

کاربرد امواج آکوستیک در شناسایی مقدار و مکان گازهای خروجی در لوله انتقال گاز

کاوه قربانیان (دانشیار)

فاطمه بهمنی (کارشناس ارشد)
دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف

در این نوشتار روشی برای نشت‌یابی براساس نحوه انتشار امواج آکوستیک در لوله‌های گاز پیشنهاد شده است. بدین منظور، از موازنه انرژی آکوستیک امواج صوتی به‌عنوان ابزاری برای ردیابی وقوع نشت، تخمین مکان نشت، و نیز میزان دبی آن استفاده شده است. با دانستن مقدار انرژی آکوستیک ورودی به لوله و میزان انعکاس، عبور و جذب انرژی از محل نشتی و تغییرات ایجاد شده در دامنه‌ی موج، مکان و میزان نشت تقریب زده می‌شود. معادلات حاکم بر میدان آکوستیک در لوله‌ی با وجود نشت نوشته شده و با استفاده از روش تفاضل محدود حل شده است. میزان انعکاس، عبور و جذب انرژی آکوستیک به علت نشتی به‌ازای تغییرات فرکانس موج و همچنین اندازه‌ی نشت نشان داده شده است. تأثیر اندازه و مکان‌های مختلف نشت بر چگونگی انتشار موج فشاری آکوستیک بررسی شده است.

ghorbanian@sharif.edu

واژگان کلیدی: امواج آکوستیک، نشتی لوله‌های گاز، امیدانس.

مقدمه

نشتی قابل تشخیص به‌وسیله‌ی روش نشت‌یابی، زمان پاسخ یا مدت زمانی که صرف تشخیص یک نشتی با اندازه‌ی معین می‌شود، قابلیت تعیین محل نشتی و دقت آن، تعیین حجم سیال خارج شده از محل نشتی، تعداد تشخیص‌های اشتباه، حساسیت به شرایط جریان، قابلیت کاربرد در شبکه‌های پیچیده‌ی خط لوله، و هزینه‌ی انجام روش.

«بازرسی فیزیکی خط لوله» با چشم مستقیماً یا از راه دور انجام می‌گیرد. همه‌ی کاربران خطوط لوله موظف‌اند به‌منظور ردیابی هرگونه آثار نشتی یا صدمات طبیعی سیستم‌های خود را در بازه‌های زمانی منظم مورد بازرسی قرار دهند. کیفیت این روش نشت‌یابی به عواملی همچون اندازه‌ی نشتی، تعداد بازرسی در زمان مشخص، نوع بازرسی انجام شده، شرایط خاک، و مهارت شخص بازرسی بستگی دارد. در «روش جدول‌بندی دستی»، برای مشاهده‌ی آثار نشتی از اندازه‌گیری کمیت‌های جریان (مانند دبی و فشار) استفاده می‌کنند. در این روش به‌منظور مشخص کردن میزان سیال خارج شده از لوله از محاسبات دستی بهره می‌برند. با استفاده از این محاسبات سیال وارده به خطوط لوله با سیال خارج شده از آن مقایسه می‌شود. «روش‌های محاسباتی» نیز مبتنی بر ایجاد تغییرات در محیط خارجی یا محیط داخلی لوله هستند. در روش‌های مبتنی بر ایجاد تغییرات در محیط خارجی، با نصب حساسه‌هایی (سنسورهای) در نقاط مختلف خطوط لوله، وقوع نشتی هشدار داده می‌شود. هزینه‌ی این سیستم‌ها و پیچیدگی نصب آنها معمولاً زیاد است و بنابراین کاربرد آنها به نواحی پرخطر، مانند نواحی نزدیک رودخانه‌ها و مناطق حفاظت‌شده‌ی طبیعی، محدود می‌شود. در این روش معمولاً از حساسه‌های مایع، حساسه‌های بخار یا گاز، حساسه‌های دما و حساسه‌های آلودگی صوتی استفاده

هم‌زمان با گسترش کاربرد گاز طبیعی به‌عنوان سوخت، شبکه‌ی خطوط لوله‌ی انتقال‌دهنده‌ی گاز از محل استخراج و پالایش به محل مصرف نیز رو به توسعه است. در حال حاضر خطوط لوله متداول‌ترین روش به‌کارگیری گاز طبیعی است و طی ۴۰ سال اخیر شبکه‌های بزرگ خطوط لوله در بسیاری از کشورها ساخته شده است. ردیابی نشتی در این خطوط به‌منظور کمینه‌سازی میزان تلفات جانی، آلودگی‌های زیست‌محیطی، ضررهای اقتصادی و در نهایت برای جلوگیری یا کنترل سریع حوادث احتمالی از اهمیت ویژه‌ی برخوردار است^[۱]. نشتی در لوله‌های گاز طبیعی ممکن است بر اثر خوردگی، وقوع عوامل طبیعی (مانند زلزله، سیل و طوفان)، یا بر اثر فعالیت‌های انسانی در تجهیزات ساخت‌وساز، وسایل حمل‌ونقل و وسایل حفاری ایجاد شود^[۲]. اگرچه ممکن است آسیب وارده جدی به نظر نرسد، می‌تواند باعث ایجاد نشتی بر اثر خوردگی درون شکستگی‌های ناشی از تنش در خط لوله شود. بیشتر خطوط انتقال گاز از جنس فولاد روکش دار هستند و وارد شدن آسیب به پوشش محافظتی لوله‌ها باعث ایجاد خوردگی در لوله و نهایتاً نشتی در آنها می‌شود. بنابراین می‌توان «خوردگی» را مهم‌ترین عامل نشتی در لوله‌ها دانست.

چون بیشتر سیالاتی که با خطوط لوله منتقل می‌شوند خطرناک‌اند، نصب سیستم‌های ردیابی نشتی و تشخیص محل آن از اهمیت بالایی برخوردار است^[۳]. به‌طور کلی روش‌های مختلفی برای نشت‌یابی در لوله‌ها وجود دارد که از رایج‌ترین آنها می‌توان به بازرسی فیزیکی خطوط لوله، جدول‌بندی دستی، و روش‌های محاسباتی اشاره کرد. عمده‌ترین معیارها برای ارزیابی این روش‌ها عبارت‌اند از: کم‌ترین اندازه‌ی

می‌برند. تشخیص وجود مایع در محیط خارج از لوله به وسیله حساسه‌های الکتروشمیایی یا فیبر نوری صورت می‌گیرد. همچنین تشخیص خروج گاز یا بخار با نصب لوله‌های کوچکی به موازات لوله اصلی امکان‌پذیر است. روش‌های آلودگی صوتی نیز یکی از روش‌های محاسباتی مبتنی بر ایجاد تغییرات در محیط داخلی است که در آن از صدای ایجاد شده به وسیله جریان آشفته خروجی از محل نشستی برای ردیابی استفاده می‌کنند. در این دسته از روش‌ها، الگوریتمی که ورودی آن کمیت‌های اندازه‌گیری شده توسط حساسه (نظیر فشار، دما، دبی، چگالی...) است، برای ردیابی نشستی استفاده می‌شود. روش‌های تعادل جرمی یا حجمی^۱، روش مدل دینامیکی^۲، نرخ تغییر فشار و جریان از این دسته روش‌ها هستند. حساسه‌هایی که با فاصله دور از هم روی لوله نصب شده‌اند، اطلاعات را به مرکز کنترل منتقل می‌کنند. در مرکز کنترل، از این اطلاعات برای اجرای الگوریتم‌های نشستی‌یابی استفاده می‌شود. کیفیت اطلاعات جمع‌آوری شده تأثیر زیادی بر قابلیت‌های روش محاسباتی در ردیابی نشستی خواهد داشت^۳. در این پروژه از تغییرات ایجاد شده در امواج آکوستیک بر اثر وجود نشستی در لوله -- به‌عنوان ابزاری برای تشخیص وجود نشستی و تعیین مکان و میزان آن -- استفاده شده است.

مطالعه و بررسی منابع موجود حاکی از آن است که بیشتر روش‌های آکوستیک که تاکنون برای نشستی‌یابی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، مبنای تجربی دارند. برای مدل‌سازی نشستی با استفاده از امواج آکوستیک، تلاش‌های پراکنده‌یی (به‌صورت نظری) صورت گرفته است. در سال ۱۹۸۰ خط لوله را به‌صورت یک وسیله موسیقی بادی بزرگ مدل، و امواج ایستاده^۴ را براساس تابعی از مکان نشستی محاسبه کردند^۵. پس از آن در تحقیقات به‌عمل آمده در سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۴، ضمن اصلاح شیوه‌های مورد استفاده برای ردیابی نشستی در لوله‌های پلاستیکی انتقال آب، و نیز با استفاده از روابط ویژه، سرعت انتشار موج و میرایی^۶ آن در لوله‌های پلاستیکی انتقال آب محاسبه شدند^۷. در سال ۱۹۸۰ از مفهوم ردیابی امواج کشسان با دامنه‌ی کم در بدنه‌ی شیر، که به‌علت جریان مغشوش ناشی از جت سیال خروجی از شیر ایجاد می‌شود، استفاده کردند^۸.

به‌طور کلی برای ردیابی نشستی با استفاده از امواج آکوستیک دو روش عمده وجود دارد. روش اول مبتنی بر این اصل است که «سیال خارج‌شونده از حفره ایجاد شده در لوله، علائم صوتی ایجاد می‌کند». در این روش دو حساسه در دو طرف نشستی قرار می‌دهند و علائم ناشی از آن را دریافت می‌کنند. با توجه به متفاوت بودن فاصله‌ی حساسه‌ها از محل نشستی، دریافت این علائم در زمان‌های مختلف صورت می‌گیرد. این علامت‌ها به یک سیستم پردازش منتقل و تحلیل می‌شوند^۹. روش دیگر، بررسی تغییر امپدانس خطوط لوله است که مستلزم یک موج صوتی به‌عنوان ورودی برای ایجاد انرژی آکوستیک است^{۱۰}. در این پروژه سعی بر آن است تا وجود نشستی در لوله با استفاده از روش دوم -- تغییر امپدانس خط لوله به‌صورت نظری -- مدل‌سازی شود.

نظریه و روش حل مسئله

به‌طور کلی چگونگی پیشروی و نحوه‌ی تغییرات موج صوتی ورودی نسبت به زمان و مکان به‌صورت هارمونیک در نظر گرفته می‌شود. طول موج صوتی ورودی به‌لوله بزرگ‌تر از قطر لوله و قطر حفره‌ی نشستی است، و بنابراین می‌توان امواج صوتی را به‌صورت صفحه‌یی فرض کرد. اگر از اثرات لزجت دیواره، مغشوش بودن رژیم جریان، و دیگر عوامل میراگر موج صوتی صرف‌نظر کنیم، دامنه‌ی موج تا ابتدای محل

نشستی ثابت خواهد ماند. چگونگی تغییرات ایجاد شده در دامنه‌ی موج در محل نشستی مجهول خواهد بود. تغییرات موج ورودی به‌ناحیه‌ی نشستی نسبت به زمان همچنان هارمونیک است و چگونگی این تغییرات نسبت به مکان در امتداد محور لوله مجهول خواهد بود. برای به‌دست آوردن این تغییرات پس از مجزا کردن محل نشستی، معادلات شبه یک‌بعدی جرم، مقدار حرکت، و انرژی را برای این ناحیه می‌نویسیم. جریان خروجی از لوله در محل نشستی به‌صورت یک عبارت منفی در سمت راست معادله‌ی جرم اعمال می‌شود. معادلات برای حجم کنترل بسیار کوچکی از ناحیه‌ی نشستی نوشته شده و برای این منظور از متوسط دبی خروجی از لوله استفاده می‌شود. پس از ورود موج صوتی به لوله، کمیت‌های چگالی، سرعت، فشار و آنتالپی سکون دچار اغتشاشات آکوستیک خواهند شد. بنابراین هر یک از این کمیت‌ها در معادلات بقاء به‌صورت مجموع مقدار متوسط و مقدار اغتشاشی جایگزین می‌شوند. با استفاده از معادله‌ی انرژی و معادلات حالت، معادلات جرم و مقدار حرکت برحسب دو مجهول دامنه‌ی اغتشاشات آکوستیک سرعت و آنتالپی سکون به‌دست می‌آیند.

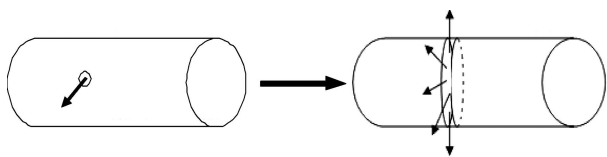
برای نوشتن معادلات حاکم، جریان در حال حرکت در لوله و جریان خروج از محل نشستی به‌صورت تراکم‌ناپذیر، و سیال موجود در لوله به‌صورت گاز ایده‌آل در نظر گرفته می‌شوند.

مدل‌سازی نشستی به‌صورت متقارن محوری

می‌دانیم که وجود یک حفره‌ی کوچک در دیواره‌ی لوله‌یی که سیال در آن جریان دارد، مسئله‌یی نامتقارن و سه‌بعدی است که مدل‌سازی تحلیلی آن به‌سادگی ممکن نیست. برای تسهیل مدل‌سازی نشستی باید مسئله را به یک مسئله‌ی متقارن محوری تبدیل کنیم. برای این منظور فرض می‌کنیم که جریان از حلقه‌ی محیطی موجود در دیواره‌ی لوله خارج می‌شود و دبی خروج از این حلقه برابر با دبی خروجی از حفره است. همچنین باید امپدانس حلقه با امپدانس حفره در دیواره‌ی لوله برابر باشد (شکل ۱). بدین ترتیب مسئله‌ی سه‌بعدی به مسئله‌ی یک‌بعدی متقارن محوری تبدیل می‌شود.

معادلات آکوستیک حاکم

برای به‌دست آوردن معادلات آکوستیک در یک لوله‌ی دارای نشستی، از مدل یک‌بعدی استفاده شده است. در مقطع بالادست لوله جریان متوسط و دائمی با سرعت \bar{u} وجود دارد، و نیز جریانی با سرعت یکنواخت و متوسط \bar{v} در محل نشستی از لوله خارج می‌شود. از آنجا که عدد ماخ هر دو جریان کوچک است، می‌توان دمای سکون مربوط به دو جریان را یکسان فرض کرد. بنابراین چگالی متوسط همه‌جا یکسان و برابر با $\bar{\rho}$ ، و سرعت متوسط صوت برابر با \bar{c} است. نشستی سه‌بعدی به‌صورت دایره‌یی کوچک با قطر D_1 فرض شده است. سطح مقطع لوله یکنواخت و برابر با S_{pipe} ، و سطح مقطع حفره‌ی نشستی برابر با S_{leak} است. سرعت جریان در مقطع پایین‌دست



شکل ۱. مدل‌سازی نشستی به‌صورت متقارن محوری.

لوله از رابطه ۱ به دست می آید (شکل ۲).

$$\bar{u}_d = \bar{u}_u - \left(\frac{S_{leak}}{S_{pipe}} \right) \bar{v} \quad (1)$$

متوسط دبی خروجی بر واحد طول نیز از رابطه ۲ به دست می آید:

$$Q = \frac{S_{leak} \bar{v}}{D_l} \quad (2)$$

که در آن نقطه $x = 0$ محل تقاطع مقطع بالادست لوله با محل نشستی است.

اغتشاشات آکوستیک به صورت اغتشاشات فشاری هارمونیک در مقطع بالادست لوله ایجاد می شوند. فرکانس این امواج به قدری پایین در نظر گرفته شده است که فقط امواج صفحه‌یی بتوانند پیشروی کنند. به علت وجود جریان در لوله بهتر است امواج آکوستیک با استفاده از اغتشاش در آنتالپی سکون بررسی شوند [۱۲].

$$B' = \frac{p'}{\rho} + \bar{u} u' \quad (3)$$

اعداد ماخ در قسمت بالادست و پایین دست لوله چنین تعریف می شوند:

$$M_u = \frac{\bar{u}_u}{\bar{c}} \quad (4)$$

$$M_d = \frac{\bar{u}_d}{\bar{c}} \quad (5)$$

همچنین عدد ماخ در محل نشستی طبق رابطه ۶ تعریف می شود.

$$M_l = \frac{\bar{v}}{\bar{c}} \quad (6)$$

عدد موج برای امواج راست رو و چپ رو در شرایطی که در لوله جریان سیال وجود داشته باشد، چنین محاسبه می شود:

$$k_u^+ = \frac{k}{1 + M_u} \quad k_u^- = \frac{k}{1 - M_u} \quad (7)$$

$$k_d^+ = \frac{k}{1 + M_d} \quad k_d^- = \frac{k}{1 - M_d}$$

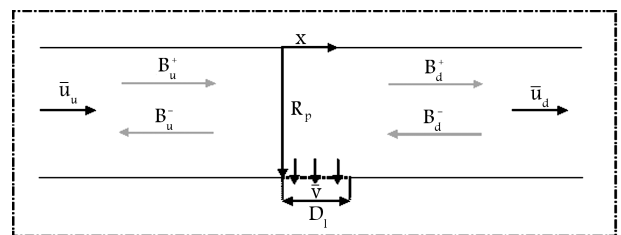
که در آنها k عدد موج در سیال ساکن و برابر با $\frac{\omega}{\bar{c}}$ است.

اغتشاشات در قسمت بالادست لوله مطابق رابطه ۸ بیان می شود.

$$B'(x, t) = \hat{B}(x) \exp[i\omega t] = B_u^+ \exp[i(\omega t - k_u^+ x)] + B_u^- \exp[i(\omega t + k_u^- x)] \quad x < 0 \quad (8)$$

که در آن B_u^+ دامنه موج راست رو، و B_u^- دامنه موج چپ رو در مقطع بالادست لوله است. لازم است یادآور شویم که فقط قسمت حقیقی این اغتشاشات معنا و مفهوم فیزیکی دارند. همچنین در قسمت پایین دست لوله نیز مانند قسمت بالادست اغتشاش در آنتالپی سکون چنین محاسبه می شود:

$$B'(x, t) = \hat{B}(x) \exp[i\omega t] = B_d^+ \exp[i(\omega t - k_d^+ x)] + B_d^- \exp[i(\omega t + k_d^- x)] \quad x > D_l \quad (9)$$



شکل ۲. امواج آکوستیک و کمیت‌های جریان در محل نشستی.

دامنه‌ی دو موج چپ رو و راست رو در قسمت پایین دست لوله (B_d^\pm) براساس شرط مرزی مشخص شده در این قسمت به هم مربوط می شوند. اگر R_d ضریب انعکاسی شرایط انتهایی نشستی باشد، یک رابطه کلی به صورت $B_d^- = R_d B_d^+$ بیان می شود.

برای بی بعد کردن معادلات از متغیرهای بی بعد زیر استفاده شده است:

$$x \rightarrow \frac{x}{D_l} \quad t \rightarrow \frac{\bar{c}t}{D_l} \quad u \rightarrow \frac{u}{\bar{c}} \quad v \rightarrow \frac{v}{\bar{c}} \quad (10)$$

$$B \rightarrow \frac{B}{\bar{c}^2} \quad \rho \rightarrow \frac{\rho}{\bar{\rho}} \quad p \rightarrow \frac{p}{\bar{\rho}\bar{c}^2}$$

برای امواج آکوستیک صفحه‌یی پیش رونده در سیال، رابطه‌ی بین سرعت ذرات و نوسانات آنتالپی سکون چنین محاسبه می شود:

$$u' = \pm \frac{B'}{\sqrt{\pm M}} \quad (11)$$

در ناحیه‌یی که نشستی وجود دارد $(0 < x < 1)$ ، آنتالپی سکون و سرعت تبدیل می شوند به:

$$B(x, t) = \bar{B} + \hat{B}(x) e^{ikD_l t} \quad (12)$$

$$u(x, t) = \bar{u} + \hat{u}(x) e^{ikD_l t} \quad (13)$$

در ناحیه‌ی نشستی سرعت متوسط محوری تابعی از x است و طبق رابطه ۱۴ به دست می آید. در واقع فرض می شود که با پیشروی سیال در طول ناحیه‌ی نشستی و خروج جرم از لوله، سرعت محوری جریان در لوله به صورت خطی کاهش یابد.

$$\bar{u}(x) = M_u - \frac{C D_l}{S_{pipe}} M_l x \quad (14)$$

حال باید معادلات بقای جرم و مقدار حرکت برای ناحیه‌یی که در آن نشستی وجود دارد، نوشته شوند. برای این کار یک حجم کنترل به طول dx منظور، و معادلات برای آن نوشته شده است. مانند کمیت‌های دیگر، سرعت جریانی که از محل نشستی خارج می شود به صورت حاصل جمع یک جریان متوسط و یک سرعت اغتشاشی هارمونیک است.

$$v(x, t) = \bar{v} + \hat{v}(x) e^{ikD_l t} \quad (15)$$

معادله‌ی بقای جرم برای حجم کنترل، با در نظر گرفتن جریان خروجی به علت نشستی تبدیل خواهد شد به:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u) = - \frac{C D_l}{S_{pipe}} \rho v \quad (16)$$

همچنین معادله‌ی مقدار حرکت چنین نوشته می شود:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (17)$$

که یک معادله‌ی اولیای یک بعدی است. از آنجا که اغتشاشات به صورت همسان فرض شده‌اند، خواهیم داشت:

$$\rho' = B' - \bar{u} u' \quad (18)$$

با جایگذاری کمیت‌های موجود در دو معادله‌ی جرم و مقدار حرکت به صورت مجموع مقدار متوسط و مقدار هارمونیک برحسب زمان، و ساده کردن آنها معادلات اغتشاشی

که در ناحیه‌ی نشستی حاصل می‌شوند عبارت‌اند از:

$$ikD_l \hat{B} + \nu \bar{u} \hat{B} + (1 - \bar{u}^2) \frac{d\hat{u}}{dx} = -\frac{CD_l}{S_{pipe}} \hat{v} \quad (19)$$

$$ikD_l \hat{u}(x) + \frac{d\hat{B}}{dx} = 0 \quad (20)$$

برای جایگذاری \hat{v} در معادله‌ی بالا با استفاده از نظریه‌ی هوا از ضریب هدایت رایلی استفاده می‌شود^[۱۳].

$$R.C. = -ikD_l \frac{\hat{v} S_{leak}}{\hat{B}^+ - \hat{B}^-} \quad (21)$$

$$R.C. = \nu R_p (\gamma - i\delta) \quad (22)$$

براساس این نظریه، کمیت‌های γ و δ برحسب عدد استروهال بیان می‌شوند:

$$St = \frac{\omega R_p}{U} \quad (23)$$

کمیت‌های مشخصه برای امواج پیش‌رونده به راست و چپ چنین تعریف می‌شوند:

$$\psi^+ = \frac{1}{\nu} (1 + \bar{u}) [\hat{B} + (1 - \bar{u}) \hat{u}] \quad (24)$$

$$\psi^- = \frac{1}{\nu} (1 - \bar{u}) [\hat{B} - (1 + \bar{u}) \hat{u}] \quad (25)$$

برای امواج راست‌رونده $\hat{B} = \psi^+$ و $\psi^- = 0$ است و برای امواج چپ‌رونده $\psi^+ = 0$ و $\hat{B} = \psi^-$ است. معادلات و شرایط مرزی براساس این کمیت‌ها مطابق معادله‌های ۲۶ و ۲۷ محاسبه می‌شوند:

$$\frac{d\psi^+}{dx} = -\frac{ikD_l}{1 + \bar{u}} \psi^+ - \frac{1}{\nu} \frac{CD_l}{S_{pipe}} \hat{v} \quad (26)$$

$$\frac{d\psi^-}{dx} = \frac{ikD_l}{1 - \bar{u}} \psi^- + \frac{1}{\nu} \frac{CD_l}{S_{pipe}} \hat{v} \quad (27)$$

با توجه به این که این معادلات از مرتبه‌ی اول هستند، دو شرط مرزی برای حل آنها مورد نیاز است. کافی است مقدار B_u^+ (دامنه‌ی موج ورودی به لوله) مشخص شود تا مقادیر دامنه‌های دیگر با توجه به مقدار این دامنه اندازه‌گیری شوند. مقدار انعکاس موج از انتهای لوله به شرایط هندسه‌ی لوله و مشخصات جریان بستگی دارد. با استفاده از مقدار انعکاس موج یک رابطه‌ی خطی بین کمیت‌های اغتشاشی برقرار می‌شود. بنابراین شرایط مرزی برای حل دو معادله‌ی دیفرانسیل معمولی مرتبه‌ی اول با استفاده از روابط ۲۸ و ۲۹ داده می‌شود.

$$\psi^+(0) = B_u^+ \quad (28)$$

$$\psi^-(1) \exp(-ik_d^- D_l) - \psi^+(1) R_d \exp(ik_d^+ D_l) = 0 \quad (29)$$

با توجه به این که مقدار سرعت اغتشاشی از محل نشستی (\hat{v}) مجهول است، معادلات هنوز کامل نیستند و باید این مقدار با استفاده از کمیت‌های ψ^+ و ψ^- جایگذاری شود. برای این کار کمیت جدید «کامپلاینس آکوستیک» معرفی می‌شود.

کامپلاینس آکوستیک

این کمیت به صورت «مشتق یک کمیت در جهت عمود بر سطح نسبت به تغییر در مقدار این کمیت در عرض سطح» تعریف می‌شود:

$$\frac{\partial B'}{\partial n} = \eta [B']_{\pm}^+ \quad (30)$$

که در آن η مقدار کامپلاینس اغتشاشات آنتالپی سکون است. n جهت عمود بر سطح است. با استفاده از نظریه‌ی هوا برای جریان از درون یک حفره، مقدار کامپلاینس مؤثر برای یک صفحه با تعداد زیادی حفره که در فاصله‌های مؤثر چیده شده‌اند، محاسبه می‌شود. مقدار کامپلاینس برای حلقه‌ی محیطی، بین سرعت اغتشاشی جریان خروجی از محل نشستی و اختلاف در اغتشاشات آنتالپی سکون در عرض نشستی یک رابطه ایجاد می‌کند. با استفاده از تعریف کامپلاینس و معادله‌ی خطی شده‌ی مقدار حرکت رابطه‌ی ۳۱ به دست می‌آید.

$$\hat{v} = \frac{\eta}{ikD_l} (\hat{B} - (x) - \hat{B}_+(x)) \quad (31)$$

که در آن $\hat{B}_-(x)$ اغتشاشات در آنتالپی سکون بعد از خروج از محل نشستی، و $\hat{B}_+(x)$ اغتشاشات آنتالپی سکون قبل از خروج جریان از محل نشستی است. با استفاده از روابط پیشین برای اغتشاشات آنتالپی سکون قبل از خروج جریان از محل نشستی رابطه‌ی ۳۲ به دست می‌آید.

$$\hat{B}_+(x) = \psi^+(x) + \psi^-(x) \quad (32)$$

با توجه به این که جریان خروجی از محل نشستی به محیطی با فشار اتمسفر وارد می‌شود، کاملاً منطقی است که مقدار اغتشاشات فشاری و در نتیجه اغتشاشات آنتالپی سکون در خارج از لوله، $\hat{B}_-(x)$ برابر با صفر باشد. بنابراین:

$$\hat{v} = -\frac{\eta}{ikD_l} [\psi^+(x) + \psi^-(x)] \quad (33)$$

جایگذاری رابطه‌ی ۳۳ در معادلات دیفرانسیل، این معادلات را کامل می‌کند.

$$\frac{d\psi^+}{dx} = \left(\frac{-ikD_l}{1 + \bar{u}} + \frac{1}{\nu} \frac{C\eta}{S_{pipe} ik} \right) \psi^+ + \frac{1}{\nu} \frac{C\eta}{ikS_{pipe}} \psi^- \quad (34)$$

$$\frac{d\psi^-}{dx} = \left(\frac{ikD_l}{1 - \bar{u}} - \frac{1}{\nu} \frac{C\eta}{S_{pipe} ik} \right) \psi^- - \frac{1}{\nu} \frac{C\eta}{ikS_{pipe}} \psi^+ \quad (35)$$

برای حل مسئله فرض می‌شود که لوله نیمه‌متناهی و مقدار انعکاس موج از انتهای آن صفر باشد. شرایط مرزی با فرض این که مقدار دامنه‌ی موج بالادست (B_u^+) برابر ۱، و ضریب انعکاس پایین دست نشستی (R_d) برابر صفر باشد، چنین محاسبه می‌شود:

$$\psi^+(0) = 1 \quad \psi^-(1) = 0 \quad (36)$$

چنان که اشاره شد، می‌توان از تعریف ضریب هدایت رایلی حفره برای محاسبه‌ی کامپلاینس یک صفحه با چیدمان منظمی از حفره‌ها که از آنها جریان خارج می‌شود، استفاده کرد. لازمه‌ی این کار این است که فاصله‌ی بین حفره‌های مجاور (d) در مقایسه با قطر حفره‌ها ($2a$) بزرگ باشد. همچنین طول موج آکوستیک باید بسیار بزرگ‌تر از شعاع حفره‌ها و فاصله‌ی بین آنها باشد ($ka \ll kd \ll 1$).

ضریب هدایت رایلی شار حجمی اغتشاشی خروجی از حفره ($Q' = \hat{Q} \exp(ikD_l t)$) را به اختلاف در آنتالپی اغتشاشی در عرض حفره مربوط می‌سازد.

$$R.C. = -ikD_l \frac{\hat{Q}}{[\hat{B}]_{\pm}^+} \quad (37)$$

برای سادگی فرض می‌شود که محل نشستی مطابق شکل ۳ از یک شبکه‌ی مربعی از حفره‌ها با فاصله‌ی d بین حفره‌های مجاور تشکیل شده باشد. تعداد حفره‌ها در واحد سطح صفحه برابر با $1/d^2$ ، N ، و سرعت اغتشاشی برابر با $\hat{v} = N\hat{Q}$ است.

تعیین قطر و فاصله‌ی بین حفره‌ها، کامپلاینس آکوستیک چیدمان مورد نظر محاسبه، و در دو معادله‌ی گسسته‌سازی شده جایگزین می‌شوند.

معادلات باید با روش سعی و خطا حل شوند. بدین ترتیب که ابتدا مقادیری برای ψ^- فرض، و از معادله‌ی اول مقادیر ψ^+ محاسبه شده است. این مقادیر ψ^+ در معادله‌ی دوم قرار داده شده و مقادیر جدید ψ^- به دست آمده است. تا جایی که خطا از یک مقدار معین کم‌تر و حل همگرا شود، این حلقه تکرار شده است.

بررسی نتایج

با این فرض که لوله به صورت نیمه‌متناهی و انعکاس امواج از انتهای آن ناچیز باشد نتایجی به دست آمده است. از اثر ضخامت لوله بر میدان جریان سیال و میدان آکوستیک نیز صرف نظر شده است.

نتایج حاصلی بیان‌گر آن است که بر اثر وجود نشتی مقداری از انرژی آکوستیک از محل نشتی به محیط خارج از لوله انتشار می‌یابد؛ به عبارت دیگر این مقدار انرژی آکوستیک موج در حال پیشروی در لوله جذب می‌شود. وجود نشتی باعث می‌شود که یک موج آکوستیک به سمت بالادست لوله انتشار یابد که انرژی آن بسیار اندک است. مقدار جذب انرژی آکوستیک به صورت اختلاف انرژی آکوستیک ورودی به محل نشتی و خروجی از آن تعریف می‌شود (رابطه‌های ۴۲ تا ۴۵). در شکل ۴ نیز نمودار پیشروی موج آکوستیک در محل نشتی لوله نشان داده شده است.

$$IE = \frac{1}{4} S_{pipe} |B_u^+|^2 \quad (42)$$

$$TE = \frac{1}{4} S_{pipe} |B_d^+|^2 \quad (43)$$

$$RE = \frac{1}{4} S_{pipe} |B_u^-|^2 \quad (44)$$

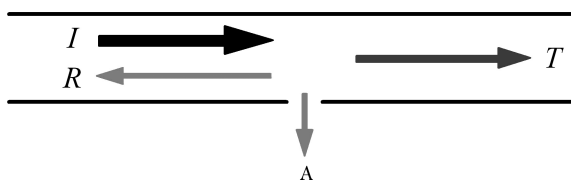
$$AE = I - T - R = \frac{1}{4} S_{pipe} |B_u^+|^2 - \frac{1}{4} S_{pipe} |B_d^+|^2 - \frac{1}{4} S_{pipe} |B_u^-|^2 \quad (45)$$

میزان عبور، انعکاس و جذب انرژی آکوستیک با استفاده از شار انرژی آکوستیک موج بالادست لوله به‌هتجار شده و چنین نوشته می‌شود:

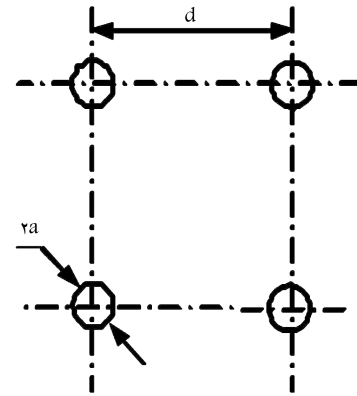
$$T = \frac{\frac{1}{4} S_{pipe} |B_d^+|^2}{\frac{1}{4} S_{pipe} |B_u^+|^2} \quad (46)$$

$$R = \frac{\frac{1}{4} S_{pipe} |B_u^-|^2}{\frac{1}{4} S_{pipe} |B_u^+|^2} \quad (47)$$

$$A = \frac{\frac{1}{4} S_{pipe} |B_u^+|^2 - \frac{1}{4} S_{pipe} |B_d^+|^2 - \frac{1}{4} S_{pipe} |B_u^-|^2}{\frac{1}{4} S_{pipe} |B_u^+|^2} \quad (48)$$



شکل ۴. چگونگی پیشروی امواج آکوستیک در لوله در محل نشتی.



شکل ۳. هندسه‌ی نشتی متقارن محوری.

با مقایسه‌ی رابطه‌ی بالا و رابطه‌ی خطی‌شده‌ی مقدار حرکت، کامپلاینس رابطه‌ی ساده‌ی با ضریب هدایت حفره دارد:

$$\eta = ND_l^* R.C. = R.C. D_l^* / d^2 \quad (38)$$

مقدار ضریب هدایت رایلی با استفاده از معادله‌ی هو جایگذاری می‌شود. ضریب هدایت رایلی تابع عدد استروهل جریان حفره است $(St = \omega a / U)$ ؛ U سرعت جابه‌جایی ریزش گردابه‌ها از لبه‌ی حفره است و براساس نظریات هو تقریباً برابر با متوسط سرعت جریان از محل نشتی است. اگر $\sigma = \pi a^2 / d^2$ نسبت سطح باز صفحه باشد، عدد ماخ یک حفره با استفاده از رابطه‌ی $M_h = M_l / \sigma$ به عدد ماخ صفحه مربوط می‌شود:

$$St = \frac{ka}{M_h} = \frac{ka\sigma}{M_l} \quad (39)$$

روش حل عددی

برای بررسی چگونگی پیشروی موج آکوستیک در یک لوله با وجود نشتی، باید دو معادله‌ی دیفرانسیل ۴۰ و ۴۱ که از نوع معمولی مرتبه‌ی اول و به صورت مزدوج هستند، حل شوند. برای این منظور از روش تفاضل محدود استفاده می‌شود. معادله‌ی اول با روش تفاضل محدود پیش‌رونده^۵ مرتبه‌ی اول، و معادله‌ی دوم با روش تفاضل محدود پسروی^۶ گسسته‌سازی می‌شود. معادلات گسسته‌سازی شده چنین خواهند بود:

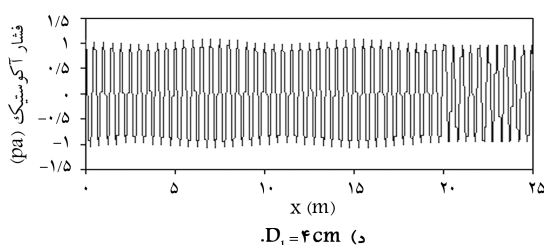
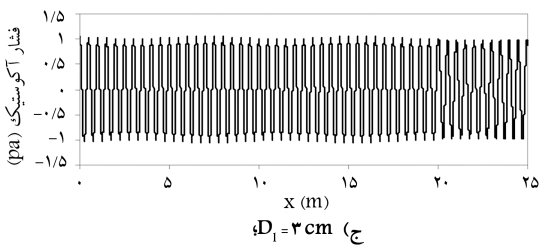
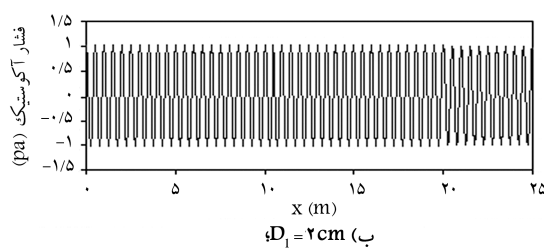
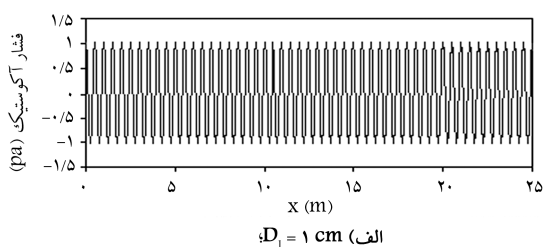
$$\psi^+(i+1) = \left[1 + \left(\frac{-ikD_l}{1 + \bar{u}(i)} + \frac{1}{4} \frac{C\eta}{S_{pipe} ik} \right) dx \right] \psi^+(i) + \frac{1}{4} \frac{C\eta}{ik S_{pipe}} \psi^-(i) dx \quad (40)$$

$$\psi^-(i-1) = \left[1 - \left(\frac{ikD_l}{1 - \bar{u}(i)} - \frac{1}{4} \frac{C\eta}{S_{pipe} ik} \right) dx \right] \psi^-(i) + \frac{1}{4} \frac{C\eta}{ik S_{pipe}} \psi^+(i) dx \quad (41)$$

چیدمان حفره‌ها، قطر، و فاصله‌ی بین آنها باید چنان باشد که امیدانس نشتی مدل‌سازی شده به صورت متقارن محوری با امیدانس حفره‌ی سه‌بعدی در جدار لوله یکسان باشد. برای دستیابی به این هدف، قطری برای حفره‌ها در نظر گرفته، و با مساوی قرار دادن امیدانس‌ها فاصله‌ی بین این حفره‌ها محاسبه می‌شود. پس از

ماند. چنان که مشاهده می‌شود، مقدار جذب انرژی با تغییر فرکانس روندی نوسانی را دنبال می‌کند که تفاوت بین بیشینه و کمینه‌ی هر منحنی بسیار اندک است. همچنین میزان انرژی آکوستیک جذب شده در چهار فرکانس مختلف، با تغییر اندازه‌ی نشستی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در یک فرکانس مشخص، با افزایش اندازه‌ی نشستی بر میزان انرژی آکوستیک جذب شده افزوده می‌شود. شکل ۶ میزان انتقال انرژی آکوستیک به قسمت پایین دست لوله، و شکل ۷ میزان انعکاس انرژی آکوستیک از محل نشستی به سمت بالادست لوله را نشان می‌دهد. با افزایش اندازه‌ی نشستی میزان انتقال انرژی آکوستیک به قسمت پایین دست لوله کاهش و میزان انعکاس به سمت بالادست افزایش می‌یابد.

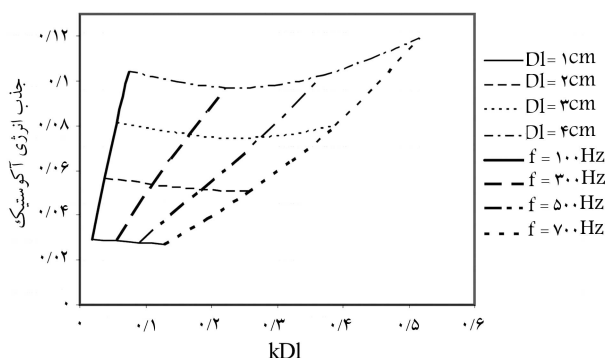
وجود نشستی باعث افت دامنه‌ی امواج آکوستیک پیش‌رونده به سمت پایین دست می‌شود. مقداری از امواج آکوستیک به سمت بالادست منعکس می‌شوند و میدان آکوستیک بالادست نشستی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. تلفیق امواج آکوستیک بالادست با امواج منعکس شده از محل نشستی به سمت بالادست باعث می‌شود که دامنه‌ی امواج آکوستیک قبل از محل نشستی دستخوش تغییر شود. این امواج منعکس شده



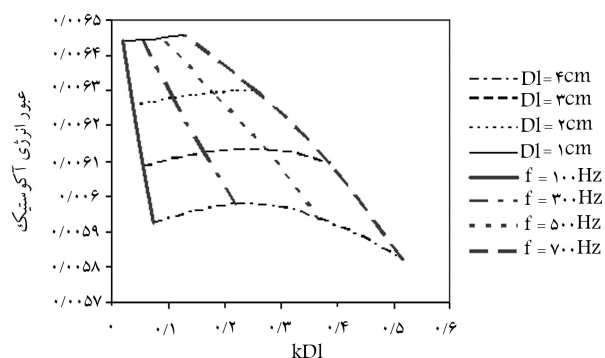
شکل ۸. چگونگی پیشروی موج آکوستیک در یک لوله‌ی دارای نشستی، به‌ازاء اندازه‌های مختلف نشستی.

در شکل ۵ مقدار جذب انرژی آکوستیک توسط یک نشستی مدل‌سازی شده به صورت متقارن محوری نشان داده شده است. مقدار انرژی جذب شده در چهار فرکانس ۱۰۰، ۵۰۰، ۳۰۰ و ۷۰۰ Hz، به‌ازاء تغییر اندازه‌ی نشستی با اندازه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ سانتی‌متر به‌ازاء تغییر فرکانس بین ۷۰۰-۱۰۰ Hz محاسبه شده است. سرعت سیال در لوله ۱۰ m/s، قطر لوله ۱۳ متر و طول لوله ۲۵ متر در نظر گرفته شده است. نشستی در فاصله‌ی ۲۰ متری از ابتدای لوله قرار گرفته است.

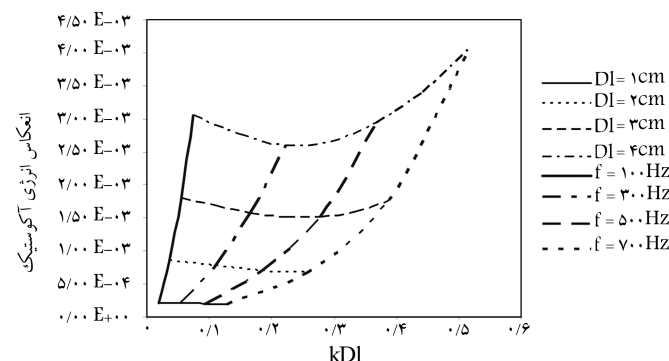
در این محدوده از فرکانس موج انتشاری در لوله به صورت صفحه‌ی باقی خواهد



شکل ۵. مقدار جذب انرژی آکوستیک از محل نشستی به‌ازاء تغییر فرکانس و تغییر اندازه‌ی نشستی.



شکل ۶. مقدار عبور انرژی آکوستیک از محل نشستی به‌ازاء تغییر فرکانس و تغییر اندازه‌ی نشستی.



شکل ۷. مقدار انعکاس انرژی آکوستیک به‌ازاء تغییر فرکانس و تغییر اندازه‌ی نشستی.

این شکل‌ها اندازه‌ی ناشتی مدل‌سازی شده ۴ سانتی‌متر، سرعت سیال ۱۰ m/s و فرکانس موج آکوستیک ۷۰۰ Hz است.

نتیجه‌گیری

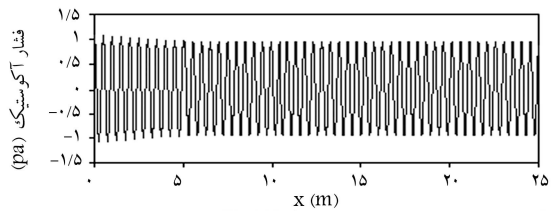
بر اثر وجود ناشتی مقداری از انرژی موج آکوستیک به علت خروج جریان از محل ناشتی جذب و مقداری نیز به سمت بالادست لوله منعکس می‌شود؛ بقیه‌ی انرژی نیز از محل ناشتی عبور می‌کند و به سمت پایین‌دست لوله منتقل می‌شود. مشاهده می‌شود که در یک فرکانس مشخص، با افزایش اندازه‌ی ناشتی میزان انرژی آکوستیک جذب‌شده و انعکاس‌یافته افزایش می‌یابد، اما مقدار انرژی منتقل‌شده به قسمت پایین‌دست لوله کاهش می‌یابد.

وجود ناشتی باعث افت دامنه‌ی امواج آکوستیک پیش‌رونده به سمت پایین‌دست می‌شود. مقداری از امواج آکوستیک به سمت بالادست منعکس می‌شوند و میدان آکوستیک بالادست ناشتی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. تلفیق امواج آکوستیک بالادست با امواج منعکس‌شده از محل ناشتی به سمت بالادست باعث می‌شود که دامنه‌ی امواج آکوستیک قبل از محل ناشتی دستخوش تغییر شود. این امواج منعکس‌شده باعث می‌شوند که دامنه‌ی فشار و سرعت آکوستیک و اغتشاشات آنتالپی سکون در بالادست محل ناشتی به صورت هارمونیک باشد. هرچه اندازه‌ی ناشتی بزرگ‌تر شود، دامنه‌ی موج انعکاس‌یافته به سمت بالادست بیشتر شده و موج بالادست بیشتر تحت تأثیر قرار می‌گیرد. همچنین دامنه‌ی موج عبوری به سمت پایین‌دست کاهش بیشتری خواهد داشت. میزان انرژی آکوستیک منتقل‌شده به سمت پایین‌دست محل ناشت و همچنین مقدار افت دامنه‌ی موج صوتی معیاری برای تعیین اندازه‌ی ناشتی است. مکانی که در آن دامنه‌ی امواج دچار تغییر می‌شوند و از آن محل انعکاس به سمت بالادست صورت می‌گیرد، همان مکان ناشت است.

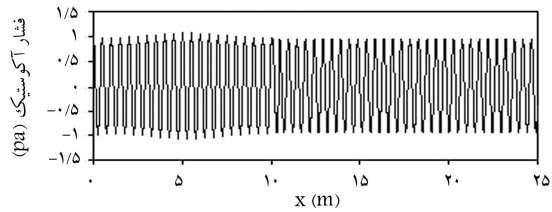
برای ادامه‌ی کار می‌توان معادلات آکوستیک را برای حالت تراکم‌پذیر به دست آورد و همچنین ناشتی را به صورت سه‌بعدی مدل‌سازی کرد. معادلات موج آکوستیک به صورت تابع هارمونیک از زمان در نظر گرفته شده‌اند و به این صورت زمان از معادلات حذف شده است. بهتر است حل معادلات زمان‌مند باشد، و با این روش زمان تشخیص ناشتی برآورد شود.

فهرست علائم

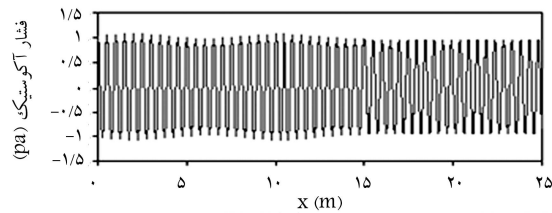
- u : سرعت متوسط جریان در بالادست ناشتی، [m/s]
- \bar{u}_d : سرعت متوسط جریان در پایین‌دست ناشتی، [m/s]
- u : سرعت کل جریان در لوله، [m/s]
- \bar{v} : سرعت متوسط جریان خروجی از محل ناشتی، [m/s]
- v : سرعت کل جریان خروجی از محل ناشتی، [m/s]
- \bar{v} : سرعت اغتشاشی جریان خروجی از محل ناشتی، [m/s]
- B_u^+ : دامنه‌ی موج راست‌رو اغتشاش آنتالپی سکون در بالادست ناشتی
- B_u^- : دامنه‌ی موج چپ‌رو اغتشاش آنتالپی سکون در بالادست ناشتی
- B_d^+ : دامنه‌ی موج راست‌رو اغتشاش آنتالپی سکون در پایین‌دست ناشتی
- B_d^- : دامنه‌ی موج چپ‌رو اغتشاش آنتالپی سکون در پایین‌دست ناشتی
- R_p : شعاع لوله، [m]



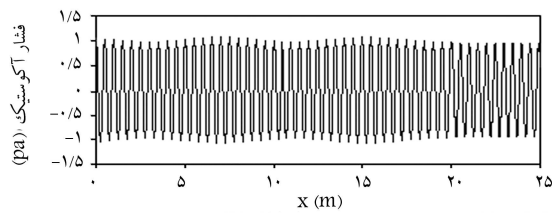
الف) $X_{leak} = 5m$



ب) $X_{leak} = 10m$



ج) $X_{leak} = 15m$



د) $X_{leak} = 20m$

شکل ۹. چگونگی پیشروی موج آکوستیک در یک لوله‌ی دارای ناشتی به‌ازاء مکان‌های مختلف ناشتی.

باعث می‌شوند که تغییرات دامنه‌ی فشار، سرعت آکوستیک و اغتشاشات آنتالپی سکون در بالادست محل ناشتی به صورت هارمونیک باشد.

در شکل ۸ تأثیر اندازه‌ی ناشتی بر چگونگی پیشروی موج آکوستیک در یک لوله -- بدون در نظر گرفتن اثرات میرایی -- نشان داده شده است. شکل‌های الف، ب، ج و د به ترتیب نشان‌دهنده‌ی ناشتی با قطرهای ۱، ۲، ۳ و ۴ سانتی‌متر هستند؛ سرعت سیال در لوله نیز معادل ۱۰ m/s در نظر گرفته شده است. مشاهده می‌شود که هرچه اندازه‌ی ناشتی بزرگ‌تر شود، دامنه‌ی موج انعکاس‌یافته به سمت بالادست بیشتر شده و موج بالادست بیشتر تحت تأثیر قرار می‌گیرد. همچنین دامنه‌ی موج عبوری به سمت پایین‌دست کاهش بیشتری خواهد داشت. در این شکل‌ها ناشتی در فاصله‌ی ۲۰ متری از ابتدای لوله قرار گرفته و فرکانس موج ۷۰۰ Hz است.

در شکل ۹ تأثیر محل ناشتی بر چگونگی پیشروی موج آکوستیک در یک لوله‌ی دارای ناشتی نشان داده شده است. موارد الف، ب، ج و د نشان‌دهنده‌ی ناشتی در فاصله‌ی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متری از ابتدای لوله است. مشاهده می‌شود که انعکاس موج از محل ناشتی، موج آکوستیک بالادست را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در

| | |
|--|--|
| ω : فرکانس زاویه‌ی موج، $[rad/s]$ | D_l : قطر حفره‌ی ناشی، $[m]$ |
| t : زمان، $[s]$ | x : مختصات در امتداد لوله، $[m]$ |
| \hat{B} : تابع مکانی اغتشاشات آنتالپی سکون | $\bar{\rho}$: چگالی متوسط، $[kg/m^3]$ |
| Re : ضریب انعکاسی شرایط انتهایی ناشی | ρ : چگالی سیال، $[kg/m^3]$ |
| C : محیط لوله، $[m]$ | ρ' : چگالی اغتشاشی، $[kg/m^3]$ |
| $R.C.$: ضریب هدایت رایلی | \bar{c} : سرعت متوسط صوت در گاز، $[m/s]$ |
| St : عدد استروهل | S_{pipe} : سطح مقطع لوله، $[m^2]$ |
| ψ^+ : کمیت مشخصه برای موج پیش‌رونده به سمت راست | S_{leak} : مساحت ناشی، $[m^2]$ |
| ψ^- : کمیت مشخصه برای موج پیش‌رونده به سمت چپ | Q : دبی حجمی خروج از محل ناشی، $[m^3/s]$ |
| η : کامپلاینس آکوستیک | Q' : دبی حجمی اغتشاشی خروج از محل ناشی، $[m^3/s]$ |
| U : سرعت جابه‌جایی ریزش گردابه‌ها از لبه‌ی حفره، $[m/s]$ | p' : فشار آکوستیک، $[pa]$ |
| a : شعاع سوراخ‌های کوچک، $[m]$ | p : فشار کل، $[pa]$ |
| σ : نسبت سطح باز صفحه | u' : سرعت اغتشاشی ذرات، $[m/s]$ |
| M_h : عدد ماخ در سوراخ‌های کوچک | B' : اغتشاشات آنتالپی سکون، $[(m/s)^2]$ |
| IE : شار انرژی آکوستیک ورودی به محل ناشی | \bar{u} : سرعت متوسط جریان در لوله، $[m/s]$ |
| TE : شار انرژی آکوستیک عبوری از محل ناشی، $[W/m^2]$ | M_u : عدد ماخ در بالادست ناشی |
| RE : شار انرژی آکوستیک انعکاس یافته از محل ناشی، $[W/m^2]$ | M_d : عدد ماخ در پایین‌دست ناشی |
| AE : شار انرژی آکوستیک جذب شده توسط ناشی، $[W/m^2]$ | M_l : عدد ماخ جریان خروجی از ناشی |
| Re : عدد رینولدز | k : عدد موج در سیال ساکن |
| d : فاصله‌ی بین سوراخ‌های کوچک، $[m]$ | k_u^+ : عدد موج برای موج پیش‌رونده به سمت راست در بالادست ناشی |
| T : مقدار عبور نرمال شده‌ی انرژی آکوستیک | k_d^+ : عدد موج برای موج پیش‌رونده به سمت راست در پایین‌دست ناشی |
| R : مقدار انعکاس نرمال شده‌ی انرژی آکوستیک | k_u^- : عدد موج برای موج پیش‌رونده به سمت چپ در بالادست ناشی |
| A : مقدار جذب نرمال شده‌ی انرژی آکوستیک | k_d^- : عدد موج برای موج پیش‌رونده به سمت چپ در پایین‌دست ناشی |

پانویس

1. mass or volume balance method
2. dynamic model based method
3. standing waves
4. attenuation
5. finite difference, forward scheme
6. finite difference, backward scheme

منابع

1. Liu, M.; Zang, S., and Zhou, D. "Fast leak detection and location of gas pipelines based on an adaptive particle filter", *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci.*, **15**(14), pp. 541-550 (2005).
2. Huebler, J.E. "Detection of unauthorized construction equipment in pipeline right of ways", Presentation given at U.S. Department of Energy, National Energy Technology Center Natural Gas Infrastructure Reliability Industry Forums, Morgantown, WV (2002).
3. Geiger, G., and PSIG 0301. "Leak detection and locating- a survey", University of Applied Sciences Gelsenkirchen, Faculty of Electrical Engineering, Germany (2002).
4. Liou, J.; Hall, R., and MaMahon, M. "Hazardous liquid leak detection techniques and processes", Final Report, Prepared for U.S. Department of Transportation, Research and Special Programs Administration, Office of Pipeline Safety, Washington, DC. (2003).
5. Watanabe, K.; Matukawa, S.; Yukawa, H., and Himmelblau, D.M. "Detection and location of a leak in a gas transport pipeline by a new acoustic method", *Hosei University, Department of Instrumentation and Engineering Journal*, **1**, pp. 129-157, (1985).
6. Watanabe, K. and Himmelblau, D.M. "Detection and location of a leak in a gas transport pipeline by a new acoustic method", *AIChE Journal*, **32**(10), pp. 1690-1701 (1986).
7. Muggleton, J.M.; Brennan, M.J., and Pinnington, R.J. "Wavenumber prediction of waves in buried pipes for water leak detection", *Journal of Sound and Vibration*, **249**(5), pp. 939-954 (2002).
8. Muggleton, J.M.; Brennan, M.J., and Linford, P.W. "Axisymmetric wave propagation in fluid-filled pipes: wavenumber measurements in vacuo and buried pipes", *Journal of Sound and Vibration*, **270**, pp. 171-190 (2004).
9. Shack, W.J.; Ellingson, W.A., and Youngdahl, C.A. "Development of a noninvasive acoustic leak detection sys-

- tem for large high pressure gas valves”, *ISA Transactions*, **19**(4), pp. 65-71 (1980).
10. Vahaviolos, S.J.; Miller, R.K.; Shemyakin, V.V., and Strizkov, S.A. “Detection and location of cracks and leaks in buried pipelines using acoustic emissions”, *Physical Acoustics Corporation*.
 11. Sharp, D.B., and Campbell, D.M. “Leak detection in pipes using acoustic pulse reflectometry”, Department of Physics and Astronomy, JCMB, King’s Building, University of Edinburgh, Edinburgh, UK (2005).
 12. D.Eldredge, J., and P.Dowling, A. “Absorption of axial acoustic waves by a perforated liner with bias flow”, *J. Fluid Mech.*, **485**, pp. 307-335 (2003).
 13. Howe, M.S. “On the theory of unsteady high Reynolds number flow through a circular aperture”, *Proc. R. Soc. Lond. A.*, **366**, pp. 205-223 (1979).