http://mechanics.journals.modares.ac.ir

مجله علمی پژوهشی
مهندسی مکانیک مدرس
دوره ۱۲ شماره ۲ تیر ۱۳۹۱ ص‌ص ۱۳۴-۱۴۳

تاریخچه مقاله:
دریافت ۹۰/۵/۱۷
پذیرش ۹۱/۱/۲۲
ارائه در سایت ۹۱/۳/۱۵

بهینه‌سازی ویبروآکوستیکی سازه‌های مکانیکی با استفاده از روش تغییر فرم هندسی و الگوریتم ژنتیک

مصطفی رنجبر[۱*]، اشتفان ماربورگ[۲]

۱- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد پردیس، پردیس
۲- استاد و رئیس انستیتو مکانیک سازه‌های فضایی، دانشگاه مونیخ، آلمان
* تهران، صندوق پستی ۱۶۵۵۵/۱۳۵، Mranjbar@pardisiau.ac.ir

چکیده- این تحقیق در مورد توسعه فناوری پیشرفته و به‌روز دنیا در زمینه کاهش تشعشعات آکوستیکی از سازه‌های مکانیکی با استفاده از روش‌های نوین بهینه‌سازی مهندسی می‌باشد. در این مقاله، یک روش منحصر به فرد ترکیبی متشکل از روش تغییر فرم هندسی سازه با رویکرد یافتن بهترین فرم هندسی سازه، به منظور کاهش سطح تشعشعات صوتی ساطع شده از آن، با کمک روش معروف بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک، توسعه داده شده است. در همین راستا، با در نظر گرفتن یک مدل المان محدود از یک سازه مکانیکی متشکل از یک ورقه مستطیلی‌شکل با ضخامت یکسان و ثابت، که تحت تاثیر سه نیروی هارمونیک به صورت نامتقارن قراردارد، به محاسبه سطح تشعشعات صوتی ساطع‌شده از آن اقدام و سپس فرم بهینه مدل به کمک روش الگوریتم محاسبه شده است.

کلید واژگان: ویبروآکوستیک، الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی، ورقه مستطیلی

Vibroacoustical optimization of mechanical structures using geometry modification concept and genetic algorithm method

M. Ranjbar[1*], St. Marburg[2]

1- Assis. Prof., Mech. Eng., Pardis Branch, Islamic Azad University, Pardis, Iran.
2- Prof., LRT, Institutfür Mechanik, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, Germany.
* P. O. B. 16555/135 Tehran, Mranjbar@pardisiau.ac.ir

Abstract- This paper introduces a new approach for the reduction of sound radiation from the mechanical structures. A combination of genetic algorithm method and geometry modification concept minimizes the root mean square level of structure borne sound for a square plate over a specific frequency range. The structure's local geometry modification values at the selected surface key-points considered as design variables. The model is under three non-symmetric harmonic excitations. An iterative approach is used to develop new modified model until when a termination criterion is reached. The results show that this approach could produce significant reduction in the value of radiated sound power level of the structure.

Keywords: Vibroacoustic, Genetic Algorithm, Optimization, Rectangular Plate

Archive of SID

www.SID.ir

۱- مقدمه

آلودگی صوتی و آزردگی حاصل از آن و مشکلات حاصل از آسیب‌های وارده به قوه شنوایی انسان‌ها به یک مشکل بزرگ در وضعیت فعلی، به‌خصوص در شهرهای بزرگ کشور از جمله تهران، تبدیل شده است. محققان و مهندسان تلاش‌های زیادی انجام داده‌اند تا از مردم و محیط زیست در مقابل این گونه آلودگی‌ها محافظت کنند. به عنوان مثال می‌توان از تصویب قوانین و مقررات زیست‌محیطی جدید، استفاده از وسایل مانع انتشار سروصدا و همین‌طور توسعه و استفاده از فناوری‌های جدید جهت طراحی سازه‌های مکانیکی آرام‌تر نام برد.

در همین راستا، استفاده از فناوری‌های نوین کاهش تشعشعات آکوستیکی سازه‌های مکانیکی می‌تواند بسیار راه‌گشا باشد. به طور کلی، روش‌های کنترل و کاهش نویز و صدا را می‌توان به دو دسته فعال و غیرفعال تقسیم کرد. روش‌های کنترل فعال از سنسورها، کنترل‌کننده‌ها، اضافه کردن جرم‌های متمرکز در نقاط مشخص از سازه و بلندگوهایی که صوت مخالف و خنثی‌کننده صدای مزاحم تولید می‌کنند استفاده می‌کنند. اما، روش‌های اصلی کنترل‌کننده نویز و صدای مزاحم به صورت غیرفعال عبارت‌اند از روش‌هایی که خواص اصلی آکوستیکی سازه را تحت تاثیر خود قرارداده تا با بهینه‌سازی شکل هندسی یا ضخامت اجزای تشکیل‌دهنده محصول در نهایت یک سازه آرام تولید شود.

در این مقاله، از روش کنترل غیرفعال استفاده شده است. مزیت این روش امکان‌پذیر بودن کاربرد آن بدون افزایش وزن سازه و کارایی بهتر می‌باشد. همان‌طور که گفته شد، این روش‌ها می‌توانند در مرحله طراحی یک ماشین یا مولفه‌های آن به‌خصوص در حین شبیه‌سازی با روش‌های المان محدود به‌کار برده شوند. در روش بهینه‌سازی غیرفعال، شکل سازه، به عنوان مثال هندسه آن، به طور خودکار بهینه شده به طوری که بتوان بدون نقض محدودیت‌های مربوط به هدف اصلی دست یافت. در این روش، می‌توان علاوه بر کاهش نویز و صدای مزاحم تولیدی در محصول نسبت به کاهش وزن آن نیز با تعریف نمودن قیود طراحی اقدام کرد.

اغلب، چون در کاربردهای مهندسی امکان تعریف یک تابع هدف دقیق با استفاده از فرمول‌های ریاضی و به صورت تحلیلی میسر نیست، لذا باید از روش‌های عددی استفاده کرد. بنابراین، انجام محاسبات بهینه‌سازی نیازمند استفاده از روش‌هایی نظیر المان محدود خواهد شد که به طور طبیعی با توجه به تعداد متغیرها و نوع محاسبات آکوستیک سازه‌ای و استفاده از روش‌های بهینه‌سازی مهندسی، که نیاز به محاسبات مکرر تابع هدف دارند، بسیار زمان‌بر خواهد بود. این در حالی است که حتی پس از صرف‌نمودن مدت زمان زیادی که لازم است تا محاسبات رایانه‌ای حین بهینه‌سازی انجام شود، اطمینان و قطعیتی وجود ندارد که جواب‌های به‌دست آمده دارای کیفیت مورد نظر باشند.

یکی از علت‌های این امر نداشتن اطلاعات لازم در خصوص فرم هندسی تابع هدف و همچنین میزان غیرخطی بودن آن است که نمی‌توان به طور کلی و به‌سرعت تشخیص داد که با چه مقادیری از متغیرهای طراحی می‌توان یک تابع هدف کمینه دلخواه را به‌دست آورد. لذا پرسش اصلی این است که چه روش بهینه‌سازی با توجه ماهیت متفاوت هر روش، می‌تواند هر چه سریع‌تر جواب بهینه را با کیفیت بهتر که همانا کاهش سطح تشعشعات صوتی است، ارایه نماید؟

تحقیقات منتشرشده توسط کوپمن در سال ۱۹۹۷میلادی در کتابی با عنوان "طراحی یک سازه آرام با رویکرد کاهش توان صوتی"[۱] نشان داد که استفاده از روش‌های علمی کاهش تشعشعات آکوستیکی سازه‌های مکانیکی در همان ابتدای مرحله طراحی محصول بسیار به‌صرفه‌تر از آن است که پس از تولید محصول نهایی نسبت به کاهش این تشعشعات، با استفاده از روش‌های قدیمی و هزینه‌بری همچون تعبیه عایق‌ها و میراکننده‌ها، اقدام شود. راه‌حل کلیدی جهت دستیابی به این منظور استفاده از روش‌های پیشرفته شبیه‌سازی عددی بر روی مدل‌های رایانه‌ای در حین مرحله طراحی محصول می‌باشد. با این روش می‌توان منابع تولیدکننده تشعشعات آکوستیکی را از همان ابتدا شناسایی کرد و نسبت به اصلاح آن اقدام نمود. هزینه این کار بسیار کمتر از آن است که پس از تولید بخواهیم نسبت به تعمیر یا اصلاح نقص اقدام کنیم.

نتایج یک مطالعه جامع انجام‌شده توسط ماربورگ[۲] در سال ۲۰۰۲ میلادی بر روی کاربرد روش‌های غیرفعال کنترل تشعشعات آکوستیکی سازه‌ها با استفاده از روش‌های متعدد بهینه‌سازی مهندسی بیانگر آن است که پیداکردن نقطه بهینه طراحی برای کاهش تشعشعات آکوستیکی سازه‌هایی که دارای

www.SID.ir
Archive of SID

تعداد زیادی نقاط بیشینه و کمینه در شکل هندسی تابع کاملا غیرخطی هدف خود هستند بسیار مشکل و گاهی غیرممکن می‌باشد. لذا حتی دست‌یافتن به یک مقدار کمی کاهش در میزان تشعشعات آکوستیکی سازه‌های مکانیکی نیز می‌تواند برای هر پژوهشگری یک افتخار تلقی گردد.

هدف از این مقاله، بررسی نحوه عملکرد و بازدهی روش بهینه‌سازی مهندسی الگوریتم ژنتیک برای اصلاح هندسه عددی سه‌بعدی یک سازه با توجه به خواص ارتعاشی، آکوستیکی و یا ساختاری آن است. به همین منظور، ترکیبی از یک نرم‌افزار تجاری المان محدود با روتین‌های نوشته‌شده توسط نگارندگان مقاله به زبان‌های فرترن، C و C++ به همراه یونیکس اسکریپت‌های خاصی، که به صورت خودکار فرایند بهینه‌سازی هندسی را به شیوه‌ای تکرارشونده با توجه به تابع هدف و توابع قیدی هدایت می‌نمایند، توسعه داده شده است.

در این مقاله، تابع هدف عبارت است از ریشه میانگین مربع از سطح توان صوتی ساطع‌شده از سطح یک سازه مکانیکی (RMSL)[1]. قیود یا محدودیت‌های اعمالی درنظر گرفته شده برای تابع هدف شامل محدودنمودن مقدار عددی مرزهای بالا و پایین مقدار متغیرهای طراحی (یا به عبارت دیگر میزان تغییرات فرم هندسی مدل) می‌باشد. همچنین، در این تحقیق فرض شده است که مقدار جرم کل سازه، در طی تمامی مراحل بهینه‌سازی، به صورت ثابت باقی خواهد ماند.

۲- نحوه محاسبه تابع هدف

قابل اعتمادترین روش محاسبه میزان نویز ساطع‌شده از اجزای یک سازه مکانیکی پارامتر سطح توان صوتی ساطع‌شده بر حسب فرکانس زاویه‌ای می‌باشد. این مقدار توسط معادله زیر محاسبه می‌گردد:

$$L_p(\omega)=10\ \lg\frac{p(\omega)}{p_0}\text{dB} \qquad (۱)$$

در فرمول (۱)، مقدار سطح توان صوتی ساطع‌شده بر اساس یک تابع لگاریتمی نسبت توان صوتی ساطع‌شده $P(\omega)$ به توان صوتی مبنا بر حسب دسی‌بل (dB) محاسبه می‌گردد. همچنین، بر اساس معادله پایه‌ای آکوستیک ماشین‌آلات ارائه‌شده توسط کولمن[۳]، مقدار $P(\omega)$ را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود:

$$P(\omega)=\rho_a c_a\ S\overline{v_{\perp rms}^2(\omega)}\ \sigma(\omega) \qquad (۲)$$

در فرمول (۲)، مقادیر ρ و c بیانگر چگالی و سرعت صوت در هوا، به عنوان سیالی که تشعشعات صوتی را از سازه منتقل می‌کند، می‌باشند. پارامتر S بیانگر سطح ساطع‌کننده تشعشعات صوتی و $\overline{v_{\perp rms}^2(\omega)}$ مقدار متوسط مربعی سرعت ارتعاشی بر روی سطح ساطع‌کننده صوت می‌باشد. همچنین پارامتر $\sigma(\omega)$ بیانگر میزان بازدهی تشعشعی می‌باشد.

با درنظر گرفتن مقدار متوسط مربعی ادمیتانس انتقالی برگرفته از کتاب مبانی آکوستیک ماشین‌آلات نوشته آقای کولمن[۳] به صورت زیر داریم:

$$h_t^2(\omega)=\frac{\overline{v_{\perp rms}^2(\omega)}}{F_{rms}^2(\omega)} \qquad (۳)$$

که مقدار F بیانگر ریشه مربعی متوسط نیروی تحریک می‌باشد. آنگاه معادله (۲) را می توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$P(\omega)=\rho_a c_a\ S\sigma(\omega)h_t^2(\omega)\ F_{rms}^2(\omega) \qquad (۴)$$

که این همان معادله اساسی آکوستیک ماشین‌آلات می‌باشد. حال با استفاده شیوه نگارش معادلات ریاضی به صورت اپراتور سطح داریم[۴]:

$$L_p(\omega)=L_\sigma(\omega)+L_{sh_t^2}(\omega)+L_F(\omega) \qquad (۵)$$

در اینجا $L_\sigma(\omega)$ بیانگر سطح بازدهی تشعشعی، $L_{sh_t^2}(\omega)$ سطح صوت تولیدشده توسط سازه و ترم $L_F(\omega)$ مربوط به سطح نیروی عملگر می‌باشد. همچنین مقدار امپدانس ویژه نیز، با توجه به یکسان‌بودن آن با مقدار مبنای استاندارد آن در معادله (۴) در شرایط درجه حرارت و فشار عادی هوا، منجر به صفرشدن مقدار نسبت لگاریتمی آن‌ها می‌گردد. علت این امر، صفربودن مقدار لگاریتم عدد یک (نسبت دو امپدانس ویژه در شرایط عادی درجه حرارت و فشار هوا) می‌باشد.

بنابراین، از معادله پنج می‌توان این استنباط را داشت که مقدار سطح توان صوتی ساطع‌شده $L_p(\omega)$ می‌تواند به عنوان مجموع سه سطح $L_{sh_t^2}(\omega)$، $L_\sigma(\omega)$ و $L_F(\omega)$ بیان گردد. لذا می‌توان گفت که مقدار سطح توان صوتی ساطع‌شده از یک سازه، با کاهش مجموع مقدار این سه سطح و یا حداقل کاهش دو تا از آن‌ها، در صورتی که کاهش آن‌ها منجر به افزایش زیاد از حد سطح سوم نگردد، میسر می‌باشد.

اگرچه انجام هرگونه اقدامی به منظور کاهش مقدار $L_F(\omega)$ بر روی مقادیر $L_{sh_t^2}(\omega)$ و $L_\sigma(\omega)$ تاثیرگذار نمی‌باشد، اما

1. Root Mean Square Level of Sound Power

www.SID.ir
Archive of SID

تلاش‌های انجام‌شده جهت کاهش سطح ارتعاشی سازه بر روی سطح بازدهی تشعشعی سازه متقابلا بر روی هم تاثیرگذارند. علت آن وجود محدودیت بر روی مقدار ماکزیمم بازدهی تشعشعی بر حسب فرکانس است که اصطلاحا بازدهی تشعشعی یک تک‌قطب تابشی نامیده می‌شود. اما در مقابل هیچ‌گونه محدودیتی بر روی مقدار پایینی سطح صوتی تولیدشده توسط سازه وجود ندارد. بنابراین امکان کاهش بیشتر آن حتی وقتی که بازدهی تشعشعی در بالاترین سطح خود است، وجود دارد.

لذا در این تحقیق فقط صوت تولیدشده توسط سازه درنظر گرفته شده است وگرنه استفاده از روش‌های بسیار پیچیده‌تر و زمانبرتر از قبیل روش المان‌های مرزی یا المان‌های نامحدود جهت محاسبه توان صوتی ساطع‌شده ضروری می‌نمود.

۳- نحوه محاسبه تابع هدف

سطح صوت تولیدشده توسط سازه $L_{sh_t^2}(\omega)$ در معادله (۵) که از این به بعد با علامت اختصاری LS نامیده خواهد شد را می‌توان به عنوان معیار اندازه‌گیری حساسیت ارتعاشی یک سازه تحت تاثیر یک نیروی عملگر معرفی نمود[۵]. بنابراین مقدار LS به صورت زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$LS = L_{sh_t^2}(\omega) = 10 \ \lg \frac{Sh_t^2(\omega)}{S_0 h_{t0}^2} \text{dB} \qquad (۶)$$

مقدار مرجع $S_0 h_{t0}^2 = 2.5 \cdot 10^{-15} \ \text{m}^4/(\text{N}^2\text{s}^2)$ می‌باشد. همچنین، به منظور محاسبه مقدار متوسط مربعی هدایتی یا $h_t^2(\omega)$، با توجه به معادله (۳)، نیاز به محاسبه مقدار $\upsilon_{\perp rms}^2(\omega)$ می‌باشد.

مقدار بردار سرعت $\upsilon_{rmsi}^2(\omega)$ در برخی نقاط بر روی سطح ساطع‌کننده تشعشعات صوتی را می‌توان با استفاده آزمایش‌های تجربی و یا از طریق شتاب‌سنج‌ها و ارتعاش‌سنج‌های لیزری و یا همچنین از طریق روش‌های آنالیز عددی دینامیکی المان محدود محاسبه نمود. سپس مولفه مقدار نرمال سرعت ارتعاشی سازه که عمود بر سطح ساطع‌کننده تشعشعات صوتی می‌باشد، با فرمول زیر محاسبه می‌گردد:

$$\upsilon_{\perp rmsi}(\omega) = \upsilon_{rmsi}(\omega).n_i \qquad (۷)$$

n بردار نرمال یکه بر روی نقطه i می‌باشد. سپس مقدار متوسط سرعتی ارتعاشی سازه بر روی سطح مد نظر از طریق ذیل قابل محاسبه می‌باشد:

$$\overline{\upsilon_{\perp rmsi}^2(\omega)} = \frac{1}{n_n} \sum_{i=1}^{n_n} \upsilon_{\perp rms}^2(\omega) \qquad (۸)$$

در فرمول بالا، مقدار پارامتر i برابر با تعداد نقاط اندازه‌گیری یا نودهای المان محدود در نظر گرفته شده بر روی سطح سازه می‌باشد.

در این مقاله، جهت محاسبه بردارهای سرعت سطحی، از روش المان‌های محدود (تکنیک جمع آثار) استفاده شده است که برای یک سازه با میرایی کم عملا قابل قبول است. نرم‌افزار به‌کار گرفته شده جهت انجام عملیات آنالیز المان محدود انسیس[1] می‌باشد[۶]. بنابراین، هر مرحله آنالیز المان‌های محدود دارای دو زیرمرحله است. ابتدا انجام آنالیز عددی مودال که منجر به محاسبه شکل مودها و فرکانس‌های طبیعی می‌شود. سپس، با درنظر گرفتن اطلاعات جمع‌آوری‌شده در مرحله اول، پاسخ ارتعاشی سازه به یک نیروی هارمونیک عملگر بر سازه تعیین می‌گردد. در حقیقت تشخیص دقیق تعداد و مقادیر فرکانس‌های طبیعی دارای اهمیت فوق‌العاده‌ای جهت افزایش دقت محاسبات در مرحله دوم می‌باشد.

در همین راستا، انتخاب یک بازه مناسب جهت تقسیم دامنه فرکانسی و انجام آنالیز مودال بسیار مهم می‌باشد. چرا که اگر دامنه فرکانسی به صورت قطعات بزرگی تقسیم‌بندی شود، آنگاه امکان گم‌کردن و یا عدم محاسبه تعدادی از فرکانس‌های طبیعی در دامنه برانگیزش مورد علاقه طراح وجود دارد. اما طبیعتا چنانچه مقادیر خیلی کوچک تقسیم‌بندی درنظر گرفته شود، آنگاه زمان اجرای هر مرحله از محاسبات المان محدود فوق‌العاده زیاد می‌شود.

از طرف دیگر، از آنجا که توان آکوستیکی به وسیله سرعت سطحی سازه محاسبه می‌شود، یک روش دیگر کم‌خرج به لحاظ محاسباتی درنظر گرفتن بازدهی ارتعاشی سازه به صورت مقدار متوسط مربعی سرعت ارتعاشی سطح سازه می‌باشد[۷].

مقدار LS در فرمول (۶) بیانگر یک طیف از فرکانس‌های کاری دورانی ω می‌باشد. برای محاسبه یک معیار کلی از رفتار ارتعاشی یک سازه در یک محدوده فرکانسی مورد علاقه، ریشه مقدار متوسط مربعی صوت تولیدشده توسط سازه، که به‌اختصار RMSL نامیده می‌شود، از طریق فرمول (۹) محاسبه می‌گردد[۸،۹]:

1. ANSYS

Archive of SID
www.SID.ir

$$\mathrm{RMSL}(=\sqrt{\frac{\int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} LS^2(\omega)d\omega}{\omega_{\max}-\omega_{\min}}}\ \mathrm{dB} \qquad (۹)$$

در معادله فوق $\omega_{\max}$ و $\omega_{\min}$ مقادیر باندهای بالا و پایین فرکانس زاویه‌ای می‌باشند. مقدار RMSL را می‌توان به نوعی بیانگر میزان انرژی ارتعاشی موجود روی یک محدوده فرکانسی معین مربوط به نیروی برانگیزش در سازه بیان نمود. این مقدار به عنوان تابع هدف در این تحقیق مد نظر قرار گرفته است. در ادامه به معرفی فرایند بهینه‌سازی درنظر گرفته شده در این تحقیق پرداخته می‌شود.

همان‌طور که درخصوص معادله (۸) ذکر شد، مقدار RMSL به عنوان تابع هدف طبق تعریف زیر جهت بهینه‌سازی مد نظر قرار گرفته است؛ به عبارت دیگر، طبق فرمول (۹)، مقدار کمینه تابع هدف تحت شرایط قیدی اعمال‌شده بر روی آن مورد حستجو واقع می‌شود:

$$\min.\ F(\vartheta),\vartheta\in R^n$$
$$\text{subject to}\ \begin{cases} C_{eq}(\vartheta)=0 \\ C_{ineq}(\vartheta)\geq 0 \end{cases} \qquad (۱۰)$$

در فرمول شماره (۱۰)، مقدار کمینه تابع هدف F بر حسب متغیر ϑ با مقادیر حقیقی تحت شرایط قیدی یکسان $C_{eq}(\vartheta)=0$ و غیریکسان $C_{ineq}(\vartheta)\geq 0$ اعمال‌شده بر روی متغیرهای مسئله مورد جستجو قرار می‌گیرد. در اینجا شایان ذکر است که تنها قیودی که در این تحقیق مد نظر قرار گرفته‌اند، اعمال مقادیر حداکثر و حداقل مجاز بر روی متغیرهای ϑ می‌باشد؛ به عبارت دیگر این متغیرهای طراحی تنها مجاز به تغییر مقدار خود در یک محدوده معین می‌باشند. در بخش‌های بعد خواهید دید که این مقدار مجاز طراحی بر اساس استانداردها و مقادیر مجاز تغییر فرم ورق‌های فولادی در حین فرآیند پرسکاری می‌باشند، به طوری که در صورت اعمال تغییر فرم، منجر به پارگی سطح ورق نگردد.

بنابراین، تابع هدف مد نظر جهت انجام فرایند بهینه‌سازی عبارت است از مقدار معادل توان تشعشعات آکوستیکی ساطع شده از سازه که به صورت متوسط بر روی کل محدوده فرکانس تحریک درنظر گرفته می‌شود. همچنین، در این تحقیق فرض می‌گردد که متغیرهای این تابع با توجه به محدودیت‌های تغییر فرم صفحات در هر دو جهت بیرونی و درونی جسم با مقادیر مشخصی محدود می‌گردند و به علاوه وزن سازه نیز در حین انجام عملیات افزایش نیابد. در این تحقیق، تنها تشعشعات صوتی ساطع‌شده از سازه درنظر گرفته می‌شود؛ به عبارت دیگر، از اثر ارتعاشی سیال دربرگیرنده مدل (هوا) بر روی سازه مکانیکی صرف‌نظر شده است. سطح این تشعشعات صوتی بیانگر میزانی حساسیت ارتعاشی سازه، هنگامی که تحت تاثیر تعدای تحریک کننده قرار گرفته است، می‌باشد.

از آنجا که توان آکوستیکی بر اساس میزان سرعت ارتعاشی سطح سازه محاسبه می‌گردد، لذا راه‌حل دست‌یافتن به ارزان‌ترین تابع هدف قابل محاسبه استفاده از راندمان ارتعاشی سازه و در نتیجه مقدار متوسط جذر مربعات سرعت عمودی سطح سازه می‌باشد. این مقدار همچنین به عنوان توان تشعشع آکوستیکی معادل سازه درنظر گرفته می‌شود. LS تابعی از فرکانس زاویه‌ای می‌باشد و برای محاسبه یک مقدار مشخص که بیانگر رفتار ارتعاشی سازه در محدوده فرکانسی مورد علاقه است از پارامتر RMSL استفاده می‌شود.

فرکانس‌های تحریک مینیمم و ماکزیمم به ترتیب صفر و صد هرتز می‌باشند. همچنین، مقدار RMSL بر حسب دسی‌بل محاسبه می‌شود.

سازه درنظر گرفته شده دارای خواص مکانیکی و آکوستیکی همگن می‌باشد و در کلیه سطوح جانبی خود توسط تعدادی پین‌های ساده نگه داشته شده است. این بدان معناست که در لبه‌های جانبی هیچ‌گونه ممان خمشی و برشی بر جسم اثر نمی‌کند. فرکانس نیروهای هارمونیک تحریک‌کننده در محدوه صفر تا صد هرتز درنظر گرفته شده‌اند که تقریبا اکثر فرکانس‌های طبیعی اصلی سازه را تحریک می‌کنند.

با توجه به اینکه عملا امکان تعیین یک تابع هدف تحلیلی برای این مدل وجود ندارد، لذا جهت محاسبه خواص آکوستیکی سازه باید از روش المان محدود استفاده نمود. اما این روش نیز خود بسیار زمانبر بوده و برای این مدل حداقل زمان مورد نیاز جهت انجام محاسبات دینامیکی سازه و سپس محاسبه تابع هدف چیزی در حدود ۱ دقیقه بر روی یک ابررایانه فوق پیشرفته می‌باشد. حال چنانچه بخواهیم مثلا محاسبات را با ۱۰۰ مجموعه اولیه طراحی شروع نموده و پس از حداکثر ۵۰۰ بار محاسبه تابع هدف نتایج حاصله را ارزیابی کنیم، چیزی در حدود ۵۰۰۰۰ بار محاسبه تابع هدف (یعنی

Archive of SID
www.SID.ir

زمانی معادل حدود یک ماه کار یک پردازشگر) مورد نیاز است. چنانچه این محاسبات فقط برروی یک پردازشگر و به صورت سری انجام پذیرد، آنگاه برای انجام محاسبات مربوط نیازمند زمانی در حدود ۳ ماه می‌باشیم. البته با استفاده از تکنیک پردازش موازی می‌توان محاسبه را بر روی چند پردازشگر انجام داد و تا حدی زمان محاسبات را کوتاه نمود.

۴- روش الگوریتم ژنتیک

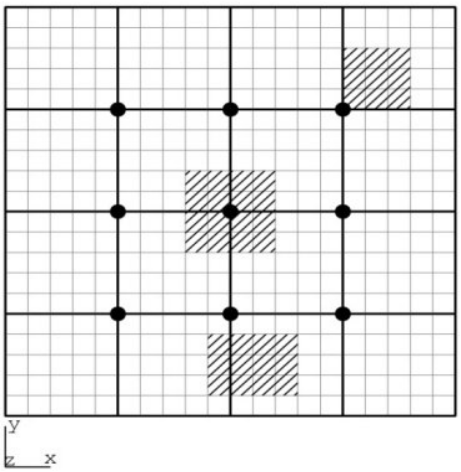
الگوریتم ژنتیک تکنیک جستجویی برای یافتن راه‌حل تقریبی برای بهینه‌سازی و مسائل جستجوست[۱۱،۱۰]. الگوریتم ژنتیک نوع خاصی از الگوریتم‌های تکامل است که از تکنیک‌های زیست‌شناسی مانند وراثت و جهش استفاده می‌کند.

مختصرا گفته می‌شود که الگوریتم ژنتیک یک تکنیک برنامه‌نویسی است که از تکامل ژنتیکی به عنوان یک الگوی حل مسئله استفاده می‌کند. مسئله‌ای که باید حل شود ورودی است و راه‌حل‌ها طبق یک الگو کدگذاری می‌شوند که تابع هدف نام دارد. هر راه‌حل کاندید را ارزیابی می‌کند که اکثر آن‌ها به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند. در اینجا، چرخه کار روش الگوریتم ژنتیک به‌اختصار از منبع [۱۲] ذکر شده است:

۱. آغاز الگوریتم
۲. جمعیت اولیه را ایجاد کن.
۳. آغاز حلقه: تعدادی جفت انتخاب کن (در واقع چند والد برای ایجاد فرزند انتخاب کن)
۴. عمل کراس اور را انجام بده (ایجاد فرزندی که پاره‌ای از صفات پدر و پاره‌ای از صفات مادر را داراست)
۵. عمل موتاسیون (ایجاد جهش در فرد، که باعث می‌شود پاره ای از صفات تغییر کند)
۶. مقدار تابع برازش را برای افراد تعیین کن.
۷. جمعیت مورد نظر را انتخاب کن (انتخاب طبیعی).
۸. در صورتی که به شرط پایان نرسیدی، به آغاز حلقه برو در غیر این صورت پایان حلقه.

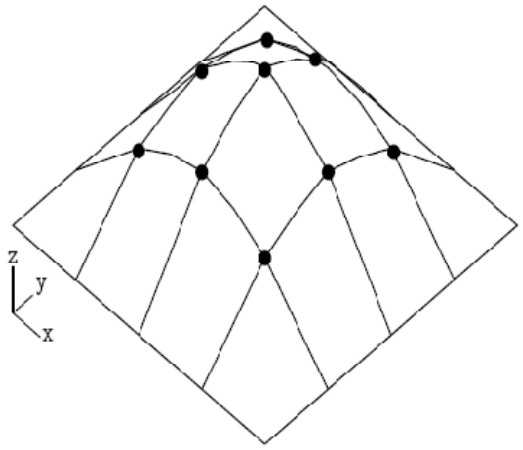
۵- مدلسازی المان محدود

یک ورقه فلزی از جنس استیل به ابعاد یک متر در یک متر و به ضخامت ثابت یک میلی‌متر به عنوان مدل مدنظر قرار گرفته است (شکل ۱). ورقه مذبور دارای شرایط مرزی سراسری پین ساده و پوسته تحت سه تحریک هارمونیک در مکان‌های مختلف می‌باشد. متغیرهای طراحی در این تحقیق عبارت‌اند از تغییر فرم عمودی نسبت به سطح سازه در ۹ نقطه کلیدی که بر روی سطح یک ورقه نازک از جنس استیل درنظر گرفته شده است.



شکل ۱ مدل المان محدود اولیه با ۴۰۰ المان ، ۹ نقطه طراحی و سه منطقه اعمال نیروی هارمونیک (مناطق هاشور زده‌شده)

تغییر فرم صفحه در این نقاط منجر به تغییر فرم هندسی کل سازه شده و در نتیجه خواص آکوستیکی سازه نیز تغییر می‌کند (شکل ۲).



شکل ۲ اصلاح فرم هندسی سه‌بعدی یک ورق با استفاده از ۹ نقطه طراحی بر روی سطح مدل به منظور کاهش سطح تشعشعات ویبروآکوستیکی یک سازه

شایان ذکر است که متغیرهای درنظر گرفته شده به صورت گسسته بوده و در نتیجه تابع هدف در هر مرحله بر مبنای متغیرهای بهینه محاسبه شده در مرحله قبل تعیین می‌گردد.

www.SID.ir

به منظور حفظ اطلاعات مربوط به کلیه پیک‌های مربوط به فرکانس‌های طبیعی (اصلی) سازه در محدوده فرکانسی ۰ تا ۱۰۰ هرتز، تحقیق جامعی انجام شد تا بهترین و مناسب‌ترین مقادیر جهت تقسیم‌بندی حوزه فرکانسی معین گردند. با توجه با اینکه بیشترین تعداد پیک‌های فرکانس اصلی ورقه مد نظر در بازه ۰ تا ۴۰ هرتز قرار دارد و با توجه به تحقیقات سایر افراد در این زمینه، تصمیم گرفته شد تا از مقدار ۰/۱ هرتز جهت تقسیم‌بندی بازه فرکانسی در حین آنالیز مودال استفاده گردد. به همین صورت مقادیر ۰/۲۵ و ۰/۵ هرتز نیز برای بازه‌های ۴۰ تا ۶۰ هرتز و همچنین ۶۰ تا ۱۰۰ هرتز استفاده شد.

قطعا می‌توان با استفاده از مقادیر تقسیم‌بندی بسیار ریز بر دقت محاسبات آنالیز مودال مسئله افزود، اما نتیجه انجام این کار افزایش فوق‌العاده زیاد زمان محاسبات، بدون به‌دست آوردن مقادیر خیلی دقیق‌تر از آنچه بر اساس تقسیم‌بندی پیشنهادی ماست، خواهد بود. قطعا شاهد این امر بررسی نمودارهای سطح صوت تولیدشده توسط سازه با مقادیر مختلف تقسیم فرکانسی می‌باشد که نتیجه آن اختلاف ناچیز بین نمودارهای ترسیمی را نشان می‌داد.

لبه‌های مدل به صورت پین‌شده می‌باشند و لذا عملا امکان حرکت خطی در سه جهت اصلی را ندارند. اما امکان دوران (پیچش) حول محورهای x وy را دارا می‌باشند. همچنین، سایر نقاط سطح مدل می‌توانند تنها در جهت محور z دارای نوسان و یا تغییر فرم اولیه باشند.

از روش بلاک لانکوژ[۶] جهت آنالیز مودال مدل استفاده شده است. ماکزیمم فرکانس مود درنظر گرفته شده به میزان ۱۵۰ هرتز و ماکزیمم مودهای ممکن موجود درنظر گرفته شده در این بازه ۱۵۰ عدد می‌باشد. هرچند که عملا تنها حدود ۱۰ مود طبیعی در فاصله ۰ تا ۱۰۰ هرتز جهت مدل درنظر گرفته شده وجود دارد. به عنوان شرط خاتمه فرایند تکرارپذیر بهینه‌سازی، حداکثر تعداد مجاز محاسبات تابع هدف برابر با ۵۰۰ مرتبه درنظر گرفته شده است.

سایر مشخصات فیزیکی مورد استفاده جهت مدلسازی ورقه عبارت‌اند از: ضخامت ورق به میزان ثابت ۱ میلی‌متر در کل سطح آن، مقدار چگالی آن ۷۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب، چگالی هوا به میزان ۱/۳ کیلوگرم بر متر مکعب، مقدار ضریب یانگ استاندارد جهت استیل، ضریب پواسون ۰/۳ و مقدار ثابت میرایی ۰/۳ درصد مستقل از فرکانس جهت مدلسازی درنظر گرفته شده است. همچنین، از آنجایی که مقدار ضریب میرایی تقریبا ناچیز است لذا از روش برهم‌نهی آثار می‌توان جهت انجام محاسبات المان محدود به منظور محاسبه بردارهای سرعت سطحی با یک میزان خطای قابل قبول استفاده نمود.

۶ - نتایج بهینه‌سازی ویبروآکوستیکی

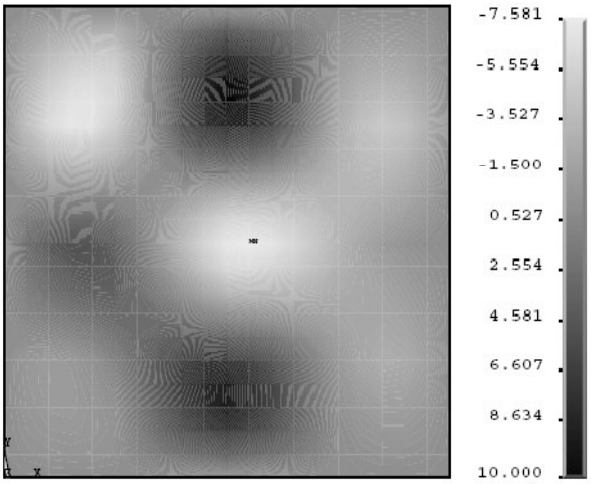
در این قسمت، نتایج آنالیز المان محدود مربوط به مدل اصلی یا ورقه مستطیلی بدون انحنا (ورقه تخت) معرفی می‌شوند. سپس، نتایج حاصل از طرح اولیه (دارای انحنای اولیه) و نتیجه حاصل از بهینه‌سازی با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک ارائه می‌شود. مقدار RMSL مدل اصلی (تخت) ورقه مستطیلی در محدوده فرکانسی ۰ تا ۱۰۰ هرتز برابر با ۴۵/۳۱ dB و مقدار ماکزیمم سطح صوتی منتشرشده به اندازه ۸۰/۵۶ dB در فرکانس اصلی ۴/۹ هرتز می‌باشد. سطح صوتی منتشرشده سازه اصلی به صورت یک خط ممتد تیره در نمودارهای مختلفی در ادامه همین فصل ارائه شده‌اند. همچنین، در جدول ۱، خواص مربوط به مدل اصلی معرفی شده است.

ژئومتری مدل اولیه در شکل ۳ به صورت دوبعدی نشان داده شده است. تمامی نقاط طراحی مابین مقادیر بیشینه و کمینیه ۱۰ و ۱۰- میلی‌متر محدود شده‌اند. مقادیر اولیه طرح اولیه مدل جهت نقاط طراحی نه‌گانه به‌ترتیب عبارت‌اند از: ۲/۳۳۵-، ۹/۲۵۹، ۵/۱۹۵-، ۳/۱۴۵-، ۷/۱۷۴-، ۳/۶۷۸، ۰/۸۲۷- ، ۷/۵۱۸، ۱/۰۶۲.

جهت طرح اولیه مدل (با فرم هندسی غیرتخت)، مقدار ماکزیمم تابع هدف در محدوده فرکانسی ۰ تا ۱۰۰ هرتز برابر با ۳۸/۹۳ دسی‌بل می‌باشد. همچنین مقدار حداکثر LS برابر با ۶۹/۱ دسی‌بل در فرکانس ۲۱/۸ هرتز واقع شده است.

برای آزمودن عملکرد روش الگوریتم ژنتیک، یک مجموعه اولیه مشتمل بر ۲۰ عضو (یعنی ۲۰ مقدار اولیه برای تابع هدف جهت شروع فرایند بهینه‌سازی) و همچنین تعداد تکرارهای کلی معادل ۲۵ درنظر گرفته شد. انتخاب مجموعه اولیه به گونه‌ای است که متوسط ۲۰ مقدار توابع هدف اولیه برابر با ۴۰/۷۱ دسی‌بل می‌باشد. سپس نمودار عملکرد این روش با استفاده از مجموعه اولیه درنظر گرفته شده بر حسب تعداد تکرارهای مختلف محاسبه گردید.

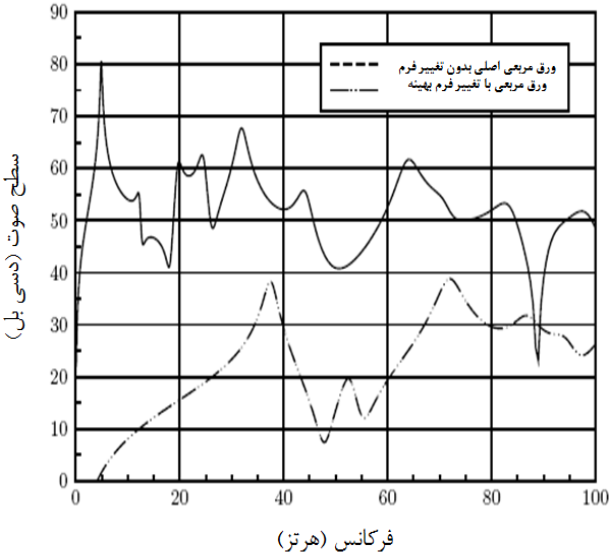
www.SID.ir
Archive of SID



شکل ۳ ساختار اولیه طرح مورد استفاده در بهینه‌سازی (مقادیر برحسب میلی‌متر می‌باشند)

شکل ۴ مقدار سطح تشعشعات ساطع‌شده از مدل اصلی، مدل اولیه مورد استفاده جهت شروع فرایند بهینه‌سازی و مدل نهایی بهینه‌شده را به نمایش می‌گذارد.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، اولین فرکانس طبیعی برای مدل بهینه‌سازی‌شده توسط این روش دارای مقداری معادل با ۳۷/۴ هرتز می‌باشد. همچنین، مقدار ماکزیمم LS سازه بهینه-شده به عدد ۳۷/۹ دسی‌بل در فرکانس طبیعی جدید کاهش یافته است.

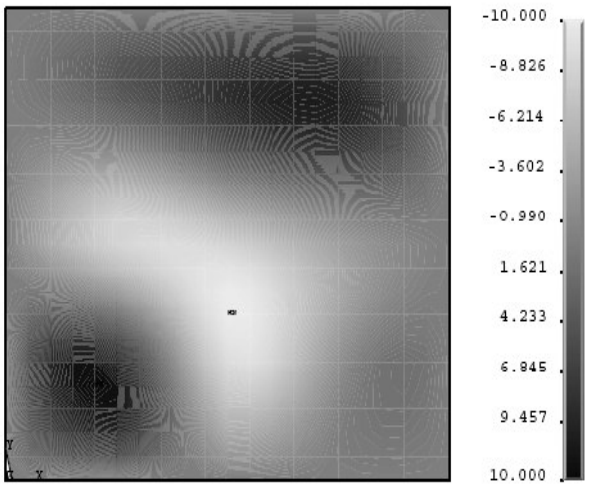


شکل ۴ طیف LS مربوط به مدل اصلی، طرح اولیه و طرح نهایی بهینه‌سازی شده با روش الگوریتم ژنتیک

آنچه در مورد نتایج حاصل از روش الگوریتم ژنتیک جالب توجه می‌باشد آن است که سطح تشعشعات صوتی در کلیه فرکانس‌های مد نظر بر روی دامنه فرکانسی کاهش یافته است. همچنین، مقدار تابع هدف RMSL نیز به ۱۸/۵ دسی‌بل کاهش یافته است که این میزان کاهش در نوع خود جالب توجه می‌باشد.

پس از انجام‌دادن ۵۰۰ محاسبه تابع هدف و طی‌شدن حدود ۸/۵ ساعت زمان، مقدار تابع هدف به ۱۸/۵ دسی‌بل کاهش و مقدار فرکانس پایه نیز به ۳۷/۴ هرتز افزایش یافته است.

مدل بهینه‌سازی شده نهایی توسط روش الگوریتم ژنتیک نیز در شکل ۵ آمده است. بر اساس نتایج حاصل مشاهده می‌گردد که فرم هندسی جدید را می‌توان به این صورت تفسیر نمود که برآمدگی در امتداد قطر صفحه توانسته است به طور موثری میزان ارتعاشات صفحه را کاهش دهد.



شکل ۵ فرم هندسی بهینه مدل حاصل از روش الگوریتم ژنتیک (مقادیر برحسب میلی‌متر می‌باشند)

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، نشان داده شد فرایندهای بهینه‌سازی درنظر گرفته شده می‌توانند به طور موثری مقدار تابع هدف را کاهش دهند. بنابراین می‌توان کاربرد این روش را در مسائل بهینه-سازی ویبروآکوستیکی توصیه نمود و انتظار داشت تا در یک زمان قابل قبول به لحاظ میزان محاسبات به یک جواب قابل قبول جهت تابع هدف نیز دست یافت.

www.SID.ir

فرم هندسی واقعی تابع هدف درنظر گرفته شده در این تحقیق به طور کامل ناشناخته می‌باشد، اما می‌توان تا حدودی فهمید که تابع هدف به شدت غیرخطی و دارای تعداد زیادی نقاط ماکزیمم و مینیمم می‌باشد. شاهد این برآورد ان است که تعداد زیادی نقاط بهینه ناشی از نقاط مختلف شروع حادث شده‌اند؛ به عبارت دیگر، ملاحظه شد که در صورت استفاده از طرح‌های اولیه مختلف، نتایج بهینه‌شده مختلفی نیز حاصل می شود که این خود نشانگر آن است که تعداد زیادی نقاط کمینه در شکل هندسی تابع هدف وجود دارد.

قسمت عمده زمان محاسبات توسط بخش آنالیز المان محدود انجام‌شده جهت محاسبه سرعت ارتعاشی نودهای سطحی روی مدل در حین فرایند بهینه‌سازی مصرف شده است. البته می‌توان جهت کاهش زمان اجرای محاسبات از روش‌های محاسبات موازی استفاده نمود، اما استفاده از این روش عملا هیچ‌گونه تاثیری بر زمان محاسبه یک تابع هدف ندارد. بنابراین، جهت کاهش زمان کل محاسبات بهتر است که زمان محاسبه تابع هدف را کاهش داد. اما بخش عمده‌ای از زمان محاسبه یک تابع هدف نیز همان‌طور که گفته شد توسط محاسبات لازم برای آنالیز المان محدود مصرف می‌شود. لذا منطقی است که بر روی کاهش زمان محاسبات لازم جهت آنالیز المان محدود مدل کار نمود.

فرایند بهینه‌سازی معرفی‌شده ترکیبی از نرم‌افزار المان محدود و سایر برنامه‌های نوشته‌شده توسط مجری طرح می‌باشد. با توجه به طراحی مدولار کل فرایند، امکان استفاده و یا جایگزینی سایر روش‌های آنالیز المان محدود و یا سایر روش‌های بهینه‌سازی مهندسی در درون آن وجود دارد.

اگرچه فرض بر این است که کاهش RMSL منجر به کاهش نویز و یا به عبارت دیگر منجر به کاهش سطح تشعشعات صوتی ساطع‌شده از سازه می‌شود، اما این فرض در طرح فعلی مورد اعتبارسنجی لازم و کامل واقع نشده است. لذا توان صوتی ساطع‌شده از مدل بهینه باید با طرح اولیه مقایسه شود تا ملاحظه گردد که آیا این ایده به اندازه کافی دارای صحت و دقت لازم می‌باشد یا خیر؟ اما شایان ذکر است که در هر حال پاسخ به این سوال هیچ‌گونه تاثیری بر نتیجه عملکرد روش‌های بهینه‌سازی نخواهد داشت.

استفاده از روش‌های موثر آنالیز حساسیت (مانند روش‌های محاسبه گرادیان‌های مرحله اول و دوم با کمترین تعداد محاسبه تابع هدف) به منظور کاهش زمان محاسبات از دیگر مواردی است که می‌تواند در سایر تحقیقات بعدی مد نظر قرار گیرد. مدل‌های مختلف تابع هدف نیز باید تجربه شوند. به عنوان مثال، می‌توان سازه را بهینه نمود تا میزان ارتعاشات منتقل‌شده بر روی فرکانس متفاوت مورد علاقه را کمینه کرد. همچنین، افزایش میزان جذب صوت در برخی از فرکانس‌ها نیز می‌تواند به عنوان یک نوع دیگر از تابع هدف مد نظر قرار گیرد. استفاده از چند تابع هدف به صورت هم‌زمان نیز می‌تواند مد نظر قرار گیرد. حتی می‌توان برخی از انواع هدف نیز به صورت شرایط قیدی در مسئله در نظر گرفت.

آنالیز مقاوم‌بودن و میزان اعتماد به نتایج جهت تکرار در کاربردهای مختلف نیز خود یک مقوله دیگر می‌باشد. استفاده از ترکیب‌های مختلف انواع روش‌های بهینه‌سازی و مقایسه نتایج و نقاط قوت و ضعف آن‌ها با یکدیگر نیز می‌تواند منجر به توسعه این زمینه علمی گردد. همچنین، سایر انواع متغیرهای مختلف از قبیل فاصله مابین نقاط طراحی و غیره نیز می‌توانند به عنوان سایر ایده‌های جالب جهت ادامه کار مطرح باشند.

۷- مراجع

[1] Koopmann G. H., Fahnline J. B., *Designing Quiet Structures: A Sound Power Minimization Approach*, London, Academic Press, 1997.

[2] Marburg St., "Efficient Optimization of a Noise Transfer Function by Modification of a Shell Structure Geometry-Part I: Theory", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 24, 2002, pp. 51-59.

[3] Kollmann F. G., *Maschinenakustik-Grundlagen, Meßtechnik, Berechnung, Beeinflussung*, (in German), 2nd Revised Edition, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2000.

[4] Bös J., "Numerical Optimization of the Thickness Distribution of Threedimensional Structures with Respect to Their Structural Acoustic Properties", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 32, No. 1, 2006, pp. 12-30.

[5] Fritze D., Marburg St., Hardtke H. J., "Reducing Radiated Sound Power of Plates and Shallow Shells by Local Modification of Geometry" *Acta Acustica United with Acustica*, Vol. 89, No. 1, 2003, pp. 53-60.

[6] Swanson Analysis System Inc. ANSYS Academic Research, Release 11.0.

Archive of SID
www.SID.ir

[7] Fritze D., Marburg St., Hardtke H. J., "Estimation of Radiated Sound Power: A Case Study on Common Approximation Methods", *Acta Acustica United with Acustica*, Vol. 95, 2009, pp. 833-842.

[8] Ranjbar M., Hardtke H. J., Fritze D., Marburg St., "Finding the Best Design within Limited Time: A Comparative Case Study on Methods for Optimization in Structural Acoustics", *Journal of Computational Acoustics*, Vol. 18, 2010, pp. 149-164.

[9] Ranjbar M., *A Comparative Study on Optimization in Structural Acoustics*, PhD Disseration, Technischen Universität Dresden, Germany, 2011.

[10] Charbonneau P., Pikaia Homepage. Research Report, http://www.hao.ucar.edu/modeling/pikaia/pikaia (Accessed December 18, 2010), 2003.

[11] Marcelin J. L., "Genetic Optimization of Stiffened Plates and Shells", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 51, No. 9, 2001, pp. 1079-1088.

[12] Keane A. J., "Passive Vibration Control via Unusual Geometries: The Application of Genetic Algorithm Optimization to Structural Design", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 185, No. 3, 1995, pp. 441-453.

Archive of SID

www.SID.ir