

بررسی نیروهای هیدرودینامیکی لحظه‌ای وارد بر خطوط لوله فراساحلی مرکب تحت جریان‌های دائمی

حامد چهره‌گشا^۱، حبیب حکیم‌زاده^۲، نازیلا کاردان^{۳*}

^۱ فارغ‌التحصیل مقطع کارشناسی ارشد مهندسی عمران - سازه‌های دریایی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

^۲ استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

^۳ دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز

دریافت: ۱۴۰۱/۱/۲۱، بازنگری: ۱۴۰۱/۱/۴، پذیرش: ۱۴۰۱/۱/۱۱، نشر آنلاین: ۱۴۰۱/۱/۱۱

چکیده

در خطوط لوله انتقال نفتی، نیروهای وارده به لوله‌ها از پارامترهای مهم طراحی به‌شمار می‌روند. مقدار این نیروها بر حسب تغییر در نحوه قرارگیری لوله‌های مجاور نظیر فاصله‌ی بین لوله‌ها، نسبت ابعاد لوله‌ها و نیز آرایش قرارگیری آن‌ها تحت تأثیر قرار می‌گیرد؛ از اینرو در پژوهش حاضر، بررسی تغییرات نیروهای هیدرودینامیکی برای حالات مختلف قرارگیری لوله‌ها تحت شرایط هیدرودینامیکی مختلف مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا، نیروهای هیدرودینامیکی لحظه‌ای وارد بر خطوط لوله فراساحلی مرکب تحت جریان‌های دائمی محاسبه و مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. کلیه شبیه‌سازی‌ها به‌صورت سه‌بعدی و در محیط نرم‌افزار ANSYS FLUENT 16.0 انجام شده است. با تغییر سرعت جریان سیال و قطر سیلندر اصلی، تأثیر تغییرات عدد رینولدز بر ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی لحظه‌ای وارد بر خطوط لوله مرکب مورد بررسی قرار گرفت. پس از بررسی‌های اولیه، مدل آشفتگی گردابه‌های بزرگ (LES) و سلول‌بندی منظم انتخاب گردید. در ادامه تأثیر فاصله نسبی سیلندر اصلی تا بستر (e/D)، فاصله نسبی دو سیلندر از یکدیگر (G/D) و قطر نسبی (d/D) مورد پژوهش قرار گرفت. نتایج نشان داد با افزایش سرعت، مقادیر میانگین زمانی ضرایب پسا (Drag coefficient) و برآ (Lift coefficient) لوله اصلی به‌ترتیب در حدود ۱۵٪ و ۳۰٪ کاهش می‌یابد. در مورد لوله فرعی این کاهش برای میانگین زمانی ضرایب پسا و برآ به‌ترتیب در حدود ۱۳٪ و ۲۵٪ است. اما با افزودن لوله فرعی سوار بر لوله اصلی، مقادیر میانگین زمانی ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر لوله اصلی کاهش چشمگیری پیدا می‌کند به‌گونه‌ای که این مقادیر در مورد ضرایب برآ کاهش ۴۰٪ را نشان می‌دهد که این امر سبب کاهش آسیب جدی به خط لوله اصلی می‌گردد. همچنین با افزایش فاصله نسبی بین لوله‌های اصلی و فرعی تا مقدار ۰/۲، مقدار متوسط زمانی ضرایب برآ در مورد لوله اصلی ابتدا افزایش یافته و سپس به مقدار ثابت (تغییرات نامحسوس) رسید. با افزایش فاصله نسبی بین لوله‌ها نیز، مقادیر متوسط زمانی ضرایب پسا برای لوله فرعی افزایش یافت. سرانجام مشاهده گردید که با افزایش قطر سیلندر اصلی سطح برخورد سیال به سیلندرها افزایش یافته که این امر موجب افزایش دامنه نوسانات ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی گردید.

کلیدواژه‌ها: خطوط لوله مرکب، نیروهای هیدرودینامیکی، شبیه‌سازی عددی، جریان آشفته، نرم‌افزار فلوئنت.

۱- مقدمه

ریزش متناوب گردابه‌ها در ناحیه‌های مجاور، باعث اعمال نیروهایی بزرگ بر لوله‌های فراساحلی می‌گردد و در برخی موارد نیز منجر به شکست آن‌ها می‌شود. از آنجاکه تداخل متقابل جریان اطراف لوله‌های دریایی ممکن است رفتارهای بسیار پیچیده‌ای از خود نشان دهد، از این‌رو بررسی نیروهای هیدرودینامیکی لحظه‌ای که متأثر از همان رفتارهاست، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و موضوع اصلی این پژوهش است. نیروهای وارد بر لوله دریایی به‌صورت منفرد به‌کرات و با جزئیات مورد توجه محققین قرار گرفته

جریان‌های آشفته بخش عمده‌ای از جریان‌های صنعتی و مهندسی را به خود اختصاص داده و در طول سالیان اخیر به‌صورت مستمر و گسترده مورد پژوهش و بررسی قرار گرفته‌اند. است. جریان حول لوله‌های دریایی از جریان‌های پایه و پرکاربرد در علوم مکانیک سیالات است که در زمینه‌های مختلف صنعتی کاربرد فراوان دارد. نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر لوله‌های سوار بر هم در بستر دریا، اساساً ناشی از ویژگی جریان در اطراف آن‌ها است.

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۴-۴۱۸۶۵۷۹

Faruquee و همکاران (۲۰۰۷)، مطالعات عددی بر روی تأثیر نسبت قطر کوچک به قطر بزرگ یک استوانه با مقطع بیضی بر روی جریان اطراف استوانه انجام دادند. در این تحقیق، نسبت قطر کوچک به قطر بزرگ بین $0/3$ الی 1 متغیر و قطر بزرگ در جهت جریان و عدد رینولدز 40 در نظر گرفته شده بود. ایشان مشاهده نمودند اگر نسبت قطرها به $0/34$ برسد، یک جفت گردابه به صورت دائم در پشت استوانه مشاهده می‌شود.

Zhao و همکاران (۲۰۰۷) جریان آشفته اطراف دو لوله دریایی با قطرهای متفاوت را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از معادلات ناویر-استوکس و متوسط عدد رینولدز در حالت دوبعدی استفاده نمودند.

Oner و همکاران در سال ۲۰۰۸، مطالعات آزمایشگاهی را بر روی اندرکنش جریان با استوانه نزدیک بستر انجام دادند تا بر اساس میدان‌های سرعت اندازه‌گیری شده، تأثیر فاصله از بستر بر روی موقعیت نقاط جدایش، عدد استروهمال و جدایی لایه مرزی دیواره را بررسی نمایند.

Lin و همکاران (۲۰۰۹) یک تحقیق آزمایشگاهی با هدف بررسی مشخصات جریان اطراف استوانه نزدیک دیواره در محدوده‌ی اعداد رینولدز مختلف انجام دادند.

Lin با استفاده از تکنیک PIV و سرعت‌سنج دوپلر لیزری، تاریخچه زمانی سرعت و میدان سرعت را اندازه‌گیری کرد.

Akoz و همکاران در سال ۲۰۱۰، با استفاده از تکنیک PIV، مشخصات استوانه خوابیده بر روی بستر را مورد بررسی قرار دادند. پدیده جریان در پایین‌دست و بالادست استوانه، محل اتصال با سطح آزاد جریان گردابه‌ای را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. Zang و همکاران (۲۰۱۲) آزمایشاتی به‌منظور بررسی گردابه‌فکنی و ارتعاش ناشی از آن برای خطوط لوله مرکب در جریان دائمی و رژیم جریان زیر بحرانی انجام دادند.

زنگنه و بختیاری (۱۳۸۹) یک پژوهش عددی برای بررسی الگوی جریان اطراف لوله‌های فراساحلی تحت اثر جریان یک طرفه انجام دادند. آن‌ها بر مبنای روش عددی حجم محدود و مدل آشفتگی $k-\epsilon$ ، میزان تنش برشی بستر را به‌ازای نسبت‌های مختلف فاصله لوله از بستر توسعه دادند. نتایج گویای آن است که افزایش نسبت فاصله از بستر به قطر لوله، باعث کاهش مؤثر در تنش برشی می‌شود.

Hakimzadeh و Mohasebi Mohammadi (۲۰۱۶) یک پژوهش عددی و آزمایشگاهی برای بررسی پدیده جدایش جریان اطراف خطوط لوله با آرایش مرکب و تأثیر عدد رینولدز بر الگوی جریان انجام دادند. Mysa و همکاران (۲۰۱۶) ارتعاشات ناشی از جریان اطراف سیلندرها را در یک میدان محاسباتی با آرایش پشت سر هم در عدد رینولدز پایین مورد پژوهش قرار دادند.

است، با این حال پژوهش‌های انجام شده پیرامون نیروهای وارد بر لوله‌های دریایی مرکب به‌مراتب کم‌تر بوده است و به دلیل پیچیدگی‌های رفتار جریان در این حالت پژوهش‌های نسبتاً اندکی در این زمینه صورت گرفته است (چهره‌گشا، ۱۴۰۰).

بررسی دقیق ویژگی‌های جریان اطراف لوله‌های دریایی مرکب و نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر خطوط لوله فراساحلی به‌صورت لحظه‌ای می‌تواند برای طراحی و عملکرد خطوط لوله انتقال نفت و گاز و یا مواد هیدروکربور و آب بستر دریا مفید باشد.

Grove و همکاران در سال ۱۹۶۴، با تغییر عدد رینولدز، مشخصات جریان جداشده اطراف استوانه را با هدف مشخص کردن رفتار حدی جریان دائمی مورد بررسی آزمایشگاهی قرار دادند.

Bearman و Zdravkovich در سال ۱۹۷۸، یک بررسی آزمایشگاهی برای جریان اطراف استوانه نزدیک دیوار برای فواصل مختلف از دیوار انجام دادند.

Grass و همکاران (۱۹۸۳) تحقیق آزمایشگاهی با هدف مطالعه بر روی تأثیر نزدیکی بستر و گرادیان‌های سرعت بالا بر روی فرکانس گردابه‌فکنی از یک استوانه غوطه‌ور در داخل لایه مرزی جریان‌های جزر و مدی انجام دادند.

Kawamura و همکاران (۱۹۸۶) جریان تراکم‌ناپذیر اطراف استوانه با اعداد رینولدز بالا را به‌صورت عددی مورد بررسی قرار دادند.

Lei و همکاران (۲۰۰۰) با کمک معادلات دوبعدی ناویر استوکس و معادله فشار پواسون، جریان لزج غیرقابل تراکم اطراف استوانه دایره‌ای را مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسیدند با افزایش پارامتر برشی، عدد استروهمال و ضریب پسا کاهش می‌یابد.

Price و همکاران در سال ۲۰۰۲، جریان اطراف استوانه نزدیک به دیواره را برای اعداد رینولدز 1200 و 4960 به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند.

Cheng و Chew (۲۰۰۳) جریان اطراف استوانه نزدیک بستر را به دو صورت همراه با صفحه جداکننده و بدون صفحه جداکننده با استفاده از معادلات ناویر-استوکس شبیه‌سازی نمودند. آن‌ها دریافتند وجود صفحه جداکننده به‌مقدار قابل توجهی میزان نیروی پسا، و نیروی برشی وارد بر بستر و میانگین جذر مربعات نیروی برآ را افزایش می‌دهد.

Zhao و همکاران (۲۰۰۵) یک تحقیق عددی با هدف بررسی جریان ویسکوز گذرنده از پیرامون دو لوله دریایی با قطرهای متفاوت را انجام دادند. در این پژوهش، نسبت قطر بزرگ به قطر کوچک برابر $0/25$ در نظر گرفته شده است.

Qi و همکاران (۲۰۰۶) تحقیقاتی بر روی اثر فاصله استوانه از بستر (در فواصل مختلف) بر روی مشخصات گردابه‌فکنی در آب کم عمق انجام دادند.

در این راستا، نیروهای هیدرودینامیکی لحظه‌ای وارد بر خطوط لوله مرکب تحت جریان‌های دائمی با استفاده از شبیه‌سازی عددی مورد ارزیابی قرار گرفتند. تأثیر مقدار سرعت جریان و قطر لوله اصلی و یا به عبارتی اثرات تغییرات عدد رینولدز بر ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی، فاصله میان لوله‌ها (G/D)، نزدیکی بستر (e/D) و قطر نسبی (d/D) بر تغییرات ضرایب پسا و برآ بررسی شدند. با توجه به این‌که برای جریان‌های اطراف لوله-های مرکب، مدل‌های آشفتگی معمول ممکن است نتایج دقیقی ارائه نکنند، ابتدا با بررسی اثر سلول‌بندی‌ها و مدل‌های آشفتگی مختلف، نوع مناسب آن‌ها که با صرف هزینه محاسباتی معقول و منطقی بتواند نتایج دقیق‌تری ارائه بدهد، انتخاب گردید.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- نرم‌افزار فلوئنت

نرم‌افزار ANSYS یک بسته نرم‌افزار کامپیوتری مهندسی و محصول شرکت ANSYS Inc است. این نرم‌افزار از دسته ابزارهای تحلیلی است که برای مدل‌سازی و تحلیل آن از روش اجزای محدود (FEM) استفاده می‌کند. ANSYS آنالیزهای غیرخطی، مکانیک شکست، سیالات و دیگران آنالیزها را در بسته نرم‌افزاری خود قرار داده و با توجه به محیط مناسب نرم‌افزار جهت تعریف مسائل و شرایط مرزی گوناگون، مسائل پیچیده با استفاده از این نرم‌افزار قابل حل می‌باشد.

۲-۲- هندسه مدل و شبکه‌بندی

یک طرح شماتیک از مدل مورد بررسی در شکل (۱- الف) و (۱- ب) نشان داده شده است. جریان از پیرامون لوله دریایی با قطر D عبور می‌کند. به منظور شبیه‌سازی جریان اطراف خط لوله، از یک میدان مستطیلی به طول $40D$ که استوانه به فاصله $16D$ از ورودی کانال قرار گرفته، استفاده شده است. برای جلوگیری از تأثیر دیواره بر الگوی جریان، عرض میدان محاسباتی برابر $14D$ و ارتفاع آن $12D$ در نظر گرفته شده است. مرکز لوله دریایی به عنوان مرکز مختصات نرم‌افزار منظور شده است. در مسائل مدل‌سازی عددی، فرایند تولید شبکه از اهمیت فراوانی برخوردار بوده و تولید شبکه مناسب تأثیر مستقیمی بر صحت و دقت نتایج به دست آمده خواهد داشت. نوع شبکه‌بندی با ساختار یا بی‌ساختار بر روی نتایج حاصل از شبیه‌سازی گردابه‌های برخاستگی بسیار تأثیرگذار می‌باشد. در شکل (۲- الف) و (۲- ب) نمونه‌هایی از شبکه‌بندی با ساختار و بی‌ساختار برای پیرامون استوانه نشان داده شده است.

Qin و همکاران (۲۰۱۷) یک مطالعه بر روی دو استوانه با قطرهای متفاوت با هدف بررسی دینامیک سیال در اطراف سیلندر اصلی انجام دادند. ویژگی‌های جریان از جمله ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی، طول تشکیل گردابه و توزیع فشار اطراف سیلندرها در این تحقیق بررسی شده است.

Pearcey و همکاران (۲۰۱۷) پژوهشی عددی بر روی جریان نوسان دو سیلندر با آرایش مرکب برای عدد کولگان-کارپنتر (KC) برابر ۱۰ انجام دادند. این پژوهش با هدف شناسایی اثر فاصله بین استوانه‌ها بر روی جریان اطراف سیلندرها انجام گردید. Kardan و Hakimzadeh (۲۰۱۸) جریان آشفته پیرامون خطوط لوله مرکب تحت جریان‌های دائمی را به صورت عددی و با نرم‌افزار FLUENT مورد بررسی قرار دادند.

Liu در سال ۲۰۲۰ بررسی عددی دوبعدی بر روی جریان گذرنده از دو لوله دریایی با قطرهای مختلف و آرایش پشت سر هم انجام داد. ایشان نشان دادند در نسبت قطر برابر ۰/۱ و ۰/۲، با افزایش فاصله نسبی، پیوستگی در تغییرات متوسط ضریب پسا و جذر میانگین مربعات ضریب برآ وجود دارد درحالی‌که در نسبت قطرهای بالاتر با افزایش فاصله نسبی، ناپیوستگی در تغییرات متوسط ضریب پسا و R.M.S ضریب برآ لوله دریایی پایین دست مشاهده می‌شود.

Wu و همکاران (۲۰۲۰) جریان حول دو لوله دریایی را مورد تحقیق قرار دادند و بیان نمودند برای فواصل نسبی بین ۵ تا ۱۲، و زاویه بین دو لوله دریایی نسبت به جریان (بین ۰ تا ۱۰ درجه) نیروی پسا منفی بر لوله دریایی پایین دست وارد می‌شود.

Chen و همکاران (۲۰۲۰) پژوهشی دوبعدی با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ روی جریان حول یک خط لوله انجام دادند. ایشان دریافتند با کاهش فاصله نسبی ضریب پسا و جذر میانگین مربعات ضریب برآ کاهش می‌یابد.

Serta و همکاران در سال ۲۰۲۱، جریان اطراف سیلندر منفرد و مرکب را با استفاده از مدل آشفتگی ($K-\omega$ SST) شبیه‌سازی نموده و اثر فاصله نسبی بین دو سیلندر (G/D) در اعداد رینولدز بالا را ارزیابی نمودند.

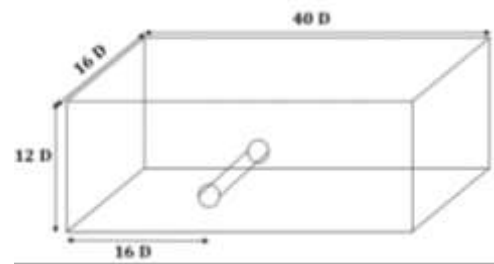
Hosseini و همکاران (۲۰۲۲) نیروهای جریان اعمال شده به خطوط لوله زیر دریا را در دو حالت منفرد و مرکب به صورت تجربی مورد پژوهش قرار دادند و نشان دادند با افزایش قطر لوله میزان نیروی اعمال شده بر روی خطوط لوله افزایش می‌یابد.

بررسی پژوهش‌های فوق نشان می‌دهد میزان تغییرات ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی تحت تأثیر پارامترهای مختلف هیدرودینامیکی و هندسی برای خطوط لوله مرکب به صورت منسجم و کامل انجام نیافته است. از این رو در پژوهش حاضر سعی بر این بوده است تقریباً تمامی پارامترهای مؤثر بر ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی در مورد خطوط لوله مذکور مورد توجه قرار گیرند.

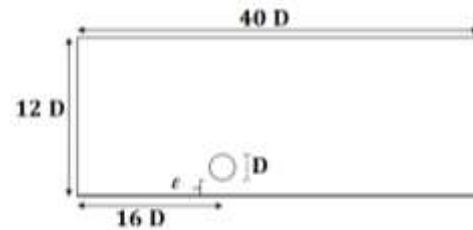
۳- صحت‌سنجی نتایج عددی

۳-۱- مقایسه سلول‌بندی‌های مختلف در پیرامون لوله منفرد

ابتدا برای دستیابی به سلول‌بندی مناسب جهت اطمینان از بحث استقلال شبکه، مدل‌ها با سلول‌بندی‌های مختلف مورد مدل‌سازی شده و سلول‌بندی مناسبی که نتایج دقیق‌تری به دست دهد، انتخاب شد. اندازه سلول‌های محاسباتی در بالادست لوله به علت عدم حساسیت این قسمت از جریان به اندازه کافی بزرگ انتخاب شده و در اطراف لوله، سلول‌بندی به اندازه کافی ریز در نظر گرفته شد. بدین منظور برای عدد رینولدز 2×10^4 ، مدل‌هایی با سلول‌بندی مختلف تولید شده و نتایج حاصله با نتایج Zhao و همکاران (۲۰۰۷) مقایسه گردیدند. زمان شبیه‌سازی برای این مدل‌ها برابر ۱۰ ثانیه انتخاب شده است و مقادیر متوسط حاصل شده در طول دوره زمانی شبیه‌سازی شده ارائه گردیده است. در شکل (۴) و جدول (۱) نتایج حاصله ضرایب پسا و برآ برای لوله منفرد در عدد رینولدز 2×10^4 آورده شده است. در این قسمت نتایج ارائه شده با استفاده از مدل آشفتگی گردابه‌های بزرگ (LES) به دست آمده است. در بخش‌های بعدی نتیجه بررسی اثر مدل‌های آشفتگی ارائه خواهد شد. با ریز کردن سلول‌بندی و مقایسه با نتایج موجود، ضرایب هیدرودینامیکی دقیق‌تری به دست آمده است. این ضرایب برای حالت سلول‌بندی C و D به نتایج Zhao و همکاران نزدیک‌تر است.



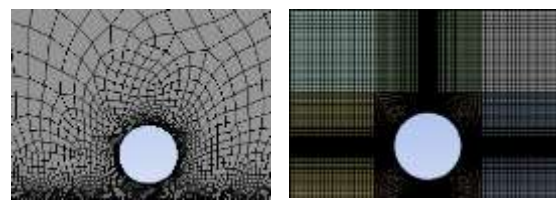
(الف)



(ب)

شکل ۱- طرح شماتیک از مدل‌های مورد بررسی:

(الف) نمای ۳D، (ب) نمای ۲D

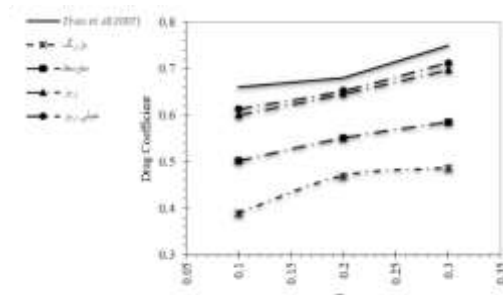


(ب)

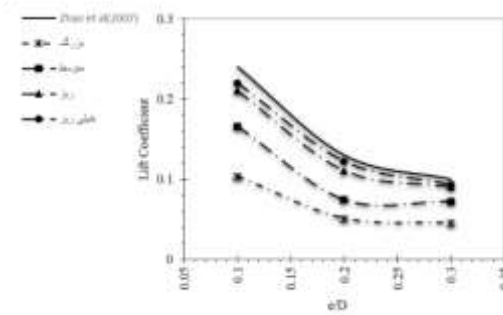
(الف)

شکل ۲- سلول‌بندی میدان محاسباتی درون کانال:

(الف) سلول‌بندی با ساختار، (ب) سلول‌بندی بی‌ساختار میدان محاسباتی



(الف)



(ب)

شکل ۴- مقایسه متوسط زمانی: (الف) ضریب پسا،

(ب) ضریب برآ

۳-۲- شرایط مرزی

جریان یکنواخت با سرعت 0.4 m/s در امتداد محور X وارد دامنه محاسباتی که به صورت کانال تعریف شده می‌شود. برای ورود جریان، شرط مرزی از نوع ورودی سرعت (Velocity) انتخاب شده و برای خروجی جریان از شرط مرزی Outflow استفاده می‌گردد. برای جریان روی سطح بستر، محیط پیرامون لوله و دیواره‌ها از شرط مرزی Wall همراه با شرط عدم لغزش (No Slip) و در قسمت فوقانی کانال نیز از شرط مرزی تقارن (Symmetry) استفاده شده است (شکل (۳) (Asrari و همکاران، ۲۰۲۱).



شکل ۳- نوع شرایط مرزی برای جریان اطراف خط لوله منفرد

جدول ۱- مقادیر خطای نسبی برای ضریب پسا و برآ

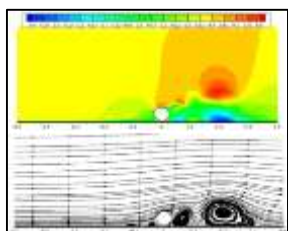
نوع سلول‌بندی	نسبت e/D		
	۰/۳	۰/۲	۰/۱
ضریب پسا	۰/۳۵	۰/۳۱	۰/۴۱
	۰/۲۲	۰/۱۹	۰/۲۴
	۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۰۹
	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۷
ضریب برآ	۰/۴۵	۰/۶۱	۰/۵۷
	۰/۲۷	۰/۴۳	۰/۳۱
	۰/۱۰	۰/۱۵	۰/۱۲
	۰/۰۹	۰/۱۳	۰/۱۱

۳-۲- بررسی اثر مدل‌های آشفتگی

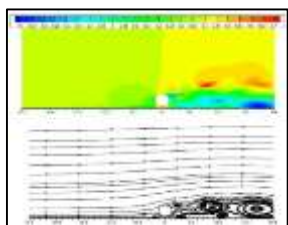
تغییرات ضرایب هیدرودینامیکی با انواع مدل‌های آشفتگی $K-\varepsilon$, RSM, $K-\omega$ و LES در ترکیب با الگوریتم PISO مورد مطالعه قرار گرفته است.

چهار مدل آشفتگی ($K-\varepsilon$ (RNG), RSM, $K-\omega$ (SST) و LES) انتخاب و مدلی که ضرایب هیدرودینامیکی اطراف خط لوله را با دقت بالاتری شبیه‌سازی نماید، انتخاب گردید. نتایج مربوط به مدل LES به‌طور خلاصه در اینجا ارائه شده است. تغییرات ضرایب برآ و پسا در مدل آشفتگی LES برای خط لوله با مشخصات $D = 0.05m$, $V = 0.4m/s$ و $Re = 2 \times 10^4$ بررسی گردید. در شکل (۵) توزیع متوسط زمانی سرعت جریان و خطوط جریان میانگین‌گیری شده در طی زمان شبیه‌سازی و در شکل (۶) منحنی‌های سرعت جریان قبل و بعد از محل لوله ارائه شده است. در جدول (۲) میزان خطای RMSE در مقایسه بین منحنی‌های سرعت جریان در فاصله 2D قبل از لوله آورده شده است. لازم به‌ذکر است کلیه موارد برای گام زمانی آخر ارائه گردیده است.

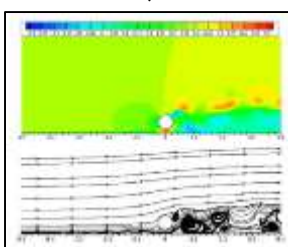
در مدل LES، جریان قبل از رسیدن به لوله در بالادست به‌صورت توسعه یافته درآمده و با نزدیک شدن به لوله دچار تغییراتی می‌شود که گویای تأثیر گردابه‌ها و جریان‌های برگشتی از لوله دریایی می‌باشد. در شکل (۷) ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی به‌صورت لحظه‌ای برای مدل LES و در جدول (۳) مقدار خطا در محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی با مدل‌های آشفتگی مختلف در مقایسه با نتایج Zhao و همکاران (۲۰۰۷) آورده شده است.



(الف)

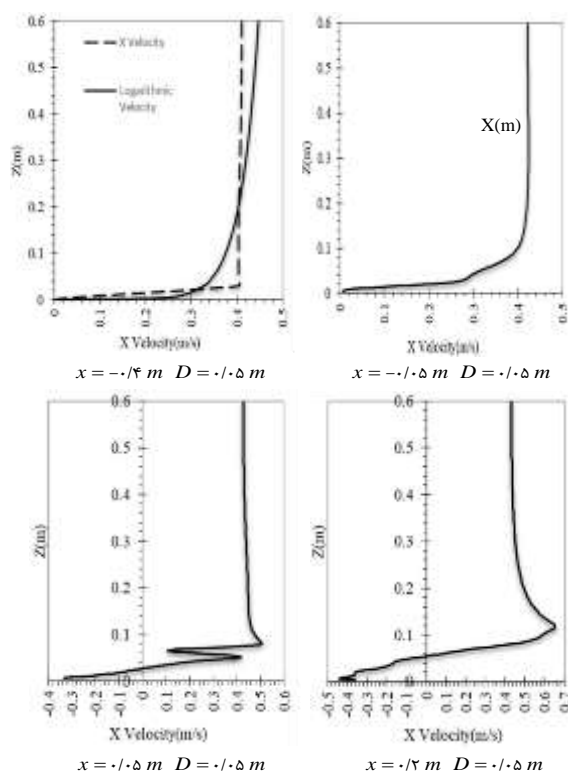


(ب)



(ج)

شکل ۵- توزیع متوسط زمانی سرعت و سرعت جریان میانگین‌گیری شده در مدل آشفتگی LES: (الف) $e/D = 0.1$, (ب) $e/D = 0.2$ (ج) $e/D = 0.3$



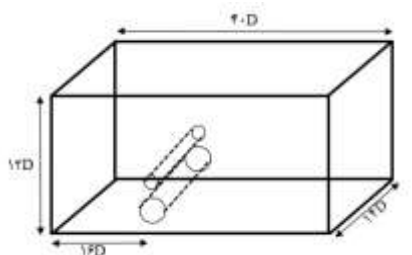
شکل ۶- منحنی‌های سرعت جریان در فواصل مختلف از لوله در مدل آشفتگی LES برای $e/D = 0.1$

با مقایسه مقادیر متوسط زمانی ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی با نتایج پژوهش Zhao و همکاران (۲۰۰۷) مشاهده می‌شود با کاهش اندازه سلول بندی از ۰/۰۰۲ به ۰/۰۰۰۵، مقدار خطا برای ضرایب پسا در نسبت $e/D = 0.1$ ، $e/D = 0.2$ و $e/D = 0.3$ به ترتیب از مقدار ۰/۴۱ و ۰/۳۱ و ۰/۳۵ به مقدار ۰/۰۷ و ۰/۰۴ و ۰/۰۵ کاهش می‌یابد. همچنین برای ضریب برآ به ترتیب از ۰/۵۷ و ۰/۶۱ و ۰/۴۵ به ۰/۱۱ و ۰/۱۳ و ۰/۰۹ تقلیل پیدا می‌کند. همچنین میزان خطا در محاسبه ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی در مقایسه با نتایج Zhao و همکاران (۲۰۰۷) در دو مدل LES و RSM کمتر از دو مدل آشفتگی دیگر است. در نهایت با جمع بندی نتایج معلوم گردید مدل آشفتگی LES دارای دقت بیش تری بوده و به عنوان یک مدل دقیق جهت شبیه سازی عددی ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی اطراف لوله دریایی تحت جریان های دائمی مورد توجه قرار گرفت.

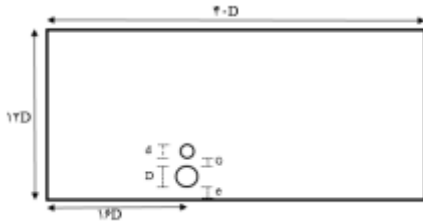
۳- نتایج و بحث

۳-۱- مدل مبنا

در شکل (۹) طرح شماتیک مدل اصلی در حالت دو و سه بعدی نمایش داده شده است.



(الف)



(ب)

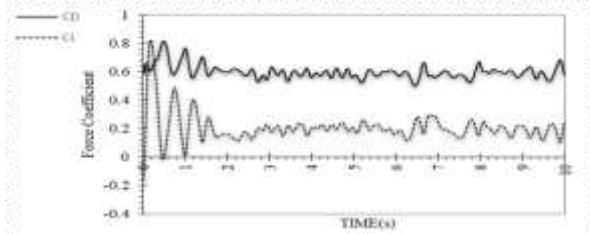
شکل ۸- طرح شماتیک مدل: الف) نمای ۳D، ب) نمای ۲D

۴- بررسی تأثیر مقدار سرعت جریان بر تغییرات ضرایب پسا و برآ

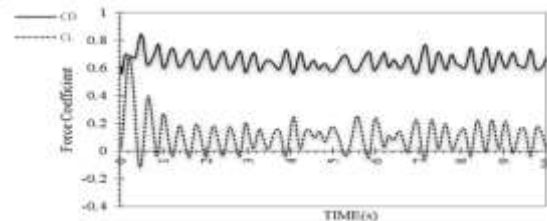
نیروهای هیدرودینامیکی پسا و برآ، تابعی از سرعت جریان، قطر لوله و چگالی آب می‌باشند. در این قسمت پارامترهای قطر لوله و چگالی آب دارای مقادیر ثابت و پارامتر سرعت جریان متغیر در نظر گرفته می‌شود. نتایج برای دو بازه عدد رینولدز استوانه

جدول ۲- مقادیر خطای RMSE در مقایسه منحنی های سرعت جریان با مدل های آشفتگی مختلف

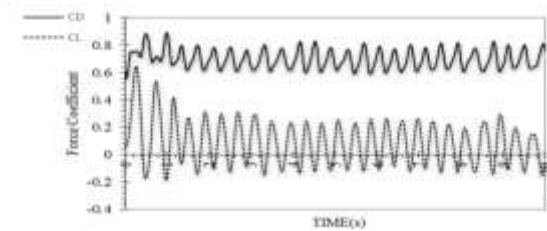
e/D	۰/۱	۰/۲	۰/۳
LES	۰/۰۷۸	۰/۰۷۶	۰/۰۷۴
RSM	۰/۰۷۶	۰/۰۷۷	۰/۰۷۷
K-ε	۰/۰۷۳	۰/۰۷۳	۰/۰۷۵
K-ω	۰/۰۷۵	۰/۰۷۸	۰/۰۷۶



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۷- ضرایب لحظه ای نیروهای هیدرودینامیکی در مدل آشفتگی LES: الف) $e/D = 0.1$ ب) $e/D = 0.2$ ج) $e/D = 0.3$

جدول ۳- مقادیر خطای نسبی (با نتایج Zhao و همکاران، ۲۰۰۷) در محاسبه ضریب پسا و برآ با مدل آشفتگی های مختلف

مدل شفتگی	نسبت e/D		
	۰/۱	۰/۲	۰/۳
LES	ضریب پسا	۰/۰۷	۰/۰۴
	ضریب برآ	۰/۱۱	۰/۰۹
RSM	ضریب پسا	۰/۱۱	۰/۰۹
	ضریب برآ	۰/۱۸	۰/۲۲
K-ε	ضریب پسا	۰/۰۲	۰/۰۹
	ضریب برآ	۰/۲۵	۰/۲۷
K-ω	ضریب پسا	۰/۳۱	۰/۱۷
	ضریب برآ	۰/۲۵	۰/۳۰

جدول ۶- اعداد رینولدز لوله اصلی و فرعی در سرعت‌های

مختلف به‌ازای $D=0.05m$

نام پارامتر	مقدار پارامتر			
	۰/۵	۰/۴	۰/۳	۰/۲
سرعت جریان (m/s)				
عدد رینولدز استوانه اصلی $D = 0.05 m$	$2/5 \times 10^4$	2×10^4	$1/5 \times 10^4$	1×10^4
عدد رینولدز استوانه فرعی $D = 0.01 m$	5×10^3	4×10^3	3×10^3	2×10^3

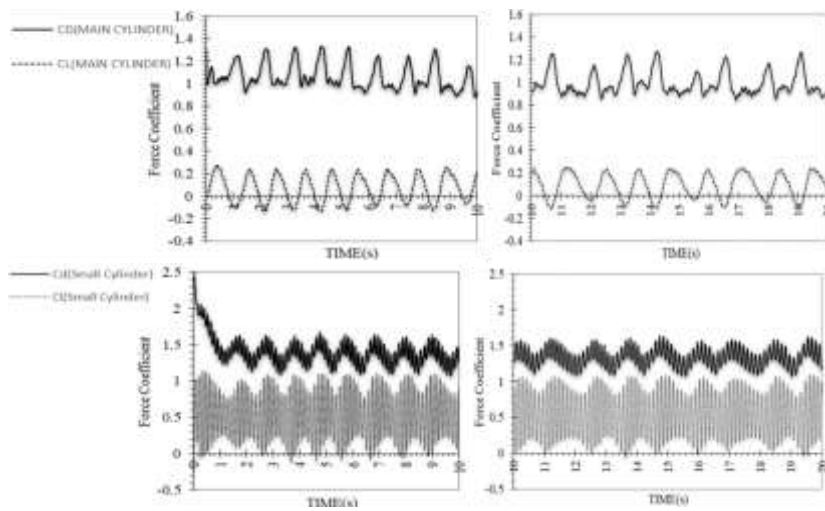
اصلی $1 \times 10^4 \leq Re \leq 2/5 \times 10^4$ و $8 \times 10^3 \leq Re \leq 2 \times 10^4$ مطابق جداول (۵) و (۶) در شرایط $e/D=0.2$ و $G/D=0.2$ مورد بررسی قرار گرفته‌اند. اعداد رینولدز استوانه اصلی و فرعی در جداول آورده شده است.

جدول ۵- اعداد رینولدز لوله اصلی و فرعی در سرعت‌های

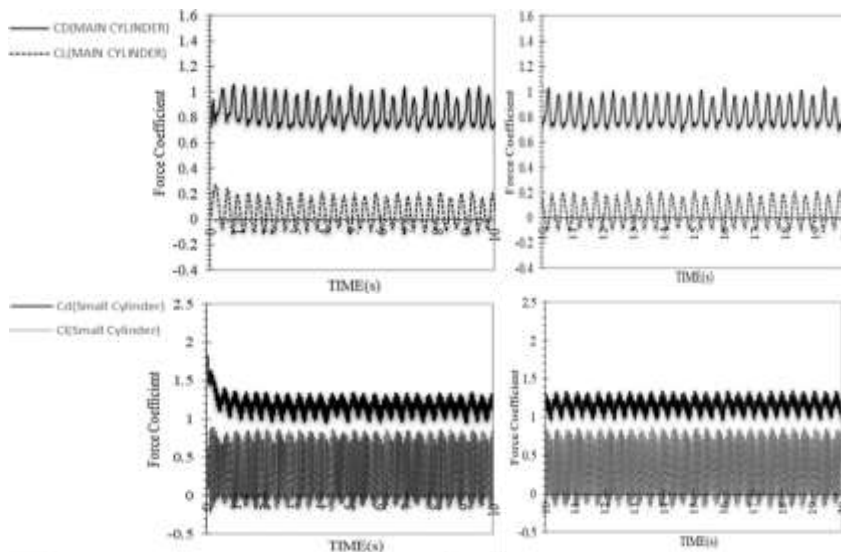
مختلف به‌ازای $D=0.04m$

نام پارامتر	مقدار پارامتر			
	۰/۵	۰/۴	۰/۳	۰/۲
سرعت جریان (m/s)				
عدد رینولدز استوانه اصلی $D = 0.04 m$	2×10^4	$1/6 \times 10^4$	$1/3 \times 10^4$	8×10^3
عدد رینولدز استوانه فرعی $d = 0.008 m$	4×10^3	$3/2 \times 10^3$	$2/4 \times 10^3$	$1/6 \times 10^3$

در شکل (۹) مقادیر لحظه‌ای ضرایب هیدرودینامیکی وارد بر لوله دریایی‌های برای حالت اول و برای سرعت جریان ۰/۲ و ۰/۴ متر بر ثانیه ارائه شده است.



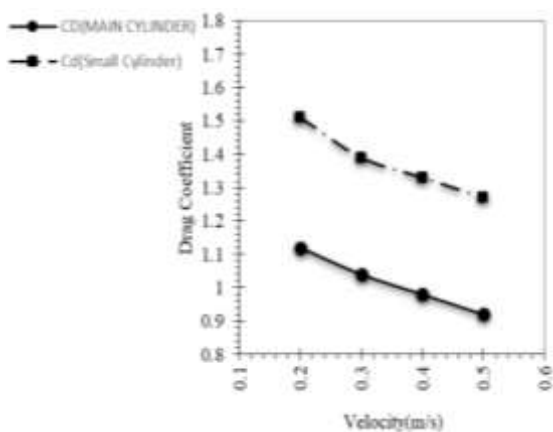
(الف)



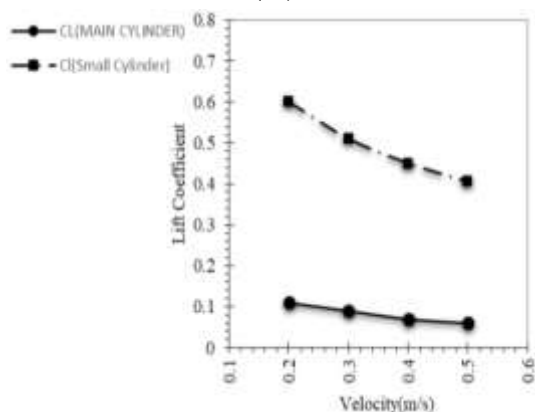
(ب)

شکل ۹- تاریخچه زمانی ضرایب هیدرودینامیکی لحظه‌ای وارد بر خطوط لوله مرکب برای $D=0.04m$:

(الف) $V=0.2m/s$ ، (ب) $V=0.4m/s$



(الف)

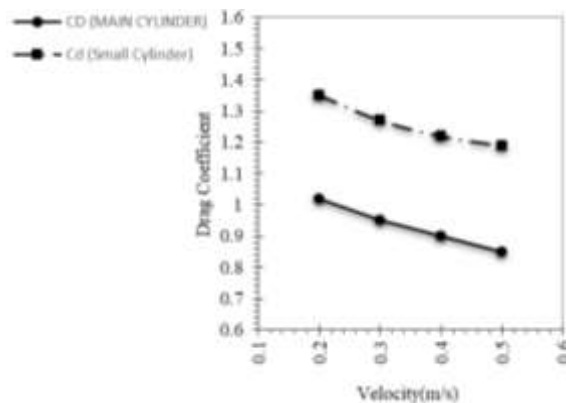


(ب)

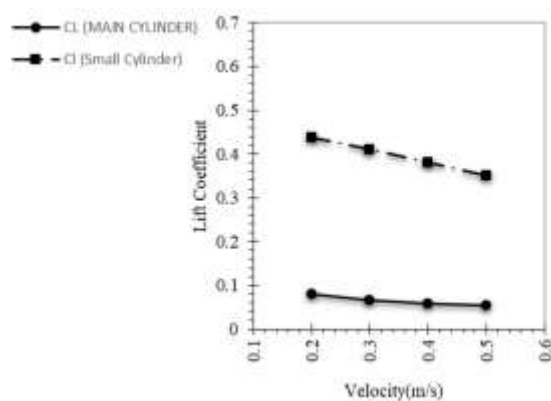
شکل ۱۱- تغییرات مقادیر متوسط زمانی ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر لوله دریایی اصلی و فرعی برای $e/D=0/2, G/D=0/2, D=0/5\Delta m$ ضریب برآ

با افزایش سرعت جریان، مقادیر ضریب پسا و برآ لوله‌های دریایی اصلی و فرعی برای هر دو حالت، کاهش می‌یابند. اثر سرعت بر مقادیر متوسط زمانی ضریب پسا لوله‌های دریایی کم بوده و تغییرات آن کم‌تر از ۱۰٪ است اما تغییرات متوسط زمانی ضرایب برآ لوله‌های دریایی نسبت به تغییرات سرعت جریان محسوس می‌باشد. با افزایش سرعت از ۰/۲m/s به ۰/۵m/s، مقدار ضریب پسا لوله اصلی در حدود ۱۵٪ کاهش می‌یابد در حالی که این کاهش برای ضریب برآ بیش از ۳۰٪ است. برای لوله فرعی این تغییرات برای ضریب پسا حدود ۱۳٪ و برای ضریب برآ حدود ۲۵٪ می‌باشد.

در شکل (۹) مشاهده می‌شود با افزایش سرعت جریان، تعداد نوسانات (سامد) ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر لوله‌ها برای دوره زمانی یکسان یکسان افزایش می‌یابد. بنابراین در مقادیر سرعت‌های جریان بالا، احتمال خرابی ناشی از آن زیاد است. همواره یکی از دغدغه‌های طراحان خطوط لوله در بستر دریا، طراحی بهینه از نظر اقتصادی و اجرایی می‌باشد. با مقایسه ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی وارد به این خطوط به صورت منفرد و آرایش مرکب، می‌توان مشاهده نمود با افزودن لوله دریایی فرعی، ضریب برآ وارد به لوله دریایی اصلی کاهش چشمگیری پیدا می‌کند. بر هم‌کنش نیروهای وارد بر لوله‌های دریایی باعث می‌گردد ضریب برآ وارده در حدود ۴۰٪ کاهش یابد که این امر باعث کاهش آسیب به خط لوله اصلی می‌گردد. در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) تغییرات مقادیر متوسط زمانی ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر لوله دریایی اصلی و فرعی برای هر دو حالت ارائه شده است. در شکل (۱۲) نیز توزیع گرافیکی متوسط زمانی سرعت جریان و سرعت جریان میانگین گیری شده ارائه شده است.



(الف)



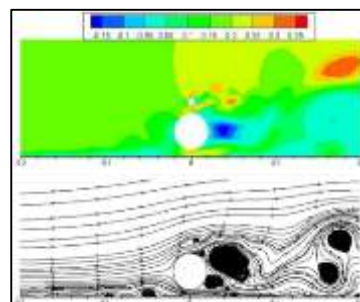
(ب)

شکل ۱۰- تغییرات مقادیر متوسط زمانی ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر لوله دریایی اصلی و فرعی برای $e/D=0/2, G/D=0/2, D=0/4\Delta m$ ضریب برآ

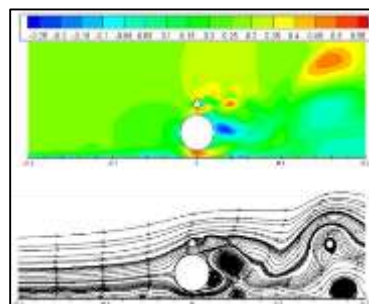
۰/۴m/s می‌باشد. قطر نسبی (D/d) نیز برابر ۰/۲ در نظر گرفته شده است. تأثیر نزدیکی لوله‌ها به بستر دریا بر استهلاک گردابه‌ها و تشکیل گردابه‌ها در ناحیه دنباله خط لوله از عواملی است که در تعیین ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی نقش مهم و اساسی را ایفا می‌کند. در واقعیت، به دلیل ناهمواری‌های بستر دریاها، آبشستگی و عوامل اجرایی، همواره امکان ایجاد یک فاصله هرچند بسیار کوچک بین لوله و بستر دریا وجود دارد. وجود این فاصله (هرچند بسیار کوچک) می‌تواند موجب فراهم کردن امکان عبور جریان از زیر لوله شده و گردابه‌هایی در ناحیه تحتانی لوله تشکیل گردد و که بر ضرایب پسا و برآ تأثیر می‌گذارد. با کمک مفهوم فاصله نسبی، این فاصله به‌عنوان حالت واقعی برای لوله‌های دریایی بستر دریا در نظر گرفته شده و در این راستا فواصل نسبی ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ مورد بررسی قرار گرفت.

تاریخچه زمانی ضرایب پسا لوله اصلی و فرعی در فواصل مختلف نشان می‌دهد با کاهش فاصله نسبی لوله‌های دریایی از بستر (e/D)، دامنه نوسانات ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی لوله دریایی فرعی کاهش محسوس می‌یابد. همچنین مشاهده می‌گردد در e/D برابر ۰/۱، تغییرات ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی به‌صورت لحظه‌ای اندک بوده و با گذشت زمان تغییر نمی‌کند که می‌توان علت آن را استهلاک گردابه‌ها در ناحیه دنباله خط لوله تحت تأثیر نزدیکی بستر به لوله‌های دریایی دانست. با کاهش فاصله نسبی لوله‌ها از بستر، مقدار نوسانات ضریب برآ لوله فرعی افزایش می‌یابد. با کاهش فاصله نسبی، ضریب پسا لوله‌ها کاهش می‌یابد.

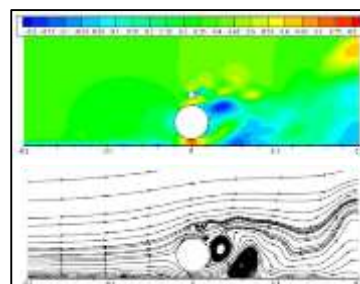
با افزودن لوله دریایی فرعی، کاهش محسوس در تعداد نوسانات و دامنه نوسانات وارد بر خطوط لوله مشاهده می‌شود که موجب کاهش آسیب‌های وارد بر سازه می‌گردد. در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) تغییرات مقادیر متوسط زمانی ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر لوله دریایی اصلی و فرعی برای هر دو عدد رینولدز $10^4 \times 1/6$ و $10^4 \times 2$ ارائه شده است. با افزایش فاصله نسبی لوله‌ها از بستر (e/D) به دلیل کاهش تأثیر بستر بر روی لوله‌ها، ضریب پسا لوله اصلی در ابتدا با شیب زیاد (حدود ۱۰٪) افزایش می‌یابد. سپس شیب صعودی آن کم‌تر شده و تغییرات آن نامحسوس می‌گردد. در انتها نیز دوباره با شیب زیاد (حدود ۱۵٪) افزایش می‌یابد. ضریب برآ لوله فرعی نیز تقریباً ثابت بوده و تغییرات آن نامحسوس می‌باشد. همچنین مشاهده می‌گردد با افزایش فاصله نسبی، ضرایب برآ لوله اصلی کاهش قابل توجهی می‌یابد. با افزودن خط لوله فرعی نیز مقادیر متوسط زمانی ضریب برآ وارد به لوله اصلی کاهش زیادی یافت به طوری که این کاهش برای e/D=۰/۱ در حدود ۵۰٪، برای e/D=۰/۲ در حدود ۴۰٪ و برای e/D=۰/۳ بیش از ۷۰٪ می‌باشد؛ این امر بر کاهش هزینه‌های نگهداری سازه تأثیر چشمگیری دارد.



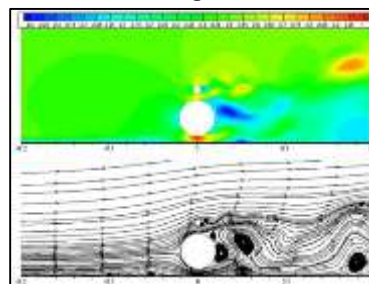
(الف)



(ب)



(ج)



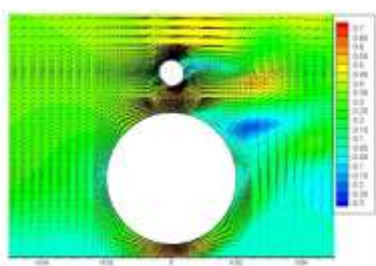
(د)

شکل ۱۲- توزیع گرافیکی متوسط زمانی سرعت و سرعت جریان میانگین‌گیری شده پیرامون خطوط لوله مرکب برای حالت اول: (الف) $V=0.2\text{m/s}$ ، (ب) $V=0.3\text{m/s}$ ، (ج) $V=0.4\text{m/s}$ ، (د) $V=0.5\text{m/s}$

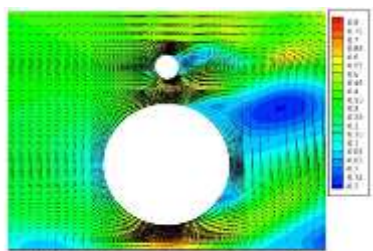
۳-۴- بررسی اثر فاصله نسبی بر ضرایب هیدرودینامیکی

به‌منظور بررسی تأثیر فاصله بین لوله‌های دریایی مرکب و بستر بر نیروهای هیدرودینامیکی، پارامتر بدون بعد فاصله نسبی e/D به‌صورت نسبت فاصله لوله از بستر به قطر لوله اصلی تعریف گردید. بررسی‌ها برای دو عدد رینولدز بر حسب قطر لوله اصلی $10^4 \times 1/6$ و $10^4 \times 2$ انجام شده است. قطر لوله اصلی در حالت اول برابر ۰/۴m و در حالت دوم برابر ۰/۵m و سرعت جریان سیال

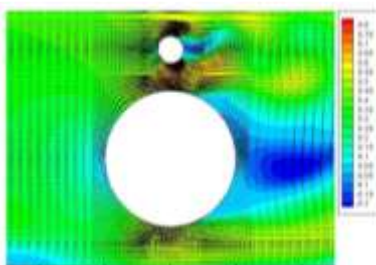
گردابه‌ها در اطراف لوله‌ها گسترش یافته و در مقیاس وسیع‌تر، لوله‌ها را در بر گرفته و تحت تأثیر قرار می‌دهند که این امر موجب افزایش اثر ضریب پسا بر روی لوله دریایی اصلی می‌گردد. به عبارتی نوسان گردابه‌ها در پشت لوله بیشتر می‌گردد. با کاهش فاصله نسبی (e/D)، کنش ترکیبی بین لوله و بستر افزایش می‌یابد. همچنین نقطه توقف به سمت پایین حرکت می‌کند (در نقطه توقف فشار ایستایی حداکثر است). بنابراین با کاهش e/D ، مقدار ضریب برآ لوله دریایی اصلی کاهش می‌یابد.



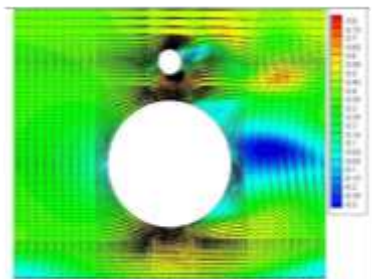
(الف)



(ب)

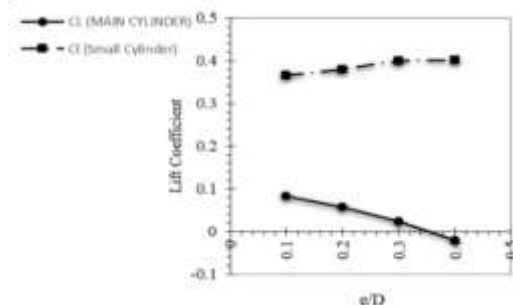
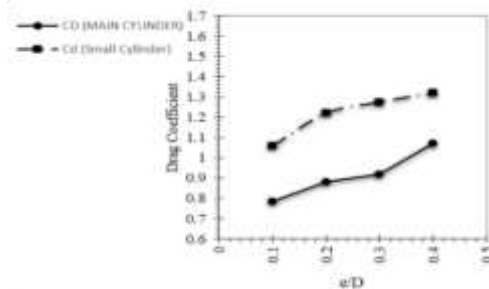


(ج)

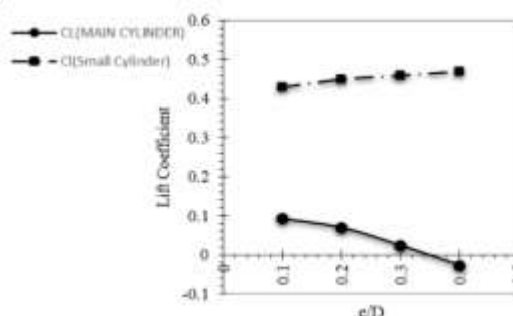
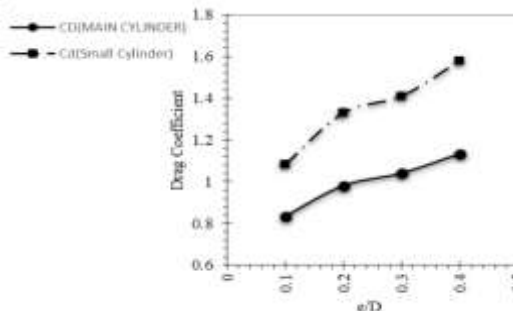


(د)

شکل ۱۵- خطوط جریان پیرامون خطوط لوله مرکب در حالت $d/D=0/2$ ، $G/D=0/2$ و $V=0/4m/s$ و $D=0/04m$: (الف) $e/D=0/1$ ، (ب) $e/D=0/4$ ، (ج) $e/D=0/2$ ، (د) $e/D=0/3$



شکل ۱۳- تغییرات مقادیر متوسط زمانی ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر لوله اصلی و فرعی در $d/D=0/2$ ، $D=0/04m$ و $V=0/4m/s$ ، $G/D=0/2$



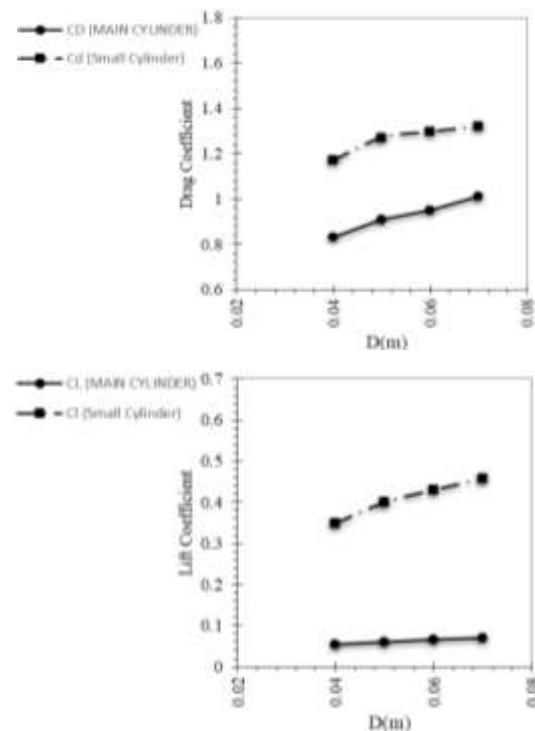
شکل ۱۴- تغییرات مقادیر متوسط زمانی ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر لوله اصلی و فرعی در $d/D=0/2$ ، $D=0/05m$ و $V=0/4m/s$ ، $G/D=0/2$

در شکل (۱۵) خطوط جریان پیرامون لوله‌های مرکب ارائه شده است. مشاهده می‌گردد در فواصل نسبی کم، گردابه‌های برخاستگی پیرامون خطوط لوله تحت تأثیر بستر قرار گرفته و در نزدیکی بستر مستهلک می‌شوند. با فاصله گرفتن لوله از بستر،

۴-۴- بررسی اثر قطر سیلندر اصلی بر تغییرات ضرایب پسا و برآ

به منظور بررسی اثر تغییرات عدد رینولدز بر ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی سرعت جریان و چگالی آب ثابت و پارامتر قطر لوله اصلی به عنوان متغیر در نظر گرفته شده است. با افزایش قطر لوله‌ها، سطح برخورد سیال به لوله‌ها افزایش می‌یابد و به تبع آن دامنه نوسانات نیز افزایش یافته که باعث می‌گردد ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر آن‌ها افزایش یابد. با افزودن لوله فرعی، دامنه نوسانات ضریب برآ کاهش می‌یابد. این کاهش قابل توجه، تأثیر زیادی روی عمر مفید سازه داشته و لوله فرعی باعث افزایش عمر مفید سازه می‌گردد. با افزایش قطر لوله اصلی، افزایش دامنه نوسانات و همچنین افزایش ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر خطوط لوله مشاهده گردید.

در شکل (۱۶) تغییرات ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی برای اعداد رینولدز لوله اصلی و فرعی در بازه $10^4 \times 2/8 \sim 10^4 \times 1/6$ و $10^4 \times 3/5 \sim 10^4 \times 2$ و برای سرعت جریان $0.5 \Delta m/s$ ارائه شده است.



شکل ۱۶- تغییرات ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی برای $d/D=0/2$ ، $e/D=0/2$ و $V=0.5 \Delta m/s$ ، $G/D=0/2$

با افزایش قطر لوله اصلی، مقادیر متوسط زمانی ضرایب پسا لوله اصلی و فرعی با شیب کم افزایش می‌یابد. در سرعت جریان $0.5 \Delta m/s$ با افزایش قطر از $0.04m$ به $0.08m$ ، افزایشی کم‌تر از 10% برای متوسط زمانی ضریب پسا لوله اصلی و فرعی مشاهده

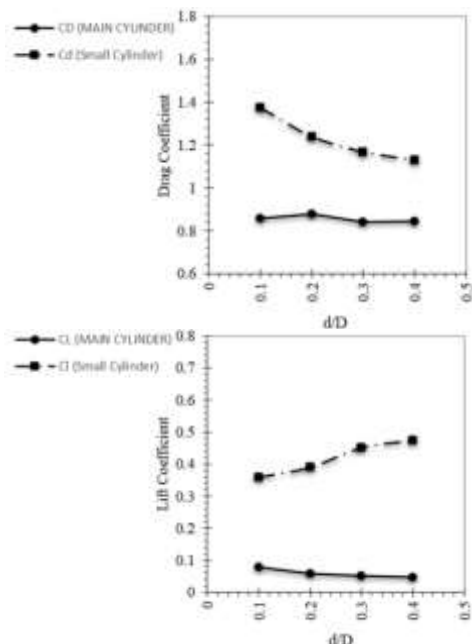
شد. با افزایش قطر لوله اصلی، ضرایب برآ لوله اصلی و فرعی ابتدا با شیب زیاد (در حدود 15%) افزایش و سپس از شیب آن کاسته شده و تغییرات آن نامحسوس می‌گردد. در مقایسه با مقادیر متوسط زمانی ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر لوله منفرد کاهش محسوس و قابل توجهی حدود 40% در متوسط زمانی ضریب برآ وارد به سازه مشاهده می‌گردد.

۴-۵- بررسی اثر فاصله نسبی بین لوله‌ها بر ضرایب هیدرودینامیکی

برای جریان حول دو لوله میزان فاصله میان دو لوله به شدت بر ویژگی‌های میدان جریان تأثیر می‌گذارد. نوسانات مربوط به ضرایب برآ برای لوله فرعی در مقایسه با لوله اصلی شدیدتر است. برای نسبت G/D برابر $0/1$ به دلیل نزدیکی دو لوله به یکدیگر، ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر لوله اصلی تقریباً ثابت بوده و با زمان تغییر نمی‌کند. با افزایش فاصله دو لوله از یکدیگر، دامنه نوسانات نسبت به حالت اول افزایش یافته است. حداکثر مقدار ضریب پسا لوله اصلی زمانی اتفاق می‌افتد که دو لوله کم‌ترین فاصله را با یکدیگر داشته باشند؛ به عبارت دیگر با افزایش فاصله نسبی بین لوله‌ها مقدار ضریب پسا لوله اصلی کاهش می‌یابد (شکل (۱۷)). میانگین زمانی ضرایب پسا لوله فرعی با افزایش فاصله نسبی افزایش می‌یابد. در شکل (۱۷-الف) مشاهده می‌گردد متوسط زمانی ضریب پسا لوله اصلی در نسبت G/D برابر $0/3$ نسبت به حالت $G/D=0/1$ حدود 17% کاهش یافته است در حالی که متوسط زمانی ضریب پسا لوله فرعی حدود 24% افزایش پیدا کرده است. تغییرات مقادیر متوسط زمانی ضرایب برآ لوله‌های دریایی در ابتدا زیاد بوده و سپس تغییرات آن نامحسوس می‌گردد. با توجه به شکل (۱۷-ب) نسبت افزایش متوسط زمانی ضریب برآ لوله‌ها در $G/D=0/1$ نسبت به $G/D=0/2$ برای لوله اصلی تقریباً برابر 2 و برای لوله فرعی تقریباً برابر $1/2$ می‌باشد.

در این راستا Kardan و Hakimzadeh (۲۰۱۸) بیان کردند افزایش در مقدار ضریب پسا با کاهش فاصله نسبی ناشی از افزایش فشار وارد در بالادست لوله‌ها است که با کاهش فاصله دو لوله، سطح برخورد جریان نزدیک شونده نیز افزایش می‌یابد. همچنین الگوی جریان نزدیک شونده به دو لوله، در مجاورت لوله فرعی بیش‌تر از لوله اصلی دستخوش تغییر می‌گردد که می‌توان عامل اول را برخورد جریان با لوله فرعی و عامل دوم را جریانی دانست که بعد از برخورد به لوله اصلی منحرف و به لوله فرعی برخورد می‌کند. در حالتی که فاصله نسبی کم است، اثر جریان انحراف یافته از لوله اصلی بسیار زیاد است و زمانی که این فاصله افزایش می‌یابد، اثر عامل دوم کم‌تر شده و جریان پیرامون لوله فرعی تنها تحت تأثیر برخورد جریان به لوله فرعی است. Zhao و همکاران (۲۰۰۷) نیز معتقد بودند به دلیل افزایش

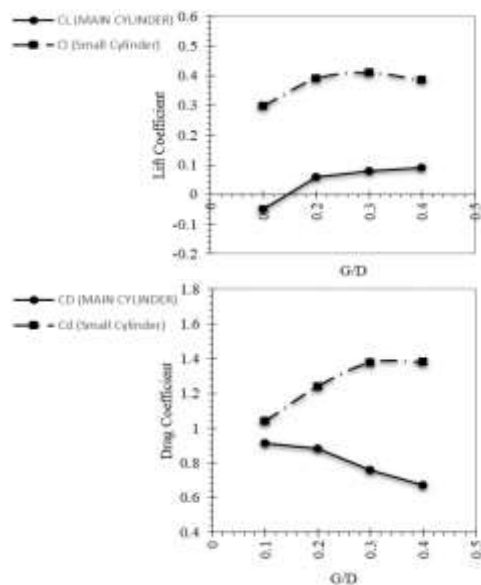
همچنین اثر گذاری آن بر روی لوله اصلی نیز افزایش یافته که باعث افزایش دامنه نوسانات ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر لوله اصلی می‌شود. در شکل ۱۸ مقادیر متوسط زمانی ضرایب پسا و برآ به ترتیب برای عدد رینولدز $10^4 \times 1/6$ و قطر $D=0.4m$ آورده شده است.



شکل ۱۸- تغییرات مقادیر متوسط زمانی ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر لوله اصلی و فرعی برای $D=0.4m$ و $V=0.4m/s$, $e/D=0.2$, $d/D=0.2$

تغییرات ضریب پسا لوله اصلی با تغییر در مقدار قطر نسبی نامحسوس بوده درحالی که میانگین زمانی ضریب پسا لوله فرعی با افزایش قطر نسبی کاهش می‌یابد. این کاهش ابتدا در حدود ۱۰٪ بوده و سپس نامحسوس می‌گردد. میانگین زمانی ضریب برآ لوله فرعی با افزایش نسبی قطر، افزایش می‌یابد. با افزایش زمانی نسبی، ضریب پسا لوله فرعی کاهش می‌یابد. مقدار میانگین زمانی ضریب پسا لوله فرعی در $d/D=0.1$ حدوداً $1/20$ برابر مقدار آن در $d/D=0.4$ است. تغییرات میانگین زمانی ضریب پسا لوله اصلی نامحسوس است و مشاهده می‌گردد مقدار میانگین زمانی ضریب برآ لوله اصلی در $d/D=0.1$ حدوداً $1/50$ برابر مقدار آن در $d/D=0.4$ می‌باشد که قابل توجه است. در ادامه و با بررسی مقدار میانگین زمانی ضریب برآ لوله فرعی در $d/D=0.1$ و $d/D=0.4$ مشاهده شد مقدار ضریب برآ لوله فرعی در $d/D=0.4$ تقریباً $1/25$ برابر مقدار آن در $d/D=0.1$ می‌باشد.

فشار سکون^۱ و ایجاد ناحیه‌ای با فشار بالا در بالادست لوله، با کاهش فاصله نسبی، مقدار متوسط زمانی ضریب پسا لوله اصلی افزایش می‌یابد. در ادامه مشاهده می‌گردد برای $G/D \geq 0.2$ با افزایش فاصله نسبی بین لوله‌ها، مقدار متوسط زمانی ضریب برآ لوله اصلی ابتدا افزایش و سپس به مقدار ثابت (تغییرات نامحسوس) می‌رسد. با کاهش فاصله نسبی بین لوله‌ها مقادیر متوسط زمانی ضریب پسا لوله فرعی کاهش می‌یابد. با افزایش فاصله نسبی ابتدا افزایشی در مقدار متوسط ضریب برآ لوله فرعی مشاهده شده لیکن برای $G/D \geq 0.3$ ، مقادیر متوسط زمانی ضریب برآ لوله فرعی کاهش نامحسوس می‌یابد. با مقایسه نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر خطوط لوله مرکب با خط لوله منفرد، کاهش حدود ۴۰٪ در مقادیر متوسط زمانی ضریب برآ لوله اصلی مشاهده گردید.



شکل ۱۷- تغییرات مقادیر متوسط زمانی ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر لوله اصلی و فرعی برای $D=0.4m$ و $V=0.4m/s$, $e/D=0.2$, $d/D=0.2$

۴-۶- بررسی اثر قطر نسبی بر تغییرات ضرایب پسا و برآ

به منظور بررسی اثر قطر نسبی، قطرهای نسبی 0.1 ، 0.2 ، 0.3 و 0.4 و قطر لوله اصلی 0.4 متر در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد با افزایش قطر نسبی، دامنه نوسانات ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی افزایش می‌یابد. تغییرات لحظه‌ای ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی لوله فرعی نامحسوس بوده و با گذشت زمان نیز تغییرات قابل توجهی دیده نمی‌شود. با افزایش قطر نسبی، به دلیل افزایش قطر لوله فرعی، دامنه نوسانات ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر لوله فرعی افزایش می‌یابد.

1. Stagnation pressure

۵- نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش تأثیر مقدار سرعت جریان و قطر لوله اصلی و یا به عبارتی اثر تغییرات عدد رینولدز، فاصله نسبی (G/D)، نزدیکی بستر (e/D) و قطر نسبی (d/D) بر تغییرات ضرایب پسا و برآ لوله اصلی و فرعی در حالت لوله‌های مرکب مورد بررسی قرار گرفتند. در ابتدا شبیه‌سازی جریان اطراف لوله منفرد انجام گرفت، مقایسه درصد خطا برای ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی با نتایج ژائو و همکاران (۲۰۰۷) برای دو مدل LES و RSM نشان داد این دو مدل دقیق‌تر از سایر مدل‌های آشفتگی بوده و در نهایت مدل آشفتگی LES دارای دقت بیش‌تری است و به‌عنوان یک مدل دقیق جهت شبیه‌سازی عددی ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی اطراف لوله دریایی به‌کار برده شد.

در خطوط لوله با آرایش مرکب، با افزایش سرعت جریان، تعداد نوسانات (بسامد) ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی برای دوره زمانی یکسان افزایش می‌یابد. بنابراین در مقادیر سرعت‌های بالا، احتمال خرابی ناشی از آن زیاد است. با افزایش سرعت جریان، میانگین زمانی ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی کاهش می‌یابد. اثر سرعت بر مقادیر میانگین زمانی ضرایب پسا لوله‌ها کم بوده و تغییرات این مقادیر کم است اما تغییرات میانگین زمانی ضرایب برآ بر حسب سرعت جریان محسوس می‌باشد. با افزایش سرعت مقادیر میانگین زمانی ضرایب پسا لوله اصلی در حدود ۱۵٪ کاهش می‌یابد در حالی که مقادیر میانگین زمانی ضرایب برآ بیش از ۳۰٪ تغییر می‌کند. برای لوله فرعی این تغییرات برای میانگین زمانی ضرایب پسا در حدود ۱۳٪ و برای ضرایب برآ در حدود ۲۵٪ می‌باشد. با افزودن لوله فرعی، ضرایب برآ وارد بر لوله اصلی کاهش چشمگیری پیدا می‌کند. بنابراین تغییر در آرایش هندسه سازه‌ای موجود در میدان جریان باعث می‌گردد مقادیر ضرایب برآ وارد در حدود ۴۰٪ کاهش یابد که این امر باعث کاهش آسیب جدی به خط لوله اصلی می‌گردد.

با کاهش فاصله نسبی لوله‌ها از بستر (e/D)، دامنه نوسانات ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی لوله فرعی کاهش محسوسی می‌یابد. با افزایش فاصله نسبی بین لوله‌ها، ضرایب پسا لوله اصلی در ابتدا با شیب زیاد (حدود ۱۰٪) افزایش می‌یابد. سپس شیب صعودی آن کم‌تر شده و تغییرات آن نامحسوس می‌گردد. با افزودن خط لوله فرعی، کاهش قابل توجه در ضرایب برآ وارد به لوله اصلی مشاهده گردید. با افزایش قطر لوله اصلی، سطح برخورد جریان به لوله‌ها افزایش یافته و به تبع آن دامنه نوسانات ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی نیز افزایش می‌یابد.

با افزایش فاصله نسبی بین لوله‌ها به مقدار ۰/۲، مقدار متوسط زمانی ضرایب برای لوله اصلی ابتدا افزایش می‌یابد و سپس به مقدار ثابت می‌رسد. با افزایش فاصله نسبی ضرایب پسا لوله فرعی افزایش

می‌یابد. با مقایسه مقادیر متوسط زمانی نیروهای هیدرودینامیکی خطوط لوله مرکب با خط لوله منفرد، کاهش در حدود ۴۰٪ در مقادیر متوسط زمانی ضرایب پسا برای لوله اصلی مشاهده گردید. در زمینه طراحی لوله‌های فراساحلی، در کنار توجه به مسائل طراحی سازه‌ای، توجه به مسائل هیدرودینامیکی نیز از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. در بحث محاسبه نیروهای هیدرودینامیکی وارده به خطوط لوله در مواجهه با جریان، به‌ویژه در مواردی که بستر دریا فرسایش‌پذیر باشد، موضوع تغییرات فزاینده نیروهای وارده به لوله‌ها و به دنبال آن ارتعاش و احتمال خرابی آن‌ها باید مورد توجه قرار گیرد. از این‌رو، محاسبه دقیق این نیروها علاوه بر این‌که ملاحظات طراحی سازه‌ای را به‌همراه دارد، می‌تواند پیش‌بینی اولیه‌ای را از احتمال گسیختگی لوله‌ها در اختیار طراحان قرار دهد.

۶- مراجع

چهره‌گشا م. "بررسی نیروهای هیدرودینامیکی لحظه‌ای وارد بر خطوط لوله فراساحلی سوار بر هم تحت جریان‌های دائمی"، پایان‌نامه مقطع کارشناسی ارشد، ۱۴۰۰، دانشگاه صنعتی سهند، دانشکده مهندسی عمران، تبریز.

زنگنه م، یگانه بختیاری ع، "مدل‌سازی عددی الگوی جریان اطراف لوله‌های فراساحلی تحت اثر جریان یک‌طرفه"، نهمین کنفرانس هیدرولیک، ۱۳۸۹، تهران.

<https://civilica.com/doc/96221>

Akoz MS, Sahin B, Akilli H, "Flow characteristic of the horizontal cylinder placed on the plane boundary", *Flow Measurement and Instrumentation*, 2010, 21 (4), 476-487.

DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2010.06.006

Asrari, S, Hakimzadeh H, Kardan N, "Investigation on the local scour beneath piggyback pipelines under clear-water conditions", *China Ocean Engineering*, 2021, 35, 422-431. DOI: 10.1007/s13344-021-0039-7

Bearman PW, Zdravkovich MM, "Flow around a circular cylinder near a plane boundary", *Journal of Fluid Mechanics*, 1978, 89 (1), 33-47.

DOI: 10.1017/S002211207800244X

Chen L, Hulshoff SJ, Wang Y, "2D residual-based LES of flow around a pipeline close to a flat seabed", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2020, 363, 112788.

DOI: 10.1016/j.cma.2019.112788

Cheng L, Chew LW, "Modelling of flow around a near-bed pipeline with a spoiler", *Ocean engineering*, 2003, 30 (13), 1595-1611. DOI: 10.1016/S0029-8018(02)00148-8

E-Rong QI, Guo-ya LI, Wei LI, Jian WU, Xin ZHANG, "Study of vortex characteristics of the flow around a horizontal circular cylinder at various gap-ratios in the cross-flow", *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 2006, 18 (3), 334-340. DOI: 10.1016/S1001-6058(06)60013-9

Faruquee Z, Ting D, Fartaj A, Barron RM, Carriveau R,

- Priced SJ, Sumnert D, Smith JG, Leong K, Paidoussis MP, "Flow visualization around a circular cylinder near to a plane wall", *Journal of Fluids and Structures*, 2002, 16 (2), 175-191. DOI: 10.1006/jfls.2001.0413
- Qin B, Alam M, Zhou Y, "Two tandem cylinders of different diameters in crossflow: flow-induced vibration", *Journal of Fluid Mechanics*, 2017, 829, 621-658. DOI: 10.1017/jfm.2017.510
- Serta CPV, Janocha MJ, Yin G, Ong MC, "Numerical simulations of flow-induced vibrations of two rigidly coupled cylinders with uneven diameters in the upper transition Reynolds number regime", *Journal of Fluids and Structures*, 2022, 105, 103332. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2021.103332
- Wu G, Xiaoqing Du, Wang Y, "LES of flow around two staggered circular cylinders at a high subcritical Reynolds number of 1.4×10^5 ", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2020, 196, 104044. DOI: 10.1016/j.jweia.2019.104044
- Zang Z, Gao F, Cui, J, "Vortex shedding and vortex-induced vibration of piggyback pipelines in steady currents", *International Offshore and Polar Engineering Conference*, Rhodes, Greece, June 2012.
- Zang ZP, Gao FP, Cui JS, "Physical modeling and swirling strength analysis of vortex shedding from near-bed piggyback pipelines", *Applied Ocean Research*, 2013, 40, 50-59. DOI: 10.1016/j.apor.2013.01.001
- Zhao M, Cheng L, Teng B, Liang D, "Numerical simulation of viscous flow past two circular cylinders of different diameters", *Applied Ocean Research*, 2005, 27 (1), 39-55. DOI: 10.1016/j.apor.2004.10.002
- Zhao M, Cheng L, Teng B, "Numerical modeling of flow and hydrodynamic forces around a piggyback pipeline near the seabed", *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2007, 133 (4), 286-295. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-950X(2007)133:4(286)
- "The effects of axis ratio on laminar fluid flow around an elliptical cylinder", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2007, 28 (5), 1178-1189. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2006.11.004
- Grove AS, Shair FH, Petersen, EE, "An experimental investigation of the steady separated flow past a circular cylinder", *Journal of Fluid Mechanics*, 1964, 19 (1), 60-80. DOI: 10.1017/S0022112064000544
- Grass AJ, Raven PWJ, Stuart RJ, Bray JA, "The influence of boundary layer velocity gradients and bed proximity on vortex shedding from free spanning pipelines", *Journal of Energy Resources*, 1984, 106 (1), 70-78. DOI: 10.1115/1.3231028
- Hakimzadeh H, Mosahebi Mohammadi M, "Experimental investigation on impact of reynolds number, fitting distance and relative diameter on flow separation around piggyback pipelines", *Marine-Engineering*, 2016, 11 (22), 109-117. DOI: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.10.6
- Hosseini N, Griffith MD, Leontini JS, "Flow-induced vibrations in long rows of cylinders and their links to convective instabilities", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2022, 94, 108922. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2021.108922
- Kardan N, Hakimzadeh H, "Numerical investigation of the hydrodynamic forces on offshore piggyback pipelines in steady currents", *Marine-Engineering*, 2018, 13 (26), 131-137.
- Kawamura T, Takami H, Kuwahara K, "Computation of high Reynolds number flow around a circular cylinder with surface roughness", *Fluid Dynamics Research*, 1986, 1 (2), 145-167. DOI: 10.1016/0169-5983(86)90014-6
- Kazeminezhad MH, Yeganeh-Bakhtiary A, Etemad-Shahidi A, "Numerical investigation of boundary layer effects on vortex shedding frequency and forces acting upon marine pipeline", *Applied Ocean Research*, 2010, 32 (4), 460-470. DOI: 10.1016/j.apor.2010.10.002
- Lei C, Cheng L, Kavanagh K, "A finite difference solution of the shear flow over a circular cylinder", *Ocean Engineering*, 2000, 27 (3), 271-290. DOI: 10.1016/S0029-8018(98)00050-X
- Lin WJ, Lin C, Hsieh SC, Dey S, "Flow characteristics around a circular cylinder placed horizontally above a plane boundary", *Journal of Engineering Mechanics*, 2009, 135 (7), 697-716. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2009)135:7(697)
- Liu MM, "The predominant frequency for viscous flow past two tandem circular cylinders of different diameters at low Reynolds number", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 2020, 234 (2), 534-546. DOI: 10.1177/1475090219875635
- Mysa RC, Kaboudian A, Jaiman RK, "On the origin of wake-induced vibration in two tandem circular cylinders at low Reynolds number", *Journal of Fluids and Structures*, 2016, 61, 76-98. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2015.11.004
- Oner AA, Kirkgoz MS, Akoz MS, "Interaction of a current with a circular cylinder near a rigid bed", *Ocean Engineering*, 2008, 35 (14-15), 1492-1504. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2008.06.005

EXTENDED ABSTRACT

Investigating into the Temporal Hydrodynamic Forces Exerted on Offshore Piggyback Pipelines due to Steady Currents

Hamed Chehrehgosha^a, Habib Hakimzadeh^a, Nazila Kardan^{b,*}

^a Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

^b Department of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

Received: 10 April 2022; **Review:** 25 December 2022; **Accepted:** 01 January 2023

Keywords:

Piggyback pipelines, Hydrodynamic forces, Numerical simulation, Turbulent flow, Fluent software.

1. Introduction

For the gas and oil pipelines in marine environment, the forces exerted on these structures are regarded to be of the important parameters in designing them. These pipelines are usually installed with twin arrangements as tandem or side by side. The diameters of the two pipelines may also be identical or different. Nevertheless, a number of them may also be configured as piggyback, an special case of side by side arrangements when their diameters are not equal. The parameters around this special arrangement have already been studied both experimentally and numerically by a few number of researchers, namely, Zhao et al. (2007), Zang et al. (2012), Hakimzadeh and Mosahebi Mohammadi (2016), Kardan and Hakimzadeh (2018). However, for this research study, the momentary hydrodynamic forces acting on the piggyback pipelines due to steady currents have been investigated using numerical simulation. All simulations were performed in 3D using ANSYS FLUENT 16 software environment. First, the capability of the software for the current study was investigated. The number of cells and various turbulence models were considered to find the proper mesh size and model, respectively. Then, considering that for flows around a single pipe, the conventional turbulence models may not provide accurate results, therefore, by examining different cell types and turbulence models, an attempt was made to select the appropriate type that can provide more accurate results by spending a reasonable computational cost. Then, it was found that a structured cell formation together with LES turbulence model reproduced the flow patterns around the pipe with a reasonable accuracy when compared with the experimental data. For the numerical simulation results, first, the effects of the inlet flow velocity and main pipe diameter (i.e., the Reynolds number) variations on the coefficients of instantaneous hydrodynamic forces (i.e., drag and lift) exerted on piggyback pipelines were determined. Further, effects of the distance between pipes (G/D), the proximity to the bed (e/D) and the relative diameter (d/D) variations on the drag and lift coefficients were considered through computer simulations.

2. Methodology

2.1. Model geometry and meshing

A schematic diagram of the investigated model is shown in Fig. 1 (a, b). The flow passes through the pipe with diameter of D . In order to simulate the flow around the pipeline, a rectangular field with a length of $40D$ has been used, and the cylinder is placed at a distance of $16D$ from the channel entrance. To avoid from the wall effect on the results, the width and height of the calculation domain has been considered equal to $14D$ and $12D$, respectively. The center of the pipe is intended as the center of the software coordinates.

* Corresponding Author

E-mail addresses: chehrehgosha.ha@gmail.com (Hamed Chehrehgosha), hakimzadeh@sut.ac.ir (Habib Hakimzadeh), n.kardan@azaruniv.ac.ir (Nazila Kardan).

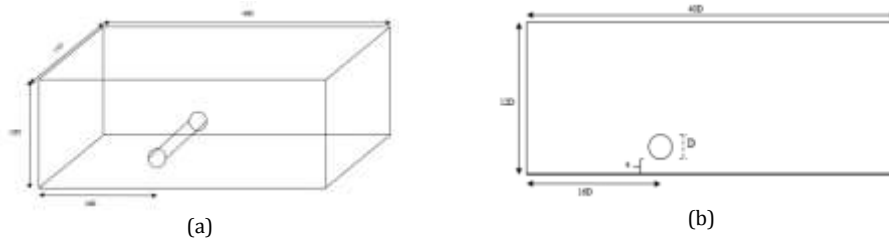


Fig. 1. Schematic design of the investigated model: (a) 3D view, (b) 2D view.

2.2. Verification

In order to achieve an appropriate cell arrangement to ensure of the mesh independency, the sizes of computational cells at the upstream and around the pipe were considered large and small enough, respectively. For this purpose, for Reynolds number of 2×10^4 , the models with different cells arrangement were produced and the results were compared with the results of Zhao et al. (2007). Table 1 shows the numerical simulation results for the drag and lift coefficients of a single pipe at this Reynolds number. It is observed that by reducing the cell size, the obtained numerical results for the hydrodynamic coefficients became more accurate and these coefficients for the C and D cell arrangements are closer to the results of Zhao et al.

Table 1. Percentage error of the current results with the results of Zhao et al. (2007) for the drag and lift coefficients

		e/D ratio		
		0.1	0.2	0.3
Drag coefficients	A (large)	0.41	0.31	0.35
	B (medium)	0.24	0.19	0.22
	C (fine)	0.09	0.05	0.07
	D (very fine)	0.07	0.04	0.05
Lift coefficients	A (large)	0.57	0.61	0.45
	B (medium)	0.31	0.43	0.27
	C (fine)	0.12	0.15	0.10
	D (very fine)	0.11	0.13	0.09

3. Results and discussion

3.1. Base model

In order to simulate the flow around the piggyback pipelines, a similar rectangular domain with a length of $40D$ has been used, where the cylinders were placed at a distance of $16D$ from the channel entrance (Zhao et al., 2007). The center of the pipe was considered as the software coordinate center (Fig. 2).

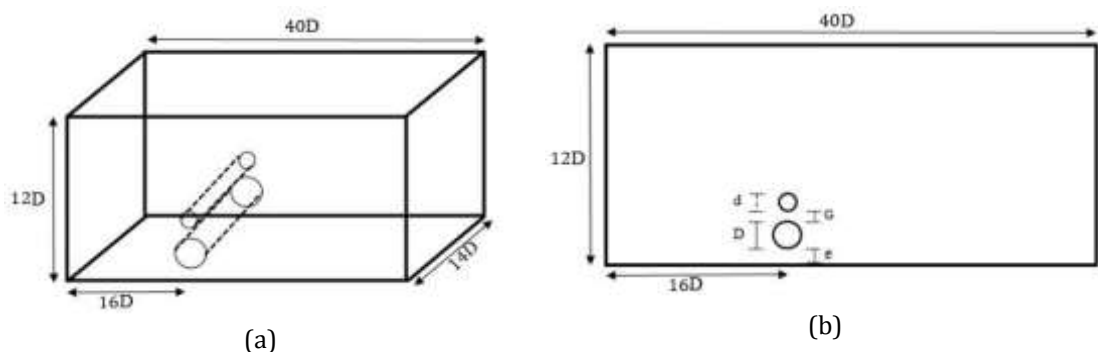


Fig. 2. Schematic view of the tested models: (a) 3D view, (b) 2D view

3.2. Effect of inlet flow velocity on the drag and lift coefficients

Effect of inlet flow velocity for the two ranges of Reynolds number (e.g., $8 \times 10^3 \leq Re \leq 2 \times 10^4$ and $1 \times 10^4 \leq Re \leq 2.5 \times 10^4$) was investigated. It was observed that, for the same period, with increasing the inlet

velocity, the number (frequency) and amplitudes of fluctuations of the hydrodynamic force coefficients increased. Thereby, it may be found that at high flow rates, the probability of caused damage will be increased.

Also, it was found that with the accompaniment of the sub-pipe, the drag coefficient of the main-pipe decreased significantly. This reduction increased up to 40%, which basically would reduce the probability of damage in the main pipeline. Fig. 3 shows the variations of hydrodynamic force coefficients acting on the main and sub-pipes.

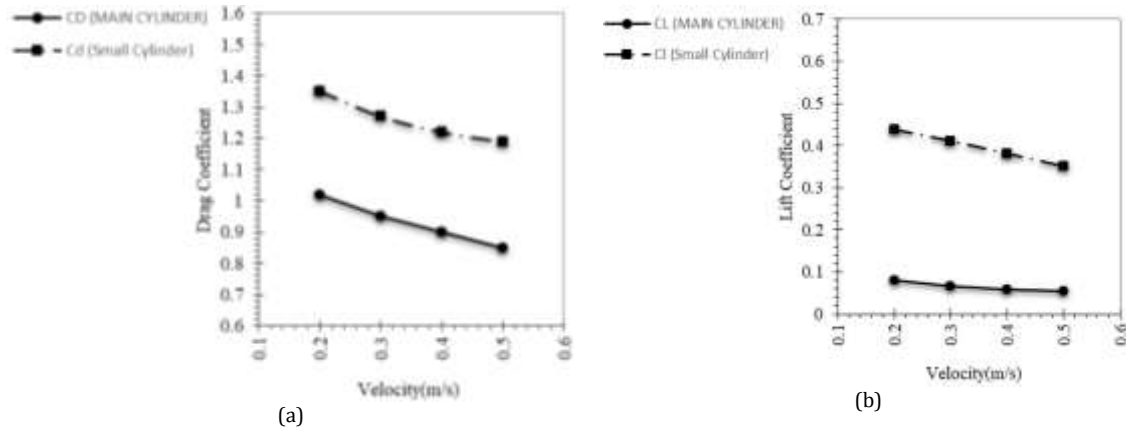


Fig. 2. Variations of the hydrodynamic force coefficients acting on the piggyback pipes for $D=0.04\text{m}$, $G/D=0.2$, $e/D=0.2$: (a) drag coefficient, (b) lift coefficient.

Then, it may be concluded that with increasing the inlet flow velocity, the time average values of the drag and lift coefficients for the main and sub-pipes decrease. The effect of inlet velocity on the drag coefficient of offshore pipes is small (i.e., about 10%), but its effect on the lift coefficient is noticeable. With increasing the inlet velocity from 0.2m/s to 0.5m/s, the time averaged value of the drag coefficient for the main pipe decreases by about 15%, while the time averaged value of the lift coefficient reduces by more than 30%. Also, for the small pipe, these changes for the time averaged drag coefficient is about 13% and for the time averaged lift coefficient is around 25%.

3.3. Effect of relative distance on hydrodynamic coefficients

In order to investigate the effects of the bed distance to the piggyback pipes on the hydrodynamic forces, the dimensionless parameter of the relative distance e/D is defined as the ratio of the distance of the pipe from the bed to the diameter of the main-pipe. In this research, relative distances of 0.1, 0.2, 0.3 and 0.4 were considered. Examining the time history of the main and sub-pipes drag coefficients at different distances showed that by reducing the relative distance, the fluctuation range of the coefficients of the hydrodynamic forces for the sub-pipe decreased significantly. With the addition of the sub-pipe, a significant reduction in the number of fluctuations and the amplitude of the fluctuations on the pipelines was observed, which reduces the probability of damage in the structure.

3.4. Effect of diameter of the main cylinder on the drag and lift coefficients

Finally, numerical results showed that with an increase in diameter of the main-pipe, the time averaged magnitudes of the coefficients for both the main and sub-pipes increased gradually. Compared to the time averaged values of the coefficients of hydrodynamic forces acting on a single pipe, a noticeable reduction of about 40% was observed in the time averaged values of the forces acting on the structure.

4. Conclusions

For this research study, the temporal hydrodynamic forces exerting on the piggyback pipelines due to steady currents have been investigated using a three dimensional numerical simulation tool. First, the capability of the software for the current study was examined. Then, it was found that for a single offshore pipeline, with increasing the gap between the pipe and bed, the fluctuation range of the drag and lift coefficients increased. Further, the time averaged value of the drag coefficient increased for the abovementioned variations,

while the counterpart magnitude of the lift coefficient decreased. In pipelines with overlapping arrangement, the results showed that with an increase in fluid flow velocity, the number (frequency) and amplitude of fluctuations of the hydrodynamic forces coefficients acting on the pipes increased for the same period of time. Susequently, this may increase the probability of damage in structure.

With the addition of the sub-pipe, a significant decrease (i.e., up to 40%) in the time averaged values of the lift coefficients for the main pipe was observed, which has a significant effect on the reduction of the maintenance costs and serious damage of the structure.

5. References

- Chehrehgosha M, "Investigation of momentary hydrodynamic forces acting on offshore pipelines riding together under permanent currents", Master's Degree Thesis, 2022, Sahand University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Tabriz, Iran.
- Hakimzadeh H, Mosahebi Mohammadi M, "Experimental investigation on impact of reynolds number, fitting distance and relative diameter on flow separation around piggyback pipelines", *Marine-Engineering*, 2016, 11 (22), 109-117. DOI: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.10.6
- Kardan N, Hakimzadeh H, "Numerical investigation of the hydrodynamic forces on offshore piggyback pipelines in steady currents", *Marine-Engineering*, 2018, 13 (26), 131-137.
DOI: <http://dorl.net/dor/20.1001.1.17357608.1396.13.26.6.4>
- Zang ZP, Gao FP, Cui JS, "Physical modeling and swirling strength analysis of vortex shedding from near-bed piggyback pipelines", *Applied Ocean Research*, 2013, 40, 50-59.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2013.01.001>
- Zhao M, Cheng L, Teng B, "Numerical modeling of flow and hydrodynamic forces around a piggyback pipeline near the seabed". *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 2007, 133 (4), 286-295. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-950X(2007)133:4(286)