

مقاله علمی-پژوهشی

ارزیابی روش سیستم استنتاج فازی (Fuzzy Inference Systems) در تخمین عملکرد روزانه

ذرت نشایی

حوریه مرادی^۱، حسین انصاری^۲، امین علیزاده^۳ و محمد نادریانفر^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۳۱

چکیده

این پژوهش با هدف بررسی امکان استفاده از کارآمدی سیستم‌های استنتاج فازی، در ایجاد نگاهت بین پارامترهای هواشناسی و گیاهی و عملکرد گیاه ذرت نشایی انجام شد. برای انجام کار، از داده‌های تحقیق با عنوان بررسی و مقایسه آب مصرفی و کارایی مصرف آب در کشت نشایی و کشت مستقیم ذرت فوق شیرین در رژیم‌های مختلف آبیاری و شبیه‌سازی آن برای شرایط متفاوت اقلیمی خراسان رضوی که به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار در اراضی زراعی ایستگاه تحقیقاتی طرق استان خراسان رضوی در سال زراعی ۹۳-۹۴ استفاده شد. تیمارها در تحقیق مورد استفاده شامل کرت اصلی سه سطح تأمین آب معادل ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد نیاز آبی گیاه ذرت و کرت‌های فرعی شامل دو روش کشت نشا ۲۰ و ۳۰ روزه و کشت مستقیم بود. داده‌های ورودی و خروجی مربوط به این تیمارها در مدل آکواکراپ استفاده شد. پس از بررسی مدل‌های موجود و ترکیب‌های مختلف داده‌های روزانه اجزا عملکرد و متغیرهای مرتبط، ۷ مدل فازی برای برآورد عملکرد روزانه گیاه ارائه شد. در این مدل‌ها عملکرد روزانه محاسبه شده از مدل آکواکراپ به‌عنوان خروجی مدل در نظر گرفته شد و کارایی مدل‌ها با استفاده از آماره‌های ریشه میانگین مربع خطا، خطای انحراف میانگین، ضریب تعیین و معیار جاکویدز و معیار صباغ و همکاران مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج مدل‌های فازی ارائه شده نشان دادند که سیستم‌های فازی قادر به برآورد عملکرد روزانه با دقت قابل قبولی هستند. به‌طوری که مدل فازی با ۹ متغیر ورودی بالاترین همبستگی (۰/۹۸) را داشته و با در نظر گرفتن سایر پارامترهای ارزیابی، مدل با ۳ پارامتر درصد پوشش گیاهی، شاخص برداشت و میانگین دمای هوای روزانه تطابق بسیار خوبی با مدل آکواکراپ در مرحله آموزش داشت. در مرحله آزمون نیز، مدل فازی با ۳ پارامتر درصد پوشش گیاهی، شاخص برداشت و میانگین دمای هوای روزانه بهترین تطابق را به دست داد.

واژه‌های کلیدی: ذرت نشایی، سیستم استنتاج فازی، عملکرد روزانه، مدل Aquacrop

مقدمه

هوا، خصوصیات ژئوتیپ‌های گیاهی، ویژگی‌های خاک و عوامل مدیریتی (آبیاری و کود دهی) را بر روی رشد گیاه شبیه‌سازی می‌کنند. از بین مدل‌های گیاهی، مدل AquaCrop یکی از مدل‌های پرکاربرد است که به دلیل سادگی، نیاز به داده‌های کمتر، کاربردی بودن و دقت قابل قبول نسبت به سایر مدل‌های رشد گیاهی برتری دارد. در تحقیقات بسیاری از این مدل جهت مدل‌سازی عملکرد و رشد گیاهان مختلف استفاده شده است که به تعدادی از این تحقیقات که به‌طور خاص در زمینه مطالعات عملکرد ذرت بوده‌اند، می‌توان اشاره نمود. هنگ و همکاران این مدل را برای محصول ذرت در سه منطقه‌ی زاراگوزا در اسپانیا و تگزاس و فلوریدا در ایالات متحده‌ی امریکا ارزیابی کردند. مدل در شبیه‌سازی آب مصرفی گیاه در شرایط تبخیر - تعرق و باد زیاد توانایی خوبی داشت. همچنین توانست بیوماس، عملکرد دانه و سطح سایه‌انداز تحت شرایط بدون تنش آبی و با تنش آبی متوسط را در حد مناسب شبیه‌سازی کند؛ اما در تنش آبی شدید، به‌خصوص در

به دلیل پیچیدگی فرآیندها و مؤلفه‌های مرتبط با چرخه آب در طبیعت، جهت شناخت بهتر ماهیت غیرخطی و پیچیده آن نیاز به توسعه مدل‌های شبیه‌سازی ساده‌شده با توجه به اهداف مورد انتظار می‌باشد. این مدل‌ها تغییرات بیلان آب در خاک، اثرات تغییرات آب و

۱- دانشجوی دکتری مهندسی آبیاری و زهکشی دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۴- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جیرفت، کرمان، ایران
(Email: ansary@um.ac.ir)

(*- نویسنده مسول):

تخلیه آزاد با 9.837 تن در هکتار مشاهده شد (Aşık et al., 2021). خلاف و همکاران ارزیابی مدل AquaCrop را در پیش‌بینی عملکرد ذرت در شرایط کم‌آبیاری مطالعه نمودند و نتایج آن‌ها نشان داد که تبخیر و تعرق واقعی (ETa) رابطه خطی با آب مصرفی دارد. پارامترهای تولید به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر افزایش سطوح آبیاری قرار داشته و سطح 100 درصد ظرفیت زراعی مقادیر بالاتری از عملکرد دانه، بیوماس بالای زمین و عملکرد دانه گیاه را در مقایسه با 75 درصد و 50 درصد ظرفیت مزرعه نشان داد. (KHALAF et al., 2019). پالاش و همکاران بهره‌وری مصرف آب در ذرت دانه‌ای (KSCV۰۶) با استفاده از مدل AquaCrop در استان کرمانشاه تعیین نمودند. نتایج حاصل از خروجی مدل و داده‌های مزرعه‌ای نشان داد که تفاوت بین عملکرد زیست‌توده و عملکرد دانه در تیمارهای آبیاری در سطح یک درصد معنی‌دار بود. (پالاش و همکاران، ۱۴۰۰). دانیچیچ و همکاران تأثیر پیش‌بینی تغییر اقلیم در تولید ذرت با استفاده از مدل AquaCrop در شمال صربستان را مطالعه نمودند. نتایج حاصل عملکرد بسیار خوبی از مدل را نشان داد به‌طوری‌که ریشه میانگین مربعات خطا به ترتیب برای ذرت دیم و آبی 0.22 و 0.16 به دست آمد. مدل کاهش عملکرد ذرت را 15 درصد با توجه به کاهش مقدار آبیاری تا 200 میلی‌متر پیش‌بینی کرده است (Daničić et al., 2021).

به دلیل آن که تخمین عملکرد فرآیندی غیرخطی و شدیداً وابسته به عوامل مختلف گیاهی و اقلیمی است، به‌کارگیری مدل‌های ریاضی با در نظر گرفتن تمام فاکتورهای مؤثر بر آن مشکل بوده و با خطاهای قابل‌توجهی روبروست. همچنین عدم قطعیت و عدم دقت موجود در برآورد عملکرد در پیچیدگی این پدیده نقش عمده‌ای دارد، ضمن این‌که این عدم قطعیت به شرایط اقلیمی و هیدرولوژیکی وابسته بوده و عدم دقت به خطاهای انسانی یا اندازه‌گیری نیز مربوط می‌شود (کوچک زاده و بهمنی، ۱۳۸۴). یکی از شیوه‌های برخورد با خطاهای ناشی از عدم قطعیت و دقت، استفاده از تئوری مجموعه‌های فازی است. به‌طور نظری هر سیستمی که توسط منطق فازی طراحی شده باشد، توسط سایر تکنیک‌های مرسوم طراحی نیز قابل پیاده‌سازی است، اما ممکن است نسبت به شیوه منطق فازی پیچیده‌تر و مشکل‌تر باشد. منطق فازی را اولین بار زاده در سال ۱۹۶۵ معرفی کرد (Kerrel, 1992). منطق فازی شیوه‌های مرسوم برای طراحی و مدل‌سازی یک سیستم را که نیازمند ریاضیات پیشرفته و نسبتاً پیچیده‌ای است با استفاده از مقادیر و شرایط زبانی و یا به عبارتی دانش فرد خبره و با هدف ساده‌سازی و کارآمد شدن طراحی سیستم جایگزین می‌کند. هدف این نظریه یافتن الگوهای ریاضی است که با استفاده از تفکر، استنتاج انسانی و همچنین با الگوهای طبیعی و واقعی تطابق و سازگاری داشته باشد. اگرچه سیستم‌های فازی پدیده‌های غیرقطعی و نامشخص را توصیف می‌کنند، با این حال تئوری مجموعه فازی یک

مراحل حساس رشد گیاه، مدل عملکرد مناسبی نداشت (Heng et al., 2009). استرسیو و همکاران از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد محصولات ذرت، آفتابگردان و چغندر قند در شرایط دیم و آبیاری تکمیلی در صربستان استفاده کردند. نتایج نشان داد این مدل می‌تواند در تصمیم‌گیری اولیه و در انتخاب گیاهان با توجه به شرایط کمبود آب مفید باشد (Stricevic et al., 2011). عابدین پور و همکاران ارزیابی کارایی مدل AquaCrop را برای محصول ذرت در محیط نیمه‌خشک هند تحت رژیم‌های متغیر آبیاری (دیم به علاوه آبیاری به میزان 50% و 75% و 100% نیاز آبی) و نیتروژن (0 و 75 و 150 کیلوگرم در هکتار) انجام دادند و عملکرد مناسبی از مدل در برآورد بیوماس، عملکرد دانه و بهره‌وری آب گزارش شد (Abedinpour et al., 2012). کاترجی و همکاران پارامترهای گیاهی ذرت را در شرایط تنش آبی توسط مدل AquaCrop در ایتالیا شبیه‌سازی کردند. مدل به‌طور مناسبی بیوماس تجمعی روزانه را در شرایط بدون تنش و تنش آبی متوسط شبیه‌سازی کرد؛ اما عملکرد خوبی در شرایط تنش آبی شدید نداشت (Katerji et al., 2013). ماسانگانیز و همکاران برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت در گذشته (۱۹۷۱ تا ۲۰۰۰) و پیش‌بینی آن در آینده (۲۰۴۶ تا ۲۰۵۶) از مدل AquaCrop در زیمبابوه استفاده کردند. نتایج نشان داد این مدل ابزاری قابل‌اتکا و مفید برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی عملکرد محصول با توجه به تغییر اقلیم است (Masanganise et al., 2013). ضیایی و همکاران (۱۳۹۳) مدل‌های AquaCrop و CERES-Maize را در برآورد اجزای بیلان آب خاک و عملکرد ذرت تحت شرایط کود دهی سنتی و کودآبیاری در منطقه کرج مقایسه کردند و در نهایت مدل AquaCrop را برای استفاده کشاورزان و برنامه‌ریزان در سطح منطقه توصیه کردند. سندهو و ایرماک مدل AquaCrop را در شبیه‌سازی پوشش گیاهی ذرت، تبخیر و تعرق، عملکرد و بهره‌وری آب برای تاریخ‌های مختلف کشت در شرایط آبی و دیم مورد ارزیابی قرار دادند. عملکرد دانه شبیه‌سازی‌شده در سال 2011 با انحراف از داده‌های اندازه‌گیری شده تا 8 درصد قابل‌قبول بوده در حالی که در سال 2012 ، انحرافات تا 40 درصد برای تیمارهای دیم با تخمین بیش‌ازحد در هر دو سال بسیار بالاتر بود. (Sandhu and Irmak., 2019). ران و همکاران عملکرد مدل‌های AquaCrop و SIMDualKc در محاسبه مقدار تبخیر و تعرق در شرایط آبیاری کامل و کم آبیاری جهت تولید بذر ذرت با استفاده از مالچ پاشی در منطقه خشک چین را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که مدل AquaCrop عملکرد بهتری در برآورد تبخیر دارد. (Ran et al., 2017). شیک و همکاران پاسخ عملکرد گیاه ذرت تحت سناریوهای مختلف مقدار آب در دسترس گیاه (RAW) با مدل AquaCrop را مورد مطالعه قرار داده و نتیجه گرفتند بیشترین عملکرد دانه در سناریو اول با 25 درصد تخلیه آزاد 10.075 تن در هکتار و کمترین عملکرد دانه در سناریو 75 درصد

آن برای شرایط متفاوت اقلیمی خراسان رضوی که به صورت کرت-های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار در اراضی زراعی ایستگاه تحقیقاتی طرق استان خراسان رضوی در سال زراعی ۹۴-۹۳ استفاده شد. تیمارها در تحقیق مورد استفاده شامل کرت اصلی سه سطح تأمین آب معادل ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد نیاز آبی گیاه ذرت و کرت‌های فرعی شامل دو روش کشت نشا ۲۰ و ۳۰ روزه و کشت مستقیم بود. رقم بکار برده شده فوق شیرین Basin بوده و نشاهای بیست و سی روزه به تعداد لازم در داخل سینی‌های نشا با نسبت‌های معینی از کوکوپیت، پرلیت و ورمی کمپوست در گلخانه دانشگاه فردوسی مشهد، تهیه شدند. کشت بذرها در مزرعه هم‌زمان با انتقال نشاها به مزرعه بود. ابعاد زمین آزمایش ۳۰×۴۰ متر و هر کرت شامل ۴ خط کاشت با فاصله ردیف‌های ۷۵ سانتیمتری به طول ۸ متر با تراکم ۷۶۰۰۰ بوته در هکتار بود. در طول فصل رشد عملیات زراعی لازم در زمان مناسب انجام شد.

مدل Aquacrop

مدل AquaCrop از معادله دورنباس و کسام (۱۹۷۹) با تفکیک نمودن تبخیر-تعرق واقعی (ET_a) به تبخیر از سطح خاک (E_s) و تعرق (T_a) و مجزا نمودن عملکرد نهایی (Y) به ماده خشک (B) و شاخص برداشت (HI) تهیه شده است (رابطه ۱):

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_x}\right) = K_Y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_x}\right) \quad (1)$$

در این رابطه، Y_x عملکرد حداکثر، Y_a عملکرد واقعی، ET_x تبخیر-تعرق حداکثر و K_Y ضریب حساسیت به آب است. با تفکیک تبخیر-تعرق به تعرق از سطح گیاه و تبخیر از سطح خاک می‌توان اثر مصرف غیرتولیدی آب از طریق تبخیر از سطح خاک به‌ویژه در شرایط پوشش گیاهی ناکامل جلوگیری کرد. تعرق روزانه با استفاده از تبخیر-تعرق روزانه و بهره‌وری آب گیاهی که با استفاده از نیاز تبخیری و غلظت CO_2 اتمسفری نرمال شده، به عملکرد بیولوژیک روزانه گیاه تبدیل شده و بر اساس رابطه ۲ محاسبه می‌شود (Steduto et al., 2009):

$$B_i = WP^* \left(\frac{Tri}{ET_{Tot}}\right) \quad (2)$$

در این رابطه B_i عملکرد بیولوژیک (kg/m^2)، WP^* بهره‌وری آب نرمال شده (kg/m^2) که مقدار آن برای شرایط اقلیمی متفاوت نرمال و به پارامتری ثابت تبدیل شده است (Steduto et al., 2007)، T_{ri} تعرق روزانه (mm) و $ET_{o,i}$ تبخیر-تعرق روزانه واقعی (mm) است. برتری دیگر رابطه ۲ به رابطه ۱ این است که شبیه‌سازی فرآیندهای رشد گیاه در آن با استفاده از گام‌های زمانی روزانه صورت می‌گیرد، درحالی‌که در معادله ۱ شبیه‌سازی به صورت دوره رشد انجام می‌شود. در تمام دوره رشد گیاه، مقدار آب ذخیره شده در ناحیه ریشه از طریق بیلان آبی جریان آب ورودی (آبیاری و بارندگی) و خروجی

تئوری دقیق است (قاسم‌نژادمقدم و همکاران، ۱۳۸۷). با این مقدمه می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد جایی که پیچیدگی سیستم در حدی است که نمی‌توان با دقت و صراحت در مورد پارامترها مشخصه‌ها و رفتار سیستم قضاوت کرد، مفهوم فازی جهت مدل‌سازی و تحلیل مطرح می‌شود. در سال‌های اخیر استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی برای شبیه‌سازی مسائل مختلف رواج بیشتری یافته است. مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و سیستم‌های استنتاج فازی دو نمونه بارز از این مدل‌ها هستند. در زمینه مدل‌سازی عملکرد محصولات مختلف نیز با استفاده از این مدل‌ها مطالعاتی به انجام رسیده است که در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره می‌شود. کومار پیش‌بینی عملکرد محصول توسط سیستم استنتاج تطبیقی فازی-عصبی برای برنج در هند را مطالعه نمودند (Kumar et al., 2011). جاریام و ماراد از سیستم استنتاج فازی برای پیش‌بینی عملکرد سورگوم استفاده کردند (Jayaram et al., 2012). حافظی و همکاران بازده کمی و کیفی نیشکر با استفاده از شبکه عصبی فازی تطبیقی بهبود یافته توسط الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات تخمین زدند (حافظی و همکاران، ۱۴۰۰). جینگر و کومار عملکرد ذرت را با در نظر گرفتن مراحل رشد با استفاده از مدل‌سازی منطق فازی پیش‌بینی نمودند (Jinger and Kumar, 2021). نیکویی و همکاران ارزیابی مدل‌های سیستم تطبیقی استنتاج عصبی فازی در برآورد عملکرد زعفران با استفاده از داده‌های هواشناسی را انجام دادند (Nekoei et al., 2021). اگرچه در مطالعات انجام شده از داده‌های ورودی متفاوتی برای مدل‌سازی فازی محصولات متفاوت استفاده شده است و مدل‌های ارائه شده فازی با روش‌های متفاوت برآورد عملکرد مقایسه شد، اما تقریباً تمامی نتایج این تحقیقات نشان دادند که مدل فازی ابزار مناسبی برای تخمین عملکرد بوده و می‌توان آن را برای برآورد این پارامتر پیشنهاد کرد. با توجه به نتایج مطالعات فوق در رابطه توانمندی منطق فازی در برآورد عملکرد محصولات زراعی، این پژوهش باهدف بررسی امکان استفاده از کارآمدی سیستم‌های استنتاج فازی، در ایجاد نگاشت بین پارامترهای هواشناسی و گیاهی و عملکرد ذرت نشایی در مقیاس روزانه انجام پذیرفت. علاوه بر این به دلیل کامل نبودن اطلاعات موردنیاز از یکسو و هزینه بالای ثبت اطلاعات برای پارامتر-های مرتبط با عملکرد از سوی دیگر، سعی شده تا نسبت به ارائه مدلی با استفاده از حداقل داده‌های موردنیاز اقدام گردد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

جهت انجام این مطالعه، از داده‌های تحقیق با عنوان بررسی و مقایسه آب مصرفی و کارایی مصرف آب در کشت نشایی و کشت مستقیم ذرت فوق شیرین در رژیم‌های مختلف آبیاری و شبیه‌سازی

قوانین مختلفی با وزن‌های متفاوت تعریف شد. به‌منظور تکمیل مراحل مدل‌سازی، در این تحقیق برای استنتاج فازی از روش ممدانی^۱ و استلزام^۲ از روش MIN و برای تجمیع قوانین فازی^۳ از روش MAX استفاده شد (Kerre, 1992).

نافازی‌سازی خروجی مدل

در مدل‌سازی فازی، استنتاج نهایی منجر به یک نتیجه فازی می‌شود، لذا برای دستیابی به عدد حقیقی باید از روش‌های نافازی-سازی زیادی که توسط محققین ارائه شده‌اند (مهم‌ترین این روش‌ها عبارت‌اند از: روش میانگین حداکثرها، روش مرکز ثقل، روش محل تقاطع نیمسازها،...) استفاده کرد. در این تحقیق با توجه به جامعیت روش مرکز ثقل، از این روش استفاده شد. در این روش مقدار خروجی با توجه به شکل (۱) از رابطه ۴ محاسبه می‌شود (انصاری و همکاران، ۱۳۸۹).

$$y = \frac{\int y\mu(y)dy}{\int \mu(y)dy} \quad (4)$$

که در آن y مقدار خروجی، $\mu(y)$ درجه عضویت خروجی y و Y مقدار حقیقی شاخص خروجی است.

آموزش و آزمون مدل‌های فازی

برای آموزش و آزمون مدل در این مطالعه، پس از واسنجی و اجرای مدل آکواراچ برای شرایط مزرعه و سناریوهای تنش آبی، خروجی‌های عملکرد گیاه از مدل آکواراچ به‌صورت روزانه مبنای مدل‌سازی قرار گرفت. بر این اساس با در نظر گرفتن انواع کشت (نشایی و مستقیم) و اعمال سطوح آبیاری ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد در دو دوره کشت (بهاره و تابستانه)، در مجموع ۱۶۹۳ داده روزانه عملکرد به دست آمد؛ بنابراین پس از آنالیز داده‌های به‌دست‌آمده از این تعداد داده ۷۵ درصد داده‌ها یعنی حدود ۱۲۷۰ داده برای آموزش مدل و ۲۵ درصد بقیه داده‌ها یعنی در حدود ۴۲۳ داده به‌منظور آزمون مدل مورد استفاده قرار گرفت.

برای حصول اطمینان از عملکرد یک مدل پیش‌بینی، لازم است این مدل مورد ارزیابی قرار گیرد. معیارهای مختلفی برای ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی وجود دارد که به‌طور عمده بر اساس اختلاف بین خروجی‌های پیش‌بینی شده و خروجی‌های مطلوب و واقعی استوارند. در این تحقیق از سه پارامتر ریشه میانگین مجذور خطا (RMSE)، خطای انحراف میانگین (MBE) و ضریب تعیین (R^2) برای ارزیابی مدل‌های فازی تعریف شده، استفاده شد. این پارامترها به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

(رواناب، نفوذ عمقی و تبخیر- تعرق) در ناحیه ریشه شبیه‌سازی می‌شود. شدت ضرایب تنش آبی (K_s) مؤثر بر پوشش تاجی (CC)، پیری و کاهش پوشش تاجی و شاخص برداشت (HI) به‌وسیله کسر تخلیه آب در ناحیه ریشه تعیین می‌شود. در نهایت مقدار عملکرد محصول با استفاده از جرم قسمت هوایی پوشش گیاهی و شاخص برداشت تعدیل شده محاسبه می‌گردد (Raes, 2012).

روش استنتاج فازی (FIS)

سیستم‌های استنتاج فازی، مدل‌های غیرخطی هستند که رابطه ورودی- خروجی یک سیستم واقعی را با استفاده از قوانین "اگر- آنگاه فازی" توصیف می‌کنند (Jacovides, 1998). ساختار عمومی قوانین تدوین شده به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\text{Rule } m: \text{ IF } (X_1 \text{ is } A_{1,m}) \text{ AND } (X_2 \text{ is } A_{2,m}) \text{ AND } (X_k \text{ is } A_{k,m}) \text{ THEN } Y \text{ is } \quad (3)$$

به‌عبارت‌دیگر، یک قانون فازی، بیان رابطه بین k متغیر ورودی X_1, X_2, \dots, X_k و خروجی Y است. عبارت $A_{k,m}$ در بخش مقدم قوانین مجموعه‌های فازی را نشان می‌دهد که برای جداسازی فضای ورودی به داخل مناطق همپوشانی کننده به‌کار می‌رود. یک مجموعه فازی یک تعمیم از مجموعه‌های کلاسیک است که تابع عضویت به-عنوان یک موضوع از درجه در یک فرم باینری تعریف می‌شود (هرکدام از عدم عضویت یا عضویت کامل) (فلاح قاهره و همکاران، ۱۳۸۸).

به‌منظور ساخت مدل فازی در این تحقیق، ابتدا پارامترهای ورودی مشخص شد و سپس پارامترهای موردنظر با استفاده از فازی‌سازی (توابع عضویت) فازی شدند و با تشریح قواعد استنتاج جهت برآورد عملکرد روزانه با استفاده از داده‌های ورودی، مقادیر خروجی با استفاده از روش نافازی‌سازی مرکز ثقل تولید شدند. فازی‌سازی شاخص‌های ورودی و خروجی، با توجه به دامنه تغییرات آن‌ها (با توجه به اطلاعات موجود) و بر اساس پیشنهادات محققین، برای پارامترهای روز کاشت (۹ بازه)، پوشش گیاهی (۹)، تعرق روزانه (۱۰)، تبخیر و تعرق (۱۴)، شاخص برداشت (۱۳)، بیشینه دمای هوا (۱۰)، کمینه دمای هوا (۱۰) و بهره‌وری نرمال شده (۱۰) بازه بکار گرفته شد. همچنین خروجی مدل نیز با ۱۴ سطح و متناسب با تغییرات ورودی در دوره آموزش مدل مدنظر قرار گرفت. با توجه به کاربرد گسترده توابع عضویت مثلثی و ذوزنقه‌ای در مسائل کاربردی و نتایج حاصل از بررسی‌ها، در این تحقیق نیز برای فازی‌سازی متغیرهای ورودی و خروجی از هر دو تابع فوق استفاده گردید (جدول ۱).

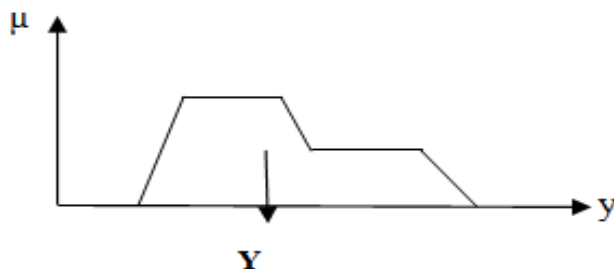
تعریف قوانین فازی و ترکیب توابع

با توجه به توابع عضویت متغیرهای ورودی و خروجی و درجه همپوشانی آن‌ها و نیز ارتباط ورودی و خروجی مدل در دوره آموزش،

1- Mamdani
2- Implcation
3- Aggregaton

جدول ۱- مجموعه‌های فازی تعریف شده برای ورودی‌ها و خروجی مدل فازی

Name='dap'		Name='cc'		Name='stTr'	
Range=[0 100] NumMFs=9 MF1='mf1':trapmf,[0 0 10 0] MF2='mf2':trimf,[10 20 30] MF3='mf3':trimf,[20 30 40] MF4='mf4':trimf,[30 40 50] MF5='mf5':trimf,[40 50 60] MF6='mf6':trimf,[50 60 70] MF7='mf7':trimf,[60 70 80] MF8='mf8':trimf,[70 80 90] MF9='mf9':trapmf,[80 90 100 100]		Range=[0 100] NumMFs=9 MF1='mf1':trapmf,[0 0 10 20] MF2='mf2':trimf,[10 20 30] MF3='mf3':trimf,[20 30 40] MF4='mf4':trimf,[30 40 50] MF5='mf5':trimf,[40 50 60] MF6='mf6':trimf,[50 60 70] MF7='mf7':trimf,[60 70 80] MF8='mf8':trimf,[70 80 90] MF9='mf9':trapmf,[80 90 100 100]		Range=[0 100] NumMFs=9 MF1='mf1':trapmf,[0 0 10 20] MF2='mf2':trimf,[10 20 30] MF3='mf3':trimf,[20 30 40] MF4='mf4':trimf,[30 40 50] MF5='mf5':trimf,[40 50 60] MF6='mf6':trimf,[50 60 70] MF7='mf7':trimf,[60 70 80] MF8='mf8':trimf,[70 80 90] MF9='mf9':trapmf,[80 90 100 100]	
Name='Tmax'		Name='Tr'		Name='wp'	
Range=[-20 40] NumMFs=10 MF1='mf1':trapmf,[-20 -20 -5 0] MF2='mf2':trimf,[-5 0 5] MF3='mf3':trimf,[0 5 10] MF4='mf4':trimf,[5 10 15] MF5='mf5':trimf,[10 15 20] MF6='mf6':trimf,[15 20 25] MF7='mf7':trimf,[20 25 30] MF8='mf8':trimf,[25 30 35] MF9='mf9':trimf,[30 35 40] MF10='mf10':trapmf,[35 40 40 40]		Range=[0 17] NumMFs=10 MF1='mf1':trimf,[0 0 0.9999] MF2='mf2':trimf,[0 0.9999 1.999] MF3='mf3':trimf,[0.9999 1.999 3] MF4='mf4':trimf,[1.999 3 4] MF5='mf5':trimf,[3 4 5] MF6='mf6':trimf,[4 5 5.999] MF7='mf7':trimf,[5 5.999 7.001] MF8='mf8':trimf,[5.999 7.001 8] MF9='mf9':trimf,[7.001 8 9] MF10='mf10':trapmf,[8 9 17 17]		Range=[-20 40] NumMFs=10 MF1='mf1':trapmf,[-20 -20 -5 0] MF2='mf2':trimf,[-5 0 5] MF3='mf3':trimf,[0 5 10] MF4='mf4':trimf,[5 10 15] MF5='mf5':trimf,[10 15 20] MF6='mf6':trimf,[15 20 25] MF7='mf7':trimf,[20 25 30] MF8='mf8':trimf,[25 30 35] MF9='mf9':trimf,[30 35 40] MF10='mf10':trapmf,[35 40 40 40]	
Name='HI'		Name='ETa'		Name='Tmin'	
Range=[0 70] NumMFs=13 MF1='mf1':trimf,[0 0 5] MF2='mf2':trimf,[0 5 10] MF3='mf3':trimf,[5 10 15] MF4='mf4':trimf,[10 15 20] MF5='mf5':trimf,[15 20 25] MF6='mf6':trimf,[20 25 30] MF7='mf7':trimf,[25 30 35] MF8='mf8':trimf,[30 35 40] MF9='mf9':trimf,[35 40 45] MF10='mf10':trimf,[40 45 0] MF11='mf11':trimf,[45 50 5] MF12='mf12':trimf,[50 55 0] MF13='mf13':trapmf,[55 60 70 70]		Range=[0 16] NumMFs=14 MF1='mf1':trapmf,[0 0 0.5 1] MF2='mf2':trimf,[0.5 1 2] MF3='mf3':trimf,[1 2 3] MF4='mf4':trimf,[2 3 4] MF5='mf5':trimf,[3 4 5] MF6='mf6':trimf,[4 5 6] MF7='mf7':trimf,[5 6 7] MF8='mf8':trimf,[6 7 8] MF9='mf9':trimf,[7 8 9] MF10='mf10':trimf,[8 9 10] MF11='mf11':trimf,[9 10 11] MF12='mf12':trimf,[10 11 12] MF13='mf13':trimf,[11 12 13] MF14='mf14':trapmf,[12 13 16 16]		Range=[-20 40] NumMFs=10 MF1='mf1':trapmf,[-20 -20 -5 0] MF2='mf2':trimf,[-5 0 5] MF3='mf3':trimf,[0 5 10] MF4='mf4':trimf,[5 10 15] MF5='mf5':trimf,[10 15 20] MF6='mf6':trimf,[15 20 25] MF7='mf7':trimf,[20 25 30] MF8='mf8':trimf,[25 30 35] MF9='mf9':trimf,[30 35 40] MF10='mf10':trapmf,[35 40 40 40]	
Name='Y'	MF1='mf1':trapmf,[0 0 0.5 1]	MF6='mf6':trimf,[4 5 6]	MF7='mf7':trimf,[5 6 7]	MF8='mf8':trimf,[6 7 8]	MF9='mf9':trimf,[7 8 9]
Range=[0 16]	MF2='mf2':trimf,[0.5 1]	MF10='mf10':trimf,[8 9 10]	MF11='mf11':trimf,[9 10 11]	MF12='mf12':trimf,[10 11 12]	MF13='mf13':trimf,[11 12 13]
NumMFs=14	MF3='mf3':trimf,[1 2 3]	MF13='mf13':trimf,[11 12 13]	MF14='mf14':trapmf,[12 13 16 16]		
	MF4='mf4':trimf,[2 3 4]				
	MF5='mf5':trimf,[3 4 5]				



شکل ۱- غیر فازی سازی مرکز ثقل

آن بیانگر سازگاری بالاتر مدل با واقعیت است (سبزی‌پرور و همکاران، ۱۳۸۷).

نتایج و بحث

همان‌طور که عنوان شد برای ایجاد مدل‌های فازی در این تحقیق، مقادیر محاسبه‌شده عملکرد روزانه با مدل آکواکراپ به‌عنوان خروجی مشاهداتی در مدل‌ها و ترکیبات متفاوت از پارامترهای مؤثر در عملکرد (جدول ۲) به‌عنوان ورودی مدل‌ها در نظر گرفته شدند. بعد از ایجاد مدل‌های فازی با ترکیب ورودی‌های متفاوت، مقایسه میان خروجی مدل آکواکراپ به‌عنوان روش مینا و مدل‌های فازی انجام شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2} \quad (5)$$

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i) \quad (6)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})]^2}{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (7)$$

در روابط فوق N تعداد نمونه، P_i مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل، O_i مقادیر واقعی، \bar{P} میانگین مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل و \bar{O} میانگین مقادیر واقعی می‌باشند.

$$t = \sqrt{\frac{(n-1)(MBE^2)}{RMSE^2 - MBE^2}} \quad (8)$$

t معیار جاکوویز و n تعداد مشاهدات می‌باشد. مقدار کمتر t بیانگر دقت بهتر مدل است. در تحقیق حاضر علاوه بر معیارهای معرفی‌شده توسط جاکوویز، از معیار ترکیبی صباغ و همکاران که حاصل نسبت R^2/t به t می‌باشد نیز استفاده شد که مقادیر بالاتر

جدول ۲- آماره‌های آزمون پارامترهای مختلف مؤثر بر عملکرد روزانه

پارامترها	میانگین	انحراف معیار	حداقل	حداکثر	ضریب همبستگی با عملکرد روزانه
روز از کاشت	۹۹/۵۰	۲۸/۳۹	۱	۱۰۱	۰/۵۲
پوشش گیاهی	۶۸/۰۸	۳۶/۳۷	۰	۹۸	۰/۲۶
نسبت تأثیر تنش بر تعرق	۱۱/۳۱	۲۱/۴۲	۰	۹۳	۰/۱۷
تعرق	۳/۸۴	۲/۹۸	۰	۹/۶	۰/۲۹
بهره‌وری نرمال شده	۳۷/۴۰	-	-	۳۷/۴۰	-
شاخص برداشت	۱۲/۸۱	۱۸/۹۳	۰	۴۹/۷۰	۰/۸۳
تبخیر و تعرق	۶/۱۶	۱/۹۳	۱/۱	۹/۷	۰/۲۲
دمای حداقل	۱۵/۷۰	۵/۸۵	-۱/۶	۲۹/۲۰	۰/۴۴
دمای حداکثر	۳۰/۵۷	۶/۸۶	۳/۴	۴۰	۰/۳۷

مدل‌های فازی ارائه‌شده با مدل آکواکراپ وجود دارد. به‌طوری‌که بیشترین همبستگی (۰/۹۸) در میان مدل‌های فازی، برای مدل ۹ پارامتری (روز از کاشت، پوشش گیاهی، نسبت تعرق، بهره‌وری نرمال شده، شاخص برداشت، تبخیر و تعرق، دمای حداقل، دمای حداکثر) و کمترین (۰/۳۳) مقدار آن برای مدل با دو ورودی پوشش گیاهی و دمای میانگین به دست آمده است. این نتایج نشان می‌دهند که مدل فازی به‌خوبی می‌تواند عملکرد روزانه گیاه ذرت را با متغیر-

همان‌طور که در جدول نشان داده‌شده است، در بین پارامترها شاخص برداشت، روز از کاشت و دمای مینیمم هوا بیشترین و نسبت تأثیر تنش بر تعرق کمترین ضریب همبستگی را با عملکرد روزانه دارد. پس از بررسی داده‌های فوق که منجر به انتخاب پارامترهای مناسب مدل فازی مورد استفاده نیز شد، سپس، همان‌طور که عنوان شد نتایج مدل‌های فازی ساخته‌شده با مدل آکواکراپ به‌عنوان مدل مرجع مقایسه شدند. نتایج نشان داد که همبستگی بالایی بین

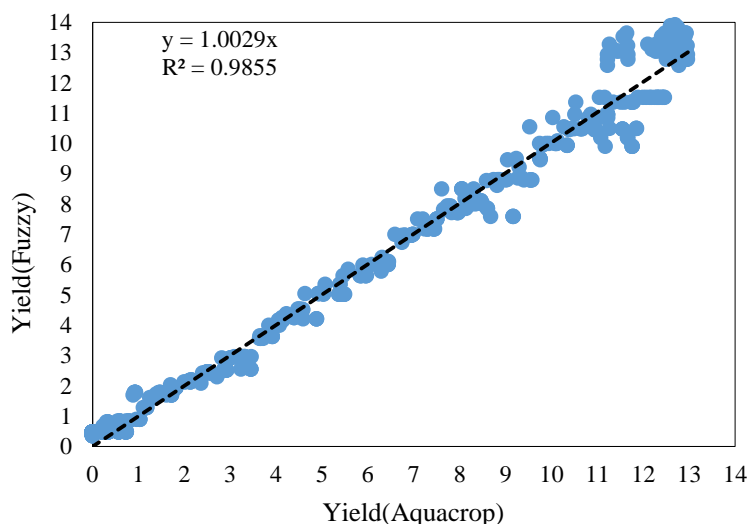
برداشت و پوشش گیاهی، حداقل مقدار معیار جاکوویدز (۲۰/۰۶) را دارا بوده و حداکثر آن (۲۸/۲۰) برای مدل فازی با در نظر گرفتن تمام پارامترهای مؤثر می‌باشد. نکته جالب‌توجه در مقایسه این پارامترها، این است که کمترین مقدار t که نشان‌دهنده تطابق بهتر مدل با مدل آکواکراپ است برای مدل با ورودی‌های شاخص برداشت و پوشش گیاهی به دست آمد که می‌توان گفت به دلیل همبستگی بالای شاخص برداشت با عملکرد می‌باشد. از طرف دیگر با در نظر گرفتن معیار صیاب و همکاران، مقدار این آماره برای دو مدل ۴ و ۵ یکسان و از بین این دو مدل، مدل فازی با ورودی‌های دما، شاخص برداشت و پوشش گیاهی (۰/۲۳) نتایج بهتری داشته است. در مجموع مدل چهارم ارائه‌شده با ورودی‌های دما و رطوبت نسبی، با در نظر گرفتن پارامترهای عملکرد نتایج قابل‌قبولی را دارد هرچند که در ابتدای بررسی با سایر پارامترها، تأثیر این عوامل مشخص شده بود (جدول ۳ و شکل ۲).

های ورودی متفاوت محاسبه نماید. با محاسبه دیگر پارامترهای ارزیابی عملکرد برای مدل‌های فازی ارائه‌شده و مدل آکواکراپ در مرحله آموزش، میانگین خطای گرایش (MBE) بین ۰/۲۳ و ۱/۶۶ تن در هکتار به دست آمد که این مقدار کم، نشان‌دهنده دقت بالای مدل‌های فازی توسعه‌یافته است. علاوه بر این، با توجه به نتایج حاصل برای MBE، می‌توان اظهار داشت که مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل فازی بیش از مقادیر محاسبه‌شده از مدل آکواکراپ است. بررسی و مقایسه مقادیر پارامتر RMSE ارائه‌شده در جدول (۳)، نیز نشان می‌دهد که اختلاف تک‌تک مقادیر پیش‌بینی‌شده در مدل فازی تا حدود زیادی با مقادیر محاسبه‌شده با مدل آکواکراپ متناظر است. مقدار این متغیر آماری برای مدل‌های فازی ارائه‌شده بین ۰/۴۹ تا ۳/۲ تن در هکتار متغیر بود که این مقادیر کم، نشان‌دهنده دقت بالای سیستم استنتاج فازی است. همچنین با محاسبه آماره‌های t و R^2/t ، می‌توان نتیجه گرفت که مدل فازی با ۲ ورودی شاخص

جدول ۳- آماره‌های آزمون مربوط به مقایسه مدل‌های فازی با مدل Aquacrop در مرحله آموزش

مدل فازی	ورودی	ضریب همبستگی	RMSE (t/hect)	MBE (t/hect)	t	R ² /t
FIS1(9)	DAP,CC,StTr,Tr,WP,HI,ET,Tmin,Tmax	۰/۹۸۵	۰/۴۹۶	۰/۲۸	۲۸/۲۰	۰/۰۳۵
FIS2(7)	DAP,CC,Tr,WP,HI,Tmin,Tmax	۰/۹۸۱	۰/۴۹۱	۰/۲۵	۲۴/۸۰	۰/۰۴۰
FIS3(5)	DAP,CC,WP,HI,Tmean	۰/۹۷۸	۰/۵۱۸	۰/۲۵	۲۲/۶۴	۰/۰۴۴
FIS4(4)	DAP,CC,HI,Tmean	۰/۹۷۸	۰/۵۱۵	۰/۲۴	۲۲/۰۸	۰/۰۴۵
FIS5(3)	CC,HI,Tmean	۰/۹۷۸	۰/۵۱۲	۰/۲۳	۲۱/۷۴	۰/۰۴۵
FIS6(2)	CC,Tmean	۰/۳۳۰	۳/۲۶۵	۱/۶	۲۴/۵۱	۰/۰۲۳
FIS7(2)	CC,HI	۰/۹۷۶	۰/۵۲۶	۰/۲۳	۲۰/۰۶	۰/۰۴۹

DAP: روز از کاشت، CC: پوشش گیاهی، StTr: نسبت تعرق، Tr: تعرق، WP: بهره‌وری آب نرمال شده، HI: شاخص برداشت، ET: تبخیر و تعرق گیاهی، Tmin: دمای هوای مینیمم، Tmax: دمای هوای ماکزیمم، Tmean: دمای هوای میانگین

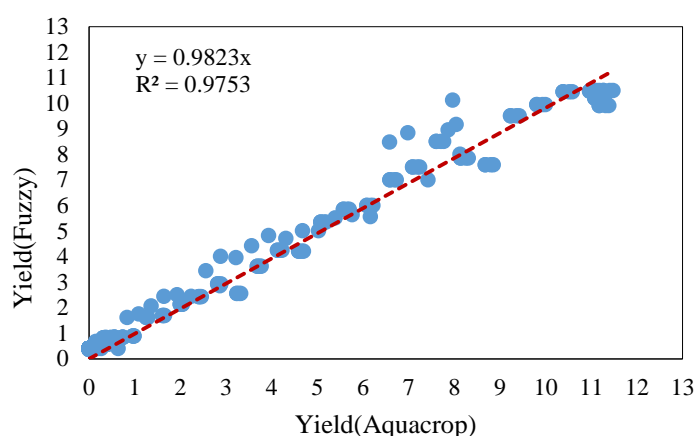


شکل ۲- مقایسه نتایج محاسبه عملکرد مدل فازی با ۹ ورودی در برابر مدل Aquacrop (آموزش مدل)

جدول ۴- آماره‌های آزمون مربوط به مقایسه مدل‌های فازی با مدل Aquarop در مرحله آزمون

(Fuzzy models)	(Inputs)	(R ²)	(t/hect) RMSE	(t/hect) MBE	t	R ² /t
مدل فازی	ورودی	ضریب همبستگی				
FIS1(9)	DAP,CC,StTr,Tr,WP,HI,ET,Tmin,Tmax	۰/۹۷۵	۰/۴۷۶	۰/۲۷	۲۸/۲۳	۰/۰۳۵
FIS2(7)	DAP,CC,Tr,WP,HI,Tmin,Tmax	۰/۹۷۴	۰/۵۰۱	۰/۲۶	۲۵/۳۰	۰/۰۳۹
FIS3(5)	DAP,CC,WP,HI,Tmean	۰/۹۷۰	۰/۵۲۷	۰/۲۴	۲۰/۵۹	۰/۰۴۸
FIS4(4)	DAP,CC,HI,Tmean	۰/۹۷۱	۰/۵۱۳	۰/۲۲	۲۰/۰۰	۰/۰۴۹
FIS5(3)	CC,HI,Tmean	۰/۹۷۱	۰/۵۰۹	۰/۲۲	۱۹/۷۲	۰/۰۵۰
FIS6(2)	CC,Tmean	۰/۱۰۷	۳/۰۸۹	۱/۴۱	۲۱/۱۶	۰/۰۱۵
FIS7(2)	CC,HI	۰/۹۵۲	۰/۶۰۱	۰/۱۹	۱۴/۰۹	۰/۰۶۹

DAP: روز از کاشت، CC: پوشش گیاهی، StTr: نسبت تعرق، Tr: تعرق، WP: بهره‌وری آب نرمال شده، HI: شاخص برداشت، ET: تبخیر و تعرق گیاهی، Tmin: دمای هوای مینیمم، Tmax: دمای هوای ماکزیمم، Tmean: دمای هوای میانگین



شکل ۳-مقایسه نتایج محاسبه عملکرد مدل فازی با ۹ ورودی در برابر مدل Aquarop (آزمون مدل)

آکواکراپ را می‌توان به عواملی نسبت داد که علاوه بر پارامترهای در نظر گرفته شده به‌عنوان ورودی مدل بر عملکرد تأثیر دارند. با این حال به دلیل این که در برآورد عملکرد، تغییرات کوتاه‌مدت پارامترهای مؤثر بر عملکرد در نظر گرفته نمی‌شوند، انتخاب پارامترهای مؤثر و در صورت امکان حذف برخی از آن‌ها به‌منظور کاهش متغیرهای ورودی، می‌تواند کمک زیادی در برآورد سریع و کم‌هزینه عملکرد روزانه در مدل‌سازی نماید. همان‌طور که نتایج نشان دادند پارامتر شاخص برداشت به دلیل این که متأثر از دما است بیشترین تأثیر را بر عملکرد روزانه در این منطقه دارد و از طرفی چون در روزهای مختلف دارای تغییر است، به نظر می‌رسد می‌تواند باعث بروز تفاوت‌هایی در عملکرد به‌دست‌آمده از سایر روش‌ها شود. در تحقیق حاضر نیز، نتایج نشان دادند که همبستگی بالایی بین عملکرد برآورد شده از مدل‌های فازی و روش آکواکراپ وجود دارد و می‌توان از این مدل برای برآورد عملکرد روزانه گیاه ذرت استفاده نمود، زیرا در مدل‌های فازی به دلیل در نظر گرفتن پارامترهای ورودی و خروجی با عدم قطعیت بالا در آن‌ها (که در برخی موارد اجتناب‌ناپذیر بوده و حتی جزئی از سیستم

مرحله آزمون مدل نیز، نتایج مشابه نتایج مرحله آموزش بوده و در اینجا نیز مدل فازی با ۹ ورودی، بالاترین همبستگی با مدل آکواکراپ را دارد، ضمن این که کمترین مقدار میانگین مطلق خطا را دارا می‌باشد. با در نظر گرفتن معیارهای جاکوویدز و صباغ، مدل فازی با ورودی پوشش گیاهی و شاخص برداشت، کمترین مقدار t (۱۴/۰۹) و بیشترین مقدار نسبت معیار صباغ (۰/۶۹) را دارا بود که این نشان‌دهنده تطابق بهتر با مدل آکواکراپ می‌باشد. (جدول ۴ و شکل ۳).

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج ارائه شده می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌های فازی توسعه‌یافته تطابق بالایی با مدل مورد مقایسه (Aquacrop) داشته و لذا توانایی لازم برای برآورد عملکرد در مقیاس زمانی روزانه را دارا می‌باشند. همچنین با در نظر گرفتن معیارهای ارزیابی مدل‌های عملکرد (جاکوویدز و صباغ) انتخاب مدل بهتر به‌طور نسبی سهل‌تر شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده این تحقیق، اختلافات مشاهده شده در محاسبات عملکرد حاصل از مدل فازی با مدل

قاسم نژاد مقدم ن، بقاتی نیا ف. و بافنده زنده ع. ۱۳۸۷. منطق فازی به زبانی ساده. ماهنامه کنترل کیفیت. ۲۴: ۴۳-۵۱.

Abedinpour, M., Sarangi, A., Rajput, T. B. S., Singh, M., Pathak, H. and Ahmad, T. 2012. Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*. 110: 55-66.

Daničić, M., Pejić, B., Mačkić, K., Lalić, B., Maksimović, I. and Putnik-Delić, M. 2021. The predicted impact of climate change on maize production in Northern Serbia. *Maydica*. 65(3): 10.

Heng, L. K., Hsiao, T., Evett, S., Howell, T. and Steduto, P. 2009. Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize. *Agronomy journal*. 101(3): 488-498.

Jayaram, M. A. and Marad, N. 2012. Fuzzy inference systems for crop yield prediction. *Journal of Intelligent Systems*. 21(4): 363-372.

Jinger, J. and Kumar, S. 2021. Maize Yield Prediction Considering Growth Stages using Fuzzy Logic Modelling. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 9(4).

Jacovides, C. P. 1998. Reply to comment on "Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration computing models". *Agricultural water management*. 37(1): 95-97.

KHALAF, A. A., & HAM, D. S. A. D. 2019. Assessment of Aquacrop Model in Prediction Maize Hybrids Yield by Simulation Production under Deficit Irrigation. *Journal of Duhok University*. 22(1): 7-23.

Kumar, P. 2011. Crop yield forecasting by adaptive neuro fuzzy inference system. *Mathematical Theory and Modeling*. 1(3): 1-7.

Kerre, E. E. 1992. A comparative study of the behavior of some popular fuzzy implication operators on the generalized modus ponens. In *Fuzzy logic for the management of uncertainty*. 281-295

Katerji, N., Campi, P. and Mastrorilli, 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*. 130: 14-26.

Malarkodi.K. P. and Arthi, K. 2018. An optimized enhanced Intuitionistic fuzzy cognitive maps for groundnut yield prediction. *International Journal of Engineering & Technology*. 7(4): 3317-3321.

Masanganise J., Basira, K., Chipindu, B., Mashonjowa, E. and Mhizha, T. 2013. Testing the utility of a crop growth simulation model in predicting maize yield in a changing climate in Zimbabwe. *International Journal of Agricultural and Food Science*. 3(4): 157-

هستند) مانند برخی از مدل‌های ریاضی دیگر در محدوده مشخصی نسبت به تغییرات حساس نبوده و دارای انعطاف‌پذیری بالایی هستند، در نتیجه به خوبی می‌توانند عملکرد گیاه را که دارای عدم قطعیت بالایی هستند، برآورد کنند. در پایان می‌توان نتیجه گرفت که سیستم استنتاج فازی به دلیل داشتن مبانی تئوری دقیق، ابزار مفیدی برای مدل‌سازی عملکرد روزانه گیاه ذرت بوده و در مقایسه با مدل مبنای مورد استفاده که به پارامترهای متعدد نیاز دارند و همچنین دارای محاسبات پیچیده‌ای هستند، روش مفیدی برای برآورد دقیق عملکرد روزانه گیاه است.

منابع

انصاری ح، داوری ک. و ثنایی نژاد ح. ۱۳۸۹. پایش خشک‌سالی با استفاده از شاخص جدید بارندگی تبخیر و تعرق استاندارد شده توسعه یافته بر اساس منطق فازی. *مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*. ۲۴ (۱): ۳۸-۵۱.

حافظی، ن، شیخ داودی، م، ج، بهرامی، ه. و علوی، س، ع. ۱۳۹۹. تخمین عملکرد کمی و کیفی نیشکر با استفاده از شبکه فازی-عصبی تطبیقی بهبود یافته با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات. *نشریه مهندسی زراعی*. ۴۳ (۲): ۲۵۵-۲۷۶.

سبزی پرور ع.ا، تفضلی ف، زارع ابیانه ح، بانژاد ح، موسوی بایگی م، غفوری م، محسنی موحد ا. و مریانجی ز. ۱۳۸۷. مقایسه چند مدل برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع در یک اقلیم سرد و نیمه‌خشک به منظور استفاده بهینه از مدل‌های تابش. *مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*. ۲۲ (۲): ۳۲۸-۳۴۰.

فلاح قاهره غ.ع، موسوی بایگی م، حبیبی ن. م، خوشحال ج. ۱۳۸۸. پیش‌بینی بارش فصلی بر اساس الگوهای همیدید با استفاده از تئوری مجموعه‌های فازی. *جغرافیا و توسعه*. ۱۵: ۱۱۳-۱۳۲.

ضیایی ق، بابازاده ح، عباسی ف، و کاوه ف. ۱۳۹۳. بررسی مدل‌های AquaCrop و CERES-Maze در ارزیابی تعادل آب خاک و عملکرد ذرت. *مجله تحقیقات آب و خاک*. ۴۵ (۴): ۴۴۵-۴۳۵.

پالاش م، بافکار ع، و فرهادی ب. ۱۴۰۰. تعیین بهره‌وری مصرف آب در ذرت دانه‌ای (KSC706) با استفاده از مدل AquaCrop در استان کرمانشاه. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*. ۱۵ (۱): ۲۳۴-۲۴۴.

کوچک زاده م. و بهمنی ع. ۱۳۸۴. ارزیابی عملکرد شبکه‌های عصبی مصنوعی در کاهش پارامترهای مورد نیاز، جهت برآورد تبخیر و تعرق مرجع. *مجله علوم کشاورزی*. ۱۱ (۴): ۸۷-۹۷.

- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. and Fereres, E. 2012. Reference manual AquaCrop version 4.0, FAO, Land and Water Division, Rome, Italy.
- Sandhu, R. and Irmak, S. 2019. Assessment of AquaCrop model in simulating maize canopy cover, soil-water, evapotranspiration, yield, and water productivity for different planting dates and densities under irrigated and rainfed conditions. *Agricultural Water Management*. 224: 105753.
- Stricevic, R., Cosic, M., Djurovic, N., Pejic, B. and Maksimovic, L. 2011. Assessment of the FAO AquaCrop model in the simulation of rainfed and supplementally irrigated maize, sugar beet and sunflower. *Agricultural Water Management*. 98: 1615– 1621.
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D. and Fereres, E. 2007. On the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrigation Science*. 25:189–207.
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D. and Fereres, E. 2009. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*. 101:426–437.
- 163.20–32
- Aşık M., Yetik A.K., Candoğan B.N. and Kuşçu H. 2021. Determining the yield responses of maize plant under different irrigation scenarios with AquaCrop model. *Journal of Agricultural, Food and Environmental Sciences*. 5 (3):260-270
- Nekoei, N., Bedani, M. A. and Khashei Siuki, A. 2021. Evaluation of adaptive Neuro-Fuzzy Inference System models in estimating saffron yield using meteorological data. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 23(1): 221-234.
- Ran, H., Kang, S., Li, F., Tong, L., Ding, R., Du, T. and Zhang, X. 2017. Performance of AquaCrop and SIMDualKc models in evapotranspiration partitioning on full and deficit irrigated maize for seed production under plastic film-mulch in an arid region of China. *Agricultural Systems*. 151: 20-32.
- Roca Cedeño, J. A., García-López, Y. J., Choque Flores, L., Morales-Ortega, R., Neira-Molina, H. and Combata-Niño, H. 2021. Big data classification using fuzzy logical concepts for paddy yield prediction. *Review of International Geographical Education Online*.

Estimation of Daily Yield of Corn Using Fuzzy Inference Systems

H. Moradi¹, H. Ansari^{2*}, A. Alizadeh³, M. Naderianfar⁴

Received: Aug.22, 2021

Accepted: Jul.13, 2021

Abstract

In this study the possibility of using fuzzy inference system efficiency, creating a bridge between meteorological, plant parameters, and Daily Yield, and comparing the accuracy of Daily Yield using these systems were investigated. After analyzing the different models and different combinations of daily meteorological data, seven models for estimating daily Yield were presented. For these models, the calculated Yield from AQUACROP model was considered as a base and the efficiency of other models was evaluated using statistical methods such as root mean squared error, error of the mean deviation, coefficient of determination, Jacovides (t) and Sabbagh et al. (R^2/t) criteria. An experiment was carried out during the 2014-2015 growing season in the Agricultural Research and Education Center of Khorasane Razavi province using a randomized complete block design with a split plot arrangement and four replications. This experiment was including of three irrigation levels treatments as the main plot and three method of planting treatments (transplanting 20-days, transplanting 30-days and direct seeded) as subplots. From the available data, 75 percent was used for training the model and the rest of 25 percent was utilized for the testing purposes. The results derived from the fuzzy models with different input parameters as compared with AQUACROP model showed that fuzzy systems were very well able to estimate the daily Yield. Fuzzy model so that the highest correlation with the 9 input variables ($r=0.98$) had in mind and evaluate other parameters, the model with 2 parameters, match very well with the AQUACROP model had stage training. In the test phase, training phase was very similar results and the model with the second phase of harvest index and canopy cover will get the best match. According to the results of this study it can be concluded that fuzzy model approach is an appropriate method to estimate the daily yield.

Keywords: AQUACROP Model, Corn, Daily Yield, Fuzzy Inference Systems

1- Ph.D. Student of Irrigation and Drainage, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- Professor, Department of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

3- Professor, Department of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

4- Assistant professor, Department of Water Engineering, University of Jiroft, Kerman, Iran

(*- Corresponding Author Email: ansary@um.ac.ir)