

دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران – سازه های دریایی

شبیه سازی عددی آب شستگی اطراف لوله تحت جریان

نگارش : نسترن انشانی

استاد راهنما : علی اکبر صالحی نیشابوری

تابستان ۱۳۸۵

## چکیده

با توسعه سريع صنايع دريابى در سه دهه گذشته، استفاده از خطوط لوله به عنوان سيستم بهينه انتقال گاز و نفت خام از سکوهاى نفتى فراساحل رواج گسترده اى يافته است. قرارگيرى لوله بر بستر دريا و تأثير آن بر رژيم جريانهاى موضعى منجر به وقوع مشکلات متعددى از قبيل آب شستگى اطراف لوله و ايجاد دهانههاى آزاد، تحميل بارهاى نوسانى و بروز خستگى و در نهايت آسيب جدى خط لوله و تحميل هزينه هاى اقتصادى و زيست محيطى مى گردد. با توجه به اهميت سازه لوله در کشور ايران به عنوان يکى از صاحبان بزرگ منابع نفت و گاز جهان، انجام مطالعات تکميلى که بتواند در پيش بينى پديده آب شستگى و بارهاى وارده بر لوله مورد استفاده قرار گيرد ضرورى مى باشد.

پژوهش حاضر، به منظور کمک به درک اندرکنش لوله- جريان و لوله- جريان- بستر ماسه اى به شبيهه سازى دو بعدى جريان پيرامون خط لوله واقع بر بستر صلب و آب شستگى اطراف لوله تحت جريان پايدار با استفاده از مدل عددى Flow-3D مى پردازد. مدل آشفتگى  $k-\epsilon$  به منظور ارزيابى مدل در محاسبه سرعت جريان اطراف لوله مورد استفاده قرار گرفته و نتايج حاصله با داده هاى آزمايشگاهى مطابقت داده شده است. مقايسه هاى انجام شده بيانگر آن است که دقت مدل در پيش بينى سرعت بالادست بسيار خوب بوده و در پايين دست نيز از دقت قابل قبولى برخوردار مى باشد. اثر فاصله لوله از بستر بر بسامد گردابه هاى پايين دست بررسى و ملاحظه گرديد با افزايش فاصله لوله از بستر از يک حد مرزى به بعد تغييرى در بسامد فرآيند گردابه فکنى به وجود نخواهد آمد. اثر زبرى لوله بر پديده گردابه فکنى با استفاده از مدل هاى آشفتگى  $k-\epsilon$  و RNG مورد مطالعه قرار گرفت و مشاهده گرديد با افزايش زبرى لوله بسامد و دامنه نوسان گردابه هاى پايين دست افزايش مى يابد. همچنين بررسى هاى انجام شده نشان مى دهد با دور شدن لوله از بستر، سرعت جريان در شکاف بين لوله و بستر کاهش يافته و تنش برشى بستر در مجاورت لوله به تنش برشى جريان دست نخورده نزديک مى شود. طول ناحيه چرخشى بالادست و پايين دست با استفاده از مدل هاى آشفتگى  $k-\epsilon$  و RNG بررسى و ملاحظه گرديد محاسبات مدل RNG به داده هاى آزمايشگاهى نزديک تر است.

به منظور مطالعه آب شستگی تحت جریان، مدل آزمایشگاهی Mao (۱۹۸۶) در شرایط بستر فعال با استفاده از مدل های آشفتگی  $k-\epsilon$  و  $RNG$  گردید. مقایسه نتایج به دست آمده از شبیه سازی عددی آب شستگی اطراف لوله نشان داد که محاسبات مدل عددی در شرایط بستر فعال از دقت مناسب برخوردار می باشد. از بین پارامترهای مؤثر بر پروفیل نهایی آب شستگی، اثر قطر لوله و قطر متوسط ذرات رسوب بر عمق حداکثر و طول حفره آب شستگی بررسی و دقت نتایج حاصله در مقایسه با روابط آزمایشگاهی قابل قبول ارزیابی گردید. البته با افزایش قطر متوسط ذرات رسوب و کاهش عدد شیلدز، عمق بی بعد آب شستگی پیش بینی شده توسط مدل عددی کم تر از نتایج آزمایشگاهی بوده و پس از برقراری شرایط آب زلال هیچ گونه آب شستگی اطراف لوله مشاهده نمی شود. به طور کلی نتایج حاصله از پژوهش بیانگر آن است که مدل عددی Flow-3D تنها در شرایط بستر فعال قادر به پیش بینی پدیده آب شستگی اطراف لوله می باشد.

واژگان کلیدی: خط لوله، شبیه سازی عددی، آب شستگی، گردابه فکنی، جریان پایدار، Flow-3D

فهرست مطالب

I	چکیده	.....
III	فهرست مطالب	.....
۱	مقدمه	.....
۳	<b>فصل ۱- مفاهیم اولیه آب شستگی و بررسی مکانیسم آب شستگی اطراف خط لوله</b>	<b>.....</b>
۴	۱-۱ مقدمه	.....
۵	۲-۱ مفاهیم اولیه آب شستگی	.....
۵	۱-۲-۱ ضریب بزرگ نمایی	.....
۵	۲-۲-۱ عمق تعادل و مقیاس زمان آب شستگی	.....
۶	۳-۲-۱ پارامتر شیلدز	.....
۷	۴-۲-۱ آب شستگی آب زلال و آب شستگی بستر فعال	.....
۸	۳-۱ مکانیسم آب شستگی زیر خطوط لوله	.....
۸	۱-۳-۱ مکانیسم آغاز آب شستگی - جریان نشی و رگاب زیر لوله	.....
۱۲	۲-۳-۱ فرسایش تونلی	.....
۱۲	۳-۳-۱ فرسایش گردابی	.....
۱۴	۴-۱ آب شستگی سه بعدی و پدیده خودمدفونی	.....
۱۶	۵-۱ محافظت از خطوط لوله در برابر آب شستگی	.....
۱۶	۶-۱ جمع بندی فصل	.....
۱۷	<b>فصل ۲- تاریخچه مطالعات</b>	<b>.....</b>
۱۸	۱-۲ مقدمه	.....
۱۸	۲-۲ مدل سازی فیزیکی	.....
۱۸	۱-۲-۲ عمق آب شستگی در جریان ماندگار	.....
۲۱	۲-۲-۲ تأثیر عوامل مختلف بر عمق آب شستگی	.....
۲۴	۳-۲-۲ مقیاس زمان آب شستگی در جریان پایدار	.....
۲۵	۳-۲ مدل سازی ریاضی	.....
۲۸	۴-۲ موضوع پژوهش حاضر:	.....
۲۹	۵-۲ جمع بندی فصل	.....

۳۰	فصل ۳- مبانی مدل سازی عددی جریان و آب شستگی در نرم افزار Flow-3D
۳۱	۱-۳ مقدمه
۳۲	۲-۳ هیدرودینامیک
۳۵	۳-۳ مدل های آشفتگی
۳۶	۴-۳ انتقال رسوب
۴۰	۵-۳ جمع بندی فصل
۴۱	فصل ۴- شبیه سازی عددی میدان جریان پیرامون لوله واقع بر بستر صلب
۴۲	۱-۴ مقدمه
۴۳	۲-۴ بررسی اندازه شبکه
۴۸	۳-۴ اثر فاصله لوله از بستر بر گردابه های پایین دست در عدد رینولدز لوله ثابت
۵۵	۴-۴ بررسی اثر زبری لوله بر گردابه های پایین دست با استفاده از مدل های آشفتگی $k - \epsilon$ و $RNG$
۶۱	۵-۴ بررسی سرعت نزدیک بستر با افزایش $\frac{e}{D}$
۶۳	۶-۴ بررسی طول ناحیه چرخشی بالادست و پایین دست لوله
۶۵	۷-۴ جمع بندی فصل
۶۶	فصل ۵- شبیه سازی عددی آب شستگی اطراف لوله تحت جریان
۶۷	۱-۵ مقدمه
۶۹	۲-۵ کالیبراسیون مدل بر اساس ضریب تخلخل بار بستر و پارامتر بلندشدگی
۶۹	۳-۵ صحت سنجی مدل
۷۴	۴-۵ آب شستگی حالت آب زلال
۷۶	۵-۵ بررسی کمیت های مؤثر بر مشخصات حفره آب شستگی
۷۷	۱-۵-۵ بررسی اثر قطر لوله بر مشخصات حفره آب شستگی
۸۰	۲-۵-۵ اثر دانه بندی ذرات رسوب بر مشخصات حفره آب شستگی
۸۳	۶-۵ جمع بندی فصل
۸۴	فصل ۶- جمع بندی و نتیجه گیری
۸۵	۱-۶ نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر
۸۷	۲-۶ پیشنهادهایی برای تحقیق های آتی

فهرست شکل ها:

- شکل ۱: گستره زمانی پیشرفت آب شستگی ..... ۵
- شکل ۲: آستانه حرکت رسوب در بستر. (Karahan و Yalin، ۱۹۷۹) ..... ۷
- شکل ۳: تغییرات عمق تعادل آب شستگی زیر خطوط لوله با پارامتر شیلدز (Mao، ۱۹۸۶) ..... ۸
- شکل ۴: توزیع فشار اطراف لوله در بستر دریا. .... ۹
- شکل ۵: جریان نشستی زیر لوله ..... ۹
- شکل ۶: تغییرات زمانی گرادیان فشار پای لوله-حالت جریان، (Sumer و همکاران (۲۰۰۱)) ..... ۱۰
- شکل ۷: پدیده رگاب (Sumer و همکاران (۲۰۰۱)) ..... ۱۱
- شکل ۸: تونل فرسایش پای لوله انتقال ..... ۱۲
- شکل ۹: گسترش پدیده آب شستگی، (Mao، ۱۹۸۶)، (واحد زمان دقیقه و  $\theta = 0.098$ ) ..... ۱۲
- شکل ۱۰: جابه جایی ذرات رسوب بستر ناشی از گردابه فکنی در پشت لوله، (Sumer و همکاران، ۱۹۸۸) ..... ۱۳
- شکل ۱۱: توزیع مکانی سرعت نزدیک لوله (Jensen و همکاران، ۱۹۹۰) ..... ۱۴
- شکل ۱۲: آب شستگی عمومی اطراف لوله ..... ۱۵
- شکل ۱۳: نتایج مربوط به عمق آب شستگی تعادل ناشی از جریان ..... ۲۰
- شکل ۱۴: تأثیر عدد شیلدز بر عمق آب شستگی. نتایج آزمایشگاهی Mao (۱۹۸۶) ..... ۲۱
- شکل ۱۵: اثر ارتعاش بر فرآیند آب شستگی.  $\theta = 0.1$ ،  $Vr = 7.2$  (سرعت کاهش یافته). Sumer و همکارانش (۱۹۸۸) ..... ۲۱
- ..... ۲۲
- شکل ۱۶: اثر قطعات صفحه ای شکل در ماسه بستر روی عمق آب شستگی (IBrahim و Sidek، ۱۹۹۲) ..... ۲۳
- شکل ۱۷: اثر عمق آب بر آب شستگی. : Aguirre-Pe و Moncana-M. (۱۹۹۹) ..... ۲۴
- شکل ۱۸: الگوی جریان اطراف لوله- Brors (۱۹۹۹) ..... ۴۲
- شکل ۱۹: ابعاد شبکه متغیر ..... ۴۴
- شکل ۲۰: مقایسه سرعت افقی به دست آمده از مدل (خطوط پر) با داده های آزمایشگاهی Jensen و همکارانش (۱۹۹۰) ..... ۴۷
- ..... (علامت‌ها) ..... ۴۷
- شکل ۲۱: نمایش وضعیت جریان در پایین دست طی زمان  $\frac{e}{D} = 0/2$ ،  $t = 0/75$  ..... ۵۱
- شکل ۲۲: نمایش فرآیند گردابه فکنی در پایین دست طی یک دوره تناوب،  $\frac{e}{D} = 0/25$  ..... ۵۲
- شکل ۲۳: نمایش فرآیند گردابه فکنی در پایین دست طی یک دوره تناوب،  $\frac{e}{D} = 0/5$  ..... ۵۳
- شکل ۲۴: نمایش فرآیند گردابه فکنی در پایین دست طی یک دوره تناوب،  $\frac{e}{D} = 1/2$  ..... ۵۴
- شکل ۲۵: نوسانات سرعت قائم نسبت به فاصله لوله از بستر (محور افقی، محور زمان است). ..... ۵۵

- شکل ۲۶: اثر زبری لوله بر نوسانات سرعت قائم با استفاده از مدل‌های  $k-\varepsilon$  و RNG در رینولدز لوله ۱۵۰۰..... ۵۸
- شکل ۲۷: اثر زبری لوله بر نوسانات سرعت قائم با استفاده از مدل‌های  $k-\varepsilon$  و RNG در رینولدز لوله ۳۰۰۰..... ۵۸
- شکل ۲۸: اثر زبری لوله بر نوسانات سرعت قائم با استفاده از مدل‌های  $k-\varepsilon$  و RNG در رینولدز لوله ۱۰۵۰۰..... ۵۹
- شکل ۲۹: اثر زبری لوله بر نوسانات سرعت قائم با استفاده از مدل‌های  $k-\varepsilon$  و RNG در رینولدز لوله ۱۵۰۰۰..... ۵۹
- شکل ۳۰: نمایش پدیده گردابه‌فکنی با استفاده از مدل  $k-\varepsilon$  در حالت لوله زبر و رینولدز لوله ۱۵۰۰۰..... ۶۰
- شکل ۳۱: نمایش پدیده گردابه‌فکنی با استفاده از مدل RNG در حالت لوله زبر و رینولدز لوله ۱۵۰۰۰..... ۶۰
- شکل ۳۲: نمایش تغییرات سرعت در نزدیکی بستر با افزایش  $\frac{e}{D}$ ..... ۶۲
- شکل ۳۳: طول بی‌بعد ناحیه چرخشی بالادست به قطر لوله..... ۶۴
- شکل ۳۴: طول بی‌بعد ناحیه چرخشی پایین دست به قطر لوله..... ۶۴
- شکل ۳۵: پروفیل تعادل آب شستگی با استفاده از مدل  $k-\varepsilon$  در حالت اندازه شبکه ۰/۵ سانتی متر..... ۷۳
- شکل ۳۶: پروفیل تعادل آب شستگی با استفاده از مدل RNG در حالت اندازه شبکه ۰/۵ سانتی متر..... ۷۳
- شکل ۳۷: پروفیل تعادل آب شستگی با استفاده از مدل  $k-\varepsilon$  در حالت اندازه شبکه ۱ سانتی متر..... ۷۴
- شکل ۳۸: پروفیل تعادل آب شستگی با استفاده از مدل RNG در حالت اندازه شبکه ۱ سانتی متر..... ۷۴
- شکل ۳۹: مقایسه عمق بی بعد آب شستگی حاصله از مدل با روابط آزمایشگاهی تحت اثر قطر لوله..... ۷۸
- شکل ۴۰: مقایسه طول بی بعد آب شستگی بالادست و پایین دست حاصله از مدل با روابط آزمایشگاهی..... ۷۸
- شکل ۴۱: اثر قطر لوله بر پروفیل تعادل آب شستگی..... ۷۹
- شکل ۴۲: مقایسه تغییرات عمق بی بعد آب شستگی حاصله از مدل با روابط آزمایشگاهی تحت اثر عدد شیلدز..... ۸۱
- شکل ۴۳: مقایسه طول بی بعد آب شستگی بالادست و پایین دست حاصله از مدل با روابط آزمایشگاهی..... ۸۱
- شکل ۴۴: اثر قطر متوسط ذرات رسوب بر پروفیل تعادل آب شستگی..... ۸۲

### فهرست جداول:

- جدول ۱: بررسی اثر اندازه سلول شبکه در دقت نتایج..... ۴۵
- جدول ۲: بررسی اثر زبری بر بسامد گردابه‌فکنی با استفاده از مدل‌های آشفتگی  $k-\varepsilon$  و RNG..... ۵۶
- جدول ۳: نتایج کالیبراسیون مدل بر اساس ضریب تخلخل بار بستر..... ۶۸
- جدول ۴: نتایج کالیبراسیون مدل بر اساس پارامتر بلندشدگی..... ۶۹
- جدول ۵: مقایسه نتایج حاصله از مدل با داده های آزمایشگاهی..... ۷۰

## مقدمه

پدیده آب شستگی به عنوان یکی از عوامل مهم تهدید کننده پایداری سازه های آبی از دیرباز مورد توجه محققین بوده است. هنگامی که سازه ای در مقابل جریان آب قرار می گیرد، به سبب انسداد موضعی مسیر حرکت آب تغییراتی را به میدان جریان اطراف خود تحمیل می نماید. این تغییرات، پتانسیل انتقال رسوب در همسایگی سازه را افزایش داده و منجر به وقوع پدیده آب شستگی می گردد. در چند دهه اخیر به دلیل گسترش صنایع دریایی و افزایش میزان ساخت و ساز در دریا مطالعه و تحقیق درباره پدیده آب شستگی در محیط دریا در حوزه وسیع تری دنبال شده است.

خط لوله یکی از سازه های مهم دریایی است که به منظور انتقال نفت و گاز از سکوه های فراساحل به مناطق ساحلی و یا بین دو خشکی مورد استفاده قرار می گیرد. انتقال نفت و گاز توسط خط لوله صرفه جویی زیادی را به لحاظ زمان و هزینه در مقایسه با حمل و نقل توسط شناورهای نفت کش به دنبال دارد. همچنین این سیستم انتقال در هنگام مواجهه با طوفان های دریایی و شرایط پیش بینی نشده در دریا از ایمنی بیش تری برخوردار است. از آن جایی که خط لوله در سراسر طول خود بر بستر فرسایش پذیر دریا تکیه دارد و به دلیل امتداد در راستای طولی با شرایط متفاوتی از عمق آب و جنس بستر مواجه است، لذا پدیده آب شستگی اطراف لوله های انتقال تهدیدی جدی برای ایمنی آن محسوب می گردد. حفره آب شستگی ایجاد شده در زیر خط لوله با گذشت زمان در امتداد طولی آن گسترش می یابد و دهانه های آزادی را در سراسر آن و به فواصل مختلف ایجاد می کند. تحمل وزن لوله و سیال درون آن و نیز بار ناشی از خستگی در محل دهانه های آزاد منجر به بروز آسیب و در پاره ای موارد شکست خط لوله می گردد که علاوه بر هزینه تعمیر و بازسازی خسارات جبران ناپذیری را به لحاظ زیست محیطی باعث می شود.

خطوط لوله مانند سایر سازه های دریایی در محیط دریا تحت جریان های یک سویه، جریان های رفت و برگشتی ناشی از موج و یا ترکیبی از این دو قرار می گیرند. از آن جایی که در اکثر موارد میزان آب شستگی تحت جریان های یک سویه به مراتب بیش تر از جریان های رفت و برگشتی است و از سوی دیگر در منطقه فراساحل که عمق آب در مقایسه با طول موج زیاد است بستر دریا عملاً جریان رفت و برگشتی ناشی از موج را حس نمی کند، لذا مطالعه آب شستگی تحت جریان یک سویه از اهمیت ویژه ای برخوردار است.



در این تحقیق جریان اطراف لوله واقع بر بستر صلب و پدیده آب شستگی اطراف خط لوله تحت جریان یک سویه با استفاده از نرم افزار Flow-3D بررسی شده است. پس از معرفی چکیده ای از مفاهیم آب شستگی و مکانیزم رخداد این پدیده اطراف خط لوله در فصل نخست، در فصل دوم تاریخچه ای از مطالعات مهم انجام شده در مورد آب شستگی اطراف خط لوله به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی و موضوع پژوهش حاضر و ضرورت انجام آن تشریح می گردد. فصل سوم به مبانی فیزیکی مدل هیدرودینامیک و رسوب در نرم افزار می پردازد. در فصل چهارم هیدرودینامیک جریان اطراف لوله واقع بر بستر صلب بررسی و نتایج حاصل از مدل عددی با داده های آزمایشگاهی ارزیابی می شود. در فصل پنجم رخداد آب شستگی اطراف خط لوله واقع بر بستر ماسه ای ارائه و به منظور ارزیابی مدل از نتایج آزمایشگاهی Mao (۱۹۸۶) استفاده می شود. در فصل ششم پس از نگاهی اجمالی به کارهای انجام شده در این پژوهش و جمع بندی نتایج به دست آمده، پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی ارائه شده است.

# فصل ۱- مفاهيم اوليه آب شستگى و بررسى مکانيسم آب شستگى اطراف خط لوله

## ۱-۱ مقدمه

هنگامی که سازه ای در محیط دریا قرار می گیرد، سبب تغییر در الگوی جریان اطراف خود و در نهایت وقوع یک یا برخی از پدیده های زیر می گردد:

۱- انقباض<sup>۱</sup> جریان

۲- تشکیل گردابه های نعل اسبی<sup>۲</sup> در جلوی سازه

۳- تشکیل گردابه های پشت سازه<sup>۳</sup> (همراه یا بدون گردابه فکنی<sup>۴</sup>)

۴- تولید آشفستگی

۵- رخداد انکسار<sup>۵</sup> و تفرق<sup>۶</sup> امواج

۶- رخداد شکست امواج

۷- اختلاف فشار خاک که می تواند منجر به وقوع روانگرایی خاک و حمل ذرات رسوب گردد.

این تغییرات می تواند سبب افزایش ظرفیت انتقال رسوب محلی و در نهایت رخداد پدیده آب شستگی شود. واژه آب شستگی به جای واژه عمومی فرسایش به کار می رود تا این فرآیند که به دلیل حضور سازه در میدان جریان رخ می دهد متمایز گردد. این فصل به معرفی مفاهیم و مکانیزم رخداد آب شستگی اطراف خط لوله می پردازد.

---

<sup>1</sup> contraction

<sup>2</sup> horseshoe vortex

<sup>3</sup> Lee-wake

<sup>4</sup> vortex shedding

<sup>5</sup> reflection

<sup>6</sup> diffraction

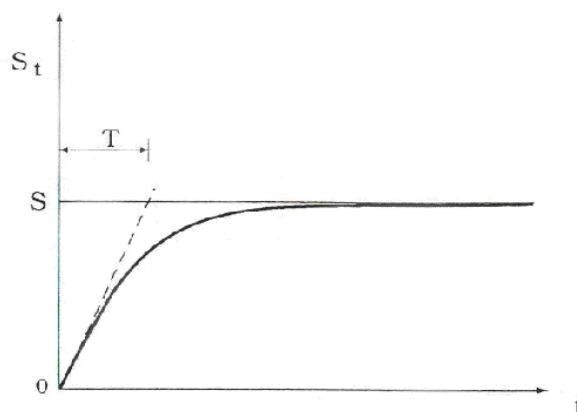
## ۲-۱ مفاهیم اولیه آب شستگی

### ۱-۲-۱ ضریب بزرگ نمایی<sup>۱</sup>

تغییر وضعیت جریان سبب افزایش تنش برشی و میزان آشفته گی جریان می گردد. معمولاً افزایش تنش برشی بستر با پارامتر ضریب بزرگ نمایی معرفی می شود که عبارت است از:

$$\alpha = \frac{\tau}{\tau_{\infty}} \quad (1-1)$$

که در آن  $\tau$  = تنش برشی بستر و  $\tau_{\infty}$  = تنش برشی بستر برای جریان دست نخورده<sup>۲</sup> می باشد. از آن جایی که ظرفیت انتقال رسوب بستر متناسب با تنش برشی بستر می باشد، لذا با افزایش محلی  $\alpha$  (یعنی  $\alpha > 1$ ) میزان حمل رسوب نیز افزایش می یابد. این فرآیند تا زمانی که ضریب بزرگ نمایی،  $\alpha$ ، در مجاورت سازه به عدد ۱ نزدیک شود ادامه می یابد.



شکل ۱: گستره زمانی پیشرفت آب شستگی

### ۲-۲-۱ عمق تعادل<sup>۳</sup> و مقیاس زمان آب شستگی<sup>۴</sup>

با نزدیک شدن ضریب بزرگ نمایی به عدد ۱ در مجاورت سازه، آب شستگی به سمت تعادل پیش می رود. عمق آب شستگی مربوط به مرحله تعادل، S در شکل ۱، عمق آب شستگی تعادل نامیده می شود.

<sup>۱</sup> Amplification factor

<sup>۲</sup> undisturbed

<sup>۳</sup> Equilibrium Scour depth

<sup>۴</sup> Time scale of Scour

برای رسیدن آب شستگی به مقدار نهایی آن باید مدت زمان مشخصی سپری شود. این زمان تحت عنوان مقیاس زمان آب شستگی نامیده می شود. برای تعیین این کمیت رابطه (۲-۱) مورد استفاده قرار می گیرد:

$$S_t = S(1 - \exp(-\frac{t}{T})) \quad (2-1)$$

که در آن  $S_t$  عمق آب شستگی در زمان  $t$ ،  $S$  عمق تعادل آب شستگی و  $T$  مقیاس زمان آب شستگی و نشان دهنده پریود زمانی است که طی آن بخش اعظم عمق آب شستگی توسعه یافته است.

کمیت های عمق آب شستگی تعادل و مقیاس زمان دو پارامتر اصلی در مطالعات مربوط به آب شستگی می باشند. عمق آب شستگی به این لحاظ حائز اهمیت است که برای سازه و شرایط محیطی خاص، نشانگر میزان پتانسیل آب شستگی است. عمق آب شستگی به عنوان عامل مهمی در طراحی فونداسیون سازه ها و روش های جلوگیری از آب شستگی و طراحی لایه محافظ بستر مطرح می شود. اهمیت مقیاس زمان آب شستگی از آن روست که در پیش بینی میزان پیشرفت پدیده تحت اثر شرایط هیدرودینامیکی گذرا نقش تعیین کننده ای دارد. برای مثال در یک طوفان برای آن که مقدار قابل ملاحظه ای آب شستگی رخ دهد، بازه زمانی وقوع طوفان می بایست از بازه زمانی لازم برای رخداد بخش قابل توجهی از آب شستگی بیش تر باشد.

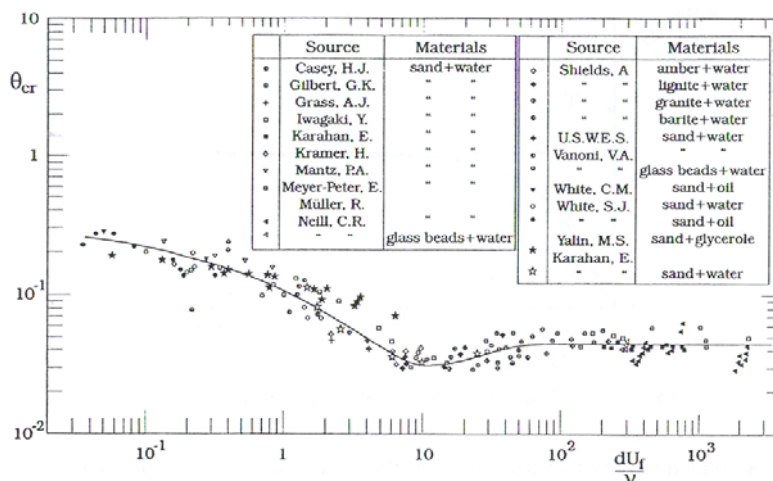
### ۳-۲-۱ پارامتر شیلدز

پارامتر شیلدز نسبت نیروی برشی وارد بر ذره رسوب (نیروی محرک دانه های رسوب) به نیروی ثقل (نیروی مقاوم در برابر حرکت) را بیان می کند و عبارت است از:

$$\theta = \frac{U_f^2}{g(s-1)d} \quad (3-1)$$

که در آن  $U_f = \sqrt{\frac{\tau_{\infty}}{\rho}}$  سرعت برشی بستر دست نخورده،  $g$  شتاب ثقل زمین،  $s = \frac{\rho_s}{\rho}$  چگالی نسبی ذرات رسوب و  $d$  قطر ذرات رسوب می باشد. یک پارامتر آشنا برای مهندسين هیدرولیک پارامتر شیلدز بحرانی است که حداقل تنش برشی لازم برای بلند شدن ذره رسوب از سطح بستر فشرده را برای قطرها و چگالی های مختلف ذرات رسوب بیان می کند و تابعی از عدد رینولدز دانه های رسوب  $\frac{dU_f}{\nu}$  است. شکل ۲ رابطه بین پارامتر شیلدز بحرانی و عدد رینولدز دانه های رسوب در بستر را نمایش می دهد.

همانطور که در شکل دیده می شود در حالتی که عدد رینولدز دانه های بستر بزرگ تر از ۲۰۰ باشد، عدد شیلدز بحرانی مستقل از عدد رینولدز بوده و تقریباً برابر ۰/۰۶ خواهد شد.



شکل ۲: آستانه حرکت رسوب در بستر. (Karahan و Yalin، ۱۹۷۹)

#### ۱-۲-۴ آب شستگی آب زلال<sup>۱</sup> و آب شستگی بستر فعال<sup>۲</sup>

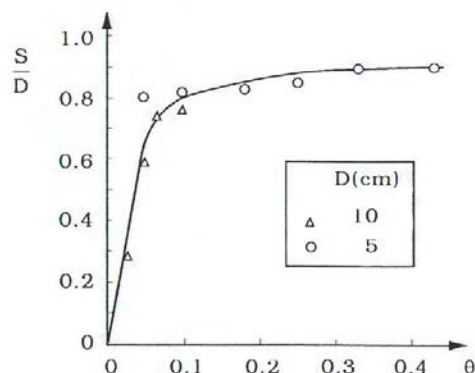
پدیده آب شستگی با توجه به وضعیت انتقال رسوب در بستر به دو دسته کلی طبقه بندی می شود: آب شستگی آب زلال و آب شستگی بستر فعال. مرز بین این دو حالت با عدد شیلدز بحرانی،  $\theta_{cr}$  مشخص می شود. در حالت  $\theta < \theta_{cr}$ ، در فاصله نسبتاً دوری از سازه دانه های رسوب ساکن است و هیچ حمل رسوبی مشاهده نمی گردد؛ تنها در مجاورت سازه به دلیل افزایش موضعی تنش برشی حرکت دانه های رسوب اتفاق می افتد. این حالت از آب شستگی، آب شستگی آب زلال نامیده می شود. در حالت  $\theta > \theta_{cr}$ ، از آن جایی که نیروی برشی وارد بر ذره رسوب (صرف نظر از تأثیر سازه) از حداقل تنش برشی لازم برای حمل آن بیش تر می باشد لذا انتقال رسوب در تمام نواحی بستر رخ می دهد. این حالت آب شستگی بستر فعال نامیده می شود.

در آب شستگی آب زلال، تغییرات عمق آب شستگی با  $\theta$  به وضوح قابل ملاحظه است (شکل ۳)، اما در آب شستگی بستر فعال، تغییرات عمق آب شستگی با  $\theta$  بسیار اندک است. این بدان علت است که در آب شستگی بستر فعال اگرچه با افزایش  $\theta$  ظرفیت حمل رسوب افزایش می یابد لکن از آن جایی که

1 Clear- Water scour

2 live- bed scour

تغییرات ایجاد شده داخل و خارج حفره آب شستگی با هم یکسان است، عمق آب شستگی تقریباً ثابت می ماند.



شکل ۳: تغییرات عمق تعادل آب شستگی زیر خطوط لوله با پارامتر شیلدز (Mao, ۱۹۸۶)

### ۳-۱ مکانیسم آب شستگی زیر خطوط لوله

#### ۱-۳-۱ مکانیسم آغاز آب شستگی - جریان نشی و رگاب زیر لوله

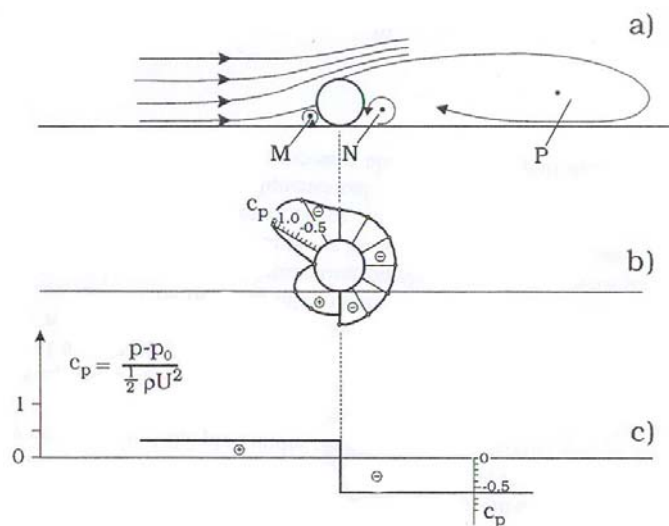
وقتی لوله ای روی بستر دانه ای در مقابل جریان قرار می گیرد، اختلاف فشار بین بالادست و پایین دست آن (شکل ۴) سبب ایجاد جریان نشی در بستر ماسه ای زیر لوله می شود (شکل ۱-۵). با افزایش سرعت جریان، خروج جریان نشی نسبت به اختلاف فشار محرک با سرعت بیش تری افزایش یافته و به طور همزمان سطح ماسه در پایین دست لوله بالا می آید و سرانجام مخلوطی از ماسه و آب از فضای زیر لوله خارج می شود. این فرآیند، رگاب<sup>۱</sup> نامیده می شود. پدیده رگاب عامل شکست بسیاری از سازه های هیدرولیکی از جمله سدها، فراز بندها و ... شناخته شده است؛ از این رو در مکانیک خاک پدیده بسیار مهمی به شمار می رود.

در پدیده رگاب برای مصالح دانه ای غیرچسبنده دو نیروی اصلی وجود دارد: نیروی نشی (نیروی محرک) و وزن مستغرق ماسه (نیروی مقاوم). نیروی نشی (شکل ۵، دتایل A)، عبارت است از:

$$F = \frac{\partial p}{\partial x} \Delta x \quad (۴-۱)$$

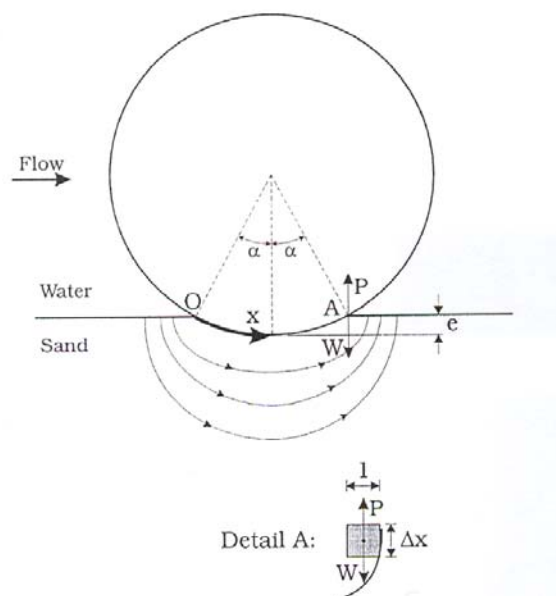
<sup>۱</sup> Piping

که در آن  $x$  فاصله از محل تماس بخش بالادست لوله و بستر در راستای محیط لوله،  $\frac{\partial P}{\partial x}$  گرادیان فشار که سبب ایجاد نیروی نشت می شود و  $F$  نیرویی است که به المان کوچکی از ماسه (با ابعاد  $1 \times 1 \times \Delta x$ ) در جایی که مخلوط آب و ماسه از زیر لوله فرار می کند وارد می شود.



شکل ۴: توزیع فشار اطراف لوله در بستر دریا.

Zdravkovich و Bearman (۱۹۷۸)



شکل ۵: جریان نشستی زیر لوله



شرایط حدی زمانی رخ می دهد که نیروی نشست  $F$  از وزن مستغرق  $W$  بیشتر شود (در لحظه گسیختگی، نیروهای اصطکاک عملاً صفر هستند).

$$F \geq W \quad (5-1)$$

وزن مستغرق ماسه،  $W$ ، به شکل زیر بیان می شود:

$$W = (\gamma - \gamma_s) \Delta x (1 - n) = \gamma (s - 1) (1 - n) \Delta x \quad (6-1)$$

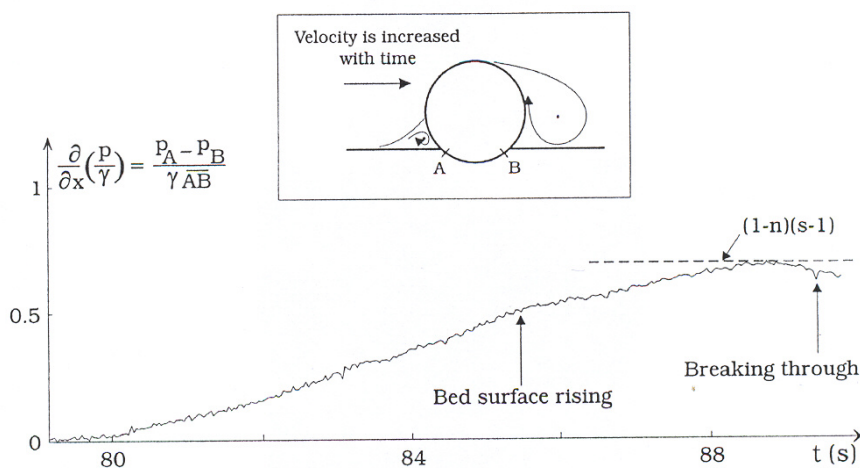
که  $s = \frac{\gamma_s}{\gamma}$  چگالی نسبی دانه های ماسه،  $\gamma$  وزن مخصوص آب،  $\gamma_s$  وزن مخصوص دانه های ماسه و  $n$  تخلخل دانه های ماسه می باشد.

بنابراین می توان نوشت:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{P}{\gamma} \right) \geq (s - 1) (1 - n) \quad (7-1)$$

یعنی شرایط حدی برای آغاز آب شستگی زمانی روی خواهد داد که گرادیان فشار در زیر

لوله،  $\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{P}{\gamma} \right)$ ، از گرادیان شناوری،  $(s - 1) (1 - n)$ ، بیش تر شود.



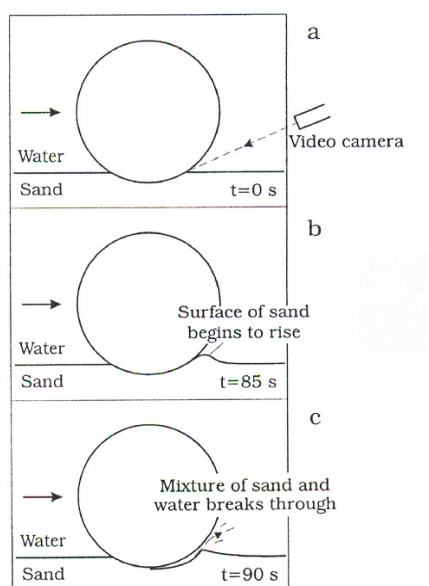
شکل ۶: تغییرات زمانی گرادیان فشار پای لوله-حالت جریان، (Sumer و همکاران (۲۰۰۱))

شکل ۶ تاریخچه زمانی گرادیان فشار را در حالت جریان پایدار در زیر لوله نشان می دهد که توسط Sumer و همکاران (۲۰۰۱) اندازه گیری شده است. در این آزمایش سرعت جریان تا رسیدن به نقطه بحرانی (جایی که مخلوط آب و ماسه از زیر لوله فرار کند) به تدریج افزایش می یابد. همچنین در

این آزمایش محل تقاطع پایین دست لوله با بستر (با اندازه گیری مقادیر فشار به طور همزمان) توسط یک دوربین زیر آب کوچک تصویربرداری شد (شکل ۷-ا). از این اندازه گیری ها و مشاهده شکل ۶ و شکل ۷، نکات زیر استنتاج می شود:

- ۱- با افزایش سرعت، گرادیان فشار  $\frac{\partial}{\partial x}(\frac{P}{\gamma})$ ، افزایش می یابد (زیرا  $p \approx U^2$ ).
- ۲- با افزایش گرادیان فشار سطح ماسه در پایین دست لوله بالا می زند (شکل ۷-ب،  $F \geq W$ ). در ادامه مخلوطی از ماسه و آب از زیر لوله به بیرون پاشیده می شود (شکل ۷-ج). لحظه ای که بستر در پایین دست شروع به بالا آمدن می کند گرادیان فشار بیش از گرادیان شناوری است، در نتیجه دانه ها به طور پیوسته شسته می شوند و گریز مصالح از زیر لوله ادامه می یابد. این فرآیند به تخلخل، اصطکاک داخلی و طول مسیر جریان (هر چه طول مسیر جریان بیش تر باشد، مدت زمان بیش تری برای فرار مصالح از زیر لوله لازم است) بستگی دارد.
- ۳- آب شستگی هیچ گاه در کل طول لوله به صورت دوبعدی رخ نمی دهد، بلکه عموماً به صورت محلی و سه بعدی اتفاق می افتد.

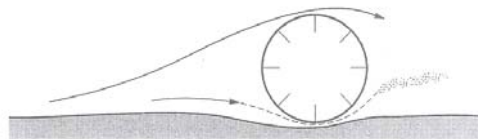
۴- پدیده رگاب زمانی اتفاق می افتد که گرادیان فشار برابر مقدار  $(s-1)(1-n)$   $\frac{\partial}{\partial x}(\frac{P}{\gamma})$  است.



شکل ۷: پدیده رگاب (Sumer و همکاران (۲۰۰۱))

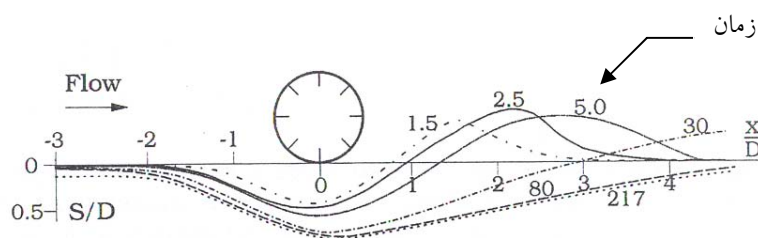
۱-۳-۲ فرسایش تونلی

پس از مرحله شروع، فرآیند آب شستگی وارد مرحله ای به نام فرسایش تونلی می شود. در آغاز این مرحله فاصله خالی بین لوله و بستر کوچک می باشد، یعنی  $e \ll D$ ، که  $D$  قطر لوله است. در این مرحله مقدار زیادی آب از فضای زیر لوله خارج شده و تنش های برشی بزرگی را در سطح بستر باعث می شود. افزایش تنش برشی منجر به افزایش دبی انتقال رسوب می گردد و لذا آب شستگی زیر لوله با شدت خیلی زیادی اتفاق می افتد و مخلوطی از ماسه و آب به شکل یک جت سریع از زیر لوله بیرون می زند (شکل ۸، Mao (۱۹۸۶)).



شکل ۸: تونل فرسایش پای لوله انتقال

با بزرگ تر شدن شکاف بین لوله و بستر در نتیجه آب شستگی و کم شدن سرعت جریان زیر لوله، شدت تونل فرسایشی کاهش یافته و به تدریج از بین می رود. فرآیند آب شستگی پس از آن توسط مرحله ای که فرسایش گردابی نامیده می شود ادامه می یابد.



شکل ۹: گسترش پدیده آب شستگی، (Mao, ۱۹۸۶)، (واحد زمان دقیقه و  $\theta = 0.098$ )

۱-۳-۳ فرسایش گردابی

شکل ۹ چگونگی گسترش گودال آب شستگی را برای یک لوله ثابت و با فاصله اولیه صفر تحت جریان پایدار طی زمان نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود آب شستگی در مراحل اولیه به

سرعت گسترش می یابد (فرسایش تونلی)؛ یک تپه ماسه ای در پایین دست لوله شکل می گیرد که با توسعه فرآیند آب شستگی به تدریج به سمت پایین دست منتقل شده و سرانجام ناپدید می شود. از پروفیل آب شستگی حالت تعادل دیده می شود که در پایین دست لوله، آب شستگی بیش تری نسبت به بالا دست آن رخ داده است و شیب گودال آب شستگی در پایین دست ملایم تر و در بالادست تندتر است.



شکل ۱۰: جابه جایی ذرات رسوب بستر ناشی از گردابه فکنی در پشت لوله، (Sumer و همکاران، ۱۹۸۸)

توسعه آب شستگی در مرحله فرسایش گردابی ناشی از گردابه فکنی می باشد (شکل ۱۰). وقتی که فاصله بین لوله و بستر در اثر آب شستگی به مقدار مشخصی برسد، یک جفت گردابه متقارن در پایین دست لوله تشکیل می شود. همچنان که قدرت جریان دست نخورده بیش تر می شود (یعنی افزایش عدد رینولدز)، لایه مرزی اطراف استوانه از حالت خطی به حالت آشفته تبدیل خواهد شد. در حالت آشفته گردابه های پشت لوله ناپایدار می شوند. این ناپایداری سبب می شود یکی از گردابه ها بزرگ تر شده و گردابه دیگر را به درون خود بکشد. سرانجام، از آن جایی که گردابه بالادست در جهت پادساعت گرد و گردابه پایین دست در جهت ساعت گرد حرکت می کند، تأمین حالت چرخایی برای گردابه بزرگ تر قطع شده و گردابه جاری خواهد شد. این فرآیند تکرار شونده گردابه فکنی نامیده می شود. گردابه هایی که در سمت بستر لوله جاری می شوند همچنان که به سمت پایین دست جا به جا می شوند بستر را جاروب می نمایند. آب شستگی پایین دست لوله، در نهایت توسط همین جریان گردابه فکنی کنترل می شود (Sumer و همکاران، ۱۹۸۸ a).

مرحله تعادل آب شستگی (شکل ۱-۹، پروفیل نقطه چین)، زمانی حاصل می شود که تنش برشی بستر ثابت و برابر تنش برشی در حالت جریان دست نخورده گردد:

$$\tau = \tau_{\infty} \quad (۸-۱)$$

وقتی که آب شستگی به این مرحله می رسد انتقال رسوب در تمامی مقاطع گودال آب شستگی یکسان خواهد بود. بنابراین مقدار رسوب وارد شده به گودال آب شستگی برابر مقدار رسوبی است که از آن خارج می شود.