

معرفی روش مرز مغروق برای تحلیل مسائل برهم کنش سازه با سیال از نوع

ارتعاش ناشی از گردابه

محمدرضا تابش پور*
دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه صنعتی شریف
tabeshpour@sharif.edu

حجت نادری اسرمی
دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه صنعتی شریف
hnaderi@mech.sharif.edu

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۱۴

چکیده

روش مرز مغروق یک روش نوین و کارآمد برای حل مسائل برهم کنش سازه - سیال^۱ است. یکی از انواع مهم مسائل برهم کنش سازه - سیال مسئله ارتعاش ناشی از گردابه استوانه‌ها است. در این مطالعه می‌خواهیم روش مرز مغروق را معرفی کنیم. به این ترتیب که فلسفه، مزایا، محدودیت‌ها و کاربردهای آن ارائه می‌گردد. با توجه به کاربردهای فراوان این روش و برای جلوگیری از عدم تمرکز، کاربرد مسئله ارتعاش ناشی از گردابه به‌عنوان مرکز توجه و نمونه مطالعاتی استفاده شده است. سپس جزئیات روابط حاکم مرز مغروق و گسسته‌سازی‌های آنها تشریح می‌شود. الگوریتم مرز مغروق تکراری که برای مسئله ارتعاش ناشی از گردابه نیز استفاده شده به‌عنوان روش حل معادلات حاکم مطرح می‌شود. پیاده‌سازی و موارد مرتبط با الزامات کدنویسی توضیح داده می‌شوند. در نهایت مسئله ارتعاش ناشی از گردابه در استوانه با این روش حل می‌شود تا توانایی آن نشان داده شود. این پژوهش به‌گونه‌ای طراحی شده که مخاطب به یک جمع‌بندی از عملکرد این روش در مسائل برهم کنش سازه - سیال و به‌ویژه مسئله ارتعاش ناشی از گردابه می‌رسد. دیده می‌شود که زمان حل و متعاقباً قدرت محاسباتی مورد نیاز در حل مسئله به این روش بسیار کمتر از روش عادی است. روش مرز مغروق با توجه به مزایایی که دارد می‌تواند در آینده تبدیل به روش اصلی حل مسائل برهم کنش سازه - سیال شود. این مزایا به قدری هستند که پیاده‌سازی روش مرز مغروق را کاملاً توجیه‌پذیر می‌کنند.

واژگان کلیدی: روش مرز مغروق، برهم کنش سازه با سیال، ارتعاش ناشی از گردابه، شبکه کارترین، هسته دلتا

۱. مقدمه

می‌دهد. محرک‌های بیرونی مثل نیروهای هیدرودینامیکی ناشی از جریان و حرکات سکوی شناور ناشی از موج هستند و تحریک‌های داخلی مثل جریان داخل لوله. مسئله VIV^2

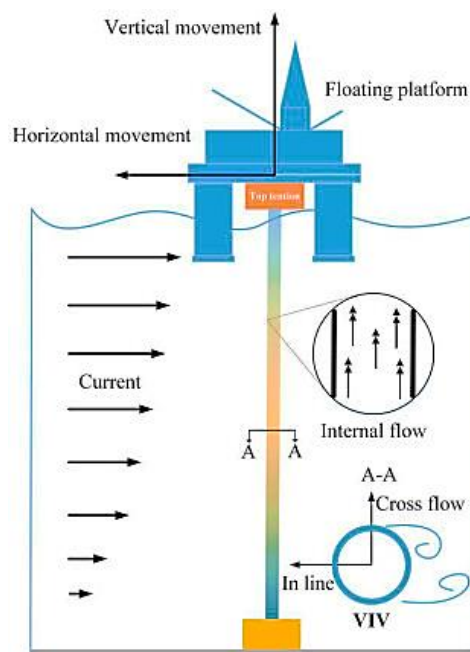
لوله‌های دریایی تحت تأثیر ارتعاش ناشی از گردابه قرار می‌گیرند که به علت ترکیبی از محرک‌های داخلی و بیرونی رخ

رایزرهای دریایی یک پدیده برهم‌کنش سازه - سیال دارای کوپل قوی است. این پدیده همچنین غیرخطی، خودمحرک، خود محدودکننده و نامتقارن است. به همین جهت یک پدیده غامض است که به خاطر پیچیدگی محرک‌های داخلی و بیرونی همچنان یک مسئله حل نشده باقی مانده است [۱].

در چند دهه گذشته مسئله ارتعاش ناشی از گردابه سیلندرهای دایروی در مرکز تحقیقات برهم‌کنش سازه - سیال بوده است. VIV، ارتعاش ناشی از ویک چندین سیلندر (WIV³) و ارتعاش شدید (گالوپینگ^۴) سیلندرهای دارای مقاطع غیردایروی

همگی زیر مجموعه ارتعاشات ناشی از جریان^۵ هستند. طبیعت پیچیده مسئله باعث می‌شود که کاوش کامل و سیستماتیک تمام مکانیزم ابتدایی FIV تقریباً غیرممکن شود [۲].

چهار نوع رایزر وجود دارد: کشش فوقانی، کنتاری^۶ فولادی، هیبریدی و منعطف. رایزرهای منعطف و کنتاری فلزی برای استفاده از منابع نفت و گاز در محیط‌های عمیق مورد استفاده قرار می‌گیرند. نمایی شماتیک از یک رایزر تحت VIV را در شکل ۱ مشاهده می‌کنید. به جهتی که در عمق حفاری است محوری^۷ گفته می‌شود [۱].



شکل ۱. شماتیک رایزر

پیش‌بینی VIV رایزرهای آب عمیق به دلیل جریان گذرا و برهم‌کنش سازه - سیال بسیار پیچیده، دشوار است. روش‌های مطالعه رایزرها به صورت تجربی و عددی هستند. مطالعات عددی به دو نوع دیدگاه نیمه‌تجربی و دینامیک سیالات محاسباتی^۸ تقسیم می‌شوند. دیدگاه نیمه‌تجربی به مدل‌های نیمه‌تجربی و مدل ویک نوسانی^۹ تقسیم می‌شوند.

روش محبوب ویک نوسانی شامل رابطه ون‌درپیل و کوپل آن با معادله ارتعاشی است. مدل‌های نیمه‌تجربی براساس داده‌های

به دست آمده از آزمایشات ارتعاش اجباری پایه‌ریزی شده‌اند. این روابط چون ماهیت سه بعدی سیال را پوشش می‌دهند، می‌توانند در کاربردهای واقعی مورد استفاده قرار گیرند [۱].

به دلیل محدودیت‌های فراوان تست‌های تجربی در مقیاس واقعی، استفاده از CFD برای مطالعه FIV می‌تواند بهترین گزینه در آینده نزدیک باشد. در حال حاضر به دلیل هزینه محاسباتی زیاد، اکثر شبیه‌سازی‌های CFD برای مسائل فراساحل در مقیاس مدل انجام می‌شود. جریان لامینار نیز حائز اهمیت است ولی در مسائل حقیقی فراساحل اعداد رینولدز بالا

و به تبع آن مدل‌سازی جریان توربولانسی نیاز است [۲]. در روش‌های CFD چهار مدل توربولانسی DNS^{10} ، $RANS^{11}$ ، LES^{12} و روش ورتکس گسسته DVM مورد استفاده هستند. روش DNS^{13} به مش‌های ریز و توان محاسباتی بالا نیاز دارد، به همین جهت در رینولدزهای پایین استفاده می‌شود. روش RANS می‌تواند به جریان‌های توربولانسی پیچیده با رینولدزهای بالا اعمال شود. دقت RANS از DNS کمتر است. روش LES ادی‌های^{۱۴} توربولانسی را به ادی‌های بزرگ و کوچک تقسیم و هر کدام را جداگانه حل می‌کند. به همین جهت بازده محاسباتی روش LES از DNS بالاتر و از RANS کمتر است (RANS دارای بازده خوب و دقت کمی است) [۱]. روش DVM یک روش ساده شده و پر بازده عددی است که از مش استفاده نمی‌کند و از تمامی روش‌های فوق هزینه محاسباتی کمتری دارد. این روش آینده‌دار دو بعدی بوده و برای تبدیل به حالت سه بعدی نیاز به تئوری نوآوری^{۱۵} دارد [۲]. روش ورتکس گسسته از لزجت میدان سیال صرف‌نظر می‌کند. در زیرمجموعه روش‌های CFD استفاده از روش تئوری نوآوری نیز مرسوم است. به‌طور کلی به این دلیل که مقیاس رایزرها در جهت محوری (عمق آب) بسیار بزرگ هستند، توان محاسباتی سنگینی برای شبیه‌سازی سه بعدی به کمک CFD نیاز است [۱].

عناوین موضوعات کار شده در زمینه VIV ناشی از جریان (یکنواخت، برشی یا نوسانی) در رایزرها دریا به شرح زیر است. پاسخ چند مودی، پاسخ در رینولدز بالا، پاسخ چندین رایزر، پاسخ رایزر مورب (در کاربردهای واقعی عموماً رایزرها مورب هستند)، پاسخ در جریان نوسانی. همچنین VIV ناشی از سکوی شناور، VIV ناشی از جریان داخل رایزر نیز از موضوعات مورد مطالعه هستند [۱].

در این مطالعه قصد داریم تا رایزرها و پایپ‌لاین‌ها^{۱۶} را به روش جدیدی به نام مرز مغروق^{۱۷} بررسی کنیم. این روش که برای مقاصد مهندسی پزشکی ابداع شده و توسعه یافته، در زمینه

دریایی کمتر مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. مزایای این روش از جمله سرعت محاسباتی بیشتر ما را بر این داشت که این روش را در زمینه لوله‌های دریایی بررسی کنیم.

۲. روش مرز مغروق

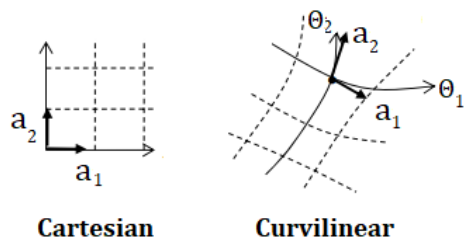
۲-۱. معرفی

روش مرز مغروق در ابتدا برای مطالعه الگوی جریان اطراف دریچه‌های قلب معرفی شد (۱۹۷۲) و سپس به روشی کاربردی برای حل مسائل FSI ارتقا یافت [۳]. به طوری که این روش یک روش شبیه‌سازی در حال ظهور برای تحلیل برهم‌کنش سیال و سازه محسوب می‌شود [۴]. این روش، هم یک فرمول‌بندی ریاضی و هم یک مکانیزم عددی است. فرمول‌بندی ریاضی یک ترکیبی از متغیرهای اویلری و لاگرانژی را به کار می‌برد. در مکانیزم عددی، متغیرهای اویلری روی یک مش کارتیزین ثابت (یکنواخت یا غیریکنواخت) تعریف می‌شوند و متغیرهای لاگرانژی روی یک مش منحنی‌الخط که آزادانه داخل مش ثابت کارتیزین و بدون تأثیرپذیری از آن حرکت می‌کند، تعریف می‌شوند. این شبکه‌ها توسط یک تقریب هموار از تابع دلتای دیراک به یکدیگر متصل می‌شوند [۳].

در روش مرز مغروق شرایط مرزی روی سطح مشترک سیال و جامد به‌طور مستقیم قابل اعمال نیستند. به همین جهت باید نیرویی حجمی به معادله مومنتوم اضافه شود تا چنین برهم‌کنشی را به حساب آورد. مرسوم است روش IB به دو دیدگاه نیروی فیدبک و نیروی مستقیم تقسیم شود [۵].

با اعمال روش IB معادلات حاکم با روش‌های اجزا محدود، حجم محدود یا المان محدود گسسته‌سازی می‌شوند، بدون اینکه انتقال مختصات یا اپراتورهای گسسته‌سازی پیچیده به میان بیایند. در روش‌های اجزا محدود معادلات دیفرانسیلی و در روش‌های حجم محدود معادلات انتگرالی حاکم حل می‌شوند [۶]. به‌عنوان مثال مطالعه با اجزا محدود، به کار میتال و همکاران ۲۰۰۸ [۷] اشاره می‌شود.

سادگی شبکه کارترین انضمام (وارد کردن) معادلات ناویر استوکس را تسهیل می‌کند که در شکل ۲ چپ می‌شود. عمومیت شبکه منحنی‌الخط مدل‌سازی مواد الاستیک ان‌ایزوتروپیک^{۱۸} (مثل مواد تقویت شده با الیاف) را تسهیل می‌کند. یک قابلیت مهم روش IB این است که این دو شبکه در هیچ صورتی مقید به وابستگی به یکدیگر نیستند [۳].



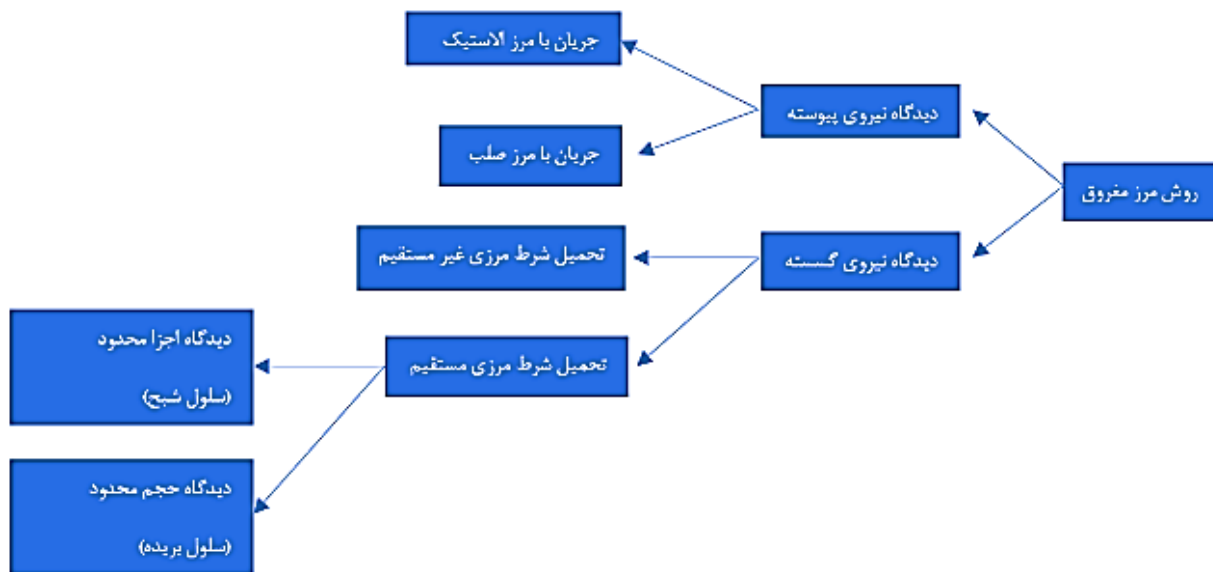
شکل ۲. انواع شبکه

به‌طور خلاصه روش IB برای مسائلی است که در آنها جسم مغروق تراکم‌ناپذیر ویسکوالاستیک یا مرز مغروق الاستیک با سیال تراکم‌ناپذیر لزج برهم‌کنش دارند. جسم ویسکوالاستیک نیاز به شناوری خنثی (بدون شتاب) در سیال ندارد. مرز

الاستیک نیازی به بی‌جرم بودن، و سیال نیز نیازی به چگالی یکنواخت ندارد [۳].

این روش به دو دسته نیروی پیوسته و نیروی گسسته تقسیم می‌شود. مزیت دسته نیروی پیوسته این است که به یک حل گر^{۱۹} موجود ناویر استوکس می‌تواند اضافه^{۲۰} شود که مزیت دسته نیروی گسسته نمایش دقیق مرز مغروق است [۷].

مزیت دیدگاه نیروی پیوسته عدم وابستگی به گسسته‌سازی فضایی است (برخلاف دیدگاه نیروی گسسته). دیدگاه نیروی پیوسته برای جریان‌هایی با مرز الاستیک مغروق جذاب است. همچنین از آنجا که در این دیدگاه باید معادلات حاکم داخل جسم مغروق نیز حل شوند، این دیدگاه برای رینولدزهای بالا نامطلوب است. مزیت دیدگاه گسسته عملکرد بهتر در رینولدزهای بالا و کمتر بودن قیود پایداری است. عیب آن سخت‌تر بودن اضافه کردن حرکت مرز و همین‌طور نیاز به شرط مرزی فشار است. تقسیم‌بندی نیرویی مرز مغروق در شکل ۳ آمده است [۶].



شکل ۳. تقسیم‌بندی نیرویی مرز مغروق

۲-۲. مزایا

در مقایسه با روش‌های متداول FSI روش IB در شبیه‌سازی‌های دارای تغییرات توپولوژیک پر فایده است [۸]. در مقایسه با مش منظم و خصوصاً نامنظم، در مش کارترین (IB) تعداد عملیات به ازای هر نقطه از مش به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد که دلیل این امر نبود ترم‌های اضافی ناشی از تبدیل شبکه است [۶]. مزیت اصلی روش IB این است که عملیات تولید مش بسیار ساده شده است.

تولید مش منطبق با جسم (منظم یا نامنظم) به دلیل پایین بودن دقت تولید مش برای اکثر هندسه‌ها، عموماً بسیار دشوار است. چراکه هدف مش منطبق، تولید مش با دقت محلی کافی با حداقل تعداد نقاط است. ارضای این دو خصوصیت متضاد به غیر از هندسه‌های بسیار ساده باعث کاهش کیفیت مش و در نهایت دقت و هم‌گرایی حل‌گر می‌شود.

ایجاد یک مش منطبق با جسم، حتی برای هندسه‌های ساده نیز فرایندی تکراری است که نیازمند مقدار قابل‌توجهی ورودی است. این قضیه برای هندسه‌های پیچیده دوچندان است. این درحالی است که در یک مش کارترین غیرمنطبق با جسم، کیفیت و پیچیدگی مش، از پیچیدگی هندسه تأثیر خیلی کمی می‌پذیرد [۶]. از روش IB برای اجسام با هندسه‌های پیچیده، و از روش‌های منطبق با جسم راحت‌تر می‌توان استفاده کرد [۴].

فایده مش کارترین در روش IB برای جریان با مرز متحرک به‌طور کامل مشخص می‌شود. شبیه‌سازی چنین جریانی در شبکه‌های منطبق با جسم نیازمند ایجاد یک شبکه جدید در هر پله زمانی (و نیز فرایند تصویر کردن راه‌حل به این شبکه جدید) است [۴، ۶]. این دو مرحله به‌خصوص در موارد شامل حرکات بزرگ سادگی، دقت و هزینه محاسبات را به‌طور منفی تحت تأثیر قرار می‌دهد. این درحالی است که وارد کردن حرکت جسم در روش IB به دلیل استفاده از مش کارترین ثابت و بدون تغییر شکل، ساده است [۶].

فایده دیگر روش IB پارامتری بودن و پیاده‌سازی سریع آن برای تعداد زیادی از شبیه‌سازی‌ها با هندسه‌های مختلف است (در مقایسه با روش‌های متداول که از مش منطبق با جسم استفاده می‌کنند) [۹]. این روش در بعضی پارامترهای هندسی توانایی مدل‌سازی ریزش گردابه نامنظم (برای VIV) را دارد [۱۰]. در روش IB نسبت به روش‌های عادی می‌توان برای دقت بیشتر یک رویه عددی بالاتری^{۳۱} به‌کار برد. همچنین مش‌های کارترین تعامد بسیار بهتری نسبت به روش‌های منطبق با جسم ارائه می‌دهند که این باعث ثبات و دقت پاسخ می‌شود [۴]. در شبیه‌سازی مسائل شامل مرزهای پیچیده ثابت و یا متحرک نسبت به روش‌های معمول دارای مزیت است. شبیه‌سازی شامل چندین جسم ثابت یا متحرک سه بعدی و اجسام غشایی برای روش‌های دارای شبکه منطبق با جسم بسیار چالش‌برانگیز است [۷].

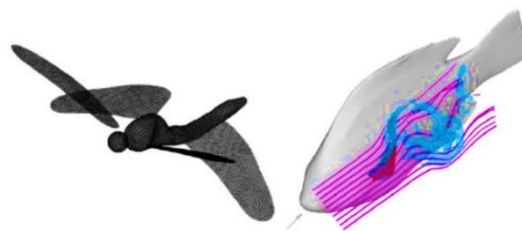
۲-۳. محدودیت‌ها

روش IB در فضا از دقت مرتبه دو برخوردار است. ولی برای فصل مشترک‌های تیز روش IB به دقت مرتبه اول محدود می‌شود. همچنین در روش IB مشخص نیست که چگونه می‌توان ویسکوزیته متغیر را مدل کرد [۳]. اعمال شرایط مرزی در روش IB سراسر و آسان نیست، و با افزایش عدد رینولدز سازه شبکه کارترین (IB) سریع‌تر از شبکه متناظر منطبق با جسم (روش عادی) بزرگ می‌شود. البته این امر مستقیماً به معنی بیشتر شدن هزینه محاسبات نیست چراکه مقدار قابل‌توجهی از شبکه IB در داخل جسم جامد قرار دارد و معادلات جریان سیال برای آن حل نمی‌شود [۶]. یک محدودیت جدی IB فرض یک بعدی بودن و ایفای بودن سازه مغروق است که می‌تواند جرم داشته باشد ولی هیچ حجمی در دامنه سیال اشغال نمی‌کند و نیز شبکه سیال یکنواخت باعث می‌شود که حل دامنه‌های سیال با اشکال هندسی پیچیده و شرایط مرزی پیچیده مشکل شود [۱۱].

۲-۴. کاربردها

بعضی از کاربردهای روش IB عبارتند از [۳]: دینامیک سیالات دریچه قلب، مدل سه بعدی کل قلب، جمع شدن پلاکت‌ها در لخته خون، تغییر شکل گلبول‌های قرمز خون در جریان برشی، جریان در رگ‌های خونی الاستیک، شناوری مارماهی‌ها، اسپرم و باکتری‌ها، حرکت خزشی آمیب‌ها^{۲۲} (تک سلولی‌ها)، حرکت موجی مژه در سیال، شبیه‌سازی بیوفیلیم‌ها، دینامیک سیالات تعاملات بین شناگرهای مجاور، حرکات رویان‌شناسی، جریان با ذرات معلق، ارتعاشات غشای پایینی گوش داخلی، جریان ماورای یک سیلندر (مسئله بنج مارک^{۲۳})، چندین کاربرد آیرودینامیکی مثل بادبان، چتر نجات، پرچم و پرواز حشرات، دانه‌های (بذر) گیاهان در حال پرواز [۳]. کاربردهای اخیر این روش عبارتند از برهم‌کنش موج سطحی با سازه‌های ساحلی، جریان آزاد سطح پس از هندسه‌های نامنظم، دینامیک حرکت پرچم‌های وارونه، پرواز حشرات و جذب انرژی از ارتعاش ناشی از جریان [۱۰].

میتال و همکاران ۲۰۰۸ شبیه‌سازی هیدرودینامیک یک ماهی با هندسه پیچیده که در شکل ۴ دیده می‌شود را به این روش انجام دادند. همچنین آیرودینامیک پرواز یک سنجاک نیز با این روش انجام شد. به ادعای آنها شبیه‌سازی به پیچیدگی شبیه‌سازی سنجاک انجام نشده بود. بال‌های عقبی سنجاک با بال‌های جلویی دارای اختلاف فاز هستند [۷].

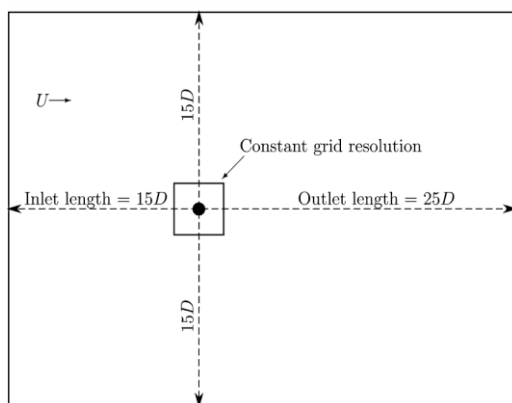


شکل ۴. مدل‌سازی ماهی و سنجاک به روش IB [۷]

۳. مطالعات VIV با روش مرز مغروق

مطالعات از این دست بسیار محدود هستند و تقریباً تمامی این مطالعات در زیر آمده‌اند. همه مطالعات دو بعدی و به صورت دینامیک سیالات محاسباتی هستند. در ابتدایی‌ترین حالت و بدون VIV میتال و همکاران ۲۰۰۸ مدل IB خود را برای یک استوانه دایروی ثابت در جریان امتحان کردند. حدود رینولدز ۴۷ جریان دائم و متقارن است. جریان بین رینولدز ۴۷ تا ۱۸۰ دارای ریزش ورتکس کارمن^{۲۴}، و همین‌طور دو بعدی است. برای رینولدزهای بالاتر از ۱۸۰ جریان سه بعدی می‌شود [۷].

گریفیت و لئونینی ۲۰۱۷ [۱۰] پدیده VIV را برای هندسه ساده استوانه دایروی (سوار شده الاستیک) به کمک روش خاصی از IB یعنی روش رابط تیز^{۲۵} مدل کردند و آن را با روش دقیق المان طیفی^{۲۶} صحت‌سنجی کردند. تصویر مدل آنها در شکل ۵ آمده است.



شکل ۵. شبیه‌سازی نوعی VIV با روش IB [۱۰]

گارگ و همکاران ۲۰۱۸ پدیده VIV را به همراه شناوری حرارتی روی یک سیلندر سوار الاستیک به کمک روش رابط تیز IB شبیه‌سازی کردند [۱۲]. کد آنها در فرترن ۹۰ نوشته شده بود و حدوداً ۲۰ ساعت هر شبیه‌سازی زمان می‌برد. همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود مسئله مورد بررسی آنها شامل دو صفحه در اطراف سیلندر می‌شود تا شناوری حرارتی ایجاد کنند (صفحه بالایی گرم و صفحه پایینی سرد است).

۴. حل گر مرز مغروق

۴-۱. روابط و معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان سیال تراکم‌ناپذیر به صورت روابط پیوستگی و ناویر - استوکس هستند که در روابط ۱ و ۲ نوشته شده‌اند:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mathbf{v}(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)) \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

در روابط بالا u بردار سرعت، p فشار، ∇ اپراتور گرادیان و v لزجت سینماتیکی است. در روش مرز مغروق، معادلات جریان روی یک شبکه ثابت کارتزینی گسسته می‌شوند. با استفاده از گسسته‌سازی زمانی مرتبه دوم آدامز - بشفورس^{۳۹} معادلات حاکم با استفاده از روش IB به صورت روابط ۳ و ۴ درمی‌آیند [۵]:

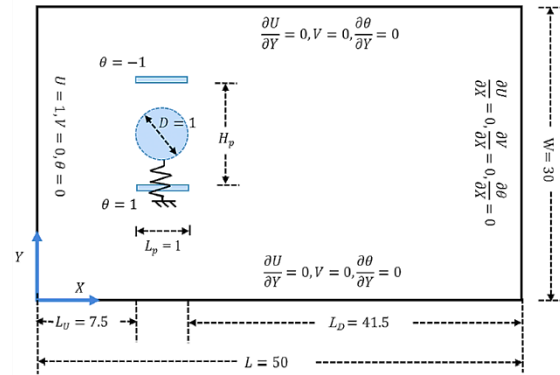
$$u^{n+1} = u^n + \delta t \left(\frac{3}{2} h^n - \frac{1}{2} h^{n-1} - \frac{3}{2} \nabla p^n + \frac{1}{2} \nabla p^{n-1} \right) + f^{n+\frac{1}{2}} \delta t \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u}^{n+1} = 0 \quad (4)$$

n ها در بالا نمایان‌گر شماره گام‌های زمانی و t مقدار گام زمانی هستند. در آن برای h داریم (شامل ترم‌های جابه‌جایی و پراکنندگی):

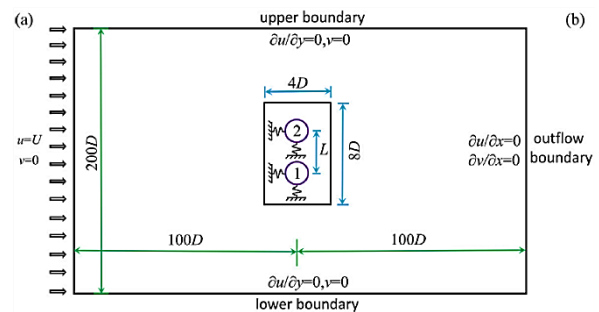
$$h = \nabla \cdot (-\mathbf{u}\mathbf{u} + v(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)) \quad (5)$$

عبارت f ظاهر شده در رابطه ۳ نیز نمایان‌گر نیروی حجمی اضافی روی شبکه کارتزین است و با برابر قرار دادن سرعت سیال u و جسم V روی مرز مشترک تعیین می‌شود. هدف روش مرز مغروق، قرار دادن دقیق شرایط مرزی روی مرز مغروق است. برابر قرار دادن سرعت‌ها روی مرز به صورت روابط ۶ و ۷ انجام می‌شود:



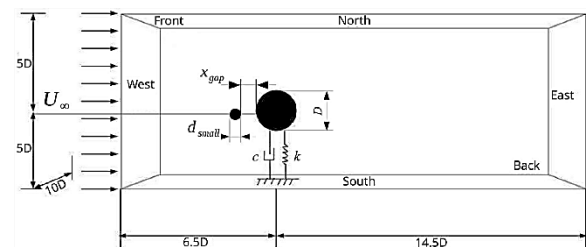
شکل ۶. شبیه‌سازی نوعی VIV با روش IB [۱۲]

چن و همکاران در مجله علمی کامپیوتر و سیالات^{۳۷} و در سال ۲۰۱۹ پدیده VIV را روی دو استوانه که کنار هم قرار دارند را با روش IB بررسی کردند [۱۳]. هر استوانه می‌تواند در جهت هم‌خط و عمود بر جریان نوسان کند که در شکل ۷ دیده می‌شود.



شکل ۷. شبیه‌سازی نوعی VIV با روش IB [۱۳]

احمدرضا و همکاران ۲۰۲۰ [۴] پدیده VIV را برای یک کره سوار شده الاستیک را به روش نیروی مستقیم مرز مغروق^{۳۸} بررسی می‌کنند که در شکل ۸ آمده است. آنها از یک کره ثابت کوچک‌تر در مقابل این کره برای کنترل VIV استفاده کردند. روش آنها CFD و از نوع حجم محدود بود.



شکل ۸. شبیه‌سازی نوعی VIV با روش IB [۴]

قرار می‌دهیم: $F^{n+\frac{1}{2}}\delta t = I(f^{n+\frac{1}{2}}\delta t)$ در آن $F^{n+\frac{1}{2}}$ نماینده نیروی حجمی روی نقاط IB است. حال با توزیع این نیرو روی شبکه کارترین خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} D(F^{n+\frac{1}{2}}\delta t) &= D\left(I\left(f^{n+\frac{1}{2}}\delta t\right)\right) \\ &= D\left(v^{n+1} - I\left(u^n + \delta t\left(\frac{3}{2}h^n - \frac{1}{2}h^{n-1} - \frac{3}{2}\nabla p^n + \frac{1}{2}\nabla p^{n-1}\right)\right)\right) \end{aligned} \quad (10)$$

در نهایت نیروی حجمی روی شبکه‌های کارترین به ترتیب زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} f^{n+\frac{1}{2}}\delta t &= D\left(v^{n+1} - I\left(u^n + \delta t\left(\frac{3}{2}h^n - \frac{1}{2}h^{n-1} - \frac{3}{2}\nabla p^n + \frac{1}{2}\nabla p^{n-1}\right)\right)\right) \end{aligned} \quad (11)$$

۲-۴. الگوریتم مرز مغروق تکراری

باتوجه به اینکه طبیعت معادله ۱۱ ضمنی است، از یک فرایند دو مرحله‌ای سعی و خطا که در آن نیروی حجمی و فشار به صورت تکراری حل می‌شوند، استفاده می‌کنیم. الگوریتم مرز مغروق تکراری به صورت مراحل ۱، ۲ و ۳ است.

۱- مرحله تخمین اولیه برای محاسبه سرعت واسط u^* [۵]:

$$u^* = u^n + \delta t\left(\frac{3}{2}h^n - \frac{1}{2}h^{n-1} + \frac{1}{2}\nabla p^{n-1}\right) \quad (12)$$

$$U^{n+1} = V^{n+1} \quad (6)$$

$$U^{n+1} = I(u^{n+1}) \quad (7)$$

U^{n+1} نمایانگر سرعت درون‌یابی^{۳۰} شده روی نقاط مرز مغروق است و V^{n+1} نشانگر سرعت مطلوب روی نقاط مرز مغروق است. V سرعت نقاط مرز مغروق است که از حل معادله حاکم بر حرکت سیلندر (y) به دست می‌آید. با ترکیب معادلات ۶ و ۷ با معادله گسسته مومنتوم ۳ داریم:

$$\begin{aligned} v^{n+1} &= U^{n+1} = I(u^{n+1}) \\ &= I\left(u^n + \delta t\left(\frac{3}{2}h^n - \frac{1}{2}h^{n-1} - \frac{3}{2}\nabla p^n + \frac{1}{2}\nabla p^{n-1}\right)\right) \\ &\quad + I\left(f^{n+\frac{1}{2}}\delta t\right) \end{aligned} \quad (8)$$

توجه شود که توابع $I(\phi)$ و $D(\Phi)$ به ترتیب توابع درون‌یابی و توزیع^{۳۱} را نشان می‌دهند. ϕ نماینده متغیرها روی شبکه کارترینی مثل p, u, x, \mathbf{u} و f و Φ نماینده متغیرها روی نقاط IB مثل U, X_i و F است. تابع درون‌یابی میادین فیزیکی را از شبکه کارترین به نقاط مرز مغروق تصویر می‌کند درحالی که تابع توزیع میادین فیزیکی را از نقاط مرز مغروق به شبکه کارترین برمی‌گرداند با بازنویسی معادله ۸ داریم:

$$\begin{aligned} I\left(f^{n+\frac{1}{2}}\delta t\right) &= v^{n+1} - I\left(u^n + \delta t\left(\frac{3}{2}h^n - \frac{1}{2}h^{n-1} - \frac{3}{2}\nabla p^n + \frac{1}{2}\nabla p^{n-1}\right)\right) \end{aligned} \quad (9)$$

۲- فشار واسط $p^{n,k}$ و نیروی حجمی $f^{n+\frac{1}{2},k}$ به صورت تکراری حساب می‌شوند (پارامتر k شمارنده حلقه تکرار است):

الف) به روزرسانی نیروی حجمی $f^{n+\frac{1}{2},k}$ (شروع لوپ):

نتیجه جای‌گذاری u^* معادله ۱۲ در معادله ۱۱، معادله ۱۳ را است.

$$f^{n+\frac{1}{2},k} \delta t = D \left(v^{n+1} - I(u^* - \frac{3\delta t}{2} \nabla p^{n,k-1}) \right) \quad (13)$$

ب) به روزرسانی سرعت واسط \bar{u}^k از رابطه ۳ [۵]:

$$\bar{u}^k = u^* + f^{n+\frac{1}{2},k} \delta t \quad (14)$$

ج) به روزرسانی فشار واسط $p^{n,k}$ توسط معادله پواسون ۱۵ انجام می‌شود [۵]:

$$\Delta p^{n,k} = \frac{2}{3\delta t} \nabla \cdot \bar{u}^k \quad (15)$$

د) معیار همگرایی: اگر نرم (اندازه) عبارت

$$I(u^* - \frac{3\delta t}{2} \nabla p^{n,k}) - I(u^* - \frac{3\delta t}{2} \nabla p^{n,k-1})$$

کمتر از تورولانس است، کد از لوپ خارج می‌شود.

ه) قرار بده (پایان لوپ): $k = k + 1$

۳- مرحله تصحیح [۵]:

$$p^n = p^{n,k} \quad (16)$$

$$u^{n+1} = \bar{u}^k - \frac{3\delta t}{2} \nabla p^n \quad (17)$$

بدین ترتیب طبق الگوریتم مرز مغروق تکراری مقادیر فشار و سرعت محاسبه می‌شوند. روش مرز مغروق تکراری از مقاله جی و همکاران [۵] ۲۰۱۲ اقتباس شده است. چندین روش مختلف مرز مغروق در مقالات موجود هستند. انتخاب این مقاله خاص به این جهت بوده که در کار مشابهی روی VIV چند

لوله در حالت دو بعدی استفاده شده و نتیجه داده است. همچنین استفاده از روش مرز مغروق تکراری می‌تواند استفاده از حل‌گرهای منفک را ساده کند.

۳-۴. توزیع و درون‌یابی

همان‌طور که بیان شد عبارات I و D به ترتیب توابع درون‌یابی و توزیع هستند که به ترتیب زیر تعریف می‌شوند [۱۳]:

$$\begin{aligned} \Phi(X_i) &= I(\phi, X_i) \\ &= \sum_{x \in g_h} \phi(x) \delta_h(x - X_i) \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \phi(x) &= D(\Phi, x) \\ &= \sum_{i=1}^{N_{IBP}} \Phi(X_i) \delta_h(x - X_i) \Delta V_i / V_m \end{aligned} \quad (19)$$

به کمک رابطه ۱۸ مقدار $\Phi(X_i)$ روی نقاط IB تعیین می‌شود. در آن مجموعه شبکه‌های کارتیزین در داخل و خارج مرز را نشان می‌دهد. متغیر $\phi(x)$ از رابطه ۱۹ و روی شبکه‌های کارتیزین هم داخل و هم خارج مرز مغروق محاسبه می‌شود. مقدار ترم ΔV_i حجم گسسته نقطه مرز مغروق X_i است، به شکل ۸ مراجعه شود، و شامل یک پوسته نازک با ضخامت برابر با عرض یک شبکه می‌شود که حول هر نقطه مرز مغروق قرار دارد. N_{IBP} مجموع نقاط مرز مغروق و V_m حجم کنترل شبکه کارتیزین x است. همچنین در معادلات ۱۸ و ۱۹ تابع گسسته دلتا δ_h آمده است که طبق نظر پسکین^{۳۳} خالق روش مرز مغروق با روابط زیر تعیین می‌شود [۳]:

$$\delta_h(x) = d_h(x) d_h(y) d_h(z) \quad (20)$$

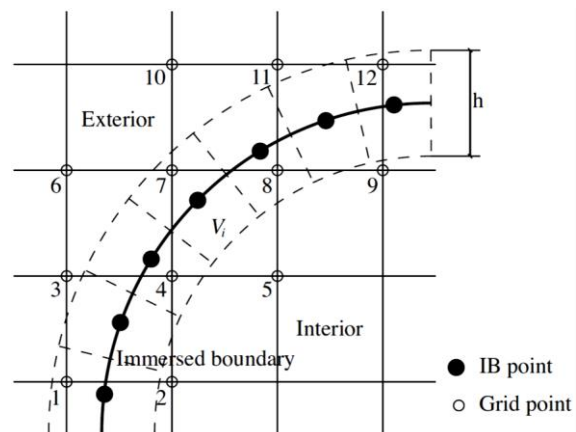
$$d_h(r) = \begin{cases} \frac{1}{8h} \left(3 - 2 \frac{|r|}{h} + \sqrt{1 + 4 \frac{|r|}{h} - 4 \left(\frac{|r|}{h} \right)^2} \right) & |r| < h \\ \frac{1}{8h} \left(5 - 2 \frac{|r|}{h} - \sqrt{-7 + 12 \frac{|r|}{h} - 4 \left(\frac{|r|}{h} \right)^2} \right) & h \leq |r| < 2h \\ 0 & 2h \leq |r| \end{cases} \quad (21)$$

هندسه پیچیده، دشوار می‌شود. به‌طور متداول روش IB برای مش ثابت استفاده می‌شود. این روش به‌خاطر استفاده از یک شبکه با هندسه ساده می‌تواند اجسام با هندسه پیچیده، جابه‌جایی‌های بزرگ و تعداد زیاد اجسام را بررسی کند. اگر روش IB با حل‌گرهای منفک استفاده شود، مشکل انتقال داده بین سیال و جامد می‌تواند منجر به عدم پایداری شود [۱۴].

به‌حل‌گر مورد استفاده در کار جی و همکاران [۵] ۲۰۱۲ متاسفانه در خود مقاله و حتی چندین مقاله مشابه همین تیم نیز اشاره نشده است. ولی با جستجوی بیشتر در مقالات منتشر شده از این دانشگاه (کویین مری لندن) می‌توان به کاری مانند وانگ و همکاران [۱۴] ۲۰۲۰ رسید که طی آن در مورد حل‌گر توضیحاتی داده شده است. به احتمال قوی، از همین حل‌گر برای کار جی و همکاران ۲۰۱۲ بهره برده شده است. اسم حل‌گر CgLES-Y است که در تحقیقات همین دانشگاه نوشته شده و از نوع منفک است. حل‌گر سیال CgLES است که Cg مخفف هندسه پیچیده است و LES نیز بیان‌گر مدل توربولانسی ادی‌های بزرگ است. حل‌گر دینامیک جامد Y است که با زبان C نوشته شده است. اساس حل‌گر سیال حجم محدود و حل‌گر جامد المان محدود (و المان محدود گسسته) است. یک الگوریتم تکراری از IB دو حل‌گر را به هم مرتبط می‌کند. این حل‌گر در طیف گسترده‌ای از مسائل مثل جریان گلبول‌های قرمز، جریان ادرار در مجاری ادراری، توربین‌های جزر و مدی و رسوب‌گذاری به‌کار رفته است.

همان‌طور که گفته شد، در مقالات حتی نام حل‌گر را مخفی نگاه می‌دارند. همین‌طور اکثر مقالات برای خود یک حل‌گر مرز

در رابطه ۲۰ پارامترهای x ، y و Z مؤلفه‌های مختصات کارترین هستند، همین‌طور مقدار h در رابطه ۲۱ در شکل ۹ دیده می‌شود.



شکل ۹. شماتیک روش مرز مغروق [۱۳]

۵. حل‌گر مورد استفاده

حل‌گرهای FSI به دو نوع یکپارچه^{۳۳} و منفک^{۳۴} تقسیم می‌شوند. حل‌گر یکپارچه برای فازهای سیال و جامد از یک حل‌گر مشابه استفاده می‌کند. گرچه این حل‌گری بهینه نیست ولی انتقال اطلاعات بین دو فاز به‌صورت پایدار انجام می‌شود. حل‌گر منفک نیز از یک حل‌گر جداگانه برای سیال و جامد استفاده می‌کند. حل‌گرهای منفک می‌توانند از مش‌های ثابت یا متغیر^{۳۵} استفاده کنند. مش متغیر خود را با جابه‌جایی سطح سازه - سیال وفق می‌دهد. دیدگاه لاگرانژی - اویلری دلخواه (ALE) دیدگاه متداول برای مش‌های متغیر است و به‌طور گسترده در نرم‌افزارهای تجاری به‌کار می‌رود روش ALE برای تغییر شکل‌های زیاد، مسائل تماسی و اجسام متعدد و دارای

مغروق خاص می‌سازند و استفاده می‌کنند. از آنجا که به حل‌گر مرز مغروق تجاری یا منبع آزاد دسترسی وجود ندارد باید برای انجام هر تحلیلی حل‌گر خودمان را بنویسیم. در این راستا برنامه‌ریزی ذیل را می‌توان متصور شد.

استفاده از متد تکراری مرز مغروق می‌تواند استفاده از حل‌گرهای منفک را ساده کند. به همین جهت از گزینه حل‌گر منفک استفاده می‌کنیم. ایجاد هندسه در محیط نرم‌افزارهای طراحی به کمک کامپیوتر (CAD) انجام می‌گیرد. در اینجا نرم‌افزار سالیدورکس^{۳۶} به‌خاطر راحتی کاربری و ارائه جامعی از گزینه‌های طراحی انتخاب می‌شود. فایل طراحی شده به‌صورت خروجی STP وارد نرم‌افزار انسیس^{۳۷} خواهد شد. تحلیل سازه در محیطی از انسیس که به‌صورت تخصصی برای حل مسائل جامد برنامه‌ریزی شده است، انجام خواهد گرفت. البته در ابتدا سعی می‌کنیم که تحلیل سازه و سیال در صورت امکان در یک محیط مشابه صورت گیرد تا در زمینه لینک شدن پاسخ‌ها، عملکرد بهتری داشته باشیم.

حل مربوط به سیال نیز در محیط نرم‌افزار فلوئنت^{۳۸} صورت می‌پذیرد. انتخاب این نرم‌افزار راحتی کاربری، وجود راهنماهای جامع، تحت ویندوز بودن و متداول بودن است. نوشتن حل‌گری مشابه CgLES-Y که با زبان C انجام شده است و از ابتدا تا انتها به‌صورت داخلی صورت گرفته است، برای ما غیرقابل انجام است. نوشتن این حل‌گر از سال ۱۹۹۸ شروع شده است و به مرور توسط افراد متعدد از گروه‌های مختلف تحقیقاتی به آن اضافه شده تا در نهایت به کد فعلی منجر شده است.

نوشتن مشابه چنین کدی چه در زبان C، و یا فرترن و متلب برای انجام پروژه فعلی امکان‌پذیر نیست. البته در صورت دست یافتن به چنین کدهایی می‌توان اصلاح و استفاده از آنها را به‌عنوان نرم‌افزار جایگزین در نظر گرفت. به‌طور کلی انتخاب و استفاده از نرم‌افزار خاصی هدف نیست و از هر نرم‌افزاری که اهداف پروژه را محقق کند، می‌توان استفاده کرد.

به‌عنوان نرم‌افزار جایگزین برای حل سیال، می‌توان از نرم‌افزار اوپن‌فوم^{۳۹} بهره جست. دلیل انتخاب این نرم‌افزار آزاد بودن منبع

آن است که به معنی دسترسی داشتن به تمام کدهای آن است. به این طریق می‌توان هم برای نوشتن کد مرز مغروق ایده گرفت و هم مراتب و جزئیات متصل کردن کد مرز مغروق با حل‌گر کلی نرم‌افزار را راحت‌تر انجام داد. نرم‌افزار اوپن‌فوم تمام قابلیت‌های کد CgLES و بیشتر از آن را دارد و همین‌طور دارای فعال‌کننده^{۴۰} رایگان است. همچنین اوپن‌فوم به دلیل توانایی اجرا بر روی لینوکس، می‌تواند گزینه مناسبی برای پیاده‌سازی روی سیستم پردازش سریع (HPC) دانشگاه صنعتی شریف باشد. البته اوپن‌فوم برای مرز مغروق طراحی نشده و برای استفاده باید توسط ما اصلاح شود.

زبان اوپن‌فوم ++C است که برای نوشتن کد مرز مغروق به آن نیاز داریم. البته برای استفاده از نرم‌افزار نیاز به دانستن بعضی دستورات سیستم عامل لینوکس نیز هست. مشکل اصلی اوپن‌فوم عدم وجود رابط کاربری مناسب، ساده و قابل رقابت با نرم‌افزارهای مشابه است.

در نهایت برای متصل کردن دو حل‌گر می‌توان از کدی که در محیط متلب (یا نرم‌افزارهای مشابه) نوشته می‌شود، استفاده کرد. این کد با الگوریتم مرز مغروق نوشته می‌شود و خروجی‌های دو حل‌گر را بین هم به اشتراک می‌گذارد.

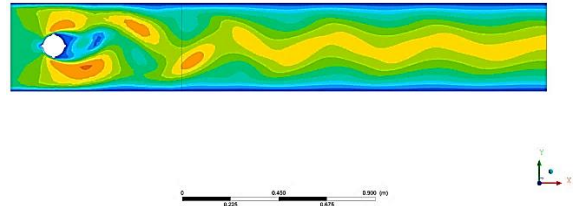
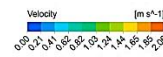
۶. حل مسئله ارتعاش ناشی از گردابه استوانه توسط روش مرز مغروق

مسئله ارتعاش ناشی از گردابه یک مسئله از نوع کوپل سیال-سازه است. کوپل موجود در این مسئله فراخور ورودی‌های آن می‌تواند به پیچیده‌ترین حالت کوپل یعنی کوپل دو طرفه قوی تبدیل شود.

نرم‌افزارهای تجاری موجود قابلیت حل مسائل کوپل را دارند. نرم‌افزارهایی که بر پایه دینامیک سیالات محاسباتی عمل می‌کنند از جمله انسیس و کامسول^{۴۱} این توانایی را دارند.

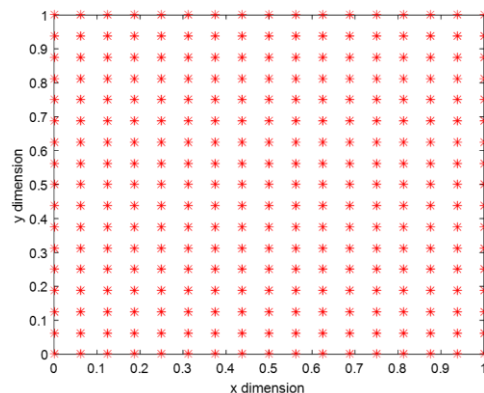
در شکل ۱۰ نمایی از حل مسئله ارتعاش ناشی از گردابه عرضی به‌صورت کوپل قوی و به کمک مش دینامیکی که در نرم‌افزار

انسیس به صورت سه بعدی انجام گرفته است را مشاهده می کنید.



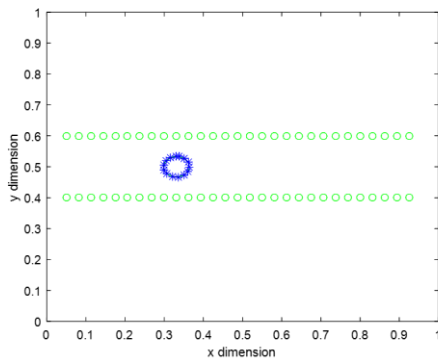
شکل ۱۰. حل ارتعاش ناشی از گردابه سیلندر در نرم افزارهای تجاری (کانتور سرعت)

هیچ کدام از این نرم افزارهای تجاری قابلیت انجام چنین تحلیلی را به صورت مرز مغروق ندارند. برای انجام تحلیل مرز مغروق دو بعدی و در مقیاس نسبتاً کوچک که مدنظر ما در این مسئله است از حل گر منبع آزاد باتیستا و همکاران ۲۰۱۸ [۱۵] استفاده می کنیم. شبکه اویلری پس زمینه با ۱۲۸ نقطه در راستای افقی و ۱۲۸ نقطه در راستای عمودی مشخص می گردد. در شکل ۱۱ نمایی از یک شبکه اویلری با دامنه واحد دیده می شود. توجه شود که کل دامنه حل با طول واحد است و حرکت مرز مغروق نیز در مرحله بعدی در داخل همین ناحیه و به صورت طولی ایجاد می شود.



شکل ۱۱. دامنه اویلری پس زمینه که با ۱۶ سلول در محور افقی و ۱۶ سلول در محور عمودی مشخص شده

برای مرز لاگرانژی باید نمای دو بعدی سیلندر را تقسیم بندی و شبکه بندی کنیم. همچنین در اینجا کانالی که سیلندر در آن قرار گرفته است را نیز باید همچون خود استوانه تقسیم بندی لاگرانژی نمایم. در شکل ۱۲ تقسیم بندی سیلندر و کانال دیده می شود. کانال با نقاط سبز و سیلندر با نقاط آبی مشخص شده اند.



شکل ۱۲. تقسیم بندی لاگرانژی استوانه با ۱۶ سلول (آبی رنگ) و کانال (سبز رنگ) (O)

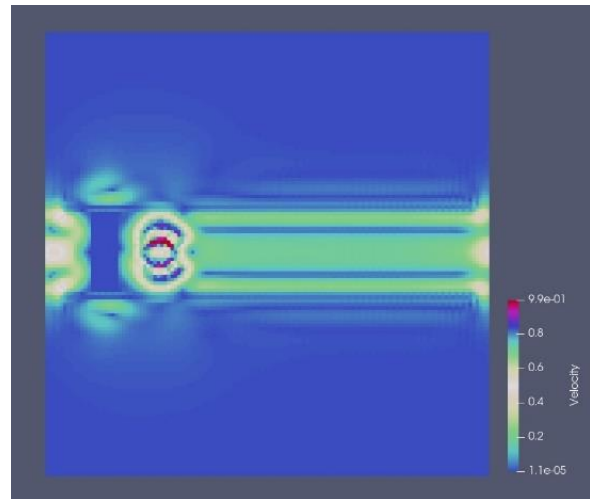
همان طور که در شکل ۱۲ دیده می شود، عرض کانال را 0.2 در نظر گرفتیم. مرکز سیلندر نیز در محور افقی 0.3 و در محور عمودی 0.5 است. حال به کمک روابط هسته دلتا می توان پارامترهای اویلری و لاگرانژی را در دو شکل ۱۱ و ۱۲ به هم مرتبط نمود. در چهار مرحله تحلیل مرز مغروق انجام می شود. در مرحله اول نیروی وارد بر مرز اعمال می شود. در مرحله دوم نیروی وارد بر مرز به کمک توابع توزیع دلتا به نقاط پس زمینه اویلری منتقل می شود. در مرحله سوم به کمک روابط ناویر استوکس مقادیر سرعت از مقادیر نیروی به دست آمده استخراج می شوند. در مرحله آخر سرعت های پس زمینه به کمک روابط درون یابی دلتا به نقاط لاگرانژی مرز منتقل می شوند. به نوعی سرعت سیال و نیروی جسم بدین ترتیب با همدیگر کوپل می شوند. نتیجه حل مرز مغروق در شکل ۱۳ مشاهده می شود. در شکل ۱۳ کانتور اندازه بردار سرعت در دامنه حل و در زمان 0.4 ثانیه دیده می شود.

۷. بحث و جمع‌بندی

روش مرز مغروق روشی نوین و کمتر شناخته شده برای حل مسائل برهم‌کنش سازه سیال است. یکی از مصداق‌های مهم مسائل برهم‌کنش سازه سیال مسئله ارتعاش ناشی از گردابه است. به‌طور کلی مهم‌ترین نوع ناپایداری‌های آیرودینامیکی یا هیدرودینامیکی به‌صورت ارتعاشات منظم رخ می‌دهند. همین قضیه باعث می‌شود که در استحصال انرژی یا کاهش ارتعاشات به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار بگیرند. با معرفی و پیشگامی روش مرز مغروق گستره‌ای از مسائل ارتعاشی از این دست را می‌توان به‌طور بهینه‌تری حل کرد.

در این مقاله ابتدا مسئله ارتعاش ناشی از گردابه استوانه‌ها مطرح شد. توجه شود که این مسئله یکی از ده‌ها مسئله‌ی ارتعاشی است که می‌توان با این روش بررسی نمود. سپس روش مرز مغروق معرفی گشت و روابط آن تشریح شد. بعد محیط اجرا و پیاده‌سازی این روش توضیح داده شد. در نهایت یک مسئله ارتعاش ناشی از گردابه در استوانه برای نشان دادن توانایی روش حل شد.

روش مرز مغروق با سرعت بالاتری که در حل مسائل FSI نشان می‌دهد، می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش‌های فعلی حل مسائل FSI باشد. این روش تا به حال تجاری‌سازی نشده و هنوز در مرحله تکوین آکادمیک مانده است. دلیل این امر پیچیدگی‌های ریاضی روش است که هنوز در دانشکده‌های مهندسی فراگیر نشده است. سرعت بالاتر حل می‌تواند منجر به استفاده از این روش با رویه‌های عددی با دقت بالاتر شود. همچنین کاهش تعداد دفعات تشکیل شبکه منجر به حل مسائل دارای حرکت غیرخطی می‌گردد. حل مسائل چند جسمی نیز با این روش بهینه می‌شود. مهم‌ترین مزیت این روش تحلیل مسائل دارای هندسه پیچیده است. تقریباً تمام مسائل واقعی شامل هندسه‌ای پیشرفته و پیچیده هستند که به این ترتیب این روش به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای آنها می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد. از حل مسئله دیده شد که زمان حل مرز مغروق بسیار کمتر از روش عادی است.



شکل ۱۳. کانتور سرعت در شبیه‌سازی ارتعاش ناشی از گردابه توسط روش مرز مغروق برای یک سیلندر در کانال

شبکه‌های مربعی اوپلری در شکل ۱۳ دیده می‌شوند. در این روش شبکه‌های سیال از ابتدا تا انتهای حل ثابت ماندند که برخلاف حل در شکل ۱۰ است که شبکه‌ها در طول حل به‌صورت دینامیکی تغییر کردند و شکل تغییر کرده خود را در هر گام زمانی به مرحله بعدی فرستادند. روش مرز مغروق به‌خاطر نداشتن این گام، بسیار سریع‌تر عمل می‌کند.

تعداد ۱۲۸ سلول در راستای افقی و همین تعداد در راستای عمودی مطابق شکل ۱۳ برای وضوح بهتر می‌تواند افزایش یابد. البته به این دلیل که در اینجا هدف معرفی روش و نشان دادن سلول‌ها است، این تعداد سلول مناسب به‌نظر می‌رسد. حل ۵ ثانیه از شبیه‌سازی با روش اوپلری لاگرانژی دلخواه که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود ۳۶ ساعت زمان می‌برد. این درحالی‌است که زمان حل برای روش مرز مغروق تحلیل مشابه دو بعدی برای حدود یک ثانیه، ۲۵ دقیقه زمان می‌برد. هر دو تحلیل بر روی یک کامپیوتر شخصی مشابه انجام شده‌اند.

به‌عنوان نتیجه می‌توان گفت که زمان حل با روش مرز مغروق بسیار کمتر (تقریباً یک دهم) روش عادی است که این مسئله استفاده از این روش را کاملاً توجیه‌پذیر می‌کند. از دشواری و پیچیدگی استفاده از روش همچنان به‌عنوان نقطه ضعف آن می‌توان نام برد.

در آینده‌ای نه چندان دور به‌عنوان روش اصلی حل مسائل برهم‌کنش سازه سیال مورد استفاده قرار بگیرد.

روش مرز مغروق روشی مناسب برای حل مسائل برهم‌کنش سازه سیال است که هنوز به‌طور کاربردی و وسیع وارد مطالعات نشده است. با توجه به مزایای این روش، پیش‌بینی می‌شود که

۸. مأخذ

- [1] Liu, Guijie, Haiyang Li, Zhaozun Qiu, Dingxin Leng, Zhixiong Li, and Weihua Li, "A mini review of recent progress on vortex-induced vibrations of marine risers", *Ocean Engineering*, 2020, Vol.195, p.106704.
- [2] Wang, Jia-song, Dixia Fan, and Ke Lin, "A review on flow-induced vibration of offshore circular cylinders", *Journal of Hydrodynamics*, 2020, Vol.32, no.3, pp.415-440.
- [3] Peskin, Charles S., "The immersed boundary method", *Acta numerica*, 2002, Vol.11, pp.479-517.
- [4] Raza, Syed Ahmad, Ming-Jyh Chern, Herman Susanto, and Yun-Hui Zhou, "Numerical investigation of the effects of a small fixed sphere in tandem arrangement on VIV of a sphere", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2020, Vol.206, p.104368.
- [5] Ji, Chunming, A. Munjiza, and J. J. R. Williams, "A novel iterative direct-forcing immersed boundary method and its finite volume applications", *Journal of Computational Physics*, 2012, Vol.231, no.4, pp.1797-1821.
- [6] Mittal, Rajat, and Gianluca Iaccarino, "Immersed boundary methods", *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 2005, Vol.37, pp.239-261.
- [7] Mittal, Rajat, Haibo Dong, Meliha Bozkurtas, F. M. Najjar, Abel Vargas, and Alfred Von Loebbecke, "A versatile sharp interface immersed boundary method for incompressible flows with complex boundaries", *Journal of computational physics*, 2008, Vol.227, no.10, pp.4825-4852.
- [8] Chen, Weilin, Chunming Ji, John Williams, Dong Xu, Lihong Yang, and Yuting Cui, "Vortex-induced vibrations of three tandem cylinders in laminar cross-flow: Vibration response and galloping mechanism", *Journal of Fluids and Structures*, 2018, Vol.78, pp.215-238.
- [9] Chen, Weilin, Chunming Ji, Dong Xu, Zhimeng Zhang, and Yuhuan Wei, "Flow-induced vibrations of an equilateral triangular prism at various angles of attack", *Journal of Fluids and Structures*, 2020, Vol.97, pp.103099.
- [10] Griffith, Martin D., and Justin S. Leontini, "Sharp interface immersed boundary methods and their application to vortex-induced vibration of a cylinder", *Journal of Fluids and Structures*, 2017, Vol.72, pp.38-58.
- [11] Zhang, Lucy, Axel Gerstenberger, Xiaodong Wang, and Wing Kam Liu, "Immersed finite element method", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2004, Vol.193, no.21-22, pp.2051-2067.
- [12] Garg, Hemanshu, Atul K. Soti, and Rajneesh Bhardwaj, "A sharp interface immersed boundary method for vortex-induced vibration in the presence of thermal buoyancy", *Physics of Fluids*, 2018, Vol.30, no.2, pp.023603.

- [13] Chen, Weilin, Chunng Ji, and Dong Xu., "Vortex-induced vibrations of two side-by-side circular cylinders with two degrees of freedom in laminar cross-flow", *Computers & Fluids*, 2019, Vol.193, pp.104288.
- [14] Wang, Mingyang, Eldad J. Avital, Xin Bai, Chunng Ji, Dong Xu, John JR Williams, and Antonio Munjiza, "Fluid–structure interaction of flexible submerged vegetation stems and kinetic turbine blades", *Computational Particle Mechanics*, 2019, pp.1-10.
- [15] Battista, Nicholas A., W. Christopher Strickland, Aaron Barrett, and Laura A. Miller, "IB2d Reloaded: A more powerful Python and MATLAB implementation of the immersed boundary method", *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, 2018, Vol.41, no.18, pp.8455-8480.

پی نوشت:

1. Fluid-Structure Interaction (FSI)
2. Vortex Induced Vibration
3. Wake Induced Vibration
4. Galloping
5. Flow-Induced Vibration (FIV)
6. Catenary
7. Axial
8. Computational Fluid Dynamics (CFD)
9. Wake Oscillator
10. Direct Numerical Simulation
11. Reynolds Averaged Navier Stokes
12. Large Eddy Simulation
13. Discrete Vortex Method
14. Eddy
15. Strip Theory
16. Pipeline
17. Immersed Boundary (IB)
18. Anisotropic
19. Solver
20. Implement
21. Higher Numerical Scheme
22. Amoeba
23. Benchmark
24. Karmen Vortex Shedding
25. Sharp Interface
26. Spectral Element
27. Computers & Fluids
28. Direct Forcing IB
29. Adams Bashforth
30. Interpolation
31. Distribution
32. Peskin
33. Monolithic
34. Partitioned
35. Deforming
36. SOLIDWORKS Software
37. Ansys
38. Fluent
39. OpenFOAM
40. License
41. Comsol