

(علمی-پژوهشی)

شبیه‌سازی عملکرد آیرودینامیکی یک ریزایرفویل مقارن با استفاده از روش دینامیک ذرات اطلاق

در این مقاله، از روش دینامیک ذرات اطلاق جهت شبیه‌سازی جریان حول ریزایرفویل استفاده شده است. به دلیل مشکل رایج در اعمال شرط مرزی و عدم بررسی آیرودینامیکی اجسام در این روش مولکولی برآن شدیم تا مطالعه در این حیطه را آغاز کنیم. در این مطالعه از شرایط مرزی دوره‌ای استفاده شده و با اعمال این شرایط مرزی ذرات به تعادل رسیدند. نتایج بدست‌آمده شامل بررسی پروفیل سرعت در هندسه ساده کانال و مقایسه شبیه‌سازی جریان در کانال به روش دینامیک ذرات اطلاق و دینامیک سیالات محاسباتی می‌باشد. خطای مقایسه پروفیل سرعت با این دو روش ۶ درصد بدست‌آمد. در ادامه، جریان حول ایرفویل لوزی شکل شبیه‌سازی شد و با گسترش جریان حول ایرفویل الگوی خطوط جریان به صورت مقارن بدست‌آمد. نتایج برای ایرفویل ناکا ۰۰۱۲ در زوایای ۰، ۳، ۶، ۹، ۱۰ نیز گسترش داده شد. نمودار ضرایب آیرودینامیکی و همچنین نمودار نسبت نیروی آیرودینامیکی بر حسب زاویه حمله با دو روش شبیه‌سازی دینامیک ذرات اطلاق و دینامیک سیالات محاسباتی مقایسه شده است. خطای مقایسه این دو روش کمتر از ۳ درصد محاسبه شد.

واژه‌های کلیدی: دینامیک ذرات اطلاق، دینامیک سیالات محاسباتی، ریزایرفویل، ناکا ۰۰۱۲، ضرایب آیرودینامیکی

Simulation of the Aerodynamic Performance of a Symmetrical Airfoil Using Dissipative Dynamic Particle Method

This paper uses the dissipative particle dynamic method to simulate the flow around a micro-airfoil. Due to the common problem in applying boundary conditions and the lack of aerodynamic study of objects in this molecular method, we decided to study this field. In this study, periodic boundary conditions were used, and the particles were balanced by applying these boundary conditions. The results include the analysis of velocity profiles in simple channel geometry and the comparison of flow simulations in channels by dissipative particle dynamics and computational fluid dynamics. The error of comparing the velocity profiles with these two methods was 6%. Next, the flow around the rhombus-shaped airfoil was simulated, and with the expansion of the flow around the airfoil, the pattern of flow lines was obtained symmetrically. The results for airfoil NACA0012 were also extended to angles 0, 3, 6, 9 and 10. The diagram of aerodynamic coefficients and the diagram of aerodynamic force ratio in terms of attack angle have been compared with two simulation methods of dissipative particle dynamics and computational fluid dynamics. The comparison error of these two methods was calculated to be less than 3%.

Keywords: Dissipative Particle Dynamics, Computational Fluid Dynamics, Micro-airfoil, NACA0012, Aerodynamic Coefficients

رخشاد دشتی گوهری^{۱*}، رامین ذاکری^{۱***}،
محمد محسن شاه‌مردان^{۱****} و محسن
نظری^{۱****}

۱- دانشکده مکانیک-هوافضا، دانشگاه صنعتی
شاهرود، شاهرود، ایران، کدپستی: ۳۶۱۹۹۵۱۶۱.

* دانشجوی کارشناس ارشد

** استادیار (نویسنده پاسخگو)، ایمیل:

r_zakeri@shahroodut.ac.ir

*** استاد

**** دانشیار

R. Dashti Gohari^{1*}, R. Zakeri^{1**},
M.M. Shahmardan^{1****}, and M.
Nazari^{1****}

1- Department of Mechanical and
Aerospace, Engineering, Shahrood
University of Technology, Postal
Code: 361995161, Shahrood, IRAN.

* M.Sc. Student

** Assistant Professor
(Corresponding Author): Email:
r_zakeri@shahroodut.ac.ir

*** Professor

**** Associate Professor

(علمی-پژوهشی)

رخشاد دشتی گوهری، رامین ذاکری، محمد محسن شاه‌مردان و محسن نظری

۱- مقدمه

امروزه علوم نانو و شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای در مقیاس مولکولی، به یکی از پرطرفدارترین موضوع‌های مورد مطالعه در دنیا مبدل شده است. جریان گاز در اطراف ساختارهای مقیاس میکرو، بخشی جدایی‌ناپذیر از بسیاری از برنامه‌های کاربردی میکروالکترومکانیکی از جمله میکرو توربو [۱]، سنسورهای شیمیایی [۲]، میکرو پمپ‌ها [۳-۵] و میکروکانال‌های [۱۰-۶] دستگاه‌های کنترل جریان است. وسایل نقلیه میکرو و نانو هواپیما به عنوان «سیستم‌های بسیار سبک وزن» با طول حداکثر ۱۵ سانتی‌متر و وزن کمتر از ۲۰ گرم تعریف می‌شوند. انتظار می‌رود که پیشرفت‌های فناوری، به طور عمده مبتنی بر فناوری‌های میکرو و فناوری نانو، به شیوه‌ای تکاملی ادامه یابد تا قابلیت‌های وسایل نقلیه آینده نانومتری و نانومواد را بهبود بخشد و زمان پرواز و زمان حمل بار بهبود یابد. مطالعه تجربی جریان گاز در مقیاس میکروسکوپی به واسطه ابعاد فیزیکی کوچک به طور ذاتی مشکل و بیشتر به جریان در کانال‌های ساده محدود شده است. از سوی دیگر، متاسفانه تکنیک‌های دینامیک سیالات محاسباتی قدیمی فقط برای رژیم پیوسته معتبر است. در نتیجه بر آن شدیم که در این مقاله به بررسی جریان حول ریزایرفویل بپردازیم. هدف در مقاله پیش رو شبیه‌سازی جریان حول ریزایرفویل می‌باشد و چون در رژیم ناپیوسته قرار داریم باید از شبیه‌سازی مولکولی استفاده کنیم. زیرا شبیه‌سازی با نرم افزار فلوئنت نمی‌تواند پاسخ گوی مناسبی برای این نوع رژیم باشد. وسایل نقلیه میکرو و نانو ایرفویل در حال حاضر بسیار گسترش یافته است. از دیدگاه مزوسکوپی، تلاش‌های متعددی برای استفاده از روش‌های مختلف از قبیل دینامیک مولکولی [۱۱] یا روش لئیس بولتزمن [۱۲ و ۱۳] و مستقیم مونت کارلو [۱۴] برای شبیه‌سازی جریان بر روی ایرفویل شده است اما در این مقاله از روش دینامیک مولکولی دانه درشت یا دینامیک ذرات اتلاfi برای شبیه‌سازی ریزایرفویل استفاده خواهیم نمود. ضرورت انتخاب این روش، در این است که در شاخص ریز برخورد بین ذرات اهمیت دارد و روش دینامیک مولکولی در شاخص میکرو هزینه‌های بالایی دارد و در روش لئیس بولتزمن درجات آزادی کاهش پیدا می‌کند که این باعث می‌شود از واقعیت دور شویم و در نتیجه این شبیه‌سازی باید به واقعیت نزدیک باشد. از این رو، نیازمند نرم‌افزار قوی هستیم تا در رژیم ناپیوسته بتوانیم از آن استفاده کنیم. روش دینامیک ذرات اتلاfi یک روش دانه درشت قدرتمند برای شبیه‌سازی جریان پیچیده در مقیاس مزو است که توسط هوگربرگ و کولمن [۱۵] در سال ۱۹۹۲ معرفی شده است. گروت و وارن^۲

[۱۸-۱۶] دامنه پارامترهای قابل استفاده را برای شبیه‌سازی دینامیک ذرات اتلاfi بدست آورده‌اند. در روش شبیه‌سازی دینامیک ذرات اتلاfi مشکلات جریان‌های چند فازی [۱۹]، پلیمرها [۲۰-۲۲] و سطح [۲۳ و ۲۴] حل شده است. همچنین، جریان پوآزی در میکروکانال نیز با روش دینامیک ذرات اتلاfi شبیه‌سازی شده است [۲۵]. برخلاف معادلات دینامیک مولکولی، معادلات دینامیک ذرات اتلاfi تصادفی هستند، در نتیجه بیانگر درجه سختی معادلات این نوع روش می‌باشد. علاوه بر این، نیروی اتلاfi به سرعت بستگی دارد و سرعت نیز بیانگر نیرو می‌باشد، بنابراین اتصال غیر خطی بوجود می‌آید [۲۶].

تاکنون هندسه‌های پیچیده‌ای با روش دینامیک ذرات اتلاfi شبیه‌سازی شده‌است [۳۰-۲۷] در تمام این مطالعات، حوزه محاسباتی دارای مرزهای متناوب است. بنابراین، به راحتی قابل اجرا است، اما برای موقعیت‌هایی که حاوی مرز دیواره هستند، دینامیک ذرات اتلاfi با برخی از مشکلات روبرو می‌شود. به دلیل پتانسیل‌های نرم استفاده شده در این روش، ذرات ممکن است به دیواره نفوذ کنند. سعیدی و همکاران [۳۱] در سال ۲۰۱۱ جریان روی ایرفویل ناکا ۰۰۱۲ با زاویه حمله ۱۰ درجه را شبیه‌سازی کردند که محدوده محاسباتی را $3 \times 10^3 \times 80 \times 300$ و عدد رینولدز را ۲۰۰ و سرعت ورودی را $1/12$ و چگالی سیال را $0/3$ در نظر گرفته شد. یکی از مواردی که در کار آن‌ها نیاز به اصلاح دارد، اعمال شرایط مرزی ورودی و خروجی می‌باشد. می‌توان از این روش برای شبیه‌سازی ریزایرفویل در سایز ریزتر در شرایطی که حل پیوسته جوابگو نیست، استفاده نمود. یکی از مهم‌ترین مزایای روش دینامیک ذرات اتلاfi، پتانسیل آن در اتصال رژیم‌های میکرو و ماکرو به منظور مطالعه پدیده‌های بزرگ و طولانی است. بیشتر این مدل‌ها دیوار را به طور صریح با یخ‌زدن یک یا حتی چند لایه از ذرات در نظر می‌گیرند. این ذرات توسط پتانسیل‌های نرم دینامیک ذرات اتلاfi با ذرات مایع در تعامل هستند. دونگ هونگ^۳ و همکاران [۳۲] مدلی را با دو لایه ذره ارائه کرده‌اند. بیان شده است که اثر لایه دوم همگن‌سازی نیروی دیواره و کاهش نوسان چگالی است. دو مورد از مهم‌ترین پارامترهای موجود در این رویکردها تراکم دیواره و دامنه نیروی بقا بین دیواره و ذرات سیال است. نیروی بقا، نفوذپذیری دیواره بالای دامنه را تضمین می‌کند اما باعث نوسان بیش از حد چگالی در نزدیکی دیواره می‌شود. پارامتر چگالی دیواره اثر مشابه دارد. پیوکی و کارنیاداکیس [۳۳] اثرات این دو پارامتر را با چندین شبیه‌سازی تشخیصی بررسی کرده‌اند. همچنین، آن‌ها روش جدیدی را برای اجرای شرایط مرزی دیواره پیشنهاد دادند. آن‌ها نیروی بقا را که بر روی دیوار اعمال

3. Duong-Hong

4. Pivkin and Karniadakis

1. Hoogerbrugge, and Koelman

2. Groot and Warren

دیواره دامنه محاسباتی برخورد می‌کنند، با روش بازتاب مکسول مجدداً به دامنه محاسباتی بازمی‌گردد.

در این مقاله برای اصلاح دینامیک سیالات محاسباتی یک مدل برای مرز جامد پیشنهاد شده است. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی شامل بررسی پروفیل سرعت در کانال می‌باشد. نتایج برای بررسی جریان حول ایرفویل لوزی شکل به روش دینامیک ذرات اتلافی شبیه‌سازی شده است. نتایج حول ایرفویل ناکا ۰۰۱۲ در زوایای مختلف حمله نیز بدست آمده است. در آخر نمودار ضریب درگ و ضریب لیفت بدست آمده از حل دینامیک ذرات اتلافی نیز با نمودار حل دینامیک سیالات محاسباتی مقایسه شده است.

۲- معادلات حاکم

سیال دینامیک ذرات اتلافی به مولفه‌های درشت دانه مربوط می‌شود که متشکل از ذراتی است که با ذرات دانه درشت مطابقت دارند، بنابراین خوشه‌های مولکولی را به جای اتم‌های فردی نشان می‌دهند [۳۷]. دانه‌های درشت منجر به پتانسیل نرم می‌شوند و ذرات با هم همپوشانی می‌کنند. با استفاده از دینامیک ذرات اتلافی بجای دینامیک مولکولی می‌شود گام‌های زمانی بزرگتری را در نظر گرفت، در نتیجه هزینه محاسباتی نسبت به روش دینامیک مولکولی کمتر است [۳۸]. دینامیک ذرات اتلافی یک سیستم شامل ذرات را که دارای حجم می‌باشند توصیف می‌کند. دینامیک ذرات اتلافی روشی مبتنی بر ذرات است که پتانسیل‌های نرم را برای تعامل ذرات در نظر می‌گیرد. سیستمی با تعداد ذرات N در نظر گرفته شده است، ذرات i دارای جرم M_i و موقعیت \vec{r}_i ، سرعت \vec{v}_i و شتاب \vec{a}_i می‌باشند. معمولاً از یک فرم پارابولیک ساده برای نیروی بقا استفاده می‌شود، بنابراین نیروی متناظر آن که توسط ذرات j بر روی ذرات i اعمال می‌شود، به طور خطی به فاصله بین ذرات وابسته است و به شرح زیر است [۳۹]:

$$\vec{F}_{ij}^c = \begin{cases} \vec{a}_{ij} \left(1 - \frac{r_{ij}}{r_c}\right) \hat{r}_{ij}; & r_{ij} \leq r_c \\ 0; & r_{ij} > r_c \end{cases} \quad (1)$$

که در آن \vec{F}_{ij}^c نشان‌دهنده نیروی بقا اعمال شده ذرات i توسط ذره j است و r_c شعاع قطع است، \vec{a}_{ij} دامنه نیروی بقا و $\vec{r}_{ij} = \vec{r}_j - \vec{r}_i$ ، $\vec{r}_{ij} = |\vec{r}_{ij}|$ و $\hat{r}_{ij} = \vec{r}_{ij} / r_{ij}$ است. به منظور حفظ دمای سیستم در مقدار مورد نظر، نیروی بقا و پراکندگی دینامیک ذرات اتلافی به شرح زیر بیان می‌شود:

$$\vec{F}_{ij}^D = -\gamma \omega^D r_{ij} (\vec{v}_{ij} \cdot \hat{r}_{ij}) \hat{r}_{ij} \quad (2)$$

شده بود، محاسبه کردند. سپس، آن‌ها ارتباطی برای نیروی بقا در مقابل چگالی دیواره به دست آوردند. شرایط بدون لغزش در این روش باید در نظر گرفته شود، اما نوسان چگالی هنوز قابل توجه است، بنابراین، آن‌ها یک مکانیزم کنترل برای به حداقل رساندن نوسان چگالی پیشنهاد کردند.

ژانگ^۱ و همکاران [۳۴] در سال ۲۰۱۸ بر روی یک سری شرایط مرزی ساده تحقیق کرده‌اند. یک مشکل چالش برانگیز در سیستم دینامیک ذرات اتلافی چگونگی اجرای یک شرایط مرزی ضد نفوذ، بدون لغزش و بدون اثر دیواره برای مرزهای جامد هندسه دلخواه می‌باشد. بعضی از شرایط مرزی مانند انعکاس، بازتاب‌های سخت و غیره احتمال بیشتری در ایجاد نوسانات نامناسب دما و چگالی در نزدیکی دیواره بوجود می‌آورند. براساس بحث‌های فوق لازم است که یک شرایط مرزی ایجاد شود که بدون در نظر گرفتن هندسه و خواصی مانند رطوبت در سیستم‌ها به خوبی اعمال شود. در این مقاله توزیع ذرات مایع و جامد و سرعت بین آن‌ها بررسی شده است. این شرایط مرزی باعث نفوذ و نگاه‌داشتن خواص می‌شود ولی در عین حال در پیاده‌سازی بسیار خوب عمل می‌کند و قبل از پیاده‌سازی این شرایط مرزی لازم نیست مرز مشخص شود. پال^۲ و همکاران [۳۵] در سال ۲۰۱۵ شرایط مرزی متقارن پیشنهاد دادند. رنجیت^۳ و همکاران [۳۶] در سال ۲۰۱۳ روی شرایط مرزی بدون لغزش در روش دینامیک ذرات اتلافی تحقیق کردند و در این تحقیقات روشی جدید برای اعمال لغزش پیشنهاد شد و از سه نوع شرایط مرزی ۱-مرزهای مجازی، ۲-مرزهای دیواره یخ‌زده و ۳-مرزهایی با دیواره تیز استفاده نمودند. در تحقیقات پیشین، مطالعه‌ای پیرامون بررسی ضرایب آیرودینامیکی بر روی ایرفویل به روش دینامیک ذرات اتلافی صورت نگرفته و تنها در سال ۲۰۱۱ مقاله‌ای در مورد جریان بر روی یک ریزایرفویل گزارش شده است. در این مقاله کانتور سرعت ناکا ۰۰۱۲ تنها در زاویه حمله ۱۰ درجه با دینامیک سیالات محاسباتی مقایسه شده است و حرکت ذرات حول ایرفویل نمایش داده نشده است. به دلیل مشکل رایج در اعمال شرط مرزی و عدم بررسی آیرودینامیکی اجسام در این روش مولکولی برآن شدم تا مطالعه در این حیطه را آغاز کنیم. در این مطالعه از شرایط مرزی دوره‌ای استفاده شده است. با اعمال این شرایط مرزی ذرات به تعادل رسیدند. مهم‌ترین ویژگی شرایط مرزی اعمال شده در شبیه‌سازی به روش دینامیک ذرات اتلافی، نفوذ ناپذیری ذرات به داخل ریزایرفویل و همچنین بازگشت صحیح ذرات از دیواره ریزایرفویل می‌باشد. ذرات زمانی که به

3. Ranjith

1. Zhang
2. Pal

(علمی-پژوهشی)

رخشاد دشتی گوهری، رامین ذاکری، محمد محسن شاه‌مردان و محسن نظری

است. در دینامیک ذرات اتلافی دو نوع برخورد، نرم و سخت وجود دارد. در برخورد نرم، ذرات را بر روی هندسه قرار می‌دهیم و زمانی که ذرات به سطح برخورد می‌کنند برخورد به صورت آینه‌ای نمی‌باشد، اما در این مقاله کاربرد مورد مطالعه در حیطه هوافضا بوده و در نهایت این ایرفویل قسمتی از پهپاد خواهد شد و جنس آن، سخت و احتمالاً برخورد به صورت آینه‌ای خواهد بود. فقط در دو حالت، دمای سطح بالا باشد و یا اینکه هندسه از جنس سخت نباشد، برخورد به صورت آینه‌ای نخواهد بود که هیچ یک از این دو حالت کاربردی در مطالعه پیش‌رو ندارند. در این مطالعه بعد از برخورد، بدون لغزش منعکس می‌شود. مرحله اول یافتن تقاطع ذرات دامنه محاسباتی با هندسه می‌باشد که امری ضروری و با استفاده از شیب خط و عرض از مبدا برخورد مناسبی بدست آمده است. در دامنه محاسباتی، برخورد ذره با مختصات مکانی (x_p, y_p) با نقاط هندسه مورد بررسی قرار گرفت، سپس با وجود نقطه برخورد، زاویه برخورد با استفاده از روابط زیر بدست آمده است.

$$\theta = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (9)$$

در این رابطه x و y به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$x = x_{collision} - x_{geometry} \quad (10)$$

$$y = y_{collision} - y_{geometry} \quad (11)$$

مسئله اصلی انعکاس صحیح ذرات از روی هندسه می‌باشد که با استفاده از تغییر مبدا مختصات و دوران و با استفاده از روابط زیر بدست آمده است. زمانی که نقاط برخورد در محدوده $x_{collision} > 0$ و $y_{collision} > 0$ باشد آنگاه خواهیم داشت:

$$x_{reflect} = (p \times \cos(\beta + \theta)) + x_{collision} \quad (12)$$

$$y_{reflect} = (p \times \sin(\beta + \theta)) + y_{collision} \quad (13)$$

زمانی که نقاط برخورد در محدوده $x_{collision} < 0$ و $y_{collision} < 0$ باشد آنگاه خواهیم داشت:

$$x_{reflect} = -\left(p \times \cos((3.141592654 - \beta) + (3.141592654 - \theta))\right) + x_{collision} \quad (14)$$

$$y_{reflect} = -\left(p \times \sin((3.141592654 - \beta) + (3.141592654 - \theta))\right) + y_{collision} \quad (15)$$

$$\vec{F}_{ij}^R = \frac{\sigma \omega_{r_{ij}}^R \zeta_{ij}}{\sqrt{dt}} \hat{r}_{ij} \quad (3)$$

که \vec{F}_{ij}^D و \vec{F}_{ij}^R نشان‌دهنده نیروی تصادفی و پراکندگی می‌باشد که توسط ذرات نسبت به اعمال می‌شود. σ و γ به ترتیب قدرت نیروهای پراکندگی و تصادفی هستند و همچنین توابع وزنی نیروی پراکندگی و تصادفی ω^D و ω^R می‌باشند، $\zeta_{ij} = \zeta_{ji}$ تعداد ذرات نرمال تصادفی توزیع شده و dt مرحله زمان است. با استفاده از قضیه اتلاف نوسانات می‌توان توابع وزنی اتلافی و تصادفی را به شرح زیر نوشت:

$$\omega^D_r = (\omega^R_r)^2 \quad (4)$$

و همچنین دامنه آن‌ها نیز به شرح زیر است:

$$\omega^2 = 2\gamma k_B T \quad (5)$$

که k_B ثابت بولتزمن و T دمای سیستم است. تابع وزن تصادفی معمولاً به عنوان یک تابع خطی ساده در نظر گرفته می‌شود:

$$\omega_{ij}^R = \begin{cases} 1 - \frac{r_{ij}}{r_c} & r_{ij} \leq r_c \\ 0 & r_{ij} > r_c \end{cases} \quad (6)$$

روش دینامیک ذرات اتلافی مبتنی بر قانون دوم نیوتن است:

$$\sum_{j=1, j \neq i}^N \vec{F}_{ij} = m_i \vec{a}_i \quad (7)$$

به منظور محاسبه خصوصیات ماکروسکوپی مانند چگالی، دما، ویسکوزیته و غیره، یک روند متوسط در طی تکامل ذرات انجام می‌شود. تکامل زمانی ذرات را می‌توان با استفاده از ادغام عددی به دست آورد. طرح‌های عددی مختلفی وجود دارد و متداول‌ترین آن‌ها سرعت ورلت که به شرح زیر است است [۳۹]:

$$\begin{cases} \vec{r}_i^{n+1} = \vec{r}_i^n + \vec{v}_i^n dt + \frac{1}{2} \vec{a}_i^n dt^2 \\ \vec{v}_i^{n+\frac{1}{2}} = \vec{v}_i^n + \frac{1}{2} \vec{a}_i^n dt \\ \text{Compute Accelerations: } \vec{a}_i^{n+1}(\vec{r}_i^{n+1}, \vec{v}_i^{n+\frac{1}{2}}) \\ \vec{v}_i^{n+1} = \vec{v}_i^{n+\frac{1}{2}} + \frac{1}{2} \vec{a}_i^{n+1} dt \end{cases} \quad (8)$$

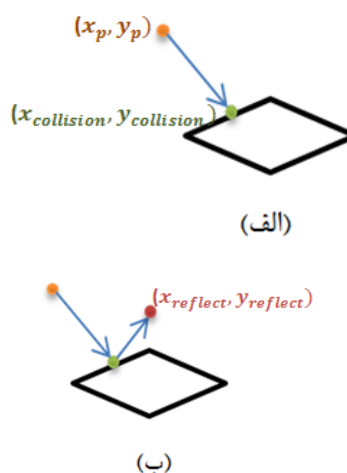
۲-۱- بازتاب از دیوار پیچیده

باید توجه داشت شبیه‌سازی بر مبنای دینامیک سیالات عددی مبتنی بر پیوستگی است و دامنه محاسباتی در ناحیه سیال محصور است و دیوار به طور صریح مدل‌سازی نمی‌شود. برای رفع این مورد در شبیه‌سازی دینامیک سیالات عددی، یک مدل برای مرز جامد در روش دینامیک ذرات اتلافی پیشنهاد شده است. در این مدل از برخورد ذرات و انعکاس آن‌ها استفاده شده

در روابط بالا p نشان‌دهنده طول پاره خط نقطه انعکاس محور مختصات اولیه است و زاویه β نیز از رابطه زیر بدست خواهد آمد:

$$\beta = \tan^{-1}(m) \quad (16)$$

در رابطه بالا m شیب خط مورد نظر می‌باشد. در شکل ۱-الف می‌توان برخورد ذره به هندسه ساده و در شکل ۱-ب می‌توان شماتیکی از انعکاس ذره از روی هندسه را مشاهده نمود. همان‌طور که در روابط بالا مشاهده می‌شود با استفاده از ریاضیات به انعکاس صحیح ذرات از روی دیواره می‌توان دست یافت.



شکل (۱): الف-برخورد ذره‌ای دامنه محاسباتی با نقاط هندسه ب-انعکاس ذره پس از برخورد.

۳- تحلیل اگزورژی

معادله ناویر استوکس برای جریان آرام در حالت پایا و توسعه یافته در یک کانال به معادله زیر کاهش می‌یابد:

$$\frac{dp}{dx} = \mu \frac{d^2u}{dx^2} \quad (17)$$

که دارای حل عمومی زیر می‌باشد:

$$U_x = \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} y^2 + C_1 y + C_2 \quad (18)$$

با در نظر گرفتن شرط عدم لغزش روی دیواره بالایی و پایینی می‌توان ثابت‌های انتگرال‌گیری C_1 و C_2 را تعیین نموده و توزیع سرعت زیر بدست می‌آید.

$$U_x = -\frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} (h^2 - y^2) \quad (19)$$

برای اطمینان از آن که شرط مرزی بر روی دیواره‌ها به درستی در کد کامپیوتری نوشته شده، ابتدا کد برای شبیه‌سازی یک جریان آرام در کانال با اعمال شرایط مرزی بکار می‌رود. با مقایسه حل عددی صورت گرفته با حل نرم افزار انسیس فلوئنت جریان

درون کانال می‌توان به صحت حل عددی پی برد. در نمایش پروفیل از موقعیت ذرات و سرعت آن‌ها استفاده شده است و به دلیل روش ناپیوسته سیالات دینامیک ذرات اتلافی طبیعی است که مقداری عدم تقارن مشاهده شود. چنانچه از روش میانگین‌گیری و ریلکسیشن استفاده می‌شد نیز پروفیل بصورت متقارن نشان داده می‌شد ولی ترجیح بر آن شد که کاملاً بصورت طبیعی نمایش داده و میزان نوسانات ذرات در نمودار آورده شود.

۳-۱- مقایسه جریان درون کانال با روش حجم محدود و دینامیک ذرات اتلافی

کانال با ابعاد 20×20 طراحی شده با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی مورد شبیه‌سازی عددی قرار گرفته است. دینامیک سیالات محاسباتی، مسائل مشتمل بر شارهای سیالاتی را تجزیه و تحلیل می‌کند. روش‌های عددی مورد استفاده جهت گسسته‌سازی معادلات دیفرانسیل، روش اجزاء محدود، روش حجم محدود و روش تفاضل محدود می‌باشد. بیش‌تر نرم‌افزارهای تجاری در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی بر مبنای روش حجم محدود بسط و توسعه یافته‌اند. محدوده حل به تعداد معینی حجم کنترل مجاور هم تقسیم شده و معادلات در آن محدوده حل می‌شود. کمیت‌ها در مرکز گره‌ها محاسبه شده و از طریق میان‌بایی روی سطوح بدست می‌آید. تکنیک‌های دینامیک سیالات محاسباتی فقط برای رژیم پیوسته معتبر است. این تکنیک‌ها در روش‌های عددی پیوسته در شاخص ریز محدودیت دارد. کانال در محیط انسیس مدل‌سازی شده است. ناحیه مورد نظر برای تحلیل جریان به المان‌های کوچک تقسیم شده است. تمام ناحیه محاسباتی با سلول‌های چهار وجهی شبکه‌بندی شده است. همان‌طور که می‌دانیم دینامیک ذرات اتلافی یک روش لاگرانژی و در نتیجه روشی بدون شبکه است. این روش به هیچ‌وجه از شبکه استفاده نمی‌کند، اما برای محاسبه خواص ماکروسکوپی مانند چگالی، سرعت و غیره، ما باید یک فرآیند آماری را انجام دهیم. بنابراین ما برای انجام این فرآیند از یک شبکه دکارتی استفاده می‌کنیم. این شبکه دقیقاً برای اندازه‌گیری متوسط مورد استفاده قرار می‌گیرد و با مش مشترکی که در المان محدود یا روش‌های حجم محدود می‌بینیم کاملاً متفاوت است. نیروی جاذبه وارد شونده به هر ذره را به عنوان نیروی خارجی در نظر می‌گیریم:

$$F_e = 0.01 \quad (20)$$

از فرمول زیر خطای موجود در دو روش، بدست آمده است.

$$\frac{100}{N} \sum \left(\frac{V_{DDP} - V_{FVM}}{V_{FVM}} \right) \quad (20)$$

در فرمول بالا V_{DDP} و V_{FVM} به ترتیب سرعت به دست آمده از شبیه‌سازی دینامیک ذرات اتلافی و دینامیک سیالات محاسباتی

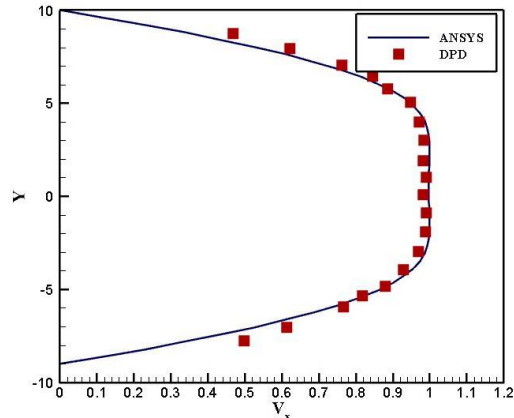
(علمی-پژوهشی)

رخشاد دشتی گوهری، رامین ذاکری، محمد محسن شاه‌مردان و محسن نظری

جدول (۱): ابعاد هندسه.

| | | | | |
|---------|------------|-------|----------|-------|
| ابعاد | (۱،۰-۰/۲۵) | (۲،۰) | (۰،۱/۲۵) | (۰،۰) |
| ایرفویل | | | | |

و N تعداد نقاط می‌باشد با توجه به فرمول بالا درصد خطا ۶ می‌باشد. مقایسه دو روش دینامیک ذرات اتلافی و دینامیک سیالات محاسباتی جهت شبیه‌سازی جریان درون کانال ساده در شرایط پایا در شکل ۲ آورده شده است.



شکل (۲): مقایسه دو روش دینامیک ذرات اتلافی و دینامیک سیالات محاسباتی جهت شبیه‌سازی جریان درون کانال ساده در شرایط پایا.

۵- اعتبارسنجی کد

در این بخش، به بررسی نتایج شبیه‌سازی دینامیک ذرات اتلافی پرداخته شده است. شرایط شبیه‌سازی با در نظر گرفتن ۸۰۰۰ ذره می‌باشد. یکی از برتری‌های روش دینامیک ذرات اتلافی در استفاده از تعداد ذرات کم و بدست آوردن جواب مناسب است. هر ذره نماینده تعدادی ذرات ریزتر است و نشان داده شده است که با همین تعداد ذرات نتایج مناسبی را می‌توان بدست آورد. در جدول ۲ پارامترهای شبیه‌سازی شده در دینامیک ذرات اتلافی آورده شده است. عدد رینولدز کم‌تر از ۱۰ در نظر گرفته است.

جدول (۲): پارامترهای شبیه‌سازی دینامیک ذرات اتلافی.

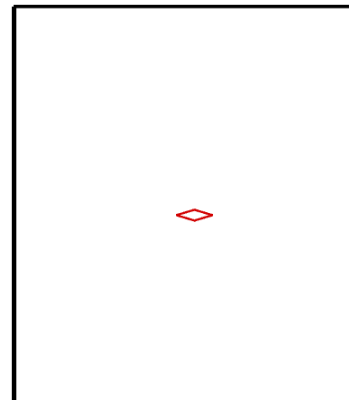
| | | | | | | |
|---------|--------|--------|--------|------|----------|----------|
| پارامتر | d_lx | d_ly | $Rho0$ | dt | $isteps$ | $maxstp$ |
| اندازه | ۲۰ | ۲۰ | ۲۰ | ۰/۰۱ | ۱۰۰ | ۱۰۰۰ |

در شکل ۴ حرکت ذرات تا گام زمانی ۱۰۰۰ در نرم‌افزار تک پلات ترسیم گردیده است. در ابتدا جریان را بر روی یک ایرفویل ساده به شکل لوزی، به روش دینامیک ذرات اتلافی شبیه‌سازی شده است. جریان شروع به گسترش حول ایرفویل می‌کند. همان‌گونه که در شکل ۴ دیده می‌شود، الگوی خطوط جریان متقارن است.

با توجه به شکل ۴ در نزدیکی سطح ایرفویل ($n=0$) حرکت ذرات ثابت است و با افزایش n سرعت ذرات نیز افزایش می‌یابد. سرعت و حرکت ذرات از نیروی اصطکاک بین سطح و سیال ناشی می‌شود. در این شبیه‌سازی از سرعت ورلت استفاده شده است. این الگوریتم نیروی اتلافی را در پایان هر مرحله زمانی دو بار محاسبه می‌کند تا رابطه ضمنی سرعت بدست آید. همچنین، نیروی پراکندگی فقط یک بار در طی یک مرحله زمانی انجام شده و در اینجا نیروها در آخرین مرحله با سرعت و موقعیت جدید ارزیابی می‌شوند. متغیرهای موقعیت و سرعت در گام‌های زمانی مختلف به روز می‌شود و ذرات به طور تصادفی در اطراف حرکت می‌کنند اما به دنبال یک جهت مشخصی هستند که توسط نیروهای بقا بیان شده است. نیروی بقا بین ذرات باعث دفع ذرات شده و در نتیجه شبیه‌سازی در مقیاس طولانی‌تری گسترش یابد. نیروی جاذبه‌ای که به هر ذره وارد می‌شود با استفاده از شرایط مرزی استفاده شده برای دیواره دوباره به حوزه سیال باز می‌گردد.

۴- تشریح مسئله

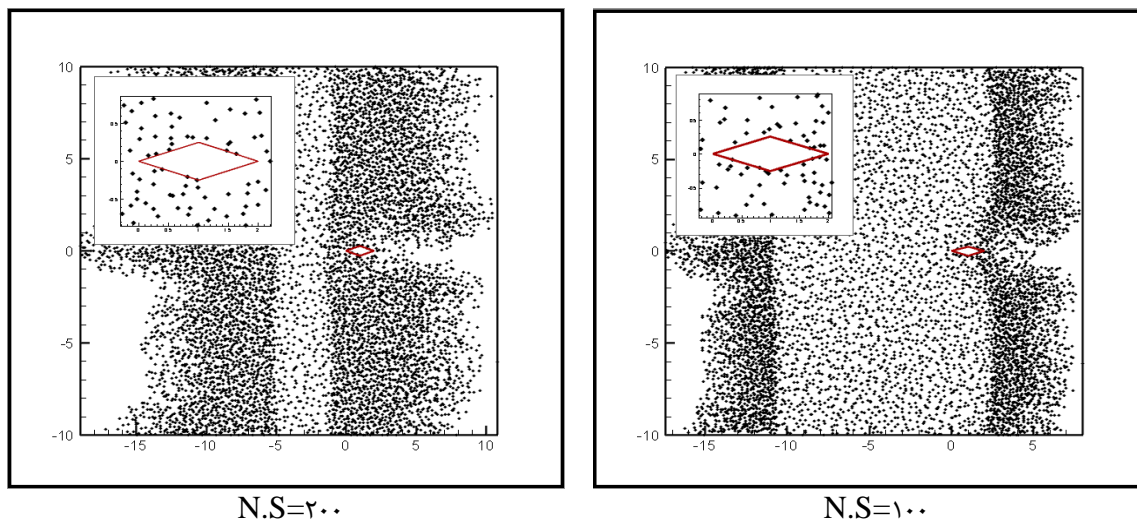
در مسئله پیش رو، سیال نیوتنی در یک کانال ۲۰ در ۲۰ جریان دارد. این نوع جریان در صنعت دارای کاربرد فراوان بوده است و هم می‌توان از آن به عنوان یک مدل کلی از جریان‌های داخلی سیال استفاده نمود. در جهت اصلی جریان x و در جهت عرضی لاشرط مرزی پرئودیک فرض شده است. بر روی دیواره‌های بالا و پایین شرط مرزی دیواره عدم لغزش برقرار است. برای اعتبارسنجی کد شبیه‌سازی به روش دینامیک ذرات اتلافی از کانال استفاده شده است. سپس درون کانال، مقطع بال لوزی شکل در صفر درجه قرار داده شد تا حرکت ذره درون کانال بررسی شود. هندسه جریان در شکل ۳ نشان داده شده است. در ادامه نتایج را برای ایرفویل ناکا ۰۰۱۲ در زوایای مختلف گسترش داده شد.



شکل (۳): بخش عرضی دامنه محاسباتی برای شبیه‌سازی ایرفویل.

می‌باشد. در نزدیکی دیواره نیروهای وارد بر ذرات ممکن است نامتعادل باشند، در نتیجه نوساناتی در نزدیکی دیواره به دلیل الگوی نامتعادل میدان نیرو ظاهر می‌شود. برای ذره‌ای که با دیواره فاصله‌ای کوچکتر از شعاع برش دارد، بخشی از دیواره نادیده گرفته می‌شود و این قسمت هیچ‌گونه نیرویی را روی ذره اعمال نمی‌کند. ذرات زمانی که به دیواره دامنه محاسباتی برخورد می‌کند و با روش بازتاب مکسول دوباره به دامنه محاسباتی بازمی‌گردد. در این مقاله به گسترش نتایج با هندسه انتخابی ایرفویل ناکا ۰۰۱۲۳ در زوایای ۰، ۳، ۶، ۹ و ۱۰ به روش دینامیک ذرات اتلافی شبیه‌سازی شده است. با مقایسه شکل‌های ۹-۵ که به ترتیب مربوط به زوایای ۰، ۳، ۶، ۹ و ۱۰ می‌باشد، متوجه خواهیم شد با افزایش زاویه حمله تعداد ذرات در بالا و پایین ایرفویل افزایش و در نتیجه اختلاف فشار بین این سطوح افزایش یافته است. با آغاز جریان حول مقطع بال، گرادیان‌های زیاد سرعت در منطقه لبه فرار منجر به ایجاد ناحیه‌ای از چرخش شدید در پایین دست جریان می‌شود. گردابه‌های ایجاد شده در جهت پادساعتگرد می‌باشند و از این رو به‌عنوان یک واکنش مسامی و مخالف، گردشی در جهت ساعتگرد در پیرامون مقطع بال بوجود می‌آید.

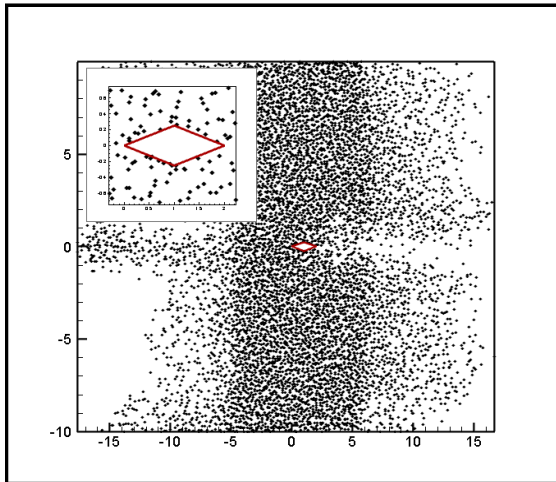
در آغاز، جریان در پایین دست لبه حمله آرام است اما پس از طی مسافتی معین، ناپایداری‌هایی در جریان آرام بروز می‌کند. این ناپایداری‌ها به سرعت رشد کرده و باعث گذار به جریان مغشوش می‌شود که این نشان‌دهنده رعایت قانون مساحت در این شکل است. زیرا در قانون مساحت با تغییرات تدریجی سطح مقطع روبرو هستیم که در این صورت سرعت به صورت ملایم از صفر (نزدیک سطح) تا افزایش حرکت ذرات در بالای ایرفویل پیش می‌رود. با توجه به روند حرکت ذرات در شکل ۴ در قسمت لبه فرار جدایش جریان اتفاق افتاده است در نتیجه اغتشاش بیشتر شده و باعث ایجاد گردابه در منطقه جدا شده می‌شود. در این شبیه‌سازی به دلیل تناوبی بودن جریان از شرایط مرزی دوره‌ای استفاده شده است. همچنین برای به حداقل رساندن اثرات لبه از این شرایط مرزی استفاده می‌کنیم. در این نوع شرایط مرزی ذرات با عبور از یک مرز دوباره با سرعت و موقعیت‌های اصلاح شده در مرز مقابل ظاهر می‌شوند. با اعمال این شرایط مرزی ذرات به تعادل رسیدند. شرایط مرزی دوره‌ای برای دست‌یابی به هندسه‌های که ورودی و خروجی آن‌ها یک اندازه نیست، قابل استفاده نیست. مهم‌ترین ویژگی شرایط مرزی اعمال شده در شبیه‌سازی به روش دینامیک ذرات اتلافی، نفوذناپذیری ذرات به داخل ایرفویل و همچنین بازگشت صحیح ذرات از دیواره ایرفویل



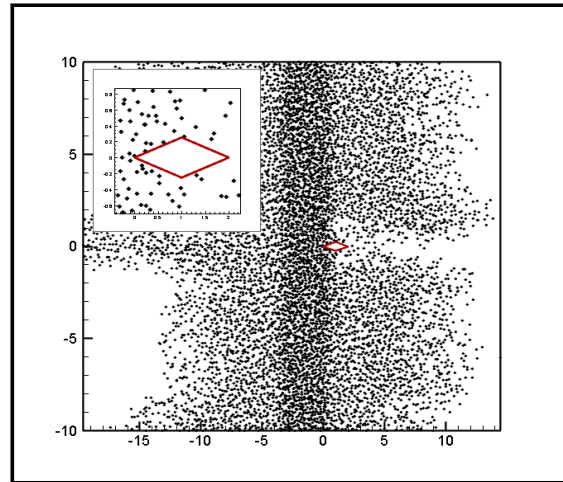
شکل (۴): حرکت ذرات از روی ایرفویل لوزی شکل در گام زمانی ۰/۰۱ و تعداد تکرار ۱۰۰۰ از حالت غیر تعادلی به حالت تعادلی.

(علمی-پژوهشی)

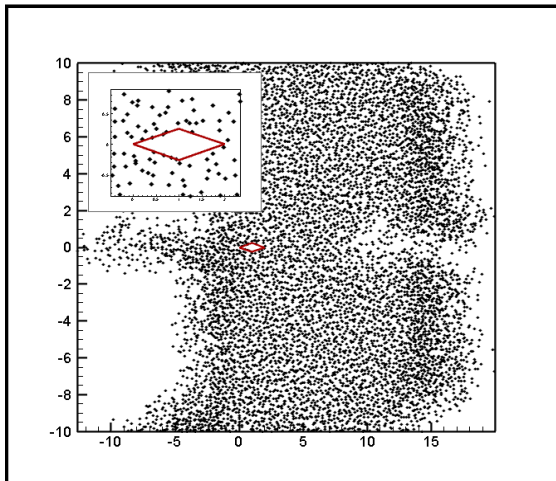
رخشاد دشتی گوهری، رامین ذاکری، محمد محسن شاهمردان و محسن نظری



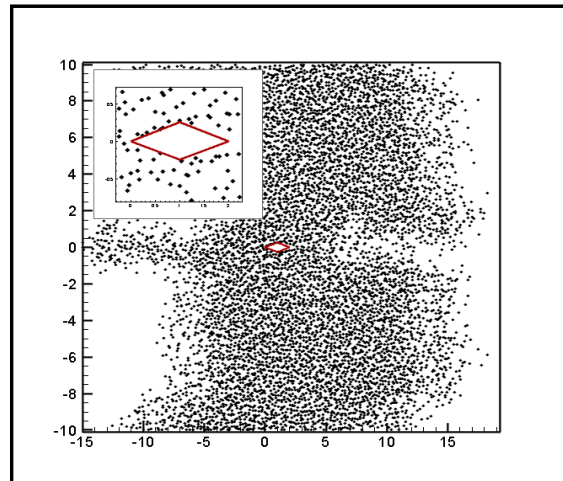
N.S=۴۲۰



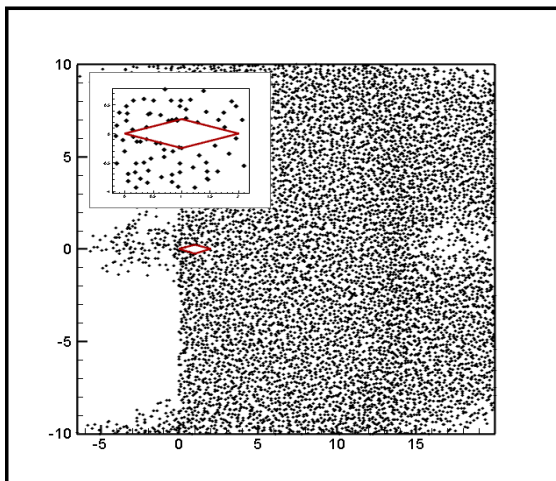
N.S=۳۰۰



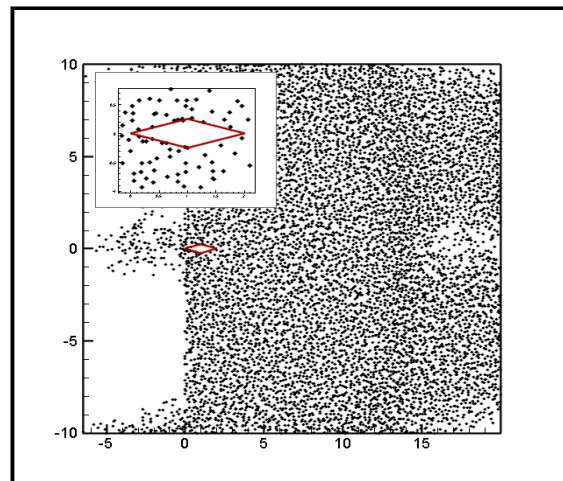
N.S=۷۸۰



N.S=۶۲۰

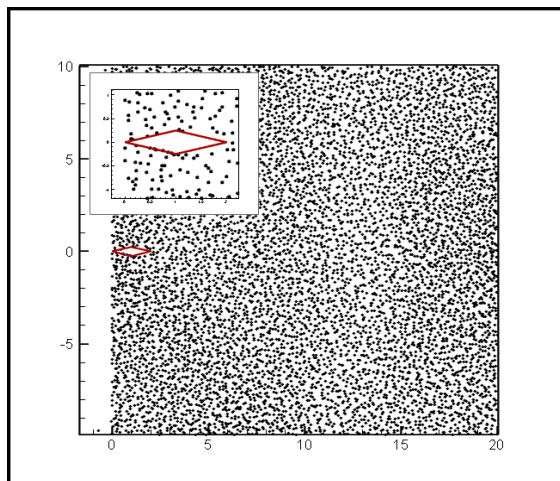


N.S=۸۶۰

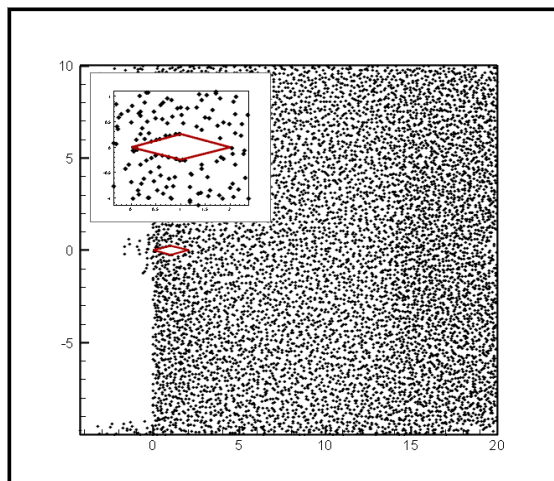


N.S=۷۰۰

شکل (۴): ادامه.

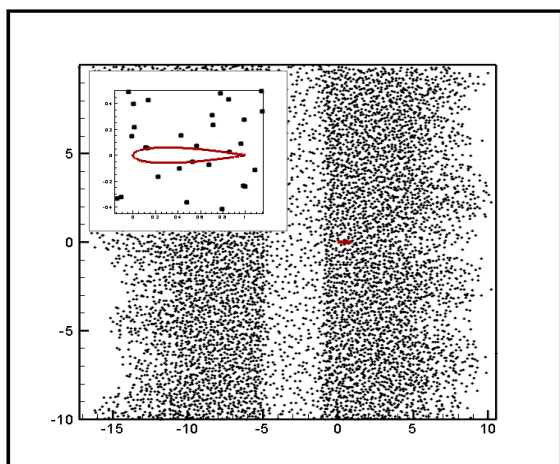


N.S=۱۰۰۰

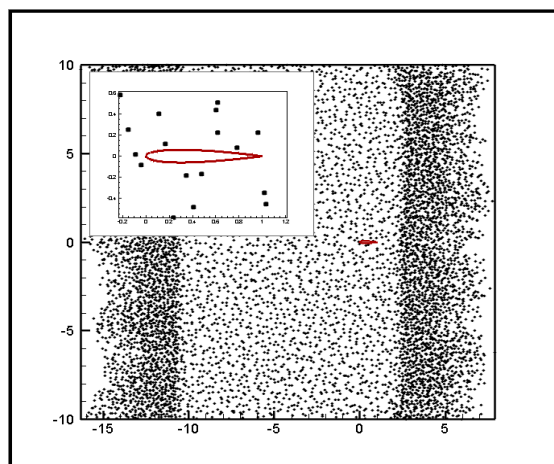


N.S=۹۲۰

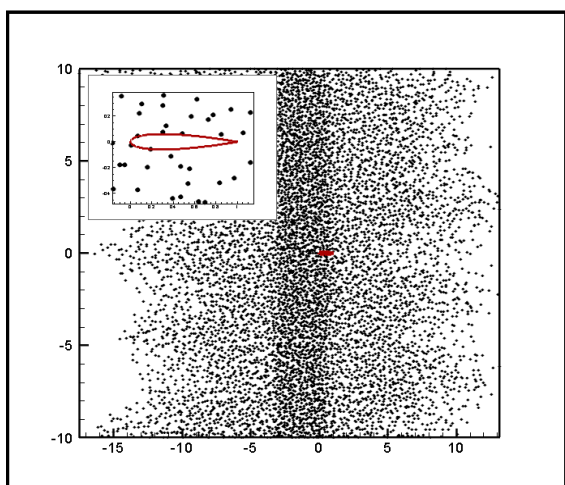
شکل (۴): ادامه.



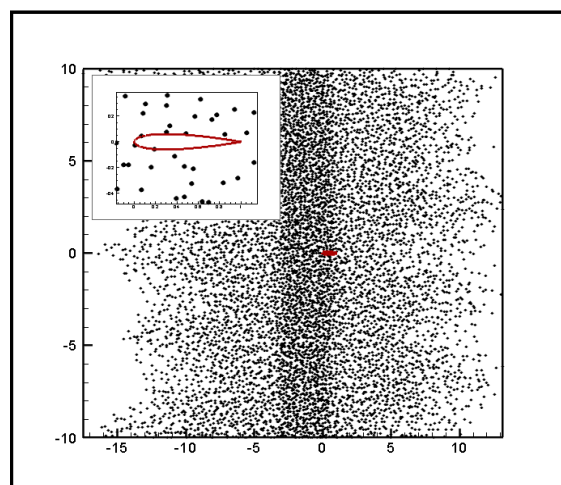
N.S=۲۰۰



N.S=۱۰۰



N.S=۵۸۰

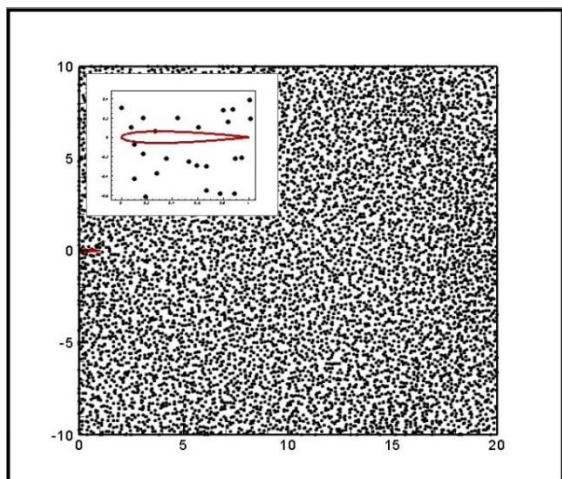


N.S=۲۸۰

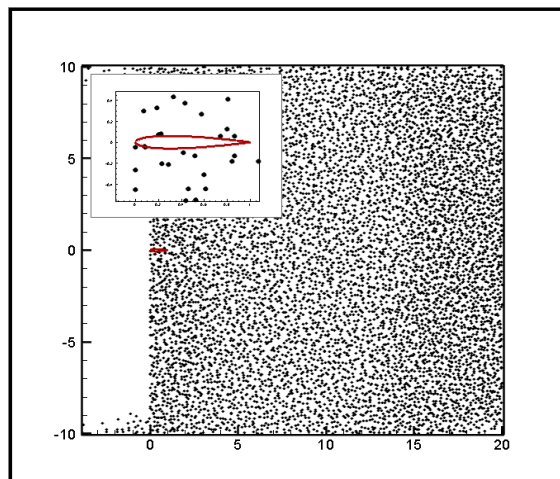
شکل (۵): حرکت ذرات از روی ایرفویل ناکا ۰۰۱۲ در زاویه حمله صفر درجه، در گام زمانی ۰,۰۲ و تعداد تکرار ۱۰۰۰ از حالت غیر تعادلی به حالت تعادلی.

(علمی-پژوهشی)

رخشاد دشتی گوهری، رامین ذاکری، محمد محسن شاهمردان و محسن نظری

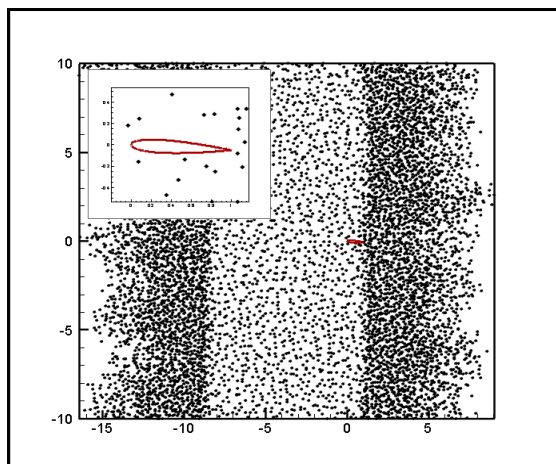


N.S=۱۰۰۰

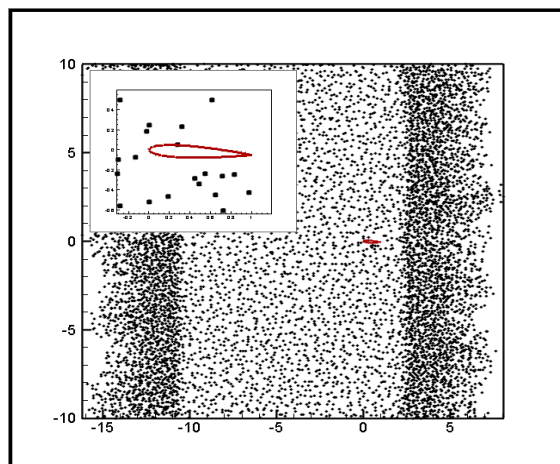


N.S=۷۲۰

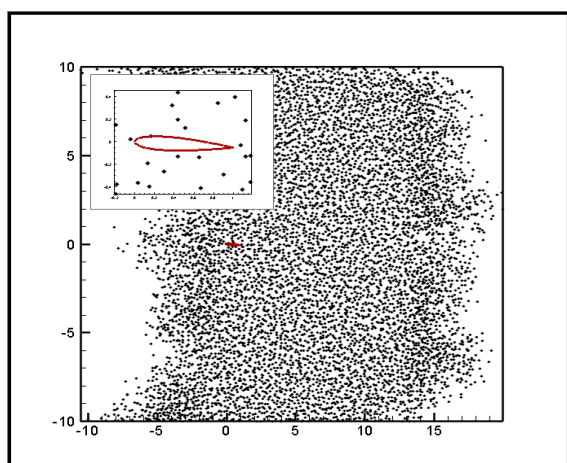
شکل (۵): ادامه.



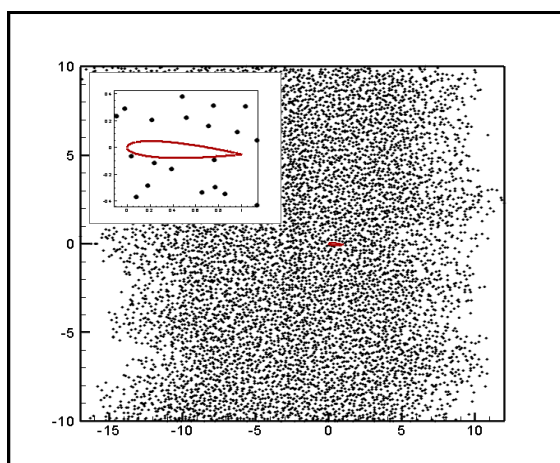
N.S=۱۷۵



N.S=۷۵

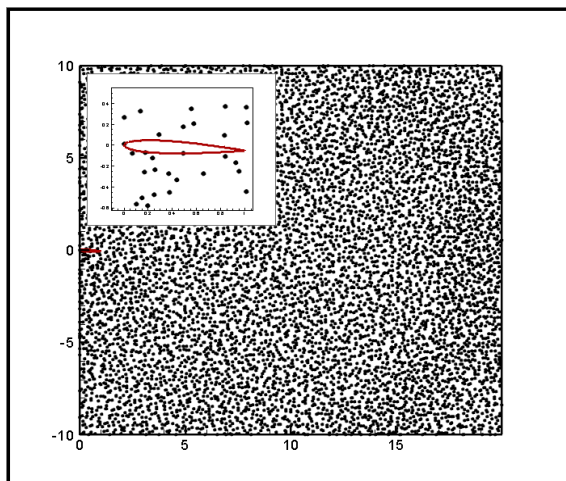


N.S=۶۱۵

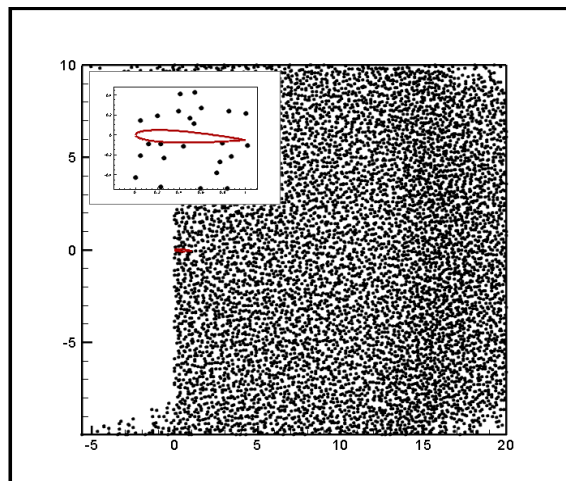


N.S=۲۷۵

شکل (۶): حرکت ذرات از روی ایرفویل ناکا ۰۰۱۲ در زاویه حمله سه درجه، در گام زمانی ۰/۰۲ و تعداد تکرار ۱۰۰۰ از حالت غیر تعادلی به حالت تعادلی.

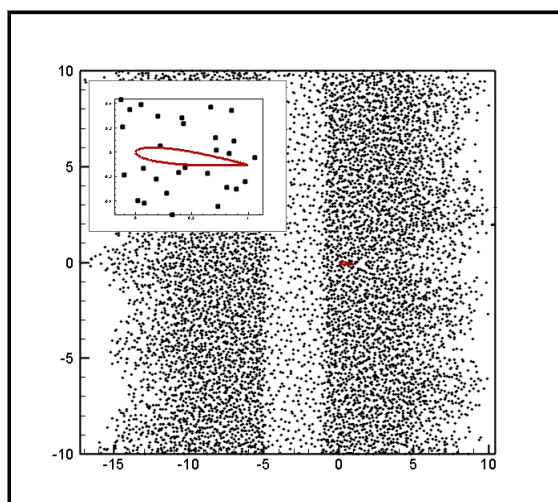


N.S=1000

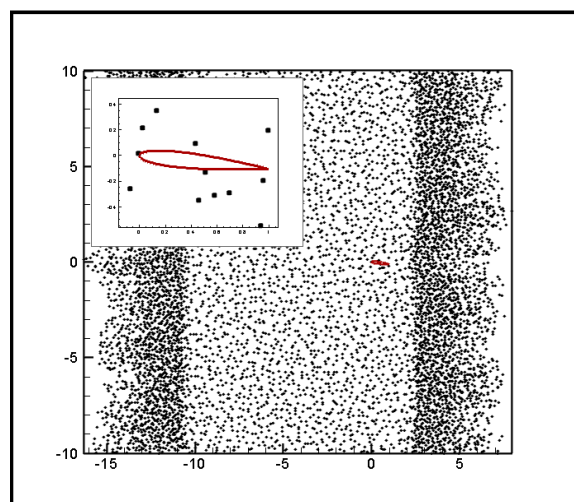


N.S=875

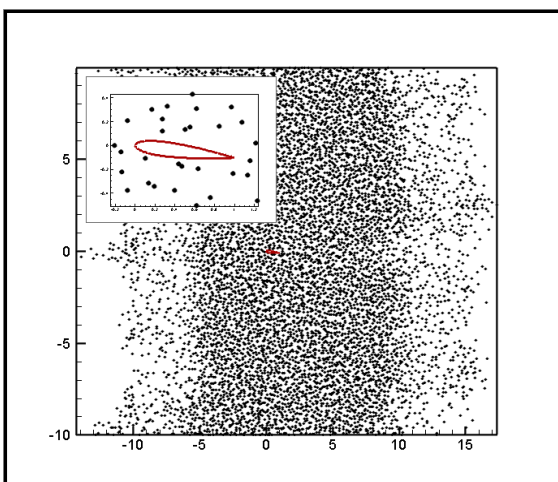
شکل (۶): ادامه.



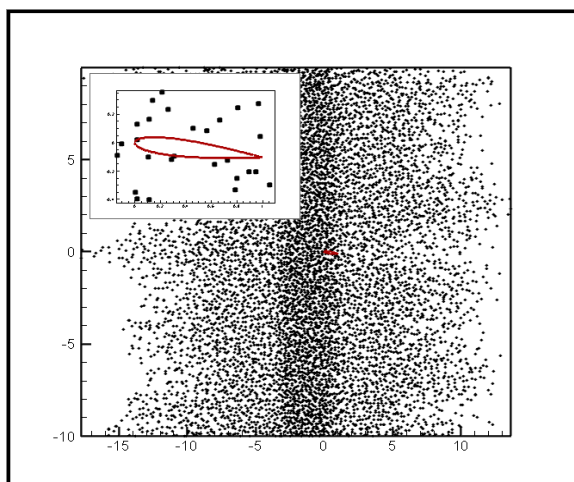
N.S=200



N.S=100



N.S=920

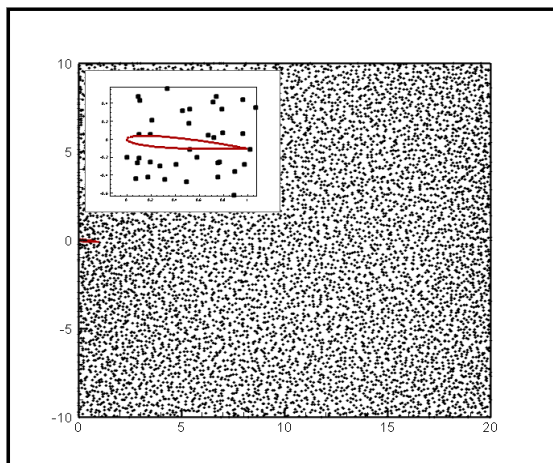


N.S=513

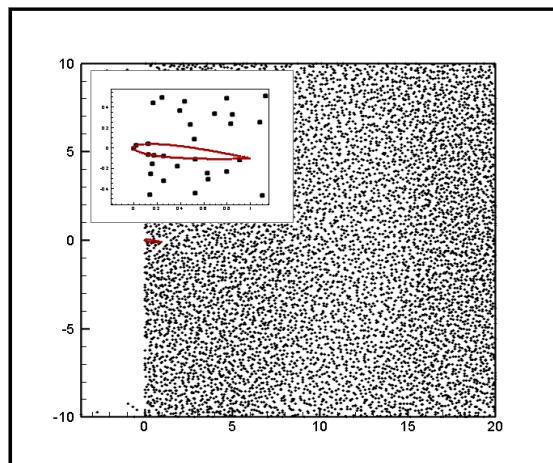
شکل (۷): حرکت ذرات از روی ایرفویل ناکا ۰۰۱۲ در زاویه حمله شش درجه، در گام زمانی ۰/۰۲ و تعداد تکرار ۲۰۰۰ از حالت غیر تعادلی به حالت تعادلی.

(علمی-پژوهشی)

رخشاد دشتی گوهری، رامین ذاکری، محمد محسن شاهمردان و محسن نظری

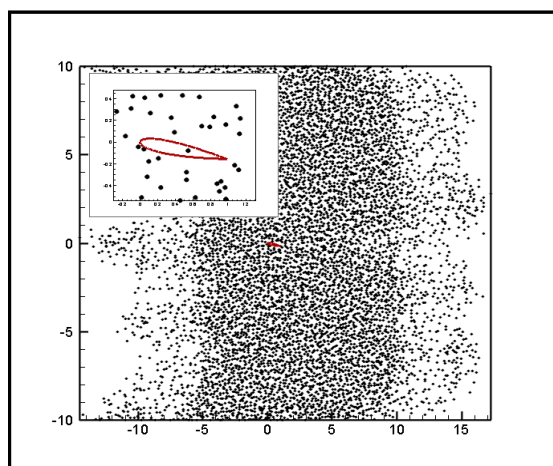


N.S=۲۰۰۰

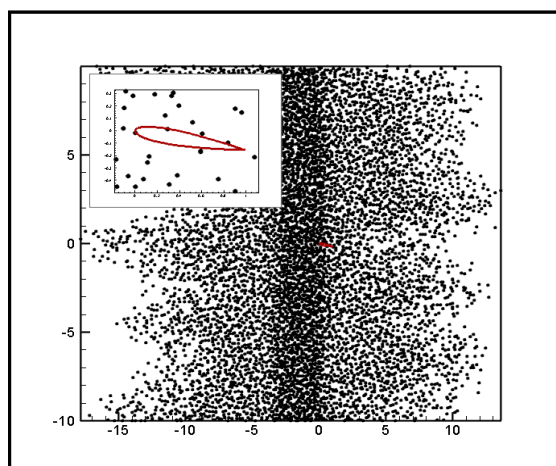


N.S=۱۵۰۰

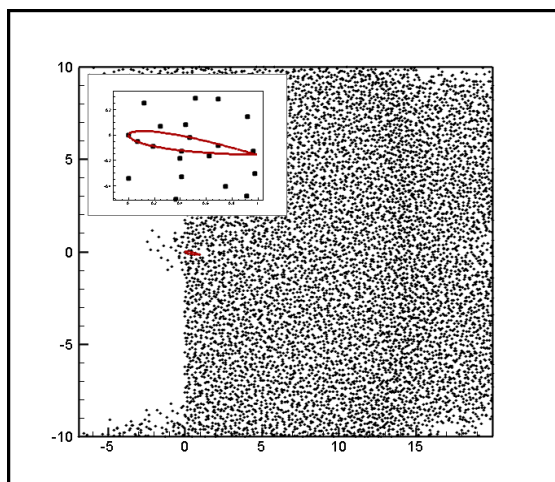
شکل (۷): ادامه.



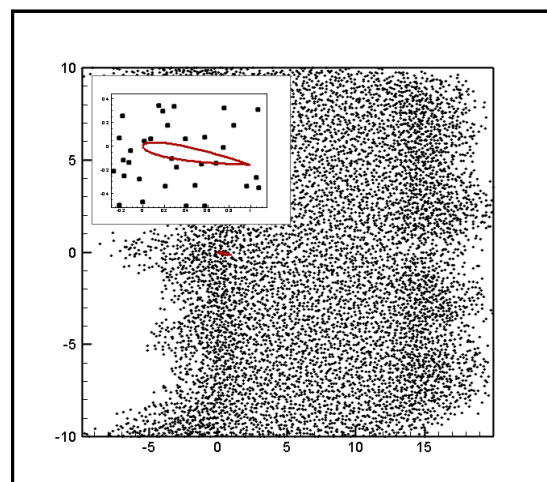
N.S=۶۰۰



N.S=۴۰۰

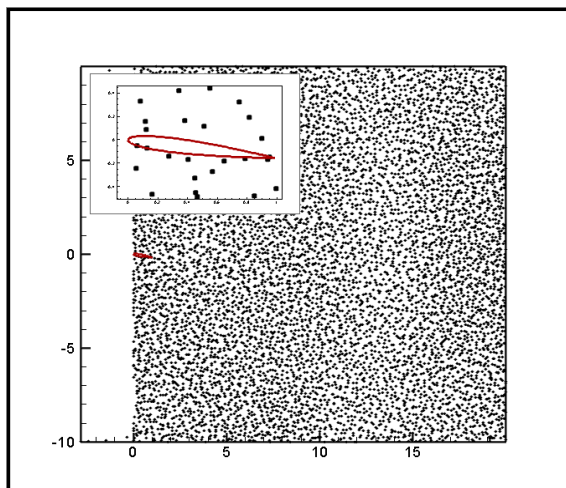


N.S=۱۸۰۰



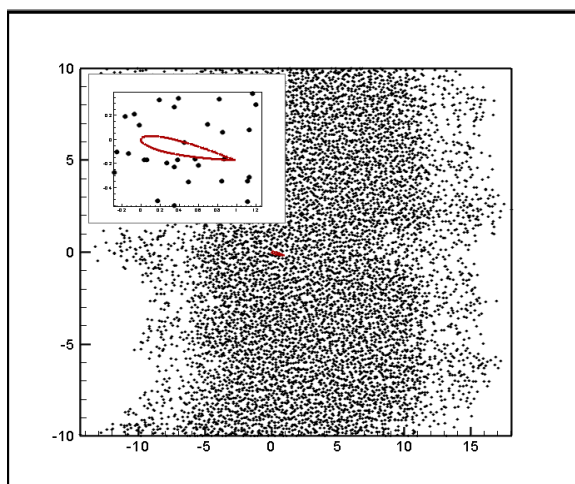
N.S=۱۲۸۰

شکل (۸): حرکت ذرات از روی ایرفویل ناکا ۰۰۱۲ در زاویه حمله نه درجه، در گام زمانی ۰/۰۲ و تعداد تکرار ۲۰۰۰ از حالت غیر تعادلی به حالت تعادلی.

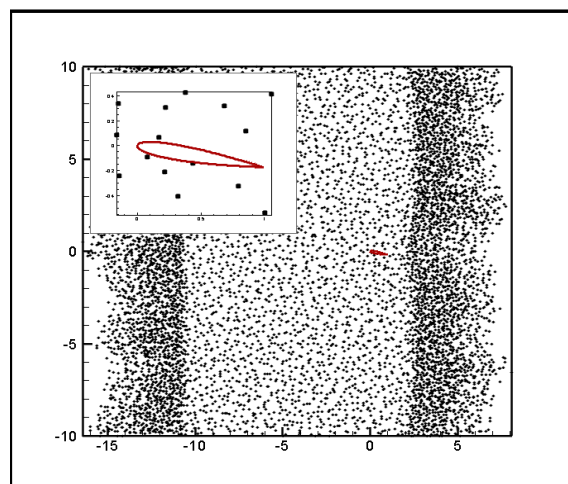


N.S=۲۰۰۰

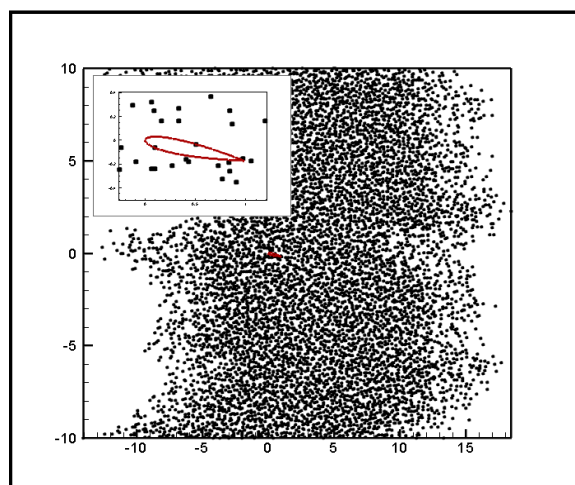
شکل (۸): ادامه.



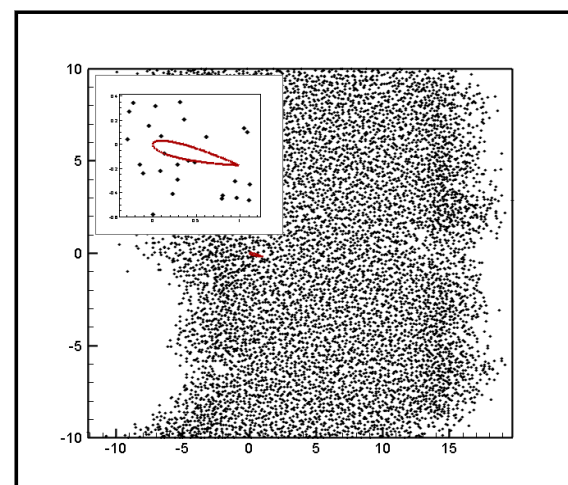
N.S=۵۹۴



N.S=۱۹۴



N.S=۱۱۰۰

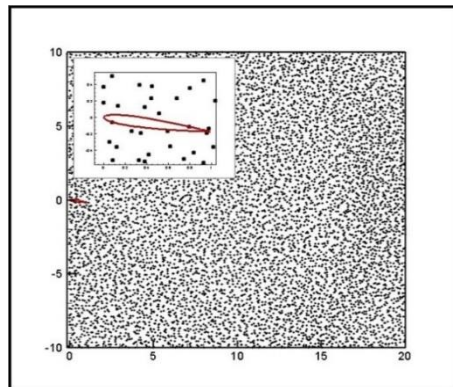


N.S=۷۰۰

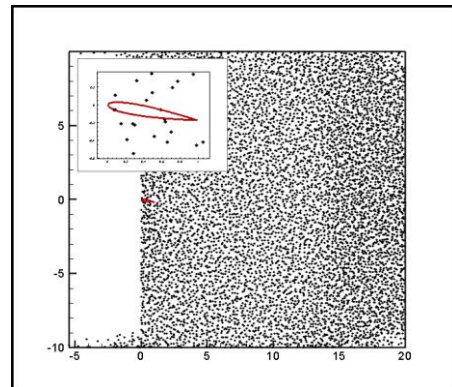
شکل (۹): حرکت ذرات از روی ایرفویل ناکا ۰۰۱۲ در زاویه حمله ده درجه، در گام زمانی ۰/۰۲ و تعداد تکرار ۲۰۰۰ از حالت غیر تعادلی به حالت تعادلی.

(علمی-پژوهشی)

رخشاد دشتی گوهری، رامین ذاکری، محمد محسن شاه‌مردان و محسن نظری

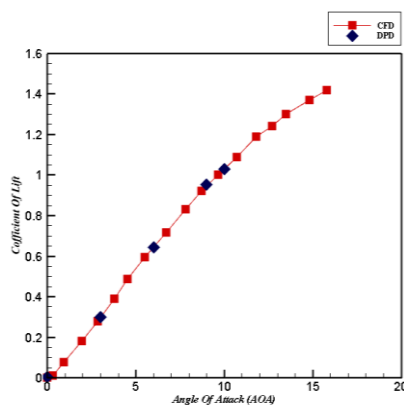


N.S=۲۰۰۰

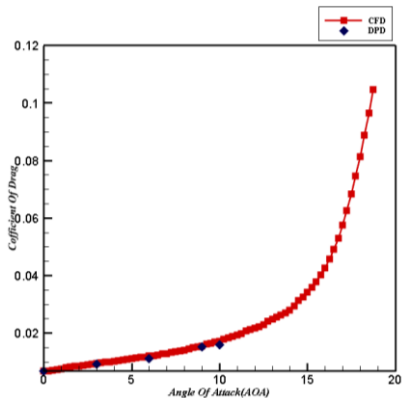


N.S=۱۶۵۰

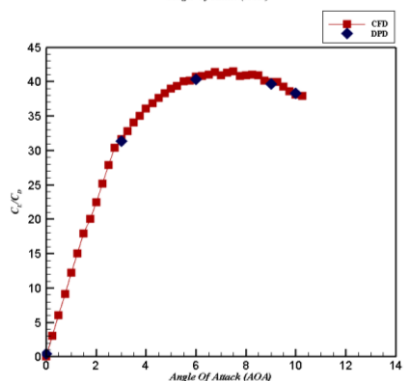
شکل (۹): ادامه.



الف



ب



ج

شکل (۱۰): مقایسه نتایج روش دینامیک سیالات محاسباتی و دینامیک ذرات انلاقی زوایای ۰، ۳، ۶، ۹ و ۱۰ (الف) مقایسه نمودار ضریب لیفت بر حسب زاویه حمله (ب) نمودار ضریب درگ بر حسب زاویه حمله، (ج) نمودار ضریب درگ بر ضریب لیفت بر حسب زاویه حمله.

دو ایرفویل ناکا ۰۰۱۲ و مقطع لوزی شکل در شرایط یکسان روبروی جریان هوا قرار گرفته‌اند. در مقطع لوزی شکل به دلیل ملایم نبودن شیب سطحی، ذرات هوا با شدت بیشتری به سطح برخورد کرده و در نتیجه تراکم و فشار مقطع لوزی در بالا دست جریان بیشتر است اما در ایرفویل ناکا ۰۰۱۲ تمام تغییرات به دلیل دوکی شکل بودنش به صورت آهسته اتفاق می‌افتد. در حقیقت خط جریان در لوزی با شیب زیاد تغییر کرده اما در ناکا ۰۰۱۲ با شیب کم تغییر می‌کند.

در این مقاله تأثیر زاویه حمله و وتر بر اساس عدد رینولدز بر ضرایب لیفت و درگ برای یک ایرفویل ناکا ۰۰۱۲ بررسی شده است. علاوه بر این، در این مقاله مقایسه داده‌های به دست آمده از شبیه‌سازی دینامیک ذرات انلاقی با سایر کارهای تحقیقاتی، برای نسبت حداکثر ضرایب لیفت و درگ صورت گرفته است. این اطلاعات برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌های عددی در آینده بسیار مفید است. علاوه بر این، مشاهده می‌کنیم که تغییر در ویژگی‌های آیرودینامیکی به تغییرات شیب خطی ضرایب لیفت و درگ به عنوان عملکرد زاویه حمله برای هر نسبت ابعادی مرتبط است. اختلاف سرعت بر روی سطوح بالا و پایین سبب تولید اختلاف فشار و به دنبال آن تولید نیروی برآ می‌شود. برای بدست آوردن ضریب لیفت در کد کامپیوتری اختلاف برخورد ذرات در بالا و پایین ایرفویل بدست آمده است. ضریب درگ نیز از مجموع ذرات در بالا و پایین ایرفویل بدست آمده است. ضریب لیفت و درگ برای ایرفویل ناکا ۰۰۱۲ در زوایای ۰، ۳، ۶، ۹ و ۱۰ بدست آمده و به ترتیب در شکل‌های ۱۰-الف و ۱۰-ب با مراجع [۴۰ و ۴۱] مقایسه شده است. با توجه به این شکل‌ها، مقایسه ضرایب لیفت و درگ و همچنین در شکل ۱۰-ج مقایسه نمودار نسبت ضریب درگ بر ضریب لیفت بر حسب زاویه حمله در دو روش خطا کمتر از ۳ درصد می‌باشد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل برای شرایط مرزی دیوار پیچیده در شبیه‌سازی دینامیک ذرات اتلافی بیان شده است. این روش مبتنی بر نمایش دیوار با استفاده از یک شبکه مربعی است. عملکرد خوبی از مدل ارائه شده در بازتاب ذرات از روی هندسه انتخابی مشاهده شد. با توجه به نتایج حاصله از شبیه‌سازی عددی میدان جریان شروع به گسترش حول ریزایرفویل می‌کند و می‌توان گفت نتایج حاصله نشان‌دهنده صحیح بودن عملکرد روش دینامیک ذرات اتلافی می‌باشد. همچنین، نتایج برای ایرفویل ناکا ۰۰۱۲ در زوایای حمله ۰، ۳، ۶، ۹ و ۱۰ نیز گسترش داده شد و جریان به

کمک روش دینامیک ذرات اتلافی شبیه‌سازی شد. با بررسی نتایج بدست آمده از این شبیه‌سازی می‌توان نتیجه‌گیری نمود که جریان حول ریزایرفویل ناکا ۰۰۱۲ گسترش یافت. به دلیل استفاده از شرایط مرزی پرئودیک در ورودی و خروجی امکان مشاهده پدیده ریزش گردابه نیست. در نتیجه این روش برای زوایای حمله بالا در حال حاضر مناسب نیست. سپس، نمودار ضریب درگ و ضریب لیفت و همچنین نمودار نسبت نیروی لیفت بر نیروی درگ بر حسب زاویه حمله با دو روش شبیه‌سازی دینامیک ذرات اتلافی و دینامیک سیالات محاسباتی ۱۰ مقایسه شد. خطای مقایسه این دو روش کم‌تر از ۳ درصد محاسبه شد.

۸- مراجع

- [1] G. Meng, W.-M. Zhang, H. Huang, H.-G. Li, and D. Chen, "Micro-rotor dynamics for micro-electro-mechanical systems (MEMS)," *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 40, pp. 538-562, 2009.
- [2] K. D. Benkstein, C. J. Martinez, G. Li, D. C. Meier, C. B. Montgomery, and S. Semancik, "Integration of nanostructured materials with MEMS microhotplate platforms to enhance chemical sensor performance," *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 8, pp. 809-822, 2006.
- [3] M. Akcakoca, B. M. Atici, B. Gever, S. Oguz, U. Demirezen, M. Demir, *et al.*, "A simulation-based development and verification architecture for micro uav teams and swarms," in *AIAA Scitech 2019 Forum*, 2019, p. 1979.
- [4] A. R. Vetrella, G. Fasano, A. Renga, and D. Accardo, "Cooperative UAV navigation based on distributed multi-antenna GNSS, vision, and MEMS sensors," in *2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2015, pp. 1128-1137.
- [5] C. He, B. Yu, and Q. Yi, "A cooperative positioning method for micro UAVs in challenge environment," in *2020 3rd International Conference on Unmanned Systems (ICUS)*, 2020, pp. 1157-1160.
- [6] C. Cercignani, M. Lampis, and S. Lorenzani, "Variational approach to gas flows in microchannels," *Physics of Fluids*, vol. 16, pp. 3426-3437, 2004.
- [7] I. Graur, J. Méolans, and D. Zeitoun, "Analytical and numerical description for isothermal gas flows in microchannels," *Microfluidics and Nanofluidics*, vol. 2, pp. 64-77, 2006.
- [8] C. White, M. K. Borg, T. J. Scanlon, and J. M. Reese, "A DSMC investigation of gas flows in micro-channels with bends," *Computers & Fluids*, vol. 71, pp. 261-271, 2013.
- [9] T. Ewart, J. Firpo, I. Graur, P. Perrier, and J. Meolans, "DSMC simulation: Validation and application to low speed gas flows in microchannels," *Journal of fluids engineering*, vol. 131, 2009.
- [10] M. Yovanovich and W. Khan, "Slip Flow Models for Gas Flows in Rectangular, Trapezoidal, and Hexagonal Microchannels," *AIAA Journal*, vol. 58, pp. 2147-2155, 2020.
- [11] F. Su, S. Tissera, T. Lukas, and A. Munjiza, "Use Improved Gradient Descent in Irregular Boundary Conditions in Molecular Dynamics," in *Applied Mechanics and Materials*, 2014, pp. 476-480.
- [12] G. Di Ilio, D. Chiappini, S. Ubertini, G. Bella, and S. Succi, "Fluid flow around NACA 0012 airfoil at low-Reynolds numbers with hybrid lattice Boltzmann method," *Computers & Fluids*, vol. 166, pp. 200-208, 2018.
- [13] S. Wilhelm, J. Jacob, and P. Sagaut, "An explicit power-law-based wall model for lattice Boltzmann method-Reynolds-averaged numerical simulations of the flow around airfoils," *Physics of Fluids*, vol. 30, p. 065111, 2018.
- [14] A. Shoja-Sani, E. Roohi, M. Kahrom, and S. Stefanov, "Investigation of aerodynamic characteristics of rarefied flow around NACA 0012 airfoil using DSMC and NS solvers," *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, vol. 48, pp. 59-74, 2014.
- [15] P. Hoogerbrugge and J. Koelman, "Simulating microscopic hydrodynamic phenomena with dissipative particle dynamics," *EPL (Europhysics Letters)*, vol. 19, p. 155, 1992.
- [16] P. Espanol and P. Warren, "Statistical mechanics of dissipative particle dynamics," *EPL (Europhysics Letters)*, vol. 30, p. 191, 1995.
- [17] R. D. Groot and P. B. Warren, "Dissipative particle dynamics: Bridging the gap between atomistic and mesoscopic simulation," *The Journal of chemical physics*, vol. 107, pp. 4423-4435, 1997.
- [18] P. Warren, "Vapor-liquid coexistence in many-body dissipative particle dynamics," *Physical Review E*, vol. 68, p. 066702, 2003.
- [19] M. Liu, P. Meakin, and H. Huang, "Dissipative particle dynamics simulation of pore-scale multiphase fluid flow," *Water resources research*, vol. 43, 2007.
- [20] J. Padding and W. J. Briels, "Systematic coarse-graining of the dynamics of entangled polymer melts: the road from chemistry to rheology," *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 23, p. 233101, 2011.
- [21] M. Darbandi, R. Zakeri, and G. E. Schneider, "Simulation of polymer chain driven by DPD solvent particles in nanoscale flows," in *International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels*, 2010, pp. 1035-1040.
- [22] R. Zakeri, M. Sabouri, A. Maleki, and Z. Abdelmalek, "Investigation of magneto hydro-dynamics effects on a polymer chain transfer in micro-channel using dissipative particle dynamics method," *Symmetry*, vol. 12, p. 397, 2020.
- [23] Y. Wang and S. Chen, "Droplets impact on textured surfaces: mesoscopic simulation of spreading dynamics," *Applied Surface Science*, vol. 327, pp. 159-167, 2015.
- [24] J. Zhao, S. Chen, and Y. Liu, "Dynamical behaviors of droplet impingement and spreading on chemically heterogeneous surfaces," *Applied surface science*, vol. 400, pp. 515-523, 2017.
- [25] W. Waheed, A. Alazzam, A. N. Al Khateeb, and E. Abu Nada, "Simulation of Fluid Flow in a Microchannel at Low Reynolds Number Using Dissipative Particle Dynamics," in *ASME*

- International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2018, p. V010T13A004.
- [26] P. Nikunen, M. Karttunen, and I. Vattulainen, "How would you integrate the equations of motion in dissipative particle dynamics simulations?," *Computer physics communications*, vol. 153, pp. 407-423, 2003.
- [27] A. M. Altenhoff, J. H. Walther, and P. Koumoutsakos, "A stochastic boundary forcing for dissipative particle dynamics," *Journal of Computational Physics*, vol. 225, pp. 1125-1136, 2007.
- [28] D. Visser, H. Hoefsloot, and P. Iedema, "Comprehensive boundary method for solid walls in dissipative particle dynamics," *Journal of computational Physics*, vol. 205, pp. 626-639, 2005.
- [29] J. M. Kim and R. J. Phillips, "Dissipative particle dynamics simulation of flow around spheres and cylinders at finite Reynolds numbers," *Chemical engineering science*, vol. 59, pp. 4155-4168, 2004.
- [30] P. De Palma, P. Valentini, and M. Napolitano, "Dissipative particle dynamics simulation of a colloidal micropump," *Physics of Fluids*, vol. 18, p. 027103, 2006.
- [31] A. Mehboudi and M. Saidi, "A systematic method for the complex walls no-slip boundary condition modeling in dissipative particle dynamics," *Scientia Iranica*, vol. 18, pp. 1253-1260, 2011.
- [32] D. Duong-Hong, N. Phan-Thien, and X. Fan, "An implementation of no-slip boundary conditions in DPD," *Computational mechanics*, vol. 35, pp. 24-29, 2004.
- [33] I. V. Pivkin and G. E. Karniadakis, "A new method to impose no-slip boundary conditions in dissipative particle dynamics," *Journal of Computational Physics*, vol. 207, pp. 114-128, 2005.
- [34] D. Zhang, Q. Shangguan, and Y. Wang, "An easy-to-use boundary condition in dissipative particle dynamics system," *Computers & Fluids*, vol. 166, pp. 117-122, 2018.
- [35] S. Pal, C. Lan, Z. Li, E. D. Hirleman, and Y. Ma, "Symmetry boundary condition in dissipative particle dynamics," *Journal of Computational Physics*, vol. 292, pp. 287-299, 2015.
- [36] S. K. Ranjith, B. Patnaik, and S. Vedantam, "No-slip boundary condition in finite-size dissipative particle dynamics," *Journal of Computational Physics*, vol. 232, pp. 174-188, 2013.
- [37] A. Chatterjee and L.-M. Wu, "Predicting rheology of suspensions of spherical and non-spherical particles using dissipative particle dynamics (DPD): methodology and experimental validation," *Molecular Simulation*, vol. 34, pp. 243-250, 2008.
- [38] Y. Zhou, X.-p. Long, and Q.-x. Zeng, "Effect of the angular potential on the temperature control in dissipative particle dynamics simulations," *Molecular Simulation*, vol. 38, pp. 961-969, 2012.
- [39] G. Karniadakis, A. Beskok, and N. Aluru, *Microflows and nanoflows: fundamentals and simulation* vol. 29: Springer Science & Business Media, 2006.
- [40] S. Martínez-Aranda, A. García-González, L. Parras, J. Velázquez-Navarro, and C. Del Pino, "Comparison of the aerodynamic characteristics of the NACA0012 airfoil at low-to-moderate Reynolds numbers for any aspect ratio," *International Journal of Aerospace Sciences*, vol. 4, pp. 1-8, 2016.
- [41] B. A. M. Zain, F. F. Anuar, and N. Al-Shaibani, "Comparative study on flexible link aerator using arduino programming and dissolved oxygen meter," *International Journal of Integrated Engineering*, vol. 10, 2018.