

تحلیل آزمایشگاهی اثر متقابل جریان یک سوپه و باله بر مکانیزم خود دفنی خطوط لوله

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

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱/۳۰

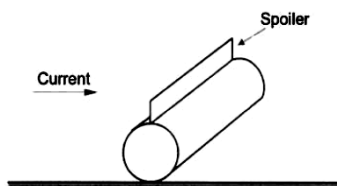
چکیده

جهت تحریک خوددفعنی مصنوعی لوله با هدف تأمین شرایط ایمن برای خطوط لوله انتقال در بستر فرسایش پذیر می توان از صفحه نصب شده در بالای خط لوله به نام اسپویلر یا باله استفاده کرد. بررسی عملکرد اسپویلر نصب شده بر روی لوله با قابلیت جابجایی طبیعی می تواند تفاوت عمده ای با تحقیقات قبلی داشته باشد. در این پژوهش آزمایشگاهی به بررسی پارامترهای موثر بر فرآیند خوددفعنی لوله پرداخته شد. رابطه ای جهت برآورد عمق خوددفعنی در حالت نشست طبیعی لوله پیشنهاد شد و مشخص گردید جابجایی لوله عمق آبستگي را تا ۵۴ درصد نسبت به لوله متصل به فلوم کاهش می دهد. با تغییر ارتفاع اسپویلر (S) بر روی لوله این نتیجه حاصل گردید که بیشترین مقدار خوددفعنی برای نسبت $S=D$ (D قطر لوله) بوده و میزان آن در بستر ریزدانه معادل ۷۰ درصد قطر لوله و برای بستر درشت دانه این مقدار ۶۷ درصد قطر لوله است. طول گسترش گردابه های دنباله ای در لوله با نشست طبیعی نسبت به لوله ثابت بیش تر بوده و با نصب اسپویلر و ازدیاد ارتفاع آن افزایش می یابد. بیشترین افزایش طول گسترش گردابه های دنباله ای در اسپویلر به ارتفاع معادل قطر لوله می باشد. بیشترین میزان دفن شدگی نیز در زاویه نصب صفر درجه اسپویلر نسبت به محور قایم لوله اتفاق افتاد.

واژه های کلیدی: اسپویلر، جابجایی، خوددفعنی، خطوط لوله

مقدمه

وجود خطوط لوله در محیط بستر رودخانه یا دریا سبب تغییر الگوی جریان در مجاورت آن ها شده و این تغییرات می توانند منجر به خستگی سازه و یا آبستگي در اطراف آن گردند در نهایت پایداری سازه را تهدید نمایند. برای محافظت از تخریب احتمالی خطوط لوله در اثر انبوه نیروهای هیدرودینامیکی جریان و موج و یا فعالیت های انسانی، لوله ها با پوشش بتن پوشیده می شوند و یا در عمق مناسب با حفر ترانشه دفن می شوند. خط لوله ای که بر بستر طبیعی رودخانه و یا دریا قرار گرفته است می تواند به علت آبستگي موضعی دچار خوددفعنی شود. فرآیند خوددفعنی را می توان با تسریع گستردگی و نرخ آبستگي بهبود بخشید. جهت تحریک خوددفعنی مصنوعی می توان از صفحه نصب شده در بالای خط لوله به نام اسپویلر یا باله استفاده کرد (شکل ۱). با توجه به نرخ آهسته روند خوددفعنی طبیعی، اسپویلر (باله) متصل به بالای لوله های واقع بر بستر رودخانه و یا دریا یک ابزار موثر



شکل ۱- شکل شماتیک اسپویلر (باله)

رگاب عامل اصلی در ایجاد آبستگي در زیر خطوط مستغرق است و وقتی رخ می دهد که شیب هیدرولیکی (گرادیان فشار) در زیر لوله از شیب شناوری (نیروی مقاوم ناشی از وزن ذرات رسوب) رسوبات بستر بیش تر شود (Chiew., 1992). پس از شروع آبستگي، فرآیند آبستگي در دو مرحله فرسایش تونلی و فرسایش دنباله ای ادامه می یابد. در مراحل اولیه آبستگي که فاصله بین لوله و بستر بسیار کوچک است سیال با سرعت زیادی به صورت جت از فاصله بین لوله و بستر عبور می کند در این مرحله حجم زیادی از رسوبات زیر لوله به صورت مخلوطی از سیال و رسوب به صورت جت از زیر لوله خارج می شوند. این مرحله از آبستگي مرحله فرسایش تونلی نامیده

۱- فارغ التحصیل دکترای سازه های آبی، پردیس بین الملل دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

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

(Esmaili@um.ac.ir)

*-نویسنده مسئول:

جریان اطراف یک لوله مجهز به اسپویلر انجام دادند. نتایج نشان داد میدان جریان در اطراف لوله آبشستگی بستر، به نسبت ارتفاع اسپویلر و نسبت شکاف (بین بستر و لوله) حساس می‌باشد

(Zhu et al., 2013). در مطالعات عددی اونر (Oner., 2016) و لی و همکاران (Lee et al., 2016) بیان شد که نصب اسپویلر سبب جدایی گسترده جریان اطراف لوله می‌شود و اسپویلر با افزایش انسداد مسیر جریان گردابه دنباله لوله-اسپویلر را بزرگ‌تر می‌کند. در کلیه مطالعات عددی یا آزمایشگاهی صورت گرفته تاکنون درباره اسپویلر، لوله مورد آزمایش به فلوم ثابت بوده است و فقط به تاثیر اسپویلر بر عمق آبشستگی و اندازه‌گیری عمق پرداخته شده است (فاز فرسایش). تحقیقات در حالت جابجایی لوله بدون اسپویلر نیز فقط در حالت جابجایی مصنوعی صورت گرفته است، در مطالعه بایکر و لیوئیستین (Bijker and Leeuwestein, 1984) و فردسو و همکاران (Fredsoe et al., 1988-1992) جهت بررسی آبشستگی زیر لوله بدون اسپویلر در حالات موج و جریان یک‌طرفه، شبیه‌سازی جابجایی لوله به وسیله یک دستگیره، که با دست و با سرعت‌های مختلف لوله را به داخل بستر ماسه‌ای جابجا می‌کرد (جابجایی مصنوعی)، صورت پذیرفت و مشخص گردید که عمق آبشستگی اندکی عمیق‌تر می‌شود. چنگ و همکاران (Cheng and Chew., 2003) با استفاده از مدل عددی بیان داشتند که عمق آبشستگی به سرعت جابجایی لوله بستگی دارد و این نتایج را با داده‌های تحقیقات فردسو و همکاران (Fredsoe et al., 1988-1992) صحت‌سنجی کردند. ژائو و فرناندو (Zhao and Fernando., 2008) نیز با استفاده از نرم افزار فلونتت به بررسی عددی پدیده جابجایی لوله و صحت‌سنجی مدل با نتایج تحقیقات فردسو و همکاران پرداختند.

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. اسپویلر نصب شده بر روی لوله با قابلیت جابجایی طبیعی می‌تواند تفاوت عمده‌ای در عملکرد با تحقیقات قبلی داشته باشد. نقش تعیین کننده جابجایی لوله در تغییر پروفیل آبشستگی، مطالعه پدیده خوددغنی لوله در حالت جابجایی و مشاهده تاثیر واقعی اسپویلر بر عملکرد خوددغنی و پارامترهای موثر بر آن شامل ارتفاع، زاویه نصب اسپویلر و مقیاس مدل فیزیکی ضروری بوده و در این تحقیق به مطالعه آزمایشگاهی این پدیده‌ها پرداخته شد.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های این تحقیق، در آزمایشگاه مدل‌های هیدرولیکی گروه مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. آزمایش‌ها در دو کانال کوچک و بزرگ صورت گرفت. فلوم مستطیلی بزرگ دارای

می‌شود. با افزایش عمق حفره آبشستگی و جابجایی پشته رسوبی به سمت پایین دست، به تدریج نقش جریان زیر لوله در توسعه حفره آبشستگی کاهش می‌یابد. مرحله فرسایش تونلی توسط مرحله فرسایش دنباله‌ای ادامه می‌یابد (Mao., 1986).

عمق حفره آبشستگی طبیعی کوچک‌تر از قطر خط لوله می‌باشد (Kjeldsen et al., 1973) و در مواردی که خوددغنی مورد نظر بوده، نیاز به تحریک مصنوعی فرسایش ضروری می‌باشد. اسپویلر (باله) متصل به بالای لوله ابزار موثر برای تسریع آبشستگی زیر لوله است. اسپویلر با ایجاد یک انسداد بزرگ برای جریان ورودی سبب افزایش شیب هیدرولیکی طرفین لوله می‌شود (Van Beek and Wind., 1990)، همچنین باعث هدایت بیش‌تر نیروهای جریان رو به پایین در زیر لوله شده و در نتیجه باعث افزایش عمق آبشستگی می‌شود (فاز فرسایش). هنگامی که حفره آبشستگی زیر لوله به اندازه کافی عمیق شد لوله شروع به پایین رفتن می‌کند (فاز انتقالی). پس از توقف فرآیند فرسایش خط لوله با شن و ماسه پوشیده می‌شود (فاز رسوبی) (Shan., 2015). تحقیقات گسترده‌ای توسط آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه دلف هلند در سال ۱۹۸۶ (Hulsbergen., 1986)؛ (Hulsbergen and Bijker., 1989) برای بررسی اثر اسپویلر بر نیروهای هیدرودینامیکی و تاثیر بر خوددغنی لوله انجام شد. پس از آن، اولین کاربرد آزمایشی در خط لوله‌ای به طول ۴ کیلومتر در بخش هلندی دریای شمال در سال ۱۹۸۸ (Delft Hydraulics Laboratory) انجام شد و در ابتدای سال ۱۹۸۹ اسپویلر کاربرد تجاری پیدا کرد. بکارگیری اسپویلر در خط لوله دریای شمال و در خلیج هانزو در شانگهای چین نمونه‌های استفاده کاربردی از این شیوه می‌باشد (Fei et al., 2004). ون بیک و ویند با مطالعه عددی بیان داشتند که اسپویلر و ارتفاع آن سبب افزایش سرعت جریان زیر لوله می‌شود (Van Beek and Wind., 1990). چپو اثرات زاویه قرارگیری اسپویلر روی لوله در آبشستگی ناشی از جریان را مورد بررسی قرار داد و بیان داشت اسپویلر قائم و با زاویه ۱۲۰ درجه نسبت به محور عمودی لوله بیش‌ترین آبشستگی را سبب می‌شوند (Chiew., 1992- 1993). بارندسه رابطه‌ای برای مقدار عمق آبشستگی نهایی در حالت استفاده از اسپویلر به شرح ذیل پیشنهاد کرد (Barendse., 1988):

$$d_s = 1.3 \left(\frac{V^2}{2g} \right)^{0.2} \times (D + S)^{0.8} \quad (1)$$

که در آن d_s عمق آبشستگی نهایی، V سرعت جریان، D قطر لوله و S ارتفاع اسپویلر می‌باشد.

فی و همکاران بیان کردند که بستر ماسه‌ای به اضافه حداکثر ۱۰ درصد لای شرایط محیطی مناسبی برای عملکرد بهینه اسپویلر می‌باشد (Fei et al., 2004). ژو و همکاران مطالعه عددی بر روی

تثبيت جریان و رسیدن به عمق و دبی مورد نظر، آزمایش آغاز شد. آزمایش های مقدماتی نشان داد که آبشستگی در زمان های اولیه شروع جریان زیاد بوده و با گذشت زمان نرخ آبشستگی به شدت کاهش می یابد. چنان که این فرآیند بعد از حدود ۳ ساعت تقریباً به صفر نزدیک شده و پس از آن لوله با رسوبات پوشیده شد. زمان نهایی آزمایش ها تا تکمیل فرآیند رسوب گذاری روی لوله ۴ ساعت انتخاب گردید.

جدول ۱- متغیرهای آزمایشات صورت گرفته

شماره آزمون	Q (lit/s)	D (cm)	d ₅₀ (mm)	α (°)	S	نوع آزمایش
۱	۱۰-۱۳	۲.۲/۵.۳.۳/۵.۴.۴/۵	۰/۲۵	۰	۰	جایجایی لوله با اسپویلر و بدون اسپویلر
۴۸			۱/۲			D/۴ D/۲ D
۴۹	۱۰-۱۳	۲.۲/۵.۳.۳/۵.۴.۴/۵	۰/۲۵	۰	۰	لوله ثابت به فلوم
۶۱			۱/۲			D/۲
۶۲	۱۰-۱۳	۲/۵.۳/۵.۴/۵	۰/۲۵	۰	۰	فیرات زاویه نصب اسپویلر نسبت به محور قائم
۷۸			۱/۲	۴۵+		D/۲
۷۹	۱۰-۱۳	۲.۲	۰/۲۵	۰	۰	تأثیر مقیاس (کانال کوچک و بزرگ)
۸۶						D/۲
۸۷						طول گسترش فرسایش دنباله ای
۹۴		۴	۱/۲	۰		D/۴ D/۲ D



شکل ۲- نحوه قرارگیری لوله با قابلیت جایجایی

آنالیز ابعادی

در شرایط جریان صاف و تقریباً بدون اغتشاش ظاهری و بستر فرسایش پذیر، عمق دفن شدگی d_s خط لوله افقی واقع بر بستر (عمود بر جهت جریان) 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 ، جرم حجمی رسوب ρ_s ، لزجت دینامیکی μ ، چگالی سیال ρ ، زاویه اسپویلر روی لوله α ، حالت لوله: متحرک یا ثابت Pos است.

$$d_s = f(T, d_{50}, D, S, V, \theta, y_n, g, \rho, \mu, \rho_s, \alpha, Pos) \quad (3)$$

با استفاده از روش باکینگهام پی رابطه ۴ حاصل شده است:

طولی برابر ۱۰ متر، عرض ۳۰ سانتی متر و ارتفاع ۵۰ سانتی متر و فلوم کوچک دارای عرض ۱۰ سانتی متر، ارتفاع ۲۰ سانتی متر و طول ۴ متر بود. برای کنترل سطح آب جهت مستغرق شدن لوله، از دریچه ای که در پایین دست کانال نصب شده، استفاده گردید. در آزمایش ها از دو ماسه ریز و درشت با دانه بندی یکنواخت برای جلوگیری از پدیده مسلح شدن بستر استفاده شد. دی و سینگ (Dey and Singh., 2008) بیان داشتند که در حالت $\sigma_g > 1.7$ اثر مسلح شدن بستر بر عمق آبشستگی زیر لوله آشکار می شود.

$$\sigma_g = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}} \leq 1.7 \quad (2)$$

σ_g انحراف معیار هندسی، d_{16} قطر ذرات رسوبی که ۱۶ درصد دانه ها از آن کوچک تر است و d_{84} قطر ذرات رسوبی که ۸۴ درصد دانه ها از آن کوچک تر می باشد. از دو نوع ماسه ریز به قطر متوسط $d_{50} = 0.25mm$ و انحراف معیار ۱/۶ و نمونه دوم ماسه درشت تر به قطر متوسط $d_{50} = 1.2mm$ و انحراف معیار ۱/۵ استفاده شد. طبق نظر چپو (Chiew., 1991) اگر عمق آب بیش تر از 4D انتخاب شود (D قطر لوله) عمق آب تاثیری بر آبشستگی زیر لوله (بدون اسپویلر) ندارد. کلدسیون و همکاران (Kjeldsen and et al., 1973) عمق آب 3D را پیشنهاد کردند. در این پژوهش از عمق آب

$$\frac{y_n}{D+S} \geq 3$$

استفاده شد، که در آن S ارتفاع اسپویلر و y_n عمق نرمال آب در کانال می باشد. شرایط مطالعه در این پژوهش، شرایط آب زلال بوده بنابراین می بایست $\frac{V}{V_c} > 1$ باشد که در آن V سرعت جریان آب و V_c سرعت بحرانی آستانه حرکت رسوب می باشد. از روابط ملویلر برای تعیین سرعت برشی بحرانی به ازای اندازه متوسط دانه های بستر و دمای آب ۲۰ درجه که تخمین خوبی برای منحنی شیلدز می باشد استفاده گردید (Mellvil., 1997). در آزمایش ها از لوله های توپر آهنی به قطر ۲، ۲/۵، ۳، ۳/۵، ۴ و ۴/۵ سانتی متر استفاده شد. در حالت لوله متحرک چهار حالت ارتفاع اسپویلر:

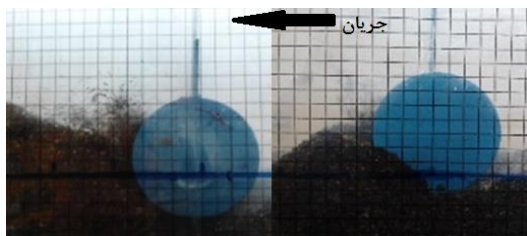
$$S = 0, S = \frac{D}{4}, S = \frac{D}{2}, S = D$$

قطر لوله و S ارتفاع اسپویلر). حالات مختلف آزمایش های انجام شده در جدول ۱ ذکر شده است. برای شروع انجام آزمایش، بستر کانال به طول ۴ متر، رسوب ریخته شد. جهت جلوگیری از آب بردگی و برهم خوردن رسوبات بستر، در ابتدا و انتهای بستر رسوبی مسطح شده، از ریپ رپ درشت دانه با شیب ۱:۳ استفاده شد. ابتدا دریچه پایین دست کانال را بسته و پمپ روشن شد تا آب به تدریج وارد کانال شود. زمانی که سطح آب داخل کانال به مقدار مورد نیاز جهت انجام آزمایش رسید، پمپ را برای چند لحظه خاموش کرده و برای نصب لوله انتخابی بر روی بستر رسوبی، اقدام شد (شکل ۲). پس از نصب لوله و



شکل ۵- مراحل خوددغنی مشاهده‌ای

مقایسه دغنی لوله بدون اسپویلر با لوله دارای اسپویلر
وقتی لوله بدون اسپویلر بر روی بستر قرار می‌گیرد فرسایش و دغنی همانند حالت با اسپویلر می‌باشد. در این حالت به علت اختلاف فشار کم‌تر دو طرف لوله فرسایش و خروج رسوب با شدت کم‌تری صورت می‌گیرد (شکل ۶).



شکل ۶- فرسایش تونلی مشاهده‌ای بستر در پشت دانه

همچنین به علت وجود گردابه در امتداد اسپویلر رسوبات می‌تواند تا ارتفاع اسپویلر بالا آمده اما در لوله بدون اسپویلر رسوبات حداکثر تا ارتفاع لوله بالا می‌آیند (شکل ۷). اسپویلر همچنین سبب انسداد بیش‌تر مسیر جریان می‌شود (شکل ۸).



شکل ۷- رسوب‌گذاری روی لوله ناشی از گردابه دنباله‌ای



شکل ۸- توسعه و توزیع جریان در لوله بدون اسپویلر (الف) و با اسپویلر (ب)

$$\frac{d_s}{D} = \psi(\theta, \frac{S+D}{d_{50}}, \frac{y_n}{d_{50}}, \frac{\rho_s}{\rho}, Re, Fr, Pos, \alpha, \frac{y_n}{S+D}, \frac{d_{50}}{D}) \quad (4)$$

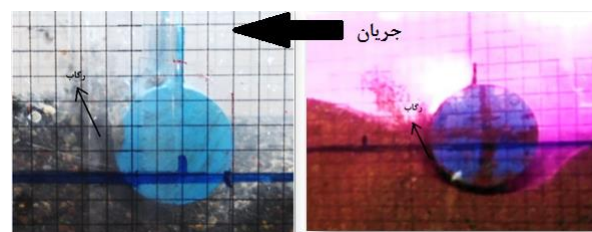
از پارامتر عدد فرود لوله ۵ نیز می‌توان به عنوان عدد بی‌بعد در مطالعه آبخستگی لوله استفاده کرد (Ibrahim and Nalluri., 1986).

$$F_{rD} = \frac{V}{\sqrt{gD}} \quad (5)$$

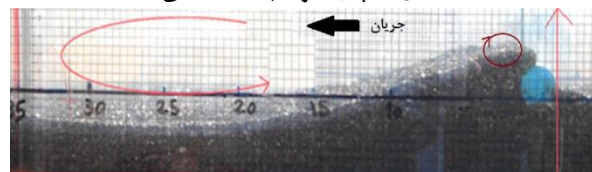
که در آن قطر لوله D ، سرعت جریان یک‌طرفه V ، شتاب ثقل g می‌باشد. مطالعات مونکادا و آگور نشان داد عدد رینولدز لوله ($2.6 * 10^4 < Re < 4 * 10^3$) تاثیر ناچیزی بر عمق آبخستگی دارد (Moncada and Aguirre., 1999). مونکادا و آگور و سومر و فردسو (Sumer and Fredsoe., 1990) بیان کردند که برای $Fr < 0.2$ عمق آبخستگی مستقل از عدد فرود می‌باشد. محدوده عدد رینولدز و فرود در آزمایش‌ها در این محدوده‌ها است.

بررسی فرآیند آبخستگی و خود دغنی

لحظاتی پس از شروع آزمایش زمانی که گرادیان فشار هیدرولیکی از گرادیان استغراقی ذرات رسوب فراتر رود، دانه‌ها به دنبال هم شسته می‌شوند و شکست رخ می‌دهد و در زیر خط لوله مخلوطی از ماسه و آب به بیرون پرتاب می‌شود (شکل ۳). در مراحل اولیه آبخستگی سیال با سرعت زیادی به صورت جت از فاصله بین لوله و بستر عبور می‌کند که منجر به افزایش تنش برشی بستر در زیر لوله می‌شود با خالی شدن زیر لوله، لوله در اثر وزن خود به داخل حفره فرو می‌رود. با نزدیک شدن لوله به بستر، فرآیند فرسایش دوباره تشدید شده و عمق آبخستگی افزایش می‌یابد این فرآیند تا زمانی که اسپویلر به نزدیکی بستر رسیده و گرادیان جهت رگاب کافی نباشد ادامه می‌یابد. پس از رسیدن لوله به عمق دغنی تعادل، مرحله فرسایش تونلی متوقف و آبخستگی توسط مرحله فرسایش دنباله‌ای ادامه می‌یابد (شکل ۴). مراحل خوددغنی مشاهده‌ای در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۳- پدیده رگاب مشاهده‌ای



شکل ۴- فرسایش دنباله‌ای

(شکل ۹) که نشان از تاثیر قابل توجه قطر ذرات بستر بر میزان دفن شدگی لوله دارد. با ریزتر شدن ذرات بستر، با گرادیان فشار کم‌تری آبشستگی بوجود می‌آید و عمق دفن شدگی در بستر ریزدانه نسبت به بستر درشت دانه (وزن ذرات رسوبی بیش‌تر) افزایش می‌یابد. در حالت لوله بدون اسپویلر با ریزتر شدن رسوبات بستر ۶۵ درصد به عمق دفن افزوده می‌شود که نشان از تاثیر قابل توجه قطر ذرات بستر بر میزان عمق دفن دارند. اما با افزایش ارتفاع اسپویلر و افزایش گرادیان فشار این تاثیر به حداقل می‌رسد و عمق دفن تقریباً مستقل از قطر ذرات بستر می‌شود (جدول ۲). در بستر درشت دانه، گرادیان فشار مورد نیاز جهت جابجایی ذرات سنگین‌تر رسوب و طول زیادتر خط خزش در قطره‌های لوله بزرگ‌تر، نیاز به گرادیان فشار قابل توجه‌ای دارد که اسپویلر این امر را محقق می‌نماید.

تاثیر مقیاس بر دفن شدگی لوله

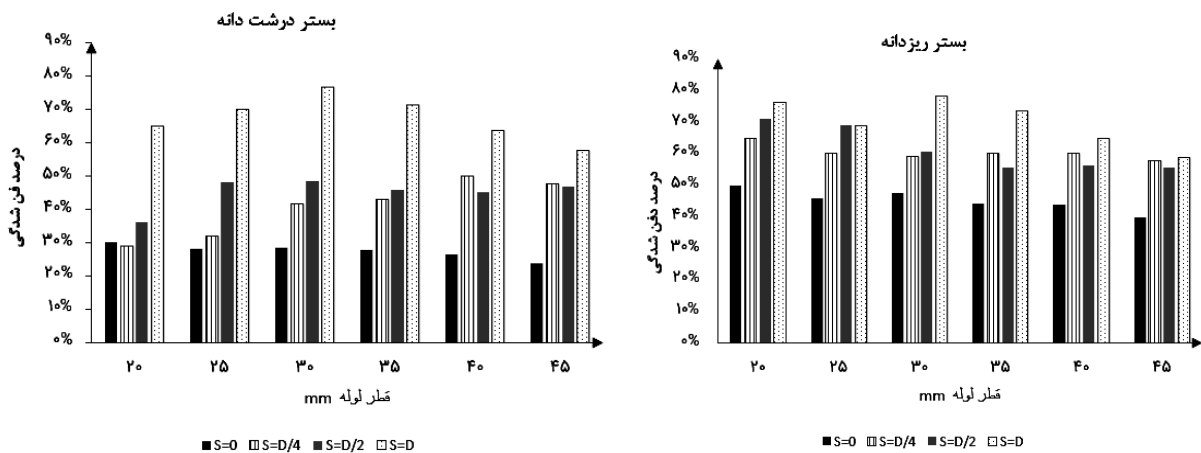
چندین عامل ناشی از اثر مقیاس از جمله اثر عدد رینولدز لوله، زبری لوله، اثرات ریپل بستر، اندرکنش خاک و موج، تاثیر اغتشاش جریان ورودی و سختی لوله در آبشستگی سه‌بعدی، بر آبشستگی زیر لوله موثر می‌باشد که با رعایت شرایطی در آزمایش‌ها تاثیر مقیاس در مطالعه آزمایشگاهی به حداقل می‌رسد. این مهم در مطالعات سومر و فردسو (Sumer and Fredsoe, 1990; 2002) و سومر و همکاران (Sumer and et al., 2001) به آن پرداخته شده است.

تاثیر ارتفاع اسپویلر بر میزان دفن شدگی لوله

با قرارگیری لوله بر روی بستر و تغییر رژیم جریان پیرامون لوله آبشستگی و خوددفعنی اتفاق می‌افتد. با افزودن اسپویلر و افزایش ارتفاع آن میزان خوددفعنی افزایش یافته (شکل ۹) که ناشی از تاثیر اسپویلر در افزایش انسداد مسیر جریان و به تبع افزایش گرادیان فشار می‌باشد (شکل ۸). با مقایسه میزان دفن شدگی در بین تمام حالات ارتفاع اسپویلر بیش‌ترین میزان خوددفعنی برای نسبت $\frac{S}{D} = 1$ به میزان $\frac{d_s}{D} = 70\%$ در بستر ریزدانه و $\frac{d_s}{D} = 67\%$ در بستر درشت‌دانه اتفاق افتاد. افزودن اسپویلر بر روی لوله سبب هدایت بیش‌تر نیروهای جریان رو به پایین در زیر لوله شده و باعث افزایش میزان دفن شدگی می‌شود. جهت مقایسه تاثیر افزودن اسپویلر به لوله، درصد افزایش عمق دفن شدگی لوله دارای اسپویلر نسبت به حالت بدون اسپویلر در شکل ۱۰ مقایسه شده است. با افزایش ارتفاع اسپویلر میزان دفن شدگی لوله نسبت به حالت بدون اسپویلر افزایش می‌یابد که نشان از تاثیر قابل توجه ارتفاع اسپویلر بر دفن لوله دارد. بیش‌ترین افزایش درصد دفن شدگی نسبت به لوله بدون اسپویلر نیز در حالت $\frac{S}{D} = 1$ در بستر ریزدانه ۵۴ درصد و در بستر درشت دانه ۱۴۵ درصد می‌باشد.

تاثیر قطر ذرات رسوب بستر بر خوددفعنی لوله

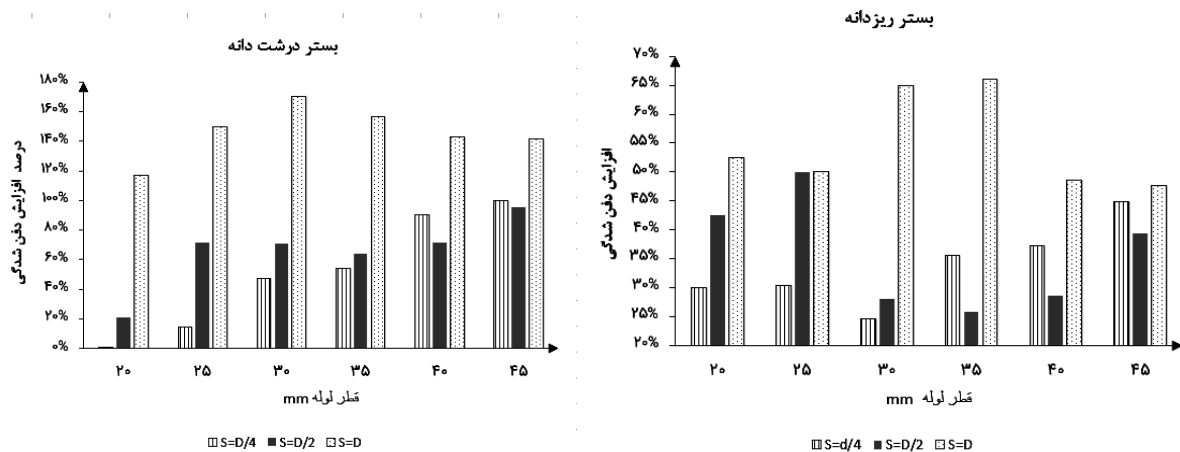
در تمام حالات ارتفاع اسپویلر در بستر ریزدانه میانگین ۶۰ درصد و در بستر درشت دانه میانگین ۴۰ درصد قطر لوله دفن می‌شود



شکل ۹- درصد دفن شدگی لوله در تمام حالات ارتفاع اسپویلر (بستر ریزدانه و درشت دانه)

جدول ۲- درصد افزایش عمق خوددفعنی با تغییر قطر ذرات بستر از درشت دانه به ریزدانه

ارتفاع اسپویلر			
S=0	S=D/4	S=D/2	S=D
میزان افزایش دفن با ریزتر شدن رسوبات بستر			
%۶۵	%۵۲	%۳۶	%۴



شکل ۱۰- درصد افزایش عمق دفن شدگی نسبت به لوله بدون اسپویلر در بستر ریزدانه و درشت دانه

لوله (شکل ۴) گسترش یافته و باعث ایجاد فرسایش در پایین دست می‌شوند. طول گسترش گردابه‌های دنباله‌ای در لوله بدون اسپویلر برای قطرهای مختلف لوله در محدوده $9D < X < 11D$ می‌باشد (جدول ۲) $(X = \frac{x}{D})$ ، فاصله از ابتدای لوله و D قطر لوله، شکل ۱۲). در لوله ثابت به فلوم این مقدار در محدوده $4D < X < 8D$ گزارش شده است (Sumer and Fredso., 2002). علت کم‌تر بودن محدوده تاثیر در حالت ثابت به فلوم، محدود بودن گردابه‌ها در داخل گودال آبشستگی می‌باشد اما در حالت جابجایی گردابه‌ها در پایین دست لوله امکان سیر دارند.

با نصب اسپویلر و افزایش ارتفاع آن گسترش گردابه و طول محدوده فرسایش دنباله‌ای تغییر محسوسی می‌یابد به طوری که این طول تا $28D$ افزایش می‌یابد (شکل ۱۲). علت این پدیده را می‌توان این طور توضیح داد که به علت افزایش مسیر انسداد جریان در ارتفاع بزرگ‌تر اسپویلر، گردابه‌های بزرگ‌تری در ناحیه دنباله شکل می‌گیرد که سیر طولانی‌تری برای محو شدن در پایین دست طی می‌کنند.

جهت بررسی اثر مقیاس تعدادی آزمایش در دو کانال کوچک (کانال کوچک دارای عرض ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر می‌باشد) و بزرگ صورت گرفت که در هر دو کانال شرایط شامل: آب زلال (یکسان بودن شرایط تنش برشی بستر)، نسبت عمق به قطر لوله، شرایط عدم تشکیل ریبیل، رسوبات یکسان و یکنواخت، قطر و جنس یکسان لوله‌ها، محدوده عدد فرود و رینولدز ذکر شده در بخش قبلی یکسان بوده است. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات ناشی از کوچک شدن کانال در میزان درصد دفن شدگی لوله بسیار اندک بوده است (شکل ۱۱) که می‌توان نتیجه گرفت با یکسان بودن شرایط ذکر شده تاثیر مقیاس در مطالعه آزمایشگاهی آبشستگی و عمق دفن شدگی لوله‌ها به حداقل می‌رسد.

تاثیر گردابه‌های دنباله‌ای بر خوددغنی لوله

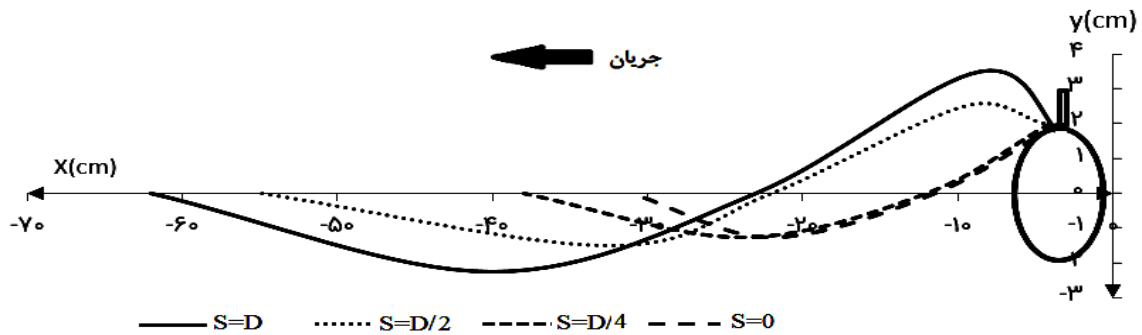
پس از رسیدن لوله به عمق دفن تعادل، مرحله فرسایش تونلی متوقف و آبشستگی توسط مرحله فرسایش دنباله‌ای ادامه می‌یابد. در این مرحله، آبشستگی توسط جریان دنباله و پدیده انتشار گردابه کنترل می‌شود. گردابه‌های دنباله‌ای ساطع شده از لوله در ناحیه دنباله

جدول ۲- طول گسترش فرسایش دنباله‌ای نسبت به قطر لوله

قطر لوله (cm) D	نسبت طول فرسایش دنباله‌ای به قطر لوله $X=x/D$			
	S=0	S=D/4	S=D/2	S=D
۲	۱۱	۱۶	۱۸	۲۸
۲/۵	۹	۱۵	۱۵	۲۳
۳	۱۱	۱۵	۱۳	۱۹
۳/۵	۹	۱۰	۱۳	۱۷
۴	۱۰	۱۰	۱۲	۱۷
۴/۵	۹	۱۰	۱۳	۱۷



شکل ۱۱- مقایسه درصد دفن شدگی لوله با قطرهای مختلف به عدد فرود لوله (در کانال کوچک و بزرگ)



شکل ۱۲- مقایسه پروفیل آبشستگی مشاهده‌ای ناشی از فرسایش دنباله‌ای در ارتفاع مختلف اسپویلر (بستر درشت دانه)

زاویه اسپویلر

با تغییر زاویه نصب اسپویلر بر روی لوله میزان آبشستگی و دفن لوله متاثر از زاویه نصب، تغییراتی خواهد داشت. این تغییرات در مطالعات چپو (Chiew., 1992- 1993) بررسی شده است (شکل ۱۳). جهت بررسی تفاوت این حالت آزمایش با حالت جابجایی لوله، اسپویلر با زاویه ۴۵+ و ۴۵- مطابق شکل ۱۴ بر روی لوله نصب گردید. پروفیل بستر در حالت جابجایی با حالت ثابت تفاوت عمده دارد (شکل ۱۳ و ۱۴). با تغییر زاویه اسپویلر به سمت جریان، گردابه‌های اولیه که در راستای خط مرکزی سیستم خط لوله و اسپویلر واقع شده، به سمت بالادست کشیده می‌شود و باعث حرکت ذرات رسوبات بر روی لوله و اسپویلر می‌شوند. در زاویه ۴۵+ (شکل ۱۴) با اتمام مرحله فرسایش تونلی و نزدیک شدن لوله به بستر، گردابه‌های دنباله‌ای باعث جابجایی رسوبات به سمت لوله (پایین دست) می‌شوند اما گردابه واقع در امتداد اسپویلر به بستر برخورد و سبب فاصله گرفتن رسوبات از

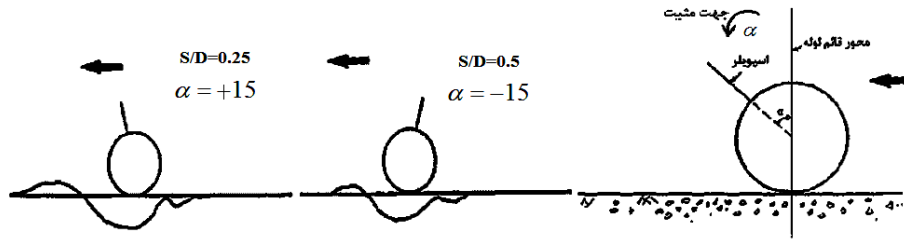
اسپویلر می‌شوند و بالا و زیر اسپویلر خالی از رسوب می‌شود.

مهم‌ترین عامل پوشش لوله با رسوب، جریان گردابی دنباله‌ای نزدیک اسپویلر بوده که باعث پوشش رسوب بر روی لوله می‌شود (شکل ۱۴). بیش‌ترین میزان دفن شدگی در زاویه صفر درجه نسبت به محور قائم لوله می‌باشد و پس از آن تغییر زاویه به سمت جریان (زاویه ۴۵- درجه) درصد دفن شدگی بیش‌تری دارا می‌باشد (شکل ۱۵).

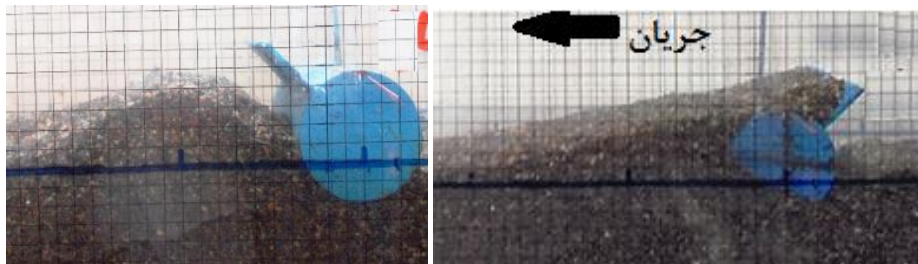
رابطه پیشنهادی جهت برآورد عمق خوددفعنی لوله با اسپویلر

عمق خوددفعنی اندازه‌گیری شده در تمام حالات آزمایش با استفاده از نرم افزار SPSS مورد تحلیل قرار گرفت و رابطه ۶ جهت پیش‌بینی عمق خوددفعنی لوله دارای اسپویلر در حالت نشست طبیعی لوله با متغیرهای مورد آزمایش ارایه گردید:

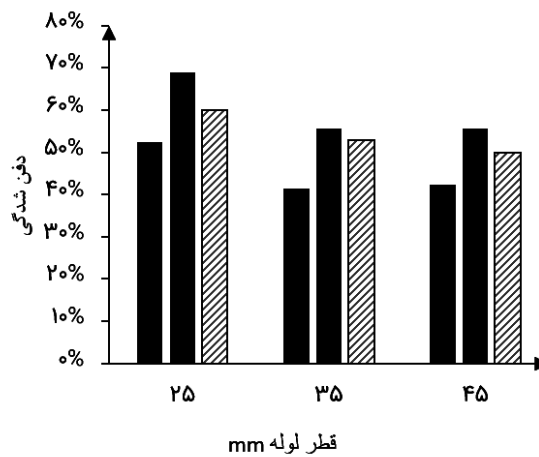
$$\frac{d_s}{D} = 0.313 \left(\frac{S}{D}\right)^{0.726} - 15.95 \left(\frac{d_{50}}{D}\right)^{1.55} + 0.434 \quad (۶)$$



شکل ۱۳- پروفیل آبشستگی در لوله با اسپویلر زاویه‌دار (Chiew., 1993)



شکل ۱۴- پروفیل آبشستگی مشاهده‌ای در اسپویلر با زاویه نصب ۴۵- و ۴۵+ درجه در بستر درشت دانه



شکل ۱۵- درصد دغنی شدگی لوله با زاویه‌های مختلف در بستر ریزدانه ($S = \frac{D}{2}$)

میانگین قدر مطلق درصد خطا برابر با رابطه ۹ است:

$$MAPE = \frac{100}{N} \sum_{N=1}^N \frac{|d_s^o - d_s^c|}{d_s^o} \quad (9)$$

در روابط بالا: d_s^o عمق خوددغنی مشاهده‌ای، d_s^c عمق خوددغنی محاسباتی و N تعداد داده‌ها می‌باشد.

میزان خطاهای معادله تخمین عمق خوددغنی با نتایج مشاهده‌ای $RMSE=2.3$ ، $MAE=1.99$ (میانگین خطای مطلق) و میانگین قدر مطلق درصد خطا $MAPE=12.5\%$ می‌باشد. با توجه به اینکه دو

در رابطه بالا d_s عمق دغنی شدگی، d_{50} اندازه ذرات، D قطر لوله، S ارتفاع اسپویلر می‌باشد.

مقدار ضریب تبیین (رابطه ۶) $R^2 = 0.78$ می‌باشد. خطای مجذور میانگین مربعات برابر با رابطه ۷ است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (d_s^o - d_s^c)^2}{N}} \quad (7)$$

میانگین خطای مطلق برابر با رابطه ۸:

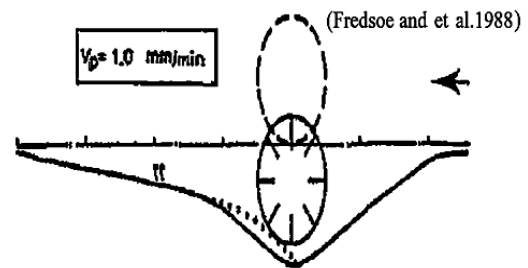
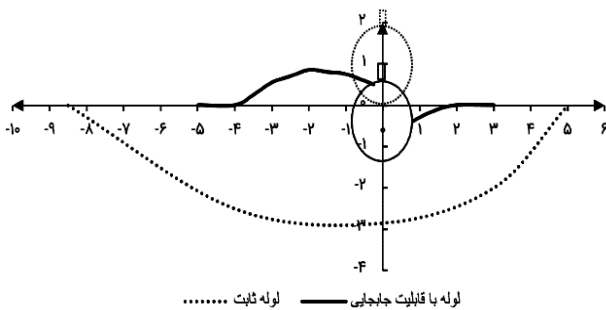
$$MAE = \frac{\sum |d_s^o - d_s^c|}{N} \quad (8)$$

با جابجایی لوله در طی فرآیند خوددغنی عمق آبشستگی تا ۵۴ درصد نسبت به لوله ثابت کاهش می‌یابد (شکل ۱۶ و ۱۷). علت این کاهش ناشی از آن است که در لوله ثابت پس از شروع فرآیند رگاب و ایجاد حفره بین لوله و بستر و افزایش فاصله مرحله فرسایش تونلی با شدت شکل می‌گیرد و فرسایش دنباله‌ای ایجاد شده نیز به توسعه آبشستگی می‌انجامد. 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 و برخورد گردابه دنباله لوله اسپویلر به بستر می‌شود که نتیجه آن کاهش آبشستگی می‌باشد. همان‌طور که از شکل ۱۷ مشاهده می‌شود نتایج عمق آبشستگی حاصل از رابطه ۱ با واقعیت (مشاهده‌ای در حالت لوله ثابت به فلوم) تطابق خوبی دارد.

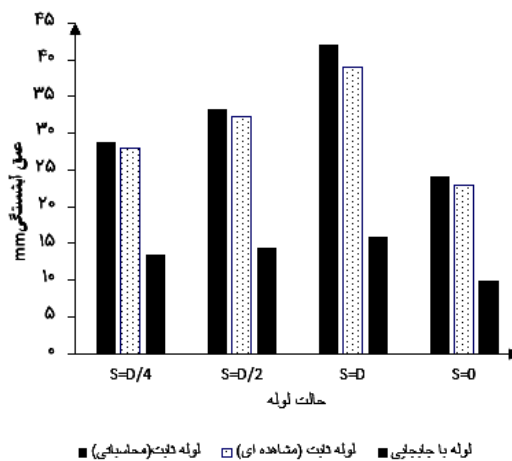
نوع دانه‌بندی استفاده شده است. پارامتر دانه‌بندی برای ارزیابی رابطه کافی نمی‌باشد. بنابراین نمی‌توان از رابطه ارزیابی شده به‌عنوان یک رابطه با کاربرد عمومی نام برد.

مقایسه فرآیند آبشستگی لوله ثابت و متحرک

در مطالعه فردسو و همکاران (Fredsoe et al., 1988) و مطالعات عددی بعدی پروفیل آبشستگی با حالت لوله ثابت تفاوتی چندانی ندارد اما پروفیل آبشستگی در حالت لوله متحرک کاملاً متفاوت بوده و لوله ثابت عمق آبشستگی زیادتری را نسبت به جابجایی طبیعی نشان می‌دهد (شکل ۱۶). در مطالعات قبلی لوله با سرعت ثابت و مرحله‌ای حرکت کرده اما در حالت طبیعی سرعت متناسب با ایجاد حفره و فرسایش تونلی نیز متناسب با آن بوده است.



شکل ۱۶- مقایسه پروفیل بستر در دو حالت لوله ثابت (آبشستگی) و متحرک (خوددغنی) (جابجایی مصنوعی، طبیعی)



شکل ۱۷- مقایسه عمق آبشستگی لوله ثابت، متحرک و حاصل از رابطه ۱ در حالات مختلف ارتفاع اسپویلر

تفاوت عمده‌ای با تحقیقات قبلی داشته باشد که در این پژوهش به بررسی این عملکرد پرداخته شد و نتایج ذیل حاصل گردید:
حالت جابجایی لوله توزیع جریان اطراف لوله را تغییر داده و باعث تغییر در عمق آبشستگی نسبت به لوله ثابت تا ۵۴ درصد می‌شود.

نتیجه‌گیری

مطالعات پیشین نشان می‌دهد که نصب اسپویلر در بالای خط لوله، سبب افزایش مقدار فرسایش در اطراف لوله می‌شود. عملکرد اسپویلر نصب شده بر روی لوله با قابلیت جابجایی طبیعی می‌تواند

- Singapor. 2: 506-521.
- 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.
- Fredsoe, J., Sumer, B.M and Arnskov, M. 1992. Time scale for wave/current scour below pipelines. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*. 2.2: 13-17.
- Hulsbergen, C.H. 1984. Stimulated self-burial of submarine pipelines. *Proceedings of the 16th Offshore Technology Conference*. Houston. Texas. 171-178.
- Hulsbergen, C. H. 1986. Spoilers for stimulated self-burial of submarine pipelines. *Proceedings of the 18th Offshore Technology Conference*. Houston. Texas. 441-444.
- Hulsbergen, C.H., Bijker, R. 1989. Effect of spoilers on submarine pipeline stability. *Proceedings of the 21th Offshore Technology Conference*, Houston. Texas. 337-350.
- Ibrahim, A and Nalluri, C. 1986. Scour prediction around marine pipelines. *Proceedings of the 5th International Symposium on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Tokyo, Japan. 679-684.
- Lee, W., Hur, D., Kim, H and Jo, H. 2016. Numerical Analysis on Self-Burial Mechanism of Submarine Pipeline with Spoiler under Steady Flow. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*. 146: 146-159.
- Mao, Y. 1986. The interaction between a pipeline and an erodible bed. *Series Paper Technical University of Denmark*, Issue 39.
- Mellvil, B.W. 1997. Pier and abutment scour. *Integrated approach*. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE. 132: 125-136.
- Moncada, A.T., Aguirre-Pe, J. 1999. Scour below pipeline in river crossings. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE. 125: 953-958.
- Oner, A. 2016. Numerical investigation of flow around a pipeline with a spoiler near a rigid bed. *Advances in Mechanical Engineering*. 8.6: 1-13
- Kjeldsen, S.P., Gjorvik, O., Bringaker, K.G and Jacobsen, J. 1973. Local scour near offshore pipelines. *Second International Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions Conference*. 308-331.
- Shan, M., Mao, Y. 1986. The interaction between a pipeline and an erodible bed. *Series paper 39*. Ph.D. thesis Technical University of Denmark.
- Shan, D. Liu, Y and Li, Y. 2015. Numerical simulation of submarine pipeline self-buried on sediment seabed. *Advances in Petroleum Exploration and*
- رابطه‌ای جهت تخمین عمق خوددغنی لوله در حالت نشست طبیعی آن پیشنهاد گردید. این رابطه نشان می‌دهد در بهترین حالت در نظر گرفته شده یعنی $S=D$ حداکثر عمق آبستگي 0.747 برابر قطر لوله می‌باشد. که نشان می‌دهد دفن شدگی به صورت کامل برای یک لوله متحرک حتی با اسپویلر صورت نمی‌گیرد.
- طول گسترش گردابه‌های دنباله‌ای در لوله با نصب اسپویلر و ازدیاد ارتفاع آن افزایش می‌یابد. بیش‌ترین افزایش طول گسترش گردابه‌های دنباله‌ای در اسپویلر به ارتفاع لوله بوده، به میزان $17 < \frac{X}{D} < 28$ می‌باشد.
- تاثیر اسپویلر در بستر درشت دانه در افزایش دفن شدگی بسیار بیش‌تر از بستر ریزدانه می‌باشد.
- تاثیر مقیاس در صورت رعایت شرایط یکسان در مواد و روش آزمایش‌ها در پدیده خوددغنی اندک می‌باشد.
- بیش‌ترین میزان دفن شدگی در زاویه صفر درجه اسپویلر نسبت به محور قایم لوله می‌باشد و پس از آن تغییر زاویه به سمت جریان (زاویه -45 درجه) درصد دفن شدگی بیش‌تری دارا می‌باشد.

منابع

- Barendse, C.A.M. 1988. Hydrodynamic forces on a near-bed offshore pipeline with spoiler during the selfburying process. *Thesis Report, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering*.
- Bijker, E.W and Leeuwestein, W. 1984. Interaction between pipelines and theseabed under the influence of waves and currents. *Seabed Mechanics, Edited Proceedings of a Symposium*. 235-242
- Cheng, L and Chew, L.W. 2003. Modelling of flow around a near-bed pipeline with a spoiler. *Ocean Engineering*. 30.13: 1595-1611.
- Chiew, Y. 1990. Mechanics of local scour around submarine pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering*. 116.4: 515-529.
- Chiew, Y.M. 1992. Effect of spoilers on scour at submarine pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE. 118.9: 1311-1317.
- 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.
- Dey, S and Singh, N.P. 2008. Clear-water scour below underwater pipelines under steady flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE. 134: 588-600.
- Fei, X.Y., Ning, G.J., Bin, N.E., Kizhikkilod, J., Le, T.S and Zhao, D. 2004. The Hangzhou bay pipeline crossing project use of spoilers to initiate pipeline self-burial and re-initiate future re-burial. *International Conference on Scour and Erosion*.

- Van Beek, F.A and Wind, H.G. 1990. Numerical modelling of erosion and sedimentation around pipelines. *Coastal Engineering*, 14:107-128.
- Zhao,Z.H and Fernando,H.J.S. 2008. Numerical modeling of a sagging pipeline using an eulerian two-phase model. *Journal of Turbulence*. 9: 1-20.
- Zhu,H., Qi,X., Lin,P and Yang,Y. 2013. Numerical simulation of flow around a submarine pipe with a spoiler and currentinduced scour beneath the pipe. *Applied Ocean Research*. 41: 87-100.
- Development. 10.1:
- Sumer,B.M and Fredsoe,J. 1990. Scour below pipelines in waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. 116: 307-323
- Sumer,B.M., Truelsen,C., Sichmann,T and Fredsoe,J. 2001. Onset of scour below pipelines and self-burial. *Coastal Engineering*. 42: 313-335.
- Sumer,B.M and Fredsoe,J. 2002. The mechanics of scour in the marine environment. *Advanced Series on Ocean Engineering* .Volume 17.

Experimental Analysis of the Interaction Between the Unidirectional Flow and Spoiler on Mechanism of Self burial Pipelines

J. Mehrabadi¹, B. Gahraman², K. Esmaili³ *

Recived: Jan.22, 2017

Accepted: Feb.18, 2017

Abstract

To stimulate the artificial self-burial of pipelines to provide safe conditions in erodible beds, the spoiler can be used at the top of the pipeline. The study of the performance of the spoiler that mounted on the naturally moveable pipe is a major gap that not founded in previous research. In this experimental study the parameters affecting the self-burial process of the pipelines were investigated. An equation was proposed for estimating the depth of self-burial in the normal settling of the pipe and was found that the moveable pipe decrease the scour depth by 54 percent in comparison with the fixed pipe. Maximum change in self -buried was obtained at $S=D$ (S is the length of spoiler & D is the diameter of the pipe) that was equal to 70 and 67 percent of the diameter of the pipe in fine and coarse beds, respectively. The length of Lee-wake erosion in the pipe with natural motion was greater than in which the fixed pipe and increase with installed spoiler and spoiler height increases. Maximum length of Lee-wake erosion happened when $S=D$. The most burying is at zero degrees of the spoiler to the vertical axis.

Key words: Pipelines, Self -buried, Spoiler, transportation

1- PhD Graduate of Hydraulic Structure.,Water Eng. Department , International Campus of Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- Professor., Department of Water Science and Engineering., Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

3- Associate. Professor., Department of Water Science and Engineering., Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

(*-Corresponding Author, Email: Esmaili@um.ac.ir)