار نگرفته است.

هدف این تحقیق ارزیابی و محاسبه مقدار تبخیر از سطح آزاد از روش‌های مه‌یر، شاه‌تین، هنفر، ایوانف، ماریانو، تیچومپروف، سازمان عمران اراضی آمریکا و شبکه عصبی است.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

این تحقیق در ایستگاه هواشناسی مرکز ترویج و توسعه تکنولوژی هراز واقع در ۱۰ کیلومتری جاده آمل- محمودآباد در استان مازندران اجرا شد. طول و عرض جغرافیایی منطقه به ترتیب ۳۶/۵۸ درجه شمالی و ۵۲/۱۷ درجه شرقی بوده و ارتفاع آن از سطح دریا ۵/۵ متر است. طبق آمار هواشناسی موجود، میانگین بارندگی سالانه در این منطقه ۸۸۲/۶ میلی‌متر، میانگین دمای سالانه ۱۶ درجه سانتیگراد و دارای اقلیم مرطوب است. برای انجام این تحقیق از آمار و اطلاعات هواشناسی سه ساعته (۸ قرائت در روز) ایستگاه هواشناسی مذکور طی سال‌های ۱۹۹۴ تا ۲۰۰۷ استفاده شد. مقادیر روزانه داده‌ها با میانگین‌گیری از ۸ قرائت انجام گرفته در طول شبانه‌روز محاسبه شد. این آمار و اطلاعات شامل دمای حداقل و حداکثر، رطوبت نسبی (حداکثر و حداقل)، ساعات آفتابی و سرعت باد است (جدول ۱). مقادیر تبخیر از تشت به صورت روزانه برداشت و برای سنجش دقت سایر روش‌ها استفاده شد. به منظور سازمان‌دهی، پردازش و اعمال کلیه روش‌های ریاضی، از امکانات و توابع موجود در نرم‌افزار اکسل استفاده شده است.

لذا تعیین مناسبترین روش تجربی برای تخمین تبخیر که کمترین اختلاف را با نتایج تشت داشته باشد، امری اجتناب‌ناپذیر است. برآورد صحیح تبخیر در برنامه‌ریزی‌های منابع آب ضروری است و تعیین مناسبترین روش تجربی با دقت مطلوب می‌تواند مسائل و مشکلات مرتبط با تشت تبخیر را تا حدودی حل کند و با صرف زمان و هزینه کمتر نتیجه دلخواه به دست آید. لذا با توجه به اینکه روش‌های معرفی شده اغلب تجربی است و برای هر منطقه باید واسنجی شوند، لازم است روشی معرفی شود که توانایی محاسبه تبخیر از سطح آزاد در شرایط آب و هوایی مختلف را با دقت کافی داشته باشد.

در این راستا رگرسیون‌های ساده و چند متغیره و مدل‌های خودهمبستگی (مثل ARMA) روش‌های آماری رایج برای پیش‌بینی سری‌های زمانی می‌باشند. با وجود این، این روش‌ها جزء مدل‌های خطی هستند و در آنها فرض بر این است که داده‌ها ایستا می‌باشند. در نتیجه این مدل‌ها توانایی اندکی در صورت غیرخطی و غیر ساکن بودن داده‌ها از خود نشان می‌دهند. در مطالعات زیادی پارامترهای هواشناسی، هیدرولوژیک و کشاورزی مختلف نظیر جریان‌ات سالانه، تبخیر و بارش به‌طور وسیعی با استفاده از مدل‌های ARMA شبیه‌سازی شده و کارایی آنها از سوی محققین پذیرفته شده است. اما ضروری است مدل‌های جایگزین و با کارایی بیشتر به‌منظور پیش‌بینی پدیده‌های غیرخطی و پیچیده معرفی شوند. استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی از سال ۱۹۹۰ در علوم مختلف از جمله کشاورزی توسعه یافت (لک و همکاران، ۱۹۹۹). طی دهه اخیر مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی به ابزارهای پیش‌بینی افزوده شده که نتایج قابل قبولی در زمینه‌های کاربردی از خود نشان داده است. هدف از این مدل که شبیه‌سازی از دستگاه طبیعی انسان و در واقع وارپته‌ای از هوش مصنوعی است، این است که با معرفی تاریخچه عملکرد یک سیستم دینامیک، مدل آموزش یافته و نحوه عملکرد سیستم در حافظه ذخیره شود و در مواردی که مدل قبلاً با آن مواجه نشده است، مورد استفاده قرار گیرد. اصلی‌ترین مزیت شبکه عصبی مصنوعی نسبت به روش‌های کلاسیک این است که شبکه‌های عصبی مصنوعی

جدول ۱ - میانگین پارامترهای هواشناسی ایستگاه سینوپتیک آمل - محمودآباد طی سال‌های ۱۹۹۴-۲۰۰۷

میانگین دما (oC)	حداقل دما (oC)	حداکثر دما (oC)	رطوبت نسبی حداکثر	رطوبت نسبی متوسط	سرعت باد (متر بر ثانیه)	ساعات آفتابی (ساعت)	نسبت ابرناکی
۱۶	-۵	۳۸	۹۸/۹	۷۳	۳	۱۲	۰/۹۳

$$E = 0.0018.(T + 25)^2(100 - RH) \quad (۸)$$

$$E = (e_s - e_a).(15 + 3U_{10}) \quad (۹)$$

$$E = 0.833.(4.57T + 43.3) \quad (۱۰)$$

در این معادلات (۸) معادله ایوانف، ۹ معادله تیچومپروف و ۱۰ معادله سازمان عمران اراضی آمریکا، E مقدار تبخیر از سطح آزاد آب برحسب میلی‌متر در ماه است که برای یکسانی کار به مقادیر روزانه تبدیل شدند، T میانگین دمای هوا (درجه سانتی‌گراد)، RH میانگین رطوبت نسبی (درصد) و  $U_{10}$  سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری (متر در ثانیه) است. همان‌طور که در معادلات فوق نیز مشخص است تمام روش‌ها به‌جز روش سازمان عمران اراضی آمریکا از ۲ یا ۳ پارامتر برای محاسبه تبخیر از سطح آزاد استفاده کردند، این درحالی است که روش سازمان عمران اراضی آمریکا تنها از دمای متوسط استفاده کرده است. وجود پارامترهای مختلف در هر روش می‌تواند معیاری برای ارزیابی اهمیت پارامترهای هواشناسی برای محاسبه تبخیر از سطح آزاد باشد.

برای تخمین تابش خورشیدی از مدل آنگستروم استفاده شده است (معادله ۱۱).

$$R_s = (a + b \frac{n}{N}) R_a \quad (۱۱)$$

که در آن:  $R_s$  تابش ورودی خورشید با طول موج کوتاه (مگاژول بر متر مربع در روز)،  $R_a$  تابش برون زمینی (مگاژول بر متر مربع در روز)،  $n/N$  نسبت ساعات آفتابی و بدون بعد،  $a, b$  ضرایب تجربی هستند که به‌ترتیب از مقادیر ۰/۲۵ و ۰/۵ در این معادله استفاده شده است (فرورت و همکاران، ۱۹۸۳).

#### شبکه‌های عصبی دینامیک

برای تحلیل داده‌ها و پیش‌بینی میزان تبخیر از مدل شبکه عصبی مصنوعی پیش‌خور پرسپترون چند لایه (MPL) با الگوریتم انتشار خطا به عقب به‌عنوان شبکه‌ای متداول در

در مطالعه حاضر از ۹ روش تجربی تخمین تبخیر به‌منظور ارزیابی نتایج تحت تبخیر استفاده شده است. تحت تبخیر مورد استفاده در ایستگاه مورد مطالعه از نوع استاندارد کلاس A، با قطر ۱۲۱ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۵/۴ سانتی‌متر می‌باشد. معادلات تجربی مورد استفاده در این تحقیق به‌صورت زیر است: (۱) معادله مهیر، ۲ معادله ماریانو، ۳ معادله شاهتین و ۴ معادله هنفر).

$$E = (1 + \frac{U_2}{16}).C.(e_s - e_a) \quad (۱)$$

$$E = 0.03.U_2.(e_s - e_a) \quad (۲)$$

$$E = (0.116 + 0.017U_2).(e_s - e_a) \quad (۳)$$

$$E = 0.028.U_2.(e_s - e_a) \quad (۴)$$

که در آن: E مقدار تبخیر از سطح آزاد آب (میلی‌متر در روز)،  $U_2$  سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (کیلومتر در ساعت)،  $e_s$  و  $e_a$  فشار بخار اشباع و فشار واقعی بخار آب در هوا (میلی‌متر جیوه) و C ضریبی است که برای دریاچه‌های عمیق ۰/۳۶ و برای دریاچه‌های کم عمق ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود. شایان ذکر است که در این مقاله میزان تبخیر از سطح آزاد برای یک دریاچه کم عمق محاسبه شده است. به‌دلیل اینکه مقادیر فشار بخار اشباع و فشار واقعی هوا در این ایستگاه محاسبه نشده است، لذا مقادیر  $e_s, e_a$  نیز توسط روابط زیر محاسبه شدند.

$$e_s(T_x) = .6018 \exp \left[ \frac{17.27 \times T_x}{T_x + 237.3} \right] \quad (۵)$$

$$e_s(T_n) = .6018 \exp \left[ \frac{17.27 \times T_n}{T_n + 237.3} \right] \quad (۶)$$

$$e_a = .6018 \exp \left[ \frac{\frac{RH_x + RH_n}{2}}{\frac{50}{e_x(T_x)} + \frac{50}{e_s(T_x)}} \right] \quad (۷)$$

در معادلات فوق  $e_s(T_n)$  و  $e_s(T_x)$  به‌ترتیب مقدار فشار بخار اشباع در دمای ماکزیمم و مینیمم است.  $e_a$  نیز معرف فشار بخار واقعی هوا است (علیزاده، ۱۳۸۳).

برای ارزیابی و بررسی بهتر روش‌های مختلف محاسبه تبخیر از سطوح آزاد از روشی به نام روش اعتبارسنجی متقاطع استفاده شد. در این روش با محاسبه ضریب همبستگی بین داده‌ها، جذر میانگین مربع خطا (RMSE) و انحراف نتایج (MBE) براساس معادلات زیر مقایسه اجرا شد (معادله ۱۲، ۱۳ و ۱۴). در فراسنج‌های آماری زیر ( $E_s$ ) مقادیر به دست آمده تبخیر از سطوح آزاد از هر روش و  $E_o$  مقادیر اندازه‌گیری شده تبخیر از تشت است (رضایی، ۱۳۷۹).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (E_{si} - E_{oi})^2}{n-1}} \quad (12)$$

$$MBE = \left( \sum_{i=1}^n (E_{oi} - E_{si}) \right) / n \quad (13)$$

$$R^2 = \frac{\left( \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \right)^2}{\left( \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right) \left( \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right)} \quad (14)$$

پارامتر ارزیابی MBE نشان می‌دهد که اولاً آیا مدل مقدار متغیر موردنظر را کم یا زیاد برآورد می‌کند و ثانیاً مقدار کمی آن چقدر است. زمانی که MBE برابر صفر است، مشخص می‌شود که مدل فضای مطالعه شده را خوب برآورد کرده و هیچ‌گونه انحرافی وجود ندارد. ضریب همبستگی هم نشان‌دهنده میزان ارتباط مقادیر برآورد شده با مقادیر محاسبه شده است که هر چه مقدار آن بیشتر باشد، این ارتباط نزدیکتر است و اختلاف مقدار برآورد شده با مقدار محاسبه شده کمتر خواهد بود. ضمن اینکه برای ارزیابی بهتر، نتایج مدل‌ها نسبت به خط ۱:۱ نیز مورد سنجش قرار گرفت.

#### آنالیز حساسیت

در اکثر روش‌های محاسبه تبخیر از سطح آزاد سه پارامتر سرعت باد، رطوبت نسبی و دما دخالت دارند. از طرفی برداشت و ثبت پارامترهای فوق در معرض خطاهای انسانی و سیستماتیک قرار دارد، لذا بررسی تأثیر تغییرات این عوامل در محاسبه تبخیر از سطح آزاد ضروری به نظر می‌رسد. بر این اساس سعی شد با ایجاد تغییرات  $\pm 10$ ،  $\pm 20$  و  $\pm 30$  درصد در مقادیر سرعت باد، دما و رطوبت نسبی، حساسیت روابط فوق در اثر تغییرات پارامترهای ورودی در برآورد تبخیر از سطح آزاد ارزیابی شود.

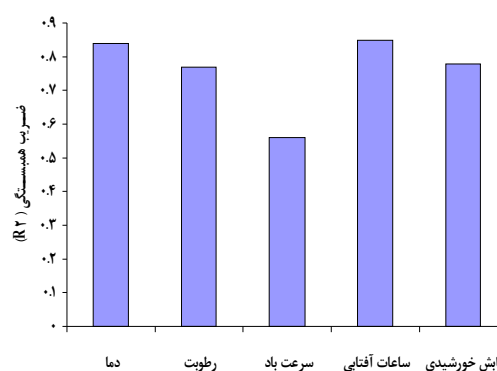
پیش‌بینی و حل مسائل غیرخطی استفاده شده است (باشر و حاج‌میر، ۲۰۰۰؛ کولیپالی و همکاران، ۲۰۰۰). در ساختار فوق خطای خروجی شبکه در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده برآورد و در مسیر رو به عقب و خلاف جهت مسیر اتصالات سیناپسی به لایه‌های قبلی منتشر می‌شود. شبکه عصبی انتخابی متشکل از سه لایه به نام‌های لایه ورودی، میانی و خروجی بود که معماری آن بر مبنای ارتباطات بین نرون‌ها در لایه‌های مختلف است. تعداد نرون‌های لایه اول برابر تعداد متغیرهای مستقل ورودی و تعداد نرون‌های لایه سوم (خروجی) معادل تعداد متغیرهای بردار پیش‌بینی است که در این تحقیق برای لایه ورودی دمای حداقل و حداکثر، رطوبت نسبی (حداکثر و حداقل)، ساعات آفتابی و سرعت باد و برای لایه خروجی میزان تبخیر می‌باشد. تعداد نرون‌های لایه میانی انعطاف شبکه در میزان دقت پیش‌بینی را کنترل می‌کند و در تخمین تعداد آنها معمولاً از روش آزمون و خطا استفاده می‌شود. اجرای مدل‌هایی با تعداد نرون‌های مختلف در لایه میانی براساس الگوریتم انتشار خطا به عقب و تابع محرک تانژانت هایپربولیک بین لایه ورودی و لایه (های) میانی و توابع انتقال مختلف بین لایه (های) میانی و لایه خروجی بود. کلیه عملیات اجرایی شبکه عصبی مصنوعی در محیط نرم‌افزار NeuroSolution تحت ویندوز انجام شد.

در این تحقیق، برای محاسبه مقدار تبخیر، مقادیر دمای حداقل و حداکثر، رطوبت نسبی (حداکثر و حداقل) ساعات آفتابی و سرعت باد به عنوان ورودی شبکه در نظر گرفته شد. برای این منظور از سری زمانی روزانه مقادیر فوق‌الذکر استفاده شد. پارامترهای ورودی مزبور به صورت تصادفی به سه بخش آموزش، اعتبارسنجی و آزمون تفکیک شد. بدین صورت که ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش، ۲۰ درصد داده‌ها برای اعتبارسنجی و مابقی داده‌ها برای آزمون شبکه عصبی مصنوعی به کار گرفته شدند. معماری شبکه برای آرایش‌های متفاوت  $m-n-1$  بود که  $n$  و  $m$  به ترتیب تعداد نرون‌های لایه میانی و تعداد پارامترهای ورودی شبکه است. در انتخاب  $n$  و  $m$  بهینه روش خاصی وجود ندارد و با استفاده از آزمون و خطا برای هر آرایش به دست می‌آید.

#### مقایسه روش‌های محاسبه تبخیر از سطح آزاد

### نتایج و بحث

در ابتدا ارتباط بین پارامترهای هواشناسی و تبخیر ارزیابی شد، لذا ضریب همبستگی پیرسون بین پارامترهای دما، رطوبت، سرعت باد، ساعات آفتابی و تابش خورشیدی با میزان تبخیر از تشت محاسبه شد (شکل ۱). همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، پارامترهای ساعات آفتابی و سرعت باد به ترتیب بیشترین و کمترین ضریب همبستگی را با تبخیر از تشت دارند. تراز و ارول کسکن (۲۰۰۵) نیز به تأثیر بسیار کم سرعت باد در ارتفاع ۲ متری بر تبخیر از سطح آزاد نسبت به سایر پارامترها اشاره داشتند. مقدار ضریب همبستگی کلیه پارامترهای زیاد است. آنچه مسلم است پارامترهای هواشناسی ساعات آفتابی و تابش خورشیدی در فرایند تبخیر از تأثیرگذاری زیادی در منطقه مورد مطالعه برخوردار می‌باشند.



شکل ۱- ضریب همبستگی بین پارامترهای هواشناسی و تبخیر از تشت

شایان ذکر است که در هیچ کدام از روش‌های تجربی مورد بررسی در این تحقیق برای محاسبه تبخیر از سطح آزاد از این پارامترها (ساعات آفتابی و تابش خورشیدی) استفاده نشده است. این نتیجه نیز ضرورت استفاده از روشی دقیقتر و قابل انعطاف‌تر برای محاسبه تبخیر از سطح آزاد را بیان می‌کند.

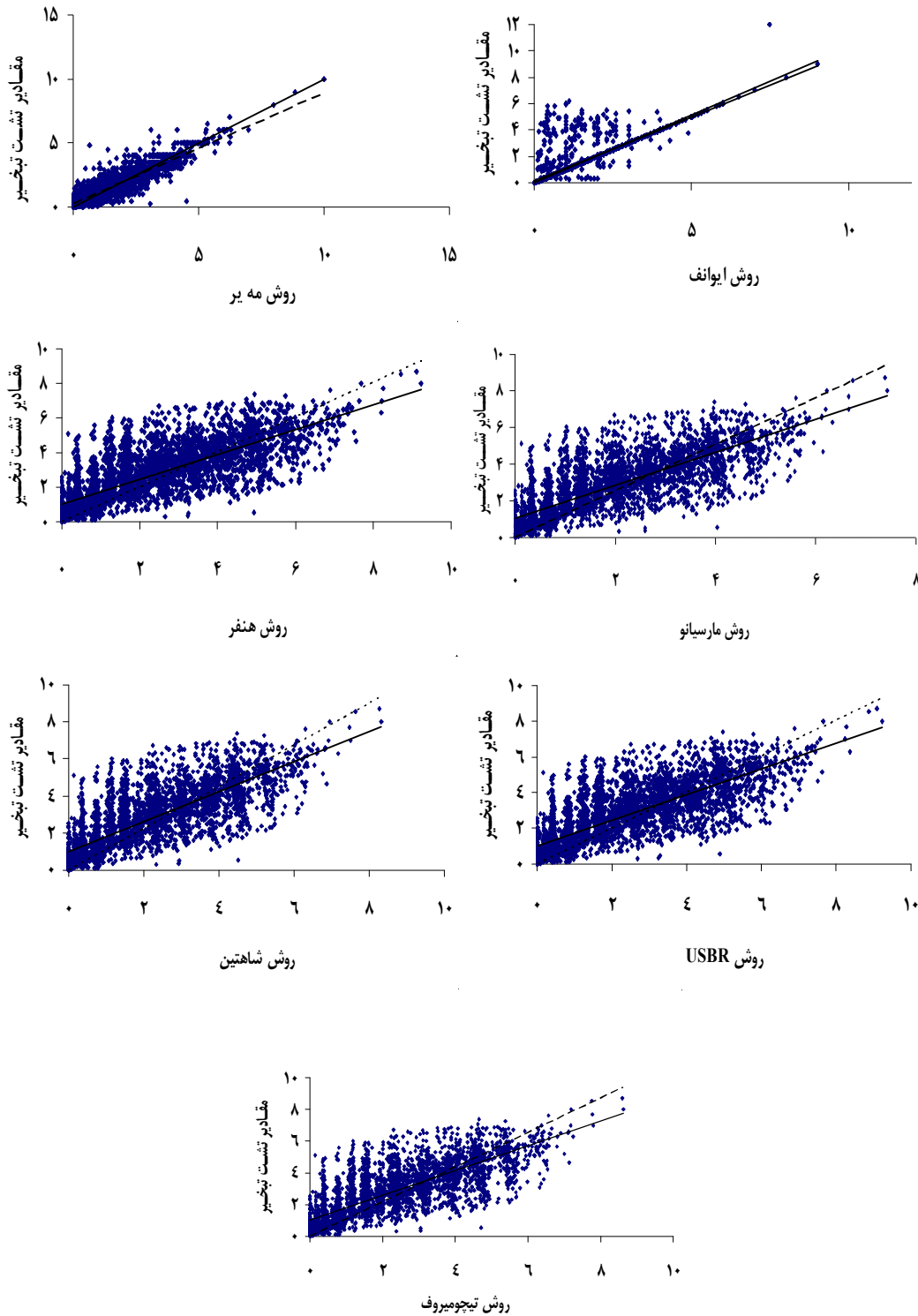
در شکل ۲ مقادیر تبخیر از سطح آزاد روزانه محاسبه شده توسط روش‌های فوق‌الذکر در مقابل مقادیر تبخیر از تشت روزانه اندازه‌گیری شده برای ایستگاه هراز- آمل ترسیم و نسبت به خط ۱:۱ و بهترین خط برازش داده شده ارزیابی شد. مطابق این شکل و نتایج رگرسیونی و آماری مندرج در جدول ۲، می‌توان گفت که روش ایوانف و USBR به ترتیب

دارای بیشترین و کمترین شیب بوده است. نتایج موجود در جدول ۲ نشان می‌دهد که روش ایوانف کمترین مقدار RMSE را دارد. آشکار است که هر چه RMSE کوچک‌تر باشد، برآورد حاصل دقیق‌تر است. روش ایوانف رتبه اول RMSE, MBE را در بین روش‌های دیگر دارد (شکل ۲)، که نشان‌دهنده دقت بالای این روش در تعیین تبخیر از سطح آزاد در آمل است. همچنین با توجه به معادله ۸ مشاهده می‌شود که روش ایوانف برای اندازه‌گیری تبخیر از سطح آزاد به پارامترهای دما و رطوبت بستگی دارد و این دو پارامتر در ایستگاه‌های هواشناسی به راحتی اندازه‌گیری می‌شود، این روش می‌تواند به عنوان روشی آسان و کم‌هزینه در تعیین تبخیر از سطح آزاد مورد استفاده قرار گیرد. بعد از روش ایوانف روش‌های مهیر و تیچومیروف نیز به ترتیب دقت زیادی برای تعیین تبخیر از سطح آزاد دارند.

با توجه به شکل فوق می‌توان نتیجه گرفت که همه روش‌ها مقدار E روزانه کمتری را نسبت به مقدار تبخیر از تشت برآورد می‌کنند. با استناد به ضرایب موجود در جدول ۲ می‌توان نتیجه گرفت که برای محاسبه E روزانه در منطقه آمل و مناطق دارای آب و هوای مشابه از داده‌های هواشناسی به ترتیب روش‌های ایوانف، مهیر و تیچومیروف مناسب‌اند. همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شد مقادیر فشار بخار اشباع با معادله ۵ تا ۷ محاسبه شد، شاید یکسان نبودن مقدار محاسباتی با مقادیر واقعی فشار بخار باعث کارایی کمتر روش‌های مهیر و تیچومیروف نسبت به ایوانف شده است. در این راستا پیشنهاد روش ایوانف برای منطقه آمل با نتایج ولایتی (۱۳۷۴) که روش ایوانف را برای مناطق خشک و نیمه خشک مناسب دانسته‌اند در تناقض است. اما باید متذکر شد که نتیجه مبنی بر کارایی کم روش ایوانف در مناطق مربوط در دست نیست. ضمن اینکه همان‌طور که در شکل ۱ نیز قابل مشاهده است، ضریب همبستگی پیرسون بین تبخیر از سطح آزاد با رطوبت نسبی و دما که هر دو در معادله ایوانف مورد استفاده هستند مقدار قابل توجهی است. از دیگر نتایج جدول ۲ می‌توان به کارایی پایین روش USBR اشاره کرد. همان‌طور که در معادله ۱۰ نیز قابل مشاهده است روش USBR فقط با استفاده از پارامتر دما تبخیر از سطح آزاد را محاسبه می‌کند، لذا تک پارامتری بودن این معادله خود گواهی بر دقت کم آن در تعیین

USBR، مه‌یر، شاهتین، هنفر و مارسیانو به ترتیب برابر ۲/۸، ۱/۷، ۳/۳، ۱/۸، ۱/۶، ۱/۲ و ۱/۱ میلی‌متر در روز محاسبه شد.

تبخیر از سطح آزاد است. روش USBR در مواردی که تنها دما اندازه‌گیری می‌شود قابل استفاده است. متوسط مقدار تبخیر از سطح آزاد توسط روش‌های ایوانف، تیچومیروف،



شکل ۲- نمودار همبستگی بین مقادیر تبخیر از سطح آزاد روزانه روش‌های مورد بررسی با مقادیر تبخیر از تشت برای دوره آماری (۲۰۰۶-۱۹۹۵) در ایستگاه هراز

جدول ۲ - نتایج حاصل از شاخص‌های آماری روش‌های مختلف تبخیر از سطح آزاد نسبت به تبخیر از تشت

پارامترهای آماری خط برازش	ایوانف	تیچومیروف	(USBR)	مه یر	شاهتین	هنفر	مارسیانو
MBE	-۰/۳۶	-۰/۸۳	-۰/۷۹	-۱/۰۵	۱/۳	۱/۲۴	۱/۱۴
RMSE	۰/۸۴	۱	۱/۲۶	۱/۲	۱/۷۵	۱/۷۳	۱/۶۴
شیب خط	۰/۹۷۴	۰/۷۸۴	۰/۷۲	۰/۸۶۴	۰/۸۰۸	۰/۷۲۵	۰/۹۰۴
عرض از مبدا	۰/۱۲	۰/۹۹۶	۱/۰۱	۰/۲۹۸	۱	۱/۰۱	۱/۰۲
R <sup>2</sup>	۰/۸۰۲	۰/۶۱۹۹	۰/۶۰۸۵	۰/۸۲۲	۰/۶۱۶۵	۰/۶۱	۰/۶۲

## نتایج آنالیز حساسیت

جدول ۳ - نتایج آنالیز حساسیت ( تغییرات ۱۰ درصد)

میزان تغییرات ←		میزان تغییرات		روش
+/۱۰	-/۱۰	+/۱۰	-/۱۰	
۰/۹۱	-۰/۶۱	۰/۹	-۰/۱	ایوانف T*
۱/۰۱	۰/۴۱	۱/۳	-۱/۱	ایوانف RH**
۰/۶۵	-۰/۰۸	۱/۹	-۱/۷	تیچومیروف RH
۱/۴۲	-۱/۲۵	۰/۸	-۰/۴	تیچومیروف T
۴/۹۹	-۴/۵۳	۴	-۳/۶	تیچومیروف U***
۱/۳۸	-۱	۱/۲	-۰/۶	سازمان عمران اراضی آمریکا T
۱/۳۴	-۱/۱۹	۱/۱	-۰/۹	مه یر U
۱/۶۸	-۱/۴۹	۰/۹	-۰/۶	مه یر T
۰/۵۹	-۰/۵۹	۲/۲	-۰/۶	مه یر RH
۳/۰۴	۲/۴۵	۳	۲/۴	شاهتین RH
۳/۰۱	۲/۴۲	۳	۲/۴	شاهتین T
۳/۰۱	۲/۴۲	۳	۲/۴	شاهتین U
۱/۶	۱/۱۱	۱/۹	۱/۴	هنفر U
۱/۵۴	۱/۰۸	۱/۹	۱/۴	هنفر T
۲/۰۸	۱/۵۸	۱/۴	۰/۹	هنفر RH
۱/۵	۱/۰۱	۱/۸	۱/۳	مارسیانو U
۲/۰۱	۱/۵۲	۱/۳	۰/۸	مارسیانو RH
۱/۴۳	۰/۹۷	۱/۸	۱/۳	مارسیانو T

\* تغییرات در دما، \*\* تغییرات در رطوبت نسبی، \*\*\* تغییرات در سرعت باد

همانطور که قبلاً ذکر شد حساسیت مدل‌های فوق با  $\pm 10\%$  قرار گرفت. نتایج این تغییرات در قالب درصد تغییرات در فراسنج‌های آماری MBE و RMSE در جدول‌های ۳ تا ۵ نشان داده شده است. باید متذکر شد که حروف U، T، RH موجود در این جداول بیانگر تغییرات در دما، سرعت باد و رطوبت نسبی است. بررسی‌های آنالیز حساسیت نشان داد که در کلیه روش‌ها اشتباهات سیستماتیک و انسانی که در جهت کاهش در مقادیر ورودی است (مقادیر ورودی کمتر از مقدار واقعی باشند)، خطای کمتری نسبت به اشتباهاتی که باعث افزایش پارامترهای ورودی می‌شود (مقادیر ورودی بیشتر از واقعیت باشند)، را ایجاد می‌کند. با توجه به نتایج آنالیز حساسیت موجود در جداول ۳ تا ۵ کمترین حساسیت نسبت به تغییرات سرعت باد در روش‌های مارسیانو و مه یر بود. درحالی‌که روش تیچومیروف حساسیت بیشتری به تغییرات سرعت باد نسبت به سایر روش‌ها از خود نشان دادند. در این راستا روش‌های مارسیانو و ایوانف کمترین حساسیت را نسبت به تغییرات دما از خود نشان دادند. از دیگر نتایج حاصله از آنالیز حساسیت می‌توان به حساسیت بسیار کم روش‌های ایوانف، مه یر و تیچومیروف نسبت به تغییرات رطوبت نسبی اشاره کرد. بیشترین حساسیت نسبت به تغییرات رطوبت نسبی مربوط به روش شاهتین بود. باید گفت در مواردی که در برداشت پارامترهای ورودی احتمال بروز خطاهای انسانی و سیستماتیک وجود دارد روش‌های ایوانف، مارسیانو و سازمان عمران اراضی آمریکا به دلیل حساسیت کمتر به تغییرات در پارامترهای ورودی نسبت به سایر روش‌ها مناسب‌تر می‌باشند.



## شبکه عصبی مصنوعی

ساختار بهینه‌ترین آرایش شبکه‌عصبی پرسپترون چند لایه از بین تمامی آرایش‌ها و دیگر توابع محرک که بهترین عملکرد را دارند، در جدول ۶ معرفی شده است. باید گفت که برای ارائه تصویر روشنتر و امکان مقایسه بهتر بین توانایی شبکه و روش‌های تجربی، پارامترهای آماری مربوط به روش ایوانف نیز در جدول ۷ ذکر شده است. شایان ذکر است که روش ایوانف نسبت به سایر روش‌ها در منطقه آمل دقت بالاتری داشت (جدول ۳ و شکل ۱). همان‌طور که در جدول ۶ نیز پیداست شبکه عصبی با ۴ لایه در ورودی ۴ لایه پنهان و یک لایه خروجی شکل گرفته است. ترز و ارول (۲۰۰۵) برای محاسبه تبخیر روزانه از تشت از شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده کردند. نتایج آنها حاکی از بهتر بودن مدل شبکه عصبی با آرایش ۴ لایه ورودی و ۳ لایه پنهان است.

پس از اجرای تمام آرایش‌ها، داده‌های بهینه ورودی شامل دما، سرعت باد، رطوبت نسبی و ساعات آفتابی (n/N) ارزیابی شد. درحالی‌که ترز و ارول (۲۰۰۵) از شبکه عصبی با آرایش ۴ لایه ورودی (شامل: دمای هوا، دمای آب، تشعشع خورشیدی و فشار هوا) برای محاسبه تبخیر استفاده نمودند. در مدل ارائه شده توسط آنها مقدار  $R^2$  در آموزش و آزمون به ترتیب برابر ۰/۷۵ و ۰/۷۷ بوده و مقادیر MSE نیز به ترتیب برابر ۱/۹۷ و ۱/۶۱ است. درحالی‌که مدل ارائه شده در این تحقیق دارای ضرایب آماری بهتری است (جدول ۶). برتن و همکاران (۲۰۰۰) توسط شبکه‌های عصبی مصنوعی، تبخیر روزانه از تشت را با استفاده از ۲۰۴۴ داده که از شهرهای مختلف جهان مانند رم در سال‌های ۱۹۹۲ تا ۱۹۹۶ جمع‌آوری شده بود، محاسبه کردند. بهترین مدل ارائه شده توسط آنها از ۵ لایه ورودی شامل بارندگی، دما، رطوبت نسبی، تشعشعات خورشیدی و سرعت باد تشکیل شده است. میزان تبخیر از تشت که از روش شبکه عصبی مصنوعی برتن و همکاران (۲۰۰۰) محاسبه شده دارای کمترین خطا نسبت به روش‌های رگرسیونی چندگانه خطی مانند روش پریستلی-تیلور بوده و خطایی برابر با ۱/۱۱ میلی‌متر در روز داشت. این درحالی است که خطای حاصله از مدل ارائه شده در این تحقیق بسیار کمتر از نتایج برتن و همکاران (۲۰۰۰)، است (جدول ۶).

جدول ۴ - نتایج آنالیز حساسیت (تغییرات ۲۰ درصد)

میزان تغییرات روش	+۲۰٪		-۲۰٪	
	MBE	RMSE	MBE	RMSE
ایوانف T	۱/۰۸	۱/۰۸	-۰/۸۷	۱
ایوانف RH	۱/۶۷	۲/۱	۱/۱۹	-۱/۹
تیچومیروف RH	۱/۳۶	۲/۹	۰/۹۷	-۲/۶
تیچومیروف T	۱/۹۷	۰/۸	-۱/۷۳	-۰/۱
تیچومیروف U	۵/۴۹	۲/۵	-۴/۹۸	-۳/۲
سازمان عمران اراضی آمریکا T	۱/۵۲	۱/۲	-۱/۲۱	-۰/۴
مه یر U	۱/۴۸	۰/۹	-۱/۳۳	-۰/۸
مه یر T	۲/۲۸	۰/۸	-۲	-۰/۳
مه یر RH	۱/۲۵	۳/۲	۱/۲۵	۳/۲
شاهتین RH	۳/۰۷	۳	۲/۴۸	۲/۴
شاهتین T	۲/۹۹	۳	۲/۴۱	۲/۴
شاهتین U	۳	۳	۲/۴۱	۲/۴
هنفر U	۱/۴۷	۲	۰/۹۸	۱/۵
هنفر T	۱/۳۲	۲/۱	۰/۸۹	۱/۵
هنفر RH	۲/۴۴	۱/۱	۱/۹۳	۰/۶
مارسیانو U	۱/۳۶	۱/۹	۰/۸۷	۱/۴
مارسیانو RH	۲/۴	۱	۱/۸۸	۰/۴
مارسیانو T	۱/۲	۲	۰/۷۸	۱/۴

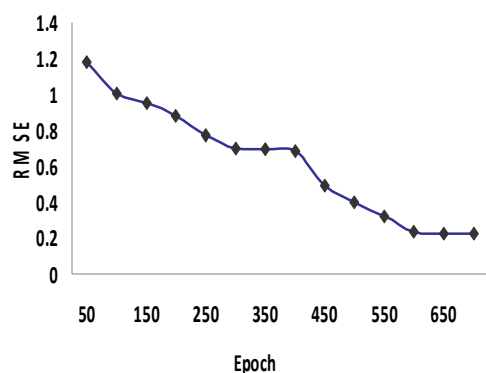
جدول ۵ - نتایج آنالیز (تغییرات ۳۰ درصد)

میزان تغییرات روش	+۳۰٪		-۳۰٪	
	MBE	RMSE	MBE	RMSE
ایوانف T	۲/۳۱	۱/۱۱	-۱/۱۴	۰/۳۱
ایوانف RH	۳/۴۵	۲/۸۹	۱/۹۷	-۲/۷
تیچومیروف RH	۳/۳	۳/۸۴	۱/۸۷	-۳/۵
تیچومیروف T	۳/۶۳	۰/۹۷	-۲/۲۷	۰/۲۱
تیچومیروف U	۶	۲/۸۹	-۵/۴۳	-۲/۷
سازمان عمران اراضی آمریکا T	۲/۶۸	۱/۱۷	-۱/۴۳	-۰/۱۵
مه یر U	۲/۶۳	۰/۸۳	-۱/۴۸	-۰/۶۱
مه یر T	۳	۰/۸۹	-۲/۵۷	۰/۰۶
مه یر RH	۴/۲۵	۴/۲۷	۲/۲۵	۴/۲۷
شاهتین RH	۴/۱	۲/۹۴	۲/۵	۲/۳۶
شاهتین T	۳/۹۷	۳/۰۵	۲/۳۹	۲/۴۵
شاهتین U	۲/۹۹	۳/۰۵	۲/۴	۲/۴۵
هنفر U	۲/۳۴	۲/۱۴	۰/۸۶	۱/۶۱
هنفر T	۲/۰۸	۲/۲	۰/۶۹	۱/۶۳
هنفر RH	۲/۸۱	۰/۸۷	۲/۲۷	۰/۲۱
مارسیانو U	۲/۲۳	۲/۰۷	۰/۷۳	۱/۵۵
مارسیانو RH	۲/۷۹	۰/۷۹	۲/۲۵	۰/۰۴
مارسیانو T	۱/۹۵	۲/۱۴	۰/۵۶	۱/۵۶

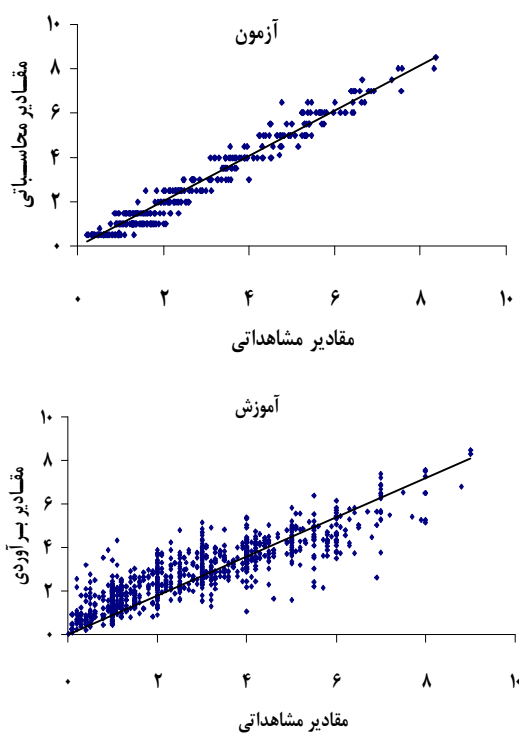
جدول ۶ - ساختار و مقادیر پارامترهای شبکه عصبی و روش ایوانف به عنوان بهترین روش تجزیه

آموزش			آزمون			تابع محرک	قانون یادگیری	آرایش شبکه
MAE	RMSE	R <sup>2</sup>	MAE	RMSE	R <sup>2</sup>			
۰/۳۲	۰/۳۶	۰/۹۴۳	۰/۲۲	۰/۷۲	۰/۹۵۹	تابع هایدربولیک	دلتا-بار-دلتا	۴-۴-۱
			-۰/۳۶	۰/۸۴	۰/۸۰۲			ایوانف

تبخیر از طریق نتایج تشت تبخیر و ضریب همبستگی بین نتایج، قابل ارزیابی است.



شکل ۳- روند کاهش خطا با تعداد تکرارها در شبکه عصبی مصنوعی



شکل ۴- مقادیر مشاهداتی و محاسباتی تبخیر توسط شبکه عصبی

در تحقیقی دیگر ویلیام و همکاران (۲۰۰۸) مدل رگرسیون چند متغیره را براساس پارامترهای ورودی سرعت باد، تشعشع خورشید، رطوبت نسبی و دمای ماکزیمم برای محاسبه تبخیر از تشت ارائه دادند که بهترین عملکرد را داشت. انتخاب پارامترهای سرعت باد، رطوبت نسبی و دمای ماکزیمم برای محاسبه تبخیر از تشت توسط ویلیام و همکاران (۲۰۰۸) با ورودی‌های مدل ارائه شده در این تحقیق همخوانی دارد.

آنچه از جدول ۶ پیدا است توانایی بالای شبکه عصبی پرسپترون چند لایه با الگوریتم انتشار خطا به عقب در محاسبه تبخیر از سطح آزاد نسبت به سایر روش‌های موجود است. بررسی‌های انجام شده مشخص کرد که نتایج برآوردهای شبکه عصبی با به کارگیری تابع محرک تانژانت هایدربولیک و قانون یادگیری دلتا-بار-دلتا نسبت به سایر توابع محرک مناسب‌تر است.

در شکل ۳ ارتباط تصویری تعداد تکرار اجرای شبکه عصبی مصنوعی برای آرایش پیشنهادی در جدول ۶ از بین آرایش‌های مختلف نشان داده شده است. این شکل تفاوت بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مقادیر اندازه‌گیری شده را برای مجموعه داده‌های آزمون نشان می‌دهد. مقدار خطا در مجموعه داده‌های آزمون به‌طور طبیعی در اوایل اجرای شبکه زیادتر است و با ادامه کار مقدار خطا کم شده تا برای تعداد معینی تکرار در حد مقدار ثابت شبکه متوقف می‌شود، لذا با توجه به شکل زیر برای اجرای شبکه مقدار ۱۰۰۰ تکرار در نظر گرفته شد.

در نهایت، همبستگی بین مقادیر تبخیر از سطح آزاد شبیه‌سازی شده توسط شبکه عصبی (محور عمودی) و مقادیر مشاهداتی (محور افقی) در شکل ۴ نشان داده شده است. شکل ۴ از لحاظ ظاهری معرف دقت مدل پیشنهادی است. همچنین بالا بودن ضرایب همبستگی نیز نشان‌دهنده وابستگی بسیار نزدیک مقادیر مشاهداتی و برآوردی است. شایان ذکر است که قابلیت اتکا به برآوردها در پیش‌بینی

## نتیجه‌گیری

در بررسی‌های اولیه مشخص شد که ساعات آفتابی و سرعت باد به ترتیب بیشترین و کمترین ضریب همبستگی را با تبخیر از تشت نسبت به سایر پارامترهای هواشناسی دارند. این درحالی است که در روابط تجربی مورد استفاده در این تحقیق پارامتر ساعات آفتابی لحاظ نشده بود، لذا معرفی یک روش مناسب و قابل اطمینان برای این منطقه ضروری است. نتایج حاکی از فراسنج‌های آماری بیانگر این بود که محاسبه تبخیر از سطح آزاد در روش تجربی ایوانف دارای بهترین همبستگی با مقدار تبخیر از تشت نسبت به سایر روش‌های تجربی در منطقه آمل است. ضمن اینکه بعد از روش ایوانف روش‌های تیچومپروف و مه‌یر نیز به ترتیب دقت بالایی برای تعیین تبخیر از سطح آزاد دارند. ارزیابی‌های حاصل از آنالیز حساسیت نشان داد در مواردی که در برداشت پارامترهای ورودی احتمال بروز خطاهای انسانی و سیستماتیک وجود دارد، روش‌های ایوانف، تیچومپروف و سازمان عمران اراضی آمریکا به دلیل حساسیت کمتر به تغییرات در پارامترهای ورودی نسبت به سایر روش‌ها مناسب‌ترند.

بررسی‌ها روی ساختار شبکه عصبی، بیانگر این است که ساختار شبکه عصبی با تابع محرک تانژانت هایدربولیک و قانون یادگیری دلتا-بار-دلتا و همچنین با آرایش ۴-۴-۱ دارای بهترین عملکرد در تعیین تبخیر از سطح آزاد است. ضمن اینکه مقایسه پارامترهای آماری  $R^2$ ، RMSE و MAE بین شبکه عصبی و روابط تجربی بیانگر توانایی بالای شبکه در تعیین تبخیر از سطح آزاد است. با محاسبه نسبتاً دقیق تبخیر از سطح آزاد توسط شبکه عصبی می‌توان راهکارهای اساسی و مدیریتی مؤثر در جهت کاهش اثرات بحران ناشی از خشکسالی و حفاظت از منابع آب اعمال کرد.

## منابع

- ۳- علیزاده ا. ۱۳۸۳. اصول هیدرولوژی کاربردی. انتشارات دانشگاه امام رضا. ۸۱۶ ص.
- ۴- کریمی‌گوغری ش. و اسلامی ا. ۱۳۸۷. پیش‌بینی بارندگی سالانه در استان کرمان با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی. مجله آبیاری و زهکشی ایران. ۲ (۲): ۱۲۳-۱۳۲.
- ۵- ولایتی س. ۱۳۷۴. جغرافیای آبها و مدیریت منابع آب. انتشارات خراسان. دانشگاه فردوسی. ۳۵۸ ص.
- 6- Al-Shalen A. and Salih A.M.A. 1987. Evapotranspiration estimation in extremely arid areas. ASCE. Journal of Irrigation. Drain. Eng. 113: 565-574.
- 7- Basher I.A. and Hajmeer M. 2000. Artificial neural networks: fundamentals, computing, design, and applivation. Jurnal of Microbiological Methods, 43: 3-31.
- 8- Bruton J. M. McClendon R. W. and Hoogenboom G. 2000. Estimating daily pan evaporation with artificial neural network. Trans.of The ASAE. 43(2):492-496.
- 9- Brutsaert W. and Parlange, M.B. 1998. Hydrologic cycle explains the evaporation paradox. Nature 396. 30: 100-120.
- 10- Burman R.D. 1976. Intercontinental comparison of evaporation estimates. ASCE. Journal of Irrigation. Drain. Eng 102: 109-118.
- 11- Cohen S. Ianetz A. and Stanhill G. 2002. Evaporative climate changes at bet Dagon, Israel, 1964-1998, Agricultural and Forest Meteorology 111: 83-91.
- 12- Coulibaly P. Antcil F. and Bobe B. 2000. Daily reservoir inflow forecasting using artificial neural networks with stopped training approach. Journal of Hydrology 230: 244-257.
- 13- Coulomb C.V. Iegesse D. Gasse F. Travi Y. and Chernet T. 2001. Lake evaporation estimates in tropical Africal (Lake Ziway, Ethiopia ). Journal of Hydrology 245: 1-18.
- 14- Frevert D.K. Hill R.W. and Braaten B.C. 1983. Estimation of FAO evapotranspiration coefficients. Journal of Irrigation and Drain. Eng. ASCE 109(2): 265-270.
- 15- Gavin H. Agnew C.A. 2004. Modeling actual, reference and equilibrium from a temperate wet grassland. Journal of Hydrology 18: 229-246.
- 16- Irmak S. Haman D.Z. and Jones J.W. 2002. Evaluation of class A pance coefficients for estimating reference evapotranspiration in humid location. Journal of Irrigation and Drain. Eng. ASCE 128(3): 153-159.
- 17- Jain S.K. and Indurthy V.P. 2004. Closure of comparative analysis of event based rainfall-runoff modeling techniques- deterministic, 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): ۵۱-۶۵.
- ۲- رضائی ع. ۱۳۷۹. مفاهیم آمار و احتمالات. نشر مشهد. چاپ اول. ۴۳۰ ص.

- 22- Sudheer K.P. 2000. Modeling hydrological processes using neural computing technique. PhD thesis, Indian Institute of Technology, Dehli.
- 23- Terz O. and Erol Keskn M. 2005. Modeling of Daily Pan Evaporation. *Journal of Applied Sciences* 5(2) : 368-372.
- 24- Vanzyl W.H. De Jager J.M. and Maree C.J. 1989. The relationship between daylight evaporation from short vegetation and the USWB Class A pan. *Agricultural and Forest Meteorology* 46: 107-118.
- 25- Wallace S.D. Nivala J.A. and Parkin G.F. 2005. Relationship between evapotranspiration and pan evaporation in cold-climate subsurface-flow constructed wetlands. *IWA Specialist Group on the Use of Macrophytes in water pollution control*, 30:25-30.
- 26- William H. Katarzyna G. and Charles L. W. 2008. A Method for Estimating Pan Evaporation for Inland and Coastal Regions of the Southeastern U.S. *Southeastern Geographer*. 48(2):149-171.
- statistical, and artificial neural networks. *ASCE Journal of Hydrological Eng.* 9(9): 551-553.
- 18- Lek S. Guiresse M. and Griaudel J.L. 1999. Predicting stream nitrogen concentration from watershed features using neural networks, *Journal of Universite Paul Sabtier, Toulouse, France Water reaserch.* 33(16): 3469-3478.
- 19- Linarce E.T. 1967. Climate and the evaporation from crops. *Journal of Irrigation and Drain. Eng.* 93: 61-79.
- 20- Rosenbeg N.J and Powers W. 1970. Potential for evapotranspiration and its manipulation in the plains region. *Proc. Symp Evapotranspiration Great Plains. Great Plains Agric. Council Publ.* 50: 275-300.
- 21- Stephan J.C. Stewart E.H. 1963. A comparison of procedures for computing evaporation and evapotranspiration. *Publication 62. International Association of Scientific Hydrology. International Union of Geodynamics and Geophysics, Berkeley, CA:* 123-133.