

## تعیین تجربی ممان‌های اینرسی یک پهپاد نمونه

### با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری ممان اینرسی مبتنی بر روش آونگ پیچشی وارون

سعید شکرالهی<sup>۱</sup>، حسین قره‌باغی<sup>۲</sup>، محمد کاظم رامندی صدیق<sup>۳</sup>

۱ استادیار مرکز آموزشی و تحقیقاتی فضایی، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۲ کارشناس ارشد مهندسی هوافضا، گرایش سازه‌های هوایی، دانشگاه علم و صنعت ایران، hussain.gharehbaghi@gmail.com

۳ کارشناسی مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۷/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۲۹

#### چکیده

در این مقاله با بهره‌مندی از دستگاه اندازه‌گیری ممان اینرسی مبتنی بر روش آونگ پیچشی وارون، که طراحی و ساخت آن در مرکز آموزشی و تحقیقاتی فضایی دانشگاه صنعتی مالک اشتر انجام شده است، به تعیین و تحلیل دقیق ممان‌های اینرسی یک هواپیمای بدون سرنشین نمونه حول محورهای اصلی آن پرداخته شده است. برای این منظور، پیش از انجام هر اندازه‌گیری، با استفاده از چند نمونه قطعه کالیبراسیون، دستگاه با دقت بسیار بالا کالیبره و نمودارهای کنترل کیفیت دستگاه ترسیم شده است که از تکرارپذیری آزمایش‌ها حکایت دارد. سپس با طراحی و ساخت فیکسچرهای مناسب، هواپیمای مورد نظر را در سه راستای مختلف به صورت صلب روی میز اندازه‌گیری نصب نموده و اندازه‌گیری‌ها انجام گرفته است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که با طراحی فیکسچر مناسب و اطمینان از کالیبره‌بودن دستگاه و کاهش منابع خطای انسانی می‌توان با دقت بسیار بالایی ممان‌های اینرسی هر جسم پیچیده از قبیل پهپاد را در کوتاه‌ترین زمان ممکن به دست آورد.

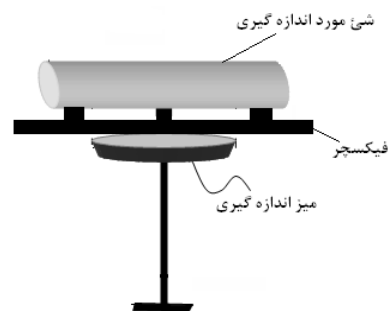
**واژگان کلیدی:** ممان اینرسی، آونگ وارون، پهپاد، فیکسچر

#### ۱. مقدمه

محاسباتی و روش تجربی وجود دارد که از نظر دقت با هم بسیار متفاوتند. در واقع، تعیین ممان اینرسی به کمک روش‌های محاسباتی با تقریب بسیار بالا همراه است و علت اصلی آن عدم امکان مدلسازی دقیق اجزای مختلف یک وسیله واقعی در نرم‌افزار است. در روش آونگ پیچشی وارون، برخلاف روش‌های متداول، به جای تعلیق جسم از یک سیم و یا میله

بدون تردید تعیین دقیق خواص جرمی و سائل نقلیه هوافضایی، نقش مؤثر و تعیین‌کننده‌ای در طراحی سیستم‌های هدایت، کنترل و ناوبری این نوع وسایل ایفا می‌نماید. ممان‌های اینرسی از مهمترین مؤلفه‌های خواص جرمی به‌شمار می‌روند و وضعیت چرخشی اجسام صلب به آنها بستگی دارد. برای تعیین ممان اینرسی یک جسم صلب، روش‌های گوناگونی از جمله روش‌های

پیچشی، شی مورد اندازه‌گیری مطابق شکل ۱ روی یک میز چرخان دقیق که به انتهای یک میله پیچشی متصل شده قرار می‌گیرد. یاتاقان‌های با اصطکاک کم، میز و بار روی آن را تحمل نموده و حرکت این عضو چرخشی را به دوران خالص محدود می‌کنند [۱]. یاتاقان‌های هوایی کروی جدید در سیستم‌های اندازه‌گیری خواص جرمی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این ابزارها سیال روان‌کننده هواست که توسط یک منبع تغذیه از طریق اریفیس‌ها وارد لقی بین روتور و استاتور شده و با تجمع سیال هوا و ایجاد فیلم هوا سبب بالارفتن روتور و جداشدن آن از سطح استاتور می‌شود. این یاتاقان‌ها از دقیق‌ترین عناصر سیستم‌های اندازه‌گیری دوار به‌شمار رفته و عموماً برای شرایط خاص طراحی می‌شوند [۲]. با اندازه‌گیری دقیق دوره تناوب نوسانات پیچشی جسم و براساس رابطه میان ممان اینرسی جسم و این دوره تناوب می‌توان به تعیین دقیق کمیت ممان اینرسی حول محور چرخش پرداخت.



شکل ۱. نمایی شماتیک ساختار اصلی دستگاه اندازه‌گیری ممان اینرسی

امروزه وسائل پرنده بدون سرنشین نظیر موشک‌های بالستیک، موشک‌های قاره‌پیما، ماهواره‌ها و انواع هواپیماهای بدون سرنشین از عملکرد کیفی بسیار بالایی برخوردارند. این امر بدون شک حاکی از یک سیستم هدایت و کنترل کارآمد و بسیار دقیق است. یکی از مهمترین عوامل مؤثر در طراحی و توسعه یک سیستم کنترل و هدایت توانمند، تحلیل دقیق و صحیح دینامیک حاکم بر حرکت وسیله مربوطه است. مطالعه رفتار دینامیکی اجسام، در حوزه کاربردهای مهندسی، اغلب مبتنی بر قوانین کلاسیک نیوتن صورت می‌گیرد [۱].

تحلیل انواع پایداری‌های موشک (شامل پایداری‌های طولی و عرضی) همگی مبتنی بر خواص جرمی صورت می‌گیرند؛ بنابراین طرح جدید در صورتی قابل انجام است که این اطلاعات

به‌طور عملی و تجربی قابل دسترس باشند. به بیان دیگر، چون کنترل و هدایت یک موشک مبتنی بر یک سیستم کنترل حلقه بسته صورت می‌گیرد و چنین سیستمی به تغییر یا انحراف پارامترهای موشک حساس می‌باشد، بدیهی است در صورت عدم تخمین صحیح پارامترهای دینامیکی آن، که همان خواص جرمی هستند، موشک مورد نظر دچار ناپایداری‌های غیرقابل پیش‌بینی شده و در نتیجه طرح با شکست مواجه خواهد شد [۱].

مراکز تحقیقاتی و صنعتی هواپیمایی کشور، نیاز فراوانی به تحقیق و مطالعه مبتنی بر خواص جرمی دارند. در طراحی یک هواپیما، عملکرد هواپیما و در پی آن طراحی سیستم‌های کنترل هواپیما به‌ویژه سیستم‌های کنترل خودکار، مبتنی بر دانسته‌های دینامیکی جسم بوده و بدون شناخت از این ویژگی‌ها این فرایند امری غیرممکن است. به‌همین دلیل، طراحان هواپیما، همواره در پی تعیین دقیق موقعیت مرکز جرم، توزیع طولی و عرضی جرم و اینرسی‌های دورانی حول سه محور اصلی هواپیما هستند. عدم صحت هر یک از این کمیت‌ها باعث می‌شود تمامی محاسبات مربوط به دینامیک پرواز با خطا همراه باشد و این اشتباهات به سایر محاسبات و تخمین‌ها تعمیم یابد و در نهایت انتخاب و طراحی اجزایی همانند موتور، سیستم‌های عملگر هیدرولیکی و پنوماتیکی و موارد مختلف دیگر، با خطا همراه باشد؛ لذا عملکرد مناسب هواپیما دچار اختلال گردد. تحقیق درباره تأثیر توزیع جرم در طول و عرض هواپیما بر پایداری‌های طولی و عرضی تنها براساس محاسبات نظری امکان‌پذیر نیست؛ زیرا این محاسبات با تقریب‌های زیادی همراه است و تنها می‌تواند در مراحل طراحی مقدماتی جهت برآوردهای اولیه مورد استفاده قرار گیرند. موضوع دیگری که باید با بهره‌مندی از آزمایشگاه اندازه‌گیری خواص جرمی مطالعه شود، مبحث کوپلینگ جرمی و آثار آن بر پایداری هواپیماست. کوپلینگ دینامیکی، به‌ویژه در هواپیماهای چابک امروزی که پایداری آنها بسیار کمتر از هواپیماهای لخت قبلی است، عامل بسیار تأثیرگذاری است و به مطالعه و تحقیق جدی نیاز دارد. نیروها و گشتاورهای اینرسی، که مستقیماً به توزیع جرم بستگی دارند، اهمیت ویژه‌ای در حرکت پس از واماندگی اجسام پرنده از جمله هواپیماها دارند؛ زیرا از همان مرتبه نیروها و گشتاورهای اثرودینامیکی می‌باشند. پدیده اسپین، که نوعی ناپایداری دینامیکی در هواپیماها در شرایط پس از واماندگی اتفاق می‌افتد،

وابستگی شدیدی به خواص جرمی هواپیما، به‌ویژه گشتاورهای ماند و موقعیت مرکز جرم دارد و می‌توان با بررسی و تحقیق کامل، به طرحی مناسب از توزیع جرم هواپیما دست یافت که از وقوع این پدیده مخرب پیشگیری نماید.

از دیگر موضوعات اساسی در روند تحلیل و طراحی یک هواپیما، بررسی تأثیر پدیده‌های اثروالاستیک بر پایداری آن است. فلاتر هواپیما از جمله مسائل ناپایداری دینامیکی است که به‌دلیل تأثیر متقابل نیروهای اثرودینامیکی، الاستیک و اینرسی در سرعت خاصی از پرواز به نام سرعت فلاتر به وقوع می‌پیوندد. یکی از مهمترین عوامل در میزان سرعت فلاتر موقعیت مرکز ثقل بال و به بیان دقیق‌تر توزیع جرم در امتداد وتر و دهانه بال می‌باشد. طراحان هواپیما با انتخاب مناسب توزیع جرم بر سطوح برآزا، سرعت ناپایداری فلاتر را تا حد مورد نظر بالا برده و از وقوع آن جلوگیری می‌نمایند [۳]. آنچه در روند این تحلیل بیش از هر چیز دیگر به طراح کمک می‌کند، داشتن اطلاعات کافی از خواص جرمی سطح برآزا شامل مقدار جرم، موقعیت مرکز جرم، ممان اینرسی و حاصل ضرب اینرسی است که تنها با وجود یک آزمایشگاه اندازه‌گیری خواص جرمی قابل دسترس خواهد بود.

تعیین دقیق ممان اینرسی دورانی برای یک ملخ هواپیما یا ملخ بالگرد در عملکرد آن تأثیر به‌سزایی خواهد داشت. عدم دقت در محاسبه و برآورد این خواص می‌تواند تنش‌های ناخواسته‌ای را در سیستم ملخ به‌وجود آورده و این تنش‌ها به‌نوبه خود به سایر اجزای سیستم از جمله محور ملخ، یاتاقان‌ها و نگهدارنده موتور منتقل شده و عملکرد هریک از آنها را دچار اختلال نماید. طراحی و ساخت بالگردها نیز به خواص جرمی آن، به‌ویژه مرکز ثقل و گشتاورهای ماند و حاصل ضرب اینرسی وابستگی زیادی دارد. بنابراین مراکز طراحی و ساخت بالگرد پیش از طراحی یک بالگرد جدید و یا بهینه‌سازی یک طرح قدیمی، نیازمند پژوهش و مطالعات گسترده‌ای در این زمینه می‌باشند. گذشته از موارد فوق، که زیر مجموعه‌ای از صنایع هوافضایی محسوب می‌شوند، صنایع دیگر از جمله صنایع خودرویی و راه‌آهن نیز می‌توانند با بهره‌مندی از یک آزمایشگاه مجهز اندازه‌گیری خواص جرمی، به پژوهش جدی در عرصه فناوری‌های مورد نیاز خود بپردازند.

باوجود آنچه در مورد اهمیت خواص جرمی و نقش آن در تحلیل مسائل دینامیکی بیان شد، باید به این موضوع اشاره نمود

که متأسفانه در ایران و به‌ویژه در صنایع نظامی، تاکنون به این موضوع به‌طور جدی توجه نشده است؛ این امر خود می‌تواند دلائل متعددی داشته باشد [۱]. عدم دستیابی به تجهیزات دقیق آزمایشگاهی، ناشی از تحریم‌های موجود علیه کشور می‌تواند یکی از علل اصلی این بی‌توجهی باشد. عدم شناخت کافی از اهمیت موضوع و درک صحیح آن و یا اعتماد به روش‌های کاملاً نظری یا نرم‌افزاری می‌تواند دلیل دیگری برای این موضوع باشد. به هر حال، به جرأت می‌توان گفت که در ایران به‌جز موارد بسیار انگشت‌شمار، آن هم با فناوری بسیار سطح پایین، هیچ‌گونه مرکز یا آزمایشگاه معتبری در این زمینه وجود ندارد و لزوم ایجاد چنین آزمایشگاهی کاملاً احساس می‌شود. هم‌اکنون در ایران و در صنایع مختلف نظامی و غیرنظامی، زمینه‌های متنوعی در بخش تحقیقات و طراحی وجود دارد که به نوعی با مسائل دینامیکی مرتبط بوده و بیش از هر مکان و زمان دیگری نیاز به احداث چنین آزمایشگاهی را احساس می‌کنند. اغلب مراکز و صنایع موشکی در کشور، که هم‌اکنون به مرحله تولید نیز رسیده‌اند، باوجود اصلاحاتی که در طرح‌های اولیه خود لحاظ نموده‌اند، روش مناسبی برای تعیین خواص جرمی محصولات خود ندارد و لذا با خطاهای عملیاتی قابل توجهی دست به‌گریبانند. البته همان‌گونه که اشاره شد، برخی از این صنایع اقدام به ساخت سیستم‌های اندازه‌گیری خواص جرمی نموده‌اند که به‌دلیل نارسایی‌های موجود در طراحی و ساخت آنها و عدم دقت کافی در اندازه‌گیری، تجهیزات نام‌برده چندان مورد توجه آنها نبوده و همواره در جستجوی یک آزمایشگاه دقیق و قابل اعتماد بوده‌اند. این موضوع در مورد صنایع هواپیمایی کشور نیز عیناً صادق بوده و این بخش از صنعت کشور نیز از نبود چنین سیستم آزمایشگاهی رنج می‌برد. سایر بخش‌های صنعتی کشور نیز کمابیش این کمبود را احساس نموده و به‌طور مقطعی به‌دنبال راه‌حل مناسبی برای رفع آن بوده‌اند و به‌نظر می‌رسد تاکنون به نتایج خاصی در این زمینه دست نیافته‌اند. از آنچه گفته شد می‌توان نتیجه گرفت که گامی اساسی و مهم در جهت نیل به یک محصول ارزشمند صنعتی، به‌ویژه در زمینه صنایع حساس و حیاتی دفاعی کشور که به‌طور قطع ضامن امنیت آینده کشور محسوب می‌شوند، پیش از هر چیز تعریف و تبیین رویکردی است جهت ایجاد یک آزمایشگاه توانمند و قابل اطمینان در زمینه اندازه‌گیری خواص جرمی می‌باشد [۱].

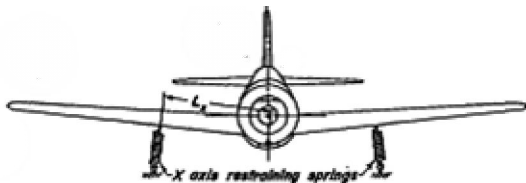
## ۲. انواع روش‌های اندازه‌گیری ممان اینرسی

تعیین خواص جرمی نیز می‌تواند به دو شکل نظری و تجربی صورت گیرد. رویکردهای نظری برای تعیین ممان اینرسی و حاصل‌ضرب اینرسی مشتمل بر محاسبه انتگرال‌هایی است که در تمامی حجم جسم صورت می‌گیرد و اغلب دشوار و در برخی موارد محاسبه دقیق آن غیرممکن می‌است. علاوه بر آن، در شکل‌های پیچیده با توزیع جرم‌های غیرهمگن، امکان مدلسازی جزئیات توزیع جرم وجود ندارد. روش دیگر برای محاسبه و تعیین خواص جرمی، استفاده از نرم‌افزارهای مدلسازی است. این نرم‌افزارها خواص جرمی را با دقت خوبی محاسبه می‌کنند که از نتایج آنها می‌توان در مراحل مقدماتی بهره‌مند شد، اما برای استفاده در مراحل طراحی تفصیلی چندان قابل اطمینان نیستند [۴]. در مقابل روش‌های نظری ذکرشده، روش‌های تجربی و آزمایشگاهی قرار دارند که در صورت اجرای صحیح می‌توانند نتایج بسیار دقیق و قابل اطمینانی نیز به‌همراه داشته باشند. در صورت داشتن یک دستگاه اندازه‌گیری مناسب، با انجام آزمایشات مختلف می‌توان ممان اینرسی را با دقت خوبی حول محورهای مختلف به‌دست آورد. یکی از بهترین روش‌های آزمایشگاهی روش پاندول پیچشی وارون است، روش‌های پاندول پیچشی، پاندول با میله اتصال بدون وزن، پاندول با میله اتصال وزن‌دار، گهواره‌ای، سطح شیب‌دار، سقوط وزنه، پاندول پیچشی سه‌کابلی از دیگر روش‌های آزمایشگاهی می‌باشد که علاوه بر دقت پایین محدودیت در اندازه‌گیری اجسام در ابعاد و وزن را دارا هستند. اندازه‌گیری مستقیم خواص جرمی در مقایسه با روش‌های محاسباتی دارای مزایای زیر می‌باشد:

۱. دقت بیشتر، خطاهای نمادین در محاسبه ممان اینرسی می‌تواند تا ۳۰ درصد ناشی از ساده‌سازی شکل قطعه یا فرضیات مربوط به چگالی متوسط باشد.
۲. صرفه‌جویی در قیمت، اندازه‌گیری می‌تواند در کسری از زمان لازم برای محاسبه دقیق ممان اینرسی انجام گیرد.
۳. بیمه کیفیت، مشخصه‌های نظامی و صنعتی به‌طور مکرر محدودیت‌هایی را بر ممان اینرسی و موقیت مرکز ثقل قرار می‌دهند که این پارامترها برای عملکرد موشک‌ها، گلوله‌ها و اجزاء بازگشت مجدد بحرانی‌اند.

## ۳. تاریخچه اندازه‌گیری ممان اینرسی

اندازه‌گیری سایر خواص جرمی، از جمله ممان اینرسی، قدمت چنان زیادی ندارد. در سال ۱۹۲۷ م، مهندسی به نام ام. دبلیو. گرین از کمیته مشورت ملی برای هوانوردی مبادرت به اندازه‌گیری ممان اینرسی یک هواپیما با مقیاس کامل نمود، سه سال بعد؛ یعنی در سال ۱۹۳۰ م، دانشمند دیگری از سازمان ناکا به نام میلر، روشی دقیق برای تعیین ممان اینرسی هواپیما ارائه نمود که مبتنی بر ارتعاشات عرضی و طولی هواپیما مطابق شکل ۲ بود [۱]. در سال ۱۹۶۳ م، پری مبادرت به اندازه‌گیری ممان اینرسی هواپیمای Avro 707B در مقیاس کامل نمود [۵].



شکل ۲. اندازه‌گیری ممان اینرسی هواپیما مبتنی بر ارتعاشات عرضی و طولی [۱]



شکل ۳. اندازه‌گیری ممان اینرسی یک هواپیما با مقیاس کامل [۵]

روش آونگ پیچشی به‌عنوان روشی برای اندازه‌گیری مستقیم ممان اینرسی در کتاب‌های استاندارد دینامیک از حدود سال‌های ۱۸۰۰ م پیشنهاد شده است [۶]. در متون جدیدتر، آونگ پیچشی شامل میله نازکی است که یک جسم از طریق مرکز جرم آن و صفحه ثابتی به میله پیچشی آویزان شده و سپس جسم با دست چرخانده و رها می‌شود. با محاسبه زمان دقیق نوسان و روابط موجود ممان اینرسی محاسبه می‌گردد. اما مشکلاتی چون تأثیر وزن جسم بر میله پیچشی و در نتیجه تغییرات در ثابت پیچشی میله و همچنین آسیب‌های ناشی از

آویزان نمودن به خود نمونه تست سبب شد تا روش آونگ پیچشی معکوس یا میز ممان اینرسی توسعه پیدا نماید. در این روش موقعیت میله پیچشی برعکس می‌گردد و قطعه به واسطه یک میز روی میل پیچشی قرار می‌گیرد. در این روش وزن قطعه به‌طور محوری روی میله پیچشی قرار ندارد، بلکه توسط میز تحمل می‌گردد و میله پیچشی تنها، متحمل نیروی پیچشی می‌باشد. اما مشکل اساسی در اینجا وجود اصطکاک در میز ممان اینرسی بین سطوحی است که باید روی هم چرخش داشته باشند [۶]. بر این اساس، در سال ۱۹۸۶ م برای نخستین بار از یاتاقان هوایی از نوع تخت جهت حداقل نمودن اصطکاک و در نتیجه حذف تقریبی میرایی استفاده شد. در این روش بوینتون و همکاران (۱۹۶۸) سیستمی را جهت اندازه‌گیری ممان اینرسی با روش میز ممان اینرسی یاتاقان هوا طراحی نمودند [۷]. در سال ۱۹۹۹ و ۲۰۰۰ م، ریچارد بوینتون و گروه تحقیقاتی وی در شرکت اسپیس الکترونیک میز ممان اینرسی را با ادغام یاتاقان‌های کروی و استوانه‌ای توسعه دادند و این امر منجر به پیدایش میزهای ممان اینرسی با قابلیت تعیین دقیق مرکز ثقل و ممان اینرسی گشت [۸]. از این فناوری به‌طور خاص در تعیین دقیق خواص جرم مخازن حاوی سوخت استفاده شد و بدین روش پارامترهای مؤثر بر خواص جرم مخازن حاوی سیال، همچون شکل هندسی مخزن، ویسکوزیته سیال و یا پر و خالی بودن مخزن مورد بررسی و ارزیابی دقیق علمی قرار گرفت. پژوهش‌های فراوانی در سال‌های اخیر برای افزایش دقت اندازه‌گیری ممان اینرسی با روش آونگ پیچشی وارون صورت گرفته است [۹].

#### ۴. کالیبراسون دستگاه

ممان اینرسی یک جسم صلب با استفاده از دستگاه مبتنی بر روش آونگ وارون به کمک رابطه ۱ به دست می‌آید:

$$I = C(T^2 - T_0^2) \quad (2)$$

که در آن  $T_0$  پریود نوسانات میز خالی،  $T$  پریود نوسانات جسم همراه با میز،  $I$  ممان اینرسی حول محور چرخش و  $C$  یک ضریب ثابت است [۱۰]. در رابطه فوق پریود نوسان‌ها به کمک یک زمان سنج نوری حساس تعیین می‌شوند، اما ضریب  $C$  را تنها می‌توان از طریق کالیبراسیون و به کمک اجسامی تعیین نمود که ممان اینرسی آنها به دقت از روش‌های تئوری قابل

محاسبه است [۱۱]. برای این منظور از نمونه‌های کالیبراسیون با ممان اینرسی معلوم استفاده شده است. این نمونه‌ها شامل دو استوانه توپر آلومینیومی و یک استوانه توخالی فولادی است (شکل ۴). با استفاده از آزمایشات طراحی شده برای به دست آوردن ضریب کالیبراسیون (شکل ۵) و بررسی تأثیر تغییرات دما بر اندازه‌گیری‌ها، نمودارهای کنترل کیفیت دستگاه رسم شده‌اند که حاکی از دقت بالا و تکرارپذیری آزمایشات و دستگاه اندازه‌گیری دارند.

نمودار شکل ۶ نتایج کالیبراسیون دستگاه را نشان می‌دهد که براساس آن ضریب  $C$  برابر  $31/5448$  به دست آمده است. محدودیت وزنی دستگاه با توجه به یاتاقان‌های استفاده شده در حدود  $200$  کیلوگرم می‌باشد، همچنین دستگاه مذکور محدودیتی در ابعاد جسم مورد اندازه‌گیری ندارد.

#### ۵. نمودارهای کیفیت

نمودار کنترل ابزاری برای کنترل فرایند درجین تولید از طریق بررسی روند تغییرات شاخص‌های آماری مربوط به مشخصه‌های مورد نظر محصولات است. در این کار تحقیقاتی نمودارهای کنترلی را برای دستگاه اندازه‌گیری ممان اینرسی رسم کرده تا نشان دهیم دستگاه از تکرارپذیری بالایی برخوردار است و خطا در اندازه‌گیری قابل اغماض می‌باشد. اساس نمودارهای کنترل بر توزیع نرمال استوار است. با استفاده از قضیه حد مرکزی، تابع توزیع همه فرایندهای تولیدی با انتخاب اندازه نمونه مناسب، قابل تبدیل به توزیع نرمال هستند. در حالت تحت کنترل، نقاط باید رفتاری شبیه تابع نرمال داشته باشند؛ یعنی نقاط ترسیمی داخل نمودار کنترل، حالت طبیعی داشته باشند و تمام نقاط، بین حدود کنترل و به صورت تصادفی قرار گیرند. بیشتر تمرکز نقاط، نزدیک خط مرکزی باشد [۱۲].

نمودارهای کنترل، ابزاری قوی برای شناسایی حالت خارج از کنترل (زمانی که علل خاص در فرایند اثر می‌گذارند) هستند. علل خاص باعث می‌شود که میانگین فرایند یا انحراف معیار فرایند یا هر دو تغییر کند. تعدادی قانون عمومی وجود دارد که برحسب آنها، مشاهده هر یک از حالات زیر در نقاط ترسیمی نمودارهای کنترل به معنای حالت خارج از کنترل است. این قوانین به شرح زیر هستند.

۱. یک نقطه خارج از حدود بالا یا پایین نمودار کنترل

باشد؛ یعنی تغییر اکتسابی در آن اثر نگذاشته و در نتیجه، میانگین و انحراف استاندارد یا هر دو تغییر نکرده باشد، احتمال ایجاد هر یک از حالات فوق بسیار ناچیز خواهد بود.

برای تشخیص حالت‌های خارج از کنترل نمودارهای میانگین ۹ شرط ذکر شد وجود دارد، اما برای نمودار انحراف معیار فقط ۴ شرط اول لازم است. بدین‌منظور نمودارهای کنترل کیفیت (میانگین و دامنه) این دستگاه توسط نرم‌افزار مینی‌تب<sup>۱</sup> رسم شده‌اند. تغییرات دما یکی از موارد ایجاد خطا می‌باشد که برای بررسی اثر تغییرات دما به مدت ۲ ماه (در ۲۵ روز و در هر روز ۵ مرتبه) به‌طور مشابه یک اندازه‌گیری را تکرار نموده تا خطای حاصل از تغییرات دما به‌دست آید که با استفاده از آن داده‌ها، نمودارها رسم شده‌اند. در شکل ۷ نمودار دامنه و در شکل ۸ نمودار میانگین دستگاه اندازه‌گیری ممان اینرسی رسم شده‌اند. این نمودارها نشان می‌دهند که فرایند اندازه‌گیری تحت کنترل است و دستگاه از دقت و تکرارپذیری بسیار بالایی برخوردار بوده و داده‌هایی که از آزمایشات به‌دست می‌آید قابل اطمینان می‌باشند.



شکل ۵. نمونه‌ای از آزمایشات برای به‌دست آوردن ضریب کالیبراسیون

از عوامل ایجاد خطا در دستگاه اندازه‌گیری ممان اینرسی می‌باشد [۱۰]، اگرچه این منبع خطا یکی از عوامل موجود در خود دستگاه نیست؛ اما خطای کل اندازه‌گیری به‌شدت تحت تأثیر توانایی کاربر در استقرار دقیق شیء مورد اندازه‌گیری نسبت به محور دستگاه اندازه‌گیری است. بایستی مرکز جرم قطعه مورد آزمایش به‌طور دقیق روی محور چرخش پاندول پیچشی قرار بگیرد تا از این طریق بتوان مقدار این خطا را به حداقل مقدار خود رساند. سختی پیچشی فیکسچر استفاده شده باید بالا باشد، لذا برای این منظور باید علاوه بر تحلیل استحکام، تحلیل مودال

۲. نه نقطه پشت سرهم در یک طرف خط مرکزی

۳. شش نقطه پشت سرهم به‌صورت صعودی یا نزولی

۴. چهارده نقطه به‌صورت پشت سرهم یک در میان بالا و پایین

۵. دو نقطه از سه نقطه متوالی در حدود یک‌سوم انتهای نمودار کنترل (در یک طرف)

۶. چهار نقطه از پنج نقطه متوالی در حدود دو سوم انتهای نمودار کنترل (در یک طرف)

۷. پانزده نقطه پشت سرهم داخل حدود یک‌سوم از خط مرکزی (در هر دو طرف)

۸. هشت نقطه پشت سرهم خارج از حدود یک‌سوم از خط مرکزی (در هر دو طرف)

۹. رفتار سیکلی (تناوب)

با کمک این قوانین می‌توان با مشاهده یک نمودار کنترل، دربارهٔ تحت کنترل بودن یا خارج از کنترل بودن آن اظهار نظر کرد. علت اینکه هر یک از ۹ قانون مذکور به‌عنوان شرایط خارج از کنترل معرفی شده‌اند، این است که اگر فرایندی تحت کنترل



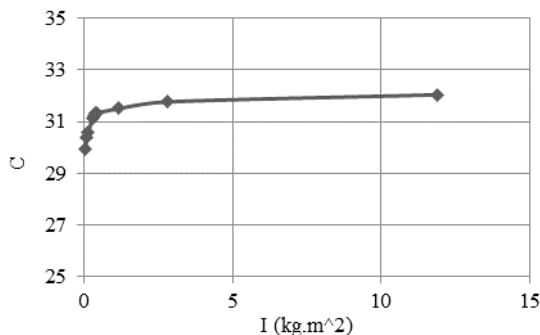
شکل ۴. تصویری از نمونه‌های کالیبراسیون

## ۶. طراحی فیکسچر جهت استقرار پهباد

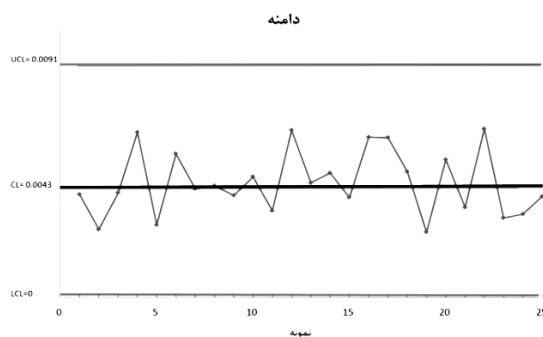
بررسی‌های انجام‌شده روی دستگاه نشان داد که عوامل خطا چه تأثیری بر دقت اندازه‌گیری‌ها دارد [۱]. این خطاها شامل هم‌مرکز نبودن محور اصلی شیء مورد اندازه‌گیری و محور چرخش میله، افزایش در اندازهٔ ممان اینرسی ناشی از هوای محبوس‌شده در داخل شیء تحت آزمایش، میرایی لزجی ناشی از هوای مزاحم، تغییرات دما و تأثیر آن بر اندازهٔ ممان اینرسی اجسام، کالیبره‌نبودن دستگاه، سختی پیچشی فیکسچر و اصطکاک در یاتاقان‌ها می‌باشند. طراحی ناصحیح فیکسچر یکی

خصوص فیکسچرهای طراحی شده در کار تحقیقاتی حاضر انجام گرفته و نتایج آنالیز حاکی از صلبیت لازم برای فیکسچرها می باشد.

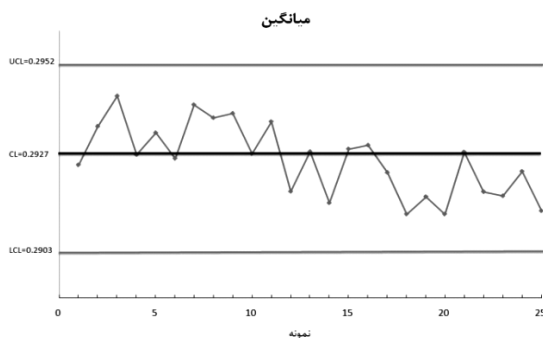
نیز در مورد فیکسچر انجام گیرد، به گونه ای که حتی الامکان فرکانس های اصلی آن به اندازه کافی (معمولاً بیش از ده برابر) از فرکانس نوسانات دستگاه اندازه گیری بالاتر باشد. این امر در



شکل ۶. نمودار تغییرات ضریب کالیبراسیون بر حسب ممان اینرسی



شکل ۷. نمودار کنترل دامنه

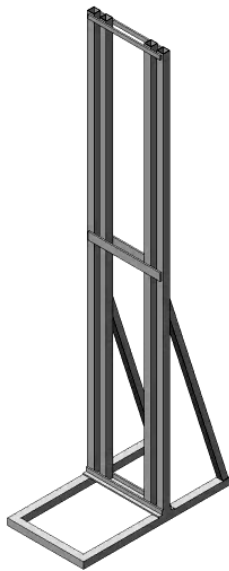


شکل ۸. نمودار کنترل میانگین

کار لازم است علاوه بر مشخص کردن هدف طراحی، به طور کامل قطعه مورد آزمایش را شناخت و از استانداردهای موجود در بازار بهره گرفت تا در هزینه صرفه جویی شود [۱۳]. براساس مشخصات هواپیما و شکل کلی فیکسچرهای موجود در مراجع طراحی [۱۴]، فیکسچری زاویه دار برای این کار تحقیقاتی طراحی شد. اندازه و پیچیدگی فیکسچر به شکل و اندازه قطعه بستگی دارد. امروزه طراح علاوه بر اینکه طرح دقیق و مطلوب

هدف، طراحی فیکسچر برای ثابت نگاه داشتن یک پهباد نمونه روی دستگاه اندازه گیری ممان اینرسی به منظور به دست آوردن ممان اینرسی حول محورهای اصلی می باشد. فیکسچر مورد نظر باید به دلیل ماهیت نوسانی بودن دستگاه، محدودیت های مجاز علاوه بر هزینه و وزن، فاکتورهایی از قبیل فرکانس نوسانات، تنش و جابه جایی را ارضا نماید. نخستین گام در طراحی فیکسچرها ساماندهی اطلاعات اولیه است. برای این

نرم افزار انسیس<sup>۲</sup> تحلیل مودال انجام گرفت و فرکانس اول فیکسچر حول محور رول، که به دلیل طول بلند حائز اهمیت تر است، حدود ۱۵ هرتز می باشد. وزن فیکسچر رول پس از ساخت ۷/۸۵ کیلوگرم شد که با توجه به وزن پهپاد، می توان به یقین گفت وزن فیکسچر عامل خطا در اندازه گیری نبوده است.



شکل ۹. فیکسچر طراحی شده برای اندازه گیری ممان اینرسی پهپاد حول محور رول



شکل ۱۰. فیکسچر طراحی شده برای اندازه گیری ممان اینرسی پهپاد حول محور یاب و پیچ

#### ۷. اندازه گیری ممان اینرسی حول محورهای اصلی

شکل های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ چگونگی استقرار پهپاد مورد اندازه گیری روی میز جهت تعیین ممان اینرسی حول محورهای اصلی را نشان می دهد.

برای یک فیکسچر تهیه کند، باید حداقل هزینه را برای این کار صرف نماید. ملاحظات اقتصادی ابتدا باید در ایده طراح نقش ببندد و سپس در ساختار محصول ساخته شده تجلی پیدا کند.

طراحی فیکسچر مورد نظر به صورتی انجام پذیرفت که علاوه بر پهپاد مورد آزمایش، بتوان برای اشیای دیگر مورد استفاده قرار گیرد، همچنین برای ساخت فیکسچر از قطعات استاندارد موجود در بازار استفاده شود. یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار در طراحی، وزن فیکسچر است که به طور مستقیم با جنس فیکسچر ارتباط دارد. فیکسچر باید تا جایی که ممکن است از جرم کمتری نسبت به قطعه مورد آزمایش برخوردار باشد تا تأثیر کمتری بر ممان اینرسی قطعه مورد آزمایش اعمال کند و دقت محاسبات افزایش یابد. بدنه فیکسچرها به یکی از سه روش ریخته گری، جوشکاری و ماشینکاری ساخته می شوند. همچنین جنس بدنه فیکسچرها از فولاد، چدن، آلایزهای آلومینیم و منیزیم، رزین اپوکسی و چوب انتخاب می شود. جمله مزایای بدنه ریخته گری شده می توان به ثبات ابعادی، صرفه جویی در زمان ماشینکاری و به دست آوردن فرم های پیچیده اشاره نمود. همچنین بدنه های ریخته گری شده، بهتر می توانند ارتعاشات را جذب کنند. عیب اساسی بدنه های ریخته گری شده، هزینه زیاد ساخت آن به دلیل نیاز به آماده کردن مدل ریخته گری و مدت زمان آماده سازی طولانی آن است. بدنه های جوشکاری شده نیز از استحکام و صلبیت خوبی برخوردارند. همچنین این نوع بدنه ها به سادگی قابل اصلاح هستند و مدت زمان آماده سازی آنها نیز کوتاه است. البته این نوع بدنه ها هزینه قابل توجهی دارند. بدنه ماشینکاری شده در ساخت فیکسچرها از بقیه انواع روش های ساخت معمول تر هستند. این بدنه ها را می توان از هر جنسی نظیر فولاد، قطعات ریخته گری شده، آلومینیم، منیزیم یا حتی چوب ساخت. از مزایای این نوع بدنه ها می توان به سادگی طراحی، آسانی اصلاحات و مدت زمان آماده سازی کم اشاره کرد. ویژگی دیگر این نوع بدنه، امکان استفاده از قطعات و تجهیزات استاندارد است. برای ساخت بدنه فیکسچر روش جوشکاری مورد استفاده قرار گرفت، با توجه به هزینه و اهمیت تنش، نوسانات، جابه جایی و در دسترس بودن قطعات مختلف در بازار، قطعات توخالی با جنس آلومینیم برای ساخت فیکسچر انتخاب شد. با استفاده از





شکل ۱۲. چگونگی استقرار پهپاد

روی دستگاه برای اندازه‌گیری ممان اینرسی حول محور پیچ



شکل ۱۱. چگونگی استقرار پهپاد

روی دستگاه برای اندازه‌گیری ممان اینرسی حول محور یاو



شکل ۱۳. چگونگی استقرار پهپاد روی دستگاه برای اندازه‌گیری ممان اینرسی حول محور رول

$$I_{airplane} = I_T - I_F + I_{wing} - I_f + m_{wing}R^2 \quad (2)$$

که در آن  $I_{Airplane}$  ممان اینرسی پهپاد حول محور رول،  $I_T$  ممان اینرسی پهپاد به همراه فیکسچر،  $I_F$  ممان اینرسی فیکسچر مخصوص پهپاد،  $I_{wing}$  ممان اینرسی بال به همراه فیکسچر،  $I_f$  ممان اینرسی فیکسچر مخصوص بال،  $m_{wing}$  جرم بال و  $R$  فاصله مرکز جرم پهپاد از محل قرارگیری بال می‌باشد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری حول محورهای رول و پیچ را در جدول‌های ۲ و ۳ ملاحظه می‌شود.

### ۸. نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از فرایند کالیبراسیون به کمک چند نمونه استاندارد با ممان اینرسی معلوم و رسم نمودارهای کنترل کیفیت، حاکی از عملکرد بسیار دقیق دستگاه اندازه‌گیری مبتنی بر نوسان پیچشی یک آونگ وارون است. خطای این اندازه‌گیری‌ها زیر یک درصد و دستگاه از تکرارپذیری بسیار بالایی برخوردار است. از مهمترین عوامل خطا در این دستگاه می‌توان به اصطکاک هرچند اندک در یاتاقان‌ها و مهمتر از همه، خطای عدم همراستایی مرکز جرم با محور دوران ناشی از طرح فیکسچر اشاره کرد که با طراحی بهینه فیکسچر این خطا به حداقل مقدار

پس از آماده‌شدن فیکسچرها برای اندازه‌گیری ممان اینرسی حول محور یاو، هواپیما مطابق شکل ۱۱ توسط این فیکسچر روی میز به گونه‌ای نصب گردید که مرکز جرم هواپیما از امتداد محور میله پیچشی عبور نماید. سپس با اعمال یک انحراف اولیه به میز و آزادساختن آن، هواپیما، میز و متعلقات آن شروع به نوسان نموده که دوره تناوب این نوسانات به کمک حسگر نوری دستگاه، ثبت و جهت تعیین ممان اینرسی توسط میکرو کنترلر واسط به کامپیوتر ارسال می‌گردد. سپس اندازه‌گیری مشابهی بدون حضور هواپیما انجام گرفت و در نهایت ممان اینرسی خالص هواپیما از تفاضل این دو اندازه‌گیری به دست آمد. هر یک از این اندازه‌گیری‌ها چندین بار تکرار گردید تا از صحت و تکرارپذیری بودن اندازه‌گیری‌ها اطمینان حاصل گردد. جدول ۱ خلاصه نتایج این اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. همین روش اندازه‌گیری برای تعیین ممان اینرسی هواپیمای موردنظر حول دو محور دیگر نیز انجام گرفت. گفتنی است برای اندازه‌گیری ممان اینرسی حول محور پیچ به دلیل شکل خاص فیکسچر، ناگزیر از انجام دو بار اندازه‌گیری شامل پهپاد بدون بال و بال تنها شده و ممان اینرسی پهپاد حول محور رول از رابطه ۲ حاصل گشت.

ممکن رسید. نتایج تحلیل مودال نشان داد که فیکسچر از سفتی کافی جهت فراهم ساختن یک مجموعه صلب نیز برخوردار است. فاکتورهایی از قبیل وزن، مقدار تنش، جابه‌جایی در طراحی فیکسچرها لحاظ شده و فیکسچرهای ساخته‌شده از نظر صنعتی مورد تأیید و مقرون به‌صرفه می‌باشند. همچنین با توجه به اختلاف بیشینه و کمینه دمای محیط آزمایشگاه در طول

انجام تحقیقات که حدود ۱۵ درجه سانتی‌گراد بوده است، محاسبات انجام‌شده نشان داد که خطای حاصل از تغییرات دما در حدود ۰/۰۳ درصد است. این موضوع بیانگر این است که برای اندازه‌گیری در فصول مختلف نیازی به کالیبراسیون دستگاه نمی‌باشد؛ چون خطای حاصل از تغییرات دما بسیار ناچیز است.

جدول ۱. نتایج حاصل از اندازه‌گیری ممان اینرسی حول محور یابو

ممان اینرسی	دوره تناوب میانگین	جسم مورد آزمایش
۴۶/۱۰۵۸۷۷۰۲	۱/۲۰۸۷۷۴۸۵۷	پهپاد + فیکسچر
۱۳/۵۶۱۵۸۸۵۳	۰/۶۵۵۵۸۸۲۵	فیکسچر
۳۲/۵۴۴۲۸۸۴۹		پهپاد

جدول ۲. نتایج حاصل از اندازه‌گیری ممان اینرسی حول محور رول

ممان اینرسی	دوره تناوب میانگین	جسم مورد آزمایش
۸/۵۴۹۲۵۹	۰/۵۲۰۵۱۲۸	پهپاد + فیکسچر
۶/۴۰۵۱۳۷۸	۰/۴۵۰۵۵۰	فیکسچر
۲/۱۴۴۱۲۱۱۹۷		پهپاد

جدول ۳. نتایج حاصل از اندازه‌گیری ممان اینرسی حول محور پیچ

ممان اینرسی	دوره تناوب میانگین	جسم مورد آزمایش
۴۴/۴۱۰۷۹۴	۱/۱۸۶۳۴۷	پهپاد بدون بال + فیکسچر
۱۳/۵۶۱۵۸۸۵۳	۰/۶۵۵۵۸۸۲۵	فیکسچر مخصوص پهپاد
۳۰/۸۴۹۲۰۵۴۷		پهپاد بدون بال
۸/۴۵۲۳۰۵	۰/۵۱۷۵۶۷	بال + فیکسچر
۸/۲۷۵۶۰۷	۰/۵۱۲۱۱۵	فیکسچر مخصوص بال
۰/۱۷۶۶۹۸		بال
۳۱/۱۳۵۸۸۲		پهپاد

## ۹. مآخذ

[۱] ح. قره‌باغی، م. رامندی صدیق، بررسی تأثیر طراحی فیکسچر بر روی دقت دستگاه اندازه‌گیری ممان اینرسی، پایان‌نامه کارشناسی، دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر، ۱۳۸۷.

- [۲] س. شکراللهی، ف. بخشی نازلو، م. نجاتی، تحلیل طراحی و ساخت یاتاقان هوایی کروی جدید مورد استفاده در دستگاه اندازه‌گیری ممان/اینرسی، بیست و دومین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک، اهواز، انجمن مهندسان مکانیک ایران، ۱۳۹۳.
- [۳] س. شکراللهی، م. توکلی، ر. ناظری، تعیین تجربی ممان‌های اینرسی و حاصلضرب‌های اینرسی سطح کنترل یک موشک نمونه به منظور پیش‌بینی سرعت فلاتر، هشتمین کنفرانس انجمن هوافضای ایران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ۱۳۸۷.
- [4] P. L. Ringengi, M. D. Actice, A. J. Patanella., An Experimental Technique for determining mass inertial properties of irregular shape bodies and mechanical assemblies, *International Journal of ELSEVIER, Measurement*, Vol. 29, pp. 63-75, 2001.
- [5] D. H. Perry, M. A., *Measurements of the Moments of Inertia of the Avro 707B Aircraft*, MINISTRY OF AVIATION, AERONAUTICAL RESEARCH COUNCIL CURRENT PAPERS, No. 647, 1963.
- [۶] م. جباری، ج. موسوی، ک. حسن‌نژاد، س. خلیل‌زاده، طراحی، ساخت و راه‌اندازی میز ممان اینرسی به کمک یاتاقان هوایی، نهمین کنفرانس انجمن هوافضای ایران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ۱۳۸۸.
- [7] R. S. Boynton, D. G. Stadelbauer, *Measuring Moment of Inertia on An Aerospace Balancing System*, For presentation At The 27<sup>th</sup> Annual Conference of the Society of Aeronautical Weight Engineers, Inc. At New Orleans, Louisiana, 13-16, 1968.
- [8] R. S. Boynton, President Space Electronics, Inc, *The Moment of Inertia of Fluids*, For presentation at the 58<sup>th</sup> Annual Conference of the Society of Allied Weight Engineers. San Jose, California, May24-26-1999.
- [9] Y. Zheng, M. Lin, B. Guo, *Instrument for measuring moment of inertia with high precision*, Sixth International Symposium on Precision Engineering Measurements and Instrumentation, 2010.
- [10] R. Boynton, *Mass Properties Measurements Errors Which Could Have Been Avoided*, Space Electronics, Inc. 81, Fuller Way, Berlin, Connecticut 06037.
- [11] R. Boynton, *Mass Properties Measurements Handbook*, Parts 1, 2, 3. Space Electronics, Inc. 81, Fuller Way, Berlin, Connecticut 06037.
- [۱۲] ر. نورالسناء، کنترل کیفیت آماری، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۶.
- [۱۳] ا. فیشر، رویتلینگن، جداول و استانداردهای طراحی و ماشین‌سازی، ترجمه عبدالله ولی‌نژاد، طراح، تهران، ۱۳۸۱.
- [۱۴] ا. هافمن، جیگ و فیکسچر، گام به گام طراحی و ساخت، ترجمه اکبر شیر خورشیدیان، طراح، تهران، ۱۳۸۰.

## پی‌نوشت

- 
1. Minitab
  2. Ansys