مقایسه روشهای جرم افزوده و آکوستیک در پیش‌بینی دهانه آزاد خطوط لوله فراساحل در هنگام زلزله

سید محسن صدرالسادات[۱]، مصطفی زین الدینی[۲*]

۱- کارشناس ارشد سازه‌های دریایی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۲- دانشیار سازه های دریایی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

چکیده

خطوط لولهٔ فراساحل معمولاً به صورت غیرمدفون اجرا می‌شوند. دهانه‌های آزاد آنها ممکن است از ابتدا به علت ناهمواری بستر وجود داشته باشند و یا بعداً در اثر آبشستگی در زیر لوله ایجاد گردند. این دهانه‌های آزاد نقاط ضعفی برای لوله محسوب خواهند شد که ممکن است تحت نوسانات ناشی از تشکیل گردابه قرار گیرند یا واکنش‌های نامطلوبی به تحریک‌های شدید بستر نشان دهند.

در این مقاله میزان دقت روش متداول و ساده شدهٔ جرم افزوده در مقایسه با روش دقیق‌تری برای مدلسازی اندرکنش آب و لوله مورد ارزیابی قرار گرفته است. در روش اخیر سیال اطراف لوله به وسیلهٔ محیط آکوستیک و به روش اجزای محدود مدلسازی شده است. هر دو نوع تحریک دینامیکی نامنظم و هارمونیک زلزله بررسی شده‌اند. همچنین اثر اندرکنش خاک و لوله در مرزهای دهانهٔ آزاد در تعدادی از تحریک‌ها در نظر قرار گرفته است. صحت سنجی مدل‌های عددی ازطریق مقابله مشخصه‌های دینامیکی آنها با برخی روابط تحلیلی-تجربی موجود انجام پذیرفته است.

تحلیلهای انجام شده حاکی از آن است که روش جرم اضافه عموماً نتایج محافظه‌کارانه‌تری را نسبت به مدل آکوستیک ارائه کرده است. تحت تحریک‌های هارمونیک میزان انحراف مشاهده شده دو روش در پیش‌بینی حداکثر کرنش طولی لوله به حدود ۶۰ درصد بالغ شده است. در تحریک زلزله حداکثر انحراف مشاهده شده حدود ۱۵ درصد بوده است. تفاوت دو روش با کاهش طول دهانه، افزایش یافته و در تحریک قائم بیشتر از تحریک افقی بوده است.

کلمات کلیدی: دهانهٔ آزاد، خطوط لولهٔ فراساحل، زلزله، اندرکنش آب و لوله، اجزاء محدود، آکوستیک، جرم افزوده

COMPARISON BETWEEN ADDED MASS AND ACOUSTIC APPROACHES IN PREDICTING FREE SPANNING OFFSHORE PIPELINES' RESPONSE TO EARTHQUAKE

S.M. Sadrossadat[1], M. Zeinoddini[2]

1-M.Sc.in Marine Structures, Faculty of Civil Eng., KNToosi University of Technology
2-Associate Professor, Faculty of Civil Eng., KNToosi University of Technology

Abstract

Offshore oil/gas pipelines are usually installed unburied. Free spans in the line may occur initially by an uneven seabed or be created later due to under-scouring. Free spans are usually unfavourable spots in the submarine pipeline. They are vulnerable to vortex

* نویسنده مسوول مقاله zeinoddini@kntu.ac.ir

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.10.2.2]

induced vibrations, excessive stresses in the pipe wall or may exhibit undesirable responses to strong ground excitations.
In this paper, the simplified/conventional added mass method for simulation of water-pipe interactions has been evaluated against a more elaborate coupled acoustic-structural model. With the coupled system the surrounding sea, the pipe body, the sea bed and the free-spanning have all been incorporated in the model. Effects from both irregular (earthquake) and harmonic excitations have been investigated. The validation of numerical models has been achieved by comparison of their dynamic characteristics to some available analytical-experimental relationships.
From the results of the current investigation it was noticed that the added mass method generally predicted more conservative free spanning responses in comparison to those from the acoustic model. Under harmonic excitations, the predictions from the two models for the maximum longitudinal strain in the pipeline deviated around 60%. For irregular (seismic) excitations, this deviation came down to about 15%. The disagreement between predictions from the two methods was increasing by the decrease in the span length. The difference was more remarkable for vertical excitations as compared to the horizontal ones.
Keywords: Offshore Pipelines, Free Spanning, Earthquake, Water-Pipe Interaction, Finite Element, Acoustic, Added Mass

۱- مقدمه

از سال ۱۹۴۴ کـه اولـین خـط لولـهٔ فراسـاحل در دریای شمال نصب گردید تا کنون بیش از یکصد هـزار کیلومتر خطوط لولهٔ زیر دریا طراحی و اجرا شده اسـت [۱]. توسعهٔ بهره‌برداری از میادین نفت و گاز فراسـاحل جنوب ایران در سالهای اخیر نیز، مویدی دیگر بـر نیـاز رو به رشـد احـداث خطـوط لولـهٔ فراسـاحل در کـشور می باشد. در مناطقی نظیر خلیج فارس و دریای عمـان لحاظ کردن اثر زلزله در طراحی خـط لولـهٔ فراسـاحلی امری الزامی خواهد بود.

روش متداول تحلیل دینامیکی خط لولـه بـرای مقـصد طراحی، مدلسازی آن با استفاده از المانهای تیری[1] و بر مبنای روش اجزاء محدود اسـت [۲]. DNV [۳] ایـن روش را برای بررسی اثـرات خـستگی و PRCI [۴] آن را برای بررسی اثرات زلزله توصیه مـی‌کننـد. Bai [۵] نیز با روشی مشابه و اعمـال تاریخچـهٔ بارگـذاری خـط لوله، به ارائهٔ مدلی جهـت تحلیـل شـرایط درجـای[2] آن می‌پردازد. گلبهار [۶] بر مبنای روش Bai بـه بررسـی اثرات زلزله‌های شدید بر خطوط لولهٔ زیر دریا پرداختـه است.

خطوط لولهٔ فراساحل معمولاً به صورت غیر مدفون اجرا می‌شوند و دهانه‌های آزاد آنها ممکن اسـت از ابتـدا بـه علت ناهواری بستر وجود داشته باشند و یا بعـداً در اثـر آبشستگی در زیـر لولـه ایجـاد گردنـد. در هـر صـورت، دهانه‌های آزاد به عنوان نقاط ضعف خط لوله محـسوب مـــی‌گردنـــد. Datta و Mashaly [۷] و Zhou و همکاران [۸ تا ۱۰] نیز اندرکنش آب و لوله برای یافتن پاسخ لرزه‌ای دهانهٔ آزاد را بـه روش جـرم افـزوده مـدل کرده‌اند.

در این مقاله با مدل‌سـازی اجـزای محـدود بـه بررسـی اندرکنش آب و لوله در زمان زلزله در قسمت دهانهٔ آزاد خطوط لولهٔ زیر دریا پرداخته شده است. روش متـداول جرم افزوده با روشی دقیق‌تر، با مدل کردن آب پیرامون با اسـتفاده از محـیط آکوسـتیک[3] بـا یکـدیگر مقایـسه شده‌اند. هم‌چنین تأثیرات طول دهانه، فرکانس و شدت تحریک زلزله و نیز راستای اثـر آن (افقـی یـا قـائم) بـر پاسخ دهانهٔ آزاد مورد ارزیابی قرار گرفتـه‌انـد. از جملـه تفاوتهای اساسی این دو روش آن است کـه اولاً، آب در روش جرم افزوده سیالی غیر قابل تراکم فرض می‌گردد در حالیکه تراکم پـذیری آن در روش آکوسـتیک دیـده می‌شود. ثانیاً امواج زلزله که از بارگذاری قائم بستر وارد

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.10.2.2]

آب شده و موجب بارگذاری لوله در دهانه آزاد می گردند صرفاً در روش آکوستیک مدل می‌شوند.

۲- معادلات حاکم

۲-۱- روش جرم افزوده

در این روش تاثیر آب پیرامون لوله با افزایش جرم لوله مدل می‌گردد. ایدهٔ جرم افزوده از حرکت شتابدار جسم غوطه‌ور در سیال، ناشی شده است. یک جسم شتاب‌دار سیال اطراف خود را تحت تاثیر حرکت خود قرار می‌دهد و می‌توان فرض کرد که بخشی از سیال اطراف جسم به همراه آن شتاب می‌گیرد. ایدهٔ جرم افزوده در اصل برای سیال تراکم ناپذیر و غیر لزج تدوین یافته است[۱۱].

به عنوان ساده ترین حالت، فرض می‌شود که جسم صلب و غوطه‌ور B (Body) در فضای بینهایت سیال، در حال حرکت مستقیم الخط و بدون چرخش است. سیال نیز در حال سکون، غیر لزج و تراکم ناپذیر فرض می‌گردد. اگر U سرعت مطلق جسم باشد، آنگاه سرعت سیال در هر نقطهٔ دلخواه N متناسب با U خواهد بود. حال اگر u، v و w مولفه‌های سرعت سیال باشند [۱۱]:

$$u = Uf_u, \quad v = Uf_v, \quad w = Uf_w \qquad (۱)$$

که f_u, f_v, f_w مقادیر سرعت سیال برای سرعت واحد جسم بوده و تابع مختصات نسبی نقطهٔ N می‌باشند. بنابراین انرژی سینماتیکی جزئی مکعبی شکل از سیال به ابعاد d_z, d_y, d_x خواهد بود:

$$E = \frac{1}{2}\rho U^2 \left(f_u^2 + f_v{}^2 + f_w^2\right) d_x\, d_y\, d_z \qquad (۲)$$

و انرژی سینماتیکی کل سیال خواهد بود:

(۳)

$$E_t = \frac{1}{2}\rho U^2 \iiint_{volume} \left(f_u^2 + f_v{}^2 + f_w^2\right) d_x\, d_y\, d_z$$

که این انتگرال بر روی حجم سیال محاسبه می‌شود.

برای سهولت، معادلهٔ (۳) به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$E_t = \frac{1}{2}\rho k U^2 \qquad (۴)$$

که

$$k = \iiint_{volume} \left(f_u^2 + f_v{}^2 + f_w^2\right) d_x d_y d_z \qquad (۵)$$

مقدار k برای یک جسم و نوع مشخص حرکت، ثابت خواهد بود. حال اگر سرعت جسم با زمان تغییر کند، انرژی سیال تغییر کرده و طبق اصل بقای انرژی می‌بایست کاری بر روی سیال انجام شود. اگر " X " مولفهٔ نیروی وارد از طرف جسم به سیال در راستای حرکت آن باشد، آنگاه نیروی " $-X$ " از سوی سیال به جسم وارد خواهد شد و نیز کار انجام شده توسط جسم در تغییرمکان d_x خواهد بود:

$$W = X\, d_x = X\, U\, d_t = d_E \qquad (۶)$$

از طرفی طبق رابطهٔ (۴):

$$d_E = k\,\rho\, U \frac{d_U}{d_t} d_t \qquad (۷)$$

و نهایتاً:

$$X = k\,\rho\, \frac{d_U}{d_t} \qquad (۸)$$

به بیان دیگر، نیروی مقاومتی که در برابر حرکت شتابدار جسم از طرف سیال به آن وارد می‌شود، برابر حاصلضرب شتاب جسم در $k\rho$ خواهد بود، و مقدار $k\rho$ را می‌توان به عنوان جرم افزوده شدهٔ به جسم برای حرکت شتابدار مستقیم الخط در سیال بینهایت تلقی نمود.

اما جرم اضافهٔ محاسبه شده در بالا با فرض ساکن بودن سیال و نیز صرفنظر از تاثیر شرایط مرزی است. در صورتیکه شتاب مطلق سیال غیر صفر باشد، نیروی اضافهٔ دیگری به جسم وارد می‌گردد که متناسب با

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.10.2.2]

شتاب سیال بوده و نیروی فرود-کریلو[۴] نام دارد [۱۱]. البته در این تحقیق فرض بر فاقد شتاب بودن آب در زمان زلزله است و بنابراین نیروی فرود-کریلو در اینجا صفر می‌باشد. همچنین اثر شرایط مرزی با استفاده از روابط پیشنهادی آیین‌نامه‌های طراحی (نظیر DNV [۳]) در محاسبهٔ جرم افزوده دیده خواهد شد. بر اساس این مبنای نظری مقدار جرم افزوده در واحد طول لوله، مطابق روش معمولی که در طراحی به کار گرفته می‌شود، بر اساس رابطهٔ زیر محاسبه شده است [۳]:

$$m_A = C_M . \rho_W . \frac{\pi . D^2}{4} \qquad (۹)$$

در این رابطه، m_A جرم افزوده در واحد طول لوله، C_M ضریب اینرسی، ρ_W چگالی آب، و D قطر خارجی لوله است. ضریب اینرسی نیز به صورت زیر محاسبه می‌گردد [۳]:

$$C_M = C_A + 1 \qquad (۱۰)$$

که C_A ضریب جرم افزوده است، و عدد یک اضافه شده به آن برای منظور کردن اثر نیروی فرود-کریلو می‌باشد. حال با فرض فاقد شتاب بودن آب در زمان رخداد زلزله که از عدم همزمانی موج و جریانات دریایی با زلزله ناشی می‌شود، نیروی فرود-کریلو صفر شده و ضریب اینرسی برابر ضریب جرم افزوده خواهد بود. ضریب جرم افزوده نیز بر اساس فاصلهٔ لوله تا بستر دریا به نسبت قطر آن (e/D) محاسبه می‌گردد، که در این خصوص با فرض $e/D > 0.8$ ضریب جرم افزوده برابر $C_A = 1$ خواهد بود [۳].

باید توجه داشت که در پدیده تشکیل گردابه، مقدار ضریب جرم افزوده سازه‌ای که در معرض تشدید ارتعاشات برآیی قرار دارد متفاوت با ضریب جرم افزوده همان سازه در آب ساکن است [۳]. در این شرایط ضریب جرم افزوده هم به تواتر تشکیل گردابه ها، هم به دامنه پاسخ سازه و تا حدی به نسبت جرمی ($\frac{M}{\rho D^2}$ = نسبت جرم سازه به جرم سیال جابجا شده) بستگی دارد. البته تغییرات ضریب جرم افزوده با دامنه پاسخ و نسبت جرمی بسیار کمتر از تغییرات آن با تواتر تشکیل گردابه ها است. تغییرات ضریب جرم افزوده در تشدید ناشی از تشکیل گردابه بعضاً به صورت ساده شده به سرعت (بی بعد شده) جریان پایدار و یا جریان نوسانی در محیط سیال[۳] و یا دقیقتر به همه عوامل یاد شده ارتباط داده شده است.

با توجه به فرض این تحقیق در مورد عدم همزمانی موج و جریانات دریایی با زلزله، محیط سیال در حین وقوع زلزله عاری از جریان های پایدار یا نوسانی خواهد بود. لذا در این تحقیق ضریب جرم افزوده در آب ساکن، مطابق توصیه DNV [۳]، ملاک قرار داده شده و تغییرات ضریب جرم افزوده در تشدید ناشی از تشکیل گردابه لحاظ نگردیده است.

۲-۲- روش آکوستیک

در این روش محیط آب اطراف لوله مستقیماً مدلسازی می‌شود. تحلیل دینامیک سیال در حالت کلی نیازمند دو معادلهٔ اصلی بقای جرم و بقای مومنتوم است که در دیدگاه لاگرانژی به صورت زیر بیان می‌شوند:

- معادلهٔ بقای جرم:

$$\frac{dm}{dt} = 0 \qquad (۱۱)$$

- معادلهٔ بقای اندازه حرکت:

$$\rho \frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{F}_{Surface} + \vec{F}_{Body} \qquad (۱۲)$$

در این دو معادله، m معرف جرم سیال، t زمان، ρ چگالی سیال، $\vec{V}$ سرعت سیال و $\vec{F}$ نیروهای خارجی وارد بر آن می‌باشند. همچنین تبدیل هر متغیر دلخواه f در سیال از فضای لاگرانژی به دیدگاه اولری با استفاده از معادلهٔ زیر انجام می‌شود:

$$\frac{df}{dt} = \frac{\partial f}{\partial t} + u\frac{\partial f}{\partial x} + v\frac{\partial f}{\partial y} + w\frac{\partial f}{\partial z} \qquad (۱۳)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.10.2.2]

که در این معادله، x, y, z مولفه‌های مختصات فضایی ذرات سیال و u, v, w مولفه‌های سرعت آن خواهند بود. با استفاده از معادلهٔ (۱۳) می‌توان معادلهٔ بقای جرم را به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\frac{\partial \rho}{dt} + div(\rho.\vec{V}) = 0 \qquad (۱۴)$$

همچنین بازنویسی معادلهٔ بقای مومنتوم در فضای اولری برای سیال ایزوتروپ خطی و با فرض در نظر گرفتن وزن به عنوان تنها نیروی حجمی وارد به سیال، به صورت معادلهٔ ناویر استوکس به شکل زیر خواهد بود [۱۲]:

(۱۵)

$$\rho \frac{d\vec{V}}{dt} = \rho.\vec{g} - \nabla P_{total} + \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\mu.(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i}) + \delta_{ij}.\lambda.div(\vec{V})\right]$$

که در این معادله، $\vec{g}$ بردار شتاب ثقل، P_{total} فشار کل سیال (جمع فشار استاتیکی و دینامیکی)، V_i و x_i به ترتیب مولفه‌های سرعت سیال و مختصات فضایی ذرات آن، μ و λ ضرایب لامه[۵] و δ_{ij} تابع دلتای کرونکر[۶] می‌باشد.

بنابراین با استفادهٔ همزمان از معادلات بقای جرم و مومنتوم برای حل دینامیک یک سیال ایزوتروپ خطی، چهار معادله و چهار مجهول در دست می‌باشد. اما فرضیات ساده کنندهٔ محیط آکوستیک این تعداد را به یک معادله و یک مجهول کاهش خواهند داد. مجهول ظاهر شده در معادلهٔ تعادل محیط آکوستیک، اضافه فشار دینامیکی سیال ($P_{dynamic}$) است. فرضیات ساده کنندهٔ محیط آکوستیک عبارتند از:

- تغییرمکانهای سیال کوچک هستند.
- سیال غیر لزج می‌باشد.

با صرف‌نظر کردن از همزمانی زلزله با موج و جریانات دریایی، فرض می‌شود که زلزله صرفاً باعث اغتشاش خطی ذرات آب حول وضعیت اولیهٔ آنها می‌گردد و نهایتاً تغییرمکان ذرات آب کوچک باقی می‌ماند. کوچک بودن تغییرمکانهای سیال منجر به صرف نظر کردن از شتاب جابجایی‌های بزرگ خواهد شد و در نتیجه:

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} \qquad (۱۶)$$

اهمیت لزجت سیال در لایهٔ مرزی، فرکانس‌های بالای بارگذاری و حرکتهای چرخشی و آشفته می‌باشد که هیچکدام از این موارد در خصوص زلزله مطرح نخواهند بود. بنابراین:

$$\mu = 0 \qquad (۱۷)$$

از ترکیب معادلات (۱۶) و (۱۷) با معادلهٔ (۱۵) نتیجه می‌شود:

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = \rho.\vec{g} - \nabla P_{total} \qquad (۱۸)$$

همچنین معادلهٔ رفتاری سیال تراکم پذیر خطی به صورت زیر است:

$$P = -K_f.\varepsilon_v \qquad (۱۹)$$

که در این معادله K_f مدول بالک سیال و ε_v کرنش حجمی آن می‌باشد. علاوه بر این برای حذف فشار استاتیکی در معادلهٔ (۱۸)، از معادلهٔ زیر استفاده می‌گردد:

$$\rho.g - \nabla P_{total} = -\nabla P_{dynamic} \qquad (۲۰)$$

نهایتاً از ترکیب معادلات (۱۹) و (۲۰) با (۱۸)، معادلهٔ تعادل محیط آکوستیک، به صورت معادلهٔ هلمهولز به شکل زیر حاصل می‌شود [۱۳]:

$$\nabla^2 P = \frac{1}{C^2}\ddot{P} \qquad (۲۱)$$

که در این معادله C سرعت انتشار صوت در سیال و P اضافه فشار دینامیکی آن می‌باشد. معادلهٔ هلمهولز را می‌توان به صورت زیر بازنویسی نمود:

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.10.2.2]

$$\frac{1}{K_f}\ddot{P}-\frac{\partial}{\partial x}.(\frac{1}{\rho_f}\frac{\partial P}{\partial x})=0 \qquad (۲۲)$$

در حالت کلی‌تر در صورتی‌که در معادلهٔ محیط آکوستیک نیروی میرایی متناسب با سرعت نیز در نظر گرفته شود [۱۳ و ۱۴] معادلهٔ تعادل به صورت زیر خواهد بود:

(۲۳)

$$\frac{1}{K_f}\ddot{P}+\frac{\gamma}{\rho_f K_f}\dot{P}-\frac{\partial}{\partial x}.(\frac{1}{\rho_f}\frac{\partial P}{\partial x})=0$$

که در این رابطه γ ضریب درگ حجمی (نیرو در واحد حجم به سرعت سیال) می‌باشد. فرم ضعیف شدهٔ معادلهٔ (۲۳) به صورت زیر است:

(۲۴)

$$\int_{V_f}\delta_P\left(\begin{array}{l}\frac{1}{K_f}\ddot{P}+\frac{\gamma}{\rho_f K_f}\dot{P}\\ -\frac{\partial}{\partial x}.(\frac{1}{\rho_f}\frac{\partial P}{\partial x})\end{array}\right)dV=0$$

که این معادله بر اساس تئوری گرین به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

(۲۵)

$$\int_{V_f}\left[\begin{array}{l}\delta_P\left(\frac{1}{K_f}\ddot{P}+\frac{\gamma}{\rho_f K_f}\dot{P}\right)\\ +\frac{1}{\rho_f}\frac{\partial\delta_P}{\partial x}.\frac{\partial P}{\partial x}\end{array}\right]dV$$
$$+\int_S\delta_P\left(\frac{1}{\rho_f}\vec{n}.\frac{\partial P}{\partial x}\right)dS=0$$

قسمت اول این معادله با توجه به معادلهٔ رفتاری در حجم سیال، و قسمت دوم آن با توجه به معادلات شرایط مرزی بر روی کرانه‌های محیط سیال محاسبه می‌شود.

لازم به توضیح است که در مدل عددی استفاده شده شرایط مرزی محیط آکوستیک به قرار زیر می‌باشند (هم‌چنین بخش ۳ را ببینید):

الف- سطح آزاد آب: در سطح آزاد آب فشار دینامیکی برابر صفر خواهد بود. همچنین از تغییرات تراز سطح آب در اثر امواج فشاری زلزله صرفنظر می‌گردد. بنابراین بر روی سطح تغییر شکل نیافتهٔ سیال:

$$P=0 \qquad (۲۶)$$

ب- صفحهٔ تقارن: تغییرمکان، سرعت و شتاب سیال عمود بر صفحهٔ تقارن برابر صفر می‌باشد. بنابراین معادلهٔ این مرز با صرفنظر کردن از میرایی حجمی خواهد بود:

$$\nabla P=\frac{\partial P}{\partial x}=\rho_f.\ddot{u}^f=0 \qquad (۲۷)$$

ج- مرز مشترک سازه- سیال: در این مرز مشترک، مولفهٔ عمود بر سطح تغییرمکان سازه با سیال برابر خواهد بود. بنابراین:

$$\frac{\partial P}{\partial x}=\ddot{u}^s+\frac{\gamma}{\rho_f}.\dot{u}^s \qquad (۲۸)$$

که در این معادله u^s تغییرمکان سازه می‌باشد. همچنین با توجه به کوچک بودن ترم سرعت در برابر شتاب و حذف آن جهت حصول شرایط تقارن در سیستم معادلات، معادلهٔ این مرز به صورت زیر خواهد بود [۱۴]:

$$\frac{\partial P}{\partial x}=\ddot{u}^s \qquad (۲۹)$$

د- مرزهای تشعشعی: در مرزهای تشعشعی محیط آکوستیک، برای مدلسازی شرایط میرایی تشعشعی و برون رفت امواج از المانهای بینهایت آکوستیک استفاده می‌گردد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.10.2.2]

۳- مدل اجزاء محدود

۳-۱- هندسهٔ مدل و المانها

دهانه‌های آزاد طویل، $L/D > 100$ (L طول دهانه و D قطر لوله است)، مربوط به شرایط موقت بوده [۳] لذا احتمال رخداد زلزله در مورد آن کم است. برای دهانه‌های کوچک، $L/D < 30$، اساساً لوله رفتاری دینامیکی نخواهد داشت [۳]. بر این اساس دو حالت طول دهانهٔ ۲۰ متری ($L/D = 66$) و ۳۰ متری ($L/D = 98$) برای انجام تحلیل‌های این تحقیق انتخاب شده‌اند (قطر خارجی لوله فولادی زیر دریا $305\,mm$ و ضخامت آن $12.7\,mm$ است). با توجه به وجود تقارن در مساله، نصف دهانهٔ آزاد مدل شده است. از ۲۰ المان پوسته‌ای[۷] از نوع "SC8R" [۱۴] در راستای محیطی لوله استفاده شده است. فواصل المان‌ها در طول لوله به گونه‌ای اختیار شده‌اند که نسبت طول به عرض آنها از حدود ۲/۵ تجاوز نکند (اشکال ۱ و ۲). همچنین مطابق توصیه DNV [۳] طول المانها کمتر از قطر لوله اختیار شده و علاوه بر آن، تحلیل‌های حساسیت سنجی انجام گرفته حاکی از مناسب بودن طول المانهای پوسته‌ای لوله بوده است.

برای مدلسازی آب به روش جرم افزوده و با فرض $e/D > 0.8$ (e فاصلهٔ لوله تا بستر دریا می‌باشد) ضریب اینرسی $C_M = 1$ در نظر گرفته شده است [۳]. در مدلسازی آب با استفاده از محیط آکوستیک و با فرض $e = 9m$، شعاعی ۲۵ متری از آب در اطراف لوله با استفاده از المانهای "AC3D20" و "AC3D15" مدل شده است (شکل ۲- ج).

برای مدلسازی محیط آکوستیک، فواصل گره‌ها بر اساس بیشترین فرکانس مورد بررسی ($20\,Hz$) تعیین شده‌اند، به گونه‌ای که این فاصله حداکثر 1/10 کوچکترین طول موج باشد. همچنین با توجه به استفاده از المانهای بینهایت در مرز بیرونی محیط آکوستیک ("ACIN3D8") برای مدلسازی میرایی تشعشعی، شعاع محیط آکوستیک از 1/30 بزرگترین طول موج بزرگتر اختیار شده است (اشکال ۱ و ۲). فاصلهٔ لوله تا بستر دریا $e = 9m$ متر فرض شده است که تحلیلهای حساسیت انجام گرفته برروی فواصل ($e = 9m$ و $e = 5m$) بیانگر تاثیر محسوسی بر روی پاسخ لوله تحت تحریک هارمونیک نبوده است.

بستر دریا کاملاً افقی فرض شده است، بنابراین تنها مولفهٔ قائم زلزله باعث ایجاد فشار دینامیکی (از سوی بستر) در آب خواهد شد. همچنین برای مدلسازی اندرکنش محیط آکوستیک با سطح لوله و بستر دریا از المانهای رابط[۸] تک گرهی "ASI1" استفاده شده است.

تحلیل‌های دینامیکی غیر خطی، در حوزهٔ زمان و به صورت افزایشی انجام شده‌اند. تحریک‌ها به صورت هارمونیک و نیز تحت رکوردهای زلزله و در هر دو راستای افقی (عمود بر محور لوله) و راستای قائم می‌باشند.

۳-۲- شرایط مرزی

۳-۲-۱- شرایط اتکایی لوله

برای نسبت طول دهانه به قطر بین ۳۰ تا ۱۰۰ رفتار تیری حاکم بوده و در نتیجه رفتار لوله نسبت به شرایط مرزی و نیروی محوری موثر حساس خواهد بود. لذا مدلسازی صحیح شرایط مرزی حائز اهمیت می باشد. در این تحقیق دو وضعیت متفاوت برای شرایط اتکایی لوله (در خارج دهانه آزاد) فرض شده است:

الف- در تحلیلهای انجام شده برای صحت سنجی مدل و نیز تحلیلهای دینامیکی غیر خطی تحت تحریک هارمونیک، بخشی از خاک بستر دریا به همراه لوله مدل شده است. متناظر با هندسه لوله، شانه‌های خاکی طرفین دهانه آزاد به صورت نیم استوانه به کمک المان‌های حجمی سه بعدی[۹] از نوع "C3D8" مدل شده‌اند (اشکال ۱ و ۲). شعاع (r_1) و طول (L_1) این نیم استوانه به گونه‌ای تعیین شده‌اند که به ترتیب تنشهای ناشی از وزن لوله در مرز پایینی آن و شیب لوله تحت اثر بار ثقلی در انتهای طول L_1 به حدود صفر برسد . درجهٔ آزادی طولی لوله U_x در انتهای لوله مقید شده است. بر روی صفحات مرزی قائم ابتدا و انتهای نیم استوانه خاک درجه آزادی طولی U_x مقید شده است. عمق مدفون لوله درخاک برابر $D/2$ فرض

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.10.2.2]

شده است. در تحلیل دینامیکی جرم خاک نزدیک به صفر انتخاب و از میرایی خاک صرفنظر شده است. المانهای لوله مستقیماً به المانهای خاک وصل شده و دارای گره مشترک می‌باشند. این المان‌ها تنها دارای درجات آزادی تغییر مکانی (U_x، U_y و U_z) هستند.

ب- در تحلیلهای زلزله از المانهای خاک در شانه‌های طرفین دهانه آزاد صرفنظر و دو انتهای لوله به صورت کاملاً گیردار فرض شده است. در عین حال برای لوله و در طرفین آن اضافه طولی در نظر گرفته شده است. این اضافه طول برابر $3.5m$، (تقریباً در حدود $11D$) به گونه‌ای اختیار شده است که خیز خالص مدل اخیر، تحت اثر بار ثقلی و فشار داخلی، برابر آنچه از مدل دارای شانه‌های خاکی به دست آمده است، باشد (شکل ۲). حذف شانه‌های خاکی اتکایی لوله در تعدادی از مدل‌ها برای اقتصادی شدن زمان محاسبات و با عنایت به این نکته که تمرکز این تحقیق بر روی اندرکنش آب-لوله (و نه اندرکنش خاک-لوله) قرار دارد انجام پذیرفته است. برای جزئیات بیشتر در خصوص نحوه مدلسازی اعمال اندرکنش بین خاک و لوله خواننده به DNV [۳] ارجاع داده می‌شود.

۳-۲- ۲- شرایط مرزی محیط آکوستیک

برای مدلسازی میرایی تشعشعی در مرزهای آبی محیط آکوستیک، از المانهای بینهایت ۸ گرهی "ACIN3D8" و برای مدل کردن اندرکنش محیط آکوستیک با سازه (در سطح بیرونی لوله و بستر دریا) از المانهای رابط تک گرهی "ASI1" استفاده شده است. نمای کلی مدل ساخته شده در دو حالت مختلف شرایط مرزی، در شکل ۱ نشان داده شده است.

شرایط مرزی آکوستیک یاد شده یک عمق آب بینهایت را مدل می‌کند. لازم به توضیح است که نتایج به دست آمده از مدل با عمق آب بینهایت با مدلی با عمق آب محدود (برابر ۶۰ متر) مقایسه شده‌اند. در مدل با عمق آب محدود ، از همزمانی امواج دریایی با زلزله و تغییر موقعیت سطح آب در اثر مولفهٔ قائم زلزله صرفنظر شده و سطح آزاد آب افقی فرض شده است. شرایط مرزی آکوستیک در سطح آب با قید صفر بودن فشار دینامیکی آب در سطح آن ($P=0$) تعریف شده است.

نتایج حاصل حاکی از آن است که تفاوت دو شرایط مرزی (با عمق آب بینهایت و عمق آب محدود) تاثیر مهمی در پاسخ لوله نخواهد داشت. به عنوان مثال برای دهانهٔ آزاد ۳۰ متر اختلاف بین حداکثر تغییرمکان قائم و کرنش کششی در وسط دهانه، برای تحریک دینامیکی با حداکثر شتاب $0.3g$ و با فرکانس نزدیک به مود اول ارتعاش طبیعی لوله به ترتیب برابر -0.09% و -0.14% (علامت منفی به معنی کمتر بودن کمیت مورد نظر در حالت مدلسازی شرایط مرزی $P=0$ در سطح آب است) و با فرکانس نزدیک به مود سوم ارتعاش طبیعی لوله به ترتیب برابر +0.42% و +0.84% بوده است.

۳-۳- منابع غیر خطی

در المانهای سازه‌ای (خاک و لوله) رفتار غیر خطی هندسی و مصالح در نظر گرفته شده است. رفتار بخش آکوستیک هم از نظر هندسه و هم از نظر مصالح خطی می‌باشد.

مدل خمیری استفاده شده در المانهای خاک، مدل موهر-کولومب می‌باشد. سخت شوندگی یا نرم شدگی رفتار خاک قابل تعریف بوده، قانون جریان آن ناهمراه و برگرفته از تابع پتانسیل ارائه شده توسط Mehetry و Willam [۱۵] می‌باشد. مشخصات خاک مورد استفاده در این مقاله، برگرفته از آزمایشهای C-CORE [۱۶] و به این قرار است:

- چگالی خاک $\rho=1800\,kg/m^3$
- مدول الاستیسیته $E=6650\,kPa$
- ضریب پواسون $\nu=0.33$
- زاویهٔ اصطکاک داخلی $\varphi=35^\circ$
- چسبندگی $c=25\,kPa$
- زاویهٔ اتساع $\psi=35^\circ$

فولاد منظور شده برای لوله "API 5L-grade X-65" با مشخصات زیر می‌باشد:

- تنش تسلیم $F_y=450\,MPa$
- مدول الاستیسیتهٔ $E=2\times10^5\,MPa$
- ضریب پواسون $\nu=0.3$
- چگالی $\rho=7850\,kg/m^3$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.10.2.2]

مدل خمیری در نظر گرفته شده برای فولاد، مدل سخت شدگی سینماتیکی خطی است که برای بارگذاری رفت و برگشتی مناسب می‌باشد و تابع تسلیم آن مستقل از تنش معادل فشاری است [۱۴]. این مدل می‌تواند با سطح تسلیم Mises یا Hill استفاده شود. قانون جریان آن همراه بوده و اثر بوشینگر را در نظر می‌گیرد. همچنین ضریب سخت شدگی کرنشی آن ثابت و برابر 1% مدول الاستیسیتهٔ فولاد در نظر گرفته شده است. ضریب میرایی سازه‌ای لوله 2% میرایی بحرانی در نظر گرفته شده است.

۳-۴- بارگذاری و مراحل تحلیل

در دو مرحله جداگانه بارگذاری استاتیکی ابتدا بارهای ثقلی خاک و لوله (با در نظر گرفتن $6cm$ پوشش بتنی) به مدل و سپس فشار داخلی $P=28.5MPa$ به لوله اعمال شده است (اثر پوشش بتنی صرفاً در جرم لوله دیده شده و از اثرات سختی و میرایی آن صرفنظر گردیده است). این فشار تنش حلقوی معادل 72% تنش تسلیم فولاد در لوله ایجاد خواهد کرد (معمولاً طراحی ضخامت لوله بر این مبنا انجام می‌پذیرد [۱۷]). مشاهده شده است که اعمال فشار داخلی، به دلیل منظور نمودن اثرات غیر خطی هندسی در تحلیل، باعث کاهش سختی لوله و افزایش خیز در دهانهٔ آزاد می‌شود.

متعاقب بارگذاری استاتیکی، مدل‌ها تحت دو نوع تحریک دینامیکی مورد بررسی قرار گرفته‌اند:

الف- در تحلیلهایی که خاک نیز به همراه لوله مدل شده است، تحریک هارمونیک با فرکانس‌هایی نزدیک به فرکانس ارتعاشی مود اول و سوم سیستم (که برای طول دهانهٔ ۲۰ متری به ترتیب برابر $f_1=2.1Hz$ و $f_3=8.5Hz$ و برای طول دهانهٔ ۳۰ متری برابر $f_1=1.5Hz$ و $f_3=5.2Hz$ می‌باشد) با حداکثر شتاب $0.3g$ و $0.6g$ و به مدت ۱۰ سیکل اعمال شده است. تحریک‌های دینامیکی به کرانهٔ بیرونی (و پایینی) نیم‌استوانه خاک در شانه‌ها و نیز بستر دریا معرفی شده‌اند.

ب- در تحلیل زلزله، که انتهای لوله با اعمال طولی اضافی، به صورت گیردار مدل شده است، رکورد شتاب زلزله به انتهای گیردار لوله و نیز المانهای رابط بخش آکوستیک در بستر دریا اعمال می‌گردد. در این تحلیل‌ها از دو رکورد شتاب زلزله استفاده شده است. رکورد اول شتاب زلزلهٔ EL-Centro [۱۸] با حداکثر شتاب و تغییر مکان زمین برابر $PGA=0.32g$ و $PGD=21.4cm$ و فرکانس غالب و متوسط به ترتیب برابر $f_p=2.0Hz$ و $f_m=1.9Hz$ [۱۹] می‌باشد. این رکورد با ضرایب مقیاس ۱ و ۲ به مدل اعمال شده است. رکورد دوم زلزله، رکورد شتاب زلزلهٔ Imperial Valley [۲۰] با حداکثر شتاب $PGA=0.21g$ و حداکثر تغییر مکان $PGD=8.3cm$ و فرکانس‌های غالب و متوسط به ترتیب برابر $f_p=8.3Hz$ و $f_m=5.2Hz$ می‌باشند. این رکورد با ضرایب مقیاس ۱، ۲ و ۳ به مدل اعمال شده است. رکوردهای یاد شده به طور جداگانه در هر دو راستای افقی عمود بر محور لوله و قائم معرفی شده‌اند.

نحوهٔ انجام تحلیل دینامیکی، انتگرال گیری مستقیم از معادلهٔ حرکت به روش ضمنی می‌باشد. طول بازه‌های زمانی به روش اتوماتیک بدست می‌آیند، ولی برای مقایسهٔ صحیح نتایج، حداکثر آن به طول بازه‌های رکورد محدود شده و نیز به گونه‌ای اعمال می‌گردد که لزوماً از نقاط مورد نظر در رکورد شتاب عبور کند.

۴- صحت سنجی مدل

صحت سنجی مدل با مقابله فرکانس‌های ارتعاشی طبیعی سیستم با روابط تحلیلی-تجربی پیشنهادی DNV [۳] که مقبولیت بین‌المللی مناسبی دارند و مبنای انجام کنترل‌های مهندسی برای رفتارهای حساس به فرکانس ارتعاش لوله در دهانه آزاد، همچون تشدید ناشی از تشکیل گردابه، قرار می‌گیرد انجام شده است. در جداول ۱ و ۲ فرکانس مودهای ارتعاشی اول و سوم لوله در هر دو راستای افقی و قائم که با هر دو روش جرم افزوده و آکوستیک محاسبه شده‌اند و نیز مقادیر به دست آمده از DNV به ترتیب برای دهانه‌های آزاد ۲۰ و ۳۰ متری ارائه شده‌اند. برای

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.10.2.2]

حساسیت سنجی مدل، حالتی که نه از المانهای آکوستیک استفاده شود و نه جرم افزوده‌ای به لوله اعمال گردد در نظر گرفته شده و فرکانس‌های ارتعاشی آن در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است.

جداول ۱ و ۲ بیانگر انطباق نسبی قابل‌قبولی بین نتایج عددی (اعم از مدل جرم افزوده یا مدل آکوستیک) با پیش بینی‌های DNV برای فرکانس ارتعاش طبیعی دهانه آزاد است. البته میزان این انطباق بسته به طول دهانه و مود ارتعاش متفاوت است. حداکثر تفاوت برای دهانه ۲۰ متری در مود اول ۱۵/۵ و در مود سوم ۵/۴ درصد و برای دهانه ۳۰ متری در مود اول ۷/۲ و در مود سوم ۱۲/۲ درصد می‌باشد. تفاوت نتایج دو روش آکوستیک و جرم افزوده حداکثر ۲/۱ درصد است. اختلاف ناچیز نتایج این دو مدل عددی موید آن است که مدل آکوستیک قادر بوده است تاثیر جرم افزوده ناشی از حضور سیال در پیرامون لوله را ، لااقل در محدودهٔ الاستیک رفتار، به درستی مدل کند. در صورتیکه المانهای آکوستیک و جرم افزوده از مدل حذف شوند حداقل انحراف در حدود ۱۱/۶ درصد خواهد بود.

یادآور می‌شود که در جداول ۱ و ۲ تنها نتایج مودهای اول و سوم ارتعاش لوله با مقادیر متناظر پیشنهادی DNV مقایسه شده‌اند زیرا به دلیل تقارن هندسی مدل عددی، مودهای نامتقارن از خروجی‌های تحلیل حذف می‌گردند. همچنین مطابق توصیه‌های DNV [۳] در زمان طراحی و استفاده از این روش تقریبی جهت صحت سنجی مدل اجزای محدود المان تیری لوله برای محاسبات تشدید ناشی از گردابه، میزان اختلاف نتایج نباید بیش از 5% باشد که در اینجا بعضاً تا 8% نیز رسیده است. این اختلاف را می توان ناشی از مدل شدن لوله با المانهای پوسته‌ای دانست و اینکه حد 5% در DNV برای مدل خاص لوله با المانهای تیری بیان شده است.

۵- نتایج شبیه‌سازی عددی

مدل صحت سنجی شده برای بررسی برخی مشخصه‌های دینامیکی رفتار لوله در دهانه آزاد به‌کار گرفته شده است. مجموعاً ۷۲ تحلیل اصلی در حوزه زمان برای مطالعه اختلاف بین نتایج روش تقریبی جرم افزوده و روش دقیقتر آکوستیک انجام شده است. جهت ارزیابی دقیق‌تر تاثیر فرکانس تحریک بر اندرکنش آب و سازه، زلزله‌هایی با محتوای فرکانسی متفاوت (فرکانس غالب نزدیک و دور از فرکانس مود اول ارتعاش لوله) و نیز تحریک‌های هارمونیک با فرکانس‌هایی نزدیک به فرکانس مودهای اول و مود سوم ارتعاش لوله در نظر گرفته شده‌اند.

اعمال تحریک‌های بستر به لوله واقع بر روی دهانه آزاد به روش تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA^{10})، در حوزهٔ زمان انجام شده است. با افزایش شدت بارگذاری (حداکثر شتابهای $0.32\,g$، $0.64\,g$ و $0.96\,g$) تاثیر رفتار غیر خطی سیستم مورد ارزیابی قرار گرفته است. تحلیل دینامیکی افزایشی ابزاری مناسب برای مطالعه رفتار غیر خطی سازه‌های در معرض تحریک‌های شدید می‌باشد. در Zeinoddini et al. [۲۱] از این روش برای پیش بینی آسیب وارد شده و خرابی اعضای لوله‌ای سکوهای فراساحل تحت اثر ضربه کشتی استفاده کردند. توسعه و نام‌گذاری روش و به کارگیری آن برای بارهای ناشی از زلزله توسط Vamvatsikos and Cornell [۲۲] و Vamvatsikos [۲۳] در سال ۲۰۰۲ انجام شده است. در این روش با مقیاس کردن تحریک وارده به سازه، شدت تحریک متوالیاً افزایش می‌یابد و حداکثر پاسخ سازه در برابر هر شدت تحریک استخراج می‌شود. بر مبنای اطلاعات به دست آمده می‌توان ارزیابی قابل قبولی در بازه گسترده‌ای از رفتار سازه (از محدوده الاستیک تا ویرانی آن) ارائه نمود.

در این تحقیق، دو معیار حداکثر کرنش طولی کششی و حداکثر تغییر مکان لوله ملاک ارزیابی رفتار دینامیکی رفتار لوله در دهانه آزاد قرار گرفته‌اند. از کرنش طولی لوله به عنوان یک معیار مهم در طراحی لرزه ای خط یاد شده است [۴]. نقاطی که کرنش طولی کششی برای بارگذاری در راستای افقی و قائم در آنها قرائت شده است، در شکل ۲- ب نشان داده شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.10.2.2]

کرنش در گرهها با برون یابی مقادیر در نقاط انتگرال گیری، به دست آمده است.

مطابق توضیحات فوق، حداکثر کرنش کششی طولی و نیز تغییرمکان وسط دهانهٔ لوله تحت تحریک‌های افزایشی هارمونیک و زلزله، به هر دو روش جرم افزوده و آکوستیک بدست آمده و نتایج در قالب به صورت نمودارهای IDA ترسیم شده‌اند. اشکال ۳ تا ۶ نمونه نتایج مربوط به تحریک‌های افقی می‌باشند. محور عرضی این نمودارها حداکثر شتاب ورودی به سیستم و محور طولی آنها حداکثر کرنش و یا تغییرمکان در کل تاریخچه زمانی پاسخ سازه به تحریک وارده است. برای تحریک در هر راستا، حداکثر تغییر مکان در آن راستا ملاک قرار گرفته است. لازم به ذکر است که حداکثر کرنشها و تغییرمکانهای قرائت شده، مقدار مطلق آنها (بدون کسر مقدار ناشی از بارگذاری استاتیکی) می‌باشد. فقط در خصوص تغییرمکانهای ناشی از بارگذاری قائم زلزله، با توجه به عدم تقارن نمودار تاریخچهٔ تغییرمکان زلزله نسبت به محور افقی، مقدار استاتیکی از تغییرمکان کم شده است.

در اشکال ۵ و ۶ (و جدول ۳) رکورد اول مربوط به زلزلهٔ EL-Centro و رکورد دوم مربوط به زلزلهٔ Imperial Valley است. هم چنین فرکانس غالب بارگذاری در رکورد اول زلزله نزدیک به فرکانس مود اول ارتعاش لوله بوده و در مورد رکورد دوم فرکانس غالب بارگذاری از فرکانس مود اول ارتعاش لوله دور می‌باشد.

یادآور می‌شود که در منحنی‌های IDA ، تحریک بحرانی تحریکی خواهد بود که منحنی مربوط به آن پایین‌تر (نزدیکتر به محور طولی) از بقیه منحنی ها قرار می‌گیرد. روشی که پاسخ‌های دست بالاتری را برای سازه ارائه می‌دهد بر همین مبنا قابل شناسایی خواهد بود. مقادیر حداکثر اختلاف نتایج دو روش جرم افزوده و آکوستیک در جدول ۳ خلاصه شده است. درصدهای تفاوت در این جدول نسبت به نتایج حاصل از روش جرم افزوده می‌باشند.

مطابق نتایج ارائه شده در جدول ۳ به طور کلی نتایج روش جرم افزوده در بارگذاری قائم نسبت به بارگذاری افقی، محافظه‌کارانه‌تر از نتایج مدل آکوستیک می‌باشند. این در حالی است که انتظار می‌رفت، لااقل در تحریک قائم، به دلیل فراهم آمدن امکان توسعه اضافه فشار دینامیکی در آب، مدل آکوستیک نتایج بحرانی‌تری نسبت به مدل جرم افزوده ارائه دهد.

بررسی دقیقتر نتایج نشان داده است که تاخیر فاز حاصل از فاصلهٔ لوله تا بستر دریا (e) در محدودتر شدن پاسخ‌های مدل آکوستیک، در مقایسه با مدل جرم افزوده، دخالت دارد. یادآور می‌شود که تحریک خارجی به صورت یکسان و همزمان به بخش اتکایی لوله، در شانه‌های دهانه آزاد، و به بستر دریا اعمال شده است. تحریک نخست تقریباً بلافاصله توسط لوله دریافت می‌شود در حالی که تحریک بستر دریا پس از یک تاخیر زمانی، برای طی مسافت موج فشار حاصل از بستر دریا تا لوله (e)، به آن منتقل خواهد شد. درواقع تاخیر فاز فشار دینامیکی آب نسبت به بارگذاری مستقیم لوله، باعث نوعی کاهش در پاسخ لوله می‌شود. این در حالی است که مدل جرم افزوده ماهیتاً قادر به منظور کردن این نوع اختلاف فاز نمی‌باشد لذا پاسخ‌های عموماً محافظه‌کارانه‌تری ارائه خواهد کرد.

برای تحریک‌های هارمونیک با فرکانس نزدیک به فرکانس مود اول ارتعاش پاسخ‌های روش جرم افزوده بحرانی‌تر از روش آکوستیک هستند (اشکال ۳ و ۴ و جدول ۳). در تحریک‌های هارمونیک با فرکانس نزدیک به فرکانس مود سوم تفاوت دو روش کمتر است ولی عموماً مدل آکوستیک به پاسخ‌های بحرانی‌تر منتج شده است.

برای محدوده دهانهٔ آزاد مورد بررسی، $30 < L/D < 100$، مشاهده شده است که کاهش طول دهانه، منجر به بیشتر شدن اختلاف نتایج دو روش و افزایش نسبی پاسخ لوله در روش جرم افزوده می‌گردد. با کاهش طول دهانه روش جرم افزوده متناسباً نتایج بحرانی‌تری را نسبت به روش آکوستیک ارائه داده است (اشکال ۳ و ۴). اختلاف دو روش در دهانهٔ ۲۰ متری به 56.6%+ بالغ شده است. این نکته در تحریک‌های قائم و بارهای هارمونیک بارزتر از تحریک‌های افقی و زلزله می‌باشد (جدول ۳).

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.10.2.2]

به طور کلی نتایج دو روش جرم افزوده و آکوستیک انطباق بیشتری را در تحریک‌های زلزله در مقایسه با تحریک‌های هارمونیک نشان می‌دهند (اشکال ۳ تا ۶ و جدول ۳). حداکثر اختلاف بین کرنشها در رکورد اول زلزله، برای دهانهٔ ۳۰ متری و بارگذاری افقی برابر 1.6%– است که در راستای قائم به 6.6%+ می‌رسد. کمیت اخیر برای دهانهٔ ۲۰ متری برابر 14.6%+ خواهد بود (با عدد 56.6%+ برای تحریک‌های هارمونیک مقایسه شود). یک دلیل کاهش اختلاف دو روش تحت تحریک‌های زلزله پهن بودن باند طیف زلزله و در نتیجه حضور مجموعه‌ای از فرکانس‌های متفاوت در رکورد می‌باشد. در نتیجه سازه از حالت رفتار تشدید شده در یک فرکانس خاص فاصله خواهد گرفت. با وجود این، برخی رفتارهای مشاهده شده در تحریک‌های هارمونیک در اینجا نیز (با شدتی کمتر) تکرار شده است. مثلاً در تمامی موارد رکورد اول زلزله به پاسخ‌های بحرانی‌تری منتج شده است. یاد آور می‌شود که فرکانس غالب رکورد اول نزدیک فرکانس مود اول ارتعاش بوده است. در اینجا هم اختلاف نتایج بین دو روش با کاهش طول دهانه عموماً افزایش یافته و مقدار اختلاف در تحریک قائم بیشتر از تحریک افقی است. عموماً روش جرم افزوده پاسخ‌های بزرگتری نسبت به روش آکوستیک ارائه داده است.

دو شاخص انتخاب شده برای ارزیابی رفتار دینامیکی لوله (حداکثر کرنش طولی و تغییر مکان در وسط دهانه) به نتایج یکسانی در دو مدل جرم افزوده و آکوستیک منجر نشده‌اند. مثلاً در شکل ۴ تغییر مکانهای افقی در هر دو مدل و در هر دو فرکانس تحریک بسیار نزدیک به هم هستند در حالی که نتایج کرنشها در دو مدل در تحریک فرکانس پایین متفاوت هستند. اختلاف نتایج دو شاخص را همچنین می‌توان در شکل ۵ مشاهده کرد. این نکته بیانگر یک تفاوت اساسی دیگر بین دو مدل جرم افزوده و آکوستیک می‌باشد. در مدل آکوستیک حضور المانهای محیط آب در اطراف لوله موجب لحاظ شدن جرم افزوده به صورت ضمنی خواهد شد، ولی این المانها نوعی سختی جانبی در اطراف لوله به وجود خواهند آورد که در مقابل تغییر شکل جانبی محدودیت‌هایی ایجاد خواهند کرد. در تحریک‌های قائم، اضافه فشار دینامیکی آب ناشی از تحریک بستر دریا هم در کنترل جابجایی‌های جانبی لوله مؤثر خواهد بود.

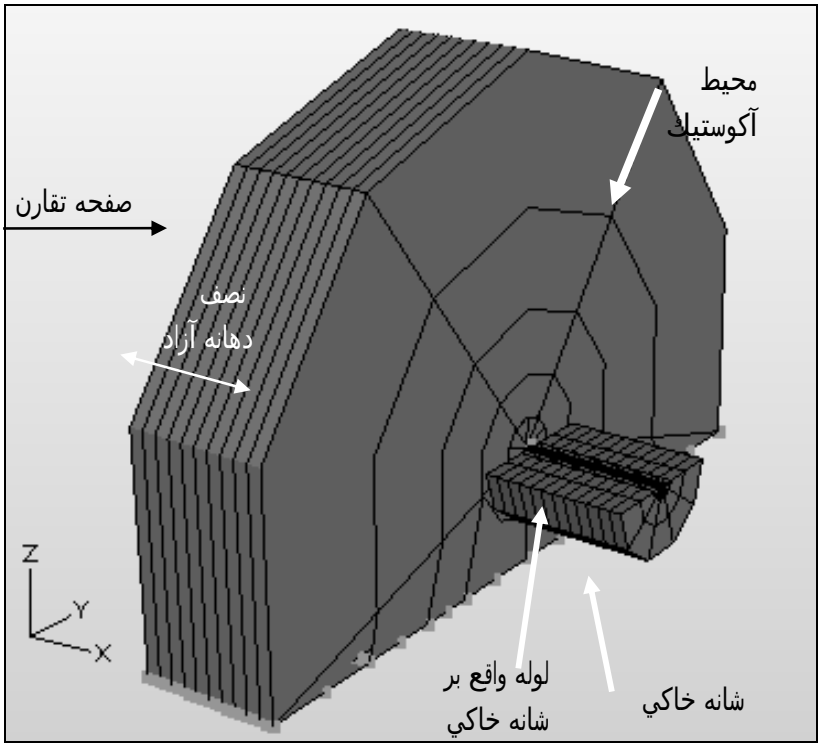
عوامل یاد شده طبعاً در یک مدل ساده شده جرم افزوده نادیده گرفته خواهند شد. بنابراین فرم تغییرشکل و انحنای لوله در دو مدل متفاوت خواهند بود که به عدم انطباق میدانهای تغییرشکل جانبی و کرنش طولی در طول دهانه آزاد منتج خواهد شد. به عنوان مثال برای دهانهٔ ۲۰ متری (تحریک هارمونیک افقی با فرکانس مود اول) منحنی‌های تغییر شکل لوله، در زمان رخداد حداکثر کرنش طولی آن، در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود فرم تغییرشکل لوله در دو مدل جرم افزوده و آکوستیک متفاوت هستند. تاثیر جانبی المانهای آکوستیک منجر به انحنای کمتر لوله در مدل آکوستیک شده است. بنابر این روش جرم افزوده به دلیل انحنای بیشتر لوله (و نادیده گرفتن برخی از تاثیرات محیط آب پیرامونی) منتج به پیش بینی مقادیر اضافه‌تری برای کرنش طولی در مقایسه با مدل آکوستیک می‌گردد.

اشکال ۳ تا ۶ بیانگر آن هستند که، در محدوده تحریک افزایشی منظور شده، بیشتر مدل‌ها رفتار سخت شونده‌ای را از خود نشان داده‌اند. این مساله خصوصاً در تحریک‌های با فرکانس مود سوم (اشکال ۳ و ۴) بارزتر هستند. منحنی‌های IDA با افزایش شدت تحریک نهایتاً باید به رفتار نرم شونده و کاهش شیب منحنی‌ها منتج شوند تا جایی‌که شیب نمودار به صفر نزدیک شود. به نظر می‌رسد این سخت شدگی (عمدتا تحت تحریک‌های هارمونیک) به دلیل تغییر در مود غالب و مشخصه‌های ارتعاش طبیعی سیستم بروز کرده باشد. با افزایش شدت تحریک سختی سیستم عموماً کاهش خواهد یافت. این به دلیل بزور رفتارهای غیر خطی هندسی (هم در خاک و هم در لوله) و غیر خطی مصالح (عمدتاً در خاک) خواهد بود. این تغییر در سختی به تغییر در فرکانس ارتعاش طبیعی سیستم منجر خواهند شد. در نتیجه حالت تشدید اولیه (ناشی از انطباق فرکانس‌های تحریک هارمونیک و فرکانس

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.10.2.2]

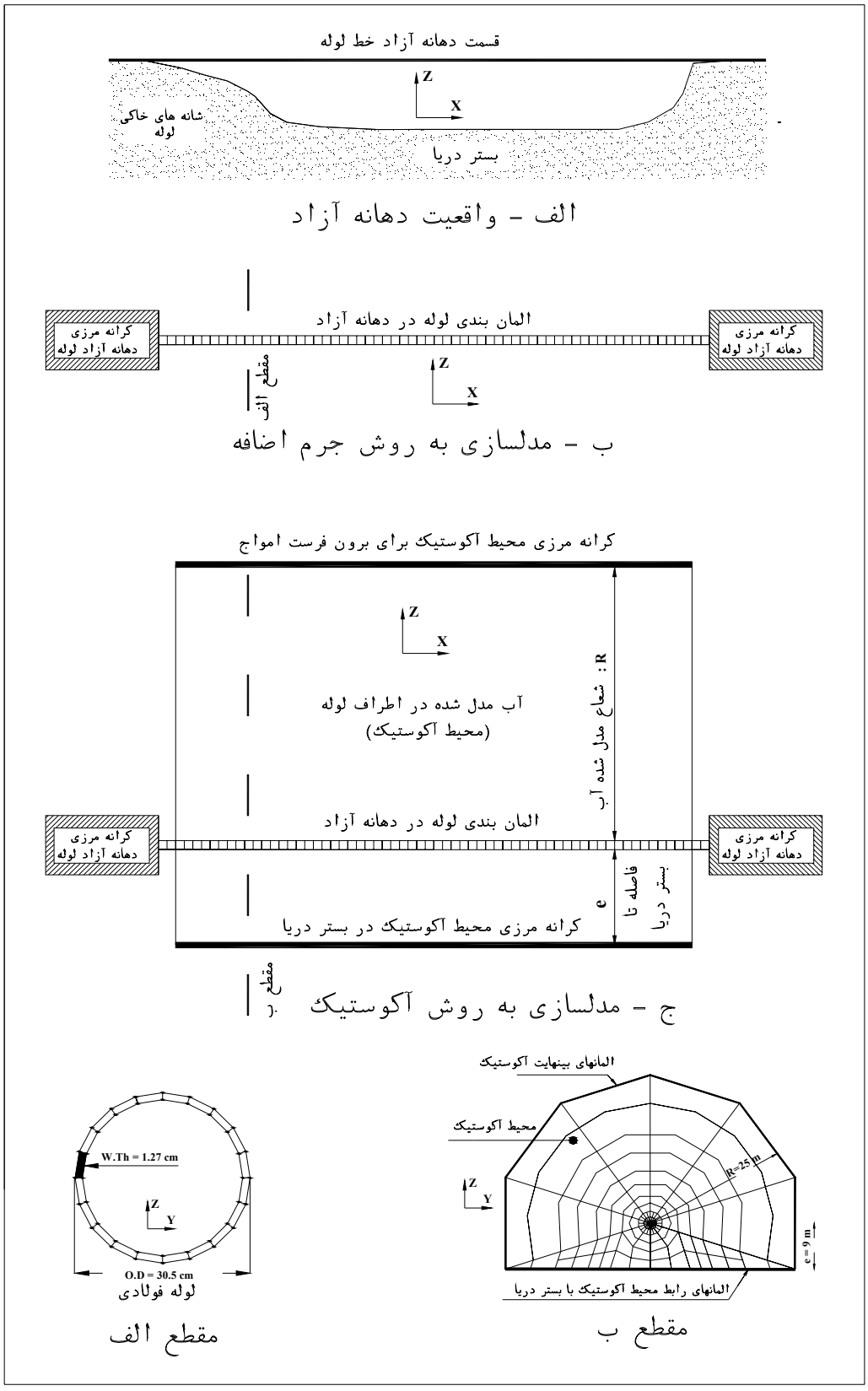
مودی) از بین خواهد رفت. علیرغم نرم‌تر شدن سیستم، دامنه پاسخ‌ها متناسب با افزایش شدت تحریک افزایش نخواهد یافت و سیستم در ظاهر رفتار سخت‌تری از خود بروز می‌دهد. دلیل دیگر افزایش سختی ظاهری رفتار (خصوصاً در تحریک در مودهای بالاتر) تغییر احتمالی در مود غالب ارتعاش سیستم متناسب با افزایش شدت تحریک خواهد بود.

برای روشن شدن موضوع، تاریخچهٔ زمانی تغییرمکان وسط دهانهٔ آزاد ۳۰ متری تحت بارگذاری با فرکانس $f = 5.2\,Hz$ با حداکثر شتابهای $0.3g$، $0.6g$ و $0.9g$ در شکل ۸ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که در تحریک با شدت پایین (دامنه شتاب $0.3g$)، علیرغم آنکه فرکانس تحریک متناظر با مود سوم ارتعاش بوده است، به دلیل کوچک بودن تحریک، مود غالب در پاسخ سیستم مود اول ارتعاش می‌باشد و به این دلیل دامنه‌های پاسخ بزرگ هستند. با افزایش شدت تحریک (دامنه شتاب $0.6g$)، مود غالب پاسخ سیستم به مود تحریک نزدیکتر شده است و به دلیل این تغییر مود دامنه پاسخ‌ها کمتر شده است. در دامنه شتاب بعدی ($0.9g$) شدت تحریک ۵۰ درصد افزایش یافته است با این وجود مشاهده می‌شود که افزایش دامنه پاسخ (به دلیل تغییر در فرکانس طبیعی ارتعاش سیستم) بسیار کمتر می‌باشد که به صورت نوعی سختی ظاهری در منحنی IDA منعکس خواهد شد.



شکل ۱- نمای کلی مدل اجزای محدود با شانه خاکی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.10.2.2]



شکل ۲- تفاوت کلی مدلسازی در دو روش، الف- واقعیت لوله در دهانهٔ آزاد، ب- مدلسازی به روش جرم افزوده و نقاط مورد استفاده در قرائت کرنش لوله (در وسط دهانه)، ج- مدلسازی به روش آکوستیک

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.10.2.2]

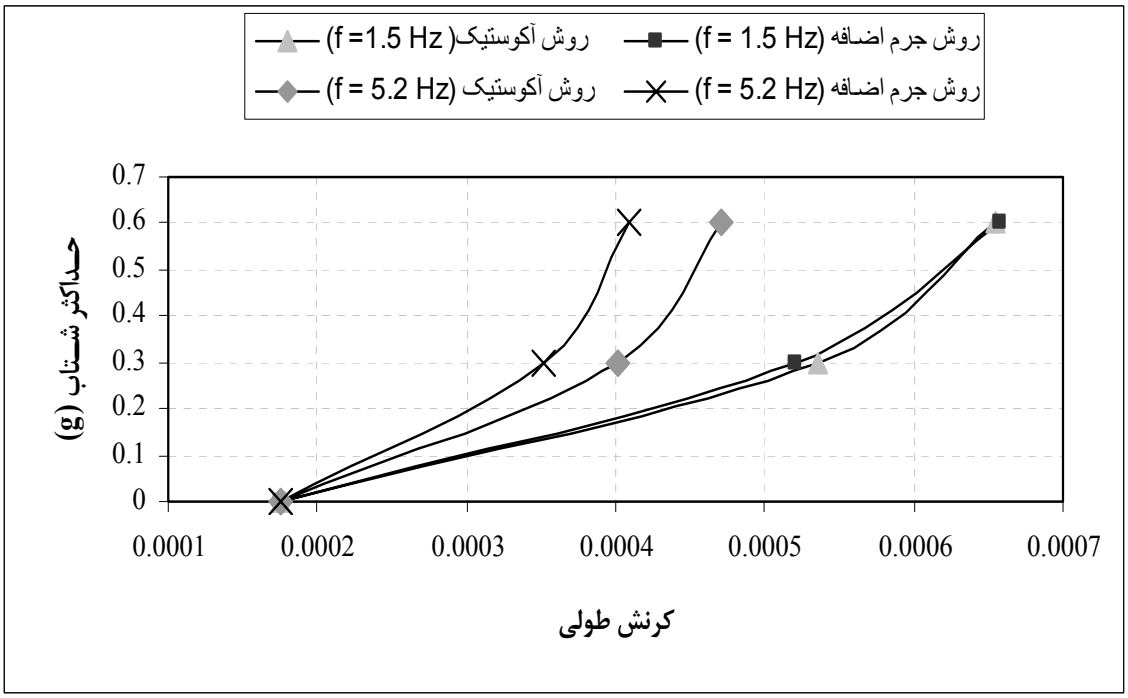
جدول ۱- نتایج آنالیزهای فرکانس برای دهانهٔ ۲۰ متری

مود ارتعاشی / آنالیز	فرکانس مود اول قائم (Hz)	فرکانس مود سوم قائم (Hz)	فرکانس مود اول افقی (Hz)	فرکانس مود سوم افقی(Hz)
آکوستیک - وزن	1.536	7.650	1.524	7.634
آکوستیک - وزن و فشار	2.103	8.512	2.080	8.528
جرم افزوده - وزن	1.523	7.588	1.512	7.572
جرم افزوده - وزن و فشار	2.086	8.446	2.063	8.462
روش تقریبی DNV - وزن	1.344	7.258	1.320	7.127
نه آکوستیک، نه جرم افزوده - وزن	1.699	8.377	1.687	8.356
نه آکوستیک، نه جرم افزوده - وزن و فشار	2.327	9.305	2.301	9.326

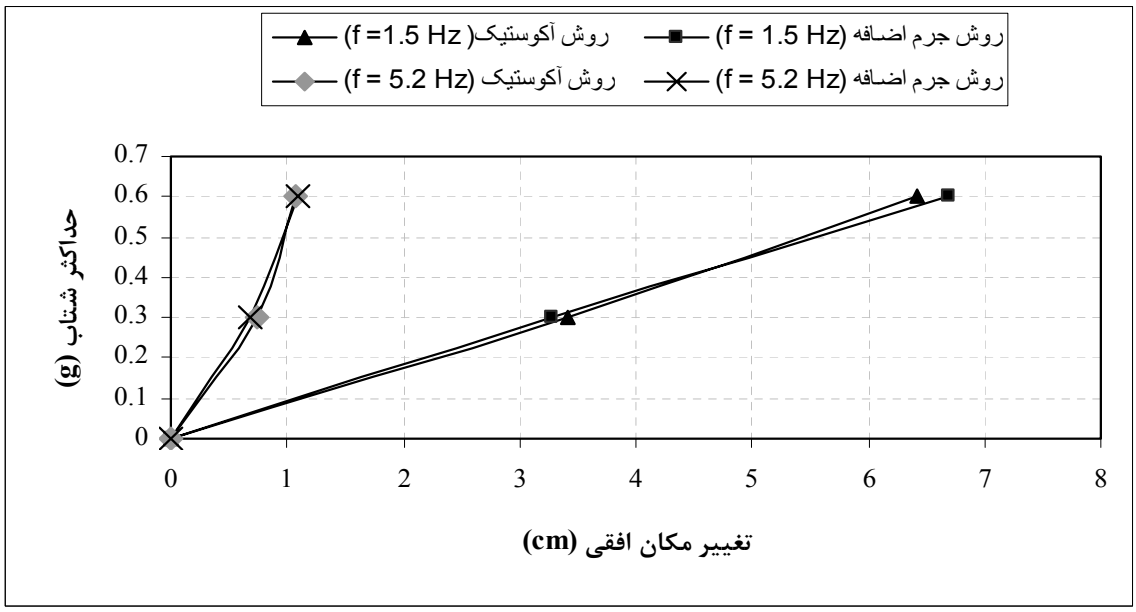
جدول ۲- نتایج آنالیزهای فرکانس برای دهانهٔ ۳۰ متری

مود ارتعاشی / آنالیز	فرکانس مود اول قائم (Hz)	فرکانس مود سوم قائم (Hz)	فرکانس مود اول افقی (Hz)	فرکانس مود سوم افقی(Hz)
آکوستیک - وزن	0.924	4.167	0.819	4.143
آکوستیک - وزن و فشار	1.526	5.187	1.354	5.141
جرم افزوده - وزن	0.905	4.084	0.803	4.061
جرم افزوده - وزن و فشار	1.493	5.082	1.326	5.038
روش تقریبی DNV - وزن	0.862	4.65	0.782	4.213
نه آکوستیک، نه جرم افزوده - وزن	1.011	4.558	0.897	4.532
نه آکوستیک، نه جرم افزوده - وزن و فشار	1.667	5.671	1.480	5.622

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.10.2.2]



(الف)



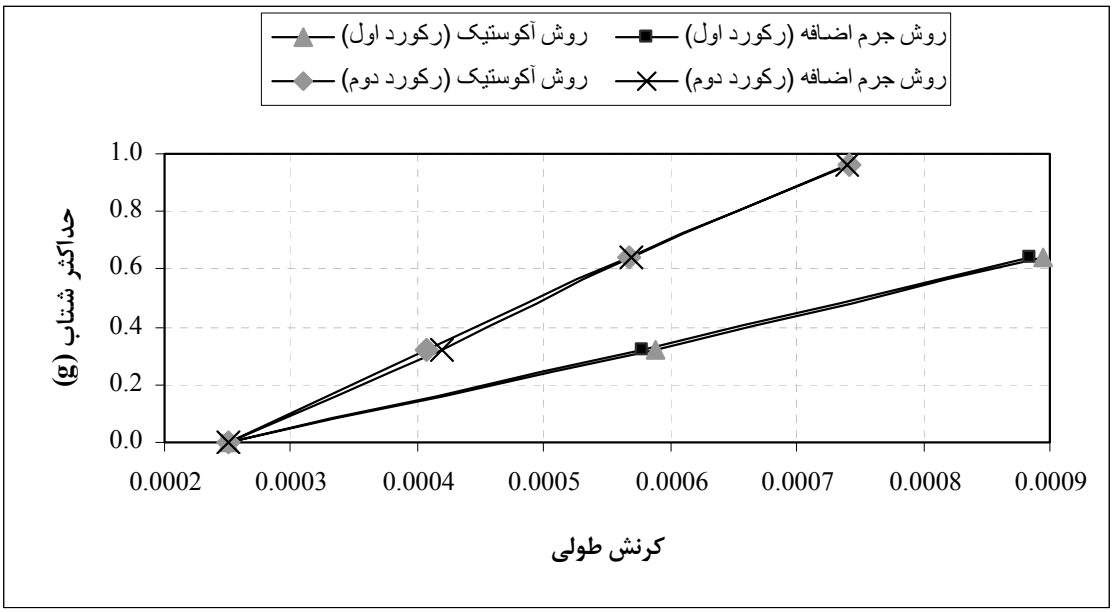
(ب)

شکل ۳- نتایج آنالیز دهانهٔ ۳۰ متری تحت اثر بارگذاری هارمونیک در راستای افقی
الف- کرنش، ب- تغییرمکان

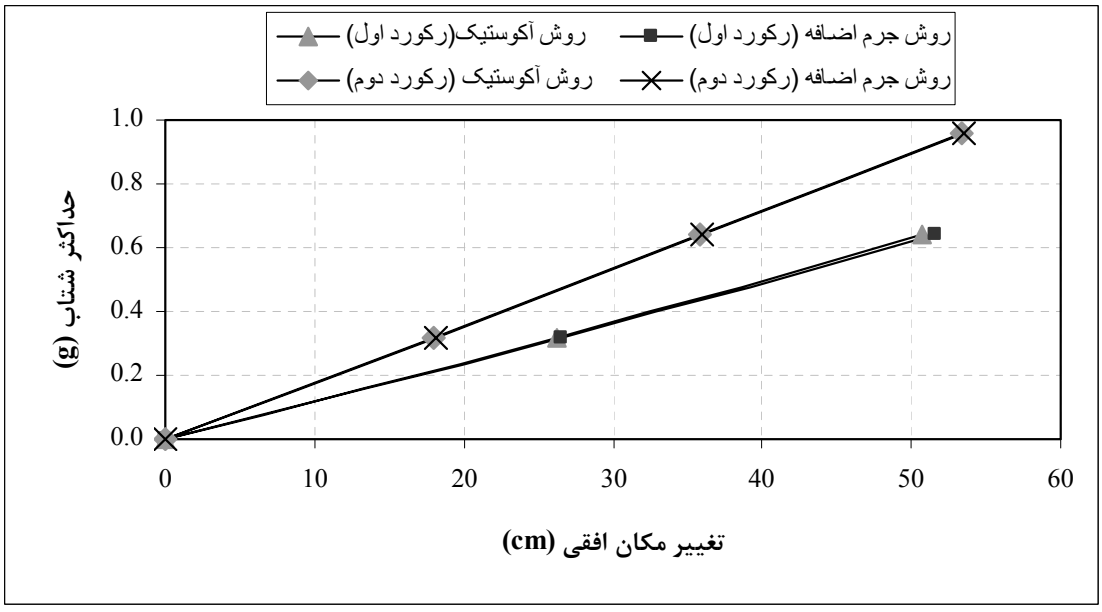
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.10.2.2]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.10.2.2]



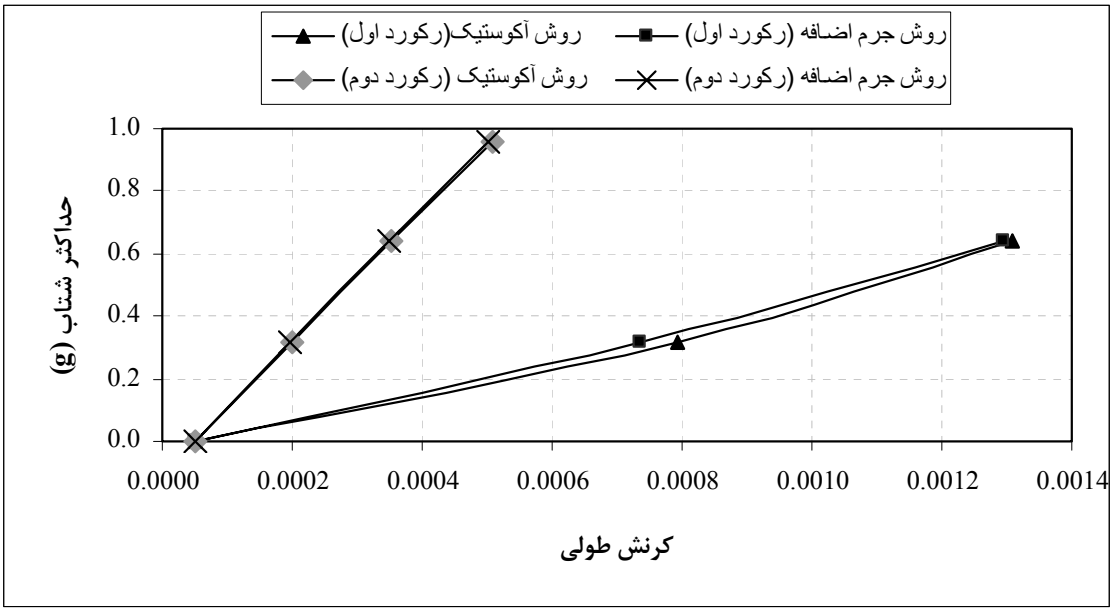
(الف)



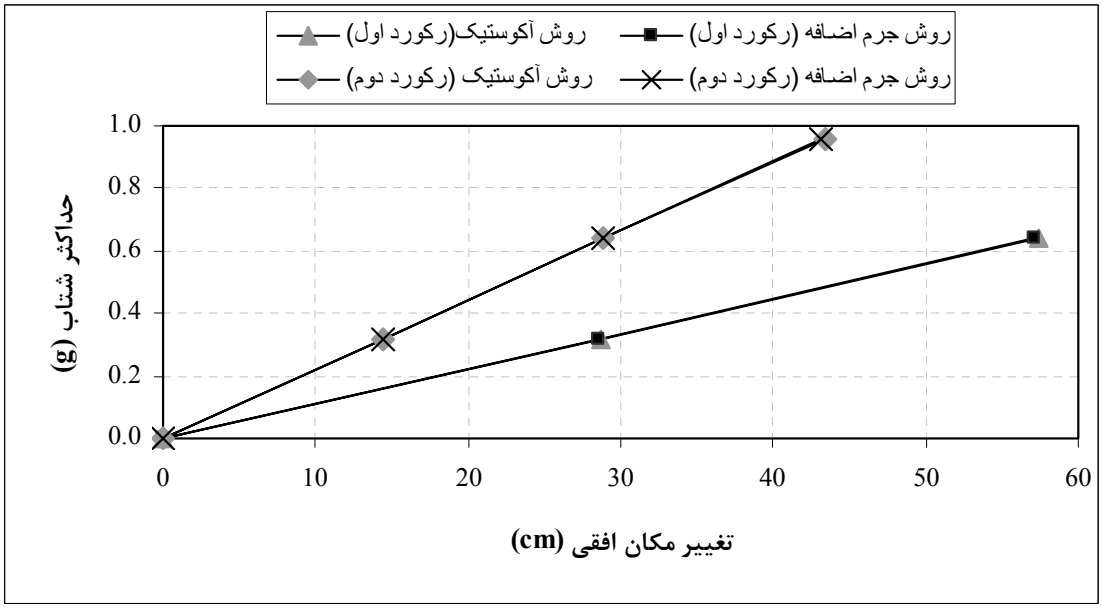
(ب)

شکل ۵- نتایج آنالیز دهانهٔ ۳۰ متری تحت اثر بارگذاری زلزله در راستای افقی
الف- کرنش، ب- تغییرمکان

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.10.2.2]



(الف)



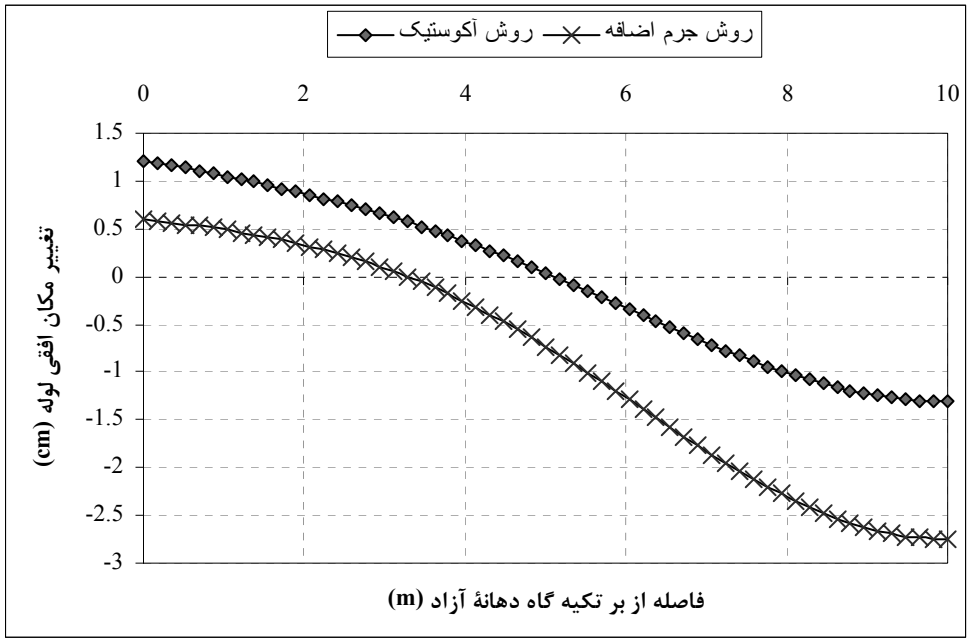
(ب)

شکل ۶- نتایج آنالیز دهانهٔ ۲۰ متری تحت اثر بارگذاری زلزله در راستای افقی
الف- کرنش، ب- تغییرمکان

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.10.2.2]

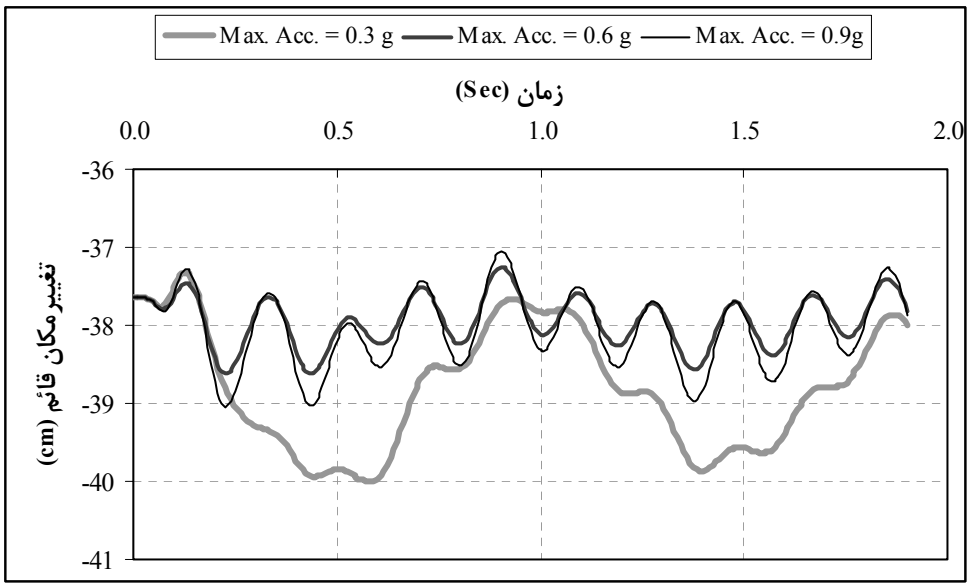
جدول ۳- حداکثر اختلاف بین نتایج روش جرم افزوده و آکوستیک
(علامت مثبت نشانهٔ بیشتر بودن کمیت مورد نظر در روش جرم افزوده می‌باشد.)

نتایج / آنالیز	دهانهٔ ۳۰ متری		دهانهٔ ۲۰ متری	
	کرنش طولی	تغییر مکان	کرنش طولی	تغییر مکان
بارگذاری هارمونیک با فرکانس مود اول در راستای افقی	+ 0.4%	+ 4.4%	+ 56.6%	+ 8.6%
بارگذاری هارمونیک با فرکانس مود اول در راستای قائم	+ 7.6%	+ 5.9%	+ 21.2%	+ 19.6%
بارگذاری هارمونیک با فرکانس مود سوم در راستای افقی	- 12.3%	- 7.8%	- 5.6%	- 8.1%
بارگذاری هارمونیک با فرکانس مود سوم در راستای قائم	+ 3.5%	- 0.5%	+ 5.7%	- 1.26%
بارگذاری زلزله، رکورد اول در راستای افقی	- 1.6%	+ 1.7%	- 7.0%	- 0.7%
بارگذاری زلزله، رکورد اول در راستای قائم	+ 6.6%	+ 6.3%	+ 14.6%	+6.9%
بارگذاری زلزله، رکورد دوم در راستای افقی	+ 3.0%	+ 0.4%	- 1.4%	- 0.7%
بارگذاری زلزله، رکورد دوم در راستای قائم	+ 3.4%	+ 3.8%	+ 8.5%	+ 3.3%



شکل ۷- تغییر شکل لوله در زمان رخداد حداکثر کرنش وسط دهانه، دهانهٔ ۲۰ متری، بارگذاری هارمونیک افقی با فرکانس مود اول

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.10.2.2]



شکل ۸- تاریخچهٔ زمانی تغییرمکان وسط دهانه
(دهانهٔ ۳۰ متری، بارگذاری هارمونیک با $f = 5.2Hz$ و شرایط مرزی ساده شده)

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق، اندرکنش آب و لوله تحت تحریکات شدید در دهانهٔ آزاد خطوط لولهٔ زیر دریا، مورد بررسی قرار گرفته است. در این خصوص، شبیه سازی اجزاء محدود این اندرکنش با دو روش "جرم افزوده" و "آکوستیک" انجام شده و نتایج حاصل از آنها مقایسه شده‌اند. هر دو نوع تحریک دینامیکی هارمونیک و نیز تحریک نامنظم (مشابه آنچه در زلزله رخ می‌دهد) بررسی شده‌اند. تحلیل‌ها به روش دینامیکی افزایشی انجام شده‌اند. اثر اندرکنش خاک و لوله در مرزهای دهانهٔ آزاد در تعدادی از تحریک‌ها در نظر قرار گرفته است. صحت سنجی مدل‌های عددی ازطریق مقابله مشخصه‌های دینامیکی آنها با روابط تحلیلی-تجربی پیشنهادی DNV [3] انجام پذیرفته است.

تحلیلهای انجام شده حاکی از آن است که روش جرم افزوده عموماً نتایج محافظه کارانه‌تری را نسبت به مدل آکوستیک ارائه کرده است (بدین معنی که مقدار کرنش طولی لوله پیش بینی شده، که معیار اصلی طرح لرزه‌ای آن می‌باشد، در روش جرم افزوده نسبت به روش آکوستیک بزرگتر خواهد بود). دو روش انطباق بیشتری را در تحریک‌های زلزله در مقایسه با تحریک های هارمونیک نشان داده‌اند. تحت تحریک‌های هارمونیک میزان انحراف نتایج روش در پیش‌بینی حداکثر کرنش طولی لوله به حدود ۶۰ درصد بالغ شده است. در تحریک زلزله حداکثر انحراف مشاهده شده حدود ۱۵ درصد بوده است. تفاوت دو روش با کاهش طول دهانه، افزایش یافته و در تحریک قائم بیشتر از تحریک نسبی بوده است.

یک دلیل محدودتر شدن پاسخ‌های مدل آکوستیک، در مقایسه با مدل جرم افزوده تاخیر فاز حاصل از فاصلهٔ لوله تا بستر دریا (e) تشخیص داده شده است. تاخیر فاز فشار دینامیکی آب نسبت به بارگذاری مستقیم لوله، باعث نوعی کاهش در پاسخ لوله به تحریک شده است. مدل جرم افزوده این نوع اختلاف فاز را منظور نمی‌کند. هم‌چنین مشاهده شده است که اساساً فرم تغییرشکل پیش بینی شده و انحنای لوله در دهانه آزاد در دو مدل متفاوت می‌باشد. انحنای لوله در مدل آکوستیک، به دلیل حضور المانهای محیط آب در اطراف لوله و نیز تاثیر اضافه فشار دینامیکی آب از شدت کمتری برخوردار بوده است. عوامل یاد شده در روش جرم افزوده نادیده گرفته می‌شوند که منتج به

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.10.2.2]

پیش بینی مقادیر اضافه‌تری برای کرنش طولی در مقایسه با مدل آکوستیک می‌گردد.

مشاهده شده است که خصوصاً در تحریک‌های هارمونیک با افزایش شدت تحریک هر دو مدل آکوستیک و جرم افزوده رفتار سخت شونده‌ای از خود بروز می‌دهند. این مساله در تحریک در مودهای بالاتر بارزتر هستند. این سخت شدگی ظاهری به بزور رفتارهای غیر خطی هندسی (هم در خاک و هم در لوله) و غیر خطی مصالح (عمدتاً در خاک) مرتبط بوده است و به تغییر در فرکانس ارتعاش طبیعی سیستم منجر شده سازه را از حالت حالت تشدید خارج خواهد کرد. این موضوع خصوصاً یک عامل کنترل دامنه ارتعاش لوله در دهانه آزاد در تحریک‌هایی چون نوسانات ناشی از تشکیل گردابه است که به نظر می‌رسد قبلاً کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

کلید واژگان

1- Beam Element
2- Insitue
3- Acoustic
4- Froude-Krylov Force
5- Lame Coefficient
6- Kronecker Delta Function
7- Shell Elements
8- Interface Elements
9- Solid
10- Incremental Dynamic Analysis

۷- مراجع

1-Braestrup M.W., Andersen J.B., Andersen L.W., Bryndum M.B., Christensen C.J. and Rishøj N., (2005) "Design and Installation of Marine Pipelines", Blackwell Publishing.
2-DNV-(Offshore Standard) OS-F101, (2000)"Submarine Pipeline Systems", Det Norske Veritas, January.
3-DNV-(Recommended Practice) RP-F105, (2006) "Free Spanning Pipelines", Det Norske Veritas, February.
4-Hongger D.G., Gailing R.W., Nyman D.J. and Associates, (2002) "Guidelines For The Seismic design and Assessment of Natural Gas and Liquid Hydrocarbon Pipelines", The Proceeding of 4th International Pipeline Conference, September 29-October 3, Calgary, Alberta, Canada, pp. 563-570.
5-Bai Y.,(2001) "Pipelines and Risers", Elsevier.
6-Golbahar M., (2005). "Analysis of Sub-Marine Pipelines Under Sever Earthquakes", MSc Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran (In Persian).
7-T.K. Datta, E.A. Mashaly, (1997) "Seismic Response of Suspended Spans of Submarine Pipeline", the Proceeding of 7th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, , February 7-12, 1988, Houston, Texas, pp. 131-138.
8-Zhou J., Li X. and Ma C.X. (2001) "Seismic Response and Vibration Control for Free Spanning Submarine Pipelines", the Proceeding of 11th International Offshore and Polar Engineering Conference, June 17-22, 2001, Stavanger, Norway, pp, 180-184.
9-Zhou J., Li X. and Dong R., (2005) "Experimental Study and Numerical Analysis on Free Spanning Submarine Pipeline under Dynamic Excitation", the Proceeding of 15th International Offshore and Polar Engineering Conference, June 19-24, 2005, Seoul, Korea, pp. 135-140.
10-Zhou J., Li X., Feng X. and Dong R. (2008) "Nonlinear Seismic Analysis of Free Spanning Submarine Pipelines under Spatially Varying Earthquake Ground Motions", the Proceeding of 18th International Offshore and Polar Engineering Conference, July 6-11, 2008, Vancouver, BC, Canada, pp, 269-276.
11-Patel M.H., (1989) "Dynamics of Offshore Structures", Butterworth.
12-RezaeeNia M. (2005), "Advanced Fluid Dynamics", Fekr Khalagh Novin Publissher, Tehran, Iran (In Persian).
13-Ahmadi M.T. and Gharebaghi, B. (1994) "Analysis of Dam/Reserval Dynamic Interactions", International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran (In Persian).
14-Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. (2005) ABAQUS Manual, Ver 6.6-3.
15-Menetrey PH., and Willam K. J., (1995) "Triaxial Failure Criterion for Concrete and its Generalization" ACI Structural Journal, Vol. 92, pp. 311–318, May/June.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.10.2.2]

16-C-CORE Report R-02-029-076, (2003) "3D Finite Element Analysis of Pipe-Soil Interaction – Effects of Groundwater", www.c-core.ca, February.
17-Chakrabarti S.K., "Handbook of Offshore Engineering", Volume II, Elsevier, 2005.
18-Chopra A., (1995) "Dynamics of Structures", Prentice-Hall, Inc.
19-Kramer S.L., (1996) "Geotechnical Earthquake Engineering", Prentice-Hall, Inc.
20-http://peer.berkeley.edu/smcat/.
21-Zeinoddini M, Harding J.E. and Parke G.A.R. (1999), "Dynamic Behaviour of Axially Pre- loaded Tubular Steel Members of offshore structures Subjected to Impact Damage", Journal of Ocean Engineering, Vol.26, P.P.963-978.
22-Vamvatsikos D, Cornell CA. (2002) "The Incremental Dynamic Analysis and its Application to Performance-Based Earthquake Engineering". Proceedings of the 12th European Conference on Earthquake Engineering, London, September.
23-Vamvatsikos, D. (2002) "Seismic Performace, Capacity and Reliability of Structures as Seen through Incremental Dynamic Analysis", Ph.D. Thesis, Stanford University, 152p.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.10.2.2]