

بررسی تأثیر پارامترهای هندسی بر عملکرد استند سنجش تراست و بهینه‌سازی طراحی آن با استفاده از الگوریتم ژنتیک

مسعود دهناد^{۱*}، مرتضی فرهید^۱، سینا اخباری^۱، آرزو اسماعیلی^۱

^۱ محقق، پژوهشکده رانشگرهای فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تبریز، ایران

^۲ استادیار، پژوهشکده رانشگرهای فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تبریز، ایران

برجسته‌ها

- مدل‌سازی تحلیلی رفتار دینامیکی و استاتیکی یک استند سنجش تراست
- بررسی میزان اهمیت و تأثیرگذاری پارامترهای هندسی استند بر عملکرد آن
- طراحی بهینه با استفاده از الگوریتم ژنتیک
- ساخت نمونه و صحنه‌گذاری نتایج

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۲۸

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۷/۱۸

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۵

ارائه برخط: ۱۴۰۱/۰۹/۲۱

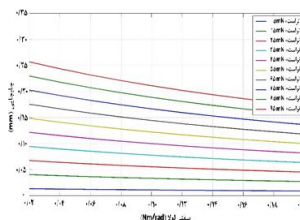
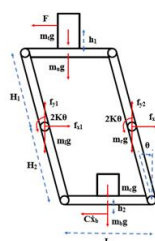
*نویسنده مسئول:

m.dehnad@isrc.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

استند سنجش تراست
پارامتر هندسی
پاسخ دینامیکی و استاتیکی
روش الگوریتم ژنتیک
مدل‌سازی و ساخت

چکیده گرافیکی



چکیده

در این مقاله، میزان تأثیرگذاری پارامترهای هندسی یک استند سنجش تراست در محدوده میلی‌نیوتنی و برای رانشگرهای الکتریکی، بر عملکرد آن بررسی می‌شود. برای اندازه‌گیری تراست رانشگرهای الکتریکی باید از سیستمی استفاده نمود که نیروی تراست را از نیروی وزن رانشگر تفکیک کند. به همین دلیل سیستم‌های اندازه‌گیری تراست بر پایه پاندول طراحی شده‌اند. پارامترهای هندسی استند سنجش تراست همچون طول بازوها، جرم بخش‌های مختلف و سفتی لولاها بر عملکرد کلی سیستم شامل پاسخ دینامیکی و استاتیکی آن (به‌عنوان مثال مقدار جابجایی، فرکانس طبیعی و زمان تثبیت نوسانات) تأثیرگذار می‌باشند. بدین منظور در ابتدا مدل تحلیلی رفتار یک استند سنجش تراست با پیکربندی پاندول معکوس به دست می‌آید. سپس با استفاده از نتایج حاصل، طراحی بهینه چند نمونه استند بر اساس الزامات فیزیکی مشخص شده و با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام می‌پذیرد. در انتهای کار نیز یک نمونه استند سنجش تراست با بیشترین مقدار نیروی قابل‌اندازه‌گیری ۱۰۰ میلی‌نیوتن بر اساس مشخصات به‌دست‌آمده از بخش بهینه‌سازی، ساخته شده و با صحنه‌گذاری نتایج حاصل از مدل تحلیلی، مقدار خطای مدل کمتر از ۶ درصد محاسبه می‌شود.

۱- مقدمه

جورن [۵] از جمله استندهایی با پیکربندی پاندول آویزان هستند.

سیستم اندازه‌گیری تراست با پیکربندی پاندول معکوس مشابه با پاندول آویزان بوده ولی رانشگر در انتهای بالایی بازو و وزنه‌های تعادلی در انتهای پایینی آن قرار گرفته‌اند. پاندول‌های معکوس به دلیل حساسیت به نیروهای کوچک ذاتاً ناپایدار بوده و در مقایسه با پاندول‌های آویزان دارای ابعاد و حجم کمتری می‌باشند. تارتلر [۶]، بیجیستر [۷] و کوکال [۸] در پژوهش‌های خود به تفضیل درباره طراحی، ساخت و تست این نوع استند پرداخته‌اند. خو و واکر [۹] نیز نوع خاصی از سیستم اندازه‌گیری تراست با پیکربندی پاندول معکوس را معرفی کرده‌اند.

اما در سیستم اندازه‌گیری تراست با پیکربندی پاندول پیچشی، محور دوران بازوی سیستم موازی با جاذبه زمین بوده که به استقلال سیستم از نیروی وزن رانشگر منجر می‌شود. سیستم‌های پاندول پیچشی حساسیت و پایداری بیشتری از پاندول‌های معکوس دارند. وجود وزنه‌های تعادلی، حساسیت سیستم به اثرات جاذبه را کمتر می‌کند، اما در طرف مقابل به دلیل استفاده از بازوی بلند، موجب افزایش ابعاد سیستم می‌گردد. نوع دیگر این نوع سیستم اندازه‌گیری تراست، دارای جهت حرکت موازی با جاذبه زمین بوده که استفاده از آن را عمدتاً برای دامنه حرکتی پایین محدود می‌کند. در نتیجه استند با پاندول پیچشی معمولاً برای اندازه‌گیری تراست در محدوده نانونیوتن مانند کارهای سونی و روی [۱۰] و دسوزا و کتسدور [۱۱] و یا محدوده میکرونیوتن همچون سیستم‌های معرفی شده توسط یانگ و همکاران [۱۲]، کویزومی و همکاران [۱۳]، تانگ و همکاران [۱۴]، لون و لاو [۱۵]، یانگ و همکاران [۱۶] و گیلپین و همکاران [۱۷] بکار می‌رود. هرچند نمونه‌هایی از سیستم اندازه‌گیری تراست با پیکربندی پاندول پیچشی برای محدوده میلی‌نیوتنی و فراتر مانند استندهای معرفی شده توسط میرژاک [۱۸] و ژانگ و همکاران [۱۹] نیز ارائه شده است.

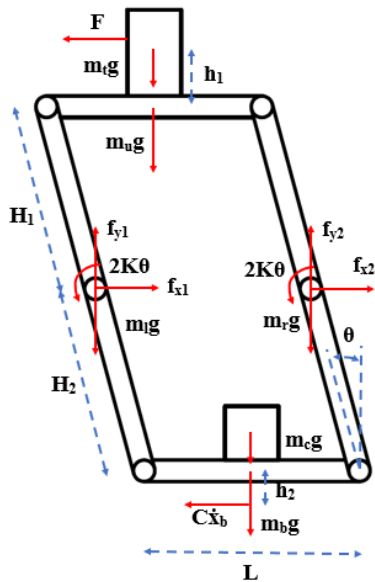
هدف از انجام این پژوهش، بررسی تأثیر پارامترهای هندسی استند سنجش تراست با پیکربندی پاندول معکوس همچون طول بازوها، طول صفحات بالایی و پایینی، طول بازوی

رانشگرهای فضایی عموماً به دودسته کلی رانشگرهای شیمیایی و الکتریکی تقسیم می‌گردند. نیروی تراست در رانشگرها از خروج پیشران با سرعت زیاد از نازل به وجود می‌آید. در رانشگرهای شیمیایی این سرعت زیاد پیشران از احتراق حاصل می‌شود اما در رانشگرهای الکتریکی ناشی از عواملی با ماهیت الکتریکی مانند گرمایش الکتریکی، نیروهای الکترواستاتیکی و یا الکترومغناطیسی می‌باشد.

به‌طور کلی رانشگرهای الکتریکی در مقایسه با رانشگرهای شیمیایی دارای جرم کم، ضربه ویژه بالا، تراست پایین و نسبت تراست به جرم بسیار پایین می‌باشند؛ بنابراین سیستم‌های متداول اندازه‌گیری تراست که برای رانشگرهای شیمیایی استفاده می‌گردند، برای رانشگرهای الکتریکی مناسب نیستند. در نتیجه سیستم اندازه‌گیری تراست برای این رانشگرها باید به‌گونه‌ای باشد که نیروی تراست را از نیروی وزن رانشگر تفکیک کرده و از خطای احتمالی جلوگیری کند. برای دستیابی به این وضعیت و کم کردن اثر نیروی وزن، سیستم‌های اندازه‌گیری تراست بر پایه پاندول طراحی شده‌اند. در این نوع سیستم‌ها، دو نیروی تراست و وزن قابل تفکیک بوده و در نتیجه تراست‌های بسیار پایین قابل اندازه‌گیری می‌باشد. از جمله طرح‌های مبتنی بر پاندول می‌توان به پاندول آویزان، پاندول معکوس، پاندول پیچشی و پاندول تاشده اشاره نمود. در تمامی این طرح‌ها مقدار نیروی تراست از طریق اندازه‌گیری جابجایی رخ داده در استند و در طی کارکرد رانشگر تعیین می‌گردد.

در سیستم اندازه‌گیری تراست با پیکربندی پاندول آویزان از یک بازوی عمودی استفاده می‌شود که رانشگر در انتهای پایینی آن و وزنه‌های تعادلی به‌منظور بی‌اثرسازی نیروی وزن، در انتهای بالایی آن قرار گرفته‌اند. این نوع سیستم دارای ساده‌ترین نوع سازه بوده و به همین دلیل دارای پایداری زیادی می‌باشد. مهم‌ترین عیب این نوع سیستم‌ها به ساختار آن‌ها مربوط می‌شود که برای داشتن حساسیت بالا نیازمند افزایش طول بازو هستند. سیستم‌های طراحی شده توسط ناکاگاوا و همکاران [۱]، وانگ و همکاران [۲]، پاکان و همکاران [۳] و ونگ و همکاران [۴] و واچز و

می‌کنند. میزان تراست رانشگر از اندازه‌گیری جابجایی نسبی دو صفحه بالایی و پایینی نسبت به یکدیگر و بر اساس فرآیند کالیبراسیون از پیش انجام‌یافته تعیین می‌گردد. برای مدل‌سازی تحلیلی استند سنجش تراست با پاندول معکوس، دیاگرام آزاد کل سازه به‌صورت دوبعدی به همراه بخش‌های مختلف آن ترسیم‌شده و روابط دینامیکی حرکت آن‌ها به دست می‌آید. برای استخراج معادلات سیستم، این چهار بخش صلب فرض می‌شوند. دیاگرام آزاد کل سازه استند به همراه تمامی نیروهای خارجی اعمالی و تکیه‌گاهی در شکل ۱ دیده می‌شود. نیروهای اعمالی شامل نیروی تراست رانشگر (F) و نیروی میرایی میراگر ($C\dot{x}_b$) می‌باشد. میراگر بکار رفته در ساختار استند از نوع جریان گردابی بوده که اثر میرایی آن از حرکت یک ورق رسانا (در اینجا مس) در داخل یک میدان مغناطیسی (در اینجا ناشی از آهنرباهای دائمی) ایجاد می‌شود.



شکل (۱): دیاگرام آزاد کل سازه استند.

رابطه تعادل دینامیکی در جهت محور افقی، محور عمودی و دوران حول مرکز جرم صفحه افقی پایینی به ترتیب در روابط (۱) الی (۳) نوشته‌شده است.

$$-F + f_{x1} + f_{x2} - C\dot{x}_b = M\ddot{x} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} -m_t g - m_u g - m_r g - m_l g - m_c g \\ - m_b g + f_{y1} + f_{y2} = M\ddot{y} \end{aligned} \quad (2)$$

دوران، جرم بازوها و صفحات، جرم رانشگر و وزنه‌های تعادلی و سفتی لولاها بر عملکرد کلی سیستم و به‌عبارت‌دیگر پاسخ دینامیکی و استاتیکی سیستم مانند مقدار جابجایی، فرکانس طبیعی و زمان تثبیت نوسانات می‌باشد؛ چراکه پارامترهای هندسی در تعیین مشخصات اصلی سیستم از جمله محدوده تراست قابل‌اندازه‌گیری، دقت اندازه‌گیری، حساسیت، تفکیک‌پذیری و تکرارپذیری تأثیرگذار می‌باشند. بدین منظور در ابتدا مدل تحلیلی رفتار دینامیکی و استاتیکی استند سنجش تراست به دست می‌آید. سپس میزان اهمیت و تأثیرگذاری پارامترهای هندسی استند بر عملکرد آن با بررسی پاسخ سیستم نسبت به تغییرات پارامترها محاسبه می‌شود. در پایان نیز با استفاده از نتایج حاصل‌شده، طراحی بهینه با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای چند نمونه استند انجام پذیرفته و یک نمونه عملی از استند ساخته و مورد آزمون قرار می‌گیرد.

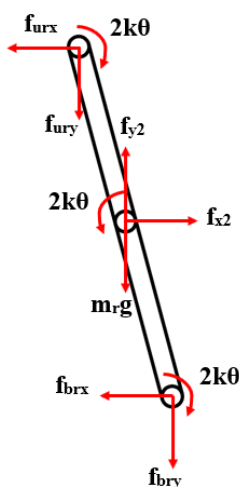
۲- مدل‌سازی تحلیلی استند سنجش تراست

اولین گام در این پژوهش مدل‌سازی تحلیلی یک استند سنجش تراست به‌منظور تعیین رفتار دینامیکی و استاتیکی آن می‌باشد. پیکربندی استند سنجش تراست انتخابی از نوع پاندول معکوس می‌باشد. این نوع پاندول در مقایسه با سایر انواع پاندول‌ها، مزایای بیشتری داشته و نمونه‌های زیادی از آن در مراکز علمی و فضایی دنیا وجود دارد که به چند نمونه در بخش قبل اشاره شد.

سازه استند از چهار بخش اصلی شامل دو صفحه افقی بالا و پایینی و دو بازوی عمودی چپ و راست تشکیل‌شده است. صفحه بالایی حامل رانشگر و صفحه پایینی حامل وزنه‌های تعادلی می‌باشد. همچنین یک سیستم میراگر نیز به‌منظور کاهش اثرات ارتعاشات خارجی و داخلی در صفحه پایینی در نظر گرفته می‌شود. هرکدام از صفحه‌ها به‌وسیله لولا به بازوهای عمودی متصل هستند. دو صفحه عمودی نیز به‌وسیله لولا از فریم اصلی و خارجی سیستم آویزان هستند. لولاهای بکار رفته از نوع بدون اصطکاک بوده و تأثیری بر حرکت استند ندارند. با عملکرد رانشگر، صفحه بالایی با رانشگر به‌صورت افقی شروع به حرکت کرده و صفحه پایینی نیز با وزنه‌های کانتربالانس در جهت مخالف حرکت

$$C\dot{x}_b h_2 - [m_c g + m_b g] L/2 + f_{br y} L + 4K\theta = J_b \ddot{\theta} \quad (9)$$

دیاگرام آزاد بازوی عمودی راستی سازه مشابه حالات سایر بخش‌های سازه، به همراه تمامی نیروهای اعمالی و تکیه‌گاهی در شکل ۴ نمایش داده شده است و روابط تعادل دینامیکی در جهت محور افقی، محور عمودی و دوران حول مرکز بازو به ترتیب در روابط (۱۰) الی (۱۲) نوشته شده است.



شکل (۴): دیاگرام آزاد بازوی عمودی راستی سازه.

$$f_{x2} - f_{br x} - f_{ur x} = 0 \quad (10)$$

$$f_{y2} - f_{br y} - f_{ur y} - m_r g = 0 \quad (11)$$

$$f_{ur x} H_1 \cos \theta + f_{ur y} H_1 \sin \theta - f_{br x} H_2 \cos \theta - f_{br y} H_2 \sin \theta - 4K\theta = J_r \ddot{\theta} \quad (12)$$

و در نهایت دیاگرام آزاد بازوی عمودی چپی سازه نیز به همراه تمامی نیروهای اعمالی و تکیه‌گاهی در شکل ۵ نمایش داده شده است و روابط تعادل دینامیکی در جهت محور افقی، محور عمودی و دوران حول مرکز بازو به ترتیب در روابط (۱۳) الی (۱۵) نوشته شده است.

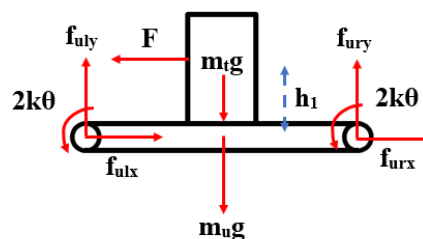
$$f_{x1} - f_{bl x} - f_{ul x} = 0 \quad (13)$$

$$f_{y1} - f_{bl y} - f_{ul y} - m_t g = 0 \quad (14)$$

$$f_{ul x} H_1 \cos \theta + f_{ul y} H_1 \sin \theta - f_{bl x} H_2 \cos \theta - f_{bl y} H_2 \sin \theta - 4K\theta = J_l \ddot{\theta} \quad (15)$$

$$[f_{y2} - m_r g][L/2 - H_2 \sin \theta] - f_{x2} H_2 \cos \theta + [m_t g - f_{y1}][L/2 + H_2 \sin \theta] - f_{x1} H_2 \cos \theta + [m_t g + m_u g][H_1 - H_2] \sin \theta + F[(H_1 + H_2) \cos \theta + h_1] - C\dot{x}_b h_2 + 4K\theta = J \ddot{\theta} \quad (3)$$

دیاگرام آزاد صفحه بالایی سازه به همراه تمامی نیروهای اعمالی و تکیه‌گاهی در شکل ۲ نمایش داده شده است و روابط تعادل دینامیکی در جهت محور افقی، محور عمودی و دوران حول انتهای چپ صفحه به ترتیب در روابط (۴) الی (۶) نوشته شده است.



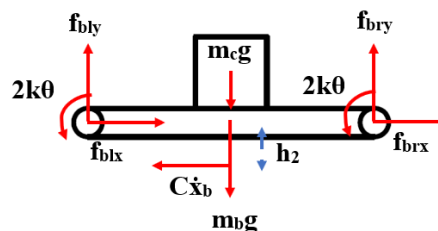
شکل (۲): دیاگرام آزاد صفحه بالایی سازه.

$$-F + f_{ul x} + f_{ur x} = [m_t + m_u] \ddot{x}_u \quad (4)$$

$$f_{ul y} + f_{ur y} - m_t g - m_u g = [m_t + m_u] \ddot{y}_u \quad (5)$$

$$F h_1 - [m_t g + m_u g] L/2 + f_{ur y} L + 4K\theta = J_u \ddot{\theta} \quad (6)$$

دیاگرام آزاد صفحه پایینی سازه نیز به همراه تمامی نیروهای اعمالی و تکیه‌گاهی در شکل ۳ نمایش داده شده است و روابط تعادل دینامیکی در جهت محور افقی، محور عمودی و دوران حول انتهای چپ صفحه به ترتیب به صورت روابط (۷) الی (۹) است.



شکل (۳): دیاگرام آزاد صفحه پایینی سازه.

$$-C\dot{x}_b + f_{bl x} + f_{br x} - C\dot{x}_b = [m_c + m_b] \ddot{x}_b \quad (7)$$

$$f_{bl y} + f_{br y} - m_c g - m_b g = [m_c + m_b] \ddot{y}_b \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
 & +\dot{\theta}CH_2^2 - \theta[(m_t + m_u)gH_1 \\
 & \quad - (m_c + m_b)gH_2 - 12K] \\
 & \quad - FH_1 = 0
 \end{aligned}$$

مقدار جابجایی دورانی سیستم در تعادل استاتیکی آن از رابطه فوق و با حذف جملات وابسته به زمان و طبق رابطه (۱۹) قابل دستیابی است.

$$\theta = \frac{FH_1}{(m_t + m_u)gH_1 - (m_c + m_b)gH_2 - 12K} \quad (۱۹)$$

با توجه به رابطه (۱۹) مقدار تعادل استاتیکی سیستم به جرم بخش‌ها، سفتی لولا، طول بازوهای دوران و نیروی تراست بستگی داشته و به پارامترهایی چون طول صفحات بالایی و پایینی، ممان اینرسی بخش‌ها و ارتفاع محل اعمال نیروی تراست بستگی ندارد. همچنین جابجایی خطی سیستم از حاصل ضرب جابجایی دورانی سیستم در مجموع طول بازوهای دوران $(H_1 + H_2)$ حاصل می‌شود.

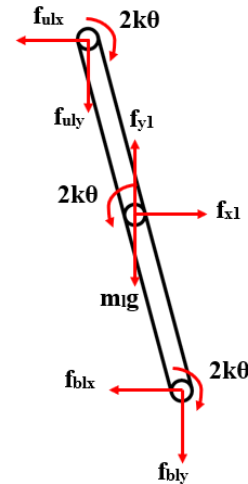
مشخصه عملکردی دیگری از استند که از سفتی لولاها متأثر می‌گردد، فرکانس طبیعی سیستم بوده که در پاسخ دینامیکی تأثیرگذار می‌باشد. فرکانس طبیعی بر اساس معادله حرکت دینامیکی سیستم معادل خطی و از رابطه (۲۰) محاسبه می‌شود.

$$\omega = \sqrt{\frac{12K + (m_c + m_b)gH_2 - (m_t + m_u)gH_1}{J - J_u - J_b + (m_c + m_b)H_2^2 - (m_t + m_u)H_1H_2}} \quad (۲۰)$$

۳- نتایج مدل‌سازی تحلیلی

در این بخش پس از به دست آوردن روابط حرکت دینامیکی و تعادل استاتیکی، تأثیر پارامترهای فیزیکی بر مشخصات عملکردی استند از جمله مقدار جابجایی، فرکانس طبیعی و زمان تثبیت نوسانات مورد بررسی قرار می‌گیرد.

ابتدا معادله تعادل استاتیکی سیستم طبق رابطه (۱۹) در نظر گرفته می‌شود. تأثیر سفتی لولاها بر میزان جابجایی نسبی به ازای نیروهای تراست متفاوت در شکل ۶ قابل مشاهده می‌باشد. لازم به ذکر است که جابجایی نسبی عموماً به وسیله سنسوری با دقت کافی و مناسب اندازه‌گیری می‌شود. همان‌طور که از شکل فوق مشخص است، مقدار جابجایی با سفتی لولا رابطه عکس دارد. با افزایش سفتی لولا میزان جابجایی کمتر شده و این تفاوت در مقادیر سفتی



شکل (۵): دیاگرام آزاد بازوی عمودی چپی سازه.

موقعیت، سرعت و شتاب مرکز جرم دو صفحه بالایی و پایینی به صورت روابط (۱۶) و (۱۷) محاسبه می‌شوند.

$$x_u = -H_1 \sin \theta - L/2 \quad (۱۶-الف)$$

$$\dot{x}_u = -H_1 \dot{\theta} \cos \theta \quad (۱۶-ب)$$

$$\ddot{x}_u = H_1 \dot{\theta}^2 \sin \theta - H_1 \ddot{\theta} \cos \theta \quad (۱۶-ج)$$

$$y_u = H_1 \cos \theta \quad (۱۶-د)$$

$$\dot{y}_u = -H_1 \dot{\theta} \sin \theta \quad (۱۶-ه)$$

$$\ddot{y}_u = -H_1 \dot{\theta}^2 \cos \theta - H_1 \ddot{\theta} \sin \theta \quad (۱۶-و)$$

$$x_b = H_2 \sin \theta - L/2 \quad (۱۷-الف)$$

$$\dot{x}_b = H_2 \dot{\theta} \cos \theta \quad (۱۷-ب)$$

$$\ddot{x}_b = -H_2 \dot{\theta}^2 \sin \theta + H_2 \ddot{\theta} \cos \theta \quad (۱۷-ج)$$

$$y_b = -H_2 \cos \theta \quad (۱۷-د)$$

$$\dot{y}_b = H_2 \dot{\theta} \sin \theta \quad (۱۷-ه)$$

$$\ddot{y}_b = H_2 \dot{\theta}^2 \cos \theta + H_2 \ddot{\theta} \sin \theta \quad (۱۷-و)$$

با استفاده از ۱۵ رابطه فوق، جاگذاری پارامترها و انجام محاسبات و با فرض اینکه مقدار دوران کم بوده و می‌توان $\sin \theta$ را برابر θ و $\cos \theta$ را برابر یک در نظر گرفت، و همچنین صرف نظر کردن از جملات با مرتبه‌های بالاتر از یک توان θ ، مدل تحلیلی استند و به عبارتی معادله حرکت دینامیکی سیستم به صورت رابطه (۱۸) به دست می‌آید.

$$\begin{aligned}
 \ddot{\theta} [J - J_u - J_b + (m_c + m_b)(H_2^2 + H_2 L/2 \theta) \\
 - (m_t + m_u)(H_1 H_2 \\
 + H_1 L/2 \theta)] \\
 + \dot{\theta}^2 [(m_c + m_b)H_2 L/2 - (m_t + m_u)H_1 L/2]
 \end{aligned} \quad (۱۸)$$

در ارتباط با فرکانس طبیعی استند سنجش تراست، عموماً سعی بر این است تا حد امکان مقدار آن پایین باشد تا از اثرات احتمالی تشدید اجتناب گردد. فرکانس زیر دو هرتز با در نظر گرفتن حداقل فرکانس کاری تجهیزات موجود در محیط (معمولاً ناشی از فرکانس کاری پمپ‌های خلأ) مطلوب می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۱۰ دیده می‌شود، با افزایش سفتی لولاها، فرکانس طبیعی نیز به‌صورت رادیکالی افزایش می‌یابد. این نکته را بایستی مدنظر قرار داد که علاوه بر سفتی لولاها، ممان دورانی سازه استند نیز در فرکانس طبیعی سیستم تأثیرگذار بوده که با توجه به راحت بودن تغییر سفتی لولا، کمتر موردتوجه قرار می‌گیرد. مشخصات سیستم شبیه‌سازی شده عبارت‌اند از: $m_u = 3 \text{ kg}$ ، $m_b = 3 \text{ kg}$ ، $m_c = 3 \text{ kg}$ ، $m_t = 3 \text{ kg}$ ، $J = 0.8 \text{ kgm}^2$ ، $J_u = 0.2 \text{ kgm}^2$ و $H_1 = 100 \text{ mm}$ ، $J_b = 0.03 \text{ kgm}^2$ و $H_2 = 200 \text{ mm}$.

در بررسی معادله حرکت دینامیکی سیستم، زمان تثبیت نوسانات استند و به عبارتی پاسخ سیستم و همچنین مقدار جهش اضافه پاسخ از مشخصه‌های مهم عملکردی استند می‌باشند. در شکل ۱۱ تأثیر میرایی برای سیستمی با مشخصات مشابه حالت قبل و به‌عنوان نمونه محاسبه شده است. بر اساس نتایج و با افزایش میرایی، زمان تثبیت و مقدار جهش اضافه پاسخ کاهش می‌یابد.

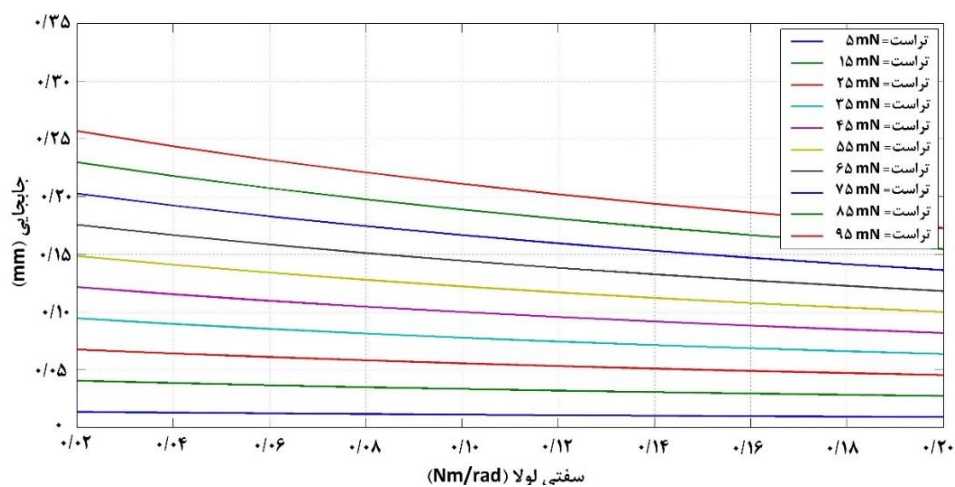
عامل دیگر تأثیرگذار در پاسخ دینامیکی سیستم مقدار سفتی لولاها می‌باشد. شکل ۱۲ تأثیر سفتی لولا بر پاسخ دینامیکی سیستم را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش مقدار سفتی لولا، علاوه بر کاهش پاسخ استاتیکی سیستم، فرکانس نوسانات افزایش یافته و در طرف مقابل از مقدار جهش اضافه پاسخ نیز کاسته می‌شود. بر اساس نتایج به‌دست آمده، پارامترهای هندسی استند سنجش تراست همچون جرم بخش‌ها، سفتی لولا و طول بازوهای دوران بر عملکرد استند سنجش تراست تأثیرگذار می‌باشد. در این بین سفتی لولاها و اختلاف گشتاورهای جرمی صفحات بالایی و پایینی یعنی دو مقدار $(m_c + m_t)H_1$ و $m_b H_2$ بیشترین تأثیر را از خود نشان می‌دهند.

لولای پایین مشهودتر می‌باشد. سایر پارامترهای سیستم برای شبیه‌سازی عبارت‌اند از: $m_b = 3 \text{ kg}$ ، $m_u = 3 \text{ kg}$ ، $m_c = 5 \text{ kg}$ ، $m_t = 2 \text{ kg}$ و $H_1 = 100 \text{ mm}$ ، $H_2 = 200 \text{ mm}$.

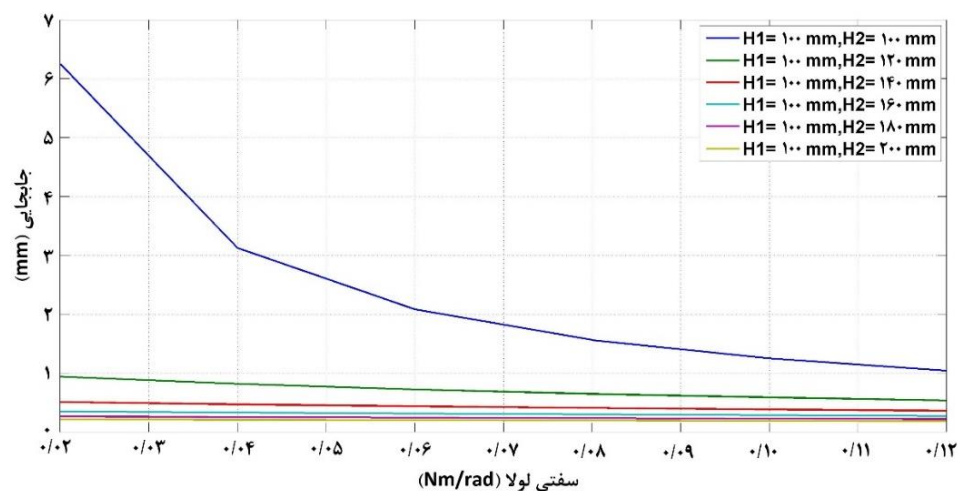
برای بررسی تأثیر طول بازوی دوران بر عملکرد استند، از رابطه (۱۹) استفاده کرده و نتایج مطابق شکل‌های ۷ و ۸ برای سفتی لولاها، مختلف ترسیم می‌شوند. در شکل ۷ با طول بازوی دوران صفحه بالایی (H_1) ثابت، طول بازوی دوران صفحه پایینی (H_2) افزایش می‌یابد. بر این اساس، با طول بازوهای برابر بیشترین جابجایی مشاهده شده و با افزایش طول بازوی دوران صفحه پایینی، میزان جابجایی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

در شکل ۸ با طول بازوی دوران صفحه پایینی ثابت، طول بازوی دوران صفحه بالایی افزایش می‌یابد. در این حالت برخلاف حالت قبلی، با افزایش طول بازوی دوران صفحه پایینی، میزان جابجایی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد و مجدداً با طول بازوهای برابر بیشترین جابجایی مشاهده می‌گردد. بنابراین می‌توان گفت با افزایش طول بازوی دوران صفحه بالایی میزان جابجایی سیستم افزایش یافته که مطلوب می‌باشد (افزایش میزان جابجایی موجب افزایش حساسیت و دقت سیستم می‌گردد)، اما مقدار این افزایش از طرف الزامات ابعادی سیستم محدود می‌گردد. لازم به ذکر است که در ترسیم این اشکال جرم صفحه بالایی و رانشگر $(m_t + m_u)$ برابر جرم صفحه پایینی و وزنه‌های تعادلی $(m_c + m_b)$ یعنی ۶ کیلوگرم در نظر گرفته شده است.

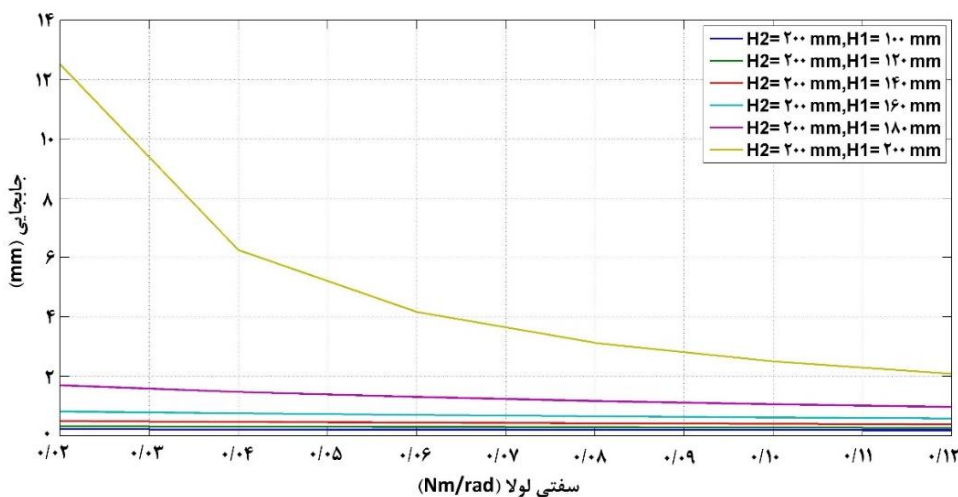
شکل ۹ تأثیر اختلاف وزن رانشگر و وزنه‌های تعادلی بر میزان جابجایی با فرض طول بازوی دوران صفحه بالایی برابر طول بازوی دوران صفحه پایینی (۱۰۰ میلی‌متر) را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، بیشترین جابجایی با اختلاف وزن صفر به‌دست آمده و با افزایش اختلاف وزن، میزان جابجایی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. بنابراین کاهش اختلاف وزن باوجود افزایش پایداری سیستم، موجب کاهش حساسیت آن (به دلیل کاهش مقدار جابجایی) نیز می‌گردد.



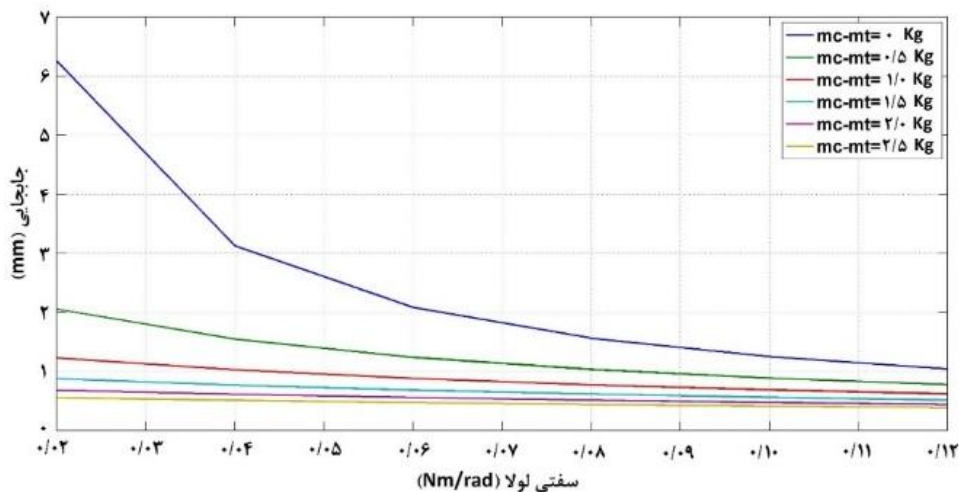
شکل (۶): تأثیر سفتی لولا بر میزان جابجایی.



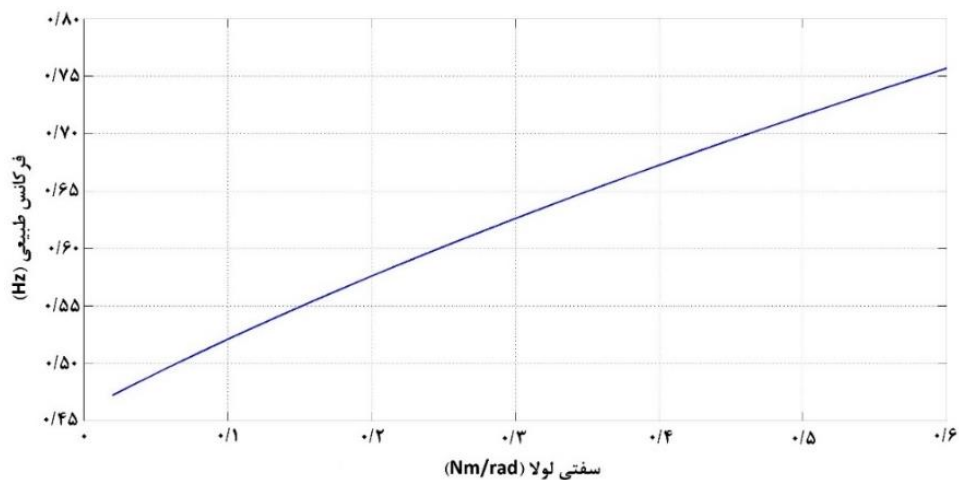
شکل (۷): تأثیر طول بازوی دوران صفحه پایینی بر میزان جابجایی.



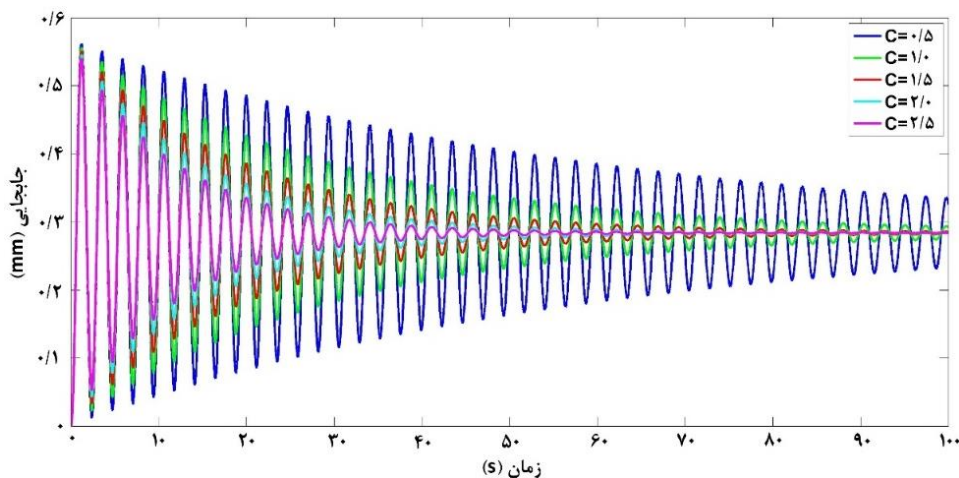
شکل (۸): تأثیر طول بازوی دوران صفحه بالایی بر میزان جابجایی.



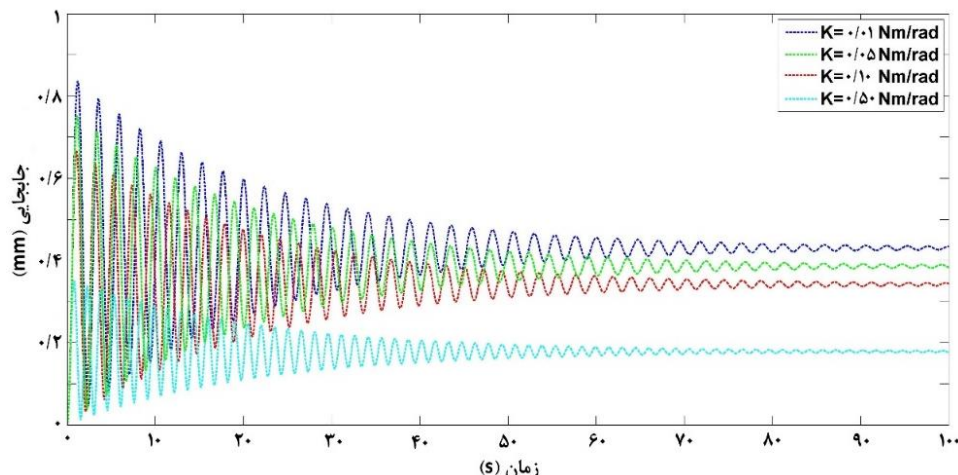
شکل (۹): تأثیر اختلاف وزن رانشگر و وزنه‌های تعادلی بر میزان جابجایی.



شکل (۱۰): تأثیر سفتی بر مقدار فرکانس طبیعی استند.



شکل (۱۱): تأثیر مقدار میرایی بر پاسخ دینامیکی سیستم.



شکل (۱۲): تأثیر مقدار سفتی لولا بر پاسخ دینامیکی سیستم

گردیده و نتایج به دست آمده با میانگین‌گیری از ۱۰ مرتبه تکرار روش بهینه‌سازی در جدول ۱ آورده شده‌اند. بر این اساس، الگوریتم ژنتیک دریافتن پاسخ، بسیار سریع‌تر و کاراتر از دو روش دیگر بوده و مقدار تابع هدف آن نیز مطلوب‌تر می‌باشد. لازم به ذکر است که نتایج حاصل با نتایج مندرج در مرجع [۲۰] نیز تطابق دارد.

الگوریتم ژنتیک، یک روش عددی مؤثر و کارا برای یافتن پاسخ یک مسئله تحلیلی پیچیده و چند پارامتری است. این پاسخ با تکرار مجموعه‌ای از محاسبات بر روی جمعیتی از پاسخ‌های احتمالی به دست می‌آید. از جمله مهم‌ترین ویژگی‌های الگوریتم ژنتیک می‌توان به قابلیت آن دریافتن اکس‌ترم مطلق اشاره نمود [۲۱]. به منظور استفاده از روش الگوریتم ژنتیک، یک تابع هزینه به صورت اختلاف بین الزامات فیزیکی مشخص شده و مشخصات محاسبه شده سیستم، با استفاده از نرم اقلیدسی و مطابق رابطه (۲۱) تعریف می‌شود.

$$Z = \sum_{n=1}^3 \left| \frac{C_{specified_n}}{C_{achieved_n}} - 1 \right| \quad (21)$$

در رابطه فوق $C_{specified}$ مقدار الزام فیزیکی مشخص شده و $C_{achieved}$ مقدار مشخصه محاسبه شده برای سیستم است. این الزامات شامل جرم کل (مجموع جرم صفحه بالایی، پایینی و وزنه‌های تعادلی و رانشگر)، ابعاد کل (مجموع طول بازوی دوران صفحه بالایی و پایینی) و مقدار جابجایی استند برای مقدار معلوم نیروی تراست است.

در سمت مقابل پارامترهایی چون طول صفحات بالایی و پایینی، محل اعمال نیروی تراست و محل اعمال نیروی میرایی تأثیری بر عملکرد استند ندارند. بنابراین برای طراحی یک استند سنجش تراست با پیکربندی پاندول معکوس می‌توان با در نظر گرفتن الزامات محدودکننده فیزیکی همچون ابعاد و جرم کلی سیستم و همچنین بازه موردنظر اندازه‌گیری و حساسیت و دقت ابزار اندازه‌گیری جابجایی، از نتایج فوق استفاده کرده و سیستمی بهینه طراحی نمود.

۴- بهینه‌سازی طراحی با استفاده از الگوریتم ژنتیک

در این بخش، بر اساس نتایج به دست آمده از بخش ۳، طراحی بهینه یک استند سنجش تراست بر اساس الزامات فیزیکی مشخص شده و معلوم انجام می‌گیرد. برای انتخاب روش مناسب بهینه‌سازی، از توابع محک استاندارد استفاده شده که روشی رایج و متداول در بررسی عملکرد روش‌های مختلف بهینه‌سازی و مقایسه آن‌ها می‌باشد. در این راستا، مقایسه‌ای بین سه روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک، ازدحام ذرات و تکامل تفاضلی با استفاده از سه تابع محک استاندارد انجام می‌گیرد. برای تعیین پارامترهای روش‌های بهینه‌سازی همچون تعداد نسل‌ها، اندازه جمعیت، بعد تابع، درصد ترکیب و جهش و ... از مرجع [۲۰] استفاده

جدول (۱): مقایسه سه روش بهینه‌سازی

تابع محکم	بهینه‌سازی روش	مقدار تابع میانگین	زمان پاسخ (ثانیه)	میانگین
	GA	۰/۰۰۱۵	۲۵/۶۲۷۲	
Sphere	PSO	۰/۰۰۱۹	۵۰۵/۹۵۱۳	
	DE	۰/۰۰۳۷	۴۷۲/۳۷۳۵	
	GA	۰/۰۱۲۶	۳۰/۷۰۸۵	
Ackley	PSO	۰/۱۲۶۵	۶۵۳/۶۲۸۷	
	DE	۰/۰۴۱۸	۶۳۵/۶۳۹۴	
	GA	۲/۱۵۱۴	۲۸/۲۲۶۷	
Rastrigin	PSO	۲۱/۲۶۵۰	۶۱۲/۵۸۴۲	
	DE	۶/۴۴۹۳	۵۹۶/۸۲۵۳	

روش الگوریتم ژنتیک که در فلوجارت شکل ۱۳ دیده می‌شود، با ایجاد جمعیت اولیه تصادفی از کروموزوم‌ها آغاز می‌شود؛ به طوری که هر کروموزوم حاوی شش ژن g_1 تا g_6 می‌باشد. هر مجموعه کروموزوم به صورت $\{g_1, g_2, \dots, g_6\}$ بوده و ژن‌ها نشان‌دهنده مقادیر پارامترهای طراحی هستند شامل طول بازوی دوران صفحه بالایی، طول بازوی دوران صفحه پایینی، سفتی لولاها، جرم صفحه بالایی، جرم صفحه پایینی و جرم وزنه‌های تعادلی هستند. مقادیر پارامترها حقیقی بوده و از یک بازه اعداد حقیقی از پیش تعیین شده تولید می‌شوند. بازه در نظر گرفته شده برای پارامترهای طول بازوی دوران صفحه بالایی و پایینی از صفر تا الزام تعیین شده برای ابعاد کل، برای جرم صفحه بالایی، جرم صفحه پایینی و جرم وزنه‌های تعادلی از صفر تا الزام جرم کل و برای سفتی لولاها از صفر تا ۰/۵ می‌باشد.

در مرحله بعد تابع هزینه برای کل افراد جمعیت محاسبه شده و کروموزوم‌ها با کمترین مقدار تابع هزینه به‌عنوان بهترین اعضای جمعیت در نظر گرفته می‌شوند. سپس الگوریتم ژنتیک یک جمعیت جدید از بهترین کروموزوم‌ها را با استفاده از عملگرهای روش الگوریتم ژنتیک شامل انتخاب، ترکیب و جهش ایجاد خواهد کرد و محاسبه تابع هزینه مجدداً برای جمعیت جدید انجام می‌پذیرد. این روند تا جایی که مقدار تابع هزینه کمتر از مقدار

مشخص شده باشد و یا تعداد دور تعیین شده به پایان برسد، تکرار می‌شود.

عملگر ترکیب با انتخاب دو کروموزوم به‌عنوان والدین و جابجایی ژن‌های آن‌ها، دو کروموزوم جدید ایجاد می‌کند. عملگر جهش به‌طور تصادفی یک یا چند ژن را در کروموزوم، به‌منظور افزایش تنوع کروموزوم در نسل تغییر می‌دهد؛ تا از ایجاد افراد شبیه به یکدیگر جلوگیری نماید. عملگر انتخاب نیز با در نظر گرفتن احتمال انتخاب هر کروموزوم، کروموزوم‌های مورداستفاده در عملگرهای قبلی را انتخاب می‌کند.

در جدول ۲ نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک برای طراحی چند نمونه هستند با الزامات فیزیکی مشخص شده و معلوم آورده شده است. همچنین منحنی همگرایی چهار طرح نیز در شکل ۱۴ دیده می‌شود. برای هر طرح، دو پارامتر بیشترین مقدار نیروی تراست قابل‌اندازه‌گیری و جرم رانشگر نیز مشخص شده‌اند. توضیح لازم اینکه برای اجرای الگوریتم جمعیت اولیه‌ای با پنجاه عضو در نظر گرفته شده و فرآیند تکرار بعد از ۲۰۰۰ دور به پایان می‌رسد.

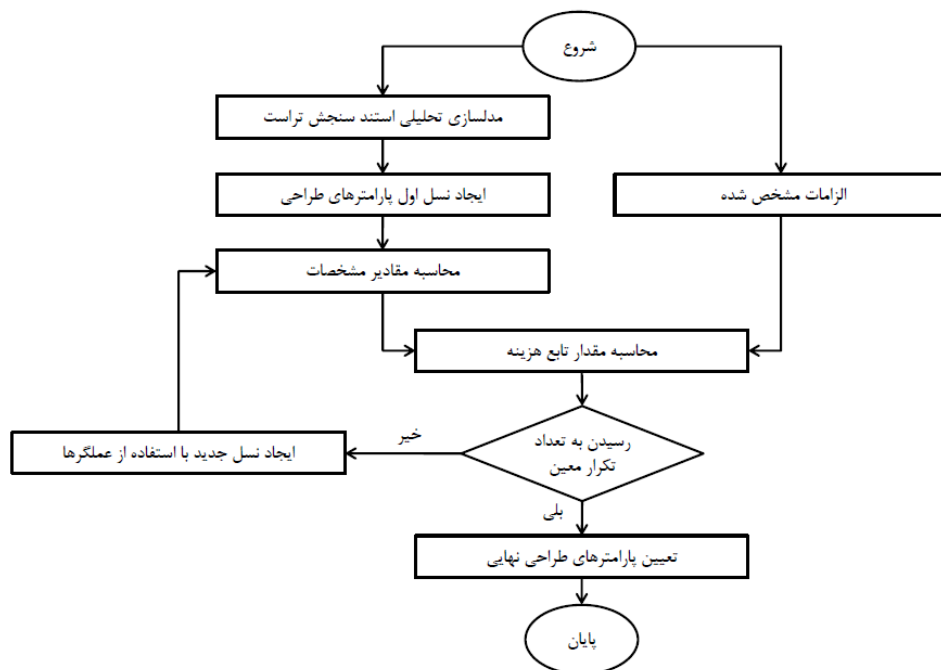
نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک بکار رفته به‌خوبی عمل کرده و مقدار تابع هزینه را به کمترین مقدار خود رسانده است. بنابراین می‌توان از این الگوریتم برای دستیابی به مقدار مشخصات فیزیکی سیستم (پارامترهای طراحی هستند) دست یافت.

۵- ساخت نمونه هستند سنجش تراست

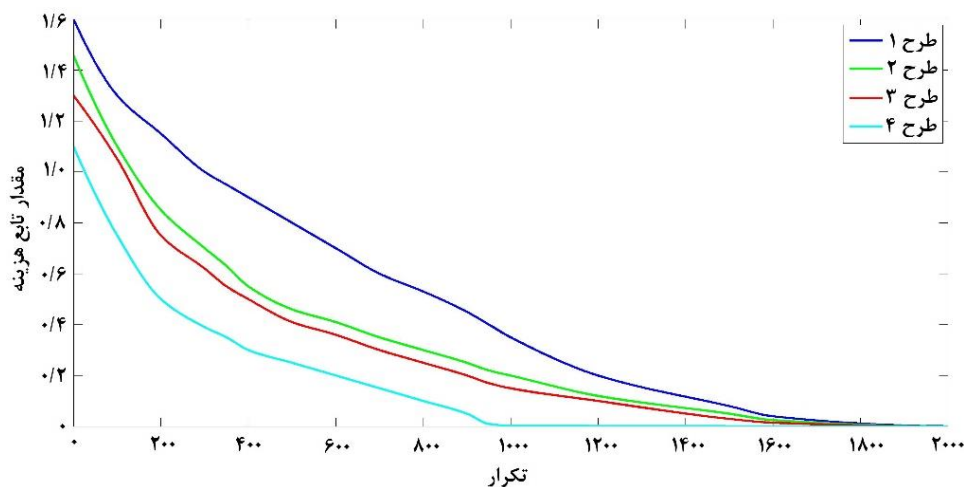
پس از انجام فرآیند بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک، طرح شماره ۲ مندرج در جدول ۲ برای ساخت انتخاب می‌گردد. نمایی از هستند سنجش تراست طراحی شده در شکل ۱۵ نشان داده شده است. در این هستند، طول بازوی دوران صفحه بالایی و پایینی به ترتیب برابر ۲۴۰ و ۱۱۰ میلی‌متر انتخاب می‌شود. همچنین جرم صفحه بالایی و پایینی نیز به ترتیب برابر ۴/۴۵۰ و ۳/۵۲۰ کیلوگرم می‌باشند. برای لولاهای هستند نیز از لولاهایی به سفتی ۰/۰۵ نیوتن‌متر بر رادیان استفاده می‌شود. در نتیجه با رانشگری به جرم ۲ کیلوگرم و استفاده از وزنه‌های تعادلی به

میکرون به دست می‌آید. بر اساس داده‌های آزمون تجربی و پس از چندین مرتبه تکرار، نیروی تراست ۱۰۰ میلی‌نیوتنی منجر به ایجاد جابجایی برابر ۰/۹۲ در استند می‌گردد. در نتیجه میزان خطایی مدل تحلیلی کمتر از ۶ درصد می‌باشد. بنابراین می‌توان بیان نمود که مدل‌سازی بکار رفته و روش بهینه‌سازی معرفی‌شده صحه‌گذاری شده و به خوبی رفتار استند سنجش تراست را شبیه‌سازی می‌کند.

جرم مجموع ۲ کیلوگرم، برای نیروی تراست ۱۰۰ میلی‌نیوتنی، مقدار جابجایی استند با استفاده از رابطه (۱۹) معادل ۰/۹۷ میلی‌متر محاسبه می‌شود. به منظور صحه‌گذاری بر نتایج حاصل‌شده، استند طراحی‌شده، ساخته‌شده و مورد آزمون تجربی قرار می‌گیرد. برای ایجاد نیروی تراست از یک محرک با دقت یک میلی‌نیوتن استفاده می‌شود. جابجایی نسبی استند نیز با استفاده از یک سنسور لیزری اندازه‌گیری فاصله با دقت ۵



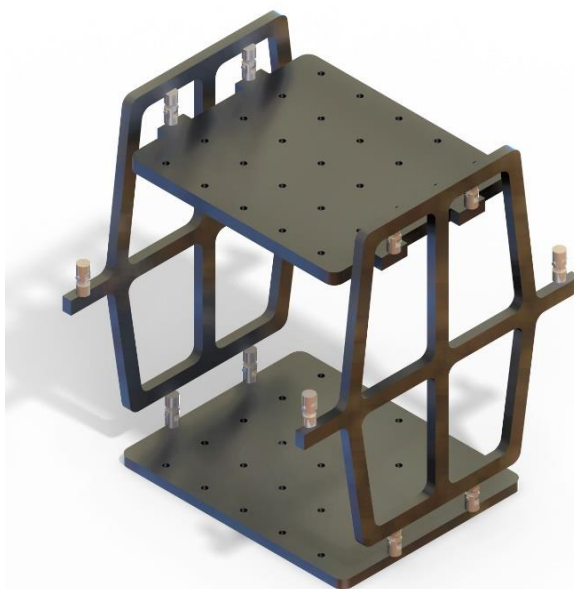
شکل (۱۳): فلوچارت الگوریتم ژنتیک.



شکل (۱۴): منحنی همگرایی الگوریتم ژنتیک برای چهار طرح.

جدول (۲): نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک برای طراحی استند

پارامترها					
طرح ۴	طرح ۳	طرح ۲	طرح ۱	بیشترین مقدار نیروی تراست (mN)	
۱۰۰	۵۰	۱۰۰	۵۰	جرم رانشگر (kg)	
۵	۵	۲	۲	مقدار تابع هزینه	
۰/۰۰۰	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۶	مجموع طول بازوی دوران صفحه بالایی و پایینی (mm)	
۵۰۰	۵۰۰	۳۵۰	۳۵۰	مجموع جرم صفحه بالایی، پایینی و وزنه‌های تعادلی (kg)	الزامات فیزیکی مشخص شده
۱۵	۱۵	۱۰	۱۰	مقدار جابجایی استند (mm)	
۱	۰/۳	۱	۰/۳	طول بازوی دوران صفحه بالایی (mm)	
۳۵۰	۴۰۰	۲۳۸	۲۴۹	طول بازوی دوران صفحه پایینی (mm)	
۱۵۰	۱۰۰	۱۱۲	۱۰۱	سفتی لولاها (Nm/rad)	مشخصات فیزیکی محاسبه شده
۰/۰۱۸	۰/۰۲۵	۰/۰۴۱	۰/۰۳۶	جرم صفحه بالایی (kg)	
۴/۶۱۰	۵/۸۷۲	۴/۴۰۳	۵/۸۰۸	جرم صفحه پایینی (kg)	
۳/۶۴۹	۲/۲۴۰	۳/۵۶۱	۲/۱۲۱	جرم وزنه‌های تعادلی (kg)	
۶/۷۴۱	۶/۸۸۸	۲/۰۳۶	۲/۰۷۰		



شکل (۱۵): نمای استند سنجش تراست طراحی شده.

صفحات بالایی و پایینی بیشترین تأثیر را از خود نشان می‌دهند. اما پارامترهایی چون طول صفحات بالایی و پایینی، محل اعمال نیروی تراست و میرایی تأثیری بر عملکرد استند ندارند. از نتایج حاصل از کار می‌توان برای طراحی بهینه یک استند با در نظر گرفتن الزامات محدودکننده فیزیکی همچون ابعاد و جرم کلی سیستم و همچنین بازه موردنظر اندازه‌گیری و حساسیت و دقت ابزار

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر پارامترهای هندسی بر عملکرد استند سنجش تراست با پیکربندی پاندول معکوس بررسی شده و همچنین میزان اهمیت و تأثیرگذاری این پارامترها بر عملکرد سیستم به‌دست‌آمده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، سفتی لولاها و اختلاف گشتاورهای جرمی

K	سفتی لولاها
L	طول صفحه بالایی و پایینی
M	جرم کل سیستم
m_b	جرم صفحه پایینی
m_u	جرم صفحه بالایی
m_l	جرم بازوی چپی
m_r	جرم بازوی راستی
m_t	جرم رانشگر
m_c	جرم وزنه‌های تعادلی
x	جابجایی افقی مرکز جرم سیستم
y	جابجایی عمودی مرکز جرم سیستم
x_b	جابجایی افقی مرکز جرم صفحه پایینی
y_b	جابجایی عمودی مرکز جرم صفحه پایینی
x_u	جابجایی افقی مرکز جرم صفحه بالایی
y_u	جابجایی عمودی مرکز جرم صفحه بالایی
θ	دوران سیستم

۸- مراجع

- [1] Nakagawa Y, Tomita D, Koizumi H, Komurasaki K. Design and test of a 100 μ N-class thrust stand for a miniature water ion thruster with CubeSat. Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan. 2018;16(7):673-8.
- [2] Wang A, Wu H, Tang H, Liu Y, Liang X. Development and testing of a new thrust stand for micro-thrust measurement in vacuum conditions. Vacuum. 2013;91:35-40.
- [3] Packan D, Bonnet J, Rocca S. Thrust measurements with the ONERA micronewton balance. In Proceedings of the 30th International Electric Propulsion Conference 2007.
- [4] Wong AR, Toftul A, Polzin KA, Pearson JB. Non-contact thrust stand calibration method for repetitively pulsed electric thrusters. Review of Scientific Instruments. 2012;83(2):025103.
- [5] Wachs BN, Jorns BA. Sub-millinewton thrust stand and wireless power coupler for microwave-powered small satellite thrusters. Review of Scientific Instruments. 2022;93(8):083507.
- [6] Tartler BR. Construction and performance of an inverted pendulum thrust balance (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology), 2010.

اندازه‌گیری جابجایی استفاده نمود. همان‌طور که با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک طراحی بهینه برای چند نمونه استند انجام‌یافته است. در انتهای کار نیز یک نمونه استند سنجش تراست بر اساس مشخصات به‌دست‌آمده از بهینه‌سازی مدل و ساخته‌شده است. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی عملکرد استند و آزمون تجربی آن، مؤید صحت‌گذاری، کارایی و توانایی روش مدل‌سازی و بهینه‌سازی معرفی‌شده در این پژوهش می‌باشند.

۷- فهرست علائم

C	ضریب میرایی
F	نیروی تراست
f_{x1}	نیروی افقی تکیه‌گاه چپ
f_{x2}	نیروی افقی تکیه‌گاه راست
f_{y1}	نیروی عمودی تکیه‌گاه چپ
f_{y2}	نیروی عمودی تکیه‌گاه راست
f_{ulx}	نیروی افقی تکیه‌گاه بالا چپ
f_{uly}	نیروی عمودی تکیه‌گاه بالا چپ
f_{urx}	نیروی افقی تکیه‌گاه بالا راست
f_{ury}	نیروی عمودی تکیه‌گاه بالا راست
f_{blx}	نیروی افقی تکیه‌گاه پایین چپ
f_{bly}	نیروی عمودی تکیه‌گاه پایین چپ
f_{brx}	نیروی افقی تکیه‌گاه پایین راست
f_{bry}	نیروی عمودی تکیه‌گاه پایین راست
g	شتاب جاذبه زمین
H_1	طول بازوی دوران صفحه بالایی
H_2	طول بازوی دوران صفحه پایینی
h_1	فاصله محل اعمال نیروی تراست از مرکز جرم صفحه بالایی
h_2	فاصله محل اعمال نیروی میرایی از مرکز جرم صفحه پایینی
J	ممان اینرسی سیستم حول مرکز جرم صفحه پایینی
J_b	ممان اینرسی صفحه بالایی حول انتهای چپ
J_l	ممان اینرسی بازوی چپی حول مرکز جرم
J_r	ممان اینرسی بازوی راستی حول مرکز جرم
J_u	ممان اینرسی صفحه پایینی حول انتهای چپ

- [15] Lun J, Law C. Direct thrust measurement stand with improved operation and force calibration technique for performance testing of pulsed micro-thrusters. *Measurement Science and Technology*. 2014;25(9):095009.
- [16] Yang C, He JW, Duan L, Kang Q, Taiji Scientific Collaboration. A torsional thrust stand for measuring the thrust response time of micro-Newton thrusters. *International Journal of Modern Physics A*. 2021;36(11n12):2140015.
- [17] Gilpin MR, McGehee WA, Arnold NI, Natisin MR, Holley ZA. Dual-axis thrust stand for the direct characterization of electrospray performance. *Review of Scientific Instruments*. 2022;93(6):065102.
- [18] Mirczak JD. Milli-newton thrust stand for electric propulsion (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology), 2001.
- [19] Zhang H, Duan B, Wu L, Hua Z, Bao Z, Guo N, Ye Y, DeLuca LT, Shen R. Development of a steady-state microthrust measurement stand for microspacecrafts. *Measurement*. 2021;178:109357.
- [20] Lim SP, Haron H. Performance comparison of genetic algorithm, differential evolution and particle swarm optimization towards benchmark functions. In 2013 IEEE Conference on Open Systems (ICOS) 2013: 41-46.
- [21] Gen M, Cheng R. Genetic algorithms and engineering optimization. John Wiley & Sons; 1999.
- [7] Bijster RJ. Design, verification and validation of a micropropulsion thrust stand, 2014.
- [8] Kokal U, Celik M. Development of a milli-Newton level thrust stand for thrust measurements of electric propulsion systems. In 2017 8th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST) 2017: 31-37.
- [9] Xu KG, Walker ML. High-power, null-type, inverted pendulum thrust stand. *Review of Scientific Instruments*. 2009;80(5):055103.
- [10] Soni J, Roy S. Design and characterization of a nano-Newton resolution thrust stand. *Review of Scientific Instruments*. 2013;84(9):095103.
- [11] D'Souza BC, Ketsdever AD. Investigation of time-dependent forces on a nano-Newton-second impulse balance. *Review of Scientific Instruments*. 2005;76(1):015105.
- [12] Yang YX, Tu LC, Yang SQ, Luo J. A torsion balance for impulse and thrust measurements of micro-Newton thrusters. *Review of Scientific Instruments*. 2012;83(1):015105.
- [13] Koizumi H, Komurasaki K, Arakawa Y. Development of thrust stand for low impulse measurement from microthrusters. *Review of scientific instruments*. 2004;75(10):3185-90.
- [14] Tang H, Shi C, Zhang XA, Zhang Z, Cheng J. Pulsed thrust measurements using electromagnetic calibration techniques. *Review of Scientific Instruments*. 2011;82(3):035118.



Investigating the Effect of Geometrical Parameters on the Performance of a Thrust Measurement Stand and Optimizing Its Design Using Genetic Algorithm

Masoud Dehnad^{1*}, Morteza Farhid², Sina Akhbari¹, Arezoo Esmaeili¹

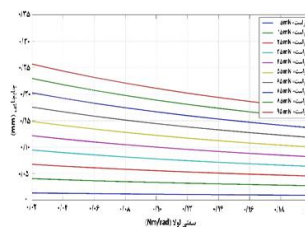
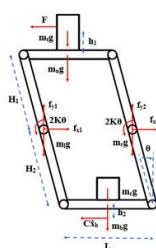
¹ Researcher, Space Thrusters Research Institute, Iranian Space Research Center, Tabriz, Iran

² Assistant Professor, Space Thrusters Research Institute, Iranian Space Research Center, Tabriz, Iran

HIGHLIGHTS

- Analytical modeling of dynamic and static behavior of a thrust measurement stand
- Specifying the importance and influence of the geometric parameters of the stand on its performance
- Optimal Designing based on the Genetic Algorithm method
- Developing an experimental stand and verifying

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 19 September 2022

Received in revised form: 10 October 2022

Accepted: 6 November 2022

Available online: 12 December 2022

*Correspondence:

hnaseh@ari.ac.ir

How to cite this article:

M. Dehnad, M. Farhid, S. Akhbari, A. Esmaeili. Investigating the effect of geometrical parameters on the performance of a thrust measurement stand and optimizing its design using genetic algorithm. Journal of Aerospace Mechanics. 2023; 19(1):107-121.

Keywords:

Thrust measurement stand
Geometric parameters
Dynamic and static response
Genetic Algorithm method
Modeling and manufacturing

ABSTRACT

In this paper, the influence of the geometric parameters of a thrust measurement stand in mN level and for electrical thrusters on its performance is investigated. To measure the thrust of the electrical thrusters, a system must be used that separates the thrust force from the weight force. Thus, thrust measurement systems are designed based on a pendulum. The geometric parameters of a thrust measurement stand, such as the length of arms, the mass of different parts, and the stiffness of pivots affect the overall performance of the system, including its dynamic and static response (for example, displacement, natural frequency and stabilization time of oscillations). For this purpose, primarily, the analytical model for the behavior of a thrust measurement stand with an inverted pendulum configuration is obtained. Then, using the obtained results, the optimal design of several stands is carried out based on the specified physical requirements and using the Genetic Algorithm method. Finally, an experimental thrust measurement stand with a maximum measuring thrust of 100 mN is developed based on obtained specifications from the optimization and by validating the results of the analytical model, the error of the model is estimated to be less than 6 percent.

* Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Imam Hossein University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>.

