

ارزیابی کارایی مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی در محاسبه عملکرد و بهره‌وری آب گندم بر اساس عوامل اقلیمی و آب - کود نیتروژن مصرفی

علی اصغر منتظر^{۱*}، بهزاد آزادگان^۲ و مهدی شهرکی^۳

چکیده

مدیریت آب و کود نیتروژن در تعامل با عوامل اقلیمی تأثیر زیادی بر عملکرد و بهره‌وری آب گندم دارد. تحقیق حاضر با هدف توسعه و ارزیابی کارایی مدل شبکه عصبی مصنوعی در محاسبه عملکرد و بهره‌وری آب گندم بر اساس عوامل اقلیمی و آب - کود نیتروژن مصرفی انجام گرفت. کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل‌ها با استفاده از نتایج یک آزمایش مزرعه‌ای سه ساله صورت پذیرفت. به منظور ارزیابی مدل‌ها از شاخص‌های آماری ضریب تبیین، مجذور میانگین مربعات، میانگین خطای اریب و خطای استاندارد استفاده شد. نتایج تحقیق نشان داد که مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی از دقت بیشتری در تخمین عملکرد و بهره‌وری آب گندم برخوردار هستند. مقایسه نتایج مدل‌های شبکه عصبی و رگرسیون غیرخطی نشان داد که مدل‌های شبکه عصبی دقت بیشتری دارند. تحلیل حساسیت مدل‌ها نشان داد که عملکرد و بهره‌وری آب گندم بیشترین حساسیت را به عامل مقدار آب مصرفی و پس از آن به کود نیتروژن مصرفی فصلی دارد. مقدار بیشینه و کمینه بهره‌وری آب گندم به ترتیب به ازای ۲۷۲ و ۴۹۰ میلی‌متر آب مصرفی فصلی و معادل ۱/۵۵ و ۰/۸۱ کیلوگرم بر متر مکعب محاسبه شد. کاربرد ساختارهای شبکه عصبی انتخابی می‌تواند زمینه ارتقای بهره‌وری آب این گیاه استراتژیک را در شرایط مختلف اقلیمی منطقه مورد مطالعه زمینه‌سازی کند و امکان بهره‌برداری منطقی و اقتصادی از منابع آب و کود نیتروژن و برنامه‌ریزی برای استفاده تلفیقی بهینه از این دو نهاد مهم را ممکن کند.

واژه‌های کلیدی: بهره‌وری آب، عوامل اقلیمی، شبکه عصبی مصنوعی، عملکرد، گندم و نیتروژن

ارجاع: منتظر ع.ا. آزادگان ب. و شهرکی م. ۱۳۸۸. ارزیابی کارایی مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی در محاسبه عملکرد و بهره‌وری آب گندم بر اساس عوامل اقلیمی و آب - کود نیتروژن مصرفی. مجله پژوهش آب ایران. ۳(۵):۱۷-۲۹.

۱- دانشیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران

۲- استادیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران

۳- کارشناس شرکت سهامی آب منطقه‌ای سیستان و بلوچستان

* نویسنده مسئول: almontaz@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۱۲/۴

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۰۲/۰۸

مقدمه

دیم منجر شود. نتایج تحقیق فرجی و همکاران (۱۳۸۵) نشان داد که با افزایش نیتروژن، عملکرد دانه به طور معنی‌دار افزایش می‌یابد. در واقع بین تنش خشکی و نیتروژن رابطه متقابل وجود داشته و همین امر باعث می‌شود که مصرف نیتروژن در شرایط خشکی اثر منفی بر عملکرد دانه محصول گندم داشته باشد.

شبکه‌های عصبی مصنوعی جزء سیستم‌های دینامیکی هوشمند هستند که با پردازش داده‌های تجربی، قانون نهفته در ورای اطلاعات را به ساختار شبکه منتقل می‌کنند. به تعبیر دیگر شبکه عصبی مصنوعی، مدلی ریاضی است که توانایی مدل‌سازی و ایجاد روابط غیر خطی برای درون‌یابی را دارد. ساختار این شبکه با تعداد لایه‌ها، تعداد نرون‌ها در هر لایه، تابع محرک (کنترل‌کننده خروجی هر نرون)، روش آموزش، الگوریتم تصحیح وزن‌ها و نوع مدل تعیین می‌شود. تاکنون شبکه‌های عصبی مصنوعی در حوزه وسیعی از مسایل مختلف فنی و مهندسی از قبیل سیستم‌های هوا فضا، الکترونیک و صنایع دفاعی به کار گرفته شده است. در علوم آب و کشاورزی نیز استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی روند صعودی داشته، تحقیقات زیادی نیز تا به حال با استفاده از این دانش انجام گرفته است. از جمله تحقیقات انجام گرفته در این حوزه می‌توان به پیش‌بینی تغییرات کیفیت آب سطحی (میثاقی و محمدی، ۱۳۸۳؛ کیمز و همکاران، ۱۹۹۸؛ آتکینسون و تاتنال، ۱۹۹۷)، تجزیه و تحلیل شوری (مایر و داندی، ۱۹۹۴)، تخمین تبخیر و تفرق پتانسیل گیاه مرجع (عباس پلنگی و همکاران، ۱۳۸۵)، محاسبه هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (نوابیان و همکاران، ۱۳۸۳؛ تاماری و همکاران، ۱۹۹۶)، آبشویی مواد شیمیایی (استارت و همکاران، ۱۹۹۸؛ استارت و آدامز، ۱۹۹۷)، تخمین محتوای رطوبتی خاک (دل‌فراتی و همکاران، ۲۰۰۳؛ چنگ و ایسلم، ۲۰۰۰)، تخمین بیومس (جین و لیو، ۱۹۹۷) و تخمین عملکرد گیاه (دروموند و همکاران، ۲۰۰۳؛ کیچن و همکاران، ۲۰۰۳؛ لیو و همکاران، ۲۰۰۱؛ سیمپسون، ۱۹۹۴) اشاره کرد.

عملکرد گیاه تابعی از عوامل مختلف گیاهی، اقلیمی و شرایط مدیریتی آب و خاک است. از این‌رو محاسبه مقدار عملکرد گیاه و شاخص‌های وابسته به آن از روابط غیرخطی پیچیده‌ای تبعیت می‌کند که مدل‌سازی آن نیز دشواری

آب به عنوان مهم‌ترین نهاده در تولید محصولات کشاورزی محسوب می‌شود و از این‌رو کمبود آن عمده‌ترین عامل بازدارنده توسعه زراعت آبی محسوب می‌شود. با توجه به بحران فزاینده مرتب بر کمیت و کیفیت منابع آبی در ایران و جهان، انتخاب استراتژی‌های مناسب به منظور بیشینه کردن میزان بهره‌وری آب برای محصولات تولیدی ضروری است. گندم به عنوان مهم‌ترین محصول زراعی ایران به طور متوسط مساحتی معادل ۶/۸ میلیون هکتار از اراضی زیر کشت را به خود اختصاص داده که سهم گندم آبی از این سطح ۳۵ درصد است (توکلی ۱۳۷۹). با توجه به سطح زیر کشت و سهم تخصیص یافته آب کشاورزی به این محصول استراتژیک، به نظر می‌رسد بهبود شرایط مدیریت منابع آب و خاک در اراضی گندم کشور اهمیت ویژه‌ای دارد و می‌تواند شرایط دستیابی به بهره‌برداری بهینه این منابع محدود را در قالب کشاورزی پایدار همراه با تأمین امنیت غذایی و تولید اقتصادی فراهم کند. به این‌منظور مدیریت مناسب آب و کود نیتروژن در تعامل با شرایط مختلف اقلیمی در کشت آبی این گیاه خاص می‌تواند یکی از راهکارهای کاربردی و قابل دسترس مطرح باشد.

نیتروژن به عنوان یک ماده معدنی به مقدار زیاد برای غلات لازم است و به دلیل نقش حساس و همچنین کمبود عرضه آن، مدیریت منابع نیتروژن از بعد تولید محصولات کشاورزی بسیار مهم است. تحقیقات نشان داده است که محصول گندم به آب آبیاری و نیتروژن واکنش مناسبی نشان می‌دهد (اویس و همکاران، ۱۹۹۸). نتایج پژوهش پاندی و همکاران (۲۰۰۱) نشان داد که آبیاری تکمیلی و کاربرد کود نیتروژن در سیستم‌های زراعی آبی عوامل اصلی افزایش عملکرد محصول گندم هستند. در این رابطه حساسیت عملکرد دانه گندم به عمق آب آبیاری در کاربرد سطوح با نیتروژن بیشتر است (لاولر و همکاران، ۱۹۸۸؛ گجری و همکاران، ۱۹۹۳). تدین و امام (۱۳۸۶) تأثیر آبیاری تکمیلی و کود نیتروژن را بر واکنش‌های مرفولوژیک و عملکرد دانه دو رقم گندم تحت شرایط دیم در استان فارس را مطالعه کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از ارقام اصلاح شده و آبیاری تکمیلی در مرحله ساقه رفتن به همراه استفاده از مقادیر کافی کود نیتروژن می‌تواند به عملکرد مطلوب در شرایط

تلفات سموم و کودها (یانگ و همکاران ۱۹۹۷) و تخمین اثرات بیماری (دولف و فرانکل، ۲۰۰۰؛ بچلر و همکاران، ۱۹۹۷؛ پارمار، ۱۹۹۷) است.

بررسی نتایج تحقیقات انجام شده، نشان می‌دهد که مدیریت آب آبیاری و کود نیتروژن در تعامل با عامل‌های اقلیمی بر روی عملکرد و بهره‌وری آب گندم اهمیت ویژه‌ای دارد که به دلیل پیچیدگی تأثیرگذاری توأمان آنها بر فرآیند رشد گیاهی، پیش‌بینی اثرات آنها دشوار است. تحقیق حاضر با هدف توسعه و ارزیابی کارآیی مدل شبکه عصبی مصنوعی در محاسبه عملکرد و بهره‌وری آب گندم بر اساس عامل‌های اقلیمی و آب و کود نیتروژن مصرفی انجام شده است.

مواد و روش‌ها

معرفی ساختار مدل‌های شبکه عصبی

در این تحقیق از شبکه عصبی با ساختار پرسپترون سه لایه دینامیک و آموزش با سرپرستی استفاده شد. آموزش شبکه با استفاده از الگوریتم پس انتشار^۱ مارکوآرت لورنبرگ^۲ انجام شد. شیوه مارکوآرت لورنبرگ از سریع‌ترین روش‌ها برای آموزش شبکه‌های عصبی است که در آموزش شبکه‌های چند لایه پرسپترون استفاده می‌شود. اساس این روش کمینه کردن تابع خطا بر مبنای عامل‌های شبکه و سرعت همگرایی بالای آن است.

از تابع فعالیت (آستانه) سیگموئیدی^۳ برای محدود سازی دامنه داده‌های خروجی از هر نرون و روند آموزش الگو به الگو به عنوان جزییات مراحل پیاده‌سازی آموزشی شبکه استفاده شد. شکل ریاضی تابع فعالیت (F) سیگموئیدی در معادله ۱ نشان داده شده است. با تنظیم داده‌های ورودی در یک محدوده خاص سعی شد ورودی خالص نرون‌ها در محدوده مطلوب قرار گرفته، از اشباع زود هنگام نرون‌ها جلوگیری شود. در اغلب موارد داده‌های ورودی در محدوده صفر و یک تنظیم شدند.

$$F(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (1)$$

خاصی دارد. امروزه استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی یکی از راهکارهای قابل توصیه به منظور محاسبه عملکرد و مراحل فنولوژیکی گیاهان مطرح می‌شود. در این رابطه، صفا و همکاران (۱۳۸۲) با استفاده از نتایج دیده‌بانی‌های اقلیمی دوره ۹۹-۱۹۹۰ برای هر یک از مراحل یازده‌گانه فنولوژی گندم دیم شامل کاشت، جوانه‌زدن، سبز شدن، سه برگی شدن، پنجه زدن، ساقه دادن، خوشه دادن، گل دادن، شیری شدن، خمیری شدن و رسیدن کامل و نیز یازده عامل هواشناسی شامل میانگین دمای حداقل روزانه، بیشترین مقدار دمای حداکثر روزانه، جمع مقادیر بارش روزانه، تعداد روز بارانی، جمع ساعات آفتابی روزانه، میانگین سرعت باد روزانه، حداکثر مطلق سرعت باد روزانه، میانگین رطوبت نسبی روزانه و بالاخره جمع نیاز آبی روزانه به طور جداگانه برای هر یک از مراحل فنولوژیکی به پیش‌بینی عملکرد گندم دیم با استفاده از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی پرداختند. مدل شبکه عصبی توسعه یافته در این تحقیق دارای سه قابلیت مهم بود که عبارتند از: ۱) محاسبه عملکرد گندم با حداکثر خطای ۴۵ تا ۶۰ کیلوگرم در هکتار حداقل یک‌ماه قبل از رسیدن کامل محصول، ۲) مشخص کردن میزان حساسیت هر یک از مراحل فنولوژی گیاه نسبت به هریک از عوامل خاص هواشناسی ۳) تعیین الویت و اهمیت هر یک از عوامل هواشناسی در رشد و عملکرد محصول.

کول و همکاران (۲۰۰۵) به بررسی کارآیی مدل‌های شبکه عصبی در تخمین ذرت علوفه‌ای و سویا در منطقه مرلند پرداختند. آنها همچنین کاربرد مدل‌های مذکور در سه سطح ایالتی، منطقه‌ای و محلی را بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل‌های شبکه عصبی نسبت به مدل‌های رگرسیونی از دقت بیشتری برخوردارند. کاربرد این مدل‌ها برای تخمین میزان محصول در گیاه ذرت علوفه‌ای و سویا در اقلیم منطقه مرلند مناسب ارزیابی شد. تخمین عملکرد ذرت دانه‌ای به کمک مدل‌های شبکه عصبی بر اساس داده‌های آب و هوا و خاک به‌وسیله تعدادی از محققین انجام شد که درجه موفقیت در محاسبه عملکرد این گیاه متفاوت گزارش شده است (لیو و همکاران ۲۰۰۱؛ لیو و گورینگ ۱۹۹۹؛ سودوت و همکاران ۱۹۹۶؛ یوریگ و همکاران ۱۹۹۲). کاربردهای آگرونومی شبکه عصبی شامل موارد توسعه مدل‌های گیاهی (الیزوندوت ۱۹۹۴)، ارزیابی

1- Back propagation
2- Marquardt Lovenberg
3- Sigmoid function

بهمن، اسفند، فروردین، اردیبهشت و خرداد، دمای میانگین هوا (T_{mean}) در هر یک از ماه‌های هشت‌گانه دوره رشد، رطوبت نسبی میانگین (RH) و میزان تشعشع خورشیدی (S) هر یک از ماه‌های فصل رشد و عوامل مدیریتی شامل مقدار آب مصرفی فصلی (مجموع آب آبیاری و بارندگی مؤثر - SI) و کود نیتروژن مصرفی (مجموع نیتروژن موجود در خاک قبل از کشت و مقدار کاربردی در طول فصل رشد - N) بودند. به این ترتیب مدل‌های شبکه عصبی در قالب ترکیب‌های متفاوتی از ۴۲ عامل ورودی فوق طراحی و ارزیابی شدند. در جدول ۱ مشخصات مدل‌های شبکه عصبی مورد مطالعه ارائه شده است.

همچنین برای استفاده داده‌ها در شبکه با تابع فعالیت سیگموئیدی، کلیه داده‌ها قبل از اعمال به شبکه با استفاده از معادله ۲ نرمال شدند. در توسعه مدل، از نرم‌افزار Neuro Solutions نسخه ۵ استفاده شد.

$$x_n = 0.5 \left(\frac{x_0 - x_{ave}}{x_{max} - x_{min}} \right) + 0.5 \quad (2)$$

که در آن x_n مقدار نرمال شده، x_0 ورودی، x_{ave} میانگین داده‌ها، x_{min} و x_{max} به ترتیب مقدار کمینه و بیشینه داده‌ها است. عامل‌های لایه‌های ورودی، تلفیقی از عوامل اقلیمی شامل دمای حداقل (T_{min}) و حداکثر (T_{max}) هوا در طول ۸ ماه مهم در طول دوره رشد محصول شامل آبان، آذر، دی،

جدول ۱- مشخصات مدل‌های شبکه عصبی مورد مطالعه

شماره مدل (ساختار شبکه عصبی)	عامل‌های ورودی	عامل‌های خروجی
۱	SI, N, RH1, RH2, RH3, RH4, RH5, RH6, RH7, RH8, S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, Tmean1, Tmean2, Tmean3, Tmean4, Tmean5, Tmean6, Tmean7, Tmean8, Tmin1, Tmin2, Tmin3, Tmin4, Tmin5, Tmin6, Tmin7, Tmin8, Tmax1, Tmax2, Tmax3, Tmax4, Tmax5, Tmax6, Tmax7, Tmax8	
۲	SI, N, RH1, RH2, RH3, RH4, RH5, RH6, RH7, RH8, S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8	
۳	SI, N, RH1, RH2, RH3, RH4, RH5, RH6, RH7, RH8, S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, Tmean1, Tmean2, Tmean3, Tmean4, Tmean5, Tmean6, Tmean7, Tmean8	
۴	SI, N, RH1, RH2, RH3, RH4, RH5, RH6, RH7, RH8, S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, Tmin1, Tmin2, Tmin3, Tmin4, Tmin5, Tmin6, Tmin7, Tmin8	
۵	SI, N, RH1, RH2, RH3, RH4, RH5, RH6, RH7, RH8, S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, Tmax1, Tmax2, Tmax3, Tmax4, Tmax5, Tmax6, Tmax7, Tmax8	(۱) عملکرد دانه (GY)
۶	SI, N, S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, Tmean1, Tmean2, Tmean3, Tmean4, Tmean5, Tmean6, Tmean7, Tmean8, Tmin1, Tmin2, Tmin3, Tmin4, Tmin5, Tmin6, Tmin7, Tmin8, Tmax1, Tmax2, Tmax3, Tmax4, Tmax5, Tmax6, Tmax7, Tmax8	(۲) عملکرد کاه و کلس (SY)
۷	SI, N, RH1, RH2, RH3, RH4, RH5, RH6, RH7, RH8, Tmean1, Tmean2, Tmean3, Tmean4, Tmean5, Tmean6, Tmean7, Tmean8, Tmin1, Tmin2, Tmin3, Tmin4, Tmin5, Tmin6, Tmin7, Tmin8, Tmax1, Tmax2, Tmax3, Tmax4, Tmax5, Tmax6, Tmax7, Tmax8	(۳) بهره‌وری آب (WP)
۸	N, RH1, RH2, RH3, RH4, RH5, RH6, RH7, RH8, S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, Tmean1, Tmean2, Tmean3, Tmean4, Tmean5, Tmean6, Tmean7, Tmean8, Tmin1, Tmin2, Tmin3, Tmin4, Tmin5, Tmin6, Tmin7, Tmin8, Tmax1, Tmax2, Tmax3, Tmax4, Tmax5, Tmax6, Tmax7, Tmax8	
۹	SI, RH1, RH2, RH3, RH4, RH5, RH6, RH7, RH8, S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, Tmean1, Tmean2, Tmean3, Tmean4, Tmean5, Tmean6, Tmean7, Tmean8, Tmin1, Tmin2, Tmin3, Tmin4, Tmin5, Tmin6, Tmin7, Tmin8, Tmax1, Tmax2, Tmax3, Tmax4, Tmax5, Tmax6, Tmax7, Tmax8	
۱۰	SI, N	

قرار گرفت. ۳۰ درصد از داده‌ها نیز برای صحت‌یابی استفاده شد. به تعبیر دیگر، ساختار شبکه با افزودن یا کاستن تعداد نرون‌ها در لایه‌های میانی، تغییر تابع محرک، تغییر حدس‌های اولیه عامل‌های شبکه و تعداد سیکل‌های آموزش تغییر یافت. روال آموزش و صحت‌یابی برای هر ساختار تکرار

برای تعیین ساختار بهینه شبکه هر یک از مدل‌ها، ابتدا براساس عامل‌های ورودی و خروجی، تابع فعالیت و الگوریتم یادگیری انتخاب شده و شبکه‌هایی با تعداد نرون‌های ۱ تا ۳۰ در لایه‌های میانی طراحی شد. شبکه‌های طراحی شده با استفاده از ۷۰ درصد داده‌ها آموزش یافته، مورد ارزیابی

از معادله بیلان آب خاک هر ۱۵ روز یکبار تعیین شد. رطوبت خاک در عمق‌های ۴۰-۰ سانتی‌متر از سطح خاک و در بازه‌های ۲۰ سانتی‌متری اندازه‌گیری شد.

عامل‌های گیاهی شامل میزان عملکرد دانه و عملکرد کاه و کلش در قالب پایش‌های مزرعه‌ای اندازه‌گیری شد. تعیین عملکرد کاه و کلش و عملکرد دانه، پس از رسیدن محصول و برداشت از یک مترمربع در هر کرت و تیمار با دست و خرمن‌کوبی با کمباین آزمایشی صورت گرفت. وزن کردن نمونه‌ها، پس از خشک شدن در آون به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد با یک ترازوی دیجیتالی دقیق انجام شد.

به منظور محاسبه شاخص بهره‌وری آب گندم نیز از معادله زیر استفاده شد.

$$WP(\text{kg m}^{-3}) = \frac{Y_a (\text{kg ha}^{-1})}{\text{Water use}_{(I+R_e)} (\text{m}^3 \text{ ha}^{-1})} \quad (3)$$

که در آن Y_a بیانگر عملکرد واقعی گیاه، I و R_e به ترتیب بیانگر مقدار آب آبیاری و بارندگی مؤثر و WP بهره‌وری آب گیاه است.

با توجه به تعداد تیمارها و تکرارهای آزمایش و سنوات مطالعه، در این تحقیق از ۱۴۴ داده حاصل از نتایج آزمایش مزرعه‌ای استفاده شد. از مجموع این داده‌ها، ۱۰۰ داده (حدود ۷۰ درصد) برای آموزش شبکه و ۴۴ داده (حدود ۳۰ درصد) برای صحت‌سنجی شبکه استفاده شد. به منظور مقایسه کمی مقادیر محاسبه و مشاهداتی از شاخص‌های آماری R^2 (ضریب تبیین)، $RMSE$ (مجذور میانگین مربعات)، MBA (میانگین خطای اریب) و STE (خطای استاندارد) استفاده شد (معادلات ۴ تا ۶).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_p - y_o)}{n}} \quad (4)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_p - y_o)}{\sum_{i=1}^n y_p} \quad (5)$$

$$STE = \sqrt{\frac{1}{n-2} \left[\sum_{i=1}^n (y_p - \bar{y}_o)^2 - \frac{\left[\sum_{i=1}^n (y_o - \bar{y}_o)(y_p - \bar{y}_p) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (y_o - \bar{y}_o)^2} \right]} \quad (6)$$

شد. در نهایت ساختاری که نتایج آن حداقل اختلاف را با مقادیر مشاهده‌ای داشت (بر اساس شاخص‌های آماری) به عنوان ساختار بهینه معرفی شد.

کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل‌ها

برای توسعه و صحت‌سنجی مدل‌ها از نتایج آزمایش سه ساله (سال‌های زراعی ۱۳۸۱-۱۳۸۰، ۱۳۸۲-۱۳۸۱ و ۱۳۸۷-۱۳۸۶) که بر روی گندم پاییزه رقم پیشتاز (رقم رایج منطقه) در مزرعه پژوهشی پردیس کشاورزی ابرویرحان دانشگاه تهران واقع در ۲۵ کیلومتری شرق شهر تهران انجام شد، استفاده شد. نوع خاک مزرعه لوم سیلتی و درصد متوسط شن، سیلت و رس بین سطح و عمق ۱۰۰ سانتی‌متری خاک آن به ترتیب ۲۸/۸، ۶۵/۱ و ۶/۱ درصد بود. درصد متوسط مواد آلی، هدایت الکتریکی (برحسب دسی زیمنس بر متر) و اسیدیته پروفیل خاک در بازه عمق ۱۰۰ سانتی‌متری خاک نیز به ترتیب ۱/۳۶، ۴/۳ و ۷/۷ بود. آزمایش شامل ۴ تیمار آب آبیاری (تیمار اصلی) و ۳ تیمار کود نیتروژن (تیمار فرعی) بوده و بر اساس طرح کرت‌های خرد شده در قالب پایه بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار انجام شد. تیمارهای آبیاری عبارت بودند از (۱) عمق آب آبیاری ۲۰ درصد بیشتر از نیاز آبی واقعی، (۲) معادل نیاز آبی واقعی، (۳) ۲۰ درصد کم آبیاری و (۴) ۴۰ درصد کم آبیاری. تیمارهای کودی نیز عبارت بودند از: (۱) مقدار کود نیتروژن برابر با توصیه کودی آزمایشگاه خاکشناسی با توجه به تجزیه شیمیایی خاک مزرعه، (۲) ۲۰ درصد بیشتر و (۳) ۳۰ درصد کمتر از نیاز کود نیتروژن توصیه شده.

داده‌های هواشناسی مورد نیاز در طول فصل پایش^۱ شد که به این منظور از داده‌های ایستگاه هواشناسی تمام اتوماتیک واقع در مجاورت مزرعه استفاده شد. داده‌های روزانه هواشناسی مورد پایش عبارت بودند از: میزان بارندگی، سرعت باد، حداقل و حداکثر دما و رطوبت نسبی هوا. میزان تابش خورشیدی نیز به روش آکینو گلا و ایکویت محاسبه شد. انتخاب روش محاسبه تابش خورشیدی بر اساس نتایج تحقیق جمشیدی (۱۳۸۷) که روش آکینوگلا و ایکویت را به عنوان مناسب‌ترین روش محاسبه تابش خورشیدی منطقه مورد مطالعه معرفی کرده است، صورت گرفت. تبخیر و تعرق واقعی به روش پایش مستقیم رطوبت وزنی خاک و استفاده

سوم، سرمای بی‌سابقه‌ای در منطقه به وقوع پیوست که بدون تردید تأثیرات معنی‌دار بر عملکرد محصول بر جای گذاشت. در طول فصول رشد مورد مطالعه نیز ماه ژوئن فصل رشد اول کم رطوبت‌ترین (۲۲/۱ درصد) و ماه دسامبر فصل رشد سوم به عنوان مرطوب‌ترین (۷۱/۲ درصد) ماه گزارش شده است. نتایج بیانگر آن است که در فصول رشد مورد مطالعه توزیع متنوعی از شرایط آب و هوایی به وقوع پیوسته که امکان بررسی تأثیر الگوی آب و هوایی منطقه بر فرآیند رشد محصول را به همراه داشته است و از این رو نتایج مطالعه از جامعیت مطلوبی برخوردار خواهد بود.

همچنین با توجه به تعداد تیمارهای آزمایشی و فصول رشد، تحقیق در گستره وسیعی از مقادیر آب و کود نیتروژن مصرفی انجام گرفته و یافته‌های آن می‌تواند در برگیرنده اثر مدیریت این دو نهاد بر عملکرد و بهره‌وری آب گندم در منطقه باشد. بازه تغییرات مقدار آب مصرفی در فصول رشد ۱ تا ۳ به ترتیب ۴۷۵/۵-۲۷۷/۵، ۴۶۸/۴-۳۱۲/۴ و ۵۰۹/۸-۳۰۷/۸ میلی‌متر بود. همچنین ترکیب ۳ سطح کود نیتروژن مصرفی ۱۰۰، ۱۴۰ و ۱۷۰ کیلوگرم در هکتار با آب مصرفی، شرایط متنوعی را به منظور بررسی تأثیر ترکیبی کود نیتروژن و آب آبیاری را بر مشخصه‌های گیاهی فراهم کرد.

۲- ارزیابی مدل‌های شبکه عصبی

آموزش مدل‌های شبکه‌های عصبی بر مبنای سعی و خطا پایه‌ریزی شد به طوری که آرایش بهینه شبکه با تغییر تعداد لایه پنهان و نرون آن، نوع تابع متحرک الگوریتم آموزشی و تعداد تکرار مرحله آموزش به منظور محاسبه عامل خروجی به دست می‌آید. مطلوب بودن لایه پنهان را می‌توان با ایجاد رگرسیون خطی بین مقادیر محاسبه شده و اندازه‌گیری و در قالب شاخص ضریب تبیین (R^2) ارزیابی کرد. در جدول ۳، تعداد نرون در لایه پنهان، تعداد لایه پنهان و ضرایب تبیین شبکه‌های عصبی مورد مطالعه در ساختار بهینه ارائه شده است. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، مدل شبکه عصبی ۱۰ (برای محاسبه عملکرد دانه) با دو لایه پنهان و ۹ نرون مناسب‌ترین برازش را با مقادیر واقعی نشان می‌دهد. مناسب‌ترین ساختار شبکه عصبی در مورد مدل محاسبه عملکرد کاه و کلش و بهره‌وری آب نیز به ترتیب به ساختار ۱۰ با دو لایه پنهان و دو نرون، و ۳ لایه پنهان و ۱۵ نرون مربوط می‌شود.

که در آن p مقدار محاسبه شده عامل موردنظر، o مقدار مشاهده‌ای عامل موردنظر، p میانگین مقادیر محاسبه شده عامل‌های موردنظر، o میانگین مقادیر مشاهده‌ای عامل‌های موردنظر و n تعداد داده مورد استفاده در محاسبات است.

نتایج و بحث

۱- شرایط آب و هوایی و مدیریت آب-کود نیتروژن در

فصول مورد مطالعه

مقادیر میانگین عامل‌های مختلف اقلیمی شامل بارش، دمای حداکثر و حداقل هوا و رطوبت نسبی هوا در طول هر یک از ماه‌های فصول رشد مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است. به منظور ارزیابی وضعیت مقدار هر یک از عامل‌ها نسبت به مقدار متوسط منطقه، مقادیر متوسط عامل‌ها در بازه زمانی ۳۰ ساله (۱۳۸۷-۱۳۵۸) نیز در این جدول آمده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که میزان بارش در طول فصل رشد دوم (۱۳۸۲-۱۳۸۱) معادل ۱۵۶/۴ میلی‌متر بوده که بیشتر از مقدار میانگین بارش ۳۰ ساله (۱۳۹/۳ میلی‌متر) است و به این ترتیب می‌توان این سال را به عنوان سال تر در منطقه معرفی کرد. در طول این فصل رشد، ماه فروردین با میزان بارش ۴۵/۵ میلی‌متر بیشترین مقدار بارندگی را داشته است که حدود دو برابر مقدار میانگین ۳۰ ساله این ماه است. طی فصول رشد اول (۱۳۸۱-۱۳۸۰) و سوم (۱۳۸۷-۱۳۸۶) نیز میزان بارندگی کمتر از میانگین دوره ۳۰ ساله منطقه بوده و می‌تواند به عنوان سال‌های خشک منطقه محسوب شود. همچنین ماه ژانویه در طول فصل رشد سوم به عنوان سردترین ماه نسبت به سایر فصول رشد مورد مطالعه و ۳۰ ساله اخیر گزارش شده است. بیشترین مقدار بارش مربوط می‌شود به فصل رشد دوم که معادل ۱۵۶/۴ میلی‌متر بوده است. همچنین مقدار بارش در فصل رشد اول و سوم به ترتیب حدود ۵۰ و ۷۰ درصد مقدار این عامل در فصل رشد دوم است. بازه تغییرات حداکثر و حداقل دمای منطقه نیز نسبتاً وسیع و بین ۳۷/۷ درجه سانتی‌گراد در ماه خرداد فصل رشد سوم و ۹- درجه سانتی‌گراد در ماه دی همین فصل تغییر نشان داده است. بررسی انجام گرفته گویای تغییرات بیشتر این دو عامل نسبت به میانگین ۳۰ ساله منطقه آن است. در فصل رشد

جدول ۲- میانگین عامل‌های اقلیمی در ماه‌های مختلف فصول رشد

ماه	بارندگی (میلی‌متر)	۱۳۸۰-۱۳۸۱			۱۳۸۱-۱۳۸۲			رطوبت نسبی (درصد)
		حداکثر درجه حرارت (درجه سانتی‌گراد)	حداقل درجه حرارت (درجه سانتی‌گراد)	بارندگی (میلی‌متر)	حداکثر درجه حرارت (درجه سانتی‌گراد)	حداقل درجه حرارت (درجه سانتی‌گراد)	رطوبت نسبی (درصد)	
مهر	۰	۲۷/۴	۱۲/۳	۲۳/۲	۳۰/۱	۱۶/۱	۳۵/۲	
آبان	۲	۱۸/۲	۵/۴۰	۴۶/۲	۱۸/۶	۷/۰	۵۰/۸	
آذر	۰	۱۳/۶	۳/۳	۶۴/۰	۹/۰	۰/۴	۶۳/۰	
دی	۱۳	۱۰/۳	۰/۹	۶۱/۵	۱۵	۰/۲	۵۵/۷	
بهمن	۰	۱۵/۶	۱/۶	۴۵/۷	۲۰/۷	۱۲/۳	۵۶/۶	
اسفند	۱۵	۲۰/۷	۶/۵	۳۸/۱	۱۶/۴	۴/۵	۴۸/۹	
فروردین	۴۹	۲۱/۷	۱۰/۳	۵۰/۹	۲۲/۵	۱۱/۲	۵۲/۸	
اردیبهشت	۵	۲۹/۶	۱۴/۴	۳۳/۰	۸/۶	۱۳/۴	۳۷/۶	
خرداد	۰	۳۵/۶	۱۹/۲	۲۲/۱	۰	۱۹/۴	۲۷/۳	

ادامه جدول ۲-

ماه	بارندگی (میلی‌متر)	۱۳۸۶-۱۳۸۷			دوره سی ساله (۱۳۵۸-۱۳۸۷)			رطوبت نسبی (درصد)
		حداکثر درجه حرارت (درجه سانتی‌گراد)	حداقل درجه حرارت (درجه سانتی‌گراد)	بارندگی (میلی‌متر)	حداکثر درجه حرارت (درجه سانتی‌گراد)	حداقل درجه حرارت (درجه سانتی‌گراد)	رطوبت نسبی (درصد)	
مهر	۰/۳	۳۰/۳	۱۰/۸	۳۳/۳	۲۶/۲	۱۳/۸	۴۹/۷	
آبان	۶/۷	۲۱/۶	۶/۶	۴۴/۰	۱۶/۵	۷/۵	۵۹/۱	
آذر	۰	۱۱/۲	۱/۱	۶۹/۰	۹/۸	۲/۲	۶۷/۱	
دی	۳/۴	۱/۰	-۹/۰	۷۱/۲	۷/۵	-۰/۱۵	۶۵/۴	
بهمن	۱۳/۳	۱۰/۰	۰/۳	۶۳/۶	۱۰/۱	۱/۴	۵۸/۲	
اسفند	۰/۱	۲۳/۵	۹/۲	۳۳/۲	۱۵/۱	۵/۶	۵۲/۴	
فروردین	۲/۲	۲۶/۰	۱۲/۴	۳۴/۰	۲۲/۵	۱۲/۱	۴۶/۸	
اردیبهشت	۱/۶	۳۰/۰	۱۴/۴	۳۱/۹	۲۷/۸	۱۵/۵	۴۲/۱	
خرداد	۰	۳۷/۷	۱۸/۳	۲۵/۳	۰/۸	۲۱/۵	۳۶/۳	

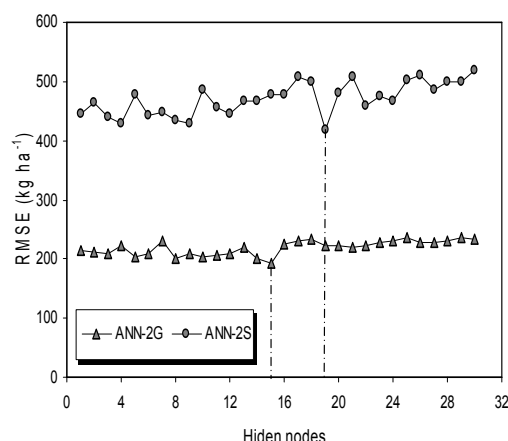
جدول ۳- تعداد لایه پنهان، تعداد نرون و ضریب تبیین ساختارهای شبکه عصبی

عامل	شماره ساختار شبکه عصبی									
	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱
تعداد نرون در لایه پنهان	۹	۱۲	۲۰	۲۱	۱۲	۱۶	۷	۲۴	۱۸	۱۵
عملکرد دانه	۲	۲	۱	۳	۳	۳	۱	۱	۲	۲
ضریب تبیین	۰/۸۵	۰/۸۳	۰/۷۸	۰/۸۱	۰/۸۴	۰/۸۵	۰/۸۰	۰/۸۱	۰/۸۱	۰/۸۶
تعداد نرون در لایه پنهان	۱۷	۱۲	۱۳	۲۲	۲۶	۱۷	۸	۵	۱۹	۱۹
عملکرد کاه و کلش	۲	۱	۱	۲	۳	۳	۲	۲	۲	۱
ضریب تبیین	۰/۷۸	۰/۷۶	۰/۶۱	۰/۷۰	۰/۷۴	۰/۷۴	۰/۷۲	۰/۷۵	۰/۷۴	۰/۷۷
تعداد نرون در لایه پنهان	۱۵	۷	۲۱	۲۴	۶	۴	۲۶	۵	۱۰	۱۱
بهره‌وری آب	۳	۱	۱	۱	۲	۳	۳	۲	۲	۲
ضریب تبیین	۰/۸۳	۰/۷۹	۰/۷۰	۰/۷۷	۰/۸۰	۰/۸۱	۰/۷۹	۰/۷۸	۰/۷۹	۰/۷۸

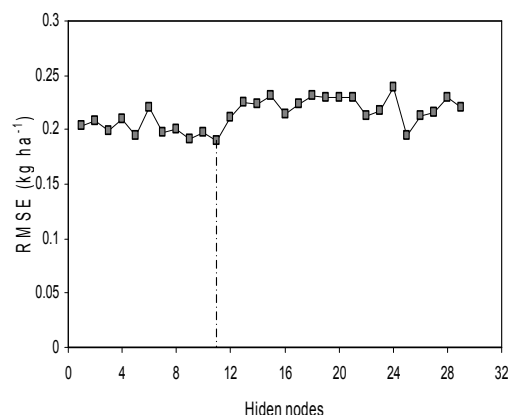
شبکه عصبی محاسبه بهره‌وری آب و عملکرد دانه به اندازه کافی کوچک شده که بیانگر آن است که شبکه به خوبی آموزش دیده است. با توجه به روند تغییرات RMSE و تعداد جواب نادرست در تست شبکه، برای مدل مربوط به محاسبه عملکرد دانه تعداد ۱۵ نرون، در مدل محاسبه عملکرد کاه و کلش ۱۹ نرون و در مدل محاسبه بهره‌وری آب ۱۱ نرون به

شکل ۱ اثر افزایش تعداد نرونهای لایه پنهان را بر خطای مدل‌های شبکه عصبی عملکرد دانه، عملکرد کاه و کلش و بهره‌وری آب (مدل دو) نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در ساختار هر دو شبکه با افزایش تعداد نرون، روند مشخصی در RMSE شبکه به وجود نمی‌آید اما مقدار کمی این شاخص آماری در مدل‌های

لایه میانی به همین صورت انجام پذیرفت.



عنوان تعداد نرون‌های ساختار شبکه‌ها تعیین گردید. در مورد سایر شبکه‌های مورد مطالعه نیز انتخاب تعداد نرون



شکل ۱- روند آموزش شبکه به ازای افزایش تعداد نرون‌های لایه میانی (الف - بهره‌وری آب ب - عملکرد دانه و کاه و کلش)

مورد مطالعه، مقدار عملکرد دانه را کمتر از مقادیر واقعی و مقدار عملکرد کاه و کلش را بیشتر از مقادیر واقعی نشان می‌دهد. به طور کلی دقت مدل‌های شبکه عصبی توسعه یافته به منظور محاسبه عملکرد دانه و بهره‌وری آب گندم مطلوب‌تر از مدل‌های شبکه عصبی توسعه یافته به منظور محاسبه عملکرد کاه و کلش است.

۳. تحلیل حساسیت عملکرد و بهره‌وری آب گندم به متغیرهای ورودی

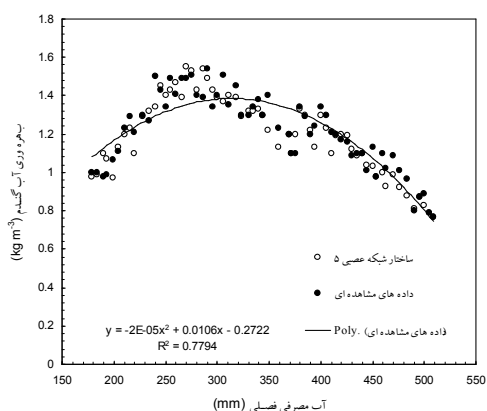
مقایسه شاخص‌های آماری ساختارهای عصبی مصنوعی مختلف (جدول ۳ و ۴) نشان می‌دهد که با حذف یک یا چند متغیر ورودی مؤثر بر عملکرد گیاه و بهره‌وری آب از مدل‌های مورد مطالعه، تغییراتی در دقت مدل‌ها، بوجود می‌آید. تحلیل حساسیت مدل‌ها بیانگر آن است که بهره‌وری آب گندم بیشترین حساسیت را به عامل مقدار آب مصرفی فصلی نشان می‌دهد (مقایسه نتایج مدل ۸ با سایر مدل‌ها). با حذف عامل مقدار آب مصرفی فصلی از مدل‌ها، مقدار R^2 به شدت کاهش و مقدار RMSE، MBA و STE افزایش می‌یابد. این نتیجه‌گیری درباره عملکرد گندم نیز صحت دارد.

نتایج مدل‌های شبکه عصبی با مقادیر مشاهده‌ای مورد مقایسه قرار گرفت. به این منظور مقادیر کمی شاخص‌های آماری RMSE، MBA و STE برای هر یک از مدل‌های محاسبه عملکرد دانه، عملکرد کاه و کلش و بهره‌وری آب گندم محاسبه و در جدول ۴ ارائه شد. نتایج نشان می‌دهد که محاسبه‌های مدل شبکه عصبی ۱۰ بهترین تطابق را با داده‌های مشاهده‌ای بهره‌وری آب گندم دارد. مقدار شاخص‌های RMSE، MBA و STE در این مدل به ترتیب ۰/۱۲ کیلوگرم بر متر مکعب، ۰/۱۰ و ۰/۱۱ کیلوگرم بر متر مکعب است. در غالب موارد ساختارهای شبکه عصبی مورد مطالعه، مقدار بهره‌وری آب را کمتر از مقادیر مشاهده‌ای نشان می‌دهد. به منظور محاسبه عملکرد دانه و کاه و کلش گندم نیز ساختارهای شبکه عصبی ۱۰ (که در آنها متغیرهای ورودی مدل‌ها مقدار آب و نیتروژن مصرفی است) مطلوب‌ترین مدل شبکه عصبی شناخته شد. مقدار شاخص‌های RMSE، MBA و STE در مدل انتخابی به منظور محاسبه عملکرد دانه به ترتیب ۱۷۰ کیلوگرم در هکتار، ۱۲۱ و ۱۳۳ کیلوگرم در هکتار و در مدل انتخابی به منظور محاسبه عملکرد کاه و کلش به ترتیب ۳۷۰ کیلوگرم در هکتار، ۲۲۱ و ۲۳۰ کیلوگرم در هکتار تعیین شد. نتایج نشان می‌دهد که در کلیه موارد، مدل‌های شبکه عصبی

جدول ۴- مقادیر شاخص‌های آماری حاصل از ارزیابی ساختارهای شبکه عصبی

عامل	شاخص آماری	شماره ساختار شبکه عصبی									
		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
عملکرد دانه	RMSE (kg ha ⁻¹)	۱۹۲	۲۸۴	۲۷۴	۳۵۷	۱۸۲	۱۶۵	۲۸۷	۴۱۷	۲۳۴	۱۷۰
	MBA	-۱۵۰	-۱۴۴	-۱۳۴	-۲۰۹	-۱۴۱	-۱۳۶	-۲۵۰	-۳۸۱	-۱۳۵	-۱۲۱
عملکرد کاه و کلش	STE (kg ha ⁻¹)	۱۲۷	۱۵۲	۱۴۹	۱۸۸	۱۴۳	۱۴۱	۲۴۹	۳۵۲	۱۳۱	۱۳۳
	RMSE (kg ha ⁻¹)	۴۲۸	۵۰۸	۵۱۰	۶۲۱	۳۸۳	۳۶۱	۷۶۸	۸۰۹	۴۷۸	۳۷۰
بهره‌وری آب	MBA	۲۱۰	۲۹۳	۲۸۰	۳۶۷	۲۸۱	۲۹۸	۳۹۱	۶۵۶	۲۵۰	۲۲۱
	STE (kg ha ⁻¹)	۲۴۷	۲۸۰	۲۷۲	۳۷۰	۲۸۷	۲۸۲	۴۰۲	۶۹۸	۲۶۲	۲۳۰
	RMSE(kg ha ⁻¹)	-۰/۱۹	-۰/۱۸	-۰/۱۸	-۰/۲۰	-۰/۱۸	-۰/۱۹	-۰/۲۲	-۰/۲۹	-۰/۱۸	-۰/۱۲
	MBA	-۰/۱۹	-۰/۱۷	-۰/۱۶	-۰/۱۵	-۰/۱۳	-۰/۱۳	-۰/۱۸	-۰/۲۱	-۰/۱۷	-۰/۱۰
	STE (kg ha ⁻¹)	-۰/۱۸	-۰/۱۷	-۰/۱۵	-۰/۱۶	-۰/۱۰	-۰/۱۴	-۰/۲۰	-۰/۲۴	-۰/۱۶	-۰/۱۱

است و برابر با ۱/۵۵ و ۰/۸۱ کیلوگرم بر متر مکعب محاسبه می‌شود (شکل ۲). در سطوح نیتروژن مصرفی ۱۴۰ و ۱۷۰ کیلوگرم در هکتار، مقدار بیشینه بهره‌وری آب گندم به ترتیب به‌ازای عمق آب مصرفی ۳۷۴ و ۴۰۵ میلی‌متر و برابر با ۱/۴۴ و ۱/۳۹ کیلوگرم بر متر مکعب تعیین شد. در این‌باره دهقانی سانچ و همکاران (۱۳۸۷) بازه تغییرات بهره‌وری آب گندم را به ازای مدیریت‌های مختلف آب و کود در سه منطقه ارومیه، مشهد و کرج ۱/۷۳ - ۰/۴ کیلوگرم بر متر مکعب محاسبه کردند. یافته‌های این پژوهش بیانگر آن است که با مدیریت آب و کود نیتروژن و کاربرد مقدار بهینه هر یک از این دو نهاده (با توجه به اثر توأمان این دو متغیر مستقل) می‌توان بهره‌وری آب گندم را تا حد معنی‌داری بهبود داد. در این‌باره تأمین مقدار مناسب نیاز کودی محصول با توجه به عمق آب کاربردی بسته به شرایط آبی توصیه می‌شود.



شکل ۲- مقایسه نتایج مدل شبکه عصبی مصنوعی ۵ و داده‌های مشاهداتی (رابطه بهره‌وری آب گندم و آب مصرفی فصلی)

یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد که رتبه‌بندی حساسیت بهره‌وری آب گندم به عوامل مختلف مورد مطالعه به‌صورت جدول ۵ است. همان‌طور که در جدول ۵ نشان داده شده است بعد از مقدار آب مصرفی فصلی، بهره‌وری آب گندم بیشترین حساسیت را به مقدار نیتروژن مصرفی و کمترین حساسیت را به مقدار بیشینه درجه حرارت هوا دارد. حساسیت پایین به درجه حرارت بیشینه هوا را می‌توان در میزان تغییرات کمتی دمای هوا در طول فصل رشد گندم جستجو کرد. در طول فصل رشد این گیاه در منطقه مورد مطالعه، خرداد ماه به عنوان گرمترین ماه مطرح بوده است که قبل از تأثیرگذاری زیاد این عامل بر عملکرد، برداشت محصول صورت می‌گیرد. به طور کلی تأثیر عامل‌های اقلیمی بجز مقدار کمینه درجه حرارت هوا، در طول ماه‌های اسفند تا خرداد بیشتر از سایر ماه‌های سال بوده است اما در مورد کمینه درجه حرارت هوا، دی و بهمن، تأثیر بیشتری بر بهره‌وری آب و عملکرد گندم دارند. همچنین رتبه‌بندی حساسیت عملکرد دانه و کاه و کلش گندم نسبت به این عوامل نیز از روند مشابهی تبعیت می‌کند.

جدول ۵- رتبه‌بندی حساسیت بهره‌وری آب گندم نسبت به

عوامل مختلف							
عامل	SI	N	RH	S	Tmean	Tmin	Tmax
رتبه	۱	۲	۶	۳	۵	۴	۷
حساسیت							

بررسی نتایج نشان می‌دهد که مقدار بیشینه و کمینه بهره‌وری آب گندم در سطح نیتروژن مصرفی ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار به ترتیب به‌ازای ۲۷۲ و ۴۹۰ میلی‌متر آب مصرفی

است. علت عملکرد بهتر شبکه عصبی را می‌توان به هوشمند بودن فرآیند آنالیز داده‌ها نسبت داد به طوری که طی فرآیند آموزش، شبکه عصبی قادر خواهد بود روابطی منطقی میان نگاشت‌های ورودی و خروجی را آموزش ببیند و از آن برای محاسبه داده‌هایی که در آموزش شبکه به کار نرفته‌اند، استفاده کند. در حالی که آنالیز رگرسیونی تنها قادر به برقراری تعدادی از مفاهیم ریاضی و آماری میان داده است.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه کارایی و قابلیت کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی دینامیک در شبیه‌سازی و پیش‌بینی عملکرد و بهره‌وری آب محصول گندم بررسی شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی در تخمین عملکرد و بهره‌وری آب گندم دقت مطلوبی دارند. مقایسه نتایج مدل‌های شبکه عصبی و رگرسیون غیرخطی بیانگر آن است که مدل‌های شبکه عصبی دقت مطلوب‌تری دارند. مدل‌های شبکه عصبی انتخابی می‌توانند با دقت کافی عملکرد دانه و بهره‌وری آب گندم را در منطقه مورد مطالعه محاسبه کنند و به منظور برنامه‌ریزی‌های منطقه‌ای با توجه به تغییرات عامل‌های اقلیمی و گزینه‌های مختلف مدیریت آب و کود نیتروژن در بهینه‌سازی بهره‌وری آب استفاده شوند. کاربرد این مدل‌ها می‌تواند زمینه ارتقای بهره‌وری آب این گیاه استراتژیک را در شرایط مختلف اقلیمی زمینه‌سازی نموده و امکان بهره‌برداری منطقی و اقتصادی از منابع آب و کود نیتروژن و برنامه‌ریزی برای استفاده تلفیقی بهینه از این دو نهاد مهم را میسر کند. اهمیت کاربرد این مدل‌ها با توجه به محدودیت منابع آب منطقه و مشکلات زیست محیطی و بار هزینه‌ای حاصل از مصرف نامناسب کود نیتروژن که بر کشاورزان تحمیل می‌گردد، ضروری است.

۴. مقایسه مدل‌های شبکه عصبی با مدل‌های رگرسیون غیر خطی

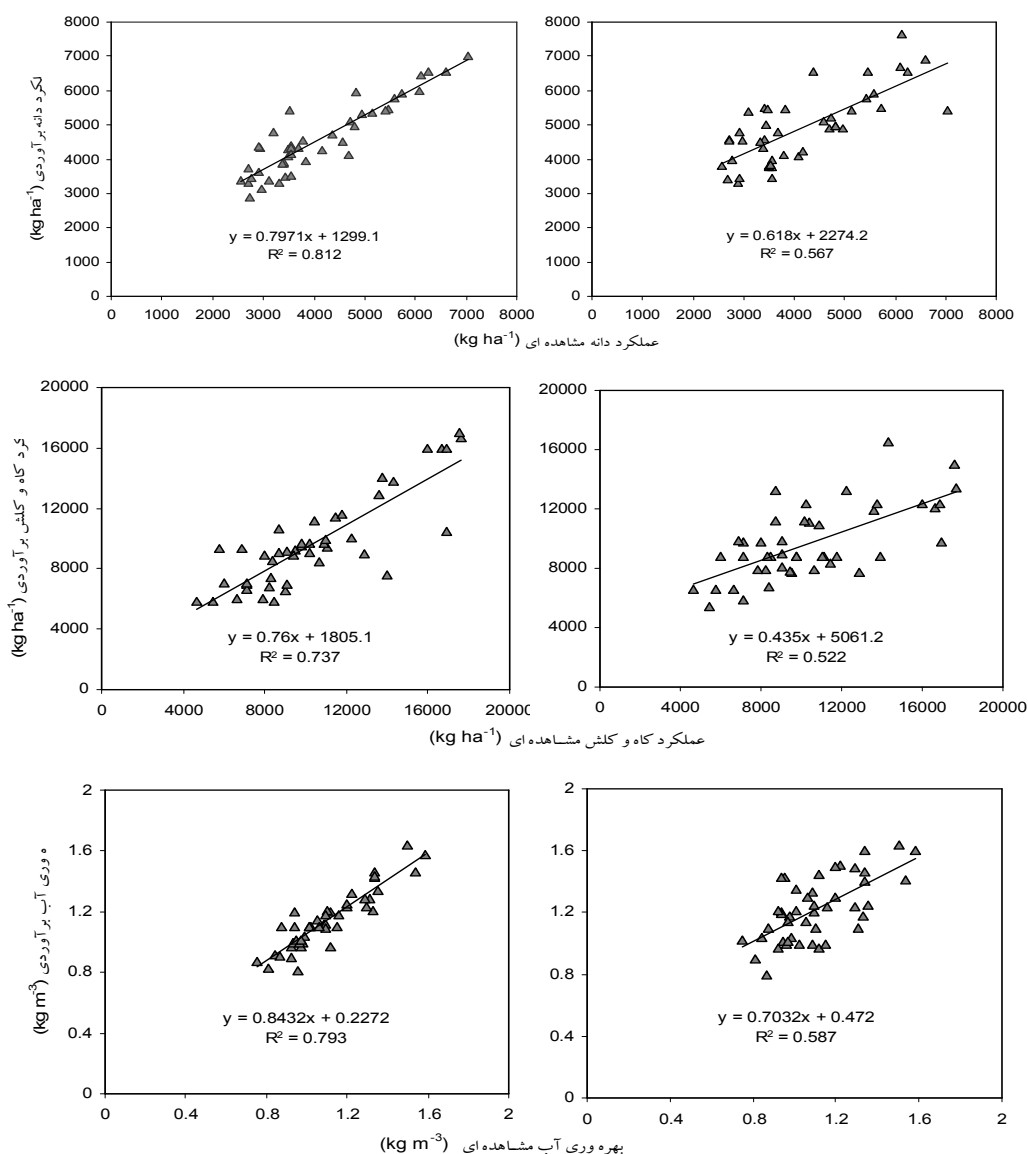
در این مطالعه همچنین مدل‌های شبکه عصبی با نتایج معادلات رگرسیون غیرخطی مورد مقایسه قرار گرفتند. در این بخش نتایج مدل‌های شبکه عصبی ۱۰ با نتایج معادلات رگرسیونی غیر خطی برآزش شده بر داده‌های مشاهده‌ای ارائه می‌شود (شکل ۳). معادلات رگرسیونی غیر خطی استخراج شده برای محاسبه عامل عملکرد دانه (GY)، عملکرد کاه و کلش (SY) و بهره‌وری آب (WP) نسبت به دو متغیر مقدار آب مصرفی (SI) و کود نیتروژن مصرفی (N) به صورت زیر هستند.

$$GY = -7.357 \times 10^{-5} (SI)^2 - 1.667 \times 10^4 (N)^2 + 7.139 \times 10^{-2} (SI) + 0.103 (N) - 26.6097 \quad (7)$$

$$SY = -8.922 \times 10^{-5} (SI)^2 - 7.398 \times 10^{-6} (N)^2 + 9.158 \times 10^{-2} (SI) + 1.1438 \times 10^{-2} (N) - 14.612 \quad (8)$$

$$WP = -2.102 \times 10^{-5} (SI)^2 - 4.742 \times 10^{-5} (N)^2 + 1.697 \times 10^{-2} (SI) + 2.879 \times 10^{-2} (N) - 6.2 \quad (9)$$

مقایسه نتایج مدل‌های شبکه عصبی و رگرسیون غیرخطی (شکل ۴) نشان می‌دهد که مدل‌های شبکه عصبی دارای دقت مطلوب‌تری در محاسبه هر سه عامل بهره‌وری آب و عملکرد دانه و عملکرد کاه و کلش گندم است. به عنوان مثال، در مقایسه نتایج مدل رگرسیون غیر خطی مربوط به بهره‌وری آب با مقادیر مشاهداتی، مقدار ضریب تبیین و RMSE به ترتیب ۰/۴۳ و ۰/۲۷ کیلوگرم بر مترمکعب بوده است که در مدل شبکه عصبی مصنوعی با متغیرها و داده‌های ورودی مشابه به ترتیب ۰/۷۹ و ۰/۱۸ کیلوگرم بر مترمکعب تغییر می‌یابند. مقدار شیب و عرض از مبدا بهترین خط برآزش شده از تطابق نتایج مدل رگرسیون غیرخطی و مقادیر مشاهداتی به ترتیب ۰/۷ و ۰/۴۷۲ بوده است که در مورد مدل شبکه عصبی مورد نظر به ۰/۸۴ و ۰/۲۲ تغییر می‌یابند. به طور کلی این نتیجه در مورد سایر مدل‌های شبکه عصبی توسعه یافته در این تحقیق نیز صادق



شکل ۳- مقایسه عامل‌های خروجی محاسبه شده از مدل‌های شبکه عصبی شماره یک و رگرسیون غیر خطی

سیاسگزاری

هزینه انجام این تحقیق از اعتبارات پژوهشی دانشگاه تهران در قالب طرح تحقیقاتی شماره پ/۱/۲۰۰۲/۷۳۰۵۰ تأمین شده است که به این وسیله از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه تهران سپاسگزاری می‌شود.

منابع

۱- تدین م.ر. و امام ی. ۱۳۸۶. تأثیر آبیاری تکمیلی و کود نیتروژن بر واکنش‌های مرفولوژیک و عملکرد دانه دو

رقم گندم تحت شرایط دیم در استان فارس. مجله علمی کشاورزی. ۳۰ (۲): ۵۳-۶۹.
 ۲- توکلی ع.ر. ۱۳۷۹. بررسی نقش آبیاری تکمیلی در مدیریت مصرف آب در شرایط دیم. دهمین همایش کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران.
 ۳- دهقانی سانجیح ح. نخجوانی مقدم م.م. و اکبری م. ۱۳۸۷. بررسی کارایی مصرف آب براساس مزایای نسبی مناطق و کم‌آبایی. مجله آبیاری و زهکشی ایران. ۲(۱): ۷۷-۹۱.

- ۱۵- Drummond S.T. Sudduth K.A. Joshi A. Birrell S.J. and Kitchen N.R. 2003. Statistical and neural methods for site-specific yield prediction. *Trans. of the ASAE* 46(1):5-14.
- ۱۶- Elizondo D.A. McClendon R.W. and Hoogenboom G. 1994. Neural network models for predicting flowering and physiological maturity of soybean. *Tran. of the ASAE* 37:981-988.
- ۱۷- Gajri P.R. Prihar S.S. and Arora V.K. 1993. Interdependence of nitrogen and irrigation effects on growth and input use efficiency in wheat. *Field. Crops Res.* 31:71-86.
- ۱۸- Jin Y.Q. and Liu C. 1997. Biomass retrieval from high-dimensional active/passive remote sensing data by using artificial neural networks. *Int. J. Remote Sens.* 18(4):971-979.
- ۱۹- Kaul M. Hill R.L. and Walthall C. 2005. Artificial neural networks for corn and soybean yield prediction. *Agriculture Systems*, 85:1-18.
- ۲۰- Keiner L.E. and Yan X. 1998. A neural network model for estimating sea surface chlorophyll and sediments from thematic mapper imagery. *Remote Sens. Environ.* 66 (2):153-165.
- ۲۱- Kimes D.S. Nelson R.F. Manry M.T. and Fung A.K. 1998. Attributes of neural networks for extracting continuous vegetation variables from optical and radar measurements. *Int. J. Remote Sens.* 19(14):2639-2663.
- ۲۲- Kitchen N.R. Drummond S.T. Lund E.D. Sudduth K.A. and Buchleiter, G.W. 2003. Soil electrical conductivity and topography related to yield for three contrasting soil-crop systems. *Agronomy Journal* 95(3):483-495.
- ۲۳- Lawlor D.W. Day W. Johnston A.E. Legg B.J. and Parkinson K.J. 1988. Nitrate nutrition and temperature under drought: crop development, dry matter accumulation and nutrient content. *Journal of Agricultural Science.* 96:167-186.
- ۲۴- Liu J. and Goering C.E. 1999. Neural network for setting target corn yields. Presented at 1999 ASAE Annual International Meeting, ASAE, St. Joseph, MI, USA.
- ۲۵- Liu J. Goering C.E. and Tian L. 2001. A neural network for setting target corn yields. *Trans. Of the ASAE* 44(3):705-713.
- ۲۶- Maier H.R. Dandy G.C. 1998. The effect of internal parameters and geometry on the performance of back-propagation neural networks: an empirical study. *Environmental Modeling and Software* 13:193-209.
- ۲۷- Oweis T. Pala M. And Rayan J. 1998. Stabilizing rain-fed wheat yields with supplemental irrigation and nitrogen in a Mediterranean climate. *Agron. J.* 90:672-681.
- ۲۸- Pandey P.k. Maranville J.W. and Admou A. 2001. Tropical wheat response to irrigation and
- ۴- جمشیدی م. ۱۳۸۷. مقایسه روش‌های مختلف تخمین تابش خورشیدی در جنوب شرق استان تهران. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران.
- ۵- صفا ب. خلیلی ع. تشنه‌لب م. و لیاقت ع. ۱۳۸۲. پیش‌بینی عملکرد گندم دیم با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی. نیوار، ۴۸: ۴۷-۶۲.
- ۶- فرجی ه. سیادت ع.ا. فتحی، ق.ا. امام ی. نادبان ح.ا. و راسخ ع. ۱۳۸۵. تأثیر نیتروژن بر عملکرد گندم در شرایط تنش خشکی، پایان دوره رشد. مجله علمی کشاورزی، ۲۹(۱):
- ۷- عباس پلنگی ج. معاضد ه. و طارقیان ر. ۱۳۸۵. تخمین تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع با استفاده از شبکه‌های عصبی در منطقه اهواز. همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۸- میناقلی ف. و محمدی ک. ۱۳۸۳. پیش‌بینی تغییرات کیفیت آب رودخانه زاینده‌رود با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی. دومین کنفرانس ملی دانشجویی منابع آب و خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز.
- ۹- نواییان م. لیاقت ع.م. و همایی م. ۱۳۸۳. محاسبه سریع هدایت آبی اشیاع خاک با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی. دومین کنفرانس ملی دانشجویی منابع آب و خاک، دانشگاه شیراز.
- 10- Atkinson P.M. and Tatnall A.L. 1997. Neural networks in remote sensing. *Int. J. Remote Sens.* 18(4):699-709.
- 11- Batchelor W.D. Yang X.B. and Tshanz A.T. 1997. Development of a neural network for soybean rust epidemics. *Trans. of the ASAE* 40: 247-252.
- 12- Chang D.H. and Islam S. 2000. Estimation of soil physical properties using remote sensing and artificial neural network. *Remote Sens. Environ.* 74(3):534-544.
- 13- Del Frate F. Ferrazzoli P. and Schiavon G. 2003. Retrieving soil moisture and agricultural variables by microwave radiometry using neural networks. *Remote Sens. Environ.* 84(2):174-183.
- 14- De Wolf E.D. and Francl L.J. 2000. Neural network classification of tan spot and stagonospora blotch infection period in a wheat field environment. *Phytopathology* 90(2):108-113.

- 33- Sudduth K.A Drummond S.T Birrell S.J and Kitchen N.R. 1996. Analysis of spatial factors influencing crop yield. In: Precision Agriculture: Proceedings of the 3rd International Conference, Minneapolis, MN, ASA/CSSA/SSSA, St. Paul, MN. USA.
- 34- Tamari S. Wosten J.H.M. and Ruiz Suarez J.C. 1996. Testing an artificial neural network for predicting soil hydraulic conductivity. SSSAJ 60 (6):1732-1741.
- 35- Uhrig J.W Engel B.A and Baker W.L. 1992. An application of neural networks: predicting corn yields. In Computers in Agricultural Extension Programs: Proceedings of the 4th International Conference, Orlando, FL. ASAE, St. Joseph, MI, USA.
- 36- Yang C.-C. Prasher S.O. Srekanth S. Patni N.K. and Masse L. 1997. An artificial neural network model for simulating pesticide concentrations in soil. Tran. of the ASAE 40:1285-1294.
- nitrogen in a Sahelian environment. I. grain yield, yield components and water use efficiency. European Journal of Agronomy, 15:93-105.
- 29- Parmar R.S. 1997. Estimation of aflatoxin contamination in preharvest peanuts using neural networks. Trans. of the ASAE 40 (3):809-811.
- 30- Simpson P.K. 1990. Artificial Neural Systems: Foundations, Paradigms, Applications, and Implementations. Pergamon Press, New York.
- 31- Starrett S.K. and Adams G.L. 1997. Using artificial neural networks and regression to predict percentage of applied nitrogen leached under turfgrass. Communications in Soil Science and Plant Analysis 28:497-507.
- 32- Starrett S.K. Najjar Y. Adams G. and Hill J. 1998. Modeling pesticide leaching from golf courses using artificial neural networks. Communications in Soil Science and Plant Analysis 29 (19/20):3093-3106.