

## بررسی تاثیر عدد رینولدز در مقیاس قطراستوانه بر پخش عرضی آلاینده در اطراف سیلندرهای استوانه‌ای

سمیراسادات سلطانی<sup>۱</sup>، میر مصدق جمالی<sup>۲</sup>، امیر حشمتی فر<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف

۲- استاد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف

۳- دانشجوی دکتری، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف

Samira\_Soltani71@yahoo.com

### خلاصه

همواره در طبیعت موانعی در مسیر حرکت سیال وجود دارد. وجود این موانع باعث بروز تغییر در خصوصیات هیدرودینامیکی جریان می‌شود که در پدیده‌هایی مانند انتقال رسوب و پخش آلاینده تاثیر گذار است. یکی از این موانع پایه‌های پل و محیط‌های گیاهی موجود در مسیر جریان می‌باشد که برای مدل‌سازی آن‌ها در آزمایشگاه از سیلندرهای استوانه‌ای استفاده می‌شود. در مطالعاتی که تاکنون انجام شده‌است اثرات مشخصات جریان و چیدمان استوانه‌ها بر روی تغییرات سرعت جریان، آشفتگی و نحوه پخش مواد مورد بررسی قرار گرفته‌است. در این مطالعه اثر عدد رینولدز جریان بر روی پخش عرضی آلاینده برای چیدمان‌های مختلف زوج استوانه تعیین می‌گردد. برای تعیین مشخصات جریان از روش<sup>۱</sup> PIV استفاده می‌شود. در نهایت مشاهده گردید که با افزایش عدد رینولدز در مقیاس قطر استوانه عرض ابر آلودگی افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: سیلندر استوانه‌ای، پخش عرضی آلاینده، عدد رینولدز در مقیاس قطر استوانه، PIV.

### ۱. مقدمه

در طبیعت و سازه‌های مهندسی، همواره موانعی در برابر جریان آب وجود دارند. برخورد بین جریان سیال و سطوح استوانه‌ای در طبیعت و تعداد زیادی از کارهای مهندسی مشاهده می‌شود. در برخی از آن‌ها جریان سیال با یک استوانه برخورد می‌کند، برای مثال می‌توان به مبدل‌های حرارتی، ساختارهای پشتیبانی و چرخ‌های فرود هواپیما اشاره کرد. درحالی‌که معمولاً در کارهای مهندسی و طبیعت جریان سیال با چند سیلندر برخورد می‌کند. برای مثال می‌توان جریان اطراف پایه‌های پل، محیط‌های گیاهی، جریان درون لوله‌ها در مبدل‌های حرارتی، برج‌های خنک‌کننده و پشته‌های دودکش را نام برد. فهم فیزیک جریان برای چنین هندسه‌هایی برای طراحی سیستم آن‌ها مهم است. از این رو، تحقیقات فراوانی در مورد جریان دائمی اطراف سیلندرهای استوانه‌ای انجام شده‌است (Williamson, 1996; Gerrard, 1966; Roshko, 1961).

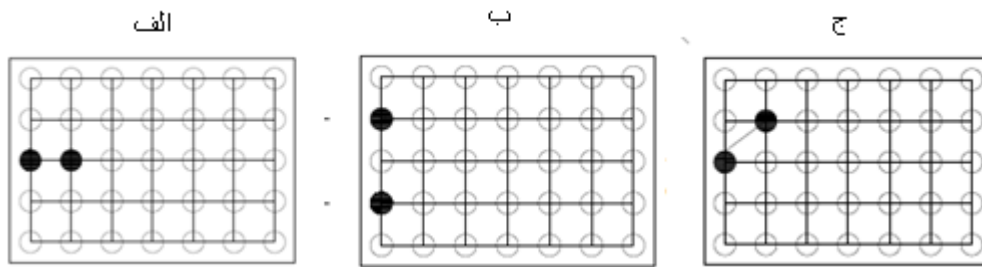
زوج استوانه در جریان دائمی در بسیاری از کاربردهای مهندسی دیده می‌شود. استوانه‌ها نسبت به جهت حرکت جریان ممکن است هم‌راستا<sup>۲</sup> (پشت سر هم)، مجاور<sup>۳</sup> (عرضی)، یا به صورت شطرنجی<sup>۴</sup> در کنار یکدیگر قرار گیرند (شکل ۱).

<sup>۱</sup> Particle Image Velocimetry

<sup>۲</sup> Tandem

<sup>۳</sup> Side-by-side

<sup>۴</sup> Staggered



شکل ۱: چیدمان زوج استوانه‌ها، الف) آرایش هم‌راستا ب) آرایش مجاور ج) آرایش شطرنجی

قرار گرفتن سیلندرهاى استوانه‌ای در مسیر جریان می‌توانند نقشی قابل توجهی در پدیده‌های موجود در محیط‌های آبی اطراف خود داشته باشند. نقش استوانه‌ها در تغییر خصوصیات هیدرودینامیکی جریان مانند توزیع سرعت، آشفتگی، شکل انتقال رسوبات و پخش مواد دیگری که توسط جریان آب حرکت می‌کنند (مانند آلاینده‌ها) می‌باشد. مطالعات گوناگونی برای تعیین اثرات سیلندرهاى استوانه‌ای بر هیدرودینامیک جریان دائمی و فرایندهای وابسته به آن مانند پخش مواد حمل شونده با جریان، انجام شده اند. در این مطالعات سعی شده است که نقش موانع در تغییرات سرعت جریان، آشفتگی، و نحوه پخش مواد به مشخصات جریان و چیدمان استوانه‌ها نسبت داده شود.

اثر جانبی تغییر خصوصیات هیدرودینامیکی جریان، تغییر در شکل انتقال رسوبات و مواد دیگری که توسط جریان آب حرکت می‌کنند (مانند آلاینده‌ها) است. هنگامی که یک آلاینده در رودخانه رها می‌شود، حرکت و پخش آن را می‌توان به سه مرحله تقسیم کرد. در مرحله اول، در لحظه رهاسازی ماده، مومتم ابتدایی و شناوری اولیه ماده کاهش می‌یابد. در گام بعد، برخورد با جریان و آشفتگی رودخانه در اطراف ماده سبب اختلاط آن با محیط اطراف می‌شود. در مرحله سوم، هنگامی که اختلاط در عرض و عمق تکمیل شد، پخش طولی صورت می‌گیرد. در جریان سیالات، مواد با جابجایی<sup>۱</sup>، پخش مولکولی<sup>۲</sup>، پخش آشفتگی<sup>۳</sup>، پخش مکانیکی<sup>۴</sup> و برش<sup>۵</sup> پخش می‌شوند. جابجایی، حمل مواد با جریان سیال است. پخش مولکولی به مفهوم پخش ذرات با حرکات تصادفی مولکول‌های ماده است که با قانون فیک<sup>۶</sup> و معادله بنیادین پخش بیان می‌شود. با پخش مولکولی، ماده از مکان با غلظت بیش تر به مکان با غلظت کم تر حرکت می‌کند. پخش آشفتگی، پخش تصادفی ذرات با حرکت آشفتگی جریان سیال است که مشابه با پخش مولکولی بررسی می‌شود. شدت پخش با ضریب دیفیوژن یا ضریب پخش بیان می‌شود (Fischer et al., 1979). پخش ذرات ماده به سبب عبور از مسیرهای مختلف (لابه‌لای گیاهان و محیط‌های متخلخل)، پخش مکانیکی<sup>۷</sup> موسوم است (Nepf, 1999).

تعیین نقش سیلندرها در پخش مواد همراه با آب، یکی از مسائل مورد توجه در حوزه مطالعات محیط‌های آبی است. امروزه پهنه‌های آبی در معرض ورود روزافزون آلاینده‌های کشاورزی و صنعتی هستند. حضور سیلندرهاى استوانه‌ای می‌تواند سبب کاهش پخش مواد در این محیط‌ها شود (Nepf, 1999). با داشتن آگاهی بیشتر در مورد نحوه پخش مواد در محیط‌های آبی، می‌توان بسته به نیاز، پراکنندگی مواد را پیش‌بینی کرد یا با ایجاد پوششی از استوانه‌ها در فرایند پخش مواد تغییراتی به‌وجود آورد.

در مطالعات Sumer and Fredsøe, 2006؛ Zdravkovich, 1987؛ Lam and Cheung, 1988؛ Sumner, 2010 به بررسی جریان اطراف سیلندهای استوانه‌ای پرداخته شده است. در این مطالعات به بررسی رابطه بین مساحت و عرض تحت تاثیر گردابه‌ها در پشت استوانه و پخش عرضی پرداخته نمی‌شود. با قرار گرفتن یک یا چند استوانه در مسیر جریان، گردابه‌هایی تشکیل می‌شود. مطالعات گذاشته نشان داده‌اند که مشخصه ویژگی تشکیل گردابه متاثر از پارامترهایی مانند عدد رینولدز در مقیاس قطر استوانه ( $Re_d = V \cdot d / \nu$ )، آشفتگی جریان آزاد و زبری سطح می‌باشد. با افزایش عدد رینولدز، گردابه پشت ساقه شروع به نوسان می‌کنند و با رسیدن به  $Re_d = V \cdot d / \nu = 90$ ، گردابه‌ها به داخل جریان می‌ریزند.

میدان سرعت جریان و شکل‌گیری و ریزش گردابه‌ها، بر فرآیند پخش ذرات و نیروهای وارد بر استوانه‌ها تاثیر می‌گذارد. از طرفی سطحی از پشت استوانه‌ها تحت تاثیر این مانع قرار می‌گیرد. پخش عرضی در اطراف سیلندرهاى استوانه‌ای، تابعی از اندازه ناحیه تحت تاثیر گردابه (مساحت دنباله) و جهت انتشار گردابه در پشت استوانه است. چیدمان استوانه‌ها و عدد رینولدز در مقیاس قطر استوانه،  $Re_d = V \cdot d / \nu$  (سرعت جریان،  $d$  قطر ساقه

<sup>۱</sup> Advection

<sup>۲</sup> Molecular diffusion

<sup>۳</sup> Turbulent diffusion

<sup>۴</sup> Mechanical diffusion

<sup>۵</sup> Shear

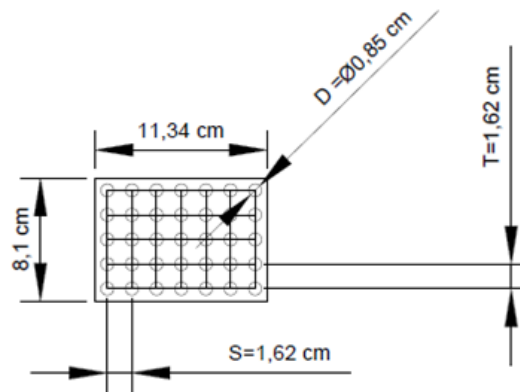
<sup>۶</sup> Fick's law

<sup>۷</sup> Mechanical diffusion

و ۷ لزجت سینماتیکی آب می‌باشد)، روی ابعاد مساحت دنباله و عرض ناحیه تحت تاثیر گردابه تاثیر می‌گذارد. هرچه تغییرات سطح بیش تر باشد، پخش عرضی آلاینده‌ها بیش تر است.

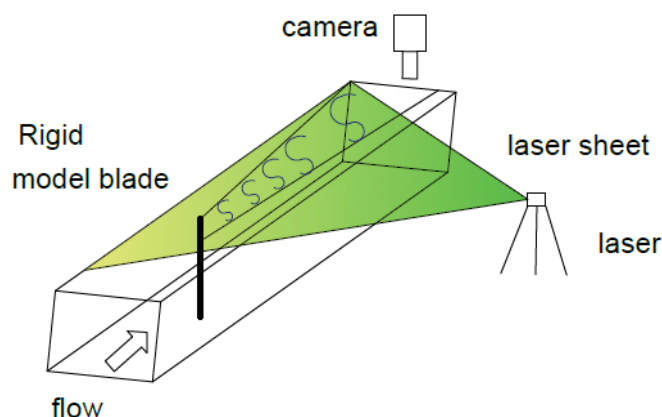
## ۲. مواد و روش‌ها

تمامی آزمایشات، در یک کانال به طول ۴/۷ متر، ارتفاع ۱۵ سانتی متر و عرض ۸/۳ سانتی متر انجام می‌شود. ارتفاع آب درون کانال توسط یک دریچه قطاعی که در انتهای کانال قرار دارد تنظیم می‌شود. در تمامی آزمایشات ارتفاع آب ثابت و برابر ۸ سانتی متر می‌باشد. برای مدل سازی منطقه گیاهی از میله‌های پلی آمیدی به قطر ۸/۵ میلی متر استفاده می‌شود. این میله‌ها توسط یک صفحه سوراخ شده از جنس پلکسی گلس به ضخامت ۰/۸ سانتی متر، که در کف کانال قرار داده می‌شود نگه داشته می‌شوند که در شکل ۲، دیده می‌شود. فاصله مرکز به مرکز این سوراخ‌ها ۱/۶۲ سانتی متر می‌باشد.



شکل ۲: صفحه سوراخ دار نگه دارنده استوانه‌ها

همچنین از یک لیزر سبز رنگ ۰/۲ وات برای انجام روشن کردن محل انجام PIV استفاده می‌شود. فاصله محل قرارگیری لیزر تا کانال ۴ متر می‌باشد. برای فیلم برداری از آزمایشات از یک دوربین Sony HDR-CX290E استفاده می‌شود. برای جلوگیری از حرکت دوربین از یک چهارپایه که در بالای کانال قرار می‌گیرد، استفاده می‌شود. ارتفاع محل فیلم برداری از لبه بالایی کانال ۲۰ سانتی متر می‌باشد. به منظور تهیه عکس‌های با کیفیت حالت فیلم برداری Full-HD انتخاب می‌شود که دارای رزولوشن ۱۹۲۰×۱۰۸۰ پیکسل هستند. بزرگ نمایی دوربین به صورت دستی تنظیم می‌شود تا دقیقاً مقطعی که نور لیزر تابیده شده است، فیلم برداری شود. در شکل ۳ موقعیت گیاهان و محل فیلم برداری و تابش لیزر و ابعاد مخزن نشان داده شده است. برای مدل کردن گیاهان از میله‌هایی به قطر ۸/۵ میلی متر استفاده شده است. استوانه‌ها با چیدمان‌های مختلف در صفحه پلکسی گلس چیده شده‌اند.



شکل ۳: سیستم انجام آزمایش

برای اندازه گیری میدان سرعت سیال از تکنیک پردازش تصویر استفاده می کنیم. به این صورت که با درخشان کردن ذرات توسط نور لیزر تابیده شده در مقطع مورد نظر، از آن مقطع فیلم برداری می کنیم و سپس با تصاویر به دست آمده از فیلم حاصله به پردازش تصویر دو عکس با فاصله زمانی مشخص از این مقطع می پردازیم. حال با استفاده از تکنیک PIV جایجایی ذرات درخشان و در نتیجه اندازه و میدان سرعت سیال مشخص می شود.

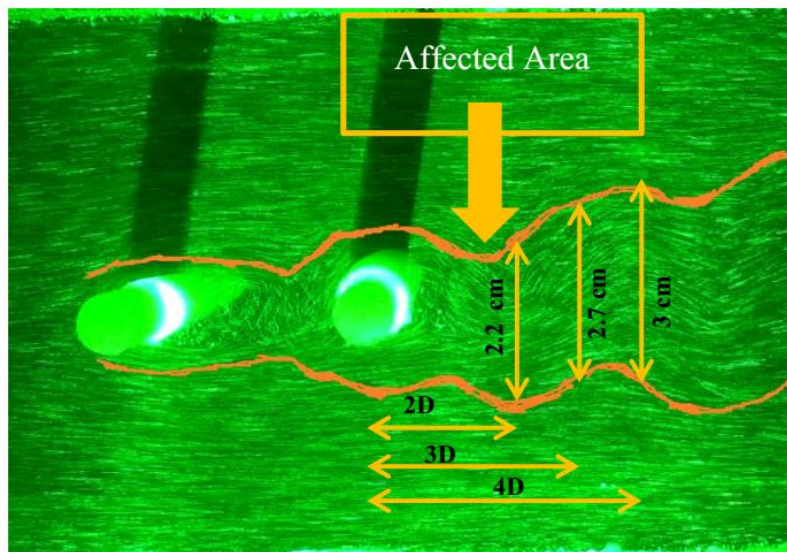
## ۳. بحث و نتایج

خلاصه آزمایشات انجام شده در جدول ۱، ارائه گردیده است.  $D$  قطر سیلندرها،  $W_p$  عرض ابر آلودگی و  $S, P, T$  فاصله مرکز به مرکز سیلندرها در چیدمانهای مختلف می باشد.

جدول ۱: مشخصات آزمایشات انجام شده

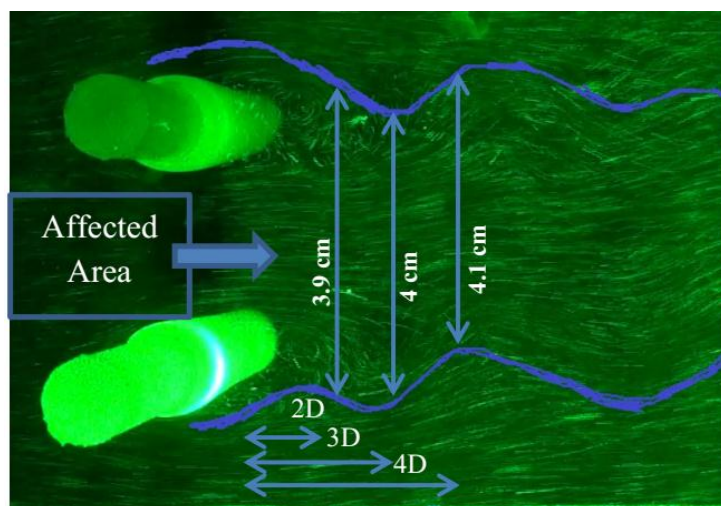
Exp Model	Arange	S/D	T/D	P/D	Red	WP/D			
						2D	3D	4D	
Two Cyl	Tandem	3.8			582	2.2	2.6	2.9	
		3.8			947	2.4	2.9	3.3	
	Side By Side		3.8		582	4	2	4.3	
			3.8		947	4.6	2.6	4.8	
	Staggered				2.7	582	2	2.1	2.3
					2.7	947	2.5	2.6	2.7

در شکل ۴، در آرایش پشت سر هم عرض ابر آلاینده ناشی از گردابه‌ها برای فواصل ذکر شده ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می شود با افزایش فاصله از محل سیلندرها، عرض ابر آلاینده افزایش می یابد که علت آن نیز ناشی از رشد گردابه‌های پشت استوانه‌های می باشد.



شکل ۴: عرض ابر آلاینده برای چیدمان پشت سر هم

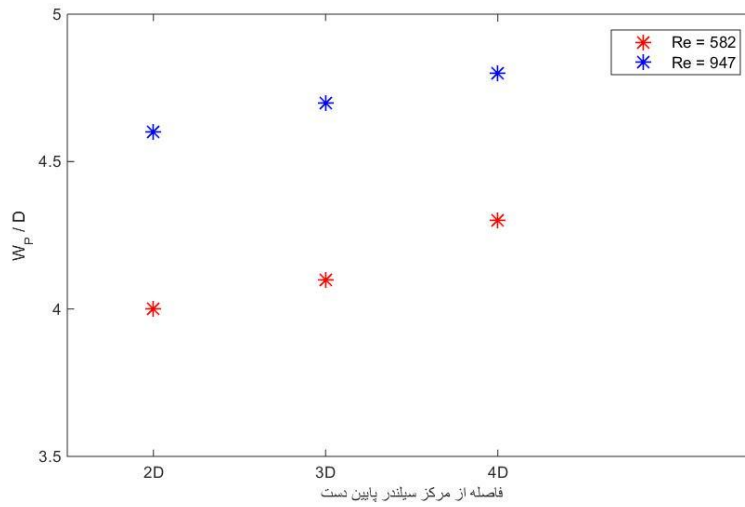
برای مقایسه در شکل ۵، برای آرایش دو ساقه کنار هم دوباره عرض ابر آلاینده محاسبه شده است. همانطور که در شکل ۵، دیده می‌شود در قیاس با شکل ۴، رشد عرض ابر آلاینده در این حالت کم‌تر است و در این حالت از ابتدا به علت تاثیر گردابه‌های دو استوانه بر یکدیگر عرض ابر آلاینده در ابتدا بزرگ‌تر است.



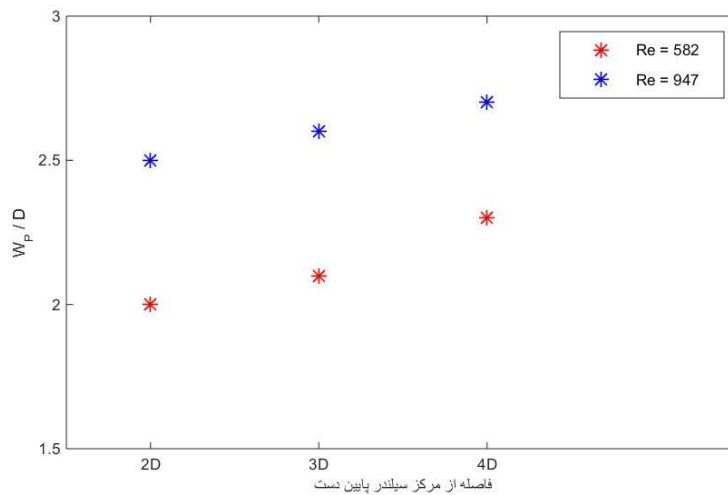
شکل ۵: عرض ابر آلاینده برای چیدمان دو ساقه کنار هم

همین‌طور بایستی توجه نمود که فاصله دو استوانه خود بر بزرگی عرض ابر آلاینده و تاثیر گردابه‌ها بر یکدیگر تاثیر گذار است. در شکل ۶، برای رینولدزهای مختلف برای چیدمان کنار هم (مجاور عرضی) عرض ابر آلاینده محاسبه و نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش عدد رینولدز برای چیدمان با فاصله ثابت بین دو استوانه، عرض ابر آلاینده افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود برای هر دو عدد رینولدز با

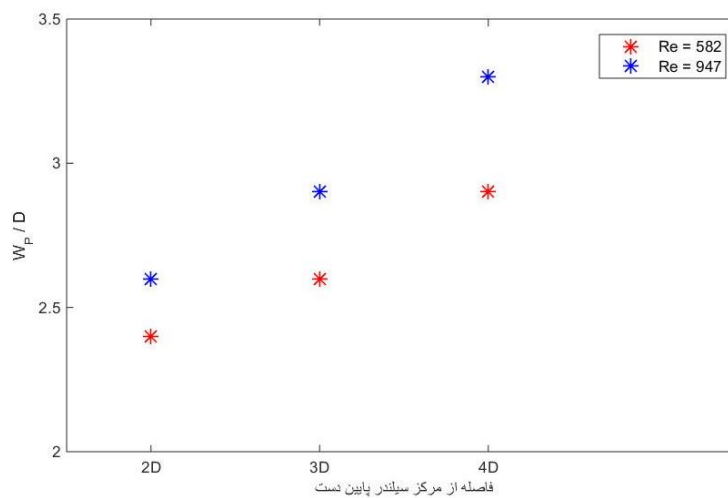
افزایش فاصله از استوانه‌ها عرض ابر آلاینده با یک شیب تقریباً یکسان افزایش می‌یابد و افزایش رینولدز تغییری در نرخ رشد عرض ابر آلاینده برای یک چیدمان تاثیر قابل توجهی ندارد.



شکل ۶: عرض ابر آلاینده برای چیدمان کنار هم برای اعداد رینولدز مختلف



شکل ۷: عرض ابر آلاینده برای چیدمان شطرنجی برای اعداد رینولدز مختلف



### شکل ۸: عرض ابر آلاینده برای چیدمان پشت سرهم (مجاور عرضی) برای اعداد رینولدز مختلف

شکل ۷ و شکل ۸، عرض ابر آلاینده برای دو چیدمان دیگر را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای عدد رینولدز ثابت عرض ابر آلاینده در چیدمان پشت سرهم در مقایسه با چیدمان شطرنجی بزرگ تر بوده و نرخ رشد آن نیز بزرگ تر است.

### ۴. نتیجه‌گیری

وجود موانع طبیعی و سازه‌ای مانند ساقه گیاهان و یا پایه‌های پل به عنوان عضوی از نواحی آبی، در هیدرودینامیک جریان منطقه تاثیر می‌گذارد. با توجه به اهمیت پخش آلاینده در این نواحی، بررسی اثر وجود این موانع بر نحوه پخش آلاینده و گسترش آن اهمیت زیادی دارد. در این تحقیق به مطالعه بررسی اثر حضور سیلندرهای استوانه‌ای بر روی گسترش عرض ابر آلاینده به‌صورت آزمایشگاهی پرداخته شد. مشاهده گردید که با افزایش عدد رینولدز عرض ابر آلاینده شروع افزایش می‌یابد.

### ۵. مراجع

- [1] Gerrard, J.H., (1966) . The three-dimensional structure of the wake of a circular cylinder, J. Fluid Mech. 25 143–164.
- [2] Nepf, H., (1999). Drag, Turbulence, and Diffusion in Flow through Emergent. Journal of Water Resources Research 35(2): 479-489.
- [3] Roshko, A., (1961). Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds number, J. Fluid Mech. 10 345–356.
- [4] Sumer, B. M. and J. Fredsøe (2006). Hydrodynamics around cylindrical structures. Singapore, River Edge, NJ.
- [5] Sumner, D., (2010). Two circular cylinders in cross-flow: A review. Journal of Fluids and Structures 26(6): 849-899.
- [6] Zdravkovich, M.M., (1987). The effects of interference between circular cylinders in cross flow. Journal of Fluids and Structures 1, 239–261.
- [7] Williamson, C.H.K., (1996). Vortex dynamics in the cylinder wake, Annu. Rev. Fluid Mech. 477–53.