

ارتعاشات ناشی از پدیده منقاری^۱ در آزمون پرش صندلی خلبان در سامانه

سورتمه

سعید محجوب مقدس*
دانشیار
دانشکده فنی و مهندسی
دانشگاه جامع امام حسین (علیه السلام)
Smahjoubmoghadas@ihu.ac.ir

محمد رضا نجفی
دانشجوی دکتری
دانشکده فنی و مهندسی
دانشگاه جامع امام حسین (علیه السلام)
najafi.m@ihu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۰۵

چکیده

سامانه سورتمه اصلی ترین جایگزین ارزیابی صحت عملکرد صندلی پران هواپیماهای پرسرعت و جت های جنگی به جای تست در حین پرواز است. این سامانه از اجزای مختلفی تشکیل شده که اتصال ریل و کفشک از مهم ترین بخش های آن است. وجود فاصله هوایی بین ریل و کفشک، گرچه امکان حرکت با سرعت های بالای سورتمه روی ریل را میسر می کند اما ممکن است منجر به انحراف سورتمه و حتی واژگونی این سامانه گردد. پژوهشگران کشورهای دارای این فناوری، با بررسی و تحلیل نیروهای منتقل شده بین ریل و کفشک، نشان دادند پدیده منقاری که باعث کنده شدن بخشی از ریل یا کفشک به صورت قطره اشک می شود، می تواند ارتعاشات زیادی به سورتمه وارد سازد. نتایج پژوهش های انجام شده در این زمینه نشان می دهد محیط ارتعاشی در تست سورتمه^۲ تابعی خطی از سرعت بوده و عیوب سطحی می تواند منجر به شروع منقاری شود. همچنین بیشترین برخورد ریل با کفشک در نقاط بالایی ریل رخ می دهد و استفاده از میراگرهای کابلی در درون پیشرانه و فوم در محفظه داخلی سورتمه، میزان ارتعاشات وارد به سورتمه را کاهش می دهد.

واژگان کلیدی: سورتمه، پدیده منقاری، ارتعاشات، کفشک، صندلی پران.

۱. مقدمه

تست بر فراز آسمان داشت و همراه با مخاطرات فراوان بود. با توجه به هزینه های بالا و امکان نتیجه نگرفتن از آزمایش واقعی، به کارگیری روشی جایگزین با قابلیت تکرار و هزینه کمتر مورد توجه کشورهای پیشرفته قرار گرفته است. بهترین

در طراحی و توسعه قابلیت های جت های جنگی، اطمینان از عملکرد صحیح صندلی پران خلبان در سرعت های بالا حائز اهمیت است. در گذشته صحت عملکرد صندلی پران نیاز به

نمونه واقعی این سامانه که جهت تست صندلی پران مورد استفاده قرار گرفته است، در شکل ۱ نشان داده شده است.

جایگزین جهت ارزیابی صحت عملکرد صندلی پران خلبان، تست سورتمه است.



شکل ۱. نمونه واقعی سورتمه و تست صندلی پران خلبان به وسیله سامانه سورتمه [۱]

هوانوردی و فضاوردی و بررسی تجهیزات سیستم‌های جت هواپیما و غیره استفاده می‌شود [۲-۴]. در شکل ۲ استفاده از بدنه جت F.4B به عنوان سازه سورتمه جهت تست پرش صندلی خلبان مشاهده می‌شود.

۱-۱. کاربردهای تست سورتمه

تست سورتمه در طراحی بسیاری از زمینه‌ها مانند آزمایش سلاح‌های پیشرفته به‌ویژه موشک‌های دوربرد، سنجش عملکرد موشک‌های نفوذی-انفجاری، شناسایی دستگاه‌های

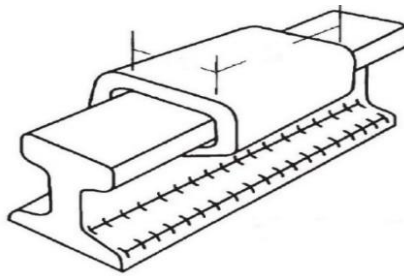


شکل ۲. استفاده از بدنه یک جت جنگی به عنوان سازه سورتمه جهت تست پرش صندلی خلبان

ریل و کفشک در یک نمونه سورتمه در حال تست پرش صندلی خلبان را نشان می‌دهد.

۱-۲. اجزای سورتمه

یکی از بخش‌های مهم در سورتمه ریل و کفشک است. شکل ۳ ریل و کفشک را به صورت شماتیک و شکل ۴ اتصال

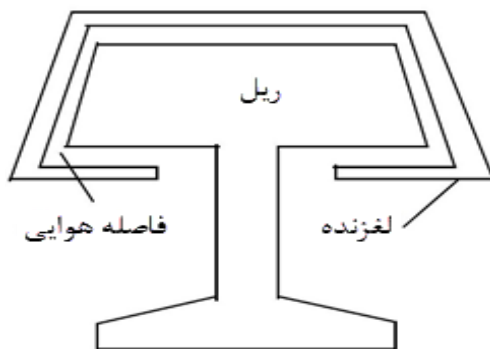


شکل ۳. ریل و کفشک [۵]



شکل ۴. اتصال ریل و کفشک در یک نمونه سورتمه

وجود فاصله هوایی بین آنها ایجاد می‌شود، این موضوع، نقشی اساسی در میزان ارتعاشات دارد چرا که جابه‌جایی سورتمه به صورت عمودی وابسته به آن است.



شکل ۵. نمایش فاصله هوایی بین ریل و کفشک [۷]

۲. فناوری تست سورتمه

با توجه به لبه دانش بودن فناوری تست سورتمه، پژوهش در این حوزه در سال‌های اخیر، مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته است [۹-۱۷].

جهت اتصال سورتمه بر روی ریل از قطعه‌ای به نام کفشک استفاده می‌شود. کفشک‌ها معمولاً از آلیاژ فولاد با مقاومت بالا ساخته می‌شوند تا بتوانند دمای بالای ناشی از اصطکاک را تحمل کنند [۶]. کفشک به شاسی و کالسنک این اجازه را می‌دهد که بر روی ریل حرکت کنند و از تکان‌های عمودی و افقی اضافی جلوگیری می‌کند. میزان فاصله هوایی بین کفشک و ریل در میزان پایداری سیستم مؤثر است. زیاد بودن فاصله هوایی، ممکن است موجب مایل شدن سورتمه به یک سمت و خارج شدن آن در اثر نیروهای آیرودینامیکی گردد [۷]. طراحی تمامی قطعات جانبی مورد استفاده در سامانه سورتمه می‌بایست قابلیت استحکام در برابر تغییر زاویه‌ای حدود ۵/۵ درجه را دارا باشند [۸]. در شکل ۵ فاصله هوایی بین ریل و کفشک مشاهده می‌شود. طراحی ریل و کفشک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از آنجا که ارتعاشات وارد بر سورتمه، از طریق برخوردهای کفشک و ریل به واسطه

۳. پدیده منقاری

۳-۱. تعریف پدیده منقاری

وجود اختلالات کوچک در ریل در کنار نیروهای عظیم آیرودینامیکی در سرعت‌های بالا، باعث ایجاد یک پرش دینامیکی در سورت‌مه می‌شود.

این ضربه به سورت‌مه می‌تواند سبب ذوب شدن موضعی سطح ریل یا کفشک و جدا شدن آن به شکل قطره اشکی گردد. به این چاله اشکی شکل که به صورت منقار پرنندگان است و می‌تواند بر روی سطح ریل و یا کفشک نمایان شود، پدیده منقاری گفته می‌شود که بر ارتعاشات سامانه سورت‌مه مؤثر است.

در شکل ۶ نمونه‌ای از اتصال ریل و کفشک به نمایش درآمده است.

استفاده از تست سورت‌مه به منظور تحلیل آزمون پرش صندلی خلبان هواپیماهای پرسرعت و جت‌های جنگی نیز از مسائل لبه دانش و کاربردی است که محققان کشورهای دارای این فناوری بدان پرداخته‌اند [۱۸-۲۵].

بیزرود^۳ و همکاران طراحی و تولید یک موشک پر سرعت برای تست سورت‌مه با وزن سبک، جمع‌وجور و کم هزینه را که قادر به پرواز با سرعتی بیش از ۶/۵ ماخ برای شکست اهداف مختلف در محدوده دید واقع‌بینانه است بررسی کردند. فناوری‌های نازل، کنترل بردار دقیق رانش، عملگر باله، طراحی اشتعال و یکپارچه‌سازی سیستم در تست سورت‌مه بررسی شده است [۲۶].

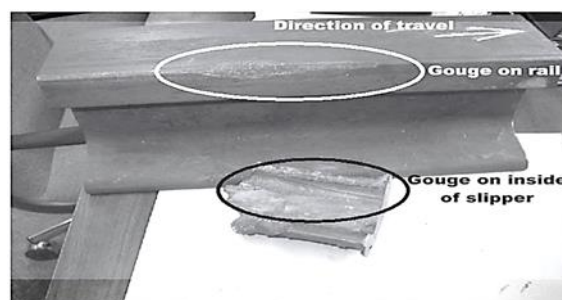
دیوید مینتو^۴ تست سرعت بالای سورت‌مه هالومن را برای ارتقاء ظرفیت‌های پشتیبانی از آزمایش فراصوت موشک‌های بالستیک زیر نظر وزارت دفاع آمریکا انجام داد [۲۷].



شکل ۶. نحوه اتصال ریل به کفشک [۲۸]

کفشک نشان داده شده است.

در شکل ۷ نیز پدیده منقاری ایجاد شده روی سطح ریل و



شکل ۷. ایجاد پدیده منقاری بر ریل و کفشک [۲۹]

۳-۲. فرایند ایجاد پدیده منقاری

پژوهشگران مختلفی در سال‌های اخیر بر پدیده منقاری تمرکز نموده‌اند [۳۲-۳۷]. جنس کفشک واسکوماکس ۵۳۰۰ فولاد مستحکم است و جنس ریل از فولاد ۱۰۸۰ است. ویژگی‌های این ماده در جدول ۱ و گرمای ویژه آن در جدول ۲ نشان داده شده است.

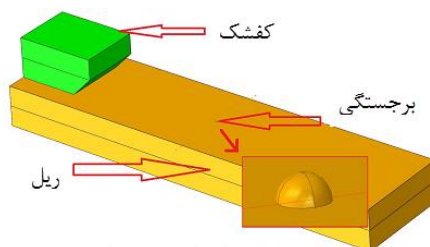
جدول ۱. ویژگی‌های واسکوماکس ۳۰۰ [۲۸]

ویژگی	مقدار	واحد
چگالی	۸۰۰۰	kg/m ³
دمای ذوب	۱۶۸۵	K
رسانایی گرمایی	۳۰/۸۰۷	W/m.K

جدول ۲. گرمای ویژه واسکوماکس ۳۰۰ [۳۳]

دما (K)	گرمای ویژه C_p (J/kg.K)
۲۹۸	۳۶۰
۴۲۲	۴۸۱
۵۹۸	۵۹۹
۷۰۰	۸۵۸

جهت شبیه‌سازی پدیده منقاری، با ایجاد یک برجستگی در سطح ریل، به تحلیل این پدیده می‌توان پرداخت که نحوه مدل‌سازی آن به صورت شماتیک در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰. شبیه‌سازی پدیده منقاری در سورتمه

راه دیگر، استفاده از شلیک گلوله به یک صفحه در زوایای ۱۰ و ۱۵ درجه است. در شکل ۱۱ اثر پوشش‌های اکسید آهن و اپوکسی بر کاهش عمق نفوذ گلوله در فولاد مورد بررسی قرار گرفته و ارتباط سرعت ضربه عمودی با شروع فرایند منقاری بررسی شده است. نتایج نشان داد طول پدیده

ضربه منقاری به وسیله یک ضربه آغاز می‌شود و در اثر تمرکز فشار و سطوح غیرصیقلی تشدید می‌شود. تنش القا شده توسط ضربه حاصل از برخورد، یک ناحیه منعطف را در زیر مکان برخورد به وجود می‌آورد. در اثر این اتفاق، یکی از اجزاء جامد تغییر شکل داده و در هنگام تغییر شکل، سطوح موازی را خرد می‌کند. در یک واکنش عکس‌العمل متقابل، این نواحی رشد کرده و در نهایت سطح کفشک یا ریل تراشیده شده و یک منقاری شکل می‌گیرد. عکس‌العمل مداوم مواد در ناحیه منقاری، منجر به ایجاد یک ناپایداری شده و رشد منقاری را بیشتر می‌کند. نوعی از این پدیده در شکل ۸ نشان داده شده است.



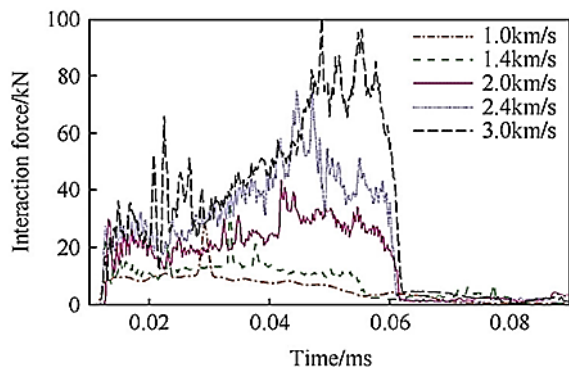
شکل ۸. اکسید آهن جهت کاهش اثر ضربه منقاری [۳۰]

روی ریل از یک لایه اکسید آهن جهت کاهش پدیده منقاری استفاده شده است تا بتواند تا حدی از شروع آن جلوگیری کند [۳۰]. برخورد ریل و کفشک باعث سوختن یک تکه از لایه‌های بیرونی کفشک و کاهش مقاومت کفشک‌ها می‌شود [۳۱]. در شکل ۹ نمونه‌ای از این برخورد نشان داده شده است.



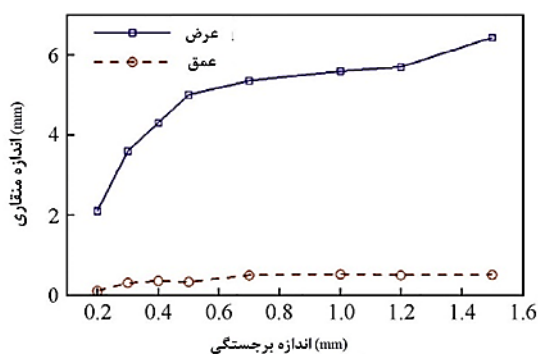
شکل ۹. نمونه‌ای از برخورد کفشک با ریل [۳۱]

همان‌گونه که در شکل ۱۳ نشان داده شده است هر چه سرعت ضربه بیشتر باشد نیروی برخورد و احتمال ایجاد پدیده منقاری بیشتر است [۴۱].



شکل ۱۳. نیروهای برخورد در سرعت‌های مختلف [۴۱]

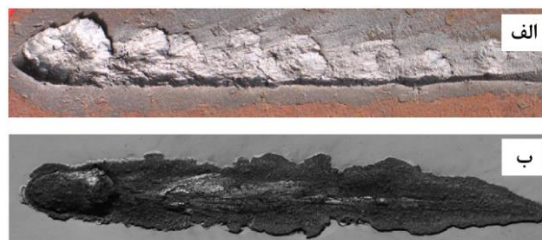
آنها همچنین مطابق شکل ۱۴ نشان دادند که می‌توان پدیده منقاری را با کاهش اندازه برجستگی به‌وسیله صیقلی نمودن سطح ریل، کنترل کرد.



شکل ۱۴. اندازه منقاری در اثر تغییر اندازه برجستگی ایجاد شده در سطح ریل [۴۱]

لیو^۹ و همکاران سایش دو ماده مختلف را مورد تحلیل قرار داده و نحوه ورود به ناحیه پلاستیک آنها را بررسی کرده‌اند. همچنین در این پژوهش استفاده از دو آلیاژ فولاد Cr18Ni9Ti و T250 برای استفاده در جنس کفشک سورت‌مورد مقایسه و بررسی قرار گرفته و اعلام شده است که در فشارهای بالا استفاده از فولاد T250 مناسب است ولی در فشارهای پایین آلیاژ دیگر رفتار سایشی بهتری دارد [۴۲]. دلیون^{۱۰} و همکاران روابط میان حرکت کفشک و

منقاری ایجاد شده در هر دو نمونه تقریباً یکسان، اما عمق آنها متفاوت است [۳۸].

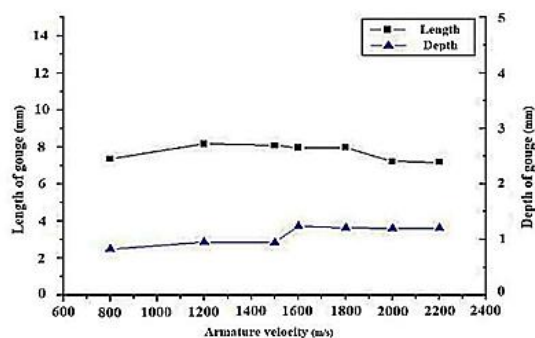


شکل ۱۱. اثر پدیده منقاری بر پوشش (الف) اکسید آهن (ب) اپوکسی [۳۸]

وات^۶ و همکاران دو ریل تخت و دارای فرورفتگی از جنس مس در سرعت‌های بیش از ۲ کیلومتر بر ثانیه را در حرکت بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهند که عیوب سطحی منجر به شروع پدیده منقاری می‌گردد [۳۹].

ژو^۷ و همکاران در پژوهشی، فرایند پدیده منقاری در برخورد کفشک و ریل دارای برجستگی را بررسی کرده‌اند. آنها تأثیر برخی عوامل مثل سرعت پیش‌رونده را در این فرایند بر عمق و اندازه حفره منقاری شبیه‌سازی کرده‌اند.

شکل ۱۲ نشان می‌دهد که از سرعت بالای ۵ ماخ، طول منقاری کاهش یافته و عمق آن تقریباً یکسان باقی مانده است [۴۰].



شکل ۱۲. رابطه سرعت کفشک با طول و عمق منقاری [۴۰]

وو^۸ و همکاران دو پارامتر جنس ماده و برآمدگی‌های سطحی روی ریل در شروع فرایند منقاری و اثر سرعت بر این پدیده را مورد بررسی قرار دادند.

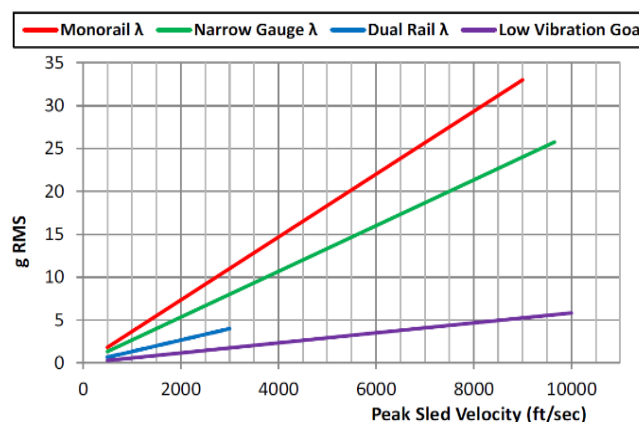
محققان بوده است. جیمز لب^{۱۱} به یک مدل ساختاری دوره‌ای از تست سرعت بالای هالومن^{۱۲} پرداخت که یک سورت‌مه می‌تواند مستقیماً باعث ایجاد ارتعاش در ریل در برخی از سرعت‌های بحرانی شود. این تئوری از طریق تجزیه و تحلیل زمان-فرکانس داده‌های شتاب‌سنج به‌دست آمده در آزمایش‌های سورت‌مه که برای دو مورد موشک انجام شده است، صحت‌سنجی شده است [۶۰]. هوزر^{۱۳} نشان داد محیط ارتعاشی در تست سورت‌مه تابعی خطی از سرعت است. همان‌گونه که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، محیط لرزش تک ریل شدیدترین میزان ارتعاش را دارد. سپس ریل مقیاس باریک بیشترین ارتعاشات را داشته و در نهایت ارتعاشات زوج ریل کمتر از دو حالت دیگر است [۶۱].

انتقال گرما را بررسی کرده و معادلات تبادل گرمای همرفتی را به‌دست آوردند. با گذشت زمان، گرادیان دمایی در فاصله‌ای که حرارت نفوذ می‌کند افزایش می‌یابد تا اینکه از دمای ذوب فراتر می‌رود و حوضچه مذاب تشکیل می‌شود. نتایج نشان داد که دو پارامتر دما و سرعت به‌صورت توأمان باعث سایش فیزیکی شده و ذوب سطحی نیز خودش عامل افزایش سایش در سورت‌مه می‌شود [۴۳].

۴. تحلیل ارتعاشی

۴-۱. ارتعاشات وارد بر سورت‌مه

پایدار کردن سامانه سورت‌مه در برابر بارهای سنگین وارد بر آن [۴۴-۵۲] و کاهش ارتعاشات این سامانه [۵۳-۵۹] از مسائلی است که به‌واسطه اهمیتی که دارند، بسیار مورد توجه



شکل ۱۵. میزان ارتعاشات در حالت‌های مختلف ریل [۶۱]

صفحه‌ای، ثابت، تماسی و مفصلی در نظر گرفته شده است. همچنین میزان شتاب در سه جهت محور در چهار ثانیه اول آزمون به‌دست آورده شد. در ادامه با استفاده از نتایج به‌دست آمده، شرایط مرزی و اطلاعات به نرم‌افزار انسیس^{۱۵} وارد گردید و مودهای خمشی در چهار نقطه زمانی به‌دست آورده شد [۶۲]. هوزر و هوزر^{۱۶} با استفاده از سنسورهای مختلف معمولی، لیزری و حرارتی به بررسی رفتار سیستم سورت‌مه عایق شده پرداختند. هدف آنها مقایسه نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی‌ها با عملکرد تجربی سیستم روی ریل بود. آنها

به‌منظور سنجش ارتعاشات بین انواع مختلف سورت‌مه در بیشینه سرعت‌های مختلف، نیازمند تعریف معیاری متناسب بود که به‌عنوان λ -dot معرفی نمود. نتایج نشان داد که استفاده از فوم در محفظه داخلی سورت‌مه که سورت‌مه هدف نامیده شد، میزان ارتعاشات وارد بر سورت‌مه را نسبت به حالت‌های مختلف دیگر ریل کاهش می‌دهد [۶۱].

ژنگ و ژیانگ^{۱۴} شبیه‌سازی دینامیکی نیروهای وارد بر سورت‌مه و بررسی مودهای آن را انجام دادند. برای بررسی تمام نقاط اتصال مختلف، چند نوع اتصال از جمله استوانه‌ای،

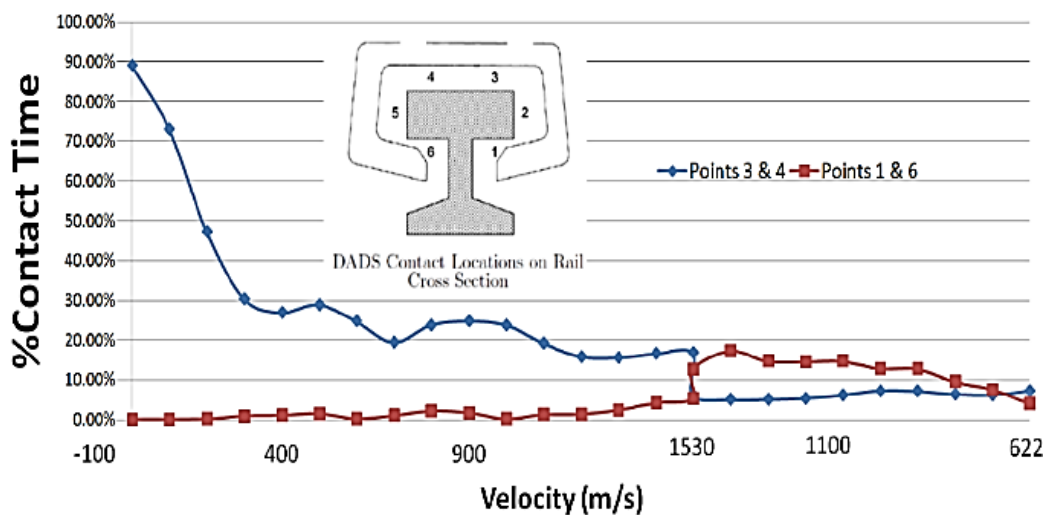
به کار رفته در کفشک‌ها دارای سفتی بالایی هستند، در اثر برخورد با ریل، ارتعاشات قابل توجهی در محل اتصال بین کفشک و ریل ایجاد می‌شود و باعث ناپایداری و کاهش عمر ریل می‌گردد [۶۶]. فضای ارتعاشی روی سطح ناشی از برخورد تصادفی کفشک با یکی از سطوح بالایی، پایینی یا جانبی ریل است که ضربه‌های به ترتیب عمودی یا جانبی را به وجود می‌آورد. تحقیقات نشان داده است که بیشترین برخورد ریل با کفشک در نقاط بالایی کفشک رخ می‌دهد و نقاط جانبی تقریباً برخوردی با ریل نداشته و برخورد نقاط زیرین کفشک نیز در طول مسیر سورت‌ها قابل چشم‌پوشی هستند [۶۷]. نتایج به دست آمده در شکل ۱۶ نشان داده شده است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، میزان تماس کفشک با ریل در نقاط زیرین ۱ و ۶ کمتر از ۵ درصد است و پس از آن نیز حداکثر به ۱۸ درصد می‌رسد. تغییرات نیروهای وارد بر بالای ریل (نقاط ۳ و ۴) در شکل ۱۷ آمده است.

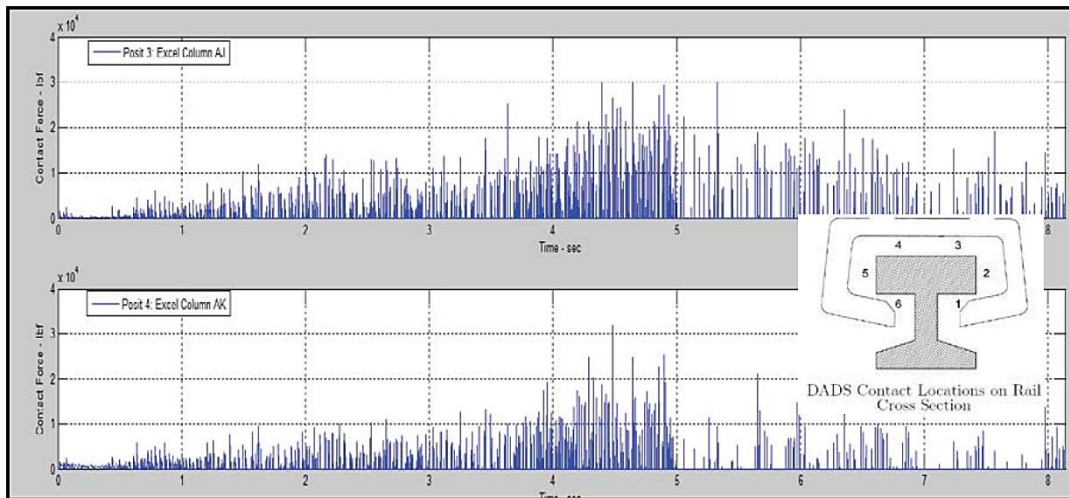
نشان دادند فرکانس طبیعی سیستم مورد بررسی‌شان، طبق آزمایش ارتعاشی آزمایشگاهی ۱۳ هرتز بود [۶۳]. این دو پژوهشگر از دو سیستم برای کاهش ارتعاشات سورت‌ها استفاده کردند. در سیستم اول از فوم و در سیستم دوم از ضربه‌گیر کابلی درون محموله سورت‌ها استفاده نمودند [۶۴]. ژیاثو^{۱۷} و همکاران جهت آنالیز مودال یک نمونه سورت‌ها از یک سیستم یک درجه آزادی استفاده کرده و ماتریس سفتی میرایی و جرم را به دست آوردند و در ادامه فرکانس‌های طبیعی سیستم را با شبیه‌سازی در نرم‌افزار مورد بررسی قرار دادند [۶۵].

۲-۴. میرا کردن ارتعاشات کفشک

ضربات ناشی از نیروی پیش‌ران موتور(ها)، نیروهای آیرودینامیکی و همچنین برخورد کفشک‌ها بر روی ریل موجب می‌شود ارتعاشات قابل توجهی به سازه سورت‌ها و تجهیزات نصب شده بر روی آن وارد شود. از آنجا که مواد



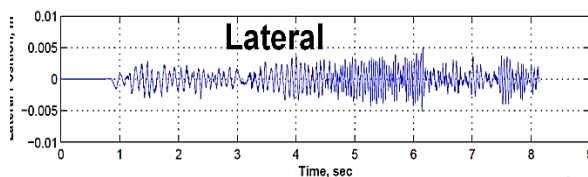
شکل ۱۶. میزان تماس نقاط تماس مختلف کفشک با ریل [۶۷]



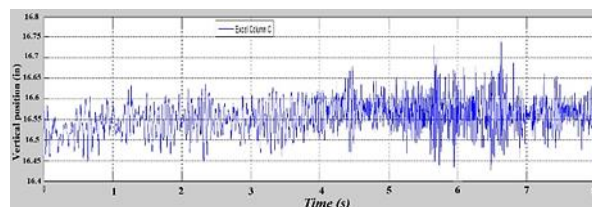
شکل ۱۷. تغییرات نیروهای وارد بر بالای ریل (نقاط ۳ و ۴) [۶۷]

بالایی ریل صورت می‌گیرد، میرا نمودن نیروهای عمودی می‌توانند تا حد زیادی از ارتعاشات سورتمه بکاهند.

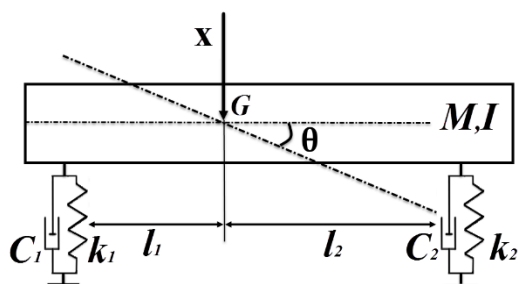
جابه‌جایی عمودی کفشک نیز در شکل ۱۸ و مقدار گشتاور و یا جابه‌جایی عرضی کفشک نیز در شکل ۱۹ آمده است. با توجه به این که بیشترین برخورد کفشک با ریل در سطح



شکل ۱۸. جابه‌جایی عرضی کفشک در طول زمان [۶۷]



شکل ۱۷A. جابه‌جایی عمودی کفشک در طول زمان [۶۷]

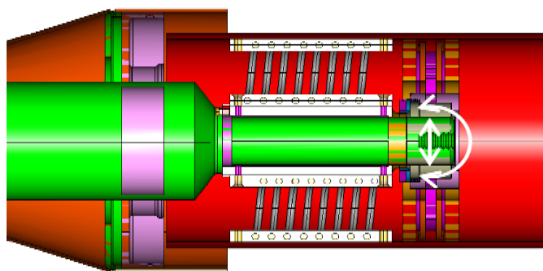


شکل ۲۰. نمایش تیر دو سر آزاد تحت نیروی محوری (پیشرانه) و تحریک از پایه (کفشک‌ها) به‌عنوان مدل ارتعاشی سورتمه

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تحریک از پایه (محل کفشک‌های سورتمه) با وجود نیروی محوری پیشرانه، می‌تواند ارتعاشات سنگینی به سیستم وارد سازد که استفاده از میراگر در محل کفشک‌ها می‌تواند تا حد زیادی، مانع از

استفاده از میراگر در محل اتصال بدنه سورتمه به کفشک‌ها، می‌تواند تا حد زیادی مانع از انتقال ارتعاشات از سطح ریل به سورتمه گردد. با توجه به این که پدیده منقاری بر اثر یک ضربه ناشی از وجود یک برجستگی بر سطح ریل ایجاد می‌شود، می‌توان این ضربه را به‌عنوان یک تابع ضربه‌ای واحد یا پله‌ای واحد در نظر گرفت و پاسخ سیستم را بررسی نمود. در این حالت می‌توان سورتمه را به‌عنوان یک تیر تحت نیروی محوری (پیشرانه) که در محل کفشک‌ها مورد تحریک قرار می‌گیرند مدل‌سازی نمود.

شمای کلی این نوع مدل‌سازی سورتمه در شکل ۲۰ نشان داده شده است.



شکل ۲۲. استفاده از میراگر کابلی جهت کاهش ارتعاشات [۶۸]

۵. نتیجه گیری

در این مقاله به ارتعاشات ناشی از پدیده منقاری در آزمون پرش صندلی خلبان در سامانه سورت‌مه پرداخته شد. برخی از نتایج به دست آمده از مرور پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه شامل موارد زیر است:

- هر چه سرعت ضربه بیشتر باشد احتمال ایجاد پدیده منقاری بیشتر است و از سرعت بالای ۵ ماخ، طول منقاری کاهش یافته و عمق آن تقریباً یکسان باقی می‌ماند.
- محیط ارتعاشی در تست سورت‌مه تابعی خطی از سرعت بوده و عیوب سطحی می‌تواند منجر به شروع پدیده منقاری شود.
- در اثر برخورد ریل و کفشک، ارتعاشات قابل توجهی در محل اتصال بین کفشک و ریل ایجاد می‌شود که با استفاده از سیستم تعلیق مغناطیسی به‌طور قابل توجهی می‌توان سطح لرزش و ارتعاشات را کاهش داد.
- محیط لرزش تک ریل شدیدترین میزان ارتعاش را داشته و سپس ریل مقیاس باریک و در نهایت ارتعاشات زوج ریل کمتر از دو حالت دیگر است.
- بیشترین برخورد ریل با کفشک در نقاط بالایی کفشک رخ می‌دهد و نقاط جانبی تقریباً برخوردی با ریل نداشته و برخورد نقاط زیرین کفشک نیز در طول مسیر سورت‌مه قابل چشم‌پوشی هستند.
- استفاده از میراگرها در محل اتصال بدنه سورت‌مه به کفشک‌ها، می‌تواند تا حد زیادی مانع از انتقال ارتعاشات

انتقال این ارتعاشات به بدنه سورت‌مه گردد. در مدل‌سازی صورت گرفته، اثر حرکت دورانی حول محور عرضی تیر (θ) نیز در نظر گرفته شده و سیستم دارای سه درجه آزادی در جهت انتقالی (X) و دورانی (θ) است.

همچنین استفاده از میراگرهای کابلی نیز می‌تواند تا حد زیادی ارتعاشات وارد بر سورت‌مه را کاهش دهند. یکی از راه‌های کاهش ارتعاشات، استفاده از میراگرهای کابلی در درون بدنه سورت‌مه است. این میراگرها از رشته‌های به هم پیچ خورده‌ی سیمی که معمولاً از جنس فولاد زنگ نزن هستند و بین دو گیره‌ی فلزی قرار دارند، درست شده‌اند.

از مزیت‌های آنها می‌توان به حفظ خاصیت استهلاکی با گذشت زمان، مقاومت بالا در برابر سایش و تغییرات آب و هوا و قابلیت تضعیف شوک‌های سنگین است. این میراگرها دارای منحنی نیرو-تغییر مکان هیستریزس غیرخطی بوده و قادر به میرا کردن ارتعاش در جهات فشاری، کششی، برشی و پیچشی با میزان جذب متفاوت هستند و می‌توانند در محدوده دمایی بین ۴۰۰ - ۷۰۰ درجه فارنهایت مورد استفاده قرار گیرند.

در میان انواع مختلف میراگرهای کابلی، سه نوع مارپیچی، دایره‌ای و فشرده بیشترین کاربرد را دارند که در شکل ۲۱ نشان داده شده است.



شکل ۲۱. میراگرهای کابلی مارپیچی، دایره‌ای و فشرده

در شکل ۲۲ نحوه قرارگیری این میراگرها در درون بدنه سورت‌مه به نمایش درآمده است.

- گردد. در این حالت با در نظر گرفتن حرکت دورانی حول محور عرضی سورتمه، مدل سازی ارتعاشی آن دارای سه درجه آزادی است که می توان پاسخ سیستم را در اثر تحریک از پایه یک تیر دو سر آزاد تحت نیروی محوری (پیشرانه) بررسی نمود.
- استفاده از میراگرهای کابلی در درون بدنه سورتمه با توجه به مقاومت بالا در برابر سایش و قابلیت تضعیف شوک های سنگین و یا استفاده از فوم در محفظه داخلی سورتمه، میزان ارتعاشات وارد به سورتمه را در جهات مختلف کاهش می دهد.

۶. مآخذ

- [1] Meacham, Michael B., Andrew Kennett, Derik J. Townsend, and Benjamin Marti, "Rocket sled propelled testing of a supersonic inflatable aerodynamic decelerator", In *AIAA Aerodynamic Decelerator Systems (ADS) Conference*, 2013, p. 1351.
- [2] Itoh, M., M. Katayama, and R. Rainsberger, "Computer simulation of an F-4 Phantom crashing into a reinforced concrete wall", *WIT transactions on modelling and simulation*, 2005, Vol.40.
- [3] Zhang, J. H., "Dynamic coupling analysis of rocket propelled sled using multibody-finite element method", *Journal of Computer Modelling New Technologies*, 2014, Vol.18, pp.25-30.
- [4] Szmerekovsky, Andrew Gerard, "The physical understanding of the use of coatings to mitigate hypervelocity gouging considering real test sled dimensions", Air Force Institute of Technology, 2004.
- [5] Hale, Chad S., Anthony N. Palazotto, and William P. Baker, "Engineering approach for the evaluation of mechanical wear considering the experimental Holloman high-speed test track", *Journal of engineering mechanics*, 2012, Vol.138, no.9, pp.1127-1140.
- [6] Cinnamon, John D., Anthony N. Palazotto, and A. G. Szmerekovsky, "Further refinement and validation of material models for hypervelocity gouging impacts", *AIAA journal*, 2008, Vol.46, no.2, pp.317-327.
- [7] Hooser, Michael, "The Holloman High Speed Test Track Gone Soft: Recent Advances in Hypersonic Test Track Vibration Environment", In *22nd AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference*, 2002, p.3035.
- [8] Factor, L. A. M. B. D. A., "Holloman High-Speed Test Track Design Manual", *Res. Summ*, 2005, Vol.1, no.2.
- [9] Hooser, Clinton, "Proposed Hypersonic Air Breathing Test Capability at the Holloman High Speed Test Track", In *22nd AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference*, 2002, p.3037.
- [10] Shockley, Jeremiah, and Scott Zetterstrom, "50 Years of the Central Inertial and GPS Test Facility", In *US Air Force T&E Days*, 2009, p.1724.
- [11] Schoenfeld, William, "Requirements for upgrading the Holloman High Speed Test Track computational fluid dynamics analytical capability", In *21st Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference*, 2000, p.2288.
- [12] Xiao, Jun, Wei-wei Zhang, Qiang Xue, Wei-bo Gao, and Bo Deng, "Analysis of rocket sled vibration signal transmission based on zigbee application", In *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, Vol.1176, no.6, p.062006. IOP Publishing, 2019.
- [13] Fradkin, David, "Use of deep penetration flash radiography in conventional ordnance, and impact dynamics research and development", In *31st Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 1995, p.2701.

- [14] Hsu, Yen-hwa, Alan Langhorn, Donald Ketchen, Leo Holland, David Minto, and David Doll, "Magnetic levitation upgrade to the Holloman high speed test track", *IEEE transactions on applied superconductivity*, 2009, Vol.19, no.3, pp.2074-2077.
- [15] Gragossian, Aram, Diego F. Pierrottet, Jay Estes, Bruce W. Barnes, Farzin Amzajerjian, and Glenn D. Hines. "Navigation Doppler Lidar performance analysis at high speed and long range." In *AIAA Scitech 2020 Forum*, 2020, p.0369.
- [16] Skulsky, Eli David, Andrew Edie Johnson, Jeff Umland, Curtis Padgett, Bill Martin, Stacy Weinstein, Mark Wallace, Adam Steltzner, and Sam Thurman, "Rocket sled testing of a prototype terrain-relative navigation system", 2001.
- [17] Morin, Christopher, and Kody Sparks, "Developing a High Altitude Simulating, Dynamic, Ground Test Capability at the Holloman AFB High Speed Test Track", In *USAF Developmental Test and Evaluation Summit*, 2004, p.6834.
- [18] HEGENWALD Jr, JAMES F., and EDWARD A. MURPHY Jr., "Sled Testing the Emergency Escape System: The Human Factor", *Journal of Jet Propulsion*, 1957, Vol.27, no.9, pp.1027-1028.
- [19] Crandall, J. R., W. D. Pilkey, W. Kang, and C. R. Bass, "Sensitivity of Occupant Response Subject to Prescribed Corridors for Impact Testing", *Shock and Vibration*, 1996, Vol.3, no.6, pp.435-450.
- [20] Rock, Stacey, Sami Habchi, Charles Yeiser, Mitchell Oslon, T. Marquette, Stacey Rock, Sami Habchi, Charles Yeiser, Mitchell Oslon, and T. Marquette, "A computational methodology for the rapid simulation of jettisoned aircraft canopy trajectories", In *35th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 1997, p.169.
- [21] Rock, S., and S. Habchi, "Validation of an automated chimera methodology for aircraft escape systems analysis", In *36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 1998, p.767.
- [22] Blachowski, Thomas, and Peter Ostrowski, "Update on the development of a laser/fiber optic signal transmission system for the Advanced Technology Ejection Seat (ATES)," In *37th Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 2001, p.3635.
- [23] Liever, Peter, and Sami Habchi, "Separation analysis of launch vehicle crew escape systems", In *22nd Applied Aerodynamics Conference and Exhibit*, 2004, p.4726.
- [24] Zhu, Yongfeng, Xiang Zhao, and Sijun Zhang, "Computational studies of aircraft Life-Support systems", In *49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, 2011, p.1045.
- [25] Guan, Huanwen, Yongfeng Zhu, Xiang Zhao, and Sijun Zhang. "Aerodynamic Characteristics of Ejection Seat and Occupant", In *51st AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, 2013, p.386.
- [26] Biserod, Hans, Kai Fossumstuen, Erland Orbekk, Dag Tokerud, Michael Kaiserman, Michael Rodack, Wayne Spate, Stanton Winetrobe, Blaine Royce, and Sandy Wallace, "The Hypervelocity Anti-Tank Missile Development Program; Passive Separation Mechanism", In *41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2005, p.4176.
- [27] Minto, David W., "The holloman high speed test track hypersonic upgrade program status", In *22nd AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference, Saint Louis, MO.*, 2002.
- [28] Boardman, Brian, Richard Uber, William Baker, and Anthony N. Palazotto, "Modeling Nonlinear Heat Transfer for Pin-on-Disc Sliding System", In *AIAA Scitech 2020 Forum*, 2020, p.0973.
- [29] Tachau, R. D. M., C. H. Yew, and T. G. Trucano, "Gouge initiation in high-velocity rocket sled testing", *International journal of impact engineering*, 1995, Vol.17, no.4-6, pp.825-836.

- [30] Cinnamon, John D., and Anthony N. Palazotto, "Analysis and simulation of hypervelocity gouging impacts for a high speed sled test", *International journal of impact engineering*, 2009, Vol.36, no.2, pp.254-262.
- [31] Wuertemberger, Lauren B., "Predicting the Wear of High Speed Rocket Sleds", AIR FORCE INST OF TECH WRIGHT-PATTERSON AFB OH SCHOOL OF ENGINEERING AND MANAGEMENT, 2012.
- [32] Laird, David, and Anthony Palazotto, "Temperature effects on the gouging and mixing of solid metals during hypervelocity sliding impact", In *43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 2002, p.1691.
- [33] Laird, David J., and Anthony N. Palazotto, "Effect of temperature on the process of hypervelocity gouging", *Aiaa Journal*, 2003, Vol.41, no.11, pp.2251-2260.
- [34] DeLeon, Armando, and Anthony N. Palazotto, "Shock Wave Investigation of High Speed Asperity Collision with Finite Element Modeling", In *AIAA Scitech 2020 Forum*, 2020, p.0316.
- [35] Szmerekovsky, Andrew G., and Anthony N. Palazotto, "Structural dynamic considerations for a hydrocode analysis of hypervelocity test sled impacts", *AIAA journal*, 2006, Vol.44, no.6, pp.1350-1359.
- [36] Palazotto, Anthony, and Stephen Meador, "Consideration of wear at high velocities using a hydrocode", *AIAA journal*, 2012, Vol.50, no.3, pp.746-751.
- [37] Watt, T. J., and D. L. Bourell, "Sliding instabilities and hypervelocity gouging", *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2010, Vol.39, no.1, pp.162-167.
- [38] Cinnamon, John D., and Anthony N. Palazotto, "Further validation of a general approximation for impact penetration depth considering hypervelocity gouging data", *International journal of impact engineering*, 2007, Vol.34, no.8, pp.1307-1326.
- [39] Watt, Trevor J., Charys E. Clay, Philip M. Bassett, and David L. Bourell, "The effect of surface indentations on gouging in railguns", *WEAR*, 2014, Vol.310, no.1-2, pp.41-50.
- [40] Zhu, Rengui, Qian Zhang, Zhiyuan Li, Longwen Jin, and Ruilin Wang, "Impact physics model and influencing factors of gouging for electromagnetic rail launcher", In *2014 17th International Symposium on Electromagnetic Launch Technology*, IEEE, 2014, pp.1-6.
- [41] Wu, Jin-guo, Bo Tang, Qing-hua Lin, Hai-yuan Li, and Bao-ming Li., "3D numerical simulation and analysis of railgun gouging mechanism", *Defence technology*, 2016, Vol.12, no.2, pp.90-95.
- [42] Liu, Jun, Weihua Wang, Feng Zhao, and Mingsheng Gong, "Comparison of two rocket sled slipper materials for resistance to wear", In *AIP Conference Proceedings*, AIP Publishing LLC, 2017, Vol.1890, no.1, p.040119.
- [43] DeLeon, Armando, William Baker, and Anthony Palazotto, "Evaluation of a Nonlinear Melt Region Produced Within a High Speed Environment", In *2018 AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 2018, p.0187.
- [44] Pierre, C., A. A. Ferri, and E. H. Dowell, "Multi-harmonic analysis of dry friction damped systems using an incremental harmonic balance method", 1985, pp.958-964.
- [45] Zhi-wei, D. O. U., and S. H. E. N. G. Suo-xiu, "The Application Research of Metal Rubber Technology [J].", *Aircraft Design*, 2010, Vol.5.
- [46] Zhao, C., Y. J. He, and H. Zhang, "Application research of metal rubber, Noise Vibr", *Control (in Chinese)*, 2006, Vol.5, p.45.
- [47] Guangqi, Han, A. I. Ren Yin, and Jie Zhenzhen, "Simulation analysis of rocket sled vibration reduction platform [J]", *Journal of experiment and test*, 2006, Vol.2, pp.10-13.

- [48] Ruan Yu Tang, "Finite element structural analysis of a machine gun based on ANSYS [[D]]". *Nanjing: Nanjing University of Science and Technology*, 2007, pp.17-37.
- [49] Holloman, A. F. B., "Honeywel", *Advanced Guidance Technologe Advanced Inertial Measurement Unit Laboratory and Sled Tests*, 1992.
- [50] Gao, Wei, and N. J. Kessissoglou, "Dynamic response analysis of stochastic truss structures under non-stationary random excitation using the random factor method", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2007, Vol.196, no.25-28, pp.2765-2773.
- [51] Rodney, David, Benjamin Gadot, Oriol Riu Martinez, Sabine Rolland Du Roscoat, and Laurent Orgéas, "Reversible dilatancy in entangled single-wire materials", *Nature materials*, 2016, Vol.15, no.1, pp.72-77.
- [52] Turnbull, Dennis, Clinton Hooser, Michael Hooser, and Jack Myers, "Soft sled test capability at the holloman high speed test track", In *US Air Force T&E Days*, 2010, p.1708.
- [53] Hooser, Michael, "Soft Sled-the Low Vibration Sled Test Capability at the Holloman High Speed Test Track", In *2018 Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference*, 2018, p.3872-3882.
- [54] Ding Wenjing compilation, "Theory of vibration reduction [M]", *Beijing: Tsinghua University press*, 2014, pp.63-91.
- [55] Ding Chun Tong, "Mechanical simulation of rocket sled test damping system [J]", *naval electronic engineering*, 2012, Vol.8 pp.87-89.
- [56] Bosmajian, Neil, David Minto, and Leo Holland, "Status of the magnetic levitation upgrade to the Holloman High Speed Test Track", In *21st Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference*, 2000, p.2289.
- [57] Minto, David, "Recent increases in hypersonic test capabilities at the Holloman High Speed Test Track", In *38th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 2000, p.154.
- [58] Gurol, Husam, Don Ketchen, Leo Holland, Mike Hooser, David Minto, Neil Bosmajian, and Russell M. Cummings, "Status of the Holloman high speed maglev test track (HHSMTT)", In *30th AIAA aerodynamic measurement technology and ground testing conference*, 2014, p.2655.
- [59] Chen, Shi-yu, Yue-lei He, and Zai-wei Li, "Analysis of the Rocket Sled Track Irregularity in Time and Frequency Domains," In *CICTP 2014: Safe, Smart, and Sustainable Multimodal Transportation Systems*, 2014, pp.111-118.
- [60] Lamb, James L., "Critical velocities for rocket sled excitation of rail resonance", *Johns Hopkins APL technical digest*, 2000, Vol.21, no.3, pp.448-458.
- [61] Hooser, Michael, "Soft Sled-the Low Vibration Sled Test Capability at the Holloman High Speed Test Track", In *2018 Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference*, 2018, p.3872.
- [62] Zhang, Jian Hua, and Shou Shan Jiang, "Definition of boundary conditions and dynamic analysis of rocket sled and turntable", In *Applied Mechanics and Materials*, Trans Tech Publications Ltd, 2011, Vol.52, pp.261-266.
- [63] Hooser, M., Hooser, C., "103X-A1 Vibration Analysis Report", HHSTT digital archive, 28 Dec 2016
- [64] Hooser, M., Hooser, C., "Soft Sled Design Evaluation Report", 25 Feb 2016

- [65] XIAO, JUN, WEI-WEI ZHANG, QIANG XUE, WEI-BO GAO, and LIN-RUI ZHANG, "Modal Analysis for SingleTrack Sled", *DEStech Transactions on Engineering and Technology Research* pmsms, 2018.
- [66] Jin, Long-wen, Qian Zhang, Bin Lei, and Zhi-yuan Li, "Simulation and research on 3D gouging model based on Abaqus/Explicit", In *2012 16th International Symposium on Electromagnetic Launch Technology*, IEEE, 2012, pp. 1-5.
- [67] Buentello Hernandez, Rodolfo G., and Anthony N. Palazotto, "3D Finite Element Modeling of High-Speed Sliding Wear", In *54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 2013, p.1505.
- [68] Turnbull, Dennis, Clinton Hooser, Michael Hooser, and Jack Myers, "Soft sled test capability at the holloman high speed test track", In *US Air Force T&E Days*, 2010, p.1708.

پی نوشت:

1. Gouging
2. Sled Test
3. H. Biserod & et al.
4. D.W. Minto & et al.
5. Vascomax 300
6. T.J. Watt & et al.
7. R. Zhu & et al.
8. J. guo Wu & et al.
9. Liu & et al.
10. DeLeon & et al.
11. Lamb, James
12. Holloman High Speed Test Track (HHSTT)
13. Hooser, Michael
14. J.H. Zhang & S.S. Jiang
15. ANSYS Software
16. Hooser, M. & Hooser, C.
17. XIAO & et al.