



مرکز بررسی اطلاعات و پژوهش

سازمان بنادر و دریانوردی به عنوان تنها مرجع حاکمیتی کشور در امور بندری، دریایی و کشتی‌رانی بازرگانی به منظور ایفای نقش مرجعیت دانشی خود و در راستای تحقق راهبردهای کلان نقشه جامع علمی کشور مبنی بر "حمایت از توسعه شبکه‌های تحقیقاتی و تسهیل انتقال و انتشار دانش و سامان‌دهی علمی" از طریق "استانداردسازی و اصلاح فرایندهای تولید، ثبت، داوری و سنجش و ایجاد بانک‌های اطلاعاتی یکپارچه برای نشریات، اختراعات و اکتشافات پژوهشگران"، اقدام به ارایه این اثر در سایت SID می‌نماید.



سازمان بنادر و دریانوردی



ICOPMAS



نهمین همایش بین المللی سواحل، بنادر و سازه های دریایی

ICOPMAS 2010

10-8 آذر ماه (تهران)



شبیه سازی عددی پراکنش گردابه ها در پشت خط لوله در بستر دریا با روش LES (گردابه های بزرگ)

مسعود توحیدی ، دانشجوی کارشناسی ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر ، masoudtohid@yahoo.com

محمود علی احمدی ، دانشجوی کارشناسی ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر ، aliamahadi_g@aut.ac.ir

محمدجواد کتابداری ، دانشیار ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر ، ketabdar@aut.ac.ir

زهره حقایقی، دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر ، z_hagh@aut.ac.ir

کلید واژه: شبیه سازی گردابه های بزرگ ، نیروی برآ، نیروی پسا، مقیاس زیر شبکه ، روش اسمگورینسکی

چکیده

خط لوله در بستر ناهموار دریا در محیط بسیار پیچیده و متغیری قرار دارد. اگر در منطقه کاری خط لوله، جریان دریایی قابل توجهی وجود داشته باشد، عبور جریان از روی خط لوله باعث پراکنش گردابه ها در دنباله جریان عبوری شده و این وضعیت نیز نیروی تحریک متغیری را به دهانه وارد و معمولاً قسمتهایی از خط لوله به صورت معلق قرار می گیرد. در چنین وضعیتی ارتعاش و در نتیجه خستگی به دلیل نیروی نوسانی وارد شده ایجاد می شود. برای محاسبه نیروی وارد به دهانه آزاد خط لوله در اثر تغییرات جریان در دنباله آن باید بتوان جریان در اطراف لوله را به خوبی مدل نمود. با توجه به ابعاد لوله و سرعت جریان دریایی، معمولاً جریان به صورت آشفته خواهد بود و لذا باید از روش های مناسب مدلسازی جریان آشفته استفاده کرد. در این تحقیق جهت بررسی الگوی جریان اطراف خط لوله ی دریایی ، از گسسته سازی معادلات ناویر استوکس به روش حجم محدود استفاده گردید. جهت مدل سازی آشفتگی از روش شبیه سازی گردابه های بزرگ¹ به عنوان روش اصلی و روش K-Epsilon به عنوان روش شروع کننده ی حل استفاده گردید. نتایج تحقیق محدوده های حضور گردابه ها و نقاط جدایش جریان و حدود تغییرات ضرایب پسا و برا را به وضوح مشخص می نماید.

مقدمه

در برخورد جریان دریایی با خط لوله های روی بستر ناهموار دریا قسمتهایی از لوله به صورت معلق در می آید. معمولاً وزن قسمت معلق تنها توسط دو شانه جانبی تحمل می شود. در چنین وضعیتی به دلیل ایجاد گردابه های نامتقارن در اطراف لوله ارتعاشات عمود بر جهت جریان و در نتیجه خستگی در لوله ایجاد می شود. برای داشتن درک صحیحی از فیزیک مساله و به تبع آن انتخاب مدل و راه حل مناسب به مدل سازی عددی نیروهای وارد بر خط لوله نیاز است. با توجه به ابعاد لوله و سرعت جریان دریایی، معمولاً جریان به صورت آشفته خواهد بود و لذا باید از روش های مناسب مدلسازی جریان آشفته استفاده کرد. در این کار برای مدل سازی عددی جریان از روش شبیه سازی گردابه های بزرگ استفاده شده است.

تاریخچه ی روش شبیه سازی گردابه های بزرگ زمانی که ویسکوزیته ی گردابی اسمگورینسکی در سال 1963 میلادی پیشنهاد شد آغاز گردید. وی بر روی مدل ریاضی مشهور Van-Newman تحقیق می نمود و در حقیقت مدل اسمگورینسکی اولین مدل مقیاس زیرشبکه ای است. مدل هایی که توسط Smagorinsky و Germano ارائه شدند، به طور کلی دارای استهلاك انرژی مناسب هستند.

¹ Large eddy simulation method (LES).

Archive of SID

در سال 1975 Schoman معادله‌های انتقال انرژی جنبشی مقیاس زیرشبکه را بر روی کانال مسطح به کار گرفت. او با استفاده از نتایج تجربیات دانشمندی‌های پیش از خود، توانست سرعت متوسط را، در کانال مسطح در حضور گردابه‌ها همگرا سازد. در سال 1980 جریان روی پله توسط Kouhen مدل گردید و تاثیر تغییرات بزرگی پله روی طول ناحیه‌ی جدایش، به ترتیب توسط Chang, Olgen, Dercy و Tropil در سال‌های 1990، 1991 و 1981 بررسی شد. در سال 1985 Kim و Moin برای اولین بار، جریان داخل کانل را در شرایط مرزی تکرار شونده مدل نمودند. در سال 1989 Shah ثابت نمود که اگر لزجت گردابه‌ای حاصل از مدل زیرشبکه‌ی اسمگورینسکی برای مدت زیادی منفی بماند، این روش می‌تواند به ناپایداری عددی منجر شود. برای بر طرف کردن انی مشکل Germano در سال 1991 از متغیرهای جریان روی یک جهت همگن متوسط‌گیری نمود. در سال 1990 میلادی Fredrich و Amel شبیه‌سازی سه بعدی را با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ انجام دادند. در سال 1991 این عمل توسط Kayktesis تکرار شد. در سال 1991 Verner کانال را با شرط خروجی نیومن مدل نمود. در سال 1993 میلادی Jein و Beraza کانال را با شرط خروجی دیگری مدل کردند و این عمل در سال 1994 توسط Besteck تکرار شد.

مدل دینامیک Germano در سال 1995 ارائه شد. این مدل، روشی برای محاسبه‌ی ثابت زیر شبکه به صورت تابعی از مکان در هر مرحله زمانی می‌باشد که از اطلاعات موجود در میدان حل شده سرعت استفاده می‌کند. این روش دو مزیت اصلی نسبت به تعیین ثابت زیرشبکه و سازگار کردن آن برای هر مسئله دارد. اول آن که این روش یک فرایند سیستماتیک برای محاسبه‌ی جریان‌هایی که از آن‌ها سابقه‌ی قبلی نداریم و لذا هیچ راهنمایی برای سازگار کردن ثابت زیرشبکه برای آن مسئله نداریم، در اختیار قرار می‌دهد و دوم درجریان‌های ناهمگن، ممکن است مقدار ثابت زیرشبکه به صورت تابعی از مکان باشد که نمی‌توان با یک ثابت زیرشبکه مسئله را به صورت دقیق حل نمود. Lilly نیز سهم شگرفی در پیشبرد مسئله داشت، هواشناسی که دستیار Smagorinsky بود [1]. کسی که مقدار ثابت اسمگورینسکی را برحسب ثابت کولموگروف در مدل سه بعدی گسترش یافته جریان گردابی، حساب نمود. Lilly روش حداقل مربعات را جهت محاسبه‌ی ثابت زیرشبکه ارائه نمود. او بیان داشت که جهت محاسبه‌ی ثابت زیرشبکه در مدل دینامیکی اسمگورینسکی فرآیند متوسط‌گیری روی یک جهت همگن برای پایداری جواب‌ها مورد نیاز می‌باشد. Moin و Gosal در سال 1995 بیان داشتند که روش Lilly برای به دست آوردن ثابت مقیاس زیرشبکه، دارای ناسازگاری ریاضی می‌باشد [2]. Moin و Gosal در سال 1996 به ارائه مدل جدیدی از مدل‌های زیرشبکه پرداختند. همان‌طور که قبلاً ذکر شد در سال 1991، Germano مدل زیر شبکه‌ای را ارائه نمود که در آن نیاز به متوسط‌گیری بر روی یک جهت همگن بود [3]. Zhang و Chen در سال 2000 روش زیر شبکه فعال فیلتر شده را معرفی نمودند تا این محدودیت را حذف کنند. این روش نسبت به روش‌های ارائه شده توسط Minio و Gosal در سال 1996 از سادگی خاصی برخوردار بود. علاوه بر موارد ذکر شده‌ی فوق از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ در مدل‌سازی فرآیندهای دیگر مانند احتراق، اختلاط و یا انتقال خاصیت نیز استفاده گردیده است [4 و 5 و 6 و 7]. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ روشی نوظهور می‌باشد که استفاده از آن در دنیا روبه افزایش است. همگام با کشورهای جهان، استفاده از این روش در ایران نیز آغاز شده و در حال گسترش است.

معادلات حاکم

روش شبیه‌سازی گردابه بزرگ از لحاظ به کارگیری سلول‌های شبکه روشی مابین شبیه‌سازی عددی مستقیم^۲ و شبیه‌سازی رینولدز متوسط^۳ است. در این روش گردابه‌های بزرگ (هم اندازه سلول‌های به کارگرفته شده) به طور مستقیم محاسبه می‌شوند و مقیاس‌های کوچک تر یا زیر شبکه^۴ با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی زیر شبکه مدل می‌گردند. جداسازی گردابه‌های بزرگ از کوچک، بر خلاف روش‌های گذشته که از فیلتراسیون زمانی استفاده می‌کردند، با استفاده از فیلتر مکانی اولیه در روش اسمگورینسکی^۵ ساده و با استفاده از فیلتر تست در روش دینامیکی صورت می‌پذیرد [3]. تفاوت‌های بین فیلتر کردن مکانی و میانگین‌گیری زمانی در جدول (1) بیان شده است. در این جدول حالت کلی بالانویس $\langle \quad \rangle$ برای کمیت فیلتر شده و علامت $\langle \quad \rangle$ برای کمیت میانگین‌گیری شده به کار می‌رود. همچنین کمیت Φ' بخش اغتشاشی Φ می‌باشد.

² Direct numerical simulation(DNS).

³ Reynold's-averaged Navier-stokes simulation (RANS).

⁴ Sub grid scale.

⁵ Smagorinsky.

جدول 1: تفاوت‌های بین فیلتر کردن مکانی و میانگین گیری زمانی

میانگین گیری زمانی	$\langle \Phi \rangle = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \Phi(t) dt$	$\Phi = \langle \Phi \rangle + \Phi'$	$\langle \Phi' \rangle = 0$	$\langle \langle \Phi \rangle \rangle = \langle \Phi \rangle$
فیلتر کردن مکانی	$\bar{\varphi}(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} G(x-x') \varphi(x') dx'$	$\Phi = \bar{\Phi} + \Phi'$	$\bar{\Phi}' \neq 0$	$\bar{\bar{\Phi}} \neq \bar{\Phi}$

درگسسته سازی معادلات حاصل از این روش نمی توان از روش های اتلاف گر استفاده نمود زیرا این روش ها با وارد کردن لزجت مصنوعی مانع از ایجاد جواب صحیح می شوند. مسئله حیاتی در استفاده از روش اسمگورینسکی تعیین ثابت اسمگورینسکی خصوصا در نزدیکی دیواره است، که این عمل در مدل های دینامیکی به صورت نقطه به نقطه صورت می پذیرد. معادله ناویر استوکس فیلتر شده در روش اسمگورینسکی عبارت است از:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_j}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (1)$$

که بالا نویس " " بیانگر پارامتر فیلتر شده است. همچنین داریم:

$$\tau_{ij} = -2\nu_{SGS} \bar{S}_{ij} \quad (2)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

$$\nu_{SGS} = (C_{SGS} \bar{\Delta})^2 \left| \bar{S} \right| = C \Delta^{-2} (2\bar{S}_{ij} \cdot \bar{S}_{ij})^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

در عبارت فوق τ_{ij} بیانگر تنش رینولدز، ν_{SGS} بیانگر لزجت گردابه ای مقیاس های کوچک، \bar{S}_{ij} بیانگر تانسور کرنش، C_{SGS} ثابت اسمگورینسکی و $\bar{\Delta}$ پهناي فیلتر است [3] و [4].

پیشینه تحقیقاتی

Zedravcovich آزمایشی را بر روی یک صفحه‌ی مسطح که جدایش جریان بر روی آن توسط یک سیلندر که در نزدیکی اش قرار گرفته بود، رخ می‌داد، انجام داد. او بیان داشت که محدوده‌ی جدایش بالادست و پائین‌دست، برای نسبت فاصله‌ی برابر صفر، به یکدیگر پیوسته‌اند. وی همچنین بیان داشت که محدوده‌ی جدایش پایین‌دست شامل دو دسته گردابه است که به کمک سیال ساکن از یکدیگر جدا شده‌اند و نیز در این وضعیت هیچ پراکنش گردابه‌ای حول سیلندر مشاهده نمی‌گردد. او همچنین بیان داشت که در مورد لایه‌ی مرزی آشفته، پراکنش گردابه‌ها در نسبت فاصله 0/2 و در مورد لایه‌ی مرزی لایه‌ای پراکنش گردابه‌ها در نسبت فاصله 0/3 اتفاق می‌افتد. Lei به بررسی آزمایشگاهی سیلندرافی غوطه‌ور در لایه‌ی مرزی پرداخت. او اثر نزدیکی سیلندر به بستر دریا، ضخامت لایه‌ی مرزی و گرادیان سرعت را در لایه مرزی بر روی نیروهای هیدرودینامیکی و پراکنش گردابه‌ها بررسی نمود. نتایج نشان می‌داد که ضرایب درگ و لیفت به شدت به نسبت فاصله وابسته‌اند و به وسیله‌ی لایه مرزی تحت تاثیر قرار می‌گیرند. نتایج همچنین حاکی از این بود که پراکنش گردابه‌ها برحسب اینکه ضخامت لایه‌ی مرزی چقدر باشد در نسبت فاصله‌ی بین 0/2 و 0/3 رخ می‌دهد. Price آزمایش‌هایی بصری را بر روی یک سیلندر که در نسبت‌های فاصله‌ی متفاوت، در نزدیکی بستر دریا قرار داده شده بود انجام داد. Qi نیز آزمایشی را بر روی یک

⁶ Dissipative methods.

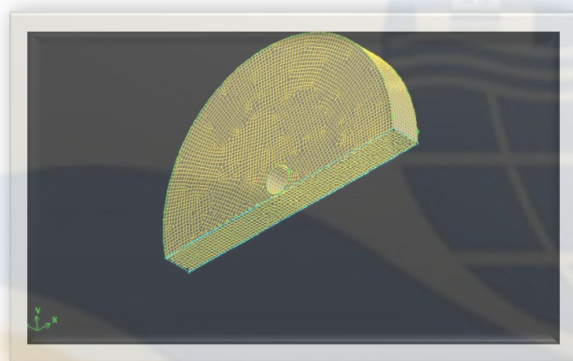
Archive of SID

سیلندر در آب کم عمق، با جریان عرضی و عدد رینولدز حدود 5000 طراحی نمود و انجام داد. او توزیع سرعت را با استفاده از دستگاه PIV، با هدف تحلیل اصول و قوانین حاکم بر گردابه‌ها ثبت نمود. به همین ترتیب، پژوهش در زمینه‌ی گردابه‌ها توسط افراد دیگری نظیر Faraci، Bhattachryya و Maiti صورت پذیرفت که هریک با به دست آوردن نتایجی محدود به شناخت جریان پیرامون خطوط لوله و پدیده‌ی گردابه‌ها کمک نمودند.

با وجود تلاش افراد فوق گردابه‌ها کماکان ماهیتی ناشناخته دارند و در همین زمان نیز، دانشمندان، دانشجویان و مهندسان بسیاری مشغول آزمایش، تحقیق و انجام کارهای عددی بر روی گردابه‌ها، به منظور شناخت بهتر تاثیرات آن‌ها بر روی سازه‌های ساحلی و فراساحلی هستند [8]، [9]، [10].

تشریح مدل و مشخصات آن

مدل به کار گرفته شده در این پژوهش، شامل یک استوانه می‌باشد که دارای نسبت فاصله‌ی صفر است. در شکل (1) محدوده‌ی مورد مطالعه و لوله‌ی مدل شده نشان داده شده است. در حقیقت این استوانه بیانگر خط لوله و سطح پایینی مدل بیانگر بستر دریا است. به دلیل زمان‌بر بودن هر بار محاسبات بر روی مدل، قطر استوانه کم و در حدود 30 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. سرعت جریان ورودی متفاوت است که با توجه به ثابت بودن قطر، اعداد رینولدز متفاوتی ایجاد می‌گردد. در روند انجام محاسبات، روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ به عنوان روش مادر در نظر گرفته شده و سعی شده علاوه بر حل مسئله‌ی پیش رو با این روش، روش‌های دیگر نیز به کار گرفته شوند تا به نوعی روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ اعتبار سنجی گردد.



شکل 1: محدوده‌ی مطالعاتی جهت مدل سازی لوله

در جداول (2) تا (4) مشخصات خط لوله، قلمرو محاسباتی و سیال مورد استفاده آمده است.

جدول 2: مشخصات خط لوله

30	قطر استوانه (خط لوله) mm	1
10	طول استوانه (خط لوله) mm	2
1	زبری استوانه (خط لوله) mm	3

جدول 3: مشخصات قلمرو محاسباتی

شبکه‌ی O Grid	نوع شبکه‌بندی مدل	1
100 × 50 × 10	تعداد سلول‌های شبکه	2

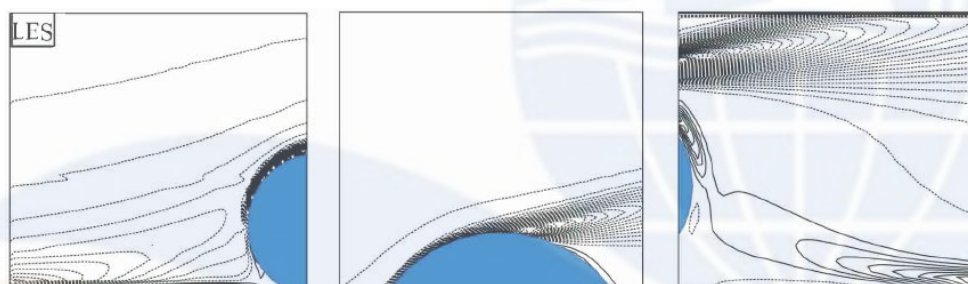
جدول 4: مشخصات سیال مورد استفاده

Fresh Water	نوع سیال مورد استفاده	1
998	چگالی سیال بر حسب $\frac{Kg}{m^3}$	2
1.003518×10^{-3}	لزجت استاتیکی سیال $\frac{Kg.m}{s}$	3
1.004×10^{-6}	لزجت دینامیکی سیال $\frac{m^2}{s}$	4

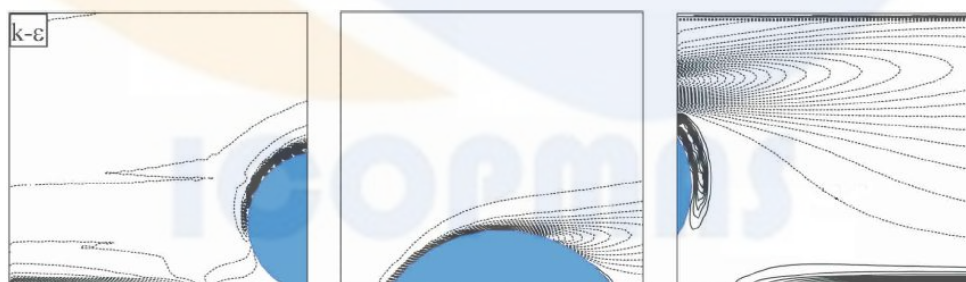
نتایج مدل

در این تحقیق مدل لوله برای جریان با اعداد رینولدز 1000، 3000، 5000، 7000 اجرا گردید (سرعت های مابین 30 تا 200 میلی متر بر ثانیه). لوله، ثابت و متصل به کف فرض گردیده و از تاثیرات ناشی از شتاب جاذبه در راستای عمودی صرف نظر گردیده است.

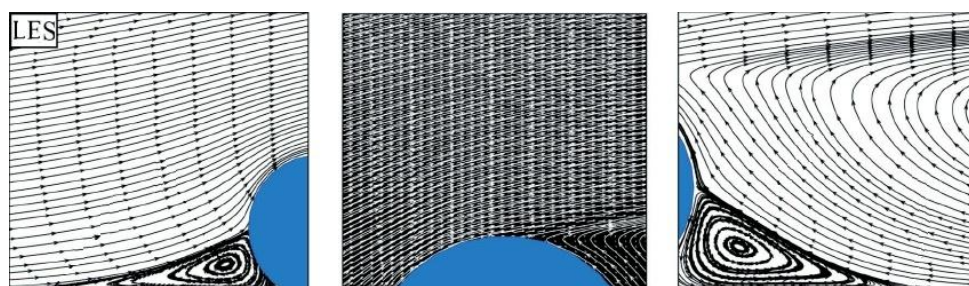
در شکل های (2) تا (7) نمونه ای از کانتورهای آشفتگی و خطوط مسیر و ضرایب برآ و پسا، با استفاده از دو روش شبیه سازی آشفتگی آمده است.



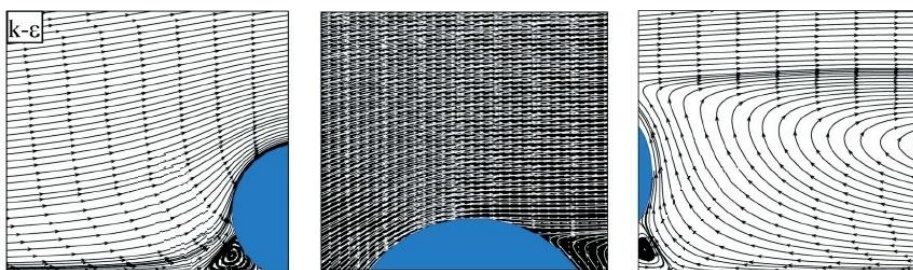
شکل 2: کانتور آشفتگی به روش شبیه سازی گردابه های بزرگ در عدد رینولدز برابر 5000



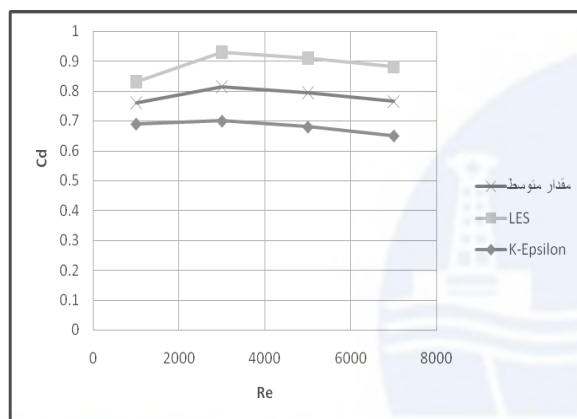
شکل 3: کانتور آشفتگی با روش K-Epsilon در عدد رینولدز برابر 5000



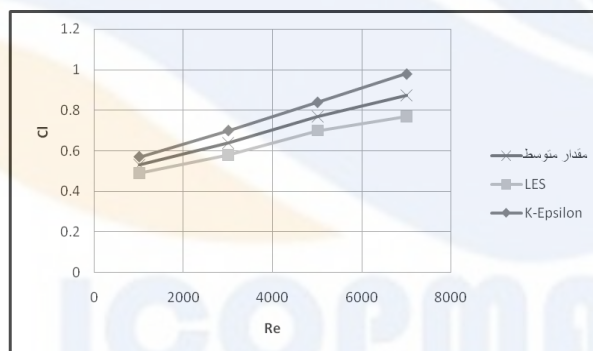
شکل 4: سرعت و خطوط مسیر به روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ در عدد رینولدز برابر 5000



شکل 5: سرعت و خطوط مسیر به روش K-Epsilon در عدد رینولدز برابر 5000



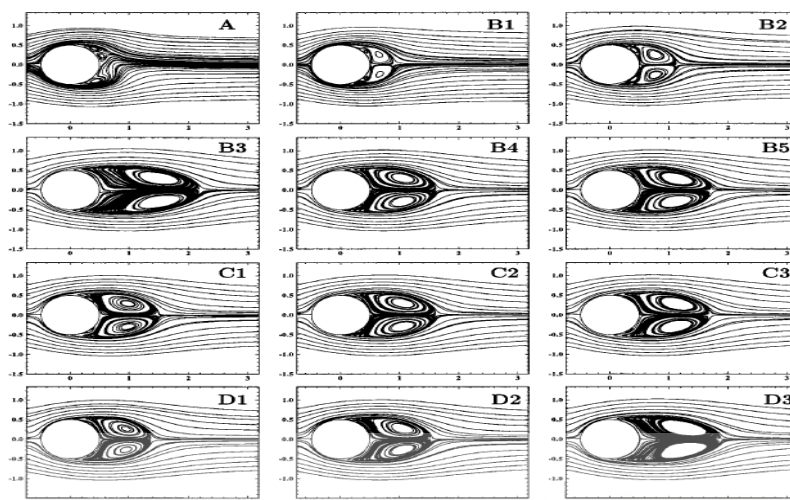
شکل 6: نمودار تغییرات ضریب درگ بر حسب عدد رینولدز قطری



شکل 7: نمودار تغییرات ضریب لیفت بر حسب عدد رینولدز قطری

بحث و نتیجه گیری

وجود گردابه‌ها را می‌توان به نوعی جریان برگشتی پیرامون جسم جامد نسبت داد. از دیدگاهی دیگر علت اصلی ایجاد این گردابه‌ها را می‌توان مربوط به گذر از حالت لایه‌ای به آشفتنه دانست. در حقیقت ایجاد گردابه دارای مفهومی معادل آشفتگی جریان است زیرا تقریباً در تمام جریان‌های آشفتنه گردابه‌ها وجود دارند. در حقیقت جریان لایه‌ای منظم بوده و پیش‌بینی حرکات در آن با مشکل خاصی روبه‌رو نمی‌باشد. در صورتی که در جریان آشفتنه این‌طور نیست. در تصویرهای دو بعدی شکل (8) جریان در اطراف یک سیلندر مغروق به خوبی نمایش داده شده است.



شکل 8: خطوط جریان متوسط گیری زمانی شده در اطراف استوانه در عدد رینولدز برابر 3900 [11]

جریان در اطراف استوانه های شکل فوق کاملا متقارن است. در حقیقت این شکل ها برای حالتی است که فاصله از سطح و کف زیاد می باشد. به محض نزدیک شدن لوله به کف تقارن از بین می رود. و این همان چیزی است که در این پژوهش به آن پرداخته شده است. با مراجعه به پروفیل های سرعت در فصل نتایج مشاهده می گردد که در اعداد رینولدز پایین، جریان در بالادست بطور عمده فقط در ناحیه ی عرض های کوچکتر از شعاع، تحت تاثیر حضور سیلندر است، در صورتی که در اعداد رینولدز بالا، به تدریج در این محدوده، از تاثیر حضور سیلندر کاسته می گردد. در نواحی با عرض بیشتر از شعاع در نواحی بالادست عموما جریان تحت تاثیر حضور سیلندر نیست. نقطه ی سکون در تمامی رینولدزها بر روی محور طولی و در بالادست قرار می گیرد. در پایین دست رفتاری کاملا متفاوت مشاهده می گردد. در رینولدزهای کم جریان تا عرض های کوچکتر از قطر تحت تاثیر حضور سیلندر است، به نحوی که در ناحیه ی مذکور سکون جریان را شاهد هستیم. در صورتی که در همین ناحیه، در اعداد رینولدز بالا نوعی جریان برگشتی را شاهد هستیم، در عرض های بیشتر از قطر عموما جریان تحت تاثیر حضور سیلندر نیست. زاویه ی جدایش در روش K-Epsilon برای تمامی رینولدزها عددی در حدود 120 درجه بوده است، در صورتی که همین عدد برای روش شبیه سازی گردابه های بزرگ عددی در حدود 100 درجه بود. محدوده ی طولی جدایش و در حقیقت محدوده ی طولی حضور گردابه ها برای روش K-Epsilon چیزی در حدود یک پنجم قطر در پایین دست و چیزی در حدود یک دوم قطر در بالادست می باشد. این اعداد برای روش شبیه سازی گردابه های بزرگ چیزی در حدود یک دهم قطر در بالادست و حدود یک و نیم تا دو برابر قطر در پایین دست است. نمودار ضریب درگ بر حسب اعداد رینولدز، نشان دهنده ی افت ناچیز این ضریب در عدد رینولدز حدود 5000 است که این امر در هر دو روش حل قابل مشاهده است. بر خلاف ضریب درگ، ضریب لیفت پیوسته افزایش می یابد. احتمالا دلیل کاهش ضریب درگ، جلو افتادن ناحیه ی جدایش و کاهش زاویه ی آغاز جدایش است، که به دلیل نداشتن اطلاعات مابین رینولدزهای 3000 تا 5000 تجزیه و تحلیل آن امکان پذیر نیست. لازم به ذکر است، اگرچه ضریب درگ کاهش می یابد، ولی نیروی درگ کاهش نمی یابد. دلیل این امر این است که نیروی لیفت با توان دوم سرعت متناسب است. نکته ی دیگری که در ارتباط با ضریب درگ، توضیح آن ضروری می نماید، مشاهده ی نوسان شدید مابین دو عدد در نمودار ضریب درگ-زمان در هنگام حل است. البته این رفتار بیشتر در روش شبیه سازی گردابه های بزرگ مشاهده گردید. لذا پس از ثابت شدن حدود نوسان، عمل میانگین گیری صورت پذیرفت. لازم به ذکر است، در این پژوهش قطر لوله کمتر از قطر لوله های مورد استفاده در محیط دریاها و اقیانوس هاست و علت استفاده از این قطر، جلوگیری از افزایش بسیار زیاد سلولهای شبکه و در نتیجه افزایش بیش از حد زمان حل می باشد. علی رغم این مسئله به نظر می آید که در مورد لوله هایی که ابعاد آن ها ضریبی از ابعاد لوله ی فوق باشد، ضریب درگ باید در محدوده ی ضرایب درگ این پژوهش باشد. علاوه بر این در بسیاری از موارد در صنعت از لوله های Piggy Back استفاده می گردد که در صورتی که قطر لوله ی تحتانی زیاد باشد و قطر لوله ی فوقانی حدود قطر لوله ی مورد استفاده در این پژوهش باشد، ضریب درگ لوله ی فوقانی را می توان با قرار دادن ضریب تصحیح مناسب، از ضریب درگ مذکور در این پژوهش بدست آورد.

[1] Smagorinsky, J. (1963), General circulation experiments with the primitive equations, The Basic Experiment. Monthly Weather Review.

[2] You, D., and Moin, P., (2007), A dynamic global-coefficient subgrid-scale eddy-viscosity model for large-eddy simulation in complex geometries, Physics of Fluids.

[3] Germano, M., Piomelli, U., Moin, P. and Cabot, W. H., (1991), A dynamic sub-grid scale eddy viscosity model, Physics of Fluids.

[4] غرضی، سید سجاده، (1384)، پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد. شبیه سازی عددی جریان های آشفته با استفاده از روش LES. دانشکده ی فنی و مهندسی. دانشگاه تربیت مدرس.

[5] نوری، نوروز محمد، (1386)، بررسی تاثیر شکل فیلتر ناهموار و مقایسه انواع فیلترهای گسسته نزدیک به برش تیز در شبیه سازی گردابه های بزرگ (LES). هفتمین همایش سالانه (بین المللی) انجمن هوا فضای ایران. اسفند.

[6] یکانی مطلق، صابر، (1387)، پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد، بررسی عملکرد فیلتراسیون در شبیه سازی گردابه بزرگ و در فرآیند تولید ورتکس. دانشکده ی مهندسی مکانیک. تهران: دانشگاه علم و صنعت ایران.

[7] ذوالفقاری، امین. (1385)، بررسی جریان مغشوش و پدیده ی انتقال به روش شبیه سازی گردابه های بزرگ LES. دانشگاه تربیت مدرس.

[8] Kim, W and Moin, S., (1995), A new dynamic one-equation subgrid-scale model for large eddy simulation, In 33rd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno.

[9] Nicoud, F. and Ducros, F., (1999), Subgrid-scale modeling based on the square of the velocity gradient tensor, Flow, Turbulence and Combustion

[10] Akoz, S., (2009), Numerical and experimental analyses of the flow around a horizontal wall-mounted circular cylinder. Turkey

[11] Breuer, M., (1998), Large eddy simulation of the subcritical flow past a circular cylinder, J. Numerical Methods In fluids, Erlangen