

بررسی هیدرولیک جریان و طول دهانه‌ی آزاد مجاز خطوط لوله دریایی تحت اثر امواج دریا

مجتبی پاکزاده ماسوله^{۱*}، عباس یگانه بختیاری^۲، محمدحسین کاظمی نژاد^۳

۱- کارشناس ارشد سازه های دریایی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، پست الکترونیکی: pmojtaba@yahoo.com

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، پست الکترونیکی: yeganeh@just.ac.ir

۳- دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، پست الکترونیکی: mkazeminezhad@just.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۰/۱۰/۱۰

* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: ۹۰/۴/۲۷

© نشریه علمی - پژوهشی اقیانوس‌شناسی ۱۳۹۱، تمامی حقوق این اثر متعلق به نشریه اقیانوس‌شناسی است.

چکیده

قرارگیری خطوط لوله دریایی بر روی بستر دریا در حالت غیر مدفون موجب شکل‌گیری دهانه‌ی آزاد در طول مسیر خط لوله می‌شود. در اثر ایجاد دهانه‌ی آزاد، برهمکنش جریان‌های گردابه‌ای و نیروهای دینامیکی وارده از طرف سیال با این خطوط، احتمال پدیده‌ی تشدید و به‌دنبال آن خستگی و شکست لوله را افزایش می‌دهد. در این راستا، هدف از این پژوهش پیش‌بینی طول دهانه‌ی آزاد مجاز خطوط لوله‌ای است که در خلیج فارس در معرض امواج (جریان‌های رفت و برگشتی) قرار دارند. اثر امواج بر میدان پیرامون لوله با دو دیدگاه سازه‌ای و هیدرولیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد و با تغییر بعضی از پارامترهای موثر در میدان جریان اطراف لوله مانند عدد کولگان کارپتر و فاصله لوله از بستر به بررسی و تفسیر نتایج حاصله از میدان جریان و ارتعاش لوله در جهت عمود بر راستای جریان پرداخته می‌شود و در نهایت در شرایط مختلف هیدرولیکی و تکیه‌گاهی طول دهانه‌ی آزاد مجاز خطوط لوله برای جلوگیری از پدیده‌ی تشدید تعیین و با نتایج آیین‌نامه‌های مختلف مورد مقایسه قرار داده می‌شود. نتایج حاصله نشانگر این مطلب است که در اجرای خطوط لوله دریایی در منطقه‌ی خلیج فارس علاوه بر اثر جریان در پیش‌بینی طول دهانه‌ی آزاد مجاز، باید اثر امواج را نیز در نظر گرفت.

کلمات کلیدی: طول دهانه‌ی آزاد مجاز، خطوط لوله دریایی، فرکانس گردابه‌های پیرامون لوله، موج، جریان نوسانی.

۱. مقدمه

گیرد. خطوط لوله‌ی انتقال عمدتاً به‌صورت غیر مدفون بر روی بستر خلیج فارس قرار می‌گیرند. با تغییر میدان جریان در اطراف لوله، رسوبات زیر لوله شروع به حرکت کرده و پدیده‌ی آبشستگی آغاز شده و منجر به دهانه‌ی آزاد در خطوط لوله می‌شود. در صورتی که طول دهانه‌ی آزاد از حد مجاز تجاوز کند، لوله‌های انتقال دچار خستگی و در معرض صدمات جدی قرار می‌گیرند. پیش‌گیری از صدمه در خطوط لوله‌های انتقال به منظور

در کشور ما ایران حجم زیادی از خطوط لوله‌ی انتقال دریایی در خلیج فارس قرار گرفته‌اند و از آنجا که در منطقه خلیج فارس شرایط کم عمق حاکم است، بنابراین امواج دریایی بر میدان جریان پیرامون لوله اثرگذار خواهند بود و باید اثر امواج در ارتعاش لوله و تعیین طول دهانه‌ی آزاد مجاز مورد بررسی قرار

لوله تعیین شود و اثر KC و e/D بر بسامد گردابه‌های پیرامون لوله و طول دهانه آزاد مجاز مورد بررسی قرار گیرد.

۲. معادلات حاکم بر جریان پیرامون لوله

با استفاده از معادلات پیوستگی و ناویه استوکس (که در واقع بیان ریاضی از اصول پایستاری جرم و اندازه حرکت هستند)، به همراه معادلات انتقال انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ استهلاک انرژی جنبشی آشفتگی می‌توان میدان سیال اطراف لوله را شبیه‌سازی نمود. در مدل حاضر معادلات حاکم بر هیدرودینامیک جریان در مختصات دو بعدی در یک سیستم مختصات کارتزین، برای جریان تراکم ناپذیر به شرح زیر هستند:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(2\nu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial u}{\partial y} + v \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - g + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(2\nu \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u \frac{\partial k}{\partial x} + v \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\nu_l + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\nu_l + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right) + P_k - \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \epsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\nu_l + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\nu_l + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right) + (c_{\epsilon 1} P_k - c_{\epsilon 2} \epsilon) \frac{\epsilon}{k} \quad (5)$$

$$P_k = \nu_t \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (6)$$

در روابط فوق u و v مؤلفه‌های سرعت میانگین در جهات افقی (x) و قائم (y)، p فشار میانگین، ρ چگالی سیال، k انرژی جنبشی سیال، ϵ نرخ استهلاک انرژی جنبشی سیال، P_k بیانگر تولید انرژی آشفتگی و $\nu = \nu_l + \nu_t$ مجموع لزجت مولکولی (ν_l) و لزجت گردابه‌ای ناشی از آشفتگی ($\nu_t = c_{\mu} k^2 / \epsilon$) هستند. در این روابط به منظور ساده‌سازی شکل معادلات تمامی پارامترها به صورت میانگین زمانی هستند. ضرایب موجود در معادلات فوق توسط Rodi (1980) به صورت زیر ارائه شده است که در مطالعات مربوط به شبیه‌سازی جریان اطراف خطوط لوله با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته‌اند:

جلوگیری از مشکلات زیست‌محیطی و صرف هزینه‌های گزاف موجب شده است که مطالعه طول مجاز دهانه‌ی آزاد مورد توجه جدی محققین قرار گیرد.

محدود نمودن طول دهانه‌ی آزاد به میزان مجاز از دو دیدگاه سازه‌ای و هیدرولیکی قابل بررسی است. دیدگاه سازه‌ای به معنی تعیین بسامد طبیعی خط لوله واقع بر دهانه‌ی آزاد براساس مشخصه‌های فیزیکی لوله و دیدگاه هیدرولیکی به معنی تعیین میزان بسامد نیروهای خارجی براساس شرایط هیدرودینامیکی پیرامون خط لوله است. Sumer و همکاران در سال ۱۹۹۱ در پژوهش‌های آزمایشگاهی خود بدون در نظر گرفتن پدیده دهانه‌ی آزاد تنها به بررسی هیدرولیک جریان و اثر حضور دیواره بر میدان جریان و فشار اطراف لوله و مکانیسم گردابه‌های اطراف لوله و نیروهای وارده بر لوله در جریان‌های رفت و برگشتی پرداختند. Choi (2000) در دیدگاه سازه‌ای نشان داد که شرایط تکیه‌گاهی و نیروی محوری نقش به‌سزایی در فرکانس طبیعی خط لوله ایفا می‌کنند و تکیه‌گاه گیرداری و افزایش نیروی محوری کششی باعث افزایش فرکانس طبیعی لوله و در نتیجه کاهش احتمال پدیده تشدید و افزایش طول دهانه‌ی آزاد مجاز خطوط لوله می‌شود. Bai (1999) خط لوله واقع بر دهانه آزاد را همانند یک سازه‌ی تیر-ستون بر روی دو تکیه‌گاه در نظر گرفت و با استفاده از تحلیل مودال معادله‌ی اوایلر برنولی تیر-ستون را برای تعیین فرکانس طبیعی خط لوله حل کرد که با توجه به مقاومت انتقالی و دورانی خاک قادر بود فرکانس طبیعی لوله را تعیین کند. DNV (2006) و ABS (2008) نیز با در نظر گرفتن نیروی محوری و شرایط تکیه‌گاهی و مشخصات لوله روابطی را برای تعیین فرکانس طبیعی لوله ارائه دادند. ولی‌پور و همکاران در سال ۲۰۰۹ با در نظر گرفتن شرایط مختلف تکیه‌گاهی، نیروی محوری، شرایط بستر و مشخصات لوله، رابطه‌ای را برای تعیین فرکانس طبیعی لوله ارائه دادند که در یک مورد مطالعاتی نتایج بهتری نسبت به آیین‌نامه‌های ABS و DNV ارائه داد. در مطالعات انجام شده به بررسی اثر KC ، e/D و شرایط تکیه‌گاهی بر پرید گردابه‌های پیرامون لوله و طول دهانه آزاد مجاز در جریان رفت و برگشتی پرداخته نشده است. بنابراین در پژوهش حاضر سعی بر آن است که بعد از مدل‌سازی هیدرودینامیکی میدان جریان توسط مدل عددی یگانه و همکاران، نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر لوله را تعیین و با استفاده از مدل‌سازی ارتعاش لوله، تغییر مکان، سرعت، شتاب و طول دهانه آزاد مجاز

جریان به شرایط مرزی ورودی، خروجی، سطح آزاد و دیواره (سطح بستر و لوله) نیاز داریم. لازم به ذکر است، به دلیل آن که لوله در عمقی قرار دارد که تغییرات سطح آزاد روی میدان جریان اطراف خط لوله تاثیری بسیار ناچیزی دارد، اثر میدان امواج بر لوله و بستر به صورت یک میدان جریان نوسانی در نظر گرفته می‌شود (Kazeminezhad, 2010).

• شرایط مرزی ورودی

در شرایطی که شبیه‌سازی جریان نوسانی مدنظر باشد از شرایط مرزی ورودی زیر در معادلات اندازه حرکت استفاده می‌شود (Liang, D., Cheng, L., 2005b):

$$u(y, t) = u_m \sin\left(\frac{2\pi}{T_w} t\right), \quad v(y, t) = 0 \quad (7)$$

در این رابطه u_m حداکثر سرعت مداری در سطح آزاد و T_w پریود جریان نوسانی هستند. شرایط مرزی ورودی برای حل معادلات آشفتگی نیز به صورت زیر هستند (Liang, D., Cheng, L., 2005b):

$$k(y, t) = k_m \left[\sin\left(\frac{2\pi}{T_w} t\right) \right]^2, \quad \epsilon(y, t) = \epsilon_m \left| \sin\left(\frac{2\pi}{T_w} t\right) \right|^3 \quad (8)$$

$$k_m = 0.0005 u_m^2, \quad \epsilon_m = \frac{C_{\mu} k_m^2}{100 v_l}$$

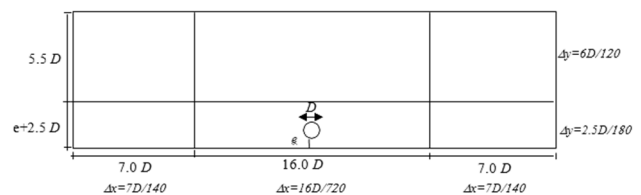
در روابط فوق k_m و ϵ_m مقادیر حداکثر انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ استهلاك آن است.

• شرایط مرزی خروجی

در این مطالعه محل مرز خروجی در فاصله نسبتاً دوری از لوله در نظر گرفته شده است؛ لذا می‌توان انتظار داشت در مرز خروجی جریان به حالت کاملاً توسعه یافته برسد. در این شرایط می‌توان فرض کرد گرادیان تمام متغیرها (به‌استثنای فشار) در مرز خروجی در راستای جریان (عمود بر مرز خروجی) برابر صفر است. در مورد شرط مرزی مناسب برای مؤلفه افقی سرعت باید بررسی بیشتری صورت گیرد. زیرا در طی تکرار حلقه‌های مربوط به الگوریتم سیمپل هیچ تضمینی برای برقراری بقای جرم در

۳. روش عددی و دامنه‌ی محاسباتی

در این تحقیق روش حجم محدود (FVM¹) جهت حل عددی معادلات حاکم به کار می‌رود. یکی از محاسن کاربرد روش حجم محدود آن است که بقای کامل کمیت‌های مختلف نظیر جرم و اندازه حرکت برای هر تعدادی از حجم‌های کنترل و البته برای کل حوزه محاسباتی در حین گسسته‌سازی و حل معادلات برقرار است. حل معادلات دیفرانسیل حاکم بر پدیده‌های مختلف مستلزم تعریف شرایط مرزی مناسب است. به منظور تعریف شرایط مرزی ابتدا باید شکل دامنه‌ی محاسباتی مشخص شود. شکل (۱) دامنه‌ی محاسباتی و موقعیت مرزها را برای شرایط جریان نوسانی نمایش می‌دهد. در این شکل D قطر لوله و e فاصله بین لوله و بستر است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در شرایطی که میدان جریان نوسانی شبیه‌سازی می‌شود دامنه‌ی محاسباتی با ابعاد $30D \times (e+8D)$ به کار برده می‌شود و لوله به فاصله $15D$ از مرزهای ورودی و خروجی قرار می‌گیرد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، شبکه‌ی محاسباتی به ۶ قسمت تقسیم‌بندی شده است و از آنجا که در نزدیکی لوله‌ی تغییرات میدان فشار و جریان بسیار متغیر و پیچیده است، شبکه‌بندی اطراف لوله بسیار کوچک است تا جواب‌های حاصله از دقت خوبی برخوردار باشند. از آنجا که اندازه‌ی شبکه‌های مجاور در روش احجام محدود باید تقریباً یکسان باشند، تغییرات اندازه شبکه‌بندی از یک منطقه به منطقه‌ی دیگر به مرور صورت گرفته است.



شکل ۱- شبکه‌ی محاسباتی و اندازه بدون بعد شبکه در بخش‌های مختلف

۴. شرایط مرزی جریان رفت و برگشتی

در این مطالعه شکل‌گیری میدان جریان در دامنه‌ی محاسباتی با تعریف شرایط مرزی مناسب صورت می‌گیرد. برای حل میدان

¹ Finite Volume Method

در این رابطه y_p فاصله دیواره تا اولین گره‌ای است که مولفه سرعت u_p در آن ذخیره می‌شود. در شرایط $y^+ \leq 11.63$ ، رابطه خطی بین u^+ و y^+ برقرار است در حالی که در محدوده $11.63 < y^+$ ، رابطه بین u^+ و y^+ به صورت لگاریتمی است (شجاعی فرد، ۱۳۷۹):

$$\begin{aligned} u^+ &= y^+ & y^+ &\leq 11.63 \\ u^+ &= \frac{1}{\kappa} \ln(E y^+) & y^+ &> 11.63 \end{aligned} \quad (12)$$

شرایط مرزی دیواره در معادلات اندازه حرکت در قالب نیروی وارده از طرف دیوار بر سیال (F_s) به صورت چشمه در معادلات اندازه حرکت مدنظر قرار می‌گیرند (شجاعی فرد، ۱۳۷۹):

$$\begin{aligned} F_s &= -\mu \frac{u_p}{y_p} A_{cell} & y^+ &\leq 11.63 \\ F_s &= -(\rho C_\mu^{1/4} k_p^{1/2} u_p / u^+) A_{cell} & y^+ &> 11.63 \end{aligned} \quad (13)$$

با در نظر گرفتن تعادل منطقه‌ای در مجاورت دیواره بدین معنا که نرخ تولید و استهلاک انرژی جنبشی آشفتگی یکسان است، شرایط مرزی زیر برای معادلات k و ε به کار می‌روند:

$$k_p = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad , \quad \varepsilon_p = \frac{u_*^3}{\kappa y_p} \quad (14)$$

در روش حجم محدود با در نظر گرفتن جملات چشمه مناسب، موانع جامد مانند لوله در ناحیه جریان تعریف می‌شود. در این موارد کلیه پارامترهای جریان در گره‌هایی که درون جسم جامد قرار می‌گیرند با استفاده از جملات چشمه زیر برابر صفر در نظر گرفته می‌شوند (شجاعی فرد، ۱۳۷۹):

$$S_u = 0 \quad , \quad S_p = -10^{30} \quad (15)$$

• نیروهای وارده بر لوله

برای تعیین ارتعاش و طول دهانه آزاد مجاز لوله بعد از مدل سازی میدان جریان باید نیروهای وارده بر لوله را محاسبه کرد. در شرایط جریان نوسانی به منظور بررسی نیروهای وارد بر لوله، نیروها به دو دسته موازی میدان جریان^۱ یا نیروی افقی (F_x) و

دامنه‌ی محاسباتی وجود ندارد. لذا شرط مرزی خروجی برای مؤلفه سرعت بر اساس شار جرمی ورودی (M_{in}) و خروجی (M_{out}) از دامنه‌ی محاسباتی به صورت زیر محاسبه می‌شود (شجاعی فرد، ۱۳۷۹):

$$u_{NI,J} = u_{NI-1,J} \times \frac{M_{in}}{M_{out}} \quad (9)$$

• شرایط مرزی سطح آزاد

در شرایطی که عمق آب کم باشد و لوله در مجاورت بستر قرار گیرد ممکن است سطح آزاد جریان به دلیل انسداد جریان تغییر کند. در صورتی که عمق آب در نظر گرفته شده روی لوله زیاد باشد انسداد جریان در مجاورت لوله اثر چندانی بر سطح آزاد نخواهد داشت. در این حالت که هیچ جریان عرضی و هیچ شار اسکالری از مرز سطح آزاد وجود ندارد می‌توان از شرط مرزی تقارن در سطح آزاد استفاده نمود. Liang et al., 2005b در مدل سازی میدان جریان اطراف لوله ارتفاع دامنه‌ی محاسباتی را برابر $4D$ در نظر گرفتند و در مرز سطح آزاد نیز از شرط مرزی تقارن استفاده نمودند. در این مطالعه نیز با در نظر گرفتن ارتفاع بیشتر برای دامنه‌ی محاسباتی، از شرط مرزی تقارن در سطح آزاد استفاده می‌شود. لذا گرادیان تمامی پارامترها در جهت عمود بر مرز برابر صفر در نظر گرفته می‌شود.

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = 0 \quad (10)$$

• شرایط مرزی دیواره

در مدل سازی میدان جریان اطراف لوله، سطح بستر و سطح لوله به صورت دیواره عمل می‌کنند و در این مکان‌ها باید از شرایط مرزی دیواره استفاده کرد. تعداد نقاط شبکه مورد نیاز در مجاورت دیواره به منظور حل دقیق و کامل تمامی لایه‌های جریان بسیار زیاد است و معمولاً از تابع دیواره جهت نشان دادن اثر مرزهای دیواره استفاده می‌شود. در تشریح وضعیت جریان اطراف دیواره از دو عدد بدون بعد زیر استفاده می‌شود (شجاعی فرد، ۱۳۷۹):

$$u^+ = \frac{u_p}{u_*} \quad , \quad y^+ = \frac{\rho u_* y_p}{\mu} \quad (11)$$

¹ Inline

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI(x) \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} \right) - N(x) \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + m \left(\frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} \right) + c \left(\frac{\partial v(x,t)}{\partial t} \right) = p(x,t) \quad (18)$$

جواب معادله‌ی بالا را می‌توان از روش تحلیل مودال با استفاده از مجموع مودهای تاثیرگذار ارتعاشی لوله به دست آورده. بدین منظور جمله‌ی زمانی پاسخ $(Y(t))$ باید در جمله‌ی مکانی یا شکل مود $(\phi(x))$ ضرب شود. بنابراین در حالت کلی پاسخ ارتعاشی سامانه به صورت زیر است که دو بخش مستقل زمانی و مکانی دارد:

$$v(x,t) = \phi(x) \cdot Y(t) \quad (19)$$

جمله‌ی زمانی، شکل مود و بسامد زاویه‌ای لوله از روابط زیر به دست می‌آیند. در معادله ۲۰، نیروی وارد بر لوله در بازه‌های زمانی مختلف است که همان‌طور که توضیح داده شد از حل عددی هیدرولیک جریان پیرامون لوله به دست آمده است:

$$Y_n(t) = \frac{1}{M_n \omega_{Dn}} \int_0^t P_n(\tau) \exp(-\xi_n \omega_n (t-\tau)) \sin \omega_{Dn} (t-\tau) d\tau \quad (20)$$

شرایط تکیه‌گاهی مفصل - مفصل:

$$\phi(x) = \sin(ax) \quad a = 0.84 \frac{n\pi}{L} \quad (21)$$

$$\omega_n = 0.7 n^2 \pi^2 \sqrt{\frac{EI}{mL^4} \left(1 - \frac{T}{P_E}\right)} \quad (22)$$

شرایط تکیه‌گاهی مفصل - گیردار:

$$\phi(x) = \left[\cos(ax) - \cosh(ax) - \frac{\cos(al) + \cosh(al)}{\sin(al) + \sinh(al)} (\sin(ax) - \sinh(ax)) \right]$$

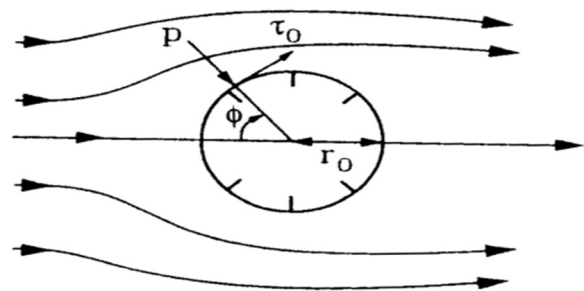
$$a = 1.02 \frac{n\pi}{L} \quad (23)$$

$$\omega_n = 1.05 n^2 \pi^2 \sqrt{\frac{EI}{mL^4} \left(1 - \frac{T}{P_E}\right)} \quad (24)$$

شرایط تکیه‌گاهی گیردار - گیردار:

$$\phi(x) = \left[\cos(ax) - \cosh(ax) - \frac{\sin(al) + \sinh(al)}{\cos(al) - \cosh(al)} (\sin(ax) - \sinh(ax)) \right]$$

عمود بر میدان جریان (F_y) تقسیم‌بندی می‌شوند. شکل (۲) نیروی فشاری و اصطکاکی وارد بر لوله را نشان می‌دهد. نیروهای وارد بر لوله را با صرف نظر کردن از نیروی اصطکاکی به علت صافی سطح لوله، می‌توان با استفاده از رابطه (۱۶) محاسبه نمود (Sumer and Fredsøe, 1999):



شکل ۲- نیروهای فشاری و اصطکاکی وارد بر لوله (Sumer and Fredsøe, 1999)

$$F_y = \int_0^{2\pi} p \sin(\phi) r_0 d\phi \quad F_x = \int_0^{2\pi} p \cos(\phi) r_0 d\phi \quad (16)$$

$$C_y = \frac{F_y}{\frac{1}{2} \rho U_0^2 D} \quad C_x = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \rho U_0^2 D} \quad (17)$$

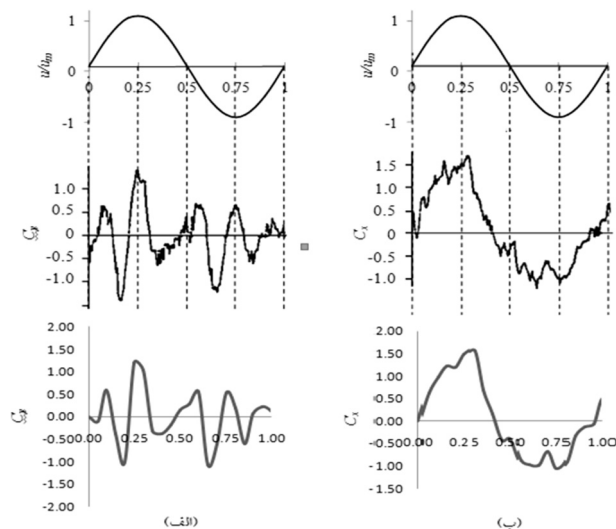
در روابط بالا p فشار در مجاورت سطح لوله و C_x و C_y به ترتیب ضرایب نیروی افقی و عمودی (برآ) هستند. پس از شبیه‌سازی میدان جریانی با در نظر گرفتن معادلات ذکر شده و شرایط مرزی مناسب و محاسبه‌ی نیروهای وارد بر لوله، می‌توان فرکانس نیروهای هیدرودینامیکی ناشی از موج را مشخص کرد.

۵. معادلات حاکم بر سازه خط لوله

بعد از تخمین نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر لوله با استفاده از معادلات حاکم بر میدان جریان با وارد کردن این نیروها به خط لوله با استفاده از تحلیل مودال میزان ارتعاش، سرعت و شتاب لوله را مورد ارزیابی قرار داده و طول دهانه آزاد مجاز لوله را تعیین می‌کنیم. معادله‌ی حاکم بر ارتعاش خط لوله واقع بر بستر دریا که مانند یک تیر گسترده که بر روی شرایط تکیه‌گاهی شبیه‌سازی شده است، به صورت معادله اویلر- برنولی زیر است (سعادت‌پور، ۱۳۸۶):

و بستر (e/D) برابر ۰/۴ بوده است. با توجه به پارامترهای آزمایش، عدد کولگان-کارپنتر و عدد رینولدز به ترتیب برابر ۲۰ و ۱/۰×۱۰۵ هستند. شبیه‌سازی با در نظر گرفتن شرایط مشابه و با تعریف سرعت نوسانی به صورت $u = u_m \sin(2\pi t/T)$ انجام شد.

در شکل (۳) مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده (Sumer et al., 1991) ضریب نیروی عمودی (برآ) وارده بر لوله مشاهده می‌شود. اختلاف‌های جزئی بین مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده نیروها وجود دارد. برای مثال مدل نتوانسته نوسانات کوچک در نیروهای هیدرودینامیکی اندازه‌گیری شده را به خوبی شبیه‌سازی نماید که این امر ناشی از کاربرد معادلات میانگین زمانی در مدل عددی است. اگر از روی نمودار نیروی برآ، کمترین پیوند مربوط به دو قله‌ی متوالی را در نظر بگیریم، پیوند گردابه‌ها برابر ۰/۲۵ ثانیه به دست می‌آید، با استفاده از این پیوند، طول دهانه‌ی آزاد مجاز لوله آزمایشگاهی مورد نظر برای شرایط مختلف تکیه‌گاهی مطابق جدول ۱ و ۲ تعیین می‌شود. همان‌طور که مشاهده شد مدل هیدرولیکی و سازه‌ای مورد استفاده از دقت خوبی نسبت به نتایج آزمایشگاهی و آیین‌نامه‌های در جریان نوسانی برخوردار هستند. بنابراین می‌توان برای شرایط مختلف هیدرولیکی و سازه‌ای از این مدل استفاده کرد و فرکانس نیروهای هیدرودینامیکی و طول دهانه آزاد مجاز لوله را مشخص نمود.



شکل ۳- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده ضریب نیروی (الف) پسا و (ب) برآ. پانل فوقانی: سرعت جریان در سطح آزاد، پانل میانی: مقادیر اندازه‌گیری (Sumer et al., 1991)، پانل تحتانی: مقادیر شبیه‌سازی

$$a = 1.21 \frac{n\pi}{L} \quad (25)$$

$$\omega_n = 1.47 n^2 \pi^2 \sqrt{\frac{EI}{mL^4} \left(1 - \frac{T}{PE}\right)} \quad (26)$$

بنابراین با استفاده از روابط ارائه شده در بالا می‌توان با استفاده از تحلیل مودال، ارتعاش و فرکانس طبیعی لوله را در شرایط مختلف تکیه‌گاهی به دست آورد و با برابر قرار دادن فرکانس نیروهای هیدرودینامیکی وارده ناشی از جریان رفت و برگشتی با فرکانس طبیعی لوله، طول دهانه‌ی آزاد مجاز خط لوله مطابق روابط (۲۷) تا (۲۹) تعیین می‌شوند:

شرایط تکیه‌گاهی مفصل-مفصل:

$$L_{allowable} = 1.0484 \sqrt{\frac{EI}{mf_v^2} \left(1 - \frac{T}{PE}\right)} \quad (27)$$

شرایط تکیه‌گاهی مفصل-گیردار:

$$L_{allowable} = 1.2844 \sqrt{\frac{EI}{mf_v^2} \left(1 - \frac{T}{PE}\right)} \quad (28)$$

شرایط تکیه‌گاهی گیردار-گیردار:

$$L_{allowable} = 1.524 \sqrt{\frac{EI}{mf_v^2} \left(1 - \frac{T}{PE}\right)} \quad (29)$$

برای محاسبه‌ی سرعت و شتاب ارتعاش لوله نیز می‌توان از روش تفاضل محدود و از رابطه‌ی زیر استفاده کرد:

$$\dot{v} = \frac{-3v_j + 4v_{i+1} - v_{i+2}}{2\Delta t} \quad (30)$$

$$\ddot{v} = \frac{v_i + 2v_{i+1} - v_{i+2}}{\Delta t^2} \quad (31)$$

۶. درستی‌سنجی مدل عددی

در این بخش یکی از آزمایش‌های Sumer et al., 1991 برای ارزیابی مدل مدنظر قرار می‌گیرد. در آزمایش مورد نظر، حداکثر سرعت نوسانی (u_m) برابر ۱/۰۷۸ متر بر ثانیه، پیوند نوسان (T) برابر ۱/۶۷ ثانیه، قطر لوله ۹ سانتیمتر، اندازه لایه‌ی مرزی ۰/۲۷ سانتیمتر، طول لوله ۲ متر و فاصله نسبی بین لوله

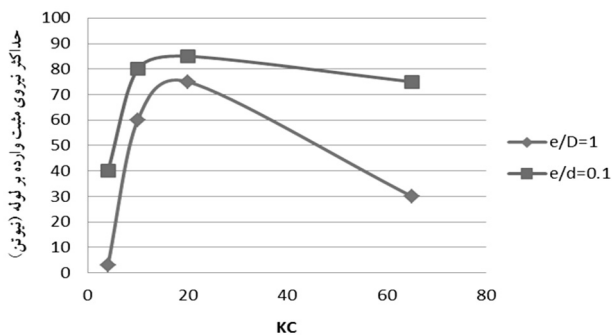
جدول ۱- طول دهانه آزاد مجاز لوله (متر) آزمایشی (Sumer et al., 1991) در شرایط تکیه‌گاهی مختلف طبق آیین‌نامه‌ها و مقادیر شبیه‌سازی شده ($e/D = 0.1$ و $KC = 20$)

شرایط تکیه‌گاهی			
گیردار - گیردار	مفصل - مفصل	مفصل - گیردار	روش مورد استفاده
۶/۰۷	۴/۰۳	۵/۰۳	DNV
۵/۶۹	۳/۷۸	۴/۷۲	ABS
۵/۲۸	۳/۸۰	۴/۶۶	مقادیر شبیه‌سازی شده

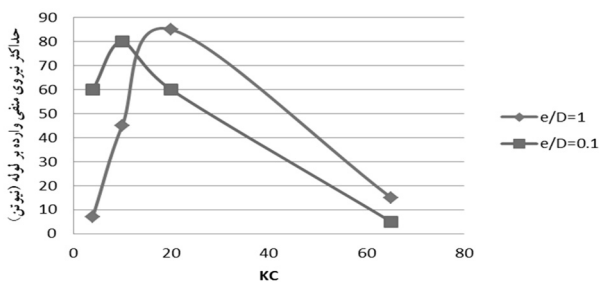
جدول ۲- مقایسه طول دهانه آزاد مجاز روش مدل‌سازی شده با آیین‌نامه‌های ABS و DNV

شرایط تکیه‌گاهی			
گیردار - گیردار	مفصل - مفصل	مفصل - گیردار	آیین‌نامه مربوطه
۱۰/۸٪	۶/۸٪	۸/۸٪	DNV
۳/۹٪	۰/۸٪	۲/۰٪	ABS

و سپس کاهش پیدا می‌کند. نیروی منفی وارده بر لوله در 10 و $KC=4$ با کاهش e/D افزایش می‌یابد، زیرا جریان برشی زیر لوله با بستر برهمکنش دارد و گردابه‌های بیشتری ایجاد می‌شود. زمانی که KC برابر با 20 می‌شود، به تدریج کاهش فاصله لوله از بستر باعث کاهش گردابه‌های قسمت نزدیک به بستر شده و زمانی که KC برابر 65 می‌شود، برای $e/D=0.1$ دیگر پدیده گردابه‌افشانی متوقف می‌شود و گردابه‌ای از سمت بستر افشاندن نمی‌شود و همان‌طور که مشاهده می‌شود، نیروی منفی وارده بر لوله به سمت صفر میل می‌کند. در عدد $KC=4$ و $e/D=1$ نیز از آنجا که پدیده گردابه‌ای افشانی صورت نمی‌گیرد و تنها گردابه‌های متقارن پیرامون لوله هستند که نوسان می‌کنند، نیروهای مثبت و منفی وارده بر لوله حدود صفر هستند.



شکل ۴- حداکثر نیروی مثبت وارده بر لوله



شکل ۵- حداکثر نیروی منفی وارده بر لوله

• حداکثر تغییر مکان، سرعت و شتاب لوله

همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، حداکثر تغییر مکان، سرعت و شتاب لوله در $e/D = 1$ با افزایش عدد کولگان-کارپتر تا عدد $KC = 20$ روند صعودی و بعد از آن روند نزولی دارد. به علاوه در $e/D = 0.1$ ، افزایش عدد کولگان-کارپتر افزایش تغییر مکان، سرعت و شتاب لوله را به دنبال دارد. کاهش فاصله‌ی

همان‌طور که مشاهده شد، فرکانس نیروی پسا به مراتب پایین‌تر از فرکانس نیروی برآ است؛ به همین دلیل احتمال پدیده تشدید تحت اثر نیروی برآ بسیار بیشتر است، بنابراین از فرکانس نیروی پسا صرف‌نظر می‌شود و فرکانس نیروی برآ مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای تعیین و بررسی ارتعاش خطوط لوله‌ی، آزمایش‌های فردسو و سومر (۱۹۹۱) ملاک قرار گرفت و با مدل‌سازی میدان جریان در پژوهش ذکر شده به بررسی و تحلیل ارتعاش خطوط لوله، تعیین فرکانس نیروهای هیدرودینامیکی وارده بر لوله و تعیین طول دهانه آزاد مجاز لوله پرداخته شد. اعداد کولگان - کارپتر در پژوهش ذکر شده $4, 10, 20$ و 65 و فاصله نسبی لوله از بستر (e/D)، 1 و 0.1 هستند که نتایج حاصل از شبیه‌سازی در قسمت بعد ارائه شده است.

۷. نتایج و بحث

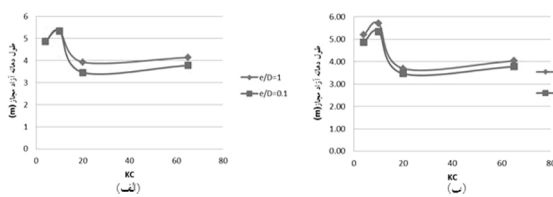
• حداکثر نیروی مثبت و منفی وارده بر لوله

همان‌طور که در شکل‌های (۴) و (۵) مشاهده می‌شود نیروی برآ مثبت و منفی وارده بر لوله به ترتیب لوله را به سمت‌های بالا و پایین حرکت می‌دهند. نیروی منفی وارده بر لوله عمدتاً به دلیل جدایی لایه‌ی برشی زیر لوله و گردابه‌های شکل گرفته از سمت بستر اعمال می‌گردد. نیروی مثبت وارد بر لوله از $KC=4$ تا $KC=20$ و نیروی منفی وارد بر لوله از $KC=4$ تا $KC=10$ افزایش

همچنین مشاهده می‌شود کمترین پریرود به عدد $KC=20$ مربوط است. این واقعیت به این دلیل است که هر چند در عدد $KC=65$ تعداد گردابه‌های بیشتری شکل می‌گیرد، اما دامنه‌ی نوسان حرکت مداری این گردابه‌ها بیشتر و اثرگذاری آن‌ها بر روی لوله کمتر است و همچنین در اعداد کولگان - کارپنتر بالای 20 از آنجا که نیروی وارده بر لوله بیشتر ماهیت نیروی پسا پیدا می‌کند، پریرود نیروی برآ افزایش می‌یابد.

• طول دهانه آزاد مجاز

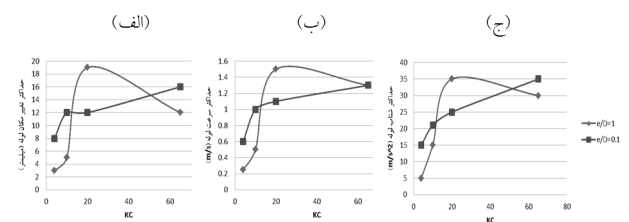
تغییرات طول دهانه‌ی آزاد مجاز لوله نیز مطابق با تغییرات پریرود گردابه‌های پیرامون لوله است و جریان رفت و برگشتی با عدد کولگان - کارپنتر 20 و $e/D = 0.1$ کمترین طول دهانه آزاد مجاز را دارا است و در اعداد کولگان - کارپنتر بیشتر از 10 کاهش فاصله‌ی لوله از بستر باعث کاهش طول دهانه آزاد مجاز می‌شود. شکل (8) روند تغییرات طول دهانه آزاد مجاز لوله در e/D و KC های مختلف را نشان می‌دهد. همچنین در این شکل طول دهانه‌ی آزاد مجاز لوله برای شرایط تکیه‌گاهی مفصل مفصل به روش آیین نامه‌ای و شبیه‌سازی شده مشاهده می‌شود. بدیهی است که در شرایط مفصل مفصل، طول دهانه‌ی آزاد مجاز پیشنهادی آیین نامه ABS و مقادیر شبیه‌سازی شده یکسان و مقادیر پیشنهادی آیین نامه DNV بیشتر از این دو مقدار هستند.



شکل 8 - (الف) تغییرات طول دهانه آزاد مجاز لوله بر اساس آیین نامه ABS (ب) تغییرات طول دهانه‌ی آزاد مجاز لوله بر اساس روش‌های مختلف برای $e/D = 0.1$

همان‌طور که در جدول (3) مشاهده می‌شود، اگر یکی از تکیه‌گاه‌ها را از مفصلی به گیرداری تغییر دهیم، 25٪ طول دهانه‌ی آزاد مجاز افزایش می‌یابد. همچنین اگر هر دو تکیه‌گاه را گیردار کنیم، طول دهانه‌ی آزاد 51٪ افزایش می‌یابد، که البته این مقادیر در مقادیر شبیه‌سازی شده 22٪ و 45٪ به‌دست آمده است.

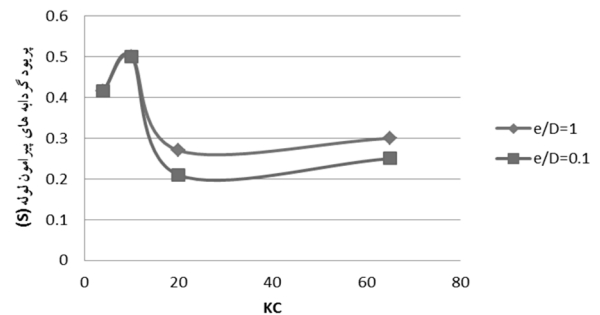
لوله از بستر در اکثر حالات به‌دلیل شکل‌گیری گردابه‌های سمت بستر، سبب افزایش دبی جریان در زیر لوله و افزایش نیروی وارده بر لوله و به دنبال آن موجب افزایش تغییر مکان، سرعت و شتاب لوله می‌شود. البته برای $KC = 20$ که نیروهای وارده بر لوله کاهش پیدا کرده‌اند، تغییر مکان لوله نیز کاهش پیدا کرده است. همچنین مشاهده می‌شود که در حالات مختلف، افزایش تغییر مکان، افزایش سرعت و شتاب لوله را نیز به‌دنبال دارد و همچنین کاهش تغییر مکان، کاهش سرعت و شتاب لوله را به‌دنبال دارد و روند تغییرات تغییر مکان، سرعت و شتاب لوله یکسان است.



شکل 6 - (الف) تغییرات حداکثر تغییر مکان لوله، (ب) تغییرات حداکثر سرعت لوله، (ج) تغییرات حداکثر شتاب لوله

• بسامد گردابه‌های پیرامون لوله

در اعداد KC 4 و 10 به‌دلیل روند کند شکل‌گیری گردابه‌ها، کاهش فاصله‌ی لوله از بستر تاثیر چندانی در تعداد گردابه‌های شکل گرفته در طول نیم‌پریرود ابتدایی نداشته و فرکانس گردابه‌های پیرامون لوله را تغییر نمی‌دهد. در حالی که در اعداد KC 20 و 65، کاهش فاصله‌ی لوله از بستر به‌دلیل برهمکنش بیشتر گردابه‌های شکل گرفته از سمت بستر با گردابه‌های بالای لوله باعث افزایش تعداد گردابه‌های پیرامون لوله و به‌دنبال آن باعث کاهش پریرود این گردابه‌ها می‌شود.



شکل 7 - تغییرات پریرود گردابه‌های پیرامون لوله

جدول ۳- میزان تغییر طول دهانه‌ی آزاد مجاز برای شرایط مختلف تکیه‌گاهی

شرایط تکیه‌گاهی	(Lhh)/(Lgh)		
	(Lhh)/(Lhh)	(Lhh)/(Lgh)	(Lhh)/(Lgg)
روش مورد استفاده			
DNV	۱۰۰	۱۲۵	۱۵۱
ABS	۱۰۰	۱۲۵	۱۵۱
مقادیر شبیه‌سازی شده	۱۰۰	۱۲۲	۱۴۵

۸. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، اثر جریان‌های نوسانی بر میدان جریان پیرامون لوله از دیدگاه هیدرولیکی با استفاده از مدل عددی مورد بررسی قرار گرفت و سپس با استفاده از معادلات حاکم بر خط لوله در شرایط مختلف تکیه‌گاهی سازه‌ی خط لوله به‌وسیله مدل عددی جدیدی شبیه‌سازی شد و با تغییر بعضی از پارامترهای موثر در میدان جریان اطراف لوله مانند عدد کولگان کارپنتر و فاصله‌ی لوله از بستر به بررسی و تفسیر نتایج حاصله از میدان جریان، فرکانس نیروهای هیدرودینامیکی و ارتعاش لوله در جهت عمود بر راستای جریان در جریان‌های رفت و برگشتی پرداخته شد. به‌علاوه، در شرایط مختلف هیدرولیکی و تکیه‌گاهی طول دهانه‌ی آزاد مجاز خطوط لوله برای جلوگیری از پدیده تشدید تعیین شد و با نتایج آیین‌نامه‌های مختلف مقایسه شد. نتایج حاصله نشانگر آن است که در اجرای خطوط لوله دریایی در منطقه‌ی خلیج فارس، علاوه بر اثر جریان در پیش‌بینی طول دهانه‌ی آزاد مجاز باید اثر موج را نیز در نظر گرفت؛ در غیر این صورت ممکن است در مناطق کم‌عمق خلیج فارس که حجم بسیار زیادی از خطوط لوله دریایی در این منطقه قرار دارند، در فواصل مختلف لوله از بستر و یا در جریان‌هایی با اعداد کولگان کارپنتر مختلف، طول دهانه‌ی آزاد لوله به‌دلیل اثر امواج از مقدار مجاز تجاوز کند و دچار خستگی و شکستگی شود و در نتیجه مشکلات فراوانی ایجاد گردد.

نتایج زیر را به‌عنوان جمع‌بندی از این تحقیق می‌توان بیان کرد:

- مقادیر مدل‌سازی عددی ذکر شده برای طول دهانه‌ی آزاد مجاز لوله به مقادیر پیشنهادی آیین‌نامه‌های DNV و ABS نزدیک و کمتر از طول پیشنهادی آیین‌نامه‌ها هستند.
- تکیه‌گاه‌ها در طول دهانه‌ی آزاد مجاز لوله بسیار تاثیرگذار هستند و با تغییر یکی از تکیه‌گاه‌ها از مفصلی به گیرداری ۲۵٪ طول دهانه آزاد مجاز افزایش پیدا می‌کند. همچنین اگر هر دو تکیه‌گاه گیردار شوند، طول دهانه‌ی آزاد ۵۱٪ افزایش

می‌یابد، که البته این مقادیر در مقادیر مدل‌سازی شده به‌ترتیب برابر با ۲۲٪ و ۴۵٪ به‌دست آمده‌اند.

- عدد کولگان - کارپنتر اثر غیر قابل اغماضی بر نیروهای وارده بر لوله، گردابه‌های پیرامون لوله و ارتعاش و طول دهانه‌ی آزاد مجاز لوله دارد و مشاهده شد که بیشترین فرکانس و کمترین طول دهانه آزاد مجاز لوله در این پژوهش مربوط به عدد کولگان - کارپنتر ۲۰ است که علت این پدیده می‌تواند به‌دلیل تغییر ماهیت نیروهای وارده از عدد کولگان-کارپنتر ۲۰ باشد؛ چرا که از این عدد به بعد نیروی غالب بر لوله همان نیروی پسا است و به‌تدریج اثر نیروی لختی قابل اغماض می‌شود.
- کاهش فاصله‌ی لوله از بستر به‌دلیل غلبه نیروی لختی بر نیروی پسا در اعداد $KC < 10$ تغییری در بسامد گردابه‌های پیرامون لوله و طول دهانه‌ی آزاد مجاز نمی‌دهد، ولی در اعداد $KC > 10$ باعث افزایش بسامد نیروی برآ و طول دهانه آزاد مجاز می‌شود.
- اگرچه کاهش فاصله‌ی لوله از بستر در اعداد کولگان - کارپنتر کم به‌دلیل برهمکنش جریان برشی زیر لوله با بستر باعث افزایش گردابه‌های پیرامون لوله و نیروهای وارد بر لوله می‌شود، اما در اعداد کولگان - کارپنتر زیاد به‌دلیل این‌که به تدریج در فواصل نزدیک لوله از بستر گردابه افشانی متوقف می‌شود لزوماً تعداد گردابه‌ها افزایش پیدا نمی‌کند.

منابع

- سعادت‌پور، محمدمهدی، ۱۳۸۶. "دینامیک سازه‌ها". ویرایش دوم، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی عمران.
- شجاعی‌فرد، محمدحسن، ۱۳۷۹. "مقدمه‌ای بر دینامیک سیالات محاسباتی CFD"، نوشته Versteeg، انتشارات دانشگاه علم و صنعت، دانشکده مهندسی عمران.
- American Bureau of Shipping, ABS., 2008. Guide for Building and Classing SubSea Pipeline Systems and Riser.
- Choi, H.S., 2000. Free spanning analysis of marine pipelines". Journal of Ocean Engineering Elsevier. 1325-1338 pp.
- Det Norske Veritas (DNV), 1998. Guidelines No.14, DNV-RP-F105, Free Spanning Pipelines.

- cylinder. *Journal of Fluid Mechanics* 225: 271-300.
- Sumer, B.M., Fredsoe, J., 1992. *Hydrodynamics Around Cylindrical Structures*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- Xu, T.; Lauridsen, B. and Bai, Y., 1999. Wave-Induced fatigue of multi-span pipelines. *Journal of Marine Structure*, Elsevier, Vol. 12.
- Yeganeh Bakhtiary, A.; Ghaheeri, A.; Valipour, R., 2007. Analysis of Offshore Pipeline Allowable Free Span Length. *International Journal of Civil Engineering*. Vol. 5, No. 1.
- Yeganeh-Bakhtiary, A.; Ghaheeri, A. and Valipour, R., 2009. New Approach to Determination Allowable Free Span Length, *Journal of Applied Ocean Research* Elsevier, in press.
- Det Norske Veritas(DNV-RP-F105)., 2006. FREE SPANNING PIPELINES, FEBRUARY.
- Kazeminezhad, M.H.; Yeganeh-Bakhtiary, A.; Etemad-Shahidi, A., 2010. Numerical investigation of boundary layer effects on vortex shedding frequency and forces acting upon marine pipeline, *Applied Ocean Research*, 32: 460-470.
- Liang, D.; Cheng, L., 2005b. Numerical model for wave-induced scour below a submarine pipeline, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*. 131(5): 193-202.
- Rodi, W., 1980. *Turbulence Models and Their Application in Hydraulics-A State-of-the-Art Review*. IAHR Publication
- Sumer, B. M.; Jensen, B.L.; Fredsøe, J., 1991. Effect of a plane boundary on oscillatory flow around a circular