

بررسی جریان سیال و اثرات متقابل دو استوانه گذرنده از کنار هم با

استفاده از روش برهم‌نهادن شبکه‌ها

محسن ثقفیان^۱ و محمد رضائی علم^۲

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی اصفهان

(تاریخ دریافت: ۸۸/۰۸/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۸۹/۰۸/۱۷)

چکیده

در این مقاله، اثرات متقابل دو استوانه دایره‌ای یا مستطیلی گذرنده از کنار هم با استفاده از روش برهم‌نهادن شبکه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. معادلات جریان سیال به صورت دوبعدی و تراکم‌ناپذیر و بر مبنای روش حجم محدود حل می‌شوند. در این پژوهش چند روش تعیین نقاط پر و خالی و چند روش میان‌یابی برای مبادله اطلاعات بین شبکه‌ها مورد آزمایش قرار گرفته و بهترین روش که روشی موسوم به میان‌یابی بر پایه شار جرم است، معرفی شده است. علاوه بر آن، کار حاضر کارآمدی روش برهم‌نهادن شبکه‌ها در تحلیل جریان‌های حول اجسام متحرک را نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده با نتایج عددی موجود مقایسه شده‌اند. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که در یک بازه زمانی کوتاه هنگام عبور استوانه‌ها از کنار هم نیروی لیفت به صورت دافعه و جاذبه به استوانه‌ها وارد می‌شود. همچنین، نیروی درگ هنگام عبور استوانه‌ها از کنار هم کاهش می‌یابد و پس از عبور استوانه‌ها افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: اثر متقابل، روش برهم‌نهادن شبکه‌ها، استوانه

Numerical Investigation of Two Cylinders Passing each other, Using Overset Grid Method

M. Saghafian and M. Rezaee Alam

Dep't of Mech. Eng.

Isfahan Univ. of Tech.

(Received: 10 November, 2009; Accepted: 8 November, 2010)

ABSTRACT

In this paper, the interactions of flow over two circular or rectangular cylinders, passing by each other, have been investigated, using overset grids method. Two-dimensional incompressible governing fluid flow equations are solved using finite volume method. In this research, several interpolation methods have been tested to transfer data between grids. One of them called Mass flux base interpolation method has been presented. In addition, it is concluded that the overset grid method is very powerful to simulate fluid flow over moving bodies. The results are compared for lift, drag, and pressure coefficients with credential other numerical results. It is observed that in a short time interval, when two cylinders are passing by, a repulsion and then attraction force applies to each cylinder. In addition, drag force is reduced and then increased.

Keywords: Interaction, Overset Grid, Cylinder

۱- استادیار (نویسنده پاسخگو) : saghafian@cc.iut.ac.ir

۲- کارشناسی ارشد

۱- مقدمه

در سال ۲۰۰۳ میلادی راسل و وانگ^۴ با استفاده از روش شبکه کارتزین ضرایب درگ، لیفت، فشار و محل نقطه سکون را برای دو استوانه دایره‌ای گذرنده از کنار هم در عدد رینولدز ۴۰ محاسبه کردند.

در سال ۲۰۰۶ ژیا^۷ و همکارانش [۵] با استفاده از نرم‌افزار اورچر^۸ جریان حول دو استوانه را که پشت سر هم در میان دو ردیف استوانه حرکت می‌کنند، در عدد رینولدز ۱۰۰۰۰ بررسی کردند.

در سال ۲۰۰۶ ژو و وانگ^۹ [۶] با استفاده از روش مرزهای معلق^{۱۰} ضرایب درگ و لیفت را برای دو استوانه دایره‌ای گذرنده از کنار هم در عدد رینولدز ۴۰ محاسبه کردند.

در کار حاضر جریان آرام، دوبعدی و تراکم‌ناپذیر حول استوانه‌های دایره‌ای و مستطیلی متحرک عبور کننده از کنار یکدیگر با استفاده از روش برهم‌نهادن شبکه‌ها^{۱۱} به صورت عددی شبیه‌سازی شده است. ضرایب نیروهای وارده به آنها محاسبه و اثرات متقابل استوانه‌ها بر روی یکدیگر مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- معادلات حاکم

معادلات جریان حاکم بر مسئله معادلات بقاء جرم و مومنتم هستند که در هر یک از شبکه‌ها به‌طور مجزا حل می‌شوند. این معادلات به‌صورت زیر هستند:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + S_i. \quad (2)$$

در این معادلات، ν ضریب لزجت سینماتیکی و u_i نیز مؤلفه‌های سرعت و p فشار هستند. جمله S_i نیز جمله چشمه است که در صورتی که دستگاه مختصات شتاب‌دار باشد، برابر شتاب دستگاه مختصات است. این معادلات در هر دو شبکه اصلی و فرعی حل می‌شوند.

در این مطالعه عددی، برای منفصل کردن معادلات

بررسی جریان حول اجسام متحرک نسبت به هم کاربرد فراوانی در شاخه‌های مختلف علوم مهندسی دارد. از کاربردهای آن می‌توان به اثرات متقابل پره‌های استاتور و روتور در توربوماشین‌ها اشاره کرد. همچنین اثرات متقابل بال و بالچه در هواپیما و اثرات متقابل ذرات در حال حرکت در جریان سیال و اثرات ذرات روی یکدیگر و روی پارامترهای جریان از جمله موارد مورد توجه دیگر می‌باشد. وقتی دو قطار از کنار هم عبور می‌کنند، نیروی آیرودینامیکی ضربه‌ای به‌صورت جاذبه و دافعه به هم وارد می‌کنند که ممکن است منجر به ناپایداری قطار و از بین رفتن راحتی مسافری شود. این نیروها از پارامترهای مهم در طراحی ساختار قطار می‌باشد.

در سال ۱۹۹۳ میلادی ایکگاو^۱ [۱] و همکارانش اثرات متقابل دو استوانه دایره‌ای و دو قطار را در حالت دوبعدی و غیر ویسکوز و تراکم‌ناپذیر با استفاده از روش FEM/FDM بررسی کردند. آنها ضریب فشار را در طرفی که اجسام از کنار هم می‌گذرند، محاسبه کردند و متوجه تغییرات شدید آن هنگامی که از کنار هم می‌گذرند، شدند.

کیکوچی^۲ و همکارانش [۲] در سال ۱۹۹۶ میلادی اثرات متقابل دو کره را با استفاده از روش المان‌های مرزی^۳ بررسی کردند. آنها همچنین اشاره کرده‌اند که بررسی آزمایشگاهی حول اجسام با حرکت نسبی نسبت به هم دشوار است و این لزوم بررسی عددی را در این‌گونه مسائل نشان می‌دهد.

در سال ۱۹۹۸ میلادی شافر و سیر^۴ [۳] ضریب لیفت را برای دو استوانه مستطیلی گذرنده از کنار هم در عدد رینولدز ۲ با استفاده از روش علامتگذاری شبکه^۵ به‌دست آوردند. آنها مشاهده کردند که ضریب لیفت تا زمانی که دو استوانه به هم نرسیدند، تقریباً صفر است. با نزدیک شدن دو استوانه به هم مقدار ضریب لیفت تا ۶ افزایش می‌یابد. طی یک بازه زمانی کوتاه پس از آن مقدار ضریب لیفت تا ۳- کاهش می‌یابد. ضریب لیفت با دور شدن استوانه‌ها به سمت صفر میل می‌کند.

6- Russell and Wang

7- Xia

8- Overture

9- Xu and Wang

10- Immersed Interface

11- Overset Grid

1- Ikegawa

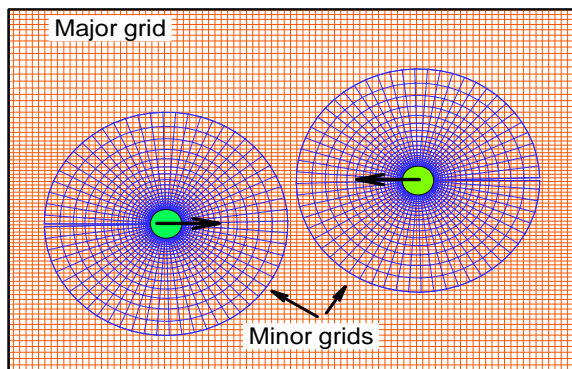
2- Kikuchi

3- Boundary Element Method

4- Schafer and Siber

5- Clicking Mesh

برهم‌نهادن شبکه‌ها علاوه بر گره‌هایی که در آنها معادلات جریان حل می‌شود، دو دسته گره دیگر وجود دارد که عبارت است از نقاط خالی^{۱۲} و نقاط پر^{۱۳} گره‌هایی که درون جسم واقع می‌شوند، نقاط خالی نام دارند و آنها را از محدوده محاسباتی خارج می‌کنند. در این روش معادلات در هر شبکه به‌طور مستقل حل می‌شود و اطلاعات بین شبکه‌ها باید با روش مناسبی انتقال پیدا کند. برای این کار گره‌هایی که نقاط پر نام دارند، در هر شبکه مشخص می‌شوند تا اطلاعات را از شبکه‌های دیگر از طریق میان‌یابی دریافت کنند. در شبکه‌های فرعی نقاط پر در مرز بیرونی واقع شده‌اند. همچنین در شبکه اصلی ردیفی از نقاط که اطراف نقاط خالی را می‌پوشانند نیز جزء نقاط پر می‌باشند.



شکل (۱): شبکه‌های اصلی و فرعی.

۳-۱- الگوریتم جستجو

برای اینکه نقاط پر اطلاعات را از شبکه دیگر دریافت کنند باید از یک الگوریتم سریع برای جایابی نقاط پر در شبکه‌ای که از آن اطلاعات را دریافت می‌کند، استفاده شود. به‌عنوان مثال برای پیدا کردن سلول مربوط به نقطه P در شکل ۲ از یک نقطه دلخواه همانند $G_{i,j}$ که با دایره توپر نشان داده شده است شروع می‌کنیم. سپس باید بررسی کنیم آیا نقطه P داخل یکی از چهار مثلث ایجاد شده به‌وسیله نقاط $G_{i,j}$ و $G_{i\pm 1,j}$ و $G_{i,j\pm 1}$ قرار دارد. برای این منظور، می‌توان مختصات هر نقطه در داخل یک مثلث را به‌صورت یکتا برحسب مختصات سه راس آن به‌صورت زیر نوشت:

12- Hole Points
13- Fringe Points

دیفرانسیل از روش حجم محدود در یک شبکه هم مکان^۱ و برای حل میدان جریان از الگوریتم سیمپل سی^۲ با شبکه هم مکان^۳ استفاده می‌شود. برای محاسبه جملات جابه‌جایی از روش کوئیک^۴ و برای محاسبه تغییرات زمانی از روش کرانک - نیکلسون^۵ استفاده می‌شود. برای ممانعت از نوسانات عددی از روش رای - چو^۶ استفاده شده است.

۳- روش برهم‌نهادن شبکه‌ها

از روش‌هایی که برای بررسی عددی جریان حول اجسام متحرک مورد استفاده قرار می‌گیرد، می‌توان به روش‌های لاگرانژی اوپلری اختیاری^۷، چند بلوکی لغزان^۸ و علامت-گذاری شبکه اشاره کرد. در روش ALE بعد از حرکت جسم، تولید شبکه مجدد انجام می‌گیرد. در روش چند بلوکی لغزان از چند شبکه برای پوشاندن تمام محدوده محاسباتی استفاده می‌شود. در این روش مرزهای میان شبکه‌ها باید برهم منطبق باشند. از این رو تولید شبکه‌ها در این روش کاملاً مستقل نمی‌باشند. همچنین در هر گام زمانی بعد از حرکت شبکه حول جسم متحرک باید شبکه مجدداً تولید شود تا مرزها برهم منطبق شوند. روش علامتگذاری شبکه قابلیت بررسی هندسه‌های پیچیده را ندارد [۳]. برای اجتناب از تولید شبکه در هر گام زمانی و همچنین تولید شبکه‌ها به‌طور مستقل و منطبق به بدنه^۹ و قابلیت بررسی جریان در مسائل پیچیده می‌توان از روش برهم‌نهادن شبکه‌ها استفاده کرد.

در این روش همانند آنچه که در شکل ۱ نشان داده شده از یک شبکه ساده مستطیلی از نوع H برای پوشاندن تمام محدوده محاسباتی استفاده می‌شود که به آن شبکه اصلی^{۱۰} می‌گویند. از یک سری شبکه‌های منطبق به بدنه حول اجسام استفاده می‌شود که شبکه فرعی^{۱۱} نامیده می‌شوند. این شبکه‌ها قابلیت حرکت نسبت به هم را دارا می‌باشند. در روش

- 1- Collocated
- 2- SIMPLEC
- 3- Co-located
- 4- QUICK
- 5- Crank-Nicolson
- 6- Rhie-Chow
- 7- Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE)
- 8- Sliding Multiblock
- 9- Body Fitted
- 10- Major Grid
- 11- Minor Grid

فلاکس مومنتم روی مرزهای شبکه نیز باعث نوسانات غیر فیزیکی در نیروهای محاسبه شده بر حسب زمان (در مسائل غیر دائم) می شود. روش های میان یابی مورد آزمایش در کار حاضر عبارت است از:

۱- میان یابی مثلثی: برای انتقال اطلاعات به نقطه پر از α و β و γ به دست آمده از جایابی در رابطه (۳) استفاده می کنیم که به این میان یابی، میان یابی مثلثی می گویند (رابطه ۴) [۷].

$$\phi_p = \alpha\phi_{i,j} + \beta\phi_{i\pm 1,j} + \gamma\phi_{i,j\pm 1} \quad (4)$$

که در آن، ϕ_p مقداری میان یابی شده برای پارامتر دلخواه ϕ (مثلا مؤلفه های سرعت) است. $\phi_{i,j}$ ، $\phi_{i\pm 1,j}$ و $\phi_{i,j\pm 1}$ مقادیر ϕ در گره های احاطه کننده نقطه P هستند. در هنگام میان یابی مؤلفه های سرعت از یک شبکه به شبکه دیگر باید توجه کرد که مقادیر سرعت نسبت به دستگاه مختصات شبکه دریافت کننده محاسبه شود. برای مثال، اگر سرعت در یک نقطه پر از شبکه فرعی، توسط میان یابی از شبکه اصلی u_1 و سرعت جسم هم u_2 باشد، با توجه به اینکه دستگاه مختصات با سرعت جسم حرکت می کند، باید سرعت $u_1 - u_2$ را به گره مورد نظر نسبت داد.

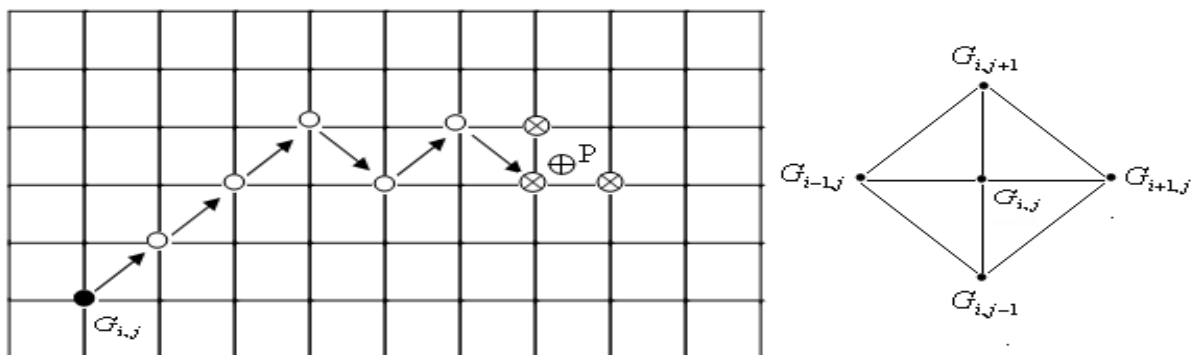
۲- میان یابی مستقیم: این روش ساده ترین راه انتقال اطلاعات از یک شبکه به شبکه دیگر است. در این روش مقدار نزدیک ترین گره از شبکه ای که از آن اطلاعات دریافت می شود، به نقطه پر نسبت داده می شود [۸].

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{i,j} & x_{i\pm 1,j} & x_{i,j\pm 1} \\ y_{i,j} & y_{i\pm 1,j} & y_{i,j\pm 1} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} \quad (3)$$

با حل دستگاه معادلات فوق α و β و γ به دست می آیند. اگر α و β و γ به دست آمده از حل دستگاه معادلات (۲) برای هر کدام از مثلث ها مثبت و کوچک تر از یک باشد، نقطه P درون مثلث واقع شده و بنابراین گره های احاطه کننده آن مشخص شده است. در غیر این صورت همانند شکل ۲ با توجه به خط واصل بین $G_{i,j}$ و P، $G_{i,j}$ باید جابه جا شود و مجدداً بررسی شود آیا نقطه P داخل یکی از چهار مثلث ایجاد شده به وسیله نقاط $G_{i,j}$ و $G_{i\pm 1,j}$ و $G_{i,j\pm 1}$ قرار دارد. این پروسه آن قدر تکرار می شود تا سلول احاطه کننده پیدا شود [۷].

۳-۲- میان یابی اطلاعات

همان طور که ذکر شد، نقاط پر که در داخل محدوده محاسباتی قرار دارند، اطلاعات را از طریق میان یابی از شبکه های دیگر دریافت می کنند. برای مثال هر نقطه پر در شبکه فرعی اطلاعات را (برای نمونه مؤلفه های سرعت) از شبکه اصلی دریافت می کند. پس از مشخص شدن گره های احاطه کننده نقطه پر P با میان یابی اطلاعات به نقطه P نسبت داده می شود. انتقال اطلاعات با میان یابی می تواند بقای جرم و مومنتم را بر روی مرزها از بین برده و نوسانات غیر فیزیکی در فلاکس مومنتم روی مرزهای شبکه از یک گام زمانی تا گام زمانی بعدی ایجاد کند. نوسانات غیر فیزیکی در



شکل (۲): مسیر جستجو و مثلث ایجاد شده برای پیدا کردن مرکز سلول های احاطه کننده نقاط پر.

قدر تکرار می‌شود تا معیار هم‌گرایی ارضا شود. برای گام زمانی بعدی باید مکان جدید مرکز استوانه‌ها تعیین شود و تمام مراحل بالا عیناً تکرار شود.

۳-۴- شرایط مرزی

شکل ۳ دامنه حل اولیه را برای دو استوانه دایره‌ای گذرنده از کنار هم نشان می‌دهد. ابعاد نشان داده شده در شکل ۳ نسبت به قطر استوانه‌ها بی‌بعد شده‌اند. در شبکه اصلی از شرط مرزی دیوار برای تمامی مرزهای بالا، پایین، راست و چپ محدوده استفاده شده است. همچنین نقاط پر که در داخل محدوده محاسباتی قرار دارند، اطلاعات را از طریق میان‌یابی از شبکه‌های فرعی دریافت می‌کنند.

در شبکه‌های فرعی از شرط عدم لغزش روی سطح استوانه‌ها استفاده می‌شود. گره‌های روی مرز خارجی شبکه‌های فرعی نیز اطلاعات را از طریق میان‌یابی از شبکه اصلی دریافت می‌کنند.

۴- نتایج

در این قسمت نتایج مربوط به مطالعه اثرات متقابل دو استوانه دایره‌ای گذرنده از کنار هم و اثرات متقابل دو استوانه مستطیلی گذرنده از کنار هم ارائه شده است.

۴-۱- اثرات متقابل دو استوانه دایره‌ای گذرنده از

کنار هم

ابتدا به بررسی عددی دو استوانه دایره‌ای گذرنده از کنار هم در عدد رینولدز ۴۰ می‌پردازیم. در زمان بی‌بعد اولیه $\hat{t} = tu/D = 0$ (قطر و u سرعت استوانه است) سرعت جریان در ابتدا در شبکه‌های اصلی و فرعی صفر می‌باشد. در $\hat{t} = 0$ مختصات مرکز استوانه پایینی (۸۰-) و مختصات مرکز استوانه بالایی (۸۱/۵) است. استوانه پایینی با سرعت (۱) و استوانه بالایی با سرعت (-۱) حرکت می‌کند. استوانه‌ها در $\hat{t} = 8$ به هم می‌رسند و روند حل تا $\hat{t} = 16$ ادامه پیدا می‌کند. پس از مطالعه بر روی شبکه تعداد گره‌های شبکه اصلی و فرعی به ترتیب 250×202 و 122×44 انتخاب شده است. علاوه بر آن از گام زمانی بدون بعد ۰/۰۱ استفاده می‌شود.

۳- میان‌یابی عکس فواصل: در میان‌یابی عکس فواصل مقادیر رئوس سلول احاطه کننده نقطه پر به نسبت فاصله‌ای که از نقطه پر دارند، به نقطه پر انتقال داده می‌شود. به عبارتی راس‌هایی که نزدیک‌تر به نقطه P هستند، از اثردهی بیشتری برخوردارند [۸].

۴- میان‌یابی دو خطی مرتبه دو [۹].

۵- میان‌یابی سه خطی مرتبه سه [۹].

۶- میان‌یابی بر پایه شار جرم ۱ (MFBI): روش‌های میان‌یابی ذکر شده تاکنون جزء دسته میان‌یابی‌های ریاضی محسوب می‌شوند و تنها بر اساس پارامترهای ریاضی انجام می‌گیرند. با استفاده از روش میان‌یابی بر پایه شار جرم ۱ مؤلفه‌های سرعت روی مرزها با اطمینان از بقای جرم با دقت مرتبه دوم در طول مرزها محاسبه می‌شوند. ایده روش MFBI توسط تانگ^۴ و همکارانش ارائه شده است [۱۰]. روشن است که اعمال این روش در کد عددی پیچیده‌تر و حجم محاسبات نیز برای میان‌یابی بیشتر است و

۷- میان‌یابی بر پایه شار جرم ۲ (MFBI2): میان‌یابی MFBI2 برگرفته از میان‌یابی MFBI می‌باشد و توسط تانگ ارائه شده است. میان‌یابی‌های MFBI و MFBI2 هر شار جرم و مومنتم را در طول مرزهای شبکه با دقت مرتبه دوم تولید می‌کند [۱۰].

۳-۳- روش حل

روش حل مسئله به این ترتیب است که با مشخص بودن مکان استوانه‌ها نقاط پر و خالی شبکه‌های اصلی و فرعی تعیین می‌شوند. پس از آن توسط الگوریتم جستجو گره‌های احاطه کننده نقاط پر شبکه اصلی در شبکه‌های فرعی و بالعکس مشخص می‌شوند. سپس با میان‌یابی از شبکه‌های فرعی و تکمیل شرایط مرزی برای شبکه اصلی، معادلات جریان در شبکه اصلی حل می‌شوند. بعد از آن با میان‌یابی از شبکه اصلی و تکمیل شدن شرایط مرزی برای شبکه‌های فرعی، معادلات جریان در شبکه‌های فرعی حل می‌شوند. این پروسه در یک گام زمانی برای شبکه‌های فرعی و اصلی آن

1- Bilinear

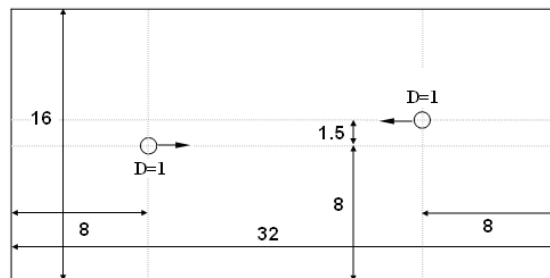
2- Bicubic

3- Mass Flux Base Interpolation (MFBI)

4 - Tang

تعدادی نقطه خالی در این شبکه‌ها ایجاد می‌شود. در اطراف این نقاط خالی باید تعدادی نقطه پر علاوه بر نقاط روی مرز بیرونی که نقطه خالی در نظر گرفته نشده‌اند، مشخص کرد. شکل ۴ (ستون راست) نقاط پر و خالی شبکه مربوط به استوانه بالایی و خطوط جریان را در یک لحظه خاص عبور دو استوانه نشان می‌دهد. نقاط پری که در اطراف نقاط خالی قرار دارند (با علامت دایره نشان داده شده‌اند) اطلاعات را از شبکه فرعی دیگر دریافت می‌کنند. قبل از حل معادلات جریان باید بقای جرم را روی مرز بیرونی شبکه‌های فرعی که از طریق میان‌یابی اطلاعات را دریافت کرده‌اند، اعمال کرد. بنابراین قبل از رسیدن هر استوانه به مرز شبکه فرعی مربوط به استوانه دیگر تنها روی مرز بیرونی شبکه فرعی بقاء جرم اعمال می‌شود. با رسیدن هر استوانه به مرز شبکه فرعی مربوط به استوانه دیگر تعدادی از گره‌های روی مرز نقطه خالی شده و از محدوده محاسباتی خارج می‌شوند. در این حالت، مرزی که باید بقای جرم در آن برقرار شود شامل قسمت‌هایی از مرز بیرونی شبکه فرعی و وجه‌هایی از حجم کنترل مربوط به نقاط پر که میان نقطه پر و گره‌هایی که در داخل محدوده قرار دارند، می‌باشد. با وارد شدن کامل استوانه به داخل شبکه فرعی استوانه دیگر علاوه بر مرز بیرونی باید در مرز اطراف نقاط پر اطراف نقاط خالی نیز بقاء جرم قبل از حل معادلات جریان ارضاء شود. در هر گام زمانی نقاط پر و خالی هر شبکه تعیین می‌شود.

۲- در روش برهم‌نهادن شبکه‌ها بین شبکه‌های مختلف نواحی مشترک وجود دارد. از مشکلات مهم در روش برهم‌نهادن شبکه‌ها تعداد گره‌های زیاد مورد استفاده در حل است. در این روش معمولاً تنها نقاط واقع در نواحی صلب حذف می‌شوند و نواحی برهم افتاده حذف نمی‌شوند. این در حالی است که نواحی برهم افتاده از تعداد زیادی گره و المان برخوردار می‌باشند. بنابراین در این روش نیازمند به ذخیره‌سازی بسیار زیاد اطلاعات می‌باشد. از طرف دیگر حل برای گره‌های واقع بر ناحیه برهم افتاده، هم در شبکه اصلی و هم در شبکه فرعی انجام می‌گیرد که افزایش زمان حل را در پی خواهد داشت. بنابراین برای کاهش زمان حل باید هم‌پوشانی شبکه‌های مختلف را به حداقل ممکن رساند.

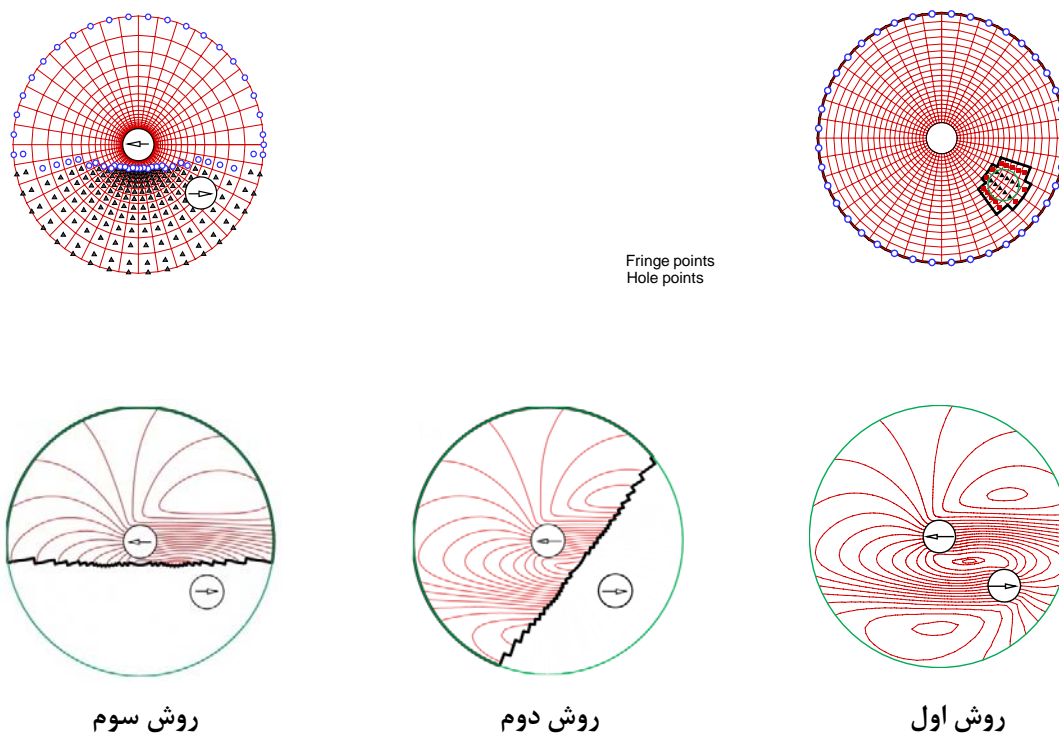


شکل (۳): هندسه اولیه دو استوانه مستطیلی گذرنده از کنار هم.

منحنی‌های ضرایب لیفت و درگ به دست آمده با روش برهم‌نهادن شبکه‌ها برحسب زمان نوسانات غیر فیزیکی دارند. این نوسانات نامنظم فرکانس بالا فقط وقتی که شبکه‌های فرعی متحرک باشند، دیده می‌شوند. از دلایل به وجود آمدن این نوسانات می‌توان به از بین رفتن بقاء جرم در طول مرزها در اثر میان‌یابی اشاره کرد. همچنین خطای میان‌یابی باعث ایجاد نوسان در مومنتم ورودی و خروجی از دامنه حل می‌شود. با توجه به اینکه اختلاف مومنتم ورودی و خروجی نیروی وارده به جسم را تعیین می‌کند، نیروهای وارده به جسم هم دارای نوسان خواهند بود. از عوامل دیگر این نوسانات گره‌هایی هستند که در اثر حرکت جسم از ناحیه‌ای که جسم واقع شده به ناحیه سیال و بالعکس منتقل می‌شوند [۸]. هنگامی که گره‌ای از ناحیه‌ای که جسم واقع شده به ناحیه سیال وارد می‌شود، یک اثر فوری روی انتقال مومنتم می‌گذارد و این اثر منجر به نوسانات نیرو می‌شود. نوسانات غیر فیزیکی ضرایب نیرو در روش شبکه بولتزمن^۱ [۱۱]، روش ورتکس^۲ [۱۲] و روش شبکه کسارتزینی [۱۳] نیز گزارش شده است. در کار حاضر سه روش برای تعیین نقاط پر و خالی مورد آزمایش قرار گرفته است. در روش‌های زیر زمان مورد نیاز محاسبات و نوسانات غیر فیزیکی مشخص کننده روش ارجح در این مسئله به خصوص است:

۱- همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، فاصله عمودی میان مرکز دو استوانه $1/5$ است. بنابراین هر کدام از استوانه‌ها از میان شبکه فرعی استوانه دیگر عبور می‌کند. با عبور استوانه‌ها از میان شبکه فرعی مربوط به استوانه دیگر

1- Lattice Boltzmann Method
2- Vortex Method



شکل (۴): نقاط پر و خالی و خطوط جریان شبکه مربوط به استوانه بالایی با سه روش تعیین نقاط پر و خالی.

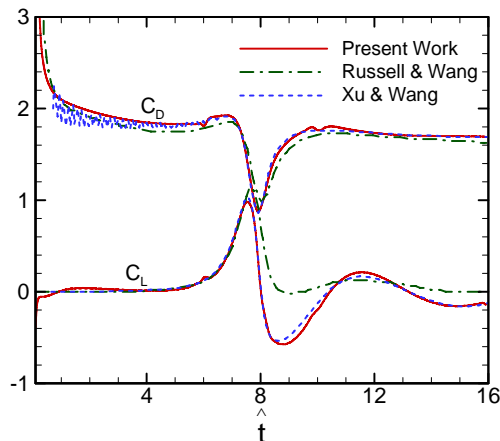
وسط) نقاط پر و خالی شبکه مربوط به استوانه بالایی و خطوط جریان را در یک لحظه خاص عبور دو استوانه نشان می دهد و

۳- در روش سوم گره‌هایی که استوانه شبکه فرعی دوم از آن عبور خواهد کرد، به‌عنوان نقطه خالی در نظر گرفته می‌شوند. نقاط پر جدیدی هم روی مرز این نقاط تعریف می‌شود. بنابراین نقاط پر و خالی هر یک از شبکه‌های فرعی در حین حرکت تغییر نمی‌کند. شکل ۴ ستون چپ نقاط پر و خالی شبکه مربوط به استوانه بالایی و خطوط جریان حاصل را نشان می‌دهد.

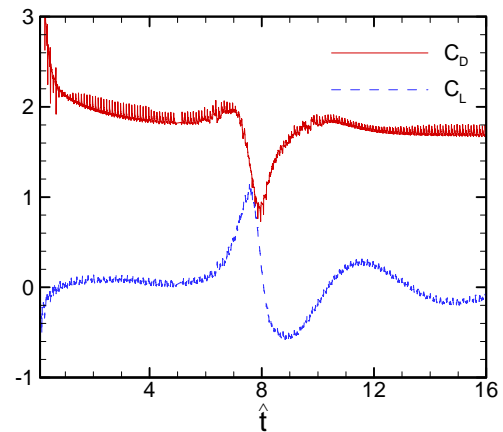
در بین سه روش فوق، روش سوم زمان محاسبات و نوسانات غیر فیزیکی را کاهش می‌دهد.

شکل ۵ تغییرات زمانی ضرایب لیفت و درگ را در روش سوم نشان می‌دهد. با این وجود نوسانات کمتر این روش، برای نمایش، نوسانات باقی‌مانده فیلتر می‌شوند.

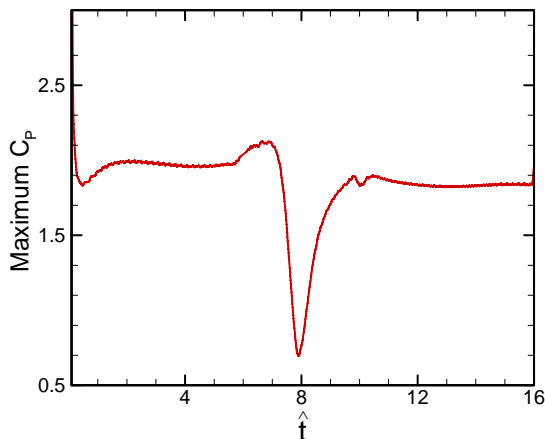
در کدهای پگاسوس و اورچر اندازه سلول‌های برهم افتاده به‌عنوان معیار برای بهینه‌سازی به‌کار رفته است. یک روش این است که در نواحی برهم افتاده سلولی را که اندازه آن کوچک‌تر است، در محدوده حل باقی بماند و سلول با اندازه بزرگ‌تر از محدوده حل خارج شود. در مرجع [۱۴] اندازه سلول در جهت عمود بر مرز به‌عنوان معیار به‌کار رفته است. در مورد دو استوانه دایره‌ای مورد بررسی، اندازه سلول‌ها در جهت عمود بر مرز و حجم سلول‌ها در فواصل یکسان از سطح استوانه یکسان هستند. بنابراین برای سلول‌های واقع شده در قسمت مشترک بین دو شبکه فرعی، سلولی که فاصله‌اش از سطح استوانه مربوط به شبکه فرعی دیگر کمتر از استوانه مربوط به همان شبکه باشد، به‌عنوان نقطه خالی در نظر گرفته می‌شود، در غیر این صورت در محدوده محاسباتی باقی می‌ماند. در این روش نیز مانند روش اول در هر گام زمانی نقاط پر و خالی هر شبکه تعیین می‌شود. شکل ۴ (ستون



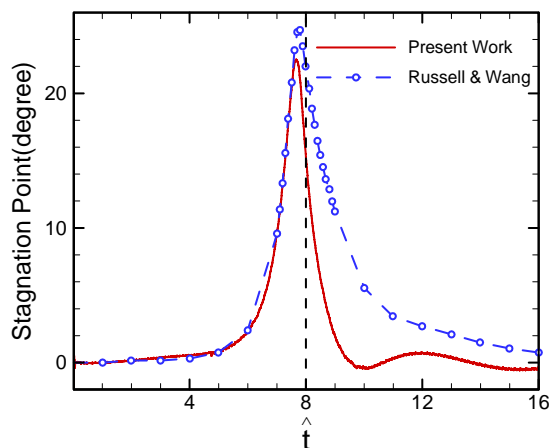
شکل (۶): نمودار ضریب درگ بر حسب زمان برای استوانه پایینی.



شکل (۵): تغییرات زمانی ضرایب لیفت و درگ در روش سوم.



شکل (۷): ضریب فشار بیشینه بر حسب زمان برای استوانه پایینی.



شکل (۸): زاویه نقطه سکون بر حسب زمان برای استوانه پایینی.

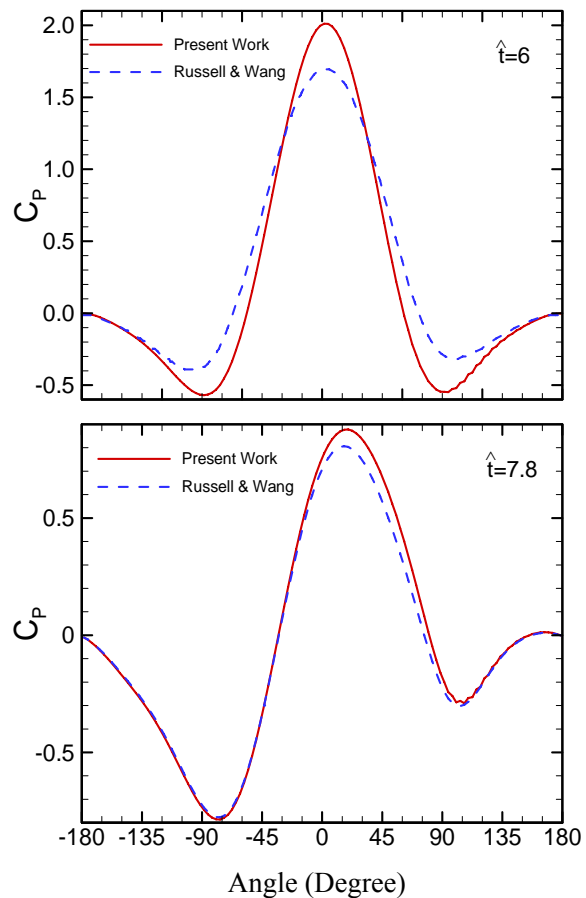
شکل ۶ تغییرات ضرایب درگ و لیفت را برای استوانه پایینی نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ضریب درگ کار حاضر تطابق خوبی را با نتایج ارائه شده توسط ژو و وانگ (با استفاده از روش مرزهای معلق) و راسل و وانگ (با استفاده از روش شبکه کارتزینی) دارد. ضریب لیفت نیز با نتایج ژو و وانگ مطابقت بسیار خوبی دارد (لازم به توضیح است که نتایج تجربی جهت مقایسه یافت نشد). هنگامی که دو استوانه به هم نزدیک می‌شوند، مقدار ضریب درگ کاهش می‌یابد. از دلایل آن می‌توان به کاهش فشار بیشینه در نقطه سکون و همچنین جابه‌جا شدن نقطه سکون به سمتی که استوانه‌ها از کنار هم می‌گذرند، اشاره کرد. کاهش فشار بیشینه در نقطه سکون در شکل ۷ برای استوانه پایینی نشان داده شده است. جابه‌جا شدن نقطه سکون به سمتی که استوانه‌ها از کنار هم می‌گذرند نیز در شکل ۸ نشان داده شده و با نتایج راسل و وانگ مقایسه شده است. شکل ۸ تغییرات زمانی زاویه نقطه سکون را برای استوانه پایینی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود با نزدیک شدن دو استوانه نقطه سکون به سمتی که استوانه‌ها از کنار هم می‌گذرند، جابه‌جا می‌شود. حداکثر جابه‌جایی نقطه سکون ۲۲ درجه می‌باشد که در $\hat{t} = 7/8$ اتفاق می‌افتد.

می‌گذرند، قرار دارد تحت تأثیر استوانه دوم قرار می‌گیرد. هنگامی که استوانه‌ها همانند آنچه که در شکل ۱۰ در $\hat{t} = 8$ نشان داده شده کنار هم قرار می‌گیرند یک ورتکس میان آنها ایجاد می‌شود. با افزایش فاصله میان استوانه‌ها گردابه میان آنها کشیده می‌شود تا جایی که به دو قسمت تبدیل می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۱۰ در $\hat{t} = 16$ نشان داده شده علاوه بر ورتکس‌های که در بالا و پایین استوانه‌ها تشکیل شده یک ورتکس نیز در بین استوانه‌ها تشکیل می‌شود که باعث ایجاد نوسان در لیفت بعد از عبور استوانه‌ها از کنار هم دیگر می‌شود. این مسئله در شکل ۶ به‌خوبی مشاهده می‌شود. در خطوط جریان نشان داده شده به‌وسیله راسل و وانگ این ورتکس تشکیل نشده و ضریب لیفت بعد از دور شدن استوانه‌ها از کنار یک دیگر به سمت صفر میل می‌کند. مقدار ضریب لیفت تا زمان رسیدن استوانه‌ها به هم تقریباً صفر است. سپس به‌علت ناحیه پر فشار تشکیل شده بین استوانه‌ها به بیشینه مقدار خود می‌رسد. پس از آن در یک بازه زمانی کوتاه به‌علت ناحیه کم فشار تشکیل شده بین استوانه‌ها به کمینه مقدار خود می‌رسد. (شکل ۶)

شکل ۱۱ کانتورهای ضریب فشار را برای دو استوانه دایره‌ای در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد. هنگامی که دو استوانه به هم نزدیک می‌شوند، همانند آنچه که در شکل ۱۱ در $\hat{t} = 7$ نشان داده شده‌است، ناحیه‌ای پر فشار بین آنها ایجاد می‌شود. این ناحیه پر فشار باعث افزایش نیروی عمودی روی استوانه‌ها می‌شود که در جهت دفع استوانه‌ها از یکدیگر است. هنگامی که استوانه‌ها از کنار یکدیگر می‌گذرند، همانند آنچه که در شکل ۱۱ در $\hat{t} = 9$ نشان داده شده است، یک ناحیه کم فشار بین آنها (در اثر ورتکس تشکیل شده بین استوانه‌ها) شکل می‌گیرد. این ناحیه کم فشار منجر به نیروی جاذبه بین استوانه‌ها می‌شود. تغییرات زمانی نیروی لیفت در شکل ۶ این مسئله را تأیید می‌کند. بعد از اینکه دو استوانه از کنار هم عبور کردند، به‌علت ایجاد ناحیه کم فشار در پشت هر دو استوانه شکل ۱۱ همان‌طور که در شکل ۶ ملاحظه می‌شود، مقدار ضریب درگ افزایش پیدا می‌کند.

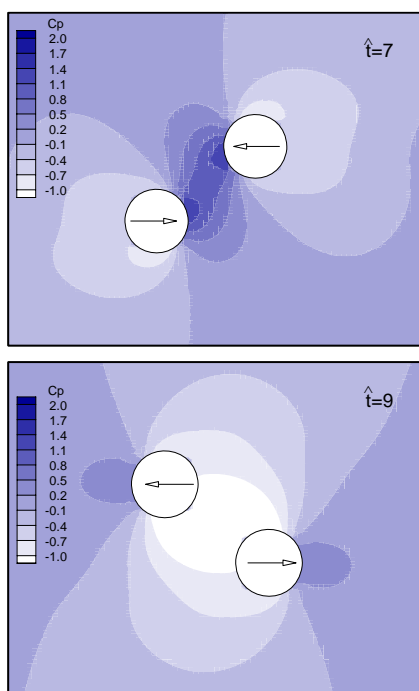
شکل ۹ توزیع ضریب فشار روی سطح استوانه پایینی را در $\hat{t} = 6$ و $\hat{t} = 7/8$ (یعنی قبل از رسیدن استوانه‌ها به هم) نشان می‌دهد. نتایج در هر دو زمان با نتایج ارائه شده توسط راسل و وانگ مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، مقدار ضریب فشار بیشینه قبل از رسیدن دو استوانه به همدیگر ($\hat{t} = 7/8$) نسبت به $\hat{t} = 6$ کمتر است.



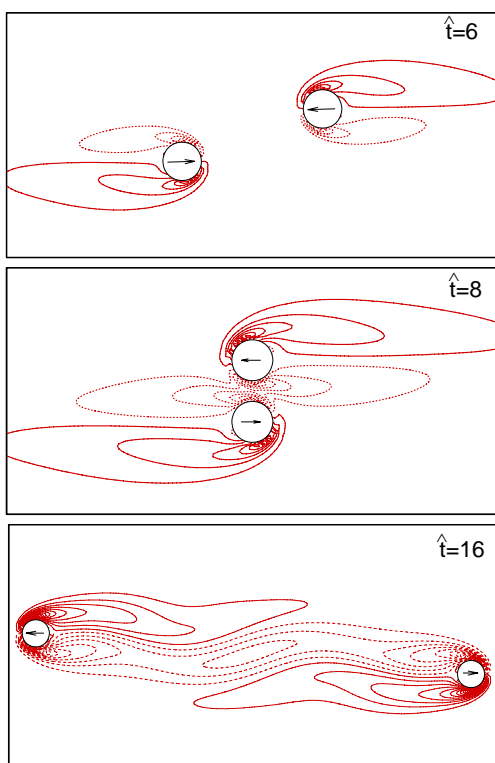
شکل (۹): نمودار توزیع ضریب فشار روی سطح استوانه پایینی در دو زمان متفاوت.

شکل ۱۰ میدان جریان را برای دو استوانه دایره‌ای گذرنده از کنار هم در زمان‌های مختلف با خطوط جریان از دید ناظر ساکن نشان می‌دهد.

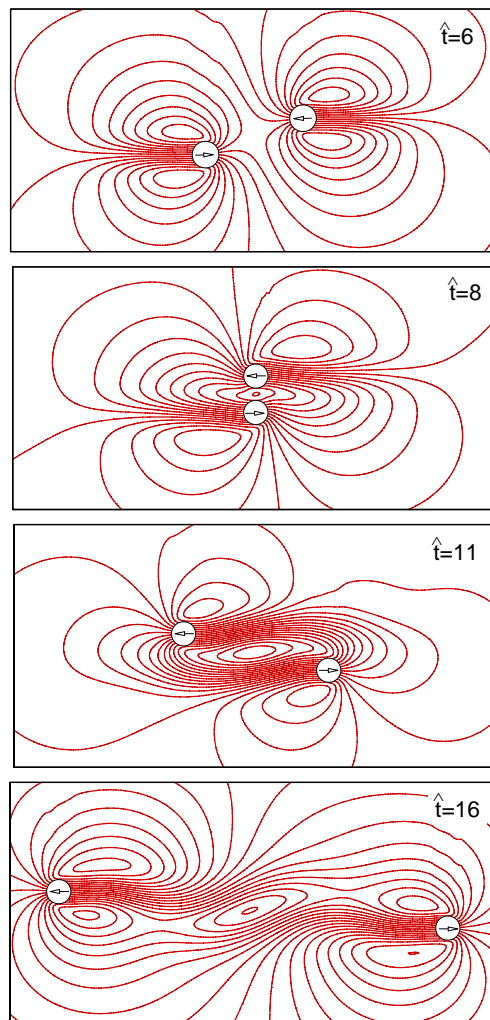
در زمان‌های اولیه ورتکس‌هایی در بالا و پایین هر استوانه قابل مشاهده‌اند. گردابه یا ورتکس در سمتی که از کنار هم



شکل (۱۱): کانتورهای ضریب فشار در دو زمان متفاوت.



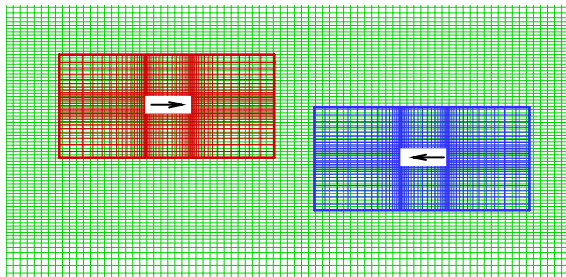
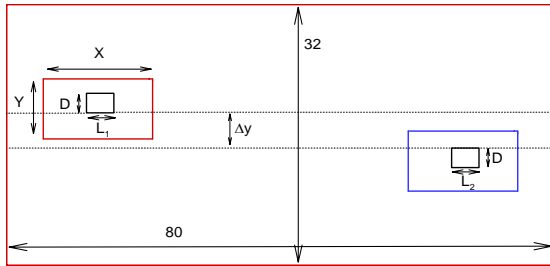
شکل (۱۲): کانتورهای ورتیسیتته برای دو استوانه دایره‌ای در زمان‌های مختلف.



شکل (۱۰): خطوط جریان در زمان‌های مختلف برای دو استوانه دایره‌ای گذرنده از کنار هم.

شکل ۱۲ کانتورهای ورتیسیتته را در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد. در این شکل ورتیسیتته‌های با علامت منفی با خط چین نشان داده شده‌اند. با رسیدن دو استوانه به هم ورتیسیتته‌های هم علامتی که در پایین استوانه بالایی و در بالای استوانه پایینی قرار دارند، یکدیگر را ظاهراً تقویت می‌کنند. در $\hat{t} = 16$ این کانتورها حضور یک ورتکس بین استوانه‌ها را تأیید می‌کند که می‌تواند یک عامل نوسان در لیفت بعد از عبور استوانه‌ها از کنار یکدیگر باشد. در نتایج ارائه شده به وسیله راسل و وانگ این ورتکس مشاهده نشده ولی تشکیل این ورتکس در نتایج ارائه شده توسط ژو و وانگ گزارش شده است.

استوانه مستطیلی گذرنده از کنار هم در $Re=2$ برای $\Delta y / D = 3$ حالت مختلف (مطابق با جدول ۱) حل شده و ضریب درگ آنها در شکل ۱۴ با هم مقایسه شده است. برای ادامه کار از شبکه مربوط به حالت ۱ استفاده شده است.



شکل (۱۳): هندسه اولیه مربوط به دو استوانه مستطیلی گذرنده از کنار هم و شبکه‌های اصلی و فرعی به صورت برهم نهاده.

در ابتدا دو استوانه مستطیلی گذرنده از کنار هم در عدد رینولدز ۲ ($Re = U_b D / \nu$) که D عرض استوانه‌ها و U_b سرعت استوانه می‌باشد) مورد بررسی قرار می‌گیرد. مشخصات شبکه‌های فرعی و اصلی که از آنها برای حل مسئله استفاده شده، مشابه حالت یک در جدول ۱ است.

در زمان بی‌بعد اولیه $\hat{t} = 0$ ($\hat{t} = t U_b / D$) سرعت در شبکه‌های اصلی و فرعی صفر است. در $\hat{t} = 0$ مختصات مرکز استوانه پایینی (۲- و ۳۰) و مختصات مرکز استوانه بالایی (۲ و ۳۰-) می‌باشد. این مختصات با D بی‌بعد شده‌اند. دو استوانه با سرعت یکسان در خلاف جهت یکدیگر حرکت می‌کنند. استوانه‌ها در $\hat{t} = 30$ به هم می‌رسند و حل تا $\hat{t} = 60$ ادامه پیدا می‌کند. روند حل جریان مشابه استوانه‌های دایره‌ای است.

۲-۴- اثرات متقابل دو استوانه مستطیلی گذرنده از کنار هم

در این بخش دو استوانه مستطیلی گذرنده از کنار هم مورد بررسی قرار می‌گیرند. در ابتدا مطالعه برای عدد رینولدز ۲ انجام می‌شود که برای آن نتایج عددی جهت مقایسه موجود است. در ادامه اثر فاصله استوانه‌ها از یکدیگر در هنگام عبور و اثر نسبت طول به عرض استوانه‌ها در عدد رینولدز ۵۰ مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در ادامه نیز تأثیر عدد رینولدز مورد بررسی قرار می‌گیرد. متأسفانه برای این بخش‌ها هیچ نتیجه عددی یا تجربی برای مقایسه یافت نشد.

شکل ۱۳ محدوده حل را برای دو استوانه مستطیلی گذرنده از کنار هم و شبکه‌های اصلی و فرعی به صورت برهم نهاده را نشان می‌دهد. هر یک از استوانه‌ها با سرعت U_b در جهت نشان داده شده در شکل ۱۳ حرکت می‌کند. عرض هر دو استوانه مستطیلی برابر D است. L_1 و L_2 طول استوانه‌های بالایی و پایینی هستند. ابعاد نشان داده شده برای شبکه اصلی که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، نسبت به عرض استوانه‌ها (D) بی‌بعد شده‌اند. طول و عرض شبکه‌های فرعی به ترتیب X و Y است. چنانچه در این شکل دیده می‌شود، حجم کنترل‌های شبکه فرعی در ناحیه اطراف استوانه و شبکه اصلی در ناحیه‌ای که استوانه‌ها حرکت می‌کنند از تراکم بیشتری برخوردار می‌باشند.

در شبکه اصلی از شرط مرز دیوار برای مرزهای راست و چپ و از شرط مرزی تقارن برای مرزهای بالا و پایین استفاده شده است. همچنین نقاط پر که در داخل محدوده محاسباتی قرار دارند اطلاعات را از طریق میان‌یابی از شبکه‌های فرعی دریافت می‌کنند. در شبکه فرعی از شرط عدم لغزش روی استوانه‌ها استفاده می‌شود. گره‌های روی مرز خارجی اطلاعات را از طریق میان‌یابی از شبکه اصلی دریافت می‌کنند. پارامترهای α و β نسبت طول به عرض هر یک از استوانه‌ها یا نسبت‌های منطری هستند که به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شوند.

$$\alpha = \frac{L_1}{D}, \quad \beta = \frac{L_2}{D} \quad (5)$$

جهت اطمینان خاطر از مناسب بودن اندازه‌های شبکه فرعی، تعداد گره‌ها و اندازه گام زمانی، مسئله عبور دو

جدول (۱): مشخصات شبکه‌های اصلی و فرعی برای مطالعه

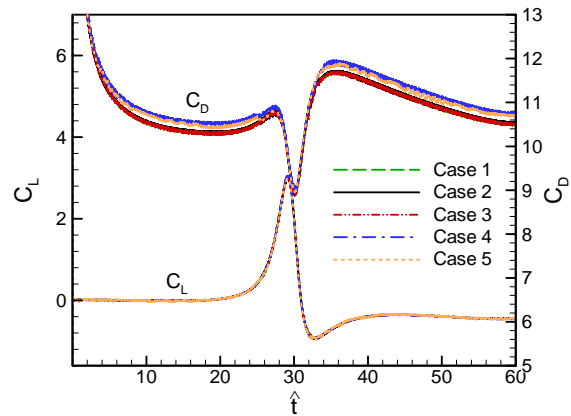
شبکه.

Δt	شبکه اصلی $n_i \times n_j$	شبکه‌های فرعی	α	β	$\frac{X}{D}$	$\frac{Y}{D}$	
۰/۰۱	۳۰۲ × ۱۶۲	۱۰۲ × ۶۲	۱	۱	۱۲	۴	حالت ۱
۰/۰۱	۳۰۲ × ۱۶۲	۱۰۲ × ۶۲	۱	۱	۱۴	۶	حالت ۲
۰/۰۰۵	۳۰۲ × ۱۶۲	۱۰۲ × ۶۲	۱	۱	۱۲	۴	حالت ۳
۰/۰۱	۳۵۲ × ۲۰۲	۱۲۵ × ۷۲	۱	۱	۱۲	۴	حالت ۴
۰/۰۱	۲۵۲ × ۱۲۲	۷۷ × ۵۲	۱	۱	۱۲	۴	حالت ۵

در شکل ۱۵ نمودار ضرایب لیفت و درگ برای میان‌یابی‌های ذکر شده نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، نوسانات غیر فیزیکی در روش‌های MFBI2 و MFBI1 نسبت به بقیه روش‌ها کمتر است که به خاطر دقت مرتبه دوم شارهای جرم و مومنت در طول مرزها با استفاده از این روش‌ها می‌باشد. میان‌یابی مستقیم که دقت پایین‌تری نسبت به بقیه روش‌ها دارد، دارای بیشترین نوسان غیر فیزیکی است. به‌منظور نمایش ضرایب نیرو نوسانات اندک باقی‌مانده نیز فیلتر می‌شوند. آخرین منحنی شکل ۱۵ ضرایب نیرو را پس از فیلتر شدن نشان می‌دهد.

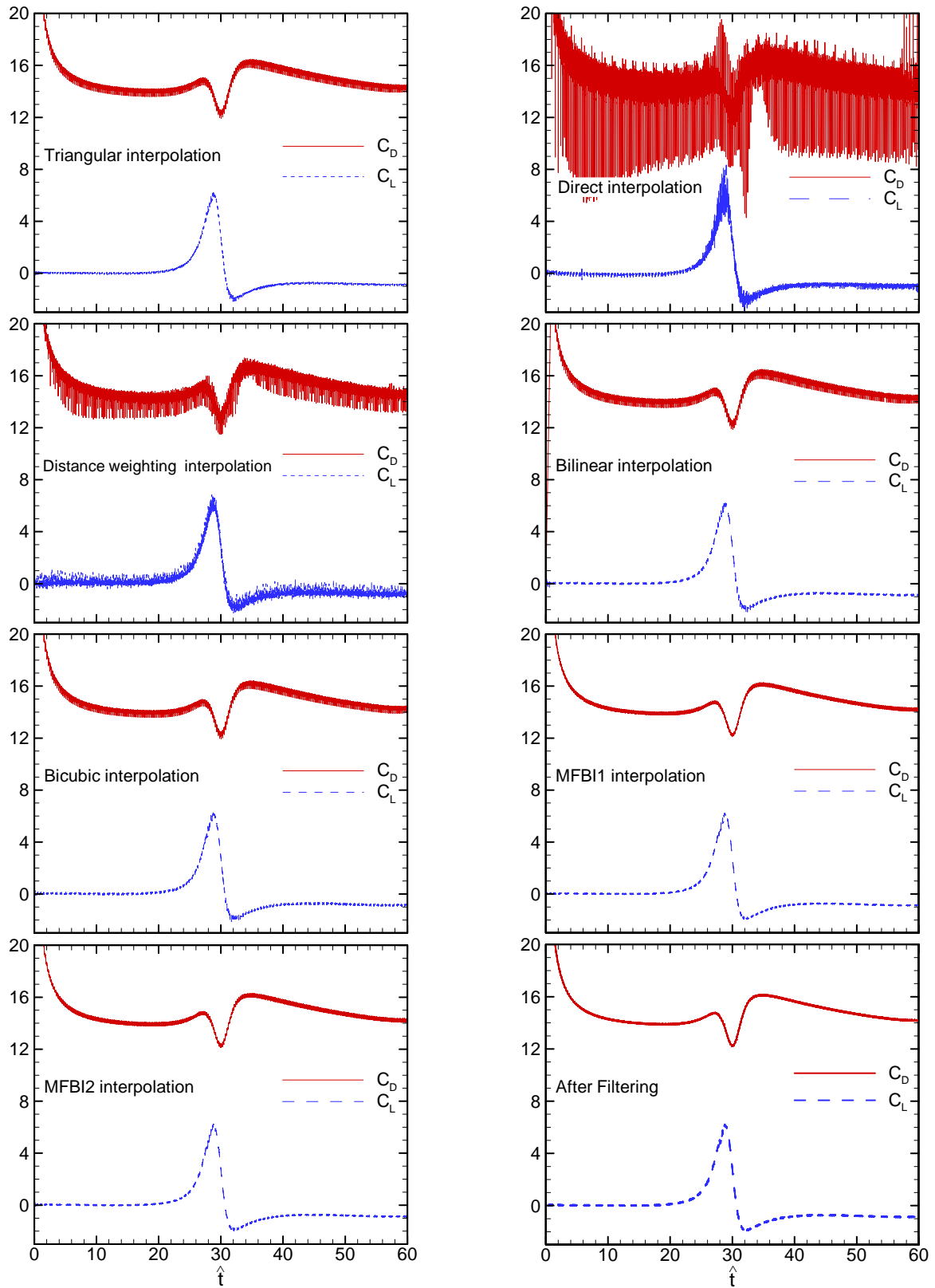
شکل ۱۶ خطوط جریان را برای دو استوانه مستطیلی گذرنده از کنار هم در عدد رینولدز ۲ در زمان‌های مختلف نسبت به دستگاه مختصات ساکن و منطبق بر شبکه اصلی نشان می‌دهد. در زمان‌های اولیه ورتکس‌هایی در بالا و پایین هر مستطیل قابل مشاهده است. ورتکس تشکیل شده در سمتی که استوانه‌ها از کنار هم می‌گذرند، تحت تأثیر رسیدن جسم دیگر قرار می‌گیرد. هنگامی که استوانه‌ها همانند آنچه که در شکل ۱۶ در $\hat{t} = 30$ نشان داده شده، کنار هم قرار می‌گیرند و یک ورتکس میان آنها ایجاد می‌شود. با افزایش فاصله میان استوانه‌ها ورتکس میان آنها کشیده می‌شود تا جایی که به دو قسمت تبدیل می‌شود. این مسئله در $\hat{t} = 40$ به‌وضوح دیده می‌شود.

شکل ۱۷ کانتورهای ضریب فشار را در زمان‌های مختلف برای دو استوانه گذرنده از کنار هم در عدد رینولدز ۲ نشان می‌دهد. هنگامی که دو جسم به هم نزدیک می‌شوند، همانند آنچه که در شکل ۱۷ در زمان بی‌بعد شده $\hat{t} = 27/5$ نشان داده شده، ناحیه‌ای با فشار بالا بین آنها ایجاد می‌شود. این ناحیه با فشار بالا باعث افزایش نیروی عمودی به‌صورت دافعه روی استوانه‌ها می‌شود. هنگامی که استوانه‌ها به هم می‌رسند و تا حدودی از کنار هم می‌گذرند، همانند آنچه که در شکل ۱۷ در زمان‌های بی‌بعد شده $\hat{t} = 30$ و $\hat{t} = 33$ نشان داده شده است، یک ناحیه با فشار پایین بین آنها (در اثر ورتکس تشکیل شده بین استوانه‌ها) مشاهده می‌شود. این ناحیه با فشار پایین منجر به نیروی جاذبه بین استوانه‌ها می‌شود.

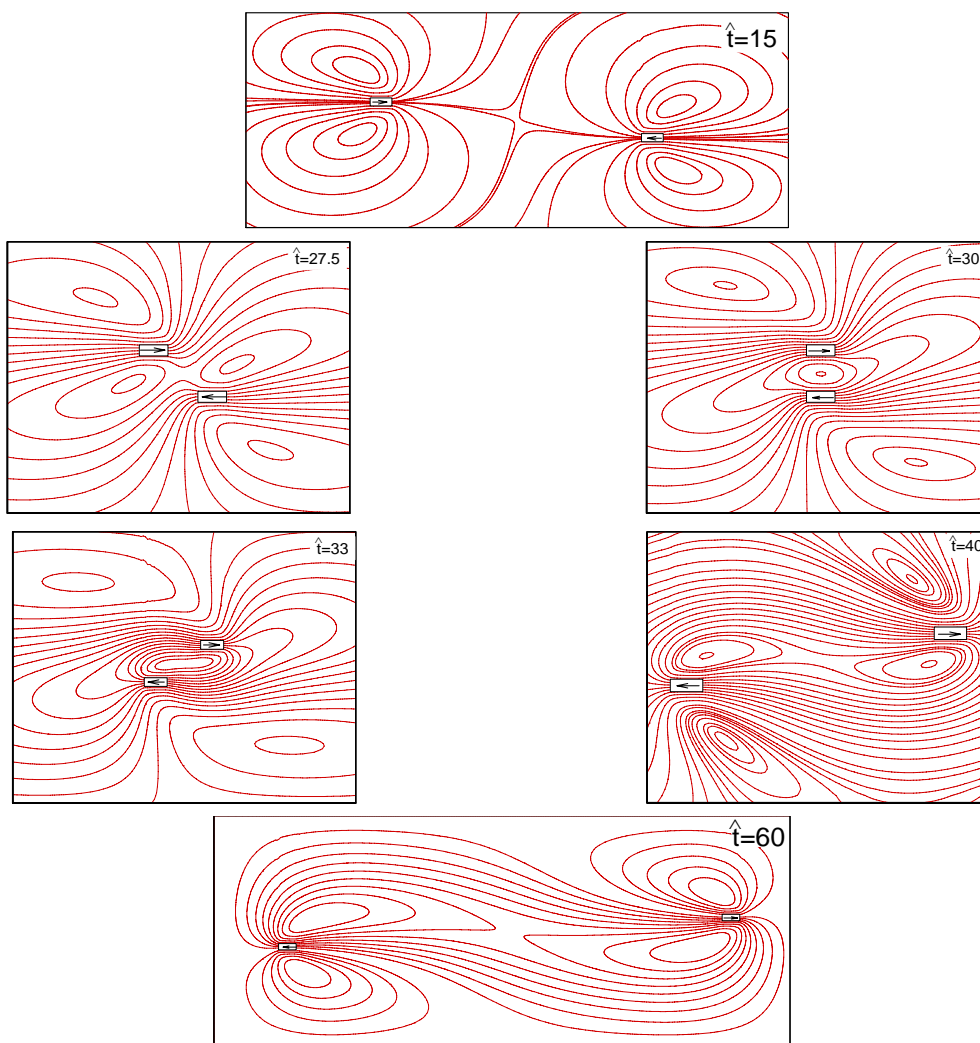


شکل ۱۴: تغییرات زمانی ضرایب لیفت و درگ برای شبکه‌های مختلف.

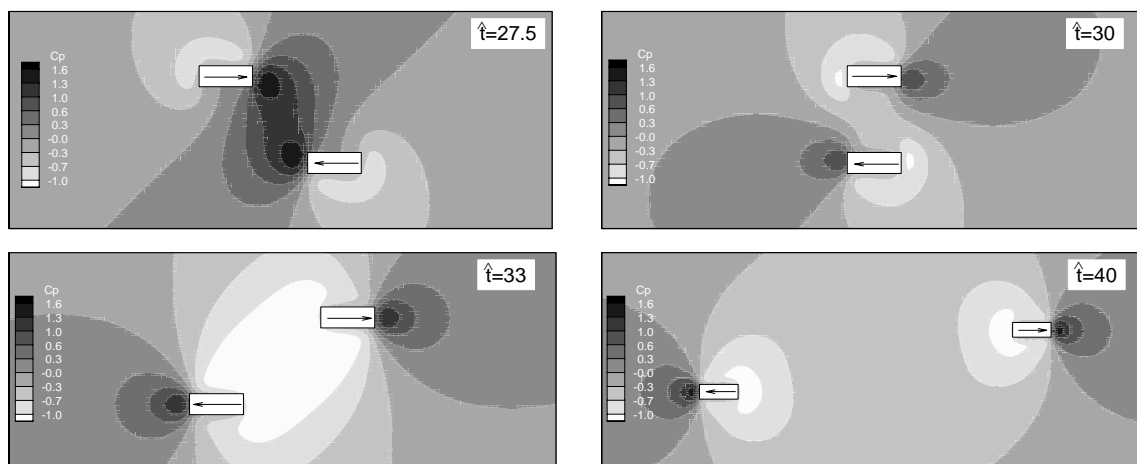
مشابه با استوانه‌های دایره‌ای در نمودار ضرایب لیفت و درگ مربوط به استوانه‌های مستطیلی نوسانات غیر فیزیکی مشاهده می‌شود. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، یکی از عوامل به‌وجود آمدن این نوسانات، از بین رفتن بقای جرم در طول مرزها در اثر میان‌یابی است. برای بررسی اثر میان‌یابی روی نوسانات غیر فیزیکی علاوه بر میان‌یابی مثلثی، از روش‌های میان‌یابی مستقیم، میان‌یابی عکس فواصل، میان‌یابی دوخطی مرتبه ۲، میان‌یابی دو خطی مرتبه ۳، میان‌یابی برپایه شار جرم ۱ (MFBI1) و میان‌یابی برپایه شار جرم ۲ (MFBI2) استفاده شده و نوسانات آنها با هم مقایسه می‌شود.



شکل (۱۵): مقایسه روش‌های میان‌یابی.

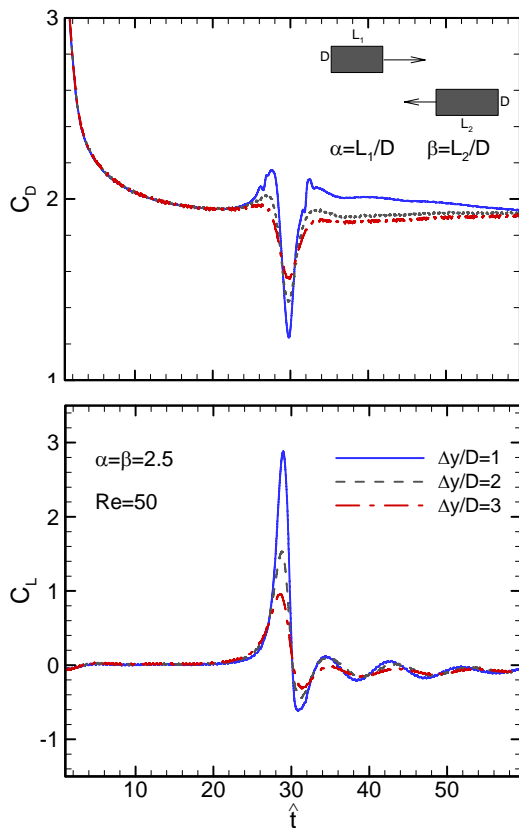


شکل (۱۶): خطوط جریان برای دو استوانه مستطیلی گذرنده از کنار هم در عدد رینولدز ۲ از دید ناظر ساکن در زمان‌های مختلف.



شکل (۱۷): کانتورهای ضریب فشار در زمان‌های مختلف برای دو استوانه گذرنده از کنار هم در زمان‌های مختلف.

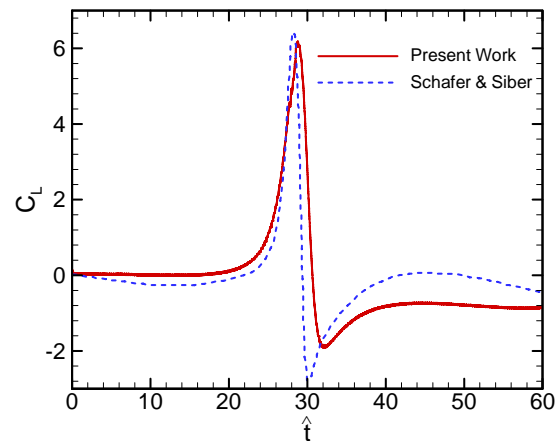
ضریب لیفت در جهت جاذبه (کمینه مقدار ضریب لیفت برای استوانه بالایی) کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش فاصله بیشینه مقدار ضریب درگ کاهش می‌یابد، اما کمینه مقدار آن افزایش می‌یابد. به عبارتی دیگر، اختلاف بیشینه مقدار ضریب درگ با کمینه مقدار آن کاهش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۱۹ ملاحظه می‌شود، نوساناتی در ضریب لیفت پس از عبور استوانه‌ها از مجاور یکدیگر در $\hat{t} = 30$ روی می‌دهد. از دید ناظر متحرک با استوانه‌ها، یک جفت گردابه به صورت متقارن در اثر حرکت سیال نسبت به استوانه در پشت آنها شکل می‌گیرد.



شکل (۱۹): تغییرات زمانی ضرایب نیرو برای Δy های مختلف.

تقارن این گردابه‌ها با عبور استوانه‌ها از مقابل یک دیگر به هم خورده و شروع به ریزش می‌کنند، ولی با توجه به عدد رینولدز پایین، ریزش گردابه‌ها متوقف و جریان تقارن خود را حول استوانه باز می‌یابد. بدین ترتیب نوسانات ضریب لیفت برحسب زمان کاهش و به سمت صفر می‌رود.

شکل ۱۸ تغییرات زمانی ضریب لیفت را برحسب زمان برای استوانه بالایی در مقایسه نتایج عددی ارائه شده به وسیله شافر و سیر که با استفاده از روش علامتگذاری شبکه به دست آمده، نشان می‌دهد. مقدار ضریب لیفت تا زمان رسیدن استوانه‌ها به هم تقریباً صفر است. سپس، به علت ایجاد ناحیه پرفشار میان دو استوانه به بیشینه مقدار خود (بیشینه مقدار در جهت دافعه) می‌رسد. سپس در یک بازه زمانی کوتاه به علت وجود ناحیه با فشار پایین میان دو جسم به کمینه مقدار خود (بیشینه مقدار در جهت جاذبه) می‌رسد. با زیاد شدن فاصله دو استوانه ضریب لیفت شروع به افزایش می‌کند.



شکل (۱۸): تغییرات ضریب لیفت برحسب زمان برای استوانه بالایی.

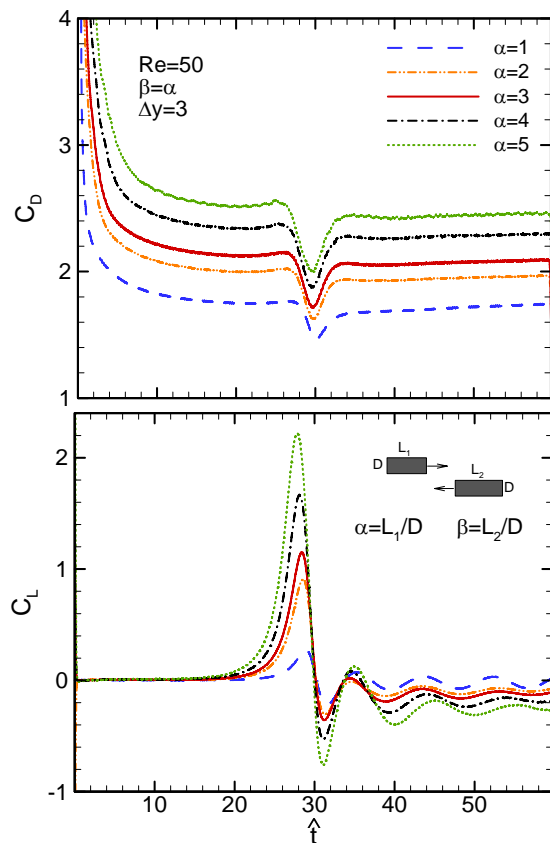
۴-۳- تأثیر فاصله بین مرکز دو استوانه روی ضرایب نیرو

در شکل ۱۹ تغییرات زمانی ضرایب لیفت و درگ استوانه بالایی برحسب فاصله عرضی بدون بعد بین مرکز دو استوانه ($\Delta y/D$) رسم شده است. نتایج ارائه شده مربوط به دو استوانه مستطیلی گذرنده از کنار هم در حالت $\alpha = \beta = 2/5$ و $Re = 50$ است. $\Delta y/D$ های مورد بررسی ۱، ۲ و ۳ می‌باشند. همان‌طور که در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود وابستگی واضحی میان فاصله دو استوانه و ضرایب نیرو وجود دارد. با افزایش فاصله میان دو استوانه اثر دو استوانه روی هم کاهش می‌یابد. با افزایش فاصله عمودی میان دو استوانه بیشینه مقدار ضریب لیفت در جهت دافعه و بیشینه مقدار

منظری، بیشینه مقدار ضریب لیفت در جهت دافعه و بیشینه مقدار ضریب لیفت در جهت جاذبه افزایش می‌یابد. علت این مسئله این است که با افزایش نسبت منظری، استوانه‌ها مدت زمان بیشتری در مجاورت یکدیگر قرار می‌گیرند که این باعث تقویت نواحی پر فشار و کم فشار که در شکل ۱۷ توضیح داده شد، می‌شود.

۴-۵- تأثیر عدد رینولدز روی ضرایب نیرو

در شکل ۲۲ تغییرات زمانی ضرایب لیفت و درگ برای استوانه بالایی در اعداد رینولدز ۳۰، ۵۰، ۷۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ نشان داده شده است.



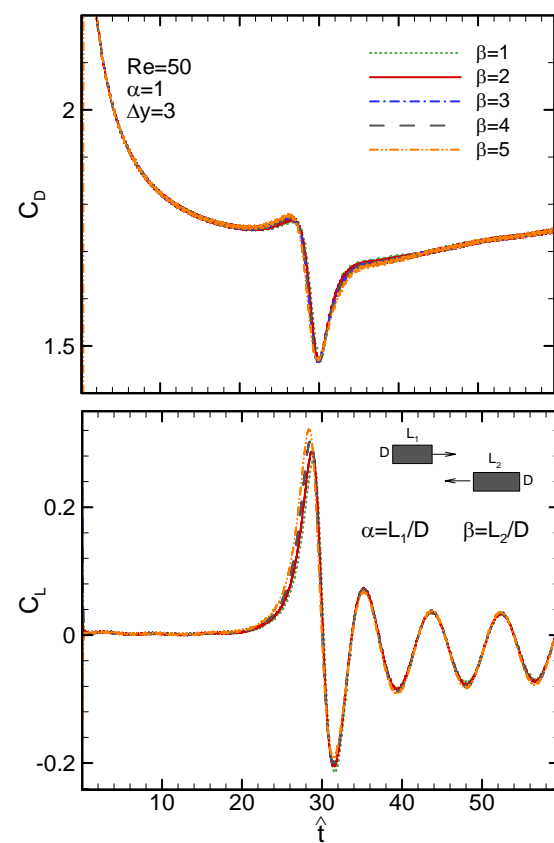
شکل (۲۱): تغییرات زمانی درگ و لیفت در چند α مختلف.

نتایج ارائه شده برای استوانه‌های مستطیلی گذرنده از کنار هم در حالت $\Delta y/D = 3$ و $\alpha = \beta = 2.5$ می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۲۲ مشاهده می‌شود، با افزایش عدد رینولدز مقادیر بیشینه و کمینه ضریب درگ و اختلاف میان آنها کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش عدد رینولدز مقدار بیشینه

۴-۴- تأثیر پارامترهای نسبت منظری (α و β) روی

ضرایب نیرو

نتایج ارائه شده در این بخش مربوط به دو استوانه مستطیلی گذرنده از کنار هم در حالت $\Delta y/D = 3$ و $Re = 50$ می‌باشد. تغییرات زمانی ضرایب لیفت و درگ استوانه بالایی برای β های (نسبت منظری استوانه پایینی) مختلف و در حالتی که α (نسبت منظری استوانه بالایی) برابر با یک است در شکل ۲۰ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۲۰ مشاهده می‌شود، تغییرات زمانی ضرایب درگ و لیفت (اتوانه بالایی) به تغییر β (استوانه پایینی) حساسیت ندارد.



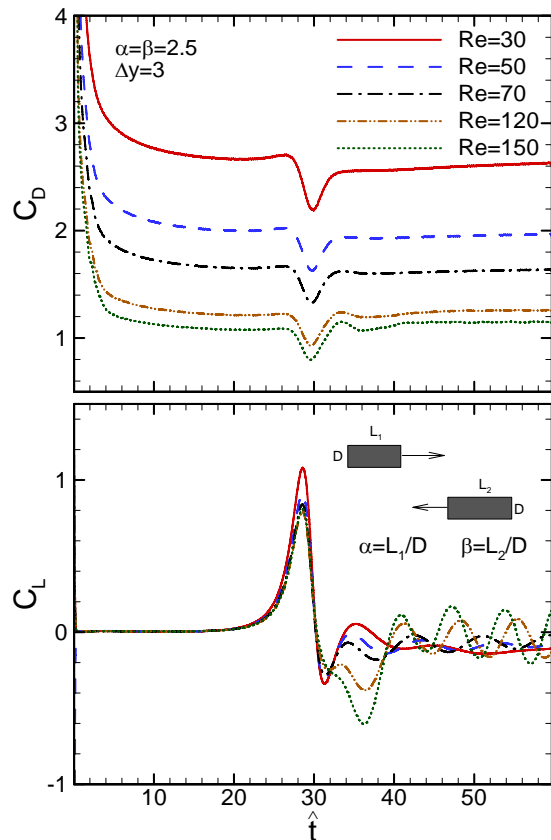
شکل (۲۰): تغییرات زمانی درگ و لیفت در چند β مختلف.

تغییرات زمانی ضرایب لیفت و درگ استوانه بالایی برای نسبت منظری‌های مختلف و در حالتی که $\alpha = \beta$ است، در شکل ۲۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۲۱ مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت منظری هر دو استوانه، مقدار ضریب درگ افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش نسبت

دو حالت که استوانه‌ها دایره‌ای و یا مستطیلی باشند، مورد بررسی قرار گرفته است. در این بررسی از روش برهم‌نهادن شبکه‌ها استفاده شده است. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که روش برهم‌نهادن شبکه‌ها در تحلیل جریان‌های حول اجسام متحرک بسیار کارآمد است. نتایج عددی به دست آمده نشان می‌دهد که برای دو استوانه گذرنده از کنار هم، میدان جریان سیال و نیروهای وارده به استوانه‌ها تحت تأثیر فاصله دو استوانه از هم قرار دارند. با نزدیک شدن دو استوانه نیروی درگ کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. با رسیدن دو استوانه به هم نیروی درگ شروع به افزایش می‌کند. همچنین با نزدیک شدن دو استوانه نیروی لیفت در جهت دافعه شروع به افزایش می‌کند و قبل از رسیدن دو استوانه به بیشینه مقدار خود در جهت دافعه می‌رسد. سپس در یک بازه زمانی کوتاه و بعد از گذشتن دو استوانه از کنار هم به بیشینه مقدار خود در جهت جاذبه می‌رسد. همچنین با نزدیک شدن دو استوانه ناحیه‌ای پرفشار بین استوانه‌ها تشکیل می‌شود. با رسیدن دو استوانه به هم و گذشتن آنها از کنار هم یک ناحیه کم‌فشار بین استوانه‌ها تشکیل می‌شود.

در بررسی جریان برای دو استوانه دایره‌ای گذرنده از کنار هم مشخص شد که با نزدیک شدن دو استوانه نقطه سکون به سمتی که استوانه‌ها از کنار هم می‌گذرند، جابه‌جا می‌شود. در بخش دیگری از کار حاضر، اثرات متقابل دو استوانه مستطیلی گذرنده از کنار هم بررسی شده است. در نمودار تغییرات زمانی ضرایب نیرو نوسانات غیر فیزیکی مشاهده می‌شود. از دلایل به وجود آمدن این نوسانات می‌توان به از بین رفتن بقای جرم در طول مرزها در اثر میان‌یابی اشاره کرد. با مقایسه چند روش میان‌یابی مشاهده شد که نوسانات غیر فیزیکی در روش‌های میان‌یابی بر پایه شار جرم ۱ و میان‌یابی بر پایه شار جرم ۲ نسبت به بقیه روش‌ها کمتر است. در پایان اثر فاصله عمودی دو استوانه، نسبت منظری استوانه‌ها و عدد رینولدز روی ضرایب نیرو برای دو استوانه مستطیلی گذرنده از کنار هم مورد بررسی قرار گرفته است. از این بررسی نتیجه گرفته شده که با کاهش فاصله عمودی دو استوانه، کاهش عدد رینولدز و افزایش نسبت منظری استوانه‌ها، اثر استوانه‌ها روی هم بیشتر می‌شود.

ضریب لیفت در جهت جاذبه و مقدار بیشینه ضریب لیفت در جهت دافعه که در اثر رسیدن دو استوانه به هم ایجاد می‌شوند، کاهش می‌یابد. نوسانات ضریب لیفت در رینولدزهای بالاتر پس از عبور استوانه‌ها از مقابل یکدیگر (در $\hat{t} = 30$) به خوبی در شکل مشخص است. علت این نوسانات همان‌طور که توضیح داده شد، پدیده ریزش گردابه (از دید ناظر متحرک) است. ریزش گردابه‌ها در رینولدزهای بیشتر مانند آنچه برای رینولدز ۳۰ یا ۵۰ اتفاق می‌افتد، میرا نمی‌شود. علت اینکه قبل از رسیدن استوانه‌ها به هم ضریب لیفت نوسان ندارد، این است که با شروع جریان روی استوانه، تقارن جریان تا نزدیک شدن به استوانه دوم حفظ می‌شود.



شکل (۲۲): تغییرات زمانی درگ و لیفت در چند عدد رینولدز.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، اثرات متقابل دو استوانه گذرنده از کنار هم در

- مراجع**
8. Wehr, D., Stangl, R., and Wagner, S. "Interpolation Schemes for Intergrid Boundary Value Transfer Applied to Unsteady Transonic Flow Computations on Overlaid Embedded Grids", The 2th European Computational Fluid Dynamics Conf., Vol. 1, pp. 382-390, 1994.
 9. Desquesnes, G., Terracol, M., Manoha, E., and Sagaut, P. "On the Use of a High Order Overlapping Grid Method for Coupling in CFD/CAA", J. Computational Physics, Vol. 220, No. 1, pp. 355-382, 2006.
 10. Tang, H.S., "Study on a Grid Interface Algorithm for Solutions of Incompressible Navier-Stokes Equations", Computers & Fluids, Vol. 35, No. 10, pp. 1372-1383, 2006.
 11. Lallemand, P. and Luo, L.S. "Lattice Boltzmann Method for Moving Boundaries", J. Computational Physics, Vol. 184, No. 2, pp. 406-421, 2003.
 12. Ploumhans, P., Winckelmans, G.S., and Salmon, J. "Vortex Particles and Tree Codes: I. Flows with Arbitrary Crossing between Solid Boundaries and Particle Redistribution Lattice", Electron. The 3rd Int. Workshop on Vortex Flows and Related Numerical Methods, ESAIM 7, Vol. 7, pp. 335-348, 1999.
 13. Colicchio, G., Greco, M., Faltinsen, and Odd M. "Fluid-body Interaction on a Cartesian Grid: Dedicated Studies for a CFD Validation", The 21st Int. Workshop on Water Waves and Floatin Bodies, Loughborough Univ., England, ISBN 0-947974-12-1, pp. 21-24, 2006.
 14. Cai, J., Tsai, H.M., and Liu, F. "A Parallel Viscous Flow Solver on Multi-block Overset Grids", Computers & Fluids, Vol. 35, No. 10, pp. 1290-1301, 2006.
 1. Ikegawa, M., Kaiho, M., and Kato, C., "FEM/FDM Composite Incompressible Flow Analysis", JSME Int. J., Series B, Vol. 36, No. 2, pp. 321-327, 1993.
 2. Kikuchi, K., Maeda, T., and Yanagizawa, M. "Numerical Simulation of the Phenomena Due to the Passing by of Two Bodies, Using the Unsteady Boundary Element Method", Int. J. for Numerical Methods in Fluids, Vol. 23, No. 5, pp. 445-454, 1996.
 3. Schafer, M. and Siber, R. "Performance of a Block-structured Clicking-mesh Multigrid Scheme for Flow Computations in Time-varying Geometries", The 4th European Computational Fluid Dynamics Conf., Vol. 1 Part 2, pp. 1291-1295, 1998.
 4. Russell, D. and Wang, Z.J. "A Cartesian Grid Method for Modeling Multiple Moving Objects in 2D Incompressible Viscous Flow", J. Computational Physics, Vol. 191, No. 1, pp. 177-205, 2003.
 5. Xia, J.Y., Leung, D.Y.C., and Hussaini, M.Y. "Numerical Simulations of Flow-field Interactions between Moving and Stationary Objects in Idealized Street Canyon Settings", J. Fluids and Structures, Vol. 22, No. 3, pp. 315-326, 2006.
 6. Xu, S. and Wang, Z.J. "An Immersed Interface Method for Simulating the Interaction of a Fluid with Moving Boundaries", J. Computational Physics, Vol. 216, No. 2, pp. 454-493, 2006.
 7. Tuncer, H. "Two-dimensional Unsteady Navier-Stokes Solution Method with Moving Overset Grid", AIAA J., Vol. 35, No. 3, pp. 471-476, 1997.