



Modeling of tractor dynamic behavior during maneuvering on compound slopes for identifying the onset of rollover

Mohammad Rasoul Shabani¹ | Ali Jafari² | Ali Hajiahmad³ |
Seyed Saeid Mohtasebi⁴

1. Department of Agricultural Machinery Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: mr.shabani.4@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Agricultural Machinery Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: jafarya@ut.ac.ir
3. Department of Agricultural Machinery Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: hajiahmad@ut.ac.ir
4. Department of Agricultural Machinery Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: mohtaseb@ut.ac.ir

Article Info	ABSTRACT	
Article type: Research Article	Tractors play a vital role in the agricultural industry, and due to their inherent characteristics and operational conditions, rollover accidents are a probable occurrence. Despite numerous studies aimed at preventing and reducing the consequences of rollover, statistics show that this accident leads to thousands of fatalities and injuries each year—a trend that continues to rise. This study modelled the tractor stability using both numerical and analytical methods, and the performance of these approaches in predicting lateral and longitudinal stability was compared. The numerical models were developed using the Response Surface Methodology, and both models were validated by comparing them to the experimental data obtained from a scaled-down tractor prototype. In addition, sensitivity analysis was conducted to determine the relative contribution of each variable. This study mathematically modelled the influence of lateral and longitudinal slope angles, center-of-gravity position, speed, acceleration, and turning radius on tractor stability. Results indicated that the squared sine of the lateral slope angle (coefficient of 0.24) most strongly governed lateral stability, while the squared sine of the longitudinal slope angle (0.21) was the principal factor affecting longitudinal stability. Despite the analytical model considering the interaction between lateral and longitudinal slopes, the numerical results indicated that the interaction was not statistically significant. The coefficients of determination (R^2) for lateral and longitudinal stability were 96.93% and 91.59% for the analytical model, 93.75% and 98.81% for the numerical model, and 65.31% and 81.16% for the advanced numerical model, respectively. The optimization framework integrated all relationships to evaluate overall stability.	
Article history:		
Received: Sep. 14, 2025		
Revised: Dec. 12, 2025		
Accepted: Dec. 22, 2025		
Published online: Winter 2026		
Keywords: <i>Mathematical Model, Response Surface Method (RSM), Rollover, Stability</i>		
Cite this article: Shabani, M. R., Jafari, A., Hajiahmad, A., Mohtasebi, S. S., (2025) Modeling of tractor dynamic behavior using two numerical and analytical methods during maneuvering on compound slope, <i>Iranian Journal of Biosystem Engineering</i> , 56 (4),47-69. https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.401891.665613		
© The Author(s). Publisher: The University of Tehran Press.		
DOI: https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.401891.665613		



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Tractors play a crucial role in modern agriculture, yet their inherent design poses significant rollover risks, causing thousands of fatalities annually. While Roll-Over Protective Structures (ROPS) remain a key safety measure, emerging technologies—such as active steering and momentum control—offer effective complements. Unlike most previous works emphasizing practical solutions, this study provides a theoretical and comparative analysis of prevention mechanisms. To reduce the high cost of physical testing, scaled-down prototypes and computer simulations were employed.

Methodology

This study enhances tractor safety through mathematical modelling of rollover dynamics using analytical and numerical approaches.

The numerical model applied Response Surface Methodology (RSM) in Design-Expert software to develop an optimized quadratic model, while the analytical model employed Newton's laws and D'Alembert's principle to describe forces under static and dynamic conditions.

A coordinate system consistent with the tractor geometry allowed direct sensor integration for parameter measurement. Key parameters reflected the goal of retrofitting older tractors with preventive systems.

Experimental Validation

A **scaled-down tractor prototype** was designed and fabricated with:

- Dual-axis tilt capability
- Adjustable centre-of-gravity
- High-precision sensors, including:
 - Four wheel load cells (0.1 N resolution)
 - A dual-axis inclinometer (0.1° resolution)

Model Evaluation & Development

Initial Validation

Model outputs were compared with prototype test data using R^2 coefficients.

Combined longitudinal and lateral stability metrics were analysed using the **desirability** function.

Advanced Model Synthesis

A **comprehensive numerical model** was developed to overcome prototype limitations by:

Incorporating analytical model data

Adding key dynamic parameters (acceleration, velocity, and turning radius) absent in the earliest numerical model

Sensitivity Analysis

Parameter significance was quantified to guide the design of preventive safety systems.

Theoretical Contribution

The finalized model provides a theoretical framework for developing next-generation rollover prevention systems.

Results

Tractor stability on compound slopes was analysed using analytical (Newton's law, D'Alembert's principle) and numerical RSM models based on 35 runs. Both showed strong concordance, with R^2 values of 93.75/98.81% (numerical) and 91.59/96.93% (analytical) for lateral and longitudinal stability.

The sensitivity analysis based on normalized RSM coefficients revealed that lateral stability was most affected by the squared lateral slope (0.206), followed by the CoG height (0.020). This indicates that slope steepness has nearly tenfold the effect of CoG height (0.206 vs 0.020). For longitudinal stability, the squared longitudinal slope (0.185) and slope–position coupling term (0.177) showed dominant contributions, both considerably exceeding the effect of the squared longitudinal CoG position (0.087) and CoG height (0.023).

Notably, the Advanced numerical model uncovered additional complexity in lateral stability behavior, with quadratic lateral CoG position emerging as a critical factor and slope-angle terms appearing in multiple interaction components. These findings fundamentally reorient rollover prevention strategies, emphasizing that while longitudinal stability depends overwhelmingly on CoG positioning, lateral stability requires balanced consideration of both geometric and operational parameters. The models' strong agreement (all $R^2 > 90\%$) despite differing methodologies underscores their reliability for safety system design.

Conclusions

This study developed analytical and numerical models to assess tractor rollover stability, achieving R^2 values of 96.93%/91.59% (analytical) and 93.75%/98.81% (numerical). Sensitivity analysis revealed that stability was most affected by $\sin^2$ (slope). An advanced model showed excellent theoretical fit (R^2 99.93%/99.17%) but reduced accuracy (R^2 65.31%/81.17%) when validated with prototype data, likely due to limited experimental parameter ranges. These findings provide a framework for stability system design, though real-world calibration is proposed to address observed deviations.

Author Contributions

M.R. Shabani: Conceptualization, Methodology, Investigation, Formal Analysis, Data Curation, Writing - Original Draft

A. Jafari: Supervision, Project Administration, Validation, Writing-Review & Editing

A. Hajiahmad: Resources (experimental apparatus), Methodology, Validation, Writing-Review & Editing

S.S. Mohtasebi: Writing-Review & Editing, General Advisory

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

This research was conducted as part of the approved project No. 8929743 by the Vice Presidency for Research and Technology, Faculty of Agriculture, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran. We sincerely appreciate their financial and scholarly support. Additionally, we would like to express our appreciation to the Department of Agricultural Machinery Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, for providing us with essential technical and workshop facilities.

Ethical considerations

This study did not involve human or animal subjects, experimental procedures, or sensitive data; consequently, ethical approval was deemed unnecessary. The authors upheld the standards of academic integrity throughout the conduct and reporting of this research

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

مدل سازی رفتار دینامیکی تراکتور حین مانور روی شیب های ترکیبی جهت شناسایی لحظه واژگونی

محمد رسول شعبانی^۱ | علی جعفری^۲ | علی حاجی احمد^۳ | سید سعید محتسبی^۴^۱. گروه مهندسی ماشین های کشاورزی، دانشکده های کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mr.shabani.4@ut.ac.ir^۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی ماشین های کشاورزی، دانشکده های کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.رایانامه: jafarya@ut.ac.ir^۳. گروه مهندسی ماشین های کشاورزی، دانشکده های کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: hajiahmad@ut.ac.ir^۴. گروه مهندسی ماشین های کشاورزی، دانشکده های کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه:mailto:mohhtaseb@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	تراکتورها در صنعت کشاورزی نقشی حیاتی دارند و باتوجه به خصوصیات ذاتی و شرایط عملیاتی، بروز سوانح ناشی از واژگونی آنها، محتمل است. باوجود پژوهش های متعدد در جهت پیش گیری و کاهش خسارات ناشی از واژگونی، طبق آمار، این گونه سوانح سالانه هزاران کشته و زخمی بر جای می گذارد و البته متأسفانه آمار سوانح مذکور همچنان روبه افزایش است. در این پژوهش به مدل سازی ریاضی پدیده واژگونی تراکتور از دو منظر عددی و تحلیلی و مقایسه عملکرد این روش ها در پیش بینی پایداری جانبی و طولی پرداخته شده است. مدل عددی با استفاده از روش سطح پاسخ توسعه داده شد و نتایج هر دو در مقایسه با داده های به دست آمده از یک مدل کوچک شده جایگزین تراکتور، اعتبارسنجی شدند. همچنین تحلیل حساسیت به منظور تعیین سهم نسبی هر متغیر انجام شد. در تحقیق حاضر، اثر زاویه جانبی و طولی، موقعیت گرانیگاه، سرعت، شتاب و شعاع دوران بر پایداری تراکتور به صورت مدل ریاضی استخراج شد. نتایج نشان داد مجذور سینوس زاویه جانبی با ضریب ۰/۲۴ بیشترین تأثیر را بر پایداری جانبی و مجذور سینوس زاویه طولی با ضریب ۰/۲۱ بیشترین تأثیر را بر پایداری طولی دارد. در مدل تحلیلی اثر متقابلی بین شیب های جانبی و طولی وجود دارد؛ ولیکن نتایج مدل عددی نشان داد که این اثر معنادار نیست. ضریب تعیین (R^2) مدل سازی پایداری جانبی و طولی به ترتیب در مدل تحلیلی ۹۶/۹۳ و ۹۱/۵۹، مدل عددی ۹۳/۷۵ و ۹۸/۸۱ و مدل عددی تکمیلی ۶۵/۳۱ و ۸۱/۱۶ درصد محاسبه شدند. در بخش بهینه سازی، اثر تمامی متغیرها جهت تشخیص پایداری کلی تراکتور تحلیل شد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۶/۲۳	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۹/۲۱	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱	
تاریخ انتشار: زمستان ۱۴۰۴	
واژه های کلیدی: پایداری، روش سطح پاسخ، مدل ریاضی، واژگونی.	

استناد: شعبانی؛ محمد رسول، جعفری؛ علی، حاجی احمد؛ علی، محتسبی؛ سید سعید، (۱۴۰۴) مدل سازی رفتار دینامیکی تراکتور حین مانور روی شیب های ترکیبی جهت شناسایی

لحظه واژگونی، مجله مهندسی بیوسیستم ایران/ ایران، ۵۶ (۴)، ۶۹-۴۷. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.401891.665613>

© نویسندگان.

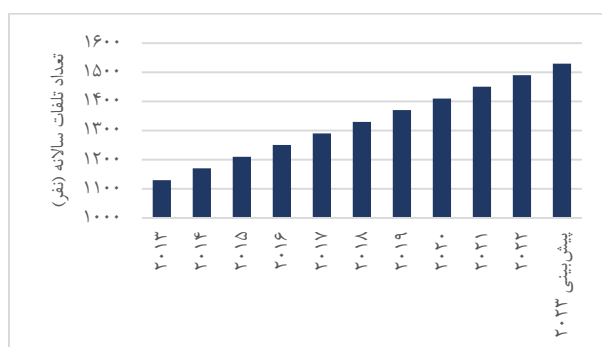
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.401891.665613>

مقدمه

ایمنی در کشاورزی، به‌ویژه در تراکتورها، از چالش‌های اساسی صنعت کشاورزی و طراحی ماشین‌ها به شمار می‌رود. واژگونی تراکتور یکی از مهم‌ترین عوامل خسارات جانی در کشاورزی است که ناشی از طراحی مرتفع و گرانیگاه بالای آن است و ناهمواری‌های راه نیز مزید بر علت شده و احتمال واژگونی را بالا می‌برد.

بررسی‌های مختلف در سراسر دنیا نشان می‌دهد که سالانه هزاران نفر جان خود را در اثر واژگونی تراکتور از دست می‌دهند که آمار جهانی آن در شکل ۱ قابل مشاهده است (Togaev & Shermukhamedov, 2023; Houshyar & Houshyar, 2018). از طرفی در میان سوانح منجر به جراحت، واژگونی تراکتور دومین جایگاه را به خود اختصاص داده است نمی‌شود (طریقی و همکاران، ۱۳۹۷). که البته باید توجه داشت که معمولاً در صورت عدم بروز خسارت جانی، گزارش رسمی‌ای از چنین وقایعی منتشر نمی‌شود (Franceschetti et al., 2019). در کشور ایالات متحده مهمترین عامل تلفات در حوزه کشاورزی واژگونی تراکتور شناخته شده است. علاوه بر این‌ها، آمارها در مناطق مختلف مانند ترکیه، پرتغال، اسپانیا، کره جنوبی، ایتالیا، ژاپن و... همه حاکی از آن است که واژگونی تراکتورها مهم‌ترین عامل تلفات و جراحات در کشاورزی است (Jang et al., 2022; Wang et al., 2024).



شکل ۱. آمار تلفات ناشی از واژگونی تراکتور در جهان به تفکیک سال (Togaev & Shermukhamedov, 2023)

به‌منظور جلوگیری از واژگونی وسایل نقلیه خارج از جاده و به طور خاص تراکتورها پژوهش‌های متعددی صورت گرفته است. یکی از راهکارها استفاده از دیفرانسیل با لغزش محدود الکترونیکی (eLSD)^۱ برای جلوگیری از انحراف از مسیر مستقیم در شیب‌های جانبی است که با ایجاد اختلاف توان بین چرخ‌ها باعث حرکت تراکتور در مسیر خود شده است (Zhang et al., 2025). این روش مشابه روش ترمز انتخابی^۲ است که در بسیاری از پژوهش‌های دیگر به‌کاررفته و در سامانه کنترل پایداری خودروهای امروزی نیز استفاده می‌شود (van Zanten et al., 1995). یکی دیگر از راهکارها فرمان‌دهی فعال است که با کنترل روی فرمان تراکتور در مواقع لزوم و کاهش کنترل مستقیم راننده، تراکتور را در مسیر خود پایدار نگه می‌دارد (Qin et al., 2019). این روش پیش‌ازین نیز به‌صورت پیشنهاد و دستورالعمل‌هایی برای فرمان‌دهی توسط خود راننده در مواقع بحران منتشر شده بود (Murphy, 2014). همچنین در پژوهشی از یک چرخ‌لنگر^۳ در جلوی تراکتور جهت حفظ تعادل با استفاده از اعمال تکان^۴ دورانی و ایجاد یک نیروی جانبی جهت حفظ تراکتور از واژگونی استفاده شده است (Qin et al., 2020). از دیگر روش‌های جلوگیری از واژگونی می‌توان به محافظ راپس^۵، راپس اتوماتیک (McKenzie et al., 2007)، نمایشگر و هشداردهنده شیب (Nichol et al., 2005) و وزنه جابه‌جاشونده (حیدری، ۱۳۹۹؛ Tarighi & Mohtasebi, 2021) اشاره کرد. در راهکارهای ارائه شده به‌منظور فعال‌سازی مکانیزم جلوگیری از واژگونی شاخص‌ها و آستانه‌هایی معرفی شده که به برخی از آنها به‌اختصار اشاره خواهد شد: در پژوهش کین^۶ و همکاران برای تشخیص سطح پایداری تراکتور از یک مدل استفاده شده است که نسبت

1. electronic Limited-Slip Differential
2. Selective brake
3. flywheel
4. momentum
5. ROPS (Rollover Protective Structure)
6. Qin

انرژی جنبشی به پتانسیل را در جهت گردش جانبی حول محور طولی می‌سجد. در صورتی که انرژی جنبشی از انرژی پتانسیل بیشتر شود به این معنا است که تراکتور در حال واژگونی است. برای به‌دست‌آوردن این مقادیر از حسگرهای شیب و شتاب زاویه‌ای استفاده شده است (Qin et al., 2019). در پژوهش ژانگ^۱ و همکاران، مقدار لغزش و انحراف زاویه‌ای تراکتور معیار پایداری قرار گرفته و برای به‌دست‌آوردن آن‌ها از حسگرهای سرعت روی هر چرخ و حسگر زاویه استفاده شده است (Zhang et al., 2025). طریقی و محتسبی در فرایند جلوگیری از واژگونی، زاویه‌ای که تراکتور مورد آزمایش به نقطه بی‌بازگشت^۲ (وضعیتی که دیگر هیچ‌گونه اقدامی نمی‌تواند وسیله را از واژگونی نجات دهد. یعنی تصویر گرانیگاه روی زمین از محدوده بین چرخ‌ها خارج شده و از نظر استاتیکی نیروی وزن تراکتور برای واژگونی آن کافی است) می‌رسد را به دست آورده (۲۸ درجه) و در نهایت نزدیک‌شدن به آن را معیار واژگونی قرار داده‌اند (Tarighi & Mohtasebi, 2021). همچنین حیدری با تشخیص شیب جانبی عملکردی را فعال کرده که وزنه‌های تعادل را به یک سمت وسیله منتقل می‌کردند (حیدری، ۱۳۹۹). هرچند واژگونی در شرایط بدون شیب هم ممکن است، اما در مطالعات انجام شده، زاویه زمین و سرعت در پیچ‌ها به‌عنوان دو عامل اساسی پایداری در نظر گرفته شده است که با احتمال واژگونی تراکتور رابطه مستقیم دارند (Togaev & Shermukhamedov, 2023). به همین منظور پژوهش‌هایی با استفاده از بینایی استریو، شبکه عصبی یا سایر روش‌ها، سعی در تخمین‌زدن شیب زمین در ادامه مسیر داشته‌اند تا با استفاده از آن بتوان از سانحه پیشگیری کرد (Shetty et al., 2022; Wang & Yuan, 2025).

در پژوهش‌های مختلف به روش‌های گوناگون از داده‌های شیب زمین برای جلوگیری از واژگونی استفاده شده است. برخی از آن‌ها زاویه را به‌عنوان یک شاخص بررسی کرده و مقدار آستانه آن را ثابت در نظر گرفته‌اند (Tarighi & Mohtasebi, 2021). از طرفی برخی از زاویه به‌عنوان یک عامل میانی استفاده کرده و تابعی از آن را به‌عنوان شاخص پایداری در نظر گرفته‌اند (Qin et al., 2019; Zhang et al., 2025). برخی نیز با استفاده از منطق فازی، کنترل‌کننده‌های تناسبی انتگرالی مشتقی^۳ سایر مدل‌های عددی یا ترکیبی از آن‌ها رابطه‌ای برای سنجش پایداری وسیله تعریف کرده‌اند (سلیمانی و همکاران، ۱۴۰۱; Wang et al., 2024).

برای ارزیابی مدل‌ها و آزمایش‌هایی که هزینه بالایی را به محقق تحمیل می‌کنند، در بسیاری از پژوهش‌ها، سامانه را روی یک وسیله مدل به‌عنوان جایگزین وسیله اصلی پیاده‌سازی کرده و آن را می‌آزمایند. به‌عنوان مثال روش فرمان‌دهی فعال و روش چرخ‌لنگر تکانه‌ساز که پیش‌ازین به آن‌ها اشاره شد، در سال ۲۰۲۱ توسط یک دستگاه مدل تراکتور کوچک شده ارزیابی شده‌اند (Li et al., 2013; Qin et al., 2021; Ribeiro et al., 2021). همچنین در برخی موارد ارزیابی و صحت‌سنجی سامانه‌ها با استفاده از شبیه‌سازی رایانه‌ای انجام گرفته است (Cavallo et al., 2014; Jang et al., 2022; Ochoa Lleras et al., 2017; Watanabe & Sakai, 2021).

علی‌رغم تمام تلاش‌های انجام‌شده در راستای شناخت و مدل‌سازی پدیده واژگونی این مقوله کماکان نیاز به واکاوی و تحقیق دارد. با بررسی پژوهش‌های پیشین مشاهده می‌شود که تمرکز آنها بیشتر به ارائه راهکار بوده و کمتر به رابطه‌ای برای تحلیل واژگونی پرداخته‌اند و هرکدام از روشی برای تعیین پایداری استفاده کرده‌اند؛ لذا پژوهش حاضر سعی داشته تا با دیدگاه تحلیلی و عددی، مسئله واژگونی تراکتور را بررسی کند و در پایان مدل کاملی برای تخمین وضعیت تراکتور ارائه دهد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش تراکتور به‌صورت جسمی صلب در نظر گرفته شده و محور جلو به‌صورت ثابت فرض شده است. همچنین از آنجاکه معمولاً حرکت تراکتور در سطوح شیب‌دار آهسته است و بررسی‌های این پژوهش صرفاً تا لحظه آستانه واژگونی ادامه دارد، مطابق اصل دالامبر، وضعیت به‌صورت نیمه استاتیک در نظر گرفته شده است که می‌تواند به‌عنوان مبنای تعیین آستانه واژگونی در نظر گرفته شود (Majdan et al., 2021; Wang et al., 2024). در این حالت شتاب و شتاب زاویه‌ای سامانه به‌عنوان ورودی در نظر گرفته شده که با معادل‌سازی، در روابط نیمه استاتیک قرار گرفته است. از آنجاکه معیار تصمیم‌گیری شرایط لحظه‌ای تراکتور است و در نهایت، مدل‌های به‌دست‌آمده می‌بایست توسط سامانه‌ای که روی تراکتورها نصب می‌شود مورد ارزیابی و تصمیم‌گیری قرار گیرند، لذا مختصات مرجع، منطبق بر تراکتور بوده و به‌صورت متحرک در نظر گرفته شد (Qin et al., 2019). همچنین از آنجاکه مدل برای تحلیل در لحظه بوده و قابلیت پیش‌بینی ندارد، می‌توان زمین و تایر را نیز صلب در نظر گرفت؛ اما باید توجه داشت که مقادیر به‌دست‌آمده می‌تواند تا ۱۵٪ از حالت واقعی انحراف داشته باشد (Majdan et al., 2021). با توجه به حرکت نسبتاً آهسته تراکتور، گشتاور ژيروسکوپی چرخ‌های جلو قابل چشم‌پوشی در نظر

1. Zhang

2. Point of no return

3. PID

گرفته شد. علاوه بر این‌ها، در مطالعه حاضر، برای ساده‌سازی روابط از اثر شرایط محیطی مانند باد، اثر نیروهای ناگهانی و تأثیر حرکت آزادانه سوخت و سایر سیالات بر پایداری چشم‌پوشی شده است.

باتوجه به این که واژگونی تراکتور خطرات و خسارات زیادی در پی دارد، به منظور صحت‌سنجی و همچنین استخراج مدل عددی، از یک مدل جایگزین تراکتور استفاده شد. این نمونه قابلیت سنجش نیروی عمودی (در سیستم مختصات تراکتور) روی هر چرخ را به وسیله چهار حسگر لودسل داشته و امکان جابه‌جایی مرکز جرم در آن تعبیه شده است. همچنین امکان ایجاد شیب در دو جهت برای این مدل فراهم شده که مقدار شیب ترکیبی (شیب در دو جهت طولی و جانبی) توسط یک حسگر شیب کالیبره شده مدل ZCT260AN سنجیده و مقدار آن توسط یک برد آردوینو مگا ۲۵۶۰ به همراه مقادیر نیروی روی چرخ‌ها پردازش می‌شود. دقت تفکیک حسگرهای نیرو و شیب به ترتیب ۰/۱ نیوتون و ۰/۱ درجه است. در سامانه الکترونیکی این امکان تعبیه شده تا اطلاعات جمع‌آوری شده علاوه بر ارسال به رایانه، امکان ذخیره در کارت حافظه و ارسال به تلفن همراه مجهز به بلوتوث را داشته باشد. تصویری از مدل جایگزین تراکتور در شکل ۲ و نقشه شماتیک ارتباطات الکترونیکی در شکل ۳ نشان داده شده است.

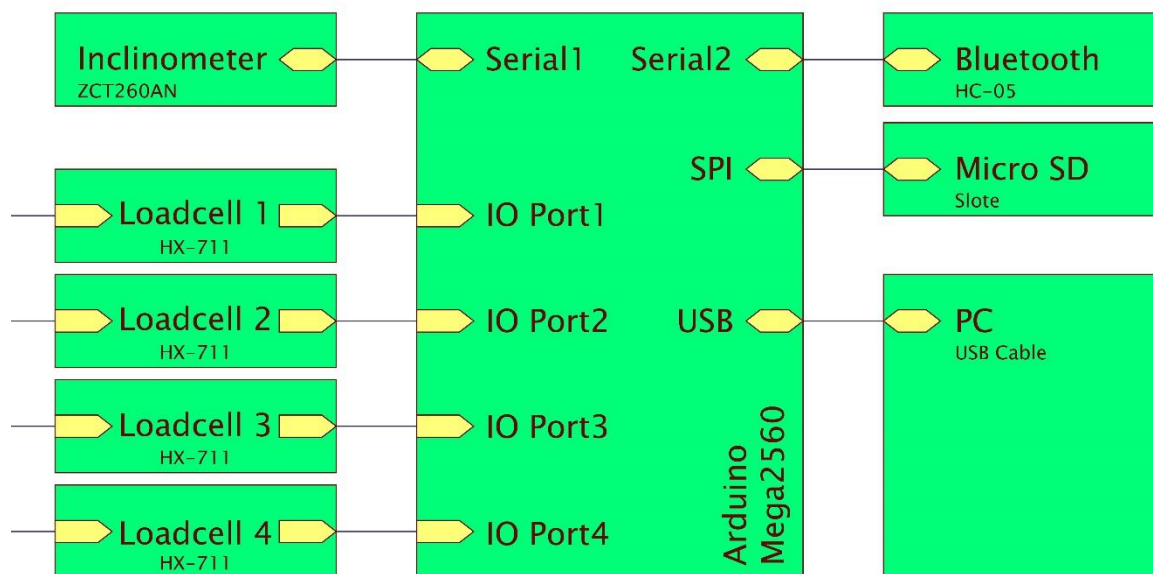


(ب)



(الف)

شکل ۲. مدل جایگزین تراکتور (الف) نمای عقب به همراه رایانه داده‌برداری و (ب) نمای جلو با دید بهتر از شیب‌های اعمال شده



شکل ۳. نقشه شماتیک بخش الکترونیکی

شاسی مدل فوق‌الذکر از ورق فیبر چوبی با تراکم متوسط (ام‌دی‌اف) به ضخامت ۱۶ میلی‌متر، بدنه از پلاستیک فشرده و وزنه تعادل جهت جابه‌جایی مرکز جرم از فولاد ساختمانی ساخته شد که مشخصات فیزیکی این مدل در جدول ۱ قابل مشاهده است.

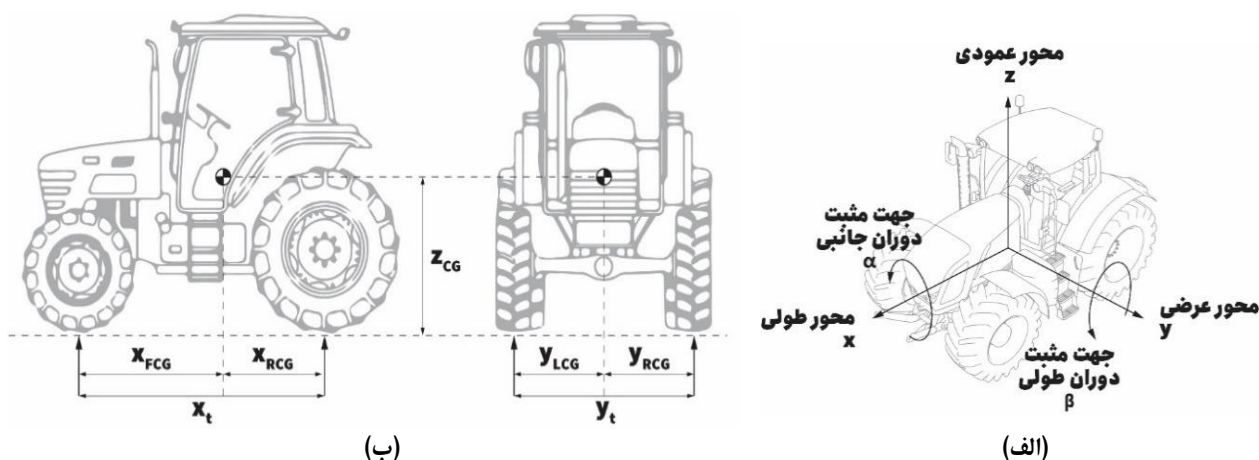
جدول ۱. مشخصات مدل جایگزین تراکتور

نام مشخصه	نماد	مقدار
وزن	W	۵۴۵ نیوتن
فاصله گرانیگاه از نقطه تماس چرخ چپ با زمین	y_{CG}	٪
فاصله گرانیگاه از محور عقب	x_{CG}	متغیر
فاصله عمودی گرانیگاه تا سطح شاسی (لودسل‌ها)	z_{CG}	متغیر
فاصله محور عقب و جلو	x_t	۰/۸ متر
فاصله چرخ راست و چپ	y_t	۰/۷ متر

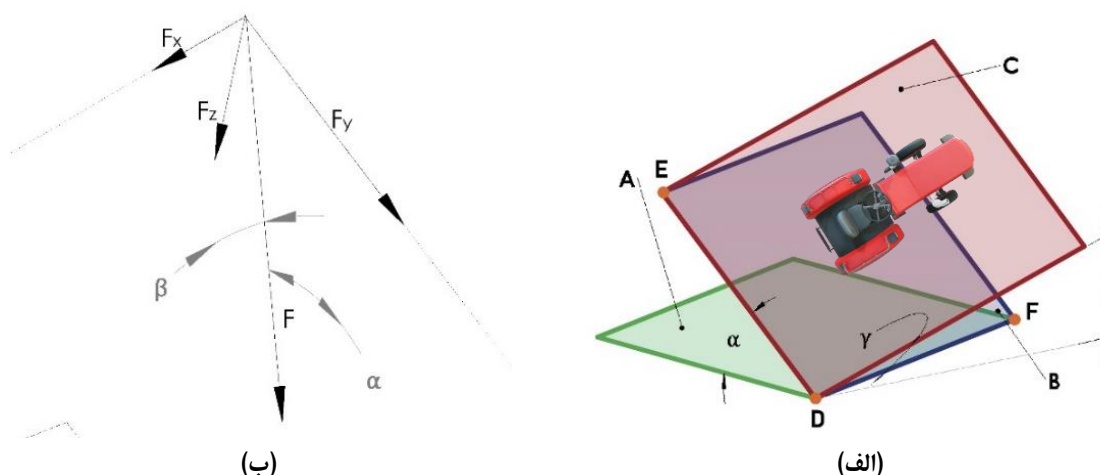
باتوجه به نتایج موردنظر مقاله، این مدل محدودیت‌هایی دارد از جمله: عدم توانایی جابه‌جایی عرضی گرانیگاه و عدم امکان ایجاد سرعت و شتاب روی مدل. از این رو بخش داده‌برداری این پژوهش به دو بخش تقسیم شده: بخش اول استفاده از مدل جایگزین تراکتور و صرف‌نظر از متغیرهای غیرقابل‌تغییر؛ بخش دوم شبیه‌سازی آزمایش با مدل تحلیلی و مقایسه نتایج با داده‌های شبیه‌سازی شده و داده‌های آزمایشگاهی. در بخش مدل عددی در این رابطه بیشتر بحث شده است.

مدل تحلیلی

تمام مدل‌سازی‌های تحلیلی در این پژوهش در یک هندسه مختصاتی از تراکتور صورت گرفته که در شکل ۴ الف مشاهده می‌شود. باتوجه به حرکت همه‌جانبه مختصات به همراه تراکتور، جهت و اندازه شیب‌ها با جهت و اندازه شیب در مختصات مرجع متفاوت بود. برای درک بهتر از زاویه‌ها، شکل ۵ طراحی شد که در آن مستطیل A (سبز) از اتصال نقاط انکای تراکتور روی یک زمین صاف حاصل شد. مستطیل B (آبی) همان مستطیل A است که حول لبه سمت راست (DF) به اندازه α دوران داشته و مستطیل C (قرمز) صفحه قرارگیری تراکتور است که از دوران مستطیل B حول لبه عقب (DE) به اندازه γ حاصل شده است و لبه طولی آن با زمین زاویه β را تشکیل داده است. از آنجا که حسگر شیب روی تراکتور نصب شده و محورهای آن با محور طولی و عرضی تراکتور منطبق است، زاویه‌ای که نشان می‌دهد همان زاویه α و β است. همچنین برای درک بهتر ابعاد مورد استفاده در روابط می‌توان به شکل ۴ ب مراجعه کرد که در آن موقعیت گرانیگاه نشان داده شده است.



شکل ۴. الف) دستگاه مختصات منطبق بر مرکز جرم وسیله ب) ابعاد تراکتور به صورت شماتیک



شکل ۵. الف) نحوه تحلیل شیبها و ب) نحوه تقسیم نیروها در شیب قسمت الف

در شکل ۵ قسمت ب، یک نیروی عمود بر سطح مرجع زمین (عمود بر صفحه A (سبز)) روی تراکتور فوق الذکر با نام F نشان داده شده است. اگر این نیرو وزن تراکتور در نظر گرفته شود باتوجه به قرار گرفتن تراکتور به عنوان مبنای مختصات، مؤلفه F_x ناشی از شیب طولی است که در حقیقت تراکتور را به سمت عقب می کشد، مؤلفه F_y ناشی از شیب عرضی است و تراکتور را به سمت راست کشیده و مؤلفه F_z پایدار کننده تراکتور روی زمین است و جهت آن عمود بر سطح حرکت (قرمز) نشان داده شده است؛ لذا برای به دست آوردن مؤلفه های سه گانه نیروها می بایست از رابطه ۱ تا رابطه ۳ استفاده کرد.

$$F_x = F \times \sin \beta \quad \text{رابطه ۱}$$

$$F_y = F \times \sin \alpha \quad \text{رابطه ۲}$$

$$F^2 = F_x^2 + F_y^2 + F_z^2 \Rightarrow F_z^2 = F^2 \times (1 - \sin^2 \alpha - \sin^2 \beta) \\ \Rightarrow F_z = F \times \sqrt{\cos^2 \alpha - \sin^2 \beta} \quad \text{رابطه ۳}$$

برای تشخیص پایداری در این پژوهش از نسبت توزیع نیرو روی چرخ ها استفاده شد که برای کاهش تعداد متغیرهای وابسته به صورت رابطه ۴ برای شاخص توزیع نیروی جانبی و رابطه ۵ برای شاخص توزیع نیروی طولی قابل بیان است:

$$I_{WDlat} = \left| \frac{N_{Left} - N_{Right}}{N_{Left} + N_{Right}} \right| \quad \text{رابطه ۴}$$

$$I_{WDlon} = \left| \frac{N_{Front} - N_{Rear}}{N_{Front} + N_{Rear}} \right| \quad \text{رابطه ۵}$$

اگر توزیع وزن به صورت متعادل باشد مقدار شاخص توزیع نیرو برابر صفر و در صورت ناپایداری مقدار مذکور به یک (یا در صورت در نظر گرفتن مقادیر منفی، به بیشتر از یک) افزایش پیدا خواهد کرد.

باتوجه به نیروهای عمود بر سطح، اصطکاک، شتاب گیری، ترمز و... همگی در راستای یکی از محورهای مختصات قرار دارند و تنها نیرویی که به مؤلفه های کوچکتر تقسیم می شود نیروی وزن است که با توجه به رابطه ۴ و رابطه ۵ قابل محاسبه است. باتوجه به روابط استاتیکی و دینامیکی حاکم بر مسئله، مدل سازی ریاضی انجام شده که با جای گذاری در رابطه توزیع نیرو، نتیجه به صورت رابطه ۶ و رابطه ۷ ساده شد.

$$I_{WDlat} = \left| \frac{2W_y \times z_{CG} + W_z \times (y_{LCG} - y_{RCG}) - 2 \times \frac{m \times v^2}{r} \times z_{CG}}{W_z \times y_t} \right| \quad \text{رابطه ۶}$$

$$I_{WDlon} = \left| \frac{2W_x \times z_{CG} + W_z \times (x_{FCG} - x_{RCG}) - 2 \times m \times a \times z_{CG}}{W_z \times x_t} \right| \quad \text{رابطه ۷}$$

مدل عددی

به منظور ایجاد یک مدل عددی، از نرم افزار دیزاین اکسپرت^۱ نسخه ۱۲ جهت تهیه طرح آزمایش و پس از آن برای تحلیل و ایجاد مدل عددی استفاده شد. در این نرم افزار یک مجموعه آزمایش بر مبنای طرح روش سطح پاسخ از نوع مرکب مرکزی^۲ طراحی و با استفاده از مدل جایگزین تراکتور اجرا شد. از آن جهت از طرح مرکب مرکزی استفاده شده که به عنوان یکی از روش های سطح پاسخ، کمک می کند تا با انجام تعداد محدودی آزمایش، بتوان تأثیر عوامل متعدد و همچنین تأثیر ترکیب آن ها را بر پاسخ نهایی بررسی کرد. این طرح شامل متغیرهای زاویه طولی و جانبی و موقعیت طولی و ارتفاعی گرانیگاه هر کدام در پنج سطح به عنوان متغیر مستقل یا ورودی و شاخص توزیع نیروی جانبی و طولی به عنوان متغیر وابسته یا خروجی بود.

به منظور اعتبارسنجی مدل ها، انطباق مدل های عددی و تحلیلی با استفاده از شاخص ضریب تعیین^۳ ارزیابی شد. مطابق منبع (Dowdy et al., 2011) این شاخص با استفاده از معادلات رابطه ۸ تا رابطه ۱۰ قابل محاسبه است.

$$e_i = x_i - f_i \quad \text{رابطه ۸}$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_i x_i}{n} \quad \text{رابطه ۹}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (e_i)^2}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

پس از بررسی نتایج و باتوجه به انطباق مدل تحلیلی بر داده ها و همچنین عدم امکان ایجاد شرایطی معادل شرایط حقیقی برای داده برداری در شرایط خارج از محدوده مدل جایگزین تراکتور، برای ایجاد یک مدل عددی دقیق تر و با طیف گسترده تری از متغیرهای دخیل در مسئله (همانند شتاب و سرعت)، آزمایش جامعی طراحی شد و نتایج آن با استفاده از مدل تحلیلی جای گذاری شد. در نهایت داده ها به نرم افزار دیزاین اکسپرت منتقل شده و مدل عددی منطبق بر مدل تحلیلی به دست آمد که در آن بتوان تحلیل های جامع تری بر ابعاد پدیده داشت.

مدل عددی تکمیلی حاصل طرح آزمایشی با متغیرهای مستقل شامل: شیب طولی و عرضی، موقعیت گرانیگاه از جهت طولی، عرضی و ارتفاعی، شتاب در جهت محور طولی و شتاب زاویه ای حول محور طولی بود. هر کدام از متغیرها شامل ۵ سطح بوده و مدل با استفاده از روش سطح پاسخ از نوع مرکب مرکزی تحلیل شد. مقادیر وزن و فاصله محورها در این مدل به صورت ثابت و معادل مقادیر مدل جایگزین تراکتور در نظر گرفته شد.

جدول ۲. کدهای استفاده شده در نرم افزار دیزاین اکسپرت برای مدل های عددی اولیه و تکمیلی

ردیف	نام متغیر	نماد	کد نرم افزار دیزاین اکسپرت	استفاده شده در مدل
۱	سینوس شیب جانبی	$\sin \alpha$	A	اولیه و تکمیلی
۲	سینوس شیب طولی	$\sin \beta$	B	اولیه و تکمیلی
۳	ارتفاع گرانیگاه	z_{CG}	C	اولیه و تکمیلی
۴	انحراف طولی گرانیگاه	x_{CG}	D	اولیه و تکمیلی
۵	انحراف عرضی گرانیگاه	y_{CG}	E	تکمیلی
۶	شتاب	a	F	تکمیلی
۷	سرعت	v	G	تکمیلی
۸	معکوس شعاع دوران	$\frac{1}{r}$	H	تکمیلی

پس از تعیین مدل بهینه، تحلیل حساسیت روی مدل انجام شده و اثر و دخالت هریک از عوامل بر بالارفتن احتمال واژگونی بررسی شده است.

نتایج و بحث

در این پژوهش رفتار دینامیکی تراکتور حین مانور بر روی شیب های مرکب با استفاده از دو رویکرد مستقل مدل تحلیلی (مبتنی بر پایداری استاتیکی، قوانین حرکت نیوتن و اصل دالامبر) و مدل عددی (با استفاده از مدل جایگزین تراکتور) شبیه سازی شده و در نرم افزار دیزاین اکسپرت مورد تحلیل قرار گرفت.

با ارائه متغیرهای آزمایش به نرم افزار دیزاین اکسپرت و انتخاب روش سطح پاسخ نوع مرکب مرکزی به عنوان طرح انتخابی، تعداد ۳۵ آزمایش در قالب یک جدول شامل مقادیر متغیرهای مستقل و جای خالی برای ثبت نتایج، توسط نرم افزار پیشنهاد شد. با استفاده از مدل جایگزین تراکتور و برد الکترونیکی، مقادیر نیرو متناظر با هر شیب به دست آمد و در نرم افزار اکسل مقادیر نیرو به شاخص توزیع وزن تبدیل شد. برای محاسبه مدل عددی، شاخص های بدست آمده به عنوان نتیجه در نرم افزار دیزاین اکسپرت وارد شد و پس از تحلیل نتایج، مدل های عددی بدست آمده، با تحلیل حساسیت و بررسی معناداری پارامترها ساده شدند تا جایی که اعتبار و دقت آن ها (با حفظ ضریب تعیین بالاتر از ۰/۹۰) کاهش نیابد. مدل های عددی ساده شده به صورت معادلات رابطه ۱۱ و رابطه ۱۲ قابل ارائه است.

$$I_{WDlat} = -0.136452 + 0.8147 \times z_{CG} + 1.68376 \times \sin^2 \alpha \quad \text{رابطه ۱۱}$$

$$I_{WDlon} = -0.195623 + 0.8981 \times z_{CG} + 6.752 \times \sin \beta \times x_{CG} + 1.50869 \times \sin^2 \beta + 15.50 \times x_{CG}^2 \quad \text{رابطه ۱۲}$$

معادلات رابطه ۱۱ و رابطه ۱۲ همچنین به صورت جدول ۳ قابل بیان است که دو ستون اول متعلق به نتایج واقعی و دو ستون بعدی مربوط به نتایج نرمال است.

جدول ۳. ضرایب رابطه عددی

ضرایب	I_{WDlat}	I_{WDlon}	I_{WDlat} (نرمال)	I_{WDlon} (نرمال)
مقدار ثابت	- ۰/۱۳۶۴۵۲	- ۰/۱۹۵۶۲۳	۰/۰۶۷۲	۰/۰۲۸۹
z_{CG}	۰/۸۱۴۷	۰/۸۹۸۱	۰/۰۲۰۴	۰/۰۲۲۵
$\sin^2 \alpha$	۱/۶۸۳۷۶	.	۰/۲۰۶۳	.
$\sin \beta \times x_{CG}$	.	۶/۷۵۲	.	- ۰/۱۷۷۲
$\sin^2 \beta$	.	۱/۵۰۸۶۹	.	۰/۱۸۴۸
x_{CG}^2	.	۱۵/۵۰	.	۰/۰۸۷۲

مقادیر ضریب تعیین برای مدل عددی ۹۳/۸۹ و ۹۸/۸۳ درصد و برای مدل تحلیلی ۹۶/۹۳ و ۹۱/۵۹ درصد به ترتیب برای مقادیر شاخص توزیع وزن جانبی و طولی محاسبه شدند که برازش خوب مدل ها را نشان می دهند. برای بررسی خطای نسبی هر پارامتر از مدل عددی اولیه، تجزیه واریانس داده ها در جدول ۴ و جدول ۵ نشان داده شده است. در تهیه مدل های عددی، همان طور که پیش از این نیز اشاره شد، با بررسی معناداری هر پارامتر، مدل های درجه دوم ساده شده اند. مطابق جدول ۴، مدل درجه دوم کاهش یافته با مقدار آماره F برابر ۱۶۸/۹۲ و آماره P کوچک تر از ۰/۰۰۰۱، برازش خوبی داشته و از نظر آماری در سطح ۱٪ معنادار است. در این مدل نسبت سیگنال به نویز ۴۴/۳۷۱۸ برآورد شده که مقدار بالایی است و صحت مدل را تأیید می کند. در میان متغیرهای بررسی شده، مربع سینوس زاویه جانبی اثر قابل توجهی بر توزیع وزن جانبی داشته و در سطح ۱٪ معنادار بوده است. اگرچه ارتفاع گرانیگاه مطابق روابط آماری معنادار نیست (P-Value = ۰/۰۹) اما با حذف این متغیر از مدل، انطباق مدل کاهش یافت (ضریب تعیین کمتر از ۰/۹)؛ لذا این متغیر در مدل باقی ماند.

جدول ۴. تجزیه واریانس شاخص توزیع وزن جانبی در مدل عددی

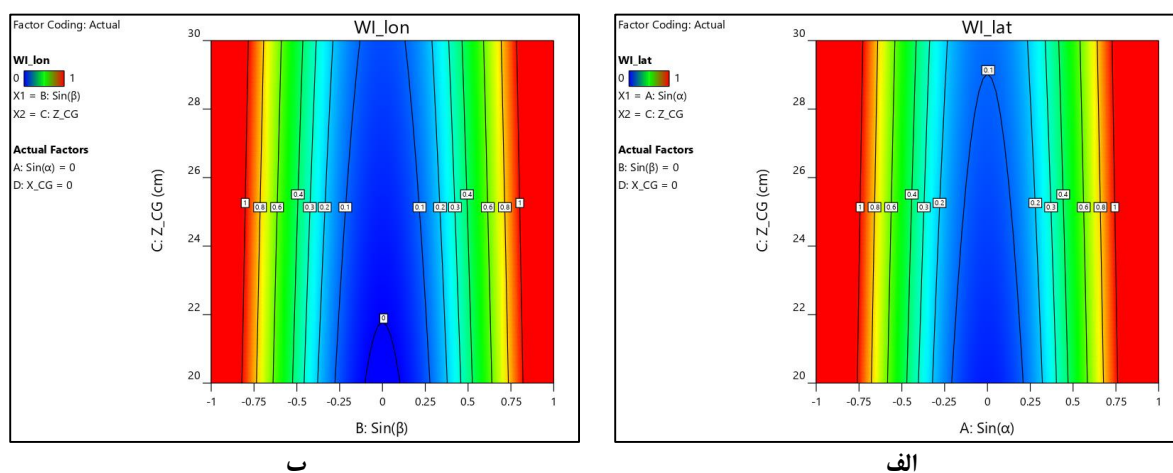
منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	آماره F	آماره P	معناداری
مدل	۱/۰۷	۲	۰/۵۳۵۹	۱۶۸/۹۲	< ۰/۰۰۰۱	۱٪
z_{CG}	۰/۰۱۰۰	۱	۰/۰۱۰۰	۳/۱۴	۰/۰۹۰۳	-
$\sin^2 \alpha$	۱/۰۶	۱	۱/۰۶	۳۳۴/۷۰	< ۰/۰۰۰۱	۱٪
باقی مانده	۰/۰۶۹۸	۲۲	۰/۰۰۳۲			
مجموع مربعات کل	۱/۱۴	۲۴				

تحلیل آماری مدل عددی اولیه توزیع وزن طولی نیز در جدول ۵ نشان داده شده است. مطابق جدول ذکر شده مدل درجه دوم کاهش یافته برای شاخص توزیع نیروی طولی نیز با آماره $F 423/49$ و آماره P کمتر از $0/0001$ به خوبی برازش یافته و از نظر آماری معنادار است. همچنین نسبت سیگنال به نویز در این مدل $62/57$ ارزیابی شده که مؤید صحت و اعتبار مدل است. تمام متغیرهای موجود در جدول ۵ شامل ارتفاع گرانیگاه، ترکیب سینوس زاویه طولی $\times$ انحراف طولی گرانیگاه، مربع سینوس زاویه طولی و مربع انحراف طولی گرانیگاه از نظر آماری در سطح ۱٪ معنادار بوده و تأثیر قابل توجهی بر شاخص توزیع نیروی طولی داشته است.

جدول ۵. تجزیه واریانس شاخص توزیع وزن طولی در مدل عددی

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	آماره F	آماره P	معناداری
مدل	۱/۳۳	۴	۰/۳۳۲۵	۴۲۳/۴۹	$< 0/0001$	۱٪
z_{CG}	۰/۰۱۲۱	۱	۰/۰۱۲۱	۱۵/۴۱	$0/0008$	۱٪
$\sin \beta \times x_{CG}$	۰/۵۰۲۶	۱	۰/۵۰۲۶	۶۴۰/۱۰	$< 0/0001$	۱٪
$\sin^2 \beta$	۰/۷۸۴۷	۱	۰/۷۸۴۷	۹۹۹/۳۶	$< 0/0001$	۱٪
x_{CG}^2	۰/۱۷۴۷	۱	۰/۱۷۴۷	۲۲۲/۴۷	$< 0/0001$	۱٪
باقی مانده	۰/۰۱۵۷	۲۰	۰/۰۰۰۸			
مجموع مربعات کل	۱/۳۵	۲۴				

اثر متقابل شیب و ارتفاع گرانیگاه در پایداری جانبی و طولی در شکل ۶ نشان داده شده است. مقادیر این نمودار شاخص توزیع نیرو ($I_{WD_{lon}}$ و $I_{WD_{lat}}$) است که به صورت کانتور نمایش داده شده و برای داده‌های آزمایشگاهی از رابطه ۴ و رابطه ۵ قابل محاسبه است. محور عمودی هر دو نمودار ارتفاع گرانیگاه است. محور افقی در نمودار الف و ب به ترتیب مقادیر سینوس زاویه جانبی و سینوس زاویه طولی را نمایش می‌دهد. با توجه به افزایش شاخص با حرکت به سمت بالای نمودار، اثر ارتفاع گرانیگاه بر هردو پایداری قابل مشاهده است و این تأثیر در پایداری جانبی محسوس‌تر است. اثر شیب جانبی در بخش الف و شیب طولی در بخش ب نیز کاملاً مشهود است (به عنوان مثال در نمودار الف در ارتفاع گرانیگاه ۲۰ سانتی متر، در سینوس زاویه جانبی کمتر از $\pm 0/25$ (معادل $\pm 14/47$ درجه) پایداری کامل برقرار بوده و بعد از آن، پایداری کم شده تا جایی که در سینوس زاویه جانبی $\pm 0/75$ (معادل $\pm 48/59$ درجه) ناپایداری کامل (واژگونی) رخ داده است اما در ارتفاع گرانیگاه ۳۰ سانتی متر در هیچ زاویه‌ای پایداری کامل وجود ندارد). در کلیه کانتورها طیف رنگی از آبی به قرمز است که رنگ قرمز به معنای ناپایداری کامل و رنگ آبی به معنای پایداری کامل توصیف می‌شود و محدوده بین آنها پایداری نسبی است.

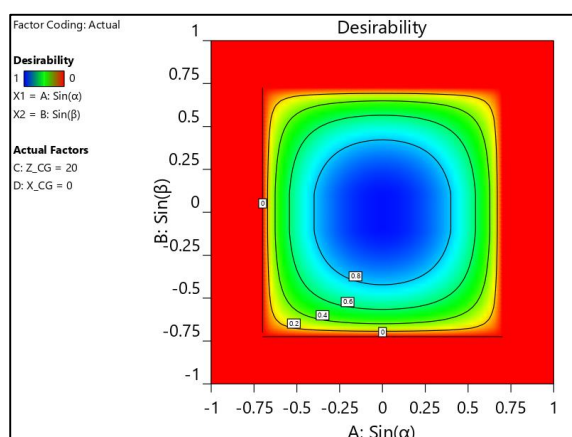


شکل ۶. نمودار اثر متقابل ارتفاع گرانیگاه با (الف) شیب جانبی (ب) شیب طولی بر شاخص توزیع نیرو در مدل عددی اولیه

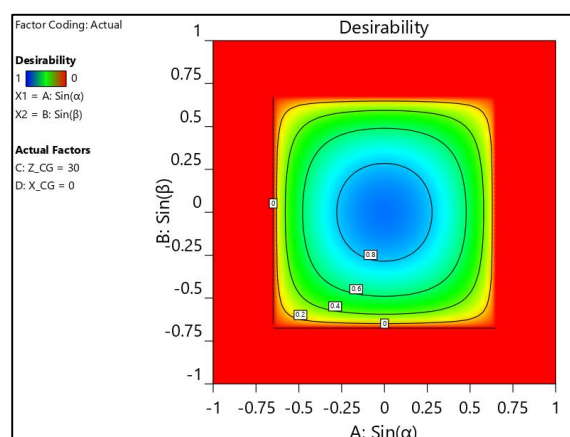
با ترکیب دو نمودار شکل ۶ می‌توان به نمودارهای شکل ۷ رسید که تأثیرپذیری پایداری به صورت کلی از زوایای طولی و جانبی را نشان می‌دهد. این نمودار تحت عنوان پایداری یا مطلوبیت استخراج شده و افزایش مقدار آن معادل افزایش پایداری است؛ لذا برخلاف دو نمودار قبلی در این نمودار اعداد بیشتر نمایانگر پایداری بیشتر است. به همین علت این نمودار (بر خلاف شکل ۶) به گونه‌ای طراحی شد که با حرکت از صفر به یک، رنگ نمودار از قرمز به آبی تغییر کند تا کماکان رنگ قرمز نشان‌دهنده وضعیت بحرانی باشد. چهار قسمت

نمودار شکل ۷ نشان دهنده اثر شیب جانبی و طولی بر پایداری است و مقدار ارتفاع و انحراف طولی گرانیگاه در هریک متفاوت است که در سمت چپ هر نمودار نوشته شده است. لازم به ذکر است که مقادیر این نمودار نیز به صورت کانتور بوده و با خطوط و رنگها قابل شناسایی است. محور عمودی همه نمودارهای شکل مذکور سینوس زاویه طولی و محور افقی آن ها سینوس زاویه جانبی می باشد.

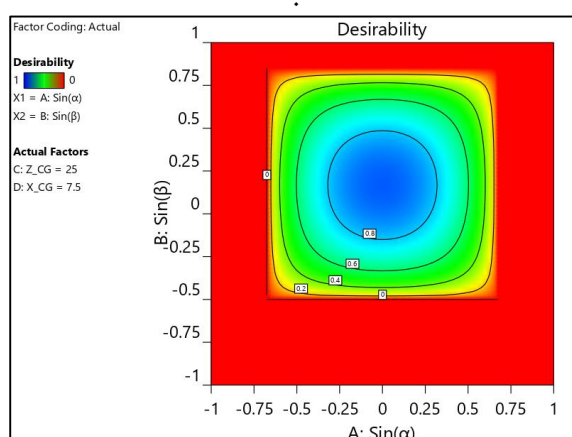
نمودار اثرات متقابل چهار عامل سینوس شیب جانبی و طولی، ارتفاع گرانیگاه و انحراف طولی گرانیگاه در مدل عددی اولیه در شکل ۸ الف نشان داده شده است. در این نمودار محور عمودی مطلوبیت است که به عنوان پایداری نیز می توان از آن یاد کرد و محور افقی مقدار نرمال است که درباره همه متغیرها قابل استفاده است. مقادیر محور افقی این نمودار در بازه -1 تا 1 نرمال شده است (-1 معادل کمترین مقدار هر متغیر و $+1$ معادل بیشترین مقدار متغیر است. همچنین مقدار 0 برای هر متغیر معادل حد وسط آن متغیر است). نمادهای A تا D در نمودار، نماینده متغیرهای مستقل بوده که پیش تر در جدول ۲ به آن ها اشاره شد و در سمت چپ هر نمودار نیز بیان شده است. با بررسی نمودار ذکر شده، می توان دریافت که در محدوده این آزمایش، سینوس شیب طولی و عرضی به عنوان بیشترین، پس از آن موقعیت طولی گرانیگاه و در آخر ارتفاع گرانیگاه به عنوان کمترین اثرگذاری بر پایداری تراکتور شناسایی شده اند (شیب بیشتر نشان دهنده تأثیر شدیدتر تغییرات متغیر در تغییر مطلوبیت است). البته باید توجه داشت که قسمت الف برای مقادیر صفر نرمال برای هر متغیر (نقطه مرکزی یا حد وسط متغیرها) است. در صورت تغییر هریک از مقادیر، امکان تغییر در نرخ سایر نمودارها وجود دارد. به عنوان مثال در صورت افزایش زاویه طولی ($\sin \beta$) به 1 نرمال، تأثیر انحراف طولی گرانیگاه (X_{CG}) از مابقی بیشتر خواهد شد که در شکل ۸ ب نشان داده شده است.



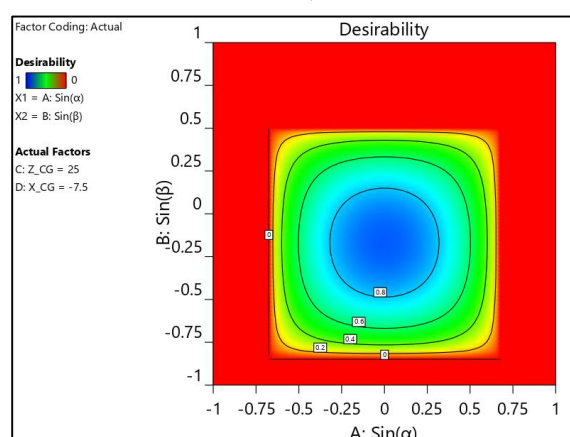
ب



الف



د

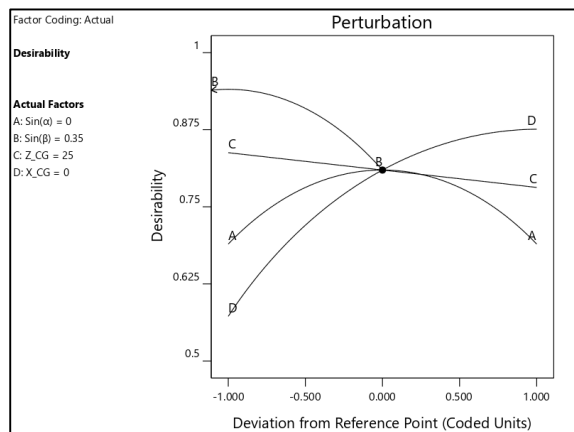


ج

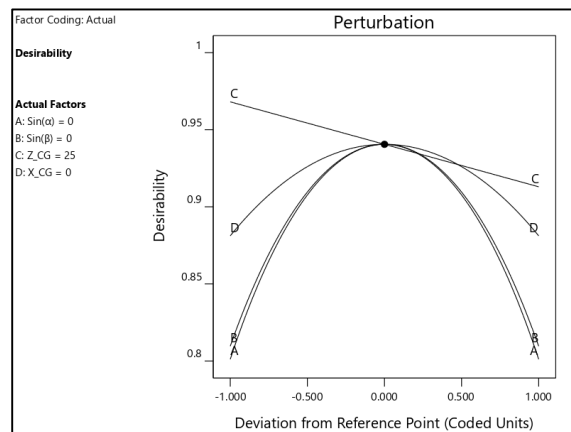
شکل ۷. نمودار اثر متقابل زاویه طولی و جانبی بر میزان پایداری در دو حالت (الف) ارتفاع گرانیگاه 30 سانتی متر (ب) ارتفاع گرانیگاه 20 سانتی متر (ج) گرانیگاه مایل به جلو و (د) گرانیگاه مایل به عقب

پس از تکمیل مدل عددی، جهت ترکیب دو مدل و ارائه مدل عددی تکمیلی، طرح آزمایش کامل تری با تعداد متغیرهای بیشتر شامل 282 آزمایش موردبررسی قرار گرفته که داده های آن توسط نرم افزار اکسل و محاسبات تحلیلی تأمین شده است. این طرح نهایتاً منجر به دو مدل عددی به صورت روابط ریاضی شد که در جدول ۶ قابل مشاهده است (رابطه ها به صورت یک چندجمله ای است که برای استخراج

معادلات ریاضی از جدول، به عنوان نمونه، به رابطه ۱۱، رابطه ۱۲ و جدول ۳ مراجعه کنید). همچنین مانند مدل عددی اولیه، جهت بررسی حساسیت مدل، باتوجه به تنوع واحد پارامترها، مقادیر استفاده شده در طرح آزمایش به صورت نرمال محاسبه شد که ضرایب مدل حاصل شده، در ستون‌های چهارم و پنجم جدول ۶ قابل مشاهده است.



ب



الف

شکل ۸. نمودار تأثیر نرمال تمام عوامل بر میزان پایداری در الف) حالت نقطه مرکزی (حد وسط متغیرها) ب) حالت شیب طولی حداکثر

جدول ۶. ضرایب رابطه عددی تکمیلی

ضرایب	$I_{WDlat}^{0.85}$	I_{WDlon}	(نرمال) $I_{WDlat}^{0.85}$	(نرمال) I_{WDlon}
مقدار ثابت	-۰/۲۸۳۶۶۲	-۰/۱۵۴۳۵۱	۰/۰۶۶۹	۰/۰۰۰۴
$\sin \alpha$	-۰/۳۱۲۷۹۹	.	۰/۰۸۹۰	.
Z_{CG}	۱/۴۰۲۱	۱/۲۵۹۳	۰/۰۴۱۷	۰/۰۳۷۴
$\sin \alpha \times y_{CG}$	-۴/۶۳۸۷	.	-۰/۱۱۴۸	.
$\sin \alpha \times v$	-۰/۰۳۱۷۳	.	۰/۰۷۸۵	.
$\sin \alpha / r$	۲/۰۹۳۶۴	.	۰/۰۵۱۸	.
$\sin^2 \alpha$	۱/۳۸۷۷۳	.	۰/۲۴۰۴	.
y_{CG}^2	۱۷/۹۸	.	۰/۰۶۳۶	.
$\sin \beta \times x_{CG}$	.	۴/۸۰۵۱	.	۰/۱۷۸۴
$\sin \beta \times a$	.	-۰/۱۸۹۳۴۶	.	-۰/۰۴۶۹
$\sin^2 \beta$	.	۱/۲۰۵۴۵	.	۰/۲۰۸۸
x_{CG}^2	.	۱۲/۳۶	.	۰/۰۹۸۳
a^2	.	۰/۰۴۱۷۵۶	.	۰/۰۱۴۸

مقدار ضریب تعیین برای مدل عددی تکمیلی پایداری جانبی در حالت درجه دوم کامل برابر ۹۹/۹۹ درصد محاسبه شد که با ساده‌سازی پارامترهایی با معناداری کمتر، این مقدار به ۹۹/۳۶ درصد رسید. در جدول ۷ قابل مشاهده است که مدل درجه دوم کاهش یافته توانسته در حد بسیار معنی‌دار (۱٪)، تغییرات شاخص توزیع نیروی جانبی را به خوبی توصیف کند. نسبت سیگنال به نویز در این مدل ۱۰۳/۱۳ بوده که نشان‌دهنده قابلیت اطمینان بالای مدل است. باتوجه به جدول ذکر شده، می‌توان دریافت که بیشترین سهم در تغییرات شاخص توزیع نیروی جانبی در مدل توسعه‌یافته نیز مربوط به برهم‌کنش‌های وابسته به زاویه جانبی است که نقش غالب آن در پایداری تراکتور را تأیید می‌کند. همچنین باتوجه به ستون چهارم جدول ۶ (ضرایب نرمال پایداری جانبی) ضرایب مربوط به مربع سینوس زاویه جانبی و ارتفاع گرانیگاه در مدل عددی تکمیلی پایداری جانبی به ترتیب بیشترین (۰/۲۴۰۴) و کمترین (۰/۰۴۱۷) مقدار را به خود اختصاص داده‌اند؛ لذا می‌توان نتیجه گرفت که مربع سینوس زاویه جانبی، بیشترین، و ارتفاع گرانیگاه کمترین اثر را بر پایداری جانبی تراکتور داشته است.

جدول ۷. تجزیه واریانس شاخص توزیع وزن جانبی در مدل عددی تکمیلی

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	آماره F	آماره P	معناداری
مدل	۱۰/۶۵	۷	۱/۵۲	۵۶۷/۲۶	< ۰/۰۰۰۱	۱٪
$\sin \alpha$	۲/۰۸	۱	۲/۰۸	۷۷۶/۲۳	< ۰/۰۰۰۱	۱٪
z_{CG}	۰/۴۳۰۶	۱	۰/۴۳۰۶	۱۶۰/۴۷	< ۰/۰۰۰۱	۱٪
$\sin \alpha \times y_{CG}$	۳/۳۸	۱	۳/۳۸	۱۲۶۰/۴۲	< ۰/۰۰۰۱	۱٪
$\sin \alpha \times v$	۱/۵۹	۱	۱/۵۹	۵۹۳/۶۶	< ۰/۰۰۰۱	۱٪
$\sin \alpha / r$	۰/۶۹۷۸	۱	۰/۶۹۷۸	۲۶۰/۰۶	< ۰/۰۰۰۱	۱٪
$\sin^2 \alpha$	۱/۴۳	۱	۱/۴۳	۵۳۲/۲۵	< ۰/۰۰۰۱	۱٪
y_{CG}^2	۰/۱۳۶۲	۱	۰/۱۳۶۲	۵۰/۷۴	< ۰/۰۰۰۱	۱٪
باقی مانده	۰/۷۳۵۲	۲۷۴	۰/۰۰۲۷			
عدم برازش	۰/۷۳۵۲	۲۶۵	۰/۰۰۲۸			
خطای خالص	۰/۰۰۰۰	۹	۰/۰۰۰۰			

مقدار ضریب تعیین مدل عددی تکمیلی پایداری طولی برابر ۹۹/۹۹ درصد برای مدل درجه دوم کامل محاسبه شده که با ساده سازی به مقدار ۹۹/۸۳ درصد برای مدل درجه دوم کاهش یافته تقلیل پیدا کرده است. این مقدار بالا نشان دهنده دقت زیاد و قدرت پیش بینی مطلوب مدل است. همچنین نسبت سیگنال به نویز در این مدل بیش از ۵۰۰ گزارش شده که بسیار بالاتر از حد مطلوب بوده و بیانگر کفایت و اطمینان مدل در پیش بینی پاسخ ها است. تجزیه واریانس داده های مدل ذکر شده در جدول ۸ ارائه شده است. باتوجه به مقدار بسیار بالای آماره F و مقدار بسیار پایین آماره P، می توان نتیجه گرفت که مدل درجه دوم کاهش یافته توانسته تغییرات شاخص توزیع نیروی طولی را به خوبی توصیف کند. بر اساس ستون آماره P تمام متغیرهای درگیر در مدل در سطح یک درصد معنی دار بوده اند. در مجموع، سهم غالب اثرگذاری بر تغییرات شاخص توزیع وزن طولی، مربوط به مؤلفه های وابسته به زاویه طولی است که نقش اصلی را در پایداری طولی تراکتور ایفا می کنند. همچنین بر اساس ضرایب نرمال پایداری طولی در جدول ۶، ضرایب مربع سینوس زاویه طولی و مربع شتاب در مدل عددی تکمیلی پایداری طولی، به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار (۰/۲۰۸۸ و ۰/۰۱۴۸) را به خود اختصاص داده اند که نشان دهنده بیشترین و کمترین تأثیرگذاری در پایداری طولی است.

جدول ۸. تجزیه واریانس شاخص توزیع وزن طولی در مدل عددی تکمیلی

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	آماره F	آماره P	معناداری
مدل	۱۱/۳۰	۶	۱/۸۸	۲۷۳۸۷/۶۷	< ۰/۰۰۰۱	۱٪
z_{CG}	۰/۳۶۶۸	۱	۰/۳۶۶۸	۵۳۳۳/۷۰	< ۰/۰۰۰۱	۱٪
$\sin \beta \times x_{CG}$	۸/۱۵	۱	۸/۱۵	۱۱۸۵۰۰	< ۰/۰۰۰۱	۱٪
$\sin \beta \times a$	۰/۵۶۲۲	۱	۰/۵۶۲۲	۸۱۷۴/۶۹	< ۰/۰۰۰۱	۱٪
$\sin^2 \beta$	۰/۹۱۵۱	۱	۰/۹۱۵۱	۱۳۳۰۷/۴۰	< ۰/۰۰۰۱	۱٪
x_{CG}^2	۰/۲۰۲۸	۱	۰/۲۰۲۸	۲۹۴۸/۷۵	< ۰/۰۰۰۱	۱٪
a^2	۰/۰۰۴۶	۱	۰/۰۰۴۶	۶۶/۵۰	< ۰/۰۰۰۱	۱٪
باقی مانده	۰/۰۱۸۹	۲۷۵	۰/۰۰۰۱			
عدم برازش	۰/۰۱۸۹	۲۶۶	۰/۰۰۰۱			
خطای خالص	۰/۰۰۰۰	۹	۰/۰۰۰۰			
مجموع مربعات کل	۱۱/۳۲	۲۸۱				

مدل ها بر مبنای مدل درجه دوم کامل با بررسی ضرب دو عامل نوشته شده است. با این حال با ساده سازی مدل ها همان طور که از معادلات جدول ۶ قابل مشاهده است، متغیرهای پایداری با برخی از حالات متغیرها از قبیل مستقل، مربع و ضرب دو عامل ارتباط دارد. با ساده سازی مدل ها نشان داده شده است که پایداری جانبی ارتباط معناداری با شیب طولی، موقعیت طولی گرانیگاه و شتاب طولی در هیچ حالتی ندارد. از طرف دیگر، پایداری طولی نیز با شیب جانبی، موقعیت جانبی گرانیگاه، سرعت و شعاع دوران به هیچ شکلی ارتباط معناداری

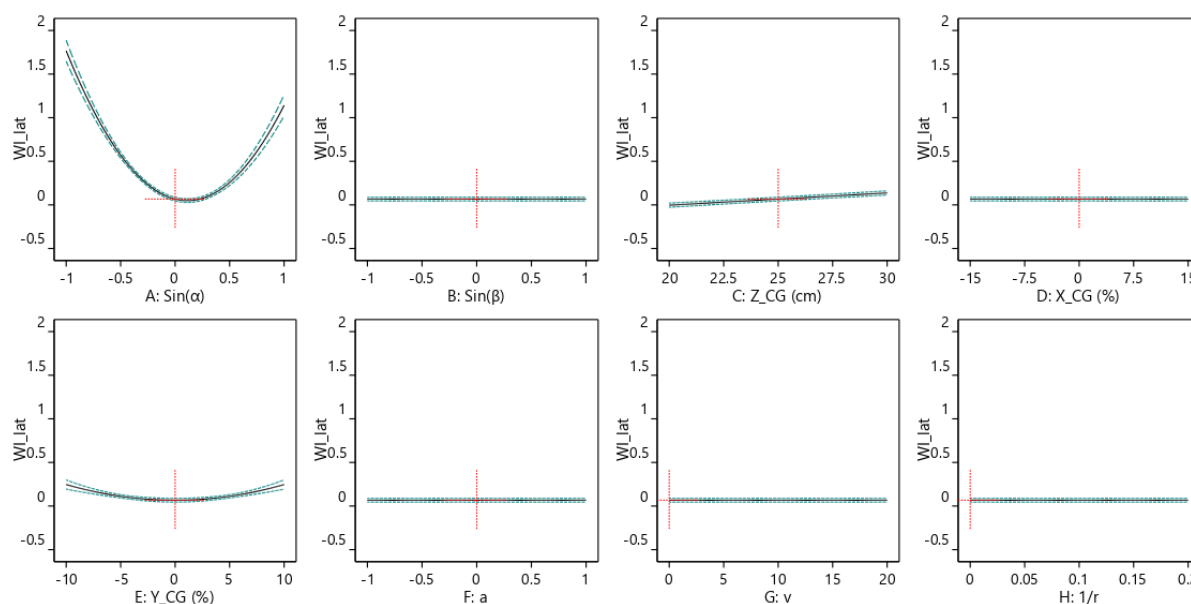
ندارد.

البته باید این نکته را در نظر داشت که در صورت عدم کنترل سرعت و افزایش بیش از حد آن، در صورت بروز سانحه و ایجاد شتاب منفی ناشی از ترمز، پایداری طولی می‌تواند تحت تأثیر قرار گیرد؛ لذا در صورت نیاز به اقدام پیش‌گیرانه، سرعت نیز ارتباط غیر مستقیمی با پایداری طولی خواهد داشت. به طرز مشابهی شتاب نیز می‌تواند با پایداری جانبی ارتباط غیرمستقیم داشته باشد که می‌بایست در سامانه‌های پیشگیرانه لحاظ گردد.

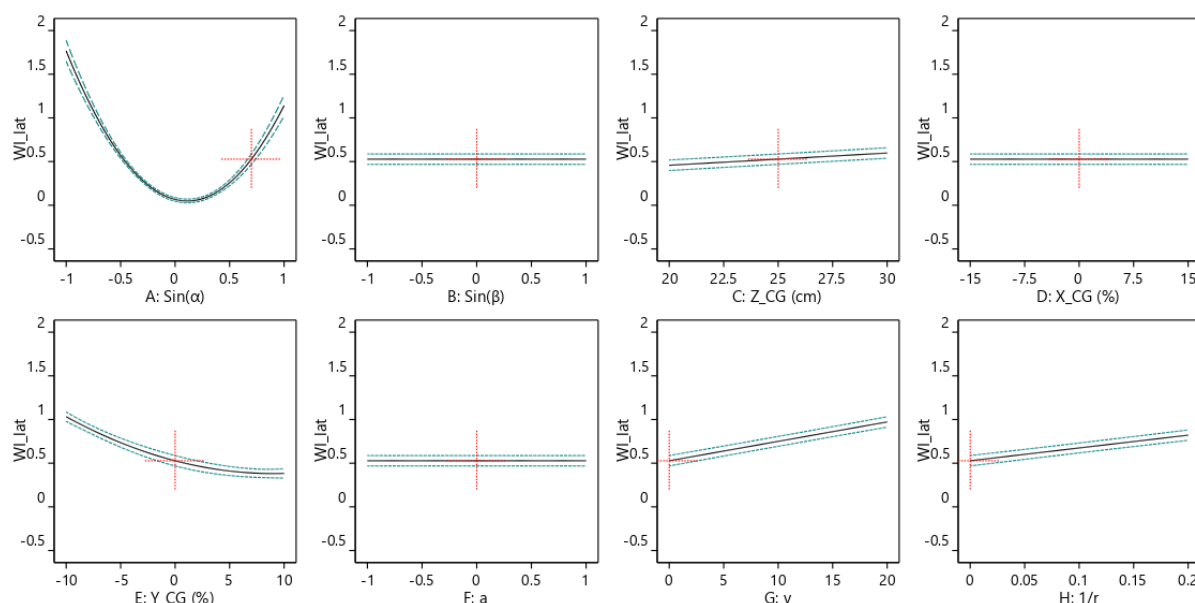
در شکل ۹ تمامی محورهای قائم نشان دهنده شاخص توزیع نیرو در جهت جانبی (I_{WDlat}) و محورهای افقی، متغیرهای مستقل شامل سینوس زاویه جانبی، سینوس زاویه طولی، ارتفاع گرانیگاه، انحراف طولی گرانیگاه، انحراف عرضی گرانیگاه، شتاب، سرعت و معکوس شعاع دوران است که به ترتیب از A تا H علامت‌گذاری شده‌اند می‌شود. علامت + قرمز روی تمام نمودارها نشان دهنده وضعیت انتخاب شده است. با توجه به تمامی نمودارهای هشت‌تایی (در تصاویر شکل ۹ تا شکل ۱۳) می‌توان دریافت که در همه نمودارهای یک تصویر، موقعیت + روی محور عمودی ثابت است؛ چرا که به یک وضعیت اشاره دارد و متغیر آن ثابت است. این نمودارها برای تشخیص شدت اثرگذاری هر متغیر بر شاخص توزیع وزن است که در هر شرایط ممکن است متفاوت از شرایط دیگر باشد. به عنوان مثال، قسمت A شکل ۹ که در قسمت بالا سمت چپ قابل مشاهده است، تأثیر پذیری شاخص توزیع نیروی جانبی در برابر سینوس زاویه جانبی نشان داده شده است. بدیهی است در زاویه‌ی صفر درجه کمترین مقدار شاخص توزیع نیرو (و در نتیجه بیشترین پایداری) و در زاویه ۹۰ و -۹۰ بیشترین مقدار شاخص توزیع نیرو (کمترین پایداری) وجود دارد و تغییرات پایداری بین این دو محدوده در شکل نمایش داده شده است. به همین ترتیب نمودارهای B, C, D, E, F, G و H به ترتیب روند تغییرات شاخص توزیع نیروی جانبی تحت تأثیر سینوس زاویه طولی، ارتفاع مرکز ثقل (Z_{CG})، انحراف طولی گرانیگاه، انحراف عرضی گرانیگاه، شتاب، سرعت و معکوس شعاع دوران را نشان می‌دهند.

در شکل ۱۰ همان نمودارهای شکل ۹ نشان داده شده‌اند با این تفاوت که مقدار سینوس زاویه جانبی در آن‌ها به حداکثر خود در این آزمایش (۰/۷) معادل زاویه ۴۴/۴۳ رسیده است. در شکل ۱۱ نیز همان نمودارها با تغییر معکوس شعاع دوران از ۰ (معادل شعاع دوران بی‌نهایت یا مسیر مستقیم) به ۰/۲ (معادل شعاع دوران ۵ متر) افزایش پیدا کرده است.

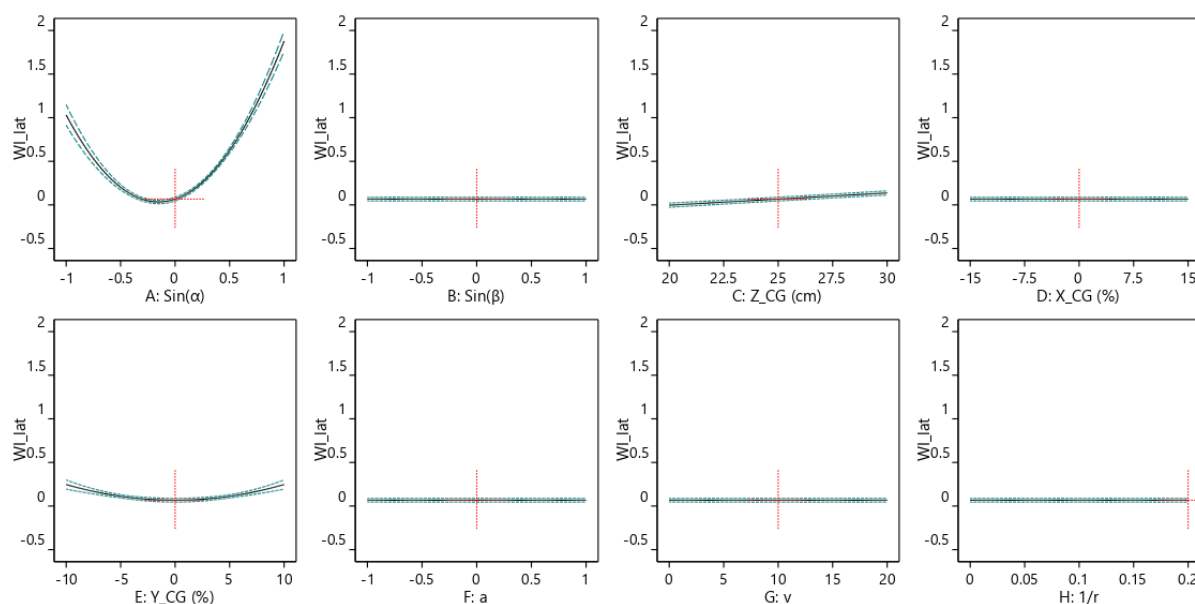
همان‌طور که در شکل ۹ قابل مشاهده است، تا زمانی که شیب و سرعت صفر باشد، تغییر هر متغیر به تنهایی اثر زیادی بر پایداری جانبی ندارد مگر تغییرات شیب جانبی (A). اما با تغییر شیب جانبی، اثر متغیرهای موقعیت عرضی و ارتفاع گرانیگاه تشدید می‌شود (شیب سایر نمودارها تغییر می‌کند) که در نمودارهای شکل ۱۰ قابل مشاهده است. اما همان‌گونه که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، اثر متقابل سرعت و شعاع دوران در این مدل مشهود نیست. به عبارتی دیگر با تغییر شعاع دوران از مسیر مستقیم به شعاع ۵ متر، اثرگذاری یا همان شیب نمودار سرعت (G) تغییر مشهودی نداشته است.



شکل ۹. اثرات متغیرهای گوناگون بر پایداری جانبی در حالت ایستا

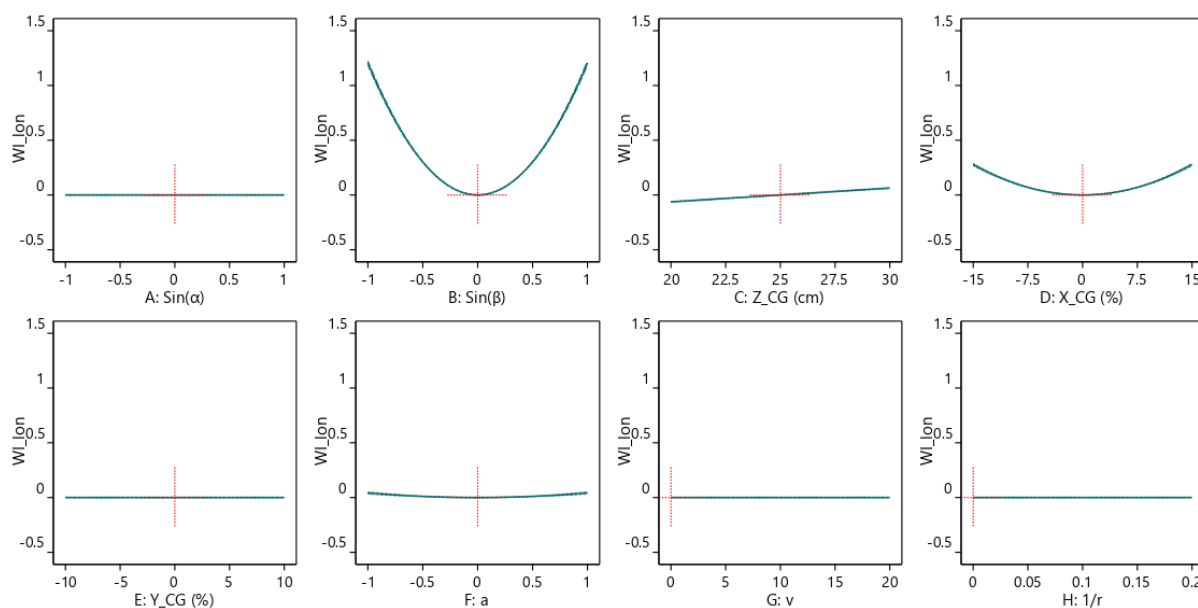


شکل ۱۰. اثرات متغیرهای گوناگون بر پایداری جانبی در شیب جانبی حداکثر (معادل زاویه ۴۴/۴۲ درجه)

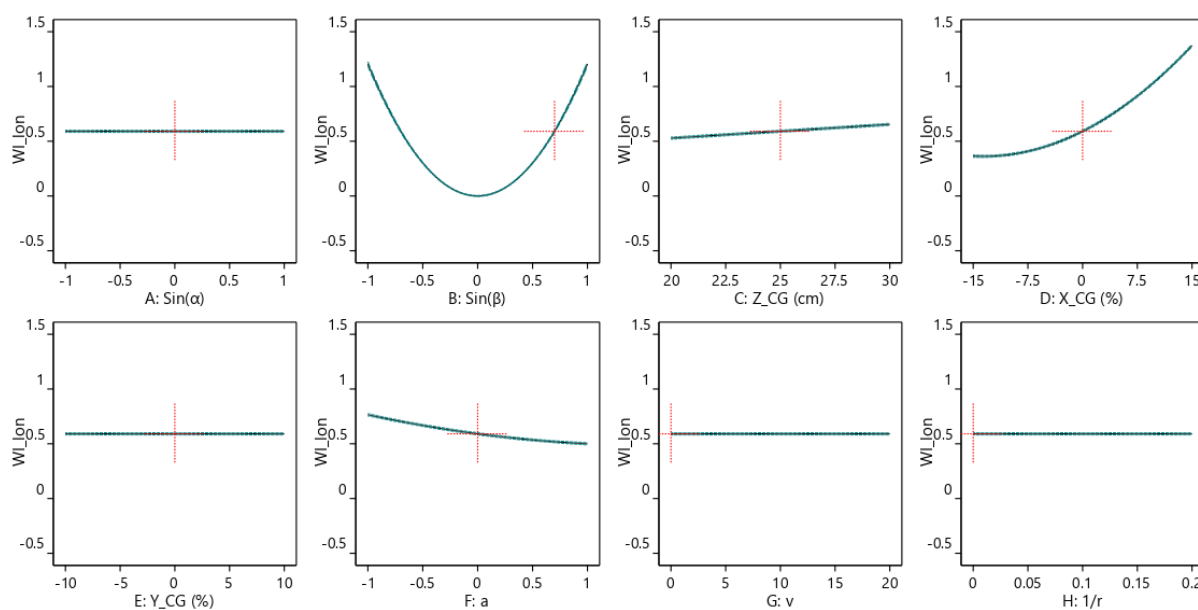


شکل ۱۱. اثرات متغیرهای گوناگون بر پایداری جانبی با شعاع دوران ۵ متر

در شکل ۱۲ دقیقاً مشابه شکل ۹ هر کدام از نمودارها اثر یکی از متغیرهای مستقل بر پایداری را نشان می‌دهد با این تفاوت که محور عمودی همه نمودارها در شکل ۱۲ شاخص توزیع نیرو در جهت طولی ($I_{WD_{lon}}$) است. با توجه به شکل فوق‌الذکر، در مشهود است که شدیدترین تأثیر متعلق به سینوس زاویه طولی است که در قسمت B نشان داده شده است. همچنین اثر ارتفاع و انحراف طولی گرانیگاه نیز تأثیر مشهودی بر پایداری طولی دارد (قسمت C و D). در شکل ۱۳ قابل مشاهده است که با افزایش شیب طولی که به تبع آن سینوس زاویه طولی افزایش دارد، تأثیرگذاری عامل انحراف طولی گرانیگاه شدیدتر می‌شود (مقایسه نمودار D در شکل ۱۲ و شکل ۱۳)؛ به گونه‌ای که در شکل ۱۲ دامنه تغییرات شاخص توزیع نیروی طولی در تمام دامنه تغییرات انحراف طولی گرانیگاه کمتر از ۰/۵ واحد است در حالی که در شکل ۱۳ که در آن تنها شیب افزایش پیدا کرده دامنه تغییرات شاخص توزیع نیروی طولی تحت اثر انحراف طولی گرانیگاه نزدیک به یک واحد است

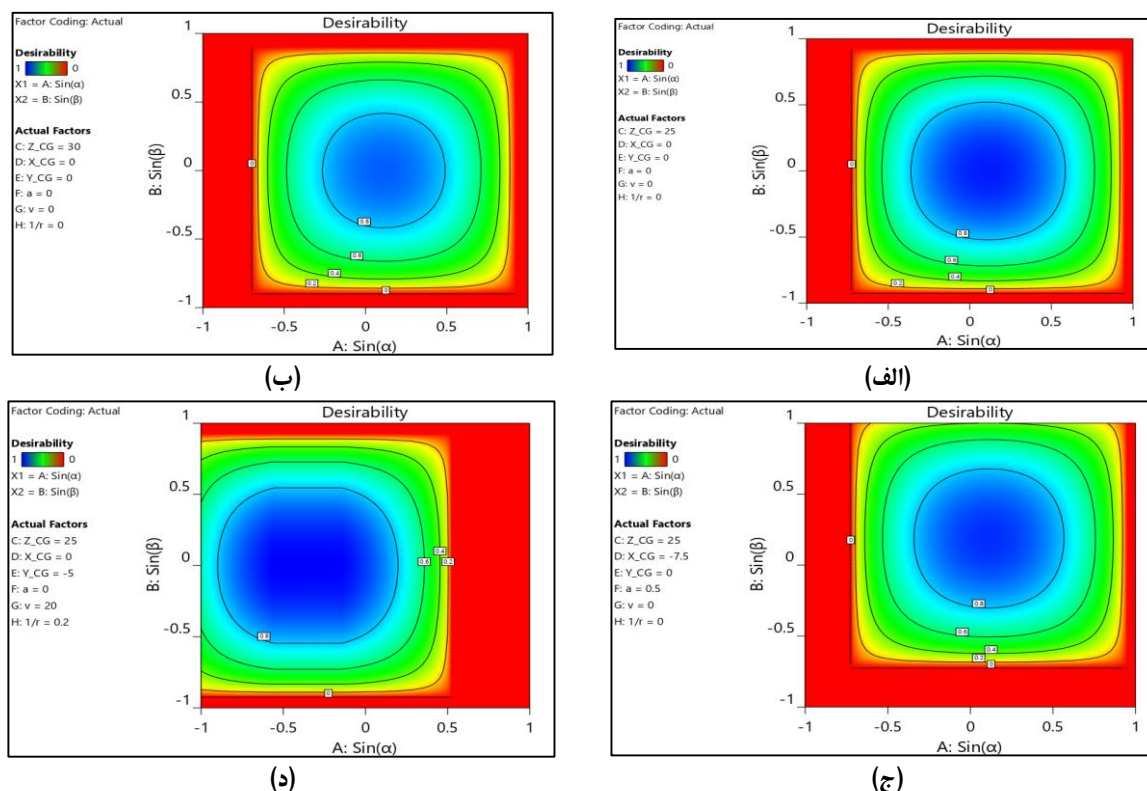


شکل ۱۲. اثرات متغیرهای گوناگون بر پایداری طولی در حالت ایستا



شکل ۱۳. اثرات متغیرهای گوناگون بر پایداری طولی در شیب طولی حداکثر (معادل زاویه ۴۴/۴۲ درجه)

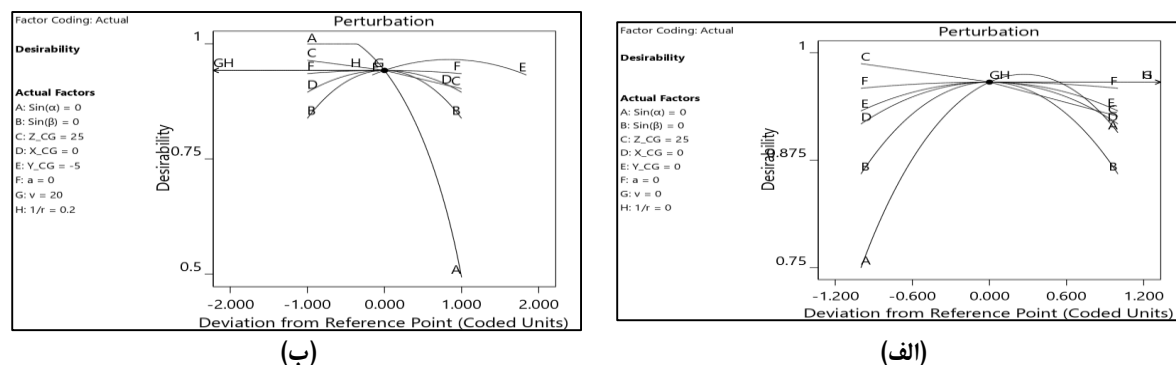
در بخش بهینه‌سازی با ترکیب دو مدل عددی تکمیلی برای پایداری طولی و جانبی با هدف کمینه کردن هردو شاخص پایداری، نمودارهای مطلوبیت به دست می‌آید که ترکیبی از نمودارهای پایداری طولی و جانبی است. در شکل ۱۴ که نمودار اثر متقابل زوایای طولی و جانبی بر پایداری است، قسمت الف نشان‌دهنده حالت میانه است که تمام متغیرها بجز شعاع دوران و سرعت درحد وسط خود هستند. با افزایش ارتفاع گرانیگاه، نمودار منقبض (شکل ۱۴، ب) و با کاهش آن منبسط می‌شود. تمایل گرانیگاه به عقب و همچنین شتاب‌گیری باعث انتقال کل نمودار به سمت بالا (شکل ۱۴، ج) و بالعکس، تمایل گرانیگاه به جلو و شتاب ترمزی باعث انتقال نمودار به سمت پایین می‌شود. از طرفی تمایل گرانیگاه به چپ، کاهش سرعت و افزایش شعاع دوران سبب انتقال نمودار به سمت راست شده و بالعکس، تمایل گرانیگاه به راست، افزایش سرعت و کاهش شعاع دوران سبب انتقال نمودار به سمت چپ (شکل ۱۴، د) می‌شود. عدم تقارن شکل ۱۴ الف به علت عدم تقارن مدل عددی است که مطابق واقعیت نبوده و ناشی از عدم تقارن زاویه در مدل پایداری جانبی است که در شکل ۱۰ بخش زاویه جانبی نیز قابل مشاهده است.



شکل ۱۴. اثرات متقابل زاویه طولی و جانبی بر پایداری (الف) در حالت ایستا و متغیرهای میانه و (ب) ارتفاع حداکثر (ج) شتاب گیری و گرانیگاه عقب (د) گرانیگاه چپ و سرعت ۲۰ متر بر ثانیه و شعاع دوران ۵ متر

همچنین در شکل ۱۵ می توان اثر تمام متغیرها را در چهار حالت قبل مشاهده کرد. مقادیر محور افقی همان گونه که در شکل ۸ نیز بیان شد در بازه ۱- تا ۱ نرمال شده است. نمادهایی که روی نمودارها قرار گرفته نیز از A تا H به ترتیب برابر سینوس زاویه جانبی، سینوس زاویه طولی، ارتفاع گرانیگاه، انحراف طولی گرانیگاه، انحراف عرضی گرانیگاه، شتاب، سرعت و معکوس شعاع دوران است که پیش تر نیز در جدول ۲ به آن ها اشاره شده بود.

همان طور که در شکل ۱۵ الف مشاهده می شود، کاهش زاویه جانبی بیشترین اثر را بر پایداری دارد. سرعت، شعاع دوران و شتاب نیز به صورت مستقل اثر چندانی نداشته و به صورت خطوط افقی به ترتیب با نمادهای G، H و F نشان داده شده اند و انحراف عرضی گرانیگاه با نماد E نیز تأثیر مستقل محدود (در حد ۰/۱) شاخص مطلوبیت) دارد؛ ولیکن در صورت تغییر آن ها، اگرچه مقدار شاخص مطلوبیت یا پایداری تغییر قابل توجهی نمی کند اما این تغییر بر واکنش سامانه نسبت به سایر متغیرها تأثیر خواهد گذاشت. همان گونه که در شکل ۱۵ ب قابل مشاهده است، زمانی که مقادیر E به ۱- و G و H به ۱+ تغییر پیدا کردند، اثر متغیر A که همان سینوس زاویه جانبی است، از ۰/۲۵ واحد به بیش از ۰/۵ واحد مطلوبیت افزایش پیدا کرد.



شکل ۱۵. اثرات مستقل متغیرها یا آشفستگی (در پایداری الف) در حالت ایستا و متغیرهای میانه، (ب) گرانیگاه مایل به چپ و سرعت ۲۰ متر بر ثانیه و شعاع دوران ۵ متر

در نهایت، مقادیر آزمایشی مورد استفاده در محاسبه مدل عددی اولیه، جهت ارزیابی مدل عددی تکمیلی نیز استفاده شد. مقدار ضریب تعیین بین مقادیر پیش‌بینی شده و نتایج تحلیلی برای شاخص‌های توزیع نیروی جانبی و طولی به ترتیب $۹۳/۳۶$ و $۹۹/۸۳$ درصد محاسبه شد. در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی، این مقادیر به $۶۵/۳۱$ و $۸۱/۱۷$ درصد کاهش یافتند. اگرچه این افت مقادیر می‌تواند بیانگر تأثیر خطاهای ناشی از شرایط واقعی آزمایش، خواص مدل و عدم قطعیت تخمین نیروهای دینامیکی باشد، اما معنی‌داری تمام عوامل و مقدار قابل قبول ضریب تعیین (به‌ویژه در مدل طولی) نشان می‌دهد که دقت و قابلیت پیش‌بینی مدل قابل قبول است.

نتیجه‌گیری کلی و پیشنهادها

در این مطالعه سعی بر آن شد که با بررسی مدل‌های تحلیلی و عددی، مدلی جامع از پایداری تراکتور ارائه شود. ابتدا شرایط حاکم بر مسئله پایداری تراکتور مورد بررسی قرار گرفت و با استفاده از آن مدل‌های تحلیلی ارائه شدند. پس از آن با یک طرح آزمایش با روش سطح پاسخ نوع مرکب مرکزی تعداد ۲۵ آزمایش طراحی شده و با استفاده از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت مدل عددی ارائه شد که مقادیر ضریب تعیین این مدل برای دو متغیر توزیع نیروی جانبی و طولی به ترتیب برابر $۹۳/۷۵$ و $۹۸/۸۱$ محاسبه شد. این در حالی است که مقدار ضریب تعیین در مدل تحلیلی در مقایسه با مقادیر آزمایشگاهی برابر $۹۶/۹۳$ و $۹۱/۵۹$ بوده است.

پس از آن باتوجه به نقص مدل عددی به علت محدودیت‌های آزمایشگاهی، آزمایش دیگری طراحی شد که شامل ۲۸۲ آزمایش بوده و تمامی متغیرهای سامانه را شامل می‌شد و نقص مدل عددی را پوشش می‌داد. آنگاه این آزمایش‌ها با داده‌های به‌دست‌آمده از مدل تحلیلی تکمیل شده و مجدداً مدل عددی دیگری تحت عنوان مدل عددی تکمیلی ارائه شد. این مدل تمامی متغیرها را پوشش می‌داد. مشخصات فیزیکی استفاده شده در مدل تکمیلی، همان مشخصات فیزیکی مدل جایگزین تراکتور است. البته علی‌رغم اینکه مقدار ضریب تعیین برای این مدل ۹۳ و ۹۹ درصد محاسبه شده است، اما با مقایسه داده‌های این مدل با مقادیر به‌دست‌آمده از مدل جایگزین تراکتور، ضریب تعیین به $۶۵/۳۱$ و $۸۱/۱۷$ کاهش پیدا کرد. اگرچه این مقادیر نیز برای ارزیابی چنین مدلی با معنی‌داری تمام پارامترها و مدل هم جهت با دیتا، قابل قبول است، این افت مقدار همچنین می‌تواند ناشی از خطای اندازه‌گیری و شرایط آزمایشگاهی، تخمین نیروهای دینامیکی و یا خواص مدل جایگزین تراکتور باشد.

با استفاده از مدل عددی ارائه‌شده، معادلات و نمودارهای پایداری استخراج و تحلیل شده و حساسیت پایداری نسبت به هر پارامتر بررسی گردید. بر اساس نتایج هر دو مدل عددی اولیه و تکمیلی و در جهت جانبی و طولی، تغییرات شاخص توزیع نیرو بیش از هر عامل دیگری متأثر از مربع سینوس شیب در همان راستا است. همچنین سهم غالب اثرگذاری بر شاخص توزیع وزن مربوط به مؤلفه‌های وابسته به زاویه در همان جهت است که بیشترین اثر را بر پایداری تراکتور ایفا می‌کند.

در مورد مدل عددی تکمیلی نیز تحلیل‌ها حاکی از اثر مستقیم و معنادار مربع سینوس شیب جانبی و طولی بر پایداری کلی تراکتور است. این مدل نسبت به اثر سرعت و شعاع دوران در حدی که انتظار می‌رفت حساس نیست. این مسئله ممکن است ناشی از شرایط طرح باشد و در پژوهش‌های آتی در صورت تکمیل دیتای دینامیکی می‌توان درباره این ارتباط تحلیل بیشتری انجام داد.

در پژوهش آقای طریقی که در بخش پیشینه به آن اشاره شد، سامانه شاخصی از پایداری نداشته و علاوه بر اینکه خاصیت پیش‌بینی نداشته، امکان تعیین نقطه بهینه برای قراردادن وزنه تعادل را ندارد. همچنین در پژوهش آقای حیدری نیز امکان تعیین نقطه بهینه برای وزنه‌های تعادل جانبی بر مبنای یک شاخص تعادل وجود نداشته است. این شاخص می‌تواند این خلاء را در پژوهش‌های مذکور جبران نماید. همچنین از وجوه تمایز این پژوهش با سایر پژوهش‌ها در این زمینه، می‌توان به تحلیل حساسیت اشاره کرد؛ چیزی که در بیشتر پژوهش‌ها به چشم نمی‌آید. باتوجه به ضرایب نرمال مدل که در جدول ۳ و پس از آن در جدول ۶ قابل مشاهده است، حساسیت هر پارامتر در پایداری تراکتور نشان داده شده است. همچنین با تعریف مطلوبیت یا پایداری کلی که جمع پایداری طولی و پایداری عرضی است، اثر هر پارامتر بر پایداری به صورت بصری همانند شکل ۷ نشان داده شده است. داده‌های این آزمایش با استفاده از مدل جایگزین تراکتور ارزیابی و صحت‌سنجی شده است.

این تحقیق به دنبال مدل ریاضی واژگونی تراکتور و تخمین لحظه واژگونی بود که نهایتاً با ارائه مدل بادقت قابل قبولی به دست‌آورد موردنظر خود رسید. هرچند روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی واژگونی تراکتور توسط سایر محققان توسعه داده شده است، مدل ریاضی حاصل از این پژوهش در نوع خود نوین بوده و در سایر پژوهش‌ها مشابه آن مشاهده نشده است. مدل ارائه شده در این تحقیق با تجهیزات محدودی قابلیت پیاده‌سازی روی انواع تراکتورها را داشته و این امکان را دارد که ایمنی بیشتری برای کشاورزان فراهم آورد.

در این پژوهش باتوجه به محدودیت های مدل جایگزین تراجکتور امکان اندازه گیری در شرایط شتاب دار، سرعت و دوران جاده وجود نداشت. لکن برای تحقیقات بعدی می توان از اعمال نیروی ثابت به مرکز ثقل وسیله به عنوان نیروهای جایگزین شتاب و نیروی گریزاز مرکز استفاده کرد که در مورد اول مطابق اصل دالامبر برابر حاصل ضرب جرم در شتاب بوده و در مورد دوم نیز برابر حاصل ضرب جرم در مجذور سرعت در معکوس شعاع دوران است که از معادلات تعادل دینامیکی قابل محاسبه است.

برای اصلاح خطاهای آزمایشی احتمالی در بخش دینامیک این پژوهش، در پژوهش های آتی می توان آزمایش های بیشتری طرح کرده یا با استفاده از یک مدل جایگزین تراجکتور دینامیکی، یا حتی یک تراجکتور واقعی، برای جبران نقایص داده های موجود، داده های آزمایشگاهی معتبر بیشتری جمع آوری کرده و از آن برای طراحی و ارزیابی یک مدل عددی تکمیلی استفاده گردد. البته در آن صورت باتوجه به افزایش چشمگیر متغیرهای مستقل، تعداد آزمایش ها بی تردید افزایش خواهند داشت که منجر به دشواری آزمایش ها خواهد شد. همچنین در صورت استفاده از تراجکتور واقعی عوامل مؤثر پیش بینی نشده از شرایط کنترل شده آزمایشگاهی فراتر رفته و تحلیل ها از این پیچیده تر نیز خواهند شد.

در این تحقیق امکان تغییر موقعیت عرضی گرانیگاه در این مدل وجود نداشته که باتوجه به شرایط عمومی تراجکتورها اولویت نداشت است؛ اما در صورت لزوم می توان با ایجاد چند جایگاه جدید روی شاسی، این امکان را فراهم کرد. از دیگر پارامترهای غیرقابل تغییر در مدل جایگزین تراجکتور می توان به عرض مسیر و فاصله دو محور اشاره کرد. با ایجاد شرایطی که بتوان این پارامترها را تغییر داد، می توان مدل های جامع و قابل تعمیم ارائه کرد که به عنوان پیشنهادی برای تحقیقات آینده مطرح می شود.

سپاسگزاری

لازم به ذکر است که این تحقیق طی طرح پژوهشی مصوب حوزه معاونت پژوهش و فناوری دانشکده کشاورزی دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران طبق ابلاغیه شماره ۸۹۲۹۷۴۳ بوده است؛ لذا بدینوسیله از حمایت های مادی و معنوی معاونت مذکور سپاس گذاری می شود. همچنین بر خود لازم می دانیم از گروه مهندسی ماشین های کشاورزی دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران به دلیل ارائه امکانات فنی و کارگاهی ضروری تشکر نماییم.

نمادها

R^2	ضریب تعیین
v	سرعت پیشروی ($\frac{m}{s}$)
W	وزن تراجکتور (N)
I_{WDlat}	شاخص توزیع نیروی عرضی
I_{WDlon}	شاخص توزیع نیروی طولی
$\bar{x}$	میانگین داده ها
x_{CG}	انحراف طولی مرکز جرم در فضای بین محور جلو و محور عقب تراجکتور (%)
x_{FCG}	فاصله طولی مرکز جرم تا محور جلوی تراجکتور (m)
x_i	مقدار واقعی داده
x_{RCG}	فاصله طولی مرکز جرم تا محور عقب تراجکتور (m)
x_t	فاصله طولی محور عقب و جلوی تراجکتور (m)
y_{CG}	انحراف عرضی مرکز جرم از مرکز هندسی تراجکتور (%)
y_{LCG}	فاصله عرضی مرکز جرم تراجکتور از نقطه اتصال چرخ های سمت چپ تراجکتور به زمین (m)
y_{RCG}	فاصله عرضی مرکز جرم تراجکتور از نقطه اتصال چرخ های سمت راست تراجکتور به زمین (m)
y_t	عرض تراجکتور (m)
z_{CG}	ارتفاع مرکز جرم تراجکتور از زمین

α	زاویه جانبی (درجه)
β	زاویه طولی (درجه)
a	شتاب پیشروی (m/s^2)
e_i	خطای مدل
F	نیرو (N)
f_i	مقدار تخمینی داده
F_x	مؤلفه نیرو در راستای محور طولی (N)
F_y	مؤلفه نیرو در راستای محور عرضی (N)
F_z	مؤلفه عمودی نیرو (N)
m	جرم تراجکتور (kg)
n	تعداد داده ها
N_{Front}	نیروی عمودی وارد شده به جفت چرخ های جلو از سمت زمین (N)
N_{Rear}	نیروی عمودی وارد شده به جفت چرخ های عقب از سمت زمین (N)
N_{Left}	نیروی عمودی وارد شده به جفت چرخ های چپ از سمت زمین (N)
N_{Right}	نیروی عمودی وارد شده به جفت چرخ های راست از سمت زمین (N)
r	شعاع دوران تراجکتور (m)

منابع

حیدری، محمد سجاد (۱۳۹۹). طراحی و ساخت یک سامانه تعادل جانبی تراکتور روی زمین‌های شیب‌دار. پایان‌نامه کارشناسی ارشد به راهنمایی علی جعفری. تهران: دانشگاه تهران، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی.

سلیمانی، افسانه؛ عباسپور فرد، محمد حسین و روحانی، عباس (۱۴۰۱). طراحی یک کنترل کننده ترکیبی فازی PID جهت تعیین نیروی لازم برای پایداری تراکتور در شیب عرضی. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی، ۱۱ (۳)، ۱-۱۴.

طریقی، جواد؛ خراسانی، اسماعیل و موسی‌زاده، حسین (۱۳۹۷). طراحی، ساخت و ارزیابی یک سیستم هشداردهنده واژگونی تراکتور. یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران، دانشگاه بوعلی سینا، همدان.

REFERENCES

- Cavallo, E., Gorucu, S., & Murphy, D. (2014). A Simulator to Improve Awareness of Rollover Risk and Stimulate Safer Driving Behavior Among Young All-Terrain (ATV) Drivers. *Journal of agromedicine*, 19, 208. <https://doi.org/10.1080/1059924X.2014.889619>
- Dowdy, S., Wearden, S., & Chilko, D. (2011). *Statistics for research*. John Wiley & Sons.
- Franceschetti, B., Rondelli, V., & Ciuffoli, A. (2019). Comparing the influence of Roll-Over Protective Structure type on tractor lateral stability. *Safety Science*, 115, 42-50. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.01.028>
- Heydari, M.S. (2020). *Design and fabrication of a tractor lateral balance system on sloping lands*, (Master's thesis, University of Tehran). (In Persian)
- Houshyar, E., & Houshyar, M. (2018). Tractor safety and related injuries in Iranian farms. *Safety Science*, 103, 88-93.
- Jang, M. K., Hwang, S. J., & Nam, J. S. (2022). Simulation Study for Overturning and Rollover Characteristics of a Tractor with an Implement on a Hard Surface. *Agronomy*, 12(12), 3093 .
- Li, X., Wang, G., Yao, Z., & Qu, J. (2013). Dynamic model and validation of an articulated steering wheel loader on slopes and over obstacles. *Vehicle System Dynamics*, 51(9), 1305-1323.
- Majdan, R., Abrahám, R., Tkáč, Z., Drlička, R., Matejková, E., Kollárová, K., & Mareček, J. (2021). Static Lateral Stability of Tractor with Rear Wheel Ballast Weights: Comparison of ISO 16231-2 (2015) with Experimental Data Regarding Tyre Deformation. *Applied Sciences*, 11(1), 381. <https://doi.org/10.3390/app11010381>
- McKenzie, E., Ronaghi, M., Powers, J., & Lutz, T. (2007). Implementing and Developing Industry Standards in the Design of Agricultural Safety Systems. ASSE Professional Development Conference ,
- Murphy, D. J. (2014). Tractor Stability and Instability. *PennState Extension* .
- Nichol, C. I., Sommer III, H. J., & Murphy, D. J. (2005). Simplified overturn stability monitoring of agricultural tractors. *Journal of agricultural safety and health*, 11(1), 99-108.
- Ochoa Lleras, N., Brennan, S., Murphy, D., Klena, J., Garvey, P., & Sommer, H. (2017). Assessing Perceptions and Alerts of Tractor Instability. *Chemical Engineering Transactions*, 58, 7-12.
- Qin, J., Liu, H., Suh, C. S., Li, Z., Zhu, Z., & Wang, G. (2020). Tractor Active Anti-rollover Control Using Momentum Flywheel with Experimental Verification. *Nongye Jixie Xuebao/Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 51, 515-520. <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.064>
- Qin, J., Wu, A., Song, Z., He, Z., Suh, C. S., Zhu, Z., & Li, Z. (2021). Recovering tractor stability from an intensive rollover with a momentum flywheel and active steering: System formulation and scale-model verification. *Computers and Electronics in Agriculture*, 190, 106458. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106458>
- Qin, J., Zhu, Z., Ji, H., Zhu, Z., Li, Z., Du, Y.,...Mao, E. (2019). Simulation of active steering control for the prevention of tractor dynamic rollover on random road surfaces. *Biosystems Engineering*, 185, 135-149.
- Ribeiro, A. M., Koyama, M. F., Moutinho, A., de Paiva, E. C., & Fioravanti, A. R. (2021). A comprehensive experimental validation of a scaled car-like vehicle: Lateral dynamics identification, stability analysis, and control application. *Control Engineering Practice*, 116, 104924. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2021.104924>
- Shetty, G., Hossain, S., Hu, C., & Lin, X. (2022). Road slope prediction and vehicle dynamics control for autonomous vehicles. *arXiv preprint arXiv:2210.05741*.
- Soleimani, A., Abbaspour-Fard, M., & Rohani, A. (2022). Development of a combined fuzzy/PID controller for determining the required force for tractor stability in side slopes. *Journal of Research in Mechanics*

- of *Agricultural Machinery*, 11(3), 1-14. <https://doi.org/10.22034/JRMAM.2022.13790.581>. (In Persian)
- Tarighi, J., & Mohtasebi, S. S. (2021). Design, fabrication and evaluation a new mechanism to automatic weight transfer control system on a tractor. *Emirates Journal for Engineering Research*, 26(2), 2 .
- Tarighi, J., Khorasani, E., Mousazadeh, H. (2018). Design, Fabrication and evaluation an alarm System to Prevent Tractor Overturning. *Eleventh National Congress on Mechanical Engineering, Biomaterials and Mechanization of Iran*. (In Persian)
- Togaev, A., & Shermukhamedov, A. (2023). Tractor Rollover Accidents: A Review of Factors and Safety Measures. *E3S Web of Conferences*. 449. [10.1051/e3sconf/202344909011](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202344909011).
- van Zanten, A. T., Erhardt, R., & Pfaff, G. (1995). VDC, The Vehicle Dynamics Control System of Bosch. *SAE Transactions*, 104, 1419-1436 .
- Wang, D., & Yuan, H. (2025). Data-driven tube model predictive control of autonomous agricultural tractors for cross-slope navigation. *Smart Agricultural Technology*, 10, 100844. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100844>
- Wang, L., Liu, F., Song, Z., Ni, Y., He, Z., Zhai, Z., ... Li, Z. (2024). Advances in tractor rollover and stability control: Implications for off-road driving safety. *Computers and Electronics in Agriculture*, 226, 109483. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109483>
- Watanabe, M., & Sakai, K. (2021). Identifying tractor overturning scenarios using a driving simulator with a motion system. *Biosystems Engineering*, 210, 261-270. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.08.010>.
- Zhang, Z., Zhu, Z., Han, B., Lu, L., Yang, H., Song, Z., ... Yang, Z. (2025). Enhancing stability and driving efficiency in tractor plowing operations on lateral slopes through independent braking and electronic Limited-Slip Differential: A Multi-Layer control strategy based on Multi-Channel time series prediction. *Computers and Electronics in Agriculture*, 234, 110298.