

تحلیل آکوستیکی نویزهای آیرودینامیکی حاصل از تشکیل حباب در ستون سیال

احسان حبیبی سیاه‌پوش (دانشجوی دکتری)

محمدرضا انصاری* (دانشیار)

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی مکانیک شریف، (بهار ۱۳۹۸)
دوره ۳-۳، شماره ۱، ص. ۵۱-۳۳

تحلیل امواج فشاری یکی از روش‌های مؤثر برای بررسی دقیق‌تر سیستم‌هاست. در تحقیق پیش رو، امواج آکوستیک منتشر شده به واسطه نفوذ گاز در ستون عمودی واکاوی شده است. فیزیک جریان گذرای دوفازی سه بعدی، برپایه روش حجم مایعات^۱ (VOF) شبیه‌سازی شده و برای محاسبه دقیق نوسانات فشاری حاصل از ورود گاز، از مدل آشفتگی^۲ LES و روش بازسازی سطح مشترک^۳ HRIC استفاده شده است. منابع صوتی با نمونه برداری نوسانات فشاری از دیواره نفوذ و صفحه مجازی در جریان، توسط معادلات^۴ FWH استخراج شده و این منابع در لحظات جدا شدن و تشکیل حباب‌ها بررسی و با کمک معادله انتقال موج در دریافت کننده‌ها تعیین شده است. همچنین با کمک تبدیل فوریه (FFT)^۵ داده‌ها از میدان زمان به میدان فرکانس منتقل و با ثبت کمیت‌های آکوستیکی، تحلیل‌های طیفی از جمله بررسی فرکانس جدا شدن حباب انجام شده است. شایان ذکر است با نمایش استقلال از شبکه، نتایج با داده‌های تجربی صحت سنجی شده است.

واژگان کلیدی: جریان دوفازی، امواج آکوستیک، آنالوژی لایت‌هیل، انتشار نویز.

۱. مقدمه

انبساط محیط منتشر می‌شوند و در واقع سازوکاری برای انتقال انرژی بین دو نقطه، بدون تغییر مکان فیزیکی‌اند.^[۱]

منابع تولید این امواج فشاری، آزاد شدن ناگهانی انرژی‌های الاستیک در طی فرایندهای دینامیکی هستند. تولید و انتشار امواج در محیط به دو صورت فعال^۶ و غیرفعال^۷ است. امواج فعال توسط منابع خارجی تولید و منتشر می‌شوند و می‌توانند در بازه‌های مختلف فرکانس ایجاد شوند. در حالی که امواج غیرفعال در فرایندهای دینامیکی و در فرکانس‌های پایین ایجاد شده‌اند. از جمله امواج غیرفعال در سیستم‌های سیالاتی می‌توان به انتشار امواج حاصل از نویزهای فرایندهای آیرودینامیکی در جریان اشاره کرد. نویزهایی که به واسطه ورود یا خروج جریان، برخورد با دیواره‌ها و جریان‌های آشفتگی ایجاد می‌شوند.^[۲] شایان ذکر است این نویزهای فرکانس پایین عمدتاً چون از فاصله‌های دور سبب شناسایی پارامترهای جریان می‌شود از اهمیت زیادی برخوردارند.^[۳]

در این میان، پدیده نفوذ گاز به درون سیستم از جمله مهم‌ترین منابع تولید نویز در جریان است. این پدیده شامل تعداد زیادی فرایندهای پیچیده هیدرودینامیکی است. ایجاد حباب، رشد تدریجی آن، جدا شدن و به هم پیوستن حباب‌ها از جمله این فرایندها هستند. منابع صوتی و پالس‌هایی که به واسطه این فرایندها تولید می‌شود به خاطر ضرباتی است که حجم حباب به جریان وارد می‌کند و دلیل آن تفاوت فشار داخلی و خارجی حباب است. عمدتاً این تحرکات به هنگام جدا شدن یا تشکیل حباب است. همچنین نویزهای ایجاد شده ممکن است در فرکانس‌های

وجود جریان‌های دوفازی و شرایطی که به واسطه آن به سیستم تحمیل می‌شود، جزء نقاط چالش برانگیز طراحی تجهیزات و فرایندهای صنعتی است. تحلیل تغییرات جریان‌های دوفازی و اندازه‌گیری پارامترهایی همچون الگوهای جریان، محل تغییرات الگوها، میزان کسر حجمی و... می‌تواند منجر به کنترل ایده‌آل این فرایندها شود. بنابراین روش‌های تحلیل و اندازه‌گیری خصوصیات این جریان‌ها، به شکل گسترده‌یی توسط محققین توسعه یافته است.

در میان روش‌های ارائه شده، فناوری‌های آکوستیک نسبت به روش‌های متداول دارای مزایای متعددی هستند. این مزایا را به اختصار می‌توان سرعت بالای پاسخ و تأخیر کم، هزینه پایین، عدم نیاز به اعمال تغییر در سیستم، مقاوم بودن حس‌گرها به شرایط محیطی، آنالیز دقیق‌تر و گسترده‌تر خصوصیات جریان و همچنین قابلیت اطمینان بالا ذکر کرد.

با وجود مزایای فوق‌ارائه‌ی مدل دینامیکی دقیق امواج فشاری، استفاده کردن از نظریه‌ها و مدل‌های قوی به منظور شبیه‌سازی جریان دوفازی و تحلیل اثر پارامترهای متعدد بر امواج آکوستیک، از جمله چالش‌های این تکنیک ذکر شده است.^[۱] امواج آکوستیک به صورت نوسانات فشاری گذرا با دامنه‌ی کوچک و به صورت الاستیک در محیط منتشر می‌شوند. این امواج از نوع طولی هستند و با انقباض و

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۲/۳۰، اصلاحیه ۱۳۹۶/۶/۴، پذیرش ۱۳۹۶/۹/۲۹.

DOI:10.24200/J40.2017.10769.1420

پایین و بالا منتشر شود. به منظور تحلیل نویزهای حاصل از نفوذ گاز در مدهای مختلف امواج آکوستیک فیلتر می‌شوند و از فیلترهای مرتبه پایین^۸ در محدوده‌ی ۰ تا ۶۰۰ هرتز و فیلترهای مرتبه بالا^۹ در محدوده‌ی ۶۰۰ تا ۳۰۰۰ هرتز استفاده می‌شود.^{۱۵} همچنین فرکانس طبیعی تولید حباب عبارت است از:

$$f_a = \frac{1}{2\pi R} \sqrt{\frac{2\gamma P_a}{\rho}} \quad (1)$$

که در آن γ نسبت گرمایی ویژه برای گاز، P_a فشار مطلق مایع، R شعاع معادل حباب و ρ چگالی مایع است. البته رابطه‌ی اصلاح شده باید شامل عبارت کشش سطحی نیز باشد که در رابطه‌ی ۱ به دلیل تأثیر کم در نظر گرفته نشده است.^{۱۴} به منظور بررسی و اندازه‌گیری نویزها در جریان، در سال ۱۹۵۲ مقاله‌ی تحت عنوان «تولید اصوات آیرودینامیکی» توسط جیمز لایت‌هیل منتشر شد. لایت‌هیل در نظریه‌ی خود محدوده‌ی مشخصی از نوسانات جریان سیال نسبت به کل حجم سیال را در نظر گرفت. سپس از معادلات استخراج شده، نوسانات فشار در محیط آکوستیکی را محاسبه کرد و از روی تفاوت میدان نوسانی و پایدار، میدان نیروها و منابع تولید امواج را تعیین کرد. این میدان نیروها به محیط آکوستیک اعمال شده و پارامترهای آکوستیک به دست آمده توسط پیاده‌سازی معادله‌ی هلمهولتز بر روی مراکز تولید، در محیط منتشر شدند. امواج منتشره در مراکز دریافت کننده‌ها ثبت شده و به کمک آن تحلیل طیفی در محل پذیرش امواج انجام شده است.

در نظریه‌ی لایت‌هیل منابع تولید صوت به صورت تک قطبی^{۱۰}، دوقطبی^{۱۱} و چهارقطبی^{۱۲} معرفی می‌شوند؛ منابع تک قطبی به واسطه‌ی نوسانات ناشی از تزریق یا جابه‌جایی جرم در جریان، منابع دوقطبی به علت نوسانات نیرویی در جریان (همانند تغییر شکل در لوله) و منابع چهارقطبی نیز به واسطه‌ی نوسانات ناشی از آشفتگی در جریان ایجاد می‌شود. در مقایسه با منابع تک قطبی، منابع دوقطبی و چهارقطبی توان کمتری دارند تا جایی که قابل صرف‌نظر کردن هستند. در این نظریه محاسبه‌ی اصوات آیرودینامیکی از حل معادلات ترکیب شده مومنتوم و پیوستگی و معرفی تانسور لایت‌هیل به دست می‌آید. همچنین با ترکیب معادله‌ی لایت‌هیل و معادله‌ی هلمهولتز تولید و انتشار پارامترهای امواج در محیط بررسی می‌شوند. محدودیت نظریه‌ی لایت‌هیل در جریان‌های گذرای با سرعت بالاتر از صوت است و این روش عمدتاً با ترکیب با حل‌گره‌های تراکم‌پذیر و غیر تراکم‌پذیر در ماس‌های پایین جواب‌های خوبی می‌دهد.^{۱۶}

به منظور تحلیل امواج آکوستیکی نیز در محیط تلاش‌های فراوانی صورت گرفته است.^{۱۷} چانگ و همکاران^{۱۸} امواج صوتی در جریان‌های دوفازی درون لوله‌های قائم را بررسی کرده‌اند. در این تحقیق روابط بین میرایی و چگالی سطح تماس با در نظر گرفتن اثر پراکندگی در یک حباب در نظر گرفته شده است. همچنین با وارد کردن ضریب جرم مجازی^{۱۳} عبارت انتقال مومنتوم نیز به سیستم اضافه شده است. چانگ با فرموله کردن سیستم و خطی‌سازی معادلات و نیز با استفاده از متد مشخصه‌ها معادلات سرعت صوت و میرایی را محاسبه کرده است. همچنین با در نظر گرفتن عدد بی‌بعد فرکانس $\Omega = \omega R^2 / \alpha_1$ در بازه ۲۰۰۰ تا ۸۰۰۰ (۲۰ تا ۲۰۰ هرتز)، کسر حجمی بین ۰٫۵ تا ۱۰ درصد و همچنین حباب‌های با شعاع ۰٫۶ تا ۲٫۲ میلی‌متر نشان داده شده است که چگالی سطوح مشترک با توان دو میرایی ارتباط دارد. در این تحقیق معادلات دینامیک حباب و معادله‌ی حالت گاز ایده‌آل و بالانس انرژی در حباب برای دستیابی به معادلات تراکم‌پذیری نگاشته شده است و همچنین بیان شده است که اثرات دمایی مهم‌ترین عامل

میرایی امواج است. اکسو و گانگ^{۱۹} یک مدل کامل برای تخمین سرعت امواج در همه‌الگوها ارائه کرده‌اند و با تعریف سرعت لغزشی و ضریب جرم مجازی معادلات انتقالی عمیق‌تر بررسی شده است. معادلات مومنتوم و پیوستگی با اعمال نیروهای بین سطوح و جاذبه و تنش برشی در مدل TFM^{۱۴} نگاشته شده، و مقدار ویژه ماتریس ضرایب را، با خطی‌سازی معادلات، برای رژیم‌های پراکنده و اسلاگ و جدا محاسبه کرده است. در این بررسی میرایی در نظر گرفته نشده است و بیان شده است که وقتی انتقال مومنتوم بین گاز و مایع ضعیف باشد و ضریب جرم مجازی کوچک باشد سرعت شدیداً افت می‌کند. در این تحقیقات با استخراج معادلات تک بعدی سیستم تنها به بررسی پارامترهای آکوستیک محیط از جمله سرعت و میرایی پرداخته شده است و در کنار در نظر نگرفتن اثرات ابعاد و الاستیسیته دیواره‌ها، اثرات منابع تولید نیز در نظر گرفته نشده است. شایان ذکر است که امواج اصولاً دارای سه دسته از مشخصات است مشخصاتی از جمله سرعت صوت و میرایی که تنها به محیط وابسته‌اند، پارامترهایی همچون فرکانس و بسامد امواج که جزء پارامترهای منبع هستند و نیز پارامترهایی همچون طول موج و دوره که هم وابسته به محیط و منبع هستند. براین اساس رسیدن به نگاه جامع برای دریافت امواج در محل دریافت کننده و تحلیل سیستم به واسطه‌ی این امواج، نیازمند بررسی همزمان منابع تولید و پارامترهای آکوستیک محیط هستند.

مناسه و همکاران نوسانات فرکانس امواج آکوستیکی حاصل از شکل‌گیری حباب‌ها را باز تولید کرده‌اند اما عدم دقت در انتقال داده‌ها از میدان زمان به میدان طیفی وجود دارد. نوسانات فشاری حاصل از شکل‌گیری حباب بررسی شده و به بررسی سیستم با کمک تحلیل طیفی پرداخته نشده است. اولیویرا^{۱۰} محل نشئت در لوله‌های طویل را با کمک امواج آکوستیک بررسی کرده و پس از حل زمانی مدل سه بعدی، تکفاز، تراکم‌ناپذیر آشفته، از مدل FWH برای ردیابی نویز استفاده کرده است. در این مدل، نویز ناشی از دیواره‌ها در محل نشئت در جریان تکفاز بررسی و منابع صوتی تک قطبی حاصل از خروج جریان محاسبه شده است. اولیویرا با در نظر گرفتن دیواره‌ها به عنوان منابع تولید نویز، نوسانات ناشی از تغییر شکل جریان و گردابه‌های تولیدی در سطوح انتگرالی را در نظر نگرفته و همچنین شبیه‌سازی با در نظر گرفتن سرعت صوت ثابت و حذف اثرات تراکم‌پذیری جریان انجام شده است. نتایج در دو مد تعیین شده و الگوی به دست آمده با داده‌های تجربی مقایسه شده است. پیلارد^{۱۱} به بررسی انتشار نویز برپایه آنالوژی لایت‌هیل، در جریان تک فاز درون کانال و به هنگام عبور از دیافراگم پرداخته است. شبیه‌سازی شامل یافتن منابع تولید و انتشار آن در مدل است. حل زمانی مدل براساس مدل‌سازی سه بعدی جریان تک فاز، تراکم‌ناپذیر با کمک مدل آشفته انجام شده و در مرحله‌ی بعد منابع صوتی تعیین شده در دیواره‌ها و با حذف اثرات سایر منابع تولید بررسی شده است. با استخراج پارامترهای منبع و در نظر گرفتن سرعت ثابت در محیط، انتشار امواج با کمک معادله‌ی موج بررسی شده و شبیه‌سازی انجام شده با نتایج نرم افزار محاسبه‌ی مستقیم صوت صحت سنجی شده است. لیو^{۱۵} نیز به استخراج نویز حاصل از گردابه‌های حاصل در جریان تک فاز تراکم‌ناپذیر پرداخته است. در بررسی انجام شده تحلیل منابع صوتی به واسطه برخورد جریان با دیواره‌ها و تولید آشفستگی در جریان‌های تک فاز تراکم‌ناپذیر بررسی شده است. با بررسی اثرات منابع روی دیواره‌ها، از انتگرال‌های سطحی و حجمی درون جریان صرف نظر شده است. لین^{۱۲} با بررسی عددی نویز حاصل از نفوذ گاز به درون سیستم در یک مدل سه بعدی دوفاز تراکم‌ناپذیر، ضمن مقایسه‌ی الگوی داده‌های عددی با داده‌های تجربی مدل را صحت سنجی کرده است. در مدل اثرات تراکم‌پذیری و اثر تغییرات سرعت

۲ برای فاز i ام معادله نگاشته می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \vec{v}) = s_{\alpha_i} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pi} - \dot{m}_{ip}) \quad (2)$$

که در آن \dot{m}_{pi} انتقال جرم از فاز p به i و \dot{m}_{ip} انتقال جرم از فاز i به فاز p است. s_{α_i} ترم منبع است. شایان ذکر است در هر سلول محاسباتی کسر حجمی سیالات از رابطه ۲ به دست می‌آید و فقط سیال اولیه با محاسبه‌ی کسر حجمی سایر سیالات و قید زیر تعیین می‌شود:

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1 \quad (3)$$

میدان سرعت در شبکه‌ی حل نیز با کمک معادله‌ی مومنتوم ۴ محاسبه می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) = +\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{v} + \vec{F} \quad (4)$$

چالش اصلی در استخراج پارامترهای آکوستیک، انرژی بسیار کم ناشی از امواج صوتی نسبت به انرژی جریان است، به طوری که اگر فشار جریان در حدود 10^6 پاسکال باشد، فشار حاصل از نوسانات امواج صوتی در حدود چند پاسکال خواهد بود. براین اساس یک مدل مناسب باید نوسانات فشاری را نشان دهد و گردابه‌های جریان تا حد امکان در آن دیده شود.

در این میان استفاده از روش‌های حل مستقیم جریان (DNS) تمام گردابه‌ها را در شبکه‌ی محاسباتی حل می‌کند ولی حجم محاسبات در میدان حل به شدت افزایش یافته تا جایی که پیاده‌سازی آن روی مسائل مهندسی، خصوصاً با رینولدز بالا، دشوار و گاهی غیرممکن است. همچنین مدل‌های مبتنی بر ناویر-استوکس با میانگین رینولدز 16^6 (RANS) تمامی نوسانات را مدل کرده و اثر گردابه‌های جریان به خوبی دیده نمی‌شود و تصویرسازی نوسانات فشاری با دقت انجام نمی‌شود. مدل آشفتگی LES با گردابه‌ها به دو صورت برخورد می‌کند، مقیاس‌های بزرگ در ابعاد شبکه را حل کرده و گردابه‌های کوچک و زیرشبکه را مدل می‌کند که ایجاد تصویر دقیق‌تر از جریان آشفته با حجم محاسباتی کمتر را سبب می‌شود.

جداسازی گردابه‌ها به واسطه‌ی اعمال فیلتر روی معادلات وابسته به زمان سیستم در فضای فوریه یا فضای فیزیکی انجام می‌شود. این فیلتر گردابه‌های در مقیاس کمتر از سلول‌های محاسباتی را فیلتر کرده و مقیاس‌های بزرگتر را در توسعه‌ی روابط نگه می‌دارد. فیلتر مورد استفاده برای متغیرها عبارت است از:

$$\bar{\varphi} = \int \varphi' G(x, x') dx' \quad (5)$$

که در آن G تابع فیلتر و φ اپراتور فیلتر است. براین اساس سمت راست معادله‌ی مومنتوم ۴ چنین نوشته می‌شود.

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (6)$$

در این معادل σ_{ij} تانسور تنش است که به صورت تابع ویسکوزیته تعریف می‌شود و τ_{ij} به عنوان تنش‌های در مقیاس کوچک است که در متغیرها فیلتر شده است. این پارامتر برحسب μ_t ویسکوزیته اغتشاشی مدل می‌شود. برای مدل‌سازی ویسکوزیته اغتشاشی مدل‌های معتبری ارائه شده است که می‌توان

صوت در جریان دوفاز دیده نشده است. همچنین منابع صوتی در یک سطح انتگرالی بررسی شده و اثرات تغییرات سطوح در یافتن منابع تولید بررسی نشده است. با توجه به مشکلات مدل‌های توربولانسی در نمایش سطح مشترک^[۱۳] روش‌های مدل‌های بازسازی سطح از جمله الگوی فشاری^{۱۵} در نمایش تولید و رشد حباب‌ها مناسب نیست و باید از روش‌های مناسب بازسازی سطح یا ترکیب روش‌های level set با روش حجم سیال (VOF) که امکان محاسبه‌ی دقیق‌تر تغییرات و شکل سطح مشترک را فراهم می‌کند، استفاده کرد.

بر این اساس در تحقیق پیش رو تغییرات ایجاد شده در جریان به واسطه‌ی نفوذ گاز در ستون سیال و ارسال امواج آکوستیک حاصل از نوبز ایجاد شده موضوع مورد بحث است. فیزیک جریان‌گذرای دوفازی سه بعدی بر پایه‌ی روش حجم سیال شبیه‌سازی شده و برای محاسبه‌ی دقیق نوسانات فشاری حاصل از ورود گاز از مدل آشفتگی LES استفاده شده است.^[۱۴] با توجه به اهمیت ردگیری سطح مشترک در نوبزهای ایجاد شده، در مدل توربولانسی روش‌های مختلف بازسازی سطح مشترک مقایسه شده و نهایتاً روش HRIC اصلاح شده به عنوان روش مناسب انتخاب شده است.

با دستیابی به مدل دینامیکی و محاسبه‌ی پارامترهای جریان به واسطه‌ی حل ضمنی، منابع صوتی با نمونه‌برداری نوسانات فشاری از دیواره‌ی نفوذ و صفحه‌ی مجازی در جریان، با کمک معادلات FWH بررسی شده است. این منابع در لحظات جدا شدن و تشکیل حباب‌ها نشان داده شده و با کمک معادله‌ی انتقال موج، نوسانات لحظات جدا شدن و تشکیل حباب در دریافت‌کننده‌ها تعیین شده است. همچنین با کمک تبدیل فوریه (FFT) داده‌ها از میدان زمان به میدان فرکانس منتقل شده و با ثبت کمیت‌های آکوستیکی، تحلیل‌های طیفی از جمله فرکانس جدا شدن حباب‌ها انجام شده است.

۲. معادلات سیستم

اکثر محققین پیشین^[۱۷-۱۵] برای یافتن پارامترهای انتشار امواج در سیستم‌ها، مدل‌ها را به صورت تک بعدی، در راستای انتشار ساده سازی کرده و پارامترهای انتشار امواج از جمله سرعت صوت و میرایی را محاسبه کرده‌اند. در مسائل ایجاد و انتشار نوبز در سیستم، علاوه بر پارامترهای انتشار امواج، پارامترهای منبع تولید نیز بسیار مهم است و نیازمند بررسی فیزیک سیستم، نحوه‌ی تولید امواج و انتشار آن در محیط، توسط یک مدل جامع است. در این میان بعضی از محققین^[۵] از مدل‌های دو بعدی برای بررسی نوبز استفاده کرده‌اند. این مدل‌ها گرچه محدوده‌ی فرکانس نوبزهای تولید شده را نشان می‌دهند اما مدل‌های مناسبی برای یافتن دامنه‌ی واقعی از سطح نوبزهای تولیدی نیستند. همچنین با توجه به ماهیت سه بعدی جریان آشفته و انتشار سه بعدی امواج آکوستیک در محیط اساساً مدل‌های سه بعدی فهم بهتری از جریان و دامنه واقعی نوبزها فراهم می‌کنند.

با توجه به اهمیت شکل حباب‌های تولیدی و تخمین حرکت درست توده‌ی گاز در تعیین مراکز نوبز، مدل حجم سیال که در تعیین حرکت و نحوه‌ی شکل‌گیری سطح حباب نسبت به سایر مدل‌های موجود توانا تر است انتخاب می‌شود.^[۱۸] روش حجم سیال با دنبال کردن کسر حجمی در شبکه، سطح مشترک را شبیه‌سازی می‌کند. در این مدل دنبال کردن سطح مشترک از طریق حل معادله پیوستگی برای فازها و یافتن کسر حجمی فازها انجام می‌گیرد. براین اساس رابطه‌ی

به مدل اسماکرونسکی و لیلی، مدل WALE و مدل انرژی جنبشی مقیاس‌های زیرشبکه اشاره کرد.^[۱۹]

در کنار به کارگرفتن یک حل زمانی دقیق منطبق بر فیزیک جریان و مدل‌های معتبر برای بررسی دقیق آشفتگی جریان، از مدل‌های مناسب آکوستیکی نیز استفاده می‌شود تا با تعیین منابع صوتی، انتشار امواج در محیط بررسی شود و این امواج در محل گیرنده ثبت شوند.

شایان ذکر است برای تحلیل میدان آکوستیک از سه روش استفاده می‌شود: روش‌های مستقیم^{۱۷}، روش‌های بررسی منابع نوین براساس پهنای باند در محدوده فرکانس^{۱۸} و روش‌های انتگرالی برپایه‌ی آنالوژی آکوستیک^{۱۹}.

در روش‌های مستقیم هم تولید و هم انتشار به صورت مستقیم توسط معادلات دینامیکی در شبکه حل می‌شود. این روش نیازمند حجم زیادی از محاسبات، شبکه‌ی مش بندی کاملاً دقیق بین منبع و دریافت کننده و اعمال شرایط مرزی غیرقابل انعکاس است. مدل به شدت نیازمند حل میدان است و نه تنها محل‌های تولید نوین باید بادقت حل شود بلکه میدان تا دریافت کننده نیز باید با کیفیت بالا مش زده شده و حل شود. این روش عمدتاً در میدان‌های نزدیک کاربرد دارد.

از روش‌های یافتن منابع نوین براساس پهنای باند عموماً برای استخراج محدوده فرکانس امواج منتشر شده و محل ایجاد نوینها استفاده می‌شود. این روش تنها توانایی یافتن محل تولید نوین در جریان را دارد و امکان محاسبه‌ی دقیق انتشار امواج در گیرنده را نداشته و تنها برای حل اولیه و یافتن مراکز تولید صوت استفاده می‌شود.

براین اساس برای بررسی میدان‌های میانه و دور تنها روش‌های انتگرالی برپایه‌ی آنالوژی لایت هیل می‌تواند جایگزین مناسبی برای حل مستقیم باشد. در روش‌های انتگرالی منابع تولید صوت معادل منابع یک، دو یا چهار قطبی شده، روابط انتگرالی در میدان زمان از معادلات گذرای سیستم استخراج می‌شود و توسط حل آن در سطوح انتگرالی تغییرات فشاری و سیگنال‌های آکوستیک درگیرنده محاسبه می‌شود.

استفاده از آنالوژی آکوستیک سبب جدا شدن روابط انتشار امواج و تولید آن می‌شود و محاسبه‌ی پارامترهای آکوستیک از انتشار آن را جدا می‌کند. مدل FWH از جمله روش‌های انتگرالی است که با کمک آنالوژی لایت هیل منابع صوتی در جریان را می‌یابد. در این مدل متغیرهای میدان در سطوح انتگرالی حل شده و سپس با تبدیل فوریه این پارامترها به میدان فرکانس منتقل می‌شود و با پردازش آن‌ها پارامترهای آکوستیک به صورت سطح فشار صوت (SPL) و توان طیفی ارائه می‌شود. از جمله محدودیت‌های مهم این روش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. به منابع صوتی بیش از محیط انتشار توجه می‌کند.

۲. اثر جریان بر انتشار نادیده گرفته می‌شود.

۳. اثر دیواره و انعکاس بر امواج ناچیز است.^[۲۰]

معادلات مدل FWH به صورت معادلات ناهمگن موج از ضرب معادله پیوستگی در معادله‌ی ناویر - استوکس به دست می‌آید:

$$\frac{\lambda}{a_0} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \nabla^2 p' = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} [T_{ij} H(f)] - \frac{\partial}{\partial x_i} \{ [P_{ij} n_j + \rho u_i (u_n - v_n)] \delta(f) \} + \frac{\partial}{\partial t} \{ \rho \cdot v_n + \rho (u_n - v_n) \delta(f) \} \quad (7)$$

که در آن u سرعت سیال و v سرعت سطح است؛ n نیز راستای عمود بر سطح است. p' فشار صوت در میدان است. T_{ij} تانسور تنش لایت هیل و P_{ij} تانسور تنش فشاری است.

حل معادله‌ی ۷ به کمک توابع گرین محاسبه شده و حل شامل روابط انتگرالی سطحی و حجمی است. انتگرال سطحی بیانگر منابع صوتی تک قطبی و دو قطبی و تا حدی چهارقطبی است. درحالی که انتگرال حجمی تنها بیانگر منابع صوتی چهارقطبی در نواحی خارج از سطح است. منابع صوتی چهارقطبی در صورت وجود، قدرت کمتری نسبت به سایر منابع صوت دارند. بنابراین با حذف انتگرال‌های حجمی ناشی از آن، فشار امواج صوتی به صورت زیر استخراج می‌شود. ترم‌های فشاری حاصل از انتگرال‌های سطحی ناشی از بارگذاری و تغییرات سرعت محاسبه شده عبارت است از:

$$p'(\vec{x}, t) = p'_T(\vec{x}, t) + p'_L(\vec{x}, t) \quad (8)$$

$$4\pi p'_T(\vec{x}, t) = \int_{f=0} \left[\frac{\rho_0 (\dot{U}_n + U_n)}{r(\lambda - M_r)^2} \right] ds + \int_{f=0} \left[\frac{\rho_0 U_n \{ r \dot{M}_r + a_0 (M_r - M^T) \}}{r^2 (\lambda - M_r)^2} \right] ds \quad (9)$$

$$4\pi p'_L(\vec{x}, t) = \frac{\lambda}{a_0} \int_{f=0} \left[\frac{\dot{L}_r}{r(\lambda - M_r)^2} \right] ds + \int_{f=0} \left[\frac{L_r - L_M}{r^2 (\lambda - M_r)^2} \right] ds + \frac{\lambda}{a_0} \int_{f=0} \left[\frac{L_r \{ r \dot{M}_r + a_0 (M_r - M^T) \}}{r^2 (\lambda - M_r)^2} \right] ds \quad (10)$$

در این معادلات U و L مطابق روابط ۱۱ و ۱۲ تعریف می‌شود؛ r نشان دهنده‌ی فاصله تا محل دریافت کننده است.^[۲۱]

$$U_i = v_i + \frac{\rho}{\rho_0} (u_i - v_i) \quad (11)$$

$$L_i = P_{ij} n_j + \rho u_i (u_n - v_n) \quad (12)$$

۳. میدان محاسباتی و شرایط مرزی

سیستم در محل نفوذ به صورت دوفاز و در سایر نقاط دیگر تکفاز مایع، به صورت سه بعدی عمودی رو به بالا و بدون انتقال جرم و حرارت بین فازگازی و سیال در نظر گرفته شده است. مدل به صورت استوانه‌یی با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر است و در وسط انتهای سیلندر یک اوریفیس به قطر ۴ و ارتفاع ۵ میلی‌متر در راستای محور x ها در نظر گرفته شده و برای نمونه برداری از نوسانات فشاری یک نیم استوانه درون جریان قرار داده شده تا در صفحه موازی جریان، نوسانات فشاری جریان به هنگام تشکیل و جدا شدن حباب استخراج شود.

شکل ۱ نمای شبکه مش بندی برای گسسته سازی معادلات و حل آن در میدان است. شبکه در محدوده‌ی ورود گاز و محدوده‌ی ثبت داده‌های آکوستیک اصلاح شده و تعداد کل سلول‌های شبکه در حدود ۲۸۰ هزار است. به منظور ردیابی سطح مشترک و نمایش حرکت حباب توسط شبکه‌ی مش و عدم ایجاد حساسیت حل آب و نسبت به میدان محاسباتی، نرخ نفوذ در محدوده‌ی ۰/۸ تا ۰/۴ کیلوگرم بر ثانیه است. شرایط مرزی ورودی به صورت دبی جرمی آب و هوا، شرط عدم لغزش به عنوان شرط مرزی دیواره‌یی، شرط فشار اتمفسفریک به عنوان شرط مرزی خروجی در نظر گرفته شده است.

از روش میان‌یابی و گسسته‌سازی Geo Reconstruct بهره برده شده است. این الگو مبتنی بر میان‌یابی شبه‌خطی است و با دقت بیشتری سطح مشترک را ایجاد می‌کند، درحالی‌که الگوی Donor Acceptor مبتنی بر میان‌یابی تک‌خطی است و عموماً برای کاهش نفوذ عددی کاربرد دارد.

سپس به منظور محاسبات نوسانات فشار آکوستیک روش LES روی مدل پیاده شده و با الگوی تفاضل محدود مرکزی^{۲۵} معادلات مومنتوم گسسته‌سازی شده است. شایان ذکر است با توجه به اهمیت ردیابی درست سطح مشترک، اعمال روش LES سبب جواب‌های نامعتبر و کشیدگی بیش از حد در سطح مشترک می‌شود. در این حالت استفاده از روش‌های معتبر برای بازسازی سطح مشترک و یا استفاده از روش‌های هیبریدی از جمله ترکیب Level Set با حجم سیال می‌تواند در کنار حفظ شرایط فیزیکی، انحنا و شکل سطوح تماس را با دقت بالایی استخراج نماید.^[۱۳] بر این اساس روش‌های مختلف بازسازی سطوح بررسی شده و نتیجه گرفته می‌شود که به هنگام استفاده از حل ضمنی برای جریان‌های دوفازی و اعمال مدل آشفتگی LES روش HRIC اصلاح شده و یا الگوریتم^{۲۶} CICSAM گزینه مناسبی برای جایگزینی Geo Reconstruct است.^[۱۸]

به منظور شبیه‌سازی میدان آکوستیکی توسط روش FWH، نوسانات فشاری از منابع صوت نمونه‌برداری می‌شود و با دستیابی به نوسانات فشار آکوستیک در محل دریافت‌کننده‌ها با انتقال فوری، تحلیل‌های طیفی امکان پذیر می‌شود.^[۲۱] شایان توجه است که محدوده نویزهای منتشره در میدان طیفی ۲-۰ kHz است و به منظور برداشت فرکانس آن با توجه به رابطه‌ی زیر گام زمانی در محدوده ۱۰^{-۲} تا ۲٫۵ × ۱۰^{-۲} در نظر گرفته می‌شود.

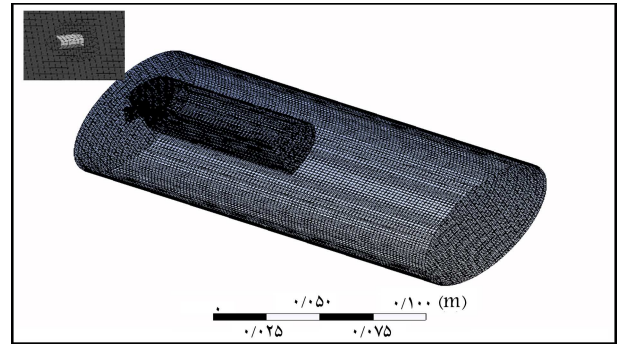
$$f = \frac{1}{\Delta t} \xrightarrow{\Delta t=10^{-2}} f = \frac{1}{2 \times 10^{-2}} = 500 \text{ Hz} \quad (13)$$

همچنین در حل انتگرالی برای محاسبه‌ی تأخیر زمانی بین زمان انتشار و زمان پذیرش از روش نمایش روبه جلو در زمان^{۲۷} استفاده می‌شود تا محاسبه‌ی صوت در همان لحظه‌ی که ایجاد می‌شود درگیرنده ممکن شود.

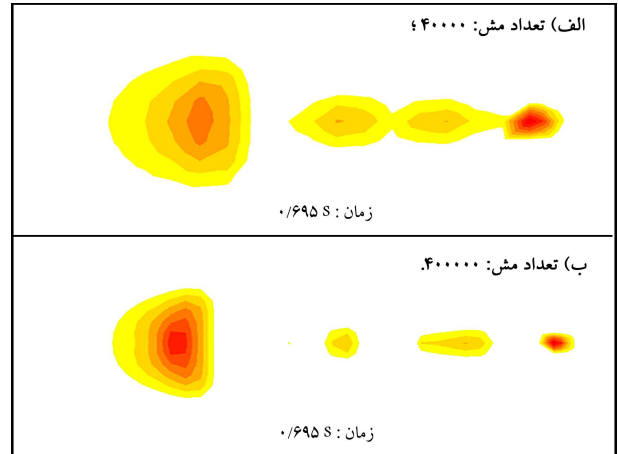
۵. صحت‌سنجی مدل

مدل عددی با مقایسه نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی حاصل از نفوذ گاز که توسط وارکوز^{۲۸} انجام شده، صحت‌سنجی شده است.^[۲۲] بر این اساس استوانه‌ی با قطر ۲۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۱۰ میلی‌متر با اوریفیسی با قطر ۱ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰ در وسط انتهای آن در نظر گرفته شده است. دبی ورودی گاز ۲۴۰ میلی‌لیتر بر دقیقه در سیال ساکن که با توجه به سطح مقطع سرعت ۱٫۲ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی خروجی فشار ثابت با دمای ۲۲°C است و نوسانات فشاری گاز در وسط ورودی نازل ثبت شده است و متعاقب آن سیگنال‌های آکوستیک در هیدروفون‌هایی که در جریان قرار داده شده، محاسبه می‌شود. به منظور صحت‌سنجی مدل در گام نخست نوسانات فشار آکوستیک در میدان زمان با داده‌های شبیه‌سازی شده مقایسه شده است. با توجه به شکل ۳ نوسانات مربوط به لحظات جدا شدن و یا تشکیل حباب است. همان‌طور که در این شکل نمایان است بزرگترین پیک در زمان ۰٫۲ رخ داده است که گویی شدن و جدا شدن کوچک‌ترین حباب است. همچنین بعد از زمان ۰٫۲ بزرگترین نوسان در لحظه ۰٫۲۲ رخ داده که در این زمان تشکیل و به هم پیوستن حباب‌ها مشاهده می‌شود.

با انتقال داده‌ها به میدان طیفی مقایسه بین فرکانس ثبت‌شده در مدل و نتایج تجربی در شکل ۴ انجام شده است. با توجه به آزمایش انجام‌شده فرکانس ثبت‌شده



شکل ۱. شبکه بندی سه بعدی سیستم.



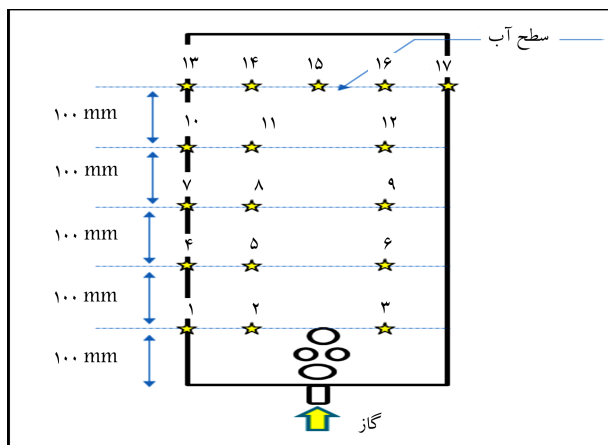
شکل ۲. مقایسه‌ی میدان فشار در صفحه‌ی مجازی.

همچنین برای نمایش استقلال مدل از شبکه‌ی میدان سرعت و فشار برای مش‌های غیرساختاری^{۲۰} با تعداد ۴۰ هزار، ۲۰۰ هزار و ۴۰۰ هزار سلول با هم مقایسه شده‌اند. در شکل ۲ میدان فشار در صفحه‌ی مجازی برای ۴۰ و ۴۰۰ هزار سلول مقایسه شده است؛ چنان‌که مشخص است منابع تولید و شکل پیشروی حباب‌ها با دقت بالایی مشابهت دارند. در بررسی عدد کورانت^{۲۱} برای فیزیکی بودن نتایج محدوده (CFL ≤ ۰٫۵) رعایت شده است.

۴. شبیه‌سازی عددی

برای شبیه‌سازی سه بعدی جریان نفوذ گاز به لوله عمودی، معادلات گذرای ناویر - استوکس با کمک نرم‌افزار فلوئنت و با روش حجم محدود (FVM) و برپایه‌ی گریدهای منظم^{۲۲} به صورت عددی حل شده است. روش دوفازی حجم سیال برای دنبال کردن سطح مشترک به مدل اضافه شده و نیروی حجمی ضمنی سیال نیز در کنار معادلات جزئی‌گرایان فشار و نیروهای حجمی در نظر گرفته شده است. همچنین برای حل مزدوج بین فشار و سرعت از الگوریتم فشار ضمنی با جداکننده PISO^{۲۳} استفاده شده است.

در مدل حجم سیال برای گسسته‌سازی معادلات فشار باید از حلال‌های مبتنی بر فشار استفاده کرد؛ استفاده از حلال‌های برپایه چگالی جواب‌های معتبری ارائه نمی‌دهد. بر این اساس از الگوی^{۲۴} PRESTO استفاده شده است. محاسبات اولیه برای ورود گاز با کمک مدل‌های RANS انجام شده و معادلات مومنتوم توسط الگوی مرتبه دوم روبه جلو گسسته‌سازی شده است. برای بازسازی سطح مشترک



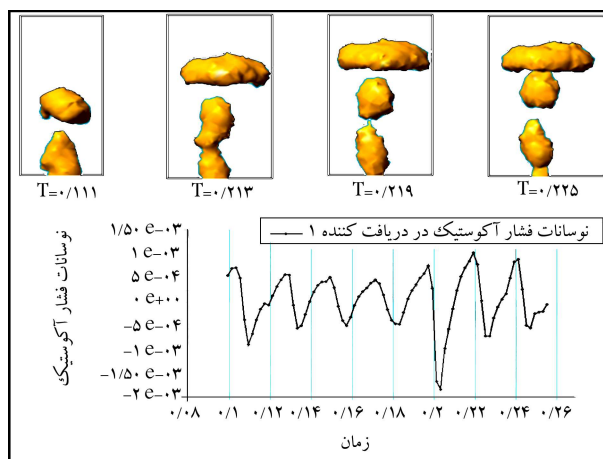
شکل ۵. محل قرارگیری دریافت کننده‌ها در سیستم.

درون و بیرون حباب، بدنه حباب به جریان وارد می‌کند. با توجه به کاهش اختلاف فشار با افزایش شعاع حباب، دامنه نوسانات و فرکانس ایجاد شده نیز با افزایش شعاع کاهش می‌یابد. همچنین بیشترین تحرکات و ضربات به هنگام جدا شدن و یا متصل شدن حباب‌ها صورت می‌گیرد، بنابراین بایستی سیگنال‌های تولید شده در لحظه گلوبی شدن و تشکیل حباب‌ها بیشترین شدت را داشته باشند و پس از آن دامنه نوسانات به صورت نمایی کاهش یابد. به منظور بررسی نتایج، داده‌ها در میدان‌های زمانی و طیفی بررسی می‌شوند که در زیر به بررسی و تحلیل آن پرداخته شده است. شایان ذکر است که جهت نمونه‌برداری نوسانات فشار آکوستیک، هیدروفون‌ها بر اساس شکل ۵ در فاصله‌های 10° میلی‌متر از هم به موازات انتشار حباب‌ها در جریان قرار داده شده است.

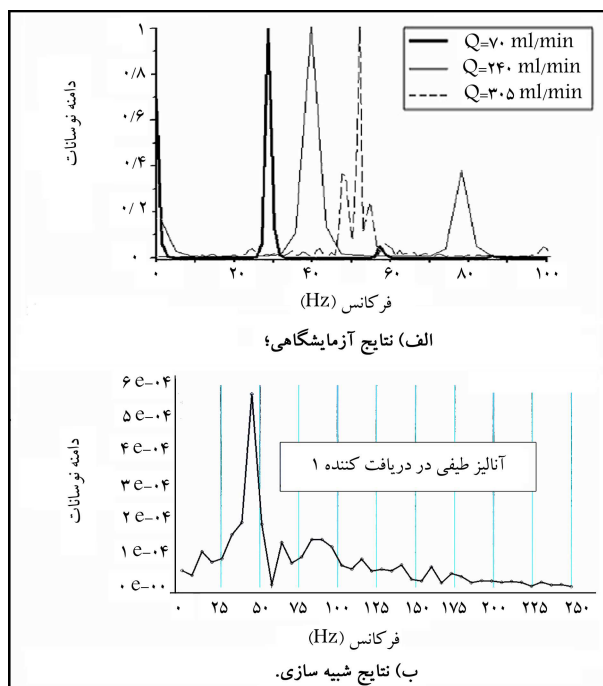
الف) میدان زمان

اولین نکته در ثبت داده‌های نوسانات فشاری در میدان زمان، ثبت نوسانات با الگوهای یکسان در دریافت کننده‌های درون جریان است. تأثیر نوسانات غیرفیزیکی که عمدتاً توسط مرزها در سیستم ایجاد می‌شوند، سبب تغییر الگوها در دریافت کننده‌ها می‌شود. به این منظور داده‌ها در دریافت کننده‌های گوناگون در شکل ۶ بررسی شده است. نتایج نشان دهنده‌ی این مهم است که در دریافت کننده‌های نزدیک به محل جدایش حباب‌ها نوسانات با شکل یکسان ثبت شده، اما با دور شدن محل دریافت کننده‌ها، با وجود ثبت پیک‌های مهم، الگوی شکل‌ها به تدریج تحت تأثیر رفتار غیر فیزیکی قرار گرفته است. نتیجه‌گیری می‌شود که اثرات غیرفیزیکی در زمان بررسی میدان‌های دور سبب تغییر شدید الگوها می‌شود و در این بررسی‌ها حائز اهمیت است.

با توجه به شکل ۶ پیک نوسانات باید مربوط به لحظات جدا شدن یا شکل‌گیری حباب باشد؛ بدین منظور در شکل ۷ بازه زمانی هر پیک نشان داده شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که بزرگ‌ترین پیک مربوط به جدا شدن کوچک‌ترین حباب است. همچنین مشاهده می‌شود که در لحظه‌ی جدا شدن حباب‌ها پیک در لحظه‌ی گلوبی شدن رخ می‌دهد. شایان ذکر است که شکل ۶ و ۷ با نمونه‌برداری از دیواره‌ی نفوذ نوسانات ثبت شده است. در این شکل‌ها با وجود ردگیری پیک‌های اصلی در زمان جدایش و تشکیل حباب، کاهش دامنه‌ی نوسانات به صورت نمایی در سایر لحظات رخ نداده است. برای دستیابی به این مهم صفحه‌ی مجازی درون جریان در نظر گرفته می‌شود و نوسانات از محل جدایش حباب‌ها استخراج می‌شود. شکل ۸ بیانگر نوسانات مستخرج از صفحه‌ی مشاهده می‌شود که با برداشت نوسانات از صفحه‌ی مجازی تنها پیک‌های اصلی



شکل ۳. شبیه‌سازی میدان جریان (نمودار نوسانات فشار آکوستیک نسبت به زمان).



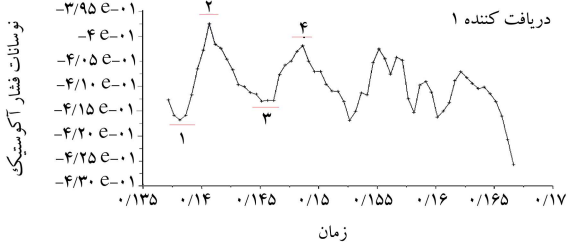
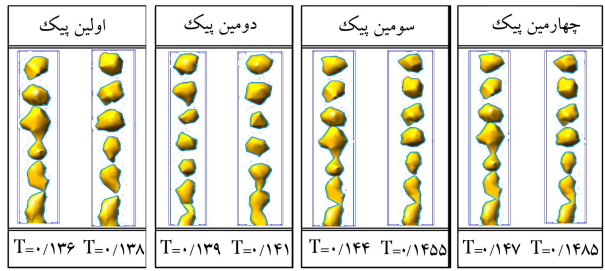
شکل ۴. مقایسه داده‌های تجربی با مدل با سرعت $1/2$ متر بر ثانیه (نمودار دامنه نوسانات نسبت به فرکانس).

برای تولید حباب در دبی 240 میلی‌لیتر بر دقیقه برابر 4° و 8° هرتز است. در مدل شبیه‌سازی شده این فرکانس‌ها دقیقاً نشان داده شده است و همچنین الگوی فرکانس نیز کاملاً به درستی تشخیص داده شده است و نوسان دوم در 8° هرتز نیز به ثبت رسیده است.

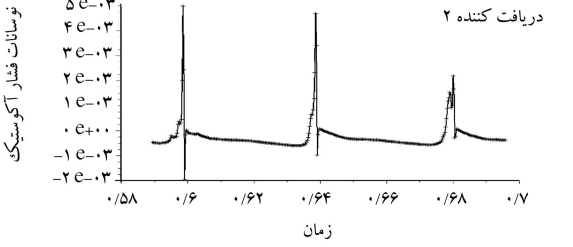
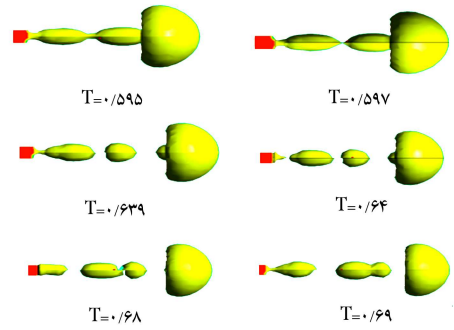
با توجه به نتایج تجربی مشاهده می‌شود که با افزایش دبی و بزرگ‌تر شدن حباب‌ها فرکانس کوچک‌تر می‌شود و رابطه‌ی عکس بین فرکانس و شعاع حباب مشاهده می‌شود.

۶. تجزیه و تحلیل نتایج

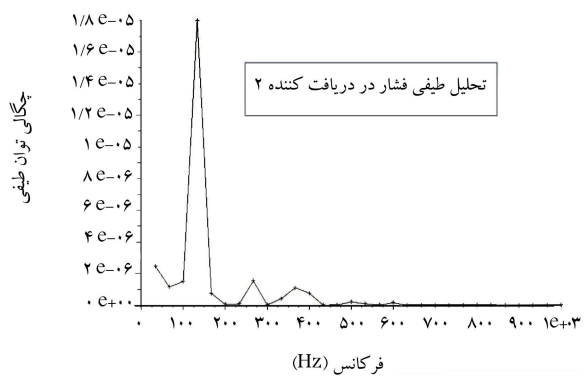
به هنگام تولید حباب، نوسانات فشاری در سیستم ایجاد و سیگنال‌هایی در محیط منتشر می‌شوند. این سیگنال‌ها به دلیل ضرباتی است که به دلیل اختلاف فشار



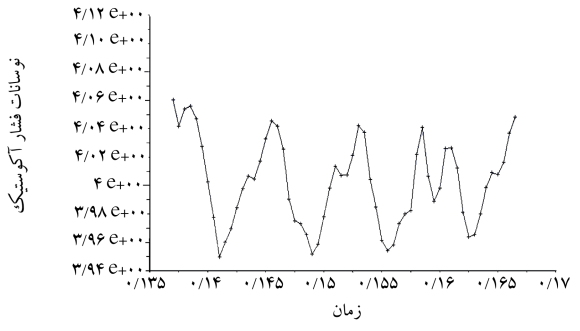
شکل ۷. مقایسه‌ی زمان جدا شدن حباب‌ها و نوسانات فشاری برای سرعت گاز ۰٫۸ متر بر ثانیه.



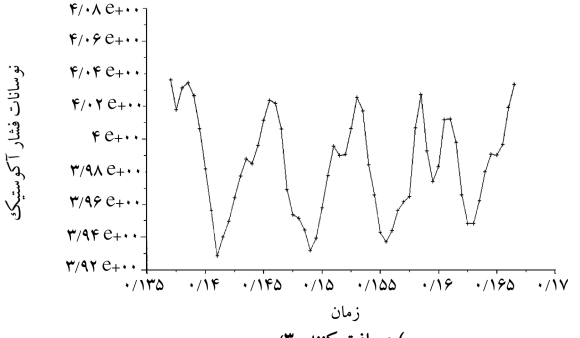
شکل ۸. ثبت نوسانات فشاری در صفحه مجازی موازی جریان برای سرعت گاز ۰٫۳۱۸ متر بر ثانیه.



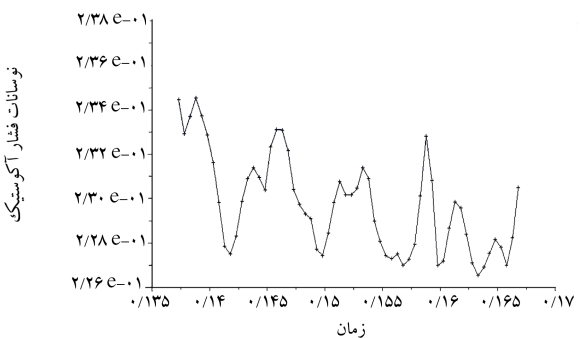
شکل ۹. فرکانس تشکیل حباب برای سرعت گاز ۰٫۸ متر بر ثانیه (نمودار توان طیفی برحسب فرکانس).



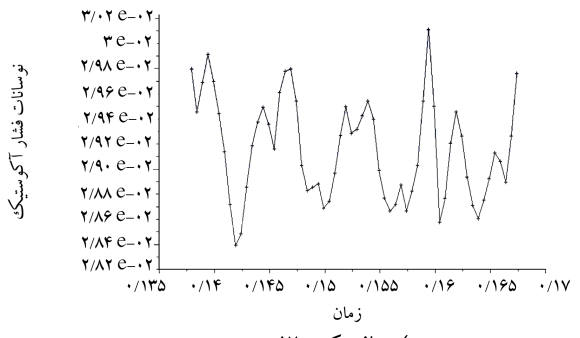
الف) دریافت کننده ۲۴



ب) دریافت کننده ۳۳



ج) دریافت کننده ۴۲



د) دریافت کننده ۱۷

شکل ۶. ثبت نوسانات فشاری در دیواره‌ی نفوذ.

مشاهده می‌شود و در سایر لحظات دامنه‌ی نوسانات به صورت نمایی کاهش می‌یابد.

با بررسی نوسانات در شکل ۸ مشاهده می‌شود که در لحظات ۰٫۶ و ۰٫۶۴ به علت جدا شدن حباب‌های با شعاع تقریباً یکسان، دامنه‌ی نوسانات تقریباً یکسانی ثبت شده اما در ۰٫۶۸ که تشکیل حباب با شعاع بزرگ‌تر است پیک نوسانات با دامنه‌ی کوچک‌تر ایجاد شده است.

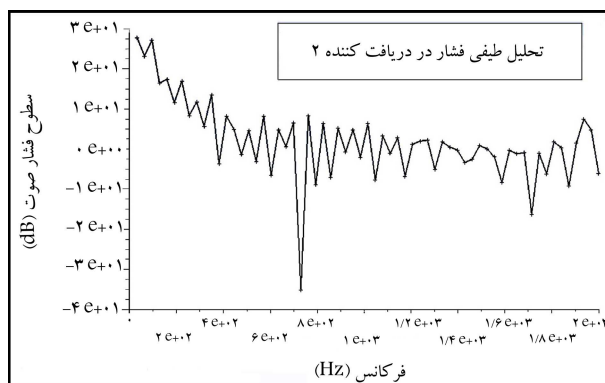
در حدود 75° هرتز ظاهر شده است. همچنین مشاهده می‌شود با کاهش سرعت، محدوده‌ی فرکانس افزایش یافته است.

۷. نتیجه‌گیری

در این تحقیق حل زمانی جریان گذرا با کمک مدل آشفتگی LES و مدل دوفازی حجم سیال انجام شده است. سپس با استفاده از مدل FWH کمیت‌های میدان آکوستیکی ثبت شده است. با استخراج نوسانات فشار صوت با کمک روابط انتگرالی و تعیین مراکز منابع تولید صوت، داده‌های آکوستیک به فضای فوری منتقل شده است. با بررسی‌های انجام شده نشان داده شده است که نوسانات فشاری در لحظه‌ی گلوبی شدن حباب‌ها ایجاد شده است و بزرگ‌ترین نوسانات در گلوبی شدن حباب‌های کوچک رخ داده است. همچنین با نمونه‌برداری از نوسانات در صفحه موازی جریان، برداشت بهتر از پیک‌ها و کاهش نمایی دامنه رخ می‌دهد.

همچنین با انتقال داده‌ها به میدان فرکانس، فرکانس جدایش حباب و تشکیل حباب استخراج و با نتایج تجربی مقایسه شده است. همچنین با کاهش دبی و کوچک شدن سایز حباب‌ها فرکانس ردیابی شده افزایش یافته است.

با توجه به موارد گفته شده لزوم انجام تحقیقات بیشتر در خصوص شناسایی، انتشار امواج و حذف اثرات غیرفیزیکی ضروری است.^[۲۳] اعمال شرایط مرزی فشار استاندارد بر روی مرزهای فرضی با دامنه کوتاه باعث انعکاس و انتشار امواج غیرواقعی در میدان حل می‌شود.^[۲۴] برای دستیابی به بررسی‌های دقیق‌تر در مورد انتشار نویز در محیط بایستی انتشار این امواج فرضی کنترل شود. همچنین انجام تحقیقات بیشتر در خصوص اعمال محدوده مناسب در منطقه تولید صوت، اعمال انتگرال‌های حجمی و نحوه قرارگیری این صفحه در میدان حائز اهمیت است.



شکل ۱۰. فرکانس تشکیل حباب برای سرعت 318° گاز در سیال ساکن در بازه 66° تا 7° ثانیه (نمودار سطح فشار صوت برحسب فرکانس).

ب) میدان طیفی

با تبدیل داده‌های میدان زمان به میدان فرکانس با انتقال FFT امکان تحلیل‌های طیفی ایجاد می‌شود. مشاهده می‌شود که در فیلتر پایین نتایج بزرگترین نوسانات در فرکانس 11° هرتز رخ داده است که فرکانس تولید حباب در ابعاد $9/5$ میلی‌متر است. همچنین با مقایسه‌ی شکل ۹ و شکل ۴ مشاهده می‌شود با کم کردن دبی و کوچک‌تر شدن حباب‌ها فرکانس تولیدی حباب افزایش می‌یابد. همچنین بیشترین سطح فشار صوت در فرکانس 11° هرتز است که در تمامی دریافت کننده‌ها در 5 دسی‌بل ثبت شده است.

همچنین نوسانات فشاری برای سرعت 318° گاز در سیال ساکن در بازه 66° تا 7° استخراج شده است. در تحلیل طیفی، فرکانس تشکیل حباب مطابق شکل ۱۰

27. forward-time projection

28. Vazquez

پانویس‌ها

1. volume of fluid
2. large eddy simulation
3. high resolution interface capturing scheme
4. fowcs-Williams & Hawkings
5. fast fourier transform
6. active
7. passive
8. low pass filter
9. high pass filter
10. monopole
11. dipole
12. quadrupole
13. virtual mass
14. two fluid model
15. compressive scheme
16. reynolds averaged navier stokes
17. direct method
18. method that utilizes broadband noise source models
19. integral method based on acoustic analogy
20. unstructured
21. courant - friedrichs - lewy (CFL)
22. cute cell
23. pressure implicit with splitting of operator
24. pressure staggering option
25. bounded central differencing
26. compressive interface capturing scheme for arbitrary meshes

منابع (References)

1. Gabriel Merhy de Oliveira et.al. "Modeling and validation of pressure propagation in drilling fluids pumped into a closed well", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **103**, pp.61-71 (2013).
2. Heinrich Kuttruff, *Acoustics, English edition published 2007 by Taylor & Francis*, 2 Park Square, Milton Park, Abingdon, Oxon OX14 4RN
3. Shuib Husin et.al. "Feasibility Study on the Use of the Acoustic Emission Technology for Monitoring Flow Patterns in Two Phase 251-256 Flow", *Flow Measurement and Instrumentation* **33** (2013).
4. jbar, A.A., Al-Masry, W., Ali, A. "Prediction of flow regimes transitions in bubble columns using passive acoustic measurements", *Chemical Engineering and Processing* **48**, pp.101-110 (2009).
5. Jiawei Liu, Simulation of Whistle Noise Using Computational Fluid Dynamics and Acoustic Finite Element Simulation, M.Sc. Thesis, University of Kentucky, Lexington, Kentucky (2012).

6. Lighthill, M.J. "On Sound Generated Aerodynamically", *Proc. Roy. Soc. London, A* **211**, pp.564-587 (1952).
7. Yingfeng Meng. "Investigation on propagation characteristics of the pressure wave in gas flow through pipes and its application in gas drilling" *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **22**, pp.163-171 (2015).
8. Chung, N.M. "Sound attenuation and its relationship with interfacial area density in an air-water two-phase bubbly flow", *Flow Meas. Instrum.* **31** (1992).
9. Xiao-Xuan Xu., Jing. Gong , " A united model for predicting pressure wave speeds in oil and gas two-phase pipeflows" , *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **60** 150-160 (2008).
10. Pablo Antonio Vallejos Olivares , Acoustic Wave Propagation and Modeling Turbulent Water Flow with Acoustics for District Heating Pipes, PhD Thesis, Uppsala University , Uppsala Sweden (2009).
11. M.Elanie P.and. Christophe, B. Several Computational Aeroacoustics Solutions for the Ducted Diaphragm at Low Mach Number, *16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference/AIAA* 3996 (2010).
12. Jingting LIU. Acoustic Analysis on Jet Bubble Formation Based on 3d Numerical Simulations. Inter noise, 5103-10 (2016).
13. F. Xiao, M. Dianat, M. McGuirk, J.J. "LES of turbulent liquid jet primary breakup in turbulent coaxial air flow", *International Journal of Multiphase Flow*, **60**, pp.103-118 (2014).
14. Nishant. K. Singh, Philip A. Rubini. "Large Eddy Simulation of acoustic pulse propagation and turbulent flow interaction in expansion mufflers", *Applied Acoustics*, **98**, pp.6-19 (2015).
15. Chung, N.M. "Sound Attenuation and Its Relationship with Interfacial Area Density in an Air-Water Two-Phase Bubbly Flow", *Flow Meas. Instrum*, **3**(1), pp.45-53 (1992).
16. Xiangwei Kong. "A new method for predicting the position of gas influx based on PRP in drilling operations", *Hindawi Publishing Corporation Journal of Applied Mathematics*, **1**, Article ID 969465 (2014).
17. Yuanhua Lin. "Calculation analysis of pressure wave velocity in gas and drilling mud two-phase fluid in annulus during drilling operations", *Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering*, Volume **1**, Article ID 318912 (2013).
18. Pedram Hanafizadeh. "Simulation of gas-liquid two phase flow in upriser pipe of gas-lift systems", *Energy Equipment and Systems*, **2**(1), pp.25-42 (2014)
19. Nishant. K., Philip, S., Rubini A. "Large eddy simulation of acoustic pulse propagation and turbulent flow interaction in expansion mufflers", *Applied Acoustics* **98**, pp.6-19 (2015).
20. Tadeusz, K. " Comparison of CICSAM Tomasz, W. and and HRIC high-resolution schemes for interface capturing", *Journal Of heoretical And Applied Mechanics*, **462**, pp. 325-345, Warsaw (2008).
21. Ffowcs-Williams, J.E. and Hawkings, D.L. Sound Generation by Turbulence and Surfaces in Arbitrary Motion. *Proc. Roy. Soc. London*, A264:321-342 (1969).
22. Vazquez A., Leifer I., Sanchez R.M. "Consideration of the Dynamic Forces During Bubble Growth in a Capillary Tube." *Chem. Eng. Sci*, **65**(13):4046-54 (2010).
23. Schmalz, J., Kowalczyk, W. "Implementation of acoustic analogies in openFOAM for computation of sound fields", *Oopen Journal of Acoustics*, **5**, pp.29-44 (2015).
24. Jiafeng, Wu. " Propagation model with multi-boundary conditions for periodic mud pressure wave in long well-bore", *Applied Mathematical Modelling* (2015).