مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها/ سال ۱۳۹۵/ دوره ۶/ شماره ۳/ صفحه ۱-۱۶

مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها

دانشگاه صنعتی شاهرود

شبیه سازی عددی سقوط آزاد اجسام استوانه‌ای به کمک روش برهم نهادن شبکه

حسین امین اسماعیلی[۱]، محسن ثقفیان[۲] و محمد علی بدری[۳،*]

[۱] کارشناس ارشد مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

[۲] دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

[۳] استادیار، پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیر دریا، دانشگاه صنعتی اصفهان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۹/۰۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۴/۰۴/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۴/۱۲

چکیده

جریان تراکم ناپذیر و غیردائم درحرکت سقوط آزاد اجسام استوانه ای بامقاطع دایره‌ای، مربعی و مستطیلی به صورت عددی شبیه سازی شده است. رژیم جریان دراین شبیه‌سازی آرام درنظرگرفته شده وازروش برهم نهادن شبکه‌ها[۱] استفاده گردیده است. معادلات حاکم برمسئله، به دودسته معادلات اندازه حرکت مربوط به سیال و معادلات دینامیک جسم صلب تقسیم شده‌اند. نیروهای اعمالی به جسم شامل، نیروهای هیدرودینامیکی، نیروی گرانشی و شناوری در نظر گرفته شده‌اند. معادلات جریان به صورت دوبعدی، به روش حجم محدود حل گردیده و شبیه‌سازی حرکت سقوط آزاد یک جسم استوانه‌ای با مقاطع مختلف دایره‌ای، در دو حالت مکان اولیه مرکز کانال و خارج مرکز کانال و نیز مقاطع مربعی و مستطیلی درآرایش‌های گوناگون به ارائه نتایج صحت سنجی شده منجرگردیده است. نتایج بدست آمده شامل، ضریب درگ برای اعداد مختلف رینولدز در بازه ۰/۵ تا۵۰، تغییرات سرعت سقوط مرکز استوانه، تغییرات سرعت زاویه‌ای و میزان انحراف زاویه‌ای جسم با نتایج تجربی مقایسه شده است؛ همچنین سقوط آزاد دو استوانه مستطیلی و مربعی مقایسه گردیده وتطابق خوبی با مطالعات قبلی احراز شده است.

کلمات کلیدی: سقوط آزاد در یک مجرا؛ روش برهم نهادن شبکه‌ها؛ جسم استوانه‌ای؛ شبکه منطبق بر بدنه؛ جریان رینولدز پایین.

Numerical Simulation of Free Falling Cylinders using Overset Grid Method

H. Amin Esmaeili[1], M. Saghafian[2], M.A. Badri[3,*]

[1] Msc., Mech. Eng., Isfahan University of Tech, Isfahan, Iran.

[2] Assoc. Prof., Mech. Eng., Isfahan University of Tech., Isfahan, Iran.

[3] Assis. Prof., P.O.Box 134, Research Institute for Subsea Science & Tech., Isfahan, Iran.

Abstract

An incompressible and unsteady flow problem in free falling of cylindrical particles was investigated in the intermediate Reynolds Number. Shape of the body that is used in an initial value problem in a vertical channel for the free falling was considered circular, square and rectangular cylinders. Fluid flow was computed by the Navier-Stokes equations for moderate Reynolds numbers. The particles were moved by effect of hydrodynamic, gravity and buoyancy forces. The governing equations for particle included second Newton law and torque were exerted over the particle. The particle-fluid interaction may treat by introducing a fully two dimensional overset grid Scheme. Overset grid Scheme may allow each component of a flow to be treated accurately and efficiently. The amounts of drag coefficients, free falling velocity, angular velocity and deviation for free falling cylinders were obtained for different Reynolds numbers ($0.5 \leq Re < 50$) and then were compared with experimental results. Free falling of rectangular and square cylinders in different situations were treated and the results compared with available data in fair agreement.

Keywords: Free Falling in Duct; Overset Grid; Cylindrical Body; Body Fitted Grid; Low Reynolds Flow.

[1] Overset

* نویسنده مسئول. تلفن: ۳۳۹۱۲۲۷۱-۰۳۱؛ فکس: ۳۳۹۱۲۵۱۸-۰۳۱

آدرس پست الکترونیک: malbdr@cc.iut.ac.ir

۱- مقدمه

حرکت اجسام جامد شناور در یک سیال ساکن در برخی از فرآیندهای صنعتی نظیر، استخراج نفت و زغال سنگ، فیلتراسیون، ساخت پیشران جت، صنایع هواو فضا، الکترونیک و دارویی کاربرد دارد. چالش اساسی در چنین مسایلی، مدل‌سازی آنهاست. برای مدل‌سازی، معادلات حاکم در دیدگاه اویلری-اویلری یا اویلری-لاگرانژی تقریب زده می‌شوند. در بیشترحالت‌ها، رژیم جریان شامل، اثرات متقابل هیدرودینامیک و بازگشت ناپذیرمی‌باشند؛ درنتیجه، دانستن این اثرات متقابل و اهمیتشان برای همه شکل‌های جریان، اساسی ومهم هستند. پدیده حاضر با کمترین فرضیات، بوسیله محاسبه حرکت اجسام شناور در یک سیال محیطی پیش‌بینی می‌شود. این تقریب، شبیه‌سازی مستقیم نامیده شده، نیروهای موثر روی سطح جسم مستقیما بدون میانگین‌گیری و تقریب جریان محاسبه می‌شوند. سطح جسم می‌تواند به صورت مرز یا سطح مشترک درنظر گرفته شود.

اولین بارلادنبرگ[۱]، اثر نزدیکی دیوار را روی ضریب درگ کره‌ها ی متحرک در یک سیال پایا بررسی کرد. از آن پس مطالعات متعددی روی آن صورت گرفت. بارتوک ومیسون[۲]، بیانی تحلیلی و آزمایشگاهی روی سقوط ذرات اعم از صلب و غیرصلب و حباب‌ها انجام دادند [۳]. دندی و همکاران، به مطالعه سه بعدی حرکت جسم در اعداد رینولدز پایین پرداختند[۴]. دندی و دوایر، جریان عبوری از کره را بررسی کردند و نتایج خود را با کارتحلیلی استافمن مقایسه کردند [۵].

القدس و کوروس [۶و۷]، به شبیه‌سازی جریان گذرنده از روی کره دریک کانال پرداختند. روش عددی آن‌ها، روش عملگرتوزیع لاگرانژی[1] بود. ژانگ و همکاران [۸] نیز، به شبیه‌سازی حرکت جسم استوانه‌ای درحال سقوط با مقطع بیضوی و دایروی به روش المان محدود پرداختند. نیرشل، با استفاده ازروش برهم نهی شبکه ها به شبیه‌سازی حرکت جسم درمحیط سیال پرداختند. رژیم جریان درشبیه‌سازی آن‌ها آرام بود (Re<100)[۹]. فنگ وهمکاران[۱۰]، به شبیه‌سازی حرکت سقوط آزاد جسم درحالت دوبعدی با روش اویلری-لاگرانژی[2] پرداختند. ژائو و همکاران، به بررسی و شبیه‌سازی جریان در اثر تقابل بین جسم و سیال پرداختند[۱۱]. آنها در شبیه‌سازی خود ازروش اویلری-لاگرانژی استفاده کردند. ژائو و همکاران، سقوط آزاد سه جسم به اشکال دایره و مستطیل و مربع را با استفاده ازاین روش به صورت دو بعدی مورد بررسی قرار دادند. کان و همکاران، با روش مرزهای فرورفته به بررسی کلی اثر جسم متحرک برسیال پرداختند[۱۲]. در کارهای مشابه دیگری تاثیرات متقابل سازه – سیال و استفاده از شبکه های با مرز متحرک، مورد بررسی قرار گرفته است [۱۳-۱۷]؛ لیکن هیچیک الگوریتم استفاده شده در این کار پژوهشی که در بخش ۲-۲ توصیف گردیده را مورد توجه قرار نداده‌اند.

در کار حاضر جریان آرام، دوبعدی و تراکم ناپذیر حول استوانه‌هایی با مقاطع دایره، مستطیلی و مربعی درحرکت سقوط آزاد با استفاده ازروش برهم نهی شبکه‌ها شبیه‌سازی شده است. ابتدا معادلات حاکم شامل، معادلات حاکم بر جسم و معادلات حاکم بر سیال در بخش ۲ ارائه شده و در ادامه، فضای محاسباتی برای استفاده از روش بر هم نهی شبکه‌ها و اعمال شرایط مرزی تعریف گردیده است. نتایج حل عددی برای حرکت سقوط آزاد اجسام استوانه‌ای با مقاطع مختلف دایره‌ای، مربعی و مستطیلی درحالات قرارگیری درمرکز کانال و با خارج از مرکزیت، مورد بررسی قرارگرفته است. ضریب درگ با تعریف معمول رابطه درگ استاندارد، تغییرات سرعت سقوط مرکز استوانه، تغییرات سرعت زاویه‌ای و میزان انحراف زاویه‌ای جسم، مورد تحقیق قرار گرفته، صحت سنجی شده است.

۲- معادلات و روش حل

۲-۱- معادلات حاکم

معادلات حاکم برمسئله، به دو دسته معادلات حاکم بر جسم (روابط ۱ تا ۳) و معادلات حاکم بر سیال (روابط ۴ تا ۶) تقسیم بندی شده‌اند [۴].

$$ma_i = m.(du_i / dt) \quad (۱)$$

$$du_i / dt = a_i, i = 1,2, \;\; dx_i / dt = u_i, i = 1,2 \quad (۲)$$

$$T = d(I\omega / dt), \;\; d\theta / dt = \omega \quad (۳)$$

[1] Distributed Operator Lagrangian Method

[2] Arbitrary Lagrangian Euilerian (ALE)

$$\partial u_i / \partial x_i = 0 \quad (۴)$$

$$\partial u_i / \partial t + u_j \partial u_i / \partial x_j = v.\partial / \partial x_j (\partial u_i / \partial x_j) + S \quad (۵)$$

$$s = -\partial p / \partial x_i - \rho \partial U / \partial t_i - \omega \times (\omega \times r) - 2\omega \times V - \alpha \times r \quad (۶)$$

در این معادلات، ν لزجت دینامیکی، u_i مولفه‌های سرعت، P فشار، θ انحراف زاویه‌ای جسم، ω سرعت زاویه‌ای جسم و s جمله چشمه است. U، سرعت مشخصه برای شروع شبیه سازی و معادل سرعت نهایی جسم استوانه‌ای در نظر گرفته شده است. به دلیل انتخاب دستگاه شتابدار برای شبکه فرعی، جملات بعد از گرادیان فشار دررابطه (۶) لحاظ گردیده اند. در این مطالعه عددی، برای انفصال معادلات دیفرانسیل، ازروش حجم محدود در یک شبکه هم‌مکان[1] [۱۸] و به منظور حل میدان جریان از الگوریتم سیمپل سی[2] استفاده گردیده است. برای محاسبه جملات جابجایی، از روش‌کوییک[3] و برای محاسبه تغییرات زمانی، از روش کرانک نیکلسون[4] استفاده شده است. این مسئله در واقع از حیث حل معادلات دینامیکی بصورت صریح انجام می‌شود؛ ولی حل میدان جریان و موقعیت ضمنی است. در هر گام زمانی بعد از محاسبه سرعت، با محاسبه نیروی روی سطح و حل معادلات دینامیکی، سرعت جسم و سپس با انتگرال‌گیری، میزان جابه‌جایی در شبکه اصلی و فرعی محاسبه می‌شوند. در ادامه، در موقعیت جدید دوباره با حل در گام زمانی جدید مسئله برای وضعیت موجود تکرارمی گردد. به عبارت دیگر، با حل شبکه فرعی، دقیقا نیروی روی سطح بدست می‌آید. با این کار، سرعت جدید و موقعیت جدید محاسبه می‌شود.

۲-۲- روش برهم نهادن شبکه‌ها

در روش برهم نهادن شبکه‌ها، ازیک شبکه اصلی (شبکه کارتزین) و تعدادی شبکه فرعی منطبق بربدنه[5]، استفاده می‌شود. این شبکه‌ها، اطلاعات جریان را که در آن‌ها به طور مجزا بدست آمده‌اند، بین یکدیگر مبادله می‌کنند[۱۹]. معادلات جریان درشبکه‌های اصلی و فرعی جداگانه حل می شوند و اطلاعات بدست آمده در نقاط خاصی با میانیابی بین شبکه‌ها مبادله می‌شوند. درکار حاضر، ازیک شبکه نوع H برای شبکه اصلی و از یک شبکه نوع O برای جسم استوانه‌ای با مقطع دایره‌ای استفاده شده است (شکل ۱-الف). در شبیه سازی سقوط جسم استوانه‌ای با مقطع مربعی و مستطیلی ازیک شبکه نوع H برای هر دو شبکه اصلی و جسم استفاده شده است. برای حل مساله، از دو شبکه کارتزین استفاده شده است. شبکه ساکن، یک شبکه کارتزین ثابت و شبکه مربوط به جسم، یک شبکه منطبق باجسم است که با آن حرکت می نماید (شکل ۱-ب). موقعیت قرار گیری هر دو جسم در دامنه حل نیز در (شکل ۱-ج) نشان داده شده است. نتایج بدست آمده در شبکه فرعی، با میانیابی به نقاط مجاور جسم درشبکه اصلی منتقل می‌شوند. این نقاط ازشبکه اصلی، نقاط مرزی[6] نامیده شده‌اند. ازطرف دیگر، شبکه فرعی نیز درهر گام زمانی، اطلاعات مورد نیاز خود را ازطریق نقاط روی مرز بیرونی خود (نقاط مرزی) بامیانیابی ازشبکه اصلی دریافت می‌کند. در هر گام زمانی، دو شبکه اصلی و فرعی دریک حلقه تکرار، همراه با فرآیند جستجوی ذکرشده و از طریق میانیابی اطلاعات حل می‌شوند[۱۹-۲۰]. الگوریتم حل، بدین صورت است که با مشخص بودن مکان اولیه جسم، نقاط مرزی و خالی برای دوشبکه بدست آمده، سپس با استفاده ازاین نقاط، اطلاعات برای دوشبکه میانیابی گردیده است. این فرآیند، دریک گام زمانی آنقدر تکرار می‌شود تا شرط همگرایی ارضا گردد. درمرحله بعد، با استفاده ازاطلاعات بدست آمده و انتگرالگیری از تانسور تنش روی سطح جسم، برآیند نیروهای فشاری و برشی وارد بر جسم با نیروی شناوری تعیین گردیده است. با استفاده از این اطلاعات و قانون دوم نیوتن، شتاب خطی جسم و باانتگرالگیری ازشتاب، سرعت خطی برطبق رابطه (۲) بدست آمده است. درنهایت، مکان جسم درهر لحظه محاسبه شده است (رابطه ۳). مکان زاویه‌ای جسم نیز، با انتگرالگیری ازحاصل ضرب برداری نیرو در فاصله برداری مکان سطح جسم با مرکز جرم آن بدست آمده است (رابطه۴). تمام

[1] Collocated
[2] SIMPLEC
[3] Quick
[4] Crank-Nicolson
[5] Body fitted
[6] Fringe point

مراحل بالادرگام‌های زمانی بعدی تکرار شده است. با استفاده ازاین نقاط، اطلاعات برای دوشبکه میانیابی گردیده است. لازم به ذکر است، برای شبکه اصلی درمرزهای راست و چپ شرط عدم لغزش، مرز بالا ازشرط $\frac{\partial \tau_{yy}}{\partial x}=0$ و $\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x}=0$ و مرز پائین بدلیل بزرگ بودن بازه محاسباتی نسبت به خود جسم از شرط مرزی عدم لغزش استفاده شده است.

۲-۳- روش حل

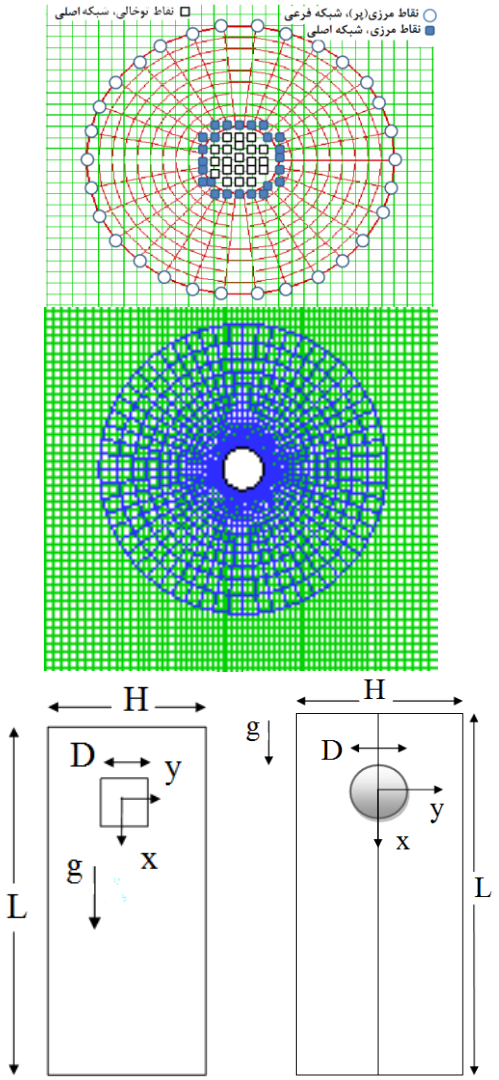
برای اعتبارسنجی پژوهش حاضر، مسئله سقوط آزاد جسم استوانه‌ای با مقاطع مختلف دایره‌ای، در دو حالت مکان اولیه مرکز کانال و خارج مرکزکانال و نیز مقاطع مربعی و مستطیلی درآرایش‌های گوناگون مورد مطالعه قرار گرفته است. در این شکل‌ها $x^*=\frac{x}{D}$، $y^*=\frac{y}{D}$، $t^*=\frac{t\times U}{D}$، $u^*=\frac{u}{U}$، $v^*=\frac{v}{U}$ متغیرهای بدون بعد مسئله تعریف شده‌اند.

۲-۳-۱- الگوریتم جستجو

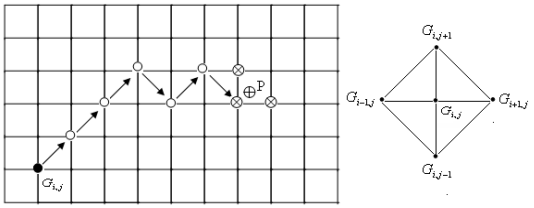
برای اینکه نقاط مرزی اطلاعات را از شبکه دیگر دریافت کنند، از یک الگوریتم سریع برای جایابی نقاط مرزی در شبکه‌ای استفاده شده است که از آن اطلاعات را دریافت می‌کند . به عنوان مثال، برای پیدا کردن سلول مربوط به نقطه P در شکل۲ از یک نقطه دلخواه همانند $G_{i,j}$ که با دایره توپر نشان داده شده شروع گردیده است؛ سپس بررسی شده که آیا نقطه P داخل یکی از چهار مثلث ایجاد شده به وسیله نقاط $G_{i,j}$ و $G_{i\pm1,j}$ و $G_{i,j\pm1}$ قرار دارد. برای این منظور، مختصات هر نقطه داخل یک مثلث بصورت یکتا برحسب مختصات سه راس آن به صورت رابطه (۷) نوشته شده است:

$$\begin{bmatrix} x_P \\ y_P \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{i,j} & x_{i\pm1,j} & x_{i,j\pm1} \\ y_{i,j} & y_{i\pm1,j} & y_{i,j\pm1} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} \qquad (۷)$$

با حل دستگاه معادلات فوق α و β و γ بدست میآیند. اگر α و β و γ بدست آمده ازحل دستگاه معادلات (۷) برای هر کدام از مثلث‌ها مثبت و کوچکتر از یک باشد، نقطه P درون مثلث واقع شده تا گره‌های احاطه کننده آن مشخص شود؛ درغیراینصورت، همانند شکل ۲ با توجه به خط واصل بین $G_{i,j}$ و P ، $G_{i,j}$ باید جابجا شود و مجدداً بررسی شود، آیا نقطه P داخل یکی ازچهار مثلث ایجاد شده به وسیله نقاط $G_{i,j}$ و $G_{i\pm1,j}$ و $G_{i,j\pm1}$ قرار دارد. این پروسه آنقدر تکرار گردیده تا سلول احاطه‌کننده پیدا شود [۲۱].



شکل ۱- الف) نمایش شبکه استاتیکی (اصلی) و دینامیکی (فرعی) برای مقطع دایره؛ ب) نمایش شبکه مربوط به جسم متحرک؛ ج) شماتیک مسیرسقوط وجهت محورهای مختصات، راست) مقطع دایره و چپ) مقاطع مربع و مستطیل



شکل ۲- مسیر جستجو و مثلث ایجاد شده برای پیدا کردن مرکز سلول‌های احاطه کننده نقاط مرزی

۲-۳-۲- میانیابی اطلاعات

همانطور که ذکرشد، نقاط مرزی که داخل محدوده محاسباتی قرار دارند، اطلاعات را از طریق میان‌یابی از شبکه-های دیگردریافت می‌کنند. برای مثال، هر نقطه مرزی در شبکه فرعی اطلاعات را (برای نمونه مولفه‌های سرعت) از شبکه اصلی دریافت می‌کند. پس از مشخص شدن گره‌های احاطه کننده، نقطه مرزی P با میانیابی اطلاعات به نقطه P نسبت داده می‌شود. انتقال اطلاعات با میان‌یابی می‌تواند بقای جرم و ممنتوم را روی مرزها از بین برده، نوسانات غیر فیزیکی در فلاکس ممنتوم روی مرزهای شبکه از یک گام زمانی تا گام زمانی بعدی ایجاد کند. نوسانات غیر فیزیکی در شار ممنتوم روی مرزهای شبکه نیز،سبب نوسانات غیر فیزیکی در نیروهای محاسبه شده برحسب زمان (درمسائل غیر دائم) می‌شود. روش های میانیابی مورد آزمایش در کار حاضر عباتند از:

۱- میان‌یابی مثلثی: برای انتقال اطلاعات به نقطه مرزی از α و β و γ بدست آمده از جایابی در رابطه (۷) استفاده شده است[۲۱].

$$\phi_P = \alpha\phi_{i,j} + \beta\phi_{i\pm1,j} + \gamma\phi_{i,j\pm1} \qquad (۸)$$

که ϕ_P مقداری میانیابی شده برای پارامتر دلخواه ϕ (مولفه های سرعت)است. $\phi_{i,j}$، $\phi_{i\pm1,j}$ و $\phi_{i,j\pm1}$ مقادیر ϕ درگره های احاطه کننده نقطه P هستند. بهنگام میانیابی مولفه‌های سرعت از یک شبکه به شبکه دیگر، باید توجه کرد که مقادیر سرعت نسبت به دستگاه مختصات شبکه دریافت‌کننده محاسبه شود. برای مثال، اگر سرعت دریک نقطه مرزی از شبکه فرعی، توسط میانیابی از شبکه اصلی u_1 و سرعت جسم هم u_2 باشد، با توجه به اینکه دستگاه مختصات با سرعت جسم حرکت می‌کند، سرعت $u_1 - u_2$ به گره مورد نظر نسبت داده شده است.

۲- میان‌یابی مستقیم: این روش، ساده‌ترین راه انتقال اطلاعات از یک شبکه به شبکه دیگر است. در این روش، مقدار نزدیک‌ترین گره، ازشبکه‌ای که از آن اطلاعات دریافت می‌شود، به نقطه مرزی نسبت داده می‌شود [۲۲].

۳- میان‌یابی عکس فواصل: در میان‌یابی عکس فواصل مقادیر رئوس سلول احاطه کننده نقطه مرزی به نسبت فاصله‌ای که ازنقطه مرزی دارند، به نقطه مرزی انتقال داده می‌شود. بعبارتی راس‌هایی که نزدیکتر به نقطه P هستند، از اثردهی بیشتری برخوردارند[۸ و ۲۳].

۴- میان‌یابی برپایه شار جرم[1]: با استفاده ازروش میان‌یابی برپایه شار جرم۱ مولفه‌های سرعت روی مرزها با اطمینان از بقای جرم بادقت مرتبه دوم درطول مرزها محاسبه می‌شوند. ایده این روش، توسط تانگ و همکارانش ارائه شده است [۲۴]. روشن است که اعمال این روش در کد عددی پیچیده تر و حجم محاسبات نیز برای میانیابی بیشتر است.

۲-۳-۳- شرایط مرزی و مطالعات شبکه

روش حل مسئله به این ترتیب است که با مشخص بودن مکان استوانه‌ها، نقاط شبکه‌های اصلی و فرعی تعیین شده تا پس از آن توسط الگوریتم جستجو، گره‌های احاطه‌کننده نقاط مرزی شبکه اصلی در شبکه‌های فرعی و بالعکس مشخص شوند. 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 ازشبکه اصلی وتکمیل شرایط مرزی برای شبکه‌های فرعی، معادلات جریان در شبکه‌های فرعی حل می‌شوند. این پروسه در یک گام زمانی برای شبکه‌های فرعی و اصلی آنقدر تکرار می‌شود تا معیار همگرایی ارضا شود. برای گام زمانی بعدی، مکان جدید مرکز استوانه‌ها تعیین و تمام مراحل بالا عیناً تکرار می شود. در شبکه اصلی، از شرط مرزی دیوار برای تمامی مرزهای بالا و پایین و راست و چپ استفاده شده است؛ همچنین نقاط مرزی که داخل محدوده محاسباتی قراردارند، اطلاعات را ازطریق میانیابی ازشبکه‌های فرعی دریافت می‌کنند. درشبکه‌های فرعی شرط عدم لغزش روی سطح استوانه‌ها استفاده شده، گره‌های روی مرزخارجی شبکه‌های فرعی نیز

[1] Mass Flux Base Interpolation (MFBI)

اطلاعات را از طریق میانیابی از شبکه اصلی دریافت نموده‌اند.

در مورد مطالعات شبکه، شبکه‌های اصلی و فرعی در ۴ حالت زیر با توجه به گام زمانی در نظر گرفته شده است؛ همچنین شبکه اصلی و فرعی با گام‌های زمانی استفاده شده ۰/۰۱، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۵ در نظر گرفته شده‌اند.

شبکه اصلی۱۶۲×۳۲۰، شبکه فرعی ۱۶۲×۱۲۲ و گام زمانی ۰/۰۱

شبکه اصلی ۱۶۲×۳۲۰، شبکه فرعی ۹۲×۱۲۲ و گام زمانی ۰/۰۰۱

شبکه اصلی ۲۰۲×۳۸۲، شبکه فرعی ۷۲×۱۲۵ و گام زمانی ۰/۰۰۵

شبکه اصلی ۲۰۲×۳۵۲، شبکه فرعی ۸۲×۱۲۵ و گام زمانی ۰/۰۰۵

در نهایت، شبکه اصلی۱۶۲×۳۲۰، شبکه فرعی۹۲×۱۲۲ و گام زمانی ۰/۰۰۱ برای اخذ نتایج برگزیده شد.

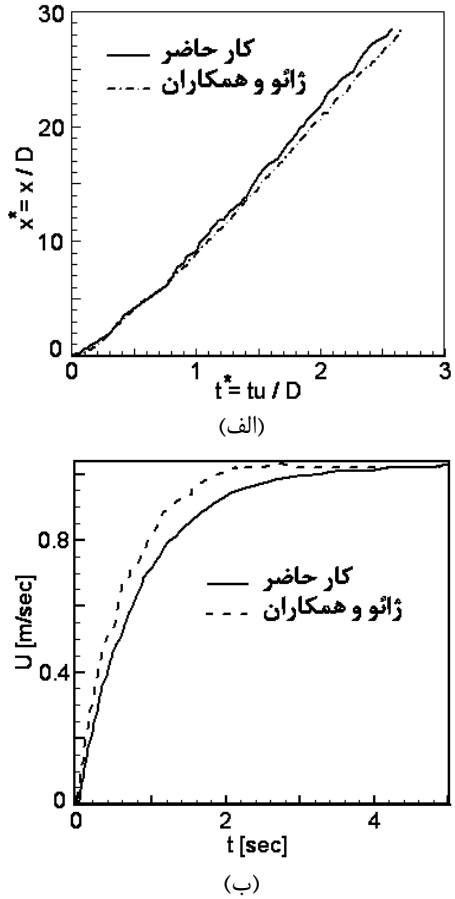
۳- شبیه سازی سقوط اجسام استوانه ای

۳-۱- جسم استوانه ای با مقطع دایره ای

برای شبیه‌سازی این مسئله، قطر جسم ۱ سانتیمتر و ابعاد بازه سیال ۲۰ در ۴۰ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. از یک شبکه دکارتی استاتیک با تعداد شبکه ۱۶۲ × ۳۲۰ و یک شبکه فرعی O شکل با تعداد گره‌های۹۲ × ۱۲۲استفاده شده است، (شکل‌های۱الف و ب). درشکل‌های ۳ الف و ب، نتایج شبیه سازی برای مسیر سقوط نسبت به زمان نشان داده شده وبا نتایج شبیه سازی ژائو و همکاران [۱۱] مقایسه و تطابق خوبی مشاهده گردیده است. خاطر نشان می‌سازد، ژائو و همکاران، شبیه‌سازی سقوط سه جسم استوانه دایروی، مربعی و مستطیلی باهم را که در فاصله ۵ برابر قطراستوانه دایروی ازهم بودند، مورد بررسی قرار دادند.

۳-۱-۱- استوانه دایروی در موقعیت اولیه مرکز کانال

به عنوان بررسی مقدماتی، حرکت سقوط آزاد جسم استوانه دایروی با مکان اولیه (۰و۰)، مورد توجه واقع شده است. سیال کاری آب در شرایط متعارفی، نسبت دانسیته جسم به سیال ۲به ۱، قطر جسم استوانه‌ای ۰/۱ سانتیمتر و ابعاد بازه سیال در شبیه‌سازی ۳۰ × ۴۰ برابر قطر جسم در نظر گرفته

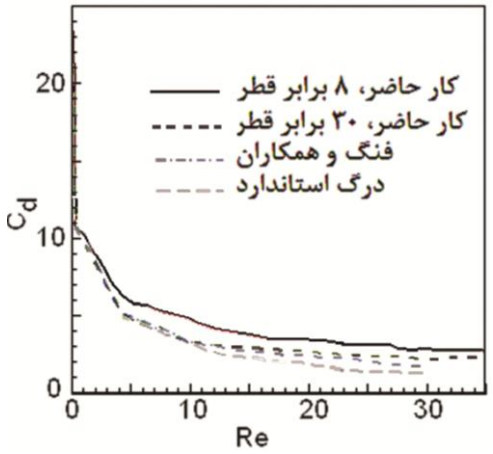


شکل۳- نمودار الف) موقعیت جسم برحسب زمان و ب) تغییرات سرعت سقوط مرکز جسم بازمان و مقایسه باکار ژائو و همکاران (مقطع دایره ای)

شده است؛ همچنین قطرشبکه فرعی بربدنه جسم استوانه‌ای، ۶ برابر قطر جسم در نظرگرفته شده است. شکل ۲، شماتیک مکان اولیه جسم و نحوه جهت‌گیری محورهای مختصات را نشان میدهد. ضریب درگ نهایی جسم استوانه‌ای، درحدود ۵/۱۹ بدست آمده است. این ضریب درمقایسه با نتیجه بدست آمده توسط فنگ وهمکاران [۱۰] ۵/۲۸ ، درحدود ۱/۷ درصد تفاوت دارد. سرعت نهایی استوانه درحدود $\frac{m}{s}$ ۰/۰۱۷ بدست آمده است. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی، نشان می‌دهد که سرعت جسم درجهت سقوط بسیار بیشتر از سرعت جانبی آن و حدود ۱۰،۰۰۰ برابر است. از نتایج بدست آمده اینگونه برداشت می‌شود که در سقوط آزاد جسم استوانه دایروی، هنگامی که جسم درمرکز کانال قرار دارد، تمایل به

جابجاشدن از مرکز را ازخود نشان نمی‌دهد؛ درنتیجه مرکز کانال دراعداد رینولدز پایین، مکان تعادلی برای استوانه دایروی است.

شکل ۴، منحنی تغییرات ضریب درگ محاسبه شده در اعداد رینولدز مختلف در مقایسه با کارهای قبلی را با همخوانی خوبی نشان می‌دهد.



شکل ۴- مقایسه تغییرات ضریب درگ محاسباتی در اعداد رینولدز مختلف برای سقوط جسم با مقطع دایره

در این شبیه‌سازی، نتایج بدست آمده در مورد سرعت جانبی در جدول ۱ ضمن احراز تطابق خوبی با نتایج فنگ و همکاران ارائه شده است [۱۰].

جدول ۱- نتایج بدست آمده از شبیه سازی درمورد سرعت جانبی (شعاع جسم ۰/۱ سانتیمتر)

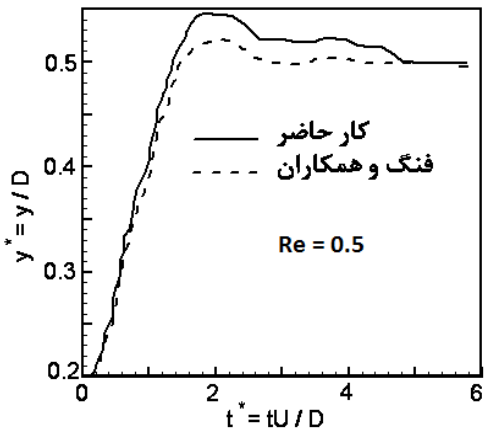
عدد رینولدز	سرعت نهایی (متر بر ثانیه)	لزجت سینماتیکی/ ۱۰۰۰۰۰۰
۵	۰/۰۱۷	۲/۹
۱۰	۰/۰۲	۵
۳۰	۰/۰۳	۱۰

عدد رینولدز	ضریب درگ شبیه سازی شده	هو و همکاران	پروپاچر	متوسط انحراف (درصد)
۵	۵	۵/۱۹	۵/۲۸	۵
۱۰	۳/۶	۳/۷	۳/۹	۲/۷
۳۰	۱/۵۲	۱/۵۵	۱/۸۵	۱/۹

۳-۱-۲- استوانه دایروی درموقعیت اولیه (y_0و۰)

در بخش دیگری از پژوهش حاضر به بررسی حرکت سقوط آزاد جسم استوانه‌ای با مقطع دایره در حالتی پرداخته شده است. که با مرکز کانال به اندازه y_0 فاصله عرضی دارد. برای این کار، از یک کانال به قطر ۶ برابر قطر استوانه استفاده شده است.

در شکل ۵، تغییرات موقعیت جسم نسبت به زمان نشان داده شده است. پس از شروع سقوط، میزان جابجایی جسم در راستای سقوط، بیش از جابجایی جانبی مشاهده گردیده است. این پدیده بدلیل زیاد بودن نیرو در راستای سقوط نسبت به جهت عمودی است. با گذشت زمان، سقوط با افزایش میزان نیروی جانبی که دراثر ضریب لیفت و چرخش بوجود می‌آید، به سمت مرکز انجام می‌شود. با تغییر مکان اولیه جسم درکانال‌های باریک بدلیل افزایش سرعت زاویه‌ای جسم بدلیل افزایش گشتاور وارده، جسم به سمت مکان تعادلی خود رانده می‌شود که در اعداد رینولدز پایین مرکز کانال است. درکانال‌های عریضتر، این اثر کمتر مشهود است و بیشتر جسم به جای حرکت افقی، تمایل به حرکت عمودی دارد. بدلیل افزایش نیروی لیفت وارد برجسم، جسم شروع به حرکت بسمت مرکز کانال می‌نماید. در شکل ۵ نشان داده شده است که نتایج بدست آمده تطابق خوبی با نتایج فنگ و همکاران داشته که حاکی از درستی روند شبیه سازی دارد [۱۰].



شکل ۵- نمودار مکان جسم با مقطع دایره ای درعدد رینولدز ۰/۵

۳-۲- بررسی تغییرات سرعت سقوط آزاد جسم استوانه دایروی در اعداد رینولدز مختلف

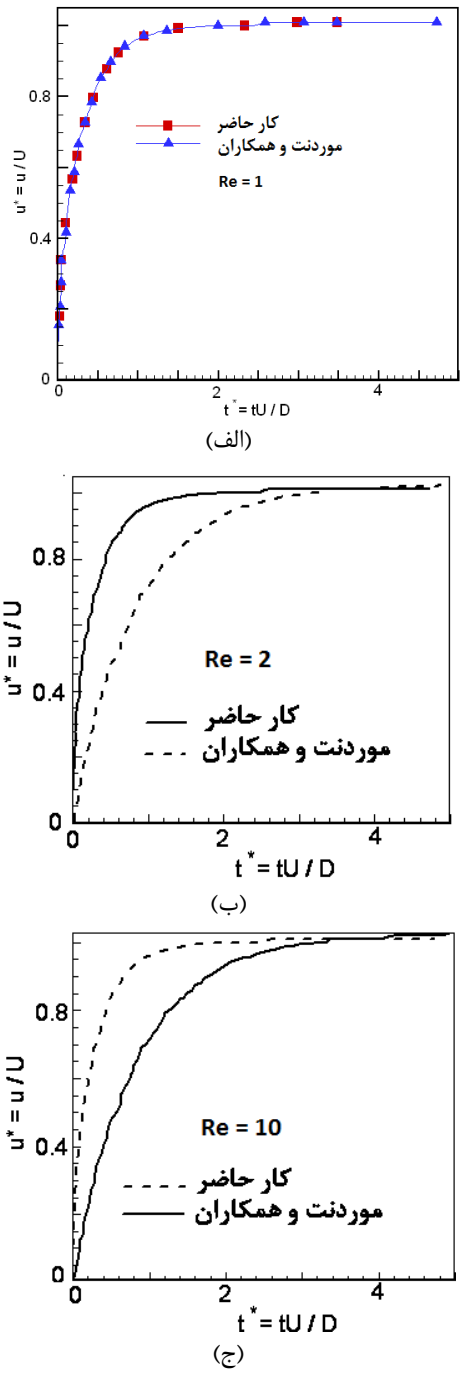
سرعت بدست آمده از پژوهش حاضر با رابطه تجربی [۱۲] $v/V_l = 1-\exp(-3t/\tau_{95})$ مقایسه شده است. در این رابطه، τ_{95} زمان رسیدن جسم به ۹۵٪ سرعت نهایی (V_l) خود است.

در شکل ۶، تغییرات سرعت بدون بعد برحسب زمان بدون بعد در سه عددرینولدز نشان داده شده است. در این شکل تغییرات سرعت نهایی جسم به قطر ۰/۵سانتیمتر در عدد رینولدز نهایی ۱ (سرعت نهایی ۰/۲ cm/s) نشان داده شده است. در این شکل، همچنین نتایج شبیه‌سازی دراعداد رینولدز ۲ (سرعت نهایی ۰/۴ cm/s) و۱۰ (سرعت نهایی ۲ cm/s) نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می شود، منحنی حاصل از رابطه ارائه شده توسط موردانت برای استوانه دایروی دراعداد رینولدز پایین تطابق خوبی با نتایج بدست آمده دارد، ولی با افزایش عدد رینولدز اختلافی بین نتایج بدست آمده و این رابطه وجود دارد. این اختلاف از ماهیت سه‌بعدی جریان و نحوه اثر گردابه روی پروفیل سرعت نهایی جسم در سقوط آزاد کره درمقابل استوانه ناشی می‌شود. خاطر نشان می‌سازد، جریان حول استوانه و کره دارای مشابهت‌هایی است و در اینجا مقایسه رفتار و نه تطابق عددی مورد نظر بوده است.

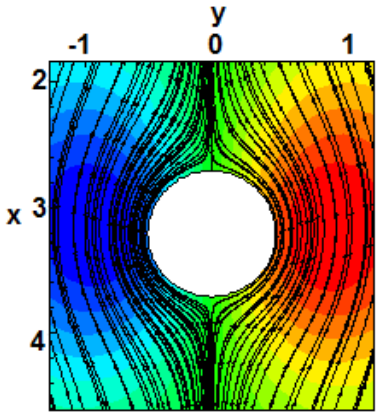
در شکل ۷ ، به عنوان یک نتیجه کیفی، خطوط جریان حول مقطع دایره‌ای در اعدادرینولدز مختلف ۵، ۱۵ و ۲۵ و در شکل۸، موقعیت استوانه درحال سقوط و خطوط جریان حول آن از دید ناظر ساکن در عدد رینولدز ۵ و نسبت چگالی جامد به سیال ۲ نمایش داده شده است.

۳-۳- شبیه سازی سقوط اجسام استوانه ای با مقاطع مربعی و مستطیلی

برای اعتبارسنجی برنامه تدوین شده، حرکت سقوط آزاد استوانه مربعی به ابعاد ۰/۷در ۰/۷ سانتیمتر با نسبت چگالی ۱/۱ مورد بررسی قرار گرفته است ($\mathrm{Re}_{final}=56$) و (شکل ۱ ج-چپ). ابعاد بازه سیال ۲۰ در۴۰ سانتیمتر در نظرگرفته شده است. نتایج بدست آمده درتطابق خوبی بانتایج بدست آمده توسط شبیه‌سازی ژائو و همکاران است[۱۱]. در شکل‌های ۹ و ۱۰، نتایج مقایسه موقعیت عرضی و سرعت سقوط جسم نشان داده شده است. این نتایج، درستی شبیه سازی را گواهی نموده است.

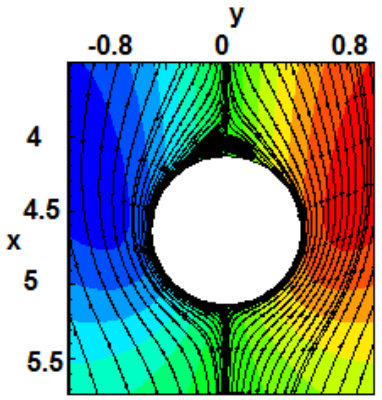


شکل ۶- تغییرات سرعت سقوط جسم با مقطع دایره‌ای بر حسب زمان بدون بعد الف) درعدد رینولدز ۱، ب) درعدد رینولدز ۲ و ج) درعدد رینولدز ۱۰



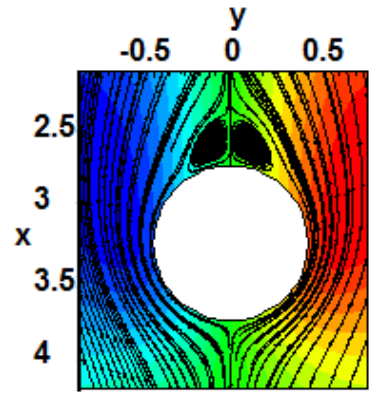
Re = 5

(الف)



Re = 15

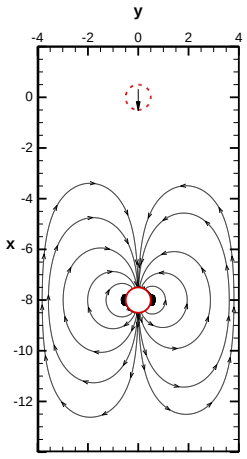
(ب)



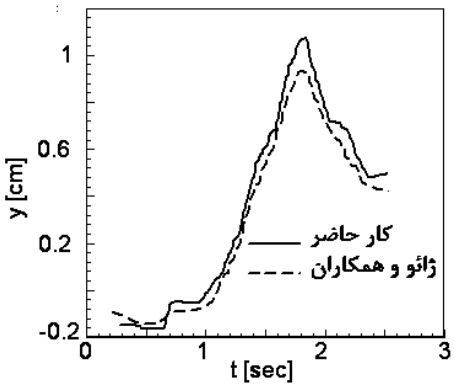
Re = 25

(ج)

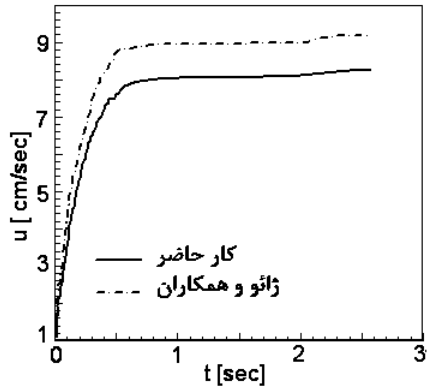
شکل ۷ - نمایش خطوط جریان حول مقطع دایره ای دراعدادرینولدز مختلف



شکل ۸- موقعیت استوانه در حال سقوط و خطوط جریان حول آن از دید ناظر ساکن در عدد رینولدز نهایی ۵

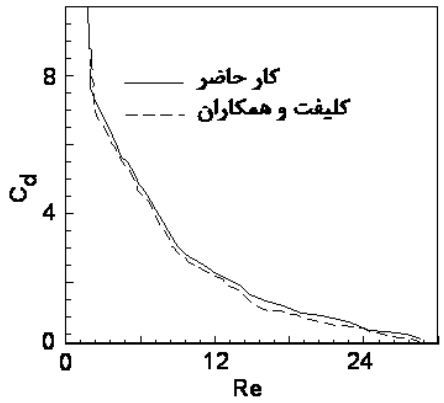


شکل ۹- مکان جانبی جسم مربعی با زمان و مقایسه با نتایج بدست آمده توسط ژائو و همکاران

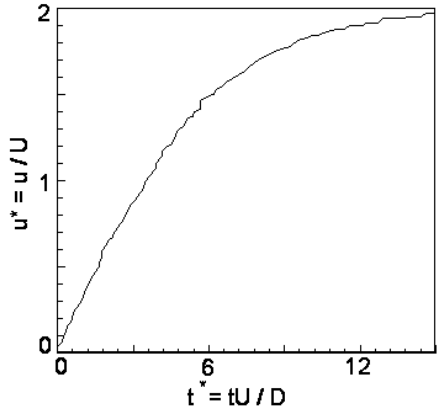


شکل ۱۰- سرعت سقوط برای استوانه مربعی و مقایسه با نتایج شبیه سازی ژائو و همکاران

در ادامه به شبیه‌سازی سقوط آزاد استوانه مستطیلی پرداخته شده است. شبیه سازی برای چند عدد رینولدز مختلف انجام شده و جسم با ضریب منظری ۲ به ۱ و نسبت دانسیته جامد به سیال ۲ به ۱ در نظرگرفته شده است. روند کلی نتایج مانند دو شکل دیگر بوده با این تفاوت که در این حالت، میزان ضریب درگ بیشتراز دو شکل دیگر مشاهده شده است. ضریب درگ جسم استوانه مربعی برحسب عدد رینولدز در شکل ۱۱ با تطابق خوب مابین نتایج این شبیه‌سازی و نتایج کلیفت همراه است. تغییرسرعت نهایی جسم در عدد رینولدز ۳۰ برحسب زمان در شکل ۱۲، به عنوان یک نتیجه کیفی نمایش داده شده است. سرعت نهایی استوانه مستطیلی در این عدد رینولدز ۰/۰۱۸ متر بر ثانیه بدست آمده است که با ۰/۰۰۹ متر بر ثانیه بدون بعد شده

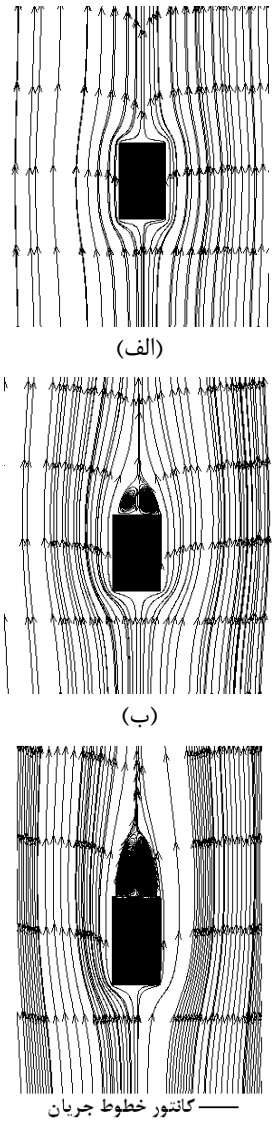


شکل ۱۱- ضریب درگ وارد براستوانه مربعی دراعداد رینولدز مختلف و مقایسه بانتایج تجربی [۲۵]



شکل ۱۲- تغییرات سرعت سقوط جسم با مقطع مربعی درعدد رینولدز ۳۰ برحسب زمان بدون بعد

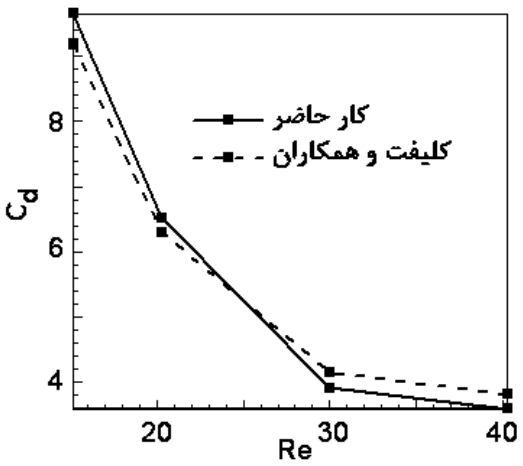
است. در شکل ۱۳، خطوط جریان از دید ناظر متحرک روی هندسه جسم درزمان‌های متوالی، نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود، با افزایش زمان سقوط تشکیل گردابه‌ها درپشت استوانه بیشتر می‌شود. این پدیده، باعث کاهش ضریب درگ و افزایش سرعت جسم شده است که در نتایج دیگر احراز گردیده است.



شکل ۱۳- خطوط جریان استوانه مستطیلی درحال سقوط از دید ناظر متحرک در زمان‌های مختلف با Re= ۱۵ الف) در زمان بدون بعد ۱، ب) در زمان بدون بعد ۱۰ و ج) در زمان بدون بعد ۱۵

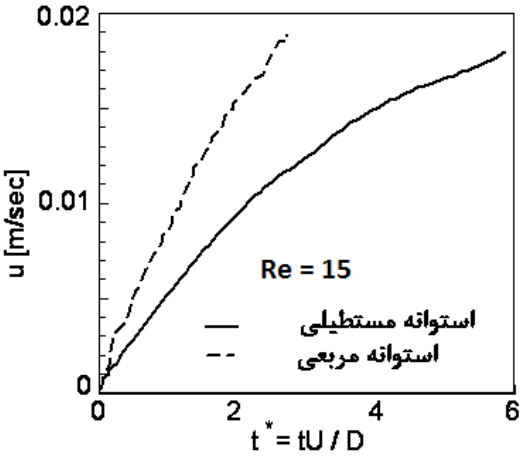
۳-۳-۱- شبیه سازی‌سقوط اجسام مربع و مستطیل

پس از اطمینان از صحت شبیه‌سازی، در شکل ۱۴ نمودار ضریب درگ وارد بر استوانه مربعی در اعداد رینولدز متفاوت رسم گردیده و با نتایج تجربی کلیفت و همکاران [۲۵] مقایسه شده است. میزان اندازه ضریب درگ درمقایسه با دوشکل دیگر به مراتب بیشتراست. در شکل‌های ۱۵ الف و ب، نمودار سرعت بدون بعد در طول کانال برحسب زمان بدون بعد برای استوانه مربعی و مستطیلی در دو رینولدز مختلف نشان شده است. ابعاد استوانه مربعی ۰/۲ × ۰/۲ سانتیمتر و استوانه مستطیلی ۰/۲ × ۰/۴ سانتیمتر در نظر گرفته شده‌اند. ابعاد بازه محاسباتی ۸۰ × ۳۲ برابر طول مشخصه در نظر گرفته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان سرعت نهایی استوانه مربعی بدلیل بیشتر بودن نیروی درگ وارد بر آن نسبت به استوانه مستطیلی بیشتر است.

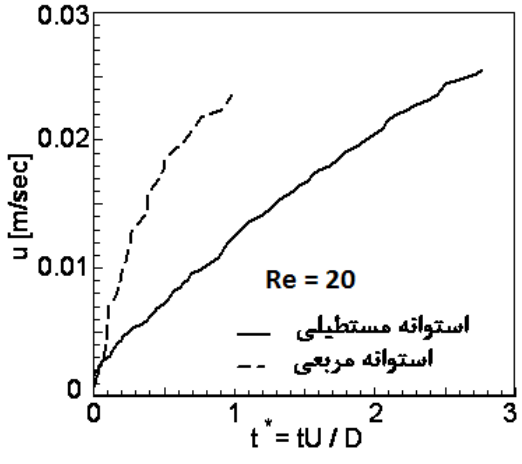


شکل ۱۴- ضریب درگ استوانه مستطیلی در اعداد رینولدز مختلف و مقایسه آن با مقادیر تحلیلی [۲۵]

مقایسه انحراف زاویه‌ای دو جسم استوانه‌ای با مقاطع مربعی و مستطیلی درسقوط آزاد نیز بررسی گردیده است. شکل ۱۶، تغییرات سرعت زاویه‌ای استوانه مستطیلی و مربعی را درحرکت سقوط آزاد نشان می‌دهد. میزان انحراف استوانه مستطیلی، بیش از مربعی بوده و عدد رینولدز نهایی پس از شبیه‌سازی ۱۵ بدست آمده است. شبکه اصلی برای مستطیل و مربع به ابعاد ۳۰ × ۴۰ برابر طول مشخصه (ضلع مربع) و تعداد شبکه در نظر گرفته شده برای شبکه اصلی ۳۰۲ × ۱۶۲ در نظرگرفته شده است. همان طورکه دیده می‌شود، میزان تغییر زاویه برای استوانه مستطیلی بیش از هندسه دیگر است که این بدلیل ناپایداری فشاری در اطراف آن در مقایسه استوانه مربعی است. شکل ۱۷، تغییرات انحراف زاویه‌ای را برای دو هندسه مختلف نشان می‌دهد. یکی از راه‌های محاسبه ضریب درگ به شیوه تحلیلی در این مسایل استفاده از قطر معادل و عامل ضریب شکل برای این کار است. به این ترتیب که سرعت و قطر جسم مورد نظر با سرعت و قطرکره معادل جایگزین گردیده و ضریب درگ به این ترتیب با ضریب درگ کره معادل تقریب زده شده است.

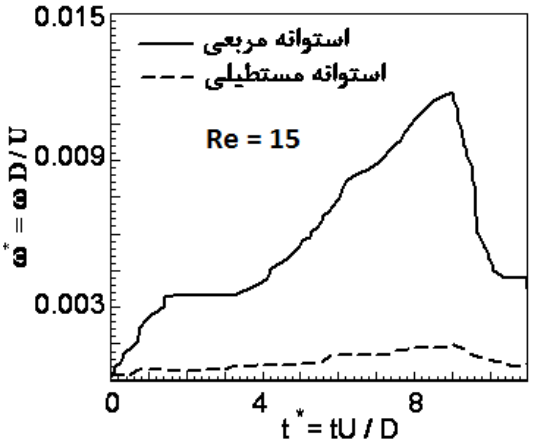


(الف)

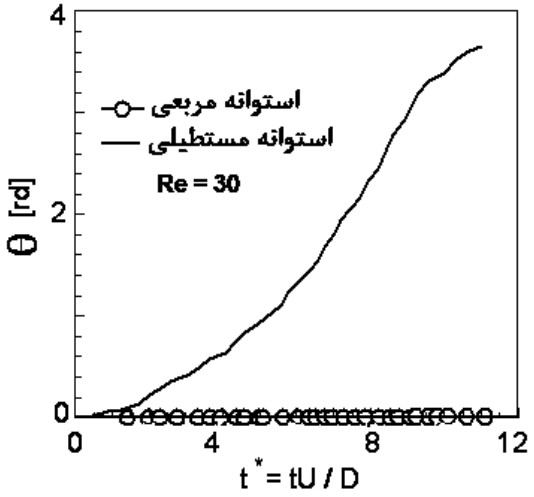


(ب)

شکل ۱۵- نمایش سرعت سقوط برای استوانه مربعی و مستطیلی برحسب زمان درعدد رینولدز الف) ۱۵ و ب) ۲۰



شکل ۱۶- تغییرات سرعت زاویه ای بدون بعد با زمان بدون بعد برای دو استوانه مربعی و مستطیلی در رینولدز ۱۵



شکل ۱۷- تغییرات میزان انحراف زاویه ای استوانه مستطیلی ومربعی نسبت به زمان بدون بعد در رینولدز ۳۰

۳-۳-۲- شبیه سازی‌سقوط دو جسم استوانه ای با مقطع مستطیلی با فاصله عرضی ۴D

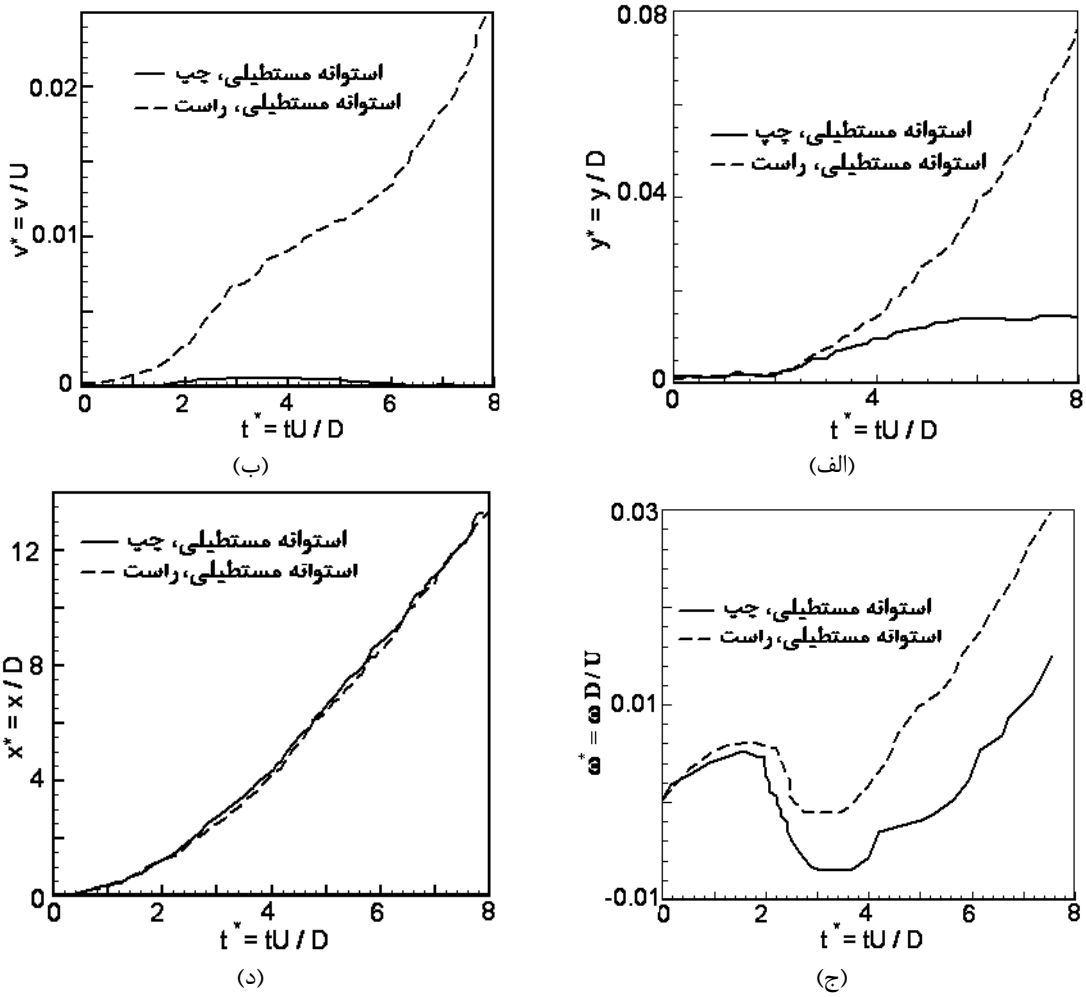
حرکت سقوط آزاد دو جسم استوانه‌ای مستطیلی به طور همزمان مورد مطالعه قرار گرفته است. مطالعه در اعداد رینولدز نهایی مختلف برای دو جسم استوانه ای مستطیلی که به صورت عمودی با فاصله افقی ۴ برابر طول مشخصه و فاصله عمودی ۷۰ برابر طول مشخصه، نسبت به هم قرار داده شده اند، انجام شده است. به عبارت دیگر، استوانه سمت چپ در موقعیت اولیه (۴-،۰) و استوانه سمت راست در موقعیت اولیه (۰،۰) قرار دارند. ابعاد کانال ۳۲ × ۸۰ و D عرض استوانه‌ای مستطیلی درنظرگرفته شده است. در شکل ۱۸-الف، نمودارجابه‌جایی جانبی دوجسم با زمان نشان داده شده است. منظور از جابه جایی جانبی $\delta y = y - y_0$ است که y_0 موقعیت اولیه جسم است. همان طور که دیده می شود، استوانه سمت راست میزان انحراف جانبی بیشتری را نشان می‌دهد. در واقع استوانه دورتر(سمت چپ) دارای جابه جایی بیشتری در جهت نزدیک شدن به مرکز کانال خواهد داشت. استوانه‌ای که در مرکز کانال واقع است، تمایل به بودن در همان مکان جانبی را نشان داده و کمترین جابه جایی را دارد. این موضوع بدلیل اثرات فشاری جسم دیگراست که سبب رانده شدن جسم از مسیر مستقیم خود می‌شود. در شکل ۱۸-ب، تغییرات سرعت جانبی را برای دو جسم استوانه‌ای با زمان نشان می‌دهد. درشکل ۱۸-ج، تغییرات سرعت زاویه‌ای برای دو جسم استوانه‌ای با زمان نشان داده شده است. با افزایش زمان به میزان سرعت زاویه‌ای دو جسم افزوده شده است. این عمل درنتیجه افزایش فشار بین دواستوانه و رانده شدن آنها از هم است. شکل ۱۸-د، تغییرات مکان دواستوانه مستطیلی را در آرایش عرضی نشان داده است. همان‌طورکه مشخص است، میزان تغییر مکان استوانه‌ها در راستای سقوط تقریبا یکسان است؛ لیکن فاصله عرضی دو استوانه مستطیلی و مربعی که لحظه به لحظه بیشتر هم می شود، سبب می‌شود دو استوانه هرگز بهم نرسند.

۳-۳-۳- شبیه‌سازی سقوط دو جسم مربعی با فاصله ۴D

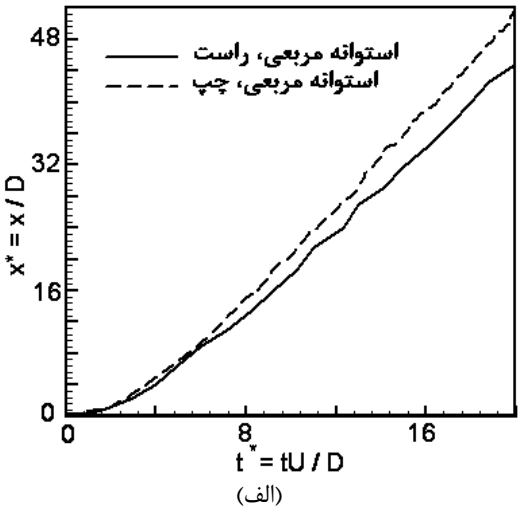
شبیه سازی حرکت سقوط آزاد دو استوانه مربعی در سیال ساکن نیز بررسی گردیده است. ابعاد شبکه اصلی۳۰ × ۴۰ برابر طول مشخصه استوانه مربعی درنظر گرفته شده است. ابعاد استوانه‌های مربعی۰/۵ ×۰/۵سانتیمتر و عدد رینولدز نهایی برای جسم ۶ در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه سازی در شکل۱۹ نمایش داده شده است. دراین شکلy^* نسبت به موقعیت اولیه اجسام و D ضلع جسم استوانه مربعی در نظر گرفته شده است.

شکل ۱۹ الف، میزان تغییر مکان دو استوانه مربعی را درجهت x نسبت به زمان بدون بعد نشان می‌دهد. همان طور

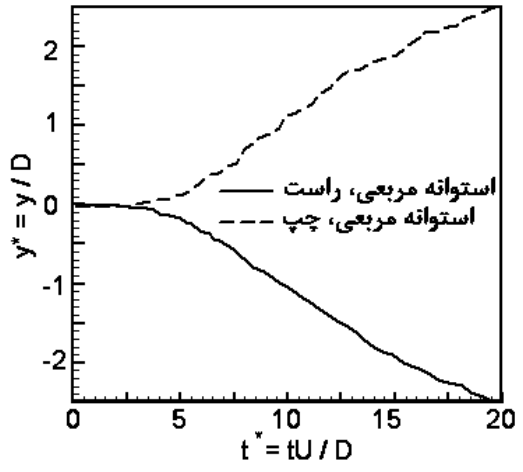
که دیده می‌شود، میزان تغییر مکان در ابتدا برای دو استوانه تقریباً برابر است. در ادامه به دلیل حضور استوانه سمت چپ و ایجاد نیروی رانش (درجهت خلاف حرکت)، استوانه سمت چپ میزان جابجایی کمتری نسبت به استوانه سمت راست دارد. شکل ۱۹ ب، تغییر مکان جانبی دواستوانه مربعی را نسبت به زمان بدون بعد نشان می‌دهد. میزان انحراف جانبی برای هر دو استوانه تقریباً برابر، ولی در دو جهت مختلف است. دلیل این اختلاف، وجود گرادیان فشار دفع کننده بین آنها است که در ابتدا این نیرو روبه افزایش دارد، ولی با دور شدن دواستوانه ازهم، این نیرو روبه کاهش می‌گذارد. نتیجه آن کاهش، جابجایی در جهت (y) برای دو استوانه است. شکل ۱۹ج، سرعت جانبی را برای دو استوانه مربعی درحال سقوط، نشان می‌دهد. همان طور که دراین شکل مشخص است، سرعت جانبی برای دواستوانه در ابتدا روند روبه رشدی را نشان می دهد که درنتیجه حضور نیروی رانش بین آنها است که پس از رسیدن به میزان بیشینه خود یعنی درفاصله تقریبی ۱۵ برابر طول مشخصه شروع به کاهش می کند. در ادامه به دلیل ایجاد نیروی فشاری معکوس، دواستوانه دوباره به هم نزدیک می شوند.



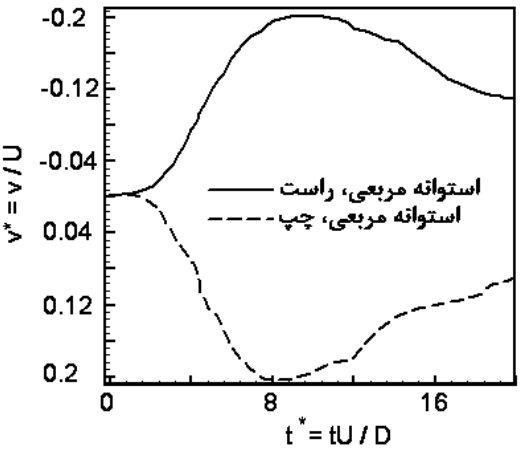
شکل ۱۸- الف) جابه جایی جانبی، ب) تغییرات سرعت جانبی، ج) تغییرات سرعت زاویه ای و د) میزان تغییر مکان استوانه مستطیلی درحال سقوط درعدد رینولدز نهایی ۱۸



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۹ – الف) تغییر مکان عمودی، ب) تغییر مکان جانبی، ج) تغییر سرعت جانبی دواستوانه مربعی درسقوط آزاد

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، پس از اطمینان ازصحت برنامه تدوین شده، به شبیه سازی حرکت سقوط آزاد اجسام استوانه‌ای با مقاطع دایره‌ای، مستطیلی و مربعی پرداخته شده است. برای مقایسه ضریب درگ محاسبه شده ازضریب درگ وارد بر استوانه ساکن در جریان، رابطه درگ استاندارد، استفاده شده است. این‌کاربدلیل آرام بودن جریان (لایه ای بودن) در اعداد رینولدز پایین است. با افزایش عدد رینولدز جریان (براساس سرعت نهایی و قطر جسم)، فشار وارد برجسم کاهش یافته که این عامل، سبب کاهش نیروی وارد بر جسم وکاهش ضریب درگ می‌شود. در واقع در اعداد رینولدز پایین تراز ۳، جریان برای استوانه دایره‌ای در حال سقوط مانند استوانه ساکن در مسیر جریان است؛ اما آنقدرقوی نیست تا ناحیه چرخش ایجادکندکه منطبق به رژیم یکنواخت در یک تعادل پایا است. دراعداد رینولدز ۳ تا ۵ جریان پایا و متقارن است.

نتیجه دیگر حاصل از شبیه سازی، این است که در اعداد رینولدز پائین، مرکز کانال مکان تعادلی برای جسم است؛ یعنی اینکه اگرجسم درابتدا در مرکز کانال قرار داشته باشد، تمایلی به جابجاشدن به سمت خارج مرکز ازخود نشان نمی‌دهد. این رفتار تا اعداد رینولدز حدود ۲۰ پابرجا می ماند. با افزایش عدد رینولدز جریان به بیش از ۲۰ و شروع تشکیل گردابه درپشت جسم استوانه ای با مقطع دایره، ناپایداری هایی درمکان تعادلی جسم مشاهده می‌شود. این بدان معنی است که دیگر جسم تمایلی به ماندن درمرکز ازخود نشان نمی‌دهد.

در حالتی که استوانه با مقطع دایره در جایی خارج از مرکز قرارگرفته باشد، با به هم خوردن تعادل فشاری روی سطح جسم دراثرسیال، نیروی لیفت ایجاد می‌شود که سبب حرکت جسم به سمت مرکز کانال می‌شود و حرکت جانبی جسم متوقف می‌شود. با افزایش عدد رینولدز جریان، میزان تغییر مکان جانبی کاهش می‌یابد.

در خصوص سقوط آزاد استوانه‌های مربعی و مستطیلی نتیجه گرفته شده حاکی از بزرگتر بودن میزان ضریب درگ وارد بر استوانه مستطیلی نسبت به استوانه مربعی است. این امر، سبب کمتر بودن سرعت نهایی سقوط استوانه مستطیلی نسبت به استوانه مربعی شده است. از مقایسه سرعت‌های زاویه‌ای بدست آمده برای این دو هندسه می‌توان گفت،

میزان انحراف استوانه مستطیلی بیش از استوانه مربعی است. میزان تغییر زاویه برای استوانه مربعی، بسیار پائین‌تر از استوانه مستطیلی است که نتیجه فوق را تأیید می‌نماید.

به منظور تکمیل شبیه‌سازی، بررسی حرکت سقوط دو استوانه مستطیلی انجام شده و نتایج خوبی اخذ گردیده است. درحالتی که استوانه مستطیلی اول در مرکز و استوانه دوم در فاصله دورتری به میزان چهار برابر ضلع آن قرار دارد. استوانه اول چندان تغییری درمکان جانبی را احساس نمی‌کند. این امر در نتیجه حضور استوانه دوم و اعمال نیروی فشاری بر استوانه اول است که مانع از تغییر مکان جانبی آن شده است. میزان تغییر مکان استوانه اول و دوم در این حالت تقریباً مشابه است. شبیه‌سازی سقوط دو استوانه مربعی با آرایش عرضی نشان داده که در این حالت یک نیروی فشاری در بین دو هندسه ایجاد می‌شود که سبب دورشدن جانبی دو استوانه نسبت به هم می شود. این نیرو در نتیجه حضور دو استوانه در یک فاصله خاص با حرکت جانبی دو استوانه رفته رفته کاهش می‌یابد تا اینکه در فاصله ای از مرکز (نسبت به دواستوانه) این نیرو کاملاً از بین رفته و نیروی مکش ایجاد شده بین استوانه‌ها، باعث نزدیک شدن دو استوانه می‌شود. میزان تغییر مکان جانبی دو استوانه قرینه یکدیگراست.

نتایج بدست آمده حاصل از سقوط آزاد دو استوانه مستطیلی نشان می‌دهد که دراین آرایش، میزان تأثیر دو استوانه روی هم نسبت به دوحالت قبل بسیار کمتر است. در واقع دو استوانه همانند حالت سقوط تک استوانه رفتار می کنند و با افزایش زمان سقوط، اثرات حضور استوانه دیگر روی رفتاراستوانه مشهود است.

۵- علایم و نشانه ها

a_i	شتاب خطی جسم (متر بر مجذور ثانیه)
D	طول مشخصه (قطر جسم متر)
Fi	بردار نیروی اعمال شده (نیوتن)
m	جرم جسم (کیلوگرم)
P	فشار (نیوتن بر متر مربع)
r	بردار مکان جسم (متر)
t	زمان (ثانیه)
t^*	زمان بدون بعد
T	گشتاور اعمالی (نیوتن بر متر مربع)
U	سرعت مشخصه (متر بر ثانیه)
Ui	بردار سرعت جسم (متر بر ثانیه)
u_i	بردار سرعت سیال (متر بر ثانیه)
vi	بردار سرعت جسم (متر بر ثانیه)
x^*	مکان بدون بعد در جهت x
y_0	موقعیت اولیه استوانه
y^*	مکان بدون بعد در جهت y
xi	بردار مکان جسم (متر)
α	شتاب زاویه‌ای (رادیان بر مجذور ثانیه)
θ	انحراف زاویه‌ای
ρ	دانسیته سیال (کیلوگرم بر متر مکعب)
ρ_s	دانسیته جسم (کیلوگرم بر متر مکعب)
υ	لزجت سینماتیکی (متر مربع بر ثانیه)
ω	سرعت زاویه‌ای (رادیان برثانیه)
$\delta y = y - y_0$	جابه‌جایی جانبی

۶- مراجع

[1] Ladenburg, R (1970) On the influence of the walls in the motion of a sphere in a viscous fluid. Ann Phys 8: 447-458.

[2] Bartok G, Mason SG (1985) Particle motions in sheared suspensions. J Colloid Sci 13.

[3] Ramscheidt FD, Mason SG (1961) Deformation and burst of fluid drops in shear and hyperbolic flow. J Colloid Sci 16(3): 238-261.

[4] Dandy DS, Dwyer HA (1990) A sphere in shear flow at finite Reynolds number, effect of shear on particle lift, drag and heat transfer. J Fluid Mech 216(381): 381-410.

[5] Galimanov A, Acharya S (2008) A computational strategy for simulating heat transfer and flow past deformable objects. Int J Heat Mass Trans 51: 4415-4426.

[6] Al Quddus N, Wailed AM (2008) Motion of a spherical particle in a cylindrical channel using arbitrary Lagrangian-Eulerian method. J colloid sci 317: 620- 630.

[7] Kurose R, Komori S (1999) Drag and lift on a rotating sphere in a linear shear flow. J Fluid Mech 384: 183-206.

[8] Zhang L, Gerstenberg A, Wang X, Liu WK (2004) Immersed finite element method. Comp Method Appl Mech Eng 193: 2051-2067.

[9] Nirschel H, Dwyer HA, Denk V (1995) Three dimensional calculations of the simple shear flow

around a single particle between two moving walls. J Fluid Mech 283: 273-285.

[10] Feng J, HU HH, Joseph DD (1994) Direct numerical simulation of Initial value problem for the motion of solid Bodies in a Newtonian Fluid Part 1: Sedimentation. J Fluid Mech 261: 95-134.

[11] Zhao P, Heinrich JC, Poirier DR (2006) Numerical modeling fluid- particle interactions. Compt Methods 195: 5780-5796.

[12] Lou K, Wang Z, Fan J (2007) A modified immersed boundary method for simulations of fluid- particle interaction. Int J Heat Mass Trans 197: 36-46.

[13] Wang ZJ, Kannan R (2012) An overset adaptive cartesian/prism grid method for moving boundary flow problems. American Institute of Aeronautics and Astronautics 1-14.

[14] Fast P, Shelley MJ (2004) A moving Overset grid method for interface dynamics applied to non-Newtonian Hele –Shaw flow. J Comput Phys 195: 117-142.

[15] Cai J, Tsai HM, Liu F (2005) A parallel viscous flow solver on multi-block overset grids. Comput Fluid 1-12.

[16] Tang HS (2010) Chimera Grid method for incompressible flows and its applications in actual problems. NASA Ames Research Center, CA, 10th Symposium on Overset Composite Grids and Solution Technology 1-25.

[17] Miller ST, Campbell RL, Elsworth CW, Pitt JS, Boger DA (2014) An overset grid method for fluid –structure interaction. WJM 4(07): 217-237.

[18] Pletcher RH, Tannehil JC, Anderson DA (2012) Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer. 3rd edn. Taylor & Francis.

[19] Glowinski R, Hesla TL, Joseph DD (1997) Distributed lagrangian-multiplayer / fictitious domain method for particulate flows. Int J Multiphase flow 25: 755-794.

[20] Nirschel H, Dwyer HA, Denk V (1994) Chimera grid for the calculation of particle flow. University of California, Davis Mechanical and Aeronautical Engineering Davis, CA 95616 USA, AIAA, 94-0519.

[21] Tuncer H (1997) Two-dimensional unsteady Navier-Stokes solution method with moving overset grid. AIAA J 35(3): 471-476.

[22] Wehr D, Stangl R, Wagner S (1994) Interpolation schemes for inter grid boundary value transfer applied to unsteady transonic flow computations on overlaid embedded grids. Proceeding of the 2th European Computational Fluid Dynamics Conference 1: 382-390.

[23] Desquesnes G, Terracol M, Manoha E, Sagaut P (2006) On the use of a high order overlapping grid method for coupling in CFD/CAA. J Comput Phys 220: 355-382.

[24] Tang HS (2006) Study on a grid interface algorithm for solutions of incompressible Navier–Stokes equations. Comput Fluids 35: 1372-1383.

[25] Clift R, Grace Weber ME (1978) Bubbles, drops and particles. Academic Press.