

برآورد تبخیر و تعرق ماهیانه به کمک مدل شبکه عصبی فازی و مدل رگرسیون چندگانه و مقایسه نتایج آن‌ها با داده‌های واقعی فائو-پنمن-مانتیس

محمد احسانی^۱، رضا احتشام راثی^{۲*}

۱. استادیار گروه مهندسی صنایع، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک
۲. استادیار گروه مدیریت صنعتی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین

(تاریخ دریافت: ۹۵/۰۳/۰۵، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده: ۹۸/۰۱/۱۹، تاریخ تصویب: ۹۸/۰۲/۰۳)

چکیده

در دهه‌های اخیر، به دلیل اهمیت یافتن مسئله آب و افزایش تمایل به محاسبه مقدار رواناب حاصل از بارش، توسعه و اجرای روش‌های مناسب برای پیش‌بینی آن با توجه به داده‌های بارش به مسئله‌ای ضروری تبدیل شده است. آگاهی از میزان تبخیر و تعرق یا آب مصرفی گیاه، اساس برنامه‌ریزی صحیح آبیاری به‌شمار می‌آید. یکی از مهم‌ترین روش‌های بهبود مدیریت مصرف آب، به‌ویژه در بخش کشاورزی که سهم عمده مصرف آب را در کشور دارد، تخمین دقیق آب مصرفی گیاه است که وابستگی مستقیمی با میزان «تبخیر و تعرق» در گیاهان دارد؛ بنابراین برآورد تبخیر و تعرق به دلیل اعمال برنامه‌های صحیح مدیریتی در بخش منابع آب ضرورتی انکارناپذیر است. روش‌های بسیاری برای پیش‌بینی تبخیر و تعرق وجود دارد؛ از جمله روش مرجع فائو-پنمن-مانتیس. در این زمینه، پژوهش‌های متعددی در داخل کشور انجام شده است. براین اساس بیشتر پیش‌بینی‌ها مبتنی بر روش‌های تجربی بوده و کمتر از روش‌های نوین استفاده شده است. در این پژوهش، نتایج پیش‌بینی تخمیر و تعریق دو روش شبکه‌های عصبی مصنوعی و رگرسیون درختی مقایسه شده است. همچنین به‌منظور ارزیابی کارایی، روش‌های میانگین درصد خطا، میانگین مربعات خطا، شاخص پراکندگی و پارامتر انحراف کاربرد داشته است.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی تبخیر و تعرق، رگرسیون درختی، شبکه فازی، مدیریت مصرف آب.

مقدمه

پیش‌بینی می‌کنند در دهه‌های آینده، کمبود آب در مقیاس جهانی رخ خواهد داد؛ از این رو ضرورت این ماده حیاتی بیش از پیش آشکار می‌شود. به همین دلیل بر اهمیت استفاده از آب به صورت کارا تأکید خواهد شد [۳]. شاید نامیدن دهه پیش‌رو به‌عنوان دهه آب، مهر تأییدی بر این امر باشد [۴].

اکنون این پرسش اساسی مطرح می‌شود که آیا در حال حاضر نحوه مدیریت منابع آبی پاسخگوی پرسش‌های مرتبط با توسعه پایدار بخش‌های گوناگون تولید از جمله کشاورزی است؟ بنابراین بحث مدیریت منابع آب در بخش کشاورزی، آن هم به صورت اجرایی یکی از دغدغه‌های برنامه‌ریزان است که به پژوهش‌های شفاف در این زمینه نیاز دارد. وجود انبوه متغیرهای تأثیرگذار در تصمیم‌گیری، مدیران بخش کشاورزی را بر آن داشته است تا همواره به دنبال شناسایی و به‌کارگیری راهکارهای مناسب برای تصمیم‌گیری کارآمد باشند. بروز فواصل عملکردی در

در زنجیره طبیعت، آب به‌شکلی مستقیم از سطح خاک یا گیاه به داخل اتمسفر وارد می‌شود. انتقال آب از سطح خاک و خروج آن از گیاه را تعرق می‌گویند. این دو پدیده ماهیت تبخیری دارند و چون تفکیک آن‌ها از یکدیگر امکان‌پذیر نیست، تبخیر-تعرق نام‌گذاری شده‌اند. تخمین دقیق مقدار تبخیر و تعرق، اولین و مهم‌ترین قدم در طراحی، مدیریت و برنامه‌ریزی سیستم‌های آبیاری و سایر سیستم‌های توزیع و کاربرد آب، محاسبه تلفات تبخیری از سطح دریاچه‌ها و سایر منابع آب‌های سطحی، اجرای مدل‌های هیدرولوژیکی و آگروهیدرولوژیکی، مطالعات بیلان آبی و زیست‌محیطی، مدیریت منابع آب و... است [۱]. افزایش روزافزون جمعیت جهان و نیاز شدید به مواد غذایی، همچنین محدودیت منابع آب و خاک قابل‌دسترسی، لزوم برنامه‌ریزی برای استفاده صحیح‌تر از منابع آب و خاک را دوچندان می‌کند [۲]. متخصصان

احمدزاده قره‌گویز و همکاران (۱۳۸۹) به «مقایسه سیستم‌های هوش مصنوعی در تخمین میزان تبخیر-تعرق گیاه مرجع در مناطق بسیار خشک ایران» پرداختند. در روش‌های فوق، دقت مدل شبکه عصبی تنها با سه پارامتر ورودی شامل تشعشع خورشیدی، دمای حداکثر هوا و سرعت باد، از همه روش‌های تجربی استفاده‌شده بیشتر است. همچنین روش فائو بلانی-کریدل از دیگر روش‌های تجربی دقت بیشتری دارد [۱، ۲].

حسن‌پور و علیان‌نژاد (۱۳۹۷) روشی را برای مدل‌سازی سیستم با مجموعه داده‌های کوچک به کمک شبکه عصبی ارائه دادند. برای این منظور از معادله ریاضی مشخصی استفاده کردند تا بهینه‌سازی روی سری زمانی غیرخطی متغیر با زمان صورت بگیرد. همچنین مجموعه داده‌های واقعی از صنعت کشاورزی را نیز ارزیابی کردند. نتایج آزمایش‌ها با معیار میانگین مربعات خطا تحلیل شده است [۷].

براساس پژوهش ترابی و همکاران (۱۳۹۴) داده‌های لحظه‌ای واحدهای نیروگاه، پس از فازی‌شدن وارد سیستم خبره فازی می‌شوند. سپس با توجه به شرایط واحدها، دو مقیاس به‌عنوان بازدهی و ریسک برای هر واحد مشخص، و به‌صورت غیرفازی‌شده در خروجی سیستم خبره ارائه می‌شود. در مرحله بعد، این پارامترها در مدل برنامه‌ریزی ریاضی دوهدفه به‌منزله ضرایب معادله‌ها به‌کار می‌روند. پس از حل مدل ریاضی نیز بهترین ترکیب ممکن از توزیع بار واحدهای نیروگاهی، براساس بازدهی و ریسک آن‌ها به برنامه‌ریزی ارائه می‌شود [۸].

لاندراس و همکاران (۲۰۰۸) به «مقایسه بین مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و روابط تجربی و نیمه‌تجربی برای محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع در شمال اسپانیا» پرداختند و نتیجه گرفتند نتایج مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی بهتر از معادلات واسنجی‌شده منطقه‌ای است.

هو و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی «کاربرد مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی برای برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع در یک منطقه خشک چین» پرداختند. در این پژوهش، با استفاده از داده‌های ۵۰ ساله هوا-اقلیم سه ایستگاه در جنوب غرب چین، مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی برای برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع آموزش داده و آزمایش شد [۲-۵، ۱۴].

تصمیم‌گیری، انحراف چشمگیر نتایج تصمیم‌ها با هدف‌گذاری و تصمیم‌گیری‌ها، ناکارآمدی در برنامه‌ریزی، محیط‌های پویا و... از جمله چالش‌هایی است که مدیران امروزی را بر آن داشته تا ابزارهایی در اختیار داشته باشند و بتوانند تصمیم‌گیری کنند [۵]. به همین دلایل، از روش‌هایی برای پیش‌بینی استفاده می‌شود که به کمک آن‌ها تخمین‌ها به واقعیت نزدیک‌تر و خطاها بسیار کمتر می‌شود. بیشتر پژوهش‌های صورت‌گرفته با مدل‌های سری زمانی، به تعیین مدل مناسب یا تخمین پارامترهای مدل پیشنهادی محدود است؛ درحالی‌که برنامه‌ریزی آبیاری و مدیریت آن به پیش‌بینی‌های پذیرفته از تبخیر-تعرق نیاز دارد. اطلاع‌نداشتن از اطلاعات جوی دوره‌های آبی و دقت بسیار مدل‌های غیرخطی مبتنی بر گذشته در پیش‌بینی تبخیر-تعرق موجب به‌کارگیری مدل شبکه عصبی شده است؛ بنابراین در پژوهش حاضر، با استفاده از داده‌های هواشناسی ایستگاه اراک، میزان تخمین و تعرق به‌کمک روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون درختی پیش‌بینی شده است.

پیشینه پژوهش

پیش‌بینی یکی از مباحث مهمی است که نظر مدیران و برنامه‌ریزان را در مسائل گوناگون مدیریتی از جمله مدیریت منابع آب به خود جلب کرده است [۶]. در خارج از کشور نیز نمونه‌هایی از پیش‌بینی‌های تبخیر و تعرق صورت گرفته است. در ادامه به برخی از پژوهش‌های داخلی و خارجی اشاره می‌شود.

علیزاده و همکاران (۱۳۸۳) در «ارزیابی روش‌های برآورد تبخیر-تعرق در مناطق خشک ایران» به مقایسه تبخیر-تعرق اندازه‌گیری شده از لایسیمتر وزنی و برآوردشده به روش‌های گوناگون پرداختند و نتیجه گرفتند در ایستگاه مرجع روش‌های پنمن-مانتیس، پنمن فائو اصلاح‌شده بهترین برآورد را دارد و روش جنسن-هیز، با کمترین دقت همراه است. در ایستگاه غیرمرجع به‌ترتیب روش‌های پرستلی-تایلور-پنمن (۱۹۴۸) و بلانی-کریدل اصلاح‌شده فائو برآوردهای دقیق‌تری برای تبخیر-تعرق ارائه و بالعکس روش پنمن-کیمبرلی (۱۹۷۲) با کمترین دقت همراه بوده است [۱].

پیش‌بینی و برآورد آن‌ها عمل می‌کند. دلیل برتری این روش بر مدل‌های دیگر، غیرخطی بودن مدل است که برای پیش‌بینی پدیده مذکور مناسب است. میزان ضریب هم‌بستگی و ضریب تبیین بالا میان مقادیر واقعی و برآوردشده در مدل، دلیلی بر این ادعاست. همچنین تعداد و ترکیب ورودی‌ها برای آموزش و آزمایش نیز با نرم‌افزارهای هوش مصنوعی تعیین شده است.

باید توجه داشت روش‌های فائو-پنمن-مانتیس و شبکه‌های عصبی مصنوعی، نتایج بهتری از سایر روش‌ها دارند که در ادامه به معرفی روش‌های استفاده‌شده در پژوهش حاضر می‌پردازیم.

روش فائو-پنمن-مانتیس

رابطه پنمن به کمک مانتیس به منظور محاسبه مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل یا تبخیر و تعرق استاندارد اصلاح شد. این روش نیازمند داده‌های تابش، دما، رطوبت و سرعت باد است و با درجه اعتماد زیاد در دامنه وسیعی از مناطق و اقلیم‌ها برآورد صحیحی از تبخیر و تعرق گیاه مرجع ارائه می‌کند [۵].

در تدوین معادله پنمن-مانتیس فرض شده است گیاه چمن در سطح وسیع و متراکم کشت شده است. ارتفاع چمن نیز به‌طور یکنواخت ۰/۱۲ متر و کاملاً بر سطح زمین سایه انداخته است و بدون کمبود آب تبخیر و تعرق می‌کند. با توجه به این فرضیه‌ها، جریان افقی هوا و شار روزانه گرمای خاک ناچیز محسوب می‌شود و از آن‌ها صرف‌نظر شده است. معادله ترکیبی پنمن مانتیس به صورت رابطه ۱ است:

$$\lambda ET_o = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \left(\frac{e_s - e_a}{r_a} \right)}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right)} \quad (1)$$

که ET_o تبخیر و تعرق گیاه مرجع (mm/day)، G چگالی شار گرمای خاک (MJ m² day⁻¹)، R_n تشعشع خالص جذب‌شده در سطح زمین (MJ/m² /day)، e_s فشار بخار اشباع در دمای متوسط (KPa)، e_a فشار بخار هوا (KPa)، $e_s - e_a$ کمبود فشار بخار اشباع (KPa)، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع با دما (KPa/oC) و γ ضریب ثابت

آکسوی و داهامشه (۲۰۰۹) با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی، بارش ماهانه اردن را پیش‌بینی کردند و نتیجه گرفتند در سه ایستگاه مورد مطالعه با توجه به معیارهای مدنظر مانند ضریب تعیین میانگین مربع خطاها و... بهترین مدل، مدل انتشار و پس‌انتشار روبه‌جلوست. همچنین در مطالعه‌ای دیگر (۲۰۰۹) با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، بارش ماهانه مناطق خشک اردن را پیش‌بینی کردند. آن‌ها برای این منظور از مدل و الگوریتم پس‌انتشار روبه‌جلو استفاده کردند و به مقایسه نتایج رگرسیون چندمتغیره پرداختند. براساس نتایج، شبکه‌های عصبی مصنوعی نتایج بهتری را رگرسیون چندمتغیره ارائه کردند [۱۶].

ماترتا (۲۰۰۴) با استفاده از ترکیب شبکه‌های عصبی مصنوعی و منطق فازی موفق، مدلی را ساخت که می‌توانست با دراختیارداشتن آمار بارندگی و برخی ویژگی‌های فیزیکی حوضه، رواناب را در زمانی مناسب پیش‌بینی کند و برای ایجاد سیستم‌های هشدار سیل کاربرد داشته باشد. وی صحت داده‌های پیش‌بینی‌شده را خوب برآورد کرد [۷].

در این مطالعه، توانایی شبکه عصبی مصنوعی و سیستم عصبی-فازی در پیش‌بینی تبخیر و تعرق حاصل از بارش مقایسه شد. فرضیه‌ها یا پرسش‌های پژوهشی در این پژوهش به شرح زیر است.

آیا می‌توان به کمک تکنیک‌های جدید مبتنی بر هوش مصنوعی از جمله شبکه عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی به مدل‌سازی پیش‌بینی تبخیر و تعرق پرداخت؟

کدام یک از دو تکنیک ذکرشده در مدل‌سازی پیش‌بینی تبخیر و تعرق توانایی بیشتری دارد؟

در پژوهش‌های پیشین، بیشتر روش هوش مصنوعی یک یا چند روش سنتی مقایسه می‌شد، اما در این پژوهش، به استناد مطالعات سایر پژوهشگران، مصاحبه با خبرگان (با مدرک کارشناسی ارشد و حداقل پانزده سال سابقه) پارامترهای پدیده اقلیمی مانند بارش، دما، تبخیر، تعرق، فشار و... شناسایی شدند که روندی غیرخطی دارند و طی زمان تغییر می‌کنند؛ بنابراین به نظر می‌رسد شبکه‌های عصبی مصنوعی، بهتر از مدل‌های دیگر برای

(۶)

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$$

ETo تبخیر و تعرق گیاه مرجع (mm/day)، G چگالی شار گرمای خاک (MJ m² day⁻¹)، T دمای متوسط هوا در ارتفاع دومتری (درجه سانتیگراد)، Rn تشعشع خالص جذب شده از سوی سطح زمین (MJ/m² /day) که با استفاده از ساعات واقعی آفتاب روزانه، روز از سال و موقعیت جغرافیایی ایستگاه برآورد می‌شود. U2 میانگین سرعت باد در ارتفاع دومتری (متر بر ثانیه)، es فشار بخار اشباع در دمای متوسط (KPa، ea)، فشار بخار هوا (KPa)، ea-es کمبود فشار بخار اشباع (KPa)، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع با دما (KPa/oC) و γ ضریب ثابت سایکرومتریک (KPa/oC) است. با اجزای گوناگون معادله فائو-پنمن-مانتیس مشخص شد که مقدار تبخیر و تعرق تابعی از مجموعه عوامل گوناگون اقلیمی، یعنی دما (T)، رطوبت (H)، ساعات آفتابی (n) و سرعت باد (U2m) است [۷] که در رابطه ۷ نشان داده شده است:

$$ET_o = f(T, H, n, U_2m) \quad (7)$$

این عوامل به همراه عرض جغرافیایی (φ) و ارتفاع از سطح دریای آن محل (Z) به تعیین مقدار تبخیر و تعرق مرجع می‌انجامد. برخی اجزای معادله فائو-پنمن-مانتیس (Δ, γ, Rn, ea, ed) به طور مستقیم یا غیرمستقیم با عوامل اقلیمی مذکور مرتبط هستند و به کمک آن‌ها محاسبه می‌شوند.

سیستم استنتاج عصبی-فازی

در میان روش‌های نوین مدل‌سازی، سامانه‌های فازی جایگاه ویژه‌ای دارند. توانایی اجرای دانش بشری با استفاده از مفاهیم برچسب‌های زبانی و قواعد فازی، غیرخطی بودن و قابلیت سازش‌پذیری این سیستم‌ها و دقت بهتر آن‌ها در مقایسه با سایر روش‌ها در شرایط محدودیت داده‌ها، از جمله مهم‌ترین ویژگی‌های این سیستم‌هاست [۹].

نکته مهم منطق فازی، امکان برقراری ارتباط فضای ورودی به فضای خروجی است. سازوکار اولیه برای این کار نیز فهرستی از کلمات اگر-آنگاه است که قانون نامیده

سایکرومتریک (KPa/oC)، ρa میانگین جرم مخصوص (دانسیته) هوا در فشار ثابت، cp گرمای ویژه هوا، rs مقاومت سطحی (ظاهری) و ra مقاومت آئرودینامیک است [۵، ۶]. انتقال گرما و بخار آب از سطح تبخیر به هوای بالای پوشش گیاهی مقاومت آئرودینامیک به صورت رابطه ۲ است:

$$r_a = \frac{\ln \left[\frac{Z_m - d}{Z_{om}} \right] \ln \left[\frac{Z_h - d}{Z_{oh}} \right]}{k^2 u_z} \quad (2)$$

مقاومت سطحی پوشش گیاهی کامل، به صورت رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

$$r_s = \frac{r_1}{LAI_{active}} \quad (3)$$

که در آن rs مقاومت سطحی (ظاهری) برحسب ثانیه بر متر، r1 مقاومت روزنه‌ای برگ به طور کامل به سوی نور برحسب ثانیه بر متر، LAIactive نمایه سطح برگ فعال به سوی نور برحسب مترمربع است. نمایه سطح برگ یک نسبت است. همچنین مساوی با مقدار سطح برگ‌ها (تنها سمت رو به بالا) در هر واحد سطح خاک زیرین و برحسب مترمربع سطح برگ بر مترمربع سطح خاک است. مقادیر نمایه سطح برگ برای گیاهان گوناگون بسیار متغیر محسوب می‌شود، اما رقمی میان ۳ تا ۵ برای بسیاری از گیاهان بالغ با رشد کامل کاربردی عمومی داد. برای یک گیاه مشخص، نمایه سطح برگ سبز در طول دوره رشد تغییر می‌کند و به طور معمول پیش از گل‌دهی یا هنگام آن به بیشترین مقدار می‌رسد. همچنین نمایه سطح برگ به تراکم کشت و نوع گیاه بستگی دارد. با فرض اندازه‌گیری سرعت باد، دما و رطوبت هوا در ارتفاع استاندارد دومتری (Zm=Zh=2m) و مقاومت‌های آئرودینامیک و سطحی عبارت‌اند از روابط ۴ و ۵:

$$r_s = 70sm^{-1} \quad (4)$$

$$r_a = \frac{208}{u_2} sm^{-1} \quad (5)$$

با استفاده از معادله اولیه پنمن-مانتیس، معادله‌های مقاومت آئرودینامیک و مقاومت سطحی، تبخیر و تعرق مرجع با روش فائو-پنمن-مانتیس به صورت رابطه ۶ برآورد می‌شود:

به دست آمده از شبکه و خروجی واقعی است. در مرحله آموزش، با اصلاح پارامترهای درجه عضویت براساس میزان خطای پذیرفته، مقادیر ورودی به مقادیر واقعی نزدیک تر می شوند. روش آموزش اصلی در این سامانه «پس انتشار خطا» است. در این روش با استفاده از «الگوریتم شیب نزولی خطا» مقدار خطا به سوی ورودی ها پخش و پارامترها تصحیح می شوند. در آموزش شبکه عصبی-فازی موارد زیر مدنظر هستند:

- الف) انتخاب اطلاعات برای آزمون و آموزش باید به صورت تصادفی باشد.
- ب) توانایی شبیه سازی اطلاعاتی که خارج از دامنه اطلاعات آموزش باشد در مدل وجود ندارد.
- ج) اطلاعات ورودی به مدل برای حصول نتایج بهتر باید نرمال شوند.
- د) هر چه تعداد داده های آموزش مدل بیشتر باشد، مدل بهتر آموزش می بیند [۱۰ و ۱۱].

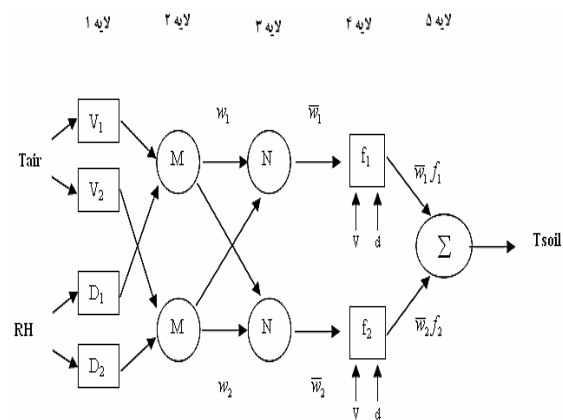
مدل درختی

مدل درختی از جمله روش های هوش مصنوعی است که بیانگر شیوه نوینی برای پیش بینی ها از جمله پیش بینی مقدار تبخیر و تعرق با استفاده از ابزارهای پویا و بر پایه و اساس تصمیم درختی است که در این مدل، تبخیر و تعرق به عنوان تابعی از متغیرهای پیش بینی کننده سنجیده می شود. تفاوت مدل درختی با روش های «تجزیه و تحلیل تمایزی» این است که در روش های تمایزی، ترکیب خطی متغیرهای پیش بینی کننده برای محاسبه «مقادیر عددی طبقه بندی» یا احتمال وقوع پیامد استفاده می شود، اما در این روش مجموعه ای از «شرط های منطقی» به صورت «الگوریتم با ساختار درختی» برای طبقه بندی یا پیش بینی پیامدی به کار می رود. دو مزیت اساسی استفاده از این روش، سهولت در تفسیر نتایج و ناپارامتری و غیرخطی بودن این مدل است؛ بنابراین در این مدل به پیش فرض رابطه خطی میان متغیرهای پیش بینی کننده و پیامد نیازی نیست [۱۲].

درخت تصمیم

درخت تصمیم درختی است که در آن نمونه ها به نحوی

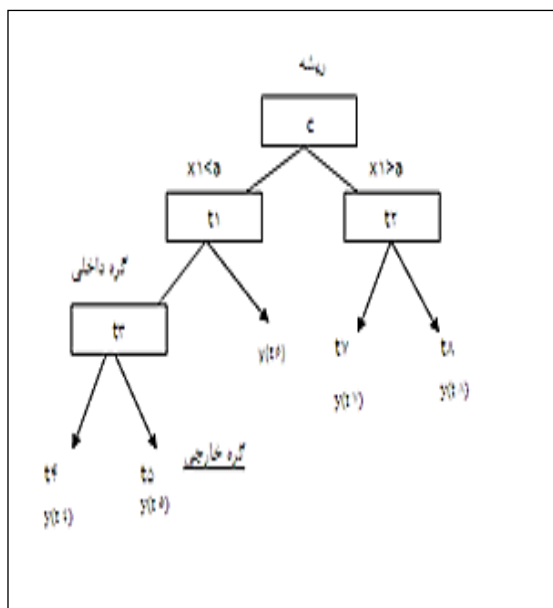
می شوند. داشتن روشی که با استفاده از آن بتوان اطلاعات موجود برای ساخت این قواعد را استفاده کرد، ابزاری کارآمد به شمار می رود. از سوی دیگر، شبکه های عصبی مصنوعی به دلیل قابلیت های آموزش پذیری، با استفاده از الگوهای گوناگون آموزشی می تواند ارتباط مناسبی میان متغیرهای ورودی و خروجی ایجاد کند؛ بنابراین استفاده ترکیبی از سامانه استنباط فازی و شبکه عصبی مصنوعی به منزله ابزاری قدرتمند که قابلیت پیش بینی نتایج با استفاده از داده های عددی موجود را دارد، با عنوان سامانه استنتاج تطبیقی عصبی-فازی معرفی می شود. در شکل ۱، نمایشی از معماری شبکه عصبی-فازی با دو ورودی، یک خروجی و دو قانون آمده است. سامانه استنتاج تطبیقی-عصبی فازی شبکه ای پنج لایه ای، متشکل از گره ها و کمان های اتصال دهنده گره ها است. ساختار مناسب سیستم عصبی-فازی متناسب با داده های ورودی، درجه عضویت، قوانین و توابع درجه عضویت خروجی انتخاب می شود [۱۰].



شکل ۱. ساختار سامانه استنتاج تطبیقی عصبی-فازی

در لایه اول (ورودی) شکل ۱، کاربر میزان تعلق هر ورودی به بازه های گوناگون فازی را مشخص می کند. با ضرب مقادیر ورودی به هر گره در یکدیگر، وزن قانون ها (w_i) در لایه دوم به دست می آید. در لایه سوم، محاسبه وزن نسبی قوانین (w_i) صورت می گیرد. لایه چهارم لایه قوانین است که از انجام عملیات روی پیام های ورودی به این لایه حاصل می شود ($w_i.f_i$). لایه آخر خروجی شبکه (f) است که هدف آن حداقل کردن اختلاف خروجی

آینده ضروری باشند. انواعی از مدل‌ها بیشتر برای رگرسیون‌گیری و دسته‌بندی کاربرد دارند. شبکه‌های عصبی می‌توانند مدل‌های رگرسیون‌گیری و دسته‌بندی را ایجاد کنند [۱۵]؛ برای نمونه الگوریتم درخت تصمیم‌گیری را می‌توان برای ساخت درخت دسته‌بندی و درخت رگرسیون‌گیری استفاده کرد. در شکل ۲، نمونه‌ای از ساختار درخت تصمیم‌گیری آمده است.



شکل ۲. ساختار رگرسیون درختی

مطالعه موردی ایستگاه سینوپتیک اراک

در این قسمت، به بررسی نتایج مربوط به محاسبه مقادیر تبخیر و تعرق به روش فائو-پنمن-مانتیس، روش شبکه عصبی فازی و روش رگرسیون درختی می‌پردازیم. سپس در قسمت نتیجه‌گیری، نتایج مربوط به روش شبکه عصبی فازی و روش رگرسیون درختی را با روش فائو-پنمن-مانتیس مقایسه می‌کنیم. با توجه به موضوع و اینکه برای پیش‌بینی تبخیر و تعرق به اطلاعات مربوط در سال‌های گذشته نیاز است، همچنین به دلیل اینکه در دسترس بودن این اطلاعات بسیار مهم است و در نظر گرفتن نوع متغیرهای موضوع، منطقه مطالعاتی ایستگاه سینوپتیک اراک انتخاب شد. ایستگاه سینوپتیک اراک در حاشیه شرقی شهر اراک قرار دارد که در جدول ۱ مشخصات آن آمده است. از نظر تقسیمات جغرافیایی، این ایستگاه در حوزه آبخیز کویر

دسته‌بندی می‌شود که از ریشه به پایین رشد می‌کنند و در نهایت به گره‌های برگ می‌رسد. هر گره داخلی یا برگ با یک ویژگی مشخص می‌شود که این ویژگی پریشی مرتبط با مثال ورودی مطرح می‌کند. در هر گره داخلی، به تعداد جواب‌های ممکن با این پریش شاخه وجود دارد که هر یک با مقدار آن جواب مشخص می‌شود. برگ‌های این درخت با یک کلاس یا یک دسته از جواب‌ها مشخص می‌شوند. دلیل نام‌گذاری این است که این درخت فرایند تصمیم‌گیری برای تعیین دسته یک مثال ورودی را نشان می‌دهد. ویژگی‌های درخت تصمیم این است که برای تقریب توابع گسسته به کار می‌رود و در برابر نویز داده‌های ورودی مقاوم است. این روش برای داده‌های با حجم زیاد کارایی بالایی دارد؛ از این رو در داده‌کاوی بسیار استفاده می‌شود. می‌توان درخت را به صورت قوانین اگر-آنگاه نمایش داد که برای استفاده قابل فهم است و امکان ترکیب عطفی و فصلی فرضیه‌ها را می‌دهد. در مواردی که مثال‌های آموزشی هیچ ویژگی‌ای ندارند نیز قابل استفاده است [۱۲ و ۱۳].

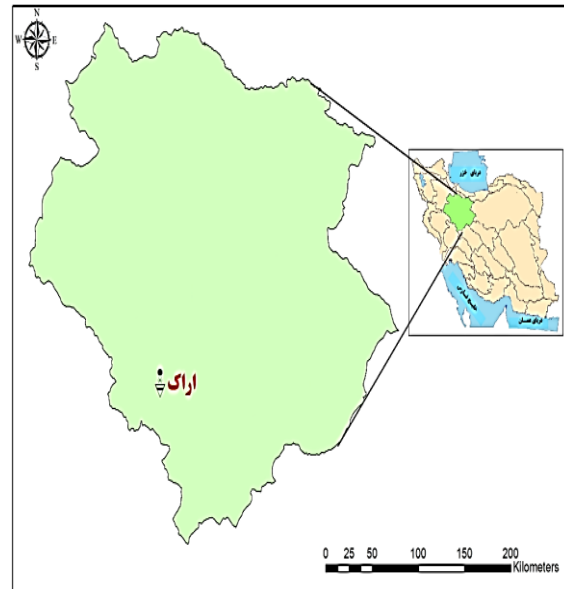
رگرسیون

تاکنون روش‌های متعددی برای تولید درخت‌های تصمیم دسته‌بندی ابداع شده‌اند که معمولاً برای تصمیم‌گیری و پیش‌بینی به کار می‌روند. در این روش‌ها، بهینه‌سازی پارامترهایی مانند دقت، سرعت دسته‌بندی، اندازه درخت‌های ساخته‌شده، سرعت یادگیری و میزان حافظه صورت می‌گیرد. میان پارامترهای ذکرشده تناقض وجود دارد؛ یعنی بهینه‌سازی یک پارامتر ممکن است موجب تغییرات نامناسب سایر پارامترها شود؛ به همین دلیل به کمک همه روش‌های موجود توازن میان این پارامترها صورت می‌گیرد [۱۴].

می‌توان تکنیک رگرسیون‌گیری را برای پیش‌بینی پذیرفت. تحلیل رگرسیون برای مدل‌سازی روابط یکپارچه چند متغیر مستقل و وابسته استفاده می‌شود. در استخراج اطلاعات، متغیرهای مستقل ویژگی‌هایی هستند که پیش‌تر شناخته شده‌اند و متغیرهای وابسته مربوط به چیزی هستند که می‌خواهیم پیش‌بینی کنیم. متأسفانه خیلی از مسائل واقعی به راحتی پیش‌بینی نمی‌شوند؛ بنابراین تفکیک‌های پیچیده‌تر ممکن است برای پیش‌بینی مقادیر

همه داده‌های مربوط به متغیرهای ورودی در این روش به صورت ماهیانه از سال میلادی ۱۹۵۵ تا ۲۰۰۵ در جدول‌های اکسل قرار داده شده است. این داده‌ها در جدول ۲ ضمایم مشاهده می‌شود.

میقان اراک است که یکی از زیرحوزه‌های ایران مرکزی به شمار می‌آید. در شکل ۳ نیز موقعیت ایستگاه مطالعاتی در حوزه آبریز مرکزی ایران آمده است.



شکل ۳. موقعیت ایستگاه سینوپتیک اراک در حوزه آبریز ایران مرکزی

جدول ۲. ورود داده‌ها در پنجره فرمان نرم‌افزار متلب

۷/۴۷	۶/۴۸	۲۱/۰۵	۵۵/۳۳	۳/۳۹	۰/۶۳	۳/۵۶
۳/۹۸	۶/۴۸	۲۰/۹۳	۴۶/۹۲	۸/۱۳	۰/۴۴	۳/۵۹
۱/۸	۵/۶۳	۱۸/۰۸	۵۸	۷/۹۸	۰/۵۶	۲/۸۲
۳/۴۶	۷/۸۶	۲۱/۸۳	۵۰/۱۷	۸/۱۷	۰/۷۵	۳/۷۵
۲/۹۵	۶/۶۶	۲۱/۰۶	۵۰/۳۳	۷/۷۸	۰/۴۵	۳/۱۷
۲/۴۷	۷/۴۳	۲۱/۷۳	۴۸/۹۲	۷/۷۰	۰/۴۸	۳/۱۰
۰/۹۱	۲۰/۴۸	۶/۴۵	۴۷/۴۱	۳/۷۵	۱/۴۱	۲/۱۴
۰/۷۲	۲۱/۷۸	۷/۵۴	۴۲/۰۹	۳/۷	۰/۹۱	۲
۰/۹۷	۲۲/۷۶	۸/۱۸	۳۷/۹۶	۳/۶۴	۱/۳۴	۲/۳
۱/۰۵	۲۰/۹۹	۶/۰۴	۳۹/۰۲	۴/۵	۰/۵۶	۲/۴
۰/۶۱	۲۱/۳۱	۷/۹۴	۴۴/۵۵	۳/۶۹	۰/۸۹	۱/۹۲
۰/۳۳	۲۳/۱۳	۸/۹۵	۴۲/۵۹	۳/۲	۰/۷۹	۱/۷۳
۰/۷۶	۲۰/۶۷	۶/۸۷	۴۲/۵۱	۳/۷۵	۰/۸۱	۲/۴۸
۰/۹۸	۱۹/۸۱	۶/۹	۴۴/۰۸	۸/۰۳	۱/۱	۳/۰۷
۰/۹۲	۱۹/۷۱	۶/۵۳	۴۸/۰۹	۸/۰۳	۱/۱	۳/۰۷
۰/۰۹۶	۲۲/۳	۷/۹۱	۳۸/۶۵	۸/۷۶	۰/۷۴	۳/۳۵
۱/۴۶	۲۱/۱	۷/۵۲	۴۲/۷	۸/۳۳	۱/۲۶	۳/۳۵
۱/۳۸	۱۸/۸۴	۵/۷۱	۴۹/۲۴	۸	۱/۲۷	۳/۲۸
۱/۷۷	۲۲/۹۷	۸/۱۸	۳۲/۹۳	۹/۱۳	۰/۳۲	۴/۲۱
۱/۰۹	۶/۴۶	۱۹/۳۸	۴۷/۵	۷/۷	۰/۳۲	۹/۸۵
۳/۵۸	۷/۵	۷/۵	۴۳/۵	۸/۷	۰/۳۳	۳/۶۹
۲/۵۴	۷/۴۷	۲۰/۶۱	۴۹/۵	۸/۳	۰/۳۷	۳/۲۲
۲/۳۶	۷/۷۳	۲۱/۳۹	۵۰/۰۸	۶/۹۱	۰/۴۵	۳/۱۲
۳/۰۶	۸/۵۹	۲۲/۶۴	۴۱/۴۲	۸	۰/۲۷	۳/۴۴
۳/۰۶	۸/۷۱	۲۲/۰۲	۴۷/۶۵	۸/۱۲	۰/۲۷	۳/۳۹
۲/۳۵	۷/۲۱	۲۱/۰۹	۴۹/۵	۷/۸۶	۰/۴۲	۳/۳۵
۳/۳۸	۷/۲۲	۲۱/۸۸	۴۶/۱۷	۸/۲۲	۰/۴۶	۳/۴۳
۴/۴۹	۴/۸۷	۱۸/۴۸	۵۱	۸/۰۴	۰/۳۸	۳/۶
۴/۴۸	۴/۴۷	۱۹/۲۸	۵۰	۷/۷۸	۰/۲۹	۳/۴۱
۴/۳۸	۵/۴۹	۱۹/۲۸	۴۸	۷/۲۳	۰/۳۲	۳/۵۱
۴/۱۹	۶/۴۱	۲۰/۵۷	۴۲/۶۶	۸/۱۷	۰/۴۸	۳/۵۳

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک اراک

ایستگاه	ارتفاع از سطح دریا (متر)	طول شرقی (درجه-دقیقه)	عرض شمالی (درجه-دقیقه)
اراک	۱۷۰۸	۴۹°-۴۶'	۳۴°-۰۶'

نتایج مربوط به پیش‌بینی مقادیر تبخیر و تعرق به روش شبکه عصبی فازی

نتایج مربوط به محاسبه مقادیر تبخیر و تعرق به روش فائو-پنمن-مانتیس، برای آماده‌سازی داده‌ها به منظور اجرای مدل پیش‌بینی مقادیر تبخیر و تعرق به روش شبکه عصبی فازی از جعبه ابزار (ANFIS) در نرم‌افزار متلب استفاده شده است. فرایند اجرای شبکه عصبی فازی شامل مراحل زیر است:

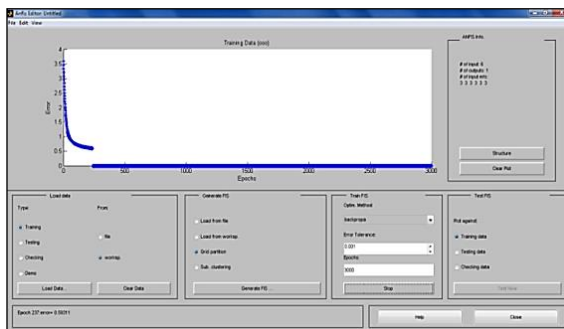
مرحله اول: ورود داده‌ها در نرم‌افزار متلب

ابتدا آمار و کمیت‌های متغیرها در روش فائو-پنمن-مانتیس به کمک آمار ایستگاه سینوپتیک اراک جمع‌آوری شد. انتخاب متغیرها براساس مطالعه روابط روش مذکور است.

مرحله دوم: استفاده از جعبه‌ابزار نرم‌افزار و بارگذاری داده‌ها در قسمت منطق فازی/ تطبیق شبکه عصبی با سیستم استنتاج فازی

در این بخش، پس از بارگذاری داده‌ها با استفاده از فضای کار سیستم استنتاج فازی ورودی داده‌ها به صورت فازی

مرحله چهارم: اجرای شبیه‌سازی با در نظر گرفتن روش بهینه‌سازی تابع پس‌انتشار خطا
توجه به خطای ۰/۰۱ و همچنین تعداد دوره شبیه‌سازی به تعداد ۳۰۰۰ عدد به شرح شکل ۴.

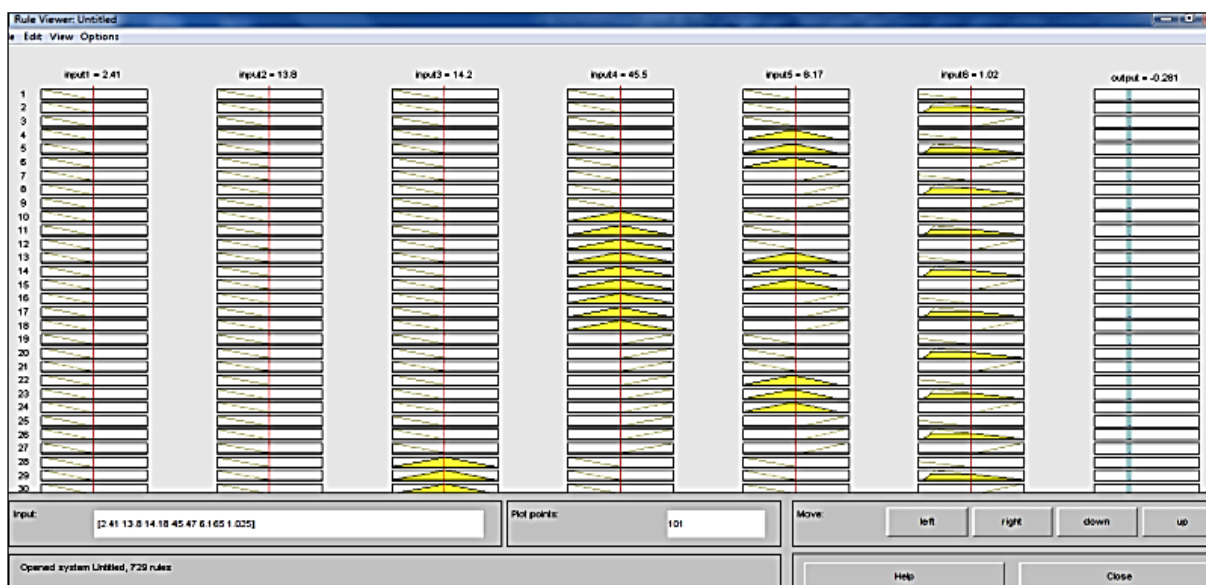


شکل ۴. اجرای شبیه‌سازی در جعبه‌ابزار Anfis

مثلثی و خروجی را مقادیر ثابت و دقیق در نظر می‌گیریم. خروجی ثابت به دلیل رعایت اصل بازده به مقیاس خطی است؛ زیرا با توجه به بررسی رفتار داده‌ها در سوابق مشخص شد که خروجی‌های مدل، رویه‌ای خطی دارند.

مرحله سوم: طراحی ساختار شبکه با استفاده از داده‌های مدل و خواسته‌های کاربر

به دلیل اینکه در این پژوهش شش متغیر ورودی و یک متغیر خروجی که همان پیش‌بینی مورد نظر پژوهشگر است و با توجه به اینکه عدد مثلثی برای ورود داده‌ها در نظر گرفته شده است، تعداد ۶ به توان ۳ لایه پنهان یا ۲۱۶ قانون برای شبیه‌سازی داده‌ها در نظر گرفته شده است.



شکل ۵. قوانین ساخته شده به کمک نرم‌افزار متلب

نتایج مربوط به پیش‌بینی مقادیر تبخیر و تعرق به روش رگرسیون درختی

متغیرهای مدل پیش‌بینی توسعه یافته عبارت‌اند از میانگین سرعت باد در ارتفاع دومتری، حداکثر درجه حرارت، حداقل درجه حرارت، درصد رطوبت نسبی، تعداد ساعات آفتابی و مقدار بارش. بر این اساس مدل رگرسیون درختی برای پیش‌بینی تبخیر و تعرق طراحی شده است.

مرحله پنجم: پایان مرحله شبیه‌سازی و گزارش‌گیری از نرم‌افزار شکل ۵

مرحله ششم: تست برخی مقادیر و تعیین مقادیر مورد نظر برای کاربران

اگر مقادیر ورودی به شرح زیر در مدل تزریق شود، خروجی عبارت است از:

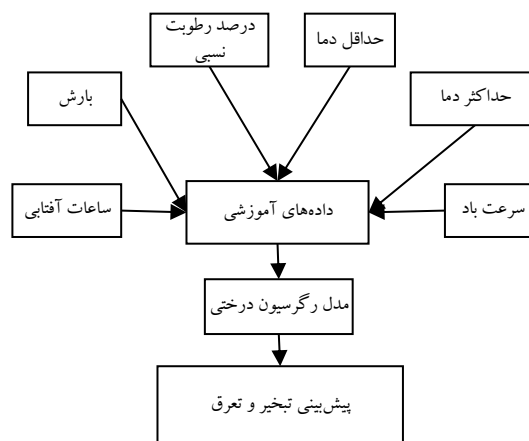
$$[0.4700 \quad 6.4800 \quad 21.0500 \quad 52.3300 \quad 3.3900 \quad 0.6300]$$

$$\text{خروجی} = 3/56$$

داده آموزشی به مدل معرفی شد که در ابتدا این نرم افزار به کمک روش پارتیشن بندی استاندارد، به پارتیشن بندی داده ها با اختصاص ۵۰ درصد از داده ها به داده های آموزشی، ۳۰ درصد به داده های صحت سنجی و ۲۰ درصد به داده های تست پرداخته شد. از ۵۱ داده سالانه تبخیر و تعرق، ۲۶ داده برای آموزش مدل، ۱۵ داده برای صحت سنجی و ۱۰ داده برای تست به کار گرفته شد. از جمله قابلیت های این نرم افزار این است که همه داده های سه مرحله برازش قابل دسترسی بوده که می توان آن ها را با داده های واقعی مقایسه کرد. در شکل ۷، خروجی مدل رگرسیون درختی در مرحله آموزش برای پیش بینی تبخیر و تعرق سالانه ایستگاه سینوپتیک اراک آمده است.

تهیه درخت ترسیم در مرحله آموزش

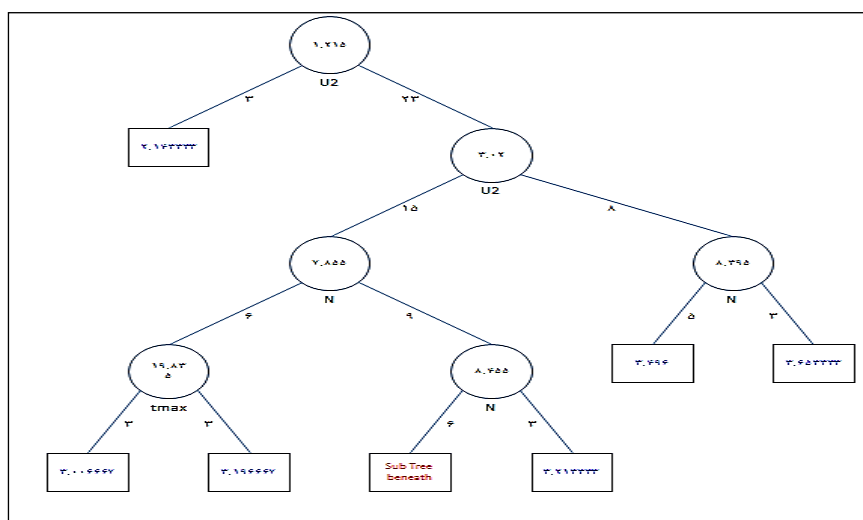
در این مرحله، درخت تصمیم برای داده های آموزش در شکل ۷ آمده است.



شکل ۶. مدل رگرسیون درختی برای پیش بینی تبخیر و تعرق ایستگاه اراک

مدل رگرسیون درختی

در این مطالعه، با استفاده از نرم افزار xlminder که روی اکسل نصب می شود و با در نظر گرفتن همه متغیرها به عنوان ورودی، مدل رگرسیون درختی را آموزش دادیم. به همین منظور همه داده های برداشت شده و محاسبه شده به عنوان



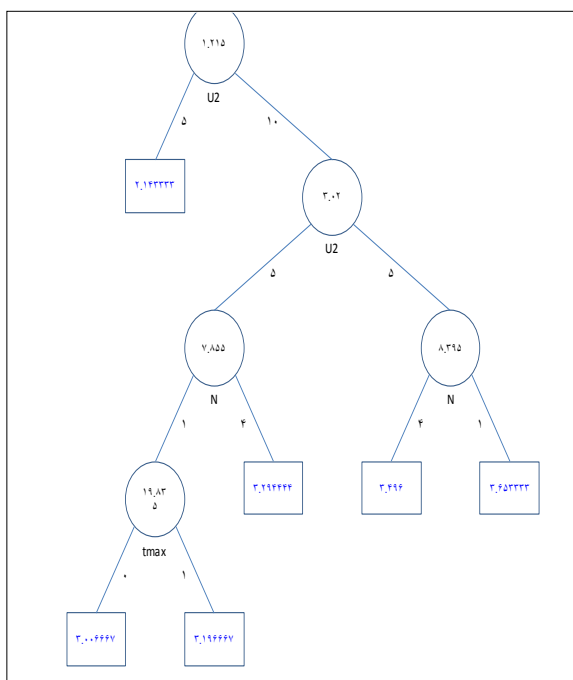
شکل ۷. خروجی مدل رگرسیون درختی در مرحله آموزش

۲. اگر سرعت باد در ارتفاع دومتری از سطح زمین میان ۱/۲۱۵ تا ۳/۰۲ متر بر ثانیه، تعداد ساعات آفتابی کمتر از ۷/۸۵۵ روز و میانگین حداکثر دما کمتر از ۱۹/۸۳۵ درجه سانتی گراد باشد، تبخیر و تعرق، ۳/۰۰۶ میلی متر در روز است.

۳. اگر سرعت باد در ارتفاع دومتری از سطح زمین میان

با توجه به نتایج شکل ۷، قوانین حاکم بر درخت بهینه در شکل ۵ که برای کل داده ها در مرحله آموزش طراحی شده است، به صورت زیر خواهد بود:

۱. اگر سرعت باد در ارتفاع دومتری از سطح زمین کمتر از ۱/۲۱۵ متر بر ثانیه باشد، مقدار تبخیر و تعرق، ۲/۱۴۳ میلی متر در روز است.



شکل ۸. درخت تصمیم هرس شده داده‌ها در مرحله اعتبارسنجی

تهیه درخت بهینه

در این مرحله، درخت تصمیم بهینه براساس خطای حداقل داده‌ها در مرحله صحت‌سنجی در شکل ۹ آمده است. قوانین حاکم بر درخت بهینه برای داده‌ها در مرحله صحت‌سنجی به‌صورت زیر است:

۱. اگر سرعت باد در ارتفاع دومتری از سطح زمین کمتر از $۱/۲۱۵$ متر بر ثانیه باشد، مقدار تبخیر و تعرق، $۲/۱۴۳$ میلی‌متر در روز است.
۲. اگر سرعت باد در ارتفاع دومتری از سطح زمین بین $۱/۲۱۵$ تا $۳/۰۲$ متر بر ثانیه و تعداد ساعات آفتابی کمتر از $۷/۸۵۵$ روز باشد، تبخیر و تعرق، $۳/۱۰۱$ میلی‌متر در روز است.
۳. اگر سرعت باد در ارتفاع دومتری از سطح زمین بین $۱/۲۱۵$ تا $۳/۰۲$ متر بر ثانیه و تعداد ساعات آفتابی بیشتر از $۷/۸۵۵$ روز باشد، تبخیر و تعرق، $۳/۲۹۴$ میلی‌متر در روز است.
۴. اگر سرعت باد در ارتفاع دو متری از سطح زمین بین $۱/۲۱۵$ تا $۳/۰۲$ متر بر ثانیه و تعداد ساعات آفتابی بیشتر از $۷/۸۵۵$ روز باشد، تبخیر و تعرق، $۳/۲۹۴$ میلی‌متر در روز است.
۵. اگر سرعت باد در ارتفاع دومتری از سطح زمین بیشتر از $۳/۰۲$ متر بر ثانیه باشد، تبخیر و تعرق، $۳/۵۵۵$ میلی‌متر در روز است.

$۱/۲۱۵$ تا $۳/۰۲$ متر بر ثانیه، تعداد ساعات آفتابی کمتر از $۷/۸۵۵$ روز و میانگین حداکثر دما بیشتر از $۱۹/۸۳۵$ درجه سانتی‌گراد باشد، تبخیر و تعرق، $۳/۱۹۶$ میلی‌متر در روز است.

۴. اگر سرعت باد در ارتفاع دومتری از سطح زمین میان $۱/۲۱۵$ تا $۳/۰۲$ متر بر ثانیه، تعداد ساعات آفتابی بیشتر از $۷/۸۵۵$ و کمتر از $۸/۴۵۵$ روز باشد، تبخیر و تعرق، $۳/۲۱۳$ میلی‌متر در روز است.

۵. اگر سرعت باد در ارتفاع دومتری از سطح زمین میان $۱/۲۱۵$ تا $۳/۰۲$ متر بر ثانیه، تعداد ساعات آفتابی کمتر از $۸/۳۹۵$ روز باشد، تبخیر و تعرق، $۳/۴۹۶$ میلی‌متر در روز است.

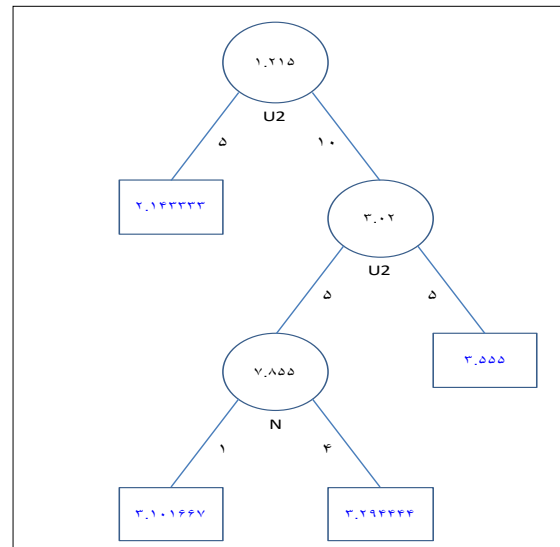
۶. اگر سرعت باد در ارتفاع دومتری از سطح زمین میان $۱/۲۱۵$ تا $۳/۰۲$ متر بر ثانیه، تعداد ساعات آفتابی بیشتر از $۸/۳۹۵$ روز باشد، تبخیر و تعرق، $۳/۶۵۳$ میلی‌متر در روز است.

تهیه درخت تصمیم هرس شده در مرحله اعتبارسنجی

درخت تصمیم هرس شده برای داده‌ها در مرحله صحت‌سنجی در شکل ۸ آورده شده است. بر این اساس قوانین حاکم بر درخت تصمیم برای داده‌ها در مرحله صحت‌سنجی به‌صورت زیر است:

۱. اگر سرعت باد در ارتفاع دومتری از سطح زمین کمتر از $۱/۲۱۵$ متر بر ثانیه باشد، مقدار تبخیر و تعرق، $۲/۱۴۳$ میلی‌متر در روز است.
۲. اگر سرعت باد در ارتفاع دومتری از سطح زمین میان $۱/۲۱۵$ تا $۳/۰۲$ متر بر ثانیه، تعداد ساعات آفتابی کمتر از $۷/۸۵۵$ روز و میانگین حداکثر دما کمتر از $۱۹/۸۳۵$ درجه سانتی‌گراد باشد، تبخیر و تعرق، $۳/۰۰۶$ میلی‌متر در روز است.
۳. اگر سرعت باد در ارتفاع دومتری از سطح زمین میان $۱/۲۱۵$ تا $۳/۰۲$ متر بر ثانیه، تعداد ساعات آفتابی کمتر از $۷/۸۵۵$ روز و میانگین حداکثر دما بیشتر از $۱۹/۸۳۵$ درجه سانتی‌گراد باشد، تبخیر و تعرق، $۳/۱۹۶$ میلی‌متر در روز است.

دارد. پارامترهای مجذور میانگین مربعات خطا (MSE)، شاخص پراکندگی و پارامتر انحراف، برای ارزیابی استفاده شده است. جدول ۳ نتایج پیش‌بینی تبخیر و تعرق روش شبکه عصبی مصنوعی فازی و روش رگرسیون درختی را در مقایسه با روش فائو-پنمن-مانتیس نشان می‌دهد. همچنین بیان‌کننده نتایج ارزیابی روش شبکه عصبی مصنوعی فازی براساس انتخاب ۳۰ نمونه تصادفی و روش رگرسیون درختی در سه مرحله در مقایسه با روش فائو-پنمن-مانتیس است. برای این منظور از پارامترهای جذر میانگین مربعات خطا، شاخص پراکندگی و پارامتر انحراف استفاده می‌شود. مرحله آموزش در مدل رگرسیون درختی نشان می‌دهد مقدار جذر میانگین مربعات خطا، ۰/۱۲۲ و مقدار شاخص پراکندگی، ۰/۰۳۸ است. همچنین پارامتر انحراف صفر است. در مرحله صحت‌سنجی، مقدار جذر میانگین مربعات خطا، ۲/۰۰۴ و مقدار شاخص پراکندگی، ۰/۴۵۸ است. همچنین پارامتر انحراف، ۰/۹۲۰- است، اما در مرحله تست مقدار جذر میانگین مربعات خطا، ۰/۱۴۲ و مقدار شاخص پراکندگی ۰/۰۴۵ است. همچنین پارامتر انحراف، ۰/۰۱۰- است. براساس نتایج برآورد بارش در شبکه عصبی فازی در منطقه اراک در محدوده ۹۹ درصد قابل اطمینان است. پیشنهاد می‌شود پژوهشگران با استفاده از سایر تکنیک‌های گروه هوش مصنوعی، مدلی برای پیش‌بینی مدیریت منابع آب ارائه کنند و به مقایسه نتایج آن با نتایج این پژوهش بپردازند. توصیه می‌شود با استفاده از سایر روش‌های یادگیری در شبکه عصبی و انواع دیگری از شبکه‌های عصبی و درخت تصمیم، همچنین متغیرهای توضیح‌دهنده دیگر، مدل‌هایی برای پیش‌بینی مدیریت آب ارائه و با نتایج این پژوهش مقایسه شود.



شکل ۹. مدل رگرسیون درختی بهینه

نتیجه‌گیری

با توجه به پیش‌بینی مقادیر بارش به کمک شبکه با استفاده از داده‌های واقعی می‌توان گفت مقادیر بارش در اراک روندی غیرخطی دارد و مقادیر این روند طی دوره مورد مطالعه، افزایش یا کاهش خاصی را نشان نمی‌دهد. در مجموع می‌توان گفت پدیده اقلیمی مانند بارش، دما، تبخیر، تعرق، فشار و... روندی غیرخطی دارند. نتایج سنجش کارایی مدل‌های پیش‌بینی استفاده‌شده در پژوهش با یکدیگر مقایسه شد. به‌منظور مقایسه نتایج مربوط به روش شبکه عصبی فازی و روش رگرسیون درختی با روش فائو-پنمن-مانتیس از توابع عملکرد استفاده شد. نتایج اجرای شبکه عصبی فازی در اراک نشان می‌دهد شبکه عصبی طراحی‌شده بر پایه شش پارامتر متغیرهای حداکثر دما، حداقل دما، درصد رطوبت، ساعات آفتابی، سرعت باد و بارش در ایستگاه اراک کمترین خطا (MAPE=۰/۴) و بیشترین ضریب هم‌بستگی (r=۰/۹۴) را

جدول ۳. نتایج ارزیابی روش شبکه عصبی مصنوعی فازی و روش رگرسیون درختی

پارامتر انحراف	شاخص پراکندگی	جذر میانگین مربعات خطا	روش
-۱/۰۴۱	۰/۴۳۶	۱/۷۷۷	شبکه عصبی فازی (۳۰ پیش‌بینی تصادفی)
۰	۰/۰۳۸	۰/۱۲۲	مرحله آموزش
-۰/۹۲	۰/۴۵۸	۲/۰۰۴	مرحله صحت‌سنجی
-۰/۰۱۰	۰/۰۴۵	۰/۱۴۲	مرحله تست

منابع

1. Rouhani, A., and Leiaghat, A. (2007). "Determination of Reference Plant Based on Lawn and Soil Cultivar in Zahedan", *National Conference on Water, Soil, Plant and Mechanization of Agriculture, Dezfoul IAU*, 3.
2. Nader, K., Pasquale, C., and Marcello, M. (2013). "Productivity, Evapotranspiration, and Water Use Efficiency of Corn and Tomato Crops Simulated by Aquacrop Under Contrasting Water Stress Conditions in the Mediterranean region", *Agricultural Water Management*, PP.14-26.
3. Sayer, M., and O'Riordan, T. (2000). "Climate Change, Water Management and Agriculture. London: Center for Social and Economic Research on the Global Environment", *University of East Anglia*.
4. Wolf, A. T. (2009). "International Water Convention and Treaties", *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, PP. 286-294.
5. Seung-Hwan Y., Jin-Yong C., and Min-Won J. (2008). "Estimation of Design Water Requirement Using FAO Penman-Monteith and Optimal Probability Distribution Function In South Korea", *Agricultural Water Management*, PP. 845-853.
6. Dziegielewski, B., and Baumann, D. D. (2011). "Predicting Future Demands for Water", *Reference Module in Earth*.
7. Hassanpour, H., and Aliankejad, M. M. (2018). "A Method for Modeling a System with a Small Data Set with the Help of a Network Nervous to Optimize It", *Journal Industrial Engineering*, Vol. 92, No. 1, PP. 25-35.
8. Torabi, S., Shaigan, M., and Mohammadi, M. (2015). "Improving the Utilization of a Combined Cycle Power Plant Using Combined Math and Fuzzy Communication Systems Approach", *Journal Industrial Engineering*, Vol. 49, No. 2, PP. 165-176.
9. Židek, V. (1991). "Actual and Potential Evapotranspiration in the Floodplain Forest, In M. V. Miroslav Penka", *Developments in Agricultural and Managed Forest Ecology*, PP. 103-120.
10. Beven, K. (1979). "A Sensitivity Analysis of the Penman-Monteith Actual Evapotranspiration Estimates", *Journal of Hydrology*, Vol. 44, No. 3, PP. 169-190.
11. Larry, M., and Efraim T., (1994). "Integrating Expert Systems and Neural Computing for Decision Support", *Expert Systems with Applications*, Vol. 7, No. 4, PP. 553-562.
12. Narasimha, B., Mohamed, Kh., and Efraim, T., (2002). "Integrating Knowledge Management Into Enterprise Environments for the Next Generation Decision Support", *Decision Support Systems*, Vol. 33, No. 2, PP. 163-176.
13. Indrajit, M., and Srikanta, R., (2012). "Comparing the Performance of Neural Networks Developed by Using Levenberg-Marquardt and Quasi-Newton with the Gradient Descent Algorithm for Modelling a Multiple Response Grinding Process", *Expert Systems with Applications*, Vol. 39, No. 3, PP. 2397-2407.
14. Robert R, T., and Efraim, T., (1990). "Auto-Learning Approaches for Building Expert Systems", *Computers and Operations Research*, Vol. 7, No. 3, PP. 553-560.
15. Richard, E. Neapolitan, X. J. (2007). "Chapter 5 – Decision Analysis Fundamentals, In X. J. Richard E. Neapolitan, Probabilistic Methods for Financial and Marketing Informatics", *Pittsburgh, PA, USA: Elsevier*, PP. 177-228.
16. Sutton, C. D. (2005). "Classification and Regression Trees, Bagging, and Boosting", *Handbook of Statistics-Data Mining and Data Visualization*, PP. 303-329.
17. Aldo, G., Caterina, M., and Gianluca, F., (2010). "Functional Clustering and Linear Regression for Peak Load Forecasting", *International Journal of Forecasting*, Vol. 2, No. 5, PP. 700-711.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن:

1. Forecasting
2. Evaporation
3. Sweating
4. FAO- Penman Monteith
5. Artificial Neural Network (ANN)
6. Tree Regression