

طراحی یک کنترل‌کننده ترکیبی فازی / PID جهت تعیین نیروی لازم برای پایداری تراکتور در شیب‌های عرضی

افسانه سلیمانی^۱، محمد حسین عباسپور فرد^{۲*} و عباس روحانی^۳

چکیده

حرکت تراکتور در شیب‌های عرضی یا جانبی سبب واژگونی و خسارت به آن و در اکثر موارد سبب مرگ راننده می‌شود. بیش از 50% تصادفات مربوط به واژگونی تراکتور است. به‌طور کلی واژگونی تراکتور می‌تواند به دو صورت واژگونی جانبی و به سمت عقب باشد که ناشی از عوامل مختلفی مانند قرار گرفتن تراکتور روی شیب‌های عرضی است. هنگامی که شیب بیش از حد باشد و یا ناهمواری‌های روی آن شدید باشد، باعث واژگونی تراکتور می‌گردد. در این مقاله به طراحی یک سیستم کنترل‌کننده ترکیبی دو لایه پرداخته شده است که لایه اول یک کنترل‌کننده فازی و لایه دوم کنترل‌کننده از نوع تناسبی انتگرالی مشتقی (PID) است. توسط این دو کنترل‌کننده نیروی لازم برای پایداری و تعادل تراکتور در شیب‌های عرضی تعیین شده است و در شبیه‌ساز نرم‌افزار MATLAB عملکرد این دو کنترل‌کننده مورد بررسی قرار گرفت. کنترل‌کننده دوم (PID) به‌منظور کاهش خطا و بالا بردن سرعت عکس‌العمل سیستم به کار برده شد. به عبارتی استفاده ترکیبی از این دو کنترل‌کننده که یک سیستم کنترل ترکیبی را به وجود می‌آورد، به نحو مؤثری می‌تواند تعادل تراکتور را در راستای شیب عرضی حفظ کند و از واژگونی آن جلوگیری نماید. در واقع کنترلر فازی مقدار نیروی لازم برای پایداری تراکتور تعیین می‌کند و کنترلر PID مقدار این نیرو را با در نظر گرفتن خطاهای موجود تصحیح می‌کند. اطلاعات به دست آمده از این کنترل‌کننده‌ها که به صورت تعیین نیروی لازم جهت پایداری تراکتور است، به یک عملگر هیدرولیکی داده می‌شود تا این نیرو توسط آن به بدنه تراکتور در هنگام شرایط واژگونی در شیب‌های عرضی وارد شود.

واژه‌های کلیدی: شیب عرضی، کنترل‌کننده فازی، کنترل‌کننده PID، واژگونی جانبی.

ارجاع: سلیمانی ا.، عباسپور فرد م. ح. و روحانی ع. ۱۴۰۱. طراحی یک کنترل‌کننده ترکیبی فازی / PID جهت تعیین نیروی لازم برای پایداری تراکتور در شیب‌های عرضی. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۲۴: ۱-۱۴. <https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2022.13790.581>

۱- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد.

۲- استاد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد.

۳- استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد.

* نویسنده مسئول: abaspour@um.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۱

مقدمه

واژگونی جانبی تراکتور یکی از عوامل صدمات جدی است که در اثر حرکت آن روی شیب‌های تند عرضی اتفاق می‌افتد. در کشاورزی تراکتورها باعث ۳۲٪ مرگ‌ومیر هستند که بیش از ۵۰٪ آن مربوط به واژگونی تراکتور است. شکل ۱ انواع خسارات ناشی از کار با تراکتور را نشان می‌دهد (Hard et al, 1999).



شکل ۱- انواع خسارات ایجاد شده در اثر کار کردن با تراکتور

با توجه به اینکه تراکتور منبع تأمین انرژی و توان منحصر به فرد برای فعالیت‌های مختلف کشاورزی است، بایستی بتوان در شرایط گوناگون و زمین‌های مختلف کشاورزی از آن استفاده کرد. به طوری که کشاورز قادر به استفاده حداکثری از آن باشد. به طور کلی واژگونی تراکتور می‌تواند به دو صورت واژگونی جانبی^۱ و به سمت عقب^۲ باشد که ناشی از عوامل مختلفی است. یکی از این عوامل قرار گرفتن تراکتور روی شیب‌های عرضی است. هنگامی که این شیب بیش از حد باشد و یا ناهمواری‌های روی آن شدید باشد، باعث واژگونی تراکتور می‌گردد (Liu & Ayers, 1996).

در این زمینه تحقیقات و راهکارهایی ارائه شده که بیشتر در جهت حفظ جان راننده در هنگام واژگونی است. استفاده از سامانه حفاظت در مقابل واژگونی (ROPS)^۳ که به عنوان یکی از راه‌حلهایی بیان شده که با نصب روی تراکتور از برخورد مستقیم راننده به زمین هنگام واژگون شدن جلوگیری می‌کند. روش اشاره شده مانعی برای جلوگیری از واژگونی تراکتور نیست و تنها از جان راننده حفاظت می‌کند. در همین راستا تحقیقاتی ارائه شد که در آن معیاری برای سنجش میزان پایداری تراکتور تعریف شده و آزمون‌هایی نیز در این زمینه انجام گرفته است (Hoy, 2009).

عمده‌ترین تحقیقات در زمینه واژگونی تراکتور در سال‌های اخیر توسط Liu & Ayers (1999) انجام شده است. این محققین معیاری را برای پایداری تراکتور تعریف کردند که بین صفر و ۱۰۰ است. معیار پایداری ۱۰۰ نشان دهنده پایداری کامل تراکتور است، برای مثال عبور تراکتور از مسیر کاملاً هموار با سرعت ثابت به عنوان معیار پایداری ۱۰۰ تعریف شده و معیار پایداری صفر حاکی از تمایل آن به واژگونی است و نشان دهنده موقعیتی است که تراکتور در آستانه واژگونی قرار دارد.

در تحقیقی دیگر استفاده از GPS^۴ و دوربین سه‌بعدی، برای شناسایی مسیر حرکت تراکتور مورد استفاده شد، به طوری که به راننده هشدار داده و او را از عبور از مسیرهایی که احتمال واژگون شدن می‌رود آگاه می‌سازد (Liu et al., 1996).

در تحقیق دیگری که توسط محققان انجام شد، پایداری تراکتور با استفاده از یک شبیه‌ساز بنام SIL^۵ مورد واکاوی قرار گرفت که توسط یک دوربین، تصویری سه‌بعدی از مسیر حرکت فراهم شد. پس از آن اطلاعات این تصویر به یک نقشه سه‌بعدی تبدیل و در این نقشه سه‌بعدی مسیری که تراکتور از آن می‌گذشت از قبل مشخص شد. با استفاده از این نقشه زوایای رول^۶ و زوایای پیچ تراکتور و سرعت‌های آن‌ها اندازه‌گیری شد. با تخمین این پارامترها که از عوامل مهم سنجیدن میزان تمایل تراکتور به واژگونی است، وضعیت تعادلی تراکتور پیش‌بینی و با استفاده از آن‌ها نسبت به واژگونی تراکتور هشدار داده می‌شد (Kise & Zhang, 2006).

استفاده از منطق فازی رویکردی مناسب است برای مواردی که داده کافی در دسترس نیست، جمع‌آوری داده مشکل یا داده‌ها به صورت متغیرهای بیانی (زبانی) و ذهنی هستند. همچنین سیستم منطق فازی یک ابزار منحصر به فرد برای تصمیم‌گیری در شرایط عدم اطمینان است. بنابراین از کنترل‌کننده فازی مطابق با منطق فازی برای تشخیص شرایط واژگونی و تصمیم‌گیری برای تعادل تراکتور و ماشین در تحقیق‌های گذشته استفاده‌های زیادی شده است (Mashadi & Nasrolahi, 2009).

4- Global Positioning System

5- Sensor-in-the Loop

6- Roll Angle

1- Side overturns

2- Rear overturns

3- Roll-over protective structures

کنترل‌کننده فازی دستور می‌گیرد) و دقت الگوریتم کنترل پیشنهادی که توسط کنترل‌کننده فازی انجام شد برای هدایت چرخ‌دستی یدک‌کش با حداقل آسیب به ردیف‌های گیاه بسیار مناسب عمل کرده است (Delavarpour *et al.*, 2020).

در تحقیق دیگری از یک سیستم کنترل فازی برای تعیین نیروی مورد نیاز برای جبران ارتعاشات وارده به خودرو از سمت ناهمواری‌های سطح جاده استفاده شد. به وسیله عملگری مکانیکی این نیرو به سیستم تعلیق خودرو وارد شد و مدل فیزیکی آن در شبیه ساز نرم افزار MATLAB ایجاد شد. نتایج نشان داد که بیش از ۲۰ درصد ارتعاشات نسبت به حالت بدون کنترل‌کننده فازی کاهش یافته است (Madani, 2019).

کنترل‌کننده PI^2 یا تناسبی-انتگرالی، یک الگوریتم و روش کنترل حلقه بسته با بهره‌گیری از مفهوم بازخورد است که دارای دو ضریب ثابت P و I است (Nise, 2020). از ترکیب دو کنترل‌کننده فازی و PI به منظور پایداری، کاهش خطا و افزایش و بهبود پاسخ سیستم‌ها استفاده شده است. در تحقیقی برای جلوگیری از واژگونی تراکتور در شیب‌های عرضی از یک تراکتور شیب‌رو^۲ به‌عنوان معیار واژگونی استفاده شد. با کنترل آن میزان انتقال وزن عرضی به حداقل مقدار خود رسید و در ناهمواری‌ها روی شیب عرضی که در آن تراکتور معمولی واژگون می‌شود، تراکتور کنترل شده تعادل خود را حفظ و بدون واژگونی به مسیر خود ادامه می‌داد. هم‌چنین از دستور تولید شده توسط یک کنترل‌کننده دو لایه فازی و PI که به یک جک هیدرولیک متصل بود برای حرکت بدنه تراکتور در شیب عرضی استفاده شد (Mashadi & Nasrolahi, 2008). در تحقیق دیگری که توسط محققین انجام شد شرایط یک تراکتور معمولی را با یک تراکتور بهینه شده با استفاده از نرم‌افزار ADAMS به عنوان ورودی مدل و مرتبط کردن آن به شبیه ساز در نرم‌افزار MATLAB شبیه‌سازی کردند. کنترل این تراکتور بهینه شده به طور خودکار و بدون دخالت راننده با استفاده از منطق فازی و PI انجام شد (Mashadi & Nasrolahi, 2008).

در شکل ۲ حالت‌های مختلف واژگونی جانبی تراکتور نشان داده شده است که هدف این تحقیق بررسی واژگونی

کامیون‌های یدک‌کش به دلیل هزینه کم عملیاتی در حمل و نقل کالا بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما برخی از مشکلات ذاتی این وسایل نقلیه قابلیت مانورپذیری کم آن‌ها است. برای حل این مشکل یک کنترل‌کننده منطق فازی برای سیستم هدایت اجباری اتوماتیک نیمه تریلر به کار بسته شده تا برای بهبود قدرت مانور خودرو در سرعت‌های پایین از انحراف، خروج و کج شدن تریلر جلوگیری کند. برای تحقق این امر کنترل‌کننده فازی، زاویه مفصل (زاویه محل اتصال تریلر به کامیون) و پارامترهایی مانند سرعت و جهت خودرو را دریافت می‌کند و دستورهایی در جهت کنترل تریلر ایجاد می‌کند (Bortoni-Anzures *et al.*, 2013). در تحقیق دیگری یک سامانه کنترل لغزش خودکار مبتنی بر منطق فازی برای تراکتورهای کشاورزی ساخته شد. سیستم توسعه یافته به طور مداوم میزان لغزشی را که در طی فعالیت‌های خاک‌ورزی اتفاق می‌افتد به عنوان ورودی به سیستم کنترل فازی اعمال می‌کرد. کنترل‌کننده فازی به طور خودکار عمق عملکرد تجهیزات خاک‌ورزی را با توجه به میزان افزایش مقدار لغزش روی چرخ‌های محرک تغییر می‌داد. در فعالیت‌های خاک‌ورزی انجام شده با کنترل‌کننده فازی در مقایسه با کنترل توسط کاربر، مشخص شد که ۴۴٪ درصد کاهش در مقدار مصرف سوخت، ۵٪ افزایش در مقادیر عملکرد مزرعه‌ای و ۱۰٪ تغییرات در عمق خاک‌ورزی به وجود آمده است (Soylu & Çarman, 2021).

عملیات پس از کاشت (مانند کوددهی، پوشش گیاهان زراعی) با تراکتور و چرخ‌دستی در محصول‌های ایستاده مثل ذرت چالش برانگیز است. تراکتور و گاری (چرخ‌دستی) باید در یک مرز خاص نگهداری شوند تا از آسیب به محصول جلوگیری شود. راه‌حل، اعمال هدایت خودکار بر تراکتور است. باین‌حال تحقیقات کافی در زمینه کنترل اتوماتیک چرخ‌دستی یدک‌کش وجود ندارد. بنابراین، اقدام به طراحی کنترل‌کننده برای مدیریت موقعیت‌های جانبی و طولی یک گاری یدک‌کش شده با تراکتور شد. این الگوریتم کنترل‌کننده تطبیقی مبتنی بر منطق فازی بود. شبیه‌سازی در SIMULINK MATLAB نشان داد که عملکرد راه انداز هیدرولیک^۱ (عملگری که از

2- Proportional and integral (PI)

3- Slope tractors

1- Hydraulic drive

شیب عرضی مسیر حرکت است. φ_{cr} زاویه رول بحرانی است که بیشتر از آن، تراکتور واژگون می‌شود (Kise & Zhang, 2006).

دومین معیار پایداری، معیار پایداری دینامیکی است، این معیار هنگامی اهمیت دارد که برای مثال یک تراکتور در حال حرکت روی سطحی با شیب عرضی ثابت، به‌طور ناگهانی تحت یک اغتشاش دینامیکی مانند عبور کردن از دست‌انداز، قرار بگیرد. این معیار پایداری از معادله (۲) به دست می‌آید (Liu & Ayers, 1996):

$$SI(t) = (1 - \frac{\varphi}{\varphi_{cr}}) [1 - (\frac{\dot{\varphi}}{\dot{\varphi}_{cr}})^2] \times 100 \quad (2)$$

که در آن، $\dot{\varphi}$ (سرعت زاویه‌ای) رول تراکتور و $\dot{\varphi}_{cr}$ (سرعت زاویه‌ای رول بحرانی) که وضعیتی است که تراکتور انرژی لازم را برای واژگونی دارد. ناپایداری استاتیکی به دلیل قرار گرفتن تراکتور روی یک شیب عرضی هموار، به ندرت اتفاق می‌افتد؛ اما از دست دادن پایداری به دلیل ناهمواری روی شیب عرضی بسیار بیشتر از شیب عرضی هموار است (Hunter & Owen, 1983).

با توجه به معادله‌های (۱) و (۲)، اگر بتوان φ (زاویه رول) و $\dot{\varphi}$ (سرعت زاویه‌ای) را در هر شیب عرضی و همچنین دست‌اندازها و ناهمواری‌ها محاسبه نمود، می‌توان توسط یک کنترل کننده آن‌ها را ارزیابی کرده و شرایطی که باعث واژگونی تراکتور در حین عبور از دست‌اندازها، شیب‌های عرضی و ناهمواری‌ها می‌شود را توسط یک کنترل کننده بررسی کرد. به این طریق می‌توان نیروی عکس‌العملی که به بدنه تراکتور بایستی وارد شود تا دو معیار پایداری استاتیکی و دینامیکی آن برابر ۱۰۰ باشد که حاکی از پایداری کامل تراکتور است، توسط کنترل کننده‌ها تعیین کرد.

هنگامی که زاویه φ و $\dot{\varphi}$ از حد بحرانی می‌گذرند چرخ‌ها تماس خود را با زمین از دست می‌دهند و تراکتور معمولی در این حالت واژگون می‌شود. به همین دلیل تراکتور مدنظر در این پژوهش تراکتور شیب‌رو مطابق شکل ۴ بوده به این صورت که دستوری که توسط کنترل کننده فازی تعیین می‌شود به عملگر هیدرولیک داده می‌شود تا به محورهای چرخ‌ها نیرو وارد کنند تا در تماس با سطح زمین قرار گیرند و از واژگونی آن به‌طور خودکار جلوگیری شود.

در اثر حرکت روی شیب عرضی یعنی حالت ۲-الف است. مشکل استفاده از کنترل کننده PI کاهش سرعت پاسخ سیستم است. به همین منظور از ترکیب کنترل کننده فازی که پارامترهایی مانند زاویه و سرعت مسیر حرکت را دریافت می‌کند و دستورهایی در جهت پایداری تراکتور ایجاد می‌کند و PID^1 که دارای سه ضریب ثابت P ، I و D است و هر کدام به ترتیب بهره کنترل کننده را افزایش و باعث بهبود پاسخ حالت دائمی و حذف خطای ماندگار، افزایش سرعت پاسخ سیستم می‌شوند، برای تعیین نیروی تصحیحی برای کنترل و تعادل تراکتور استفاده شده است. در این تحقیق هدف، به دست آوردن صحیح‌ترین مقدار نیرو با کمترین خطا برای حفظ تعادل تراکتور در شیب‌های عرضی است. به این منظور از ترکیب کنترل کننده PID و فازی استفاده شده که این کار یک نوآوری است، چون تا به حال از کنترل کننده PID به همراه کنترل کننده فازی برای چنین منظوری در تراکتور استفاده نشده است.

مواد و روش‌ها

به‌طور کلی برای تحقق اهداف این پروژه مراحل زیر انجام شد: تشخیص پارامترها و عوامل تأثیرگذار در پایداری تراکتور روی شیب‌های عرضی، طراحی کنترل کننده فازی و تعیین قوانین فازی بر اساس پارامترهای مؤثر در پایداری روی شیب عرضی و طراحی کنترل کننده PID بر اساس سیستم عملگر هیدرولیک تراکتور

پارامترهای تأثیرگذار بر پایداری تراکتور روی

شیب‌های عرضی

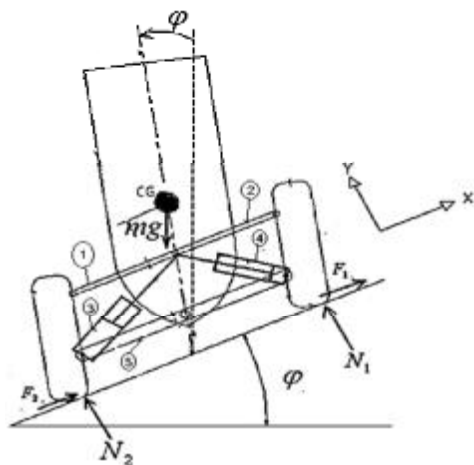
پایداری تراکتور به سه صورت عرضی، طولی و چرخشی است. چون در این پژوهش، واژگونی جانبی ناشی از شیب عرضی مورد بررسی قرار گرفته، لذا بایستی معیار پایداری عرضی مورد توجه قرار گیرد. معیار پایداری عرضی در حالت استاتیکی به صورت معادله (۱) است (Liu & Ayers, 1996).

$$SI = (1 - \frac{\varphi}{\varphi_{cr}}) \times 100 \quad (1)$$

که در آن، φ زاویه رول تراکتور که مطابق شکل ۳ در وضعیتی که چرخ‌های آن از زمین جدا نشده است، برابر با

1- Proportional, integral and derivative (PID)

صورت دو تکه و با اهرم‌بندی به چرخ‌ها و بدنه وصل شده است، شماره‌ی ۴ و ۳ سیلندره‌های هیدرولیک و عمل‌کننده‌ها هستند، شماره‌ی ۲ و ۱ دو میله‌ای هستند که جک هیدرولیک و عمل‌کننده‌ها به آن وصل شده‌اند. نیرویی که توسط کنترل‌کننده فازی و PID در این تحقیق تعیین می‌شود به سیلندره‌های هیدرولیک داده می‌شود تا با وارد کردن نیرو به اکسل عقب پایداری آن را در شیب عرضی حفظ کنند.

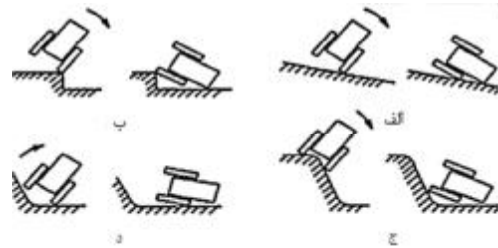


شکل ۵- تصویر جسم آزاد تراکتور شیب‌رو

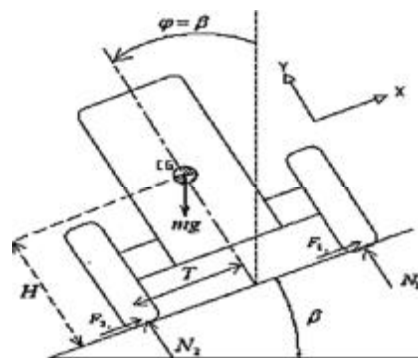
طراحی کنترل‌کننده فازی و تعیین قوانین فازی بر اساس پارامترهای مؤثر در پایداری روی شیب عرضی

کل فرایند طراحی با استفاده از جعبه ابزار فازی در نرم‌افزار MATLAB انجام شد. در این طراحی، کنترل‌کننده مطابق شکل ۶ دو مقدار ورودی ϕ (زاویه رول) و $\dot{\phi}$ (سرعت زاویه‌ای رول) دریافت می‌کند. در واقع دو تا ورودی برای آن در نظر گرفته شده است و در مرحله بعد قواعد منطق فازی برای این دو مقدار دریافتی تعیین گردید، سپس نیروی واکنش F یا عکس‌العملی بر اساس قواعد و قانون‌هایی که تعیین شد برای حفظ تعادل تراکتور برآورد می‌شود.

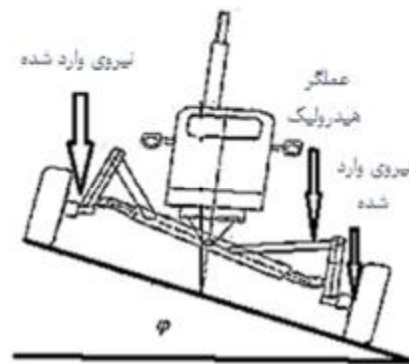
برای زاویه رول مطابق شکل ۷ حالت الف، سه تابع عضویت و برای $\dot{\phi}$ (سرعت زاویه‌ای)، حالت ب، تعداد خیلی بیش‌تری تابع عضویت در نظر گرفته شده است که نشان می‌دهد حساسیت سیستم روی $\dot{\phi}$ (سرعت زاویه‌ای) بیشتر از زاویه رول است.



شکل ۲- حالات مختلف واژگونی تراکتور، الف) حرکت روی شیب عرضی ب) حالتی که چرخ‌های تراکتور روی یک لبه قرار می‌گیرد ج) حرکت روی یک لبه دهانه بزرگ یا لبه تپه و لبه ناهمواری‌ها د) حرکت روی یک دهانه بزرگ یا مانع بزرگ (Chisholm, 1979)



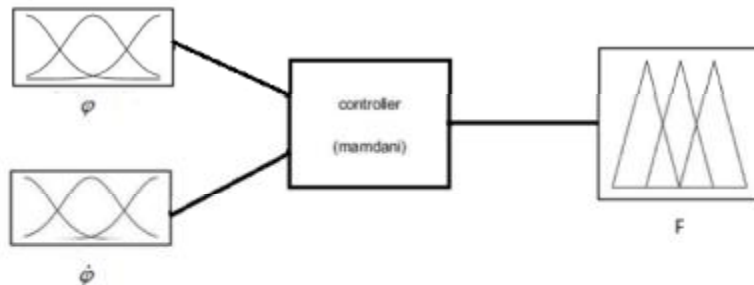
شکل ۳- تصویر جسم آزاد تراکتور هنگام استقرار و یا حرکت بر روی سطحی با شیب عرضی



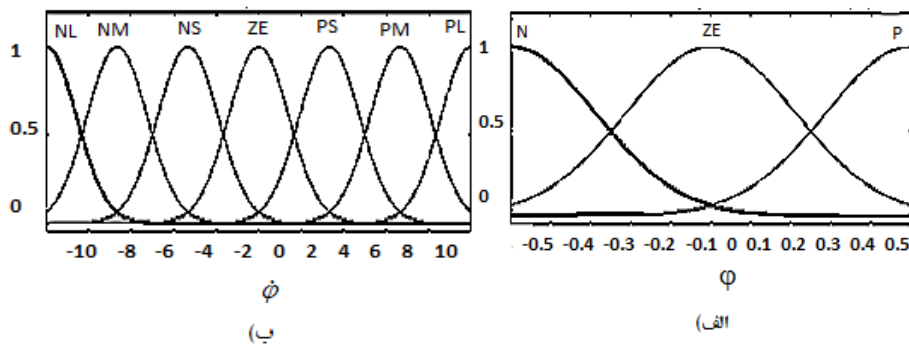
شکل ۴- نمایش تراکتور شیب‌رو

تصویر جسم آزاد^۱ تراکتور شیب‌رو نیز در شکل ۵ نمایش داده شده است. قسمت‌های مختلف عمل‌کننده هیدرولیکی روی شکل با شماره مشخص شده است. شماره ۵ روی شکل، اکسل عقب تراکتور است که به

1- Free body diagram (FBD)



شکل ۶- نمایش کنترل کننده فازی با دو ورودی و یک خروجی طراحی شده



شکل ۷- توابع عضویت فازی، الف) تابع عضویت مربوط به زاویه‌ی رول (ب) تابع عضویت مربوط به سرعت زاویه‌ای رول & j

قواعد فازی

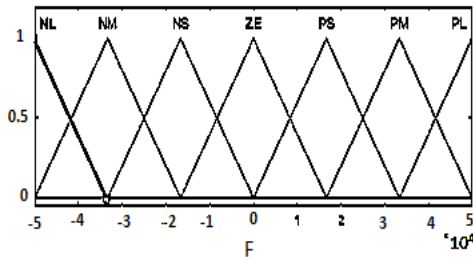
برای تعریف قواعد فازی بایستی نکات مهم در حرکت تراکتور در نظر گرفته شود. وقتی که مقدار زاویه رول در حال افزایش باشد، نیروی تعیین شده باید با ماکزیمم مقدار در جهت عکس تعیین شود و در موقعیتی که زاویه رول با سرعت زاویه‌ای کمی کاهش می‌یابد، نیرویی با مقدار کوچک تعیین می‌شود. در صورتی که زاویه رول با سرعت زاویه‌ای متوسطی کاهش یابد، نیرویی تعیین نمی‌شود؛ اما اگر کاهش زاویه رول با سرعت زاویه‌ای زیادی باشد، یک مقدار نیرو در جهت عکس تعیین می‌شود که این سرعت را خنثی کند. در صورتی که مقدار زاویه رول کم باشد، متناسب با مقدار سرعت زاویه‌ای، مقدار نیرو تعیین می‌شود؛ اما اگر با سرعت زاویه‌ای زیاد کاهش می‌یابد، بایستی از سرعت زاویه‌ای زیاد آن کاسته

شود تا باعث عبور بدنه تراکتور از زاویه رول صفر نشود، بنابراین در این حالت نیرویی کم در جهت عکس حرکت بدنه تراکتور به سمت زاویه رول صفر، اعمال می‌شود. مسلماً این قوانین برای زاویه رول منفی و مثبت به دلیل تقارن سیستم یکسان است. در وضعیتی دیگر ممکن است مقدار زاویه رول از هر دو سمت (مثبت و منفی) کم باشد و نزدیک به صفر باشد. بنابراین متناسب با مقدار سرعت زاویه‌ای، در جهت عکس افزایش یا کاهش زاویه رول نیروی مطلوب وارد می‌شود. با توجه به این نکات قوانین فازی تعریف می‌شود.

جدول ۱ قواعد فازی حاکم بر کنترل کننده فازی را نشان می‌دهد. حروف اختصاری که در تعیین قواعد فازی بکار رفته است در شکل ۷ و ۸ توضیح داده شده است.

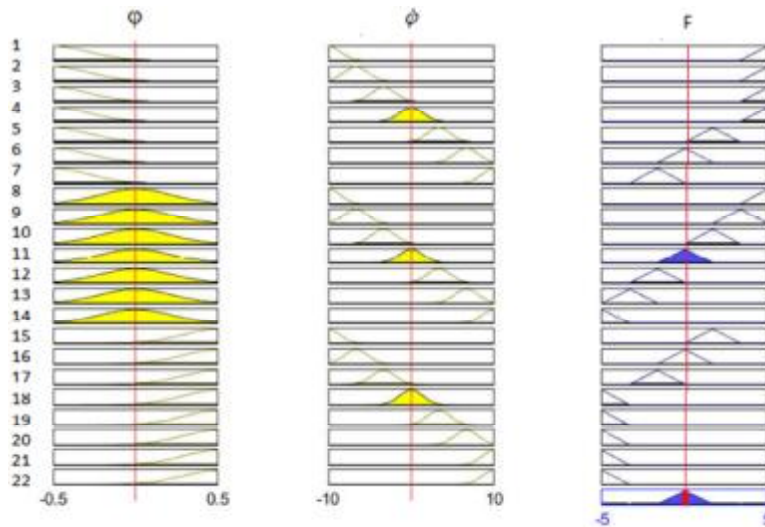
جدول ۱- قواعد فازی حاکم بر کنترل کننده فازی

Roll_rate	ZE	PS	NM	PM	NL	PL	NS
Roll_angle							
P	PL	PS	PL	PL	PL	NS	PL
N	ZE	NS	PM	PM	PL	NL	PS
ZE	NL	NS	ZE	ZE	PS	NL	NS



شکل ۸- تابع عضویت مربوط به نیروی خروجی

توابع عضویت مربوط به نیرو نیز مطابق شکل ۸ شامل نیروهای زیاد، متوسط، کم و صفر تعریف شده است. همچنین با توجه به تقارن سیستم حول زاویه رول صفر، تمام توابع عضویت مربوط به هرکدام از ورودی‌ها و خروجی کنترل‌کننده به صورت قرینه است. بعد از اتمام مرحله فازی‌سازی و تعریف قوانین فازی، می‌توان مسائل را با پردازش قواعد پایه فازی حل کرد و مقادیر خروجی را از طریق فرایند غیرفازی‌سازی قوانین در محیط FIS مطابق شکل ۹ به مقادیر قطعی تبدیل کرد.



شکل ۹- فرایند غیرفازی‌سازی قوانین در محیط FIS در نرم‌افزار MATLAB

رابطه تغییرات نیروی حاصل از جک هیدرولیک بر حسب جابجایی شیر کنترل جهت به صورت معادله (۴) است (Manring & Fales, 2019).

$$F_A = A_p \alpha \left[C_d w x_v \sqrt{\frac{P_S - \text{sgn}(x_v) P_L}{\rho}} - C_{tm} P_L - A_p (x_b - x_a) \right] \quad (4)$$

که در آن $(x_b - x_a)$ ، جابجایی سیلندر و P_L اختلاف فشار در سیلندر است. همچنین:

$$F_A = A_p P_L \quad (5)$$

مقادیر پارامترهای بکار رفته در معادلات همراه با مقادیر آن در جدول ۲ آمده است. مدت زمان عملکرد عملگر هیدرولیک می‌باشد.

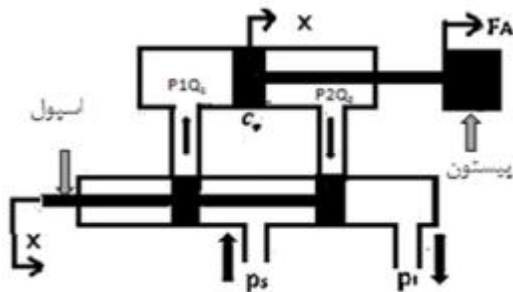
کنترل‌کننده PID با توجه به معادلات (۳)، (۴) و (۵) طراحی شده است. کنترل‌کننده میزان خطا که اختلاف نیروی مطلوب با نیروی خروجی از سیلندر هیدرولیک

طراحی کنترل‌کننده PID بر اساس سیستم عملگر هیدرولیک تراکتور

در شکل ۱۰ نحوه عملکرد عملگر هیدرولیک نشان داده شده است. در آن، نیروی مطلوب دریافت و جابجایی شیر کنترل جهت (x) باعث هدایت جریان با فشار بالا به یکی از دو محفظه سیلندر شده و جریان سیال از سمت دیگر محفظه سیلندر به سمت مخزن هدایت می‌شود. این جریان باعث به وجود آمدن اختلاف فشار در سیلندر هیدرولیک و به دنبال آن ایجاد نیرو می‌شود. دینامیک شیر شبیه یک سیستم مرتبه دوم، به صورت معادله (۳) است (Manring & Fales, 2019).

$$\tau \ddot{x}_a + \dot{x}_a = k a \quad (3)$$

که در آن، سرعت حرکت مایع سیال از مکان اولیه a ، \dot{x}_a ، شتاب حرکت مایع سیال از مکان اولیه آن است، k ضریب ثابت، a مکان اولیه حرکت مایع سیال، τ مقدار تنش است.



شکل ۱۰- سیلندر هیدرولیکی و شیر کنترل جهت

است را دریافت کرده و با کنترل ولتاژ شیر کنترل جهت، باعث تحریک آن می‌شود. این کنترل کننده با سه ضریب ثابت به صورت معادله (۶) حاصل می‌گردد.

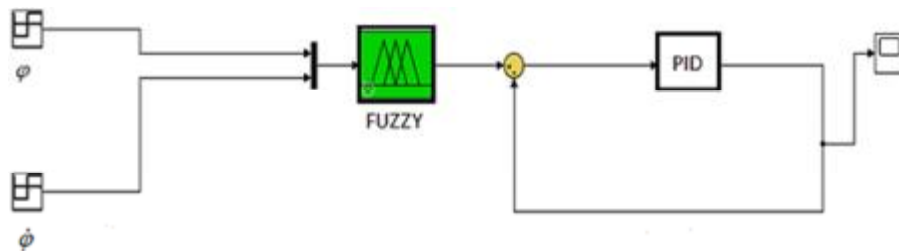
$$G_c(s) = 1.26 + \frac{0.65}{s} + 1.28s \quad (۶)$$

این کنترل کننده PID به همراه کنترل کننده فازی در محیط شبیه‌ساز MATLAB مطابق شکل ۱۱ نیز طراحی گردید. ساختار کلی سیستم کنترل در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

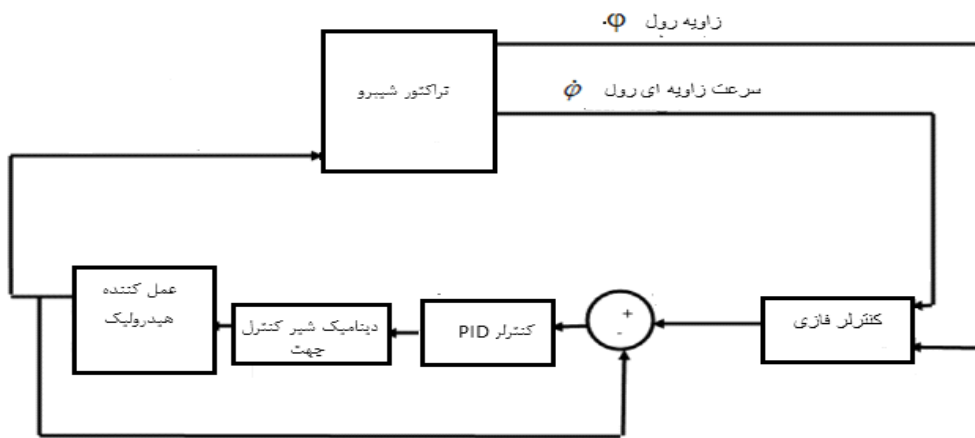
نمودار جریان عملیاتی سیستم فازی و کنترل کننده PID جهت تخمین نیروی لازم برای پایداری تراکتور روی شیب‌های عرضی مطابق شکل ۱۳ نشان داده شده است.

جدول ۲- مشخصات و پارامترهای بکار رفته برای عملگر هیدرولیکی (Manring & Fales, 2019)

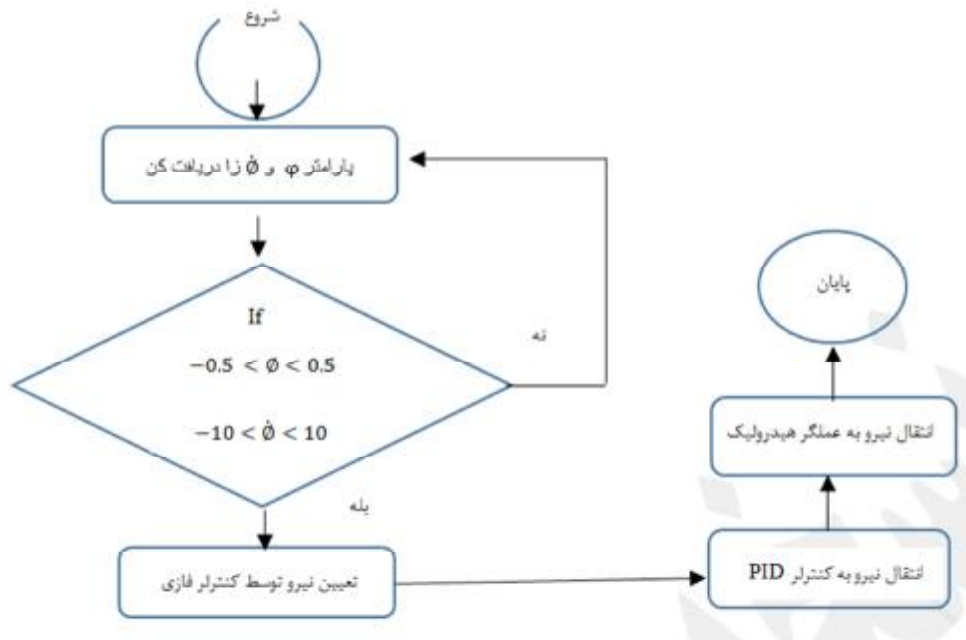
نام پارامتر	مشخصه پارامتر	مقدار پارامتر	واحد
مساحت پیستون	A_p	۰/۰۰۴۳	m^2
ضریب نشتی	C_{tm}	-	-
ضریب تخلیه	C_d	۰/۶۸	-
عامل تبدیل ولتاژ به جابجایی شیر	K	$1/4 \times 10^{-11}$	m/v
فشار پمپ	P_s	۲۰۶۸۵	kN/m^2
عرض دریچه شیر	W	۰/۰۰۹	m
ضریب هیدرولیک	α	$2/26 \times 10^9$	N/m^5
ثابت زمانی	T	۰/۰۰۱	Sec^{-1}



شکل ۱۱- شبیه‌سازی سیستم کنترل واژگونی تراکتور در محیط شبیه‌ساز MATLAB



شکل ۱۲- ساختار کلی سیستم کنترل



شکل ۱۳- نمودار جریان عملیاتی سیستم فازی و PID جهت تخمین نیروی لازم جهت پایداری تراکتور

(سرعت زاویه‌ای) بالایی افزایش داده و باعث ناپایداری تراکتور شود (Liu et al., 1999). زاویه رول تراکتور، در هر دو سرعت حرکت پس از عبور از دست‌انداز افزایش یافته و در نهایت واژگون می‌شود.

برای جلوگیری از این واژگونی در مناطقی با شیب عرضی از تراکتورهای شیب‌رو استفاده می‌کنند که توسط جک هیدرولیک و عملگر هیدرولیک (مطابق شکل ۴ و ۵) در هر شیبی چرخ‌ها در تماس با زمین قرار می‌گیرد. کنترل‌کننده فازی که در این پژوهش استفاده شده است، با گرفتن زاویه و سرعت زاویه‌ای رول در حرکت تراکتور با دو سرعت ثابت و مستقیم یک نیروی عکس‌العملی را تعیین و مشخص می‌کند و با انتقال این نیرو به عملگر هیدرولیک تماس چرخ‌ها دوباره با زمین به‌طور خودکار فراهم می‌شود و تراکتور در هر شیب عرضی بدون واژگونی به حرکت خود ادامه می‌دهد.

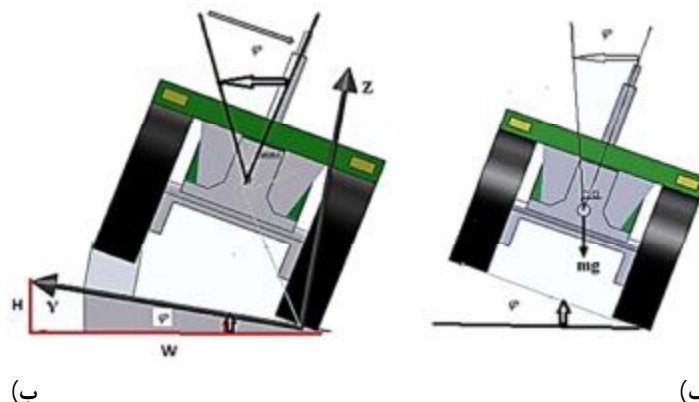
کنترل‌کننده فازی بنابر شکل ۱۵ و با توجه به دو مقدار ورودی زاویه و سرعت زاویه‌ای رول مقدار نیروی بهینه برای کنترل تراکتور را تعیین و پیش‌بینی می‌کند. با توجه به شکل ۱۵ مشخص است که در گوشه‌ها که رنگ نمودار قرمز و نارنجی است به عنوان نواحی بحرانی با بیش‌ترین مقدار نیرو تعریف شده است.

نتایج و بحث

شبیه‌سازی

در شبیه‌سازی حرکت تراکتور، مطابق شکل ۱۴-الف پس از آن‌که تراکتور روی شیب عرضی $20^\circ < \phi < 0^\circ$ و دست‌اندازی با ارتفاع 0.5 متر، عرض 3 متر با سرعت 10 و 15 (km/h) قرار می‌گیرد، زاویه رول آن برابر زاویه شیب عرضی است که نشان دهنده پایداری کامل آن است؛ اما در ثانیه دوم وقتی چرخ‌های سمت بالای شیب عرضی از دست‌انداز اشاره شده که به‌عنوان اغتشاش سیستم تلقی می‌شود، گذشتند، زاویه رول آن ناگهان افزایش یافته و چرخ‌ها از سطح زمین جدا می‌شوند که نشان دهنده ناپایداری آن است، ولی دوباره به موقعیت اولیه خود و شیب مورد نظر بازگشته و پایدار می‌شود.

برای زوایای $30^\circ < \phi < 20^\circ$ و دست‌اندازی با ارتفاع 0.3 متر، عرض 3 متر با سرعت 10 و 15 (km/h)، زمانی که یکی از چرخ‌های عقبی یا جلویی تماس خود را با سطح شیب‌دار از دست می‌دهند و یا از سطح زمین جدا می‌شوند و در ثانیه دوم که چرخ‌های سمت بالای شیب عرضی مطابق شکل ۱۴-ب با سرعت مشخصی از دست‌اندازی سینوسی شکل به طول و ارتفاعی مشخص عبور می‌کند، این دست‌انداز به‌عنوان اغتشاش وارده به سیستم می‌تواند شیب عرضی را به‌طور ناگهانی با $\>r$

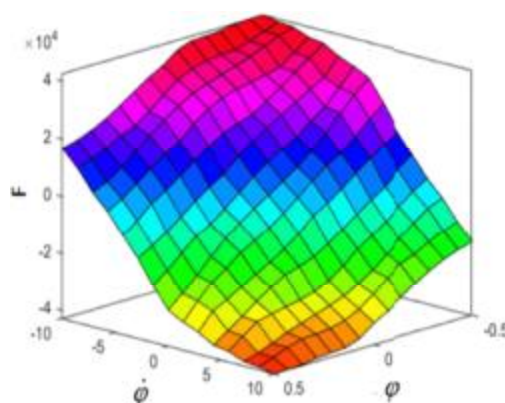


شکل ۱۴- نمایش تراکتور در شیب عرضی، الف) تراکتور روی شیب عرضی در حالت پایدار ب) تراکتور روی شیب عرضی در حالت ناپایدار

حسب قوانین فازی نشان می‌دهد با جابه‌جایی خط عمود قرمز رنگی که روی هر ستون مربوط به زاویه و سرعت زاویه‌ای قرار دارد مقدار نیروی تعیین شده تغییر می‌کند و در واقع هر چه به نواحی بحرانی و مرزهای آن‌ها مخصوصاً سرعت زاویه‌ای (نزدیک به ۱۰ و -۱۰) و زاویه رول (نزدیک به ۰.۵ و -۰.۵) نزدیک‌تر شویم مقدار نیروی تصحیحی با مقدار بیش‌تری تغییر می‌کند.

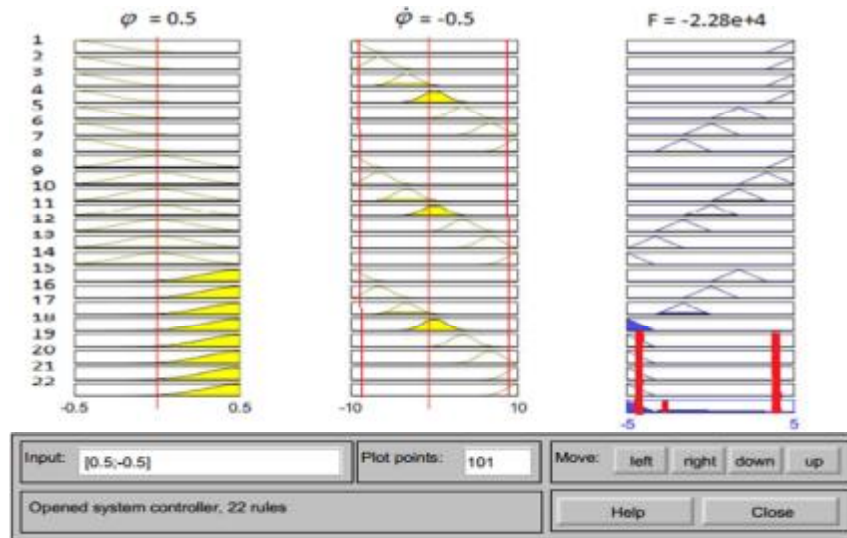
با توجه به شکل ۱۸ که تغییرات سطح پاسخ (نیروی عکس‌العملی) از ۰ تا ۵۰۰۰۰ نیوتن (منحنی ۱) را در برابر تغییرات سرعت زاویه‌ای (منحنی ۲) و زاویه رول (منحنی ۳) در مسیر حرکت، توسط کنترل‌کننده فازی نشان می‌دهد، مشخص است که تغییرات سطح پاسخ که همان نیروی عکس‌العمل و به مقدار خیلی زیادی به تغییرات سرعت زاویه‌ای وابسته است و با تغییرات جزئی در مقدار سرعت زاویه‌ای، مقدار سطح پاسخ به مقدار زیادی تغییر می‌کند. بنابراین با سرعت زاویه‌ای می‌توان سطح پاسخ را کنترل کرد.

با توجه به شکل ۱۹ که نمایش دو بعدی تغییرات سطح پاسخ را در صفحه افقی در برابر زاویه و سرعت زاویه‌ای مسیر حرکت توسط کنترل‌کننده فازی نشان می‌دهد، مشخص است که وقتی φ و $\dot{\varphi}$ هم علامت و هم جهت باشند یعنی با زیاد شدن و کم شدن زاویه رول، سرعت زاویه‌ای در همان جهت پیش رود. مانند نواحی قرمز رنگ و نارنجی رنگ که در این نواحی بیشترین احتمال ناپایداری تراکتور را داریم و به همین دلیل مقدار نیرو در این نواحی به صورت بحرانی تعیین شده است.

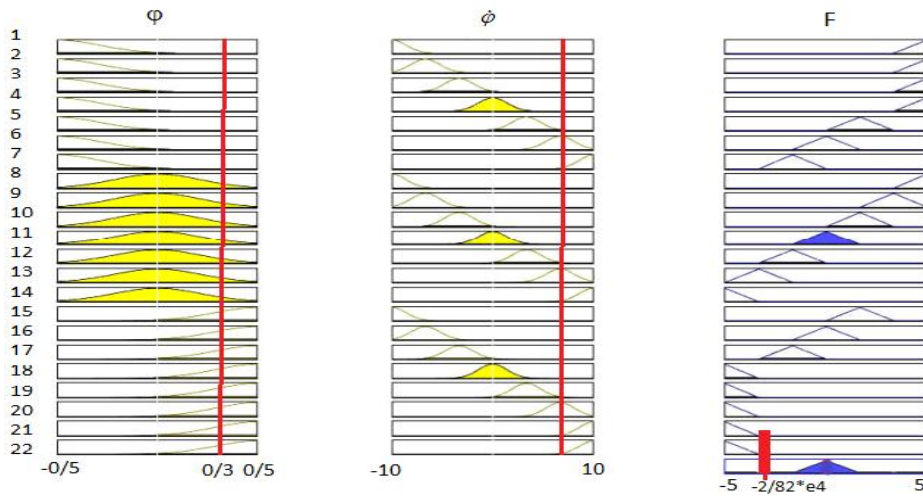


شکل ۱۵- نمایش سه‌بعدی تغییرات سطح پاسخ (F) در برابر زاویه (φ) و سرعت زاویه‌ای $(\dot{\varphi})$ مسیر حرکت توسط کنترل‌کننده فازی

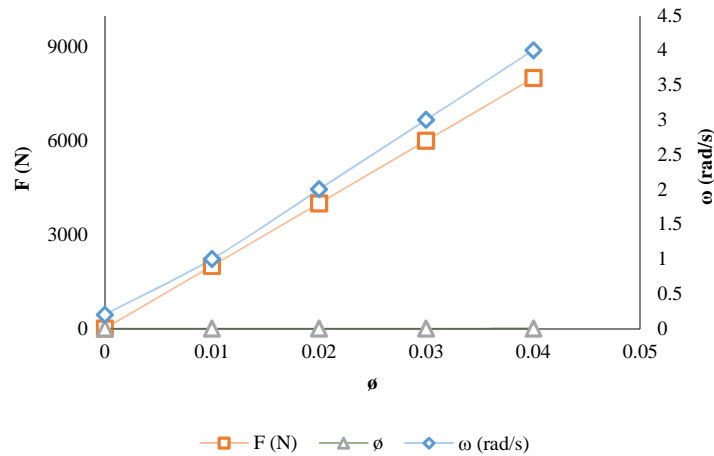
بعد از اینکه شبیه‌سازی سیستم کنترل، مطابق شکل ۱۶ کنترل‌کننده با گرفتن دو مقدار φ و $\dot{\varphi}$ ، مقدار F (نیروی تصحیحی برای تعادل تراکتور) را تعیین می‌کند. برای مثال با دادن مقدار زاویه رول 0.5 درجه و سرعت زاویه‌ای 0.5 مقدار نیرو $10^4 \times 2/12$ نیوتن به دست می‌آید. هنگامی که مقدار سرعت زاویه‌ای نزدیک ۱۰ و -۱۰ است مقدار نیرو به صورت بحرانی تعریف می‌شود، چون احتمال سقوط تراکتور در این نواحی خیلی زیاد است و با علامت ستون قرمز مطابق شکل ۱۶ تعیین می‌شود. می‌توان نتیجه گرفت که کنترل‌کننده فازی با گرفتن دو مقدار زاویه رول و سرعت زاویه‌ای آن، مقدار نیروی تصحیحی را به صورت خودکار و بدون دخالت راننده تعیین می‌کند. مطابق شکل ۱۷ که مقادیر قطعی نیروی تصحیحی با توجه به تغییرات زاویه و سرعت زاویه‌ای بر



شکل ۱۶- فرایند غیرفازی‌سازی قوانین در محیط FIS در نرم‌افزار MATLAB همراه با نمایش بحرانی مقادیر نیرو

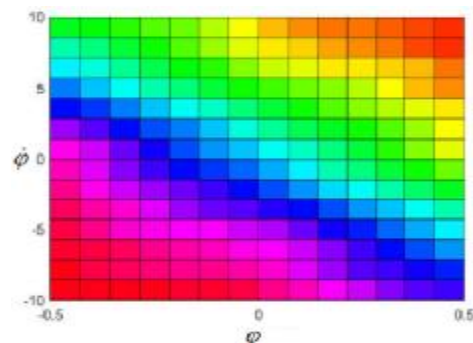


شکل ۱۷- مقادیر قطعی نیروی تصحیحی به دست آمده توسط کنترل کننده فازی

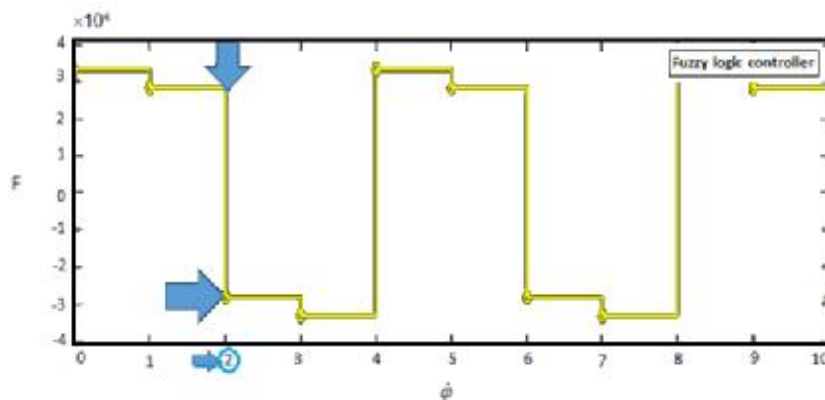


شکل ۱۸- نمایش تغییرات سطح پاسخ در برابر سرعت زاویه‌ای و زاویه رول

شکل ۲۰ منحنی تغییرات نیروی تصحیحی را نشان می‌دهد. محور افقی ϕ (سرعت زاویه‌ای) و محور عمودی F (نیروی تصحیحی) را نشان می‌دهند. تغییرات نیروی تصحیحی به صورت پله‌ای و قرینه به دست آمد، به طوری که برای هر مقدار ϕ (سرعت زاویه‌ای) دو مقدار F به صورت مثبت و منفی که با فلش‌هایی روی شکل ۲۰ نشان داده شده شامل می‌شود. می‌توان نتیجه گرفت وقتی سرعت زاویه‌ای با مقدار مثبت در جهت افزایش زاویه زیاد شود، مقدار نیرو به صورت منفی تعیین شده تا در جهت عکس تمایل به منحرف شدن تراکتور به آن نیرو وارد کند و اگر سرعت زاویه‌ای خلاف جهت زاویه رول در حال افزایش باشد مقدار نیرو به صورت مثبت تعیین می‌شود.



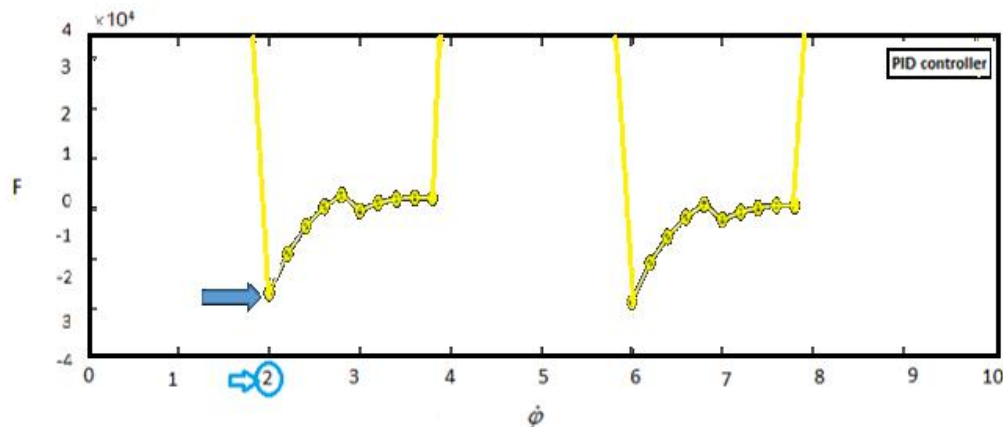
شکل ۱۹- نمایش دو بعدی تغییرات سطح پاسخ در صفحه افقی در برابر زاویه و سرعت زاویه‌ای مسیر حرکت توسط کنترل کننده فازی



شکل ۲۰- منحنی تعیین نیروی سطح پاسخ توسط کنترل کننده فازی

۲۱ مشخص است نیروی تصحیح شده‌ای را به جک هیدرولیک (مطابق شکل ۱۰) انتقال می‌دهد. نتایجی که در این تحقیق بدست آمد را باید در یک شرایط شبیه‌سازی شده به تراکتور شیب‌رو وارد کرد، زیرا در این پژوهش تنها نیروی لازم برای پایداری تراکتور توسط کنترل کننده‌ها تعیین می‌شود و عکس‌العمل این نیرو روی تراکتور در تحقیق‌های بعدی باید بررسی شود. در تحقیقی که توسط (Mashadi & Nasrolahi, 2009) انجام شد مقدار نیروی تعیین شده برای پایداری تراکتور روی شیب عرضی در یک فضای شبیه‌سازی شده به تراکتور اعمال شد و نمودارهای نیرو-زمان به دست آمد، اما در این تحقیق نمودارهای نیرو بر حسب سرعت زاویه‌ای و زاویه شیب حرکت بدست آمد و اگر بخواهیم نمودار نیرو-زمان را رسم کنیم باید در شرایط شبیه‌سازی شده نیرو را به تراکتور اعمال کرد.

شکل ۲۱ منحنی تغییرات نیروی تصحیحی که توسط کنترل کننده PID تعیین می‌شود را نشان می‌دهد، محور افقی ϕ و محور عمودی، F را شامل می‌شود. تغییرات به صورت سهموی به دست می‌آید. برای مقایسه دو نموداری که از کنترل کننده‌ها به دست آمد برای شکل ۲۰ نقطه‌ای با مقدار سرعت زاویه‌ای ۲ رادیان بر ثانیه که با روی شکل نشان داده شده و مقدار نیرو 3×10^4 نیوتن به دست آمده، در حالی که همین نقطه در شکل ۲۱ (که روی شکل نشان داده شده است) مقدار نیرو برای آن $3/5 \times 10^4$ نیوتن به دست آمده است. با مقایسه نقاط دیگر می‌توان نتیجه گرفت که مقدار نیروی به دست آمده توسط کنترل کننده فازی کمتر از کنترل کننده PID به دست آمده است؛ به علت اینکه کنترل کننده PID اتلاف نیرویی که توسط جک هیدرولیک و خطاهای موجود ایجاد می‌شود را در نظر می‌گیرد و با سرعت پاسخ‌دهی بالا همان گونه که در شکل



شکل ۲۱- منحنی تعیین نیروی سطح پاسخ توسط کنترل کننده PID

fatalities in the agricultural production sector using two national occupational fatality surveillance systems, 1990-1995. *Journal of agricultural safety and health*, 5(2): 155.

Hoy, R. M. (2009). Farm tractor rollover protection: Why simply getting rollover protective structures installed on all tractors is not sufficient.

Hunter, A. G. M., & Owen, G. M. (1983). Tractor overturning accidents on slopes. *Journal of Occupational Accidents*, 5(3): 195-210.

Kise, M., & Zhang, Q. (2006). Sensor-in-the-loop tractor stability control: Look-ahead attitude prediction and field tests. *Computers and electronics in agriculture*, 52(1-2): 107-118.

Liu, J., & Ayers, P. D. (1996). Technology for measuring tractor stability on-site. *ASAE paper*, 965034.

Liu, J., Ayers, P. D., & Vance, M. (1999, July). Off-road vehicle stability mapping integrating gps/gis and video technology. In *ASAE Annual International Meeting*, Tech. Rep.

Mashadi, B., & Nasrolahi, H. (2009). Automatic control of a modified tractor to work on steep side slopes. *Journal of Terramechanics*, 46(6): 299-311.

Mashadi, B., & Nasrolahi, H. (2008). Automatic control of a modified tractor to work on steep side slopes. *2nd Joint Congress on Fuzzy and Intelligent Systems* 28-30 October 2008. (In Persian).

Madani, A. (2019). *Active suspension system control using fuzzy reinforcement learning*. Master Thesis, Ferdowsi University of Mashhad. (In Persian).

Manring, N. D., & Fales, R. C. (2019). *Hydraulic control systems*. John Wiley & Sons.

Nise, N. S. (2020). *Control systems engineering*. John Wiley & Sons.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق طراحی یک کنترل‌کننده ترکیبی برای تعیین نیروی مورد نیاز برای پایداری تراکتور که با دو سرعت ثابت ۱۰ و ۱۵ کیلومتر بر ساعت روی شیب عرضی حرکت می‌کند ارائه گردید. کنترل‌کننده PID سبب افزایش سرعت پاسخ‌دهی سیستم انتقال نیرو به عملکرد سیستم هیدرولیک تراکتور شیب‌رو شد و مقدار خطا به مقدار زیادی کاهش و نزدیک به صفر به دست آمد، در صورتی که وضعیت‌های مختلف تراکتور در حرکت مثل دور زدن و چرخیدن تراکتور در حرکت روی شیب عرضی در نظر گرفته نشد و تنها حرکت با سرعت ثابت و در مسیر مستقیم بررسی گردید، بنابراین پیشنهاد می‌شود در این راستا تحقیقات بیشتری صورت بگیرد. همچنین ادامه این تحقیق روی تراکتور در شرایط واقعی و شبیه‌سازی شده اجرا شود.

منابع

- Bortoni-Anzures, L., Gómez-Meléndez, D., Herrera-Ruíz, G., & Martínez-Madrid, M. (2013). Fuzzy controller for automatic steering in heavy vehicle semi-trailers. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 14(1): 1-9.
- Chisholm, C. J. (1979). A mathematical model of tractor overturning and impact behaviour. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 24(4): 375-394.
- Delavarpour, N., Eshkabilov, S., Bon, T., Nowatzki, J., & Bajwa, S. (2020). The tractor-cart system controller with fuzzy logic rules. *Applied Sciences*, 10(15): 5223.
- Hard, D. L., Myers, J. R., Snyder, K. A., Casini, V. J., Morton, L. L., Cianfrocco, R., & Fields, J. (1999). Identifying work-related

Soylu, S., & Çarman, K. (2021). Fuzzy logic based automatic slip control system for agricultural tractors. *Journal of Terramechanics*, 95: 25-32.