

## مقاله پژوهشی

DOR: [20.1001.1.24767131.1399.6.1.5.9](https://doi.org/10.1001.1.24767131.1399.6.1.5.9)

## بررسی عملکرد قطعات سازه‌ای سامانه آشکارساز ناهنجاری مغناطیسی هواپایه با شبیه‌سازی محیط عملیاتی عبدالرضا اسرار

asrara@mut.ac.ir

مجتمع دانشگاهی هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۲/۳۱

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۲/۰۸

## چکیده

آشکارسازی ناهنجاری مغناطیسی روشی غیرفعال است که با آشکار کردن ناهنجاری‌ها در میدان مغناطیسی زمین، به کشف اشیاء فرومغناطیسی ناشناس در محیط می‌پردازد. تشخیص ناهنجاری مغناطیسی مسئله‌ای مهم در برنامه‌های مختلف از جمله نظارت زمین‌شناسی و شناسایی نظامی است. سنسورهای آشکارش ناهنجاری مغناطیسی؛ آشفتگی‌های موضعی را در میدان مغناطیسی تشخیص می‌دهند، که می‌تواند برای تشخیص وجود و برآورد جایگاه اشیاء پنهان یا غوطه‌وری مانند زیردریایی‌ها و سنگ معدن استفاده شود. تشخیص زیردریایی‌هایی که از لحاظ صوتی بسیار بی‌صدا ساخته می‌شوند، به وسیله آشکارسازهای صوتی بسیار سخت و حتی ناممکن است. از این رو بهره‌مندی از سیستم‌های آشکارساز ناهنجاری مغناطیسی ضروری به نظر می‌رسد. در پژوهش حاضر در ابتدا سامانه‌های موجود مورد بررسی قرار گرفته، سپس به بازطراحی مکانیکی یک سامانه آشکارش ناهنجاری مغناطیسی هواپایه پرداخته شده است. در ادامه توزیع تنش در سامانه طراحی شده به وسیله نرم‌افزار آباکوس به روش اجزاء محدود مورد تحلیل قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد بیشینه مقدار تنش مجموعه قطعات برای شتاب عملیاتی  $0.2g$  برابر با  $88.7 \text{ MPa}$  است که این مقدار در واقع بسیار کمتر از تنش تسلیم ماده مورد استفاده است. در نتیجه، در هیچ کدام از قطعات، تغییر شکل دائم ایجاد نمی‌شود که از قابل قبول بودن طراحی مکانیکی سامانه آشکارش ناهنجاری مغناطیسی هواپایه حکایت دارد.

واژه‌های کلیدی: آشکارسازی ناهنجاری مغناطیسی، طراحی مکانیکی، روش اجزاء محدود.

## ۱. مقدمه

تشخیص هوایی اختلالات یا ناهنجاری‌های موجود در میدان مغناطیسی زمین موضوع علمی جذابی است که در سال‌های اخیر مطرح شده است. این موضوع تقریباً از سال ۱۹۴۰ مورد توجه قرار گرفته است. نیاز متفقین در سال ۱۹۴۱ به ادوات تشخیص زیردریایی‌های غوطه‌ور از هوا به تحقیقات فشرده‌ای در زمینه توسعه مهندسی و تولید آشکارساز هوایی مغناطیسی منجر شد. سامانه آشکارساز ناهنجاری مغناطیسی<sup>۱</sup> یا به اختصار مد (MAD) در اوایل سال ۱۹۴۲ در هواپیماهای گشت نظامی مورد استفاده قرار گرفت و با موفقیت‌های مختلفی در طول دوران باقی مانده از جنگ جهانی دوم روبرو شد. از سال ۱۹۴۵ اشکال مختلف سامانه آشکارساز ناهنجاری مغناطیسی از سوی دولت‌ها و گروه‌های تجاری در نقشه‌برداری ژئوفیزیکی سراسر جهان استفاده شده است.

تشخیص ناهنجاری مغناطیسی در بخش‌های نظامی، غیر نظامی و صنعتی کاربردهایی دارد. سنسورهای مد آشفتگی‌هایی را در میدان مغناطیسی زمین تشخیص می‌دهد که نشان‌دهنده وجود اشیایی همچون مین‌های زمینی و دریایی، سنگ معدن، ذخایر معدنی و زیردریایی‌هاست [۱].

این روش در دهه‌های اخیر برای کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. در مطالعات اخیر، روش‌های مختلفی مانند استفاده از رادار، امواج مادون قرمز، سونوبوی و آشکارساز ناهنجاری مغناطیسی در محیط دریا مورد استفاده و مقایسه قرار گرفته است [۲]. ژجی ژونگ<sup>۲</sup> و همکاران ثابت کرده‌اند که این روش‌ها برای تشخیص زیردریایی مؤثرند. همچنین از تکنیک آشکارساز آنومالی مغناطیسی برای کسب اطلاعات ضروری در مورد فضای اشغالی پارکینگ و جریان ترافیک استفاده شده است [۳]. شینکر<sup>۳</sup> و همکارانش از آشکارساز مغناطیسی برای شناسایی اشیاء فرومغناطیسی، به‌ویژه اهداف پنهان استفاده کردند [۴]. موری شناسایی یک هدف فرومغناطیسی در حال حرکت با یک مغناطیس سنج سه محور و احتساب توابع وزنی برای هر محور به منظور شناسایی را مورد بررسی قرار داده است. [۵]

در مطالعاتی دیگر، ویژگی‌های نقشه‌برداری سه بعدی در آشکارسازی مغناطیسی از راه هوا ارائه شده است [۶]. همچنین در سال ۲۰۰۶، از روش‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی در حوزه آشکارسازی مغناطیسی بهره گرفته شد [۷]. در تحقیقی دیگر، اندازه‌گیری ناهنجاری مغناطیسی با در نظر گرفتن جریان‌های گردابی ایجاد شده روی پرنده حامل به عنوان جمله‌های تصحیح در تشخیص ناهنجاری‌ها، مورد بررسی قرار گرفته است [۴].

مفهوم استفاده از ناهنجاری مغناطیسی ایجاد شده به وسیله بدنه فرومغناطیسی یک زیردریایی برای تشخیص حضور آن به پژوهش‌های گذشته باز می‌گردد. در سال ۱۹۳۹ با شروع جنگ جهانی دوم، فقط روش‌های اپتیکی برای تشخیص زیردریایی‌های مهاجم وجود داشت و هیچ وسیله‌ای برای شناسایی زیردریایی‌های از هواپیما وجود نداشته است.

در سال ۱۹۴۰ ابتدا بریتانیا و بعد در همان سال، ایالات متحده توسعه در آشکارساز مغناطیسی هواپایه را آغاز کردند. با این حال نخستین بار در بهار سال ۱۹۴۲ مجموعه‌های کاربردی آشکارساز ناهنجاری مغناطیسی در هواپیماهای جستجوی نیروی دریایی و هوایی ارتش ایالات متحده نصب و عملیاتی شد [۸].

در این مقاله ابتدا؛ یک سیستم آشکارساز ناهنجاری مغناطیسی معمولی که در جنگ جهانی دوم مورد استفاده قرار گرفته تشریح شده و در نهایت به طراحی سیستم موردنظر پرداخته می‌شود.

شکل ۱ مغناطیس سنج دو محوره استفاده شده برای شناسایی زیردریایی‌ها در طول جنگ جهانی دوم را نشان داده است [۸].

سیستم دو محوره بالا امکان چرخش حول دو محور عمود بر هم را دارد. این سیستم در عرض جغرافیایی قطبی عملکرد قابل قبولی داشته، اما در مناطق استوایی که در آن زاویه شیب مغناطیسی کمتر از  $20 \pm$  درجه است، با مشکلات جدی روبرو است. با توجه به اینکه آشکارساز سامانه مد باید در راستای میدان زمین قرار گرفته و این هدف به وسیله

در شکل سه؛ قطعات اصلی سامانه مد سه محوره معرفی شده است.

سیستم مد سه محوره در هواپیما P3F با قطعات معرفی شده در شکل سه نصب می‌شود. صفحه شوک<sup>۶</sup> مستقیم به هواپیما متصل شده و بازوی اسپیدر<sup>۷</sup> به صفحه شوک متصل می‌شوند. قطعه بازوی اسپیدر به سامانه مد و صفحه یوغ<sup>۸</sup> متصل و یک رابط، صفحه شوک را به بازوی اسپیدر متصل می‌کند.

در ادامه به بررسی عملکرد قطعات سازه‌ای سامانه آشکارساز ناهنجاری مغناطیسی هواپایه به کمک روش المان محدود تحت بارگذاری پرداخته و روند شبیه‌سازی تشریح می‌شود.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲-۱. مدل‌سازی عددی

به منظور شبیه‌سازی سامانه مد هواپایه به روش المان محدود از نرم افزار آباکوس استفاده شد. روش المان محدود روشی عددی است که می‌توان آن را برای حل مسائل پیچیده مهندسی و تحلیل تنش‌های وارده به جسم بارگذاری شده استفاده کرد. مسائلی که با روش‌های معمولی تحلیلی قابل حل نیست یا مستلزم انجام آزمایش‌های پرهزینه‌اند، با مدل‌سازی در این روش به حل قابل قبولی می‌رسند. برای شبیه‌سازی سیستم مورد نظر در نرم‌افزار آباکوس، اطلاعات اولیه از انجام این تحلیل در اختیار قرار داده شده است.

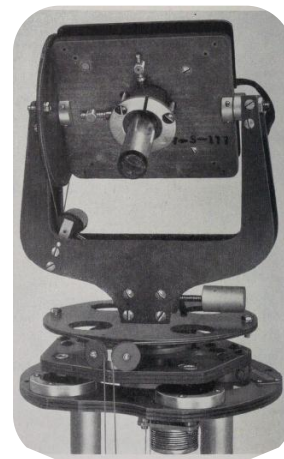
از آنجا که قطعات سامانه مد در محفظه‌ای مجزا قرار داشته و در تماس مستقیم با جریان هوا قرار دارد، افزایش دمای موضعی در قطعات وجود ندارد و در حین عملیات تغییر دمایی عمده‌ای حاصل نمی‌شود.

### ۲-۲. هندسه مدل و نوع مش‌بندی المان‌ها و شرایط

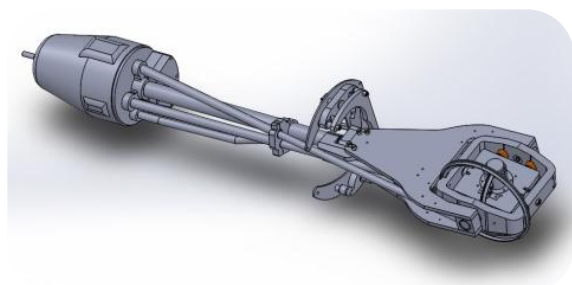
#### بارگذاری

نمونه مورد مطالعه در این پژوهش، سامانه مد سه محوره است. سیستم مد سه محوره در محیط نرم‌افزار سالیدورک طراحی شد. برای شبیه‌سازی، فایل تک‌تک (مجزا) قطعات سیستم مد به نرم‌افزار آباکوس وارد شده و در قسمت مونتاژ

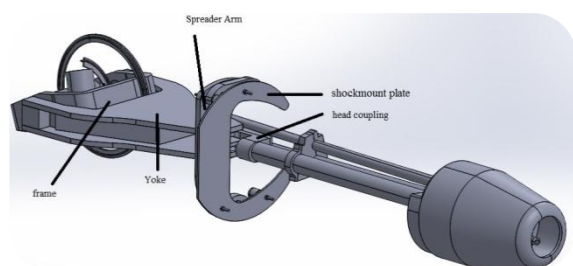
سیستم‌های آشکارساز ناهنجاری مغناطیسی دو محوره امکان‌پذیر نیست، تغییر در روش نصب هد دو محوره بر این مشکل غلبه خواهد کرد. رسیدن به این هدف مستلزم طراحی یک پلتفرم سه محوره است که قابلیت عملیاتی شدن در تمام عرض‌های جغرافیایی را داشته باشد. در این مقاله با ایده گرفتن از نمونه‌های موجود روی هواپیمای P3F به طراحی سیستم مورد نظر پرداخته شد. در ادامه سامانه آشکارساز ناهنجاری مغناطیسی سه محوره طراحی شده که در تمام زوایای مغناطیسی<sup>۴</sup> عملکرد قابل قبولی داشته و معایب سیستم دو محوره را پوشش داده است، مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۲ سیستم آشکارساز ناهنجاری مغناطیسی سه محوره باز طراحی شده در نرم‌افزار سالیدورک<sup>۵</sup> را نشان داده است.



شکل ۱. هد مغناطیس‌سنج دو محوره [۸]



شکل ۲. سیستم مد سه محوره باز طراحی شده



شکل ۳. قطعات اصلی سامانه مد سه محوره

تغییر گام زمانی تأثیر بسزایی بر نتایج و همگرایی ندارد. از سویی افزایش تعداد بازه‌های زمانی (کاهش گام زمانی) سبب محدودیت سیستمی در انجام شبیه‌سازی می‌شود.

### ۲-۳. خصوصیات مواد

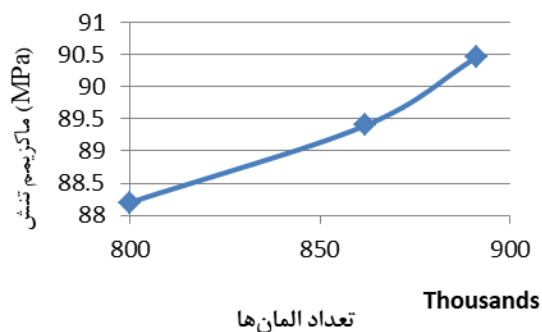
تحلیل سیستم در ناحیه الاستیک انجام شده و در واقع مقدار خیز در محدوده این ناحیه محاسبه شده است. جنس بدنه آلومینیوم ۵۰۵۳ است. خواص پلاستیک و خواص مکانیکی مورد استفاده در تحلیل در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. خواص مکانیکی آلومینیوم ۵۰۵۳ [۱۱]

چگالی ( $km/m^3$ )	ضریب پواسون	تنش تسلیم (مگاپاسکال)	مدول یانگ (گیگاپاسکال)
۲۶۵۰	۰/۳۳	۱۵۳	۷۲

با توجه به شبیه‌سازی آزمون دینامیکی و تحت شتاب، در مطالعه ما از تحلیلگر دینامیکی صریح در نرم‌افزار المان محدود آباکوس استفاده شده است. با توجه به اینکه تحلیل مسئله مورد نظر غیرخطی دینامیکی و از سویی در مسئله حاضر بارگذاری به صورت اعمال شتاب بر سیستم گفته شده بوده است، استفاده از روش صریح به منظور افزایش پایداری، حل و همگرایی بیشتری دارد. برای استقلال نتایج از شبکه، با تغییر اندازه المان در انجام شبیه‌سازی در ادامه به مطالعه شبکه‌بندی پرداخته شده است.

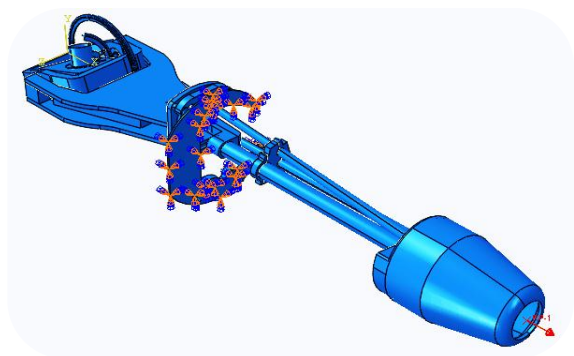
برای مطالعه شبکه‌بندی سامانه مد، سائز المان‌ها تغییر داده شده و با تنش در نقطه بیشینه مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۵ نمودار تغییرات اندازه المان‌ها بر حسب بیشینه تنش را نشان داده است.



شکل ۵. نمودار تنش بر حسب تعداد المان

یکپارچه شد. این کار موجب افزایش دقت در محاسبات و مش‌بندی می‌شود. در شکل چهارم نمای سه بعدی سیستم مد سه محوره به همراه شرایط مرزی و بارگذاری نشان داده شده است.

در ادامه به بررسی و تحلیل شتاب وارده به سامانه پرداخته می‌شود. در این شبیه‌سازی برای تعریف شرایط مرزی، تکیه گاه کاملاً باید در تمامی جهات مقید شوند. سیستم مد سه محوره، با قطعه صفحه شوک به هواپیما متصل شده و قطعه مربوطه در نرم‌افزار در تمامی جهات مقید و ثابت شده است.



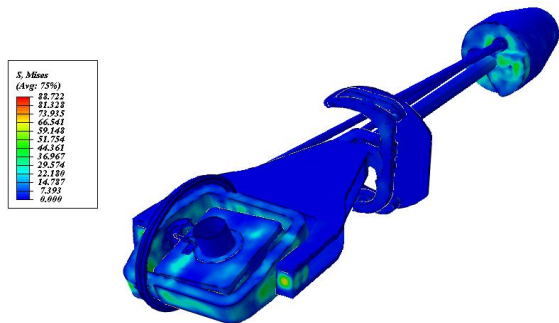
شکل ۴. نمای سه بعدی سیستم مد سه محوره به همراه شرایط مرزی و بارگذاری

در ادامه تمام نقاط سیستم مد سه محوره در شکل ۴ را به نقطه‌ای مشخص کوپل کرده و شتاب  $0/2g$  به این نقطه اعمال شد. این شتاب در راستای محور X (راستای محور سامانه مد) به سیستم اعمال شده است. این شتاب به منزله ضربه وارده در زمان فرود به سامانه مد است [۱۰]. از آنجا که تمام نقاط قطعات به نقطه مشخصی کوپل شده، این شتاب به تمام قطعات اعمال می‌شود. با توجه به اینکه سیستم مد سه محوره با صفحه شوک ثابت شده، شتاب اعمال شده، قطعات سیستم مد را تحت نیروی حاصله قرار می‌دهد و بیشینه تنش فون میزز و المان بحرانی بر سامانه مد به دست می‌آید.

لازم به بیان است که به منظور تعریف تماس بین قطعات از حالت تماس جامع<sup>۱</sup> با ضریب اصطکاک  $0/3$  استفاده شد. از سویی گام زمانی به نحوی تعیین شد تا شبیه‌سازی حداقل شامل ۲۰ بازه زمانی مختلف برای نتیجه‌گیری باشد. با مطالعه صورت گرفته روی گام زمانی مدل‌سازی و ماهیت مدل،

تنش تماسی بین قطعات به واسطه اعمال شتاب در قسمت یادشده متمرکز خواهد شد.

این در حالی است که کمینه مقدار تنش در دیسک تکیه گاهی ایجاد می‌شود. البته این نتیجه بدیهی است، زیرا تمامی دیسک در همه درجات آزادی قید شده و اجازه تغییر شکل گرهی وجود ندارد. همچنین لازم به بیان است که با توجه به توزیع تنش، مقادیر آن و ماده مورد استفاده، بیشینه مقدار تنش برای مجموعه قطعات برابر با  $88/7 \text{ MPa}$  است که این مقدار، در واقع کمتر از تنش تسلیم ماده است. پس در نتیجه، در هیچ کدام از قطعات تغییر شکل دائم ایجاد نمی‌شود. این تحلیل گواهی بر طراحی قابل قبول این سیستم است.



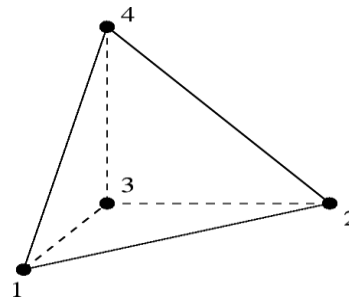
شکل ۸. توزیع تنش در سامانه مد هواپایه

در ادامه کانتور قطعاتی که بیشترین توزیع تنش را دارند، نمایش داده شده است. این قطعات به دلایلی مانند کوچک بودن، داشتن سطح اصطکاک کم و ارتباط و تماس بیشتر با قطعات دیگر مقدار تنش بیشتری را تجربه می‌کنند. شکل ۹، توزیع تنش در قطعه بازوی اسپیدر را نشان داده است. با توجه به ارتباط با قطعات جانبی این قطعه تنش تماسی بیشتری را تحمل می‌کند.

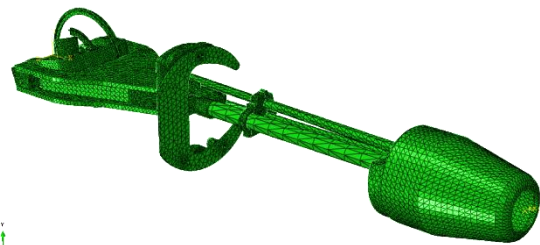
شکل ۱۰ توزیع تنش نامتقارن به سبب شتاب وارده در قطعه فریم<sup>۱۰</sup> را نشان داده است. طبق این شکل، به دلیل ارتباط گسترده با قطعات دیگر که موجب افزایش تنش‌های تماسی در این قطعه شده، کمربند میانه فریم تنش بیشتری را تحمل می‌کند. فریم با توجه به ارتباط با دو چرخ‌دنده محور داخلی و خارجی، پیچ‌های محور داخلی، خارجی و قطعات زیاد تنش تماسی بیشتری را تحمل می‌کند.

با توجه به شکل ۵ می‌توان دریافت که افزایش تعداد المان‌ها موجب افزایش ناچیز تنش بیشینه به مقدار ۱ مگاپاسکال شده و ریز کردن المان، جواب مسئله را تغییر نداده و مستقل از اندازه شبکه است. در حقیقت درصد خطای نسبی تغییر اندازه المان نسبت به بیشترین مقدار المان همواره کمتر از ۵ درصد است. پس در نتیجه برای افزایش سرعت محاسبات توسط نرم‌افزار از نود ۸۰۰۰۰۰ استفاده شده است.

با توجه به مش سنجی‌های صورت گرفته، از المان‌های مثلثی استفاده شده و مدل به ۸۰۰۰۰۰ المان نوع C3D4 (هرمی سه بعدی solid دارای چهار گره) تقسیم شد. شکل ۶، نوع المان‌های به کار رفته در نمونه (C3D4) را نشان داده است. شکل ۷ نمایی از شبکه‌بندی کل سامانه را نشان می‌دهد.



شکل ۶. نوع المان‌های به کار رفته در نمونه (C3D4)



شکل ۷. مش‌بندی سیستم مد سه محوره

### ۳. یافته‌ها

به منظور تعیین تأثیر شتاب یکنواخت و ثابت برابر با  $0/2g$  بر مجموعه قطعات در زمان فرود، در شکل ۸ میزان تأثیرگذاری این شتاب بر توزیع تنش معیار ون میزس نمایش داده شده است. با توجه به این شکل می‌بینیم توزیع تنش در اثر شتاب وارد شده به صورت نامتقارن ایجاد شده است. طبق این شکل مقدار تنش ون میزس برای انتهای مجموعه قطعات بیشتر است، زیرا تعداد قطعات اتصالی در این قسمت بیشتر و در نتیجه، تماس بین قطعات نیز بیشتر خواهد بود که به تبع آن توزیع

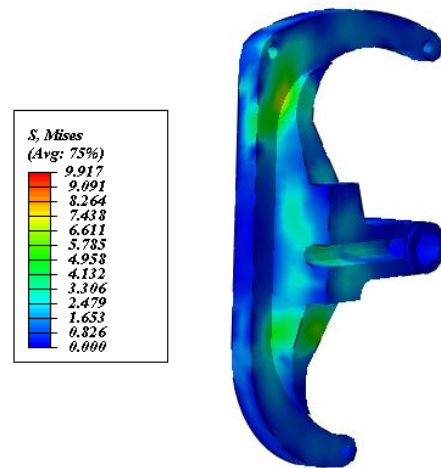
#### ۴. نتیجه گیری

در این مقاله، با استفاده از طراحی انجام شده سیستم آشکارساز ناهنجاری مغناطیسی سه محوره هواپایه، هندسه مورد نظر تهیه و با فرمت مناسب وارد نرم افزار آباکوس شد. برای تعریف شرایط مرزی، تکیه گاه کاملاً در تمامی جهات مقید شد. سیستم مد سه محوره، با صفحه شوک به هواپیما متصل و در نرم افزار این قطعه در تمامی جهات مقید و ثابت شده است.

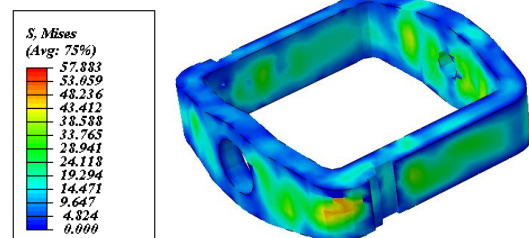
در ادامه، تمام نقاط سیستم مد سه محوره را به نقطه ای مشخص کوپل و شتاب  $2g$  به این نقطه اعمال شد؛ این شتاب در راستای محور x به سیستم اعمال شد و به منزله ضربه وارده در زمان فرود به سامانه مد است. با توجه به اینکه تمام نقاط قطعات به نقطه مشخصی کوپل شده، این شتاب به تمام قطعات اعمال می شود. با توجه به اینکه سیستم مد سه محوره در قطعه صفحه شوک فیکس شده، شتاب اعمال شده، قطعات سیستم مد را تحت نیروی حاصله قرار می دهد. با توجه به شبیه سازی انجام شده این نتیجه به دست آمد که بیشینه مقدار تنش برای مجموعه قطعات برابر با  $88.7 \text{ MPa}$  است که این مقدار، در واقع کمتر از تنش تسلیم ماده است. در نتیجه، در این شتاب هیچ کدام از قطعات تغییر شکل دائم پیدا نمی کند، این تحلیل گواه طراحی قابل قبول سامانه و قابلیت عملیاتی شدن آن بدون ایجاد خستگی در عملکرد آن است.

#### مراجع

- [1] Dames PM, Schwager M, Rus D, Kumar V. Active magnetic anomaly detection using multiple micro aerial vehicles. IEEE Robotics and Automation Letters. 2015 Dec 22;1(1):153-60.
- [2] Zhi-zhong J, Ri-jie Y. Research on Modeling for Real Time Range Prediction of Airborne Submarine Search Sensors. 2010 Second World Congress on Software Engineering; 2010 Dec 19-20; Wuhan, China. IEEE Xplore; 2011. p. 41-44.
- [3] Sifuentes E, Casas O, Pallas-Areny R. Wireless magnetic sensor node for vehicle detection with optical wake-up. IEEE Sensors journal. 2011 Jan 6;11(8):1669-76..

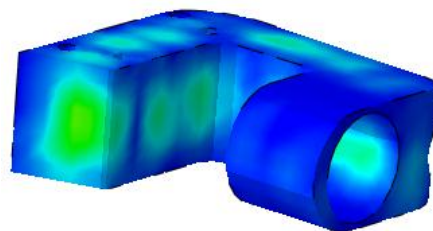


شکل ۹. توزیع تنش قطعه بازوی اسپیدر



شکل ۱۰. توزیع تنش قطعه فریم

شکل ۱۱ توزیع تنش قطعه اتصال هد را نشان می دهد. در این شکل نیز با توجه به سطح اصطکاک کم و تماس گسترده با قطعات سیستم، تنش تماسی بیشتری وجود دارد.



شکل ۱۱. توزیع تنش قطعه اتصال هد



- 9. General contact
- 10. Frame
- 11. head coupling

- [4] Sheinker A, Frumkis L, Ginzburg B, Salomonski N, Kaplan BZ. Magnetic anomaly detection using a three-axis magnetometer. IEEE Transactions on Magnetics. 2009 Feb 3;45(1):160-7.
- [5] Mori KE. Detection of magnetic anomaly signal by applying adjustable weight functions. IEEE transactions on magnetics. 1990 Mar;26(2):1083-7.
- [6] Tobely TE, Salem A. Position detection of unexploded ordnance from airborne magnetic anomaly data using 3-D self-organized feature map. Proceedings of the Fifth IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology; 2005. IEEE; 2005. p. 322-7.
- [7] Miller I, McGlinchey S. A neural classifier for anomaly detection in magnetic motion capture. International Conference on Entertainment Computing; 2006 Sep 20. Berlin, Heidelberg: Springer; p. 141-6.
- [8] Fromm WE. The magnetic airborne detector. IN: Marton, L. Advances in Electronics and Electron Physics. Academic Press; 1952 Jan 1. p. 257-99.

[۹] دینی عبدالله، احمدی مرتضی، گشتاسبی کامران. بررسی تغییرات تنش‌های حرارتی و مکانیکی ایجاد شده ناشی از سوراخ کاری سنگ با لیزر در فشارهای جانبی بالا با روش اجزاء محدود. روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن. ۱۳۹۵؛ ۶(۱۲): ۴۷-۵۵.

- [10] Burke JM, inventor; Qualcomm Inc, assignee. Mems accelerometer airliner takeoff and landing detection. United States patent application US 13/342,439. 2013 Mar 7.
- [11] Cetinel H, Ayvaz M. Microstructure and Mechanical Properties of AA 5083 and AA 6061 Welds Joined with AlSi5 and AlSi12 Wires. Materials Testing. 2014 Oct 1;56(10):884-90.

#### پی‌نوشت‌ها

1. Magnetic Anomaly Detection
2. Zhi-zhong
3. Sheinker
4. dip angle
5. Solidworks
6. shockmount plate
7. spreader arm
8. Yoke