

## مطالعه آزمایشگاهی تأثیر زاویه برخورد جریان در آبشستگی زیر لوله‌های مستغرق

پریا هدایت بهرامی<sup>۱\*</sup>، سید ساسان کاتورانی<sup>۲</sup>، علی حسین زاده دلیر<sup>۳</sup>، داود فرسادی زاده<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۷/۲۸ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۷/۱۷

<sup>۱</sup> دانش‌آموخته کارشناس ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه

<sup>۳</sup> استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: P.hedayatbahrami@gmail.com

### چکیده

خطوط لوله عبوری از دریاها و رودخانه‌ها به‌عنوان وسیله‌ای برای انتقال سیال (نفت، گاز، آب، فاضلاب) دارای اهمیت ویژه‌ای است زیرا پیامدهایی از قبیل تغییر دادن الگوی جریان و افزایش آشفتگی و تشدید تنش برشی بستر در اطراف خود را در پی دارند و این تغییرات سبب ایجاد حفره آبشستگی در زیر لوله می‌شود. وقوع حفره آبشستگی در زیر لوله‌ها منجر به ناپایداری و حتی شکست لوله و در نهایت موجب خسارات اقتصادی و زیست محیطی شدیدی می‌شود. در این مقاله نتایج تحقیق آزمایشگاهی تأثیر زاویه‌های مختلف برخورد آب بر روی بیشینه عمق آبشستگی در زیر لوله‌های مستغرق تحت جریان یک‌سویه ارائه شده است. آزمایش‌ها در دو حالت (۱) آبشستگی زیر لوله با زاویه برخورد ۹۰ درجه (۲) آبشستگی زیر لوله با زاویه برخورد کمتر از ۹۰ درجه لوله در ۲ موقعیت روی بستر و در فاصله  $D/4$  از بستر قرار داده شد. در انجام آزمایش‌ها از سه زاویه برخورد ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه استفاده شده است. نتایج نشان داد که زاویه برخورد جریان بر روی مکان قرارگیری بیشینه عمق آبشستگی و نحوه عملکرد گردابه‌ها مؤثر می‌باشد برای زاویه‌های کوچکتر از ۹۰ درجه بیشینه عمق آبشستگی در سمت راست فلوم اتفاق می‌افتاد.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی، جریان یک‌سویه، حفره آبشستگی، زاویه برخورد جریان، لوله مستغرق

## Laboratory Study on the Impact of Collision Angle of Flow on Scour under the Submerged Pipe

P Hedayat Bahrami<sup>1\*</sup>, S Katourany<sup>2</sup>, A Hoseinzadeh Dalir<sup>3</sup>, D Farsadizadeh<sup>3</sup>

Received: 20 October 2015

Accepted: 08 October 2016

<sup>1</sup>M.Sc. Graduate, Water Eng. Dept., Faculty of Agric., Tabriz University, Iran

<sup>2</sup> Ph.D. Student, Water Eng. Dept., Faculty of Agric, Razi University, Iran

<sup>3</sup> Prof., Water Eng. Dept, Faculty of Agric, Tabriz University, Iran

\*Corresponding Author, Email: P.hedayatbahrami@gmail.com

### Abstract

Pipelines passing through the seas and rivers as a means for transferring fluids (oil, gas, water, sewage) have a great importance since the pipelines change flow pattern, increase turbulence and intensify the bed shear stress around submerged pipes, which create scour holes under the pipes. Development of scour hole under pipelines leads to instability and failure of pipelines, which may cause severe environmental and economic damages. In this paper, the results of laboratory research on the effect of different attack angle of the approaching flow on the maximum scour depth under submerged pipes have been provided. Experiments were conducted in two modes: 1) scour under pipe with 90° angle of attack, 2) scour under pipe with less than 90° angle of attack. The pipe was also placed in 2 positions, i.e. on the bed and at a distance of D/4 from the bed. Three (45°, 60° and 90°) angles of attack were employed in the experiments. The results showed that the angle of attack is an effective parameter on the location of the maximum scour depth and performance of vortices. For angles smaller than 90 degrees, maximum scour depth occurred in the right hand side of the flume.

**Keywords:** Collision angle of flow, Scour, Scour hole, Submerged pipe, Unidirectional flow

### مقدمه

مجاورت لوله می‌تواند باعث تخریب آن شود. آبشستگی موضعی باعث جدایی خط لوله از بستر شده 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 گردابه‌ها باعث خستگی و در نهایت گسیختگی آن گردند (چیوو ۱۹۹۱). وقتی که خط لوله به داخل حفره فرو می‌رود فرسایش در زیر لوله تشدید شده و عمق حفره

خطوط لوله انتقال آب، نفت، گاز و ... اگر در مسیر خود از رودخانه‌ها و بستر دریاها عبور کنند، در طراحی آن‌ها باید دقت فراوانی به کار برده شود. چون گسیختگی آن‌ها پیامدهای اقتصادی و بعضاً زیست محیطی زیادی به دنبال خواهد داشت. بررسی‌های دقیق انجام شده روی خطوط لوله در حال بهره برداری نشان می‌دهند که آبشستگی موضعی ایجاد شده در

که در آن  $S$  عمق آبشستگی،  $D$  قطر لوله و  $V$  سرعت جریان می‌باشند. رابطه ۱ برای حالتی ارائه شده که خط لوله بر روی بستر افقی قرار گرفته است. در رابطه فوق اثر عمق جریان و اندازه دانه مواد رسوبی منظور نشده است بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری نمود که شرط بستر زنده در این آزمایش‌ها حاکم بوده است.

در حالت بدون بعد رابطه ۱ به صورت زیر در می‌آید:

$$\frac{S}{D} = 0.972 \theta^{0.2} \quad \text{For } \theta > \theta_{cr} \quad [2]$$

که  $\theta$  پارامتر پایداری (شیلدن) و  $\theta_{cr}$  مقدار بحرانی پارامتر پایداری برای شروع حرکت رسوب بر روی بستر می‌باشد.

مونکادا و آگوئیر (۱۹۹۹) موفق به ارائه دو رابطه- ساده ولی با دقت نسبتاً کم جهت تعیین عمق آبشستگی نهایی در زیر لوله واقع در یک کانال آزمایشگاهی شدند. همچنین آن‌ها متوجه شدند که تأثیر عدد رینولدز روی آبشستگی بسیار ناچیز می‌باشد. دو رابطه به دست آمده عبارتند از:

$$\frac{S}{D} = 0.9 \tanh(1.45 Fr) + 0.55 \quad [3]$$

$$\frac{S}{D} = 2 Fr^* \sec h \left( 1.7 \frac{e}{D} \right) \quad [4]$$

که در آنها  $S$  عمق آبشستگی  $D$  قطر لوله و کمیت  $e$  نشان‌دهنده فاصله اولیه بین لوله و بستر می‌باشد.

قدسیان (۲۰۰۰) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی مونکادا و آگوئیر (۱۹۹۹) معادله ۵ را جهت تعیین عمق نهایی آبشستگی در زیر لوله با درصد خطای میانگین ۱۰/۹۵ به دست آورد:

$$\frac{S}{D} = 1.563 Fr^{0.599} \quad [5]$$

ابراهیم و نالوری (۱۹۸۶) براساس آزمایش‌های گسترده‌ای که روی آبشستگی موضعی در اطراف خطوط لوله در دانشگاه نیوکاسل انجام شده بودند دو رابطه ۶ و ۷ را ارائه نمودند:

باز هم بیشتر می‌شود و این روند تا جایی ادامه پیدا می‌کند که بالاترین قسمت لوله هم‌تراز بستر می‌شود از این لحظه به بعد تحت شرایط جریان جزر و مدی امکان دارد که خط لوله به طور خودبه‌خود دفن گردد (حسین زاده دلیر ۱۹۹۶).

فرایند آبشستگی زیر خطوط لوله مستغرق روندی پیچیده دارد که به شرایط هیدرولیکی، ژئوتکنیکی و هیدرولوژیکی بستگی دارد، تغییر و شکست ساختار الگوی جریان توسط آبشستگی در زیر خطوط لوله در موارد شدید از جریان‌های ناپایدار و تعامل با شرایط در حال تغییر کانال رخ می‌دهد (بروسوز و رادکیوی ۱۹۹۱). اگرچه مطالعات فیزیکی و عددی زیادی در مورد خطوط لوله دریایی در روی بستر متحرک وجود دارد اما تعداد کمی تحقیق در مورد آبشستگی موضعی در عرض رودخانه متمرکز شده است که یک مسئله مهم برای مدیریت منابع آب است. دهانه آزاد این خطوط لوله در معرض تخریب توسط روند طبیعی و فعالیت‌های انسانی می‌باشد که ممکن است باعث تشدید مسائل زیست محیطی و مشکلات اقتصادی شود (موسوی و همکاران ۲۰۰۹).

چن و زانگ (۲۰۰۹) آبشستگی زیر خطوط لوله را به سه دیدگاه متفاوت مدل‌سازی طبقه‌بندی کردند. این مدل‌سازی‌ها عبارتند از: مدل‌سازی فیزیکی دو بعدی آبشستگی، مدل‌سازی فیزیکی سه بعدی آبشستگی و مدل‌سازی عددی آبشستگی. آنها همچنین بیان کردند که شروع پدیده آبشستگی را می‌توان به نفوذ جریان زیر لوله‌ها نسبت داد یا به جریان نشسته زیر خطوط لوله که از یک جهش بزرگ توسط ضریب فشار نسبی متفاوت بین بالادست و پایین‌دست ناشی می‌شود.

کیجلدسن و همکاران (۱۹۷۳) تحقیقی را درباره آبشستگی ایجاد شده در اطراف خطوط لوله ناشی از جریان یک‌سویه انجام و رابطه تجربی ۱ برای محاسبه عمق آبشستگی در زیر خطوط لوله ارائه شد:

$$S = 0.972 \left( \frac{V^2}{2g} \right)^{0.2} D^{0.8} \quad [1]$$

مستغرق انجام شده است اما در بسیاری از این تحقیقات در مورد تأثیر نفوذ با زاویه مورب بر روی پروفیل آبشستگی بحث نشده است. هدف از تحقیق حاضر بررسی چگونگی وقوع پدیده آبشستگی در زیر خطوط لوله تحت جریان یک سویه با زوایای مختلف برخورد آب می باشد.

### مواد و روش‌ها

آزمایشات در فلوم مستطیلی فلزی - شیشه‌ای آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تبریز به طول ۱۰ متر، عرض ۲۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر مطابق شکل ۱ انجام شد. جریان ورودی فلوم به وسیله پمپاژ از مخزن زیرزمینی آزمایشگاه تأمین شده است. اندازه‌گیری دبی جریان توسط یک سرریز لبه تیز مثلثی قرار گرفته در انتهای فلوم که واسنجی گردیده و دارای رابطه دبی - اشل مشخصی است، انجام می‌شود. عمق پایاب توسط یک دریچه قابل تنظیم در پایین دست طوری تنظیم شده که شرایط استغراق برقرار شود. مقدار عمق جریان به وسیله عمق‌سنج با دقت ۰/۱ میلی‌متر که در بالای فلوم نصب می‌شود قرائت گردیده است. همچنین از کف کاذب به ارتفاع ۱۳ سانتی‌متر در ابتدا و انتهای فلوم استفاده شد. برای ایجاد جریان یکنواخت در قسمت ابتدایی کف کاذب با استفاده از ذرات ماسه پوشانده شد تا جریان یکنواخت در ابتدای بستر شنی ایجاد شود. برای حذف تأثیر غیریکنواختی رسوبات بر آبشستگی موضعی، انحراف معیار هندسی ذرات برای رسوبات با دانه‌بندی یکنواخت حدود ۱/۴ در نظر گرفته شد (چیوو ۱۹۹۱).

$$\frac{S}{D} = 4.706 \left( \frac{V}{V_c} \right)^{0.89} \left( \frac{V}{\sqrt{g y_0}} \right)^{1.43} + 0.06 \quad [6]$$

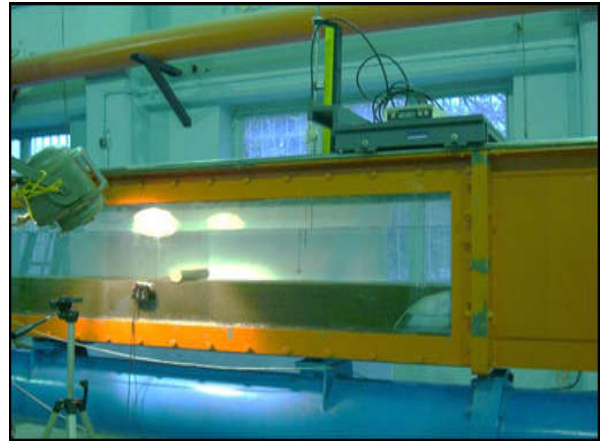
$$\frac{S}{D} = 0.084 \left( \frac{V}{V_c} \right)^{-0.3} \left( \frac{V}{\sqrt{g y_0}} \right)^{-0.16} + 0.06 \quad [7]$$

که در آنها  $S$  عمق آبشستگی،  $D$  قطر لوله،  $V$  سرعت متوسط جریان نزدیک شونده،  $V_c$  سرعت بحرانی جریان جهت حرکت رسوب،  $g$  شتاب ثقل و  $y_0$  عمق جریان می‌باشد. رابطه‌های ۶ و ۷ به ترتیب برای محاسبه آبشستگی در شرایط آب زلال و بستر زنده به کار می‌روند (چیوو ۱۹۹۱). نقص مهم رابطه‌های ۶ و ۷ این است که برای سرعت جریان صفر، عمق آبشستگی صفر نیست.

دی و سینگ (۲۰۰۸) با کمک نتایج آزمایشگاهی به تشریح تأثیر پارامترهای مختلف بر روی عمق آبشستگی پرداختند، به طوری که مشخص شد با افزایش عمق جریان ورودی ( $h$ ) عمق آبشستگی ( $d_s$ ) افزایش می‌یابد و برای  $h/b > 5$ ،  $d_s/b$  مستقل از  $h/b$  می‌شود و در عمق آبشستگی تأثیر ندارد ( $b$  قطر یا عرض لوله می‌باشد).

در گذشته تعدادی از رابطه‌های تجربی برای برآورد بیشینه عمق آبشستگی در زیر خط لوله توسعه داده شده بود (چاو و هنسی ۱۹۷۲). اگرچه تعداد زیادی از تکنیک‌ها و روش‌های گوناگون برای پیش‌بینی بیشینه عمق آبشستگی زیر خطوط لوله مطرح شده است، اما محققان تعداد کمی از این تکنیک‌ها و روش‌های مناسب پیدا کرده‌اند که به راحتی قابل اجرا باشد (دی و سینگ ۲۰۰۸). به تازگی دنگ و همکاران (۲۰۱۳) با تحلیل ابعادی برخی اقدامات حفاظتی براساس اصل کاهش خطر ارائه نمودند آن‌ها همچنین رابطه‌ای بین محور لوله و جریان گردشی رودخانه ارائه داده‌اند. گردابه‌های ایجاد شده در محدوده حفره آبشستگی عامل اصلی انتقال رسوبات و ایجاد حفره بوده‌اند. با انجام آزمایشات بستر ثابت، محدوده تنش برشی بستر مورد مطالعه قرار گرفت (حاجی کندی ۱۳۹۱). اگرچه تحقیقات متعددی برای مطالعه فرآیند آبشستگی زیر لوله‌های

در انجام آزمایش‌ها از یک لوله با قطر ثابت ۳۰ میلی‌متر استفاده شد و همچنین قطر ذرات رسوب و شدت جریان در این آزمایش‌ها ثابت در نظر گرفته شد در انجام آزمایش‌ها سه لوله از جنس پلی‌اتیلن با مقطع دایره‌ای با زاویه برخورد ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه به‌کار برده شد. در هرکدام از حالت‌های برخورد زاویه لوله در دو موقعیت روی بستر و در فاصله  $D/4$  از بستر، قرار داده شد (جدول ۲).



شکل ۱- تصویر فلوم آزمایشگاهی.

جدول ۱- پارامترهای به‌کار رفته در این تحقیق.

واحد	نماد	پارامتر
mm	D	قطر لوله
mm	G	فاصله لوله از سطح بستر
°	$\theta$	زاویه برخورد جریان با محور لوله
mm	$d_s$	عمق آبشستگی
mm	$d_{s-max}$	بیشینه عمق آبشستگی
-	$T^*$	زمان نسبی
-	Fr	عدد فرود لوله

مقدار دبی ( $Q$ ) و عمق جریان ( $y$ ) با در نظر گرفتن نسبت  $y/D \geq 3$  و برقراری شرایط آبشستگی آب زلال ( $0.9 \approx 0.8 \leq U/U_c$ ) انتخاب شد. برای برقراری شرایط آبشستگی آب زلال در این تحقیق، همه آزمایش‌ها با دبی ثابت (حدود  $14/0.8$  لیتر بر ثانیه) در نظر گرفته شد تا بتوان با تنظیم عمق آب در بالادست لوله، شرایط آبشستگی آب زلال را ایجاد کرد. پس از هر آزمایش برای اندازه‌گیری میزان آبشستگی از یک عمق سنج که در عرض و طول فلوم به راحتی حرکت می‌کرد استفاده شد.

در ابتدای هر آزمایش برای جلوگیری از آبشستگی ناخواسته در سطح بستر، فلوم از انتهای پایین‌دست از آب پر و بعد از رسیدن به عمق قابل قبول جریان را ساکن نگه داشته و لوله در نقطه مورد نظر (در ۸۰ سانتی‌متری از ابتدای بستر) قرار داده شد. برای آگیری اولیه فلوم، جریان به آرامی برقرار می‌شد تا مانع از بهم خوردن بستر و تشکیل رپیل در سطح بستر شود. پروفیل آبشستگی در فواصل منظم بر روی یک صفحه شفاف که در قسمت خروجی دیواره شیشه‌ای نصب شده ترسیم شد. در این آزمایش‌ها سرعت متوسط جریان ورودی ( $U$ ) تقریباً بین  $0.8$  تا  $0.9$  سرعت بحرانی ( $U_c$ ) تنظیم شد تا شرایط آبشستگی آب زلال برقرار گردد. سرعت بحرانی ورودی  $U_c$  توسط رابطه نیمه‌لگاریتمی ۸ به‌دست می‌آید (دی و سینگ ۲۰۰۸).

$$\frac{U_c}{u_{*c}} = 5.75 \log(5.53 h/d) \quad [8]$$

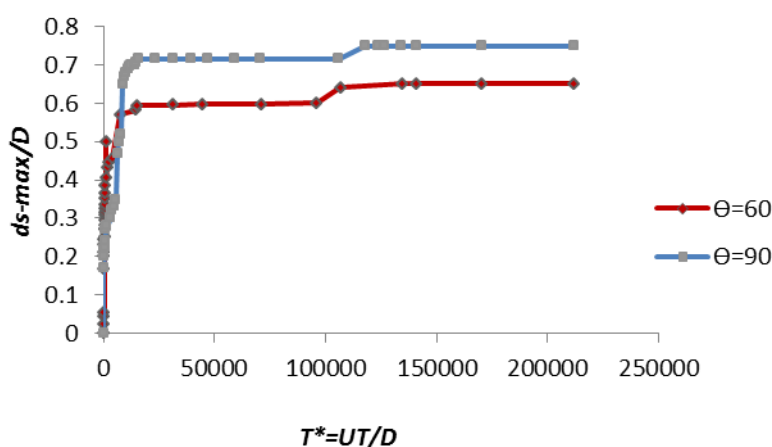
که در این معادله  $u_{*c}$  سرعت برشی بحرانی ذرات می‌باشد که از دیاگرام شیلدز به‌دست می‌آید و  $d$  اندازه میانه ذرات رسوب می‌باشد.

پارامترهای به‌کار رفته در شکل‌ها و جدول‌ها این

تحقیق در جدول ۱ معرفی شده‌اند.

جدول ۲- شرایط جریان در آزمایش‌های انجام شده.

$d_{50}(mm)$	$Q(m^3s^{-1})$	$y(m)$	$V_c(ms^{-1})$	$V/V_c$	Fr	D(mm)	$\theta(^{\circ})$	Gap
$1/14 \times 10^{-2}$	$0.1408$	$0.16$	$0.392$	$0.9$	$0.28$	۳۰	۹۰	.
$1/14 \times 10^{-2}$	$0.1408$	$0.16$	$0.392$	$0.9$	$0.28$	۳۰	۹۰	D/4
$1/14 \times 10^{-2}$	$0.1408$	$0.16$	$0.392$	$0.9$	$0.28$	۳۰	۶۰	.
$1/14 \times 10^{-2}$	$0.1408$	$0.16$	$0.392$	$0.9$	$0.28$	۳۰	۶۰	D/4
$1/14 \times 10^{-2}$	$0.1408$	$0.16$	$0.392$	$0.9$	$0.28$	۳۰	۴۵	.
$1/14 \times 10^{-2}$	$0.1408$	$0.16$	$0.392$	$0.9$	$0.28$	۳۰	۴۵	D/4



شکل ۲- منحنی بی‌بعد عمق آبشستگی.

## نتایج و بحث

آزمایش‌های شاهد با مدت زمان طولانی برای زاویه برخورد ۹۰ درجه و زاویه‌های برخورد کوچکتر از ۹۰ درجه با قطر ۳۰ میلی‌متر صورت گرفت. نتایج مربوط به عمق نسبی آبشستگی برای هر دو زاویه برخورد ۹۰ و ۶۰ درجه در شکل ۲ نشان داده شده است. عمق نسبی  $\frac{d_s}{D}$  برای زاویه‌های برخورد ۹۰ و ۶۰ درجه در ۲۰ ساعت به مقدار عددی ۰/۷۵ و ۰/۶۵ رسیدند. معیار زمان تعادل در این تحقیق، مدت زمانی است که تغییرات عمق آبشستگی در ۳ ساعت متوالی بیش از یک میلی‌متر نباشد (کومار و همکاران ۱۹۹۹).

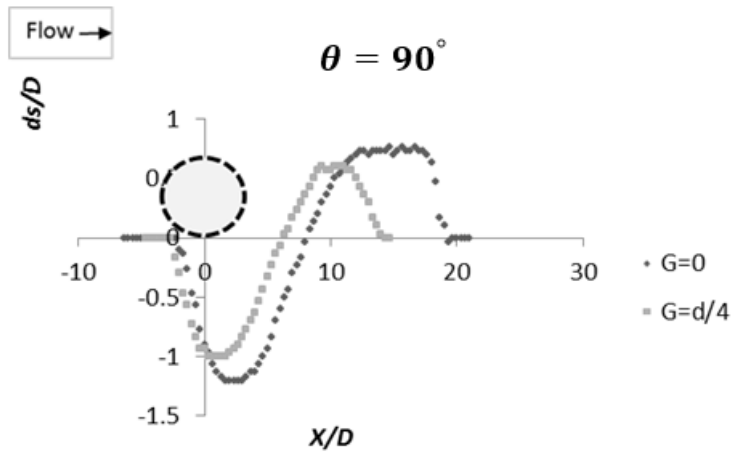
### الف) زاویه برخورد ۹۰ درجه

بعد از اتمام آزمایش، پروفیل آبشستگی در محور مرکزی فلوم برداشت شد که در شکل ۳ می‌توان بیشینه عمق آبشستگی در زیر لوله‌های با زاویه برخورد ۹۰

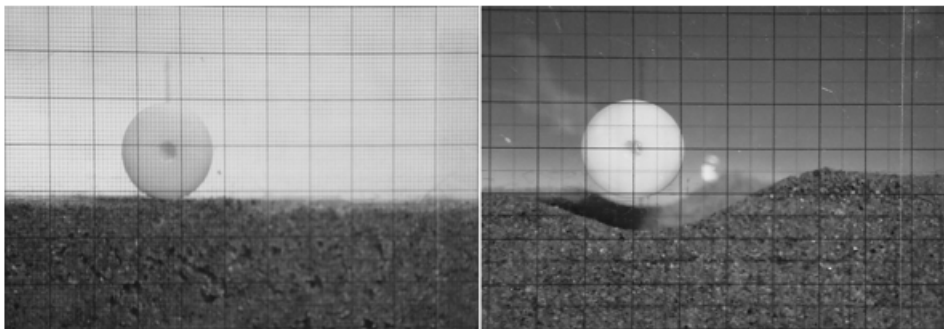
درجه را مشاهده کرد. شکل ۳ نشان می‌دهد که هر چقدر فاصله بین لوله و بستر افزایش پیدا کند. آبشستگی زیر لوله کمتر می‌شود، علت این امر این است هر چقدر فاصله کمتر باشد شدت جریان عبوری بیشتر می‌باشد و تنش برشی نیز افزایش می‌یابد با افزایش فاصله بین لوله و بستر تنش برشی نیز کاهش می‌یابد کاهش تنش برشی با کاهش عمق آبشستگی همراه است. بیشینه عمق آبشستگی در زاویه برخورد ۹۰ درجه در محور مرکزی لوله رخ می‌دهد، طوری که بیشینه عمق آبشستگی و تپه متقارن در پایین‌دست لوله تقریباً در یک راستا قرار می‌گیرند و چون در یک راستا هستند در شکل مشاهده شد که با افزایش فاصله از بستر بیشینه تپه آبشستگی کاهش یافته است. همچنین در شکل می‌توان مشاهده کرد که با افزایش فاصله از بستر بیشینه عمق آبشستگی به سمت جلو پیشروی می‌کند.

درجه در ابتدا (شکل سمت چپ) و انتهای (شکل سمت راست) آزمایش مشاهده می‌شود.

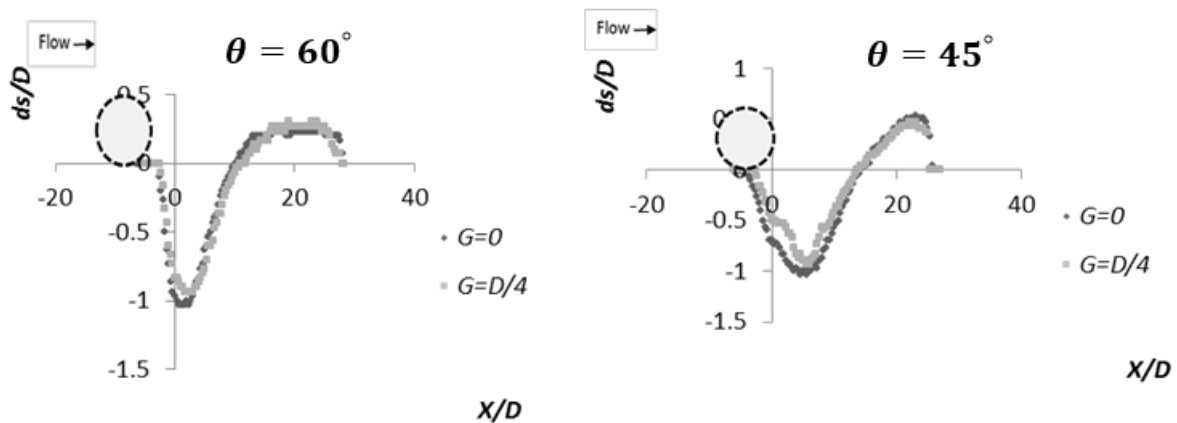
اما عمق نسبی  $\frac{ds}{D}$  کاهش پیدا کرده و تپه تشکیل شده در پایین دست لوله بیشتر گسترش یافته است. در شکل ۴ تصاویری از آبستگی با زاویه برخورد ۹۰



شکل ۳- پروفیل طولی آبستگی برای زاویه برخورد ۹۰ درجه.



شکل ۴- تصاویر پروفیل آبستگی برای زاویه برخورد ۹۰ درجه.



شکل ۵- پروفیل‌های طولی آبستگی برای زاویه‌های برخورد کمتر از ۹۰ درجه.

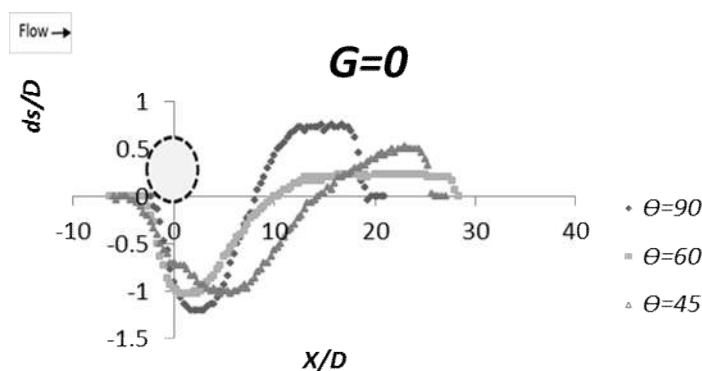
### ب) زاویه برخورد کوچکتر از ۹۰ درجه

به دلیل تغییر زاویه برخورد آب علاوه بر جت آب و گرداب‌های برخاستگی که قبلاً در نحوه و چگونگی آبشستگی تأثیر گذار بوده‌اند، چگونگی برخورد آب با لوله نیز بر روند آبشستگی تأثیر دارد.

تغییر جهت جریان، توسط لوله‌های با زاویه برخورد کمتر از ۹۰ درجه یک فشار متفاوت بین بالادست و پایین دست لوله ایجاد می‌کند این اختلاف فشار باعث نشت جریان از زیر لوله می‌شود وقتی سرعت افزایش می‌یابد فشار دینامیک نیز افزایش می‌یابد سرعت جریان درون کانال تا وقتی که نقطه بحرانی تشکیل شود (جایی که مخلوط ماسه و آب فرار کند) افزایش می‌یابد و باعث می‌شود در نزدیکی لوله و در قسمت راست لوله مخلوطی از ماسه و آب در جهت زاویه و انحنای لوله به سمت چپ لوله رفته و روی هم انباشته شوند. یعنی در حالت کلی می‌توان گفت که بیشتر عمق آبشستگی در سمت راست کانال (جایی که برخورد آب با لوله زودتر اتفاق می‌افتد). باز هم در این آزمایش‌ها مشاهده شد که تغییرات پروفیل گودال آبشستگی در جهت قائم بسیار سریع‌تر از تغییرات آن در جهت طولی است. همچنین در آزمایش‌های زاویه‌های

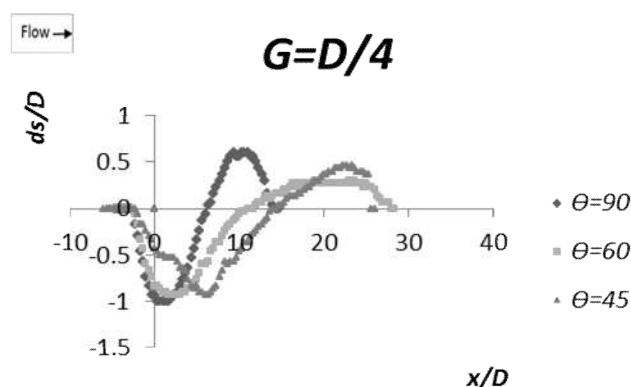
برخورد کوچکتر از ۹۰ درجه مطابق شکل ۵ مشاهده شد که بیشینه عمق آبشستگی و تپه ماسه‌ای در یک راستا قرار نمی‌گیرند. گاه‌آ‌ پیش می‌آید که محل عمق آبشستگی عوض می‌شود به مقدار کمی به سمت محور کانال می‌آید. در نتیجه با بزرگتر شدن شکاف بین لوله و بستر ناشی از آبشستگی سرعت جریان در زیر لوله کاهش یافته و شدت فرسایش تونلی کاهش و به تدریج از بین می‌رود و عمق آبشستگی به تعادل می‌رسد.

می‌توان از شکل‌های ۶ و ۷ نتیجه گرفت که هر چه قدر فاصله لوله از بستر افزایش یابد مقدار بیشینه عمق آبشستگی کاهش می‌یابد به دلیل این که هر چه فاصله بین لوله و بستر کم باشد در این مرحله مقدار زیادی آب از زیر لوله عبور می‌کند که باعث به وجود آمدن جریانی با سرعت خیلی زیاد در فاصله بین لوله و بستر می‌شود، در نتیجه در روی بستر زیر خط لوله تنش‌های برشی خیلی بزرگی به وجود می‌آید ولی با ایجاد فاصله بین لوله و بستر سرعت جریان در زیر لوله کاهش می‌یابد و تنش برشی کم می‌شود و عمق آبشستگی هم کم می‌شود.



شکل ۶- پروفیل طولی آبشستگی برای فاصله  $G=0$  از بستر.



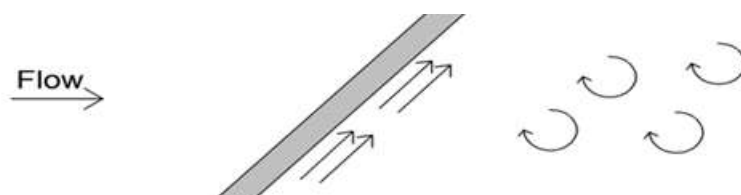


شکل ۷- پروفیل طولی آبشستگی برای فاصله  $G=D/4$  از بستر.

برخورد کوچکتر از  $90^\circ$  درجه به دست آمد، با نتایج گفته شده در مورد زاویه برخورد  $90^\circ$  درجه متفاوت است. پس می‌توان گفت که زاویه برخورد آب بر روی نحوه آبشستگی تأثیر مستقیم دارد. شکل ۸ طرح شماتیک عملکرد گرداب‌ها را نشان می‌دهد می‌توان گفت انتشار گرداب‌های برخاستگی از بالا و پایین لوله به صورت تناوبی و در خلاف جهت هم اتفاق می‌افتد.

البته قابل ذکر است که با توجه به عرض محدود کانال، دیواره‌ها می‌تواند تأثیر به‌سزایی در محل آبشستگی بگذارند. ولی در بیشتر آزمایش‌های با زاویه برخورد کوچکتر از  $90^\circ$  درجه این تحقیق (با توجه به نحوه قرارگیری لوله) بیشینه عمق آبشستگی در سمت راست اتفاق می‌افتد.

نتایج و مشاهداتی که از بررسی زاویه‌های



شکل ۸- طرح شماتیک عملکرد گرداب‌ها نما از بالا.



شکل ۹- نحوه قرارگیری لوله‌ها با زاویه برخورد کوچکتر از  $90^\circ$  درجه در کانال.

در معرض فرسایش قرار می‌گیرد و ماسه‌های شسته شده را با توجه به جهت لوله و بردار سرعت به سمت چپ و جلوی لوله می‌فرستد. به همین دلیل بیشینه عمق آبشستگی در زاویه برخورد  $90^\circ$  درجه در محور لوله اتفاق می‌افتد اما در لوله‌های با زاویه برخورد کوچکتر از  $90^\circ$  درجه در قسمتی که به بالادست لوله نزدیکتر

با توجه به شکل ۸ می‌توان گفت در لوله‌های با زاویه برخورد  $90^\circ$  درجه تمام طول لوله در مسیر جریان قرار می‌گیرد هر چه به طرف محور کانال از دیواره‌ها فاصله بگیریم حفره هم می‌تواند افزایش پیدا کند اما در لوله‌های با زاویه برخورد کوچکتر از  $90^\circ$  درجه قسمتی از لوله که به بالادست نزدیکتر است بیشتر و زودتر

مشاهده نشد یعنی نمودارها تقریباً در حالت‌های مختلف فاصله از بستر تغییر چندانی نمی‌کنند و تقریباً مشابه هستند. شکل ۱۰ عکس‌هایی در مورد آبشستگی لوله‌های با زاویه کمتر از ۹۰ درجه نحوه قرارگیری لوله‌ها بر روی بستر متحرک نشان می‌دهند.



شکل ۱۰- تصاویر پروفیل آبشستگی برای زاویه برخورد کمتر از ۹۰ درجه.



شکل گرفته در پشت لوله‌هایی با فاصله کمتر از بستر در فاصله دورتری نسبت به گردابه‌های شکل گرفته در پشت لوله‌های با فاصله بیشتر از بستر به بستر برخورد می‌کنند.

۳) از سوی دیگر برای لوله‌های با زاویه برخورد کوچکتر از ۹۰ درجه در سراسر کانال بیشینه عمق آبشستگی در دیوار سمت راست اتفاق می‌افتد چون تغییر جهت جریان توسط لوله‌های زاویه‌دار یک فشار متفاوت بین بالادست و پایین‌دست لوله ایجاد می‌کند و باعث حرکت و تغییر مکان شن و ماسه به سمت راست می‌شوند.

۴) با کاهش زاویه برخورد فرآیند گردابه‌فکنی به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد در نتیجه عمق آبشستگی کاهش می‌یابد.

است با توجه به شکل ۱۰ در این تحقیق در سمت راست اتفاق می‌افتد. همچنین با توجه به نمودارها می‌توان گفت در زاویه‌های برخورد کوچکتر از ۹۰ درجه تفاوت فاحشی در بین بیشینه عمق آبشستگی در حالت‌های مختلف از بستر در مقایسه با زاویه برخورد ۹۰ درجه

### نتیجه‌گیری کلی

۱) با افزایش فاصله لوله از بستر بیشینه عمق آبشستگی ناشی از گردابه‌های برخاستگی کاهش می‌یابد علت این امر این است که با افزایش فاصله لوله از بستر گردابه‌های شکل گرفته از بالا و پایین لوله عبور می‌کنند و گردابه‌های شکل گرفته کوچک‌تر گشته و با قدرت کمتری به بستر برخورد می‌کنند، اما در حالت تماس بر بستر گردابه‌ها بیشتر از بالای لوله عبور کرده که قابلیت انتقال رسوبات بیشتری را خواهند داشت فلذا عمق گودال آبشستگی ناشی از گردابه‌های برخاستگی در این حالت عمیق‌تر خواهد بود.

۲) با کاهش فاصله از بستر موقعیت بیشینه عمق آبشستگی در پایین‌دست لوله ناشی از گردابه‌های برخاستگی از نزدیکی لوله به سمت پایین‌دست پیشروی می‌کند علت این امر شاید بدین دلیل است که گردابه‌های

## منابع مورد استفاده

- حاجی کندی ه، و وثوقی ح، ۱۳۹۵. مطالعه آزمایشگاهی پارامترهای آبشستگی بالادست اریفیس مربعی تحت هد ثابت. نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، جلد ۴۶، شماره ۸۳، صفحه‌های ۷۱ تا ۸۱.
- Breusers H N C and Raudkivi A J, 1991. Scouring, Hydraulic Structure Design Manual. No. 2. I.A.H.R. Balkema. 152 pages.
- Chen C and Zhang J, 2009. A review on scour modelling below pipelines. *Infrastructures Hidden Assets ASCE* 1(1): 1019-1028.
- Chiew Y M. 1991. Prediction of maximum scour depth at submarine pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 117(4): 452-466.
- Choa J I and Hennessy P V, 1972. Local Scour under ocean outfall pipe-lines. *Water pollution Control Federation* 44(7): 1443-1447.
- Day S and Singh N, 2008. Clear-Water scour below underwater pipelines under steady flow. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 134(5): 588-600.
- Deng Q, Li L and Zhang Y, 2013. An analysis of river washout influence and protective measures of long-distance gas and oil pipelines and trenchless technology for construction, oil and gas. *Engineering (ICPTT 2012) Wuhan China* October 19-22. 2012. ASCE pp, 1280-1293.
- Godsian M, 2000. Discussion of scour below pipeline in river crossing. By A.T. Moncada M, and Aguirre-Pe. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 135(1):13-21.
- Hosseinzadeh Dalir A, 1996. An experimental and theoretical study of the mechanics of self-burial of seabed oil and gas Pipelines. A Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy in the University of London. Dept., of Civil and Environmental Engineering, University College London, England.
- Ibrahim A and Nalluri C, 1986. Scour prediction around marine pipelines. *Proc 5th International Symp. On offshore Mechanics and Arctic Engineering, ASME, Tokyo, Japan, Vol (3): 679-684.*
- Kjeldsen S P, Gjorsvik O, Bringaker K G and Jacobsen J, 1973. Local scour near offshore pipelines. *Proc 2nd Int Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Univ. of Iceland, 308-331.*
- Kumar V R K, Ranga-Raju G and Vital N, 1999. Reduction of Local scour around bridge piers using slots and collars. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 125(12): 1302-1305.
- Moncada M A T and Aguirre-Pe J, 1999. Scour below pipeline in river crossing. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 125(9): 953-958.
- Mousavi M E, Bakhtiary A Y and Enshaei N, 2009. The equivalent depth of wave-induced scour around off shore pipelines. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering ASME* 131(2): 43-48.