

برآورد مقدار تبخیر با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی: ایستگاه تبریز)

علی محمد خورشید دوست^۱

حمید میرهاشمی^۲

موسی نظری^۳

چکیده

به سبب تأثیر متقابل عناصر هواشناختی در محاسبه قدرت تبخیر جو، تخمین آن یک کار پیچیده و غیر خطی است. لذا برای تخمین آن باید از مدل‌های پیشرفته ریاضی استفاده نمود. در این مطالعه جهت برآورد قدرت تبخیر جو در سطح ایستگاه تبریز از شبکه‌های عصبی مصنوعی بر پایه دو الگوریتم آموزشی لونیبرگ - مارکوئٹ و الگوریتم ژنتیک، رگرسیون خطی چند متغیره و معادله پنمن - فائو استفاده شده است. بر این اساس در مدل شبکه عصبی با اتخاذ یک و دو لایه پنهان و دو تابع فعال‌سازی تان‌سیگموئید و لوگ‌سیگموئید، ۵۶ مدل شبکه عصبی تولید شد. ارزیابی و مقایسه نتایج این مدل‌ها براساس معیارهای چون ضریب تعیین و مجذور میانگین مربعات خطا نشان داد که دقت مدل‌ها بستگی به نوع تابع محرک، نوع الگوریتم آموزشی، تعداد لایه‌های پنهان و تعداد نرون‌های اتخاذ شده دارد. از سوی نتایج نشان داد که در مدل‌های تک لایه، دقت وزن‌دهی الگوریتم ژنتیک برای هر دو تابع فعال‌ساز بیش از الگوریتم‌های با دو لایه پنهان دقت وزن‌دهی الگوریتم

۱- استاد گروه آب و هواشناسی، دانشگاه تبریز.

۲- استادیار آب و هواشناسی دانشگاه لرستان. (نویسنده مسئول)

Email: mirhashemi.h@lu.ac.ir

۳- دانشجوی دکتری مهندسی کامپیوتر دانشگاه تبریز.

ژنتیک بوده؛ به طوری که دقیق‌ترین مدل شبکه با آرایش ۵-۷-۷-۱ با مجذور میانگین مربعات خطای ۰/۲۲۷ میلی‌متر بر اساس الگوریتم آموزشی لونبرگ مارکوئث و دو لایه پنهان و تابع فعال‌سازی تان سیگموئید تولید شده بود. همچنین مجذور میانگین مربعات خطای مدل رگرسیون خطی چند متغیره و معادله پنمن - فائو به ترتیب به مقدار ۰/۷۹ و ۱/۳۴ بدست آمد. بنابراین مدل شبکه عصبی در قیاس با دو مدل مذکور دارای کارایی بهتر، ضریب دقت بیشتر و مقدار خطای کمتری جهت پیش بینی مقدار تبخیر ایستگاه تبریز است.

واژگان کلیدی: تبریز، قدرت تبخیر جو، شبکه عصبی مصنوعی، رگرسیون چند متغیره.

مقدمه

تبخیر یکی از عوامل مهم در چرخه هیدرولوژی و از جمله عوامل تعیین کننده معادلات انرژی در سطح زمین و توازن آب است که برآورد آن در حیطه‌های مختلف همچون آب و هواشناسی، هیدرولوژی، کشاورزی، مدیریت جنگل و مرتع و مدیریت منابع آب مورد نیاز است (ثنایی نژاد و همکاران، ۱۳۹۰؛ دانشفرز، ۱۳۹۴). در این خصوص یکی از داده‌های اساسی در طراحی شبکه‌های آبیاری و زهکشی مقدار قدرت تبخیر در هر منطقه است. چرا که طراحی شبکه‌های انتقال اعم از کانال‌های آبرسانی یا زهکشی و نیز سایر قسمت‌های طراحی آب وابسته به مقدار آب مورد نیاز از طریق پدیده تبخیر است (جهانبخش و همکاران، ۱۳۸۰). به طور کلی از نظر هیدرولوژی تبخیر به مجموعه پدیده‌هایی گفته می‌شود که آب را صرفاً از راه یک فرایند فیزیکی به بخار تبدیل می‌کند. عواملی که میزان تبخیر را مشروط می‌سازند بر حسب اینکه وابسته به هوای مجاور یا سطح تبخیرکننده باشند به دو دسته کاملاً متمایز تقسیم می‌شوند: الف) عواملی که مربوط به هوای مجاور سطح تبخیر بوده و در واقع محرک آن هستند و به نام عوامل هواشناختی و یا عوامل قدرت و یا توان تبخیر جو و یا تبخیر - تعرق پتانسیل از آنها یاد می‌شود. ب) دسته دوم عواملی که مشخص‌کننده جنس و طبیعت سطح تبخیر هستند، مثل سطح آزاد آب، برف، یخ، سطح

خاک و گیاهان، وسعت آب، عمق آب و همچنین قابلیت خاک برای تأمین آب مورد نیاز تبخیر و تأثیرپذیری آن در مقابل قدرت تبخیر جو. سطوح مختلف تبخیرکننده به صورت‌های کم و بیش مختلف تحت تأثیر تغییرات قدرت تبخیر جو قرار می‌گیرند. این قدرت تبخیر می‌تواند با تقریب اولیه یک عامل مشترک برای کلیه پدیده‌های تبخیر صرف‌نظر از نوع سطح تبخیرکننده در نظر گرفته شوند (راخچا و سینگ^۱، ۲۰۰۹؛ رمنیراس^۲، ۱۳۶۳). از طرفی تغییر زمانی - مکانی عناصر آب و هوایی موثر در تبخیر - تعرق به‌مراه تغییرات آب در خاک و گیاه، شرایط پیچیده‌ای را برای تخمین تبخیر بوجود آورده است. از این رو در مناطق مختلف جهان کوشش‌هایی در جهت تعبیه‌ی روابط تجربی برای تعیین تبخیر- تعرق واقعی با استفاده از داده‌های هواشناسی به عمل آمده است (رحیمی‌خوب و محمودی، ۱۳۹۰) در این خصوص افزون بر معادله‌های موجود برای برآورد تبخیر - تعرق می‌توان از روش‌های جدید پردازشی در تخمین تبخیر - تعرق بهره گرفت. یکی از این روش‌های نوظهور، روش شبکه‌های عصبی مصنوعی است. در این راستا مطالعاتی در زمینه مدل‌سازی تبخیر - تعرق (یا قدرت تبخیر جو) با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی در ادبیات ایران و جهان انجام گرفته است، از قبیل: رید^۳ (۲۰۱۴) با کاربرد شبکه عصبی مصنوعی به برآورد میزان تبخیر - تعرق گیاه مرجع در منطقه راجستان هندوستان پرداخت. وی با اتخاذ داده‌های دمای هوا، نم نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد به عنوان ورودی شبکه عصبی و تبخیر - تعرق گیاه مرجع محاسبه‌شده توسط فرمول فائو - پنمن - مانتیث به عنوان خروجی شبکه عصبی نشان داد که مدل شبکه عصبی با ساختار ۱-۳-۴ دارای دقیق‌ترین برآورد از تبخیر تعرق گیاه مرجع است. لندراس^۴ و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، روش‌های تجربی و نیمه تجربی میزان تبخیر - تعرق را در شمال اسپانیا تخمین زدند و آنگاه نتایج حاصله از هر یک از روش‌های یادشده را مورد مقایسه قرار دادند. نتایج این مطالعه حاکی از برتری و دقت بیشتر شبکه عصبی در تخمین میزان تبخیر

1 - Rakhecha and Singh

2 - Remniras

3- Reddy

4- Landeras

- تعرق نسبت به دو روش دیگر بود. تراکوویچ^۱ (۲۰۰۵) از یک تابع شعاعی شبکه عصبی با داده‌های ورودی دما برای مدل‌سازی تبخیر - تعرق استفاده کرد و نتایج حاصل از شبکه عصبی را با معادلات هارگریوز - سامانی، تورنت وایت و فائو - پنمن - ماتیت مقایسه کرد. نتایج نشان داد که شبکه عصبی بر مبنای تابع‌های شعاعی با دقتی بیشتر از دیگر مدل‌های شبکه عصبی تبخیر - تعرق مرجع را تخمین می‌زند. سلطانی و همکاران (۱۳۹۲) کارایی دو مدل تلفیق غیر خطی سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی و مدل شبکه عصبی - خود رگرسیون را جهت تخمین میزان تبخیر روزانه از تشنگ تبخیر برای شرایط آب و هوایی خشک و گرم (ایران شهر)، خشک و گرم ساحلی (چابهار) و نیمه خشک و معتدل گرم (سراوان) واقع در استان سیستان و بلوچستان مورد ارزیابی قرار دادند. ایشان با استفاده از الگوریتم ژنتیک و گاماتست از بین پارامتری‌های ورودی همچون دما، نم نسبی، سرعت باد، ساعات آفتابی و فشار هوا، بهترین ترکیب ورودی مدل‌های شبکه عصبی را برای هر یک از مناطق مذکور انتخاب نمودند. نتایج مطالعه ایشان حاکی از توانایی مطلوب دو مدل یاد شده در شرایط آب و هوایی خشک و گرم نسبت به دو شرایط آب و هوایی دیگر است. قبائی سوق و همکاران (۱۳۸۹) برای پیش‌پردازش پارامترهای ورودی به شبکه عصبی پرسپترون چندلایه جهت تخمین تبخیر - تعرق روزانه‌ی ایستگاه همدید شیراز از دو روش گاماتست و رگرسیون گام به گام استفاده کردند. ایشان در مطالعه خود ادعا نمودند که اگرچه دقت مدل شبکه عصبی - گاماتست نسبت به مدل شبکه عصبی بسیار اندک است اما بخاطر توانایی آن در مشخص کردن اهمیت پارامترهای ورودی، تعیین تقریباً ۸۰۰ داده‌ی معنادار برای آموزش شبکه و پیدا نمودن بهترین ترکیبی که شامل تمامی عناصر ورودی به جز دمای بیشینه است، این آزمون را به منزله ابزاری سودمند برای پیش‌پردازش عناصر ورودی جهت مدل‌سازی سریع‌تر تبخیر - تعرق معرفی نمودند. رحیمی خوب و محمودی (۱۳۹۰)، جهت برآورد تبخیر - تعرق بر پایه حداقل داده‌های هواشناختی در حوضه امامه از چهار نوع شبکه عصبی استفاده کردند. نامبردگان در این مطالعه، پارامترهای چون دمای بیشینه و کمینه، نم نسبی و سرعت باد را به عنوان حداقل داده‌های هواشناسی مورد نیاز برای برآورد تبخیر -

1- Trajkovic

تعرق معرفی کردند. ولیزاده کامران (۱۳۹۳)، با محاسبه تبخیر - تعرق پتانسیل به روش استنفزا در آذربایجان شرقی و ترسیم نقشه پدیده یادشده برای روز ۱۱ خردادماه به این نتیجه رسید که مقدار تبخیر - تعرق پتانسیل در منطقه تحت بررسی از ۰ تا ۱۵ میلی‌متر در ساعت در نوسان است. در این خصوص، نامبرده در مطالعه خود نشان داد که ارتفاع و جهت شیب به عنوان مهمترین عامل در ایجاد نوسان مکانی تبخیر تعرق پتانسیل در آذربایجان شرقی محسوب می‌شوند.

بنابراین به سبب نقش وزینی که قدرت یا پتانسیل تبخیر جو سطح زمین در بیلان آب و برنامه‌ریزی‌های مربوط به کشاورزی و استحصال آب دارد و با توجه به مسائل پدیدآمده در رابطه با آب‌های سطحی و زیرزمینی بخش‌های بزرگی از ایران، به نظر می‌رسد که بیش از پیش ضرورت دارد که قدرت تبخیر جو برآورد و پیش‌بینی شود تا براساس آن بتوان برنامه‌ریزی‌های متناسب و بهینه را بر حسب شرایط به وجود آمده به انجام رساند. در این راستا شمال‌غرب و شهرستان تبریز نیز از بحران‌های اتفاق افتاده در مسائل ذخایر آبی مستثنا نبوده، لذا در این مطالعه با توجه به توانمندی‌های شبکه‌های عصبی که قادر به کشف روابط پیچیده هستند سعی می‌شود تا براساس عناصر هواشناختی قدرت تبخیر جو در طی ماه‌های گرم سال با استفاده از شبکه‌های عصبی برآورد و نتایج حاصل از آن با مقادیر حاصل از معادله پنمن و رگرسیون چند متغیره جهت ارزیابی کارایی آن مقایسه شود.

مواد و روش‌ها

جهت رهیافت به این مطالعه، از مدل‌های شبکه عصبی، رگرسیون چند متغیره و معادله پنمن فائو استفاده شد. بدین منظور داده‌های متغیرهای هواشناختی از قبیل دمای هوا، نم نسبی، فشار هوا، سرعت باد و ساعات آفتابی ماه‌های گرم سال شامل مه، ژوئن، جولای، اوت و سپتامبر با پوشش زمانی ۱۹۹۲ - ۲۰۱۱ متعلق به ایستگاه همدید تبریز به عنوان داده‌های ورودی شبکه عصبی مورد استفاده قرار گرفتند. نظر به اینکه میزان تبخیری که به وسیله تشتک تبخیر یا حوضه‌های آزمایشی و سفره‌های آزاد آب کم‌عمق اندازه‌گیری می‌شود نیز می‌تواند با وجود اینرسی حرارتی کم و بیش زیاد این وسایل، تا اندازه‌ای معرف قدرت تبخیر جو باشد (رمنیراس، ۱۳۶۳)، داده‌های تشتک تبخیر ایستگاه همدید تبریز در

همان بازه زمانی به عنوان خروجی شبکه عصبی در نظر گرفته شدند. پیش‌پردازش‌های صورتی گرفته بر روی داده‌های هواشناختی ورودی به شبکه عصبی نشاندهنده هم‌معیار نبودن این داده‌ها و عدم تبعیت آنها از توزیع نرمال بود. لذا نخست با استفاده از توابع جانسون که دارای انعطاف‌پذیری قدرتمندی هستند اقدام به نرمال‌سازی داده‌های ورودی به شبکه عصبی شد. بعد از نرمالیزه و هم‌معیار کردن داده‌های ورودی به شبکه، جهت دستیابی به بهترین ساختار شبکه عصبی مصنوعی ساختارهای مختلفی مورد سنجش قرار گرفتند. در این خصوص با در نظر گرفتن دو الگوریتم آموزشی لونبرگ - مارکوئت و الگوریتم ژنتیک و دو تابع فعال‌سازی لوگ سیگموئید و تانژانت سیگموئید، ۵۶ گروه مدل شبکه عصبی با استفاده از ۵ داده ورودی شامل مقادیر دما، نم نسبی، ساعات آفتابی، فشار هوا، سرعت باد و یک داده خروجی شامل میزان تبخیر حاصل از تشتک تبخیر ایجاد شد. از سوی برای آرایش هر ساختار، هر گروه شبکه با تعداد نرون‌های ۲ تا ۸ برای ۱ و ۲ لایه پنهان آموزش داده شد و در هر سری با استفاده از داده‌های آزمون، شاخص‌های آماری ضریب تعیین (R^2)، مجذور مربعات میانگین خطا^۱ (RMSE) برآورد شدند. به طور کلی می‌توان با سعی و خطا بهترین ساختار برای شبکه‌های عصبی در جهت کاهش مقدار خطا تعیین را نمود. بدین منظور ساختارهای مختلف در تعداد لایه و نرون‌ها مورد ارزیابی و مقایسه توسط معیارهای بیان شده بر روی داده‌های آزمون انجام گرفت.

از این گذشته، مقادیر تبخیر با استفاده از روش پنمن - فائو و رگرسیون خطی چند متغیره نیز برآورد شد. در نهایت به منظور ارزیابی، مقایسه و تعیین میزان خطای نتایج حاصل از شبکه عصبی، معادله پنمن - فائو و رگرسیون چند متغیره خطی، از معیار آماری ضریب تعیین و معیار مجذور میانگین مربعات خطا استفاده شد.

یافته‌ها و بحث

در مطالعه حاضر با بهره‌گیری از داده‌های هواشناختی به مدل‌سازی مصنوعی، خطی و

1 - Root Mean Square Error (RMSE)

تجربی قدرت تبخیر جو به ترتیب با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (الگوریتم ژنتیک و الگوریتم لونبرگ - مارکوئت) رگرسیون خطی چند متغیره و معادله پنمن - فائو پرداخته می‌شود.

جدول‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ نتایج اصل از مدل‌های شبکه عصبی هستند. همچنانکه از این جدول‌ها پیداست نوع تابع، نوع الگوریتم و تعدا نرون‌های بکار گرفته شده بر روی دقت مدل تأثیر دارند. ملاحظه ساختارهای شبکه‌ای با یک لایه پنهان نشان می‌دهد که دقیق‌ترین ساختار براساس هر دو تابع محرک مربوط به ساختار ۱-۴-۵ است که ضریب تعیین و مجذور میانگین مربعات خطا در این ساختار براساس بکارگیری تابع محرک تان‌سیگموئید به ترتیب برابر با ۰/۸۸۴ و ۰/۳۱۱ و براساس بکارگیری تابع محرک لوگ‌سیگموئید به ترتیب برابر با ۰/۸۶۳ و ۰/۶۰۲ بدست آمدند (جدول ۱).

از سویی مقایسه نتایج حاصل از عملکرد دو تابع محرک در کلیه‌ی ساختارهای تک لایه گویایی کارایی دقیق‌تر تابع محرک تان‌سیگموئید نسبت به لوگ‌سیگموئید بوده. به طوریکه خطای پیش‌بینی شبکه عصبی جهت برآورد قدرت تبخیر جو در نتیجه به کارگیری تابع محرک تان‌سیگموئید در قیاس با بکارگیری لوگ‌سیگموئید کاهش می‌یابد.

در مدل‌های با دو لایه پنهان بر اساس الگوریتم آموزشی لونبرگ - مارکوئت نیز مشاهده می‌شود که براساس نوع تابع بکار گرفته شده و تعداد نرون‌های تعبیه یافته دقت مدل تغییر پیدا می‌کند.

جدول (۱) نتایج آماری ساختارهای مختلف شبکه عصبی برای تخمین قدرت تبخیر جو براساس الگوریتم وزن‌دهی مارکوئت - لونبرگ.

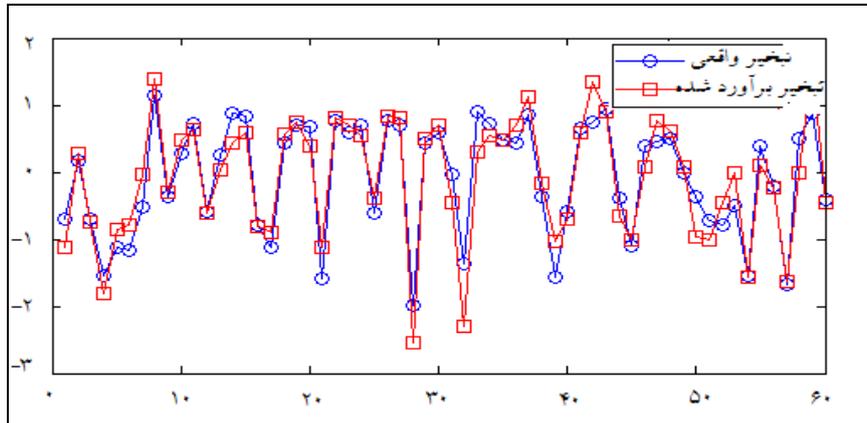
تابع عضویت	ساختار	RMSE	R^2
------------	--------	------	-------

آزمون	آموزش	آزمون	آموزش		
۰/۸۳۶	۰/۸۷	۰/۷۱۶	۰/۴۲۹	۵-۲-۱	تان‌سیگموئید
۰/۸۵۱	۰/۹۰۷	۰/۸۱۷	۰/۲۶۷	۵-۳-۱	تان‌سیگموئید
۰/۸۸۴	۰/۸۷۸	۰/۳۱۱	۰/۵۱۴	۵-۴-۱	تان‌سیگموئید
۰/۸۳۴	۰/۸۷۵	۰/۵۶۸	۰/۴۸۴	۵-۵-۱	تان‌سیگموئید
۰/۸۴۶	۰/۹۱۸	۰/۴۶۳	۰/۴۷۲	۵-۶-۱	تان‌سیگموئید
۰/۷۹۳	۰/۹۱۵	۰/۶۴۲	۰/۳۷۴	۵-۷-۱	تان‌سیگموئید
۰/۷۷۸	۰/۹۰۵	۰/۷۰۹	۰/۴۶	۵-۸-۱	تان‌سیگموئید
۰/۸۳۴	۰/۸۱۳	۱/۳۵	۰/۵۶	۵-۲-۱	لوگ‌سیگموئید
۰/۸۰۵	۰/۹۰۵	۰/۸۸۴	۰/۳۹۶	۵-۳-۱	لوگ‌سیگموئید
۰/۸۶۳	۰/۸۷۵	۰/۶۰۲	۰/۵۱۹	۵-۴-۱	لوگ‌سیگموئید
۰/۸۹۴	۰/۸۲۴	۰/۷۱۳	۰/۶۲۸	۵-۵-۱	لوگ‌سیگموئید
۰/۸۲۸	۰/۹	۰/۷۵	۰/۳۱۶	۵-۶-۱	لوگ‌سیگموئید
۰/۸۴۶	۰/۹۰۴	۰/۶۸۸	۰/۲۴۵	۵-۷-۱	لوگ‌سیگموئید
۰/۸۳۶	۰/۹۰۹	۰/۷۷۵	۰/۳۲۲	۵-۸-۱	لوگ‌سیگموئید

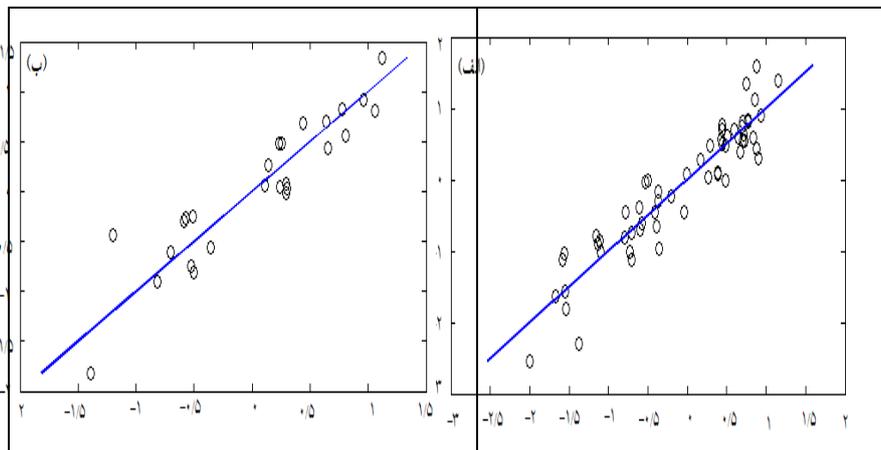
RMSE: مجذور میانگین خطا، R^2 : ضریب تعیین. در ستون ساختار عدد ۱ سمت چپ مین خروجی شبکه که تبخیر است، عدد وسطی نشان‌دهنده تعداد نرون‌های قرار گرفته در لایه پنهان بوده و عدد آخری به مقدار ۵ معرف تعداد متغیرهای هواشناختی ورودی به شبکه عصبی است.

در این مدل‌های با دولایه پنهان برخلاف مدل با یک لایه پنهان، بهترین ساختار مدل بر حسب نوع تابع بکار گرفته شده متفاوت است. به ترتیبی که بهترین ساختار برای تابع محرک تانژانت سیگموئید ۵-۷-۷-۱ با ضریب تعیین ۰/۹۲۴ و مجذور میانگین مربعات خطای ۰/۲۲۷ بدست آمد. بنابراین مدل مذکور قادر است میزان قدرت تبخیر جو را با خطای

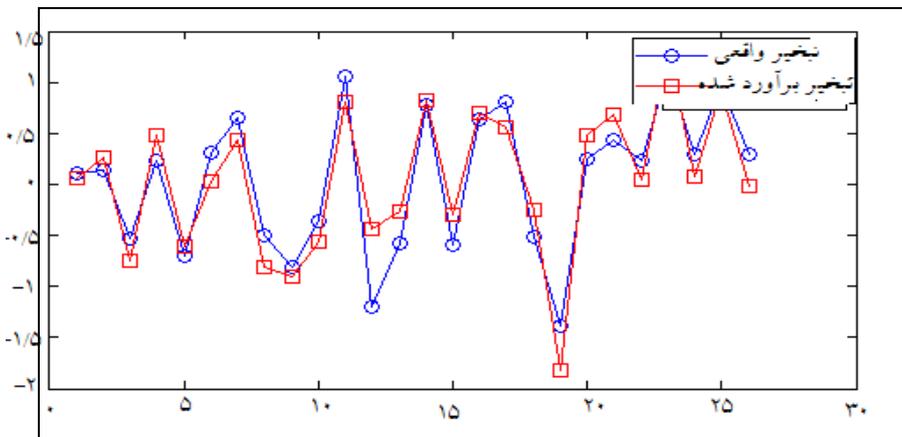
۰/۲۲۷ میلی‌متر در روز پیش‌بینی کند (شکل‌های ۱، ۲ و ۳). بهترین ساختار برای تابع محرک لوگ‌سیگموئید با آرایش ۵-۳-۳-۱ با ضریب تعیین ۰/۹۰۸ و مجذور میانگین مربعات خطای ۰/۲۸۵ محاسبه شد (جدول ۲). نکته جالب توجه در ساختارهای تدوین‌یافته بر مبنای بکارگیری این دو تابع محرک آن است که در ساختارهای با نرون‌های کمتر، لوگ‌سیگموئید نتایج دقیق‌تری ارائه می‌دهد ولی در ساختارهای با نرون‌های ۶ و بیشتر از آن نتایج حاصل از بکارگیری تابع محرک تان‌سیگموئید دقیق‌تر است.



شکل ۱) نمودار مقادیر تخبیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده براساس داده‌های آموزش



شکل ۲) نمودار همبستگی بین مقادیر تبخیر واقعی و شبیه‌سازی شده. الف) براساس داده‌های آموزش، ب) داده‌های آزمون



شکل ۳) نمودار مقادیر تبخیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده براساس داده‌های آزمون

به طور کلی نتایج حاصل از اتخاذ دو لایه پنهان برای هر دو تابع تان و لوگ‌سیگموئید بسیار دقیق‌تر از نتایج ناشی از بکارگیری یک لایه پنهان بوده که نتایج این تحقیق با نتایج مطالعه نوری و همکاران (۱۳۹۱) که در مطالعه خود بیان داشته بودند تغییر در تعداد لایه‌های پنهان شبکه‌های طراحی شده منجر به تصمیم‌گیری قاطعانه‌ای در رابطه با برتری

یک لایه پنهان و یا دو لایه پنهان نمی‌شود و تنها بستگی به پارامترهای ورودی به شبکه دارد، معیار است، زیرا مشخص شد که نتایج حاصل از بکارگیری دو لایه پنهان (در این مورد) بسیار دقیق‌تر از نتایج حاصل از بکارگیری یک لایه پنهان است.

در مدل شبکه عصبی با یک لایه پنهان بر اساس الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک، بهترین ساختار برای هر دو تابع محرک تان و لوگ‌سیگموئید در ساختار ۵-۷-۱ بدست آمد. لذا همانند ساختارهای مدل شبکه عصبی تک لایه با الگوریتم وزن‌دهی لونبرگ - مارکوئت در این مدل‌ها نیز دقیق‌ترین ساختار ناشی از بکارگیری هر دو تابع تان و لوگ‌سیگموئید در ساختار یکسانی بدست آمد (جدول ۳). شایان توجه است که در این مورد، براساس مجذور میانگین خطای بدست آمده دقت هر دو تابع تان و لوگ‌سیگموئید در تمامی ساختارها تقریباً برابر است به طور که در برخی ساختارها تان‌سیگموئید و در برخی دیگر لوگ‌سیگموئید خروجی دقیق‌تری را نشان می‌دهد و به طور دقیق نمی‌توان بیان داشت که در کلیه ساختارها دقت کدامیک از این توابع بر پایه الگوریتم وزن‌دهی ژنتیک بیشتر است (جدول ۳). با این حال در ساختار بهینه ۵-۷-۱ خروجی ناشی از لوگ‌سیگموئید اندکی دقیق‌تر از خروجی تان‌سیگموئید است. مقایسه نتایج حاصل از بکارگیری الگوریتم وزن‌دهی ژنتیک با

جدول ۲) نتایج آماری ساختارهای مختلف شبکه عصبی برای تخمین قدرت تبخیر جو براساس الگوریتم وزن‌دهی مارکوئت - لونبرگ.

R ²		RMSE		ساختار	تابع عضویت
آزمون	آموزش	آزمون	آموزش		
۰/۸۱۸	۰/۸۹۸	۰/۸۷۳	۰/۳۳۲	۵-۲-۲-۱	تان‌سیگموئید
۰/۸۷۹	۰/۸۷۲	۰/۵۷۹	۰/۴۳۱	۵-۳-۳-۱	تان‌سیگموئید
۰/۸۹۴	۰/۸۹	۰/۸۷۴	۰/۳۲۲	۵-۴-۴-۱	تان‌سیگموئید
۰/۸۸۱	۰/۹۰۶	۰/۷۶۱	۰/۳۷۷	۵-۵-۵-۱	تان‌سیگموئید
۰/۸۹	۰/۸۸۲	۰/۳۶۱	۰/۴۷۶	۵-۶-۶-۱	تان‌سیگموئید
۰/۹۲۴	۰/۹۳۵	۰/۲۲۷	۰/۲۴۶	۵-۷-۷-۱	تان‌سیگموئید
۰/۸۹۲	۰/۸۹۲	۰/۴۶۱	۰/۵۹۴	۵-۸-۸-۱	تان‌سیگموئید
۰/۶۳۷	۰/۷۴۷	۰/۵۲۱	۰/۱۰۶	۵-۲-۲-۱	لوگ‌سیگموئید

لوگ‌سیگموئید	۵-۳-۱	۰/۵۳۵	۰/۲۸۵	۰/۸۷۲	۰/۹۰۸
لوگ‌سیگموئید	۵-۴-۱	۰/۷۴۵	۰/۵۵۱	۰/۸۰۶	۰/۹۰۶
لوگ‌سیگموئید	۵-۵-۱	۰/۷۲۱	۰/۳۳۷	۰/۸۵۱	۰/۹۱۹
لوگ‌سیگموئید	۵-۶-۱	۰/۴۴۳	۰/۶۷۱	۰/۸۶۷	۰/۸۸۳
لوگ‌سیگموئید	۵-۷-۱	۰/۵۱۵	۰/۴۷۸	۰/۸۷۸	۰/۸۴۷
لوگ‌سیگموئید	۵-۸-۱	۰/۶۳۷	۰/۶۳۳	۰/۸۳۵	۰/۷۴۴

RMSE مجذور میانگین خطا، R^2 : ضریب تعیین. در ستون ساختار عدد ۱ سمت چپ مبین خروجی شبکه که تبخیر است، دو عدد وسطی نشاندهنده آن هستند که مدل دارای دولایه پنهان است و مقدار آنها مبین تعداد نرون‌های قرار گرفته در هر لایه پنهان بوده. عدد آخری به مقدار ۵ معرف تعداد متغیرهای هواشناختی ورودی به شبکه عصبی است.

نتایج حاصله از الگوریتم وزن‌دهی لونیبرگ - مارکوئت در مدل‌های تک لایه گویایی آن است که برای تابع محرک لوگ‌سیگموئید خروجی‌ها چندان باهم تفاوت ندارند. لیکن براساس تابع محرک لوگ‌سیگموئید، نتایج ناشی از بکارگیری الگوریتم ژنتیک بسیار دقیق‌تر از نتایج حاصل از الگوریتم لونیبرگ - مارکوئت هستند. بنابراین در این مورد الگوریتم ژنتیک توانسته است مدل‌های دقیق‌تری ایجاد نماید.

جدول ۳) نتایج آماری ساختارهای مختلف شبکه عصبی برای تخمین قدرت تبخیر جو براساس الگوریتم وزن‌دهی ژنتیک.

تابع عضویت	ساختار	RMSE		R^2	
		آزمون	آموزش	آموزش	آزمون
تان‌سیگموئید	۵-۲-۱	۰/۶۵۵	۰/۶۰۴	۰/۷۷۸	۰/۷۹۹
تان‌سیگموئید	۵-۳-۱	۰/۴۷۳	۰/۵۱۲	۰/۸۷۴	۰/۸۶۳
تان‌سیگموئید	۵-۴-۱	۰/۳۷۴	۰/۵۱۴	۰/۹۱۱	۰/۸۳۹
تان‌سیگموئید	۵-۵-۱	۰/۵۰۱	۰/۴۰۷	۰/۸۶۹	۰/۹۴۱
تان‌سیگموئید	۵-۶-۱	۰/۴۱۲	۰/۵۴۲	۰/۸۸۴	۰/۹۰۶
تان‌سیگموئید	۵-۷-۱	۰/۵۰۶	۰/۲۹۵	۰/۸۶۱	۰/۹۵
تان‌سیگموئید	۵-۸-۱	۰/۴۶۷	۰/۲۹۹	۰/۸۷	۰/۹۴۳
لوگ‌سیگموئید	۵-۲-۱	۰/۷۳۹	۰/۷۶	۰/۸۹۸	۰/۸۶۷
لوگ‌سیگموئید	۵-۳-۱	۰/۵۲۳	۰/۵۸۴	۰/۸۶	۰/۹۱
لوگ‌سیگموئید	۵-۴-۱	۰/۴۸۱	۰/۳۳۹	۰/۸۸۷	۰/۹۳۶
لوگ‌سیگموئید	۵-۵-۱	۰/۴۱۹	۰/۵۳	۰/۹۰۲	۰/۹۰۵
لوگ‌سیگموئید	۵-۶-۱	۰/۴۲۲	۰/۲۹	۰/۸۹۶	۰/۹۴۵

لوگ سیگموئید	۵-۷-۱	۰/۴۵	۰/۲۸۵	۰/۸۸۴	۰/۹۴۴
لوگ سیگموئید	۵-۸-۱	۰/۴۸	۰/۳۸۴	۰/۸۶	۰/۹۱۶

RMSE: مجذور میانگین خطا، R^2 : ضریب تعیین.

در مدل‌های شبکه عصبی با دو لایه پنهان و الگوریتم آموزشی ژنتیک نیز بهترین ساختار با آرایش ۱-۷-۷-۵ هم برای لوگ سیگموئید و هم برای تانژانت سیگموئید بدست آمد. با این وجود، دقت ساختارهای ناشی از بکارگیری تابع محرک تان سیگموئید به مراتب بیشتر از لوگ سیگموئید است به طوری که میزان خطای ناشی از تابع اولی به مقدار ۰/۳۲ و دومی به مقدار ۰/۵۹ بدست آمد (جدول ۴).

جدول ۴) نتایج آماری ساختارهای مختلف شبکه عصبی برای تخمین قدرت تبخیر جو براساس الگوریتم آموزش ژنتیک

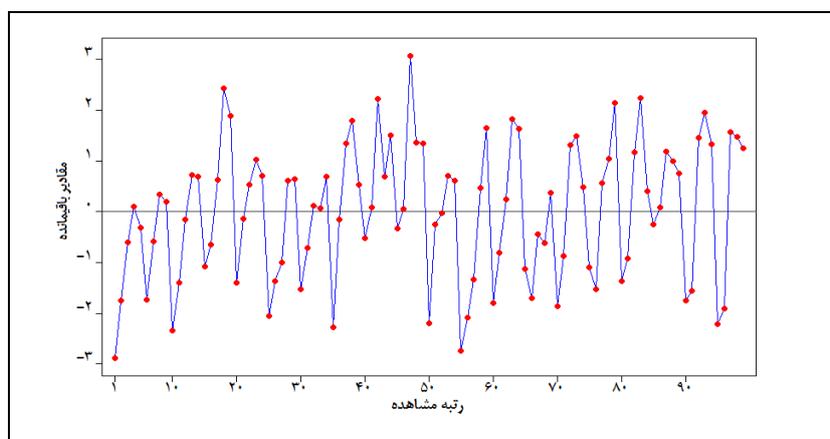
R^2		RMSE		ساختار	تابع عضویت
آزمون	آموزش	آزمون	آموزش		
۰/۹۱۷	۰/۸۵۱	۰/۶۱۱	۰/۶۵۱	۵-۲-۲-۱	تان سیگموئید
۰/۹۱۹	۰/۸۸۸	۰/۳۷۲	۰/۴۶۱	۵-۳-۳-۱	تان سیگموئید
۰/۸۶۷	۰/۸۲۶	۰/۵۷۶	۰/۵۱۴	۵-۴-۴-۱	تان سیگموئید
۰/۸۹	۰/۸۷۵	۰/۴۳۹	۰/۴۶۳	۵-۵-۵-۱	تان سیگموئید
۰/۹۱۴	۰/۸۲۶	۰/۴۸۱	۰/۶۰۸	۵-۶-۶-۱	تان سیگموئید
۰/۹۴۱	۰/۸۷۸	۰/۳۲۲	۰/۴۵۴	۵-۷-۷-۱	تان سیگموئید
۰/۸۸۲	۰/۸۹۹	۰/۵۷	۰/۵۳۳	۵-۸-۸-۱	تان سیگموئید
۰/۹۴	۰/۸۹۲	۰/۷۰۱	۰/۸۷۶	۵-۲-۲-۱	لوگ سیگموئید
۰/۸۱۴	۰/۸۸۵	۰/۷۰۲	۰/۸۶۷	۵-۳-۳-۱	لوگ سیگموئید
۰/۸۳۹	۰/۹۰۷	۱/۰۳	۰/۷۳۷	۵-۴-۴-۱	لوگ سیگموئید
۰/۸۹	۰/۸۶۳	۰/۸۳۹	۰/۸۲۳	۵-۵-۵-۱	لوگ سیگموئید
۰/۸۹	۰/۸۶۳	۰/۸۳۹	۰/۸۲۳	۵-۶-۶-۱	لوگ سیگموئید
۰/۹۱۳	۰/۸۵۳	۰/۵۸۷	۰/۸۳۲	۵-۷-۷-۱	لوگ سیگموئید
۰/۸۹۸	۰/۸۷۸	۰/۹۸۷	۰/۸۲۷	۵-۸-۸-۱	لوگ سیگموئید

RMSE مجذور میانگین خطا، R^2 : ضریب تعیین

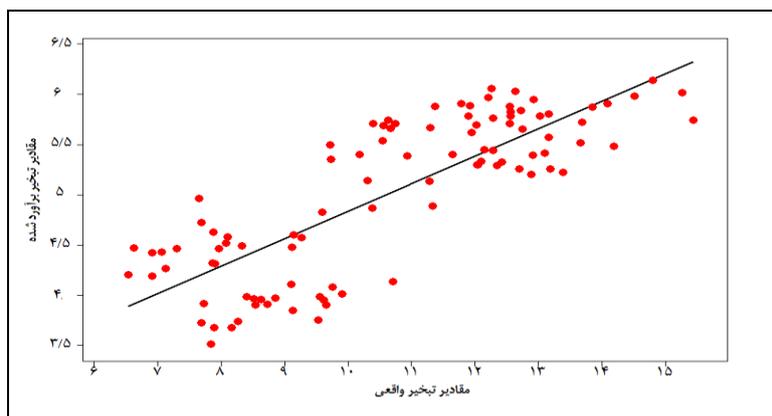
به طور کلی مقایسه نتایج دو لایه پنهان نشان می‌دهد که استفاده از الگوریتم وزن دهی لونیبرگ - مارکوئٹ بسیار مناسب‌تر از الگوریتم ژنتیک است ولی در مدل‌های تک لایه نتایج

حاصل از بکارگیری الگوریتم ژنتیک دقیق‌تر از الگوریتم لونیبرگ - مارکوئت است. به طور کلی کاربرد الگوریتم ژنتیک در مدل‌های با یک لایه پنهان براساس تابع فعال‌سازی لوگ‌سیگموئید قادر به تولید مدل دقیق‌تری نسبت به الگوریتم ژنتیک با تابع فعال‌سازی تان‌سیگموئید و الگوریتم لونیبرگ - مارکوئت با هر دو تابع محرک یاد شده است. همچنین در این مطالعه ضعیف‌ترین عملکرد را مدل‌های با دولایه پنهان با تابع فعال‌سازی لوگ‌سیگموئید و الگوریتم آموزشی ژنتیک ارائه دادند.

میزان قدرت تبخیر با استفاده از معادله پنمن - فائو نیز محاسبه شد که میزان ضریب تعیین این مقادیر برآورد شده با مقادیر واقعی مشاهده‌ای به مقدار $0/62$ (شکل ۴) و مجذور میانگین مربعات خطا به مقدار $1/34$ میلی‌متر در رور بدست آمد. همچنانکه از شکل ۴ بر می‌آید مقادیر باقیمانده بین تبخیر محاسباتی و تبخیر واقعی در بسیاری از سری‌های زمانی نسبتاً بزرگ بوده است.



شکل ۴) نمودار پراکنش مقادیر باقیمانده در مقابل مقادیر مشاهده‌ای



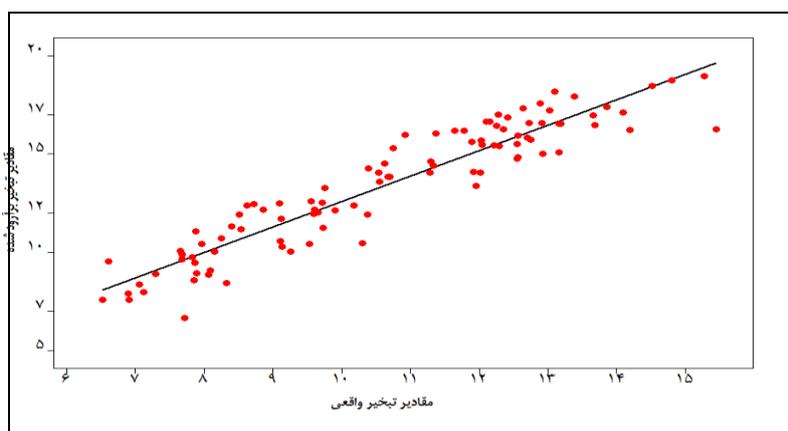
شکل ۵) نمودار همبستگی بین مقادیر تبخیر برآورد شده توسط معادله پنمن فائو و تبخیر واقعی.

با بکارگیری رگرسیون چند متغیر خطی، مدل خطی میزان قدرت تبخیر جو در ارتباط با متغیرهای هواشناختی با ضریب تعیین $0/88$ بدست آمد. مجذور میانگین خطای این مدل به مقدار $0/79$ محاسبه شد. بدین ترتیب معادله رگرسیون خطی قادر است میزان قدرت تبخیر جو تبریز را با خطای $0/79$ میلی‌متر در روز پیش بینی کند (معادله ۱).

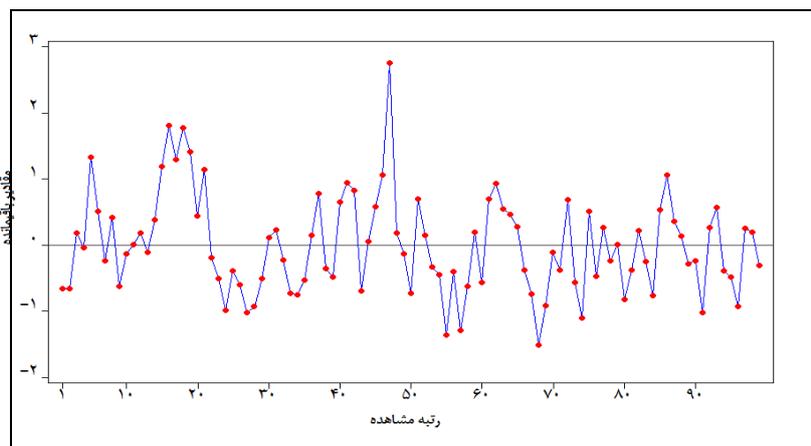
$$E = 172 + 0.34T - 0.0402H - 0.201P + 0.694W + 0.202S \quad (1)$$

در رابطه فوق E معرف تبخیر پیش‌بینی شده برحسب میلی‌متر در روز، T : دما بر حسب سلسیوس، H : نم‌نسبی به درصد، P : فشار هوا برحسب میلی‌بار، W سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه و S ساعات آفتابی است.

در این راستا مقایسه ضرایب آماری و شکل‌های ۴ و ۵ با ۶ و ۷ نشان از دقت بیشتر نتایج حاصل از رگرسیون خطی چند متغیره در قیاس با معادله پنمن فائو دارد، همچنین میزان تبخیر حاصل از مدل رگرسیونی، بیشتر از تبخیر واقعی و در عین حال تبخیر محاسبه‌شده از مدل پنمن - فائو کمتر از تبخیر واقعی بدست می‌آید.



شکل ۶ نمودار همبستگی بین مقادیر تبخیر برآورد شده توسط مدل رگرسیون چندمتغیره خطی و تبخیر واقعی



شکل ۷ نمودار پراکنش مقادیر باقیمانده در مقابل مقادیر مشاهده‌ای

نتیجه‌گیری

در این مطالعه با بهره‌گیری از عناصر هواشناختی و بکارگیری شبکه عصبی مصنوعی، به برآورد مقدار قدرت تبخیر جو پرداخته شد. در این خصوص با در نظرگیری یک و دو لایه پنهان و دو تابع فعال‌سازی تان و لوگ‌سیگموئید در لایه‌های پنهان، از دو الگوریتم آموزشی

لونبرگ - مارکوئت و الگوریتم آموزشی ژنتیک جهت آموزش شبکه استفاده شد.

بدین ترتیب ۶۵ مدل شبکه عصبی ایجاد شد. مقایسه و ارزیابی این مدل‌ها با استفاده از معیارهای آماری ضریب تعیین، مجذور میانگین خطا و میانگین خطا حاکی از آن است که دقت مدل‌ها در پیش‌بینی و مدل‌سازی قدرت تبخیر جو وابسته به نوع تابع محرک، نوع الگوریتم بهینه‌سازی و تعداد لایه‌های پنهان و تعداد نرون‌های بکارگرفته شده است. به طوری که در مدل‌های با یک لایه پنهان و الگوریتم بهینه‌سازی لونبرگ - مارکوئت، با وجود آنکه مدل با آرایش ۵-۴-۱ به عنوان دقیق‌ترین مدل برای هر دو تابع محرک بدست آمد اما دقت مدل تابع تان‌سیگموئید نسبت به مدل لوگ‌سیگموئید بیشتر بود. از سویی در این مدل‌های تک لایه بر اساس الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک نیز یک مدل با آرایش یکسان ۵-۷-۱ برای هر دو تابع محرک بدست. اما در این مورد دقت مدل ایجاد شده بر اساس تابع محرک لوگ‌سیگموئید بیش از تابع محرک تان‌سیگموئید بود.

خروجی‌های مدل‌های با دولایه پنهان، بسیار متفاوت از خروجی‌های مدل‌های تک لایه بود. در این خصوص مطالعات گذشته که اذعان نموده بودند دقت مدل وابستگی به تعداد لایه پنهان ندارد در این مورد بخصوص رد شد. وانگهی بررسی مدل‌های تدوین یافته براساس دو لایه پنهان و الگوریتم بهینه‌سازی لونبرگ - مارکوئت نشان داد که دقیق‌ترین مدل برای هر تابع بر خلاف مدل‌های تک لایه در ساختار متفاوتی ایجاد شده است به طوری که مدل با آرایش ۵-۳-۳-۱ و ۵-۷-۷-۱ به ترتیب به عنوان دقیق‌ترین مدل برای تان و لوگ سیگموئید بدست آمدند. خروجی‌های ناشی از مدل‌های دولایه پنهان با الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک حاکی از این است که در این مورد نیز دقیق‌ترین مدل بر اساس دو تابع محرک در ساختارهای متفاوتی ایجاد شده است.

از سویی، میزان تبخیر با استفاده از معادله پنمن - فائو محاسبه شد که میزان خطای محاسباتی آن نسبت به داده‌های واقعی به مقدار ۱/۳۴ بدست آمد. همچنین با کاربرد معادله رگرسیون خطی چند متغیره میزان تبخیر برآورد شد که میزان خطای آن به مقدار ۰/۷۹ میلی‌متر در روز است.

به طور کلی مقایسه و ارزیابی کلیه ساختارهای شبکه عصبی نشان می‌دهد که مدل با آرایش ۵-۷-۷-۱ دقیق‌ترین مدل در بین ۵۶ گروه شبکه عصبی است که براساس الگوریتم بهینه‌سازی لوببرگ - مارکوئت و تابع محرک تان‌سیگموئید تولید شده است بنابراین جهت مدل‌سازی قدرت تبخیر جو در ایستگاه سینوپتیک تبریز بسیار مناسب است از ساختار یاد شده استفاده شود زیرا برمبنای این ساختار می‌توان میزان قدرت یا پتانسیل تبخیر جو تبریز را با خطای ۰/۲۲۷ میلی‌متر در روز در نیمه گرم سال پیش بینی نمود. مقایسه نتایج حاصل از این سه روش نشان از کارایی مناسب و دقیق‌تر شبکه عصبی مصنوعی در مقایسه با رگرسیون خطی و معادله پنمن - فائو در ایستگاه تبریز است.

منابع

- ثنائی نژاد سید حسین؛ نوری، سمیرا و هاشمی نیا، سید مجید (۱۳۹۰)، برآورد تبخیر - تعرق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در منطقه مشهد. *نشریه آب و خاک (علوم صنایع و کشاورزی) مشهد*، جلد ۲۵، شماره ۳، صص ۵۴۷-۵۴۰.
- جهانبخش، سعید؛ موحدانش، علی اصغر و مولوی، واحد (۱۳۸۰)، تحلیل مدل‌های برآورد تبخیر - تعرق برای ایستگاه هواشناسی تبریز، *مجله دانش کشاورزی*، جلد ۱۱، شماره ۲، صص ۵۱-۶۵.
- دانشفراز، رسول (۱۳۹۴)، تحلیل حساسیت پارهای موثر بر میزان تبخیر روزانه با استفاده از الگوریتم Garson و شبکه عصبی مصنوعی (مطالعه موردی: شهر تبریز)، *نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی دانشگاه تبریز*، شماره ۵۴، صص ۱۴۲-۱۲۷.
- رحیمی خوب، علی و محمودی، علی (۱۳۹۰) برآورد تبخیر - تعرق واقعی از سطح حوضه آبریز با استفاده از مدل‌های شبکه عصبی و حداقل داده‌های هواشناسی - مطالعه موردی حوضه معرف امامه، *نشریه تحقیقات منابع آب*، شماره ۴، صص ۶۱-۵۱.
- رمنی‌راس، ژان (۱۳۶۳)، *اصول هیدرولوژی مهندسی*، جلد اول، برگردان حسین صدقی، انتشارات مرکز نشر و ترجمه امور آب وزارت نیرو - تهران، چاپ سوم.
- سلطانی، جابر؛ مقدم نیا، علیرضا؛ پیری، جمشید؛ میرمراذهی، جواد (۱۳۹۲)، مقایسه کارایی مدل‌های تلفیقی NN-ARX و ANFIS با GA-GT جهت تخمین تبخیر روزانه از تشت در شرایط اقلیمی خشک و گرم بلوچستان، *نشریه آب و خاک مشهد*، شماره ۲، صص ۳۸۱-۳۹۳.
- قبائی‌سوق، محمد؛ مساعدی ابوالفضل، حسام؛ و هزار جریبی ابوطالب، موسی (۱۳۸۹)، ارزیابی تأثیر پیش پردازش پارامترهای ورودی به شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از روش‌های رگرسیون گام به گام و گاما تست به منظور تخمین سریع تر تبخیر - تعرق روزانه، *نشریه آب و خاک*، شماره ۳، صص ۶۲۴-۶۱۰.
- کوچک‌زاده، مهدی و بهمنی، عارف (۱۳۸۴)، ارزیابی عملکرد شبکه‌های عصبی مصنوعی در کاهش پارامترهای مورد نیاز، جهت برآورد تبخیر و تعرق، *مجله علوم کشاورزی*، صص ۸۷-۹۶.

- نوری، سمیرا؛ قاله‌ری، غلامعباس و ثنایی‌نژاد، سید حسین (۱۳۹۲)، مدل‌سازی تبخیر - تعرق گیاه پتانسیل با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی با حداقل متغیرهای اقلیمی در ایستگاه سینوپتیک مشهد، *نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، شماره ۵، ۱۷۸-۱۶۳.
- ولیزاده کامران، خلیل (۱۳۹۳)، برآورد تبخیر تعرق پتانسیل در آذربایجان شرقی به روش استفنز با استفاده از GIS، *نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی دانشگاه تبریز*، شماره ۴۹، صص ۳۳۴-۳۱۷.

- Rosen, B.E. and Goodwin, J.M. 1997. Optimizing Neural Networks Using Very Fast Simulated Annealing, *Neural, Parallel & Scientific Computation*, 383-392.
- Landeras, G., Ortiz-Barredo, A. and Lopez, 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), *Journal of Agricultural Water Management*, 95, 553- 565.
- Sanford, W.A., Selnick, D.L., 2013, Estimation of Evapotranspiration across the conterminous United State using a regression with climate and land-cover data, *J: American Water Resources Association*, Vol: 49, No 1: 217-230.
- Trajkovic, S., Todorovic, B., and Stankovic, M. 2003. Forecasting of reference evapotranspiration by artificial neural networks. *J. of Irrig. Drain. Eng. ASCE*. 129: 6. 454-457.