

اصول دینامیکی طراحی یک سازه تراست استند و روش‌های بهبود پاسخ دینامیکی آن

مجتبی حیدری^۱، امیرعلاء الدین مطلبی^۲، صادق رحمتی^۳ و ابراهیم حریربافان^۴
Mojtaba.heidari@yahoo.com

چکیده

به منظور سنجش دقت عملکرد موتور موشک‌ها و راکت‌ها آنها را در دستگاهی به نام تستر(تراست استند) آزمایش می‌کنند. در این مقاله به نحوه طراحی دینامیکی یک سازه تراست استند به منظور تست موتورهایی با حداکثر نیروی تراست ۵ ton و تدوین اصول طراحی آن در مقابل ارتعاشات اتفاقی موتور سوخت جامد پرداخته شده است. ابتدا مفاهیمی از چگونگی اثرپذیری تسترها از ارتعاشات موتور شرح داده شده است. سپس با استفاده از اطلاعات تراست-زمان سه نوع موتور سوخت جامد، تابع تراکم طیفی قدرت (PSD) موتورها توسط نرم‌افزار MATLAB، محاسبه شده است. آنگاه چندین طرح تستر در SolidWorks طراحی شده و توسط نرم‌افزار ANSYS پاسخ دینامیکی آنها محاسبه شده است. سعی شده است با تغییرات در سازه، پاسخ دینامیکی آنها بهبود داده شود. از میان انواع تسترهای طراحی شده، طرحهای معدودی وجود دارند که قابلیت بهبود پاسخ دینامیکی بهتری دارند. افزایش هر چه بیشتر فرکانس‌های طبیعی تستر، سازه را در مقابل ارتعاشات موتور ایمن می‌کند. سازه خرپایی به دلیل قابلیت بهبود پاسخ دینامیکی بهتر، یکی از گزینه‌های مناسب برای تستر است. کم کردن جرم سازه، استفاده از انواع مقاطع لوله و کوتاه کردن طول اعضا از جمله راهکارهایی هستند که موجب افزایش فرکانس‌های طبیعی سازه می‌شود.

کلیدواژه:

تراست استند- تراکم طیفی قدرت- پاسخ دینامیکی - ارتعاشات اتفاقی

۱ - کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه امام حسین(ع)

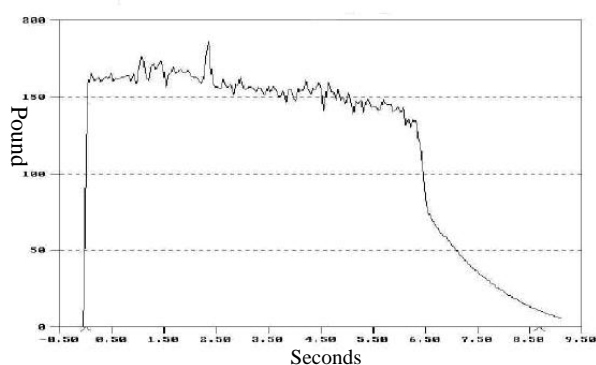
۲- کارشناس ارشد هوا فضا، مرکز تحقیقات قدر، Amiralaeddinmotallebi@yahoo.com

۳- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مجلسی، Srahmati2007@gmail.com

۴- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه امام حسین(ع)

۱- مقدمه

در طول آزمایش، تراست موتور به واسطه یک کلکتور تراست به تکیه‌گاه صلب منتقل می‌شود. کلکتورهای تراست بوسیله قلاب‌هایی به موتور بسته می‌شوند که قسمت‌های لازمی جهت نگه داشتن موتور و انتقال تراست هستند. بعد از انتقال تراست به این نگه‌دارنده‌ها، بار تراست بوسیله لودسل تراست به تکیه‌گاه منتقل می‌شود. کلکتورهای تراست (یا رابط‌ها) یک حد فاصل بین موتور با لودسل‌ها تعبیه می‌کنند به طور معمول در انتهای هر لودسل از فلکسچرهایی به منظور کاهش لقی و حداقل کردن تداخل‌های اندازه‌گیری استفاده می‌شود.



شکل (۲): نمودار تراست - زمان یک موتور هیبریدی کوچک [۸]

به طور کلی می‌توان گفت که یک طراح، در طراحی سازه تراست استند باید از دو منظر آن را مورد توجه قرار دهد:

- ۱- استاتیکی
- ۲- دینامیکی

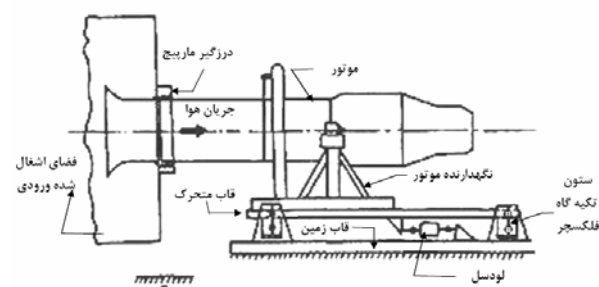
در طراحی تستر، ملاحظات استاتیکی در مقایسه با قیود و ملاحظات دینامیکی از اهمیت کمتری برخوردار است. در ملاحظات استاتیکی ضریبی از حداکثر نیروی تراست موتور را بر سازه اعمال می‌کنند [۵]. دقت اندازه‌گیری تستر ارتباط مستقیمی با عدم اثرپذیری حسگرهای اندازه‌گیر از پاسخ ارتعاشی استند دارد. ارتعاشات احتراق موتور موشک‌های سوخت جامد را معمولاً در قالب ارتعاشات اتفاقی بررسی می‌کنند. معدود موتورهایی نیز وجود دارند که به صورت هارمونیک ارتعاش می‌کنند. فرکانس ارتعاشات اتفاقی موتورها به طور معمول در زیر 5000 Hz می‌افتد [۶]. این فرکانس‌ها را می‌توان با دریافت اطلاعات شتاب یا نیروی موتور از طریق شتاب‌سنج‌ها و لودسل‌ها و محاسبات تبدیل فوریه سریع (FFT^{10}) بدست آورد [۷]. شکل (۳) نمونه‌ای از منحنی‌های استخراج شده تراست از تست واقعی یک موتور هیبریدی کوچک را نشان می‌دهد. نوسانات بسیار

جهت دستیابی به دقت عملکرد موتورهای توربوجت و توربوفن، موشک‌ها و راکت‌های سوخت جامد و مایع و شبیه‌سازی شرایط پروازی، آنها را در دستگاهی به نام تستر (تراست استند^۱) آزمایش می‌کنند (شکل ۱). تستر یک ابزار اندازه‌گیری دقیق است که مشخصات موتور از جمله شتاب، نیرو، گشتاور در سه جهت مختصات و فشار و دما در نقاط مختلف محفظه موتور و دهانه نازل توسط آن استخراج شده و طراحان موتور جهت بهبود عملکرد موتور، بررسی نازلها و گرین سوخت، محاسبه انحراف از محور بردار تراست^۲، کالیبراسیون بردار کنترل تراست (TVC^3) و... از آن بهره می‌برند [۱]. اندازه‌گیری کارایی موتورها منوط به استفاده از چندین پارامتر (برای مثال، مصرف سوخت ویژه، ضربه‌های مجموع و ویژه^۴ [۲ و ۳]) که نیازمند اندازه‌گیری دقیق نیروی تراست هستند، می‌باشد. تراست را می‌توان به وسیله چندین شیوه اساسی به طور مثال مقیاس اندازه نیرو^۵، بالانس ممنتوم داخلی و محاسبه با استفاده از ضریب نازل تعیین کرد. از انواع این تکنیک‌ها تنها شیوه مقیاس اندازه نیرو در اینجا مورد بحث قرار می‌گیرد.

به طور کلی، تراست استندها از دو قسمت اساسی تشکیل شده‌اند:

- ۱- متحرک^۶
- ۲- ثابت^۷

موتور از طریق قسمت متحرک و شناور به قسمت ثابت وصل می‌شود. قسمت متحرک، آداپتور^۸، قاب متحرک و ابزار تحت آزمایش (موتور) را در بر می‌گیرد. قسمت متحرک توسط فلکسچرهایی^۹ با قاب زمینی یا ثابت در اتصال است [۴] (شکل ۱).



شکل (۱): تستر افقی خارج از محور موتور هوا تنفسی سکویی

- 1- Thrust stand
- 2- Thrust Misalignment
- 3- Thrust Vector Control
- 4- Specific Impulse
- 5- Scale force measurement
- 6- LIVE FRAME
- 7- FIX OR GROUND FRAME
- 8- Adapter
- 9- Flexure

10- Fast Fourier Transform

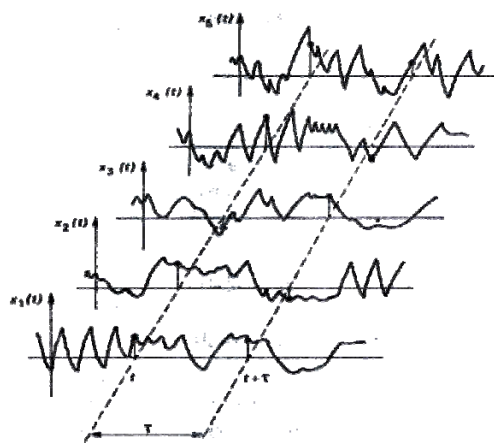
تحریک موتور دور شود. اغلب طراحان افزایش هر چه بیشتر پاسخ دینامیکی استند را پیشنهاد داده‌اند [۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴].

در این مقاله به شیوه دوم پرداخته می‌شود. پرسش‌های مهمی که یک طراح تستر اغلب با آن مواجه است اینکه چرا و چه اندازه افزایش پاسخ دینامیکی تستر لازم است؟ چه نوع سازه پاسخ دینامیکی بالاتری دارد؟ چگونه فرکانس طبیعی تستر افزایش می‌یابد؟ روش ارائه شده در این مقاله، روند اصولی طراحی دینامیکی یک سازه تستر را برای آزمایش موتورهایی با حداکثر نیروی تراست ۵ ton و نحوه طراحی آن در مقابل ارتعاشات اتفاقی موتور سوخت جامد، تدوین می‌کند. در این مقاله از آزمایشهای متعدد سه نوع موتور که تراستی تا محدوده ۵ ton را پوشش می‌دهند، استفاده شده است. ابتدا مفاهیمی از چگونگی اثرپذیری تسترها از ارتعاشات موتور شرح داده می‌شود. سپس تابع تراکم طیفی (PSD) سه نوع موتور سوخت جامد با استفاده از اطلاعات تراست-زمان آنها توسط نرم‌افزار MATLAB، محاسبه می‌شود. از میان انواع طرح‌ها، یک طرح اولیه از یک سازه تستر به دلیل ملاحظات دینامیکی انتخاب شده و در Solid Works مدل می‌شود. سپس توسط نرم‌افزار ANSYS پاسخ دینامیکی آن با تغییرات در سازه بهبود داده شده و در انتها نتایج آورده می‌شود.

۲- مفاهیم اولیه

برخورد فرکانس‌های طبیعی سازه و موتور با فرکانس‌های ارتعاشی حاصل از احتراق موتور با توجه به شدت دامنه نیرویی موجب شوک در بدنه موتور و سازه تراست استند شده اطلاعات خروجی از اندازه‌گیرها، به خصوص لودسلها و شتابسنج‌ها را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. از طرف دیگر با شروع احتراق، جرم موتور به تدریج کم می‌شود. این موضوع خود موجب تغییر در فرکانس‌های طبیعی موتور و در نتیجه دشوارتر شدن مسئله می‌شود. کاهش جرم موتور، از آنجایی که فرکانس‌های طبیعی ضریبی از $\sqrt{\frac{k}{m}}$ هستند موجب افزایش پاسخ دینامیکی موتور در هنگام احتراق می‌شود. موتورهایی با جرم زیاد، به طور معمول فرکانس‌های طبیعی کوچکتر دارند. جدول (۱) که توسط ناسا گزارش شده است این موضوع را به خوبی نشان می‌دهد.

زیاد و غیرقابل پیش بینی نیرو نشان دهنده رفتار اتفاقی ارتعاشات موتور می‌باشد. این رفتار در موتورهای سوخت جامد به نسبت دیگر موتورها از شدت بیشتری برخوردار است. در این مقاله مبنای موتور سوخت جامد می‌باشد.



شکل (۳): محاسبه خودارتباطی

تأثیرات متقابل سازه و موتور بر بسیاری از استندها اثر گذاشته و نتایج آنها را محدود می‌کند. اگر چه در بسیاری از آزمایش‌ها از این خطا چشم‌پوشی شده اما روشهایی برای اصلاح داده‌ها تحت تأثیر این اثرات بوجود آمده است [۴].

از دهه ۵۰ میلادی که ساخت اولین تسترها آغاز گردید این موضوع همواره مدنظر طراحان بوده است. گرچه هیچگاه اثرات ارتعاشات موتور بر نتایج تستر از بین نرفته است، اما طراحان تستر با توجه به خلاقیت و تکنولوژی روز از روشهای متعددی جهت کاهش این اثرات استفاده کرده‌اند. بطور کلی این روشها به دو صورت تقسیم می‌شوند:

۱- دفع و میرا کردن آثار ارتعاشات بعد از تحریک استند توسط موتور.

۲- حداقل کردن تحریک استند توسط موتور.

بطور مثال استفاده از یک میراکننده خودتنظیم [۹] یا بازخورد نیروهای هیدرولیکی [۱۰] راهکاری در قالب شیوه اول است. شیوه اول سه ضعف اساسی دارد:

۱- پرهزینه

۲- قابلیت اطمینان کم

۳- نامناسب برای تسترهای چند مؤلفه

اما شیوه دوم اغلب مورد استفاده طراحان قرار گرفته است [۵]. در این شیوه سازه استند به گونه‌ای طراحی می‌شود تا از فرکانس‌های

جدول (۱): فرکانس طبیعی استند بر حسب وزن موتور [۱۴]

Published Results From Literature Survey		
Wtof Motor	Natural Frequency	Source
3.2 LB	2,600 CPS	Rohm & Haas Co.
2 0 LB	1,400 CPS	Rohm & Haas Co.
1,000 LB	500 CPS	Baldwin-Lima-Hamilton Co.
20,000 LB	25 CPS	Aerojet
Results of Study into Axial Thrust Accuracy		

با استفاده از داده‌های تراست-زمان موتور، تابع خودارتباطی (خودهمبستگی) محاسبه شده و سپس با استفاده از تابع خودارتباطی^{۱۲}، PSD محاسبه می‌شود [۱۶].

تابع خودارتباطی یک متغییر اتفاقی $x(t)$ به عنوان متوسط $x(t)x(t+\tau)$ تعریف می‌شود. به عبارت دیگر یک فرآیند در زمان $t, t+\tau$ نمونه برداری می‌شود (شکل ۳) و متوسط حاصلظرب $E[x(t)x(t+\tau)]$ برای مجموعه آماری محاسبه می‌شود.

بنابر این می‌توان نوشت:

$$E[x(t)x(t+\tau)] = f(\tau) = R_x(\tau) \quad (1)$$

که در آن $R_x(\tau)$ تابع خودارتباطی $x(t)$ است.

$$S_x(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (2)$$

و $S_x(\omega)$ تراکم طیفی فرآیند نامیده می‌شود که تابعی از فرکانس ω است. در این روش خصوصیات آماری داده‌ها در محاسبات PSD نقش پیدا می‌کند، که متداولترین شیوه در ارتعاشات اتفاقی است. برای محاسبه PSD از نرم افزار MATLAB استفاده شده و از الگوریتم یول والکر^{۱۳} [۱۷ و ۱۸] پیروی شده است. در محاسبات، اطلاعات حاصل از آزمایش احتراق ۳ نوع موتور سوخت جامد مدنظر قرار گرفته است. از آنجایی که هدف طراحی تراست استند برای تست موتورهایی با بازه تراست بین ۵۰۰-۵۰۰۰ Kg است موتورهای به گونه‌ای انتخاب شدند که همه بازه مدنظر طراحی را در بر بگیرند. اطلاعات موجود خروجی لودسل نیروی تراست با فرکانس داده برداری ۲۰۰ Hz بوده و توسط استندهای تک مؤلفه استخراج شده است. نسبت نیروی تراست بزرگترین موتور به کوچکترین موتور تقریباً ۱۱ می‌باشد. موتورهای از شماره ۱ تا شماره ۳ نامگذاری شده‌اند. شکل (۴) نمودار PSD این سه نوع موتور را به صورت لگاریتمی نشان می‌دهد.

نمودار PSD هر سه موتور با افزایش فرکانس افت کرده و تقریباً بعد از عبور از ۱۵۰ Hz ناچیز می‌شود. نمودارها نشان می‌دهند که در فرکانس‌های پایین تحریک موتور با اهمیت است. موتور شماره ۱ که تقریباً تراستی معادل ۰/۱ تراست دو موتور دیگر دارد، به نسبت نیروی تراست، رفتار ناآرامتری دارد. همچنین موتورهای شماره ۲ و ۳ با افزایش فرکانس افت PSD بیشتری به نسبت موتور شماره ۱ دارند. این موارد، نشان می‌دهند که موتورهای کوچکتر

از این رو جلوگیری از برخورد فرکانس‌های طبیعی سازه تراست استند و موتور با فرکانس‌های ارتعاشی حاصل از احتراق موتور به جهت کم کردن خطا و جلوگیری از آسیب به سازه به عنوان یکی از الزامات طراحی مطرح می‌شود [۱۴]. این عمل از دو جهت خطای نتایج استخراج شده را بهبود می‌بخشد. در نگاه اول از بروز حالتی که در بالا شرح داده شد جلوگیری کرده و در نتیجه سازه و نتایج استخراج شده از آسیب‌های احتمالی در امان می‌مانند.

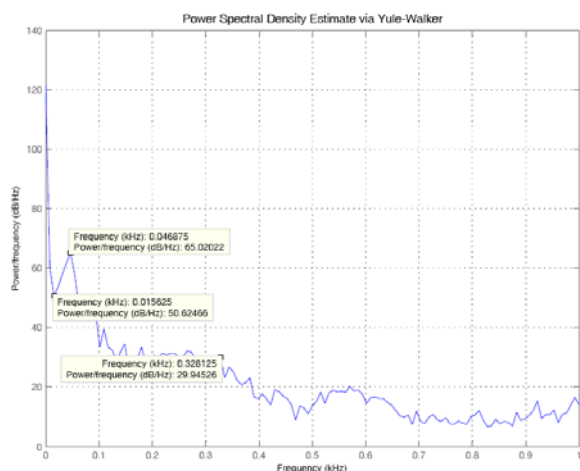
از نگاه دیگر، بهبود فرکانس‌های طبیعی سازه مساوی با سخت شدن سازه است. اگر سازه تراست استند و دیگر اجزای آن به صورت یک سیستم چند درجه آزادی فرض شود تنها نیرویی که فنرهای لودسل نشان می‌دهند خروجی اطلاعات موتور خواهد بود. لذا نیرویی که به دیگر فنرهای شبیه‌سازی شده وارد می‌شود صفر فرض می‌شود. اما در عمل به این صورت نخواهد بود. این نیروها متناسب با سختی فنرها می‌باشند. هر چه فنرها سخت باشند هر چه سازه صلب‌تر باشد موجب بهبود اطلاعات استخراج شده می‌شود که این به فرض اولیه نزدیکتر و ایده‌آل‌های طراحی را بهتر برآورده می‌کند. این موضوع را می‌توان یکی از مهمترین دلایل رویکرد طراحان تستر به سمت تسترهای بتنی [۱۳] دانست.

۳- محاسبه تابع تراکم طیفی قدرت^{۱۱} (PSD)

عامل تحریک سازه تستر ارتعاشات موتور است. ارتعاشات موتور به صورت اتفاقی رخ می‌دهد. اثر ارتعاشات موتور بدین ترتیب خود را بر لودسلها و دیگر دستگاه‌های اندازه‌گیر نشان می‌دهد که تحت اثر ارتعاشات موتور، مودهای استند تحریک شده پاسخ تحریک موتور بر روی لودسلها و دیگر دستگاه‌های اندازه‌گیر اثر می‌گذارد [۱۵]. چون هدف استند تنها اندازه‌گیری اثرات موتور است لذا در این اندازه‌گیریه‌ها، به میزان پاسخ تحریک مودها، خطا وارد محاسبات می‌شود. PSD از روش‌های متعددی قابل محاسبه است [۷]. در اینجا

12- Autocorrelation
13- Yule-walker

11- Power Spectral Density



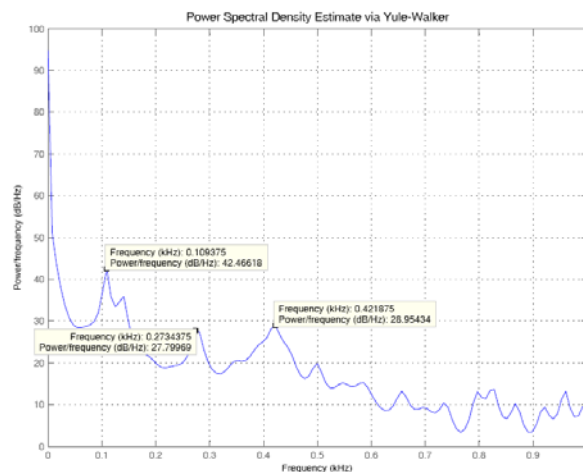
موتور شماره ۳

شکل(۴): موتور شماره ۱، ۲ و ۳ نمودار PSD سه نوع موتور سوخت جامد

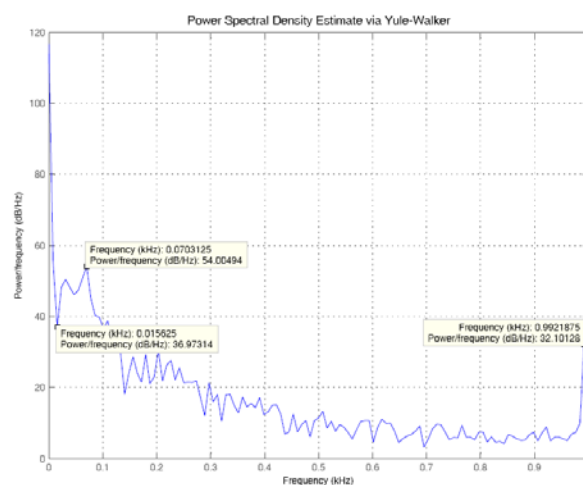
۴- انتخاب سازه تستر و طراحی اولیه

طرح‌های محدود و پرهزینه‌ای هستند که می‌توانند از فرکانس‌های احتراق موتور فراتر روند. یک بررسی کلی بر انواع تراست استندهای موجود در دنیا این مطلب را متذکر می‌شود که با صرف نظر از تراست استندهای قائم، تراست استندهای افقی در چند قالب خاص طراحی می‌شوند. این قالب بیشتر تحت تأثیر نوع و اندازه موتور و بزرگی نیروی تراست است. به طور مثال موتورهای جت را به علت عبور جریان هوا به صورت خارج از محور تست می‌کنند (شکل ۱). اما وابستگی فرکانس‌های احتراق موتور به جرم موتور و نیروی تراست بارزترین دلایلی هستند که طرح را تحت الشعاع خود قرار می‌دهند. با توجه به نتایج بدست آمده در بخش پیشین، الزام صلبیت سازه برای موتورهای کوچکتر برای دستیابی به دقت بیشتر، با اهمیت تر می‌شود. با این دیدگاه قالب کلی چند طرح تراست استند، طراحی و توسط روش‌های اجزاء محدود، فرکانس‌های طبیعی آنها بدست آمد. سپس سعی شد با تغییر در طرح سازه، فرکانس طبیعی آنها بهبود داده شود. اما محدود طرح‌هایی هستند که می‌توان پاسخ دینامیکی آنها را بهبود بخشید. از جمله طرح‌هایی که مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت در شکل (۵) نشان داده شده است. نتایج تحلیل مودال نشان داد که فرکانس طبیعی اول پایینی دارد و تغییرات در سازه موجب بهبود پاسخ آن نمی‌شود. یا تراست استند شکل (۶) که یک تراست استند افقی خارج از محور سکویی بوده و ایده آن برگرفته از بالانس‌های خارجی تونل باد است. فرکانس اولیه این طرح نیز به دلیل محدودیت‌های طرح فراتر از ۱۹ Hz نرفت. در این راستا طرح‌های دیگری نیز مورد بررسی قرار گرفت که از آن جمله می‌توان

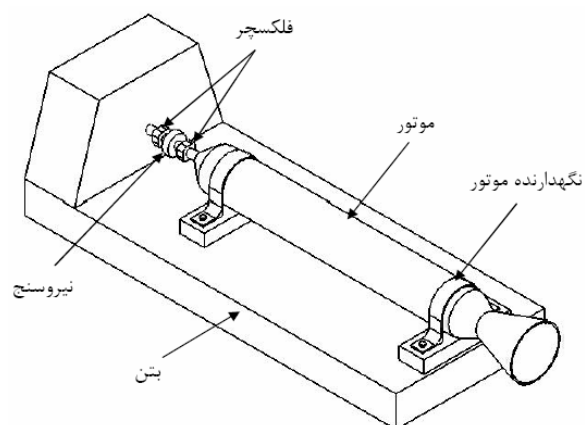
فرکانس‌های تحریک به نسبت بالاتری دارند. به طور کلی می‌توان گفت PSD هر سه موتور با افزایش فرکانس کاهش می‌یابد. لذا طراح سازه تستر برای تست این موتورها باید تلاش کند تا فرکانس‌های طبیعی سازه را تا حد ممکن افزایش دهد بخصوص فرکانس‌های طبیعی آن باید از ۱۵۰ Hz فراتر رود. این موضوع در مورد اغلب تسترها به ویژه تستر موتورهای کوچکتر بیشتر اهمیت می‌یابد. موتور شماره ۲ در فرکانس حدود ۹۹۰ Hz یک افزایش در منحنی PSD دارد. با آزمایش‌های متعدد موتور شماره ۲ و استخراج PSD آنها مشخص شد که این اتفاق در همه آزمایشات موتور ۲ رخ می‌دهد لذا باید مورد توجه قرار گیرد. از آنجایی که فرکانس‌های اولیه بیشترین انرژی را جذب می‌کنند؛ هنگامی که فرکانس‌های اولیه سازه در این محدوده قرار گیرند این PSD مهمتر می‌شود.



موتور شماره ۱



موتور شماره ۲



شکل (۸): یک نمونه تستر بتنی با پوشش

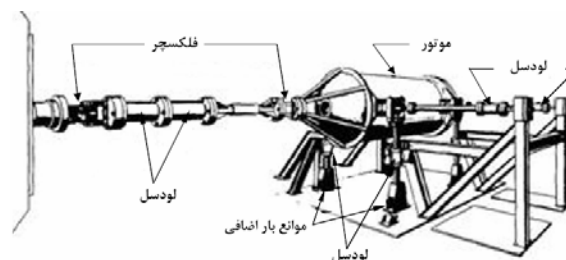
اما از میان انواع طرح‌های تستر ارائه شده، سازه خرپایی به عنوان سازه‌ای که قابلیت ارتقاء پاسخ دینامیکی بهتری نسبت به دیگر طرح‌ها داشت، انتخاب گردید و طرح اولیه آن بر اساس تستر شش مؤلفه شرکت اورمند [۲۰] در Solid Works مدلسازی شد.

۵- نتایج آنالیز مودال و بهبود پاسخ دینامیکی سازه

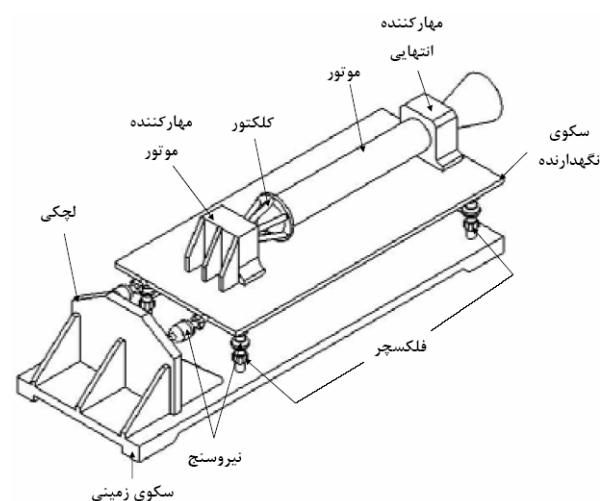
طرح اولیه مدلسازی شده در نرم‌افزار Solid Works به محیط ANSYS انتقال داده شده است. جنس سازه بر اساس استاندارد st-37, DIN انتخاب شده و شرایط مرزی آن اعمال شده است. سپس فرکانس‌های طبیعی سازه محاسبه شده است. با تغییر در سازه این روند تکرار شد و سعی شد پاسخ دینامیکی سازه تا حد ممکن بهبود یابد. مبنای طراحی برای مجموعه موتورهای با حداکثر طول از نوک تا گلوگاه نازل ۳ متر و قطر ۶۰-۱۰ cm و تراست ۵۰۰-۵۰۰ kg قرار داده شد. موتورهای موجود در این بازه به طور معمول باید با دقت بالایی طراحی و ساخته شوند لذا استخراج مشخصات عملکردی آنها باید از دقت خوبی برخوردار باشد.

به منظور دستیابی به ذهنیتی مفید جهت روند تغییرات در سازه ابتدا سازه استند در دو حالت تحلیلی مورد بررسی قرار داده شد. در محاسبه فرکانس طبیعی سازه یکی از ابتدایی‌ترین حالات، در نظر گرفتن یک سازه تراست استند تک مؤلفه، به صورت یک جسم صلب و یک فنر است (شکل ۹).

به تستر افقی هم محور آویزان (همانند شکل ۷) و تسترهای بتنی [۱۹ و ۱۳] اشاره کرد (شکل ۸).



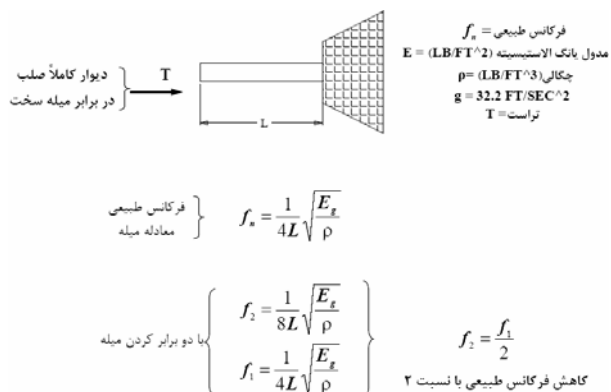
شکل (۵): یک طرح تراست استند افقی [۱۴]



شکل (۶): مدل تستر شش مؤلفه خارج از محور سکویی



شکل (۷): تصویر تستر شش مؤلفه با قاب متحرک جهت تست موتور سوخت جامد SRB-A از مجموعه ناسا



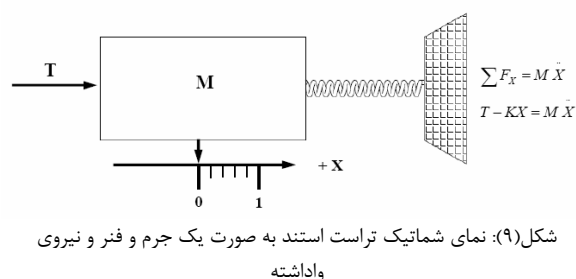
شکل (۱۰): تراست استند به صورت یک تیر یک سر گیردار فرض شده است

سازه‌های تراست استند مخصوص موتورهای بزرگ را با فرکانس طبیعی پایین تری نسبت به استند مخصوص موتورهای کوچک می‌توان طراحی کرد (شکل ۷). اما همانگونه که پیش‌تر نیز گفته شد، هر چه فرکانس طبیعی سازه بالاتر باشد میزان صحت و دقت اطلاعات دریافتی از سنسورها بخصوص لودسل‌ها بهتر است.

در شبیه‌سازی استند نکته دیگری که تأثیر قابل توجهی در محاسبات و سادگی تحلیل‌ها دارد نتایج آقای کویلیون و دیگر همکاران [۹] است که با تست‌های تجربی با ورودی‌های سینوسی و اتفاقی بر روی انواع موتورهای دامی و واقعی نشان دادند که نوع موتور نصب شده بر روی استند در فرکانس‌های سازه نقش چندانی ندارد و همچنین می‌توان با تقریب خوبی مودهایی که توسط میله‌های استرات^{۱۵} (میله رابط بین آداپتور موتور و سازه استند که شامل کوپلینگ‌ها، فلکسچرها و لودسل می‌شود. امروزه این قطعات هر کدام به تنهایی فرکانس‌هایی بالای ۲۰۰۰ Hz دارند) در سازه به وجود می‌آید را بالاتر از فرکانس‌های اولیه سازه در نظر گرفت.

طرح اولیه استند در نرم افزار Solid works مدلسازی شد و در ANSYS آنالیز مودال صورت گرفت. فرکانس اول سازه در شکل (۱۱) نشان داده شده است. فرکانس اول ۳۲ Hz بدست آمده است؛ که با توجه به PSD موتورها در محدوده خطرناکی از طراحی واقع است. عضوهای نازک با عضوهای ضخیم‌تر تعویض شده و محاسبات مجدداً تکرار شده است. فرکانس اول طرح دوم ۱۳۰ Hz محاسبه شده، شکل (۱۲) و تا حدی مطلوب به نظر می‌رسد. اما بزرگترین مشکل این طرح این است که نقطه بحرانی مود اول در محل اتصال لودسل‌ها اتفاق می‌افتد و نکته دوم ازدیاد بیش از اندازه وزن است که امتیاز متحرک بودن^{۱۶} آن را از بین می‌برد.

مدل تراست استند:



ترتیب فرکانس طبیعی سازه به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (۳)$$

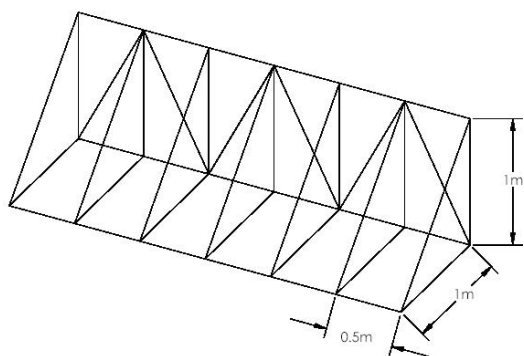
در شرایط عملی، ضریب ارتجاعی سازه را می‌توان با استفاده از روش تاونگینگ^{۱۴} محاسبه کرد [۱۴]. همانگونه که در رابطه (۳) نیز مشخص است افزایش جرم سازه موجب کاهش فرکانس استند می‌شود. اگر تراست استند همانند شکل (۱۰) به صورت تیر یک سر گیردار فرض شود، فرکانس طبیعی سازه عبارت است از:

$$f_n = \frac{1}{4L} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (۴)$$

حال اگر طول سازه یعنی طول تیر یک سر گیردار دو برابر شود فرکانس طبیعی سازه طبق روابط نصف می‌شود. این اتفاق بدین معنی است که افزایش طول استند فرکانس طبیعی آن را کاهش می‌دهد. بزرگتر شدن اندازه موتورها، فرکانس طبیعی سازه را از چند جهت تحت تأثیر قرار می‌دهد. با بزرگ شدن طول موتور تراست استند نیز بزرگتر می‌شود. این امر به تناسب طول افزوده موجب کاهش فرکانس‌های طبیعی سازه می‌شود. از طرف دیگر بزرگ شدن موتور به معنی ازدیاد جرم آن است. افزایش جرم همانگونه که در جدول (۱) نشان داده شده است موجب کاهش پاسخ دینامیکی خود موتور می‌شود.

موضوع دیگری که در ارتباط با افزایش جرم و اندازه موتورها مطرح می‌شود این است که موتورهای با تراست بالا و جرم زیاد به طور معمول فرکانس‌های تحریک کمتری نسبت به موتورهای کوچکتر دارند. یعنی با افزایش جرم موتور میزان اینرسی موتور افزایش یافته، موجب کاهش فرکانس‌های تحریک در هنگام احتراق می‌شود. پس اگر چه افزایش جرم موجب کاهش فرکانس‌های طبیعی موتور می‌شود اما از طرف دیگر فرکانس‌های تحریک را کاهش می‌دهد،

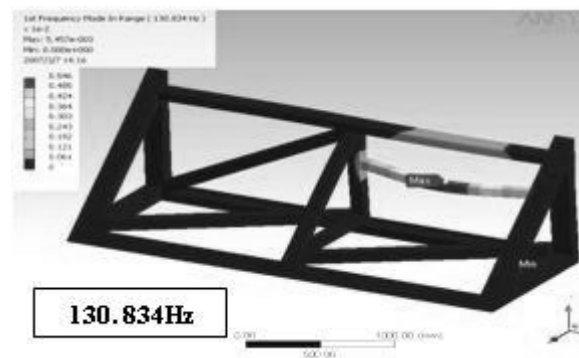
در طرح پنجم چند راهکار همزمان در طراحی بکار رفته است. تعداد دهانه‌های سازه افزوده شده است، تا اعضا کوتاه‌تر شوند. همچنین تمامی دهانه‌ها با استفاده از عضوهای مایل تقویت شده اند. اما افزایش تعداد اعضاء موجب افزایش وزن سازه شده است که همانگونه که توضیح داده شد مشکلاتی بوجود می‌آورد. برای رفع این مشکل و همچنین به منظور یافتن بهترین سطح مقطع، طرح پنجم شکل (۱۳) ثابت نگاه داشته شده و با تغییر سطح مقطع محاسبات مجدداً تکرار شده است. نتایج آن در جدول (۳) نشان داده شده است.



شکل (۱۳): طرح پنجم سازه تستر، ترسیم شده در نرم‌افزار ANSYS



شکل (۱۱): نتیجه تحلیل مودال طرح اول



شکل (۱۲): نتیجه تحلیل مودال طرح دوم.

جدول (۳): نتایج آنالیز مودال طرح پنجم و وزن سازه با تغییر سطح مقطع

ردیف	وزن مقطع	مقطع (mm)	ضخامت	اول فرکانس (Hz)	وزن سازه (Kg)
1	دایره ای	D=50	-	95.522	609.994
2	چهارگوش	50*50	-	110.21	776.356
3	قوطی	80*40	5mm	131.21	335.4967
4	Lbeam 140(B)	h=140, b=66, t=8.6	5.7mm	128.79	566.423
5	Lbeam 160(B)	h=160, b=74, t=9.5	6.3mm	143.02	709.019
6	Lbeam 180(B)	h=180, b=82, t=10.4	6.9mm	156.55	867.459
7	لوله ۸۰	Dout=80	6mm	196.465	431.749
8	لوله ۱۰۰	Dout=100	5.5mm	233.392	507.008
9	لوله ۱۲۰	Dout=120	4mm	254.597	451.554
10	لوله ۱۶۰	Dout=160	6mm	281.49	896.235
11	لوله ۲۰۰	Dout=200	5.5mm	306.7	1037.42
12	لوله ۲۴۰	Dout=240	4mm	332.39	915.389

با نگاهی به این دو نتیجه، طرح سوم طراحی گردید. سعی شد در این طرح از عضوهای کوتاه و مایل استفاده شود. در این مدل سازه خرپا متشکل از سه تیر مکعبی توپر و قاب‌های مثلثی با سطح مقطع دایره توپر و یک نگهدارنده مکعبی که بین دو خرپا قرار دارد، می‌باشد. فقط در سه تیر اصلی از مقطع مربع توپر استفاده گردید و بقیه سازه از مقطع دایره‌ای توپر استفاده شد که این امر باعث افزایش وزن سازه، حدود ۲۹۵۳/۵۲ کیلوگرم و بهبود فرکانس طبیعی سازه گردید. با تحلیل فرکانسی که روی این سازه صورت گرفت اولین مود فرکانسی این مجموعه در حدود ۱۳۷/۷۰۶ Hz قرار گرفت. بزرگترین مشکل طرح‌های پیشین میله‌های رابط و اتصالات هستند، که مودهای ارتعاشاتی درون آنها اتفاق می‌افتد. لذا با تقویت این میله‌ها می‌توان فرکانس‌های سازه را بالا برد. با اصلاح مجدد طرح، محاسبات، دو بار دیگر تکرار شده است. نتیجه دو طرح آخر مطلوب بوده است اما وزن سازه به دلایل اقتصادی و عدم قابلیت جایجایی بسیار زیاد است. نتایج هر پنج مرحله در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول (۲): نتایج آنالیز مودال و وزن ۵ طرح اول

طرح	اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم
فرکانس اول (Hz)	۳۲	۱۳۰	۱۳۷	۱۴۷	۱۸۰
وزن سازه (Kg)	۸۵۱	۲۲۶۲	۲۹۵۳	۲۹۹۷	۳۲۲۲

در شکل (۱۴) طرح نهایی سازه تستر خرپایی به همراه میله‌های استرات به صورت شماتیک نشان داده شده است. پایه‌های سازه درون بتن قرار داده شده است. بتن طراحی شده توسط ترکیبات

آلیاژی با مدول الاستیسیته بزرگتری استفاده کرد تا پاسخ دینامیکی سازه ارتقاء یابد.

۷- نتیجه گیری

نمودارهای PSD استخراج شده از ۳ نوع موتور، نشان می‌دهد ارتعاشات موتورهای سوخت جامد اغلب در فرکانس‌های پایین قدرت تحریک بالاتری نسبت به فرکانس‌های بالاتر دارند لذا افزایش هر چه بیشتر فرکانس‌های طبیعی تستر، سازه را در مقابل ارتعاشات موتور ایمن می‌کند.

سازه تستری مناسب‌تر است که فرکانس‌های طبیعی بالاتر و یا فرکانس‌هایی دور از فرکانس‌های تحریک قوی موتور دارا بوده تا کمترین اثرپذیری از ارتعاشات موتور داشته باشد. این موضوع در طراحی تستر موتورهای کوچکتر الزام بیشتری دارد.

بطور کلی می‌توان نتایج را به صورت زیر خلاصه کرد:

- اغلب فرکانس‌های خطرناک موتور در محدوده پایین قرار دارند. لذا افزایش فرکانس‌های طبیعی سازه تستر راهکار مناسبی برای کاهش اثرات موتور است.

- سازه خرپایی یک طرح مناسب برای سازه تستر است. این سازه قابلیت بهبود فرکانسی خوبی دارد.

- افزودن عضوهای مایل، کوتاهتر شدن طول اعضاء و استفاده از ماده‌ای با مدول الاستیسیته بیشتر سختی کل سازه را افزوده در نتیجه موجب افزایش فرکانس‌های طبیعی سازه می‌شود.

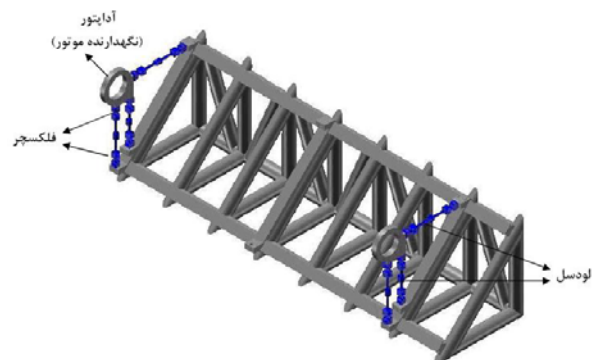
- از میان مقاطع، مقطع لوله مناسب‌ترین مقطع که هم از لحاظ وزن و هم از لحاظ فرکانس مناسب‌تر می‌باشد.

- بر اساس اندازه نیروی تراست موتور نمی‌توان در مورد اثرات ارتعاشی آن اظهار نظر کرد.

۸- مراجع

- [1] NASA SP- 8114, "Solid Rocket Thrust Vector Control", Desember 1974.
- [2] S. S. CHIN, "Missile Configuration Design", Magraw-Hill, 1961.
- [3] L. Eugene Fleeman, "Tactical Missile Design", AIAA, 2001.
- [4] K. C. Wong, "Derivation of The Data Reduction Equations for The Calibration of the Six-component Thrust Stand in the CE-22 Advanced Nozzle Test Facility", NASA TM-2003-212326, 2003.

خاص [۲۱] مقاومت کششی آن افزایش یافته، تا از اثرات مخرب ارتعاشات مصون بماند. بتن به شیوه خاص مسلح شده و از انجام هرگونه عملیات جوشکاری پرهیز شده است.



شکل (۱۴): طرح نهایی سازه تستر شش مولفه مدل خرپایی

۶- بحث بر روی نتایج

هر چه PSD تحریک موتور در فرکانس‌های طبیعی سازه بخصوص در فرکانس‌های ابتدایی سازه بالاتر باشد میزان خطا افزوده می‌شود. با توجه به نمودارهای PSD موتورهای مدنظر، سازه تستر این دسته از موتورها باید حداقل فرکانس طبیعی ۱۵۰ Hz داشته باشد تا از اثرات ارتعاشات موتور کمتر اثر پذیرفته و در نتیجه خطای اندازه‌گیری حداقل شود. شایان ذکر است، PSD بعضی موتورها در فرکانس‌های بالا نیز ناگهان یک قله پیدا می‌کند که طراح استند باید فرکانس اول سازه را از آن دور نگه دارد. این قله که در شکل (۵) برای موتور شماره ۲ نمایش داده شده است در منحنی‌های PSD بدست آمده از تست‌های این نوع موتور همواره در محدوده فرکانسی ۹۸۰-۹۹۵ Hz می‌باشد. از تشابه این منحنی‌ها می‌توان به کیفیت ساخت پی برد و همچنین می‌توان با درصد احتمال بالایی رفتار یکی از آنها را به کل آنها، تعمیم داد. در موتورهای کوچکتر نسبت به موتورهای سنگین، به نسبت نیروی تراست رفتار ناآرامتری در منحنی PSD آنها دیده می‌شود. از میان انواع تسترهای ارائه شده، سازه خرپایی یکی از معدود طرح‌هایی است که قابلیت ارتقاء پاسخ دینامیکی بالایی دارد. در طرح‌های بهبود یافته این سازه، به دلیل اینکه فرکانس‌های طبیعی با نسبت سختی به جرم رابطه مستقیم دارند، با کم کردن جرم، بطور مثال استفاده از انواع مقاطع لوله (جدول ۳) پاسخ دینامیکی سازه افزایش می‌یابد. استفاده از عضوهای مایل و کوتاه کردن اعضا نیز موجب سخت‌تر شدن سازه و افزایش فرکانس‌های طبیعی سازه می‌شود. نکته دیگر اینکه در محاسبات، فولاد معمولی در نظر گرفته شده است که می‌توان به جای آن از

- [13] Z. N. Brimhall, J. P. Atkinson, D. R. Kirk, and H. G. Peebles, "Design of a Novel Six Degree of Freedom Solid Rocket Motor Test Stand", Florida Institute of Technology, Melbourne, FL, 32901, AIAA 2007-5331.
- [14] D. P. Ankeney, C. E. Woods, "Design Criteria for Large Accurate Solid-Propellant Static Thrust Stands", U. S. Naval Ordnance Test Station, China Lake, California, June 1963.
- [15] Dave S. Steinberg, "Vibration Analysis for Electronic Equipment", John Willy & Sons, inc., Third Edition, 2000.
- [16] R. McAmis, "An Analysis Tool for Assessing Dynamic Response of a Rocket Motor", Sverdrup Technology, Inc. Arnold Air Force Base, Tennessee, AIAA-91-2424.
- [17] S. M. Kay, "Modern Spectral Estimation: Theory and Application. Englewood Cliffs", NJ: Prentice-Hall, 1988.
- [18] S. L. Marple, Jr., Digital Spectral Analysis with Applications. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1987.
- [19] "Rocket Motor Test Facilities for Static Firing of Solid Rocket Motors", Propex Research and Engineering.
- [20] <http://www.ormondinc.com>
- [21] <http://www.concredamp.com>
- [5] Nasa Space Vehicle Design Criteria, "Captive-Fired Testing of Solid Rocket Motors", Nasa Sp-8041, March 1971.
- [6] www.floridaspaceauthority.com, "Request for Proposal for A Rocket Motor Test Stand", Florida Space Authority, March 27, 2006.
- [7] D. E. Newland, "Random Vibrations and Spectral Analysis", McGraw-Hill Publisher, First Edition 1969.
- [8] J. Spurling, R. Bustamante, S. Kim, N. Sarigul-Klijin and N. McGuire, "Design and Development of a Vertical Test Stand for Hybrid Propulsion Acoustic Signature Measurements", AIAA 4409, 2006.
- [9] A.J. Couvillion, N.G. Tinling, "Testing and Analysis of a Thrust Stand System", Technical Report NO.AFRPL-TR-66-343, 1966.
- [10] A. Arnold, "The Feasibility of a Closed Loop Multiple Component Rocket Thrust Stand", AEDC-TR-68-164 1968.
- [11] H. A. Jessup, "Methods of Improving Frequency Response of Solid Propellant Rocket Motor Thrust Stands", CPIA No. 182, Bulletin of the 6th Meeting, Solid Propellant Rocket Static Test Working Group, pp. 17-30, Oct. 1968.
- [12] R. B. Runyan, J. P. Rynd, Jr., and J. F. Seely, "Thrust Stand Design Principles", AEDC Group, Arnold Air Force Base, Tennessee, AIAA-92-3976.