



تحلیل ارتعاشات پوسته استوانه‌ای دستگاه ام آر آی به روش اجزای محدود

حمید رضا مرتضوی بنی

گروه مهندسی پزشکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ارسنجان، ارسنجان، ایران

نویسنده مسئول: HRM.Beni@iau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۱۸

چکیده

تصویربرداری با رزونانس مغناطیس یکی از روش‌های تصویربرداری پزشکی غیرتهاجمی است که بر اساس میدان‌های مغناطیسی و امواج رادیویی عمل می‌کند. این مطالعه بر تقلیل نویز صوتی در داخل مخزن استوانه‌ای شکل اسکنر ام آر آی که بیمار در آن قرار دارد، متمرکز است. دیوار نیم‌تونل اسکنر معمولاً به سیلندر مارپیچ‌گردان متصل می‌شود که باعث انتقال برخی از ارتعاشات به دیوار می‌گردد و در نتیجه موج‌های صوتی تولید می‌شوند. یکی از راه‌حل‌های ممکن برای مدیریت نویز از دیوار نیم‌تونل اسکنر یا نویز انتقالی از سیلندر مارپیچ‌گردان، طراحی یک جذب‌کننده پهن اضافی بین سیلندر گردان و دیوار نیم‌تونل اسکنر است. در این مطالعه به کمک مدل‌سازی در نرم‌افزار انسیس نشان داده شد که تحلیل عددی چرخه‌های گردان می‌تواند به دقت سطوح ارتعاشی و نویز را بر اساس تحلیل صوتی مورد بررسی قرار دهد. نتایج نشان داد که با استفاده از جذب‌کننده پهن میکرو متخلخل با ضخامت لایه جذب به اندازه ۲۰ میلی‌متر، تلفات انتقالی در محدوده فرکانسی ۱۲۵ هرتز تا ۳ کیلوهرتز به میزان ۱۵ تا ۳۷ دسی‌بل کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه دستگاه ام آر آی یکی از محبوب‌ترین و پرکاربردترین دستگاه‌های تصویربرداری در حال حاضر است، بسیاری از شرکت‌های تولیدکننده دستگاه ام آر آی به دنبال بهبود و کنترل این ارتعاشات هستند. لذا، نتایج حاصل از این مطالعه می‌تواند به عنوان یک راهنمای مفید برای شرکت‌های تولیدکننده دستگاه ام آر آی در بهبود عملکرد و کارآمدی آن‌ها باشد.

کلمات کلیدی: دستگاه ام آر آی، پوسته استوانه‌ای، سطوح ارتعاشی، جذب پهن میکرو متخلخل.

مقدمه

در دنیای پزشکی، تصویربرداری با رزونانس مغناطیسی^۱ (ام آر آی) یکی از روش‌های مهم برای تشخیص بیماری‌ها و اختلالات در بدن است. در این روش، با استفاده از گیرنده‌های مغناطیسی و فرکانس‌های رادیویی، تصاویر دقیق و سه بعدی از بافت‌ها و ساختارهای داخل بدن به دست می‌آید. اما در همین حین، نحوه عملکرد دستگاه ام آر آی نیز به گونه‌ای است که ممکن است باعث ارتعاشات شدید در سطح پوسته استوانه‌ای دستگاه شود. به همین منظور، لازم است که مدل‌سازی و تحلیل این ارتعاشات صورت گیرد تا بتوان به بهبود و کنترل ارتعاشات در دستگاه ام آر آی حایز اولویت قرار داد.

مدل‌های تحلیلی

در طول دو دهه گذشته، بسیاری از مطالعات تحلیلی، عددی و تجربی برای بهبود درک ما از خواص ارتعاشی پوسته استوانه‌ای منتشر شده‌اند. اولین مدل تحلیلی که برای تحلیل ارتعاشات پوسته استوانه‌ای مورد استفاده قرار گرفت، نظریه پوسته دیواره نازک بود [۱]. تاراسیلا و همکاران [۲] حالت‌های پوسته ارتعاشی را محاسبه کردند و کانال‌های استوانه‌ای با طول محدود با انتهای باز را تحلیل کردند. شاو و همکاران [۳] یک مدل تحلیلی از کانال‌های استوانه‌ای محدود ارائه کردند. این مدل برای بررسی ویژگی‌های تابش صوتی سیستم سیم پیچ‌گردان یک اسکنر ام آر آی استفاده می‌شود. لی و مچفسک [۴]، در تجزیه و تحلیل جامع خود، هر دو حالت پوسته ارتعاشی و انتشار موج صوتی را در مجاری استوانه‌ای با انتهای باز ترکیب کردند. آنها همچنین اولین کسانی بودند که اتصال بین حالت ارتعاشی و آکوستیک را توصیف کردند. در مطالعه ای دیگر مچفسک و ونگ [۵] حالت

^۱ Magnetic Resonance Imaging



نسبتاً کم فرکانس (۲۰۰-۲۰۰۰ هرتز) یک سیلندر با ضخامت دیواره متوسط را مورد ارزیابی قرار دادند. رفتار دینامیکی یک سیلندر سیم پیچ گرادیان نقش مهمی در تعیین و کنترل عملکرد ارتعاشی اسکرن ام آر آی دارد [۵].

مدل‌های عددی

اولین مدل عددی مورد استفاده برای توصیف آکوستیک پوسته استوانه‌ای با استفاده از تجزیه و تحلیل انرژی آماری، توسط ادلستین و همکاران [۶] اجرا شد، که سیستم‌های صوتی پیچیده را به عنوان یک مشکل تعادل انرژی با هزینه محاسباتی بسیار کاهش یافته در مقایسه با روش‌های دقیق‌تر مانند روش اجزای محدود حل می‌کند. مچفسک و همکاران [۷] اولین مدل‌سازی عددی روش اجزا محدود آکوستیک پوسته استوانه‌ای را انجام دادند، که در آن هر دو تحلیل ارتعاشی و آکوستیک یک استوانه گرادیان جداره ضخیم مستقل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. یاو و مچفسک [۸] سوئیچینگ با سرعت بالا جریان در سیم پیچ‌های گرادیان در اسکرن‌های ام آر آی با قدرت میدان مغناطیسی بالا را مورد بررسی قرار دادند. ونگ و همکاران [۹] نیز برای مشخص کردن ویژگی‌های ارتعاش و ویژگی‌های نویز صوتی سیم‌پیچ گرادیان، یک مدل المان محدود با استفاده از مشخصات طراحی ابعادی را توسعه دادند. تجزیه و تحلیل روش اجزای محدود همچنین در یک مطالعه اخیر نیز برای یک دستگاه ام آر آی استفاده شد [۱۰]. منابع محاسباتی مطالعات قبلی محدود بود و بنابراین اولین مدل‌های عددی شامل مفروضات و ساده‌سازی‌هایی مانند نادیده گرفتن برخی اثرات فیزیکی بودند. وینکلر و همکاران [۱۱] یک مدل ارتعاشی جدید پیشنهاد کردند که شامل میرایی لورنتز که قبلاً نادیده گرفته شده بود، اما جزییات ضروری قبلی مانند الگوهای سیم دقیق، شکل حفره، پل بیمار و هوای خارج از حفره است. این پلت‌فرم شبیه‌سازی چند بعدی فیزیکی واقعی، درک از لرزش‌های صوتی در پوسته استوانه‌ای را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، این پلت‌فرم شبیه‌سازی می‌تواند به بهبود پوسته استوانه‌ای موجود کمک کند و طراحی کویل‌های گرادیان جدید کمتر را هدایت نماید. ساخر و کرونیچ [۱۲] یک مدل الاستودینامیک تحلیلی خطی دقیق برای سیم‌پیچ‌های شیب طولی محافظ ارائه نمودند. مدل آنها نشان می‌دهد که پاسخ فرکانس به یک تابع پروفایل بدون بعد بستگی دارد که مشخص می‌نماید چگالی جریان چگونه در محور سیلندر سیم‌پیچ گرادیان تغییر می‌کند. همچنین ساخر و همکاران [۱۳] از این مدل برای مطالعه دینامیک رزونانس یک پوسته استوانه‌ای با توجه به پارامترهای هندسه سیلندر مانند طول، شعاع متوسط و ضخامت شعاعی استفاده کردند.

اندازه‌گیری نویز صوتی

مک‌جوری و همکاران [۱۴] سطوح نویز آکوستیک تجربه شده در توالی‌های ام آر آی معمولی را در سیستم‌های ۱ و ۱/۵ تسلا اندازه‌گیری کردند و دریافته‌اند که بسیاری از توالی‌ها سطوح نویز بالاتر از آستانه ایمنی نظارتی تولید می‌کنند. سطوح بالای نویز صوتی در ام آر آی همیشه منبع نگرانی‌های ایمنی بوده است و تکنیک‌های کاهش نویز مختلفی در طول سال‌ها پیشنهاد شده است [۱۵ و ۱۶]. چو و همکاران [۱۷] به طور سیستماتیک رفتار نویز صوتی سیستم‌های تجاری ۱/۵ تسلا و نوع تحقیقاتی ۲/۰ تسلا را با استفاده از توالی‌های معمولی مورد مطالعه قرار دادند. آنها دریافته‌اند که مشخصات نویز نه تنها به پارامترهای توالی بستگی دارد، بلکه به ساختار پوسته استوانه‌ای و پشتیبانی نیز بستگی دارد. آنها دو راه حل ممکن را برای کاهش نویز صوتی پیشنهاد کردند: (۱) ایجاد توالی‌های تصویربرداری ساکت‌تر، (۲) اصلاح ساختار سیم پیچ گرادیان. مچفسک و همکاران [۱۸] تشعشع واقعی صدای تجربه شده توسط بیماران را در ۴ تسلا اندازه‌گیری کرد و پیشنهاد کرد که از پوشش صوتی برای کاهش نویز استفاده شود.

پارامترهای کاهش نویز

در میان روش‌های دیگر، نویز صوتی در ام آر آی را می‌توان با بهینه‌سازی پارامترهای توالی پالس، به عنوان مثال، سرعت و دامنه گرادیان کاهش داد. چو و همکاران [۱۹] یک تکنیک ام آر آی را بر اساس تغییرات بازسازی طرح‌ریزی و با استفاده از یک پوسته استوانه‌ای چرخش مکانیکی توسعه دادند، که پالس گرادیان را به حداقل رساند و منجر به کاهش نویز ۲۰/۷ دسی بل



شد. توالی گرادیان آرام دیگری به نام حالت اکتساب پژواک تحریک شده توسط کرمیلیکس و همکاران [۲۰] توسعه داده شد که منجر به کاهش تا حد زیادی نویز صوتی در روش‌های تصویربرداری می‌شود.

تکنیک‌های حذف نویز

چندین تکنیک حذف نویز فعال در طول سال‌ها پیشنهاد شده است [۲۱]. مک جوری و همکاران [۲۲] سیستم کنترل نویز فعال را پیشنهاد کردند، که در آن کاهش صوتی نویز با معرفی یک موج صوتی ضد فاز برای ایجاد منطقه‌ای از تداخل مخرب در یک منطقه خاص در فضا به دست می‌آید. به طور متوسط، ۱۰-۱۵ دسی بل نویز در محدوده فرکانس ۱۰۰-۳۵۰ هرتز، با حداکثر کاهش نویز ۳۰ دسی بل حذف شد. چن و همکاران [۲۳] از یک تکنیک تطبیقی مشابه استفاده کردند و به کاهش نویز ۱۸/۸ دسی بل برای فرکانس‌های زیر ۴ کیلوهرتز دست یافتند. لی و همکاران [۲۴] از یک سیستم بهبود یافته استفاده کردند که در طیف گسترده‌ای از فرکانس‌ها تا ۵ کیلوهرتز کار می‌کند و اجازه می‌دهد تا اکثر فرکانس‌های مورد استفاده در یک اسکندر ام آر آی معمولی را پوشش دهد. مینفنگ و همکاران [۲۵] برای ارزیابی اثر بخشی سیستم کنترل نویز فعال و برای کاهش انتشار نویز صوتی تولید شده توسط یک اسکندر ام آر آی ساز و کار نوآورانه‌ای را ایجاد کردند. چمبرز و همکاران [۲۶] یک مبدل نوری آکوستیک توسعه داد که بر اساس اصل مدولاسیون نور عمل می‌کند و تداخل الکترومغناطیسی ایجاد نمی‌کند، که برای ام آر آی عملکردی مهم است.

همانطوری که اشاره گردید، پوسته استوانه‌ای اسکنرهای تصویربرداری تشدید مغناطیسی تحت نیروهای بزرگ لورنتس قرار می‌گیرند، زیرا جریان‌های الکتریکی با سوئیچ سریع از آنها در حضور میدان مغناطیسی ساکن عبور می‌کنند. در اثر این نیروها هادی‌های پوسته استوانه‌ای ارتعاش می‌کنند و این ارتعاشات به صورت امواج فشار آکوستیک و تشعشعات صوتی به هوا تابش می‌کنند. الگوی نویز صوتی به شکل گرادیان بستگی دارد و بنابراین برای هر دنباله پالس متفاوت است. سطوح فشار صوتی تولید شده توسط کوئل‌های گرادیان می‌تواند از محدودیت‌های ایمنی تعیین شده فراتر رود. طراحی‌های جدید که سرعت جمع‌آوری داده‌ها را افزایش می‌دهد، در سال‌های اخیر تمرکز تحقیقات بوده است. با این حال، این طرح‌ها ممکن است سطوح نویز را بیشتر افزایش دهند، زیرا چنین سیستم‌هایی برای تولید میدان‌های گرادیان قوی‌تر و نرخ حرکت تیزتر طراحی شده‌اند. بنابراین، مدل‌سازی عددی دقیق آکوستیک پوسته استوانه‌ای برای برآورد واقعی نویز و تحلیل ایمنی ضروری است. در این مطالعه قصد بر آن است که تحلیل تئوری و عملی مدل پوسته استوانه‌ای دستگاه ام آر آی را با استفاده از روش المان محدود بررسی گردد. همچنین، در این تحقیق به بررسی تأثیر برخی پارامترها بر ارتعاشات پوسته استوانه‌ای و نحوه کنترل آن‌ها پرداخته می‌شود. این مطالعه بر کاهش نویز صوتی در پوسته استوانه‌ای که در آن بیمار قرار دارد تمرکز خواهد کرد.

معادلات حاکم و مدل‌سازی

در این بخش، به بررسی رفتار پوسته استوانه‌ای در دستگاه ام آر آی با استفاده از معادلات حاکم و مدل‌سازی محاسبات تحلیلی پرداخته خواهد شد. تجزیه و تحلیل سازه‌های صفحه و پوسته دارای سابقه‌ای طولانی دارد که با تئوری غشاء و سپس تئوری‌های خمشی چندین نظریه صفحه شروع می‌شود. تجزیه و تحلیل ورق مرکب چند لایه و تجزیه و تحلیل پوسته عمدتاً بر اساس سه نظریه است: (۱) نظریه کلاسیک صفحات چند لایه^۱، (۲) نظریه تغییر شکل برشی مرتبه اول^۲، (۳) نظریه تغییر شکل برشی مرتبه بالاتر^۳. اثر تغییر شکل برشی عرضی، که ممکن است در برخی موارد ضروری باشد، در نظریه دوم و نظریه سوم گنجانده شده است، در حالی که در نظریه اول به دلیل فرضیه کریشف نادیده گرفته شده است. تئوری کلاسیک صفحه چند لایه بر اساس فرضیه کریشف است که خطوط مستقیم نرمال به صفحه میانی تغییر شکل نیافته مستقیم و نرمال به صفحه میانی تغییر شکل یافته باقی می‌مانند و در جهت ضخامت تحت کشش قرار نمی‌گیرند. این مفروضات حاکی از ناپدید شدن برش عرضی و کرنش‌های نرمال عرضی است. تئوری کلاسیک ورقه در تحلیل تنش صفحات کامپوزیت استفاده شده است. با این حال،

^۱ Classical Laminated Plate Theory (CLPT)

^۲ First-order Shear Deformation Theory (FSDT)

^۳ Higher-order Shear Deformation Theory (HSDT)



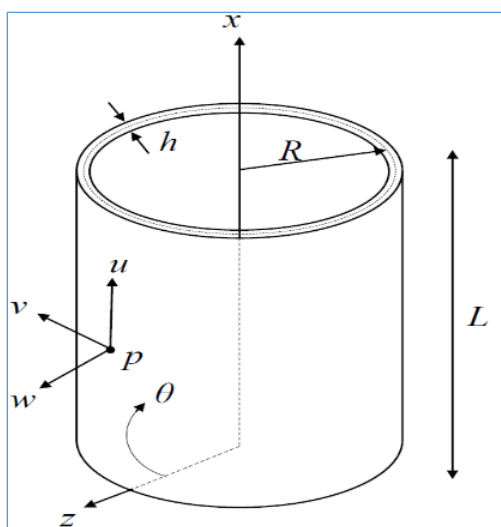
فقط برای لمینت‌های کامپوزیتی نازک دقیق است. در نظریه دوم، یک میدان جابجایی مرتبه اول برای کرنش عرضی در ضخامت در نظر گرفته شده است. ضرایب تصحیح برشی مناسب در نظریه اول به دلیل فرض کرنش برشی عرضی ثابت و تنش برشی از طریق ضخامت صفحه، که با شرایط تنش برشی صفر در صفحات مرزی ورقه‌ای و حالت‌های تنش واقعی از طریق ضخامت لایه متناقض است، مورد نیاز است. چند جمله‌ای‌های مرتبه بالاتر برای نشان دادن اجزای جابجایی از طریق ضخامت لایه‌ها در نظریه سوم استفاده می‌شود و کرنش/تنش عرضی واقعی از طریق ضخامت و شرایط تنش صفر در بالا و پایین یک لایه عمومی را می‌توان نشان داد. بنابراین می‌توان تقریب دقیق‌تری از اثر برشی عرضی را بدون فاکتورهای اصلاح برشی به دست آورد. با این حال، پیچیدگی در فرمول‌بندی و تلاش محاسباتی زیاد آن را از نظر اقتصادی غیرجذاب می‌کند. ارتعاش آزاد صفحات تا حد زیادی با استفاده از تئوری‌های نظریه دوم مورد مطالعه قرار گرفته است. پوسته‌های استوانه‌ای نازک به طور گسترده‌ای به عنوان عناصر ساختاری استفاده می‌شود. مطالعات پوسته‌های استوانه‌ای نازک گسترده است و نظریه‌های زیادی ارائه شده است. اولین کسی که مسئله پوسته استوانه‌ای را مطالعه کرد، آرون بود و اولین کسی که یک چارچوب ریاضی برای نظریه پوسته نازک ارائه کرد لائو بود. چارچوب ریاضی لائو، که به عنوان اولین نظریه تقریب لائو نیز شناخته می‌شود، شامل چهار فرض اصلی بود که بر اساس آنها بسیاری از رویکردهای پوسته نازک توسعه یافتند. این چهار فرض که معمولاً به عنوان فرضیه‌های کریشف-لاو شناخته می‌شوند، زمینه بسیاری از تئوری‌های پوسته نازک خطی را تشکیل می‌دهند که در طی سال‌ها به درجات مختلف اصلاح شده و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در پژوهش‌های گذشته تنها برای جابجایی‌های درون صفحه‌ای از بسط چند جمله استفاده شده است. در صورتی که در پژوهش حاضر جابجایی عرضی با استفاده از بسط سه جمله‌ای تقریب زده شده است. با توجه به متقارن محوری بودن پوسته استوانه‌ای، تنها مدهای محوری بررسی شده‌اند و از مدهای پیرامونی صرفه نظر شده است. میدان جابجایی برای پوسته استوانه‌ای متقارن محوری با استفاده از تئوری مرتبه بالا با رابطه (۱) بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} U(r_1, r_2, z) &= u(r_1, r_2) + z\psi(r_1, r_2) \\ V(r_1, r_2, z) &= 0 \\ W(r_1, r_2, z) &= w(r_1, r_2) + zw_1(r_1, r_2) + \frac{z^2}{2}w_2(r_1, r_2) \end{aligned} \quad (1)$$

در این رابطه، r_1 و r_2 مختصات انحنایی، u و w مختصات نقاط روی صفحه میانی پوسته استوانه‌ای، U ، V و W مختصات هر نقطه دلخواه روی پوسته استوانه‌ای، z فاصله هر نقطه تا محور میانی و ψ دوران محور عمود بر صفحه میانی حول محور است؛ همچنین w_1 و w_2 مجهولات جابجایی عرضی می‌باشند با توجه به اینکه هدف از این پژوهش به دست آوردن فرکانس‌های متقارن محوری برای پوسته استوانه‌ای است، بنابراین تغییرات در راستای محور V برابر صفر در نظر گرفته شده است. روابط کرنش - تغییر مکان برای پوسته استوانه‌ای متقارن محوری با در نظر گرفتن این فرضیه که تغییر مکان‌ها، کرنش‌ها و دوران حول محورها کوچک در نظر گرفته شده‌اند، به صورت رابطه (۲) بیان می‌شوند [۲۷].

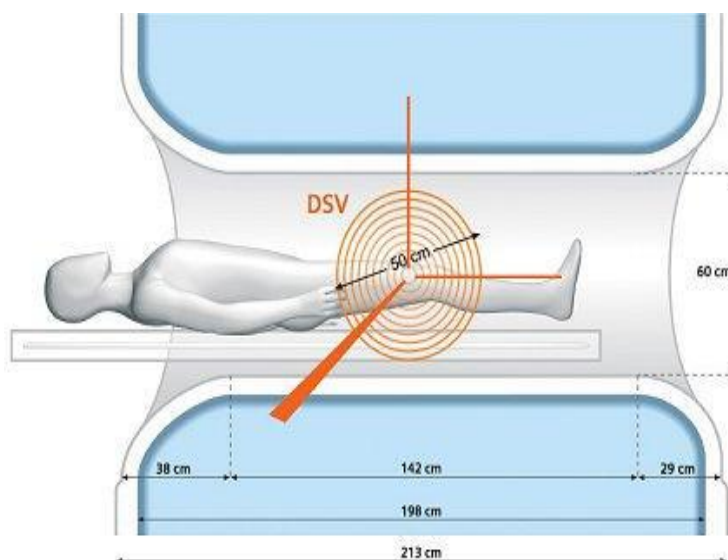
$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} + z \frac{\partial \psi}{\partial x} \\ \epsilon_\theta &= \frac{w + zw_1 + \frac{z^2}{2}w_2}{R + z} \\ \epsilon_n &= w_1 + zw_2 \\ \gamma_{x\theta} &= \psi + \frac{\partial w}{\partial x} + z \frac{\partial w_1}{\partial x} + \frac{z^2}{2} \frac{\partial w_2}{\partial x} \\ \gamma_{\theta n} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

در این رابطه، x محور مختصات در راستای طول استوانه و θ مختصات انحنایی حول محیط پوسته استوانه و R فاصله مرکز پوسته استوانه‌ای تا صفحه میانی آن است (به شکل (۱) مراجعه گردد).

شکل ۱: مختصات انحنایی بر روی پوسته استوانه‌ای (L طول استوانه)

نتایج و بحث

مدل‌سازی عددی دقیق استوانه اسکرنر ام آر آی برای تولید پیش‌بینی‌های واقع‌گرایانه از سطوح ارتعاشات ضروری است. در این تحقیق به طور عددی استوانه اسکرنر ام آر آی با استفاده از رویکرد جامع مدل‌سازی عددی مورد مطالعه و تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. سطوح ارتعاشات حاصل از بدن و سر را مقایسه می‌گردد و همچنین چگونگی تاثیرگذاری قدرت میدان اصلی بر سطوح ارتعاش صوتی و لرزش بررسی می‌شود. سپس بر روی کاهش سطوح ارتعاشات تمرکز می‌گردد. یک طراحی برای تصویربرداری مغز انسان با عملکرد بالا به عنوان مدل پایه استفاده شد. شکل (۲) ابعاد ساختار استوانه تک لایه‌ای اسکرنر ام آر آی، به عنوان یک پوسته دایره‌ای را نشان می‌دهد.



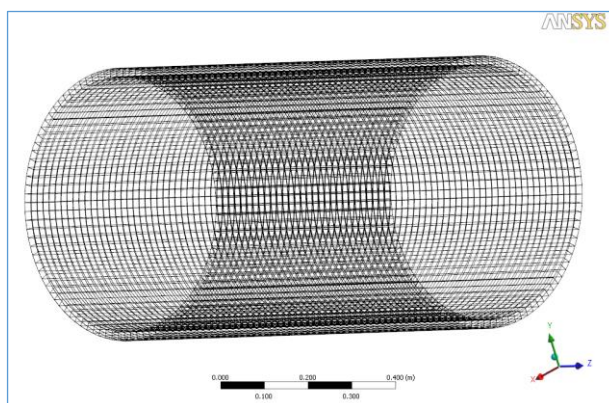
شکل ۲: ابعاد ساختار استوانه گرادیان تک لایه‌ای اسکرنر ام آر آی.

شبکه بندی المان محدود ساختار پوسته استوانه‌ای شکل (۳) پس از بررسی استقلال شبکه منطبق بر پارامترهای جدول (۱) انتخاب شدند. همچنین با توجه به جدول (۲) اعتبار سنجی نتایج نیز تایید گردید.



جدول ۱: مشخصات و تنظیمات برای آنالیز ارتعاشات مدل سازه.

اندازه عناصر (متر)	۰/۰۲
حداکثر طول لبه (متر)	۱/۸۸
تعداد گره‌ها	۵۸۵۶
تعداد عناصر	۵۷۶۰
نوع عنصر	پوسته ۱۸۱
حداکثر حالت‌ها	۱۰۰۰
کمترین مقدار	۰ هرتز
بیشترین مقدار	۳۰۰۰ هرتز
حل‌کننده	بلاک لنگزوس ^۱



شکل ۳: شبکه بندی المان محدود ساختار سیم پیچ گرادیان ساختار یک کویل گرادیان تک لایه‌ای

جدول ۲: اعتبار سنجی نتایج.

مد محیطی m	$n=10$			$n=1$		
	Ref. [25]	تحقیق حاضر	درصد اختلاف	Ref. [25]	تحقیق حاضر	درصد اختلاف
۱	۳۰/۴۵	۲۸/۶	۶/۰۸	۲۹/۴۴	۲۹/۶	-۰/۵۴
۲	۱۰/۶۶	۱۰/۱	۵/۲۵	۱۰/۱۵	۱۰/۵	-۳/۴۵
۳	۶/۱	۶/۲	-۱/۶۴	۶/۰۹	۶/۴	-۵/۰۹
۴	۷/۹۲	۷/۸	۱/۵۲	۷/۴۱	۸/۲	-۱۰/۶۶
۵	۱۲/۲	۱۲	۱/۶۴	۱۱/۶۷	۱۲/۵	-۷/۱۱
۶	۱۷/۷۷	۱۷/۴	۲/۰۸	۱۶/۷۵	۱۸/۲	-۸/۶۶
۷	۲۴/۳۶	۲۳/۹	۱/۸۹	۲۳/۰۴	۲۵	-۸/۵۱
۸	۳۲/۵	۳۱/۴	۳/۳۸	۳۰/۴۵	۳۲/۹	-۸/۰۵
۹	۴۰/۶	۴۰	۱/۴۸	۳۹	۴۱/۸	-۷/۱۸
۱۰	۵۰/۷۷	۴۹/۵	۲/۵	۴۸/۷۳	۵۱/۸	-۶/۳

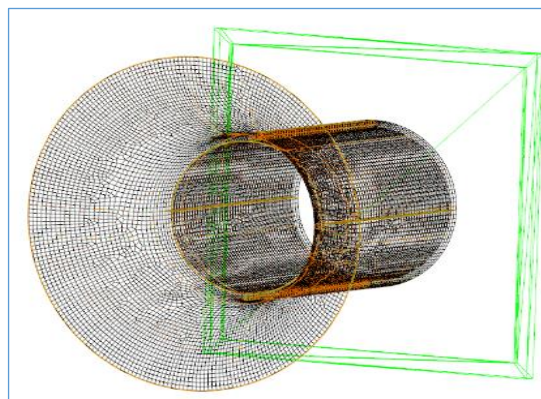
با توجه به شکل (۴) و جدول (۳)، خواص ماده الاستیک خطی شامل ضریب پواسون ۰/۴، چگالی $\frac{kg}{m^3}$ ۱۶۰۰، ضریب یانگ ۱۳ GPa و همچنین هوای درون و بیرون محفظه به عنوان دامنه سیال صوتی فشاری طبق خواص چگالی $\frac{kg}{m^3}$ ۱/۲ و سرعت صوت $\frac{m}{s}$ ۳۴۳ در شبیه‌سازی لحاظ گردید. اتصال بین ارتعاش و نویزها در مدل شبیه‌سازی نیز پیاده‌سازی شد. در هر دو انتهای مجاری، یک حجم هوای نیم‌کروی با شعاع ۱ متر برای شبیه‌سازی انتشار موج صوتی خارج از محفظه اضافه شد. یک لایه کاملاً هماهنگ به طول ۲۰ سانتی‌متر به مدل اضافه شد تا دامنه شبیه‌سازی بی‌نهایت را ممکن کند. یک تحریک هارمونیک با جریان متناوب با بزرگی ۵۰ آمپر برای راه اندازی از کویل گرادیان استفاده گردید. محدوده فرکانس ۰ تا ۳۰۰۰ هرتز برای پوشش بیشترین دنباله‌های استفاده شده در اسکنرهای ام آر آی انتخاب شد.

¹ Block Lanczos



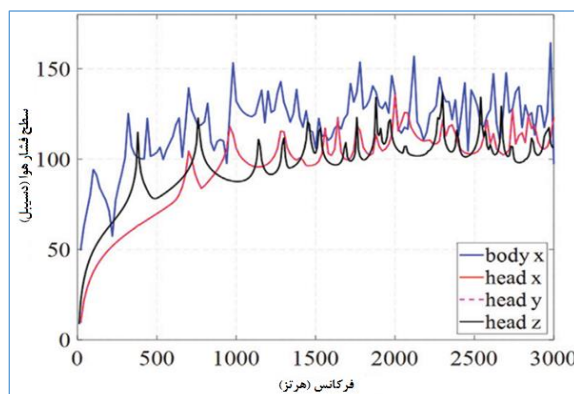
جدول ۳: مشخصات و تنظیمات برای آنالیز ارتعاشات مدل سازه.

اندازه عناصر (متر)	۰/۰۱۵
تعداد گره‌ها	۱۸۳۳۰
تعداد عناصر	۱۷۸۲۵
نوع عنصر	پوسته ۱۸۱
شرایط بار سرعت	۰/۰۰۰۱ m/s
کمترین مقدار	۱۰۰ هرتز
بیشترین مقدار	۳۰۰۰ هرتز
گام‌های فرکانس	۱۰۰ هرتز
حل کننده	سیسنویز

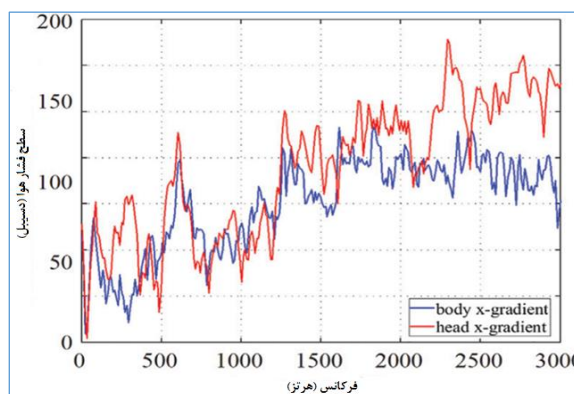


شکل ۴: مش المان محدود ساختار حفره اسکندر ام آر آی.

شکل‌های (۵) و (۶)، به ترتیب طیف ارتعاش سر و بدن را در دو حالت تحلیل مستقل و تحلیل کامل را نشان می‌دهند. در مقایسه طیف‌های ارتعاشی سر و بدن، طیف‌ها با استفاده از دو رویکرد تحلیل مستقل و کامل تحلیل گردیدند. در تحلیل مستقل شکل (۵) مشاهده شد که بدن به نظر می‌رسد طیف سطوح ارتعاشی بلندتر باشد. این می‌تواند به دلیل وجود حالت‌های بیشتری در طیف‌ها تحریک شده، باشد. با این حال، در تحلیل کامل شکل (۶) که عوامل واقع‌بینانه را مدنظر قرار می‌دهد و شامل اعمال شرط مرزی جفت‌شدگی بین پوسته استوانه‌ای و لرزش‌های سازه‌ای است، مشاهده گردید که سطوح فشار ارتعاش آکوستیک سر و بدن مشابه هستند. میانگین ارتعاش‌ها به ترتیب برابر با ۹۷/۶ دسی‌بل برای سر و ۹۰/۵ دسی‌بل برای کویل بدن اندازه‌گیری شدند. این مقایسه نشان می‌دهد که سر بیشتر در آسیب دیده‌گی به دلیل در معرض قرار گرفتن سطوح ارتعاشی قرار دارد.



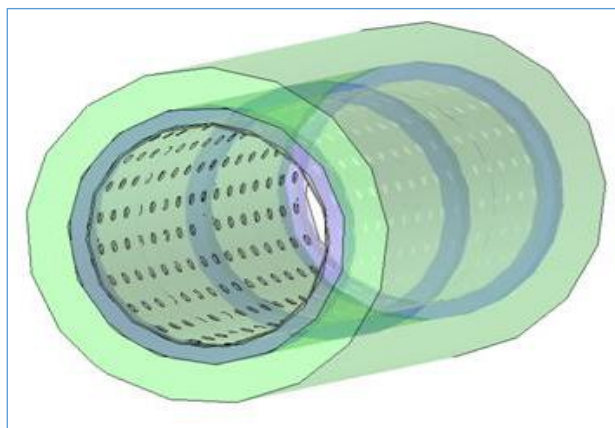
شکل ۵: مقایسه طیف سطوح ارتعاشی سر و بدن در تحلیل مستقل



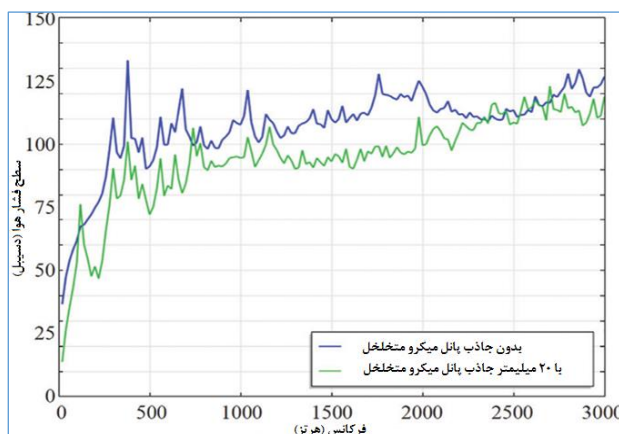
شکل ۶: مقایسه طیف سطوح ارتعاشی سر و بدن در تحلیل کامل



می‌توان مطابق شکل (۷) با قرار دادن لایه‌ای از جاذب در دیوار داخلی محفظه اسکنر سطوح ارتعاشی را کاهش داد. طیف میانگین ارتعاش‌های شبیه‌سازی شده در شکل (۸) نشان می‌دهد که کاهش میانگین نویز ۱۲/۵ دسی‌بل می‌باشد. با استفاده جاذب پانل میکرو متخلخل با ضخامت لایه جاذب به اندازه ۲۰ میلی‌متر، تلفات انتقالی در محدوده فرکانسی ۱۲۵ هرتز تا ۳ کیلوهرتز به میزان ۱۵ تا ۳۷ دسی‌بل کاهش می‌یابد.



شکل ۷: مدل گرادیان کویل و جاذب با پشتیبانی تحت حمایت محیطی



شکل ۸: کاهش صدا با جاذب و بدون جاذب

در اکثر اسکنرهای ام آر آی، بخشی نویزهایی که از انتهای باز دیواره می‌آیند به‌علاوه نویز صوتی مستقیماً از سیلندر کویل گرادیان از طریق دیواره شبه تونل به داخل حفره شبه تونل اسکنر منتقل می‌شوند. علاوه بر این، دیواره شبه تونل اسکنر معمولاً به سیلندر کویل گرادیان متصل می‌شود و بنابراین برخی از ارتعاشات به دیواره انتقال می‌یابد. این ارتعاشات منجر به لرزش دیواره و تولید امواج صوتی می‌شود. یک راه‌حل ممکن برای این مشکل طراحی یک جاذب پانل اضافی بین کویل گرادیان و دیواره شبه تونل اسکنر است. در این پژوهش نشان داده شد که تحلیل عددی کویل‌های گرادیان می‌تواند به‌طور دقیق و بر اساس تحلیل اکوستیک منجر به کاهش سطح ارتعاش و نویزها شود و در نهایت سبب عملکرد ایمن کویل گرادیان شود. از نظر مهندسی، بهترین راه حل برای مقابله با مشکل نویز صوتی طراحی مجدد ساختار کویل گرادیان است به گونه‌ای که صداهای ناخواسته تولید نشود؛ به عنوان مثال، با توازن نیروهای لورنتز تولید شده توسط جریان‌های متحرک می‌توان نویز و ارتعاش تولیدی را کاهش داد. با این حال، در عمل نصب آنها در سیستم‌های ام آر آی موجود ممکن است نسبت به روش‌های جایگزین کاهش نویز هزینه بر باشد.



نتیجه گیری

در این پژوهش، روش عددی و راه‌حل عملی برای کاهش نویز صوتی در کوئل‌های گرادیان‌ام آر آی مورد بررسی قرار گرفت و تمرکز بر روی روش‌های کاهش نویز غیرفعال بود. تحلیل وابستگی گرادیان اکوستیک به قدرت میدان مغناطیسی اصلی نشان می‌دهد که اکوستیک گرادیان و ارتعاشات در قدرت‌های میدان قابل کنترل هستند. نشان داده شد که یک جاذب با ضخامت یکنواخت ۲۰ میلی‌متر طراحی عملی است که تا حد قابل توجهی نویز صوتی را در بازه فرکانسی ۰ تا ۳ کیلوهرتز کاهش می‌دهد. با توجه به اینکه دستگاه‌ام آر آی یکی از محبوب‌ترین و پرکاربردترین دستگاه‌های تصویربرداری در حال حاضر است، بسیاری از شرکت‌های تولید کننده دستگاه‌ام آر آی به دنبال بهبود و کنترل این ارتعاشات هستند. لذا، نتایج حاصل از این مطالعه می‌تواند به عنوان یک راهنمای مفید برای شرکت‌های تولید کننده دستگاه‌ام آر آی در بهبود عملکرد و کارآمدی آن‌ها مفید باشد.

مراجع

- [1] Soedel, W., (2004). Vibrations of shells and plates. CRC Press.
- [2] Taracila, V., Edelstein, W. A., Kidane, T. K., Eagan, T. P., Baig, T. N., Brown, R. W., (2005). Analytical calculation of cylindrical shell modes: Implications for MRI acoustic noise. Concepts in Magnetic Resonance Part B: Magnetic Resonance Engineering: An Educational Journal, 25(1), pp 60-64.
- [3] Shao, W., Mechefske, C. K., (2005). Analysis of the sound field in finite length infinite baffled cylindrical ducts with vibrating walls of finite impedance. The Journal of the Acoustical Society of America, 117(4), pp 1728-1736.
- [4] Li, G., Mechefske, C. K., (2009). Structural-acoustic modal analysis of cylindrical shells: application to MRI scanner systems. Magnetic Resonance Materials in Physics, Biology and Medicine, 22, pp 353-364.
- [5] Mechefske, C. K., Wang, F., (2006). Theoretical, numerical, and experimental modal analysis of a single-winding gradient coil insert cylinder. Magnetic Resonance Materials in Physics, Biology and Medicine, 19, pp 152-166.
- [6] Edelstein, W. A., Hedeem, R. A., Mallozzi, R. P., El-Hamamsy, S. A., Ackermann, R. A., Havens, T. J., (2002). Making MRI quieter. Magnetic Resonance Imaging, 20(2), pp 155-163.
- [7] Mechefske, C. K., Wu, Y., Rutt, B. K., (2002). MRI gradient coil cylinder sound field simulation and measurement. J. Biomech. Eng., 124(4), pp 450-455.
- [8] Yao, G. Z., Mechefske, C. K., Rutt, B. K., (2004). Characterization of vibration and acoustic noise in a gradient-coil insert. Magnetic Resonance Materials in Physics, Biology and Medicine, 17, pp 12-27.
- [9] Wang, Y., Liu, F., Crozier, S., (2015). Simulation study of noise reduction methods for a split MRI system using a finite element method. Medical Physics, 42(12), pp 7122-7131.
- [10] Wang, Y., Liu, F., Weber, E., Tang, F., Jin, J., Tesiram, Y., Crozier, S., (2015). Acoustic analysis for a split MRI system using FE method. Concepts in Magnetic Resonance Part B: Magnetic Resonance Engineering, 45(2), pp 85-96.
- [11] Winkler, S. A., Alejski, A., Wade, T., McKenzie, C. A., Rutt, B. K., (2017). On the accurate analysis of vibroacoustics in head insert gradient coils. Magnetic resonance in medicine, 78(4), pp 1635-1645.
- [12] Sakhr, J., Chronik, B. A., (2019). Vibrational response of a MRI gradient coil cylinder to time-harmonic Lorentz-force excitations: An exact linear elastodynamic model for shielded longitudinal gradient coils. Applied Mathematical Modelling, 74, pp 350-372.



- [13] Sakhr, J., Chronik, B. A., (2021). Parametric modeling of steady-state gradient coil vibration: resonance dynamics under variations in cylinder geometry. *Magnetic Resonance Imaging*, 82, pp 91-103.
- [14] McJury, M. J., (1995). Acoustic noise levels generated during high field MR imaging. *Clinical Radiology*, 50(5), pp 331-334.
- [15] McJury, M. J., (2022). Acoustic noise and magnetic resonance imaging: a narrative/descriptive review. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 55(2), pp 337-346.
- [16] McJury PhD, M., Shellock PhD, F. G., (2000). Auditory noise associated with MR procedures: a review. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 12(1), pp 37-45.
- [17] Cho, Z. H., Park, S. H., Kim, J. H., Chung, S. C., Chung, S. T., Chung, J. Y., Wong, E. K., (1997). Analysis of acoustic noise in MRI. *Magnetic resonance imaging*, 15(7), pp 815-822.
- [18] Mechefske, C. K., Geris, R., Gati, J. S., Rutt, B. K., (2001). Acoustic noise reduction in a 4 T MRI scanner. *Magnetic Resonance Materials in Physics, Biology and Medicine*, 13, pp 172-176.
- [19] Cho, Z. H., Chung, S. T., Chung, J. Y., Park, S. H., Kim, J. S., Moon, C. H., Hong, I. K., (1998). A new silent magnetic resonance imaging using a rotating DC gradient. *Magnetic resonance in medicine*, 39(2), pp 317-321.
- [20] Crémillieux, Y., Wheeler-Kingshott, C. A., Briguet, A., Doran, S. J., (1997). STEAM-Burst: a single-shot, multi-slice imaging sequence without rapid gradient switching. *Magnetic resonance in medicine*, 38(4), pp 645-652.
- [21] Goldman, A. M., Gossman, W. E., Friedlander, P. C., (1989). Reduction of sound levels with antinnoise in MR imaging. *Radiology*, 173(2), pp 549-550.
- [22] McJury, M., Stewart, R. W., Crawford, D., Toma, E., (1997). The use of active noise control (ANC) to reduce acoustic noise generated during MRI scanning: some initial results. *Magnetic resonance imaging*, 15(3), pp 319-322.
- [23] Chen, C. K., Chiueh, T. D., Chen, J. H., (1999). Active cancellation system of acoustic noise in MR imaging. *IEEE transactions on biomedical engineering*, 46(2), pp 186-191.
- [24] Li, M., Lim, T. C., Lee, J. H., (2008). Simulation study on active noise control for a 4-T MRI scanner. *Magnetic resonance imaging*, 26(3), pp 393-400.
- [25] Li, M., Rudd, B., Lim, T. C., Lee, J. H., (2011). In situ active control of noise in a 4 T MRI scanner. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 34(3), pp 662-669.
- [26] Chambers, J., Bullock, D., Kahana, Y., Kots, A., Palmer, A., (2007). Developments in active noise control sound systems for magnetic resonance imaging. *Applied Acoustics*, 68(3), pp 281-295.
- [27] Mustafa, B. A. J., Ali, R., (1989). An energy method for free vibration analysis of stiffened circular cylindrical shells. *Computers & structures*, 32(2), pp 355-363.