Quarterly Journal of Defense Technology Engineering Imam Ali University

Summer 2025, Vol. 42

Original Research

Application of new health monitoring sensor technology in helicopter structures

Javad Deldarshikhi[1], Ali Mehrabi[2], Ehsan Abdollahi [3*]

[1] Lecturer of Aviation Engineering, Flight and Engineering Department, Imam Ali University

[2] Aerospace Assistant Professor, Flight and Engineering Department, Imam Ali University

[3] Master's degree student in Helicopter Engineering, NET major, Imam Ali University (AS)

ARTICLE INFO

Received: 2025.06.26

Accepted: 2025.08.06

Published: 2025.09.06

Keyword:

Helicopter maintenance and repairs
Monitoring
Sensors
Structure
Rotor blade

***Corresponding Author:**

Ehsan abdollahi

Email:

Ehsanabdollahi359@gmail.com

ABSTRACT

The purpose of this research is to identify and investigate the need for monitoring the health of helicopter structures by introducing technological methods and the evolution of health monitoring sensors. Despite the small share of technical defects in aviation incidents and accidents, which is only 10% [1] compared to other influential and prominent factors, aviation industry leaders have seriously considered reducing technical defects or controlling them, and implementing predictive and preventive maintenance in this area as one of their long-term goals. This measure is an effective step towards reducing maintenance costs before defects spread uncontrollably, reducing accident rates, and increasing the reliability of aircraft. On the other hand, structural health monitoring or other air systems are complementary to control systems, because if we benefit from a powerful monitoring system, we will have more comprehensive and accurate information for use in control systems. In the following, methods for monitoring structural health with a helicopter main propeller approach are studied.

فصل نامه مهندسی فناوری‌های دفاعی دانشگاه افسری امام علی (ع)

تابستان 1404 ، دوره 42

مقاله پژوهشی

بکارگیری فناوری نوین حسگرهای پایش سلامت در سازه های بالگرد

جواد دلدارشیخی[1]، علی مهرابی[2]، احسان عبداللهی[3*]

۱ مدرس عالی هوافضا، گروه مهندسی هواگردها، دانشکده مهندسی و پرواز، دانشگاه امام علی (ع)

۲ استادیار هوافضا، گروه مهندسی هواگردها، دانشکده مهندسی و پرواز، دانشگاه امام علی (ع)

۳ دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد رشته مهندسی بالگرد ، گرایش نت ، دانشگاه امام علی (ع)

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: 1404/04/05

پذیرش مقاله: 1404/05/15

انتشار مقاله: 1404/06/15

کلید واژگان:

نگهـداری و تعمیـرات بـالگرد، پایش، حسگر، سازه ، ملخ

نویسنده مسئول*

احسان عبداللهی

پســـت الکترونیکـــی:

Ehsanabdollahi359@gmail.com

چکیده

هدف این تحقیق شناخت و بررسی چگونگی و لزوم نظارت بر سلامت سازه های بالگرد در قالب معرفی روش های فناورانه و سیر تکامل حسگرهای پایش سلامت می‌باشد. سیستم‌های پایش سلامت و کارکرد به طور گسترده برای پایش سلامت سازه و سامانه انتقال قدرت در بالگردها استفاده می‌شوند. در عین حال، سازه‌های حیاتی بالگرد مانند روتورهای اصلی و دم یا دنباله بالگرد هنوز تحت پایش دائمی قرار نگرفته اند. علیرغم سهم اندک و 10 درصدی نقص های فنی در رویدادها و سوانح هوائی به نسبت عوامل موثر و مطرح دیگر، پیشگامان تولید در صنعت هوائی، بطور جدی اهتمام بر کاهش نواقص فنی و یا کنترل، تعمیر و نگهداری پیش بینانه و پیشگیرانه در این زمینه را از اهداف بلند پایه خود قرار داده اند. این اقدام گامی‌موثر در راستای کاهش هزینه های تعمیر و نگهداری قبل از گسترش غیر قابل کنترل عیوب، کاهش نرخ سوانح و افزایش قابلیت اطمینان وسایل پرنده می‌باشد. از سوی دیگر پایش سلامت سازه و یا سیستم های هوائی دیگر بخش مکمل برای سیستم های کنترل می‌باشند چرا که در صورت بهره مندی از یک سیستم پایش قدرتمند، اطلاعات جامع و دقیق تری برای استفاده در سامانه های کنترل خواهیم داشت. در ادامه روش های نظارت بر سلامت سازه با رویکرد ملخ اصلی بالگرد مورد مطالعه قرار گرفته است.

1- مقدمه

علیرغم نقش عمده فناوری و تکنولوژی های مدرن در تسهیل و ساده سازی تعمیر و نگهداری، با پیشرفت و توسعه صنعت هوانوردی همچنان هزینه ها، عمر مفید قطعات، عمر خستگی، فرسایش کارکنان و احتمال بروز خطاهای انسانی و تضمین ایمنی از دغدغه های جدی می‌باشند که هر روزه اقدامات هرچند جزئی اما رو به رشد برای کاهش آنها انجام می‌گردد. یکی از مهمترین مسائل، نظارت بر سیستم ها و تجزیه و تحلیل اطلاعات بدست آمده جهت استفاده در راستای پایش سلامت سازه و در نهایت برطرف سازی یا کنترل چالش های مطرح می‌باشد. به دلیل نوع و شدت تنش ها در بالگرد و خصوصا ملخ بالگردها که تنها مولد نیروی برا و پیش برنده می‌باشند، موضوع پایش و مانیتورینگ وضعیت سازه از اهمیت ویژه و منحصر به فردی تلقی می‌گردد. با توجه به مطالعات گسترده ای که در مورد روش های نوین و موثر پایش سلامت سازه ها در تمامی‌صنایع و حتی سازه های ایستا انجام شده است، این مساله در سازه های دینامیکی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند و در این پژوهش، تکنیک امیدوارکننده‌ای را برای پایش سلامت سازه‌ای (SHM)[1] یک بالگرد در حال پرواز، از جمله پره‌های چرخان، در نظر می‌گیرد. توسعه فعال روش‌های آنالیز مودال، به ویژه روش "عملیاتی"، فرصت جدیدی را برای پایش سازه‌ای و مسائل مرتبط با آن فراهم می‌کند.

ازسال 1998 ، (USC)[2] دانشگاه کارولینای جنوبی در تعدادی از پروژه های مهم (SCARNG)[3] ارتش کارولینای جنوبی که با هدف کاهش هزینه های هوانوردی ارتش و افزایش آمادگی عملیاتی انجام شده بودند، شرکت کرده اند که این تلاش مشترک در افزایش آمادگی عملیاتی با استفاده ازمنابع کمتر و توانمندتر موفق بوده و اطلاعات مربوط به آمادگی مبتنی بر تعمیر و نگهداری را در هر سطحی در اختیار فرماندهان قرارداده، میلیون ها دلار صرفه جویی در هزینه های عملیاتی رانشان داده و امکان پذیر ساخته است، و الگو را از شیوه های واکنشی به فرآیندهای تعمیر و نگهداری تحلیلی پیشگیرانه تغییر داده است، که اکنون به عنوان (CBM)[4] تعمیر و نگهداری مبتنی بر شرایط شناخته می‌شود. مزایای این فناوری ها قبلا برای بالگردها در مأموریت های جنگی، آموزش و شرایط پرواز تعمیر و نگهداری اثبات شده است. [1]

---

1 . *Structural Health Monitoring*
2. *University of south carolina*
3. *South Carolina army national guard*
4. *Condition base monitoring*

در تعمیر و نگهداری مبتنی بر شرایط (CBM) که نیازمند تلاش مشترک و هماهنگ یک تیم صنعتی، دانشگاهی و سازمانی است و منوط به شناسایی و به کارگیری فناوری های پیشرفته و نوظهور در سیستم های هوانوردی موجود و آینده است. این امر مستلزم ابزارهای جدید، تجهیزات آزمایشی، حسگرها و سیستم های تشخیصی تعبیه شده در هواپیما است. مفهوم (CBM) تعمیرات و نگهداری مبتنی بر شرایط که گاهی اوقات نگهداری و تعمیرات پیش بینانه نیز نامیده می‌شود، رویکردی برای نگهداری و تعمیرات تجهیزات است که درآن اقدامات بر اساس شرایط قطعه انجام می‌شود، که از طریق مشاهده و تجزیه و تحلیل سلامت قطعه قبل از وقوع خرابی (نگهداری و تعمیرات اصلاحی) یا با پیروی ازیک برنامه زمانی دقیق نگهداری و تعمیرات برای نگهداری هواپیما در نظر گرفته می‌شود که در صورت اجرای صحیح، می‌تواند تعداد یا میزان عملیات نگهداری و تعمیرات برنامه ریزی شده را به طور قابل توجهی کاهش دهد، و هزینه های برنامه ریزی شده را حذف کند.[1]

به نظرمی‌رسد نظارت بر سلامت سازه (SHM) قادر به کمک به کاهش هزینه های نگهداری و بهره برداری است که حدود 25 درصد از هزینه عملیاتی مستقیم بالگردی را تشکیل می‌دهد. استفاده از (SHM) امکان استفاده از تعمیر و نگهداری مبتنی بر شرایط (CBM) فراهم می‌کند که می‌تواند هزینه چرخه عمر را بدون تغییر قابل توجه در ساختار آنها کاهش دهد.[2]

2- مزایای تعمیر و نگهداری مبتنی بر شرایط

اکتساب داده ها

خروجی حاصل از اندازه گیری حسگر را به یک پارامتر دیجیتال تبدیل می‌کند که نشان دهنده یک کمیت فیزیکی و اطلاعات مرتبط مانند زمان، سرعت، شتاب و پیکربندی حسگر است.

تجزیه و تحلیل داده ها

تجزیه و تحلیل سیگنال را انجام می‌دهد، توصیفگرهای معنادار را محاسبه می‌کند و خوانش های مجازی حسگر را از اندازه گیری های خام استخراج می‌کند.

طبقه بندی و تشخیص حالت

طبقه بندی باعث تسهیل در ایجاد و نگهداری خطوط مبنای عملیات عادی می شود، هر زمانی که داده های جدید به دست آمد، به دنبال ناهنجاری‌ها می‌گردد و تعیین می‌کند که داده ها، در صورت وجود، به کدام منطقه ناهنجاری تعلق دارند.

ارزیابی و تشخیص سلامت

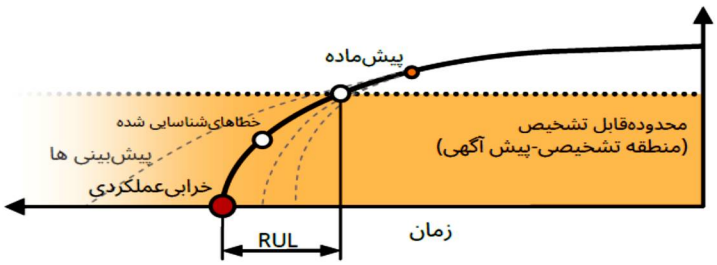
هرگونه عیب را تشخیص داده و سلامت فعلی تجهیزات یا فرآیند را با در نظر گرفتن تمام اطلاعات وضعیت، ارزیابی می‌کند.

ارزیابی اولیه

ارزیابی اولیه بعنوان یک پیش آگهی، حالت های سلامت و حالت های خرابی آینده را بر اساس ارزیابی سلامت فعلی و بارهای مصرفی پیش بینی شده روی تجهیزات و یا فرآیند و همچنین عمر مفید باقی مانده، تعیین می‌کند.

ارایه راهکار و پیشنهادات

اطلاعات عملی در مورد نگهداری یا تغییرات عملیاتی مورد نیاز برای بهینه سازی عمر فرآیند و یا تجهیزات را براساس اطلاعات تشخیصی اولیه و منابع موجود ارائه می‌دهد. شماتیک منحنی طول عمر یک قطعه، مربوط به تشخیص وضعیت و پیش آگهی آن در تصویر 1 نشان داده شده است.



تصویر 1: شماتیک منحنی طول عمر یک قطعه، مربوط به تشخیص اولیه وضعیت و پیش آگهی آن

3-روش ها و حسگرها

در بکارگیری حسگرها، تشخیص عیب بر شناسایی وضعیت تک تک اجزا تمرکز دارد، که شامل تشخیص زودهنگام عیب، جداسازی و شناسایی (مانند محل و اندازه ترک فعلی) می‌شود. پیش‌بینی عیب یک اصطلاح کلی است که فرآیندی را برای پیش‌بینی عمر مفید باقیمانده یک قطعه و سیستم توصیف می‌کند (اینکه عیب تشخیص داده شده چگونه، با چه سرعتی و تا چه حدی پیشرفت خواهد کرد).

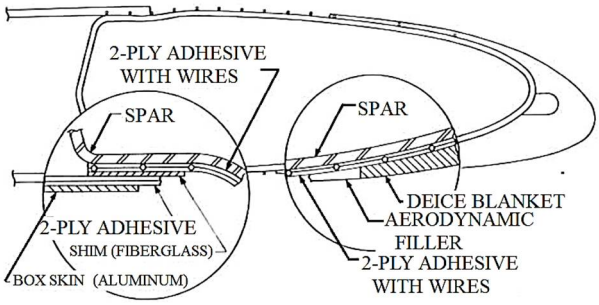
3-1- سیستم مدار الکتریکی

این سیستم پایشگر یا نظارت برسلامت سازه شامل یک مدار الکتریکی است بعنوان مثال برای سلامت ملخ بالگرد، قطعات الکتریکی را روی سطح تیرک[1] اصلی بال قرار می‌گیرد. این مدار شامل یک رسانای محصور شده در یک چسب حامل است که به سطح تیرک متصل شده است. در صورت

1. *(SPAR) main structural member of the rotor wing*

شکستگی تیرک، یک گسستگی در مدار بـه وجـود می‌آیـد. قطـع شـدن مـدار توسـط یـک پردازشـگر الکترونیکی مناسب در هواپیما شناسایی و نشان داده می‌شود. با ایـن سیسـتم قابلیـت تشـخیص تـرک تیرک به شدت به خواص رسانای حسگر ترک وابسته است. به طوریکه یک مـاده بـا ضـریب کشـیدگی کمتر، حساس تر از ماده های با ضریب کشیدگی بیشتر خواهد بـود. یـک سیسـتم مـدار الکتریکـی در تصویر 2 نشان داده شده است.

موادی که ضریب انبساط طول کمتری دارند به صورت رنگ هـای رسـانا مقاومـت خـوبی در برابـر خستگی و حساسیت خوبی در تشخیص ترک از خود نشان می‌دهند. اما با این حـال اسـتفاده از چنـین رنگ هایی معایبی از قبیل دشواری نصب مطمئن روی سطح داخلی تیرک، پیچیدگی تعمیرات و هزینه های بالایی دارد.



تصویر2: سیستم مدار الکتریکی نصب شده روی تیرک پره بالگرد

مواد با ضریب انبساط طول متوسط به شکل رساناهای سیمی با مقاومـت بـالا، مقاومـت خـوبی در برابر خستگی نشان می‌دهند، اما حساسیت ضعیفی در تشخیص ترک دارند. پـس در نتیجـه بـرای ایـن مواد با مقاومت بالا، یک حالت شکست نهایی مورد نیاز است. مشکل این سیستم بـا سـیم هـای مقـاوم، عدم توانایی در دستیابی به یک پیوند مناسب انتقال بار قابل اعتماد بین سیم و چسب بود.

مواد با ضریب انبساط و کشیدگی بالا تشخیص ترک را به طور رضایت بخشی نشان می‌دهنـد ولـی آنهایی که نقاط تسلیم پایینی داشتند در آزمایش هـای اسـتقامت دربرابـر خسـتگی شکسـت خوردنـد. آنهایی که نقاط تسلیم بالاتری داشتند مقاومت خوبی از خود نشـان دادنـد. بـا ایـن حـال، یـک تجزیـه تحلیل آماری شکست ها، پیش بینی کرد که اگر این سیم هـا در تیـرک اسـتفاده شـوند درصـدکمی‌از نشانه های نامعتبر در سیستم نشانگر سلامت تیرک ملخ[1] رخ خواهد داد.

حاملی که هادی را در بر می‌گیرد و همچنین چسبی که برای اتصال این مجموعه به تیرک استفاده

[1]. *(ISIS) Internal Spar Inspection System*

می‌شود بر قابلیت تشخیص ترک نیز اثر می‌گذارد، این مواد باید این قابلیت را داشته باشند تا کرنش افزایش یافته در اثر ترک را به هادی منتقل کنند. بنابراین، ضخامت حامل و چسب مهم هستند. به طور نسبی، ضخامت کم مطلوب‌تر- هستند.

جهش بیش از حد، که فاصله ای است که ترک قبل از شکست از یک رسانا عبور می‌کند، نیز یک ویژگی مهم در تشخیص ترک یک رسانا است. برای یک سیستم حامل معین، مواد با کشیدگی کم، جهش کمی‌و یا هیچ جهشی نشان نمی‌دهند. مواد با کشیدگی بالا، با جهش کمی، بهترین عملکرد را در رتبه بعدی دارد، در حالی که مواد با کشیدگی متوسط، جهش زیادی را نشان می‌دهند.

علاوه بر این، سیستم حامل کاندید، باید به خوبی به سطح تیرک چسبیده باشد. ترک هایی که در یک ناحیه غیر چسبیده شروع می‌شوند تا زمانی که به ناحیه چسبیده گسترش نیابند، قابل تشخیص نخواهند بود. بنابراین قابلیت تشخیص ترک نیز تحت تاثیر حوزه ها قرار می‌گیرد که اندازه و جهت آنها را حائز اهمیت می‌گرداند.

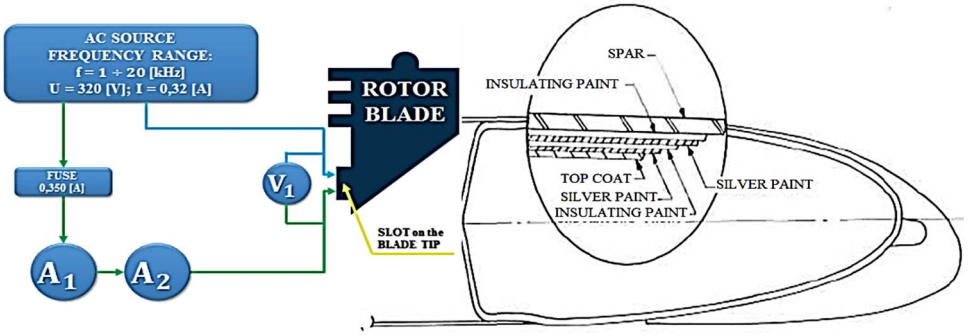
این سیستم ها که در تشخیص ترک های کوچک موفق بودند اما هزینه بالای سیستم و این واقعیت که سیستم به طور کامل در تیغه ملخ قرار نمی‌گیرد دلایل اصلی عدم انتخاب مفهوم مدار الکتریکی بودند.

2-3-سیستم خازن الکتریکی

سیستم خازن الکتریکی یک خازن را بر روی سطح تیرک ایجاد می‌کند. این خازن از لایه های رنگ شده مواد عایق و رساناها روی تیرک ایجاد می‌شود. این مواد استقامت خستگی بسیار عالی از خود نشان می‌دهند ولی به آسانی با تیرک ترک می‌خورند. وقتی که تیرک ترک می‌خورد، خازن ترک می‌خورد و در نتیجه تخلیه بار الکتریکی انجام می‌شود. تخلیه را از نظر الکترونیکی می‌توان حس کرد و اطلاعات را به یک پردازشگر الکترونیکی در هواپیما منتقل و ذخیره کرد.

قابلیت تشخیص ترک این سیستم، به ضخامت رنگ عایق بسیار حساس بوده، یک لایه رنگ نسبتا نازک با تاب آوری بسیار نزدیک مورد نیاز می‌باشد. بنابراین اعمال چنین لایه رنگی با ضخامتی یکنواخت امکان پذیر نیست و یا بسیار دشوار است.

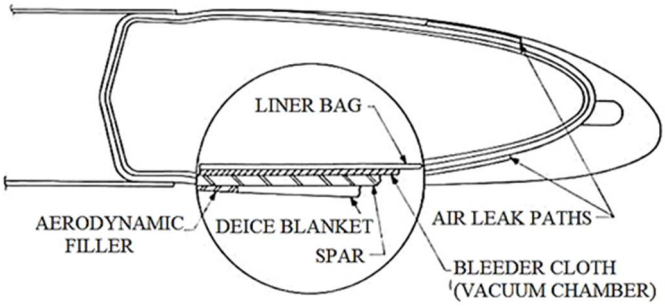
همچنین روش‌ها و دستورالعمل های کنترل کیفیت مورد نیاز برای اطمینان از ضخامت رضایت بخش رنگ منتشر نشده و همچنین این سیستم به نصب حلقه های لغزنده برای انتقال سیگنال به واحد الکترونیکی در هواپیما نیاز دارد و در نتیجه هزینه بالای سیستم نیز عاملی دیگر در عدم انتخاب مفهوم ظرفیت خازن الکتریکی برای نشانگر سلامت تیرک ملخ می‌باشد. یک سیستم مدار الکتریکی در تصویر 3 نشان داده شده است.



تصویر3: سیستم ظرفیت خازنی در عیب یابی ملخ

3-3-سیستم فشار تفاضلی

سیستم فشار تفاضلی با آب بندی هر دو انتهای تیرک و اعمال فشار یا تخلیه فشار فضای محصور شده حاصل می‌شود. با این حال، در یک سیستم فشار، نیروی گریز از مرکز باعث ایجاد گرادیان فشار در امتداد دهانه تیغه می‌شود. فشار داخلی تیرک در داخل کمتر و در خارج بیشتر از فشار بار است. این پدیده را می‌توان با استفاده از خلاء حذف کرد. با این حال، در یک سیستم خلاء، مشکلات انحراف تیرک و حد تسلیم شکل دهنده های[1] بخش یک سیستم خلاء با آستر خلاء در تصویر 4 نشان داده شده است. سیستم خلاء این ویژگی را دارد که موجب کاهش حجم سیستم می‌گردد و این امر باعث افزایش حساسیت تشخیص ترک می‌شود.



تصویر 4: سیستم خلاء با اختلاف فشار خطی

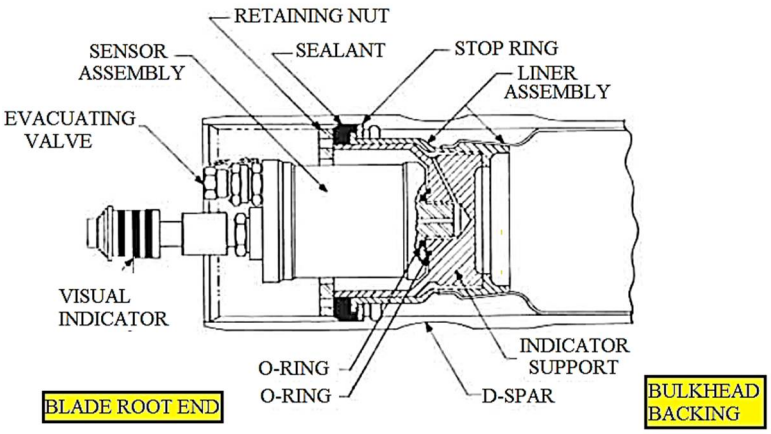
چندین ماده برای آستر از نظر خستگی، نفوذپذیری، قابلیت ساخت و ویژگی‌های جابجایی مورد ارزیابی قرار گرفتند. آستر انتخاب شده شامل دو لایه مایلار (نوعی رزین پلی‌استر که برای ساخت فیلم‌ها و ورق‌های پلاستیکی مقاوم در برابر حرارت استفاده می‌شود) با یک لایه آلومینیوم در بین آنها است. از

1. *RIB:the structural member of an airfoil that gives it the desired aerodynamic shape*

آنجا که فشار اتمسفر که آستر را در مقابل تیرک نگه می‌دارد می‌تواند باعث آب‌بندی شود، یک لایه اضافی از مواد برای ایجاد مسیر نشتی مورد نیاز است. یک پارچه داکرون برس خورده که روی سطح آستر اعمال می‌شود، با تیرک تماس پیدا می‌کند و چنین مسیر نشتی را فراهم می‌کند. در تصویر 5، سیستم بازرسی یکپارچه تیرک که برای هلیکوپتر H-46 توسعه داده شده است، نشان داده شده است. [3]

3-4-تکنیک آنالیز مودال

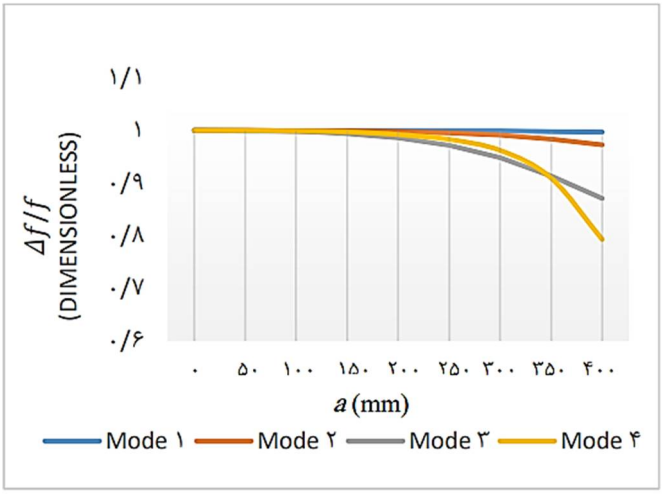
این تکنیک روشی مبتی بر تشخیص ارتعاشات می‌باشد که به طورگسترده برای ماشین های دوار استفاده می‌شود. این روش شامل تکنیک‌های عددی و تجربی می‌باشد. پره‌های هواپیما، بالگرد و یا ژنراتورهای بادی اجسامی هستند که در پرواز یا هنگام حرکت توسط باد به صورت استاتیکی و دینامیکی بارگذاری می‌شوند. با توجه به چنین شرایطی آنالیز مودال عملیاتی برای این سازه ها کار آسانی نیست و معمولا" برای به دست آوردن پاسخ مناسب جهت محاسبه پارامترهای مودال، تحریک آزمایشی مورد نیاز است. هرچقدر رفتار میان پارامترهای مکانیکی معمول که بر پایه فرکانس هستند و پارامترهای مودال اندازه‌گیری شده در پاسخ به ضربه آزمایش، مشابه تر باشند، کارایی تحلیل تکنیک مودال بیشتر است.



تصویر 5: سیستم فشار تفاضلی و خلاء با آستر

هدف در این روش نظارت، جمع آوری و آنالیز اطلاعاتی از قبیل هرگونه نقص ساختاری مربوط به از دست دادن یا توزیع مجدد جرم، فرسایش، لب پریدگی، پوسته پوسته شدن، تغییر شکل، شکاف و

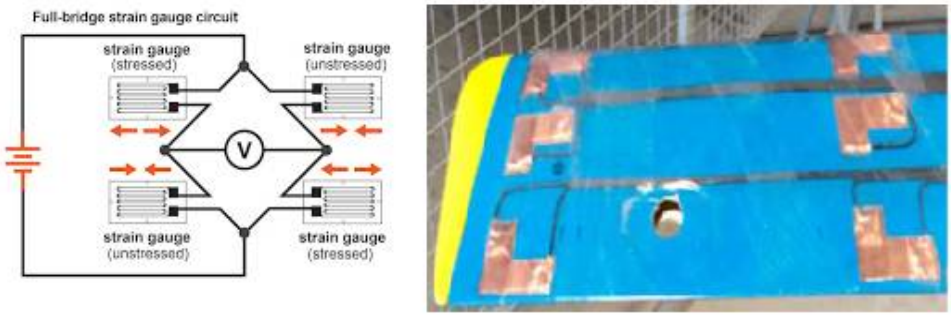
ترک، تغییرات فیزیکی و ویژگی های مکانیکی، تغییرظرفیت میرائی که دستخوش طـول عمـر قطعـات است و به تغییرات خواص مکانیکی مواد منتهی می‌شود، می‌باشد.



تصویر 6 : نمودار نسبت تغییر فرکانس طبیعی به مقدار اولیه برحسب عمق ترک نزدیک به نوک پره

پارامترهای روش مودال شامل نسبت سختی، تغییر نسبی فرکانس، کـرنش و تغییرشـکل، تغییـرات فرکانس یکپارچگی و خطاهای اندازه‌گیری می‌باشد. این پارمترهای مهم، خواص دینـامیکی را مـنعکس می‌کنند و بنابراین هرگونه تغییر در وضعیت فنی سازه را می‌توان با اسـتفاده از پارامترهـای مـودال آن اندازه‌گیری کرد. روش آنالیز مودال امکان تعیـین تجربـی ویژگی‌هـای دینـامیکی یـک سـازه، از جملـه فرکانس ها، شکل های مودی و میرائی مودال را فراهم می‌کند.

به طورکلی در این روش، ابتدا پارامترها و ویژگی‌های مودال طبیعی یک جسم دوار محاسبه شـده و این پارامترها مجدد پس از اعمال بارگذاری و یا ضربه، اندازه گیـری می‌شـود و از مقایسـه ایـن دو فـاز، اطلاعات به دست آمده تجزیه و تحلیل می‌گردد. در این روش از مبدل و انتقال دهنـده هـای اطلاعـات مانند مبدل های تغییر شکل وکرنش سنج ها استفاده می‌شود. یک سیستم مدار الکتریکی در تصـویر 7 نشان داده شده است.



تصویر 7 : مدار الکتریکی انتقال دهنده تغییر شکل

4- حسگرهای فشار میکرو الکترومکانیکال[1]

حسگرهای میکرو الکترومکانیکال حسگرهایی هستند که از اجزای مکانیکی و الکترونیکی در مقیاس میکرومتری در دو نقش حسگر و تحریک‌گر تشکیل شده اند. مزایای حسگرهای میکروالکترومکانیکال عبارتند از:

الف) حساسیت بالا

ب) مصرف کم انرژی الکتریکی

ج) مقاومت در برابر تنش ها

4-1- حسگرهای فشار پیزو مقاومتی

این حسگرها که با نام های دیگری از جمله کرنش سنج یا گیج کرنش[2] نیز شناخته می شوند، نوعی حسگر فشار هستند که از اثر پیزو مقاومتی برای اندازه‌گیری فشار استفاده میکنند. این حسگرها به دلیل سادگی ساخت، استحکام و امکان استفاده در محدوده وسیعی از کاربردها، ازمحبوبیت بالایی برخوردار هستند. اساس کار حسگر پیزو مقاومتی یک گیج رسانا می باشد که مقاومت الکتریکی آن هنگام کرنش تغییر می کند. درسال 1960، آزمایشگاه های هانیول و بل اولین حسگرهای فشار پیزو مقاومتی مبتنی بر فناوری سیلیکون را توصیف کردند.

حسگرهای فشار سیلیکونی اولیه شامل پیزومقاومت های سیلیکونی بودند که با چسب و اپوکسی به دیافراگم های فلزی متصل می شدند. تغییر فشار باعث انحراف دیافراگم و متعاقبا تغییر مقاومت پیزو

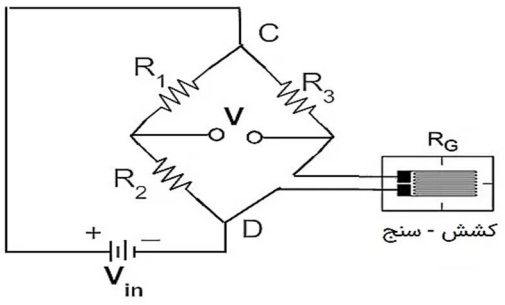
---

1. *MEMS: micro electro mechanical sensors*
2. *Strain gage*

مقاومت ها می شود. این تغییر توسط کرنش سنج ها ثبت می شود. به دلیل پیشرفت در فناوری ساخت میکرو، حسگرهای میکرو فشار پیشرفته مورد استفاده، امروزه با حکاکی ناهمسان‌گرد سیلیکون ساخته می‌شوند. مزایای ذاتی مرتبط با این تکنیک شامل اندازه ها و مکان های دیافراگم با کنترل خوب، قرارگیری بهتر کرنش سنج و ساخت آسان‌تر است.

حسگرهای پیزومقاومتی از یک دیافراگم با پیزومقاومت ها درپیکربندی پل وتستون تشکیل شده است. با اعمال فشار، دیافراگم منحرف می‌شود و کرنش های روی دیافراگم از طریق کرنش سنج ها محاسبه می‌گردد. مقاومت برای دیافراگم های نازک و انحراف های کوچک، به صورت خطی با فشار اعمال شده تغییر می‌کند.

طرح کلی مدار پل وتستون در تصویر8 نشان داده شده است. همه مقاومت ها مقادیر مقاومت مشابهی دارند. هنگامی‌که به دو سر پل ولتاژ اعمال می‌شود، خروجی سیگنال به صورت ولتاژ تحریک نصف ولتاژ اعمال شده خوانده می‌شود. با اعمال فشار، مقاومت های مخالف مقاومت خود را تغییر می‌دهند. در نتیجه، ولتاژ تغییر می‌کند و این تغییر به گونه ای کالیبره می‌شود که فشار اعمال شده را نشان دهد.



$$V \times \left(\frac{R_X}{R_3 + R_X}\right) = V \times \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right)$$

$$R_X R_1 + R_X R_2 = R_2 R_3 + R_2 R_X$$

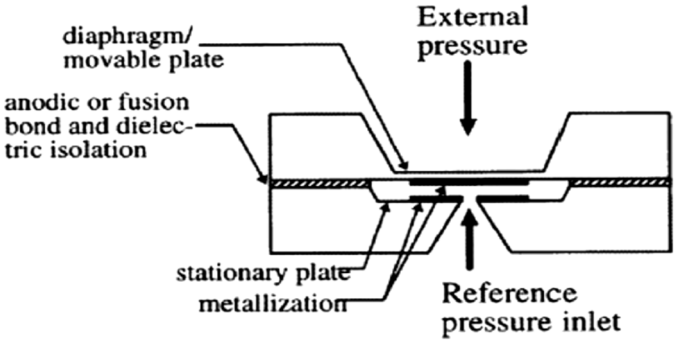
$$R_X R_1 = R_2 R_3$$

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_X}{R_3}$$

تصویر8: شماتیک مدار پل وتستون برای ستجش کرنش

2-4- حسگرهای فشار خازنی

یک حسگر فشار خازنی بر اساس اصل واریانس ظرفیت خازنی بین یک دیافراگم فلزی و یک صفحه فلزی ثابت عمل می کند. این ساختار دارای یک محفظه با فشار مرجع است و توسط یک غشای الاستیک که در معرض فشار خارجی قرار دارد، بسته شده است. فشار اعمال شده فاصله بین دو صفحه را کاهش می‌دهد و متعاقبا منجر به تغییر ظرفیت خازنی می شود. شماتیک حسگر فشار خازنی در تصویر 9 نشان داده شده است.



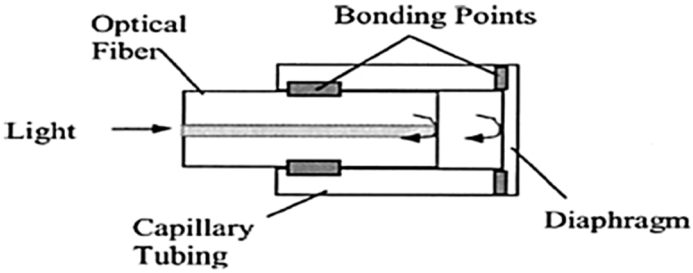
تصویر9: شماتیک یک حسگر فشارخازنی

در اثر اعمال فشار خارجی، دو صفحه موازی باقی نمی‌مانند، که منجر به یک رابطه غیرخطی بین انحراف و ظرفیت می‌شود. بنابراین، پاسخ حسگر خازنی با فشار اعمال شده، غیرخطی می‌شود. طرح کلی اولیه یک حسگر فشار خازنی شامل مجموعه ای از صفحات با ثابت دی الکتریک محیط بین صفحات است و مقدار ظرفیت خازنی از رابطه زیر به دست می‌آید که ε ثابت دی الکتریک بین صفحات است.

$$C_o = \varepsilon \frac{A}{d}$$

3-4- حسگرهای فشار نوری

حسگرهای فشار نوری بر اساس اصل اندازه‌گیری شدت نور و طول موج سیگنال فشار اعمال شده کار می‌کنند. یک منبع، نور را بر روی یک غشاء متمرکز می‌کند و تغییر متناظر در شدت نور به دلیل فشار اعمال شده و انحراف غشاء توسط یک مجموعه آشکارساز، همانطور که در تصویر10 نشان داده شده است، ثبت می‌شود. حسگرهای فشار نوری کاربرد خود را درتوربوماشین ها، دستگاه های صفحه لمسی مانند پدها، تلفن های هوشمند و غیره به اثبات رساندند. مزایای مشخصه مرتبط با سنسورهای فشار فیبر نوری شامل قابلیت بقاء درمحیط های سخت ازجمله دمای بالا و خوردگی است.



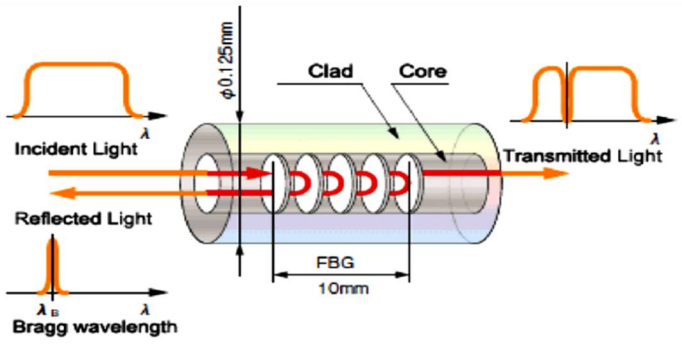
تصویر10 : حسگر فشار فیبر نوری مبتنی بر دیافراگم

علاوه بر این، حسگرهای فشار نوری برای الزاماتی از جمله وضوح بالا، حساسیت بالا و مقاومت در برابر تداخل الکترومغناطیسی انتخاب مناسبی هستند. با این حال، ساخت حسگرهای نوری دشوار است، زیرا معمولا شامل چندین ماده است. به دلیل عدم تطابق در مقادیر ضریب انبساط حرارتی مربوطه، تنش های شدیدی بین مواد ایجاد می‌شود و سایر چالش ها شامل تنظیم اپتیک و کالیبراسیون حسگر است.

در بسیاری از پژوهش ها، محققان از حسگرهای نوری که از دیافراگم برای اندازه گیری انحراف های ناشی از فشار که تغییرات خطی دارند، استفاده می‌کنند. تکنیک های تداخل سنجی شامل روش های مایکلسون، روش فابری-پرو و روش توری براگ فیبری، برای اندازه گیری نوری جابجایی در سیستم های مکانیکی در محدوده نانومتری است. رایج ترین روش مورد استفاده در فناوری حسگر، روش فیبر نوری[1] که طول موج های خاصی از نور نزدیک به طول موج رزونانس خود را منعکس می‌کند و طیف نوری باقی مانده همانطور که در شکل نشان داده شده است، اجازه عبور دارد. در تصویر 11 طول موج تشدید براگ به صورت زیر تعریف می‌شود. *[4]*

$$\lambda_{Bragg} = 2n_{eff}\lambda$$

[1] . *Fiber brag grating*



Note: When light passes through the FBG, only the light of a particular wavelength is reflected

شکل 11 : شماتیک یک حسگر نوری توری براگ فیبری

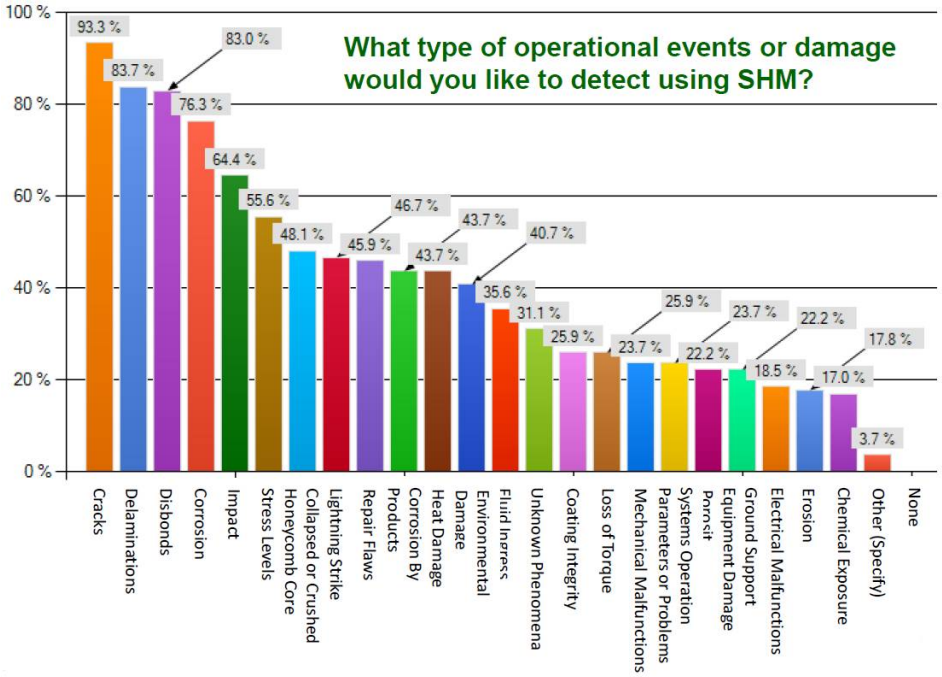
5- نتیجه گیری

در این مقاله ضمن طرح اهمیت نظارت بر وضعیت سازه های هوایی، نسبت به کاربرد حسگرهای تشخیص سلامت در صنعت هوایی با تمرکز بر ملخ، برای ایجاد امکان نظارت لحظه ای و تشخیص زودهنگام خرابی ها یا ناهنجاری هایی که می‌توانند منجر به خرابی های جبران ناپذیر گردند، پرداخته شد. از مزایای پایش سلامت سازه ها می‌توان به ارزیابی سریع، از راه دور و بلا درنگ وضعیت و تشخیص عیوب سازه، کاهش هزینه های نگهداری و عملیاتی، افزایش طول عمر سازه، هوشیاری بیشتر در حوزه های کلیدی، غلبه بر محدودیت‌های دسترسی به هندسه های پیچیده، عمق سنجی آسیب‌های پنهان و به حداقل رساندن عوامل انسانی با تجزیه و تحلیل خودکار داده ها در مدت زمان کوتاه‌تر اشاره کرد.

همچنین پایش سازه ها امکان نظارت گسترده و شبکه ای، و در بلند مدت، زمینه و فلسفه طراحی‌های نوین را فراهم می‌کند. با توسعه فناوری و یافتن مکمل ها در علوم مختلف، همچنان پتانسیل رشد و نوآوری در خصوص حسگرهای پایشگر وجود دارد و محققان برای کاهش دغدغه های نظارتی بر سازه ها و سیستم ها، خصوصا" صنعت هوافضا رقابت جهانی گسترده ای را ایجاد نموده اند.

در تصویر 12 حوزه های کاربرد نظارت بر سلامت سازه در تشخیص عیوب نشان داده شده است. همانطور که در نمودار مشاهده می شود در 24 حوزه نقش و تاثیر سیستم نظارت (SHM) مورد مقایسه قرار گرفته است. برای مثال نقش (SHM) در شناسائی ترک ها 93/3 درصد، در شناسائی عیوبات ورقه ورقه شدن 83/7 درصد، در شناسائی کروژن 76/3 درصد، برخورد صاعقه 46/7 درصد می باشد و در عیوباتی ازجمله عیوبات مکانیکی 23/7 درصد است. مقایسه و تحلیل نمودار تصویر 11 بیانگر این است که حسگرهای پایش سلامت سازه های بال و بدنه به مراتب شبکه های گسترده و

دقیق تری دارند. همچنین این مقایسه تائیدی بر اهمیت نواقص سازه بال و بدنه دارد و در نتیجه شبکه های متشکل از این حسگرها به طور گسترده تری در محصولات به روز صنعت هوانوردی مورد مطالعه، تولید و استفاده قرار گرفته اند. با این مطالعه به نظر می رسد طراحی و به کار گیری چنین سیستم هایی می توانند سهم عمده ای در ارتقاء و بهینه سازی وسایل پرنده نسل های نه چندان جدید باشند تا بتوانند کماکان ماموریت خود را ادمه دهند.



تصویر 11. رویدادها و عملیاتی که توسط سیستم نظارت بر سلامت سازه قابل تشخیص است

6- منابع

Lechertas, V., Bayoumi, A., Goodman, N., Shah, R., & Shin, Y. J. (2009). CBM fundamental research at the university of south carolina: a systematic approach to US army rotorcraft CBM and the resulting tangible benefits.

Mironov, A., Doronkin, P., Priklonsky, A., & Kabashkin, I. (2016). Structural health monitoring of rotating blades on helicopters. Aviation, 20(3), 110-122.

Thompson, G. H., & Weiss, W. L. (1972). Fail-Safety for the H-46 Rotor Blade. Journal of the American Helicopter Society, 17(1), 57-63.

Yaser, J., Mohtashim, M., and Irtiza A., (2019). A review of principles of MEMS pressure sensing with its aerospace applications. Sensor Review 39, 5.

Coats, D., Cho, K., Shin, Y. J., Goodman, N., Blechertas, V., & Bayoumi, A. M. E. (2011). Advanced time–frequency mutual information measures for condition-based maintenance of helicopter drivetrains. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 60(8), 2984-2994.

Serafini, J., Bernardini, G., Porcelli, R., & Masarati, P. (2019). In-flight health monitoring of helicopter blades via differential analysis. Aerospace Science and Technology, 88, 436-443.

Kurz, F., Rosenbaum, D., Meynberg, O., Mattyus, G., & Reinartz, P. (2014). Performance of a real-time sensor and processing system on a helicopter. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 40, 189-193.

Weber, S., Lone, M., & Cooke, A. (2019). Recent experiences of helicopter main rotor blade damage. Journal of the American Helicopter Society, 64(3), 1-5.

Roy, N., & Ganguli, R. (2005). Helicopter rotor blade frequency evolution with damage growth and signal processing. Journal of Sound and vibration, 283(3-5), 821-851.

Das, S., Harrison, G., Bodkin, M., Herzog, S., & Hall, R. (2010). CBM+ for helicopter Health management.