



مطالعه عددی و تجربی مبدل فرکانس پایین کششی-خمشی کلاس IV

محمد کریمی^{*}، سید محمد رضا شایگانی^ب، عباس کلاته سیفوری^پ

^ا ایران، شیراز، فضل آباد، دانشگاه صنعتی شیراز، دانشکده مکانیک و هوافضا، ۷۱۵۵۷۱۳۸۷۶، دانشجوی دکتری مکانیک

^ب ایران، شیراز، ارم، دانشگاه شیراز، دانشکده مکانیک، ۷۱۹۶۴۸۴۳۳۴، کارشناسی ارشد مکانیک

^پ ایران، شیراز، فضل آباد، دانشگاه صنعتی شیراز، دانشکده فیزیک، ۷۱۵۵۷۱۳۸۷۶، کارشناسی ارشد فیزیک

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mo.karimi@sutech.ac.ir

چکیده

پرتونگاری آکوستیکی در زیر دریا یکی از چالش‌های بزرگ در دنیا می‌باشد. لذا از مبدل‌های الکتروآکوستیکی جهت ارسال و دریافت صوت در زیر آب استفاده می‌شود. در میان انواع مبدل‌های الکتروآکوستیکی، مبدل‌هایی که بتواند در فرکانس‌های پایین (کمتر از ۱ کیلو هرتز)، وزن کم (کمتر از ۲۵۰ کیلوگرم)، توان بالا و قابلیت استفاده در اعماق زیاد باشد بسیار حائز اهمیت است. طراحی مبدل‌های الکتروآکوستیکی در این بازه فرکانس، موجب حجم و هزینه بسیار بالا و در بسیاری از موارد غیر قابل ساخت بودن آن خواهد بود لذا جهت برآوردن این نیاز، از مبدل‌های الکتروآکوستیکی کششی-خمشی استفاده می‌شود. این نوع مبدل‌ها دارای دسته بندی مختلف بوده که هر کدام از دسته‌بندی‌ها کاربرد ویژه دارد. در این مقاله یک نمونه مبدل کششی-خمشی از نوع کلاس IV، در فرکانس پایین، مورد مطالعه عددی و تجربی قرار گرفته است. در ادامه از نرم‌افزار طراحی سالیدورکس جهت طراحی و تحلیل فرکانسی مبدل و بررسی مودهای ارتعاش مبدل استفاده شده است. در نهایت از نرم‌افزار عددی کامسول جهت تحلیل پارمترهای آکوستیکی از جمله حساسیت فرستندگی و نمودار فرکانس-مقاومت استفاده شده است. جهت اعتبارسنجی تحلیل عددی انجام شده، یک نمونه مبدل ساخته شده و تمامی پارمترهای آکوستیکی و فرکانسی استخراج شده و مشاهده شد که مطابقت بسیار خوبی بین نتایج عددی و نمونه تجربی، برقرار است.

کلمات کلیدی: مبدل کششی-خمشی؛ شبیه‌سازی عددی؛ مطالعه تجربی؛ سالیدورکس

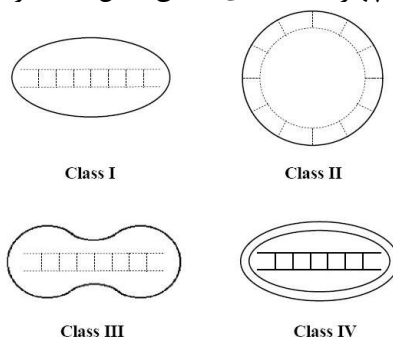
۱- مقدمه

توسعه مبدل‌های ۱ الکتروآکوستیکی از اوایل قرن بیستم شکل گرفت. مبدل به صورت کلی به وسیله الحاق می‌گردد که یک صورت از انرژی را به صورتی دیگر تبدیل بنماید. لذا مبدل الکتروآکوستیک به مبدلی الحاق می‌شود که انرژی الکتریکی را به آکوستیکی و بالعکس تبدیل بنماید. جهت انشار امواج در زیر آب، استفاده از مبدل الکتروآکوستیکی الزامی است. یکی از معایب اصلی مبدل‌های

الکتروآکوستیک کمبود توان کافی جهت برآورده کردن برد لازم است. فرکانس کاری صوت در زیر آب می‌تواند از 1 هرتز تا 1 مگا هرتز باشد. برای مثال می‌توان با استفاده از صوت در زیر آب به وسعت کیلومترها، ارتباط برقرار کرد ولی فرکانس به دلیل تلفات می‌بایست زیر 100 هرتز باشد (افزایش فرکانس موجب افزایش شدید تلفات در زیر آب می‌شود). همچنین در صورت استفاده از صوت در آب‌های کم عمق، فرکانس می‌بایست دارای در حدود چند صد هرتز با پالس کوتاه باشد تا بتوان بازگشت صوت را از صوت ارسالی تشخیص داد. این کاربردها نشان می‌دهد که دامنه بسیار زیادی از مبدل‌ها نیاز است.

۱-۱) مبدل کششی-خمشی

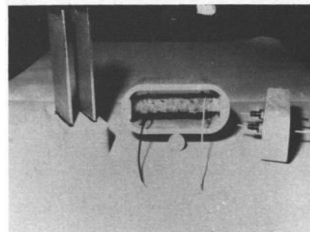
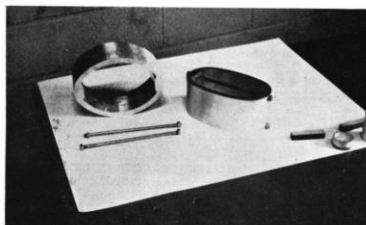
مبدل کششی-خمشی دقیقاً به گونه‌ای از مبدل‌ها الحاق می‌گردد که تحمل اعمال توان الکتریکی بالا در فرکانس پایین را داشته باشد. در این گونه مبدل‌ها، با کشش بسته پیزوسرامیک^۲، خمش در پوسته سازه اعمال می‌گردد. معمولاً فرکانس کاری این نوع مبدل، فرکانس اصلی خمش در پوسته سازه است. این نوع مبدل در مقایسه با طول موج انتشاری دارای ابعاد کوچک می‌باشد لذا به عنوان یک منبع انتشار صوت نقطه‌ای شناخته می‌شود [1-8]. در بحث دسته‌بندی مبدل‌های کششی-خمشی دو نظریه وجود دارد. نظریه پاگلیارینی-وایت^۳ که بر اساس شکل مبدل، چهار دسته بندی مطابق شکل (1) معرفی کرد.



شکل 1. دسته بندی مبدل کششی-خمشی بر اساس نظریه Pagliarini-White

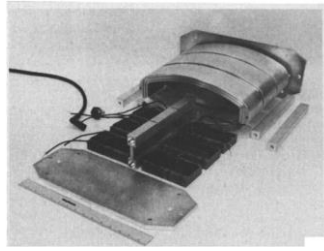
۲-۱) مبدل کششی-خمشی کلاس IV

این نوع کلاس از مبدل دارای یک پوسته بیضوی شکل است که می‌تواند به صورت محدب یا مقعر باشد. به این نوع از مبدل‌های کششی-خمشی به دلیل شباهت هندسی به استخوان، به عنوان استخوان سگ^۴ شناخته می‌شود. در این کلاس، از پیزوسرامیک‌های به شکل صفحه یا قطاعی^۵ استفاده می‌شود. با طراحی بهینه در این کلاس، دیافراگم‌های جانبی می‌توانند جابجایی بسیار خوبی را ایجاد کنند. از مدل مقعر در محیط‌های فشار بالا (عمق زیاد آب) می‌توان استفاده کرد. از جمله مزیت اصلی این نوع کلاس، ساخت آسان آن است. از معایب اصلی این کلاس تنظیم مقدار پیش فشار است. شکل‌های (2-6) نمونه مبدل کششی-خمشی کلاس IV را به صورت مقعر یا محدب شکل، نمایش داده است.

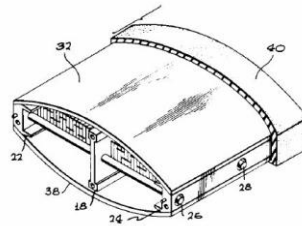


شکل 2. نمونه‌ای مبدل کششی-خمشی کلاس IV با پوسته بیضوی شکل محدب

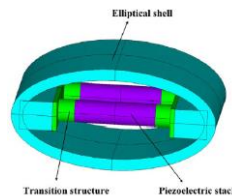
2 Piezoceramic stack
3 Pagliarini-White
4 Dog bone
5 segment



شکل 3. نمونه‌ای مبدل کششی-خمشی کلاس IV با پوسته بیضوی شکل محدب در طول زیاد



شکل 4. نمونه مبدل کششی-خمشی کلاس IV



شکل 5. شبیه سازی نمونه‌ای مبدل کششی-خمشی کلاس IV با پوسته بیضوی شکل محدب

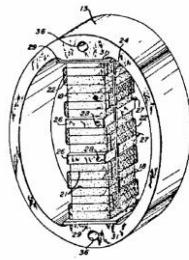


شکل 6. نمونه‌ای مبدل کششی-خمشی کلاس IV با پوسته بیضوی شکل مقعر

۳-۱ مطالعه پیشین

طراحی مبدل‌های فرکانس پایین، توان بالا دارای مشکلات عدیده‌ای می‌باشند [۸-۱]. این موارد به عمق کاری و ابعاد مبدل ارتباط دارد. جهت برآورده شدن توان آکوستیکی مورد نیاز، معمول است که از مبدل در فرکانس تشدید استفاده شود [۳]. ابعاد مبدل در حدود فرکانس تشدید ۱ کیلوهرتز ابعاد بسیار بزرگی خواهند داشت. برای استفاده از مبدل در اعماق کمتر از ۱۰۰۰ متر از مبدل استوانه‌ای استفاده می‌شود. علت این امر این است که سیال درون حفره وسط مبدل نیز قرار می‌گیرد [۹-۱۱]. در اعماق کم، معمولاً زیر ۲۰۰ متر معمولاً از یک کیسه داخلی استفاده می‌شود. این کیسه با افزایش عمق، هوای داخل محفظه را تحت فشار قرار داده تا فشار بیرونی ناشی از عمق آب جبران شود [۱۶-۱۲]. در اعماق بسیار کمتر، کمتر از ۱۰ متر، معمولاً استراکچر به گونه‌ای طراحی می‌گردد که تحمل فشار هیدرواستاتیکی را دارا باشد [۱۷-۱۸]. مبدل کششی-خمشی دقیقاً به گونه‌ای از مبدل‌ها الحاق می‌گردد که تحمل اعمال توان الکتریکی بالا در فرکانس پایین را داشته باشد. در این گونه مبدل‌ها، با کشش بسته پیروسرامیک، خمش در پوسته سازه اعمال می‌گردد. معمولاً فرکانس کاری این نوع مبدل، فرکانس اصلی خمش در پوسته سازه است. این نوع مبدل در مقایسه با طول موج انتشاری دارای ابعاد کوچک می‌باشد لذا به عنوان یک منبع انتشار صوت نقطه‌ای شناخته می‌شود. نظریه مبدل کششی-خمشی به

تولیس^۶ که در سال ۱۹۶۶ مقاله‌ای ارائه داد، منتسب شده است [۱۹-۲۰] نمونه مبدل کششی-خمشی که تولیس مورد مطالعه قرار داد به صورت شکل (۷) است.

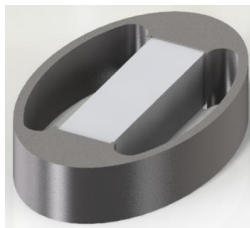


شکل ۷. نمونه مبدل کششی-خمشی تولیس در سال ۱۹۶۶

اگرچه که‌هایس^۷ در سال ۱۹۲۹ در آزمایشگاه تحقیقات دریایی نتایج مشابه بدست آورده بود [۲۱]. در سال ۱۹۵۰ رولت^۸ از نتایج تحقیقات تولیس جهت استفاده در پیزوسرامیک‌های استوانه‌ای استفاده کرد [۲۲-۲۴]. جونز^۹ دسته بندی پاگلیارینی-وایت را به سه دسته ا، ب و ج تقسیم کرد [۲۸]. مبدل کششی-خمشی کلاس ا که تحت عنوان مبدل بشکه‌ای شناخته می‌شود، به عنوان اولین مبدل‌های کاربردی استفاده می‌شود [۲۵]. پوسته این نوع مبدل به صورت شکل بشکه محدب یا مقعر طراحی می‌کنند. برای تعیین عملکرد مبدل‌های کششی-خمشی کلاس ا، رویستر از تکنیک مدل‌سازی کامپیوتری استفاده کرد [27-28]. در این مقاله یک نمونه مبدل کششی-خمشی کلاس IV مورد شبیه‌سازی عددی و مطالعه تجربی قرار گرفته است. در گام نخست مبدل در نرم افزار سالیدورکس، طراحی گردیده و پس از نهایی شدن مدل، با استفاده از مازول تحلیل ارتعاشاتی سالیدورکس مورد آنالیز عددی قرار گرفت. پس از تعیین فرکانس کاری، طرح مبدل وارد نرم‌افزار عددی کامسول شده و حساسیت فرستندگی مبدل، مورد تحلیل قرار گرفته است. نهایتاً نقشه‌های دو بعدی مبدل تهیه گردیده و یک نمونه ساخته شد. پیزوسرامیک‌های مورد استفاده از نوع PZT8 بوده و با استفاده از فیکسچر مناسب، درون پوسته فلزی قرار گرفته است. نهایتاً با استفاده از لاستیک پلی‌یورتان، مبدل پوشش دهی شده است. تمامی تست‌های حساسیت فرستندگی و نمودارهای فرکانسی در استخر مناسب، برای نمونه مبدل ساخته شده، استخراج گردیده و با نمودارهای شبیه‌سازی عددی مقایسه گردیده است. مطابقت بسیار عالی بین نتایج تست تجربی و شبیه‌سازی عددی مشاهده شده است.

۲- طراحی مدل در نرم‌افزار سالیدورکس و کامسول

مبدل کششی-خمشی کلاس IV که در نرم‌افزار سالیدورکس طراحی گردید مطابق شکل (۸) می‌باشد.



شکل ۸. مبدل کششی-خمشی کلاس IV طراحی شده در نرم‌افزار سالیدورکس

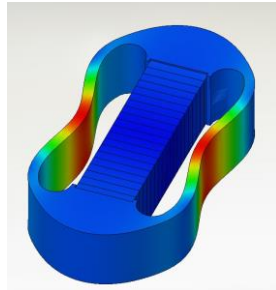
^۶ toulis

^۷ hayes

^۸ rolt

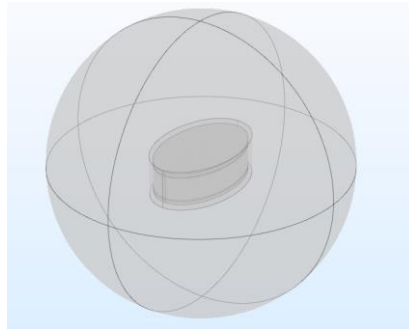
^۹ jones

همان‌طور که در شکل مشخص است، یک بسته پیزوسرامیک از جنس PZT8 در وسط پوسته فلزی از جنس آلومینیوم قرار گرفته است. کل مبدل نهایتاً توسط دو صفحه فلزی در دو سمت بسته شده و یک عدد گلند جهت اتصال کابل به صفحه فلزی جوشکاری شده است. با استفاده از ماژول تحلیل عددی نرم‌افزار سالیدورکس، تحلیل ارتعاشاتی بر روی مبدل انجام شده که نتیجه تحلیل مطابق شکل (۹) می‌باشد. میزان فرکانس رزونانس ۴.۸ کیلوهرتز می‌باشد.



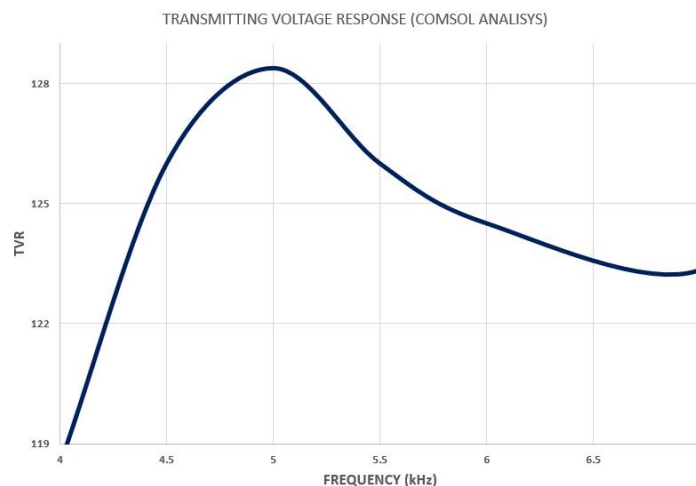
شکل 9. تحلیل ارتعاشاتی مبدل کششی-خمشی کلاس IV در نرم‌افزار سالیدورکس

همان‌طور که در شکل (۹) مشخص است، کشش در بسته پیزوسرامیک منجر به خمش در لبه‌های پوسته فلزی خواهد شد. پس از شبیه‌سازی ارتعاشاتی، مدل مطابق شکل (۱۰)، وارد نرم‌افزار کامسول شده است. برای استخراج نتایج حساسیت فرستندگی و میزان امپدانس، کره‌ی آب در اطراف مبدل (مطابق با تست تجربی) در نظر گرفته شده است.



شکل 10. مبدل کششی-خمشی کلاس IV در نرم‌افزار کامسول

نتایج تحلیل حساسیت فرستندگی مطابق شکل (۱۱) می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، ماکزیمم حساسیت فرستندگی در فرکانس رزونانس ۵ مشاهده شده و مقدار آن ۱۲۸ دبی می‌باشد.



شکل 11. حساسیت فرستندگی مبدل در نرم‌افزار کامسول

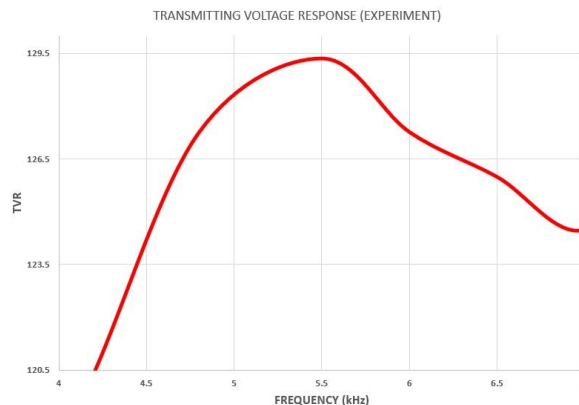
۳- ساخت نمونه مبدل کششی-خمشی کلاس IV

جهت اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی عددی سالیدوورکس و کامسول، یک عدد مبدل مطابق شکل (۱۲) ساخته شده است.



شکل 12. نمونه مبدل کششی-خمشی کلاس IV ساخته شده

جهت انجام تست‌های حساسیت فرستندگی، مبدل درون استخر بوده و یک عدد مبدل هیدروفن مرجع در فاصله معین از مبدل، قرار گرفته است. نتایج تست حساسیت فرستندگی مطابق شکل (۱۳) می‌باشد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، مقدار ماکزیمم حساسیت فرستندگی در فرکانس 5.5 کیلوهرتز و مقدار 129 دیبی می‌باشد.



شکل 13. حساسیت فرستندگی مبدل ساخته شده

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله انواع کلاس مبدل‌های کششی-خمشی با تاکید بر روی کلاس IV مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. در گام اول مبدل در نرم‌افزار سالیدوورکس طراحی گردیده و با استفاده از ماژول آنالیز ارتعاشات، فرکانس کششی-خمشی مبدل استخراج گردید. جهت تحلیل میزان حساسیت فرستندگی، از نرم‌افزار عددی کامسول استفاده شده و نمودار حساسیت فرستندگی حاصل شد. جهت اعتبارسنجی نتایج تحلیل عددی، یک عدد مبدل ساخته شده و پس از پوشش گذاری با لاستیک پلی‌یورتان، مبدل درون آب قرار گرفته و نمودار حساسیت فرستندگی به صورت تجربی به دست آمد. با مقایسه بین نتایج عددی و تجربی مشاهده شد که میزان اختلاف فرکانس رزونانس 9 درصد بوده و میزان اختلاف در ماکزیمم حساسیت فرستندگی زیر 2 درصد می‌باشد که این نشان‌دهنده مطابقت بسیار عالی بین تست تجربی و شبیه‌سازی عددی می‌باشد.

مراجع

1. D. Stansfield, Underwater Electroacoustic Transducers, (Bath University Press and Institute of Acoustics, 1990), Chapter 11.

2. O. B. Wilson, Introduction to Theory and Design of Sonar Transducers, (Peninsula Publishing, 1988), Chapter 6.
3. J.-N. Decarpigny, B. Hamonic, and O. B. Wilson, 'The Design of Low-Frequency Underwater Acoustic Projectors: Present Status and Future Trends', IEEE J. Oceanic Eng., 16(1), 107-122, (1991).
4. R. Timme, A. M. Young, and J. E. Blue, 'Transducer Needs for Low Frequency Sonar', in Power Transducers for Sonics and Ultrasonics, B. Harmonic, O. B. Wilson, and J.-N. Decarpigny, eds., (Springer-Verlag, 1988), 143-159.
5. D. Boucher, 'New Solutions for Low Frequency Sonar Projectors', in Transducers for Sonics and Ultrasonics, M. D. McCollum, B. F. Hamonic, and O. B. Wilson, eds. (Technomic Publishing Co. Inc., 1993), 17-37.
6. D. Boucher, 'Trends and Problems in Low Frequency Sonar Projector Design', in Proc.
7. Power Sonic and Ultrasonic Transducers Design, B. Hamonic and J.-N. Decarpigny, eds. (Spring-Verlag, 1988), 100-120.
8. R. S. Woollett, 'Trends and Problems in Sonar Transducer Design', IEEE Trans Ultrasonics Eng., 10, 116-124, (1963).
9. R. S. Woollett, 'Basic Problems Caused by Depth and Size Constraints in Low-Frequency Underwater Transducers', J. Acoust. Soc. Am., 68(4), 1031-1037, (1980).
10. Y. Le Gall, D. Boucher, X. Lurton, and A. M. Bruneau, 'Optimization of the Janus- Helmholtz Transducer for Ocean Acoustic Tomography', in Proc. Underwater Acoustics, L. Bjørnø, ed., (European Commission, 1994), Vol. 1, 527-530.
11. Y. Le Gall, D. Boucher, X. Lurton, and A. M. Bruneau, 'Great Depth, High Efficiency, Broadband, Reliable Low Frequency Transducer for Acoustical Tomography', Proc. OCEANS '94 , 2, 284-288, (1994).
12. G. W. McMahon and B. A. Armstrong, 'A Pressure-compensated Ring-Shell Projector' Conf. Proc. I. O. A., Transducers for Sonar Applications, 9.1-9.8, (1980).
13. B. A. Armstrong and G. W. McMahon, 'Discussion of the Finite-Element Modelling and Performance of Ring-Shell Projectors', IEE Proceedings, 131(F), 275-279, (1984).
14. G. W. McMahon, 'Ring-Shell Projector', U. S. Patent 4,858,206, (15 August 1989); reviewed in J. Acoust. Soc. Am., 87(4), 1834, (1990).
15. G. W. McMahon, 'The Ring-Shell Flextensional Transducer (Class V)', in Power Transducers for Sonics and Ultrasonics, B. Harmonic, O. B. Wilson, and J. N. Decarpigny, eds., (Spring-Verlag, 1991), 60-74.
16. D. J. W. Hardie, 'The Effect of Depth Pressure on a Flextensional Transducer', Proc. I. O. A., 12(4), 40-48, (1990).
17. J. R. Oswin and A. Turner, 'Design Limitations of Aluminium Shell, Class IV Flextensional Transducers', Proc. I. O. A., 6(3), 94-101, (1984).
18. J. Oswin and J. Dunn, 'Frequency, Power, and Depth Performance of Class IV Flextensional Transducers', in Power Sonic and Ultrasonic Transducers, B. Hamonic and J.N. Decarpigny, eds., (Springer-Verlag, 1987), 121-133.
19. W. J. Toulis, 'Flexural-Extensional Electromechanical Transducer', U.S. Patent 3,277,433 (4 October 1966); reviewed in J. Acoust. Soc. Am., 41(3), 764, (1967).
20. W. J. Toulis, 'Flexural-Extensional Electromechanical Transducer', U.S. Patent 3,274,537 (20 September 1966); reviewed in J. Acoust. Soc. Am., 41(3), 764, (1967).
21. H. C. Hayes, 'Sound Generating and Directing Apparatus', U.S. Patent 2,064,911 (22 December 1936).

22. W. J. Toulis, 'Acoustic Refraction and Scattering with Compliant Elements. I. Measurements in Water', *J. Acoust. Soc. Am.*, 21(9), 1021-1026, (1957).
23. W. J. Toulis, 'Acoustic Refraction and Scattering with Compliant Elements. II. Analysis', *J. Acoust. Soc. Am.*, 29(6), 1027-1033, (1957).
24. W. J. Toulis, 'Electromechanical Coupling and Composite Transducers', *J. Acoust. Soc. Am.*, 35(1), 74-80, (1963); R. S. Woollett, 'Comments on "Electromechanical Coupling and Composite Transducers"', *J. Acoust. Soc. Am.*, 35(11), 1837-1838, (1963); W. J. Toulis, 'Author's Response to Comments by R. S. Woollett', *J. Acoust. Soc. Am.*, 35(11), 1838, (1963).
25. D. F. Jones, 'Flextensional Barrel-Stave Projectors', in *Transducers for Sonics and Ultrasonics*, M. D. McCollum, B. F. Hamonic, and O. B. Wilson, eds., (Lancaster, PA: Technomic Publishing Co. Inc., 1993), 150-159.
26. E. F. Rynne, 'Innovative Approaches for Generating High Power, Low Frequency Sound', in *Transducers for Sonics and Ultrasonics*, M. D. McCollum, B. F. Hamonic, and O. B. Wilson, eds., (Lancaster, PA: Technomic Publishing Co. Inc., 1993), 38-49.
27. L. H. Royster, 'Flextensional Underwater Acoustic Transducer', *J. Acoust. Soc. Am.*, 43(3), 671-682, (1969).
28. J. N. Boone, L. H. Royster, and R. A. Nelson, 'Mathematical Model for a Class II Flextensional Underwater Acoustic Transducer', *J. Acoust. Soc. Am.*, 47(1), 71 (abs), (1970).
29. F. R. Abbott, 'High Fidelity Underwater Music Projector', U. S. Patent 3,718,897 (27 May 1971); reviewed in *J. Acoust. Soc. Am.*, 54(2), 568, (1973).