

حفظ پایداری تراکتور بهینه شده روی شیبهای تند عرضی (۴۱۶)

بهروز مشهدی^۱، حنیف نصرالهی^۲

چکیده

نیمی از صدمات و خسارات وارده به تراکتور ناشی از واژگونی آن می باشد. تحقیقات و راهکارهای انجام شده در این زمینه بیشتر در جهت حفظ جان راننده در حین واژگونی و یا ایجاد سیستم های هشدار دهنده برای جلوگیری از عبور آن در مسیرهای ناهموار می باشد. در این مقاله برای افزایش کارایی تراکتور و جلوگیری از واژگونی آن در شیبهای عرضی از یک تراکتور بهینه شده استفاده شد، به طوریکه با کنترل آن میزان انتقال وزن عرضی تراکتور به حداقل مقدار خود رسیده و در دست اندازهای روی شیب عرضی که در آن تراکتور معمولی واژگون می شود، تراکتور کنترل شده تعادل خود را حفظ کرده و بدون واژگونی به مسیر خود ادامه می دهد.

کلیدواژه: تراکتور بهینه شده، شیب عرضی، انتقال وزن عرضی، زاویه رول

۱- استادیار، دانشگاه علم و صنعت، دانشکده خودرو، پست الکترونیک: b_mashhadi@iust.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت، دانشکده خودرو

مقدمه

هیچ ماشینی به خطرناکی تراکتور برای کشاورزان، شناخته شده نیست. چون این ماشین قادر است کارهای مختلفی انجام دهد و یک نوع ماشین همه کاره می باشد، ممکن است کاربر آن فراتر از محدوده ایمن از آن استفاده کند. همچنین تراکتورها معمولاً روی شیبهای تند و یا مسیره های ناهموار حرکت می کنند. عدم داشتن سیستم تعلیق نیز نقش بسزایی در ناپایداری تراکتور ایفا می کند، که به دلیل عدم تعادل عامل واژگونی می شود.

تراکتورها در این صنعت باعث ۳۲٪ مرگ و میر در کشاورزی هستند، که بیش از ۵۰٪ آن مربوط به واژگونی آن می باشد [۱]. مطابق تحقیقات انجام شده در دانشگاه جان هاپکینز^۱ از مرگ و میر مربوط به تراکتور بین سالهای ۱۹۷۵ تا ۱۹۸۱، ۴۵٪ یا ۱۱۶۳ نفر از ۲۵۶۶ نفر فوت شده، بدلیل واژگونی تراکتور بوده است. سازمان بین المللی ایمنی^۲ در آمار خود که در سال ۱۹۹۶ منتشر شد، نشان داد ۵۱٪ صدمات مربوط به تراکتور، بین سالهای ۱۹۸۵ تا ۱۹۹۵ مربوط به واژگونی آن بوده است.

در کل واژگونی تراکتور می تواند به دو صورت واژگونی جانبی و واژگونی بسمت عقب باشد. که ناشی از عوامل مختلفی می باشد. یکی از این عوامل فرارگرفتن تراکتور روی شیبهای عرضی می باشد که این شیب و یا ناهمواریهایی که روی آن قرار دارد، باعث واژگونی جانبی تراکتور می گردد. در این مقاله این نوع واژگونی مورد بررسی قرار گرفته است.

استفاده از ROPS^۳ به عنوان یکی از راه حل هایی می باشد که با نصب آن در تراکتور از صدمه دیدن راننده هنگام واژگونی جلوگیری به عمل می آید. ROPS، قفسه ای میله ای می باشد که به منظور ایجاد یک ناحیه ایمن برای راننده تراکتور، هنگام واژگونی آن، طراحی و روی تراکتورهای کشاورزی نصب می شود. با بکاربردن کمربند ایمنی همراه با ROPS از برخورد راننده تراکتور به زمین هنگام واژگون شدن آن جلوگیری می شود.

عمده ترین تحقیقات در زمینه واژگونی تراکتور در سالهای اخیر توسط آیزز^۴ و همکاران انجام شده است. برای اینکه بتوانند میزان پایداری تراکتور را در هر نوع زمین کشاورزی اندازه بگیرند و میزان نزدیکی تراکتور به واژگونی را حدت بزنند، معیاری را برای پایداری تراکتور تعریف کردند. این معیار بین صفر و ۱۰۰ می باشد. معیار پایداری ۱۰۰ نشان دهنده پایداری کامل تراکتور می باشد. برای مثال عبور تراکتور از مسیر کاملاً هموار با سرعت ثابت، و معیار پایداری صفر حاکی از تمایل آن به واژگونی می باشد [۲].

آیزز و همکاران در تحقیق دیگری اقدام به استفاده از معیار پایداری جهت حفظ پایداری تراکتور کردند. در این تحقیق یک نوع مدیریت ایمنی رانندگی با استفاده از سیستمهای موقعیت یاب انجام شد. وقتی تراکتور در حال حرکت می باشد، شاخص پایداری آن توسط سیستم MSTS^۵ و موقعیت آن توسط GPS^۶ اندازه گیری می شود. سپس نقشه پایداری تراکتور بصورت عکس و ویدئو توسط GIS^۷ و نرم افزار نقشه برداری تهیه می شود. بطوریکه برای هر نقطه ای از مسیر می توان شاخص پایداری تراکتور را تعیین نمود. این نقشه های پایداری می تواند به راننده تراکتور به منظور تعیین مسیر ایمن حرکت تراکتور و جلوگیری از واژگون شدن آن کمک کند [۳].

در تحقیق دیگری که توسط زوهانگ^۸ و همکاران در سال ۲۰۰۶ انجام شد، پایداری تراکتور با استفاده از سیستم تصویر سه بعدی از مسیر مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق با استفاده از یک شبیه ساز بنام SIL^۹، که بصورت یک دوربین می باشد، مسیر حرکت تراکتور شناسایی شده و اطلاعات را به یک نقشه سه بعدی تبدیل می کند. این نقشه سه بعدی، از مسیری است که تراکتور از روی آن خواهد گذشت. با استفاده از این نقشه زوایای رول^{۱۰} و کله زنی^{۱۱} تراکتور و سرعتهای آنها اندازه گیری می شود. این

3- Johns Hopkins

4- National Safety Council

5-Roll Over Protection Structure

4- Paul D. Ayers

5- Measuring System of Tractor Stability

6- Global Positioning System

7- Geographic Information System

8- Q. Zhang

9- Sensor-in-the Loop

10- Roll Angle

11- Pitch Angle

پارامترهای تخمین زده شده، عوامل مهم سنجیدن میزان تمایل تراکتور به واژگونی می باشد و بنابراین می توان با استفاده از آن نسبت به واژگونی تراکتور هشدار داد [۴].

ایده اصلی در این مقاله استفاده از تراکتور شیبرو بوده که کنترل آن خودکار می باشد، به طوریکه با استفاده از آن به عنوان یک تراکتور بهینه شده و جابجایی مرکز جرم آن، با توجه به شیب عرضی و ناهمواریهای موجود در مسیر، به نحوی که انتقال وزن عرضی برابر صفر باشد، از واژگونی عرضی تراکتور جلوگیری شد.

تراکتورهای شیبرو

این نوع تراکتور که نمونه ای از آن در شکل ۱ دیده می شود، به منظور درو و چیدن علف بر روی شیبهای عرضی بکار می رود. تراکتور از یک هیدرولیکی که توسط راننده آن، کنترل می شود، استفاده می کند. بدین طریق که با عمل کردن جکها با وجود آنکه چرخهای آن در تماس با سطح شیبدار هستند، تراکتور به سمت بالای شیب عرضی متمایل می شود. ابزار علف زنی که در زیر تراکتور قرار دارد همواره موازی سطح شیبدار و در تماس با آن می باشد. این تراکتور به دلیل اینکه مرکز جرم آن به سمت بالای سطح شیبدار متمایل شده بطوریکه بدنه آن همواره عمود بر سطح افق می باشد، دارای ایمنی بیشتر و همچنین راحتی بیشتر را برای راننده فراهم می کند [۵]. بنابراین می توان با استفاده از این نوع تراکتور به عنوان تراکتور بهینه شده اقدام به کنترل آن بطور خودکار و بدون دخالت راننده کرد، بطوریکه مانع واژگونی آن در هر شیب عرضی شد.

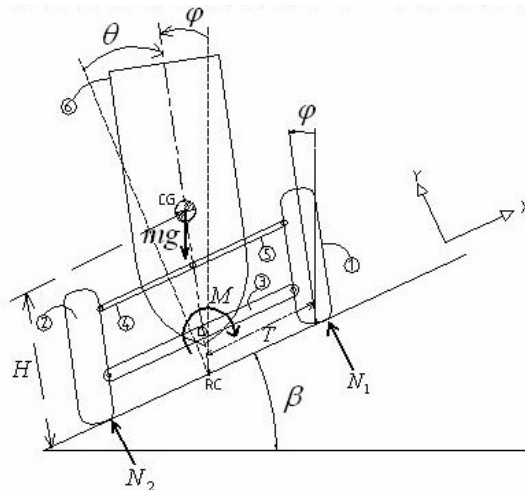
مدلسازی تراکتور بهینه شده روی شیب عرضی

از آنجاییکه در هنگام واژگونی پدیده انتقال وزن اتفاق می افتد، از آن غالباً برای شناسایی واژگونی استفاده می شود. در این قسمت اثر جابجایی مرکز جرم تراکتور بهینه شده (تراکتور شیبرو) بر انتقال وزن عرضی آن مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق شکل ۲، تراکتور بهینه شده روی یک شیب عرضی (β) قرار دارد. با اعمال گشتاور M از سمت محور اصلی به بدنه می توان بدنه تراکتور را به اندازه θ از موقعیت عمود بر محور اصلی منحرف کرد. مقدار انحراف تراکتور از موقعیت عمود بر راستای افق، زاویه رول تراکتور (φ) می باشد.

تراکتور بهینه شده مطابق شکل شامل اعضای اصلی ۱ و ۲ (بترتیب چرخهای سمت چپ و راست تراکتور)، عضو ۳ (محور اصلی)، عضوهای ۴ و ۵ (محورهای فرعی) و عضو ۶ (بدنه) می باشد. بدلیل موازی بودن اهرم بندی اتصال چرخ به بدنه، مرکز رول تراکتور بهینه شده از اتصال راستای بدنه با زمین بدست می آید که مطابق شکل ۲ بین دو نقطه تماس چرخ با زمین می باشد.



شکل ۱: تراکتور شیبرو



شکل ۲: تراکتور بهینه شده و نیروهای وارده بر آن

فرضیات:

- ۱- از طول تراکتور صرف نظر شده است.
- ۲- از حرکت عرضی چرخها صرف نظر شده است.
- ۳- اهرم بندی اتصال چرخ به بدنه بصورت موازی می باشد. بنابراین زاویه چرخش بدنه با چرخها یکسان می باشد.
- ۴- چرخها بصورت صلب در نظر گرفته شده اند.
- ۵- از جرمهای میله های ۴ و ۵ صرف نظر شده است.

همچنین با توجه به شکل ۲ رفتار زاویه رول تراکتور مطابق روابط زیر می باشد:

$$(۱) \quad \varphi = \beta - \theta$$

$$(۲) \quad \ddot{\varphi} = -\ddot{\theta}$$

در نهایت، پس از نوشتن معادلات تعادل دینامیکی برای هر کدام از اعضا، معادله کلی حرکت برای تراکتور بهینه شده بصورت زیر می باشد:

$$mgH \sin \varphi - M = (I_{b_0} + 2I_{t_0}) \ddot{\varphi} + m_a RL_1 \ddot{\varphi} \cos \theta \quad (۳)$$

که m جرم کلی تراکتور و H فاصله مرکز جرم آن تا سطح زمین باشد. m_a و L_1 ، بترتیب جرم محور اصلی و فاصله آن تا سطح زمین، I_{b_0} ممان اینرسی بدنه حول مرکز رول تراکتور، R و I_{t_0} نیز بترتیب شعاع چرخ و ممان اینرسی آن حول نقطه تماس با زمین هستند.

اختلاف دو نیروی وارده بر چرخهای تراکتور از سطح زمین یا همان انتقال وزن عرضی^۱، مطابق شکل ۲ روی شیب عرضی بصورت زیر می باشد:

$$(۴) \quad N_2 - N_1 = \frac{M}{T}$$

با توجه به این معادله می توان گفت با افزایش گشتاور وارده بر بدنه تراکتور بهینه شده از سمت محور اصلی، انتقال وزن عرضی افزایش می یابد.

با جایگذاری معادله (۳) در (۴)، داریم:

^۱- Lateral Load Transfer

$$(5) \quad N_2 - N_1 = \frac{mgH \sin \varphi - (I_{b_0} + 2I_{t_v}) \ddot{\varphi} - m_a RL_1 \ddot{\varphi} \cos \theta}{T}$$

از معادله (5) می توان نتیجه گرفت که با کاهش زاویه رول و چرخش تراکتور بسمت بالای شیب مقدار انتقال وزن عرضی کاهش یافته و به عبارت دیگر پتانسیل واژگونی عرضی تراکتور کاهش می یابد. در صورتیکه راستای تراکتور بصورت پایا در هر شیب عرضی عمود بر سطح افق بماند، یعنی:

$$(6) \quad \varphi = \dot{\varphi} = \ddot{\varphi} = 0$$

مطابق معادله (5) دو نیروی عمودی وارد بر چرخهای چپ و راست تراکتور برابرند:

$$(7) \quad N_2 = N_1$$

که حاکی از صفر شدن انتقال وزن عرضی و کاهش حداکثری احتمال واژگونی تراکتور می باشد. برای یک تراکتور معمولی که خاصیت جابجایی مرکز جرم برای آن وجود ندارد و راستای بدنه همواره عمود بر محور تراکتور می باشد:

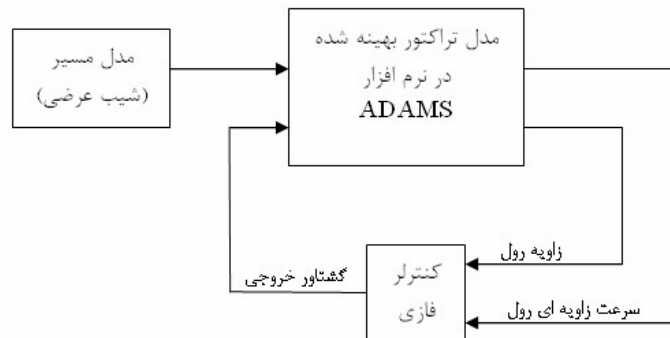
$$(8) \quad \beta = \varphi$$

با نوشتن معادلات تعادل مقدار انتقال وزن آن بصورت زیر می باشد:

$$(9) \quad N_2 - N_1 = \frac{mgH \sin \beta}{T}$$

روش کنترل سیستم

همانطور که گفته شد برای به صفر رساندن انتقال وزن عرضی تراکتور بایستی زاویه رول و سرعت آن برابر صفر باشد و یا به عبارتی دیگر تحت هر شرایطی و روی هر شیب عرضی، بدنه تراکتور همواره عمود بر سطح افق بماند. بنابراین هدف کنترل اعمال گشتاور مناسب از سمت محور عقب تراکتور به بدنه جهت به صفر رساندن این دو پارامتر می باشد. در این مقاله با استفاده از شبیه سازی تراکتور شیبرو و مسیر حرکت آن در نرم افزار ADAMS به عنوان ورودی مدل و مرتبط کردن آن به سیمولینک در MATLAB، اقدام به کنترل تراکتور شیبرو با استفاده از کنترلر فازی شد. ساختار کلی مدل کنترلی را می توان در شکل 3 مشاهده کرد.



شکل 3: ساختار کلی مدل کنترلی

کنترلر استفاده شده یک کنترلر فازی می باشد که به گونه ای طراحی شده که برای مثال اگر زاویه رول زیاد بوده و تغییرات آن نیز با سرعت زیادی در حال افزایش می باشد، با اعمال نیروی زیاد در جهت خلاف حرکت آن، مقدار دو پارامتر ورودی را کاهش می دهد. همچنین در ناحیه ای که زاویه رول نزدیک به صفر می باشد، بیشتر سعی شده است که سرعت زاویه ای کاهش پیدا کند.

جدول ۱ قوانین فازی^۱ حاکم بر کنترلر می باشد. دلیل تقسیمات بیشتر در تابع عضویت مربوط به سرعت زاویه رول تراکتور، حساسیت بیشتر آن در مقابل زاویه رول است.

جدول ۱: قوانین فازی حاکم بر کنترلر

	Roll Rate	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
Roll Angle								
N		PL	PL	PL	PL	PS	ZE	NS
ZE		PL	PM	PS	ZE	NS	NM	NL
P		PS	ZE	NS	NL	NS	NM	NL

شبیه سازی و نتایج

تراکتور شبیرو با توجه به مشخصات ابعادی آن در نرم افزار ADAMS شبیه سازی شد. همچنین خواص ارتجاعی و مکانیکی چرخهای جلو و عقب تراکتور نیز در نظر گرفته شده است. گشتاور M از سمت محور عقب تراکتور به بدنه وارد می شود. مشخصات این تراکتور در جدول ۲ آورده شده است. پروفیل مسیر حرکت تراکتور که بصورت مستقیم حرکت می کند، با استفاده از جابجایی چهار سطح مسطح که چرخهای تراکتور روی آن قرار گرفته، تعیین شده است.

بمنظور اتصال مدل شبیه سازی شده در ADAMS به مدل سیمولینک در MATLAB بایستی ورودیها و خروجیهای مدل تراکتور تعیین شود تا از آن بتوان به منظور کنترل استفاده کرد. این ورودیها شامل زاویه شیب عرضی مسیر، طول و ارتفاع دست انداز و همچنین سرعت حرکت تراکتور می باشد، که می توان مقادیر آنرا در سیمولینک تعیین کرد. گشتاور وارده که به بدنه تراکتور از سمت محور عقب وارد می شود، نیز به عنوان یکی از ورودیهای مدل می باشد که توسط کنترلر تعیین می گردد. خروجیها نیز زاویه رول تراکتور و سرعت زاویه ای آن است.

از طرفی تراکتور دیگری با همان مشخصات مانند تراکتورهای معمولی که راستای دو محور عقب و جلوی آن همواره عمود بر راستای بدنه می باشد، مدلسازی شده است (معادله (۸)). بطوریکه قابلیت تغییر زاویه رول برای آن وجود ندارد. این تراکتور به عنوان یک تراکتور کنترل نشده تعریف شده است. برای چندین پروفیل جاده تراکتور شبیه سازی شده مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج با تراکتور معمولی مقایسه شد.

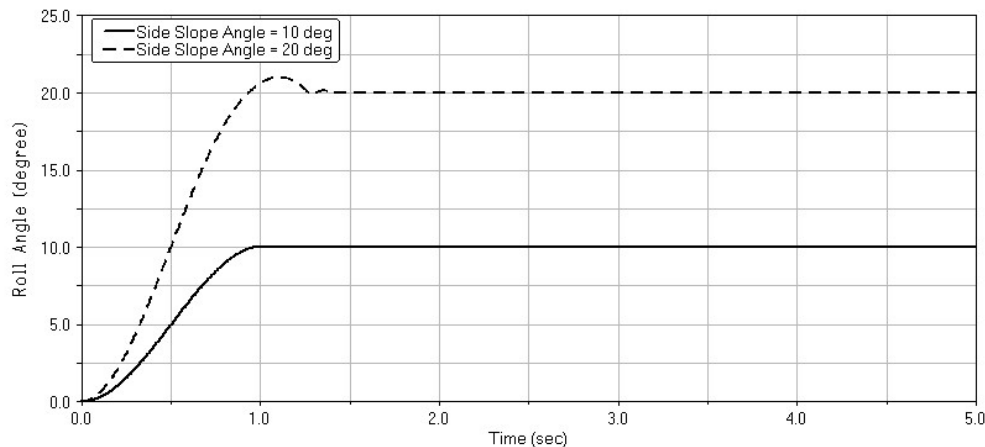
جدول ۲: مشخصات تراکتور شبیرو

نام پارامتر	مشخصه پارامتر	مقدار پارامتر	واحد
جرم تراکتور	M	2453	Kg
عرض تراکتور	T	978.5	mm
طول تراکتور	B	2286	mm
ارتفاع مرکز جرم	H	1380	mm
شعاع چرخهای عقب	R_r	565	mm
شعاع چرخهای جلو	R_f	384.5	mm
سختی چرخهای عقب	K_r	1.00E+06	N/m
سختی چرخهای جلو	K_f	1.50E+06	N/m
ضریب میرایی چرخهای عقب	C_r	9.00E+03	Ns/m
ضریب میرایی چرخهای جلو	C_f	7.00E+03	Ns/m

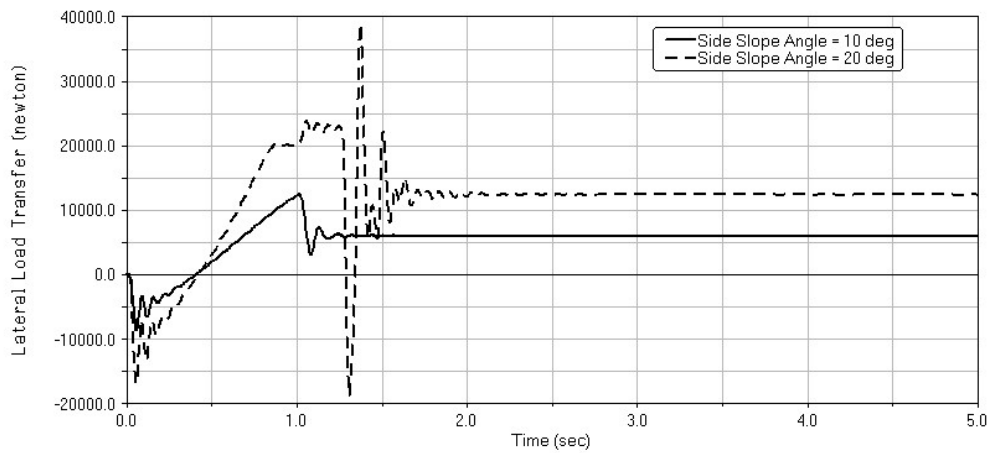
¹ - Rule Base

در اولین مانور دو تراکتور کنترل شده (بهینه شده) و کنترل نشده (معمولی) در مدت ۱ ثانیه از شیب عرضی صفر درجه به دو شیب مورد نظر که ۱۰ و ۲۰ درجه می باشد، می رسند. نتایج این مانور را می توان برای یک تراکتور معمولی در اشکال ۴ و ۵ مشاهده کرد. مطابق شکل ۴، زاویه رول این نوع تراکتور وقتی روی شیب عرضی ۱۰ درجه قرار می گیرد، همانطور که در معادله (۵) بیان شده، برابر زاویه شیب عرضی می باشد. اما در شیب عرضی ۲۰ درجه در زمان یک ثانیه، بدلیل بالا بودن سرعت زاویه ای رول تراکتور در هنگام تغییر شیب عرضی، چرخهای سمت بالای شیب از سطح زمین جدا می شوند. که باعث اختلاف جزئی بین زاویه شیب عرضی و زاویه رول تراکتور می شود. اما پس از مدت زمان کوتاهی دوباره تراکتور به وضعیت پایدار خود برگشته بطوریکه زاویه رول آن با شیب عرضی برابر می شود. در شکل ۵ می توان انتقال وزن عرضی را در دو شیب عرضی مشاهده کرد. این انتقال وزن، اختلاف مجموع نیروهای عمودی وارده از طرف زمین به دو چرخ جلو و عقب تراکتور در سمت بالای شیب با مجموع نیروهای وارده به دو چرخ عقب و جلو سمت پایین شیب می باشد. در حالت پایا انتقال وزن عرضی برای دو شیب عرضی مطابق معادله ۹ می باشد که مسلمان برای شیب عرضی ۲۰ درجه بیشتر از شیب عرضی ۱۰ درجه می باشد. بعد از ثانیه یکم برای شیب عرضی ۲۰ درجه یک تغییر زیاد و ناگهانی در انتقال وزن دیده می شود که ناشی از جدایی چرخهای بالای شیب از زمین به دلیلی که بیان شد، و برخورد دوباره آن به زمین برای برگشت به وضعیت پایدار می باشد.

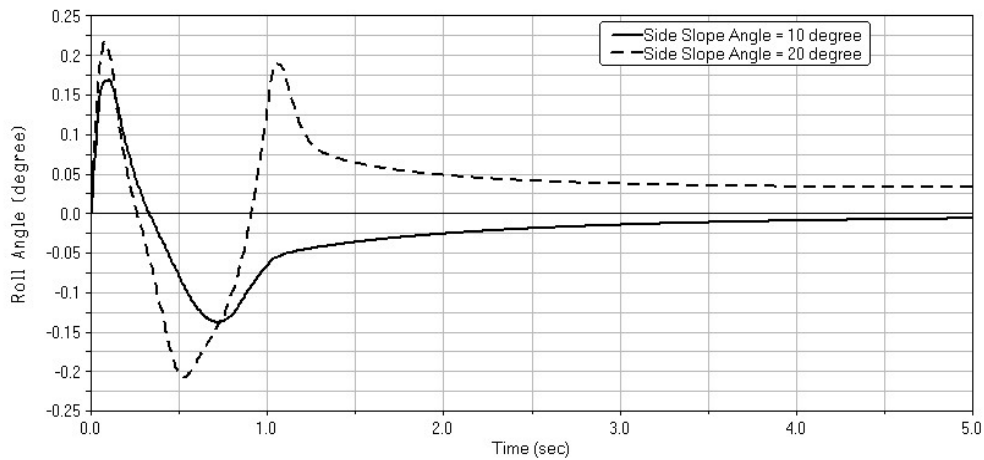
این مانور برای تراکتور کنترل شده نیز انجام شد. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می شود کنترلر توانسته زاویه رول تراکتور بهینه شده را برای هر دو شیب عرضی، نزدیک به صفر نگه دارد. بطوریکه سرعت زاویه ایی آن نیز در نهایت صفر می شود. که نتیجه آنرا می توان در انتقال وزن این نوع تراکتور که در شکل ۷ نشان داده شده است، دید. همانطور که مشاهده می شود مطابق معادله (۷) با به صفر رسیدن زاویه رول و تغییرات آن انتقال وزن عرضی تراکتور نیز به صفر نزدیک شده است. بطوریکه برای شیب عرضی ۱۰ درجه این مقدار برابر صفر و برای شیب عرضی ۲۰ درجه در حدود ۵۰۰ نیوتن است که مقدار کمی بوده و حاکی از کاهش حداکثری پتانسیل واژگونی تراکتور می باشد. این درحالیست که انتقال وزن عرضی برای تراکتور معمولی (کنترل نشده) مطابق شکل ۵ در حالت پایا برای شیب عرضی ۱۰ درجه در حدود ۵۰۰۰ نیوتن و برای شیب عرضی ۲۰ درجه در حدود ۱۳۰۰۰ نیوتن می باشد که بسیار زیادتر از تراکتور کنترل شده می باشد.



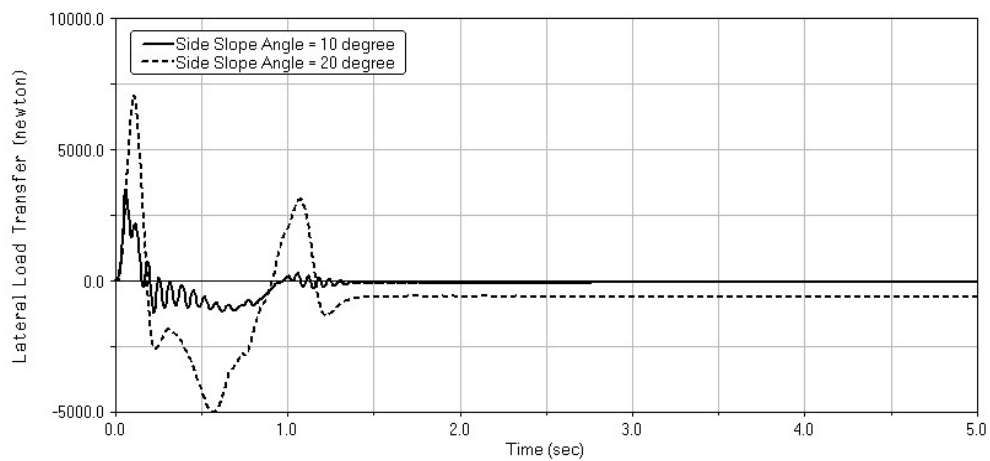
شکل ۴: تغییرات زاویه رول برای تراکتور کنترل نشده (معمولی) در اولین مانور



شکل ۵: تغییرات انتقال وزن عرضی برای تراکتور کنترل نشده (معمولی) در اولین مانور



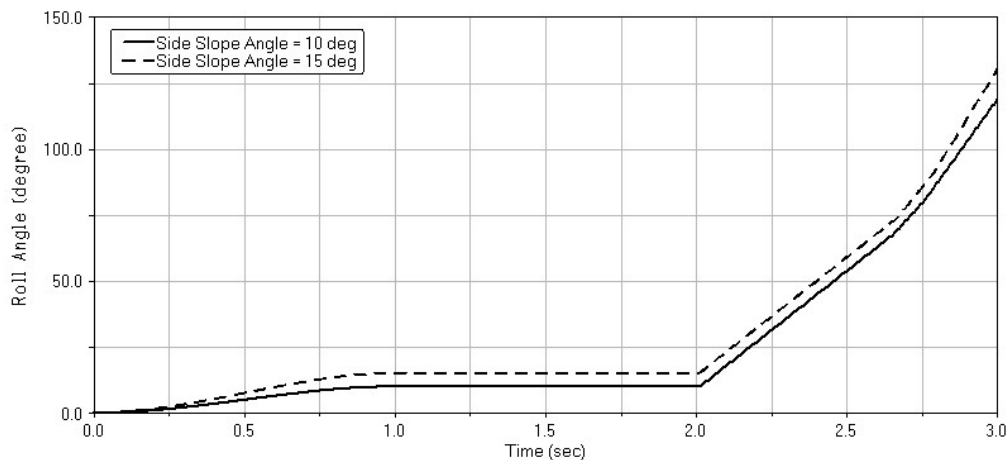
شکل ۶: تغییرات زاویه رول برای تراکتور کنترل شده (بهینه شده) در اولین مانور



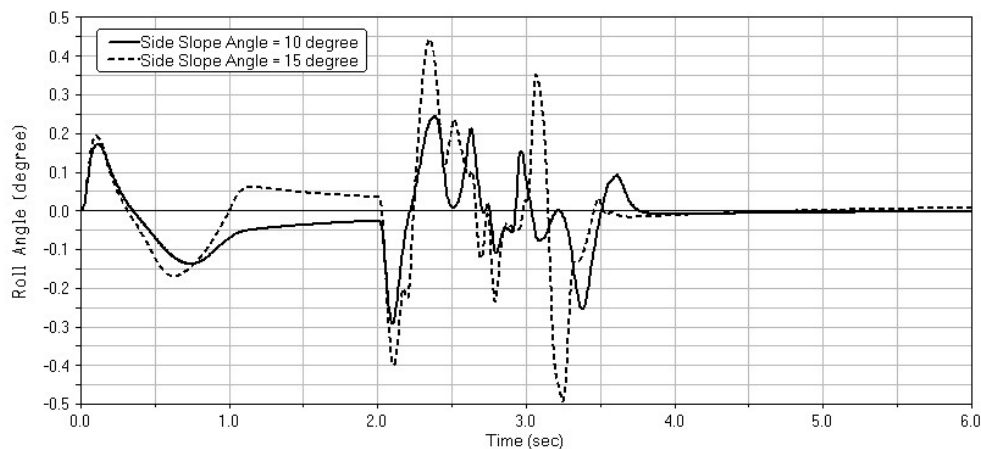
شکل ۷: تغییرات انتقال وزن عرضی برای تراکتور کنترل شده (بهینه شده) در اولین مانور

در مانور دوم، پس از آنکه دو تراکتور کنترل شده و کنترل نشده بعد از یک ثانیه روی شیب عرضی ۱۰ و ۱۵ درجه قرار گرفتند، در ثانیه دوم چرخهای بالای شیب با سرعت ۱۵ km/h از دست اندازی سینوسی شکل بطول ۳ متر و ارتفاع ۰.۵ متر عبور می کنند، این دست انداز به عنوان اغتشاش وارد به سیستم می تواند شیب عرضی را ناگهانی افزایش داده و باعث ناپایداری تراکتور شود. در شکل ۸ می توان تغییر زاویه رول تراکتور کنترل نشده یا معمولی را برای این نوع مانور مشاهده کرد. پس از آنکه تراکتور روی شیب عرضی قرار گرفت، در ثانیه دوم زاویه رول بطور ناگهانی در هر دو شیب عرضی افزایش می یابد. که نشان دهنده واژگونی تراکتور در اثر عبور از دست انداز مورد نظر می باشد.

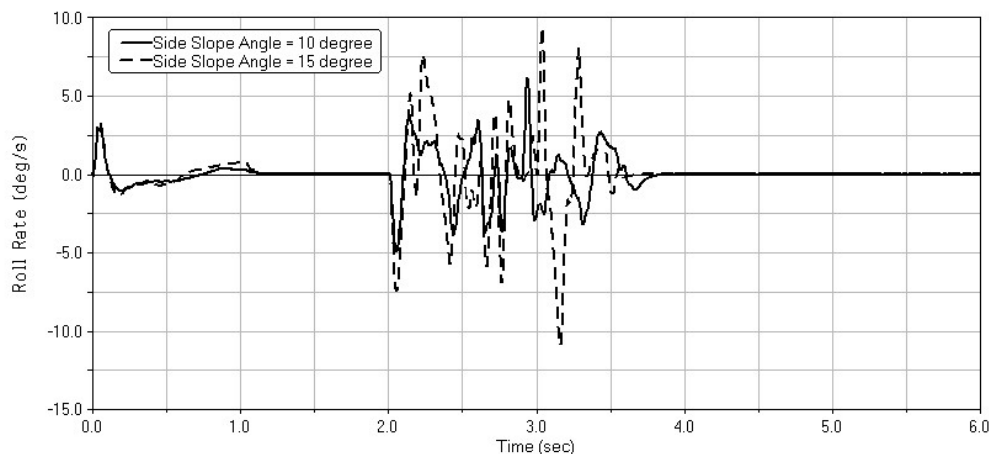
در دو شکل ۹ و ۱۰ تغییرات زاویه رول و سرعت زاویه ای آن در این مانور برای تراکتور کنترل شده، مشاهده می شود. همانطور که دیده می شود، با وجود دست انداز اشاره شده، تراکتور بهینه شده توانسته است توسط کنترلر فازی تعادل خود را حفظ کند، بطوریکه تغییرات زاویه رول در هر دو شیب عرضی بسیار ناچیز و حداکثر بین ۰.۵/ و -۰.۵/ درجه می باشد که این تغییرات جزئی نیز ناشی از عبور چرخهای بالای شیب از دست انداز می باشد و پس از ثانیه چهارم تراکتور در هر دو شیب عرضی کاملاً پایدار می شود، بطوریکه سرعت زاویه ای آن برابر صفر است. از طرف دیگر با توجه به دو شکل ۹ و ۱۰ می توان دید، در شیب عرضی ۱۵ درجه زاویه رول و سرعت زاویه ای آن در هنگام عبور از دست انداز کمی بیشتر از حالت شیب عرضی ۱۰ درجه می باشد. زیرا در شیب عرضی بالاتر تمایل تراکتور به ناپایداری بیشتر می باشد.



شکل ۸: تغییرات زاویه رول برای تراکتور کنترل نشده (معمولی) در دومین نور



شکل ۹: تغییرات زاویه رول برای تراکتور کنترل شده (بهینه شده) در دومین مانور



شکل ۱۰: تغییرات سرعت زاویه ای رول برای تراکتور کنترل شده (بهینه شده) در دومین مانور

نتیجه گیری و پیشنهادات

با استفاده از یک تراکتور بهینه شده که توانایی جابجایی مرکز جرم دارد، و با جابجایی بدنه تراکتور با اعمال گشتاور از طریق جکهای هیدرولیک می توان امکان حرکت تراکتور روی شیبهای عرضی را فراهم نمود. به کمک کنترلر فازی با اعمال فرمان در جهتی که در هر شیب عرضی، بدنه آن همواره عمود بر سطح افق بماند، از انتقال وزن عرضی جلوگیری شد. در مانوری دیگر که چرخهای سمت بالای شیب تراکتور از دست اندازی روی شیب عرضی عبور کرد، تراکتور معمولی قادر به عبور از دست انداز اشاره شده نبود و در نهایت واژگون شد. این در حالیست که با کنترل تراکتور بهینه شده که از لحاظ جرم و مشخصات ابعادی با تراکتور معمولی تفاوت نداشت، تعادل تراکتور در حین عبور از این دست انداز حفظ شد.

در این مقاله تراکتور با سرعت ثابت و مستقیم حرکت می کند. برای افزایش کارایی آن می توان به عنوان پیشنهاد پایداری آنرا نیز در هنگام پیچیدن حفظ کرد. این امر مستلزم مدل پیچیده تری برای چرخهای تراکتور می باشد، که در آن دینامیک عرضی نیز لحاظ شود.

مراجع

- 1- Hard, D.L. and Myers Snyder, J.R. 1999. Identifying work-related fatalities in the agricultural production sector using two national occupational fatality surveillance systems. *J. Agric. Safety Health*, 5 (2): 155–169
- 2- Liu, J. and Ayers, P.D. 1996. Technology for measuring tractor stability on-site. ASAE paper 965034
- 3- Liu, J. Ayers, P.D. and Vance, M. 1999. Off-Road Vehicle Stability Mapping Integrating GPS/GIS and Video Technology. An ASAE Meeting Presentation, pp 1–15
- 4- 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: 107–118
- 5- Hale, R. D. Lowrey, R. S. Denny, R. I. and Wedman, J. R. 1968. Slope mower vehicle. United States Patent 3402536