بررسی مسائل آبشستگی موضعی در اطراف خطوط لوله با استفاده از مدل‌های عددی و فیزیکی

داریوش حسینی[۱] ، حبیب حکیم‌زاده[۲] ، رضا غیاثی[۳]

۱- کارشناس ارشد سازه‌های دریایی، دانشگاه صنعتی سهند تبریز
۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند تبریز
۳- عضو هیات علمی دانشکده فنّی، دانشگاه تهران

چکیده

در این مقاله ابعاد مختلف فرآیند آبشستگی در اطراف خطوط لوله تحت اثر جریانهای ماندگار با استفاده از مدل‌های عددی و فیزیکی بررسی شده است. برای محاسبه بیشینه عمق آبشستگی در زیر لوله، مدلی ریاضی بر اساس معادله دوبعدی لاپلاس ارائه گردیده و فرآیند آبشستگی به صورت دو بعدی در صفحه (x-z) مدل‌سازی گردیده و برای گسسته‌سازی و حل معادله حاکم بر میدان محاسباتی از روش حجم محدود استفاده شده است. در مدل عددی تهیه شده برای محاسبه نیمرخ بستر تغییر شکل یافته در اثر آبشستگی که تحت اثر نیروهای وارد بر مواد رسوبی بر روی بستر دریا حاصل می‌شود، از یک مرز معادل استفاده شده که با استفاده از روش تکرار نیوتن رافسون محاسبه می‌گردد. در مدل‌های آزمایشگاهی نیز سعی شده است که اثر پارامترهای مختلفی نظیر قطر لوله‌ها، عمق آب، سرعت جریان و اندرکنش لوله‌های موازی با همدیگر بر روند فرآیند آبشستگی بررسی شود. سرانجام نتایج مدل‌سازی عددی با نتایج به دست آمده از مدل فیزیکی و دیگر نتایج تجربی مقایسه شده است.

کلمات کلیدی: آبشستگی، خطوط لوله، مدل سازی عددی، مدل‌سازی فیزیکی, جریان، حجم محدود

Investigation of Local Scour Process Around Pipelines Using the Numerical and Physical Models

Abstract

In this paper, the local scour process around pipelines due to steady currents has been investigated from different points of view using the numerical and physical models. In order to calculate the maximum scour depth under the pipe, a mathematical model based on the two-dimensional Laplace equation has been developed and the scour process on the 2D *x-z* vertical plane has been simulated, with the finite volume method being used to discretize the governing equation. In the developed numerical model, an equivalent boundary calculated using the Newton-Raphson iteration method, has been used to determine the deformed bed profile due to scour resulting from the subjected forces on the sediment particles on sea bed. In the physical models, emphasis has been focused on the effects of different parameters such as pipe diameter, water depth, velocity of flow and the interaction of the parallel pipes on local scour process. Finally, the numerical model results have been compared with the results obtained from the physical model and the other experimental data.

Keywords: Scour, Pipelines, Numerical Modeling, Physical Modeling, Steady Current, Finite Volume Method

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-25]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1385.3.5.3.5]

۱- مقدمه

بررسی‌های دقیق انجام شده روی خطوط لوله در حال بهره‌برداری نشان دهنده آبشستگی محلی ایجاد شده در مجاورت لوله تحت اثر جریان (جریان تنها یا جریان رفت و برگشتی ناشی از موج و یا ترکیبی از این دو) می‌باشد. آبشستگی باعث جدایی خط لوله از بستر شده و در نتیجه فضای خالی نسبتاً بزرگی بین بستر و خط لوله به وجود می‌آید. در این حالت دهانه آزاد خط لوله به مرور گسترش یافته که ممکن است بارهای نوسانی ناشی از گردابه فکنی باعث خستگی و در نهایت گسیختگی آن گردند. مورد مهمی که در طراحی خطوط لوله وجود دارد این است که در اثر آبشستگی محلی چه شرایطی حاصل می‌شود و حفره ایجاد شده در زیر لوله چگونه گسترش می‌یابد. در ارتباط با مسائل آبشستگی مربوط به خطوط لوله تحقیقات آزمایشگاهی و عددی توسط پژوهشگران مختلف انجام گرفته است که از جمله آنها می‌توان به کارهای عددی انجام گرفته توسط لی و چن [۳ و۴]، مدلسازی فیزیکی و ریاضی انجام شده توسط سامر [۵]، پیش بینی حداکثر عمق آبشستگی در زیر خطوط لوله دریایی توسط چیو [۶]، شروع پدیده آبشستگی در زیر خطوط لوله توسط سامر و همکاران ایشان [۸] و مدلسازی عددی انجام شده برای جریان و آبشستگی در خطوط لوله توسط برورس [۷] اشاره کرد. همچنین یک منبع جامع در ارتباط با مسائل آبشستگی در اطراف خطوط لوله دریایی و پایه‌های استوانه‌ای توسط سامر و فردسو [۹] تهیه شده است. به طور کلی سه روش اساسی برای مطالعه و بررسی آبشستگی محلی در زیر خطوط لوله وجود دارد که عبارتند از: (۱) مدل‌سازی عددی پدیده آبشستگی، (۲) استفاده از مدل‌های فیزیکی و (۳) برداشت‌های محلی و بازدیدهای صحرایی. که در تحقیق حاضر از روش‌های (۱) و (۲) برای مطالعه پدیده آبشستگی استفاده شده است.

۲- مدل‌سازی عددی

مهمترین بخش از مدل‌سازی عددی هر پدیده‌ای انتخاب معادلات حاکم بر آن است، به گونه‌ای که این معادله‌ها به نحو مناسبی بیان کننده جزئیات پدیده مورد نظر باشند. پدیدهٔ آبشستگی فرآیندی است که از اندرکنش خط لوله، خاک بستر دریا و جریان ناشی می‌شود. بنابراین تحلیل آن نیازمند شناخت دو سری معادلات می‌باشد: (۱) معادلات حاکم بر جریان آب و (۲) معادله انتقال رسوب. در این پژوهش از نظریه‌های پتانسیل جریان و مکانیک حرکت دانه رسوبی برای مدل‌سازی عددی پدیده آبشستگی استفاده شده است.

۲-۱- معادلات حاکم بر جریان آب

در این پژوهش پتانسیل جریان پایدار عمود بر محور طولی لوله مورد توجه بوده و فرآیند آبشستگی به صورت دو بعدی (در جهت طولی و قائم) مورد بررسی قرار می‌گیرد. معادلهٔ حاکم جهت مدل‌سازی جریان در قلمرو محاسباتی معادله لاپلاس است.

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \qquad (۱)$$

که $\Phi = \Phi\ (x, z)$، پتانسیل سرعت و x و z به ترتیب مؤلفه‌های طولی و قائم دستگاه مختصات کارتزین می‌باشند. پس از محاسبه تابع پتانسیل سرعت، مولفه‌های افقی و قائم بردار سرعت با توجه به روابط زیر محاسبه می‌شوند.

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x} \quad , \quad v = \frac{\partial \Phi}{\partial z} \qquad (۲)$$

نکته مهمی که در این جا وجود دارد آن است که معادله لاپلاس وابسته به زمان نیست. بنابراین نتایج به دست آمده از حل عددی این معادله به مرحله نهایی فرآیند آبشستگی (مرحله تعادل) مربوط هستند.

۲-۲- معادله حاکم بر انتقال رسوب

در این قسمت برای مدل‌سازی بستر فرسایش‌پذیر دریا از نظریه مکانیک حرکت دانه رسوب بر روی بستر شیب‌دار استفاده شده است. اگر یک دانه رسوب بر روی یک بستر افقی در حال سکون باشد تا زمانی که

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-25]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1385.3.5.3.5]

نیروهای ناشی از جریان بیشتر از نیروی پایداری ناشی از اصطکاک نباشند ذره حرکت نخواهد کرد. نیروهای ناشی از جریان وارد بر یک دانه رسوب به دو دسته تفکیک می‌شوند: (۱) نیروی پسا و (۲) نیروی بالابرنده. نیروهای پسا و بالابرنده وارد بر کره‌ای به قطر d به صورت عبارت‌های صریحی از سرعت مشخصه بیان می‌شوند:

$$F_D = \frac{\rho}{2} C_D \frac{\pi}{4} d^2 U_0^2 \qquad (۳)$$

$$F_L = \frac{\rho}{2} C_L \frac{\pi}{4} d^2 U_0^2 \qquad (۴)$$

$$W = \rho g (s-1) \frac{\pi}{6} d^3 \qquad (۵)$$

که C_D و C_L به ترتیب ضرایب پسا و بالابرنده می‌باشند، d= قطر دانه رسوب، W= وزن مغروق دانه رسوب، g= شتاب جاذبه، $s = \rho_s / \rho$ چگالی نسبی رسوب و U_0= سرعت مشخصه جریان می‌باشد [۱].

۲-۲-۱- وضعیت دانه رسوب در آستانه حرکت بر روی بستر افقی دریا

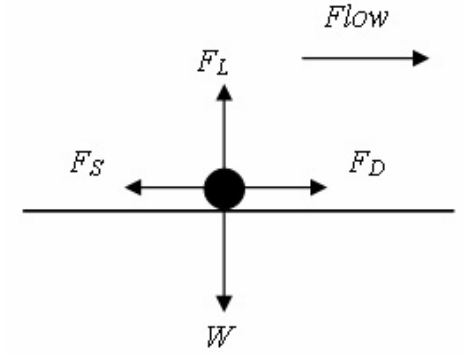
در شکل (۱) نیروهای وارد بر یک دانه رسوب کروی در آستانه حرکت بر روی بستری افقی نشان داده شده است. نیروی رانشی FD که بر یک دانه کروی به قطر d در روی بستری افقی وارد می‌شود، برابر است با:

$$FD = F_D + F_L \tan\phi = \frac{\rho}{2}\frac{\pi d^2}{4}(C_D + C_L \tan\phi) U_{b0}^2 \qquad (۶)$$

و نیروی پایداری ناشی از اصطکاک به صورت زیر بیان می‌شود:

$$FS = W \tan\phi = \rho g (s-1) \frac{\pi d^3}{6} \tan\phi \qquad (۷)$$

که U_{b0}= سرعت مشخصه جریان در نزدیکی بستر، ϕ= زاویه اصطکاک داخلی دانه‌های رسوب در حالت غوطه‌ور که بیشترین مقدار آن ϕ_s می‌باشد. برای ماسه طبیعی غوطه‌ور در آب مقدار ϕ_s در حدود ۳۳ تا ۳۸ درجه می‌باشد.



شکل ۱- نیروهای وارد بر دانه رسوب که بر روی بستری افقی قرار گرفته است.

در شرایط بحرانی ($FD = FS$) و با فرض $U_{*c}^2 = \lambda U_{*b0}^2$ رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\frac{U_{*c}^2}{(s-1)gd} = \frac{\lambda U_{*b0}^2}{(s-1)gd} = \frac{4\lambda \tan\phi_s}{3(C_D + C_L \tan\phi_s)} \qquad (۸)$$

که U_{*c}= سرعت مالشی بحرانی، U_{*b0}= سرعت بحرانی نزدیک بستر و λ= ضریبی که به عدد رینولدز بستگی دارد. زیرنویس 0 (صفر) نشان دهندهٔ شرایط مربوط به بستر افقی می‌باشد. سمت چپ معادله (۸) همان پارامتر پایداری بستر می‌باشد [۱].

۲-۲-۲- وضعیت دانه رسوب در آستانه حرکت بر روی بستر شیبدار دریا

در حالتی که دانه رسوب بر روی یک سطح شیبدار قرار داشته باشد، تغییراتی در نیروهای محرک و مقاوم ایجاد می‌شود. مطابق شکل (۲) برای دانه رسوبی که بر روی بستری با زاویه شیب δ نسبت به افق قرار گرفته است نیروهای محرک ومقاوم وارده به ترتیب عبارتند از:

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-25]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1385.3.5.3.5]

$$FD = F_D + F_L \tan\phi + W\sin\delta = \frac{\rho}{2}\frac{\pi d^2}{4} \quad (۹)$$

$$(C_D + C_L \tan\phi)U_b^2 + W\sin\delta$$

$$FS = W\cos\delta\tan\phi_s \quad (۱۰)$$

برای دانه رسوبی که بر روی سطح شیب‌دار قرار دارد، شرط مرزی آستانه حرکت، با برابر هم قرار دادن نیروهای محرک و مقاوم به دست می‌آید:

$$FD = FS \quad (۱۱)$$

با جایگذاری معادله‌های (۹) و (۱۰) در رابطه (۱۱) و فرض این که $\phi = \phi_s$ باشد، می‌توان نوشت:

$$U_{*b}^2 = \frac{(s-1)gd}{\lambda}\left[\cos\delta - \frac{\sin\delta}{\tan\phi_s}\right] \quad (۱۲)$$

که U_{*b}= سرعت بحرانی نزدیک بستر بر روی بستر شیب‌دار می‌باشد. اگر پارامتر پایداری بستر بر روی سطح شیب‌دار به صورت زیر تعریف شود:

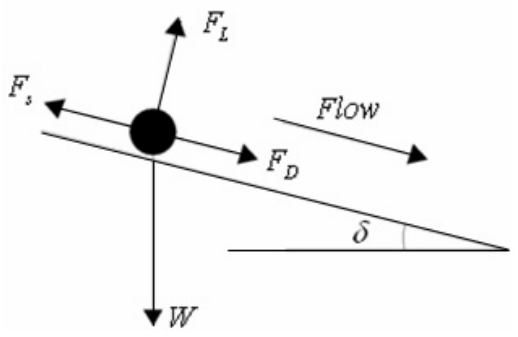
$$\theta_c = \frac{U_{*c}^2}{(s-1)gd} = \frac{\lambda U_{*b}^2}{(s-1)gd} \quad (۱۳)$$

آنگاه، نسبت پارامتر پایداری بستر در روی سطح شیب‌دار به پارامتر پایداری بستر در روی بستر افقی عبارت است از:

$$\frac{\theta_c}{\theta_{c0}} = \frac{U_{*b}^2}{U_{*b0}^2} = \cos\delta - \frac{\sin\delta}{\tan\phi_s} \quad (۱۴)$$

که θ_c و θ_{c0} به ترتیب پارامتر پایداری در روی بستر شیب‌دار و بستر افقی می‌باشند. با توجه به معادله (۱۴) شرط مرزی بستر فرسایش‌پذیر به صورت زیر ارائه می‌گردد:

$$U_{*b} = U_{*b0}\sqrt{\cos\delta\left(1 - \frac{\tan\delta}{\tan\phi_s}\right)} \quad (۱۵)$$



شکل۲- نیروهای وارد بر دانه رسوب که بر روی بستری شیبدار قرار گرفته است.

به عبارت دیگر معادله (۱۵) بیان می‌کند که گسترش ابعاد گودال آبشستگی زمانی متوقف می‌شود که بین نیروهای محرک ناشی از جریان و نیروی مقاوم دانه‌های رسوب بستر تعادل ایجاد شود. به عبارت ساده‌تر سرعت در روی بستر شیب‌دار (دیواره‌های گودال آبکند زیر لوله) با سرعت بحرانی جهت حرکت رسوب بر روی بستر شیب‌دار برابر شود [۱].

۲-۳- شرایط مرزی

در شکل (۳) محدودهٔ محاسباتی جریان همراه با شرایط مرزی لازم جهت حل مسئله نشان داده شده است. در سطح آزاد (***P₁***) و بستر (***P₅***) و دیواره خارجی لوله (***P₂***) سرعت عمود بر سطوح باید صفر باشد

$$\frac{\partial\Phi}{\partial\vec{n}} = 0 \quad (۱۶)$$

که $\vec{n}$= بردار واحد عمود بر مرز مورد نظر می‌باشد. محل مرزهای ورودی (***P₃***) و خروجی (***P₄***) با آزمون‌های عددی به گونه‌ای تعیین می‌شود که کمترین اثر را روی میدان جریان نزدیک لوله داشته باشند. به این ترتیب جریان دایمی و یکنواختی بر روی مرز ورودی و مرز خروجی در نظر گرفته می‌شود:

$$\frac{\partial\Phi}{\partial x} = U_0 \quad (۱۷)$$

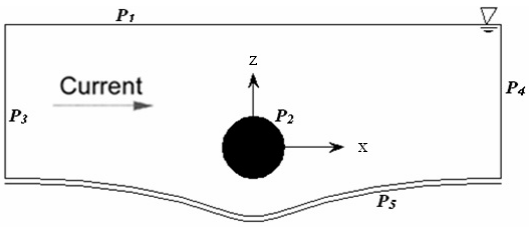
[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-25]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1385.3.5.3.5]

در مرز بستر (P_5) که دارای اهمیت زیادی است دو شرط مرزی، یعنی شرط پایداری جریان و شرط پایداری رسوب وجود دارند که به ترتیب عبارتند از:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \vec{n}} = 0 \qquad (۱۸)$$

$$U_b = U_{*b} = U_{*b0}\sqrt{\cos\delta(1-\frac{\tan\delta}{\tan\phi_s})} \qquad (۱۹)$$

که U_b= سرعت مشخصه مماسی نزدیک بستر، U_{*b}= سرعت بحرانی نزدیک بستر بر روی سطح شیب‌دار و U_{*b0}= سرعت نزدیک بستر بر روی بستر افقی، δ= زاویه میان بستر دریا و خط افق می‌باشد که برای شیب به سمت پایین در راستای جریان مثبت بوده و ϕ_s= زاویه اصطکاک داخلی (سکون) دانه‌های رسوب می‌باشد. معادله (۱۸) بیان می‌کند که بستر یک خط جریان می‌باشد و معادله (۱۹) رابطه میان سرعت نزدیک بستر و سرعت بحرانی انتقالی رسوب را نشان می‌دهد.



شکل ۳- میدان محاسباتی جریان و شرایط مرزی

۲-۴- حل دستگاه معادلات

همانگونه که پیش از این بیان گردید برای گسسته سازی معادلات حاکم بر پدیده از روش حجم محدود بهره گرفته شده است [۱۰ و ۱۱]. یکی از ویژگی‌های مدل عددی ارائه شده در این پژوهش، شبکه‌بندی خود به خود میدان محاسباتی و به هنگام کردن شبکه‌بندی متناسب با تغییرات ایجاد شده در تراز بستر دریا با استفاده از روش نیوتن رافسون می‌باشد. در ابتدا برای شروع آبشستگی در زیر لوله، بستر در این محل به صورت یک منحنی کسینوسی در نظر گرفته شد، به طوری که فاصله بین جدار لوله و بستر در مرکز لوله $0.1D$ می‌باشد (شکل ۴). در پیرامون لوله ناحیه‌ای مستطیلی به ابعاد ΔX و ΔZ در نظر گرفته شده است. ناحیه مزبور به $(12m)$ المان در جهت x و $(12m)$ المان در جهت z تقسیم شده است (m بخش صحیح خارج قسمت n بر عدد هشت است). مرکز لوله به عنوان مبدأ مختصات انتخاب شده و زیرنویس‌های i و j برای این نقطه برابر صفر می‌باشند. برای مدل کردن شکل دایره‌ای لوله از یک n ضلعی محاط در دایره استفاده شده است. جزییات بیشتر در مورد شبکه بندی میدان محاسباتی و روش گسسته سازی معادلات حاکم در منابع [۱ و ۲] آورده شده است.

روشی که برای تعیین نیمرخ بستر به کار گرفته شده است به صورت زیر بیان می‌گردد:

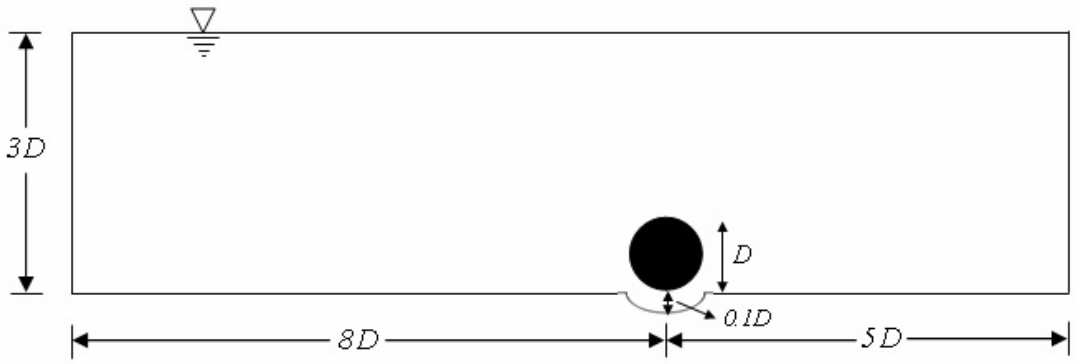
۱- در ابتدا برای پروفیل بستر یک فرض اولیه در نظر گرفته می‌شود به عنوان مثال (در این جا فرض شده است که در ابتدا پروفیل بستر زیر لوله به صورت یک نیم موج کسینوسی بوده که در زیر مرکز لوله فاصلهٔ بین بستر و لوله به $0.1D$ می‌رسد که در آن D قطر لوله می‌باشد).

۲- با حل معادله (۱) و اعمال شرط مرزی (۱۸) میدان جریان محاسبه می‌شود به گونه‌ای که نیمرخ $S^0(x)$ را برآورده نماید.

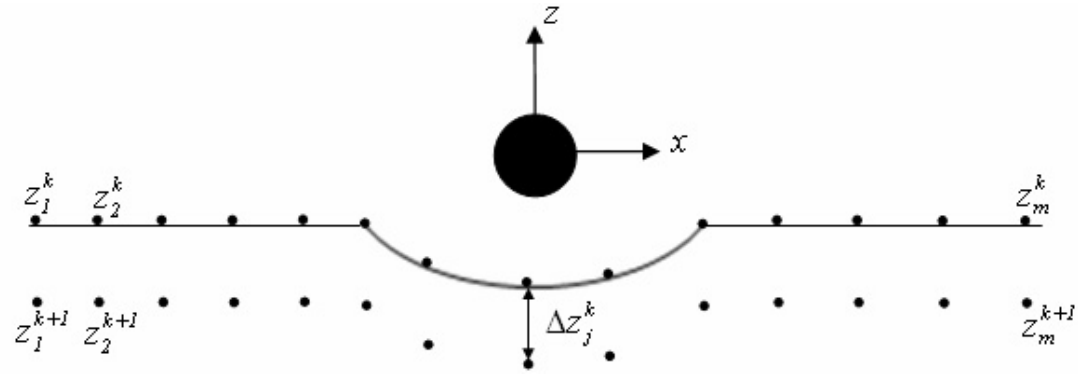
۳- پس از محاسبه میدان جریان، شرط مرزی (۱۹) کنترل می‌شود. در صورتی که این شرط برقرار نشود نیمرخ بستر باید به گونه‌ای تغییر کند که شرط مزبور برآورده شود. نتیجه به دست آمده برای نیمرخ بستر جدید به صورت $z^1=S^1(x)$ تعریف می‌شود. سپس میدان جریان با توجه به مرز $z^1=S^1(x)$ محاسبه می‌شود و بستر دریا مجدداً توسط معادله (۱۹) تنظیم می‌شود. این روش تکرار زمانی پایان می‌یابد که سطح معادل گودال آبشستگی $z^n=S^n(x)$ در هر دو معادله (۱۸) و (۱۹) صدق کند.

در روش ذکر شده بالا در هر مرحله برای محاسبه مرز جدید $z^{k+1}=S^{k+1}(x)$ به صورت زیر عمل شده است : در این روش تکرار $z^k=S^k(x)$ به ازای تک‌تک نقاط براساس خطای ΔU_b^k تولید شده انجام می‌شود به طوری که شرط مرزی (۱۹) به صورت $\Delta U_b^k = 0$ نوشته شود. اگر ΔU_b^k در نقطهٔ ویژه j صفر نشود، محل نقطهٔ z_j^k باید با محل جدید z_j^{k+1} عوض شود.

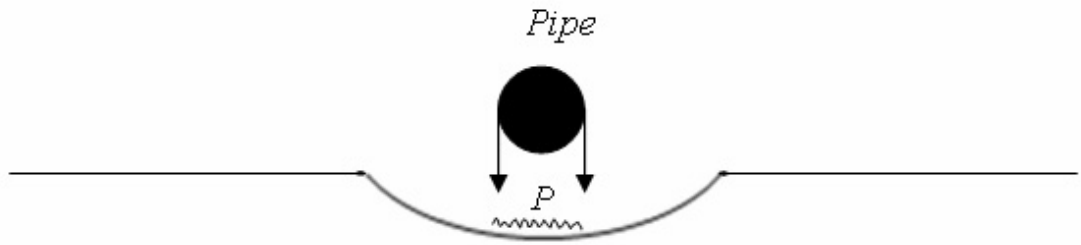
[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-25]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1385.3.5.3.5]



شکل ۴- ابعاد میدان محاسباتی در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی عددی



شکل ۵- طرحی از روش تکرار به کار گرفته شده برای تعیین نیمرخ



شکل ۶- محدوده انتخاب سرعتهای مشخصه

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-25]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1385.3.5.3.5]

$$z_j^{k+1} = z_j^k + \Delta z_j^k \qquad (۲۰)$$

که مقدار Δz_j^k با استفاده از روش تکرار نیوتن - رافسون به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$f_j^k(\Delta z) = \Delta U_b^k(z_j^k + \Delta z_j^k) \qquad (۲۱)$$

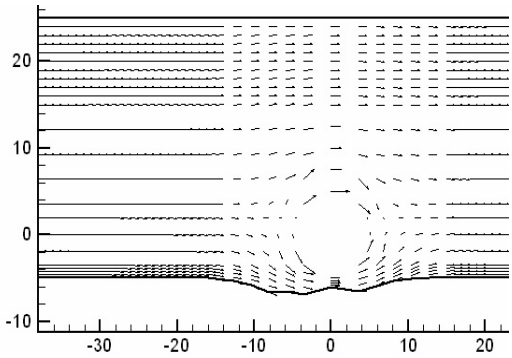
$$\Delta z_j^k = -f_j^k(0) \Big/ \frac{d}{d(\Delta z)} f_j^k(0) \qquad (۲۲)$$

مفهوم فیزیکی این روش آن است که اگر سرعت مشخصهٔ نزدیک بستر U_b در نقطه‌ای بیشتر یا کمتر از سرعت بحرانی برای حرکت دانه رسوب U_{*b} باشد، به ترتیب تراز بستر باید پایین برده شده یا بالا آورده شود. همچنین انتظار می‌رود که استفاده از سرعت‌های مشخصه مختلف بر شکل گودال آبکند پیش‌بینی شده با استفاده از این روش مؤثر باشد.

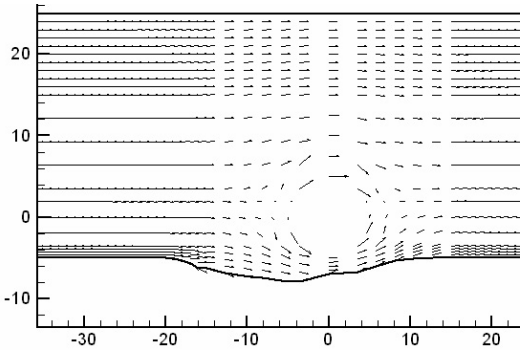
ارزیابی و اعتبار سنجی نتایج مدل عددی تهیه شده با داده‌های آزمایشگاهی، صحرایی ویا مقایسه آنها با نتایج سایر مدل‌های عددی و در نهایت کالیبره نمودن مدل مورد نظر، یکی از موارد بسیار مهمی است که باید در تهیه مدل‌های عددی بدان توجه شود. برای سهولت در مقایسهٔ نتایج محاسبات با نتایج گزارش شده توسط دیگر محققین، مدل عددی تهیه شده برای لوله‌ای به قطر $100\ mm$ که تحت جریانی با سرعت $U_0=0.31\ m/s$ قرار دارد، اجرا شده است. در این جا از دانه‌هایی با $d_{90} = 0.42mm$ با زاویه اصطکاک داخلی $\phi = 33°$ استفاده شده است. همچنین عمق آب $30\ cm$ بوده و طول کانال $130\ cm$ می‌باشد که لوله در فاصله $80\ cm$ از مرز ورودی جریان قرار گرفته است. در این جا در ابتدا سرعت پتانسیل جریان بر روی بستر (سرعت مرزی) به عنوان سرعت مشخصه انتخاب شده و در محاسبه گودال آبکند (*scour hole*) ناشی از آبشستگی به کار برده شده است. در این حالت بیشینه عمق آبشستگی برای لولهٔ به قطر $100mm$، $S=39mm$ بوده که ۶۶٪ نتایج تجربی به دست آمده توسط سامر [۵] می‌باشد. همان طور که دیده می‌شود، نتایج به دست آمده در این حالت کمتر از بیشترین عمق آبشستگی به دست آمده از مدل آزمایشگاهی می‌باشند. برای بهبود پیش‌بینی‌ها، از یک سرعت اصلاح شده که توسط محققین پیشین پیشنهاد شده بود، استفاده گردید. در مورد اخیر همانطور که در شکل (۶) نشان داده شده در خارج از محدوده P از همان سرعت مرزی به عنوان سرعت مشخصه استفاده شده و در محدودهٔ P، سرعت مشخصه به صورت $U_b = Max\left[U_T, \overline{U}_T\right]$ محاسبه می‌شود که در آن U_T=سرعت جریان در مجاورت بستر (سرعت مرزی) و $\overline{U}_T$=سرعت متوسط میان لوله و ماسه فرسایش یافته بستر است.

شکل‌های (۷) مراحل توسعه تدریجی مدل‌سازی عددی پدیده را برای تکرارهای مختلف نشان می‌دهند. با بررسی شکل‌های مزبور می‌توان مشاهده نمود که تغییرات ایجاد شده در بستر با افزایش تکرار محاسبات قابل ملاحظه است. همچنین در شکل (۸) نتایج مربوط به اجرای مدل عددی برای لوله به قطر $100mm$ با استفاده از سرعت متوسط در حالت تعادل نشان داده شده است. همان طور که دیده می‌شود در این حالت بیشترین عمق آبشستگی محاسبه شده $S=67mm$ می‌باشد. با بررسی دقیق‌تر شکل (۸) مشاهده می‌شود که مطابق نتایج آزمایشگاهی، بیشینه عمق آبشستگی دقیقاً در زیر مرکز لوله رخ داده است. از سوی دیگر نیمرخ گودال آبشستگی به دست آمده دارای شیبی ملایم در بالادست لوله و شیبی تند در پایین‌دست لوله می‌باشد. در حالی که نتایج آزمایشگاهی حاکی از آن است که گودال آبشستگی دارای شیب نسبتاً ملایمی در پایین دست لوله می‌باشد. این نتیجه دور از انتظار نیست، زیرا مدل پتانسیل جریان استفاده شده در این جا توانایی مناسب مدل‌سازی فرآیند گردابه فکنی را ندارد. جدایی سیال از لوله و به دنبال آن فرآیند گردابه فکنی عامل اصلی به وجود آمدن شیب ملایمی در پایین دست گودال آبشستگی است [۱].

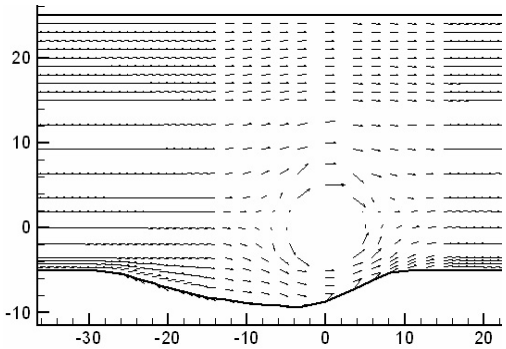
[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-25]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1385.3.5.3.5]



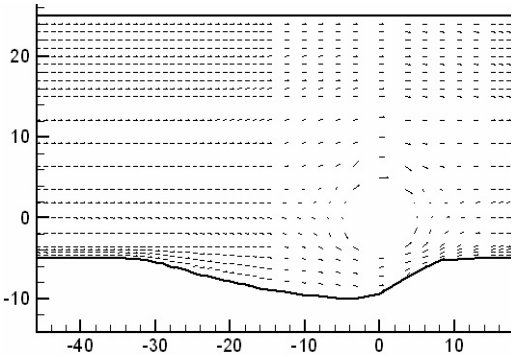
شکل ۷-۱- نیمرخ بستر پس از ۴ تکرار



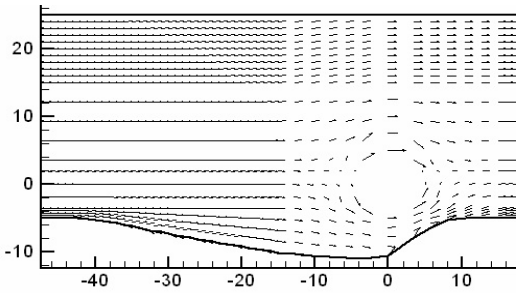
شکل ۷-۲- نیمرخ بستر پس از ۸ تکرار



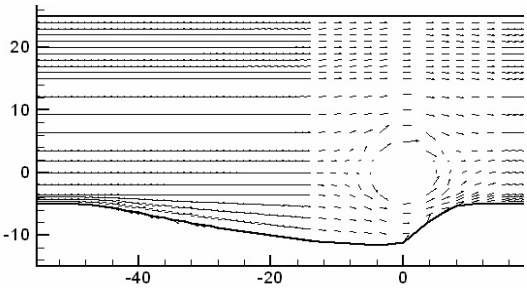
شکل ۷-۳- نیمرخ بستر پس از ۱۶ تکرار



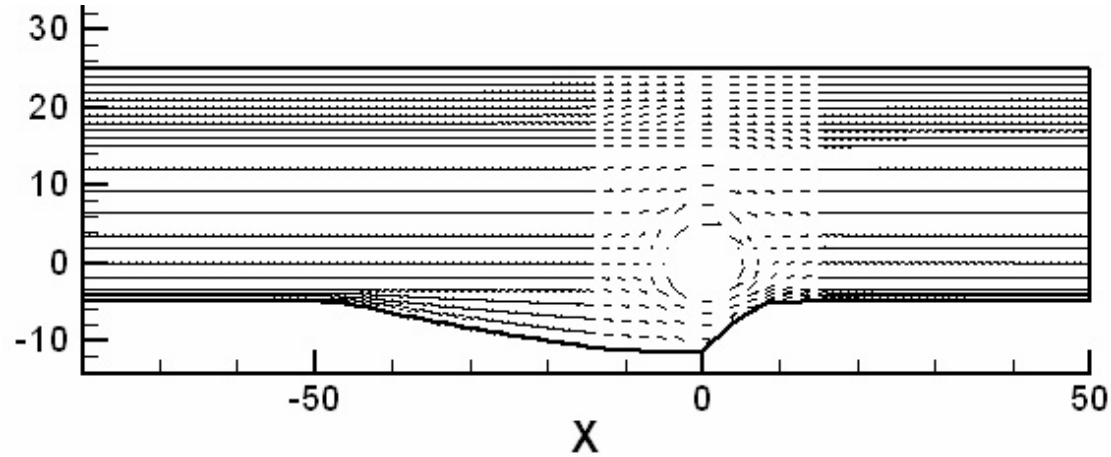
شکل ۷-۴- نیمرخ بستر پس از ۲۰ تکرار



شکل ۷-۵- نیمرخ بستر پس از ۲۸ تکرار



شکل ۷-۶- نیمرخ بستر پس از ۳۴ تکرار



شکل ۸- محاسبه نیمرخ بستر و توزیع بردارهای سرعت جریان در حالت تعادل با استفاده از سرعت متوسط

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-25]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1385.3.5.3.5]

۳- مشخصات مدل فیزیکی و شرایط مرزی

آزمایش‌ها در کانالی به طول ۶ متر، عرض ۰/۲۷۵ متر و عمق ۰/۳۵ متر انجام گردید. در وسط کانال در محدوده‌ای به طول ۲ متر و به ضخامت ۱۰ سانتیمتر ماسه ریخته شده است. برای جلوگیری از فرار ماسه‌ها هنگام عبور جریان، دو سطح شیبدار از جنس پلیمر و با شیب ۱:۲ در طرفین محدوده بالا قرار داده شده بود. به منظور کاهش اثرات مرزهای ورودی وخروجی جریان، بالادست و پایین دست محدودهٔ انجام آزمایش هر یک به اندازهٔ ۲ متر از مرزهای ورودی و خروجی فاصله داشتند. برای تنظیم عمق آب در محدودهٔ انجام آزمایش، یک دریچهٔ تیغه‌ای در فاصلهٔ ۱۵۰ سانتیمتری از خروجی جریان قرار داده شده بود. آزمایش‌ها بر روی دو لوله با قطرهای ۱۱۰/۵۰ و ۶۲/۷۵ میلیمتر انجام شده است. به منظور جلوگیری از قفل و بست دانه‌ها در یکدیگر و تشکیل لایه‌ای مقاوم روی بستر که موجب کاهش اثرات فرآیند آبشستگی می‌شود، دانه‌بندی مواد رسوبی بستر به صورت کاملاً یکنواخت انتخاب شده است. مشخصات ماسه به کار رفته جهت مدلسازی رسوب بستر عبارتند از: $d_{50}= 0.42\ mm$ با چگالی نسبی $s=2.7$.

۳-۱- روش انجام آزمایش‌ها و مشخصات مدل‌های مورد آزمایش

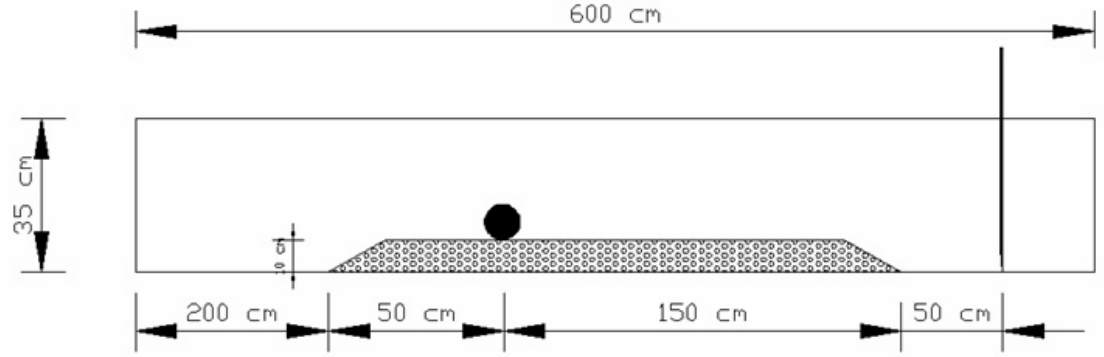
در این تحقیق جهت بررسی ابعاد مختلف فرآیند آبشستگی در اطراف خطوط لوله دو دسته آزمایش انجام شده است: (۱) آزمایش‌های مربوط به بررسی پدیده آبشستگی موضعی در اطراف خطوط لوله منفرد، (۲) آزمایش‌های مربوط به بررسی پدیده آبشستگی موضعی در اطراف خطوط لوله مرکب.

در حالت عمومی روش انجام آزمایش‌ها در این پژوهش به صورت زیر بیان می‌گردد. برای جلوگیری از ایجاد آبلرز (*Ripple*) بر بستر ماسه‌ای در ابتدا دریچه تیغه‌ای پایین دست کاملاً بسته شده و از طرفین (از پایین دست و بالادست)، کانال تا عمق مورد نظر به آرامی از آب زلال (آب شرب) پر می‌شود. سپس جریان ورودی از بالا دست قطع شده و لوله بر روی بستر و عمود بر جهت جریان قرار داده می‌شود. به منظور جلوگیری از حرکت جانبی لوله، از دو درپوش لاستیکی منبسط شونده در دو انتهای لوله‌ها استفاده شده و به این ترتیب لوله به دیواره‌های کانال ثابت می‌شود. پس از قرار دادن لوله، پمپ روشن شده و همزمان با آن، دریچه پایین دست به اندازه کافی باز می‌شود تا عمق آب در کانال ثابت بماند. با توجه به سرعت جریان آب پس از گذشت مدت زمان کمی از عبور جریان، ناگهان مخلوطی از ماسه و آب از زیر لوله به سمت بیرون پاشیده می‌شود (شکل ۱۰). در ادامه، فرسایش نسبتاً شدیدی در زیر لوله رخ داده و گودال نسبتاً بزرگی در زیر لوله شکل می‌گیرد. همزمان با شکل‌گیری گودال آبکند، تپه‌ای ماسه‌ای در پایین دست لوله ایجاد می‌شود. با توجه به سرعت جریان آب، فرآیند آبشستگی در زیر لوله طی مدت زمان مشخصی (حدود ۱۵ تا ۲۰ دقیقه، با توجه به قطر لوله) به حالت تعادل رسیده و تغییر محسوسی در عمق گودال آبکند مشاهده نمی‌شود. پس از به تعادل رسیدن فرآیند آبشستگی، مرحله ثبت نتایج فرا می‌رسد در این مرحله با استفاده از یک ارتفاع سنج با دقت ۰/۰۵ میلیمتر، نیمرخ آبشستگی در جهت‌های طولی و قائم برداشت می‌شود [۲].

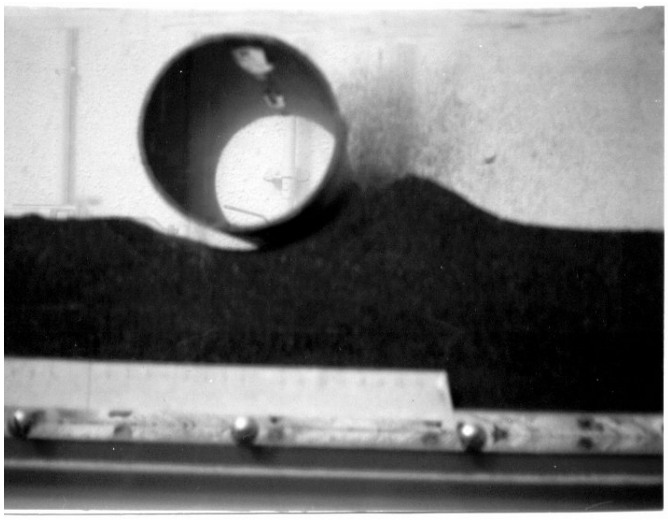
۳-۲- نتایج مدل فیزیکی

فرآیند آبشستگی در اطراف خطوط لوله متأثر از پارامترهای مختلفی نظیر قطر لوله، عمق آب، سرعت جریان، دانه‌بندی و... می‌باشد. در ادامه، تأثیر پارامترهای عمده روی فرآیند آبشستگی در قالب نمودارهایی نشان داده شده است. در جدول (۱) مشخصات آزمایش‌های انجام شده، ارائه گردیده است. در این جدول U= سرعت متوسط جریان آب در کانال می‌باشد که با اندازه‌گیری دبی جریان و تقسیم آن بر مقطع کانال درست در بالا دست لوله تعیین شده است، U_f = سرعت اصطکاکی در روی بستر که با توجه به معادله *Colebrook -White* (۲۳) محاسبه شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-25]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1385.3.5.3.5]



شکل ۹- مشخصات کانال مورد استفاده جهت انجام آزمایش‌ها



شکل ۱۰- خروج سریع مخلوطی از آب وماسه از زیر لوله در آستانه شروع آبشستگی

جدول ۱- مشخصات آزمایش‌های انجام شده

Test no.	*h (mm)*	*D (mm)*	*U (cm/s)*	*U_f (cm/s)*	*θ*	*Re*	*Fr*	*S/D*
O1	150	62.75	20.26	1.185	0.020	12,713	0.17	0.35
O2	150	62.75	18.63	1.090	0.017	11,690	0.15	0.31
O3	140	62.75	24.61	1.440	0.0296	15,443	0.21	0.39
O4	150	110.5	51.82	2.800	0.112	57,261	0.43	0.46
O5	170	110.5	14.806	0.800	0.0091	16,361	0.11	0.11
O6	170	110.5	52.75	2.850	0.116	58,289	0.41	0.47
O7**	140	62.75	25.92	1.156	0.033	16,265	0.22	0.59
O8***	140	62.75	24.10	1.410	0.028	15,123	0.21	0.59
O9****	140	62.75	24.40	1.428	0.029	15,311	0.21	0.51

** لوله‌های موازی به هم چسبیده , *** لوله‌های موازی که فاصله بین آنها برابر قطر لوله می‌باشد.

**** لوله‌های موازی که فاصله بین آنها دو برابر قطر لوله می‌باشد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-25]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1385.3.5.3.5]

$$\frac{U}{U_f} = 8.6 + 2.5\,ln(\frac{D}{2.5k_b}) \qquad (۲۳)$$

که در آن داریم: D = قطر لوله و k_b = زبری بستر می‌باشد که در این جا $2.5d_{50}$ در نظر گرفته شده است [۹]. پارامتر پایداری بستر (θ) از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\theta = \frac{U_f^2}{g(s-1)d_{50}} \qquad (۲۴)$$

که در آن s= چگالی نسبی ماسه بستر و g= شتاب جاذبه است.

همچنین اعداد رینولدز و فرود از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$Re = \frac{UD}{\upsilon} \qquad (۲۵)$$

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gh}} \qquad (۲۶)$$

که در آنها داریم: D = قطر لوله، υ = ویسکوزیته سینماتیکی آب و h= عمق آب در بالا دست لوله می‌باشد. همچنین S = عمق آبشستگی متناظر با حالت تعادل است که در مبدأ مختصات اندازه‌گیری شده است.

۳-۲-۱- تأثیر قطر لوله بر نیمرخ آبشستگی

یکی از مهمترین پارامترهایی که نقش تعیین کننده‌ای روی مشخصات نیمرخ آبشستگی بستر دارد، قطر لوله می‌باشد. همان طور که در شکل (۱۱) نشان داده شده است، با افزایش قطر لوله، مشخصات نیمرخ بستر مربوط به حالت تعادل فرآیند آبشستگی تغییر یافته و پارامترهایی از قبیل بیشترین عمق آبشستگی، طول گودال آبکند در بالادست و پایین‌دست افزایش می‌یابند.

با توجه به نمودار (۱۱) می‌توان چنین بیان کرد که به ازای یک سرعت ثابت، تغییرات عمق آبشستگی حالت تعادل با قطر لوله تقریباً خطی است.

$$S = 0.5D \qquad (۲۵)$$

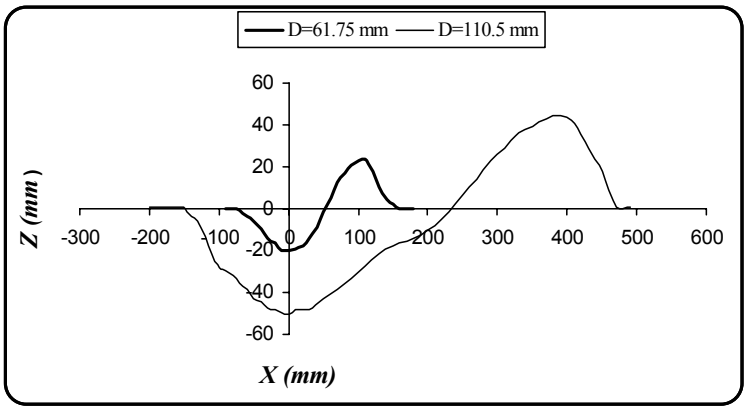
از سوی دیگر با توجه به مشاهدات عینی به عمل آمده می‌توان چنین نتیجه گرفت که در حین فرآیند آبشستگی، تغییرات نیمرخ بستر در جهت قائم بسیار سریعتر از تغییرات آن در جهت طولی می‌باشد. همچنین با افزایش قطر لوله مدت زمان بیشتری برای رسیدن به حالت تعادل صرف می‌شود. در شکل (۱۲) نمونه‌ای از الگوی آبشستگی در اطراف لوله منفرد نشان داده شده است.

۳-۲-۲- تأثیر سرعت جریان بر عمق آبشستگی تعادل

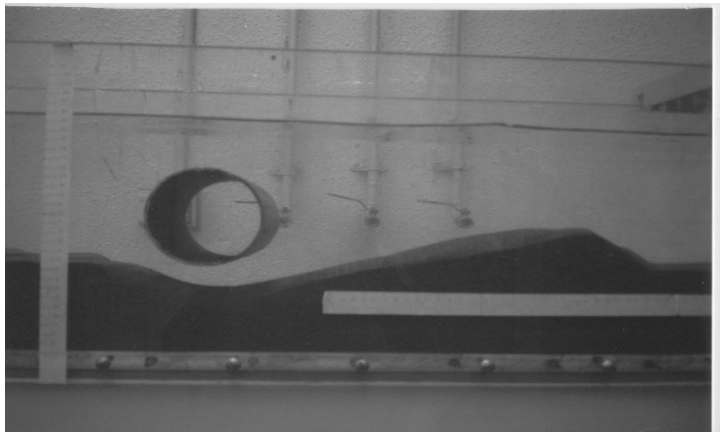
در ادامه برای مطالعهٔ اثر سرعت جریان بر عمق آبشستگی تعادل در زیر لوله از پارامتر پایداری بستر استفاده شده است. با توجه به رابطه (۲۴)، وقتی که مشخصات مواد رسوبی بستر تغییر نکند، تغییرات پارامتر پایداری بستر وابسته به تغییرات سرعت اصطکاکی نزدیک بستر و به تبع آن سرعت جریان در کانال می‌باشد. در شکل (۱۳) نتایج مربوط به تأثیر پارامتر پایداری بستر روی عمق آبشستگی نسبی آورده شده است.

در این قسمت، θ_{cr}= مقدار بحرانی پارامتر پایداری بستر بوده که با توجه به مشخصات دانه‌های رسوب بستر برابر ۰/۰۳۳ می‌باشد. با توجه به این نمودار مشاهده می‌شود که در شرایط آب زلال یعنی $\theta \le \theta_{cr}$ تغییرات عمق آبشستگی نسبی S/D، نسبت به پارامتر پایداری بستر چشمگیر بوده و وقتی که $\theta > \theta_{cr}$ می‌باشد (در شرایط بستر فعّال)، تأثیر پارامتر پایداری روی عمق آبشستگی ضعیف می‌گردد. به عبارت دیگر وقتی که مقدار سرعت جریان فراتر از مقدار سرعت بحرانی باشد، افزایش هرچه بیشتر سرعت جریان تغییرات محسوسی را در عمق آبشستگی حالت تعادل ایجاد نمی‌کند و همان طور که مشاهده می‌شود در محدودهٔ $\theta > \theta_{cr}$ منحنی به صورت مجانب در می‌آید.

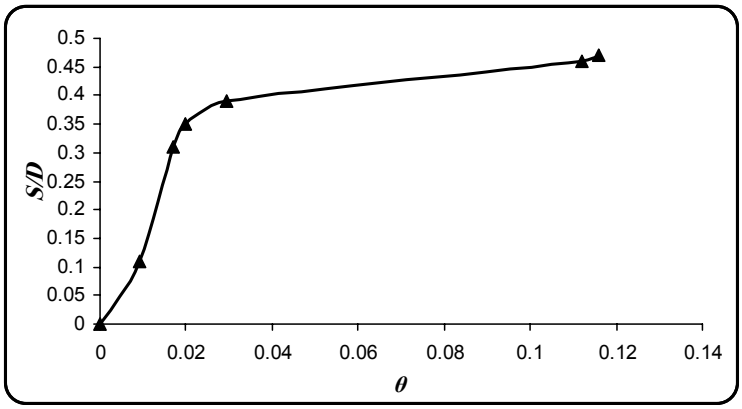
[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-25]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1385.3.5.3.5]



شکل ۱۱- تأثیر قطر لوله روی مشخصات نیمرخ آبشستگی



شکل ۱۲- نیمرخ بستر متناظر با حالت تعادل برای لوله منفرد



شکل ۱۳- تأثیر سرعت جریان روی عمق آبشستگی نسبی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-25]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1385.3.5.3.5]

۳-۲-۳- الگوی آبشستگی در اطراف لوله‌های مرکب موازی

در گروه دوم از آزمایش‌های سری اول به بررسی الگوی آبشستگی در اطراف خطوط لوله دوتایی (موازی) پرداخته شده است. در این حالت فاصله خطوط لوله از همدیگر عامل تعیین کننده‌ای می‌باشد که بر الگوی آبشستگی تأثیر می‌گذارد. جهت بررسی تأثیر این مورد روی نیمرخ و عمق آبشستگی در اطراف خطوط لوله دوتایی، سه آزمایش ترتیب داده شد که مشخصات آنها در جدول (۱) آورده شده است.

نتایج به دست آمده از این سری آزمایش‌ها در شکل (۱۴) نشان داده شده اند. با توجه به این شکل دیده می‌شود وقتی که فاصلهٔ بین لوله‌ها بیش از قطر لوله باشد تأثیر آنها بر همدیگر کاهش می‌یابد. نکته دیگری که در این نمودار جلب توجه می‌کند این است که در مورد لوله‌های موازی به هم چسبیده عمق حداکثر آبشستگی اندکی کوچکتر از حالتی است که فاصلهٔ لوله‌ها برابر قطر لوله می‌باشد. بنابراین می‌توان چنین بیان کرد که کاهش عمق آبشستگی ناشی از کاهش فرآیند گردابه فکنی (*Vortex shedding*) و به دنبال آن کاهش فرآیند فرسایش گردابی می‌باشد. همچنین می‌توان دریافت که فاصلهٔ کوچک میان لوله‌ها (کمتر از نصف قطر لوله‌ها) به طور چشمگیری باعث کاهش گردابه فکنی شده و اثر گردابه‌های چرخکی بر عمق آبشستگی کاهش می‌یابد.

مکانیسم فرآیند آبشستگی در اطراف لوله‌های چندتایی اندکی متفاوت با لوله منفرد می‌باشد. در ادامه با توجه به شکل‌های (۱۵) تا (۱۷)، مکانیسم فرآیند آبشستگی در مورد لوله‌های چندتایی تشریح می‌شود. هنگامی که لوله‌ها به هم چسبیده باشند تقریباً به صورت جسمی واحد عمل نموده و آبشستگی به طور همزمان در زیرآنها شروع شده و مشابه حالت لوله منفرد تا مرحله تعادل پیش می‌رود. البته در این جا قعر گودال آبشستگی پهن‌تر از گودال آبکند مربوط به لوله منفرد است. اگر لوله‌ها از همدیگر فاصله داشته باشند (کمتر از دو برابر قطر لوله‌ها)، در ابتدا فرآیند آبشستگی در اطراف لوله بالا دست شروع شده و مواد رسوبی خارج شده لوله پایین دست را می‌پوشانند. وقتی که عمق گودال آبشستگی در زیر لوله بالا دست به مقدار نهایی خود رسید، فرآیند آبشستگی در اطراف لوله دوم شروع می‌شود، ولی در حالتی که فاصلهٔ لوله‌ها از همدیگر بیش از دو برابر قطر لوله باشد هر یک از آنها به صورت یک لوله منفرد عمل نموده و فرآیند آبشستگی تقریباً به طور همزمان در اطراف آنها شروع خواهد شد [۱۳].

با توجه به مطالب بیان شده می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که در عمل بهتر است لوله‌های موازی مرکب تا حد امکان نزدیک به هم اجرا شوند، زیرا در این حالت علاوه بر کاهش مقدار بیشینه عمق آبشستگی، لوله در اثر ضربات مواد رسوبی خارج شده از زیر لوله بالا دست آسیب نمی‌بینند. از لحاظ اقتصادی نیز منطقهٔ محدودتری از دریا جهت طرح و اجرا مورد استفاده قرار خواهد گرفت که از نظر زیست محیطی نیز مطلوب می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این بخش مقایسه‌ای بین نتایج عددی به دست آمده و نتایج آزمایشگاهی و فرمول‌های تجربی ارائه شده توسط پژوهشگران پیشین انجام شده است، در شکل (۱۸) نتایج به دست آمده از مدل عددی تهیه شده در این تحقیق (*SFSL2 , SFSL1*) و فرمول‌های پیشنهادی سایر پژوهشگران ارائه شده است. این فرمول‌ها عبارتند از [۵]:

فرمول کجلدلسن (۲۶)

$$S = 0.972\left(\frac{V^2}{2g}\right)^{0.2} D^{0.8}$$

فرمول ابراهیم و نالری برای آب زلال (۲۷- الف)

$$\frac{S}{D} = 4.706\left(\frac{V}{V_c}\right)^{0.89}\left(\frac{V}{\sqrt{gy_0}}\right)^{1.43} + 0.06$$

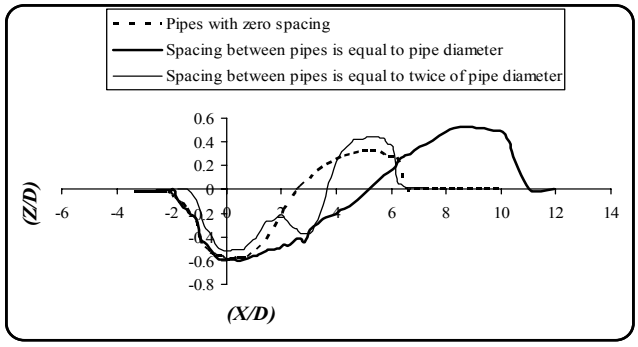
فرمول ابراهیم و نالری برای بستر فعال (۲۷- ب)

$$\frac{S}{D} = 0.084\left(\frac{V}{V_c}\right)^{-0.3}\left(\frac{V}{\sqrt{gy_0}}\right)^{-0.16} + 1.33$$

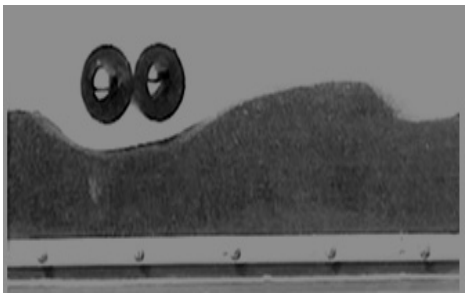
فرمول پیشنهادی دانشگاه دلف (۲۸)

$$S = 0.929\left(\frac{V^2}{2g}\right)^{0.26} \times D^{0.78} \times d_{50}^{-0.04}$$

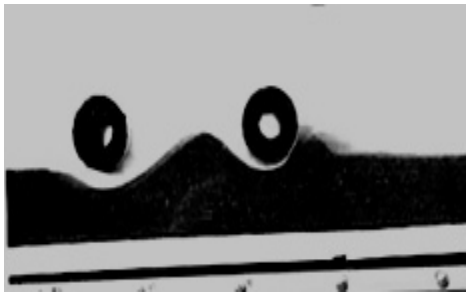
[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-25]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1385.3.5.3.5]



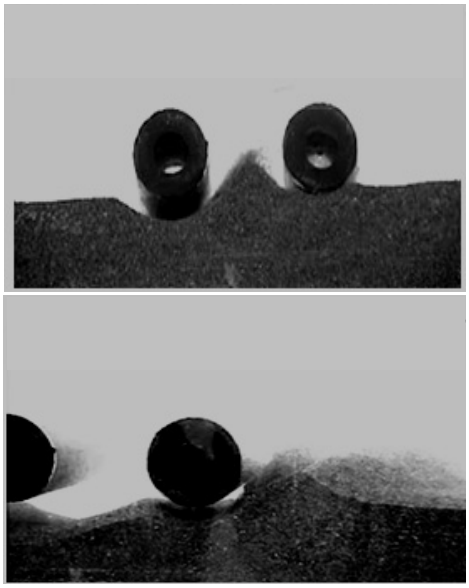
شکل ۱۴- نیمرخ‌های آبشستگی حالت تعادل در اطراف لوله‌های موازی با فاصله‌های مختلف از همدیگر(Test no 7,8,9)



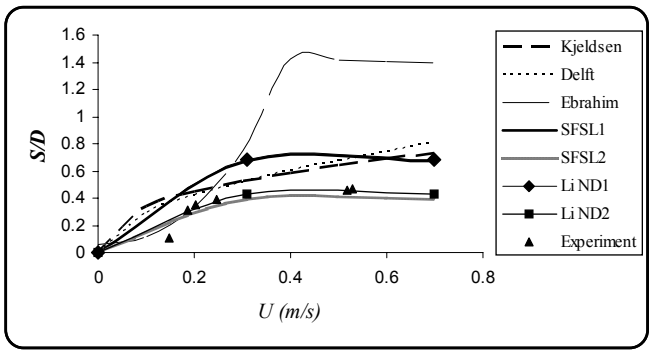
شکل ۱۵- الگوی آبشستگی در اطراف لوله‌های به هم چسبیده



شکل ۱۶- الگوی آبشستگی در اطراف لوله‌هایی با فاصله دو برابر قطر لوله از همدیگر



شکل ۱۷- الگوی آبشستگی در اطراف لوله‌های موازی با فاصله برابر قطر لوله از همدیگر



شکل ۱۸- مقایسه عمق آبشستگی نسبی محاسبه شده توسط روابط تجربی، مدل‌های عددی لی و چن، نتایج آزمایشگاهی و عددی ارائه شده در این پژوهش

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-25]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1385.3.5.3.5]

در این نمودار U= سرعت دست نخورده جریان می‌باشد و $SFSL1$, $SFSL2$ به ترتیب مدل‌های عددی مربوط به سرعت متوسط و سرعت مرزی ارائه شده در این تحقیق می‌باشند. در سه رابطه آخر از روابط بالا می‌توان دریافت که با افزایش سرعت جریان بیشینه عمق آبشستگی نیز افزایش می‌یابد که مغایر با نتایج آزمایشگاهی و عددی ارائه شده است. به عبارت دیگر در فرمول‌های ارائه شده در بالا عمق متناظر حالت تعادل وجود ندارد که این مورد در تضاد با مکانیسم پدیده آبشستگی می‌باشد. سرانجام بر اساس نتایج بدست آمده از انجام آزمایش‌های عددی و فیزیکی می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد:

۱- در بخش مدل‌سازی عددی برای محاسبه بیشینه عمق آبشستگی در زیر لوله، مدلی ریاضی بر اساس معادله دوبعدی لاپلاس ارائه گردید. این مدل اندرکنش میان جریان یک سویه، خط لوله و بستر دریا را بررسی می‌کند.

۲- مدل عددی $SFSL$ در شرایط آب زلال عمق آبشستگی در زیر خطوط لوله را بدون استفاده از فرمول‌های نیمه تجربی دیگر محاسبه می‌نماید.

۳- به ازای سرعت مشخصه‌های مختلف، مدل عددی مزبور مقادیر متفاوتی را برای بیشینه عمق آبشستگی ارائه می‌نماید، اما با توجه به مقایسه‌ای که بین نتایج عددی به دست آمده و نتایج تجربی صورت گرفته است می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که اگر سرعت متوسط بین لوله و بستر فرسایش یافته به عنوان سرعت مشخصه در نظر گرفته شود، نتایج به دست آمده از مدل تطابق خوبی با نتایج تجربی خواهند داشت.

۴- با توجه به نتایج آزمایشگاهی و عددی ارائه شده در این تحقیق و کارهای انجام شده توسط پژوهشگران پیشین، حداکثر عمق آبشستگی دقیقاً در زیر مرکز لوله رخ می‌دهد.

۵- برای استفاده عملی از مدل عددی ارائه شده باید به سرعت بحرانی نزدیک بستر U_{*b0} توجه کرد، زیرا U_{*b0} تابعی از اندازهٔ دانه رسوب و عمق آب می‌باشد. به هر حال باید توجه داشت که بسته به بافت بستر، مشخصات رسوب بر روی مقادیر U_{*b0} مؤثرخواهند بود و حتی در عمل تأثیر جانوران زنده نیز باید در نظر گرفته شود.

۶- مدل عددی $SFSL$ پیش‌بینی خوبی از قسمت بالادست گودال آبشستگی ارائه داده ولی در ارائه شیبی ملایم برای پایین دست گودال توانایی مناسبی را نشان نداده است. علت این امر آن است که مدل‌های عددی تهیه شده بر اساس نظریه تابع پتانسیل جریان نمی‌توانند به خوبی فرآیند گردابه‌فکنی ایجاد شده در پایین دست لوله را مدل نمایند.

۷- با افزایش قطر لوله عمق آبشستگی تعادل، حجم گودال آبکند و مقیاس زمان آبشستگی افزایش می‌یابند.

۸- نتایج آزمایشگاهی حاکی از آن است که در تمامی موارد گودال آبشستگی دارای شیبی تند در بالادست و شیبی ملایم در پایین دست می‌باشد.

۹- عمق نسبی آبشستگی حالت تعادل با افزایش عدد فرود، افزایش می‌یابد به عبارتی با کاهش عمق آب، عمق آبشستگی حالت تعادل افزایش می‌یابد.

۱۰- در شرایط بستر فعّال تأثیر پارامتر پایداری بستر روی عمق آبشستگی ناچیز است اما در شرایط آب زلال تأثیر این پارامتر روی عمق آبشستگی چشمگیر بوده و باید در نظر گرفته شود.

۱۱- برای محاسبه عمق آبشستگی حالت تعادل در زیر خطوط لوله می‌توان از روابط زیر استفاده کرد.

$$\frac{S}{D} \approx 0.50 \quad \text{برای} \quad \theta = \theta_{cr} \quad \text{و}$$

$$\frac{S}{D} = 0.6 \pm 0.1 \quad \text{برای} \quad \theta \geq \theta_{cr}$$

۱۲- وقتی که فاصلهٔ بین لوله‌ها بیش از قطر لوله باشد تأثیر آنها بر همدیگر کاهش می‌یابد. همچنین در مورد لوله‌های موازی به هم چسبیده، عمق حداکثر آبشستگی اندکی کوچکتر از حالتی است که فاصلهٔ لوله‌ها برابر قطر لوله می‌باشد. از این رو می‌توان چنین بیان کرد که کاهش عمق آبشستگی از کاهش فرآیند گردابه فکنی و به دنبال آن کاهش فرآیند فرسایش گردابی ناشی می‌شود. به طور کلی ملاحظه شد که فاصلهٔ کوچک میان لوله‌ها (کمتر از نصف قطر لوله‌ها) به طور چشمگیری باعث کاهش گردابه فکنی شده و

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-25]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1385.3.5.3.5]

اثر گردابه‌های چرخکی بر عمق آبشستگی کاهش می‌یابد.

۱۳- شرط مرزی جریان در بستر (معادله ۱۶) به دلیل نفوذ مقدار کمی از آب به درون محیط ماسه‌ای می‌تواند اندکی تعدیل یابد، ولی مقدار مذکور در شرایط کانال آزمایشگاهی بدلیل اشباع بودن محیط و نفوذناپذیری کف کانال به مقدار حداقل می‌رسد.

۱۴- فرمول‌های تجربی ارائه شده، مقادیر مختلفی را برای بیشترین عمق آبشستگی ارائه می‌نمایند.

۵- مراجع

۱- حسینی، د. (۱۳۸۴)، بررسی پدیده آبشستگی موضعی در اطراف خطوط لوله فراساحلی تحت اثر جریانهای ماندگار با استفاده از مدل‌های عددی و فیزیکی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند.

۲- حسینی، د. حکیم‌زاده، ح. و غیاثی، ر. (۱۳۸۵)، مقایسه الگوی آبشستگی اطراف لوله‌های منفرد و مرکب عمود بر جریانهای فراساحلی، هفتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران (ICCE7th)، دانشگاه تربیت مدرس تهران.

3-Li, F., Cheng, L., Numerical model for local scour under offshore pipelines, 1999 , J. Hydraulics Engineering, ASCE, Vol. 125, No. 4, 400-406.

4-Li, F., Cheng, L., Prediction of lee-wake scouring of pipelines in currents, 2001 , J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 127, No. 2, 106-112.

5-Sumer, B. M., 2004 , Physical and mathematical modelling of scour, Proc., 2th ICSE, Singapore.

6-Chiew, Y.M., "Prediction of maximum scour depth at submarine pipelines." J. Hyd. Engrg, ASCE, Vol. 117, No 4, 1991, pp 452-466.

7-Brors, B., Numerical modeling of flow and scour at pipelines, 1999 , J. Hydraulics Engineering, ASCE, Vol. 125, No. 5, 511-523.

8-Sumer, B.M., Truelsen, C., Sichmann, T. and Fredsoe, J., "Onset of scour below pipelines and self buria." Coast. Engrg, ASCE, Vol. 42, No 4, 2001, pp 313-335.

9-Sumer, B.M. and Fredsoe, J., "The mechanics of scour in the marine environment." World Scientific, Vol. 17, 2002.

10-Versteeg, H.K. and Malalasekera, W., "An introduction to Computational Fluid Dynamics, The Finite Volume Method" Pearson Prentice Hall, Longman Group Ltd, 1995.

11-Hirsch, C., "Numerical Computation of Internal and External Flows, Fundamental of Numerical Discretization" John Wiley & Sons Publication, Vol. 1, 1991.

12-Hosseini, D., Hakimzadeh, H. and Ghiassi, R., Numerical and experimental modeling of scour around submarine pipeline due to currents, 2005 , ASCE, Pipeline 5, Texas.

13-Hosseini, D., Hakimzadeh, H. and Ghiassi, R., Scour below submarine pipeline due to currents, 2004 ICSE 2004, 53-PIP-A1073, Singapore.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-25]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1385.3.5.3.5]