

## طراحی یک کنترلر فازی و PID جهت تعیین نیروی لازم برای پایداری تراکتور در شیب‌های عرضی

افسانه سلیمانی<sup>۱\*</sup>، محمدحسین عباسپور فرد<sup>۲</sup>، عباس روحانی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد (a.soleimani98@mail.um.ac.ir)

۲. استاد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد (abaspour@um.ac.ir)

۳. دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد (arohani@um.ac.ir)

### چکیده:

حرکت تراکتور در شیب‌های عرضی یا جانبی سبب واژگونی و خسارت وارده به آن و در اکثر موارد سبب مرگ راننده می‌شود. در این مقاله به طراحی دو کنترلر پرداخته شده است که کنترلر اول یک کنترلر فازی و کنترلر دوم از نوع تناسبی انتگرالی مشتقی (PID) می‌باشد. توسط این دو کنترلر نیروی لازم برای پایداری و تعادل تراکتور در شیب‌های عرضی تعیین شده است و در محیط سیمولینک نرم‌افزار متلب عملکرد این دو کنترلر مورد بررسی قرار گرفت. در واقع کنترلر دوم (PID) به منظور کاهش خطا و بالا بردن سرعت عکس‌العمل سیستم به کار برده شد. به عبارتی استفاده ترکیبی از این دو کنترلر که یک سیستم کنترل ترکیبی را به وجود می‌آورد، به نحو موثرتری می‌تواند تعادل تراکتور را در راستای شیب عرضی حفظ کند و از واژگونی آن جلوگیری نماید. اطلاعات به دست آمده از این کنترلرها که به صورت تعیین نیروی لازم جهت پایداری تراکتور می‌باشند، به یک عملکرد هیدرولیکی داده می‌شود تا این نیرو توسط آن به بدنه تراکتور در هنگام شرایط واژگونی در شیب‌های عرضی وارد شود.

### کلمات کلیدی:

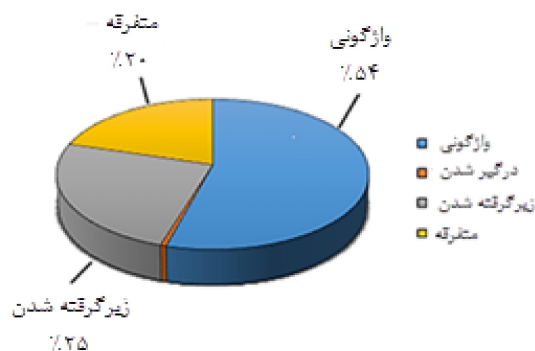
واژگونی جانبی، کنترلر فازی، شیب عرضی، کنترلر PID

\*نویسنده مسئول: آدرس a.soleimani98@mail.um.ac.ir

## طراحی یک کنترلر فازی و PID جهت تعیین نیروی لازم برای پایداری تراکتور در شیب‌های عرضی

### مقدمه

واژگونی جانبی تراکتور یکی از صدمات جدی است که در اثر حرکت آن روی شیب‌های تند عرضی اتفاق می‌افتد. تراکتورها در کشاورزی باعث ۳۲٪ مرگ‌ومیر هستند که بیش از ۵۰٪ آن مربوط به واژگونی می‌باشد. مطابق شکل ۱ که انواع خسارات ناشی از کار کردن با تراکتور را نشان می‌دهد، بیش از نیمی از خسارات ناشی از واژگونی تراکتور می‌باشد [2].



شکل ۱. انواع خسارات ایجاد شده در اثر کار کردن با تراکتور [2]

با توجه به اینکه تراکتور منبع تامین انرژی و توان منحصر بفرد برای فعالیت‌های مختلف کشاورزی است، بایستی بتوان در شرایط گوناگون و زمین‌های مختلف کشاورزی از آن استفاده کرد. بطوریکه کشاورز قادر به استفاده حداکثری از آن باشد. بطور کلی واژگونی<sup>۱</sup> تراکتور می‌تواند به دو صورت واژگونی جانبی<sup>۲</sup> و به سمت عقب<sup>۳</sup> باشد که ناشی از عوامل مختلفی است. یکی از این عوامل قرار گرفتن تراکتور روی شیب‌های عرضی می‌باشد. هنگامی که این شیب بیش از حد باشد و یا ناهمواری‌های روی آن شدید باشد، باعث واژگونی تراکتور می‌گردد [6].

در این زمینه تحقیقات و راهکارهایی ارائه شده که بیشتر در جهت حفظ جان راننده در هنگام واژگونی می‌باشد. استفاده از سیستم جلوگیری از واژگونی (ROPS<sup>۴</sup>) که یک سیستم محافظ در برابر واژگونی است به عنوان یکی از راه‌حل‌هایی بیان شده که با نصب روی تراکتور از برخورد مستقیم راننده به زمین هنگام واژگونی جلوگیری می‌شود. بنابراین روش اشاره شده مانعی برای جلوگیری از واژگونی

<sup>1</sup> Roll-over

<sup>2</sup> Side overturns

<sup>3</sup> Rear overturns

<sup>4</sup> Roll-over protective structures

تراکتور نمی‌باشد و تنها از جان راننده حفاظت می‌کند. در همین راستا تحقیقاتی ارائه گردیده که در آن معیاری برای سنجش میزان پایداری تراکتور تعریف شده و تست‌هایی نیز در این زمینه انجام گرفته است [3].

عمده‌ترین تحقیقات در زمینه واژگونی تراکتور در سال‌های اخیر توسط آیز<sup>۱</sup> و همکاران انجام شده است. این محققین معیاری را برای پایداری تراکتور تعریف کردند که بین صفر و ۱۰۰ می‌باشد. معیار پایداری ۱۰۰ نشان دهنده پایداری کامل تراکتور می‌باشد. 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 [6].

در تحقیقی دیگر استفاده از GPS<sup>۲</sup> و دوربین سه‌بعدی، استفاده شده است که بیشتر برای شناسایی مسیر حرکت تراکتور مورد استفاده قرار می‌گیرند. بطوریکه به راننده هشدار داده و او را از عبور مسیرهایی که احتمال واژگون شدن می‌رود، آگاه می‌سازد [7]. در تحقیق دیگری که توسط زوهانگ<sup>۳</sup> و همکاران [5] انجام شد، پایداری تراکتور با استفاده از یک شیب‌ساز بنام SIL<sup>۴</sup> مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد که توسط یک دوربین، تصویری سه‌بعدی از مسیر حرکت فراهم می‌کند. پس از آن اطلاعات این تصویر به یک نقشه سه‌بعدی تبدیل می‌شود. در این نقشه سه‌بعدی مسیری که تراکتور از روی آن خواهد گذشت را مشخص می‌کند. با استفاده از این نقشه زوایای رول<sup>۵</sup> و کله زنی<sup>۶</sup> تراکتور و سرعت‌های آن‌ها اندازه‌گیری می‌شود. با تخمین این پارامترها که از عوامل مهم سنجیدن میزان تمایل تراکتور به واژگونی می‌باشد، می‌توان وضعیت تعادلی تراکتور را پیش‌بینی نمود و با استفاده از آنها نسبت به واژگونی تراکتور هشدار داد. در تحقیق دیگری برای جلوگیری از واژگونی تراکتور در شیب‌های عرضی از یک تراکتور بهینه شده بعنوان معیار واژگونی استفاده شد. به طوریکه با کنترل آن میزان انتقال وزن عرضی به حداقل مقدار خود رسیده 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 می‌دهد. همچنین از یک کنترلر دو لایه که به یک جک هیدرولیک متصل است برای حرکت بدنه تراکتور در شیب عرضی استفاده شده است [8].

در شکل ۲ حالت‌های مختلف واژگونی جانبی تراکتور نشان داده شده است که هدف این تحقیق واژگونی در اثر حرکت روی شیب عرضی یعنی حالت الف می‌باشد.

<sup>1</sup> Paul D. Ayers

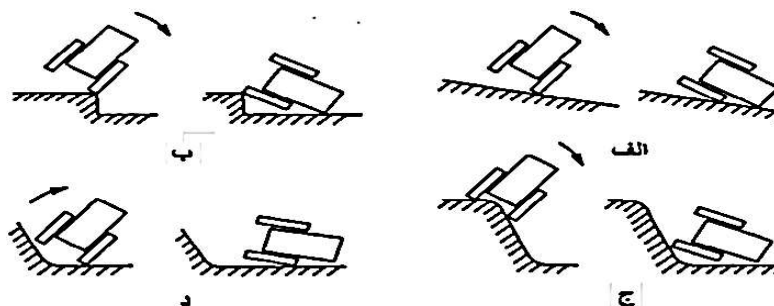
<sup>2</sup> Global Positioning System

<sup>3</sup> Q. Zhang

<sup>4</sup> Sensor-in-the Loop

<sup>5</sup> Roll Angle

<sup>6</sup> Pitch Angle

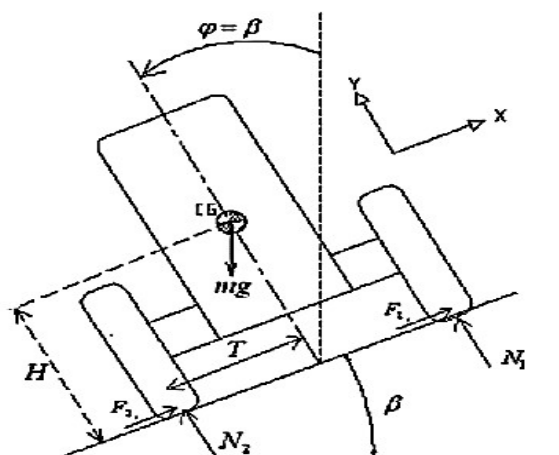


شکل ۲. حالات مختلف واژگونی تراکتور، الف) حرکت روی شیب عرضی ب) حالتی که چرخ‌های تراکتور روی یک لبه قرار می‌گیرد ج) حرکت روی یک لبه دهانه بزرگ یا لبه تپه و لبه ناهمواری‌ها د) حرکت روی یک دهانه بزرگ یا مانع بزرگ [1].

پایداری به سه صورت عرضی، طولی و چرخشی اتفاق می‌افتد. چون در این مقاله 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 زیر می‌باشد.

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

در معادله (۱)،  $\varphi$  زاویه رول تراکتور که مطابق شکل ۳ در وضعیتی که چرخ‌های آن از زمین جدا نشده است، برابر با شیب عرضی مسیر حرکت می‌باشد.  $\varphi_{cr}$  زاویه رول بحرانی است که بیشتر از آن، تراکتور واژگون می‌شود [6].



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

<sup>1</sup> Free body diagram (FBD)

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 رابطه زیر به دست می‌آید:

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

در معادله (۲)،  $\dot{\varphi}$  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 [4].

با توجه به معادلات (۱) و (۲) اگر بتوان زاویه رول و سرعت زاویه‌ای را در هر شیب عرضی و همچنین دست‌اندازها و ناهمواری‌ها محاسبه نمود، میتوان توسط یک کنترلر آنها را ارزیابی کرده و شرایطی که باعث واژگونی تراکتور در حین عبور از دست‌اندازها، شیب‌های عرضی و ناهمواری‌ها می‌شود را توسط یک کنترلر تشخیص داد. 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 می‌باشد، توسط کنترلرها تعیین کرد.

### هدف تحقیق

در این تحقیق، هدف به دست آوردن صحیح‌ترین مقدار نیرو و با کمترین خطا برای تعادل تراکتور در شیب‌های عرضی می‌باشد به این منظور از کنترلر PID به همراه کنترلر فازی استفاده شده است که این کار یک نوآوری می‌باشد چون تا به حال از کنترلر PID به همراه کنترلر فازی استفاده نشده است.

### مواد و روش‌ها

به طور کلی مراحل زیر را در مواد و روش‌ها انجام می‌دهیم:

۱. طراحی کنترلر فازی و تعیین قوانین فازی بر اساس پارامترهای مؤثر در پایداری روی شیب عرضی
۲. طراحی کنترلر PID بر اساس سیستم عملگر هیدرولیک تراکتور

### ۱. طراحی کنترلر فازی و تعیین قوانین فازی بر اساس پارامترهای مؤثر در پایداری روی شیب عرضی

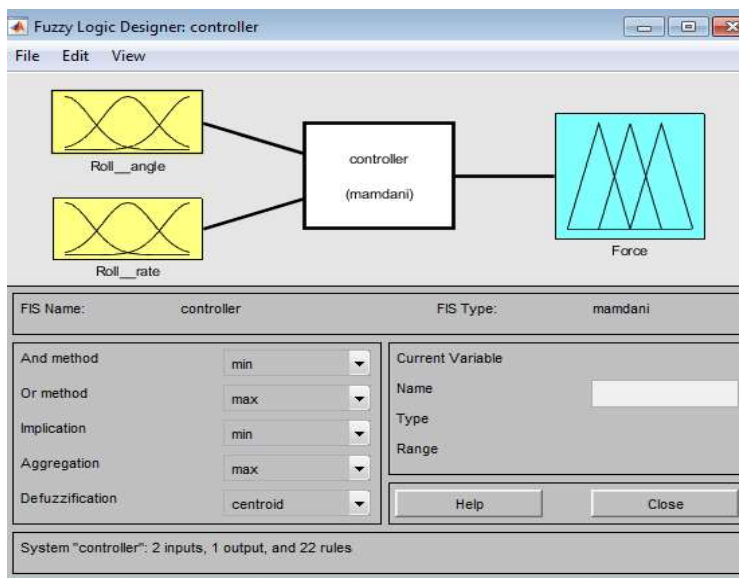
#### ساختار کنترلر فازی مطابق با منطق فازی:

استفاده از منطق فازی رویکردی مناسب است برای مواردی که داده کافی در دسترس نیست، جمع‌آوری داده مشکل یا داده‌ها به صورت متغیرهای زبانی و ذهنی می‌باشند. همچنین سیستم منطق فازی یک ابزار منحصر به فرد برای تصمیم‌گیری در شرایط عدم اطمینان است. اصل منطق فازی با اتکا بر این واقعیت که در برخی از مسائل، نیاز به مقدار صحیح یا دقیق از موضوع موردنظر نیست و می‌توان مسائل را با اطلاعات

موجود و مربوط به تجربه و دانش حل کرد بنا شده است. از تئوری احتمالات برای انتقال ورودی‌های قطعی به ورودی‌های فازی استفاده می‌شود. برای کنترل ورودی‌ها جهت ورود به سیستم استنتاج فازی، از مجموعه قوانین فازی استفاده می‌گردد. همچنین می‌توان مسائل را با پردازش قواعد پایه فازی حل کرد، خروجی‌های فازی هم با استفاده از الگوریتم‌های غیرفازی سازی به خروجی قطعی تبدیل می‌شود [8]. بنابراین برای کنترل تراکتور از یک سیستم کنترل فازی مطابق با قوانین و منطق فازی برای تشخیص شرایط واژگونی، عدم تعادل تراکتور و تعیین نیروی لازم برای پایدار نگه داشتن بدنه تراکتور استفاده شده است. کنترلر اول یک کنترلر فازی می‌باشد که دارای دو ورودی زاویه رول و مشتق آن و یک خروجی که نیروی مطلوب می‌باشد، است.

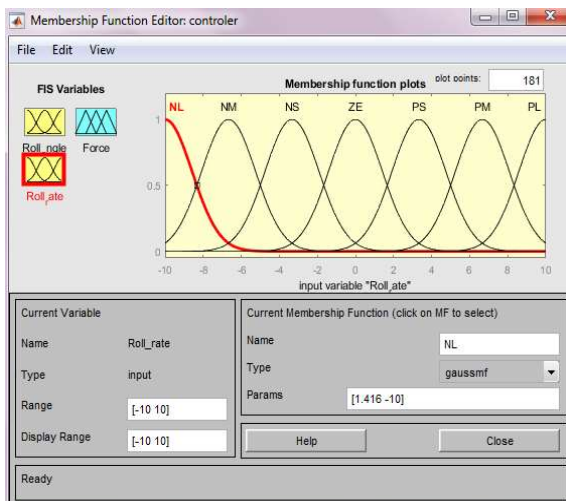
### طراحی کنترلر فازی:

کل فرایند طراحی با استفاده از جعبه ابزار فازی در نرم‌افزار MATLAB انجام شد در این طراحی، کنترلر مطابق شکل ۴ دو مقدار ورودی زاویه رول و سرعت زاویه‌ای رول دریافت می‌کند. در واقع دو تا ورودی برای آن در نظر گرفته شده است و در مرحله‌ی بعد یک سری قوانین و قواعد مطابق با قوانین و منطق فازی برای این دو مقدار دریافتی تعیین گردید. سپس نیروی واکنش یا عکس‌العملی بر اساس قواعد و قانون‌هایی که تعیین شده برای حفظ تعادل تراکتور برآورد می‌شود.

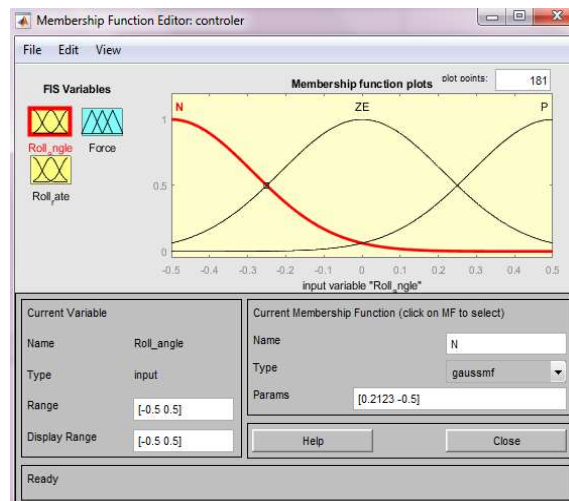


شکل ۴. نمایش کنترلر فازی با دو ورودی و یک خروجی طراحی شده

برای زاویه رول مطابق شکل ۵ حالت الف، سه تابع عضویت و برای سرعت زاویه‌ای، حالت ب، تعداد خیلی بیش‌تری تابع عضویت در نظر گرفته شده است که نشان می‌دهد حساسیت سیستم روی سرعت زاویه‌ای بیشتر از زاویه رول است.



ب



الف

شکل ۵. توابع عضویت فازی، الف) تابع عضویت مربوط به زاویه‌ی رول  $\varphi$  ب) تابع عضویت مربوط به سرعت زاویه‌ای رول  $\dot{\varphi}$

### قوانین فازی:

برای تعریف قوانین فازی بایستی نکات مهم در حرکت تراکتور در نظر گرفته شود. وقتی که مقدار زاویه رول زیاد در حال افزایش باشد، نیروی تعیین شده باید با ماکزیمم مقدار در جهت عکس تعیین شود. 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 می‌باشد. در وضعیتی دیگر ممکن است مقدار زاویه رول از هر دو سمت (مثبت و منفی) کم باشد و نزدیک به صفر، 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.

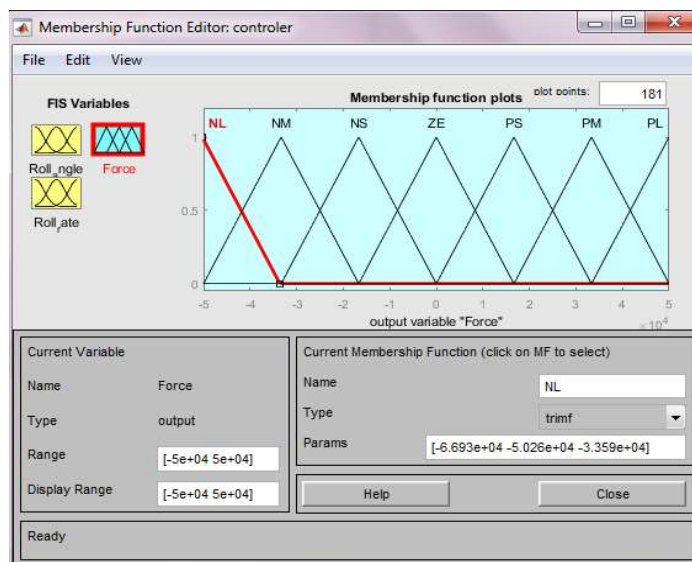
جدول ۱ قوانین فازی<sup>۱</sup> حاکم بر کنترلر فازی را نشان می‌دهد.

<sup>1</sup> Rule\_Base

جدول ۱: قوانین فازی حاکم بر کنترلر فازی

	Roll_rate	ZE	PS	NM	PM	NL	PL	NS
<b>Roll_angle</b>								
<b>P</b>		PL	PS	PL	PL	PL	NS	PL
<b>N</b>		ZE	NS	PM	PM	PL	NL	PS
<b>ZE</b>		NL	NS	ZE	ZE	PS	NL	NS

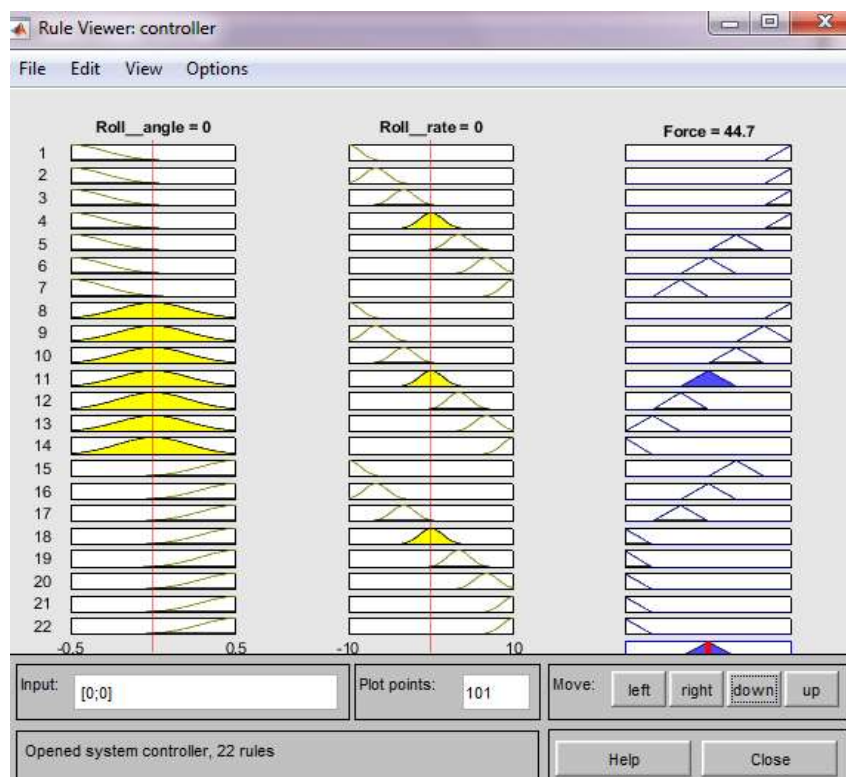
توابع عضویت مربوط به نیرو نیز مطابق شکل ۶ شامل نیروهای زیاد، متوسط، کم و صفر تعریف شده است. همچنین با توجه به تقارن سیستم حول زاویه رول صفر، تمام توابع عضویت مربوط به هر کدام از ورودی‌ها و خروجی کنترلر به صورت قرینه می‌باشند.



شکل ۶. تابع عضویت مربوط به نیروی خروجی

بعد از اتمام مرحله فازی سازی و تعریف قوانین فازی، مقادیر خروجی را از طریق فرایند غیرفازی سازی قوانین در محیط FIS مطابق شکل ۷ به مقادیر قطعی تبدیل می‌کنیم.





شکل ۲. فرایند غیرفازی سازی قوانین در محیط FIS در نرم افزار MATLAB.

## ۲. طراحی کنترلر PID بر اساس سیستم عملگر هیدرولیک تراکتور

### طراحی کنترلر<sup>۱</sup> PID

کنترل کننده PID یا تناسبی-انتگرالی-مشتقی، یک الگوریتم و روش کنترل حلقه بسته با بهره گیری از مفهوم فیدبک است. این سه ضریب پایه P، I و D در کنترلر به منظور دستیابی به مقدار بهینه می باشد که در بسیاری از فرایندهای صنعتی بیشترین کاربرد را برای کنترل سرعت، فشار، دما و ... دارند. از ویژگی های این کنترلر می توان به پایداری، کاهش زمان پاسخدهی، افزایش سرعت پاسخدهی، کنترل خطا و حذف خطای ماندگار اشاره کرد که به ترتیب وظیفه هر المان این کنترلر به شرح زیر است [10]:

۱. ضریب P (کنترل کننده تناسبی): با افزایش بهره کنترل کننده، پایداری نسبی سیستم را کاهش می دهد و در عوض از خطای دائمی آن کم می کند.

<sup>1</sup> Proportional, integral and derivative (PID)

۲. ضریب I (کنترل کننده انتگرالی): به منظور افزایش و بهبود پاسخ حالت دائمی استفاده می‌شود.
۳. ضریب D (کنترل کننده مشتقی): پایداری نسبی سیستم و سرعت پاسخ سیستم را بهبود و افزایش می‌دهد.

در شکل ۸ نحوه عملکرد عملگر هیدرولیک که نیروی مطلوب را دریافت می‌کند و در آن جابجایی شیر کنترل جهت (Xv) 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 بوجود آمدن اختلاف فشار در سیلندر هیدرولیک و به دنبال آن ایجاد نیرو می‌شود. دینامیک شیر شبیه یک سیستم مرتبه دوم، به صورت معادله ۳ می‌باشد [9].

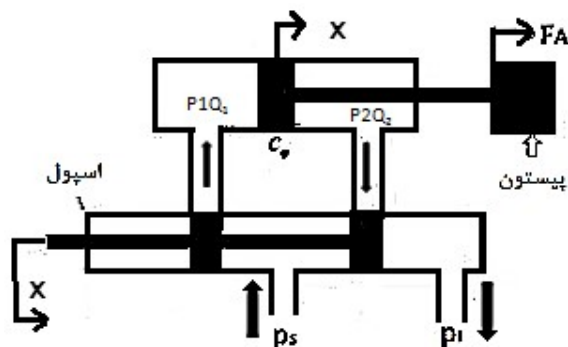
$$\tau \ddot{x}_a + \dot{x}_a = ka \quad (3)$$

رابطه تغییرات نیروی حاصله از جک هیدرولیک بر حسب جابجایی شیر کنترل جهت بصورت زیر می‌باشد [9]:

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

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

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



شکل ۸. سیلندر هیدرولیکی و شیر کنترل جهت

مقادیر پارامترهای بکار رفته در روابط همراه با مقادیر آن در جدول ۲ آمده است:

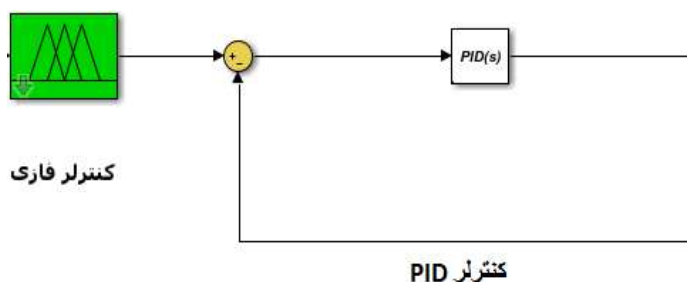
جدول ۲: مشخصات و پارامترهای بکار رفته برای عملگر هیدرولیکی

نام پارامتر	مشخصه پارامتر	مقدار پارامتر	واحد
مساحت پیستون	$A_p$	۰/۰۰۴۳	$M^2$
ضریب نشتی	$C_{im}$		
ضریب تخلیه	$C_d$	۰/۶۸	
عامل تبدیل ولتاژ به جابجایی شیر	$K$	$۱۰^{-۱۱} \times ۱/۴$	$m/v$
فشار پمپ	$P_s$	۲۰۶۸۵	$KN/m^2$
عرض دریچه شیر	$W$	۰/۰۰۹	$m$
ضریب هیدرولیک	$\alpha$	$۱۰^6 \times ۲/۲۶$	$N/m^5$
ثابت زمانی	$T$	۰/۰۰۱	$Sec^{-1}$

این کنترلر PID با توجه به معادلات (۳)، (۴) و (۵) طراحی شده است. کنترلر میزان خطا، که اختلاف نیروی مطلوب با نیروی خروجی از سیلندر هیدرولیک است را دریافت کرده و با کنترل ولتاژ شیر کنترل جهت، باعث تحریک آن می‌شود. این کنترلر با سه ضریب ثابت به صورت رابطه ۶ حاصل می‌گردد:

$$G_c(s) = 1.26 + \frac{0.65}{s} + 1.28s \quad (6)$$

این کنترلر در واقع پارامتر ورودی را می‌گیرد و خروجی خواسته شده را ایجاد می‌کند. در این مقاله یک کنترلر کننده PID به همراه کنترلر کننده فازی در محیط سیمولینک متلب<sup>۱</sup> مطابق شکل ۹ طراحی گردید.



شکل ۹. کنترلر PID طراحی شده

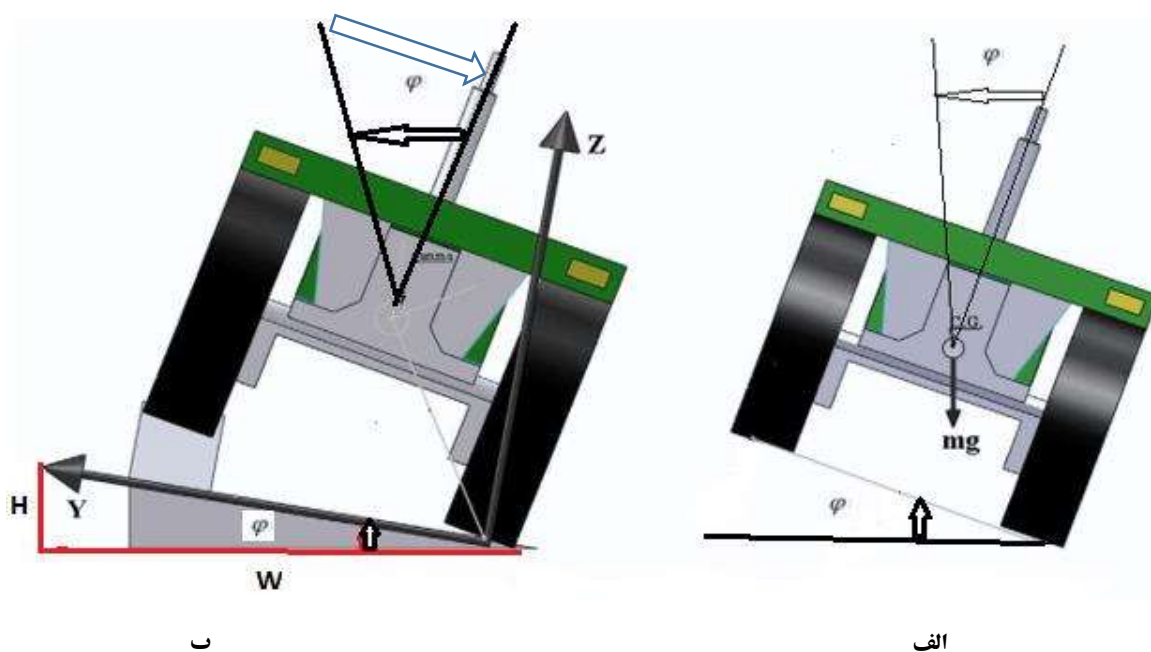
## نتایج

در شبیه‌سازی حرکت تراکتور، مطابق شکل ۱۰ حالت الف پس از آنکه تراکتور روی شیب عرضی  $0 < \varphi < 20$  و دست‌اندازی با ارتفاع ۰/۵ متر، عرض ۳ متر با سرعت ۱۰ (km/h) و ۱۵ (km/h) قرار می‌گیرد، زاویه رول آن برابر زاویه شیب عرضی است که نشان دهنده پایداری کامل آن می‌باشد. اما در ثانیه دوم وقتی چرخ‌های سمت بالای شیب عرضی از دست‌انداز اشاره شده که به‌عنوان اغتشاش سیستم تلقی می‌شود، گذشت، زاویه رول آن ناگهان افزایش یافته و چرخ‌ها از سطح زمین جدا می‌شود که نشان دهنده ناپایداری آن است، ولی دوباره به موقعیت اولیه خود و شیب مورد نظر بازگشته و پایدار می‌شود [8].

برای زوایای  $20 < \varphi < 30$  و دست‌اندازی با ارتفاع ۰/۳ متر، عرض ۳ متر با سرعت ۱۰ (km/h) و ۱۵ (km/h)، زمانی که یکی از چرخ‌های عقبی یا جلویی تماس خود را با سطح شیب‌دار از دست می‌دهد یا از سطح زمین جدا می‌شود و در ثانیه دوم که چرخ‌های سمت بالای شیب عرضی مطابق شکل ۱۰ حالت ب با سرعت مشخصی از دست‌اندازی سینوسی شکل به طول و ارتفاعی مشخص عبور می‌کند، این دست‌انداز

<sup>۱</sup> MATLAB-SIMULINK

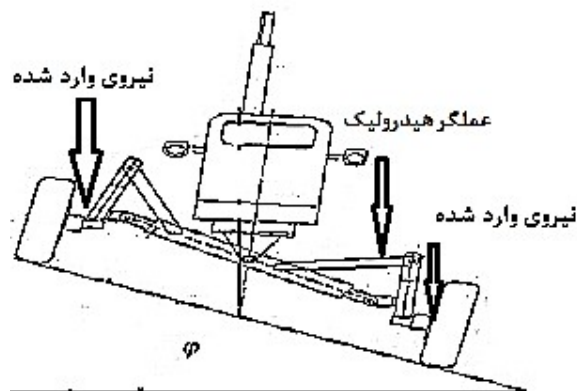
به‌عنوان اغتشاش وارده به سیستم می‌تواند شیب عرضی را به‌طور ناگهانی با سرعت زاویه‌ای بالایی افزایش داده و باعث ناپایداری تراکتور شود [8]. زاویه رول تراکتور، در هر دو سرعت حرکت پس از عبور از دست‌انداز افزایش یافته و در نهایت واژگون می‌شود.



شکل ۱۰. نمایش تراکتور در شیب عرضی، الف) تراکتور روی شیب عرضی در حالت پایدار ب) تراکتور روی شیب عرضی در حالت ناپایدار

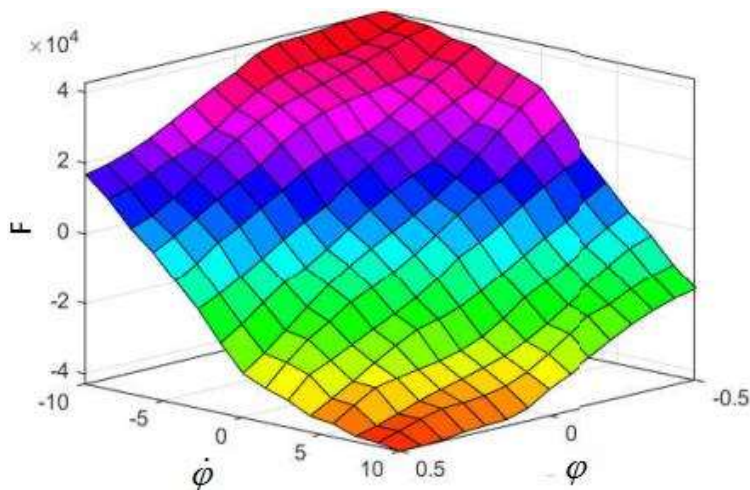
برای جلوگیری از این واژگونی در مناطقی با شیب عرضی از تراکتورهای شیب رو<sup>۱</sup> استفاده می‌کنند. مطابق شکل ۱۱ که تراکتور شیب رو را نشان می‌دهد، توسط جک هیدرولیک و عملگر هیدرولیک در هر شیبی چرخ‌ها در تماس با زمین قرار می‌گیرد. کنترلر فازی که ما در این مقاله طراحی کردیم با گرفتن زاویه و سرعت زاویه‌ای 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.

<sup>1</sup> Slope tractors



شکل ۱۱. نمایش تراکتور شیب رو

با توجه به شکل ۱۲ که نمایش تغییرات سطح پاسخ (نیروی عکس‌العملی) در برابر زاویه و سرعت زاویه‌ای مسیر حرکت، توسط کنترلر فازی نشان می‌دهد هرچه زاویه و سرعت زاویه‌ای بیشتر شود، مقدار نیروی عکس‌العملی افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به شکل مشخص است که تغییرات نیرو، همراه با تغییرات سرعت زاویه‌ای حساس تر است و در گوشه‌ها که رنگ نمودار قرمز و نارنجی است به عنوان نواحی بحرانی با بیشترین مقدار نیرو تعریف شده است که در این نواحی بیشترین احتمال ناپایداری تراکتور را داریم به همین دلیل مقدار نیرو در این نواحی به صورت بحرانی تعیین شده است.



شکل ۱۲. نمایش تغییرات سطح پاسخ در برابر زاویه و سرعت زاویه‌ای مسیر حرکت توسط کنترلر فازی

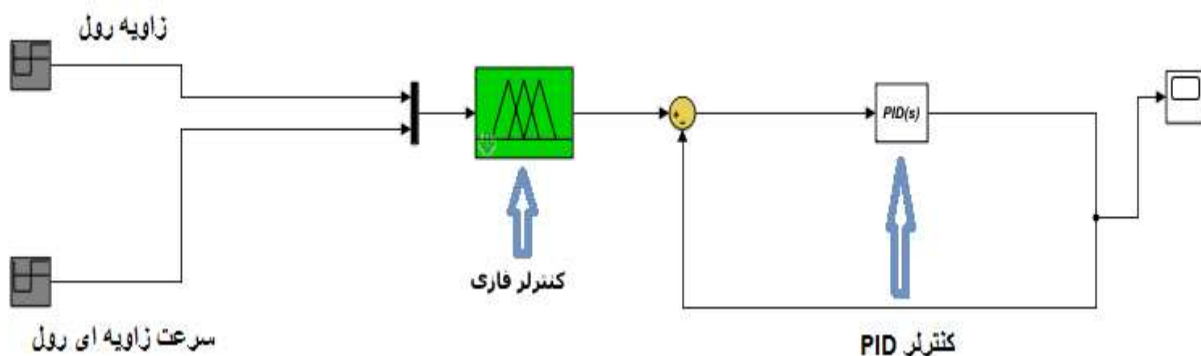
همچنین با توجه به شکل ۱۳ که تغییرات سطح پاسخ (منحنی ۱) از ۰ تا ۵۰۰۰۰ نیوتن را در برابر تغییرات سرعت زاویه‌ای (منحنی ۲) و زاویه رول (منحنی ۳) نشان می‌دهد، مشخص است که تغییرات سطح پاسخ که همان نیروی عکس‌العمل است به مقدار خیلی زیادی به تغییرات

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.



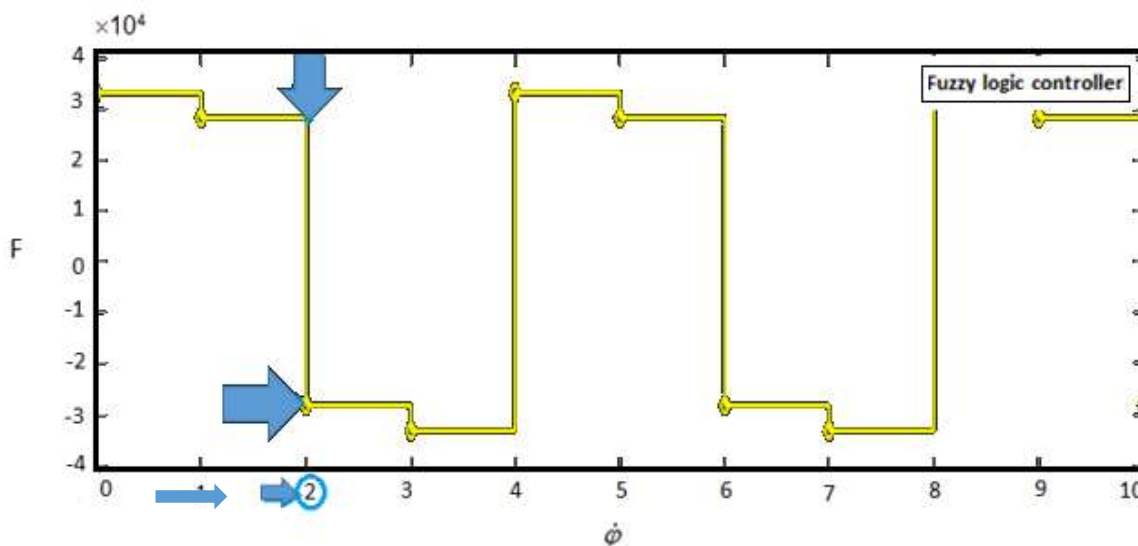
شکل ۱۳. نمایش تغییرات سطح پاسخ در برابر سرعت زاویه‌ای و زاویه رول

مطابق شکل ۱۴ کنترلر فازی دو مقدار زاویه رول و سرعت زاویه‌ای رول را دریافت می‌کند و براساس قوانینی که برای آن نوشته شده مقدار نیروی بهینه برای کنترل و تعادل تراکتور پیش‌بینی می‌شود. همچنین برای بهبود کارایی سیستم کنترل و پایداری در برابر اغتشاش وارده و همچنین سرعت پاسخ‌دهی بالا و کاهش خطا از کنترلر PID بعد از کنترلر فازی در محیط نرم‌افزار سیمولینک متلب استفاده شد. با این کار سرعت عکس‌العمل سیستم افزایش پیدا کرد و با در نظر گرفتن خطای قابل قبولی دستوری را که از کنترلر فازی می‌گیرد، دنبال و نیروی تصحیحی برای پایداری تراکتور در نظر می‌گیرد.



شکل ۱۴. شبیه‌سازی سیستم کنترل واژگونی تراکتور در محیط سیمولینک متلب

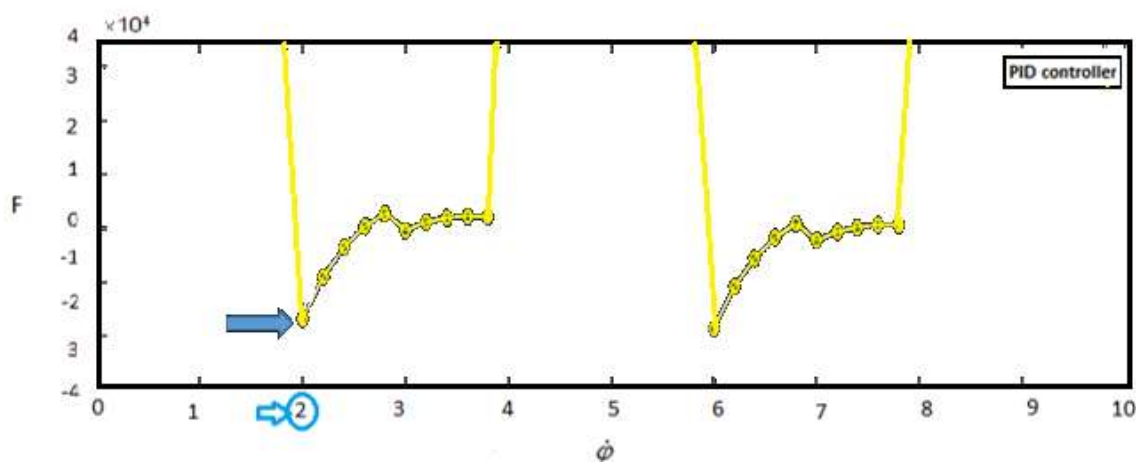
شکل ۱۵ منحنی تغییرات نیروی تصحیحی که توسط کنترلر فازی که در محیط سیمولینک متلب مطابق شکل ۱۴ شبیه‌سازی شد نشان می‌دهد. محور افقی سرعت زاویه‌ای و محور عمودی نیروی تصحیحی را شامل می‌شود. تغییرات نیروی تصحیحی به صورت پله‌ای و قرینه به دست آمد، به طوری که برای هر مقدار سرعت زاویه‌ای دو مقدار نیرو به صورت مثبت و منفی که با فلش‌هایی روی شکل ۱۵ نشان داده شده است، می‌توان نتیجه گرفت وقتی سرعت زاویه‌ای با مقدار مثبت در جهت افزایش زاویه زیاد شود مقدار نیرو به صورت منفی تعیین می‌شود و اگر سرعت زاویه‌ای خلاف جهت زاویه رول در حال افزایش باشد مقدار نیرو به صورت مثبت تعیین می‌شود.



شکل ۱۵. منحنی تعیین نیروی سطح پاسخ توسط کنترلر فازی

شکل ۱۶ منحنی تغییرات نیروی تصحیحی که توسط کنترلر PID تعیین می‌شود نشان می‌دهد، محور افقی سرعت زاویه‌ای و محور عمودی نیروی تصحیحی را شامل می‌شود. تغییرات به صورت سهموی به دست می‌آید. برای مقایسه دو نموداری که از کنترلرها به دست آمد برای شکل ۱۵ نقطه‌ای با مقدار سرعت زاویه‌ای ۲ (رادیان بر ثانیه) که با فلش روی شکل نشان داده شده و مقدار نیرو  $3 \times 10^4$  (نیوتن) به دست آمده در حالی که همین نقطه در شکل ۱۶ (که با فلش نشان داده شده است) مقدار نیرو برای آن  $3/5 \times 10^4$  (نیوتن) بدست آمده است با مقایسه نقاط دیگر می‌توان نتیجه گرفت که مقدار نیروی بدست آمده توسط کنترلر فازی کمتر از کنترلر PID به دست آمده است به علت اینکه کنترلر PID اتلاف نیرویی که توسط جک هیدرولیک و خطاهای موجود ایجاد می‌شود را در نظر می‌گیرد و با سرعت پاسخی بالا همان گونه که در شکل ۱۶ مشخص است نیروی تصحیح شده‌ای را به جک هیدرولیک (مطابق شکل ۱۱) انتقال می‌دهد.





شکل ۱۶. منحنی تعیین نیروی سطح پاسخ توسط کنترلر PID

### نتیجه گیری

در این تحقیق طراحی یک کنترلر و فیدبک برای تعیین نیروی مورد نیاز برای پایداری تراکتور که با دو سرعت ثابت ۱۰ و ۱۵ کیلومتر بر ساعت روی شیب عرضی حرکت می کند ارائه گردید. کنترلر PID سبب افزایش سرعت پاسخدهی سیستم انتقال نیرو به عملگر سیستم هیدرولیک تراکتور شیب رو شد و مقدار خطا به مقدار زیادی کاهش و نزدیک به صفر به دست آمد، در صورتی که وضعیت های 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 می شود در این راستا تحقیقات بیشتری صورت بگیرد.

## مراجع

1. Chisholm, C.J., 1979. A mathematical model of tractor overturning and impact behaviour. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 24(4), pp.375-394.
2. Hard, D.L., Myers, J.R., Snyder, K.A., Casini, V.J., Morton, L.L., Cianfrocco, R. and Fields, J., 1999. Identifying work-related fatalities in the agricultural production sector using two national occupational fatality surveillance systems, 1990-1995. *Journal of agricultural safety and health*, 5(2), p.155.
3. Hoy, R.M., 2009. Farm tractor rollover protection: Why simply getting rollover protective structures installed on all tractors is not sufficient.
4. Hunter, A.G.M. and Owen, G.M., 1983. Tractor overturning accidents on slopes. *Journal of Occupational Accidents*, 5(3), pp.195-210.
5. Kise, M. and 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), pp.107-118.
6. Liu, J. and Ayers, P.D., 1996. Technology for measuring tractor stability on-site. *ASAE paper*, 965034.
7. Liu, J., Ayers, P.D. and Vance, M., 1999, July. Off-road vehicle stability mapping integrating gps/gis and video technology. In *ASAE Annual International Meeting, Tech. Rep.*
8. Mashadi, B. and Nasrolahi, H., 2009. Automatic control of a modified tractor to work on steep side slopes. *Journal of Terramechanics*, 46(6), pp.299-311.
9. Manring, N.D. and Fales, R.C., 2019. *Hydraulic control systems*. John Wiley & Sons.
10. Nise, N.S., 2020. *Control systems engineering*. John Wiley and Sons.

## Design of a fuzzy and PID controller to determine the force required for tractor stability in side slopes

Afsaneh Soleimani<sup>\*1</sup>, Mohammad Hossein Abbaspour-Fard<sup>2</sup>, Abbas Rohani<sup>3</sup>

1. Master student of Biosystems Mechanics, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad
2. Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad
3. Associated Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

### Abstract

The movement of tractor on side or lateral slopes causes overturning and damage to it and in most cases causes the death of driver. In this paper, two controllers are designed as a hybrid unit, the first controller is a fuzzy controller and the second controller is a Proportional integral Derivative controller (PID). By these two controllers, the necessary force for the stability and balance of tractor in side slopes was determined and in Simulink MATLAB environment, the performance of these two controllers was investigated. The combination of these two controllers Which create a combinatory control system was able to maintain the balance of the tractor on the go on the side slope and prevent it from overturning. The information obtained from these controllers, which is in form of determining the force required for the stability of tractor, is given to a Hydraulic operator system to apply this force to the tractor body during overturning conditions on side slopes.

**Key words:** Lateral overturning, fuzzy controller, side slope, Controller (PID)

\*Corresponding author: E-mail: a.soleimani98@mail.um.ac.ir