فصلنامه پژوهش در علوم، مهندسی و فناوری
دوره ۸، شماره ۱، بهار ۱۴۰۱
صفحات ۹۲-۱۰۳
ISSN: 2476-5082
www.uctjournals.com

تحلیل دینامیکی سازه‌ی موشک هدایت‌شونده

فاطمه طیبی
کارشناسی ارشد، گروه شیمی فیزیک، دانشگاه پیام نور تهران شرق، تهران، ایران
Fatemetayebi72@chmail.ir

چکیده
در این مقاله معتبرسازی مدل، بوسیله کنترل همگرایی در ساخت ماتریس جرم و سختی و کنترل شکل مودها و مقادیر وژه بدست آمده از طریق المان محدود و روش تجربی، پیشنهاد داده شده تا به ترتیب خطاهای گسسته سازی و خطاهای پیکربندی در مدل المان محدود به حداقل برسد. در این مقاله توجه خاصی به تعیین مشخصات دینامیکی اتصالات با استفاده از داده های تجربی و بهینه سازی در یک موشک تاکتیکی را مدنظر داشته است. از این مدل معتبر شده می توان جهت تحلیل دینامیکی سازه استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: موشک، دینامیک، هدایت‌شونده

مقدمه

تکنیک المان محدود (FE) و معتبر سازی مدل استفاده از مدل المان محدود جهت پیش بینی خواص دینامیکی سازه ها در صنایع مکانیک مدرن بیشتر و بیشتر اهمیت یافته است، مثلا در صنایع هوافضا هرگاه هدف یک طراحی جدید یا اصلاح یک طرح، مد نظر باشد، بایستی قبل از اینکه سازه تکمیل گردد، خواص دینامیکی سازه محصول (فرکانس طبیعی، شکل مود و ضریب استهلاک) امتحان شود تا با مقادیر مد نظر از طرف صنعت مطابقت داشته و در زمان عملکرد با مشکلی مواجه نگردد (۱).

روش معمول ارزیابی خواص دینامیکی یک سازه، انجام یک سری آزمایشهای دینامیکی روی نمونه های پیش تولید محصول میباشد. تا زمانی که نتایج تجربی نشان دهد نمونه پیش تولید میتواند مشخصات مربوطه را برآورده سازد، محصول طراحی مجدد خواهد داشت و حلقه طراحی - آزمایش ادامه خواهد داشت. در این حلقه طراحی - آزمایش - طراحی مجدد، زمان و هزینه زیادی روی ساخت نمونه و انجام آزمایش صرف میگردد. با رشد توانایی تکنیک های کامپیوتری و قدرت رقابت بین شرکتها، از پیش بینی های مدل المان محدود بیشتر و بیشتر به جای داده های آزمایش دینامیکی تجربی استفاده میشود. از این گذشته تکنیک مدل سازی المان محدود ممکن است جهت پیش بینی پاسخ دینامیکی سازه ها در شرایط خارج از محدوده عملکرد بکار رود. چون آزمایش تجربی موارد فوق کاری بسیار مشکل و یا غیر ممکن می باشد. شبیه سازی این شرایط به دقت مدل المان محدود و همچنین به معتبر بودن مدل بستگی دارد (۲).

تعریف مدل المان محدود معتبر، وابسته به روند ساخت مدل المان محدود می باشد. رفتار دینامیکی مدل معتبر باید تشابه قابل قبولی با رفتار سازه حقیقی مد نظر داشته باشد. معمولا برای شبیه سازی یک سازه ابتدا یک مدل ابتدایی بنا میگردد که پس از بهینه سازی و معتبر شدن، مدل باید قابلیت پیش بینی رفتار دینامیکی سازه را در محدوده ای که در فرآیند معتبر سازی از آن داده های تجربی استفاده شده است را داشته باشد. همچنین این مدل بایستی بتواند خواص دینامیکی سازه را در خارج از محدوده ای که آزمایش انجام شده است را پیش بینی نماید (البته با دقتی خاص).

اختلاف بین پیش بینی مدل با داده های تجربی

بطور معمول، نمیتوان تضمین کرد خواص دینامیکی حاصل از مدل المان محدود اولیه یک سازه صنعتی دقتی قابل قبول داشته باشد و مستقیما جایگزین داده های تجربی گردد. معمولا اختلافهایی بین پیش بینی های مدل و داده های تجربی حاصل از آزمایش وجود دارد. در اندازه داده های تجربی از سازه حقیقی بعضی از خطاها ناشی از اغتشاش میباشد ولی اغلب اختلافها به علت بی دقتی در مدلسازی میباشند. به همین دلیل باید مدل المان محدود مورد ارزیابی قرار گیرد تا صحت پیش بینی آن مورد ارزیابی قرار گیرد.

سه نوع خطا می تواند در مدلهای المان محدود وجود داشته باشد. این سه نوع خطا میتواند در طی ساخت مدل اتفاق بیافتد. خطاهای مؤثر در استخراج خواص دینامیکی مدل المان محدود بطور خلاصه شده زیر بیان میگردد.

الف) خطای گسسته سازی

مقادیر حاصل از مدل المان محدود گسسته بیشتر یا کمتر از خواص دینامیکی سازه پیوسته میباشد. هر چند زمانی که پیکربندی و متغیرهای مدل درست باشند. مرجع چنین اختلافاتی به خطاهای گسستگی مدل المان محدود بر میگردد. برای بدست آوردن خواص دینامیکی از یک مدل المان محدود هر دو ماتریس جرم و سختی مدل در محاسبه مشارکت مینمایند. بصورت ریاضی می توان بیان کرد، ساختار ماتریس جرم و سختی هر المان از مدل که در معادله حرکت مؤثر باشد برای یک سیستم پیوسته یک علت اصلی ایجاد خطاهای گسستگی میباشد.

ب) خطاهای پیکربندی

نوع المان مورد استفاده در مدل المان محدود، مخصوصا المانهایی که در سازه نقش کلیدی دارند، مثلا اتصالات تأثیر بسزایی در خواص دینامیکی مدل دارند. در فرآیند مدل سازی، بعضی اشکال فیزیکی مجبورند در مدل سازی ساده شوند. برای مثال در بدنه موتور هواپیما یا موشک در مدل سازی معمولی از المان پوسته استفاده میشود، هر چند در بعضی مکانها ضخامت پوسته

مناسب برای مدل سازی با المان پوسته نمیباشد. فلنج های پوسته اغلب بوسیله المان تیر مدل سازی میگردند. بعضی ساده سازی ها تأثیر زیادی روی خواص دینامیکی مدل در محدود فرکانس پایین نمیگذارد اما در محدوده فرکانس بالا تأثیر گذار میباشد، ضمن اگر بعضی قطعات یا قسمتهایی از سازه جزء اشکال "کلیدی سازه باشند و در بعضی از مردها از مدل حذف شده باشند نبایستی انتظار برآورد خواص دینامیکی از این مردها را داشته باشید یا حداقل نمیتوان پیش بینی این مردها را دقیق دانست.

ج) خطای پارامتر ها

چون مدل المان محدود یک مدل ساده شده از سازه میباشد. ممکن است بعضی از پارامتر ها را غیر دقیق نماید. مهندسین بر اساس تجربیاتشان یا از روی تخمین مقدار مناسبی از مقادیر را بکار میبرند. زمانی که مقدار این پارامترها دقیق نباشد خواص دینامیکی حاصل دقیق نخواهد بوده زمانی که مدل تحت پروسه بهینه سازی قرار گیرد و پارامترها غیر دقیق انتخاب شده باشند این فرآیند پارامترها را به مقادیر واقعی سیر میدهد.

در پروسه معتبر سازی مدل، مدل اولیه معمولا دارای سه نوع خطای ذکر شده خواهد بود. تأثیر انواع خطاهای مختلف که در هم آمیخته میشوند باعث میگردد تا فرآیند معتبر سازی مدل، پیچیده تر از حالتی گردد که فقط یک نوع خطا در مدل وجود داشته باشد (۳).

استراتژی معتبر سازی مدل

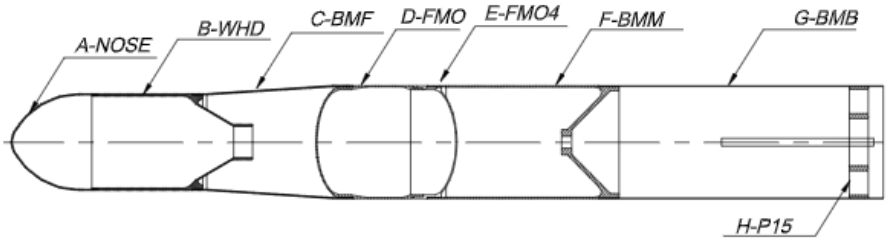
برای محاسبه و تخمین رفتار دینامیکی سازه مورد نظر این مقاله نیاز به مدلسازی مناسب سازه و کنترل مدل توسط آزمایشهای تجربی مودال می باشد در عمل پس از مدلسازی اولیه تک تک قطعات به روش المان محدود، با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش مودال این قطعات، مدلها معتبر می گردند و در مرحله بعد هر دو قطعه متوالی در مدل المان محدود با استفاده از لایه نازک المان به هم متصل می گردند و مشخصات دینامیکی قطعات متصله محاسبه میگردد و به روش تجربی نیز این خواص استخراج میشود از مقایسه نتایج تجربی با نتایج آزمایش آنالیز مودال می توان پارامترهای اتصال بین قطعات را محاسبه نمودا فصل ۳) و بعبارت دیگر اتصالات بین قطعات را شبیه سازی می گردد.در این مرحله هر مدل المان محدود بهینه و معتبر گردیده است. این فرایند تا زمانی ادامه پیدا می کند که کل سازه قدرتی جسم پرنده در مدل المان محدود به هم متصل شده باشد و کلیه اتصالات بوسیله آزمایش آنالیز مودال و بهینه سازی شبیه سازی شده باشند و خواص دینامیکی مدل المان محدود شبیه به خواص دینامیکی حاصل از آزمایش گردد (۴).

مشخصات اجزاء سازه

موشک مورد تحلیل یک موشک سوخت جامد می باشد که طول آن ۱۱۶۳ میلیمتر و قطر آن۵/۱۴۸ میلیمتر و متوسط وزن آن۸۶۵/۱۸ کیلوگرم می باشد قسمتهای سازه قدرتی این موشک ضد زره (شکل ۱) به ترتیب عبارتند از:

کلاهکA ، سرجنگی B بدنه ابتدایی، موتور پروازD ، درپوش موتور پروازE ، بدنه میانی F و بدنه انتهاییG

جهت مدلسازی المان محدود از نرم افزار ANSYS استفاده شده است.



شکل۱- مشخصات اجزاء سازه

زیر سازه بدنه کلاهک

(A-NOSE) دارای ضخامتی در حدود ۳/۱ میلیمتر و حد اکثر قطر آن۴/۱۲۴ میلیمتر می باشد و از جنس آلومینیوم ساخته شده است. جهت مدلسازی قطعه فوق و دوری از خطای پیکربندی از المان پوسته ای با هشت گره استفاده شده است که هر گره دارای شش درجه آزادی می باشد و جرم این قطعه در مدل المان محدود در حدود قطعه اصلی بدست آمده است (۵).

خلاصه نتایج زیر سازه ها

در مدل اولیه المان محدود زیر سازه های بدنه این موشک ضدزره جهت پیش بینی شکل مودها و فرکانسهای طبیعی از روش المان محدود استفاده گردیده فرکانس طبیعی اول، در زیر سازه بدنه انتهایی با ض خامت ۷/۰ میلیمتر کمترین مقدار (۴۹ هرتز) و در زیر سازه بدنه سرجنگی با ضخامت ۳ میلیمتر بیشترین مقدار (۵۷۷ هرتز) را دارا می باشد. تغییرات ضخامت تاثیر زیادی در افزایش و کاهش فرکانس طبیعی زیر سازه ها ایجاد می نماید. شکل مودهای قطعات عموما مشابه استوانه های کوتاه به صورت تغییر شکلهای دو وجهی، سه وجهی و چهار وجهی شدن ظاهر می گردد.

مدلسازی اتصالات سازه ها با المان واسط در تحلیل اتصالات به جای پیچها و پرچها از المانهای واسط استفاده شده است. اولین بار، المانهای واسط توسط گودمن، تیلور" و برک" در تحلیل المان محدود اتصال جرم نوسانی استفاده شد. سپس کلاف و دانسنه برای تحلیل دیوار ساختمان از این المان استفاده کردند (۶).

اینها دو شرط را فرض نمودند:

۱ -بین سطوح کاملا خشن بوده و هیچ لغزشی بین سطوح نیست و یا ۲- بین سطوح کاملا صاف بوده و هیچ تنش برش وجود ندارد. عمدتا دو گروه از المانهای واسط در مدل کردن اتصالات بکار می رود المالهای واسط ضخامت صفر و المانهای واسط لایه نازک المانهای معرفی شده توسط گودمن، تیلور و برک به المانهای اتصال و یا المانهای واسط ضخامت صفر معروف است. این المان دارای چهار گره با ضخامت صفر میباشد که در شکل (۱-۳۷) نشان داده شده است.

أماده سازی سازه

یکی از مقدمات لازم برای انجام آزمایش مودال آماده سازی سازه تحت آزمایش میباشد که عدم دقت و توجه کافی در این مرحله می تواند موجب بی ارزش شدن کل نتایج گردد.

سازه را به دو صورت می توان مورد آزمایش قرار داد : ۱- آزاد ۲- درگیر در نوع آزاد سازه در هیچ نقطه ای دارای اتصال مکانیکی به محیط نخواهد بود و بنابراین بصورت آزاد در فضا معلق است. در این حالت مودهای صلب سازه نیز بدست می آیند. مطابق با تئوری هر سازه شش مود صلب در فرکانس صفر دارد که این مودها به خواص اینرسی و جرم جسم مربوط می شوند. البته در عمل امکان ایجاد یک تکیه گاه کاملا آزاد وجود ندارد ولی می توان با روشهایی به این هدف نزدیک شد.

مثلا می توان جسم را بر روی فوم های خیلی نرم قرار داد و یا بوسیله طنابهای ارتجاعی آن را معلق نمود. در این حالت فرکانس طبیعی تکیه گاه بایستی ۱۰ تا ۲۰ درصد کمتر از فرکانس مود اول خمشی سازه باشد.

ضمنا بهتر است این تکیه گاهها را در نزدیکی محل گره مود مورد نظر نصب کرد. با ایجاد این شرایط میتوان خواص اینرسی و جرم سازه را از رفتار فرکانس های پایین سازه بدست آورد.

در نوع اتصال درگیر برخلاف تئوری که بسادگی با حذف چند درجه آزادی جسم درگیر مدل می شود، در عمل ایجاد شرایط درگیر بصورت کاملا صلب امکان ندارد، زیرا هر اتصالی از قبیل فیکسچرها، پیچها و جوشها و غیره دارای خاصیت ارتجاعی می باشند که آزمایشها نشان می دهند که این خاصیت در نوع اتصال درگیر برخلاف تئوری که بسادگی با حذف چند درجه آزادی جسم درگیر مدل می شود، در عمل ایجاد شرایط درگیر بصورت کاملا صلب امکان ندارد، زیرا هر اتصالی از قبیل فیکسچرها، پیچها و جوشها و غیره دارای خاصیت ارتجاعی می باشند که آزمایشها نشان می دهند که این خاصیت ارتجاعی خواص ارتعاشی اندازه گیری شده را تحت تأثیر قرار می دهد.

بنابراین بهتر است هر جسمی را تا حد امکان در شرایط تکیه گاهی آزاد آزمایش نمود، زیرا از شرایط آزاد میتواند شرایط تکیه گاهی خاص که تعدادی درجات آزادی مقید می شوند را بدست آورد در حالی که عکس این عمل امکان ندارد. اما در مواردی که سازه های خیلی بزرگ مانند اجزاء نیروگاهها و سازه های ساختمانی تست می شود، نمی توان از روش شرایط آزاد استفاده نمود. گاهی استفاده از شرایط تکیه گاهی واقعی مناسبتر است.

سیستم اندازه گیری

اگرچه روش آزمایشی اندازه گیری تحرک مکانیکی با متغیرهای زیادی مرتبط است، ولی اساس سیستم اندازه گیری شامل سه بخش عمده است که عبارتند از :

۱-مکانیزم تحریک

۲-سیستم اندازه گیری پارامترهها

۳-یک تحلیلگر سیستم که اطلاعات مورد نظر را از نتایج اندازه گیری شده استخراج می کند.

مکانیزم تحریک سازه

وسایل مختلفی برای اعمال نیروی تحریک به سازه ها وجود دارد که توابع تحریک مختلفی را ایجاد می کنند. در یک تقسیم بندی اولیه می توان آنها را به دو دسته تحریک کننده های ارتعاشی و چکش ضربه تقسیم نمود. تحریک کننده های ارتعاشی نیز بر اساس مقدار نیرو، محدوده فرکانسی و نوع توابع ارتعاشی دارای سه نوع هستند:

تحریک کننده های مکانیکی (جرمهای دوار خارج از مرکز)

الکترومغناطیسی (کویل متحرک در یک میدان مغناطیسی).

الکتروهیدرولیک.

در حال حاضر بیشتر در سازه های سبک و نیروهای کم از تحریک کننده های الکترومغناطیسی استفاده می شود که از جمله خواص آن امکان تغییر همزمان فرکانس و دامنه تحریک بصورت مستقل از یکدیگر می باشد. امتیاز مهمدیگر آن امکان ایجاد توابع ارتعاشی متنوع که در آزمایش مودال بکار می روند می باشد از جمله:

-امواج سینوسی پله ای

- امواج سینوسی جارویی

- امواج اتفاقی

-امواج شبه اتفاقی

-امواج ضربه ای متناوب

نصب تحریک کننده های و اتصال آن به سازه نحوه قرار دادن تحریک کننده باید به گونه ای باشد که نروی عکس العمل ناشی از اعمال نیروی آن به سازه منتقل نشود (۷).

سنسورهای اندازه گیری

اندازه گیری دو پارامتر نیرو و پاسخ در فرآیند آزمایش مودال ضروری است.

اندازه گیری نیرو

نیروی تحریک معمولا بوسیله یک مبدل نیروی پیزوالکتریک اندازه گیری می شود. از محاسن مبدلهای پیزوالکتریک، خطی بودن و وسعت گستره دینامیکی آنها می باشد نیروی تولید شده در تحریک کننده باید تمامی قطعات از جمله سیم پیچ تحریک کننده، مکانیزم اتصال سازه و ... را به جنبش در آورد.

لذا اندازه گیری نیرویی که فقط صرف به تحریک واداشتن سازه می شود، تنها بوسیله مبدلی امکان پذیر است که مستقیما به سازه متصل باشد.

نصب شتابسنج ها

پس از انتخاب شتابسنج مناسب و محل نصب و نحوه نصب نیز از اهمیت خاصی برخوردار است. از آنجاییکه سیستم های مکانیکی می توانند رفتار پیچیده ای داشته باشند و تحت اثر تحریک ثابت، در نقاط حتی
نزدیک به یکدیگر طیف فرکانسی و سطح ارتعاشی متفاوتی بدهند، لذا این هنر فرد آزمایش کننده است که تصمیم
مقتضی را اتخاذ نماید.

نحوه نصب شتابسنج ها بر روی سازه می تواند با توجه به سهولت انجام آزمایش، محدوده فرکانسی، امکان انجام کار مکانیکی بر روی سازه و غیره انتخاب شود. روشهای نصب به ترتیب وسیع تر بودن محدوده فرکانسی به شرح زیر هستند.

نصب شتابسنج توسط پیچ بی سر نصب شتابسنج توسط موم.

نصب شتابسنج توسط واشر فلزی و چسباندن دو طرف آن.

نصب شتابسنج توسط آهنربا.

نگهداشتن شتابسنج بوسیله دست در محل اندازه گیری

روشهای تحلیل و استخراج پارامترهای مودال

همینکه مرحله اندازه گیری آزمایش مودال به پایان برسد، با حجم زیادی از منحنی های اندازه گیری شده روبرو می‌شویم که باید این اطلاعات خام به پارامترهای توصیف کننده خواص سازه فرکانسهای طبیعی، ضرایب میرایی و شکل مودها تبدیل شود. در واقع مرحله تحلیل مودال بخشی از آزمایش مودال است که خواص مودال مدل، از اطلاعات اندازه گیری شده استخراج می گردد. در روش تحلیلی دینامیک سازه نیز به مرحله استخراج خواص مودال از ماتریسهای سفتی و جرم، به شکل مقادیر ویژه و بردارهای ویژه نیز تحلیل مودال می گویند، با این تفاوت که در روش تجربی خواص سازه از توابع اندازه گیری شده استخراج می گردد، در حالیکه در روش تحلیلی، این خواص از ماتریسهای جرم و سفتی استخراج می گردد (۸).

روشهای مختلفی برای انجام تحلیل مودال وجود دارد و بسته به اینکه اطلاعات اندازه گیری شده در حوزه زمان و یا در حوزه فرکانس مورد استفاده قرار گیرند، روشهای مختلفی برای استخراج پارامترهای مودال وجود دارد. در حوزه فرکانس برای تحلیل مودال از توابع FRF استفاده می شود، در حالیکه در حوزه زمان تحلیل بر روی توابع پاسخ ضربه (IRF) انجام می شود. ولی روشهایی نیز وجود دارد که برای تحلیل مودال از اطلاعات خام ثبت زمان امواج بدون انجام عملیاتهای مختلف از قبیل متوسط گیری و غیره استفاده می شود. چون در اکثر موارد عملی از روشهای تحلیل مودال در حوزه فرکانس استفاده می شود، لذا در این فصل روشهای مختلف تحلیل توابعFRF مورد بررسی قرار می گیرد. صرف نظر از روش مورد استفاده، روند کلی تحلیل مودال بصورت زیر می باشد:

۱. اطلاعات اندازه گیری شده در شکل گرافیکی مناسب (مانند نمودار مدول FRF برحسب زمان مورد استفاده قرار می گیرد.
۲. بسته به فرم مدل ریاضی فرض شده برای بیان ساختار آزمایش، یک فرمول تئوری برای بیان تابع انتخاب می شود که ضرایب آن در این مرحله مجهول می باشد.
۳. با انجام یک فرآیند برازش منحنی بر روی تعدادی از نقاط منحنی FRF ، با در نظر گرفتن حداقل مربعات بین نقاط اصلی و نقاط تئوری بازسازی شده، مجموعه ای از ضرایب برای فرمول تئوری بدست می آید.
۴. سرانجام ضرایب بدست آمده به پارامترهای مودال مورد نیاز تبدیل می شوند (۹).

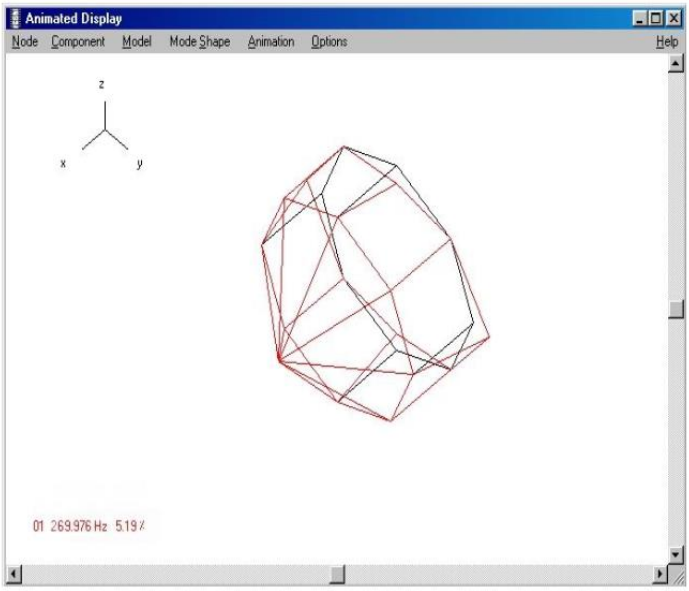
در هر دو حالت حوزه زمان و حوزه فرکانس دو منحنی وجود دارد، یکی از اطلاعات اندازه گیری شده و دیگری از فرمول تئوری. مقادیری از ضرایب فرمول تئوری که حداقل اختلاف بین این دو منحنی را بوجود می آورند، برای بدست آوردن پارامترهای مودال مورد استفاده قرار می گیرد.

فرضیات و ساده سازی - خطی بودن : یکی از فرضیات اصلی در تحلیل مودال، اینستکه سازه مورد آزمایش در گستره فرکانسی مورد نظر رفتار خطی دارد و هر رفتار غیر خطی سازه باعث بروز اختلاف بین رفتار واقعی سازه و رفتار فرض شده می گردد. -

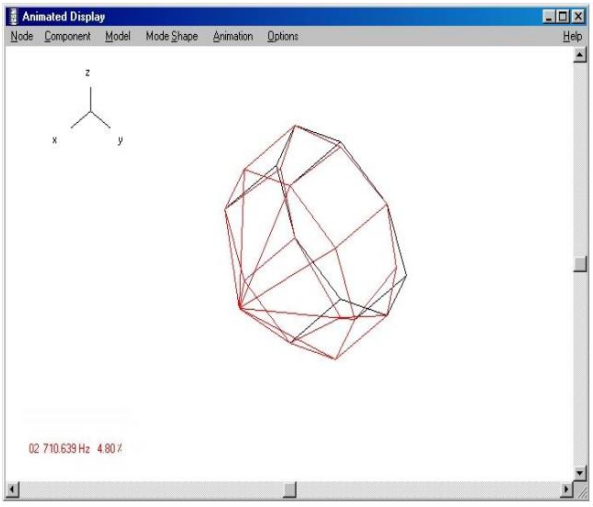
مدل میرایی : یکی از عواملی که باعث ایجاد اختلاف بین تئوری و واقعیت می شود، میرایی است. اکثر الگوریتم های تحلیل مودال از میرایی ویسکوز استفاده می کنند ولی در برخی موارد از میرایی سازه ای نیز استفاده می‌شود (۱۰).
در تحلیل مودال از میرایی ویسکوز استفاده می کنند ولی در برخی موارد از میرایی سازه ای نیز استفاده می شود.
- قابلیت تحریک مودها : (Observability) در تحلیل مودال فرض می شود، سنسورها در نقاطی واقع شده اند که تمام مردها را مشاهده می کنند، یعنی در نقاطی قرار گرفته اند که در تمام مودها پاسخی را نشان می دهند. در نتیجه قبل از اینکه نتایج تحلیل مودال تأیید شود باید از مناسب بودن نقاط نصب سنسور اطمینان حاصل نمود.
روند تحلیل مودال
استراتژی تحلیل مودال به صورت زیر تقسیم بندی می شود:
۱ -تحلیل یک درجه آزادی SDOF (استخراج یک مود) یا تحلیل چند درجه آزادی MDF استخراج چند مود بطور همزمان)
۲- روش یک ورودی - یک خروجی) SISO تحلیل تنها یک منحنی FRF یا (IRF یا روش یک ورودی - چند خروجی) SIMOتحلیل همزمان مجموعه ای از FRP های بدست آمده از یک نقطه تحریک و چند نقطه پاسخ) یا روش چند ورودی - چند خروجی) MIMO تحلیل همزمان مجموعه ای از FRF های بدست آمده از چند نقطه تحریک و چند نقطه پاسخ) (۱۱).
تمام تقسیم بندی های بالا در نرم افزاهای تحلیل مودال تجاری وجود داشته و انتخاب روش مناسب از پیچیدگی های تحلیل بشمار می رود.
روشهای تحلیل SDOF یا MDOF
انتخاب روش SDOF یا MDOF به معنی آن نیست که سازه تنها دارای یک درجه آزادی یا چند درجه آزادی است بلکه بیانگر تعداد مودهایی است که بطور همزمان تحلیل می شود. در روش تحلیل SD0F با متمرکز شدن در یک ناحیه اطراف یک نقطه رزونانس، مود مربوطه استخراج می شود و تمام مودها به همین روش یکی یکی استخراج می گردد. از طرفی در روش MDF همان اطلاعات مودها تنها با انجام یک تحلیل و انتخاب گستره فرکانسی مورد نیاز، استخراج می گردد (۱۲).
روشSDOF
برازش منحنی در این روش بر روی مجموعه کوچکی از اطلاعات FRF اندازه گیری شده انجام می شود که این مجموعه حدود ۲۰ نقطه اطراف نقطه رزونانس مود مورد نظر را شامل می شود. فرمولی که برازش منحنی در این روش استفاده می کند تنها یک مود را شامل می شود و مودهایی که فرکانس طبیعی آنها خارج از رنج فرکانسی انتخاب شده است را شامل نمی شود و تنها ضرایب جبرانی برای مردهای دیگر که در این حالت هنوز پیدا نشده اند، در نظر گرفته می شود. بنابراین این روش برای حالتی استفاده می شود که مردها به اصطلاح کاملا مجزا شده باشند.
از مزایای استفاده از این روش، یکی سادگی استفاده از آن و دیگری قابلیت مقایسه اطلاعات اندازه گیری شده با تئوری می باشد.
از اشکالات روش مزبور اینستکه چون در گستره فرکانسی کوچک انتخاب شده تنها یک مود فرض می شود، اثر مودهای دیگر تنها با ضرایب جبران ساده دخالت داده می شود که در برخی کاربردها فرض ساده شونده مناسبی نمی‌باشد.
روشMIDOF
از نقطه نظر محاسباتی، این روش کار آمدتر است زیرا تحلیل کامل منحنی داده شده، در یک قدم انجام میشود، یعنی پارامترهای تمام مودهای مورد نظر به طور همزمان در یک تحلیل استخراج می گردد. با وجود مزایای بسیار از قبیل صرف زمان و نیروی انسانی کمتر، بدلیل وجود محدودیتهای بسیار، بایستی در انتخاب یکی از روشهای ذکر شده دقت نمود.
اغلب در شرایطی که گستره فرکانسی دارای وسعت زیادی باشد یعنی نسبت فرکانس بالا به فرکانس پایین بیشتر از۱۰ باشد مشکلاتی در پایداری جوابها ایجاد می شود (۱۳).
مشکل دیگری که در بکار بردن روش

MDFپیش می آید تعیین دقیق تعداد مودها در گستره فرکانسی مورد نظر می باشد. گاهی با انتخاب یک نقطه تحریک، مودهای بسیار ضعیفی در منحنی FRF ظاهر می شود که وجود مود در آن فرکانس ابهام انگیز است. در مواقعی نیز وجود اغتشاش باعث می شود قسمتهایی از منحنی به عنوان مودهای ضعیفی در نظر گرفته شود که در هر دو حالت مشکل تعیین دقیق تعداد مودها وجود دارد (۱۴).

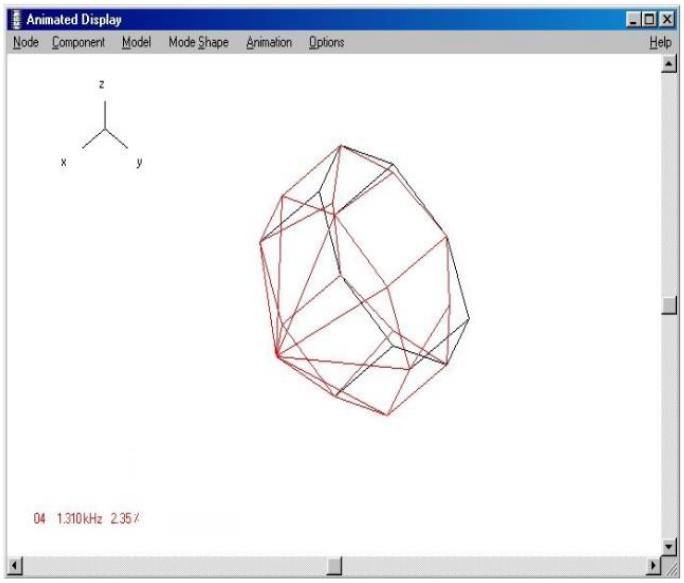
مشخصه دینامیکی زیرسازه کلاهک



شکل۲- شکل مود اول زیرسازه کلاهک در فرکانس طبیعی ۲۷۰ هرتز



شکل۳- شکل مود دوم زیرسازه کلاهک در فرکانس طبیعی ۷۱۰/۶هرتز

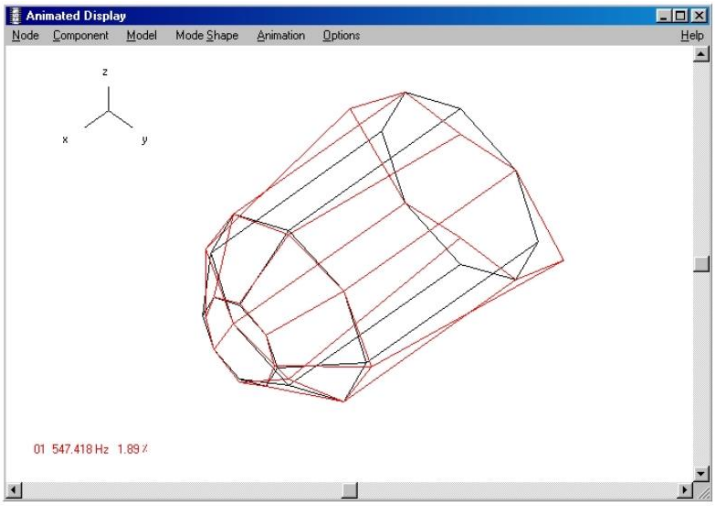


شکل۴- شکل مود سوم زیرسازه کلاهک در فرکانس طبیعی ۱۳۱۰هرتز

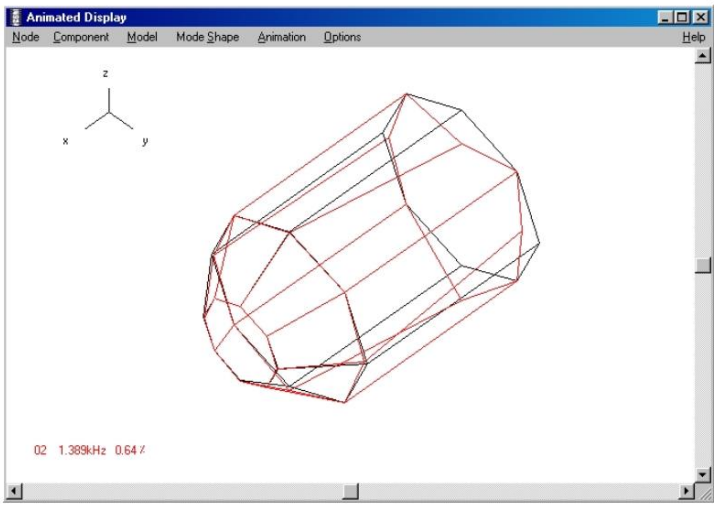
خلاصه‌ی نتایج در جدول زیر آمده‌است:

جدول ۱- خلاصه‌ی نتایج آزمایش مودال روی زیرسازه‌ی بدنه‌ی کلاهک

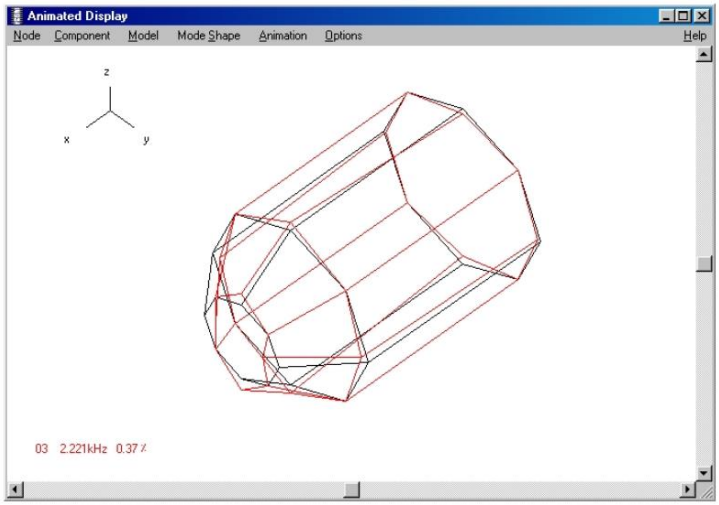
ضریب استهلاک ٪	فرکانس طبیعی (هرتز)	مود
۵/۱۹	۲۷۰	۱
۴/۸	۷۱۰/۶	۲
۲/۳۵	۱۳۱۰	۳



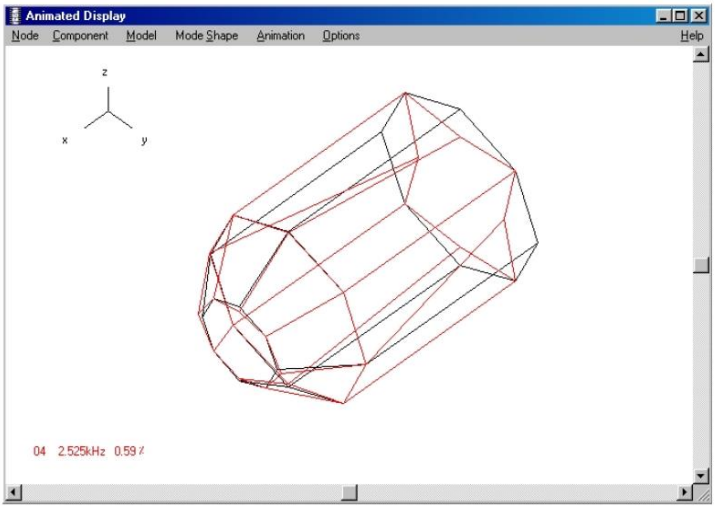
شکل۵ – شکل مود اول زیرسازه جنگی در فرکانس طبیعی ۱۳۸۹ هرتز



شکل۶ – شکل مود دوم زیرسازه جنگی در فرکانس طبیعی ۱۳۸۹ هرتز



شکل۷ – شکل مود سوم زیرسازه جنگی در فرکانس طبیعی ۲۲۳۱ هرتز



شکل۸ – شکل مود چهارم زیرسازه جنگی در فرکانس طبیعی ۲۵۲۵ هرتز

خلاصه‌ی نتایج در جدول زیر آمده‌است:

جدول ۲- خلاصه‌ی نتایج آزمایش مودال روی زیرسازه‌ی جنگی

مود	فرکانس طبیعی (هرتز)	ضریب استهلاک ٪
۱	۵۴۷/۴	۱/۸۹
۲	۱۳۸۴	۰/۵۴
۳	۲۲۲۱	۰/۲۷
۴	۲۵۲۵	۰/۵۹

بحث و نتیجه گیری

در مقایسه کلی بین نتایج حاصل از تحلیل مدل اولیه المان محدود سازه ها با دادهای آزمایش مودال تفاوتی بین ۲ الی ۱۸ درصد مشاهده گردیده است. لذا لزوم آزمایش مودال و استفاده از نتایج حاصل از مدل المان محدود بخوبی مشاهده شده است. در کلیه زیر سازه ها جهت کاهش پارامتر خطا، تغییر پارامتر ضخامت از حساسیت نسبتا بالایی برخوردار بوده و تغییر در پارامترهای خواص مکانیکی (مانند مدول الاستیسیته و دانسیته و ضریب پواسن و ...) از اهمیت کمتری برخوردار می باشد، این تغییرات کلا در تغییر شکل مودها تاثیر چندانی نگذاشته است.

زمانی که اتصال زیر سازه هادر مدل المان محدود به صورتی merge کردن شبیه سازی گردد، سازه سختی بالاتری از خود نشان می دهد و نتیجتا فرکانسهای طبیعی مقدار بالاتری نسبت به واقعیت خواهند داشت. در شبیه سازی اتصالات با لایه نازک المان (طی فرآیند بهینه سازی جهت محاسبه مقادیر مدول الاستیسیته لایه واسط)، مقادیر فرکانسهای طبیعی در حد امکان با مقادیر آزمایش مودال همخوانی پیدا کرده اند.

در شبیه سازی اتصالات عموما، مرتبه بزرگی مدول الاستیسیته لایه واسا حدود دو الی چهار مرتبه از مدول الاستیسیته سازه های مجاور این لایه کمتر می باشد. لذا پیشنهاد می گردد در مدلسازی اوله المان محدود اتصالات به روش لایه نازک در ابتدا مقدار مدول الاستیسیته دو الی چهار مرتبه کمتر از مدول سازه های مجاور در نظر گرفته شود تا نتایج حاصل از مدل سازی اولیه دارای خطای کمتری نسبت به مدل واقعی داشته باشد.

منابع

1. Goodman, R. E., Taylor, R.L., and Brekke, T. L., "A model for the mechanics of jointed rock", Journal of the soil mechanics and foundations division, ASCE, 94, 637-659, 2018.
2. Heuze, F.E., and Barbour, T. G., "New models for rock joints and interfaces", ASCE Journal of the geotechnical engineering division, 108, 757- 776, 2019
3. Beer, G., "An isoparametric joint/interface element for finite element analysis", International journal for Eddy Dascotte & Armin Schonrock, Validation and Updating of an Aeroengine FE model Based on Static Stiffness Testing, 2020
4. Ralph D. Buehrle, Gary, A Fleming, Finite Element Model Development and Validation for Aircraft Fuselage Structure, 2019.
5. Les Goldberg, Comparison of The Analytical and Experimental Mode of a Model Airoplane Using Finite Element Analysis and Multi- Reference Testing, 2017.
6. Wong, P.C., Kulhawy, F.H., and Ingraffea, A. R., "Numerical modeling of interface behavior for drilled shaft foundations under generalized loading",
7. Foundation engineering current principles and practice, ASCE geotechnical special publication, 22, 565-579, 2019.
8. Matsui, T., and San, K.C., "An elastoplastic joint element with its application to reinforced slope cutting", Soils and foundations 29(3), 95-104,2019.

9. K. O. Kim, J. M. Lee, J. H. Kim, S. J. Kim, A Study on the Dynamic Characteristics of Rocket Structure, 2020
10. E. L. Marek, T. G. Cane, G. H. James R. L. Mayes, STARS Missile – Comparison of Pre-Flight Predictions From Test-Reconciled Models to Actual Flight Data, 2020
11. D.j. Ewins, Adjustment or Updating of Models, 2000 H. Ahmadian, M. Ebrahimi, J. E. Motetershead, M. I. Friswell, Identification of Bolted-joint Interface Models, 2020
12. Charles. W. Engelhardt, David L. Hunt, Carig F. Chang, Don Mason, Evaluation of Dynamic Responses of the Space Shuttle Rocket Motor Static Firing, 2018.
13. G.H. James, T. G. Came, T. S. Edmunds, STARS Missile – Modal Analysis of First-Flight Data Using the Natural Excitation Technique Next, 2016.
14. D. J. Ewins, Modal Testing: Theory, Practice and aplication, 2017.