

بررسی پایداری سکوی بالون مقید بر روی سطوح صاف و شیب‌دار

محرم شاملی*

استادیار، پژوهشکده رانشگرهای فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تبریز، ایران، m.shameli@isrc.ac.ir

غلامرضا هاشمی

کارشناس ارشد، پژوهشکده رانشگرهای فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تبریز، ایران، gh.hashemi@isrc.ac.ir

احسان شالچی

کارشناس ارشد، پژوهشکده رانشگرهای فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تبریز، ایران، e.shalchi@isrc.ac.ir

سعید سرخیل

استادیار، پژوهشکده سامانه‌های حمل‌ونقل فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران، s.sarkheil@isrc.ac.ir

چکیده

پایداری یک جنبه حیاتی از سیستم‌های حمل‌ونقل و ساختارهای صنعتی است. این مقاله روشی را برای ارزیابی پایداری با استفاده از مقادیر شاخص ایمنی برای طراحی یک سیستم بالون مقید ارائه می‌کند. با استفاده از روابط ریاضی استخراج‌شده از طراحی مدل ایجادشده در SolidWorks، تجزیه و تحلیل جایجایی‌های مرکز جرم، عکس‌العمل‌های سیستم پایه و ممان‌های تثبیت و واژگونی اعمال‌شده بر روی سکوی انجام می‌شود. سه شاخص، یعنی شاخص مرکز جرم، شاخص گشتاور و شاخص نیرو، که تمایل به واژگونی و ناپایداری سکوی بالون متصل را تعیین می‌کنند، برای بهبود اقدامات ایمنی و جلوگیری از واژگونی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. مسئله پایداری در دو حالت که سکوی بر روی یک سطح صاف و یک سطح شیب‌دار قرار می‌گیرد، تحلیل می‌شود. روش برنامه‌ریزی خطی برای ارزیابی نیروهای واکنش مجاز پایه‌ها با محدودیت‌های پایداری برای حالتی که سکوی توسط تکیه‌گاه‌ها روی سطح نگه‌داشته می‌شود، استفاده می‌شود. رویکرد حداقل/حداکثر برای افزایش کارایی محاسباتی در ارزیابی نیروهای پایه در شرایط ایستا نامطمئن اعمال می‌شود. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، سکوی طراحی‌شده و ساخته‌شده در شرایط کاری موجود پایدار است.

واژه‌های کلیدی: سکوی بالون مقید، طراحی سازه، تحلیل پایداری سازه، واژگونی، گشتاور، نیروی پایه.

Investigating the stability of the tethered aerostat platform on smooth and inclined surfaces

M. Shameli
Gh. Hashemi
E. Shalchi
S. Sarkheil

Space Thrusters Research Institute, Iranian Space Research Center, Tabriz, Iran
Space Thrusters Research Institute, Iranian Space Research Center, Tabriz, Iran
Space Thrusters Research Institute, Iranian Space Research Center, Tabriz, Iran
Space Transportation Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran

Abstract

Stability is a crucial aspect of transportation systems and industrial structures. This paper presents a method for evaluating stability using safety index values to design a tethered balloon system. Using the mathematical relations extracted from the model design created in SolidWorks, analyzes of the displacements of the center of mass, the reactions of the base system, and the stabilizing and overturning moments acting on the platform are performed. Three indices, namely the center of mass index, the torque index and the force index, which quantify the overturning tendency and instability of the tethered balloon platform, are analyzed to improve the safety measures and prevent overturning. The stability problem is analyzed in two cases where the platform is placed on a flat and an inclined surface. The linear programming method is used to evaluate the allowable reaction forces of the bases with stability limits for the case where the platform is held on the surface by the supports. The minimum/maximum approach is applied to increase the computational efficiency in evaluating the foundation forces under statically uncertain conditions. According to the obtained results, the designed and built platform is stable under the existing working conditions.

Keyword: Tethered Aerostat, Structure Design, Analysis of Structure's Stability, Overturning, Torque, Outrigger Force.

امکان فراهم کردن ارتباطات مخابراتی پایدار در مناطقی که به‌سرعت به ارتباطات نیاز دارند را فراهم می‌کنند. (۲) برای پایش محیط‌زیست و جمع‌آوری اطلاعات مربوط به شرایط جوی، آلودگی هوا و انواع دیگری از داده‌های محیطی؛ (۳) پایش ترافیک و ایمنی جاده‌ای؛ (۴) پایش و مراقبت از مرزها؛ (۵) استفاده در تحقیقات علمی و آزمایش‌های مختلف؛ (۶) کاربردهای نظامی؛ (۷) استفاده در مواقع بحرانی مثل حوادث طبیعی یا بلاها. این فهرست تنها چند نمونه از کاربردهای سکوی بالون مقید است و این فناوری به‌عنوان یک ابزار چندمنظوره در حوزه‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. کشورهایی مختلفی مانند آمریکا، ژاپن، کشورهای اروپایی مانند فرانسه، انگلستان، آلمان و اسپانیا، کشورهایی با شرایط ویژه قطبی مانند کانادا و روسیه،

۱- مقدمه

سکوی بالون مقید پلتفرمی است که از یک بالون که به‌وسیله‌ی یک کابل به یک سازه متصل شده است تشکیل یافته است. این کابل به بالون امکان حرکت عمودی را می‌دهد اما از حرکت‌های دیگر بالون جلوگیری می‌کند. سکوهایی بالون مقید در اندازه‌ها و ارتفاع‌های مختلفی در دسترس هستند. به‌طوری‌که این سیستم‌ها دارای کاربردهای مختلفی می‌باشد که چند مورد از این موارد در زیر ارائه شده است:

(۱) به عنوان پایگاه‌های مخابراتی در محل‌های دورافتاده یا در مناطقی با زیرساخت مخابراتی ضعیف مورد استفاده قرار می‌گیرند به‌طوری‌که

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: m.shameli@isrc.ac.ir

تاریخ دریافت: ۲۰۲۴/۲۵

تاریخ پذیرش: ۲۰۲۴/۰۳

کشورهایی در مناطق مرزی و نزدیک به مناطق نزاع، دارنده‌های سکوی بالون مقید هستند.

پایداری در وسایل نقلیه زمینی و فضایی به معنای توانایی این وسایل نقلیه برای حفظ تعادل و کنترل به صورت مطلوب در طول عملکرد در شرایط مختلف است. به طوری که استفاده از کنترل‌کننده‌ها و رویتگرها در نوبری به منظور حفظ پایداری سیستم‌های فضایی و زمینی غیر قابل چشم‌پوشی است [۱-۱۵]. در واقع پایداری به عنوان یکی از ویژگی‌های مهم در طراحی و عملکرد وسایل نقلیه مورد توجه قرار می‌گیرد و تأثیر مستقیمی بر ایمنی و کارایی دارد. به طور ویژه پایداری در سیستم‌های جرتقیلی به معنای توانایی این سیستم‌ها برای حفظ تعادل است. برای دستیابی به پایداری در سیستم‌های جرتقیلی، عوامل مختلفی مانند نحوه توزیع وزن مجموعه، استفاده از سیستم‌های کنترلی مختلف، در نظر گرفتن شرایط محیطی مختلف مانند باد، باران، یخ و ... باید مدنظر قرار گیرد [۶-۹]؛ زیرا هر نقص در پایداری این مجموعه‌ها می‌تواند منجر به حوادث جدی، صدمات و خسارات مالی شود؛ بنابراین، طراحی، نصب و بهره‌برداری از این سیستم‌ها با دقت و با رعایت اصول پایداری انجام می‌شود تا ایمنی و کارایی برقرار باشد. در نتیجه درک شرایط کاری و محیطی برای طراحی یک مدل پایدار مناسب که شامل موقعیت‌های متقابل اجزای وسیله نقلیه باشد، بسیار مهم است. مقدار گشتاور مورد نیاز برای حفظ تعادل حول محور واژگونی ممکن است معیار واژگونی باشد [۱۰-۱۲]. در واقع گشتاور واژگونی توسط گشتاور تثبیت‌کننده با جهت مخالف که به جرم و محل مرکز جرم اجزای سیستم بستگی دارد خنثی می‌شود. در برخی از تحقیقات میزان پایداری و واژگونی وسایل نقلیه متحرک یا سازه‌ها از جمله جرتقیل اندازه‌گیری شده است. کاکالاک و همکاران روند ارزیابی پایداری سیستم جابجایی جرتقیل متحرک را بر اساس روش توسعه‌یافته با استفاده از مدل ریاضی ساخته‌شده و مدل ایجادشده در محیط CAD/CAE ارائه نمودند [۱۳]. مدل پیشنهادی شامل مجموعه‌های اصلی جرتقیل شامل کامیون با سیستم پایه‌ها و تثبیت‌کننده‌ها، ستون چرخان، بازوهای داخلی و بیرونی، بوم تلسکوپیی شش عضوی، قلاب با زنجیر بالا بر و بار حمل شده است که به هم متصل شده‌اند. در پژوهش آن‌ها، تجزیه و تحلیل جابجایی‌های مرکز جرم سیستم جرتقیل، عکس‌العمل مجموعه پایه‌ها، گشتاورهای تثبیت‌کننده و واژگونی که بر روی جرتقیل عمل می‌کنند و همچنین مقادیر شاخص ایمنی برای مسیر حرکت اجزای جرتقیل انجام شد. آن‌ها در پژوهش دیگر یک روش ارزیابی پایداری سیستم جابجایی جرتقیل متحرک را بر اساس مقادیر شاخص ایمنی که به عنوان معیار بهینه‌سازی مسیر حرکت جرتقیل است، ارائه نمودند [۱۴]. آن‌ها تحلیل‌هایی از جابجایی‌های مرکز جرم سیستم جرتقیل، گشتاورهای تثبیت‌کننده و واژگونی که بر روی جرتقیل اثر می‌کنند و همچنین مقادیر نشان‌دهنده ایمنی برای مسیر حرکت داده‌شده اجزای کار جرتقیل را انجام دادند. حوادث سیستم‌هایی مانند جرتقیل به عوامل مختلفی از جمله شرایط نامناسب زمین، پایه‌ها یا تثبیت‌کننده‌های ضعیف، عدم تراز کردن سیستم، چرخش سریع اجزا یا باد شدید بستگی دارد. از مهم‌ترین دلایل دیگر ناپایداری و ایجاد حادثه در این سیستم‌ها ضعف در پایه‌ها می‌باشد. مطالعاتی از جمله [۱۴-۱۹] تأثیر سیستم پایه را بر پایداری و عکس‌العمل زمین که جرتقیل متحرک روی آن قرار دارد را بررسی

نمودند. نتایج ارائه شده در [۲۰] نشان می‌دهد که حداقل ۵۰ درصد از اتفاقات این سیستم‌ها به این دلیل رخ می‌دهد که پایه‌ها به درستی کار نمی‌کنند. جنک و همکاران یک روش سیمپلکس برنامه‌ریزی خطی را برای ارزیابی نیروهای عکس‌العمل مجاز سیستم پایه‌ها با محدودیت‌های پایداری ارائه نمودند [۱۱]. آن‌ها معیارهای ایمنی دو نوع جرتقیل متحرک مجهز به پایه‌های مختلف را برای نشان دادن امکان‌سنجی طرح پیشنهادی تجزیه و تحلیل نمودند.

پایداری سکوی بالون مقید معمولاً به ویژگی‌ها و وضعیت‌هایی اشاره دارد که سیستم می‌بایست داشته باشد تا بالون به طور پایدار در ارتفاع مشخص نگه‌داشته شود و از سقوط یا از دست دادن کنترل جلوگیری شود. پایداری در این سازه‌ها به معنای حفظ تعادل و ایمنی سکو است؛ بنابراین در حالت کلی، پایداری سکوی بالون مقید یک مسئله حیاتی در طراحی و عملکرد این سیستم‌ها است. اگر پایداری به خوبی در نظر گرفته نشود، ممکن است با مشکلاتی مانند سقوط ناگهانی یا از دست دادن کنترل روبه‌رو گردد که می‌تواند منجر به آسیب‌های جدی شود. در پژوهش‌های مختلفی که در پیشینه تحقیق مورد بررسی قرار گرفته‌اند، به بررسی پایداری جرتقیل‌ها به سه روش مختلف پرداخته شده است. با این وجود، پایداری سکوی بالون مقید هرگز در پژوهش‌های گذشته مورد توجه قرار نگرفته است. لذا در این مقاله تمرکز به بررسی هم‌زمان سه شرط پایداری است. در حالت کلی می‌توان موارد زیر را به عنوان معیار پایداری سکوی بالون مقید معرفی نمود:

- موقعیت قرارگیری مرکز جرم نسبت به چندضلعی تشکیل‌شده توسط پایه‌ها؛ که بیانگر این است که باید مرکز جرم مجموعه در هر شرایط کاری در داخل چندضلعی ایجادشده توسط پایه‌ها قرار گیرد.

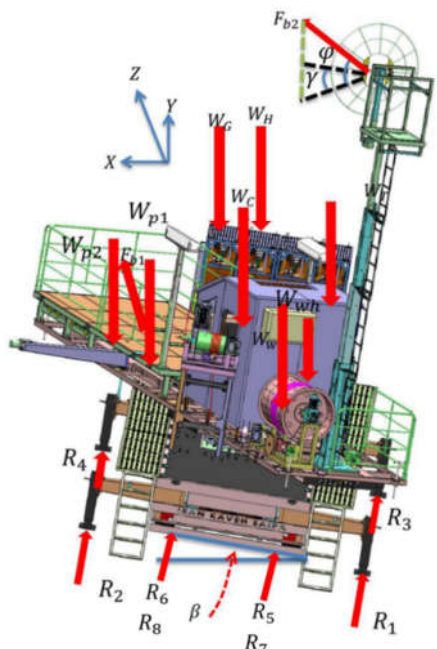
- گشتاور حول محورهای ایجادشده از اتصال پایه‌ها بیشتر از گشتاورهای منجر به واژگونی باشد. به طوری که شاخص گشتاور میزان تمایل سکو برای واژگونی را کمی سازی می‌کند.

- باید نیروهای پایه‌ها همواره فشاری باشد و بیشتر از میزان نیروی لهدیگی پایه‌ها نباشد. به طوری که این شاخص اطمینان لازم برای جلوگیری از سقوط یا فرورفتن در زمین و تحمل پایه‌ها در برابر نیروی وارده را تعیین می‌کند.

در مقاله حاضر هدف بررسی پایداری و ثبات سکوی بالون مقید در شرایط کاری تعیین‌شده است. مدل شبیه‌سازی شده سکو در محیط CAD/CAE بر اساس مدل واقعی ایجادشده، امکان ارزیابی پایداری سیستم سکو را ایجاد می‌کند. مسئله پایداری در دو حالت شامل قرارگیری سکو در سطح صاف و همچنین سطح شیب‌دار مورد بررسی قرار می‌گیرد. در سطح صاف مجموعه سکوی بالون مقید نسبت به افق دارای زاویه صفر و در سطح شیب‌دار سکوی بالون مقید با زاویه ۳ درجه قرار می‌گیرد.

مقاله به شرح زیر سازمان‌دهی شده است. در بخش دوم مدل سکوی بالون مقید در محیط CAD/CAE به طور کامل شبیه‌سازی می‌شود. در بخش سوم به بررسی شرط اول پایداری سکو که شامل قرارگیری مرکز جرم سکو در موقعیت‌های داخل چندضلعی پایه است پرداخته می‌شود. در بخش چهارم شرط دوم پایداری سکوی بالون مقید ارائه می‌شود. به دلیل اینکه تعداد نیروهای پایه‌ها از تعداد معادلات تعادل بیشتر است مسئله نامعین استاتیکی می‌باشد. با استفاده از

۱۰۰۰۰	وزن بخش ژنراتور	۷	W_G
۴۰۰۰۰	وزن قسمت رک کپسول‌های هلیوم	۸	W_H
۱۵۰۰۰	نیروی کشش بالون در قسمت شکم	۹	F_{b1}
۳۰۰۰	نیروی کشش بالون در قسمت دماغه	۱۰	F_{b2}



شکل ۲- طرحواره سکوی بالون مقید بر روی سطح شیب‌دار

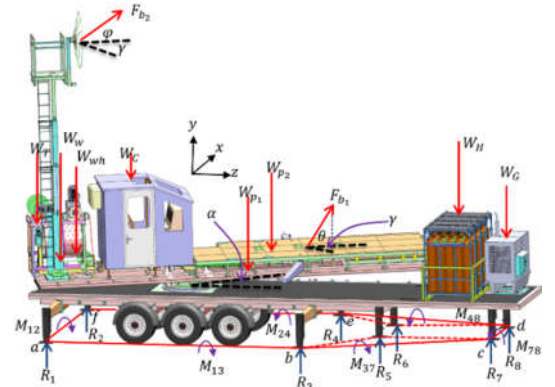
معادلات تعادل و روش برنامه‌ریزی خطی حداقل و حداکثر نیروهای عکس‌العملی مجاز پایه‌ها در بخش پنجم استخراج می‌شود. بخش ششم نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

۲- مدل سکوی بالون مقید

در بررسی مفهوم پایداری، احتمال واژگونی سیستم در موقعیت‌های مختلف قرارگیری سکو و شرایط مختلف بارگذاری بررسی می‌گردد. به‌منظور تحلیل تعادل سکوی بالون مقید در حالت‌های مختلف، مقادیر مربوط به نیروها و همچنین مرکز اعمال نیروها نسبت به مرکز یاتاقان چرخشی در جدول‌های ۱ و جدول ارائه‌شده است. بر اساس استاندارد پایداری سیستم‌های حمل‌ونقل، مقدار نیروهای بالون ۲۵ درصد بیشتر در نظر گرفته می‌شود [۲۱، ۲۲]. شکل یک طرحواره طراحی‌شده از سکو در محیط CAD/CAE را نمایش می‌دهد. مطابق شکل سیستم سکوی بالون مقید دارای چرخش با زاویه α است. از طرفی مجموعه بالون نیز دورانی حول مرکز سیستم دارد که این دوران با زاویه γ نشان داده‌شده است. همچنین بالون توسط دو طناب نگهداری می‌شود که این طناب‌ها دارای زاویه بار کششی اعمالی در قسمت شکم آن نسبت به سکو و زاویه بار کششی اعمالی در دماغه آن نسبت به دکل می‌باشد که به ترتیب با θ و ϕ نشان داده می‌شوند. همچنین در شکل طرحواره‌ای از سکو بر روی سطح شیب‌دار با زاویه β نشان داده‌شده است. تصویر سکوی بالون مقید ساخت شده در پژوهشگاه فضایی ایران و پژوهشکده رانشگرهای فضایی تبریز در شکل نشان داده‌شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود زاویه سطح شیب‌دار برابر با $\beta = 3^\circ$ در نظر گرفته شده است.



شکل ۳- سکوی بالون مقید ساخته شده در پژوهشکده رانشگرهای فضایی تبریز



شکل ۱- طرحواره سکوی بالون مقید بر روی سطح صاف

جدول ۲- فاصله مرکز جرم المان‌های مختلف سکو از مرکز یاتاقان چرخشی بر حسب متر

المان	W_{p1}	W_{p2}	W_w	W_{wh}	W_c	W_H
x	۰/۰۲	-۰/۰۲	۰/۷۴	-۰/۱	۰/۲۸	۰
y	۰/۳۳	-۰/۸۱	۱/۵۳	-۰/۶	۱/۷۵	۰/۸۸
z	۰/۷۷	۳/۶۴	-۳/۲۳	-۲/۸۲	-۱/۱۵	۷/۵۳

المان	W_{G}	W_T	R_1	R_2	R_3
x	۰/۵۷	۰	-۰/۰۴	۲/۲۴	-۲/۲۴
y	۰/۸۸	۰/۷۴	۳/۱۷	-۰/۷۴	-۰/۷۴

جدول ۱- مقادیر بارهای وارده به سکوی بالون مقید بر حسب نیوتن

پارامتر	زیرنویس	المان	مقدار
W_{p1}	۱	وزن قسمت پایین سکو	۲۱۰۰۰
W_{p2}	۲	وزن قسمت بالای سکو	۱۲۰۰۰
W_w	۳	مجموع وزن وینچ‌های اصلی، دیتا	۱۳۰۰۰
W_{wh}	۴	وزن وینچ دماغه	۶۰۰۰
W_c	۵	وزن کابین	۱۰۰۰۰
W_T	۶	وزن دکل	۲۰۰۰۰

z	۷/۵۳	۸/۷۹	-۳/۴۴	-۳/۳۵	-۳/۳۵	۳/۳۵
المان	R ₄	R ₅	R ₆	F _{b1}	F _{b2}	w
x	۲/۲۴	-۰/۷۳	۰/۷۳	۰/۱۲	۰	
y	-۰/۷۴	-۰/۷۴	-۰/۷۴	۰/۹	۶/۸۶	۲/۵
z	۳/۳۵	۵/۴	۵/۴	۳/۰۴	-۲/۹۶	

۳- بررسی پایداری سکو موقعیت مرکز جرم

بخش اول شرط پایداری این است که مرکز جرم همه بخش‌های سکوی بالون مقید در داخل چندضلعی ایجاد شده از پایه‌ها باشد. به طوری که با توجه به شکل می‌توان مشاهده کرد که مرکز جرم مجموعه در همه شرایط کارکردی در داخل هشت‌ضلعی ایجاد شده در پایه‌ها می‌باشد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که طراحی سازه سکوی بالون مقید از نظر موقعیت مرکز جرم دارای پایداری مناسبی می‌باشد.

۴- بررسی پایداری سکو از دیدگاه گشتاور

بخش دوم شرط پایداری، برتری مقدار گشتاور پایداری نسبت به گشتاور واژگونی است. طبق این شرط، سکو پایدار است اگر گشتاور حاصل از نیروهای پایدارکننده، M_s ، بیشتر از گشتاور حاصل از نیروهای منجر به واژگونی، M_0 ، حول محورهای فرضی گذرنده از پایه باشد. در نتیجه برای پایداری سکو باید رابطه زیر برقرار باشد:

$$\Delta M = M_s - M_0 > 0 \quad (1)$$

به طوری که:

$$\Delta M = \min \in (\Delta M_i), \quad \Delta M_i = M_{s_i} - M_{0_i} \quad (2)$$

که i محورهای واژگونی گذرنده از پایه‌ها می‌باشد. با توجه به اینکه سکو دارای ۸ پایه می‌باشد، محورهای حاصل از اتصال پایه‌ها به هم تشکیل یک هشت‌ضلعی غیر منظم می‌دهد. در واقع منطقه ایمن برای سکو مساحت تشکیل شده حاصل از پایه‌ها است. با این حال طبق فیزیک مسئله، احتمال واژگونی حول محورهای تشکیل دهنده هشت‌ضلعی نمایش داده شده در شکل خواهد بود. بدین منظور گشتاورهای پایداری و واژگونی در هر یک از محورهای هشت‌ضلعی ساخته شده با پایه‌ها باید محاسبه و مقایسه گردد. معادلات تعادل گشتاور حول محورهای فرضی حاصل از پایه‌ها به صورت زیر استخراج می‌گردد. در دو حالت $\beta = 0^\circ$ و $\beta = 3^\circ$ می‌باشد. تعادل گشتاوری ΔM_{24} در راستای محور z به شرح زیر است:

$$\begin{aligned} \Delta M_{24} = \cos^2 \beta \sum_{i=1}^6 W_i \left(\sin(\alpha + \zeta_i) d_i + \frac{w}{2} + 1 \right) \\ - F_9 \sin \theta \left(\sin(\alpha + \zeta_9) d_9 + \frac{w}{2} + 1 \right) \\ + F_9 \cos \theta \sin(\alpha - \gamma) y_9 \\ - F_{10} \sin \varphi \left(\sin(\alpha + \zeta_{10}) d_{10} + \frac{w}{2} + 1 \right) \\ + F_{10} \cos \varphi \sin(\alpha - \gamma) y_{10} \end{aligned} \quad (3)$$

که در رابطه (۳)، $d_i = \sqrt{x_i^2 + z_i^2}$ برابر با فاصله بین مرکز جرم المان i ام مجموعه تا مرکز یاتاقان چرخشی و $\zeta_i = \arctan(x_i/z_i)$ زاویه این مرکز جرم المان نسبت به محور z عبوری از مرکز یاتاقان چرخشی می‌باشد. همچنین تعادل گشتاوری ΔM_{13} در راستای محور

z عبارتند از:

$$\begin{aligned} \Delta M_{13} = \cos^2 \beta \sum_{i=1}^6 W_i \left(\sin(\alpha + \zeta_i) d_i - \frac{w}{2} - 1 \right) \\ + F_9 \sin \theta \left(-\sin(\alpha + \zeta_9) d_9 + \frac{w}{2} + 1 \right) \\ + F_9 \cos \theta \sin(\alpha - \gamma) y_9 \\ + F_{10} \sin \varphi \left(-\sin(\alpha + \zeta_{10}) d_{10} + \frac{w}{2} + 1 \right) \\ + F_{10} \cos \varphi \sin(\alpha - \gamma) y_{10} \end{aligned} \quad (4)$$

همچنین تعادل گشتاوری ΔM_{12} حول محور x برابر است با:

$$\begin{aligned} \Delta M_{12} = \sin \beta \cos \beta \sum_{i=1}^8 W_i y_i + \\ \cos^2 \beta \left[\sum_{i=7}^8 W_i (z_i - z_{R2}) - \sum_{i=1}^6 W_i (\cos(\alpha + \zeta_i) d_i + z_{R2}) \right] \\ + F_9 (\cos \theta \cos(\alpha - \gamma) y_9 + \sin \theta (\cos(\alpha + \zeta_9) d_9 - z_{R2})) \\ + F_{10} (\cos \varphi \cos(\alpha - \gamma) y_{10} + \sin \varphi (\cos(\alpha + \zeta_{10}) d_{10} - z_{R2})) \end{aligned} \quad (5)$$

و برای ΔM_{78} حول محور x داریم:

$$\begin{aligned} \Delta M_{78} = \sin \beta \cos \beta \sum_{i=1}^8 W_i y_i \\ \cos^2 \beta \left[\sum_{i=7}^8 W_i (z_i - z_{R8}) - \sum_{i=1}^6 W_i (\cos(\alpha + \zeta_i) d_i + z_{R8}) \right] \\ + F_9 (\cos \theta \cos(\alpha - \gamma) y_9 + \sin \theta (\cos(\alpha + \zeta_9) d_9 + z_{R8})) \\ + F_{10} (\cos \varphi \cos(\alpha - \gamma) y_{10} + \sin \varphi (\cos(\alpha + \zeta_{10}) d_{10} + z_{R8})) \end{aligned} \quad (6)$$

همچنین گشتاور ناشی از تمامی نیروهای اعمالی حول محور حاصل از پایه‌های R_3 و R_7 یعنی ΔM_{37} ، و حول محور حاصل از پایه‌های R_4 و R_8 یعنی ΔM_{48} به صورت زیر تعریف می‌شود. که a_{mn} و b_{mn} عرض از مبدأ و طول از مبدأ خط گذرنده از دو پایه R_n و R_m می‌باشد. در ادامه میزان گشتاور پایداری در حالت‌های مختلف قرارگیری اجزای سکو شامل $0 \leq \alpha \leq 360^\circ$ و $30 \leq \theta \leq 90^\circ$ و $\theta = \varphi$ در دو حالت $\gamma = 0^\circ$ و $\gamma = 45^\circ$ بررسی می‌گردد. شرایط پایداری در هر یک از حالات فوق با استفاده از نرم‌افزار متلب بررسی و به صورت نمودار رسم می‌گردد که در شکل یک حالت به صورت خاص رسم شده است. به طوری که این شکل برای تعیین M_{24} در حالت سطح صاف در نظر گرفته شده است.

$$\begin{aligned} \Delta M_{mn} = \sin \beta \cos \beta \sum_{i=1}^8 W_i y_i \\ + \cos^2 \beta \sum_{i=1}^6 W_i \left[\frac{a_{mn} \cos(\alpha + \zeta_i) d_i + b_{mn} \sin(\alpha + \zeta_i) d_i + 1}{\sqrt{a_{mn}^2 + b_{mn}^2}} \right] \\ + F_{b1} \sin \theta \left[\frac{a_{mn} \cos(\alpha + \zeta_i) d_i + b_{mn} \sin(\alpha + \zeta_i) d_i + 1}{\sqrt{a_{mn}^2 + b_{mn}^2}} \right] \\ + F_{b2} \sin \varphi \left[\frac{a_{mn} \cos(\alpha + \zeta_i) d_i + b_{mn} \sin(\alpha + \zeta_i) d_i + 1}{\sqrt{a_{mn}^2 + b_{mn}^2}} \right] \\ - F_{b1} \sin(\alpha - \gamma) \cos \theta h_{b1} - F_{b2} \sin(\alpha - \gamma) \cos \varphi h_{b2} \end{aligned} \quad (7)$$

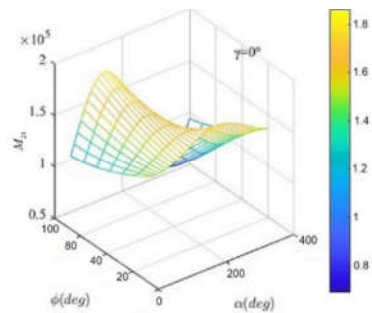
۳۰	۱۲۰	۱۶۲	۸۰	۳۱۰	۳۳۱	۰	M ₃₇
۳۰	۱۴۰	۱۵۷	۸۰	۳۲۰	۳۳۳	۴۵	
۹۰	۲۹۰	۲۲۳	۹۰	۱۱۰	۳۱۶	۰	M ₄₈
۳۰	۲۳۰	۲۱۰	۹۰	۱۰۰	۳۱۹	۴۵	

۵- بررسی پایداری سکو از دیدگاه نیرویی

بررسی نیروهای پایه‌ها از دیدگاه پایداری بسیار حائز اهمیت است. هنگامی که نیروهای پایه‌ها منفی باشد احتمال جدایش پایه‌ها از کف زمین و ناپایداری سیستم وجود دارد. لذا تعیین نیروهای وارده بر پایه‌های سکوی بالون مقید، روشی مؤثر برای بررسی واژگونی سکو با خرابی پایه‌ها است. با توجه به اینکه تعداد پایه‌های سکوی بالون مقید در این مقاله بیشتر از ۳ می‌باشد، رفتار سکو نامعین استاتیکی خواهد بود به طوری که تعداد معادلات استاتیکی کمتر از تعداد مجهولات است. در نتیجه نیروهای اعمالی از طرف زمین بر پایه‌ها را نمی‌توان به طور مستقیم تنها با استفاده از معادلات تعادل تعیین نمود. یک راه‌حل برای تعیین نیروهای پایه‌ها سازگاری سیستم نامعین با قیدهای پایداری است. در این حالت مسئله، به یک مسئله بهینه شامل توابع هدف خطی چندگانه و توابع قیود خطی تبدیل خواهد شد. راه‌حل بهینه برای یک مسئله برنامه‌ریزی خطی همیشه در مرز یک بازه شدنی قرار دارد. در واقع در این روش هدف تعیین بازه‌ی قابل قبول نیروهای پایه‌ها می‌باشد که این بازه نیرویی قیود پایداری را باید برقرار کنند. برای جلوگیری از واژگونی جرثقیل، نیروهای پایه‌ها باید بزرگ‌تر یا مساوی صفر باشند. بنابراین نیروهای پایه‌ها، به‌عنوان متغیرهای طراحی انتخاب می‌شوند. در مسئله بهینه‌سازی اگر پاسخ تهی نباشد و بازه قیود شدنی تشخیص داده شود، می‌توان مرزهای پایین و بالایی هر نیروی پایه را به دست آورد [۲۳-۲۵]. وقتی بازه شدنی تهی باشد، نیروهای پایه‌ها نمی‌توانند مجموعه بازه‌ها را برآورده کنند و باعث واژگونی جرثقیل خواهند شد. مسئله به دست آوردن حد پایینی نیروهای پایه‌ها را می‌توان با در نظر گرفتن نیروهای پایه‌ها به‌عنوان تابع هدف فرمول‌بندی کرد. هدف طراحی، به حداقل رساندن نیروی پایه‌ها و به‌طور هم‌زمان، برقراری مجموعه قیود نامساوی است. به‌طور مشابه، حد بالایی نیروی پایه‌ها، مانند حداکثر کردن نیروی پایه‌ها با برقراری مجموعه قیود نامساوی است. پایداری واژگونی را می‌توان با تعیین اینکه آیا نیروها در یک بازه شدنی هستند و یا بالاتر یا کمتر از صفر هستند، بررسی نمود؛ بنابراین اگر نیروهای خروجی با مقادیر غیر منفی تعادل استاتیکی را برآورده کنند، سکو پایدار خواهد بود. در غیر این صورت، سکو ناپایدار است. برای اینکه یک جسم صلب در حالت تعادل باشد، نیروی خالص و گشتاور خالص روی بدنه باید برابر با صفر باشد. این وضعیت تعادل را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد. به‌طوری که تعادل نیرو در راستای محور y به‌صورت زیر است:

$$\sum_{i=1}^8 R_i - \cos\beta \sum_{i=1}^8 W_i + F_0 \sin\theta + F_{10} \sin\phi = 0 \quad (8)$$

و تعادل گشتاوری در راستای محور x عبوری از مرکز یاتاقان چرخشی به‌صورت زیر بیان می‌شود:



شکل ۴- گشتاور آستانه واژگونی در حالت سطح صاف با شرط

به علت تعدد نمودارها صرفاً حالات اکستریم در دو حالت سطح صاف و سطح شیب‌دار از نمودارها استخراج و به ترتیب در جدول‌های جدول و جدول نمایش داده شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول‌های جدول و جدول مقادیر گشتاورهای پایداری در جهت تثبیت سکو در تمامی شرایط کارکردی مثبت بوده و شرط دوم پایداری برای مسئله برقرار است.

جدول ۳- گشتاورهای آستانه واژگونی در حالت سطح صاف

شرط کمینه گشتاور	شرط بیشینه گشتاور	شرط کمینه گشتاور (KN)		شرط بیشینه گشتاور (KN)		γ	
		ϕ	α	ϕ	α		
M ₂₄	۰	۹۰	۲۹۰	۲۵/۵	۹۰	۱۱۰	۱۵۴
		۹۰	۲۸۰	۳۴/۲	۹۰	۱۰۰	۱۵۴
M ₁₃	۰	۹۰	۱۱۰	۳۵/۵	۹۰	۲۹۰	۱۵۲/۷
		۹۰	۱۰۰	۳۴/۲	۳۰	۲۸۰	۱۵۴
M ₁₂	۰	۹۰	۱۰	۶۳۹	۳۰	۳۰۰	۷۵۷
		۹۰	۱۰	۶۳۶	۳۰	۱۲۰	۷۶۳
M ₇₈	۰	۹۰	۲۰۰	۴۸	۳۰	۱۲۰	۱۹۷
		۹۰	۱۹۰	۴۷	۳۰	۳۰۰	۲۰۳
M ₃₇	۰	۳۰	۱۲۰	۱۵۶	۸۰	۳۱۰	۳۲۵
		۳۰	۱۴۰	۱۵۱	۸۰	۳۲۰	۳۲۸
M ₄₈	۰	۳۰	۶۰	۲۱۳	۹۰	۱۱۰	۳۱۰
		۳۰	۲۰۰	۲۰۱	۹۰	۱۰۰	۳۱۲

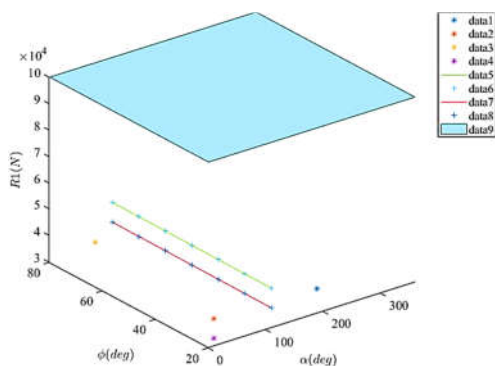
جدول ۴- گشتاورهای آستانه واژگونی در حالت سطح شیب‌دار

شرط کمینه گشتاور	شرط بیشینه گشتاور	شرط کمینه گشتاور (KN)		شرط بیشینه گشتاور (KN)		γ	
		ϕ	α	ϕ	α		
M ₂₄	۰	۹۰	۲۹۰	۳۵	۹۰	۱۱۰	۱۵۲
		۹۰	۲۸۰	۳۴	۹۰	۱۰۰	۱۵۳
M ₁₃	۰	۹۰	۱۱۰	۳۵	۹۰	۲۹۰	۱۵۲
		۹۰	۱۰۰	۳۴	۹۰	۲۸۰	۱۵۳
M ₁₂	۰	۹۰	۲۰	۶۴۲	۳۰	۳۰۰	۷۶۱
		۹۰	۱۰	۶۴۰	۳۰	۱۲۰	۷۶۷
M ₇₈	۰	۹۰	۲۰۰	۴۱	۳۰	۱۲۰	۱۹۰
		۹۰	۱۹۰	۴۰	۳۰	۳۰۰	۱۹۶

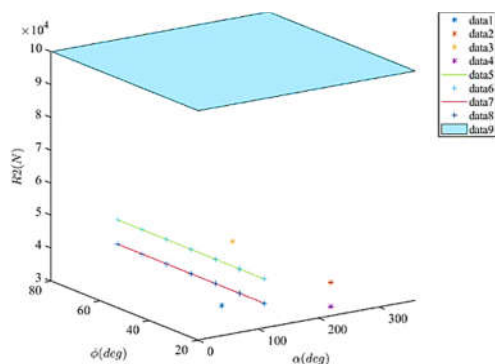
نیروی صفر است فضای مجاز برای نیروهای پایه‌ها می‌باشد. بازه دقیق‌تر نیروی مجاز از طریق مسئله بهینه‌سازی استخراج می‌شود. با توجه به اینکه مقدار نیروها هیچ‌گاه منفی نمی‌شود و بازه‌های شدنی تهی نمی‌باشند و مقدار تمامی نیروها قیود را برقرار می‌کنند و کمتر از مقدار لهیدگی هستند، سیستم پایدار می‌باشد.

جدول ۵- شرح داده‌های نشان داده‌شده در شکل‌ها

داده‌های شکل	شرح داده‌های شکل
data1	باوجود نیروی طناب و وزن رک $\gamma = 0^\circ$
data2	باوجود نیروی طناب و وزن رک $\gamma = 45^\circ$
data3	عدم وجود وزن رک و وجود نیروی طناب $\gamma = 0^\circ$
data4	عدم وجود وزن رک و وجود نیروی طناب $\gamma = 45^\circ$
data5	عدم وجود نیروی طناب و وجود وزن رک $\gamma = 0^\circ$
data6	عدم وجود نیروی طناب و وجود وزن رک $\gamma = 45^\circ$
data7	عدم وجود نیروی طناب و عدم وجود وزن رک $\gamma = 0^\circ$
data8	عدم وجود نیروی طناب و عدم وجود وزن رک $\gamma = 45^\circ$



شکل ۵- حداکثر مقدار نیروی R_1 بر روی سطح صاف



شکل ۶- حداکثر مقدار نیروی R_2 بر روی سطح صاف

$$-\sum_{i=1}^8 R_i z_{R_i} + \sin \beta \cos \beta \sum_{i=1}^8 W_i y_i + \cos^2 \beta \left(W_7 z_7 + W_8 z_8 + \sum_{i=1}^6 W_i \cos(\alpha + \zeta_i) d_i \right) + F_9 (\cos(\alpha - \gamma) \cos \theta y_9 - \sin \theta \cos(\alpha + \zeta_9) d_9) + F_{10} (\cos(\alpha - \gamma) \cos \phi y_{10} - \sin \phi \cos(\alpha + \zeta_9) d_{10}) = 0 \quad (9)$$

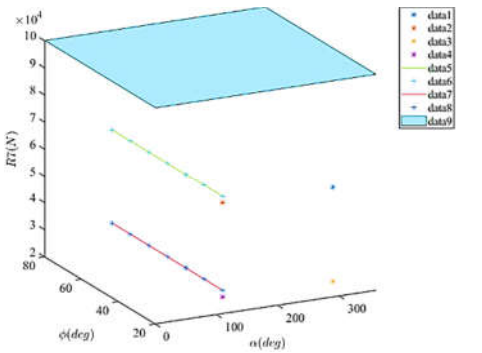
همچنین و تعادل گشتاوری در راستای محور z عبوری از مرکز باتاقان چرخشی عبارتند از:

$$\sum_{i=1}^8 R_i x_{R_i} + \sin \beta \cos \beta \sum_{i=1}^8 W_i y_i - \cos^2 \beta \sum_{i=1}^6 W_i \sin(\alpha + \zeta_i) d_i + F_9 (\sin \theta \sin(\alpha + \zeta_9) d_9 - \sin(\alpha - \gamma) \cos \theta y_9) + F_{10} (\sin \phi \sin(\alpha + \zeta_{10}) d_{10} - \sin(\alpha - \gamma) \cos \phi y_{10}) = 0 \quad (10)$$

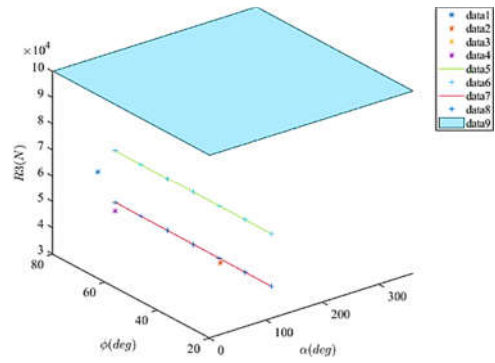
همچنین طبق شرط پایداری باید نیروهای پایه‌ها نامنفی باشد؛ بنابراین معادلات نامساوی به‌صورت زیر استخراج می‌شود:

$$R_i \geq 0 \quad i=1 \dots 8 \quad (11)$$

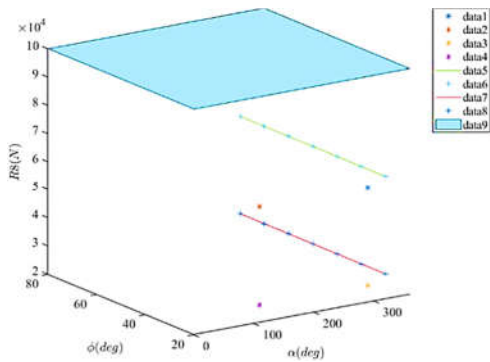
در مسئله بهینه‌سازی رابطه (۱۱)، به‌عنوان تابع هدف و معادلات (۸) تا (۱۰) به‌عنوان قیود مسئله تعریف می‌شوند. با توجه به اینکه تابع هدف و همچنین قیود مسئله چندجمله‌ای خطی می‌باشند، از روش بهینه‌سازی برنامه‌ریزی خطی استفاده می‌شود. روش برنامه‌ریزی خطی به معنای پیدا کردن مقدار اکسترمم یک تابع خطی بر روی یک چندضلعی می‌باشد [۲۳-۲۵]. با حل مسئله بهینه‌سازی مقدار حداقل و حداکثر نیروهای پایه‌ها با کمک نرم‌افزار MATLAB استخراج می‌شود. حداقل مقدار تمامی نیروهای پایه‌ها برابر با صفر و حداکثر مقدار آن‌ها ۱۰۰ کیلو نیوتن در نظر گرفته شده است. این مقدار نیرو با استفاده از روش المان محدود به‌دست‌آمده است و برابر با مقدار نیرویی است که در آن پایه‌ها از نظر میزان تنش قابل‌تحمل بیشینه مقدار است. نمودارها برای دو حالت سطح صاف و سطح شیب‌دار رسم شده‌اند. باید توجه داشت که در تحلیل نتایج $0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$ ، $30^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ و $\theta = \phi$ در نظر گرفته شده است. این بدان معنی است که مسئله چرخش سکو به‌صورت واقعی شبیه‌سازی شده است. به‌منظور جلوگیری از ازدحام و پیچیدگی در نمودارها، میزان حداقل نیرو و بازه شدنی میان حداقل و حداکثر نیرو نمایش داده نشده است. بازه شدنی، بازه بین مقدار صفر نیرو و مقدار حداکثر نیرو در هر یک از حالات است. توضیح حالات مختلف نمودارها در جدول ۵ نمایش داده‌شده است. این توضیحات برای تمامی نمودارها یکسان است. در حالت‌های عدم وجود نیروی طناب مقدار حداکثر در یک خط اتفاق می‌افتد نه یک نقطه. همان‌طور که در نمودارها مشاهده می‌شود بیشترین مقدار نیروها بر روی پایه‌های ۵ و ۶ می‌باشد. در بحث پایداری سکو می‌بایست پایداری هر پایه را از دیدگاه مقاومت در برابر لهیدگی نیز بررسی نماییم. در نمودارهای سطح نیرویی که منجر به ایجاد لهیدگی در پایه می‌شود نیز در شکل‌ها رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان حداکثر نیروی پایه‌ها از میزان لهیدگی کمتر می‌باشد. در واقع فضای مابین سطح حاصل از نیروی لهیدگی و سطح قید پایینی نیرو که سطح



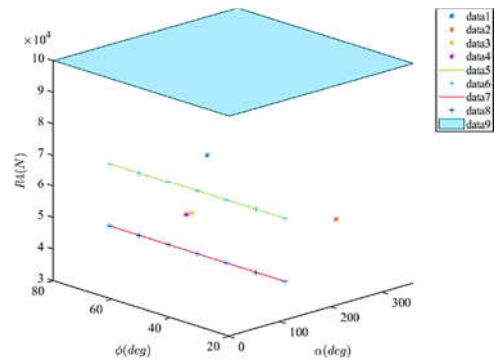
شکل ۱۱- حداکثر مقدار نیروی R_7 بر روی سطح صاف



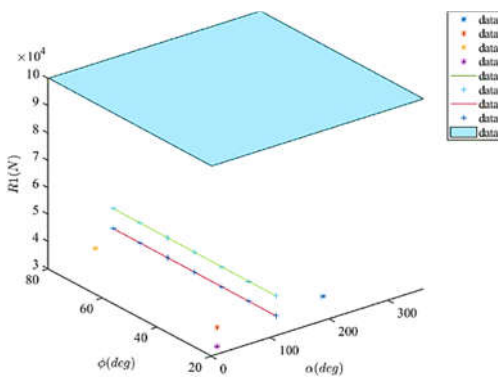
شکل ۷- حداکثر مقدار نیروی R_3 بر روی سطح صاف



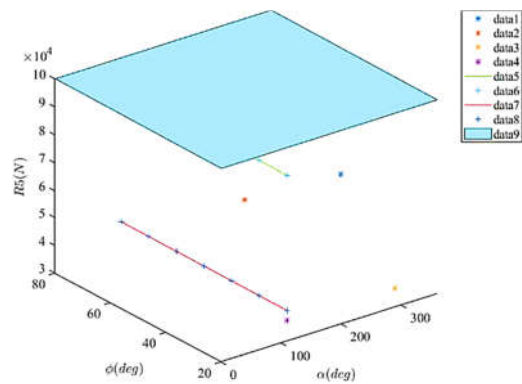
شکل ۱۲- حداکثر مقدار نیروی بر روی سطح صاف



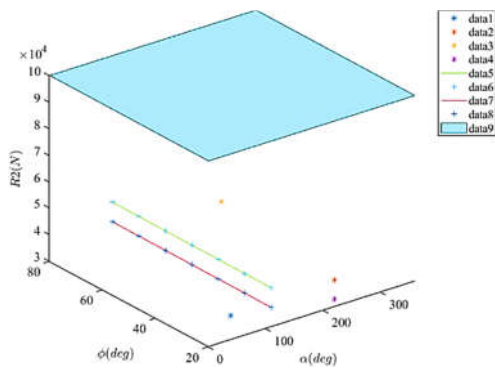
شکل ۸- حداکثر مقدار نیروی R_4 بر روی سطح صاف



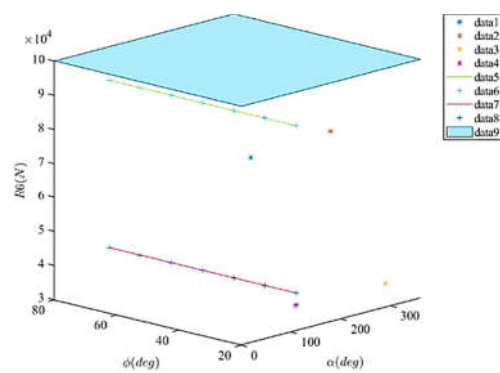
شکل ۱۳- حداکثر مقدار نیروی R_1 بر روی سطح شیب‌دار



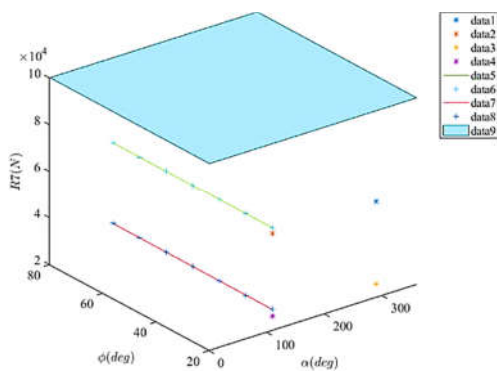
شکل ۹- حداکثر مقدار نیروی R_5 بر روی سطح صاف



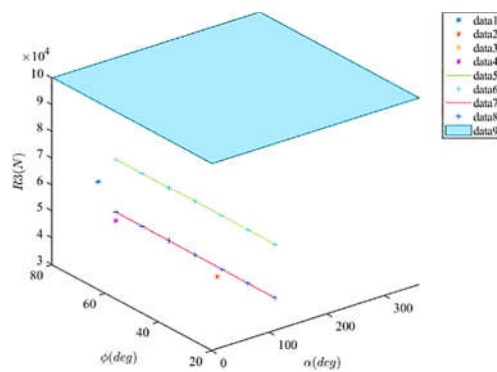
شکل ۱۴- حداکثر مقدار نیروی R_2 بر روی سطح شیب‌دار



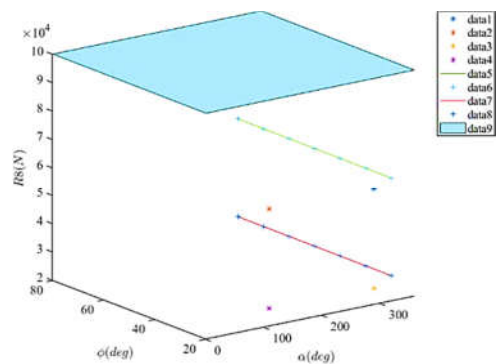
شکل ۱۰- حداکثر مقدار نیروی R_6 بر روی سطح صاف



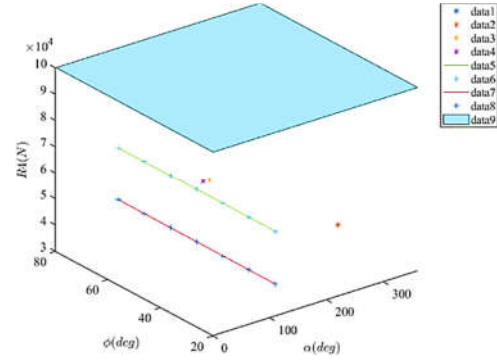
شکل ۱۹- حداکثر مقدار نیروی R_7 بر روی سطح شیب‌دار



شکل ۱۵- حداکثر مقدار نیروی R_3 بر روی سطح شیب‌دار



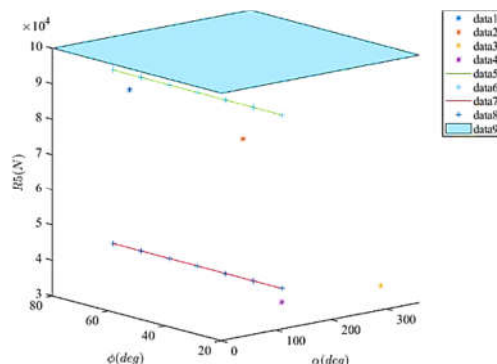
شکل ۲۰- حداکثر مقدار نیروی R_8 بر روی سطح شیب‌دار



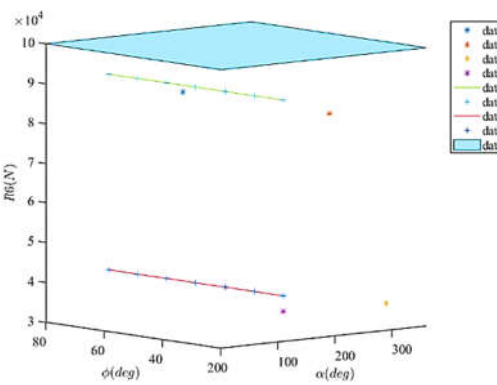
شکل ۱۶- حداکثر مقدار نیروی R_4 بر روی سطح شیب‌دار

۶- نتیجه‌گیری

بحث پایداری یکی از مباحث مهم در سکوی بالون مقید می‌باشد. با توجه به ساختار سکو و اجزای آن احتمال واژگونی در حین عملکرد وجود دارد. در این مقاله به منظور بررسی مفهوم پایداری و اطمینان از ایمنی سکوی طراحی شده، موقعیت‌های مختلف سیستم سکوی بالون مقید و شرایط مختلف واژگونی سیستم بررسی گردید. مسئله پایداری در دو حالت سطح صاف و همچنین سطح شیب‌دار مورد بررسی قرار گرفت. در سطح صاف مجموعه سکوی بالون مقید نسبت به افق دارای زاویه صفر بوده در حالی که در حالت شیب‌دار سکوی بالون مقید بر روی سطح شیب‌دار با زاویه ۳ درجه قرار داشت. در مسئله بررسی پایداری، به این دلیل که صرفاً معادلات تعادل استاتیکی منظور شده است، سیستم نامعین می‌باشد. در این حالت برای سکو با پایه‌های متعدد از روش برنامه‌ریزی خطی برای ارزیابی نیروهای عکس‌العملی مجاز پایه‌ها با محدودیت‌های پایداری استفاده شد. دو کمیت گشتاور و نیرو به صورت تابعی از متغیرهای طراحی سکو استخراج شدند. با استفاده از خروجی تحلیل پایداری می‌توان سکو را با حصول اطمینان از پایداری و ثبات و به صورت ایمن طراحی نمود. در نهایت رویکرد حداقل/حداکثر برای افزایش کارایی محاسباتی در ارزیابی نیروهای پایه‌ها اتخاذ شده است. طبق نتایج به دست آمده سکوی طراحی شده در شرایط کاری موجود پایدار می‌باشد. با توجه به نتایج ارائه شده در این مقاله می‌توان مشاهده کرد که سیستم در حالت‌های مختلف دارای پایداری بوده و از نظر ثبات گشتاوری دچار مشکل نخواهد بود.



شکل ۱۷- حداکثر مقدار نیروی R_5 بر روی سطح شیب‌دار



شکل ۱۸- حداکثر مقدار نیروی R_6 بر روی سطح شیب‌دار

- [22] International Organization for Standardization. ISO 4304:1998. Tower cranes, Stability requirements. PN: ISO; 1998.
- [23] Hosseini-Nodeh Z, Khanjani-Shiraz R, Pardalos PM. Distributionally robust portfolio optimization with second-order stochastic dominance based on wasserstein metric. *Information Sciences*. 2022; 613: 828-852.
- [24] Hosseini-Nodeh Z, Khanjani-Shiraz R, Pardalos PM. Portfolio optimization using robust mean absolute deviation model: Wasserstein metric approach. *Finance Research Letters*. 2023; 54: 103735.
- [25] Khanjani-Shiraz R, Babapour-Azar A, Hosseini-Nodeh Z, Pardalos PM. Distributionally robust joint chance-constrained support vector machines. *Optimization Letters*. 2023; 17(2): 299-332.
- [1] Keighobadi J, Faraji J, Janabi-Sharif F, Hamed MA. Design and experimental evaluation of block-pulse functions and Legendre polynomials observer for attitude-heading reference system. *ISA Transactions*. 2021; 116: 232-244.
- [2] Faraji J, Tale-Masouleh M, Saket M, Radsereht M. Design and Simulation Non-Singular Backstepping Terminal Sliding Mode Control and Extended Kalman Filter for Quadrotor. *Modares Mechanical Engineering*. 2018; 18(1): 219-230.
- [3] Rafatnia S, Faraji J, Keighobadi J. Design and implementation of a novel inertial sensor errors model in extended Kalman filter based on genetic algorithm. *Journal of Mechanical Engineering*. 2020; 50(3): 97-106.
- [4] Keighobadi J, Hosseini-Pishrobat M, Faraji J. Adaptive neural dynamic surface control of mechanical systems using integral terminal sliding mode. *Neurocomputing*. 2020; 379: 141-151.
- [5] Keighobadi J, Vosoughi H, Faraji J. Design and implementation of a model predictive observer for AHRs. *GPS Solutions*. 2018; 22(1): 29-47.
- [6] Cekus D, Depta F, Kubanek M, Kuczyński Ł, Kwiaton P. Event visualization and trajectory tracking of the load carried by rotary crane. *Sensors*. 2022; 22(2): 1-15.
- [7] Kacalak W, Budniak Z, Majewski M. Modelling and analysis of the positioning accuracy in the loading systems of mobile cranes. *Materials*. 2022; 15(23): 8426-8451.
- [8] Romanello G. A graphical approach for the determination of outrigger loads in mobile cranes. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. 2022; 50(3): 767-780.
- [9] Urbaś A, Augustynek K, Stadnicki J. Kinetic Energy-Based Indicators to Compare Different Load Models of a Mobile Crane. *Materials*. 2022; 15(22): 8156-8167.
- [10] Janusz J, Klosiński J. Influence of the selected control strategies of mobile crane motions on its stability. *Acta Mechanica et Automatica*. 2010; 10(2): 74-80.
- [11] Jeng SL, Yang CF, Chieng WH. Outrigger force measure for mobile crane safety based on linear programming optimization. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. 2010; 38(2): 145-170.
- [12] Rauch A, Singhose W, Fujioka D, Jones T. Tip-over stability analysis of mobile boom cranes with swinging payloads. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 2013; 135(3): 031008.
- [13] Kacalak W, Budniak Z, Majewski M. Stability assessment as a criterion of stabilization of the movement trajectory of mobile crane working elements. *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*. 2018; 23(1): 65-77.
- [14] Kacalak W, Budniak Z, Majewski M. Crane stability assessment method in the operating cycle. *Transport Problems*. 2017; 12(4): 141-151.
- [15] Abdel-Rahman EM, Nayfeh AH, Masoud ZN. Dynamics and control of cranes: A review. *Journal of Vibration and control*. 2003; 9(7): 863-908.
- [16] Arena A, Lacarbonara W, Casalotti A. Payload oscillations control in harbor cranes via semi-active vibration absorbers: modeling, simulations and experimental results. *Procedia engineering*. 2017; 199: 501-509.
- [17] Cekus D. Modeling and simulation research of laboratory truck crane motion. *Systems: journal of transdisciplinary systems science*. 2012; 16(2): 93-103.
- [18] Herbin P, Pajor M. Modeling direct and inverse kinematics of loading crane with redundant degrees of freedom structure using Matlab. *Modelowanie Inzynierskie*. 2016; 27(58): 44-50.
- [19] Trąbka A. The influence of clearances in a drive system on dynamics and kinematics of a telescopic crane. *acta mechanica et automatica*. 2015; 9(1): 9-13.
- [20] Neitzel RL, Seixas NS, Ren KK. A review of crane safety in the construction industry. *Applied occupational and environmental hygiene*. 2001; 16(12): 1106-1117.
- [21] International Organization for Standardization. ISO 4305:2014. Mobile Cranes-Determination of stability. Geneva: ISO; 2014.