

پایاده‌سازی و ارزیابی کنترل کننده منطق فازی جهت تنظیمات خودکار کمباین غلات

محمد لشگری، حسین مبلی*، محمود امید، رضا علیمردانی، سعید محتسبی و رضا حسامی فرد**

* نگارنده مسئول، نشانی: کرج، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، ص. پ. ۴۱۱۱، تلفن: ۰۲۶۱(۲۸۰۱۰۱۱).

پیم‌نگار: hmobli@ut.ac.ir

** به ترتیب دانشجوی دوره دکتری؛ دانشیاران دانشگاه تهران؛ و کارشناس ارشد هوش مصنوعی دانشگاه صنعتی شریف.

تاریخ دریافت مقاله: ۸۶/۳/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۸۷/۲/۲۸

چکیده

به دلیل نبود مدل ریاضی و اینکه عوامل تأثیرگذار بر افت انتهای کمباین ماهیت غیر خطی دارند، در این تحقیق با بهره‌گیری از دانش شخص خبره، سیستمی هوشمند مبتنی بر کنترل کننده منطق فازی برای تنظیمات خودکار کمباین طراحی، پایاده‌سازی، و ارزیابی شد. این سیستم هوشمند قادر بود بر اساس اطلاعات دریافتی از مقدار تلفات در الک‌ها و کاه‌پران‌ها به اجرای تنظیمات خودکار سرعت دورانی کوبنده، فاصله کوبنده و ضدکوبنده، سرعت دورانی دمنده، و سرعت پیشروی دست زند. به منظور اجرای طرح، در ابتدا مکانیزم‌های تغییر وضعیت این واحدها در کمباین جان‌دیر مدل ۹۵۵ از حالت مکانیکی به هیدرولیکی تغییر داده شدند. برای این کار، چهار حسگر برای اندازه‌گیری پارامترهای کاری کمباین شامل: سرعت دورانی کوبنده، فاصله کوبنده و ضدکوبنده، سرعت دورانی دمنده، و سرعت پیشروی و سه حسگر برای اندازه‌گیری تلفات انتهای کمباین شامل دو حسگر برای اندازه‌گیری تلفات کاه‌پران‌ها و یک حسگر برای اندازه‌گیری تلفات الک‌ها نصب شدند. ورودی‌های سیستم شامل تلفات الک‌ها و کاه‌پران‌ها و خروجی‌های سیستم شامل سرعت دورانی کوبنده، فاصله کوبنده و ضدکوبنده، سرعت دورانی دمنده، و سرعت پیشروی هستند. برای هر یک از ورودی‌های سیستم سه تابع تعلق دوزنقه‌ای و برای هر یک از خروجی‌ها، فازی‌ساز منفرد در نظر گرفته شد. برای منطق فازی در مجموع شش قاعده با اپراتور منطقی AND و موتور استنتاج مینیمم مددانی طراحی شد. الگوریتم طراحی شده، درون یک کنترل کننده منطقی برنامه‌پذیر برنامه‌ریزی و در داخل کابین کمباین تعبیه شد. به منظور ارزیابی سیستم، آزمون‌های میدانی متعددی در تابستان ۱۳۸۵ در شهرستان اراک به اجرا درآمد. نتایج تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها نشان می‌دهد که میانگین تلفات برداشت با کمباین مجهز به منطق فازی و کمباین فاقد کنترل کننده تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد دارد.

واژه‌های کلیدی

افت کمباین، حسگر، کنترل کننده منطق فازی، کنترل کننده منطقی برنامه‌پذیر، گندم

مقدمه

کامل روشن نیست. ضایعات و افت گندم به مراحل قبل از کاشت، کاشت، داشت، برداشت، و پس از برداشت برمی‌گردد. قسمت اعظم افت گندم مربوط به مرحله برداشت می‌شود. در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی روی تعیین میزان افت غلات در مرحله برداشت با کمباین صورت پذیرفته است.

گندم مهم‌ترین محصول زراعی کشور است که نقش عمده‌ای در تأمین مواد غذایی مردم دارد ولی تولید آن در ایران با ضایعات بسیاری همراه است. عوامل مؤثر در این ضایعات شناخته شده‌اند ولی اثر کمی آنها به شکل



استون (Le Fluffy & Stone, 1983) یک سیستم کنترل الکترونیکی برای کمباین ارائه کردند که در آن سرعت پیشروی به شکلی تنظیم می‌شد که میزان تلفات واحد کوبنده یکنواخت باقی می‌ماند. در این سیستم از دو پتانسیومتر جهت اندازه‌گیری میزان تغذیه محصول و یک حسگر اکوستیکی جهت تعیین تلفات دانه استفاده شد.

هال (Hall, 1992) میزان افت کمباین را به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی^۱ مدل‌سازی کرد. شبکه پیشنهادی شامل پنج پارامتر خروجی است که دو تای آنها مربوط به کیفیت برداشت و سه پارامتر دیگر مربوط به بازده برداشت است. در این مدل، تأثیر پانزده متغیر ورودی مورد ارزیابی قرار گرفت: رطوبت نسبی، میزان تغذیه دانه، رطوبت دانه، میزان تغذیه، باز بودن سوراخ‌های الک بالایی، باز بودن سوراخ‌های الک پایینی، دور دمنده، فاصله کوبنده و ضد کوبنده، دور کوبنده، رطوبت مواد گیردانه‌ای، پارامتر کوبش، پارامتر آبیاری، ساعت برداشت، و دو وضعیت ویژه بر پنج متغیر خروجی شامل شکستگی دانه، ترک برداشتن دانه، تلفات کوبنده، تلفات جداکننده، و تلفات تمیز کننده.

چنین سیستمی نیاز به حجم عظیمی از محاسبات برای کنترل تمامی قسمت‌ها دارد و این مستلزم صرف وقت زیاد برای محاسبه و استفاده از رایانه‌های پیشرفته است. لذا از سیستم‌های کنترل مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی به‌طور عملی در ماشین‌های برداشت استفاده نمی‌شود.

بنسون و همکاران (Benson et al., 2000) با استفاده از منطق فازی^۲ (FLC)، سیستمی جهت هدایت خودکار

بهریزی لار و همکاران (Behroozi Lar et al., 1995) افت کمباین‌های گندم را در مراکز پنج استان گندم خیز کشور از طریق اجرای آزمایش‌های مزرعه‌ای تعیین و میانگین افت کمباینی گندم را در استان خراسان ۷/۸ درصد، اصفهان ۲/۳ درصد، مازندران ۶ تا ۷ درصد، همدان ۷ درصد، و فارس ۴/۵ درصد گزارش کردند. به‌طور کلی در سیستم‌های با کنترل مکانیکی، دقت کار پایین است و استفاده صحیح از ماشین بستگی به مهارت، تجربه، و خبرگی کاربر دارد. با تجهیز کمباین غلات به سیستم کنترل الکترونیکی خودکار، تنظیمات مربوط به واحدهای مختلف برحسب شرایط محصول و محیط تغییر می‌کند و می‌توان کارایی آن را به میزان قابل توجهی افزایش داد.

بریزگیس و همکاران (Brizgis et al., 1980) یک سیستم کنترل خودکار دور کوبنده را ارائه دادند که در آن سرعت کوبنده بر اساس اندازه‌گیری رطوبت محصول (که یک حسگر رطوبت جریان پیوسته انجام می‌داد) تنظیم می‌شد. در این تحقیق، سیستم کنترل دستی دور کوبنده کمباین با یک واحد محرک الکتریکی ترکیب شد و ضمن ارزیابی آن در آزمایشگاه، نتایج آن با یک مدل شبیه‌سازی شده کامپیوتری مقایسه گردید. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد که حسگر رطوبت تحت تأثیر میزان جریان محصول قرار می‌گیرد. کروتز و مایلاندر (Krutz & Mailander, 1983) سیستمی طراحی کردند که سرعت پیشروی کمباین را بر اساس دور موتور تنظیم می‌کرد. آنها ابتدا تغییراتی در نقاله تغذیه کمباین ایجاد کردند تا بتوان به کمک حسگرهای فشار، فشار هیدرولیکی لازم را جهت به حرکت درآوردن نقاله تعیین کنند. لی فلافی و

پیاده‌سازی و ارزیابی کنترل‌کننده منطق فازی جهت تنظیمات ...

از تمامی وضعیت‌های برداشت پیشین بهره‌گیر و همانند شخصی خبره عمل کند. جلالی و جاویدی (Jalaei & Javidi, 2004)، یک بررسی در مورد واحد تمیز کننده کمباین جهت نصب کنترل‌کننده روی آن انجام دادند. این محققان در بررسی خود، میزان تلفات دانه در واحد تمیز کننده و دور دمنده را به عنوان دو ورودی و دور مناسب دمنده را به عنوان خروجی سیستم فازی در نظر گرفتند و به کمک جعبه ابزار منطق فازی نرم‌افزار مطلب، سیستم پیشنهادی خود را تحلیل کردند، اما هیچ‌گونه پیاده‌سازی و آزمونی جهت داده‌برداری و صحت طرح خود انجام ندادند.

حرکت مواد در کمباین بسیار پیچیده و دارای رفتاری غیرخطی است و ضمناً این ماشین جهت تعیین کمی افت انتهایی کمباین در محیطی پیچیده به‌کار برده می‌شود، بنابراین مدل‌های ریاضی استفاده از منطق فازی یکی از روش‌هایی است که می‌تواند در حل این مسئله به‌کار گرفته شود. در این مقاله مراحل مختلف طراحی، پیاده‌سازی، نصب، و ارزیابی یک کنترل‌کننده هوشمند مبتنی بر منطق فازی برای انجام دادن تنظیمات خودکار و کاهش تلفات انتهایی کمباین جان‌دیر مدل ۹۵۵ ارائه شده است.

مواد و روش‌ها

اصلاح مکانیزم‌ها

برای پیاده‌سازی سیستم کنترل خودکار روی کمباین جان‌دیر (مدل ۹۵۵ ساخت شرکت کمباین‌سازی ایران)، ابتدا مکانیزم‌های مکانیکی تغییر سرعت دورانی کوبنده، سرعت دورانی دمنده، و فاصله کوبنده و ضدکوبنده حذف

کمباین ارائه دادند و به این منظور از یک کمباین جریان محوری مجهز به سیستم دید ماشین استفاده کردند. کنترل‌کننده منطق فازی، تغییرات در فرمان‌گیری کمباین را بر اساس نتایج حاصل از سیستم دید ماشین ایجاد می‌کرد. ورودی‌ها و خروجی سیستم هر یک دارای پنج تابع عضویت بودند. خروجی کنترل‌کننده منطق فازی از طریق اتصال سریال به عمل‌کننده فرمان می‌داد. نتایج آزمایش‌های میدانی این محققان نشان داد که چنین سیستمی قادر به هدایت مناسب و دقیق کمباین در مزرعه هست. مارتینز و همکاران (Maertens *et al.*, 2002) سیستمی برای پایش فرایند جدا کردن در کمباین ارائه دادند. آنها این کمباین را به دو حسگر فراصوت جهت تشخیص عرض برش، یک حسگر جهت تشخیص میزان مواد، دو حسگر ضربه‌ای در زیر کوبنده، دو حسگر ضربه‌ای در پشت کاه‌پران‌ها، یک حسگر ضربه‌ای در انتهای الک‌ها، و یک حسگر ضربه‌ای در نقاله برگشتی مجهز کردند. سیگنال‌های دریافتی از حسگرها به یک شبکه کنترل‌کننده ارسال می‌شد. با این شبکه، آزمایش‌هایی با مقادیر متفاوت تغذیه اجرا شد و سپس نتایج برای سنجش کیفیت سیستم تجزیه و تحلیل آماری شدند.

ما (Ma, 2003) یک سیستم کنترل هوشمند ترکیبی

(هیبریدی) برای کمباین ارائه کرد که عمل کنترل از تلفیق دانش شخص خبره، منطق فازی، و شبکه عصبی مصنوعی بهره می‌گرفت. در این طرح، تنظیمات مربوط به واحدهای کوبنده، جدا کننده، و تمیز کننده به‌طور پیوسته و در حین حرکت کمباین انجام می‌گرفت. با تلفیق منطق فازی و شبکه عصبی مصنوعی، سیستم کنترلی قادر بود تا

و سیستم‌های هیدرولیکی جایگزین آنها شد تا بدین وسیله امکان کنترل این واحدها توسط مدارهای الکترونیکی فراهم شود. به این منظور، سیلندرهای هیدرولیکی برای هر یک از آنها طراحی و نصب و پایه‌های لازم جهت نصب سیلندرها نیز طراحی و ساخته شد. چهار شیر کنترل جهت برای تغییر جهت جریان به مسیرهای مورد نظر در این طرح به کار برده شد که تمامی آنها از نوع چهار راهه، سه حالته و دو سولونوئیدی بودند. همچنین، چهار شیر کنترل جریان، برای تنظیم سرعت کار سیلندرها در دو جهت رفت و برگشت مورد استفاده قرار گرفت. شیرهای کنترل جهت به‌گونه‌ای انتخاب شدند که در وضعیت میانه، مجاری ورود و خروج سیلندرها مسدود و حالت قفل پیش آید، اما به‌دلیل نشتی داخلی سیلندرها، قفل کامل (نشتی صفر) حاصل نشد که برای این منظور از شیرهای یکطرفه با تحریک خط فرمان استفاده شد. مجموعه شیرها روی پایه‌ای قرار داده شدند و به منظور جلوگیری از افت فشار در جایی نزدیک به پمپ هیدرولیک کمباین نصب شدند.

نصب حسگرها

برای کنترل میزان تلفات کمباین، دو سری حسگر روی کمباین نصب شد: سری اول حسگرهای اندازه‌گیری پارامترهای کاری کمباین و سری دوم حسگرهای اندازه‌گیری تلفات ریزش. برای اندازه‌گیری تلفات انتهای کمباین از سه حسگر استفاده شد: دو حسگر برای اندازه‌گیری تلفات کاه‌پران‌ها و یک حسگر برای اندازه‌گیری تلفات الک‌ها در شکل ۱ انواع حسگرهای اندازه‌گیری تلفات نشان داده شده است. این حسگرها از نوع پیزوالکتریک بودند که مستقیماً از شرکت CNH تهیه شدند. حسگرهای مذکور به‌گونه‌ای

طراحی شده‌اند که حساسیتشان نسبت به اندازه و وزن دانه‌هایی که به آنها برخورد و ایجاد پالس می‌کنند، قابل تنظیم است. حساسیت این حسگرها در سه محدوده دانه‌های ریز، متوسط، و درشت قابل تنظیم است (Taylor et al., 2008). این کنترل‌کننده در مزرعه گندم مورد ارزیابی قرار گرفت، لذا حساسیت حسگرها در وضعیت وسط یعنی برای دانه‌های متوسط مانند گندم قرار داده شد. حسگرهای اندازه‌گیری پارامترهای کاری کمباین نیز شامل حسگرهای سرعت دورانی کوبنده، فاصله کوبنده و ضدکوبنده، سرعت دورانی دمنده، و سرعت پیشروی کمباین هستند. از یک حسگر بارگیر مغناطیسی مدل E2EL-X8F1-D2M ساخت شرکت اُمرُن برای اندازه‌گیری سرعت دورانی کوبنده و دمنده استفاده شد که با نگهدارنده‌ای روی بدنه کمباین نصب شد. محدوده حسگرهای مورد استفاده برابر ۸ میلی‌متر و فرکانس آنها صفر تا ۳۰۰ هرتز است. روی انتهای محور کوبنده و دمنده نیز چرخنده‌های آهنی با دو دندان نصب شد که همراه با محورها در مقابل حسگرها به چرخش در می‌آمدند. برای اندازه‌گیری سرعت پیشروی نیز یک حسگر بارگیر مغناطیسی با مشخصات ذکر شده در قسمت قبلی استفاده شد که توسط نگهدارنده‌ای روی محور چرخ‌های عقب کمباین نصب گردید. با توجه به محدوده سرعت پیشروی کمباین، چرخنده انتخاب شده دارای چهار دندان بود. جهت اندازه‌گیری فاصله کوبنده-ضدکوبنده، از یک حسگر القای مغناطیسی مدل MK3A استفاده شد. محدوده اندازه‌گیری حسگر انتخابی صفر تا ۱۰ سانتی‌متر و دقت آن نیز یک‌صدم میلی‌متر است. این حسگر با دو تکیه‌گاه روی بدنه کمباین ثابت و لغزنده آن به قسمت ضدکوبنده متصل

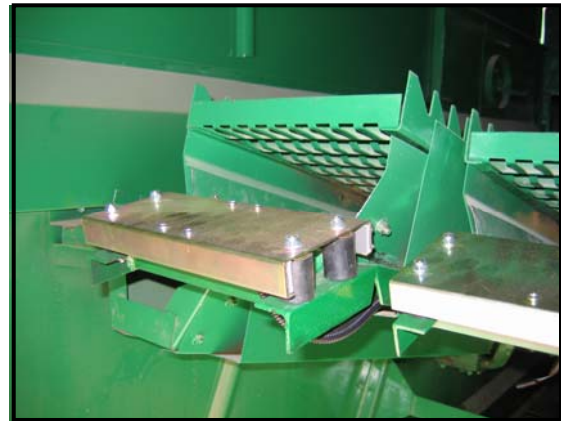
پیاپی سازی و ارزیابی کنترل کننده منطق فازی جهت تنظیمات ...

تغییرات پیوسته ولتاژ بود تغییر می کند که مقدار آن (با یک ضریب تناسب) بیانگر فاصله است.

شد. با تغییر فاصله کوبنده و ضد کوبنده، لغزنده روی قسمت اصلی حسگر جابه جا می شود و خروجی حسگر که به صورت



(ب)



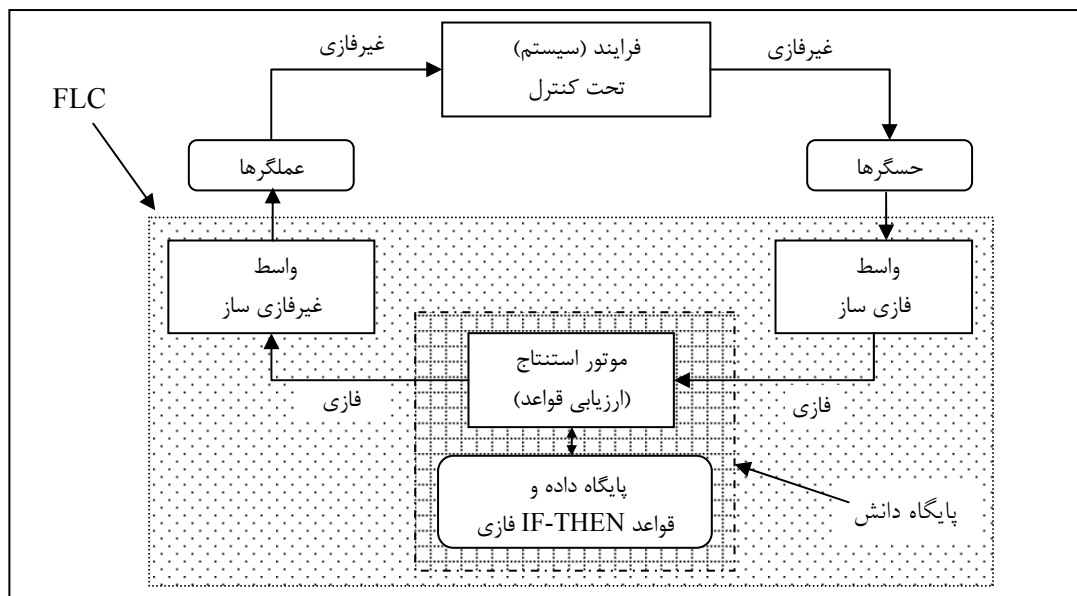
(الف)

شکل ۱- الف) حسگرهای اندازه گیری تلفات کاه پراپانها، و ب) حسگر اندازه گیری تلفات الکها

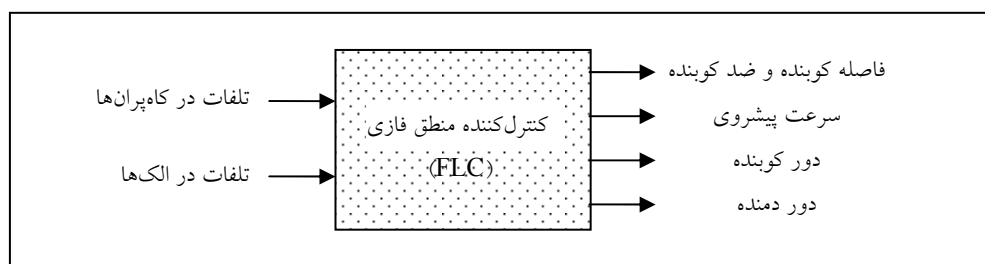
است، برای استخراج قوانین فازی، از روشی استفاده شد که رانندگان کمباین پیش می گیرند. بنابراین، الگوریتم طراحی شده برای FLC دارای دو ورودی شامل تلفات کاه پراپانها و تلفات الکها و چهار خروجی شامل دور کوبنده، فاصله کوبنده و ضد کوبنده، دور دمنده، و سرعت پیشروی کمباین است (شکل ۳).

طراحی کنترل کننده منطق فازی

ساختار که شامل چهار مؤلفه اصلی یعنی رابط فازی سازی، پایگاه دانش، منطق تصمیم سازی، و رابط غیر فازی کننده است در شکل ۲ نشان داده شده است (Teshnelab *et al.*, 2001). با توجه به هدف اصلی از اجرای این طرح که کنترل و کاهش افت انتهای کمباین



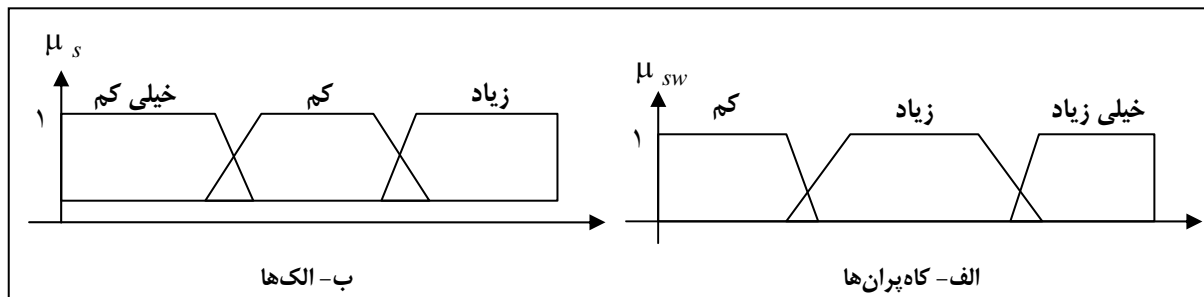
شکل ۲- ساختار کلی یک کنترل کننده منطقی فازی



شکل ۳- ورودی ها و خروجی های کنترل کننده منطقی فازی پیشنهادی جهت کاهش افت انتهای کمباین

(۱-۴)، و زیاد (>3) در نظر گرفته شدند. خروجی FLC یک بردار چهارتایی به صورت (y_s, y_f, y_t, y_c) بود که از آن مقدار تفاوتی که باید در سرعت پیشروی (y_s) ، دور دمنده (y_f) ، دور کوبنده (y_t) ، و فاصله کوبنده و ضدکوبنده (y_c) اعمال می شد به دست می آمد. این خروجی ها همگی از نوع منفرد فازی هستند.

برای هر یک از ورودی های سیستم، از سه تابع تعلق ذوزنقه ای و برای هر یک از خروجی های کنترل کننده از توابع فازی ساز منفرد استفاده شد. توابع عضویت کاه پراپرها $(\mu_{sp}(x))$ با سه تابع تعلق کم (۰-۳)، زیاد (۲-۵)، و خیلی زیاد (>4) بیان شدند. توابع عضویت الکها $(\mu_s(x))$ نیز با سه تابع تعلق خیلی کم (۰-۲)، کم



شکل ۴- نمودارهای توابع تعلق برای دو ورودی سیستم: الف) کاه پرا ن‌ها، و ب) الکها

y_i یعنی تلفات الک‌هاست که مقادیر زبانی هستند. مجموعه فازی C نیز یک منفرد فازی است که برای خروجی‌های کنترل‌کننده $\{y_s, y_f, y_t, y_c\}$ استفاده شد. برای بررسی تعامل بین پارامترها در قسمت مقدمه قواعد، اپراتور منطقی AND اعمال شد.

مهم‌ترین مزیت روش ممدانی در سادگی محاسبات است. به‌طور خلاصه، در موتور استنتاج مینیمم از استنتاج مبتنی بر قواعد جداگانه با ترکیب اجتماع، عملگر \min برای اشتراک فازی و عملگر \max برای اجتماع فازی استفاده می‌شود، یعنی این روش ساختار ساده اعمال \min و \max را دارد. استتلازم مینیمم ممدانی (QMM) به‌صورت رابطه ۲ و موتور استنتاج مینیمم نیز با رابطه ۳ بیان می‌شود (Teshnelab et al., 2001):

$$\mu_{Q_{MM}}(x, y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (2)$$

$$\mu_B(y) = \max_{i=1}^M \left[\sup_{x \in U} \min(\mu_A(x), \mu_{A_1}(x_1), \dots, \mu_{A_n}(x_n), \mu_B(y)) \right] \quad (3)$$

که در آن، $U =$ مجموعه مرجع؛ $\sup(A) =$ نشان‌دهنده

موتور استنتاج (شکل ۲)، با توجه به قواعد If...Then فازی در پایگاه قواعد و اطلاعات موجود در پایگاه داده‌ها و دریافت ورودی از بخش فازی‌ساز، عمل ترکیب قواعد و استنتاج فازی را انجام می‌دهد و خروجی نهایی را در قالب یک مجموعه فازی تعیین می‌کند. این روش، از استنتاجی به‌صورت زیر استفاده می‌کند:

$$\text{If } x_i \text{ is } A_i \text{ And } y_i \text{ is } B_i \text{ Then } z_i \text{ is } C_i, \quad i=1, 2, \dots, M \quad (1)$$

که در آن، عبارت بعد از If فرض یا قیاس و عبارت بعد از Then نتیجه یا تالی نامیده می‌شود. در قاعده ترکیبی (رابطه ۱)، x_i و $y_i =$ متغیرهای فرض؛ $z_i =$ متغیر نتیجه؛ $M =$ تعداد قواعد؛ و $R_i =$ شماره قاعده مربوط است. در سیستم فازی طراحی شده جهت کاهش افت انتهای، قسمت مقدمه دارای دو شرط (یکی برای کاه پرا ن‌ها و یکی برای الک‌ها) است که در اینجا $A = \{\text{کم، زیاد، و خیلی زیاد}\}$ ، مجموعه فازی برای ورودی x_i یعنی تلفات در کاه پرا ن‌ها است که مقادیر زبانی هستند. همچنین، $B = \{\text{خیلی کم، کم، و زیاد}\}$ ، مجموعه فازی برای ورودی

نیز مصاحبه‌های صورت گرفته با اشخاص خبره برای کاهش افت انتهایی، شش قاعده شرطی از ۹ قاعده فازی که از اهمیت بیشتری برخوردار بودند انتخاب شدند که به صورت جدول ۱ خلاصه شده است. این قواعد به صورت یک پایگاه قواعد، مبین راهبرد کنترلی فازی است و یکی از بخش‌های مهم FLC به‌شمار می‌رود (شکل ۲). هر شاخص بردار نتیجه که در قواعد جدول ۱ تعیین نشده است (عبارات بعد از Then) به معنی مقدار صفر برای آن محسوب می‌شود. مثلاً، بردار خروجی برای قاعده اول (ws1, 0,0,0) خواهد بود.

تکیه‌گاه مجموعه فازی A و $\mu_A(x)$ و $\mu_B(y)$ توابع تعلق یا به ترتیب درجه تعلق x و y به A است. مشکل‌ترین بخش محاسبات در رابطه ۳، مربوط به $\sup_{x \in U}$ است، که در صورت استفاده از یک منفرد فازی، به کلی حذف می‌شود. بنابراین، در صورت استفاده از یک منفرد فازی، محاسبات طبق رابطه ۳ بسیار ساده می‌شوند زیرا یک منفرد فازی، یک مجموعه فازی است که تکیه‌گاه آن یک نقطه واحد در U است. با توجه به توابع عضویت در نظر گرفته شده می‌توان در مجموع ۹ قاعده شرطی (اگر- آنگاه) داشت. اما با بررسی متون راهنما و دستورالعمل‌های کاربری کمباین و

جدول ۱- قواعد شرطی If-Then فازی استخراج شده برای طراحی کنترل‌کننده منطقی فازی

قاعده	قاعده شرطی (اگر - آنگاه) فازی
R_1	If sw is Low And s is Low Then $y_c = w_{s1}$.
R_2	If sw is Low And s is High Then case1 $y_f = -w_{f21}$, case2 $y_f = -w_{f22}$, case3 $y_s = -w_{s2}$, case4 $y_c = w_{c2}$
R_3	If sw is Low And s is Very Low Then $y_f = w_{f3}$
R_4	If sw is High And s is High Then $y_s = -w_{s4}$
R_5	If sw is Very High And s is Low Then case1: $y_s = -w_{s5}$, case2: $y_t = -w_{t5}$
R_6	If sw is High And s is Low Then $y_s = -w_{s6}$

$w_s =$ مقدار تفاوتی که به سرعت پیشروی اعمال می‌شود؛ $w_f =$ مقدار تفاوتی که به دور دمنده اعمال می‌شود؛ $w_c =$ مقدار تفاوتی که به فاصله کوبنده و ضدکوبنده اعمال می‌شود؛ و $w_t =$ مقدار تفاوتی که به دور کوبنده اعمال می‌شود.

فعال شوند (که با توجه به ترکیب دو قاعده این مسئله ممکن خواهد بود)، کنترل‌کننده باید همزمان سرعت کمباین و سرعت دمنده را تغییر دهد که خلاف محدودیت اعمال شده خواهد بود. برای رفع این مسئله، دو راه وجود دارد. راه حل اول آن است که توابع عضویت به گونه‌ای شکل گیرند که فعال شدن بیش از یک قاعده امکان‌پذیر نباشد. از این طریق مشکل فوق مرتفع می‌شود اما کنترل‌کننده حاصل دیگر کارایی لازم را نخواهد داشت زیرا یکی از مهمترین دلایل عملکرد قابل قبول کنترل‌کننده‌های فازی به‌خاطر برآیند قواعدی است که با هم فعال شده‌اند (Yan et al., 1994).

همان‌طور که بررسی قواعد تنظیم کمباین نشان می‌دهد (جدول ۱)، در هر حالت تنها یکی از شاخص‌های کنترلی تنظیم می‌شود. این مسئله اتفاقی نیست. به‌طور کلی به رانندگان توصیه می‌شود که در هر یک از حالات تنها یکی از شاخص‌ها را تغییر دهند و از تغییر همزمان چند شاخص خودداری کنند (Griffin, 1987). دلیل این توصیه مهم، پیچیدگی فراوان سیستم است. با توجه به قواعد فازی جدول ۱ و شکل توابع عضویت ورودی‌های سیستم، این امکان وجود دارد که در هر حالت بیش از یک قاعده فعال شود. به‌عنوان مثال، اگر قواعد اول و سوم به‌طور همزمان

پیاده‌سازی و ارزیابی کنترل‌کننده منطق فازی جهت تنظیمات ...

کنترلی در خروجی شود. برای عملکرد مناسب انتخاب‌گر ابتدا باید حالتی که ممکن است با هم فعال شوند تعیین گردند و پس از آن اثر حالتی که با هم فعال می‌شوند بررسی شود. در صورتی که اثر آنها با هم یکسان باشد $O_{w,s}$ فعال می‌شود، وگرنه از خروجی O_{max} استفاده می‌گردد. در سلول اول max مشخص شده است؛ با فرض انتخاب عملگر max برای ترکیب قواعد، خروجی لازم (O_{max}) از رابطه ۴ تعیین می‌شود:

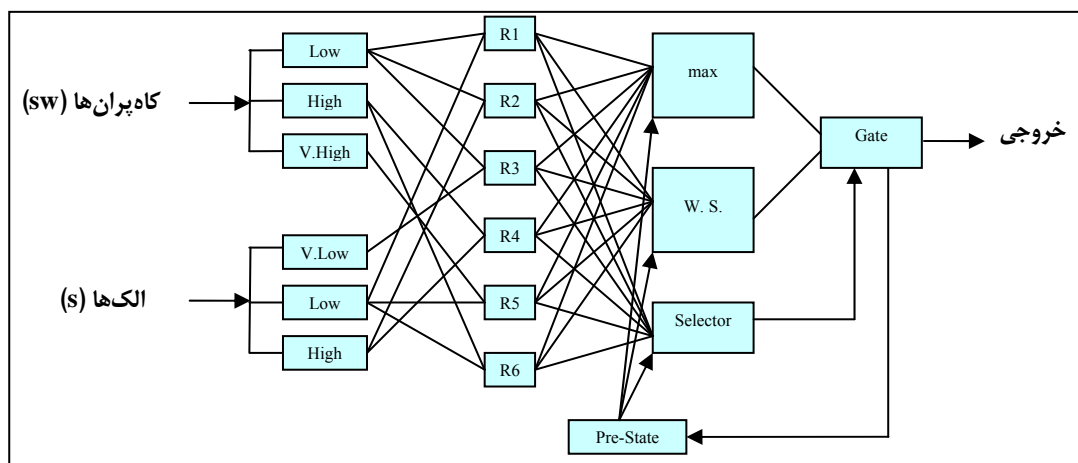
$$O_{max} = R_{max} \cdot outR_{max} \quad (4)$$

که در آن،

$$R_{max} = \max(R_1, \dots, R_6) \quad (5)$$

$outR_{max}$ = خروجی تعیین شده برای قاعده R_{max} خواهد

راه حل دوم که در این تحقیق به کار گرفته شده است استفاده از دو سیستم ترکیب قواعد برای حالات مختلف است. در شکل ۵ ساختار کلی کنترل‌کننده نشان داده شده است. در لایه اول، مقدار عضویت ورودی به مجموعه‌های فازی محاسبه می‌شود؛ در این لایه، تلفات کاه‌پران‌ها با sw و تلفات الک‌ها با s نشان داده شده است. در لایه دوم، شش قاعده، فازی قرار دارند که برای هر قاعده ورودی‌های لازم تعیین شده است. در این بخش مقدار فعال شدن توابع ورودی بر اساس عملگر t -norm تعیین می‌شود (Klir & Yuan, 1995). لایه سوم به منظور ترکیب قواعد (انبوهش)، تعیین خروجی فازی کنترل‌کننده (بلوک فازی‌ساز شکل ۲) در نظر گرفته شده است. در این لایه، چهار بخش مختلف با کارایی‌های متفاوت وجود دارد: مهمترین بخش لایه سه را سلول سوم یا انتخاب‌گر (Selector) تعیین می‌کند. گفته شد که انتخاب‌گر باید مانع از فعال‌سازی بیش از یک شاخص



شکل ۵- ساختار کلی کنترل‌کننده کمباین

در سلول دوم که با نام W. S. مشخص شده است، با استفاده از عملگر جمع وزن دار، خروجی کنترل کننده را از رابطه ۶ تعیین خواهد کرد:

$$O_{w.s.} = \frac{\sum R_i.outR_i}{\sum R_i} \quad (6)$$

که در آن، $outR_i$ = خروجی تعیین شده برای قاعده R_i خواهد بود. در سلول آخر که با PreState مشخص شده است، مقدار انواع حالت‌های ممکن برای قواعد دوم و پنجم نگهداری خواهد شد که برای تعیین قواعد استفاده می‌شود. در لایه آخر کنترل کننده نیز باید بر اساس خروجی انتخاب‌گر یکی از دو خروجی (O_{max} یا $O_{w.s}$) فازی انتخاب و پس از غیرفازی‌سازی (کد برداری) به خروجی کنترل کننده (عملگر مربوط) فرستاده شود (شکل ۲). این خروجی در قالب یک مجموعه فازی است و باید به یک عدد قطعی جهت تغییر وضعیت دادن عملگرها تبدیل شود. در این تحقیق از غیر فازی‌ساز میانگین ماکزیمم برای فازی‌زدایی استفاده شد.

پیاده‌سازی کنترل کننده منطق فازی

در این تحقیق، به منظور پیاده‌سازی الگوریتم کنترلی و پردازش داده‌های حسگرها از یک کنترل کننده منطقی برنامه‌پذیر^۱ (PLC) (سری CJ1 ساخت شرکت امرن) استفاده شد. این PLC پنج قسمت اصلی دارد: واحد ورودی آنالوگ، واحد ورودی دیجیتال، واحد پردازش مرکزی (مدل CJ1M-CPU11)، واحد منبع تغذیه، و واحد خروجی دیجیتال.

اجرای آزمایش‌ها

پس از نصب سیستم فازی روی کمباین، آزمایش‌های مزرع‌ای جهت ارزیابی سیستم صورت پذیرفت. آزمایش‌ها

در تابستان ۱۳۸۵ در دیمزاری دیم با عملکرد ۱/۵ تن در هکتار در منطقه اراک اجرا شدند. ابعاد کرت‌های آزمایش $۱۰۰ \times ۴/۵$ متر در نظر گرفته شد؛ عرض ۴/۵ متر با توجه به عرض دماغه کمباین مورد آزمایش انتخاب گردید. آزمایش‌ها به دو شکل اجرا شدند، حالتی که سیستم کنترل کننده فازی فعال بود و پارامترهای کاری کمباین در تمامی مراحل برداشت با این سیستم بدون نیاز به توقف کمباین تنظیم می‌شدند. در حالت دوم، سیستم کنترل کننده در ابتدای کرت غیرفعال و تأثیر آن بر فرایند برداشت به‌طور کلی حذف می‌شد. در این حالت، تنظیمات لازم را کاربر کمباین به عهده داشت. در هر دو حالت، پس از تنظیمات اولیه دور کوبنده و فاصله کوبنده و ضدکوبنده و دور دمنده به ترتیب برابر ۹۰۰ دور در دقیقه، ۱۴ میلی‌متر در قسمت جلو، و ۶۰۰ دور در دقیقه طبق دستورالعمل کاربری کمباین (در طول ۳۰ متر اولیه کرت) عملیات برداشت آغاز می‌گشت تا اینکه حرکت مواد در داخل کمباین به حالت پایدار می‌رسید. تحت این شرایط، داده‌برداری تلفات در زمان‌های مختلف از طریق حسگرهای نصب شده در پشت کاه‌پران‌ها و الک‌ها به‌طور جداگانه صورت می‌گرفت. پس از اجرای آزمایش‌های مزرع‌ای و جمع‌آوری اطلاعات مربوط به تلفات که در حافظه PLC نصب شده روی کمباین ذخیره شده بود، داده‌ها تجزیه و تحلیل آماری شدند. برای مقایسه میانگین تلفات حاصل از برداشت با کمباین مجهز به سیستم کنترل کننده و کمباین فاقد سیستم کنترل کننده، از آزمون آماری t استیودنت استفاده شد.

نتایج و بحث

تلفات حاصل از برداشت گندم با کمباین مجهز به

پیاده‌سازی و ارزیابی کنترل‌کننده منطق فازی جهت تنظیمات ...

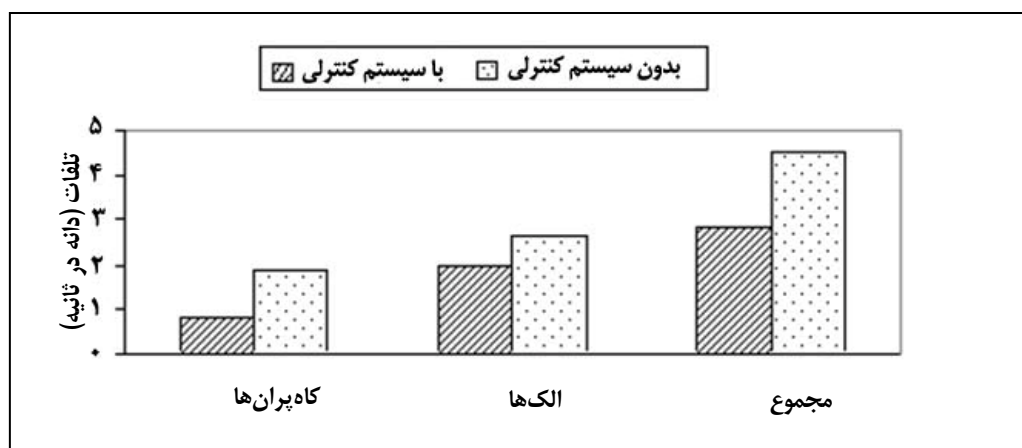
تلفات دانه در هر مرحله از برداشت نیز در شکل ۶ نشان داده شده است. از جدول ۲ مشخص است که تلفات دانه در پشت کاه‌پران‌ها و الک‌ها و مجموع تلفات انتهایی در حالت برداشت با کمباین دارای سیستم کنترل‌کننده فازی، در مقایسه با برداشت با کمباین بدون سیستم کنترل‌کننده، به‌طور معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد کاهش نشان می‌دهد.

سیستم کنترلی و کمباین فاقد سیستم کنترلی به‌طور جداگانه برای کاه‌پران‌ها و الک‌ها تعیین شد. در هر یک از مراحل برداشت (در زمان فعال بودن و فعال نبودن سیستم کنترل‌کننده) به‌طور جداگانه برای الک‌ها و کاه‌پران‌ها ۷۰۰ نمونه گرفته شد. نتایج مقایسه میانگین تلفات هر قسمت و مجموع تلفات با استفاده از آزمون t استیودنت در جدول ۲ آورده شده است. میانگین

جدول ۲- مقایسه میانگین تلفات در برداشت با کمباین مجهز به سیستم کنترلی و کمباین فاقد

تلفات	\bar{d}^*	$S\bar{d}$	t محاسبه‌ای
کاه‌پران‌ها	۱/۰۴۰	۰/۰۱۸۰	۷/۷۵۱**
الک‌ها	۰/۶۵۴	۰/۰۱۸۵	۴/۸۰۸**
مجموع	۱/۶۹۵	۰/۰۳۶۶	۸/۸۵۹**

* تفاوت میانگین تلفات، ** اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد



شکل ۶- میانگین تلفات دانه‌ها در برداشت با کمباین مجهز به سیستم کنترلی و کمباین فاقد سیستم کنترلی

شد. با توجه به اینکه تمامی تنظیمات کمباین ۹۵۵ با کنترل و نظارت کاربر عملی می‌شود، کار کردن با آن حتی برای اشخاص خیره نیز همواره دشوار است. از طرفی، بیشتر کمباین‌داران ایرانی به جهت اینکه دائماً

نتیجه‌گیری

در این تحقیق با بهره‌گیری از دانش شخص خیره، یک کنترل‌کننده منطق فازی (FLC) برای اجرای خودکار تنظیمات کمباین طراحی، پیاده‌سازی، و ارزیابی

تجربه بالا ندارد. زمان پاسخگویی و تنظیمات به میزان چشمگیری کاهش می‌یابد و باعث تسریع در عملیات برداشت غلات می‌شود. افت انتهایی را کاهش و بازدهی کمباین‌های غلات ساخت داخل را افزایش می‌دهد. فرایند برداشت محصول بهینه می‌شود.

روش ارائه شده از ماهیتی ابتکاری برخوردار است و می‌تواند به راحتی برای مسائل مختلف کنترل در کشاورزی، صنعت، مدیریت، و غیره به‌کار رود. با اجرای پاره‌ای اصلاحات روی سکوی برش (پلاتفرم)، امکان توسعه سیستم کنترل پیشنهادی برای کاهش افت سکوی برش در آینده نیز امکان‌پذیر خواهد بود.

در حال جابه‌جا کردن کمباین‌های خود به نقاط مختلف کشور هستند فرصت و رغبتی برای پرداختن به تنظیمات صحیح قسمت‌های مختلف ندارند. با تجهیز کمباین به FLC، تنظیمات لازم مربوط به واحدهای مختلف برحسب شرایط و به‌صورت خودکار اجرا می‌شود و به همین جهت تلفات انتهایی به میزان قابل ملاحظه‌ای توجهی می‌یابد که نتیجه آزمایش نیز حاکی از حدود ۳۰ درصد کاهش تلفات دانه در واحد زمان است. مزایای این سیستم را به‌طور خلاصه می‌توان چنین برشمرد: بعضی از تنظیمات کمباین به‌طور خودکار اجرا می‌شود و کاربر نیازی به داشتن مهارت و

مراجع

- Behrooz Lar, M., Hassan Pour, M., Sadegh Nezhad, H., Asadi, A., Khosravani, A. and Saati, M. 1995. Combine harvesting loss. Agric. Engineering Research Institute. Final Research Report. Karaj. Iran. (in Farsi)
- Benson, E. R., Reid, J. F. and Zhang, Q. 2000. Development of an automated combine guidance system. ASAE Annual Meeting. Paper No. 001337. St. Joseph. MI 49085-9659. USA. Paper No. 003137.
- Brizgis, L. J., Nave, W. R., Paulsen, M. R. 1980. Automatic cylinder control for combines. Trans. ASAE. 23(5): 1066-1071.
- Griffin, G. A. 1987. Combine harvesting, FMO. John Deere company Pub.
- Hall, J. W. 1992. Emulating human process control functions with neural networks. Ph.D. Dissertation. Department of Mechanical Engineering. University of Illinois. Urbana Illinois.
- Jalaei, A. and Javidi, M. 2004. Investigation of combine cleaning shoe to implementation of a fuzzy logic controller. The 3rd national conference on agricultural machinery and mechanization. Kerman. Iran. (in Farsi)
- Klir, G. J. and Yuan, B. 1995. Fuzzy Sets and Fuzzy Logic theory and application. Prentice Hall, Inc. New Jersey. USA.
- Krutz, G. W. and Mailander, M. P. 1983. Automatic combine. Proceeding of the 1st International Conference on Robotics and Intelligent Machines in Agriculture. Tampa. Florida. USA.

پیااده‌سازی و ارزیابی کنترل‌کننده منطق فازی جهت تنظیمات ...

- Le Flufy, M. J. and Stone, G. T. 1983. Speed control of a combine harvester to maintain a specific level of measured threshing grain loss. J. Agric. Eng. Res. 28, 537-543.**
- Ma, X., Karl-heinz Otto, M. and Folker, B. 2003. Harvester with intelligent hybrid control system. United States Patent. 6553300.**
- Maertens, K., Ramon, H. and De Baerdemaeker, J. 2002. Online monitoring system for separation processes in combine harvesters. ASAE. 701P0502. St. Joseph. MI 49085-9659. USA.**
- Taylor, R., Downs, W. and Stone, M. 2008. Combine operation: Loss monitors. Oklahoma cooperation extension fact sheets. Oklahoma State University. <http://osufacts.okstate.edu>.**
- Teshnelab, M., Saffar Pour, N. and Afyooni, D. 2001. Fuzzy systems and control. Khaje Nasir University. Tehran. Iran. (in Farsi)**
- Yan, J., Ryan, M. and Power, J. 1994. Using Fuzzy Logic: Towards Intelligent Systems. Prentice Hall, Inc. New Jersey. USA.**



Implementation and Evaluation of a Fuzzy Logic Controller for the Automatic Settings of a Combine Harvester

M. Lashgari, H. Mobli*, M. Omid, R. Alimardani, S. Mohtasebi and R. Hesamifard

*Corresponding Author: Associate Professor, University of Tehran, P. O. Box: 4111, Karaj, Iran. E-mail: hmobli@ut.ac.ir

Many factors affect yield loss in wheat harvesting with a grain combine harvester and there is no mathematical model to describe the behavior of this complex system. Thus in this study, a fuzzy logic controller (FLC) was designed, implemented and tested for the automatic settings of cylinder speed, concave clearance, fan speed and forward speed of a model 955 John Deere combine. First, the mechanical systems of these units were converted into hydraulic systems to implement the FLC. Then, seven sensors were installed to measure combine parameters (four sensors) and yield losses (three sensors). The yield loss sensors were very accurate and reliable. A fuzzy logic algorithm was proposed to control these units, with two inputs (straw walker and sieve loss) and four outputs (cylinder speed, concave clearance, fan speed and forward speed). Trapezoidal membership functions were selected as fuzzy linguistic input variables and fuzzy singletons were selected as output variables. Six rules having logical AND operators and Mamdani implications were employed. The fuzzy algorithm was implemented using a CJ1M model PLC. Laboratory and field experiments were carried out in the summer of 2006 to evaluate the performance of the proposed fuzzy inference system. Statistical analysis (t-tests) of the present investigation indicated a significant difference ($p < 1\%$) between loss mean in the combine with FLC installed and the combine without a controller.

Key Words: Combine Loss, Fuzzy Logic Controller, PLC, Sensor, Wheat