

مطالعه آزمایشگاهی فرآیند خوددغنی لوله مستغرق روی بستر فرسایش پذیر در جریان دائمی

جعفر مهرآبادی^۱، بیژن قهرمان^{۲*} و کاظم اسماعیلی^۳

۱- دانشجوی دکتری سازه های آبی، پردیس بین الملل دانشگاه فردوسی مشهد.

۲- نویسنده مسئول، استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد bijangh@um.ac.ir

۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۲/۲۷

تاریخ پذیرش: ۹۵/۳/۸

چکیده

یکی از مسائل قابل توجه در اجرای پروژه های انتقال آب از طریق خطوط لوله در بسترهای فرسایش پذیر، ایجاد شرایط ایمن برای خط لوله اجرا شده است. مطالعات نشان می دهد که نصب صفحه ای به نام اسپویلر در بالای خط لوله واقع بر بستر فرسایش پذیر منجر به افزایش مقدار فرسایش در اطراف لوله و تحریک خوددغنی آن می شود. عموماً مطالعات درباره اسپویلر با لوله ثابت صورت پذیرفته است اما در واقعیت هنگامی که حفره آبشستگی زیر لوله به اندازه کافی عمیق شود لوله در اثر وزن شروع به پایین رفتن می کند، در این هنگام لوله به کف حفره آبشستگی رسیده و فرآیند فرسایش متوقف می شود و پس از آن خط لوله با شن و ماسه پوشیده می شود. در این پژوهش به بررسی فرآیند خوددغنی لوله با جابجایی طبیعی در اثر وزن لوله پرداخته شد و مشخص گردید جابجایی لوله، عمق آبشستگی را تا ۵۰ درصد نسبت به لوله ثابت کاهش و همچنین سبب تغییر پروفیل بستر می شود. با نصب اسپویلر روی لوله در بستر ریزدانه میانگین ۴۰ درصد و در بستر درشت دانه میانگین ۹۰ درصد عمق دفن نسبت به حالت لوله صاف افزایش می یابد.

کلید واژه ها: آبشستگی، لوله مستغرق، اسپویلر، خوددغنی.

مقدمه

شبکه های وسیع انتقال نفت خام، گاز طبیعی، آب و فاضلاب در بستر دریاها می باشند که برای محافظت از تخریب احتمالی خطوط لوله در اثر انبوه نیروهای هیدرودینامیکی جریان و موج یا فعالیت های انسانی، لوله ها با پوشش بتن پوشیده می شوند یا در عمق مناسب با حفر تراشه دفن می شوند. خط لوله ای که بر بستر طبیعی رودخانه یا دریا قرار گرفته، قابلیت آن را دارد که به علت آبشستگی موضعی دچار خوددغنی شود. فرآیند خوددغنی خطوط لوله انتقال ممکن است به طور طبیعی رخ دهد؛ ولی می توان این فرآیند را با تسریع گستردگی و نرخ آبشستگی، بهبود بخشید. از شیوه های مدرن تحریک خوددغنی مصنوعی، استفاده از صفحاتی است که در بالای خط لوله نصب شده و با نام اسپویلر شناخته می شوند (هولزبرگن^۱، ۱۹۸۴ و ۱۹۸۶). زمانی که لوله به طور مستقیم روی بستر دریا قرار می گیرد، در اثر برخورد جریان یک طرفه با لوله چندین گردابه در طرفین آن تشکیل می شود (شکل ۱)، جریان در برخورد به بالادست لوله سرعت آن برابر صفر می شود و نقطه ایستایی کامل تشکیل می گردد که باعث افزایش فشار هیدرودینامیکی در بالادست لوله می شود. از طرفی در پایین دست لوله به دلیل وجود جدایش جریان از لوله و تشکیل چرخابه ها باعث

ایجاد فشار هیدرودینامیکی منفی می شود. این گرادیان فشار باعث افزایش شدت جریان در زیر لوله شده و در نتیجه باعث تشدید سرعت جریان و سبب ایجاد جریان نشستی در رسوبات زیر لوله می شود (چیو^۲، ۱۹۹۰). چیو (۱۹۹۰) رگاب را عامل اصلی در ایجاد آبشستگی در زیر خطوط مستغرق دانست و نشان داد که با دفن لوله توزیع فشار اطراف لوله کاهش می یابد (شکل ۲).

بایکر و لیو بستین^۳ (۱۹۸۴) بیان داشتند که سه نوع فرسایش اصلی در اطراف یک خط لوله مستغرق وجود دارد که منجر به آبشستگی می شوند. این سه فرسایش شامل فرسایش آغازین (که در سمت بالادست لوله رخ می دهد و توسط یک سازند گردابی بالادست لوله ایجاد می شود)، فرسایش دنباله ای (که در سمت پایین دست لوله اتفاق می افتد و توسط ظهور دوباره جریان اصلی در طول و به دنبال جریان آشفته پایین دست لوله ایجاد می شود) و فرسایش تونلی (که در زیر لوله رخ می دهد و نتیجه مستقیم افزایش سرعت در زیر لوله در مقایسه با سرعت غیر آشفته) می باشد. آزمایشهای کیلدرن و همکاران^۴ (۱۹۷۳) نشان می دهد که عمق حفره آبشستگی در پایین دست خط لوله که روی بستر اصلی ثابت شده تابعی خطی از قطر لوله است به طوری که عمق

3- Chiew

4- Bijker and Leeuwenstein

5- Kjeldsen *et al.*

1- Hulsbergen

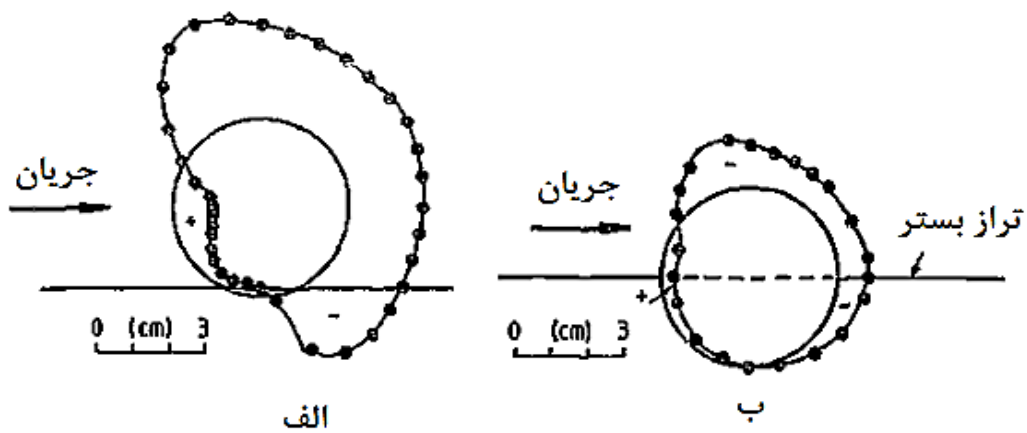
مهرآبادی و همکاران: مطالعه آزمایشگاهی فرآیند خوددغنی لوله مستغرق...

ضریب برآ و تمایل به حرکت رو به پایین و افزایش تنش برشی روی بستر می‌شود. اسپویلر ایجاد یک انسداد بزرگ برای جریان ورودی کرده، سبب هدایت بیشتر نیروهای جریان رو به پایین در زیر لوله شده و در نتیجه باعث افزایش عمق آبشستگی می‌شود (فاز فرسایش).

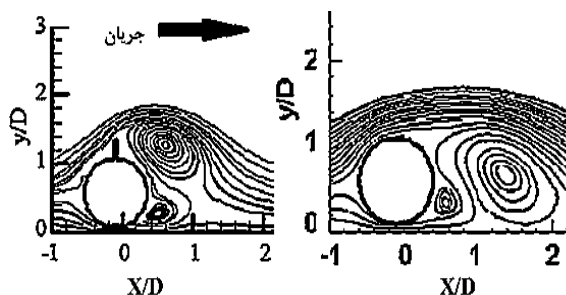
حفره آبشستگی طبیعی کوچک‌تر از قطر خط لوله بوده و در مواردی که خود دغنی موردنظر باشد، نیاز به تحریک مصنوعی فرسایش ضروری می‌باشد. برای تحریک خود دغنی مصنوعی می‌توان از صفحه نصب شده در بالای خط لوله به نام اسپویلر یا باله استفاده کرد. اسپویلر سبب افزایش نیروی پسا، منفی شدن



شکل ۱- سه گردابه تشکیل شده اطراف لوله (چیو، ۱۹۹۰)



شکل ۲- توزیع فشار اطراف لوله ی روی بستر و لوله ی نیمه مدفون (چیو، ۱۹۹۰)



شکل ۳- خطوط جریان اطراف لوله صاف و دارای اسپویلر (زینلی، ۱۳۸۷)

راستای خط مرکزی سیستم خط لوله و اسپویلر و نه صرفاً بر روی خط لوله صورت می‌گیرد (شکل ۳). اسپویلر در دو نوع سخت و ارتجاعی استفاده می‌شود. آزمایش‌های یانگ و همکاران^۴ (۲۰۱۲) نشان می‌دهد که اگر چه اسپویلر سخت می‌تواند عمق آبشستگی را افزایش دهد و در نتیجه تسریع در خوددافی لوله شود، ولی تأثیر قابل توجهی بر توپوگرافی بالادست و بستر پایین دست با تشکیل ریز تپه‌های شن و ماسه‌ای می‌شود. از سوی دیگر، صفحات لاستیکی نه تنها می‌تواند به طور قابل توجهی افزایش عمق آبشستگی را سبب شوند، بلکه اثر کمی در بستر بالادست و پایین دست دارند.

در کلیه مطالعات عددی یا آزمایشگاهی صورت گرفته تاکنون درباره اسپویلر، لوله مورد آزمایش به فلوم ثابت بوده و آبشستگی در حالتی که لوله هیچ گونه جابجایی نداشته بررسی شده است و فقط به بررسی تأثیر اسپویلر بر عمق آبشستگی و اندازه گیری این عمق پرداخته شده است (فقط فاز فرسایش). تحقیقات در حالت جابجایی لوله صاف (بدون اسپویلر) نیز نادر است. در مطالعه فردسو و همکاران^۵ (۱۹۸۸) و لیوئیستین^۶ (۱۹۸۵) برای بررسی آبشستگی زیر لوله صاف در حالات موج و جریان یک طرفه شبیه سازی جابجایی لوله بوسیله یک دستگیره که با دست و با سرعت های مختلف لوله را به داخل بستر ماسه ای جابجا می‌کرد (جابجایی مصنوعی) صورت پذیرفت. با مقایسه آبشستگی در حالت ثابت با حالت جابجایی لوله مشخص شد آبشستگی در حالت جابجایی لوله به علت نزدیک شدن لوله به بستر و افزایش فرسایش تونلی بیشتر می‌شود و با افزایش سرعت جابجایی پروفیل آبشستگی نیز تغییر می‌کند و عمق آن افزایش می‌یابد. چنگ^۷ و چو^۸ (۲۰۰۳) و ژائو و فرناندو^۹ (۲۰۰۸) با استفاده از مدل‌های عددی و نتایج تحقیقات فردسو و همکاران (۱۹۸۸) به برسی عددی پدیده جابجایی لوله پرداختند. شان و همکاران^۹ (۲۰۱۵) به بررسی عددی خوددافی لوله با استفاده از اسپویلر در حالت جابجایی به کمک نرم افزار

هنگامی که حفرة آبشستگی زیر لوله به اندازه کافی عمیق شد لوله شروع به پایین رفتن می‌کند (فاز انتقالی). در این هنگام لوله به کف حفرة آبشستگی رسیده و فرآیند فرسایش متوقف می‌شود. پس از آن خط لوله با شن و ماسه پوشیده می‌شود (فاز رسوبی). تحقیقات گسترده‌ای توسط آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه دلف^۱ هلند در سال ۱۹۸۶ برای بررسی اثر اسپویلر بر نیروهای هیدرودینامیکی و تأثیر بر خوددافی لوله انجام شد. پس از آن، اولین کاربرد آزمایشی در دریای شمال در سال ۱۹۸۸ انجام شد و در ابتدای سال ۱۹۸۹ اسپویلر کاربرد تجاری پیدا کرد. نمونه هایی از استفاده در مقیاس وسیع از این شیوه، بکارگیری آن در خط لوله دریای شمال و در چین در خلیج هانزو در شانگهای می‌باشد.

چو^۲ (۱۹۹۲) تأثیر جهت اسپویلر در آبشستگی ناشی از جریان را مورد بررسی قرار داد و بیان داشت اسپویلر قائم روی لوله و باله با زاویه ۱۲۰ درجه نسب به محور عمودی لوله بیشترین آبشستگی را سبب می‌شوند. چو (۱۹۹۳) نشان داد که اسپویلر می‌تواند به افزایش هر دو آبشستگی زیرین (تونل فرسایش) و پایین دست (آبشستگی دنباله‌ای) خط لوله منجر شود. بایکر^۳ (۲۰۰۰) به ارائه نتایج حاصله از بررسی‌های آزمایشگاهی و میدانی خط لوله دریای شمال با استفاده از باله پرداخت. بر این اساس:

- خوددافی بدون استفاده از اسپویلر در خاک‌های ماسه‌ای با حداکثر ۲۰ درصد سیلت قابل انجام است، اما با استفاده از اسپویلر تا ۴۰-۵۰ درصد سیلت نیز خوددافی صورت می‌گیرد.

- بسترهای حاوی مقدار قابل توجه رس و شن برای خوددافی مناسب نیستند.

- استفاده از این روش دارای فواید محیط زیستی، صرفه جویی در هزینه‌ها و پایداری بیشتر خط لوله حتی در طوفان شده است. زینلی (۱۳۸۷) با بررسی عددی جریان اطراف لوله مستغرق بیان داشتند که در حالت خط لوله صاف گردابه‌های اولیه جریان در مرکز خط لوله و در پایین دست شکل می‌گیرند، در حضور اسپویلر گردابه‌های اولیه جریان عمدتاً در ناحیه دنباله اسپویلر شکل می‌گیرد. گسترش گردابه‌های اولیه جریان به سمت پایین دست در

4-Yang *et al.*

5-Fredsøe *et al.*

6- Leeuwestein

7- Chen and Chew

8- Zhao and Fernando

9 - Shan *et al.*

1- Delft Hydraulics Laboratory

2- Chiew

3- Bijker

استفاده از ماسه به قطر متوسط $d_{50} = 0.25$ و انحراف معیار $1/49$ میلی متر و نمونه دوم رسوب، ماسه درشت تر به قطر متوسط $d_{50} = 1.2$ و انحراف معیار $1/5$ میلی متر استفاده شد.

عمق جریان آب در کانال یکی از کمیت‌هایی است که اگر به درستی انتخاب نشود حداکثر عمق آبستگي را تحت تأثیر آن قرار می‌گیرد. طبق نظر چپو (۱۹۹۱) اگر عمق آب بیشتر از $4D$ انتخاب شود تأثیری بر آبستگي زیر لوله (بدون اسپویلر) ندارد کلدسین و همکاران^۴ (۱۹۷۳) عمق آب $3D$ را پیشنهاد کردند. در این پژوهش از عمق آب $\frac{y_n}{D+S} \geq 3$ استفاده شد، که در آن D :

قطر لوله، S : ارتفاع اسپویلر و y_n : عمق نرمال آب در کانال می‌باشد.

شرایط مطالعه در این پژوهش، شرایط آب زلال بوده بنابراین می‌بایست $1 < \frac{V}{V_c}$ باشد که در آن V : سرعت جریان آب و V_c : سرعت بحرانی آستانه حرکت رسوب می‌باشد. ملویل^۵ (۱۹۹۷) برای تعیین سرعت برشی بحرانی به ازای اندازه متوسط دانه‌های بستر و دمای آب 20°C درجه روابط زیر را ارائه نمود که تخمین خوبی برای منحنی شیلدز می‌باشد:

$$U_{*c} = 0.0115 + 0.0125d_{50}^{1.4} \Rightarrow 0.1\text{mm} < d_{50} < 1\text{mm} \quad (2)$$

$$U_{*c} = 0.0305d_{50}^{0.5} - 0.0065d_{50}^{-1} \Rightarrow 1\text{mm} < d_{50} < 100\text{mm} \quad (3)$$

و برای سرعت بحرانی از رابطه زیر (توزیع لگاریتمی سرعت) استفاده نمود:

$$\frac{V_c}{U_{*c}} = 5.75 \log(5.53 \frac{y_0}{d_{50}}) \quad (4)$$

که در آن d_{50} : قطر متوسط ذرات رسوب، y_0 : عمق آب، U_{*c} : سرعت برشی بحرانی می‌باشد.

در این پژوهش سرعت جریان در محدوده $0.8 \sim 0.9 \frac{V}{V_c}$ انتخاب شد تا بستر فرسایش عمومی نداشته باشد. برای برقراری شرایط حداقل عمق آب در آزمایش‌های انجام شده عمق جریان بین 17 تا 20 سانتی متر و دبی جریان در حدود $q = 40$ لیتر بر ثانیه بر متر انتخاب گردید. در آزمایش‌ها از لوله‌های به قطر 2 ، $2/5$ ، 3 ، $3/5$ ، 4 و $4/5$ سانتی متر استفاده شد.

فلوئنت پرداخته و بیان داشتند، سرعت بالاتر در نزدیک بستر به افزایش سرعت دغنی بسیار کمک می‌کند.

بررسی پدیده خوددغنی با استفاده از اسپویلر در حالت جابجایی لوله به صورت طبیعی تاکنون صورت نگرفته است، و به علت ثابت بودن لوله، فازهای انتقالی و رسوبی تاکنون مشاهده و بررسی نشده است. با توجه به نقش تعیین کننده جابجایی لوله در تغییر پروفیل آبستگي، مطالعه پدیده خوددغنی لوله در حالت جابجایی و مشاهده تأثیر واقعی اسپویلر بر عملکرد خوددغنی و پارامترهای مؤثر بر آن ضروری بوده و در این پژوهش به مطالعه آزمایشگاهی این پدیده پرداخته شده است.

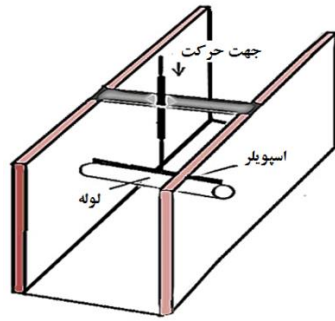
مواد و روش‌ها

آزمایش‌های این پژوهش در آزمایشگاه مدل‌های هیدرولیکی گروه مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد انجام شده است. دبی جریان در یک مدار بسته، برقرار و به روش حجمی اندازه‌گیری شده و با شیر تنظیم که قبلاً میزان باز شدگی آن با اندازه دبی واسنجی و مدرج شده برای کنترل دبی استفاده می‌شود، همچنین برای کنترل سطح آب برای مستغرق شدن لوله، از دریچه‌ای که در پایین دست کانال نصب شده، استفاده می‌شود. اندازه‌گیری عمق جریان به کمک عمق سنج با دقت ± 0.1 میلی متر انجام شده است. در این آزمایش از دو ماسه ریز و درشت با دانه‌بندی یکنواخت برای جلوگیری از پدیده مسلح شدن^۱ بستر استفاده شد. برای تعیین یکنواختی دانه بندی ذرات انحراف معیار هندسی باید از $1/5$ کوچک تر باشد (رابطه ۱). در این حالت مصالح را می‌توان یکنواخت فرض نمود (شفاعی بجستان ۱۳۸۴).

$$1.1 \leq \sigma_g = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}} \leq 1.5 \quad (1)$$

σ_g : انحراف معیار هندسی، d_{16} : قطر ذرات رسوبی که 16% درصد دانه‌ها از آن کوچک تر است و d_{84} : قطر ذرات رسوبی که 84% درصد دانه‌ها از آن کوچک تر می‌باشد.

طبق نظر بروزرز و رادکیوی^۲ (۱۹۹۱) برای جلوگیری از تشکیل ریز تپه ماسه در سرعت‌های نزدیک به آستانه حرکت باید $d_{50} \geq 0.7$ میلی متر باشد اما برای رسوب کوچک تر از مقدار ذکر شده ریز تپه ماسه‌ها در سرعت‌های جریان بیش از $0.6V_c$ تشکیل می‌شوند. برای رفع این مشکل انحراف معیار هندسی ذرات رسوبی باید در محدوده $1/1$ تا $1/5$ باشد. تا در این حالت آبستگي در شرایط آب زلال همانند شرایطی که ایجاد تپه ماسه نمی کند رخ دهد (رادکیوی و اتما^۳، ۱۹۹۹). در تحقیق حاضر از دو نمونه رسوب غیرچسبنده استفاده گردید. نمونه اول رسوب مورد



شکل ۴- نحوه قرارگیری لوله با قابلیت جابجایی

دبی مورد نظر، آزمایش آغاز می شود. تصویر برداری به صورت دوبعدی از مراحل دفن لوله در زمان‌های مختلف از جداره مدرج شده کانال برداشت شده و عمق دفن لوله نسبت به زمان‌های مختلف تعیین می‌شود.

تحلیل ابعادی نشان داد که عمق دفن‌شدگی (d_s) و سرعت دفن‌شدگی تابعی از زمان آبشستگی (T)، اندازه ذرات (d_{50})، قطر لوله (D)، ارتفاع اسپویلر (S)، سرعت جریان یکطرفه (V)، شتاب ثقل (g)، پارامتر شیلدز (θ)، ارتفاع آب (y_n)، چگالی سیال (ρ)، زاویه اسپویلر روی لوله (α)، حالت لوله متحرک یا ثابت (Pos) است:

$$d_s = f(T, d_{50}, D, S, V, \theta, y_n, g, \rho, \alpha, Pos) \quad (5)$$

با استفاده از روش باکینگهام پی رابطه ذیل حاصل شده است:

$$\frac{d_s}{D} = \psi\left(\theta, \frac{y_n}{D+S}, \frac{D+S}{d_{50}}, Re, Fr, Pos, \alpha\right) \quad (6)$$

از پارامترهای عدد رینولدز (Re) به علت آشفتگی جریان و زاویه اسپویلر (به علت استفاده از زاویه ثابت) و عدد فرود (Fr) به علت تغییرات کمتر چشم‌پوشی شده است. تأثیر پارامتر شیلدز (θ) و زمان آبشستگی (T) نیز به صورت مقیاس بی بعد که در ادامه به توضیح آن پرداخته شده مورد استفاده قرار گرفته است.

تأثیر زمان بر دفن‌شدگی

مطابق با معیار اتما^۱ (۱۹۸۰) مدت زمانی که تغییرات عمق آبشستگی در یک بازه زمانی چهار ساعته کمتر از یک میلی‌متر باشد جهت مدت زمان آزمایش انتخاب می‌شود. آزمایش‌های مقدماتی نشان داد که آبشستگی در زمان‌های اولیه شروع جریان زیاد بوده و با گذشت زمان نرخ آبشستگی شدت کاهش می‌یابد چنان که این فرآیند بعد از حدود ۳/۵ ساعت تقریباً به صفر نزدیک می‌شود.

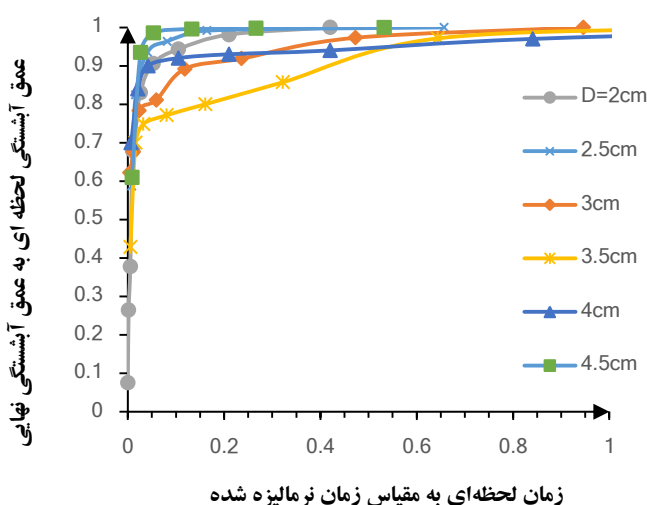
برای امکان جابجایی لوله و امکان شبیه‌سازی فرآیند خوددفعی از لوله توپر آهنی با وزن مخصوص ۷/۸۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب استفاده شد. لوله مطابق شکل (۴) در داخل فلوم نصب شده به طوری که امکان حرکت آزادانه در جهت قائم در اثر وزن فراهم باشد. در حالت لوله متحرک از دو ارتفاع اسپویلر $S=0$ و $S = \frac{D}{2}$ (بدون اسپویلر) استفاده شد (D قطر لوله و S ارتفاع اسپویلر). جهت مقایسه و بررسی میدان جریان و بررسی بستر آبشستگی، در حالت لوله ثابت نیز آزمایش‌هایی به صورت مقدماتی و شاهد انجام پذیرفت. مجموعاً در حالات مختلف دانه‌بندی، قطر لوله، ارتفاع اسپویلر در حالت جابجایی لوله و حالت ثابت لوله ۴۰ آزمایش انجام شد.

در این آزمایش‌ها زاویه صفر درجه نسبت به خط قائم جهت نصب صفحه اسپویلر به علت کاربردی بودن در واقعیت (بایکر^۱، ۲۰۰۰) مورد استفاده قرار گرفت.

نحوه انجام آزمایش

برای شروع انجام آزمایش‌ها، ماسه انتخابی را پس از شستن در بستر کانال به طول سه متر ریخته و به روش ماله‌کشی به صورت کاملاً افقی (در جهت طولی و عرضی فلوم) تنظیم می‌شود. برای کاهش آبشستگی رسوبات بستر در ابتدا و انتهای بستر رسوبی مسطح شده (به علت بالا آمدگی کف کانال و اتصال ورودی و خروجی به سطح رسوبات)، از سنگ چینی درشت دانه که با شیب ۳۰ درجه نسبت به افق در کف کانال قرار گرفته استفاده شده است. به دلیل این که هنگام پر کردن کانال جریان متغیر تدریجی با عمق کم و سرعت بالا در کانال ایجاد و سبب آبشستگی غیر واقعی زیاد در زیر لوله می‌شود؛ در نتیجه بعد از مسطح کردن بستر، ابتدا دریچه‌ی انتهایی فلوم را بسته و با دبی بسیار پایین نسبت به آبیگری کانال اقدام شده و پس از آن لوله‌ها روی بستر قرار داده می‌شود. پس از نصب لوله در محل مورد نظر پمپ آب روشن و شیر تنظیم جریان را تا رسیدن به دبی مورد نظر باز کرده و به تدریج دریچه‌ی انتهایی کانال باز می‌شود تا عمق آب در کانال به ارتفاع مورد نظر برسد. پس از تثبیت جریان و رسیدن به عمق و

مهرآبادی و همکاران: مطالعه آزمایشگاهی فرآیند خوددغنی لوله مستغرق...



شکل ۵- نمودار توسعه زمانی دغنی شدگی در لوله با قطرهای مختلف



شکل ۶- فرآیند خوددغنی مشاهده‌ای

می‌شود. با ایجاد اولین حفره، فرسایش نسبتاً شدیدی در زیر لوله رخ داده و به تدریج بستر زیر لوله شسته شده و زیر لوله خالی می‌شد. با خالی شدن زیر لوله، لوله در اثر وزن خودبه داخل حفره فرو می‌رود. با نزدیک شدن لوله به بستر، فرآیند فرسایش دوباره تشدید شده و عمق آبستگی افزایش می‌یابد این فرآیند تا زمانی که اسپویلر به نزدیکی بستر رسیده و گردادیان جهت رگاب کافی نباشد ادامه می‌یابد (شکل ۷ ب) و پس از آن لوله با رسوب گذاری ناشی از گردابه دنباله‌ای لوله (گردابه B شکل ۱) و گردابه دنباله اسپویلر (چرخابه ساعت گرد) بالای لوله با رسوب پوشیده می‌شود (شکل ۸).

مقایسه فرآیند آبستگی لوله ثابت و متحرک

در مطالعه فردسو و همکاران (۱۹۸۸) و مطالعات عددی بعدی پروفیل آبستگی با حالت لوله ثابت تفاوتی چندانی ندارد اما پروفیل آبستگی در حالت لوله متحرک کاملاً متفاوت بوده و لوله ثابت عمق آبستگی زیادتری را نسبت به جابجایی طبیعی نشان می‌دهد (شکل ۹). در مطالعات قبلی لوله با سرعت ثابت و مرحله ای حرکت کرده اما در حالت طبیعی سرعت متناسب با ایجاد حفره و فرسایش تونلی نیز متناسب با آن بوده است. در حالت لوله متحرک عمق آبستگی و دغنی تا ۵۰ درصد نسبت به لوله ثابت کاهش می‌یابد. علت این کاهش ناشی از آن است که در لوله ثابت

در شکل (۵) نمودار عمق دغنی شدگی نسب به زمان نشان داده شده است. برای آن که آبستگی تا مقدار نهایی آن ادامه یابد مدت زمان مشخصی سپری شود. این زمان سپری شده، مقیاس زمان فرآیند آبستگی نامیده می‌شود. سامر و فردسو (۱۹۹۲) مقیاس زمان نرمالیزه شده برای لوله‌های مستغرق با رابطه ذیل ارائه نمودند:

$$T^* = \frac{[g(s-1)d^3]^{\frac{1}{2}}}{D^2} T \quad (7)$$

که در آن S: چگالی دانه‌ها، d: قطر ذرات، T: مقیاس زمان آبستگی، D: قطر لوله، g: شتاب ثقل می‌باشد. عمق آبستگی نسبی یا خوددغنی نسبی به صورت عمق آبستگی لحظه‌ای مشاهده‌ای (dt) در زمان t به عمق نهایی آبستگی (ds) بیان می‌شود.

فرآیند دغنی شدگی لوله

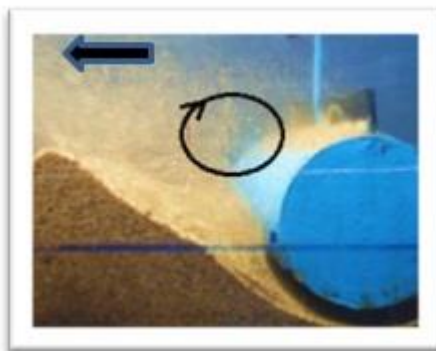
مراحل خوددغنی مشاهده‌ای در آزمایش در شکل (۶) نشان داده شده است. با شروع آزمایش ابتدا پس از وقوع پدیده رگاب در زیر خط لوله مخلوطی از ماسه و آب از زیر لوله به بیرون پرتاب

تثبیت و تشدید فرآیند فرسایش تونلی و فرسایش دنباله‌ای در لوله متحرک امکان محقق شدن نمی‌یابد لذا فرآیند آبستگي لوله کاهش می‌یابد. این موضوع به این دلیل است که نزدیک شدن زیاد لوله به بستر باعث می‌شود که چرخانه ساعت‌گرد بالای لوله، در نزدیکی لوله به بستر برخورد کند این چرخانه ساعت‌گرد در بستر در خلاف جهت جریان می‌باشد در نتیجه از مقدار سرعت در زیر لوله می‌کاهد.

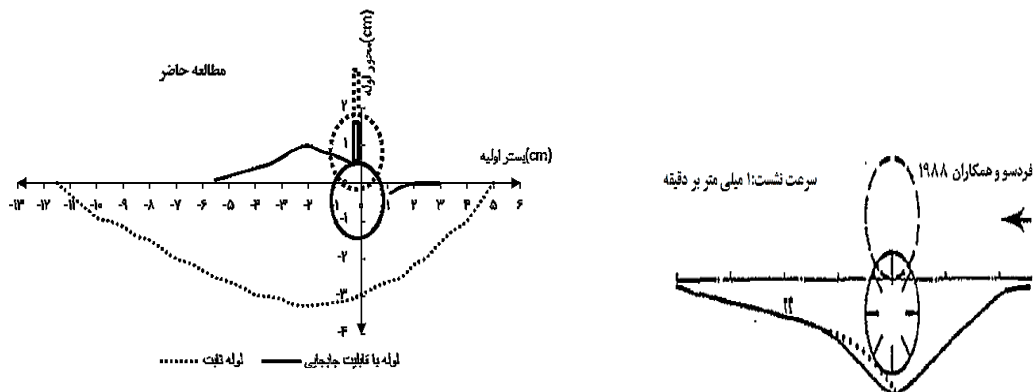
پس از شروع فرآیند رگاب و ایجاد حفره بین لوله و بستر و افزایش این فاصله مرحله فرسایش تونلی با شدت شکل می‌گیرد و فرسایش دنباله‌ای ایجاد شده نیز به توسعه آبستگي می‌انجامد (شکل ۷ الف). اما در حالت لوله متحرک با ایجاد فرسایش و پایین رفتن لوله، کاهش انسداد مسیر جریان منجر به کاهش توسعه گردابه‌ها و تنش برشی اعمالی به بستر (شکل ۷ ب) و کاهش گرادیان فشار به علت کاهش اختلاف فشار بالادست و پایین دست (شکل ۲) می‌شود.



شکل ۷- توسعه و توزیع جریان در لوله ثابت و لوله متحرک



شکل ۸- رسوب گذاری روی لوله

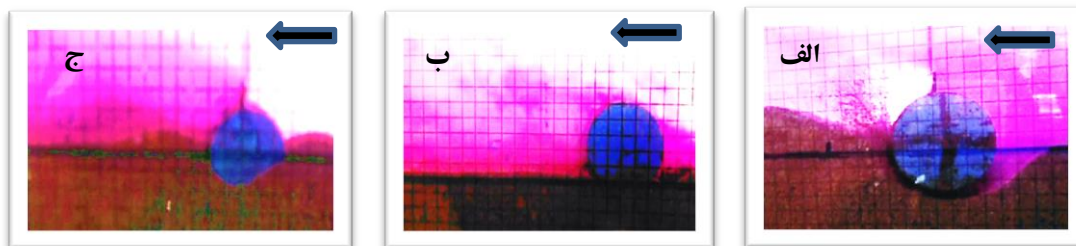


شکل ۹- مقایسه پروفیل بستر در دو حالت لوله ثابت (آبستگي) و متحرک (خوددفعي)

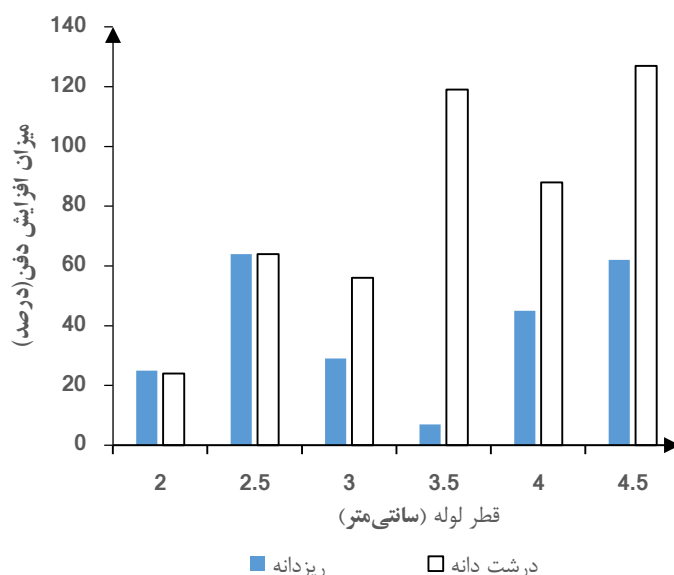
تأثیر اسپویلر بر عمق دفن شدگی

با افزودن اسپویلر به لوله باله ایجاد یک انسداد بزرگ برای جریان ورودی کرده و گرادیان فشار بین دو طرف لوله را افزایش می‌دهد همچنین سبب هدایت بیشتر نیروهای جریان رو به پایین در زیر لوله شده (شکل ۱۰ الف و ب)، با افزایش نیروی تراوش رگاب (شکل ۱۰ ج) قدرت فرسایش تونلی و دنباله‌ای در حالت مقایسه با لوله صاف افزایش می‌یابد. در نتیجه باعث افزایش عمق آبستتگی و میزان دفن شدگی می‌شود. در شکل (۱۱) میزان افزایش عمق دفن شدگی در اثر افزودن اسپویلر را نسبت به حالت لوله صاف (بدون اسپویلر) نشان داده شده است. نصب اسپویلر به طور میانگین در ریزدانه ۴۰ درصد و در درشت‌دانه میانگین تا ۹۰ درصد باعث افزایش در میزان دفن شدگی می‌شود.

بیشترین سرعت دفن شدگی در ابتدای زمان آبستتگی است. در سه دقیقه ابتدایی سرعت دفن شدگی زیاده‌تر می‌باشد (شکل ۱۲). در این بازه زمانی سرعت دفن شدگی لوله در رسوب ریزدانه برای حالت بدون اسپویلر اندکی بیشتر یا مساوی حالت با اسپویلر می‌باشد اما در بازه زمانی سه تا ۱۵ دقیقه سرعت دفن شدگی لوله با اسپویلر بیشتر از حالت بدون اسپویلر می‌شود و سرعت تا ۱۰ برابر افزایش می‌یابد و با افزایش قطر لوله سرعت افزایش یافته که بیانگر تأثیر افزایش قطر با انسداد مسیر و افزایش گرادیان فشار و نیروی تراوش می‌باشد (شکل ۱۳). علت این امر آن است که در حالت بدون اسپویلر فرآیند آبستتگی به علت گردابه‌های بالادست و پایین دست به سرعت شکل گرفته و فرآیند فرسایش آغاز می‌شود. اما وجود اسپویلر باعث ایجاد انسداد شده و مدت زمان تشکیل فرآیند گردابه‌ها و توسعه آنها و ایجاد اختلاف فشار با تأخیر صورت می‌گیرد.

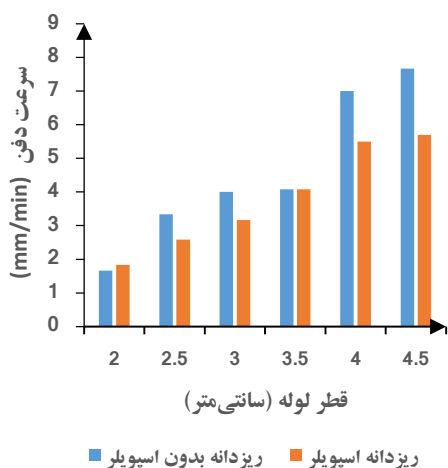
سرعت دفن شدگی

شکل ۱۰- توسعه و توزیع جریان در لوله صاف و با اسپویلر

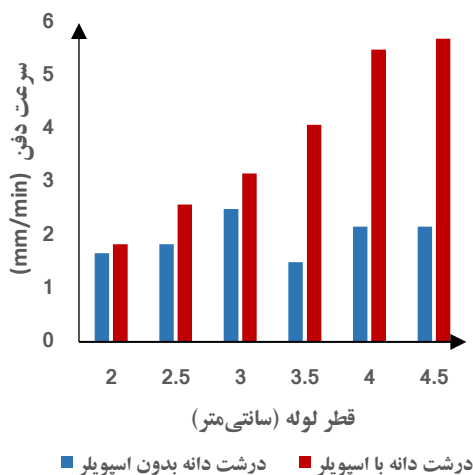


شکل ۱۱- تأثیر اسپویلر بر افزایش عمق دفن شدگی

بالاتر ذرات، نیاز به نیروی تراوش و به تبع گرادیان فشار بیشتری می باشد که اسپویلر این حالت را بوجود می آورد، سرعت دفن نیز به این دلیل افزایش می یابد (شکل ۱۵).



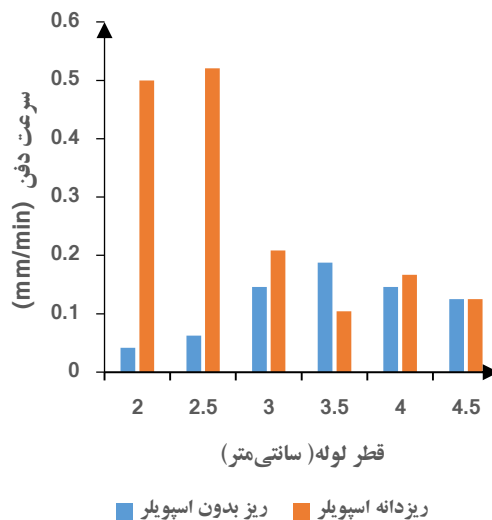
شکل ۱۳- سرعت دفن شدگی ریزدانه سه تا ۱۵ دقیقه



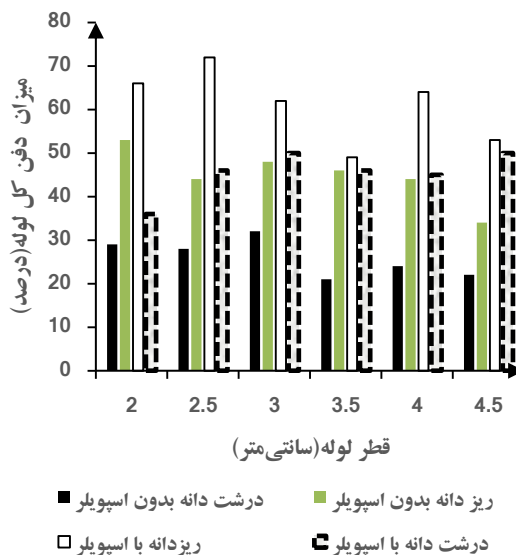
شکل ۱۴- مقایسه عمق دفن در حالت های مختلف لوله صفر تا سه دقیقه

تأثیر قطر ذرات بر دفن شدگی

با ریزتر شدن قطر ذرات رسوبی، وزن ذرات کمتر شده و در نتیجه نیروی تراوش باعث افزایش عمق دفن شدگی نسبت به درشت دانه می شود (شکل ۱۴). تأثیر اسپویلر بر خوددفعی در درشت دانه بسیار بیشتر از ریزدانه می باشد. در درشت دانه به علت وزن

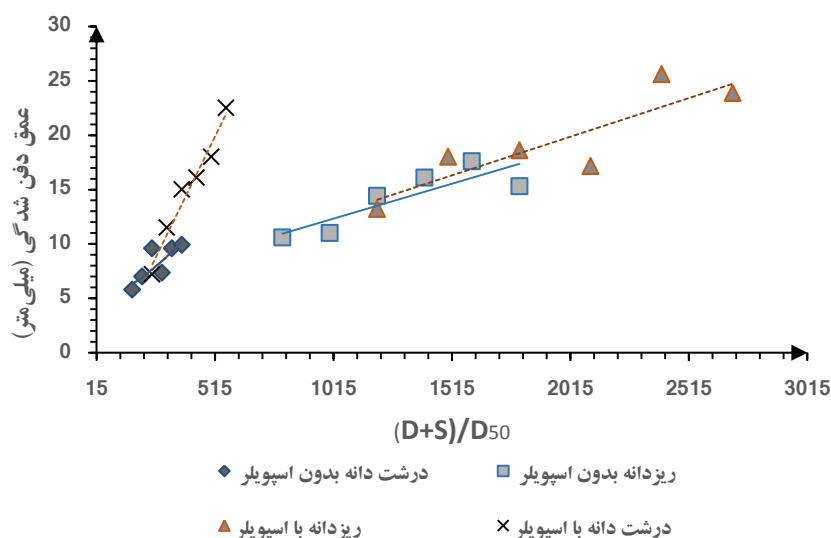


شکل ۱۵- سرعت دفن شدگی ریزدانه صفر تا سه دقیقه



شکل ۱۶- مقایسه عمق دفن در حالت های مختلف لوله صفر تا سه دقیقه

مهرآبادی و همکاران: مطالعه آزمایشگاهی فرآیند خوددغنی لوله مستغرق...



شکل ۱۶- افزایش عمق دفن با افزایش قطر لوله

تأثیر قطر لوله‌ها بر دفن شدگی

سامر و فردسو (۱۹۹۲) رابطه خطی بین عمق آبشستگی و قطر لوله در حالت صاف (بدون اسپویلر) را ارائه نمودند. شکل (۱۶) نیز بیانگر آن است که عمق دفن با قطر لوله در حالت جابجایی رابطه خطی دارد (رابطه خطی دارای ضریب رگرسیون بالاتری نسبت به سایر برازش‌های لگاریتمی، نمایی و .. می‌باشد). افزایش قطر لوله همانند اسپویلر سبب انسداد مسیر جریان و افزایش عمق آبشستگی می‌شود. شیب خط در حالت با اسپویلر بیشتر از حالت بدون اسپویلر به خصوص در درشت دانه می‌باشد. با مقایسه خط برازش داده شده در دو حالت لوله می‌توان نتیجه گرفت تأثیر اسپویلر بیشتر از تأثیر افزایش قطر لوله بر آبشستگی می‌باشد.

نتیجه گیری

در این پژوهش تأثیر جابجایی واقعی لوله بر خوددغنی مورد بررسی قرار گرفت. تأثیر استفاده از اسپویلر بر این فرآیند نیز تحلیل و نتایج ذیل حاصل گردید:

- با جابجایی لوله در طی فرآیند خوددغنی عمق آبشستگی تا ۵۰ درصد نسبت به لوله ثابت کاهش یافت لذا پروفیل بستر در حالت لوله ثابت نمی‌تواند بیانگر شرایط واقعی خوددغنی باشد.

- افزودن اسپویلر به لوله در حالت جابجایی سبب افزایش سرعت آبشستگی تا ۱۰ برابر و افزایش عمق دفن می‌شود. چنان‌که این مقدار در حالت بسترریزدانه به طور میانگین تا ۴۰ درصد و در بستر درشت دانه به طور میانگین تا ۹۰ درصد می‌شود. از این رو به نظر می‌رسد در شرایط طبیعی که سواحل ریز دانه باشند زمان و عمق آبشستگی کمتر از سواحل و یا محدوده‌های بستر درشت دانه است.

- افزودن اسپویلر در اطراف لوله به طور کلی الگوی جریان در اطراف لوله را تغییر داده است، افزایش گرادیان فشار و افزایش نیروی تراوش بر عمق دفن در بستر درشت دانه دارای تأثیر بیشتری نسبت به بستر ریزدانه می‌باشد.

- افزایش عمق دفن با قطر لوله رابطه مستقیم داشته و با افزایش قطر لوله عمق دفن افزایش می‌یابد. البته روند افزایشی مستلزم تحقیقات بیشتر است تا بتوان اندازه قطر بهینه را برای هر عمق جریان برآورد کرد.

- توجه کافی به نتایج به دست آمده حاکی از آن است که وجود اسپویلر سطح رکودی در برابر جریان ایجاد می‌کند که اگر قطر لوله همان سطح را ایجاد کند به دلیل شکل هندسی لوله تأثیر افزودن اسپویلر بیشتر از افزایش قطر بر افزایش عمق دفن شدگی خواهد بود.

منابع

- ۱- زینلی، م. ۱۳۸۷. شبیه سازی عددی نیروهای هیدرودینامیکی موثر بر خطوط لوله موازی فراساحلی. پایان نامه کارشناسی ارشد، رشته مهندسی عمران، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت.
- ۲- شفاعی بجستان، م. ۱۳۸۴. هیدرولیک رسوب. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز.

3- Bijker, E. W. and W.Leeuwestein. 1984. Interaction between pipelines and the seabed under the influence of waves and currents. Springer Netherlands. Seabed Mechanics, pp. 235-242.

- 4-Bijker, R. 2000. Achieving sub-sea pipeline burial and stability with spoilers. *Pipeline & Gas Journal*, 227 (4): 46.
- 5-Breusers, H. N. C. and A.J. Raudkivi. 1991. Scouring. Hydraulic structure design manual No.2. International Association for Hydraulic Research, Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- 6-Chiew, Y. 1990. Mechanics of local scour around submarine pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(4): 515–529.
- 7-Chiew, Y. M. 1991. Flow around horizontal circular cylinder in shallow flows. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. ASCE, 117(2): 120-135.
- 8- Chiew, Y.M. 1992. Effect of spoilers on scour at submarine pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE, 118(9): 1311-1317.
- 9- Chiew Y. 1993. Effect of spoilers on wave-induced scour at submarine pipelines. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. ASCE, 119(4): 417–429.
- 10-Cheng, L. and L.W. Chew. 2003. Modelling of flow around a near-bed pipeline with a spoiler. *Ocean Engineering*, 30(13): 1595-1611.
- 11- Ettema, R.1980. Scour at bridge piers. Report .No 216, University of Auckland, School of Engineering. New Zeland.
- 12- Fredsoe, J., Hansen, E.A., Mao,Y. and B.M. Sumer. 1988. Three-dimensional scour below pipelines. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 110: 373–379.
- 13-Hulsbergen, C. H. 1984. Stimulated self-burial of submarine pipelines. *Proceedings of the 16th Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, pp. 171-178.
- 14- Hulsbergen, C. H. 1986. Spoilers for stimulated self-burial of submarine pipelines. *Proceedings of the 18th Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, pp. 441-444.
- 15-Kjeldsen, S. P., Gjørsvik, O., Bringaker, K. G. and J. Jacobsen. 1973. Local scour near offshore pipelines. *Second International Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions Conference*, pp. 308-331.
- 16- Leeuwenstein, W. 1985. Natural self-burial of submarine pipelines. *Ma TS – Stability of pipelines, scour and sedimentation*. Coastal Engineering Group, Department of Civil Engineering, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
- 17-Mellvil, B.W. 1997. Pier and abutment scour. Integrated approach. *Journal of Hydraulic Engineering* ASCE, 132(2): 125-136.
- 18- Raudkivi, A. and R. Ettema. 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering* ASCE 109(3): 338-350.
- 19- Shan, D. Liu, Y. and Y. LI. 2015. Numerical simulation of submarine pipeline self-buried on sediment seabed. *Advances in Petroleum Exploration and Development*, 10(1): 44-50
- 20- Sumer, B.M. and J. Fredsøe. 1992. A review of wave/current-induced scour around pipelines. *Proceeding of 23rdInt. Conference on Coastal Engineering*. 217: 2839–2852.
- 21-Yang, L. P., Guo, Y. K., Shi, B., Kuang, C. P., Xu, W. L. and S. Cao. 2012. Study of scour around submarine pipeline with a rubber plate or rigid spoiler in wave conditions. *ASCE Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 138 (6): 484–490.
- 22- Zhao, Z. H. and H. J. S. Fernando. 2008. Numerical modeling of a sagging pipeline using an eulerian two-phase model. *Journal of Turbulence*, 9: 1-20.

EXTENDED ABSTRACT

Experimental Study in Self-Burial Submerged Pipelines at Erodible Bed Under Steady Flow

J. Mehrabadi¹, B. Gahraman^{2*} and K. Esmaili³

1-PhD Candidate of Hydraulic Structure, International Campus of Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

2*-Corresponding Author, Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran. (*bijangh@um.ac.ir*)

3-Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

Received:17 March 2016

Accepted:28 May 2016

Keywords: Scour, Submerged pipe, Spoiler, Self-burial.

Introduction

Providing safe conditions for water pipelines or other fluids on erodible beds is an important issue in the field of hydraulic engineering. Studies show that the installation of a plate called Spoiler on top of the pipeline increases the amount of the erosion around the pipe and its self burial stimulation. Most studies about spoiler have been done on a fixed pipe, but in reality, when the scouring hole underneath the pipe is deep enough, the pipe begins to lower as a result of the weight, at when the pipe reaches the bottom of the scour hole, the erosion process stops and then the pipe is covered with sand and buried. The self burial phenomenon has not been studied with the use of a spoiler in the case of actual displacement of the pipe, and due to the fact that the studied pipes have been fixed, the transitional and sedimentary phases have not been observed. Considering the role of pipe displacement in changing the scouring profile, the study of the spatial phenomenon of the pipe during displacement and observing the actual effect of the spoiler on the self burial performance and its effective parameters are necessary. In this study, this phenomenon has been studied experimentally.

Methodology

The experiments of this research have been carried out in Hydraulic Models Laboratory of Ferdowsi University of Mashhad. In these experiments, two fine and coarse sand with uniform distribution were used. The first sediment sample was used with mean diameter of $d_{50} = 0.25$ mm and standard deviation of 1.49, and second sediment sample, coarser sand with average diameter of $d_{50} = 1.2$ mm and standard deviation of 1.5. In this study, $\frac{y_n}{D+S} \geq 3$ was used as water depth,

in which D , S and y_n are pipe diameter, height of the spoiler and normal depth of water in the channel, respectively. The study was conducted in clear water conditions. In experiments, pipes with diameters of 2, 2.5, 3, 3.5, 4, and 4.5 cm were used. For the possibility of pipe displacement and the simulating of the self burial process, a solid steel pipe with a specific gravity of 7.86 $\frac{gr}{cm^3}$ was used. As shown in Fig. 1 the pipe is fitted inside the flume so that it can move freely in the vertical direction under the influence of its weight. In the moving pipe mode, two spoiler height spans of $S = \frac{D}{2}$ and $S = 0$ (without spoiler) were used. In order to compare and check the

flow field and to examine the scouring bed, in the fixed pipe mode, experiments were performed as preliminary and control test.

Results and Discussion

With the onset of the test, after the occurrence of the phenomenon, a relatively intense erosion occurred under the pipe. The pipe fell into the hole due to its weight and afterwards it was covered with sediment. In previous studies, scouring profile for fixed pipe was not much different, but the scouring profile is completely different in the case of movable pipe, and the fixed pipe shows a greater scour depth than normal displacement (Fig. 2). In the moving pipe mode, the scour depth and burial rate were reduced by 50% compared to the fixed pipe. The installation of the spoiler choked the flow path and increased the velocity and scouring depth comparing to the pipe without the spoiler, which in average 40% in fine grains and 90% in coarse grain increased the burial depth and up to ten times increases the burial speed.



Figure 1- Natural sagging

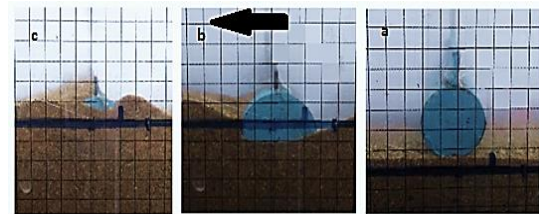


Figure 2- Observational Self-burial

By decreasing of the sediment particle diameter resulting in less weight of the particles, the seepage force causes an increment in the burial depth compared to the coarse grain (Fig. 3). There is a linear relationship between the burial depth and the pipe diameter in the displacement state (Fig. 4).

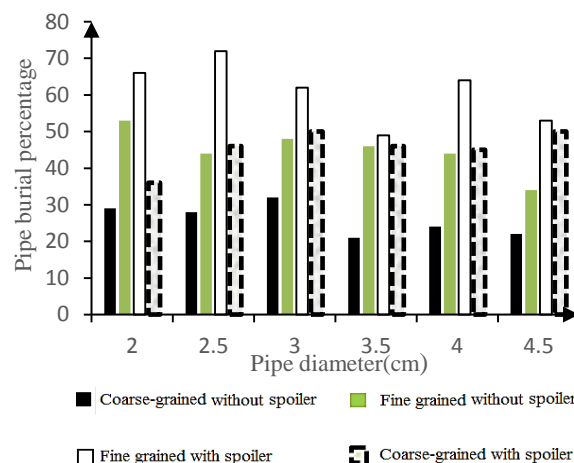


Figure 3- Comparison of the burial depth in different pipe status

The increase in the pipe diameter, like the spoiler, causes the flow path choke and increases the scour depth. The slope of the line with the spoiler is greater than the non-spplier mode, especially in coarse grain. By comparing the fitted line in two pipe modes, it can be concluded that the effect of the spoiler on scouring is greater than the effect of increasing of the pipe diameter.

Conclusions

In this research, the effect of the actual displacement of the pipe on self burial deformation was investigated. The effect of using Spoiler on this process also led in the following results:

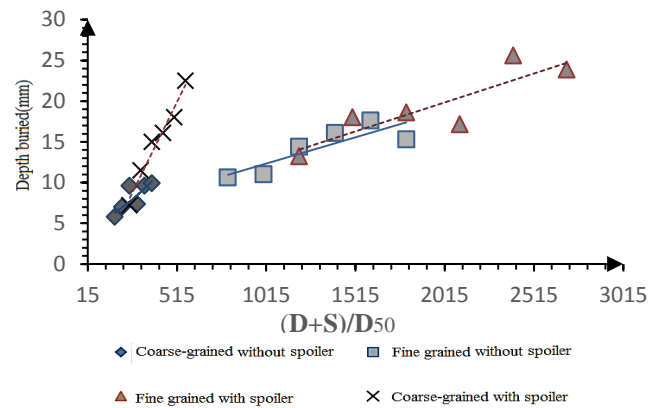


Figure 4- Rising of the burial depth by increasing of the pipe diameter

With the displacement of the pipe during the self burial process, the scour depth decreased by 50% compared to the fixed pipe; therefore, the bed profile in the fixed pipe state could not indicate the actual self burial condition. Adding the spoiler to the pipe in displacement mode increases the scour velocity up to 10 times and increases the depth of burial. As an average of up to 40% in the binder, and in a coarse-grained bed, it is an average of 90%. Therefore, in natural conditions, fine-grained shores, the time and depth of scouring are less than the coarse-grained bedding or coarse-grained area. The addition of the spoiler around the pipe generally changed the flow pattern around the pipe, increasing of the pressure gradient, and the seepage force is more effective when occurred in the coarse-grained bed than the fine grained bed. The increase of the burial depth led to the pipe diameter increments and is directly related to the pipe diameter. Presence of a spoiler creates a level of recession against the flow, which, if the pipe diameter creates the same level, due to the geometry of the pipe, the spoiler addition impact will be greater than the diameter increment on the burial depth rising.

References

- 1- Bijker, R. 2000. Achieving sub-sea pipeline burial and stability with spoilers. *Pipeline & Gas Journal*, 227 (4): 46.
- 2- Chiew Y. 1993. Effect of spoilers on wave-induced scour at submarine pipelines. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. ASCE, 119(4): 417–429.
- 3-Cheng, L. and L.W. Chew. 2003. Modelling of flow around a near-bed pipeline with a spoiler. *Ocean Engineering*, 30(13): 1595-1611.
- 4- Fredsoe, J., Hansen, E.A., Mao, Y. and B.M. Sumer. 1988. Three-dimensional scour below pipelines. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 110: 373–379.
- 5- Hulsbergen, C. H. 1986. Spoilers for stimulated self-burial of submarine pipelines. *Proceedings of the 18th Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, pp. 441-444.
- 6- Sumer, B.M. and J. Fredsøe. 1992. A review of wave/current-induced scour around pipelines. *Proceeding of 23rd Int. Conference on Coastal Engineering*. 217: 2839–2852.