

مدلسازی لاگرانژی اثر موج منظم بر خط لوله دریایی مستقر بر بستر نفوذپذیر

علی پویاراد^۱، حسن اکبری^{۲*}

^۱ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس، Ali.pooyarad@modares.ir

^۲ استادیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس، Akbari.h@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۴/۱۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۰۸ کلمات کلیدی: هیدرودینامیک ذرات هموار، بستر متخلخل، خطوط لوله، جاذب موج	استفاده از خطوط لوله دریایی متداول ترین راه جهت انتقال نفت و گاز استخراج شده از میادین نفتی و گازی است. مجاورت این خطوط با بستر متخلخل دریا، منجر به پیچیدگی الگوی جریان حول خطوط لوله می گردد. در تحقیق حاضر، این جریان با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم پذیر جزئی با قابلیت شبیه سازی محیط متخلخل، مدلسازی شده است. همچنین برای جذب کردن انرژی موج و جلوگیری از انعکاس آن، دو رویکرد متفاوت شامل روش استهلاک تدریجی سرعت موج در لایه جاذب و روش جذب انرژی موج روی بستر شیب دار مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت روش ترکیبی جدیدی برای جذب موثر انرژی موج معرفی شده است. با استفاده از مدل توسعه یافته، اندرکنش امواج با خطوط لوله مستقر بر بستر متخلخل و همچنین بستر نفوذناپذیر مورد مطالعه قرار گرفته است. از طرفی، تاثیر فاصله خط لوله تا بستر دریا در الگوی جریانات حول خط لوله و نیروهای وارد بر آن مدل سازی شده است. کارایی مدل عددی تحقیق حاضر با مقایسه با نتایج موجود عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی و تایید قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد که روش هیدرودینامیک ذرات هموار توسعه یافته، به خوبی می تواند اندرکنش امواج و خطوط لوله مستقر بر بستر نفوذناپذیر و متخلخل را شبیه سازی کند و مدل جاذب موج ترکیبی معرفی شده توانایی کاهش مناسب انعکاس از انتهای مرز مدل را دارد.

Lagrangian Modeling of Regular Wave Effect on Sea Pipeline on Permeable Sea Bed

Ali Pooyarad¹, Hasan Akbari^{2*}

¹ MSc student, Department of civil and environmental engineering, Tarbiat Modares University, ali.pooyarad@modares.ac.ir

^{2*} Assistant professor, Department of civil and environmental engineering, Tarbiat Modares University,

Akbari.h@modares.ac.ir

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<i>Article History:</i> Received: 30 Jun. 2020 Accepted: 28 Dec. 2020 <i>Keywords:</i> Smoothed Particle Hydrodynamic, Porous seabed, pipeline, Wave absorption	Using offshore pipelines is the most common way to transport oil and gas extracted from oil and gas fields. Since the pipelines are usually located on porous seabed, current pattern around them is complicated. In this study, based on the weakly compressible smoothed particles hydrodynamic method, new numerical model has been developed that is capable of simulating flow inside a porous medium. In addition, to minimize wave reflections, two different methods i.e. using gradual velocity damper and using a sloped beach geometry are studied and a hybrid method is introduced as an effective new wave absorbing system. Wave interactions with pipeline on and spaced from permeable and impermeable beds are studied by means of the introduced method. Distance between pipeline and seabed is investigated for both conditions. The introduced numerical model is validated via comparing its results with experimental data and similar numerical results. The results confirm that the developed numerical model can be used efficiently in modeling wave interaction with pipelines located on either permeable or impermeable seabed. In addition, wave reflections can be minimized by means of the introduced hybrid wave absorption system

انتقال محصولات استخراجی یکی از موارد موثر در توسعه یک میدان نفتی یا گازی به شمار می‌رود. متداول‌ترین راه انتقال از طریق خطلوله است. خطلوله دائم در معرض امواج و جریانات قرار دارند. به همین دلیل بررسی اندرکنش موج و این سازه‌ها حائز اهمیت است. این سازه‌ها در کف دریا می‌توانند به روش‌های متفاوتی قرار داده شوند. می‌توانند روی بستر دریا قرار گیرند، یا با یک فاصله‌ی نسبی از بستر قرار داده شوند، و یا به صورت جزئی یا کلی در بستر مدفون شوند. انتخاب روش اجرای مناسب یک خطلوله در یک منطقه خاص به امکانات موجود، تجهیزات اجرایی، شرایط هیدرودینامیکی دریا و جنس بستر دریا بستگی دارد. یوهانسون [۱] یک مطالعه آزمایشگاهی برای نیروهای موج وارده به خطلوله کف دریا انجام داد. براساس نتایج بدست آمده مقادیر $\frac{3}{3}$ و $\frac{3}{3}$ را به ترتیب برای ضرایب افقی و قائم اینرسی، $\frac{2}{3}$ برای ضریب درگ، و مقدار 0.6 را برای ضریب لیفت برای $\frac{d}{D} \leq 3.5$ و مقدار 4 برای $\frac{d}{D} > 3.5$ پیشنهاد داد (d عمق آب و D قطر لوله است). اسپیلر [۲] یک لوله افقی با قطر $\frac{15}{2}$ سانتی‌متر را در معرض امواج منظم با طول موج‌های متغیر از $\frac{0.6}{5}$ تا $\frac{5}{5}$ متر قرار داد و نتیجه گرفت که ضریب نیروی افقی با ارتفاع موج به صورت کاملاً خطی تغییر می‌کند. در مقابل، مشاهده شد که ضریب نیروی قائم با ارتفاع موج به صورت غیر خطی تغییر می‌کند. شانکار و همکاران [۳] یک تحقیق آزمایشگاهی بر روی نیروهای وارده ناشی از امواج منظم به خطلوله مستقر بر بستر نفوذناپذیر و با فاصله‌های متفاوت از بستر قرار داده شده، انجام داده‌اند. آنها همانند اسلیچر [۲] نتیجه گرفتند که ضریب نیروی افقی به صورت خطی با پارامتر ارتفاع موج $H/2a$ که H ارتفاع موج و a شعاع لوله است، تغییر می‌کند و ضریب نیروی قائم برای مقادیر کوچک $H/2a$ نزدیک خطی و برای مقادیر بزرگ آن به صورت غیرخطی تغییر می‌کند. همچنین نتیجه گرفتند که هر دو ضریب نیروی افقی و قائم با افزایش در مقدار پارامتر عمق d/a ، کاهش می‌یابد و ضریب نیروی افقی با افزایش فاصله لوله از بستر افزایش می‌یابد در حالی که ضریب نیروی قائم کاهش می‌یابد. سودهان و همکاران [۴] نیروها و فشارهای ناشی از امواج روی خطلوله مدفون در بستر متخلخل ماسه‌ای را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که فشارهای ناشی از موج اطراف خطلوله در مناطق کم‌عمق به وسیله پرید موج کنترل می‌شود و فشار با افزایش عمق دفن لوله در این مناطق افزایش پیدا می‌کند. از آنجا که خطوط لوله معمولاً بر روی بسترهای نفوذپذیر قرار می‌گیرند، جابجایی رسوبات در اطراف خط لوله می‌تواند بر روی نیروهای وارد بر خط لوله اثر داشته باشد. اگرچه این مورد در این تحقیق بررسی نشده است اما میتوان به تحقیق میرمحمدی و

کتابداری [۵] اشاره کرد که آبشستگی اطراف خط لوله دریایی را با استفاده از روش ISPH را بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند که SPH می‌تواند مسائل اندرکنش سیال نیوتنی و غیر نیوتنی را به خوبی حل کند. رن و همکاران [۶] یک مدل WCSPH برای شبیه سازی جریان آشفته درون محیط متخلخل توسعه دادند. در مطالعه آنها از یک سری معادلات میانگین گیری شده حجمی برای سیال درون و بیرون محیط متخلخل استفاده شده است. اکبری و طاهرخانی [۷] با استفاده از مدل WCSPH مسئله اندرکنش موج با موج شکن کیسونی واقع بر بستر نفوذپذیر را بررسی کردند و نشان دادند که جریان درون محیط متخلخل می‌تواند بر روی پاسخ سازه ای کیسون اثر بگذارد. مصطفی و میزوتانی [۸] یک تحقیق آزمایشگاهی در فلوم موج بر روی نیروهای ناشی از امواج غیر خطی استوکس مرتبه دوم و سوم و امواج شکسته وارده به خطلوله مدفون در وسط بستر متخلخل ماسه‌ای انجام داده‌اند. آنها نتیجه گرفتند که نیروی موج بی‌بعد شده برای امواج بلندتر در عمق‌های آب بینابینی^۱ افزایش می‌یابد اما نیرو برای امواج بلندتر در مناطق کم‌عمق آب کاهش می‌یابد. همچنین یافتند که تاثیر نیروی قائم وقتی که اثرات امواج غیر خطی جزئی هستند، بیشتر از نیروی افقی است. پنگ ژانگ و همکاران [۹] یک مدل عددی برای شبیه‌سازی نیروهای موج وارده به خطلوله کف دریا ارائه داده‌اند. در این تحقیق یک مجموعه از معادلات دوبعدی ناویراستوکس با استفاده از روش حجم محدود در یک سیستم شبکه‌بندی متحرک به صورت عددی گسسته‌سازی شده است. اثرات فاصله بین خطلوله و بستر نفوذناپذیر دریا، عمق آب و ارتفاع موج بر نیروهای وارده بررسی شده است. آنها مشاهده کردند که ضریب درگ با افزایش فاصله لوله از بستر ابتدا افزایش و سپس کاهش پیدا می‌کند. ضریب اینرسی با افزایش فاصله لوله از بستر ابتدا کاهش پیدا می‌کند و سپس یک روند ثابت را طی می‌کند. براساس مطالعات آنها، نیروی افقی موج با افزایش ارتفاع موج و کاهش عمق آب به صورت خطی افزایش پیدا می‌کند و نیروی قائم با افزایش ارتفاع موج به صورت غیرخطی افزایش و با افزایش عمق آب کاهش می‌یابد. این تغییرات غیرخطی در مقادیر بزرگ‌تر ارتفاع موج یا مقادیر کوچک‌تر عمق آب و یا هر دو باهم اتفاق می‌افتد. کاظمی‌نژاد و همکاران [۱۰] اثرات تغییر فاصله خطلوله از بستر دریا را بر روی نیروی درگ و الگوی جریان اطراف لوله در معرض جریان دائمی بررسی کرده‌اند. در این تحقیق میدان جریان به‌وسیله معادلات دوبعدی ناویراستوکس میانگین‌گیری شده رینولدز (RANS) با مدل آشفتگی $k - \epsilon$ شبیه‌سازی شده است. آنها مشاهده کردند که ضریب درگ با افزایش فاصله لوله از کف دریا به تدریج افزایش می‌یابد و این نرخ افزایش با افزایش فاصله لوله از کف، کاهش می‌یابد. مطالعات انجام

ناویراستوکس برای هر ذره با توجه مشخصات فیزیکی ذرات همسایه حل شده و در هر گام زمانی مشخصات فیزیکی جدید برای هر ذره محاسبه می‌شود و ذرات متناسب با مشخصات فیزیکی جدید در دامنه محاسباتی حرکت می‌کنند. ذرات همسایه برای هر ذره به وسیله تابع وزنی به نام تابع کرنل و یا هموارساز مشخص می‌شوند. تابع کرنل، تابعی از فاصله بی‌بعد بین ذرات، $q = \frac{r}{h}$ می‌باشد که r فاصله بین دو ذره و h طول هموارساز تابع کرنل است که بصورت تابعی از فاصله اولیه ذرات dp تعریف می‌شود. هر ذره از ذرات همسایه خود، با توجه به فاصله‌ای که از آن‌ها دارد تأثیر می‌پذیرد. در تحقیق حاضر از تابع کرنل معرفی شده توسط Wendland [۱۳] مطابق زیر استفاده شده است.

$$W(r, h) = \alpha_D \left(1 - \frac{q}{2}\right)^4 (2q + 1) \quad 0 \leq q \leq 2 \quad (1)$$

در رابطه فوق مقدار α_D برای حالت ۲ بعدی برابر $\frac{7}{4\pi h^2}$ می‌باشد.

در روش هیدرودینامیک ذرات هموار برای دامنه محاسباتی گسسته شده براساس ذرات، مقدار یک کمیت در موقعیت مکانی خاص با توجه به همسایگی موقعیت مکانی موردنظر، از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$F(r_a) = \sum_b F(r_b) \frac{m_b}{\rho_b} W(r_a - r_b) \quad (2)$$

که در این رابطه $F(r_a)$ مقدار کمیت موردنظر برای ذره a ، $F(r_b)$ مقدار کمیت موردنظر برای ذره b ، r_a و r_b به ترتیب موقعیت مکانی ذره a و b و m_b مقدار جرم ذره b و ρ_b مقدار چگالی این ذره است.

۳- معادلات حاکم

۳-۱- معادلات حاکم بر سیال

معادلات حاکم بر سیال در روش هیدرودینامیک ذرات هموار، معادله ناویر-استوکس^۲ (اندازه حرکت) و معادله پیوستگی^۳ است. روابط زیر به ترتیب این معادلات را نشان می‌دهند.

$$\frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot \rho v = 0 \quad (3)$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + g + \Gamma \quad (4)$$

که در روابط فوق v بردار سرعت سیال و P فشار سیال به عنوان مجهول‌های اصلی مطرح هستند. هم‌چنین ρ چگالی سیال، t زمان، g بردار شتاب ثقل و Γ بیانگر ترم پراکندگی است. در روش هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم‌پذیر جزئی (WCSPH) که در این تحقیق استفاده شده است، جرم ذرات در طول مدت شبیه‌سازی ثابت بوده و تنها چگالی اختصاص یافته به ذرات تغییر می‌کند.

شده روی خط لوله با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار بسیار محدود بوده و عموماً، تأثیر بستر متخلخل در آن‌ها، منظور نشده است. از بین اولین مطالعاتی که محیط متخلخل را به روش هیدرودینامیک ذرات هموار غیرقابل تراکم (ISPH) مورد بررسی قرار داده است، می‌توان به مطالعه شائو [۱۱] برای مدلسازی اندرکنش موج و محیط متخلخل اشاره نمود. در ادامه، اکبری و نمین [۱۲] مدلی را با استفاده از روش عددی هیدرودینامیک ذرات هموار غیرقابل تراکم توسعه داده‌اند که حضور محیط متخلخل با اضافه کردن نیروهای مقاوم خطی و غیرخطی به ترتیب برای اعداد رینولدز پایین و بالا در نظر گرفته شده و ضرایب و معادلات مربوط به نیروهای مقاوم ناشی از حضور محیط متخلخل در مطالعات شائو [۱۱] در این تحقیق نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این مدل برخلاف مدل شائو [۱۱] دو نوع معادله مجزا را برای سیال درون و بیرون محیط متخلخل حل نمی‌کند و برای تمام دامنه محاسباتی یک سری معادله ناویراستوکس حل می‌شود. در این روش، نیروهای مقاوم ناشی از حضور محیط متخلخل با در نظر گرفتن ضریب تخلخل برابر یک برای سیال بیرون از محیط متخلخل و ضریب تخلخل برای سیال درون محیط متخلخل، نیروهای مقاوم ناشی از حضور محیط متخلخل در محدوده سیال خالص برابر صفر شده و فقط در محدوده محیط متخلخل دارای مقدار عددی غیر صفر می‌باشند. به علاوه به دلیل اینکه تنها یک نوع معادله برای تمام دامنه محاسباتی حل می‌شود نیازی به شرایط مرزی خاصی در مرز بین سیال خالص و محیط متخلخل نیست.

اگرچه، مطالعات محدودی برای مدل‌سازی اندرکنش موج و محیط متخلخل به روش هیدرودینامیک ذرات هموار انجام شده است، لیکن بر اساس دانش نویسندگان، بررسی اثر محیط متخلخل بر الگوی جریان حول خط لوله، به روش هیدرودینامیک ذرات هموار انجام نشده است. از این رو، در تحقیق حاضر با کدنویسی در محیط ++C روش عددی SPH توسعه یافته بگونه‌ای که با اعمال نیروهای مقاوم در برابر حرکت ذرات و اصلاح رابطه ممنتوم در برنامه، مدلسازی محیط متخلخل امکان پذیر گردد. در توسعه مدل، از تکنیک‌های بکار رفته در کدهای مختلفی از جمله نرم افزار DualSPHysics نیز استفاده شده است. با استفاده از کد نوشته شده، پدیده برخورد موج با خط لوله مدل سازی شده و هم‌چنین برای کاهش اثر انعکاس از مرز انتهایی، دو مدل جاذب موج (استهلاک تدریجی سرعت اربیتالی موج و بستر شیب‌دار) معرفی و عملکرد آن‌ها ارزیابی شده است.

۲- فرمولاسیون روش عددی هیدرودینامیک ذرات هموار

هیدرودینامیک ذرات هموار، روش لاگرانژی بدون شبکه‌ای با کاربرد فراوان در زمینه دینامیک محاسباتی سیالات است که در آن دامنه محاسباتی به ذرات گسسته‌ای تقسیم می‌شود و معادلات

$$\frac{dv_D}{dt} = -n_w \frac{1}{\rho} \nabla P + n_w g + n_w \Pi \quad (8)$$

$$-an_w v_D - bn_w v_D |v_D|$$

در این رابطه v_D سرعت داری است که برابر است با حاصل ضرب تداخل محیط متخلخل (n_w) در سرعت واقعی سیال (v_f)، هم-چنین a و b به ترتیب ضرایب خطی و غیرخطی مقاومت محیط متخلخل می‌باشند و Π ویسکوزیته مصنوعی است. در دهه‌های گذشته محققین زیادی مطالعاتی در زمینه به‌دست آوردن مقادیر دقیق ضرایب معادله (۸) انجام داده‌اند روابط زیر معادلات مربوط به ضرایب a و b را نشان می‌دهند.

$$a = \alpha \frac{v(1-n_w)^2}{n_w^3 D_{50}^2} \quad (9)$$

$$b = \beta \frac{(1-n_w)}{n_w^3 D_{50}} \quad (10)$$

که در این روابط U لزجت سینماتیک آب برابر با 10^{-6} ، D_{50} قطر میانگین ذرات محیط متخلخل و α و β به ترتیب ضرایب تجربی مربوط به نیروی خطی و غیرخطی درگ می‌باشند. برای ضرایب α و β ، بر اساس شرایط آزمایشگاهی مختلف مقادیر متفاوتی ارائه شده است. فن خنت [۱۶] مقادیر $\alpha=1000$ و $\beta=1.1$ و هسو و همکاران [۱۷] مقادیر $\alpha=200$ و $\beta=1.1$ را ارائه داده‌اند. در تحقیق حاضر از مقادیر ۲۰۰ و ۱/۱ استفاده شده است. معادله پیوستگی سیال در محیط متخلخل به صورت زیر نمایش داده می‌شود.

$$\frac{d\rho}{dt} = \rho \nabla v_D \quad (11)$$

اکبری [۱۸] در مدل عددی خود به‌جای استفاده از دو سری معادله برای سیال درون و بیرون محیط متخلخل و استفاده از شرط مرزی مناسب در مرز بین سیال خالص و محیط متخلخل از یک سری معادله برای هر دو حالت سیال درون و بیرون محیط متخلخل استفاده کرده است. در تحقیق حاضر نیز برای تمام دامنه محاسباتی و برای سیال درون و بیرون محیط متخلخل از روابط (۸) و (۱۱) استفاده شده است. بر اساس این روابط زمانی که سیال درون محیط متخلخل است مقدار n_w برابر با تداخل محیط متخلخل است که مقداری مثبت و کمتر از ۱ است و در زمانی که سیال بیرون محیط متخلخل است مقدار n_w برابر با ۱ در نظر گرفته می‌شود که در این صورت ضرایب a و b برابر با صفر شده، مقدار سرعت داری برابر با سرعت واقعی سیال می‌گردد و اثر حضور محیط متخلخل در روابط نظر گرفته نشده و این روابط به معادله اصلی ناویر-استوکس و پیوستگی برای سیال خالص تبدیل می‌شوند. رابطه زیر فرم گسسته معادله میانگین‌گیری شده ناویر-استوکس با در نظر گرفتن اثرات محیط متخلخل و فرم گسسته معادله پیوستگی را نشان می‌دهد.

کند. این تغییرات چگالی با حل معادله پیوستگی (۳) و با اعمال گسسته سازی به صورت زیر نمایش داده می‌شود.

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_b m_b v_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab} \quad (5)$$

در این روش برای محاسبه مقدار فشار نیاز به معادله دیگری است که به آن معادله حالت^۴ گفته می‌شود. موناگان و جو [۱۴] برای محاسبه فشار ذرات سیال بر اساس چگالی آن‌ها رابطه زیر را معرفی کرده‌اند.

$$P = b \left(\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right) \quad (6)$$

در رابطه فوق ρ_0 ، چگالی مبنا که برای آب برابر با ۱۰۰۰ kg/m^۳ است و ضریب b از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$b = \frac{C_0^2 \rho_0}{\gamma} \quad (7)$$

در رابطه فوق C_0 سرعت صوت در چگالی مبنا است که مقدار آن باید حداقل ۱۰ برابر بیشتر از حداکثر سرعت سیال در نظر گرفته شود تا نوسانات چگالی کمتر از ۱٪ باشد.

۳-۲- معادلات حاکم در محدوده محیط متخلخل

مدل سازی جریان در محدوده متخلخل می‌تواند به صورت میکرواسکیل (مدل نمودن جزییات سنگ‌دانه ها) و یا ماکرواسکیل (مدل نکردن جزییات) انجام شود. در حالت اول، معادلات اصلی ناویر-استوکس کاربرد دارد. از آنجایی که مدل کردن محیط متخلخل به صورت میکرواسکیل و با تمام جزییات باعث افزایش حجم محاسباتی می‌گردد، محققین علاقه بیشتری به مدل کردن محیط متخلخل به صورت ماکرواسکیل دارند. در مدل ماکرواسکیل، تنها اثر محیط متخلخل در مدل عددی در نظر گرفته شده و ساختار و قرارگیری اجزای این محیط مدل نمی‌گردد و این امر باعث کاهش چشم‌گیر هزینه محاسباتی مدل عددی می‌شود. از طرفی، با توجه به ماهیت پراکندگی قطر سنگ‌دانه ها در واقعیت، امکان مدل سازی دقیق شرایط هندسی مشکل است. در روش ماکرواسکیل، باید از معادله میانگین‌گیری شده ناویر-استوکس استفاده کرد. در این راستا محققین با استفاده از معادله تجربی فورچهایمر [۱۵] معادله میانگین‌گیری شده ناویر-استوکس را ارائه داده‌اند که اثر محیط متخلخل با اضافه کردن ترم‌هایی برای اعمال مقاومت و اصطکاک این محیط، در معادله اصلی ناویر-استوکس دیده شده است. رابطه زیر معادله میانگین‌گیری شده ناویر-استوکس مورد استفاده در این تحقیق برای شبیه سازی عددی جریان سیال درون محیط متخلخل را نشان می‌دهد.

۶- شرایط مرزی در روش هیدرودینامیک ذرات هموار

۶-۱- مرز سطح آزاد

ذراتی که در سطح آزاد سیال قرار دارند، نسبت به ذرات داخلی سیال، دارای ذرات همسایه کمتری بوده و به دلیل شکسته شدن تابع کرنل در سطح آزاد، این ذرات دچار افت چگالی شدید می-شوند. شرط مرزی سطح آزاد سیال به این صورت در نظر گرفته می-شود که اگر ذره‌ای دچار افت چگالی بیشتر از ۱۰٪ چگالی مبنا شود، این ذره به عنوان ذره سطح آزاد در نظر گرفته شده و فشار این ذره برابر صفر در معادلات قرار داده می-شود.

۶-۲- معرفی مرز بین سیال و محیط متخلخل

در این تحقیق برای تمام ذرات دامنه محاسباتی از یک سری معادله استفاده می-شود. زمانی که ذره سیال به طور کامل در محدوده سیال خالص قرار دارد، تخلخل آن برابر واحد بوده و در معادلات حاکم بر جریان سیال، نیروهای مقاوم ناشی از حضور محیط متخلخل برابر صفر می-شوند. از طرفی اگر ذره سیال به طور کامل درون محدوده محیط متخلخل باشد، مقدار تخلخل آن برابر تخلخل محیط متخلخل بوده و ذره تحت اثر نیروهای مقاوم ناشی از حضور محیط متخلخل قرار می-گیرد. اگر ذره در مرز بین سیال خالص و محیط متخلخل قرار گیرد، حالت بینابینی رخ می-دهد که یک فاصله به عنوان مرز بین سیال خالص و محیط متخلخل معرفی می-شود. در این تحقیق عرض آن همانند تحقیق اکبری [۱۸]، ۴ برابر میانگین قطر ذرات محیط متخلخل (4D₅₀) در نظر گرفته شده است. در این حالت تخلخل متناظر با ذرات سیال درون این مرز با استفاده از تکنیک انتگرال گیری روش هیدرودینامیک ذرات هموار محاسبه شده و تخلخل ذرات به صورت تدریجی از مقدار واحد به مقدار تخلخل محیط متخلخل می-رسد.

۶-۳- معرفی مرز جاذب موج

در روش هیدرودینامیک ذرات هموار مدل کردن دامنه محاسباتی طولانی برای جلوگیری از انعکاس موج از مرزهای نفوذناپذیر ضروری است. این کار هزینه محاسباتی و زمان اجرای برنامه را افزایش می-دهد که به خصوص برای روش‌های بدون شبکه بندی اقتصادی نیست. یک راه حل استفاده از جاذب موج برای کوتاه کردن دامنه محاسباتی و کاهش انعکاس موج احتمالی می-باشد. سیستم جاذب موج در انتهای دامنه محاسباتی قرار داده شده است و به تدریج انرژی موج را در طول جاذب موج کاهش می-دهد. استفاده از جاذب موج، مدل کردن سری زمانی‌های طولانی امواج دریا را امکان پذیر می-کند. در این تحقیق دو نوع مستهلک کننده معرفی و اعمال شده است. در روش اول، یک ساحل شیب دار به منظور استهلاک انرژی موج به وسیله فرآیند شکست و بالاروی

$$\frac{dv_{Da}}{dt} = -n_{w,a} \sum_b m_b \left(\frac{P_a + P_b}{\rho_a \cdot \rho_{app,b}} \right) \nabla_a W_{ab} + n_{w,a} g + n_{w,a} \Pi_{ab} - a n_{w,a} v_{Da} |v_{Da}| \quad (12)$$

که در روابط فوق $\rho_{app,b}$ چگالی ظاهری است که برابر با حاصل-ضرب تخلخل محیط متخلخل (n_w) و چگالی سیال است.

۴- الگوریتم گام زمانی

در تحقیق حاضر از روش سیمپلستیک [۱۹] برای اعمال گام زمانی و محاسبه مقادیر جدید کمیت‌های فیزیکی ذرات، استفاده شده-است. گام زمانی متغیر Δt با استفاده از روابط زیر و بر اساس محدودیت عدد CFL^۵، محاسبه می-شود.

$$\Delta t_f = \min_a \left(\sqrt{\frac{h}{|f_a|}} \right) \quad (13)$$

$$\Delta t_{cv} = \min_a \left(\frac{h}{c_a + \max_b \left| \frac{h * v_{ab} * r_{ab}}{r_{ab}^2 + \eta^2} \right|} \right) \quad (14)$$

$$\Delta t = CFL * \min(\Delta t_f, \Delta t_{cv}) \quad (15)$$

که Δt_f بر اساس نیروی واحد جرم وارد بر هر ذره بوده $|f_a|$ و Δt_{cv} ترکیب کورانت و کنترل گام زمانی لزجت است.

۵- کاهش نوسانات فشار در روش WCSPH

یکی از مشکلات روش مبتنی بر تراکم پذیری جزئی سیال، نوسانات فشار ناشی از تغییرات چگالی است. برای رفع این نوسانات و افزایش پایداری مدل عددی، استفاده از ترم پایدارساز در معادله پیوستگی استفاده کرد تا با کاهش نوسانات چگالی، نوسانات مربوط به میدان فشار در مدل عددی را کاهش داد. در این راستا مولتینی و کولاگروسی [۲۰] ترم پخش مصنوعی‌ای را به معادله پیوستگی اضافه کرده‌اند که رابطه زیر معادله ارائه شده توسط این محققین را نمایش می-دهد.

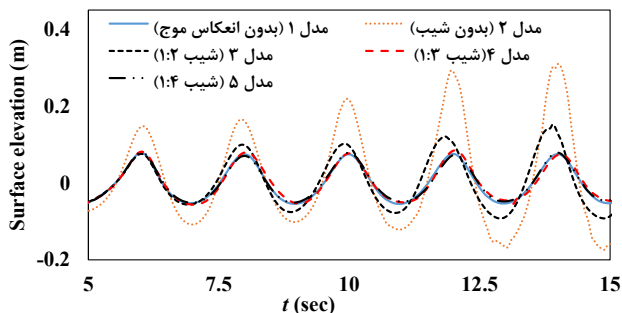
$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_b m_b v_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab} + 2\delta_\phi h c_0 \sum_b (\rho_b - \rho_a) \frac{r_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab}}{r_{ab}^2} \frac{m_b}{\rho_b} \quad (16)$$

که در این رابطه δ_ϕ پارامتری است که شدت تصحیح عددی اعمال شده را نشان می-دهد و مقدار این پارامتر بین ۰ تا ۰/۱ پیشنهاد شده است. در تحقیق حاضر از شکل اصلاح شده این رابطه استفاده شده است.

۳	-	۱:۲	۱/۹۲L	۱۲/۸
۴	-	۱:۳	۲/۱۳L	۳/۰۲
۵	-	۱:۴	۲/۳۴L	۱/۹۵
۶	L	-	۲/۵L	۱/۲۲
۷	۲L	-	۳/۵L	۰/۷۴
۸	L	۱:۴	۲/۵L	۱/۳۹

۷-۱-۱- استهلاک موج با ساحل شیبدار

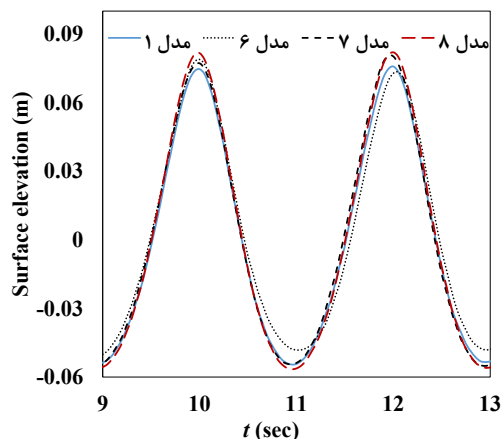
در ابتدا، به منظور استهلاک انرژی موج، شیبهای مختلف همچون ۱:۲، ۱:۳ و ۱:۴ در انتهای مدل اعمال شده و نتایج آن در شکل (۱) نشان داده شده است. همچنین مقدار خطاهای مذکور در جدول (۱) نشان می دهد که شیبهای ملایم تر بهتر می توانند امواج را مستهلک کنند. با این حال، با تغییر دادن مشخصات موج ممکن است در نتایج تغییری ایجاد شود. بیشترین مقدار خطا در مدلی که از هیچ کدام از دو نوع جاذب موج استفاده نکرده است (مدل ۲)، مشاهده می شود.



شکل (۱): تغییرات تراز سطح آب برای جاذب موج ساحل شیبدار

۷-۱-۲- استهلاک موج با کاهش سرعت ذرات موج

برای این منظور، مستهلک کننده سرعت با طولهای L و 2L در مدل های ۶ و ۷ طراحی شده است. نتایج در شکل (۲) نشان داده شده است. براساس نتایج، جاذب موج با طول دوبرابر طول موج، بهتر از سایر شرایط عمل می کند. از طرف دیگر، کاهش خطای ناشی از انعکاس حتی با استفاده از جاذب موج با طول L نیز در محدوده قابل قبولی است (مدل ۶).



شکل (۲): تغییرات تراز سطح آب برای جاذب موج کاهنده سرعت

موج در انتهای مدل استفاده شده است. در روش دوم، سرعت ذرات به تدریج درون ناحیه استهلاک کننده موج کاهش می یابد. در این روش، سرعت هر ذره در انتهای هر گام زمانی بر اساس موقعیت آن به وسیله رابطه زیر اصلاح می شود:

$$v = v_0 \cdot f(x) \quad (17)$$

که v_0 سرعت محاسبه شده ذره i ، v سرعت اصلاح شده و $f(x)$ تابع کاهنده است که به صورت زیر تعریف می شود.

$$f(x) = 1 - \alpha \cdot \left(\frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \right)^\beta \quad (18)$$

که x موقعیت ذرات، x_0 و x_1 به ترتیب موقعیت نقطه شروع و پایان ناحیه مستهلک کننده موج است. در این تحقیق، مقادیر α و β پس از تحلیل حساسیت به ترتیب برابر ۱ و ۴ در نظر گرفته شده اند.

۷- نتایج مدل عددی

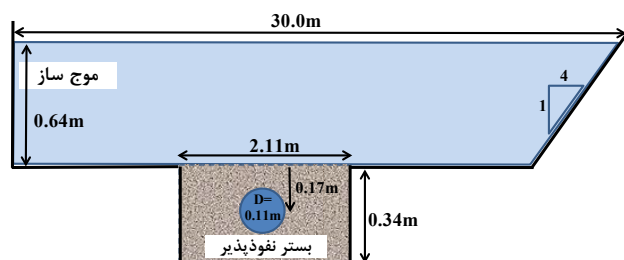
در این قسمت از تحقیق حاضر ابتدا عملکرد سیستم معرفی شده برای جذب و جلوگیری از انعکاس موج بررسی شده است و سپس، با استفاده از مدل عددی تحقیق حاضر مسئله خطلوله مدفون در بستر متخلخل ماسه ای، شبیه سازی سازی شده و نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی و عددی مشابه، مقایسه و صحت سنجی شده است. سپس مسئله های اندرکنش خطلوله مستقر و با فاصله از بستر نفوذناپذیر و متخلخل با امواج منظم مورد مطالعه بوده است.

۷-۱- صحت سنجی عملکرد مرزهای جاذب موج

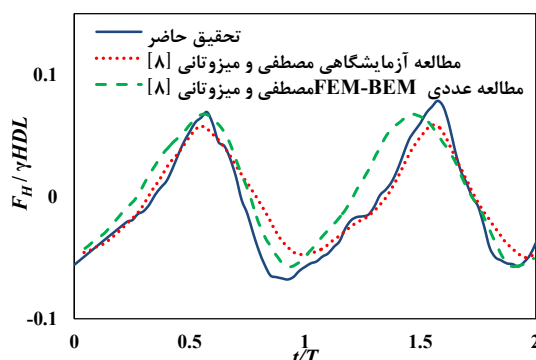
در همه شبیه سازی ها ارتفاع موج، پریود و طول موج به ترتیب ۰/۱۴ متر، ۲ ثانیه و ۴/۵ متر هستند. همچنین عمق اولیه آب ۰/۶۴ متر است. همچنین یک مدل با طول دامنه ۱۰ برابر طول موج نیز طراحی شده است که در آن هیچ گونه انعکاس موجی رخ نمی دهد. مقدار خطا در هر مدل با مقایسه کردن تراز سطح آب با مدل ۱ (مدلی که در آن انعکاس موج رخ نمی دهد) در نقطه ای به فاصله یک طول موج از موج ساز محاسبه و با تقسیم بر ارتفاع موج بی بعد شده و در جدول (۱) نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد، عدم استفاده از جاذب موج مناسب مطابق مدل ۲، خطای قابل توجهی در تراز آب مدل شده را به همراه خواهد داشت.

جدول (۱): مشخصات مدل ها برای بررسی سیستم جاذب موج

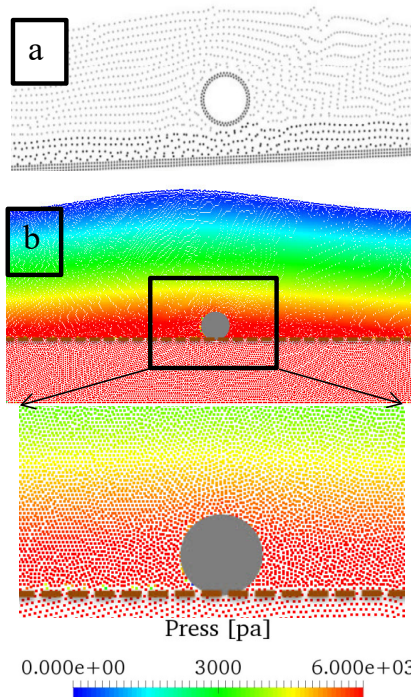
شماره مدل	طول جاذب	شیب (افقی: قائم)	طول کل مدل	خطا (%)
۱	-	-	۱۰L	صفر
۲	-	دیواره قائم	۱/۵L	۳۶



شکل (۳): هندسه مدل عددی مورد مطالعه



شکل (۴): صحت سنجی نیروهای وارد بر خط لوله



شکل (۵): بالا: توزیع ذرات در مطالعه عددی میرمحمدی و کتابداری [۵] و پایین: کانتورهای فشار اطراف خط لوله در تحقیق حاضر

همانطور که مشاهده می شود کیفیت کانتورهای فشار مناسب است که این موضوع منجر به دقت بار وارد بر خط لوله مطابق شکل (۴) شده است. از طرفی، کیفیت پخش ذرات و تعداد آن ها در مقایسه با مطالعات قبلی دقت مناسبی دارد اگرچه لازم به توضیح است که در مطالعه میرمحمدی و کتابداری [۵] تغییرات بستر زیر خط لوله نیز در مدلسازی مدنظر بوده است.

بر خلاف جاذب موج شیبدار، نتایج جاذب موج کاهندهی سرعت برای هر طول موج معتبر است و بنابراین نسبت به جاذب موج شیبدار ترجیح داده می شود. با این که جاذب موج کاهنده سرعت برای جذب انرژی موج می تواند به خوبی عمل کند، استفاده از هردو جاذب سطح شیبدار و جاذب موج کاهندهی سرعت بطور همزمان، می تواند مقادیر خطا را در حد قابل قبولی کاهش دهد در حالی که با کاهش ذرات هزینهی محاسباتی کم می شود (مدل ۸). از این رو، در این مطالعه از روش جاذب موج هیبرید شامل ترکیب جاذب کاهنده سرعت و انتهای شیبدار است استفاده می گردد.

۲-۷- صحت سنجی مدل موج و خطلوله مدفون

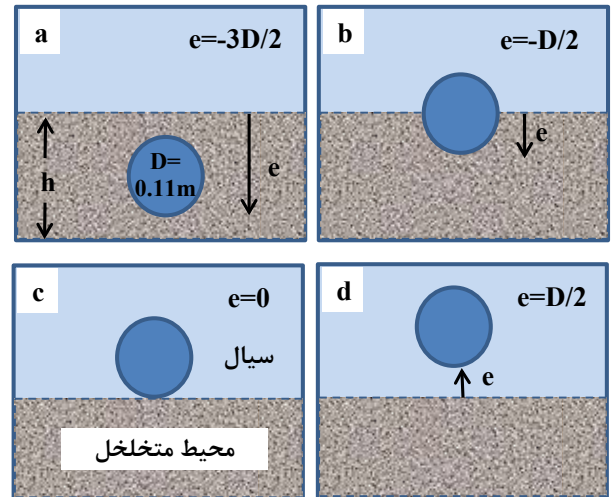
در این قسمت مسئله خطلوله مدفون در بستر متخلخل ماسه ای براساس مطالعات آزمایشگاهی مصطفی و میزوتانی [۸] مطابق شکل (۳)، شبیه سازی شده و نتایج با مطالعات آزمایشگاهی و عددی موجود مقایسه شده است. در این مدل، دوره تناوب موج ۲ ثانیه، ارتفاع موج ۰/۱۴ متر و مقدار تخلخل ۰/۴۹ است که خط لوله در وسط محدوده متخلخل مدفون است. فاصله اولیه ذرات پس از حساسیت سنجی نهایتاً ۰/۰۵ متر انتخاب شده و مدت زمان هر اجرا با استفاده از کامپیوتر ۱۶ هسته ای با مشخصات Intel® Core™ i7-4470k CPU@3.5GHz حدود یک هفته بوده است.

مطابق شکل (۴) نیروهای افقی وارد به خطلوله که از روش عددی تحقیق حاضر به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی همخوانی بهتری از مطالعات عددی قبلی دارد بگونه ای که میانگین خطای برآورد حداکثر نیروی وارده حدود ۱۵ درصد و حداکثر خطا کمتر از ۳۰ درصد است که برای محدوده متخلخل قابل قبول است. محور قائم شکل نیروی افقی بی بعد شده با تقسیم نیرو بر γHDL می باشد که γ وزن مخصوص آب، H ارتفاع موج، D قطر لوله و L طول لوله است که برابر واحد فرض شده است. محور افقی نیز زمان بی بعد شده با تقسیم زمان بر دوره تناوب موج برخوردی است.

نیروهای وارد بر خط لوله تابعی از فشار سیال روی خط لوله است. از این رو، الگوی توزیع فشار هنگام عبور این موج از روی خط لوله مستقر بر محیط متخلخل در شکل (۵) ارائه شده است. مطابق توضیحات بخش مقدمه، تحقیقات کمی برای مدلسازی برخورد موج با خط لوله به روش SPH انجام شده و نتایج فشار در دسترس نیست. لیکن به منظور مقایسه کیفی نتایج با تحقیقات مشابه قبلی، الگوی کلی ذرات اطراف خط لوله ارائه شده توسط میرمحمدی و کتابداری [۵] نیز در شکل (۵) ارائه شده است.

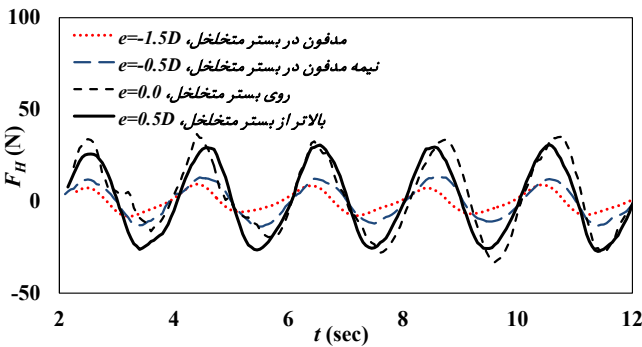
۳-۷- بررسی موقعیت خط‌لوله در بستر متخلخل

در این قسمت اثر فاصله خط‌لوله از کف بستر برای بستر متخلخل و دو ارتفاع موج ۱۴ و ۳۰ سانتی‌متری مورد بررسی قرار گرفته است. سایر مشخصات همانند مشخصات مدل قسمت قبلی است. شکل (۶) چهار مدل استفاده شده برای موقعیت قرار گیری خط‌لوله نسبت به بستر متخلخل را نشان می‌دهد.

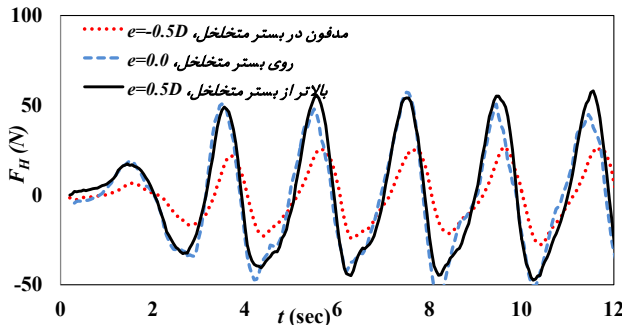


شکل (۶): نمای شماتیک چهار مدل استفاده شده برای موقعیت قرار گیری خط‌لوله نسبت به بستر متخلخل

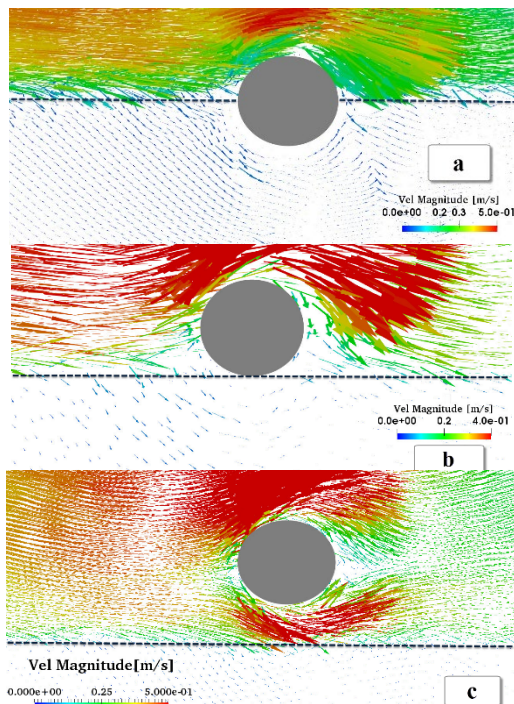
شکل‌های (۷) و (۸) به ترتیب نیروهای افقی وارده به خط‌لوله در موقعیت‌های قرار گیری مختلف برای دو ارتفاع موج ۱۴ و ۳۰ سانتی‌متری را نشان می‌دهند. مطابق انتظار با افزایش ارتفاع موج، نیروی وارد بر خط لوله افزایش خواهد یافت. از طرفی، با فاصله گرفتن خط‌لوله از حالت مدفون به نیمه‌مدفون و روی بستر، نیروی وارده به خط‌لوله افزایش پیدا می‌کند. لازم به ذکر است که در حالت خط‌لوله با فاصله $e=0.5D$ از بستر نسبت به روی بستر با $e=0$ ، نیروی کمتری به خط‌لوله با فاصله گرفتن از بستر متخلخل وارد می‌شود. دلیل این اتفاق می‌تواند این باشد که در حالت $e=0$ جریان کمتری نسبت به حالت $e=0.5D$ از زیر خط‌لوله عبور می‌کند و مسدود شدن جریان جلوی خط لوله باعث می‌گردد تا نیروی بیشتری به آن وارد شود. شکل (۹) بردارهای سرعت ذرات موج در لحظه عبور قله موج از روی خط‌لوله برای سه حالت را نشان می‌دهد. محدوده سرعت ها بین ۰ تا ۰.۵ m/s است. لازم به توضیح است که با استقرار خط لوله روی بستر متخلخل، مقداری از جریان از زیر خط لوله و از داخل محیط متخلخل عبور خواهد کرد که منجر به شکل‌گیری فشار در جلوی خط لوله می‌گردد.



شکل (۷): نمودار نیروهای افقی وارده به خط‌لوله با بستر متخلخل برای ارتفاع موج $H=14\text{ cm}$



شکل (۸): نمودار نیروهای افقی وارده به خط‌لوله با بستر متخلخل برای ارتفاع موج $H=30\text{ cm}$



شکل (۹): الگوی توزیع بردارهای سرعت اطراف خط‌لوله برای سه حالت خط‌لوله نیمه‌مدفون، مستقر و با فاصله از بستر متخلخل ($H=30\text{ cm}$)

۴-۷- بررسی موقعیت خط‌لوله نسبت به بستر نفوذناپذیر

در این قسمت اثر فاصله قرارگیری خط‌لوله از بستر نفوذناپذیر را برای دو ارتفاع موج ۱۴ و ۳۰ سانتی‌متری برای حالت‌های $e=0$ و $e=0.5D$ مورد بررسی قرار داده‌ایم. شکل (۱۰) نمای شماتیک دو

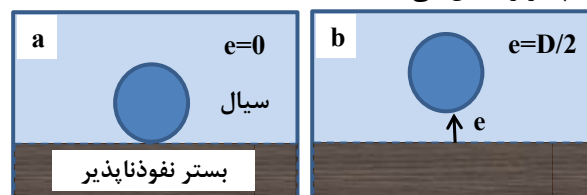
همان‌طور که از نمودارها نیز مشخص است، با افزایش ارتفاع موج، مطابق انتظار، نیروی وارد بر خط لوله افزایش پیدا می‌کند از طرفی، با افزایش فاصله خطلوله از بستر (افزایش e) مطابق شکل (۱۱) با افزایش محدوده سرعت‌ها و عبور جریان از دو طرف خط لوله، الگوی جریان نیز تغییر می‌کند. برای حالت خطلوله مستقر بر بستر نفوذناپذیر با $e=0$ با مسدود کردن جریان در پایین شعاع پایینی، جریان سرعت چندانی نداشته و از یک طرف خطلوله عمده جریان عبور می‌کند. در حالی که برای شرایط مشابه و وجود بستر متخلخل، امکان عبور جریان حتی کم از زیر خط لوله (شکل ۹)، منجر به افزایش مقدار نسبی فشار وارد بر خط لوله می‌گردد.

۸- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در تحقیق حاضر با توسعه مدلی عددی برپایه روش عددی هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم‌پذیر جزئی، مسئله‌ی اندرکنش امواج منظم با خطلوله مستقر و با فاصله از بستر نفوذناپذیر و نیز بستر متخلخل مورد بررسی قرار گرفت. هم‌چنین سیستمی برای جذب کردن انرژی موج به منظور جلوگیری از انعکاس موج از مرز انتهایی مدل، طراحی و استفاده گردید. در مدل مورد استفاده، با اضافه کردن ترم اصلاحی به معادله پیوستگی، نوسانات فشار در محدوده داخل و خارج از محیط متخلخل کاهش یافت. با مقایسه نتایج به‌دست آمده از روش عددی تحقیق حاضر و نتایج موجود، مشخص شد که روش توسعه یافته، قابلیت مدل‌سازی مناسب مسئله اندرکنش امواج و خط لوله مجاور با محیط متخلخل را داشته و نتایج این مدل عددی هم‌خوانی قابل‌قبولی با نتایج آزمایشگاهی و نتایج مدل‌های عددی مشابه دارد. اهم نتایج به‌دست آمده به صورت زیر ارائه می‌شود:

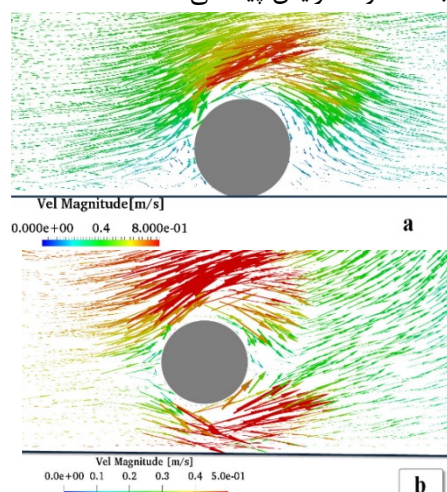
- ۱- استفاده از مرز جاذب هیبرید معرفی شده و یا به عبارتی استفاده همزمان از مرز مستهلک کننده سرعت موج و مرز سطح شیب‌دار، باعث جذب مناسب انرژی موج شده و در عین حال منجر به کاهش حجم محاسباتی خواهد شد.
- ۲- با تغییر دادن محل قرار گیری خطلوله مدفون در بستر متخلخل به حالت نیمه‌مدفون و سپس استقرار روی بستر متخلخل، نیروی افقی وارد بر خطلوله افزایش پیدا می‌کند. ولی با فاصله گرفتن خط لوله از کف بستر متخلخل، مقدار نیروی وارد بر خطلوله، نسبت به شرایطی که خطلوله دقیقاً روی بستر متخلخل قرار گرفته کاهش می‌یابد. دلیل این امر، مسدود شدن نسبی جریان در محل بستر دریا و در عین حال عبور خطوط جریان از داخل محدوده بستر متخلخل است.
- ۳- در صورتی که بستر نفوذناپذیر مدل گردد، با عدم عبور جریان از زیر خط لوله، الگوی جریان جلوی خط لوله متفاوت می‌گردد به گونه‌ای که با عبور جریان از بالای خط

مدل استفاده شده و موقعیت قرارگیری خطلوله نسبت به بستر نفوذناپذیر را نشان می‌دهد.

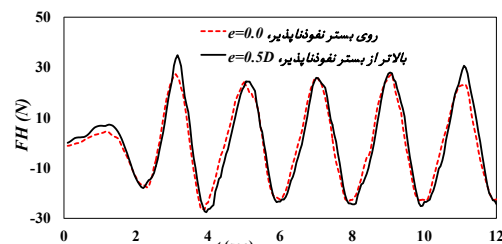


شکل (۱۰): نمای شماتیک قرارگیری خطلوله نسبت به بستر نفوذناپذیر

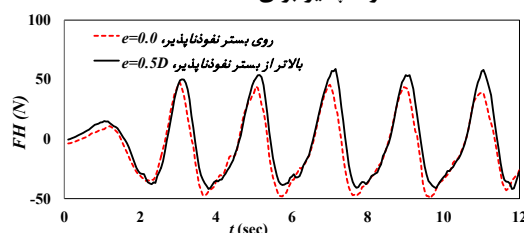
شکل (۱۱) بردارهای توزیع سرعت در اطراف خطلوله برای دو حالت خطلوله مستقر و با فاصله از بستر نفوذناپذیر را نشان می‌دهد و شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نمودار نیروهای مربوطه را نشان می‌دهد. برای ارتفاع موج ۳۰ سانتی‌متری با افزایش فاصله مقدار نیرو در قله‌ها بیشتر و در قعرها کمتر شده است. برای حالت خطلوله روی بستر نفوذناپذیر همانند تحقیق پنگ ژانگ و همکاران و کاظمی نژاد و همکاران با افزایش فاصله از بستر نیروی افقی وارده به خطلوله افزایش پیدا می‌کند.



شکل (۱۱): توزیع بردارهای سرعت اطراف خطلوله برای دو حالت خطلوله مستقر و با فاصله از بستر نفوذناپذیر ($H=30\text{ cm}$)



شکل (۱۲): نمودار نیروهای افقی وارده به خطلوله مستقر بر بستر نفوذناپذیر برای $H=14\text{ cm}$



شکل (۱۳): نمودار نیروهای افقی وارده به خطلوله مستقر بر بستر نفوذناپذیر برای $H=30\text{ cm}$

- and Polar Engineering Conference 2002 Jan 1. International Society of Offshore and Polar Engineers.”.
- [9] “Zang ZP, Teng B, Bai W, Cheng L. *A finite volume solution of wave forces on submarine pipelines*. Ocean engineering. 2007 Oct 1;34(14-15):1955-64.”.
- [10] “Kazeminezhad MH, Bakhtiary AY, Etemad-Shahidi A, Valipour R. *Numerical investigation of gap to diameter ratio effects on flow pattern and drag force around offshore pipeline*. In ASME 2008 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engin.”.
- [11] “Shao S. *Incompressible SPH flow model for wave interactions with porous media*. Coastal Engineering. 2010 Mar 1;57(3):304-16.”.
- [12] “Akbari H, Namin MM. *Moving particle method for modeling wave interaction with porous structures*. Coastal engineering. 2013 Apr 1;74:59-73.”.
- [13] “Wendland H. *Piecewise polynomial, positive definite and compactly supported radial functions of minimal degree*. Advances in computational Mathematics. 1995 Dec 1;4(1):389-96.”.
- [14] “Monaghan JJ. *Smoothed particle hydrodynamics*. Annual review of astronomy and astrophysics. 1992 Sep;30(1):543-74.”.
- [15] “Van Gent MR. *Formulae to describe porous flow*.”.
- [16] “van Gent MR. *The modelling of wave action on and in coastal structures*. Coastal Engineering. 1994 Feb 1;22(3-4):311-39.”.
- [17] “Hsu TJ, Sakakiyama T, Liu PL. *A numerical model for wave motions and turbulence flows in front of a composite breakwater*. Coastal Engineering. 2002 Jun 1;46(1):25-50.”.
- [18] “Akbari H. *Modified moving particle method for modeling wave interaction with multi layered porous structures*. Coastal Engineering. 2014 Jul 1;89:1-9.”.
- [19] “Leimkuhler BJ, Reich S, Skeel RD. *Integration methods for molecular dynamics*. In Mathematical Approaches to biomolecular structure and dynamics 1996 (pp. 161-185). Springer, New York, NY.”.
- [20] “Molteni D, Colagrossi A. *A simple procedure to improve the pressure evaluation in hydrodynamic context using the SPH*. Computer Physics Communications. 2009 Jun 1;180(6):861-72.”.
- لوله، نیروی وارد بر خط لوله کاهش خواهد یافت. از این‌رو، با افزایش فاصله خط‌لوله از بستر نفوذناپذیر و عبور جریان از اطراف خط لوله، نیروی افقی وارد بر آن بطور نسبی افزایش پیدا می‌کند.
- ۴- در شرایط یکسان، مقدار نیروی افقی وارد بر خط‌لوله مستقر بر بستر متخلخل در مقایسه با بستر نفوذناپذیر در قله‌ها بیش‌تر و در قعرها کم‌تر است.
- ۵- نتایج به‌دست آمده نشان‌دهنده اهمیت در نظر گرفتن شرایط تخلخل بستر در تحلیل نیروهای وارد بر خط لوله است. از طرفی، نتایج ارائه شده نشان می‌دهد، مدل عددی معرفی شده می‌تواند برای این منظور مورد استفاده باشد.
- ### ۹- کلید واژگان
- 1- Intermediate Water
2- Momentum equation
3- Continuity equation
4- Equation of State
5- Courant-Friedrichs-Lewy condition
- ### ۱۰- فهرست مراجع
- [1] “Johansson B. *Wave Forces on a Pipe at the Bottom of the Sea*. Royal Institute of Tech., Stockholm, Sweden, Division of Hydraulics, Bulletin. 1968)71.”.
- [2] Schiller FC. *Wave forces on a submerged horizontal cylinder (Doctoral dissertation, Monterey, California; Naval Postgraduate School)*.”.
- [3] Shankar NJ, Raman H, Sundar V. *Wave forces on large offshore pipelines*. Ocean engineering. 1985 Jan 1;12(2):99-115.”.
- [4] “Sudhan CM, Sundar V, Rao SN. *Wave induced forces around buried pipelines*. Ocean Engineering. 2002 May 1;29(5):533-44.”.
- [۵] Mirmohammadi A, Ketabdari MJ. *Numerical simulation of wave scouring beneath marine pipeline using smoothed particle hydrodynamics*. International Journal of Sediment Research. 2011 Sep 1;26(3):331-42.
- [۶] Ren B, Wen H, Dong P, Wang Y. *Improved SPH simulation of wave motions and turbulent flows through porous media*. Coastal Engineering. 2016 Jan 1;107:14-27.
- [۷] Akbari H, Taherkhani A. *Numerical study of wave interaction with a composite breakwater located on permeable bed*. Coastal Engineering. 2019 Apr 1;146:1-3.
- [8] Mostafa AM, Mizutani N. *Nonlinear wave forces on a marine pipeline buried in a sand seabed*. In the Twelfth International Offshore