مجله مهندسی مکانیک مدرس، آذر 1395، دوره 16، شماره 9، ص‌ص 449-458

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

پیاده سازی پردازش موازی روی کارت گرافیک برای شبیه سازی جریان سیال با روش شبکه بولتزمن و نمایه هموار

بهنام خلیلی[1]، محمد رهنما[2*]، سعید جعفری[3]، ابراهیم جهانشاهی جواران[4]

1- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان
2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان
3- استادیار، مهندسی نفت، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان
4- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان
* کرمان، صندوق پستی 133-76169، rahnama@uk.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 25 خرداد 1395
پذیرش: 30 مرداد 1395
ارائه در سایت: 11 مهر 1395

کلید واژگان:
روش شبکه بولتزمن
روش نمایه هموار
پردازش موازی
برهم کنش جامد- سیال

چکیده

بررسی بر هم کنش میان ذرات جامد و سیال به عنوان مقدمه‌ای بر شبیه سازی بسیاری از مسائل مهندسی مانند بسترهای سیالی، ته نشینی ذرات و جوهر کاتالیست در سلول‌های سوختی مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از روش‌های مناسب برای انجام این گونه شبیه سازی‌ها، ترکیب دو روش شبکه بولتزمن و نمایه هموار می‌باشد که دارای یک الگوریتم مناسب برای اجرا شدن به صورت موازی می‌باشند. روش نمایه هموار همانند روش شبکه بولتزمن از یک شبکه ثابت برای شبیه سازی ذرات جامد در سیال استفاده می‌کند و از این رو یک روش کارامد برای پردازش موازی به کمک کارت گرافیک می‌باشد. در کار حاضر، پیاده سازی یک الگوریتم مناسب برای موازی سازی ترکیب دو روش نمایه هموار و شبکه بولتزمن روی کارت گرافیک ارائه می‌شود. به منظور بررسی صحت نتایج، ابتدا جریان سیال درون کانال مورد بررسی قرار گرفت. نتایج زمانی حاکی از آن بود که زمان حل می‌تواند تا 80 برابر بوسیله کارت گرافیک کاهش یابد. در ادامه نیروی پسای وارد بر یک کره در جریان سیال و همچنین شبیه سازی سقوط یک ذره در سیال ساکن بر اثر نیروی وزن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده بر روی کارت گرافیک، نشان دهنده افزایش توان محاسباتی تا 6.5 میلیون گره محاسباتی در واحد زمان را نشان می‌دهد.

Implementation of parallel processing on GPU for fluid flow simulation using Lattice Boltzmann method and Smoothed Profile method

Behnam Khalili[1], Mohammad Rahnama[1*], Saeed Jafari[2], Ebrahim Jahanshahi Javaran[3]

1- Department of Mechanical Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
2- Department of Petrolium Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
3-Department of Energy, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran.
* P.O.B.76169-133, Kerman, Iran, rahnama@uk.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 14 June 2016
Accepted 20 August 2016
Available Online 02 October 2016

Keywords:
Lattice Boltzmann method
Smoothed Profile method
Parallel processing
Fluid- solid interaction

ABSTRACT

Investigation of fluid-solid interaction has been studied as an introduction to simulate a wide range of engineering problems such as fluidized beds, sediment transportation and catalyst inks in fuel cells. An efficient method for performing such simulations is a combination of Lattice Boltzmann method (LBM) and Smoothed Profile method (SPM). In addition, the operations in the SPM are local; it can be easily programmed for parallel processing. In this approach, the flow is computed on fixed Eulerian grids which are also used for the particles. Owing to the use of the same grids for simulation of fluid flow and particles, this method is highly efficient for the purpose of parallel processing by means of GPU. In this study, a combination of Lattice Boltzmann method (LBM) and Smoothed Profile method has been implemented in parallel processing on GPU. For validationpurpose, the fluid flow within a channel was investigated. Results suggest that computational time can be reduced up to 80 times by means of GPU.Then, drag force exerted on a sphere in fluid flow and the sedimentation of one sphere in a quiescent fluid were studied. Results show that performance of GPU can be increased up to 6.5 million fluid nods per second by using this method.

1-مقدمه

در سال‌های اخیر ظهور پردازنده‌های موازی دریچه‌ای جدید برای بررسی مسائل پیچیده را فراهم نموده و پردازش موازی جایگاه ویژه‌ای در علوم مختلف پیدا کرده است. بسیاری از محققان که در زمینه روش‌های عددی کار می‌کنند همواره با مشکل سنگینی و زمان بر بودن محاسبات درگیر بوده‌اند. از این رو همواره تلاش کرده‌اند که از روش‌های محاسباتی استفاده کنند که قابلیت پردازش موازی را داشته باشد تا بتوانند بالاترین بازدهی را از آنها کسب کنند.

در چند دهه گذشته، روش شبکه بولتزمن به دلیل داشتن یک الگوریتم آسان برای پردازش موازی توجه زیادی را به‌عنوان یک روش مناسب برای

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
B. Khalili, M. Rahnama, S. Jafari, E. Jahanshahi Javaran, Implementation of parallel processing on GPU for fluid flow simulation using Lattice Boltzmann method and Smoothed Profile method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 9, pp. 449-458, 2016 (in Persian)

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.9.9.8]

شبیه سازی انواع جریان‌های مختلف از جمله جریان‌هایی با هندسه‌های پیچیده به خود جلب کرده است [1]. روش شبکه بولتزمن مشکلات روش‌های معمول دینامیک سیالات محاسباتی از جمله تولید مش در هر تکرار را ندارد زیرا از یک شبکه محاسباتی اویلری و ثابت برای حل جریان سیال استفاده می‌کند. به دلیل اینکه این روش نیاز به تولید شبکه محاسباتی در هر گام زمانی ندارد برنامه نویسی آن آسان بوده و می‌توان آن را به راحتی روی پردازنده‌های موازی همانند کارت گرافیک برنامه نویسی کرد [2]. واحد پردازنده گرافیکی[1] برای پردازش کارهای گرافیکی که حاوی محاسباتی ساده اما با تعداد زیاد می‌باشد، طراحی شده است. بنابراین کارت‌های گرافیک قادر به انجام تعداد زیادی محاسبه شبیه به هم اما با تعداد بالا هستند. در چند دهه اخیر به خاطر این ویژگی پردازنده‌های گرافیکی، از آنها برای انجام محاسبات غیر گرافیکی نیز استفاده می‌شود. ازجمله تفاوت‌های میان واحد پردازنده مرکزی[2] و واحد پردازنده گرافیکی، آن است که واحد پردازنده مرکزی مجموعه‌ای کوچک از هسته‌های بسیار قوی است در حالی که واحد پردازنده گرافیکی مجموعه‌ای بزرگ (تا چند هزار هسته) از هسته‌های نسبتا قوی می‌باشد که این موضوع امکان پردازش موازی با تعداد بالا را فراهم می‌کند. از این رو محققین بسیاری حل شبکه بولتزمن را با استفاده از کارت گرافیک مورد بررسی قرار داده‌اند. در این رابطه، کوزنیک و همکاران [3] مدلی را برای اجرا کردن بخش‌های مختلف روش شبکه بولتزمن روی کارت گرافیک ارائه دادند. در ادامه ریگل و همکاران [4] از کارت گرافیک برای شبیه‌سازی جریان حول کره با استفاده از روش شبکه بولتزمن استفاده کردند. تولکی و همکاران [5] نیز یک کد دو بعدی بر اساس روش شبکه بولتزمن را به کمک کارت گرافیک اجرا کرده و نتایج زمانی آن را مقایسه کردند. آنها با انجام این مقایسه روی یک مسئله یکسان به این نتیجه رسیدند که به کمک کارت گرافیک می توان زمان محاسبات را تا 23 برابر کاهش داد.

یکی از کاربردهای روش شبکه بولتزمن، شبیه سازی مسائلی است که در آنها اندرکنش بین ذرات جامد و سیال وجود دارد. به دلیل کاربرد وسیع این مسائل در صنعت و طبیعت، بررسی آنها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. مهمترین موضوع در شبیه سازی چنین مسائلی ارضای شرط مرزی عدم لغزش در سطح مشترک جامد و سیال می‌باشد. این موضوع توسط محققین زیادی مورد بررسی قرار گرفته است [7,6]. از پیشگامان شبیه‌سازی ذرات جامد در سیال به کمک روش شبکه بولتزمن می‌توان به لد و همکاران [9,8] در سال 1994 اشاره کرد. لد و همکاران از شرط مرزی کمانه کردن[3] برای اعمال شرط مرزی عدم لغزش استفاده کردند. شرط مرزی کمانه کردن ساده‌ترین و پر استفاده‌ترین روش برای اعمال شرط مرزی عدم لغزش در روش شبکه بولتزمن می‌باشد. از این رو اوبرت و همکاران [10] یک روش کارامد را برای موازی سازی شرط مرزی کمانه کردن روی کارت گرافیک ارائه دادند اما مهم‌ترین مشکل این روش هنگام شبیه‌سازی شکل‌های پیچیده می‌باشد که باعث به وجود آمدن نوساناتی در نیروی اعمالی محاسبه شده روی ذره می‌گردد.

از این رو به منظور رفع مشکل شرط مرزی کمانه کردن، روش‌های دیگری برای اعمال شرط مرزی عدم لغزش ارائه شد. در این روش‌ها یک نیروی حجمی به معادله حرکت سیال اضافه می‌شود که این نیرو نقش ذرات جامد در سیال را ایفا می‌کند و مانند یک شرط مرزی برای سیال می‌باشد.

[1]GPU
[2]CPU
[3]Bounce Back

یکی از این روش‌ها، روش نمایه هموار[4] است که در سال 2005، توسط ناکایاما و یاماموتو [11] ارائه شد. این روش از یک شبکه اویلری ثابت برای سیال میزبان استفاده می‌کند. در این روش، به جای استفاده از شرط مرزی در سطح مشترک جامد و سیال، سطح جامد با استفاده از یک نیروی حجمی هموار مشخص در معادلات ناویر-استوکس نمایش داده می‌شود. روش نمایه هموار یک معادله را در کل ناحیه حل شامل حجم اجسام جامد بدون هیچ شرط مرزی داخلی حل می‌کند. برای نمایش مرز جامد، از یک لایه مشترک بین جامد و سیال استفاده می‌شود که این لایه به طور هموار از سمت جسم جامد به طرف سیال گسترده می‌شود یا به عبارتی، از این لایه برای گذر از حرکت جسم صلب به حرکت سیال استفاده می‌شود. این فصل مشترک بین جامد صلب و سیال، حجم معینی دارد که در آن چندین نقطه شبکه قرار گرفته است. با استفاده از این تغییر ساده، مختصات کارتزین معمولی می‌تواند برای سیستم‌های پیچیده با هر شکل دلخواه استفاده شود. بدلیل ویژگی‌های مشترک روش نمایه هموار و روش شبکه بولتزمن مبنی بر استفاده از یک شبکه کارتزین ثابت، ترکیب روش شبکه بولتزمن و نمایه هموار برای اولین بار در سال 2011 توسط جعفری و همکاران انجام شد [12].

روش نمایه هموار به دلیل داشتن ویژگی‌های مناسب از جمله الگوریتم ساده و استفاده از یک شبکه کارتزین ثابت همانند روش شبکه بولتزمن، یک روش مناسب برای پردازش موازی می‌باشد. از این رو در پژوهش حاضر یک روش کارآمد برای پیاده سازی ترکیب دو روش شبکه بولتزمن و نمایه هموار بر روی کارت گرافیک ارائه می‌شود. در ادامه مختصری از روش‌های شبکه بولتزمن و نمایه هموار ارائه خواهد شد و ساختار کارت گرافیک برای پردازش موازی شرح داده می‌شود. در نهایت نتایج و نتیجه گیری مورد بررسی قرار می‌گیرند.

2- روش شبکه بولتزمن

برای شبیه سازی جریان سیال از روش شبکه بولتزمن (سه بعدی) استفاده شده است. در این روش کمیت‌های ماکروسکپی از محاسبه تابع توزیع احتمال بدست می‌آیند که این تابع توسط حل معادله بولتزمن محاسبه می شود. بر اساس روش ارائه شده توسط بهاتنگار، گروس و کروک [13] (BGK) ترم برخورد در معادله بولتزمن ساده شده و معادله مورد نظر به صورت زیر تبدیل می‌گردد.

$$f_i(x + c_i\Delta t, t + \Delta t) = f_i(x,t) - \frac{1}{\tau}(f_i(x,t) - f_i^{eq}(x,t) \quad (1)$$

که در معادله بالا τ زمان آرامش، c_i بردار یکه سرعت، $f_i(x,t)$ تابع توزیع احتمال و $f_i^{eq}(x,t)$ تابع توزیع احتمال تعادلی می‌باشد. زمان آرامش در معادله بولتزمن به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$\tau = \frac{\vartheta}{c_s^2\delta t} + 0.5 \quad (2)$$

همانطور که ذکر شد، اندازه بردارهای سرعت شبکه، با توجه به مدل انتخابی برای شبکه مشخص می‌شوند. در کار حاضر از یک مدل سه بعدی با نوزده مولفه سرعت، مدلD_3Q_{19}، که معروف ترین مدل در محاسبات سه بعدی می‌باشد، برای شبیه سازی استفاده می‌شود (شکل1).

مولفه‌های بردار سرعت برای این مدل به صورت زیر تعریف می‌گردند:

$$c_i = \begin{cases} (0,0,0), & i = 0 \\ (\pm1,0,0)(0,\pm1,0)(0,0,\pm1), & i = 1\sim6 \\ (\pm1,\pm1,0)(0,\pm1,\pm1)(\pm1,0,\pm1), & i = 7\sim18 \end{cases} \quad (3)$$

[4]Smoothed Profile Method(SPM)

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.9.9.8]

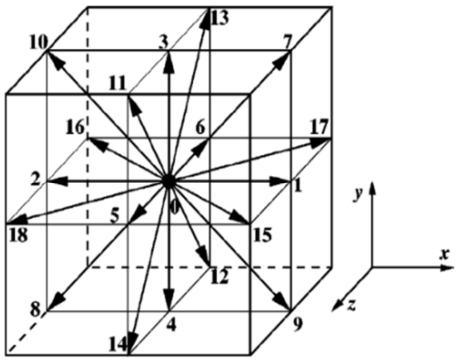

Fig. 1 LBM discrete velocity vector, D_3Q_{19} model

شکل 1 بردارهای تجزیه شده سرعت برای مدل D_3Q_{19}

تابع توزیع تعادلی $f_i^{eq}(x,t)$ در معادله 1 به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$f_i^{eq} = \rho w_i[1 + 3\frac{c_i \cdot u}{c^2} + \frac{9}{2}\frac{(c_i \cdot u)^2}{c^4} - \frac{3}{2}\frac{u \cdot u}{c^2} \quad (4)$$

در این رابطه، w_i، ثابت وزنی و $c = \delta x/\delta t$ سرعت شبکه برای ذرات سیال می‌باشد که از یک نقطه شبکه به نقطه دیگر در حال حرکت هستند. علاوه بر این مقادیر ضرایب وزنی، w_i ، برای شبکه D_3Q_{19} به صورت زیر می‌باشند:

$$w_i = \begin{cases} 1/3, & i = 0 \\ 1/18, & i = 1\sim6 \\ 1/36, & i = 7\sim18 \end{cases} \quad (5)$$

در نهایت خواص ماکروسکوپی چگالی ρ و سرعت u برحسب واحدهای شبکه با استفاده از ممان‌های مرتبه صفر و اول از توابع توزیع حاصل می‌شوند و می‌توان روابط زیر را برای محاسبه خواص ماکروسکوپی نوشت:

$$\rho(x,t) = \sum_{i=0}^{18} f_i(x,t) \quad \text{(الف -6)}$$

$$\rho u(x,t) = \sum_{i=0}^{18} e_i f_i(x,t) \quad \text{(ب -6)}$$

$$P(x,t) = \sum_{i=0}^{18} c_s^2 \rho(x,t) \quad \text{(ج -6)}$$

که در آن $c_s = c/\sqrt{3}$ سرعت صوت در روش شبکه بولتزمن است.

3- روش نمایه هموار

روش نمایه هموار که در سال 2005 توسط ناکایاما و یاماموتو [11] معرفی شد، روشی برای شبیه سازی حرکت ذرات جامد در سیال و اعمال شرط مرزی عدم لغزش در سطح مشترک سیال و جامد می‌باشد. در این روش، سطح هر ذره جامد نه به عنوان یک سطح با ضخامت صفر، بلکه به عنوان یک مرز با ضخامتی قابل مقایسه با واحد شبکه معرفی می‌شود. به عبارتی، روش نمایه هموار هر ذره را با یک منحنی هموار موسوم به منحنی تابع موقعیت جسم جامد، $\emptyset(x)$، نشان می‌دهد که این منحنی در ناحیه جامد دارای مقدار یک، در ناحیه سیال دارای مقدار صفر و به طور هموار از مقدار یک به مقدار صفر در سطح مشترک جامد و سیال تغییر می‌کند (شکل 2).

در روش نمایه هموار، کمیت‌های میدانی از قبیل سرعت و تابع موقعیت ذرات جامد روی تمام ناحیه محاسباتی تعریف می‌شوند که این ناحیه، شامل سیال و کل ذرات جامد می‌باشد. برای تعیین نواحی که در آنها ذرات جامد وجود دارند، تابع موقعیت ذرات جامد به صورت زیر معرفی می‌شود:

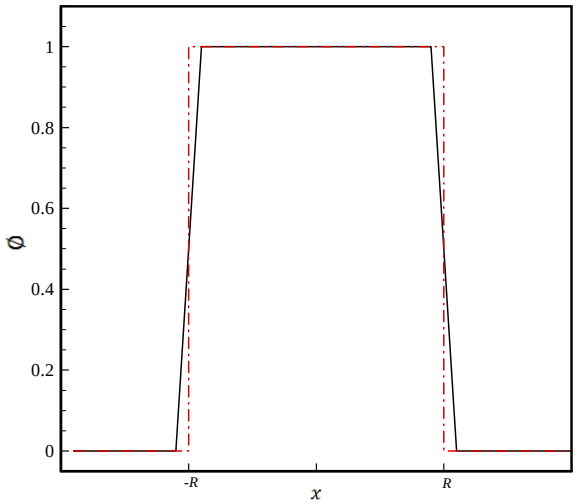

Fig. 2 Representation of a particle in smoothed profile (solid line)

شکل 2 نمایش یک ذره جامد به کمک روش نمایه هموار (خط جامد)

$$\emptyset(x,t) = \sum_{i=1}^{N_p} \emptyset_i(x,t) \quad (7)$$

در این رابطه، $\emptyset_i(x,t)$ که مقداری بین صفر و یک دارد، تابع موقعیت ذره i ام می‌باشد و N_p ، تعداد ذرات جامدی است که در سرتاسر ناحیه حل قرار دارند. توابع تحلیلی مختلفی از این نمایه هموار برای ذرات کروی شکل وجود دارد که پر استفاده‌ترین تابع به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\emptyset_i(x,t) = s(R - |x - R_i(t)|)$$
$$S(x) = \begin{cases} 0, & x < -\zeta/2 \\ \frac{1}{2}\sin\left(\frac{\pi x}{\zeta_i} + 1\right), & |x| < \zeta/2 \\ 1, & x > \zeta/2 \end{cases} \quad (8)$$

در این رابطه، R شعاع هر ذره و $R_i(t)$ و ζ_i به ترتیب بردار موقعیت مرکز ذره و ضخامت سطح مشترک ذره i ام می‌باشند.

بر اساس تابع موقعیت ذرات جامد، میدان سرعت ذرات جامد بصورت معادله زیر تعریف می‌شود:

$$\emptyset(x,t)u_p(x,t) = \sum_{i=1}^{N_p} \emptyset_i(x,t)\,[U_{c_i}(t) + \omega_i \times \{x - R_i(t)\}] \quad (9)$$

در آن $\{U_{c_i}, \omega_i\}(i = 1, \dots, N_p)$ به ترتیب، سرعت خطی مرکز جرم و سرعت زاویه‌ای ذره i ام می‌باشند. جریان سیال روی یک ذره جامد منجر به اعمال نیروهای عمودی و برشی روی این ذره بوسیله سیال و متقابلا توسط ذره جامد روی سیال می‌شود که از این نیروها به نیروهای اندرکنش هیدرودینامیکی جامد-سیال یاد می‌شود. این نیروها سیال مجاور به سطح ذره جامد را وادار به حرکت با سرعت سطح جامد می‌کنند که همان شرط مرزی عدم لغزش می‌باشد. حال اگر بتوان یک نیروی خارجی معادل با این نیروی اندرکنش هیدرودینامیکی به گونه‌ای به سیال وارد کرد که سیال بتواند در ناحیه متعلق به جسم جامد با سرعتی برابر با سرعت جسم جامد حرکت کند، در این صورت می‌توان حرکت سیال حول جسم جامد را بدون هیچ شرط مرزی شبیه سازی کرد. روش نمایه هموار بر پایه چنین ایده‌ای استوار است. به بیان دقیق‌تر، گره‌های سیالی که بوسیله ذره جامد پوشیده شده‌اند (گره-های سیال مجازی) باید سرعتی برابر سرعت ذره جامد داشته باشند. بدین منظور، یک نیروی حجمی به کل میدان سیال وارد می‌شود تا سیال مجازی داخل این ذره را وادار به ارضا کردن حرکت جسم صلب کند. این نیروی

حجمی خارج از ناحیه جسم جامد صفر می‌باشد. نیروی اندرکنش هیدرودینامیکی جامد-سیال، f_{H} ، که روی گره‌های سیال مجازی قرار گرفته درون ذره جامد اعمال می‌شود به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$f_{\mathrm{H}}(x,t) = \emptyset(x,t_n) f_p(x,t_n) = \emptyset(x,t_n)\frac{(u_p(x,t_n)-u(x,t_n))}{\Delta t} \quad (10)$$

در این رابطه، $u_p(\mathrm{x},t_n)$ و $u(x,t_n)$ به ترتیب، سرعت گره‌هایی از شبکه با بردار موقعیت x و قرار گرفته درون ذره جامد و سرعت سیال در محل این گره‌ها در زمان t_n می‌باشند. در روش نمایه هموار، تنها یک معادله در کل میدان مورد نظر حل می‌شود و اثر ذرات جامد روی این میدان با یک نیروی حجمی لحاظ می‌شود. در روش شبکه بولتزمن روش‌های مختلفی برای وارد کردن نیروی حجمی به معادله تکاملی شبکه بولتزمن وجود دارد. مرسوم ترین روش، اضافه کردن یک جمله به تابع برخورد می‌باشد. بنابراین، ترکیب نمایه هموار با روش شبکه بولتزمن به صورت زیر در می‌آید:

$$f_i(x+e_i\Delta t, t_n+\Delta t) = f_i(x,t_n) - \frac{1}{\tau}\left[f_i(x,t_n) - f_i^{\mathrm{eq}}(x,t_n)\right] + \frac{\omega_i \Delta t}{c_s^2}(f_H \cdot e_i) \quad (11)$$

با انتگرال گیری از نیروی اعمالی بر یک گره قرار گرفته درون جسم جامد روی کل حجم جسم جامد و همچنین انتگرال گیری از گشتاور حاصل از این نیروها روی کل حجم جسم جامد، می‌توان نیرو و گشتاور هیدرودینامیکی کل را که از طرف سیال به هر ذره جامد وارد می‌شوند به صورت زیر بدست آورد:

$$F_i^{\mathrm{H}} = \int \rho\emptyset(x,t_n) f_p(x,t_n) dV_{p_i} = \int \rho\emptyset(x,t_n)\left(u(\mathrm{x},t_n) - u_p(\mathrm{x},t_n)\right) dV_{p_i} \quad (12)$$

$$T_i^{\mathrm{H}} = \int (x - R_i^{\mathrm{n}})\rho\emptyset(x,t_n) f_p(x,t_n) dV_{p_i} = \int (x - R_i^{n})\rho\emptyset(x,t_n)\left(u(\mathrm{x},t_n) - u_p(\mathrm{x},t_n)\right) dV_{p_i} \quad (13)$$

با استفاده از معادلات حرکت و روش صریح اویلر، سرعت خطی و سرعت زاویه‌ای ذرات جامد به صورت زیر بروز رسانی می‌شوند:

$$U_{c_i}^{n+1} = U_{c_i}^{n} + M_{p_i}^{-1}\int_{t_n}^{t_n+\Delta t}(F_i^{\mathrm{H}} + F_{\mathrm{lub}_{ij}} + F_i^{\mathrm{ext}})ds \quad (14\text{- الف})$$

$$\omega_{c_i}^{n+1} = \omega_{c_i}^{n} + I_{p_i}^{-1}\int_{t_n}^{t_n+\Delta t}(T_i^{\mathrm{H}} + T_i^{\mathrm{ext}})ds \quad (14\text{- ب})$$

4- پردازش موازی

در چند دهه اخیر استفاده از پردازنده‌های گرافیکی برای انجام کارهای غیر گرافیکی مورد توجه محققین بسیاری قرار گرفته است. برای انجام برنامه نویسی بر روی کارت گرافیک از زبان کودا[1] استفاده می‌شود. کودا یک زبان برنامه نویسی برای انجام کارهای محاسباتی به وسیله کارت گرافیک می‌باشد. محیط برنامه نویسی کودا بر پایه دو زبان C و C++ نوشته شده است، به همین خاطر تمام ویژگی‌های دو زبان را دارا می‌باشد. ساختار برنامه کودا بر پایه همکاری میان واحد پردازنده مرکزی و واحد پردازنده گرافیکی طرح ریزی شده است به طوری که هر فایلی که بر اساس زبان کودا نوشته می‌شود، می‌تواند ترکیبی از کدهای مربوط به واحد پردازنده مرکزی و واحد پردازنده گرافیکی باشد. در واقع ساختار برنامه نوشته شده در کودا می‌تواند ترکیبی از دستورات سری و موازی باشد به‌گونه‌ای که قسمت‌هایی از برنامه که قابلیت پردازش موازی را دارند بر روی کارت‌گرافیک اجرا شوند و قسمت‌هایی از برنامه که این قابلیت را ندارند روی واحد پردازنده مرکزی اجرا گردند تا از مزیت قدرت بالای پردازنده‌های مرکزی برای اجرا کردن برنامه‌های سری بهره‌مند شوند. در کار حاضر از نسخه 5.5 برنامه نویسی کودا در سیستم‌های پردازنده گرافیکی استفاده شده است.

4- 1- ساختار کارت گرافیک

کارت گرافیک برای اجرا کردن توابع فراخوانی شده به چند زیر مجموعه تقسیم‌بندی می‌شود. هر یک از این زیر مجموعه‌ها می‌توانند یک تابع فراخوانی شده را انجام دهند. به تابعی که فراخوانی می‌شود تا بر روی کارت گرافیک اجرا گردد کرنل[2] می‌گویند. هنگامی که یک تابع (کرنل) فراخوانی می‌شود، تعداد زیادی از رشته‌های پردازشی[3] توسط کارت گرافیک سازمان دهی می‌شوند تا تابع مورد نظر را به صورت همزمان اجرا کنند. رشته پردازشی کوچکترین واحد اجرایی می‌باشد که کرنل‌ها را بر روی کارت گرافیک اجرا می‌کند. این واحدهای اجرایی تقریبا شبیه رشته‌های پردازشی پردازنده مرکزی می‌باشند با این تفاوت که تعداد آنها بسیار بیشتر است. برای سازماندهی و طبقه بندی رشته‌های پردازشی، زبان برنامه نویسی کودا آنها را در دو سطح کلی طبقه بندی می‌کند. سطح اول بلوک[4] می‌باشد که در این بلوک‌ها یک حافظه اشتراکی بسیار قوی وجود دارد که این امکان را فراهم می‌آورد تا رشته‌های پردازشی که در یک بلوک یکسان قرار دارند با هم در ارتباط باشند و بتوانند هماهنگ شوند. موقعیت رشته‌های پردازشی درون هر بلوک بوسیله مشخصه[5] آن رشته پردازشی مشخص می‌گردد. این مشخصه می‌تواند به صورت یک، دو و یا سه بعدی تعریف گردد. حداکثر رشته‌های پردازشی درون یک بلوک به ساختار فیزیکی کارت گرافیک بستگی دارد. در کارت‌های گرافیکی امروزی بلوک‌ها می‌توانند حداکثر 1024 رشته پردازشی را در خود جای دهند. سطح دوم شبکه[6] نام دارد که شامل مجموعه‌ای از بلوک‌ها می‌شود. بر خلاف رشته‌های پردازشی که درون یک بلوک قرار دارند، رشته‌های پردازشی که در بلوک‌های مختلف هستند نمی‌توانند با یکدیگر هماهنگ شوند. موقعیت بلوک‌ها همانند رشته‌های پردازشی نیز با شاخص بلوک[7] در شبکه مشخص می‌گردد. بلوک‌ها نیز می‌توانند به صورت دو بعدی یا سه بعدی چیده شوند. همان طور که بیان شد تعداد حداکثر رشته‌های پردازشی درون یک بلوک به ساختار فیزیکی کارت گرافیک بستگی دارد و مقداری محدود است اما تعداد بلوک‌ها تقریبا محدودیتی ندارند. در کارت‌های گرافیکی امروزی $(2^{31}-1)$ بلوک می‌تواند در یک شبکه وجود داشته باشد. به طور کلی زمانی که یک کرنل برای اجرا شدن روی کارت گرافیک فراخوانی می‌شود، مجموعه‌ای از رشته‌های پردازشی درون شبکه‌ای از بلوک‌ها سازماندهی می‌شوند تا کرنل مورد نظر را اجرا کنند. مطابق شکل 3 وقتی که کرنل شماره یک فراخوانی می‌شود، یک شبکه دو بعدی از بلوک‌ها سازماندهی می‌شود تا کرنل مورد نظر را اجرا کند. درون بلوک‌ها نیز رشته‌های پردازشی به صورت سه بعدی چیده شده‌اند. تعداد بلوک‌ها و رشته‌های پردازشی توسط برنامه نویس در فراخوانی کرنل مشخص می‌گردد.

[1] CUDA

[2] Kernel
[3] Thread
[4] Block
[5] ThreadIdx
[6] Grid
[7] BlockIdx

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.9.9.8]

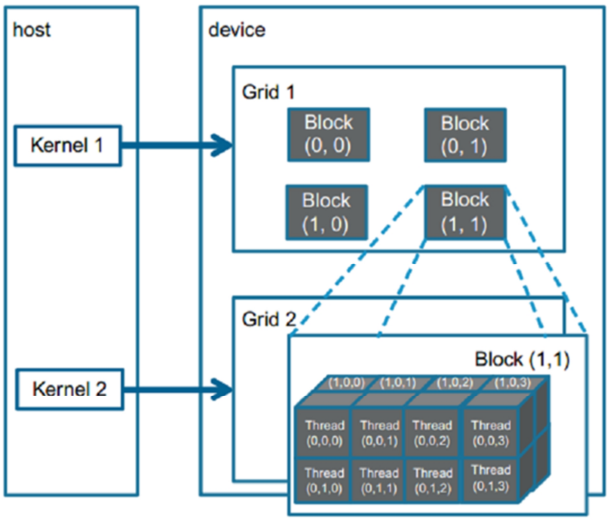

Fig. 3 Schematic view of threads arrangement in GPU

شکل3 شماتیکی از چینش رشته‌های پردازشی در کارت گرافیک

در کارت گرافیک برای فراخوانی کرنل‌ها از دستور زیر استفاده می‌شود:

(ارگومان‌های تابع) <<< تعداد رشته پردازشی، تعداد بلوک‌ها>>> نام کرنل

همان گونه که بیان گردید، تعداد رشته‌های پردازشی و بلوک‌ها توسط برنامه نویس و متناسب با هندسه مساله و الگوریتم حل انتخاب می‌شوند. تعداد آنها باید به گونه‌ای انتخاب شود که بالاترین بازدهی ممکن را داشته باشد. به عنوان مثال برای جمع کردن دو ماتریس که هر کدام 10 درایه دارند، برنامه نویس می‌تواند از راهکارهای زیر برای موازی سازی استفاده کند. اولین راهکار این است که یک بلوک که در آن یک رشته پردازشی قرار دارد برای انجام محاسبات فراخوانی شود. در این حالت جمع کردن تمامی درایه‌ها توسط یک رشته پردازشی انجام می‌شود. در حالت دوم برنامه نویس می‌تواند جمع کردن هر دو درایه را به یک رشته پردازشی اختصاص دهد. در این حالت به پنج بلوک که در آن یک رشته پردازشی قرار دارد نیاز می‌باشد. در حالت سوم برنامه نویس برای جمع کردن هر درایه از یک رشته پردازشی استفاده می‌کند. در این حالت عملیات جمع کردن هر 10 درایه همزمان با هم در یک لحظه انجام می‌شود و بالاترین بازدهی ممکن را خواهد داشت. به طور کلی تعداد بلوک‌ها و رشته‌های پردازشی باید متناسب با الگوریتم موازی سازی مساله انتخاب شوند تا بالاترین بازدهی بدست آید. در روش حاضر نیز هر گره محاسباتی روش بولتزمن توسط یک رشته پردازشی انجام می‌شود. این عمل سبب می‌گردد که محاسبات مربوطه همزمان با هم انجام شوند و دیگر نیازی به حلقه‌های تکرار پی در پی نباشد.

4- 2- شبکه بندی رشته های پردازشی

یک از مهمترین موضوعات در استفاده از کارت گرافیک چینش رشته‌های پردازشی در یک شبکه می‌باشد به گونه‌ای که با شبکه محاسباتی مورد نظر همخوانی داشته باشد. در کار حاضر رشته‌های پردازشی همانند شبکه محاسباتی به صورت سه بعدی چیده شده‌اند و هر گره محاسباتی در روش شبکه بولتزمن توسط یک رشته پردازشی انجام می‌شود. شکل 4 نحوه چینش بلوک‌ها و رشته‌های پردازشی درون آنها را مطابق با هندسه اصلی نمایش می‌دهد.

در این چینش محاسبات هر گره در روش شبکه بولتزمن توسط یک رشته پردازشی انجام می‌گیرد. برای چینش رشته‌های پردازشی و بلوک‌ها به

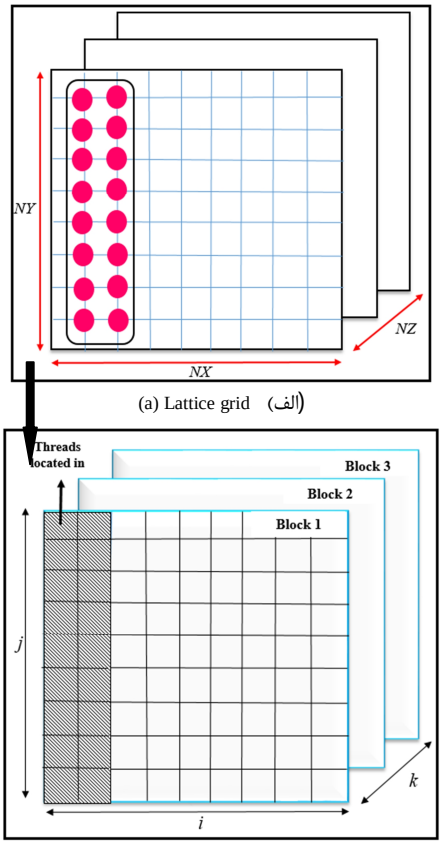

Fig. 4 Schematic view of (a) lattice grid and (b) thread block which is linked to a lattice grid

شکل4 شماتیکی از الف) شبکه محاسباتی در شبکه بولتزمن و ب) چینش رشته های پردازشی در بلوک‌ها متناسب با شبکه اصلی

صورت سه بعدی از ساختار Dim3 استفاده می‌گردد. این ساختار به طور کلی به صورت زیر تعریف می‌شود:

(بعد در راستای z، بعد در راستای y، بعد در راستای x) نام متغیر Dim3

به عنوان مثال در شکل 3 برای ایجاد یک بلوک که رشته‌های پردازشی در آن به صورت سه بعدی چیده شده‌اند از دستور زیر استفاده می‌گردد:

Dim3 Block (4, 2, 2)

در این حالت یک بلوک سه بعدی با نام مورد نظر با ابعاد 4، 2 و 2 در راستاهای x، y و z ساخته می‌گردد که در شکل 3 قابل مشاهده است. برای چینش بلوک‌ها و رشته‌های پردازشی به صورت دو و یا سه بعدی لازم است در ابتدا با استفاده از ساختار Dim3 ساختار مورد نظر ساخته شود و نام ساختار مورد نظر به جای تعداد بلوک‌ها و رشته‌های پردازشی قرار گیرد.

4- 3- اختصاص دهی حافظه

واحد پردازنده مرکزی و کارت گرافیک حافظه‌های جداگانه‌ای دارند. به دلیل اینکه کارت گرافیک به حافظه اصلی سیستم دسترسی ندارد، لذا برای اجرا کردن یک کرنل بر روی کارت گرافیک لازم است که برنامه نویس بر روی حافظه کارت گرافیک مقدار مناسبی حافظه برای انجام محاسبات تخصیص دهی[1] کند. سپس اطلاعات مربوطه را از حافظه اصلی سیستم به حافظه تخصیص یافته بر روی کارت گرافیک منتقل نماید و در نهایت پس از انجام

[1]Allocate

محاسبات، نتایج را به حافظه اصلی انتقال دهد و حافظه اختصاص یافته درکارت گرافیک را آزاد[1] کند. حافظه عمومی کارت‌گرافیک برای واحد پردازنده مرکزی قابل‌دسترسی است تا بتواند اطلاعات را به کارت‌گرافیک بفرستد یا از آن بگیرد. برای تخصیص دادن حافظه کارت‌گرافیک یا انتقال اطلاعات بین حافظه واحدپردازنده مرکزی وکارت گرافیک نیاز به توابع API[2] می‌باشد. توضیحات اضافی در مورد این توابع در مرجع [5] بیان شده است.

4- 4- الگوریتم موازی سازی

اگوریتم محاسباتی برای موازی سازی ترکیب دو روش شبکه بولتزمن و نمایه هموار در الگوریتم 1 بیان شده است. در این الگوریتم، روند اجرای برنامه روی کارت گرافیک تشریح شده است. برای آنکه موضوع دقیق تر بررسی گردد یک شبه کد در پیوست ضمیمه شده است.

برای آنکه مشخص شود که یک تابع کرنل است و باید به کارت‌گرافیک فرستاده شود، از شناساگر[3] قبل از نام تابع استفاده می‌شود. درواقع با آوردن یک شناسه قبل از نام تابع مشخص می‌شود آن تابع از چه نوعی است و باید بر روی کدام پردازنده پردازش شود. این شناسه ها عبارت اند از:

__global__: تابعی با این شناسه به‌وسیله واحدپردازنده‌مرکزی فراخوانی شده و بوسیله کارت‌گرافیک اجرا می‌شود. کرنل‌ها بوسیله این شناسه مشخص می‌شوند.

__device__: این نوع توابع به‌وسیله کارت‌گرافیک فراخوانی و اجرا می‌شوند و درواقع توابع کمکی کرنل‌ها هستند.

__host__: این نوع توابع به‌وسیله واحدپردازنده‌مرکزی فراخوانی و اجرا می‌شوند و می‌توان آن‌ها را بدون شناسه نیز آورد.

الگوریتم 1 الگوریتم پیاده سازی روش شبکه بولتزمن و نمایه هموار روی کارت گرافیک

Algorithm 1 Implementation of LBM and SPM on GPU algorithm

تخصیص دهی حافظه روس کارت گرافیک و پردازنده مرکزی
مقدار دهی اولیه برای خواص ماکروسکوپی، تابع موقعیت ذرات جامد $\emptyset$، و موقعیت اولیه ذرات جامد در پردازنده مرکزی
انتقال خواص ماکروسکوپی، تابع موقعیت ذرات جامد $\emptyset$ و موقعیت اولیه ذرات جامد از حافظه پردازنده مرکزی به حافظه کارت گرافیک
مقدار دهی اولیه برای تابع توزیع احتمال, $f_i(x,t)$, برای روی حافظه کارت گرافیک
محاسبه تابع موقعیت ذرات جامد و نیروی حجمی بر روی کارت گرافیک طبق معادلات (10,8)
اجرای کرنل روش شبکه بولتزمن به منظور حل کردن جریان سیال طبق معادله (11)
اعمال شرایط مرزی در روش شبکه بولتزمن
محاسبه خواص ماکروسکوپیک در کارت گرافیک طبق معادله (6)
انتقال تابع موقعیت ذرات جامد، خواص ماکروسکوپی و نیروی حجمی از حافظه کارت گرافیک به حافظه پردازنده مرکزی
محاسبه نیرو و گشتاور هیدرودینامیکی وارد بر ذره مورد نظر در پردازنده مرکزی طبق معادلات (13,12)
به روز رسانی موقعیت ذرات جامد طبق معادله (14)

یک نکته مهم مرتبط با الگوریتم 1، محاسبه نیرو و گشتاور وارد بر ذره (معادلات 12 و 13) در پردازنده مرکزی به جای کارت گرافیک می‌باشد. همانطور که از معادلات مربوطه نیز مشخص می‌باشد نیرو و گشتاور وارد بر هر ذره از جمع بستن تمام نیروهای حجمی که در درون ذره قرار دارند محاسبه می‌شود. این نیروهای حجمی که از معادله 10 بدست می‌آیند، به نقاطی از سیال وارد می‌شوند که ذره در آنجا وجود داشته باشد. جمع کردن این نیروها در کارت گرافیگ یک چالش مهم در این مساله می‌باشد. به دلیل اینکه عمل جمع کردن ذاتا یک عمل سری است و نیازمند چند حلقه تو در تو می‌باشد، لذا نمی‌توان به راحتی آن را در کارت گرافیک انجام داد چون جمع کردن این حلقه های تو در تو برای رشته‌های پردازشی سنگین بوده و راندمان کار را کاهش می‌دهد. از طرف دیگر همان طور که بیان شد محاسبات مربوط به هر گره محاسباتی در کارت گرافیک توسط یک رشته پردازشی انجام می‌گیرد و چون فقط رشته‌های پردازشی درون یک بلوک می‌توانند اطلاعات خود را به اشتراک بگذارند، لذا رشته‌های پردازشی در یک بلوک نمی‌توانند به اطلاعات رشته‌های پردازشی دیگر بلوک‌ها دسترسی داشته باشند. لذا جمع کردن اطلاعات آنها مساله را دچار مشکل می‌کند. به علاوه اینکه رشته‌های پردازشی همزمان با هم کار انجام دادن محاسبات را انجام می‌دهند ولی هیچ تضمینی وجود ندارد که همه آنها در یک زمان کار خود را تمام کنند. از این رو ممکن است هنگام جمع کردن نتایج، یک رشته پردازشی کارش تمام نشده باشد و مقدار عددی نیروی مورد نظر در مرحله جدید تغییر نکرده باشد و این موضوع سبب بوجود آمدن مشکلاتی در حل شود. از این رو برای حل این مشکل، نتایج حاصل از محاسبه نیروی حجمی در هر مرحله به پردازنده مرکزی فرستاده می‌شود تا عمل جمع کردن توسط پردازنده مرکزی صورت می‌گیرد.

5- نتایج

5-1- جریان درون یک کانال

در مرحله اول، به منظور اعتبار سنجی روش شبکه بولتزمن برای شبیه سازی جریان سیال و همچنین بررسی تاثیر کارت گرافیک بر کاهش زمان محاسبات، جریان سیال درون یک کانال مورد بررسی قرار گرفت. هندسه مورد بررسی جریان سیال درون یک کانال مکعبی می‌باشد. در این هندسه طول، عرض و ارتفاع 96 بر حسب ابعاد شبکه بولتزمن انتخاب شده است. شرایط مرزی در ورود و خروج، تناوبی و در چهار وجه دیگر شرط مرزی کمانه کردن اعمال شده است. برای بررسی صحت نتایج، نتایج حل عددی با حل تحلیلی مورد مقایسه قرار گرفت که در شکل 5 قابل‌مشاهده می‌باشد. به منظور بررسی تاثیر کارت گرافیک بر روی کاهش زمان محاسبات، مساله مورد نظر نیز برای شبکه $64 \times 64 \times 64$ به صورت کامل توسط پردازنده مرکزی و پردازنده گرافیکی برای 80000 تکرار حل شد و همان طور که از جدول 1 مشخص می باشد زمان پردازش با کارت گرافیک حدود 80 برابر نسبت به پردازنده مرکزی کاهش یافته است. مشخصات سیستم مورد استفاده در جدول 2 بیان شده است.

5- 2-نیروی پسای وارد بر یک کره در جریان سه بعدی

در این مطالعه جریان سیال حول یک کره به منظور بدست آوردن نیروی وارد بر آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. هندسه مسئله به گونه‌ای می‌باشد که یک کره ثابت در وسط میدان سیال مکعب شکلی که دارای شرایط مرزی پریودیک در هر شش وجه است، قرار داده شده و برای ایجاد جریان سیال،

[2] Free
[3] Application Programming Interface
[4] Quantifier

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.9.9.8]

جدول 1 مقایسه مدت زمان حل برای شبکه64 × 64 × 64 برای پردازنده مرکزی و پردازنده گرافیکی

Table 1 Comparision of simulation time for 64 × 64 × 64 grids between GPU and CPU

پردازنده‌های مختلف	زمان بر حسب دقیقه
پردازنده مرکزی سیستم 1	238
پردازنده گرافیکی سیستم 1	3

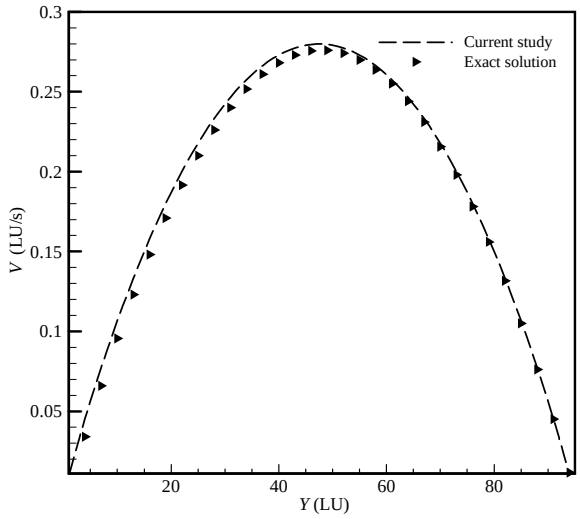

Fig.5 Velocity profile at the middle plane (Lattice Unit)

شکل 5 پرفیل سرعت در صفحه میانی کانال بر حسب ابعاد شبکه بولتزمن

جدول2 مشخصات کارت‌های‌گرافیک و واحدهای پردازنده مرکزی مختلف

Table 2 Configuration of different GPU and CPU

نام پردازنده	مدل پردازنده مرکزی	مدل پردازنده گرافیکی	قابلیت محاسباتی	تعداد چند پردازنده‌ها	حافظه سیستم
سیستم 1	Intel® core i7-4770k	GTX Titan	3.5	14	16
سیستم 2	Intel® core i7-4790	GTX 980	5.2	16	32

گرادیان فشار ثابت به صورت یک نیروی حجمی به سیال وارد می‌شود (شکل 6). اندازه میدان سیال L=62Δx است. شعاع کره از R=8Δx تا R=31Δx تغییر می‌کند که Δxفاصله گره‌ها می‌باشد. همچنین برای ایجاد کره جامد از روش نمایه هموار استفاده شده است.

برای اعداد رینولدز پایین، نیروی پسای وارد بر یک کره از رابطه استوکس به دست می‌آید:

$$F_D = 6\pi R\mu U \tag{15}$$

که از آن برای بی‌بعد کردن نیروی وارد بر کره استفاده شده است [14]. در این رابطه F_D نیروی پسا، R شعاع کره، μ لزجت و U سرعت متوسط حجمی سیال می‌باشد. شکل 7 ضریب پسا $\emptyset(\varphi)$ را برحسب نسبت حجمی φ نشان می‌دهد. مقادیر ضریب پسا و نسبت حجمی به ترتیب بر حسب روابط زیر بدست می آید:

$$\emptyset(\varphi) = -\frac{6\pi R\mu U}{F_D} \tag{16}$$

$$\varphi = \left(\frac{4}{3}\right)\pi\left(\frac{R}{L}\right)^3 \tag{17}$$

همان گونه که از شکل 7 مشخص می باشد، نتایج کار حاضر سازگاری خوبی را با نتایج ارائه شده توسط زیک و هموسی [14] دارد.

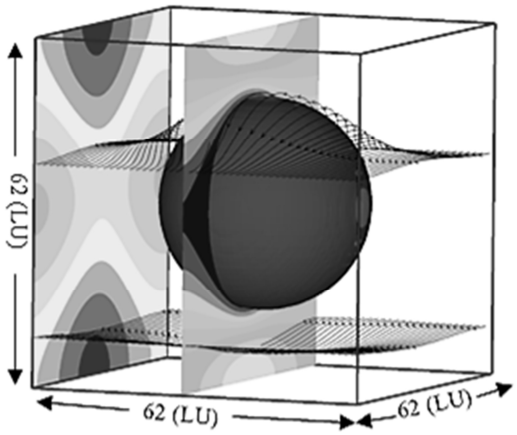

Fig. 6 Three dimensional view of contour and stream line around fixed sphere in steady flow(Lattice Unit)

شکل 6 نمای سه‌بعدی از خطوط جریان و کانتور سرعت اطراف یک کره ثابت در جریان پایا (بر حسب ابعاد شبکه بولتزمن)

5- 3-ته نشینی یک ذره کروی درون یک محفظه مستطیلی

در سومین مطالعه، شبیه سازی عددی ته نشینی یک ذره در یک محفظه مکعب مستطیلی حاوی یک سیال لزج نیوتنی غیر قابل تراکم مورد بررسی قرار می‌گیرد. طول، عرض و ارتفاع این محفظه مطابق شکل 8 به ترتیب L_x = 1 cm ، L_y = 1.6 cm و L_z = 1 cm می‌باشند. یک ذره کروی شکل با قطر d_p = 0.15 cm و چگالی ρ_p = 1.12 g/cm^3 در یک سیال با چگالی-های متفاوت مطابق جدول 3 و چسپندگی‌های سینماتیک متفاوت قرار می‌گیرد. مبدأ مختصات در گوشه پایین سمت چپ قرار دارد و موقعیت اولیه این ذره در (0.5 cm, 0.5 cm, 1.2 cm) می‌باشد. شرایط مرزی برای شش وجه محفظه کمانه کردن استاندارد قرار داده شده است و سیال و ذره در ابتدا در حال سکون می‌باشند، سپس ذره تحت اثر نیروی جاذبه شروع به سقوط می-کند. ناحیه محاسباتی دارای ابعاد (209 × 131 × 131) در روش شبکه بولتزمن می‌باشد. قطر ذره بر حسب واحد شبکه 19.5 و زمان آرامش τ = 0.9 انتخاب شده است.

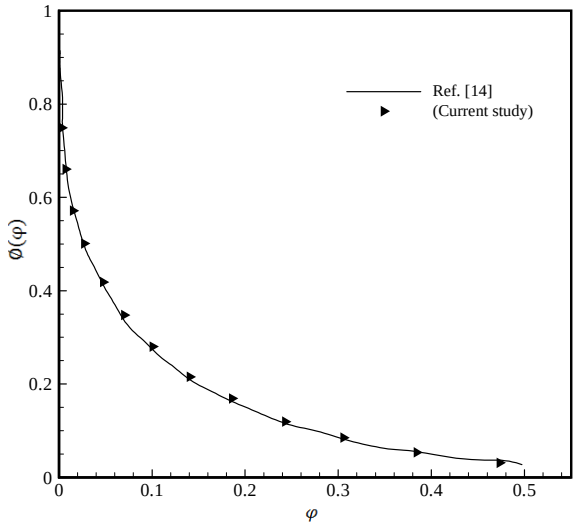

Fig. 7 Drag coefficient of fixed sphere in steady flow as a function of volume fraction

شکل 7 تغییرات ضریب پسا یک کره ثابت در جریان پایا برحسب نسبت حجمی

شکل 9 به ترتیب سرعت سقوط ذره کروی و موقعیت آن ذره را در زمان‌های مختلف نمایش می‌دهند. همان‌گونه که از شکل‌ها مشخص است ذره جامد در ابتدا در اثر نیروی وزن شتاب گرفته و سرعت آن افزایش می‌یابد. در ادامه هر چه قدر که سرعت آن زیاد می‌شود، نیروی درگ اصطکاکی وارد بر ذره نیز افزایش یافته تا زمانی که به اندازه نیروی وزن برسد. در این حالت برآیند نیروهای وارد بر ذره صفر شده و ذره با سرعت ثابت به حرکت خود ادامه می‌دهد و در نهایت در ته محفظه ته نشین می‌شود. سازگاری خوبی بین نتایج این مطالعه و نتایج ارایه شده توسط تین کیت [15] وجود دارد، به جز در نواحی نزدیک به دیواره که این ناشی از مدل‌های مختلف برخورد بین ذره جامد و دیواره پایین می‌باشد که در این مطالعه استفاده شده است.

در کار حاضر به منظور نشان دادن عدم وابستگی حل عدی حاضر به شبکه محاسباتی، شبیه سازی سقوط ذره در عدد رینولدز $Re = 11.6$ برای چندین شبکه مطابق شکل 10 بررسی شده است. همان گونه که از شکل مشخص می‌باشد حل حاضر به شبکه محاسباتی وابسته نیست.

5- 4-بررسی کارایی کارت گرافیک در محاسبات

در نهایت به منظور بررسی راندمان[1] الگوریتم ارائه شده بر روی کارت گرافیک، شبیه سازی ته نشینی یک ذره در اثر نیروی وزن با دقت مرتبه دوم[2] بر روی سیستم شماره 2 برای شبکه‌های محاسباتی مختلف مورد مطالعه قرار گرفت. برای انجام این بررسی از روش تعداد گره‌های محاسباتی به روز رسانی شده بر واحد زمان[3] استفاده شده است که معمول‌ترین روش در شبکه بولتزمن می‌باشد [10]. شکل 11 راندمان بدست آمده بر حسب تعداد گره‌های محاسباتی به روز رسانی شده را بر حسب ثانیه برای شبکه‌های مختلف نمایش می‌دهد. همان گونه که از شکل نیز مشخص می‌باشد، در کار حاضر می‌توان به توان محاسباتی 6.5 میلیون گره پردازش شده در واحد زمان دست یافت. همان طور که ملاحظه می‌گردد، راندمان کارت گرافیک با افزایش گره‌های محاسباتی افزایش می‌یابد که مبین آن است که استفاده از کارت گرافیک برای شبکه‌های بزرگتر مناسب‌تر است.

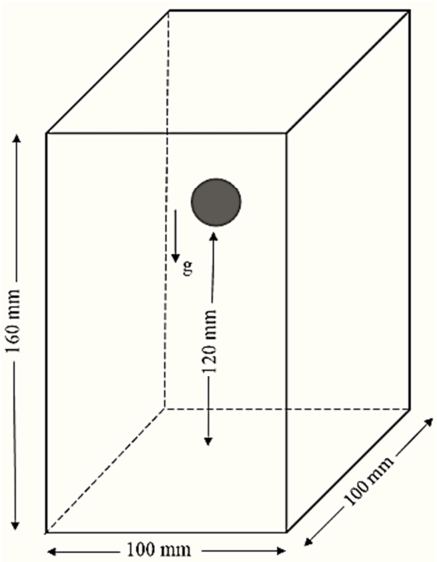

Fig. 8 Schematic view of a sphere in a square cylinder.

شکل 8 شماتیکی از یک ذره کروی درون یک محفظه مستطیلی

1- Performance
2- Double precision
3- Million fluid lattice node updates per second

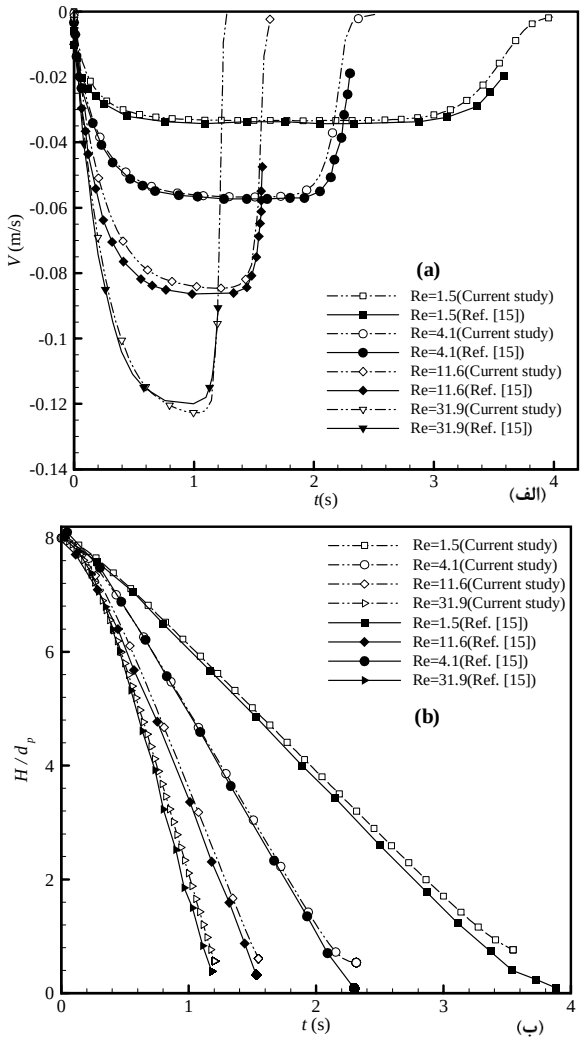

Fig. 9 Variation of vertical (a) velocity and (b) height of sphere with time for different Reynolds numbers

شکل 9 تغییرات عمودی (الف) سرعت (ب) ارتفاع یک کره همراه با زمان برای اعداد رینولدز مختلف

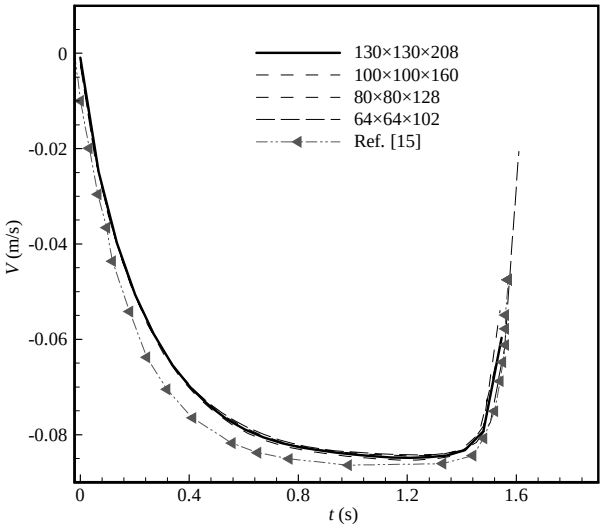

Fig. 10 Grid study for simulation of settling sphere in a quiescent fluid.

شکل 10 مطالعه عدم وابستگی شبیه سازی ته نشینی یک ذره کروی نسبت به شبکه محاسباتی

جدول3 اعداد رینولدز، چگالی و ویسکوزیته سیال به همراه سرعت ذره در فرایند سقوط ذره بیان شده در مرجع [15]

Table 3 Reynolds number, fluid density and viscosity and terminal velocity of sphere in its sedimentation. (Re, ρF and μF were taken from Ref. [15])

عدد رینولدز	ویسکوزیته سیال $(\frac{10^{-3}NS}{m^2})$	چگالی سیال $(\frac{kg}{m^3})$	سرعت ذره $(\frac{m}{s})$
1.5	373	970	0.038
4.1	212	965	0.06
11.6	113	962	0.09
31.9	58	960	0.128

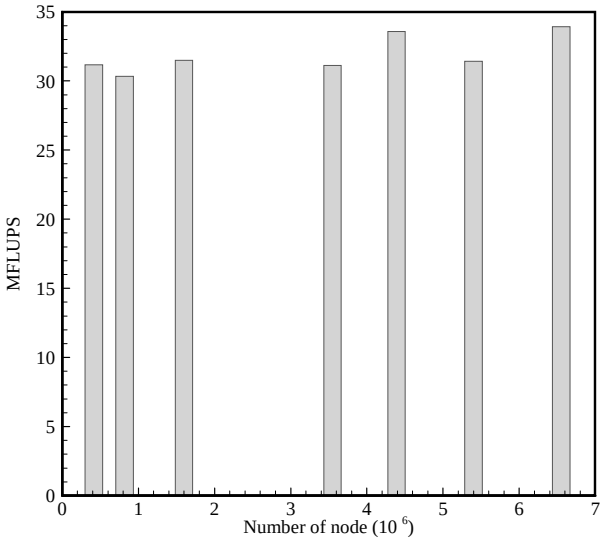

Fig. 11 Performance of GPU based on number of lattice nodes

شکل 11 راندمان کارت گرافیک بر حسب تعداد گره‌های محاسباتی

6- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، شبیه سازی جریان با استفاده از ترکیب دو روش شبکه بولتزمن و نمایه هموار از طریق پردازش موازی روی کارت گرافیک برای اولین بار مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا برای بررسی صحت کد نوشته شده و بررسی تأثیر پردازش موازی بر زمان حل، جریان آرام در یک کانال مربعی مورد بررسی قرار گرفت که نتایج به دست آمده از حل عددی با نتایج به دست آمده از حل تحلیلی کاملا تطبیق داشت. با مقایسه بین مدت زمان حل به کمک پردازنده گرافیکی و پردازنده مرکزی مشخص شد که برای جریان درون یک کانال، زمان حل بوسیله پردازنده گرافیکی به 1/80 زمان حل با پردازنده مرکزی کاهش می‌یابد. در ادامه سقوط یک ذره بر اثر نیروی وزن برای بررسی تاثیر کارت گرافیک بر روی موازی سازی الگوریتم این دو روش بررسی شد. در نهایت توان محاسباتی کارت گرافیک بر حسب تعداد گره‌های پردازش شده در واحد زمان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده موید این بود که با استفاده از الگوریتم حاضر می‌توان به توان محاسباتی 6.5 میلیون گره محاسباتی پردازش شده در واحد زمان دست یافت.

7- پیوست

در این قسمت یک شبه کد مربوط شبیه سازی عددی ته نشینی یک ذره در یک محفظه مکعب مستطیلی روی کارت گرافیک به منظور فراگیری قسمت-های مختلف کارت گرافیک آورده شده است. در این برنامه ماتریس‌های fin0_h، fin1_h و غیره به عنوان ماتریس‌های نمونه که در پردازنده مرکزی تعریف شده‌اند اورده شده است. در ادامه برای همین این ماتریس‌ها با نام fin0_d، fin1_d و غیره در حافظه کارت گرافیک، حافظه اختصاص دهی می-شود. سپس اطلاعات به کمک توابع API به کارت گرافیک فرستاده می‌شوند تا توابع مورد نظر روی کارت گرافیک اجرا گردند. در نهایت نتایج به حافظه پردازنده مرکزی انتقال داده شده و حافظه‌های اختصاص داده شده آزاد می-شوند.

Pseudo-code for GPU program

```
int main( )
{
Define parameters for CPU
double *fin0_h,*fin1_h, u_h, XC_h, …;
int num;      /* Element number for matrix  */
Define parameters for GPU
double *fin0_d,*fin1_d, u_d, XC_d, …;
Allocate memory for CPU
double *fin0_h=(float *)malloc((size od double*num));
double *fin1_h=(float *)malloc((size od double*num));
Allocate memory for GPU
cudaMalloc((void **) &fin0_d,(size od double*num) );
cudaMalloc((void **) &fin1_d,(size od double*num) );
Initialize macroscopic properties and position of particles in
CPU
U_h=0;
XC_h=10;
Copy  macroscopic properties and position of particles form
CPu to GPU
cudaMemcpy(u_d,u_h,  size  od  double*num,
cudaMemcpyHostToDevice);
cudaMemcpy(XC_d,XC_h,  size  od  double*num,
cudaMemcpyHostToDevice);
Initialize fin0_d and fin1_d in GPU
While (…)
{
Call functions
SPM kernel <<<Number of blocks, Number of theads>>>
(fin0_d, fin1_d, …);
LBM kernel <<<Number of blocks, Number of theads>>>
(fin0_d, fin1_d, …);
LBM boundry conditions <<<Number of blocks, Number of
theads>>> (fin0_d, fin1_d, …);
Macroscopic properties kernel <<<Number of blocks,
Number of theads>>> (fin0_d, fin1_d, …);
Copy macroscopic properties and body force form GPu to
CPU
cudaMemcpy(u_h,u_d,  size  od  double*num,
cudaMemcpyDeviceToHost);
}
Free fin0_h, fin1_h;
cudaFree(d_a);
cudaFree(d_b);
return 0;
}
```

8- مراجع

[1] C. K. Aidun, J. R. Clausen, Lattice-Boltzmann method for complex flows, *Annual review of fluid mechanics*, Vol. 42, pp. 439-472, 2010.

[2] W. Li, X. Wei, A. Kaufman, Implementing lattice Boltzmann computation on graphics hardware, *The Visual Computer*, Vol. 19, No. 7-8, pp. 444-456, 2003.

[3] F. Kuznik, C. Obrecht, G. Rusaouen, J.-J. Roux, LBM based flow simulation using GPU computing processor, *Computers & Mathematics with Applications*, Vol. 59, No. 7, pp. 2380-2392, 2010.

[4] E. Riegel, T. Indinger, N. Adams, Implementation of a Lattice–Boltzmann method for numerical fluid mechanics using the nVIDIA CUDA technology, *Computer Science-Research and Development*, Vol. 23 , No. 3-4, pp. 241-247, 2009.

[5] J. Tölke, Implementation of a Lattice Boltzmann kernel using the compute unified device architecture developed by nVIDIA, *Computing and Visualization in Science*, Vol. 13, No. 1, pp. 29-39, 2010.

[6] M. H. Sedaghati, M. M. Shahmardan, M. Nazari, M. Norouzi, Immersed boundry- Lattice Boltzmann method for modeling non-Newtonian fluid flow around curved boundries, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 8, pp. 146-156, 2013. (in Persian فارسی)

[7] O. R. Mohammadipoor, H. Niazmand, S. A Mirbozorgi, A new curved boundry treatment for the Lattice Boltzmann method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 8, pp. 21-48, 2013. (in Persian فارسی)

[8] A. J. Ladd, Numerical simulations of particulate suspensions via a discretized Boltzmann equation. Part 1. Theoretical foundation, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 271, No. 1, pp. 285-309, 1994.

[9] A. J. Ladd, Numerical simulations of particulate suspensions via a discretized Boltzmann equation. Part 2. Numerical results, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 271, pp. 311-339, 1994.

[10] C. Obrecht, F. Kuznik, B. Tourancheau, J.-J. Roux, Efficient GPU implementation of the linearly interpolated bounce-back boundry condition, *Computers and Mathematics with Applications*, Vol. 65, No. 6, pp. 936-944, 2013.

[11] Y. Nakayama, R. Yamamoto, Simulation method to resolve hydrodynamic interactions in colloidal dispersions, *Physical Review E*, Vol. 71, No. 3, pp. 036707, 2005.

[12] S. Jafari, R. Yamamoto, M. Rahnama, Lattice-Boltzmann method combined with smoothed-profile method for particulate suspensions, *Physical Review E*, Vol. 83, No. 2, pp. 026702_1-7, 2011.

[13] P. Bhathnagor, E. Gross, M. Krook, A model for collision processes in gases, *Physical Review*, Vol. 94, No.3, pp. 511,1954.

[14] A. Zick, G. Homsy, Stokes flow through periodic arrays of spheres, *Journal of fluid mechanics*, Vol. 115, pp. 13-26, 1982.

[15] A. Ten Cate, C. Nieuwstad, J. Derksen, H. Van den Akker, Particle imaging velocimetry experiments and lattice-Boltzmann simulations on a single sphere settling under gravity, *Physics of Fluids* (1994-present), Vol. 14, No. 11, pp. 4012-4025, 200.

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.9.9.8]