



Accurate and faster than real-time simulation of indoor airflow by using fast fluid dynamics

M. Seyedi, H. Pasdarsahri*

Tarbiat Modares University, Faculty of Mechanical Engineering

ABSTRACT: The multizone model is one of the most popular models for simulating indoor energy and airflow; however, its basic problem is that it cannot provide detailed and accurate airflow information. Computational fluid dynamics can be used to obtain detailed airflow information but is restricted due to its high computational cost. Therefore, it is necessary to develop a model which can provide detailed airflow information with reasonable accuracy and computational time. In this study, fast fluid dynamics, which has an unconditionally stable algorithm, is proposed. To investigate this model, four case studies of flow in a lid-driven cavity, flow in a channel, natural and forced flow convection are analyzed, and the results are compared and validated with computational fluid dynamics, experimental data, and analytical solution. The main focus of this study is increasing the computational speed of fast fluid dynamics. For this purpose, the sequence of equations has been modified and suitable numerical methods have been applied to solve each equation. Using the proposed fast fluid dynamics solver, the simulation time of the case studies has decreased between 52 to 94 percent compared to computational fluid dynamics and faster than real-time simulation has been achieved on a conventional computer system.

Review History:

Received: Oct. 15, 2019
Revised: Dec. 30, 2019
Accepted: Mar. 10, 2028
Available Online: Mar. 22, 2028

Keywords:

Fast Fluid Dynamics
Computational Fluid Dynamics
Fluid Flow Simulation
Ventilation, Building Energy
Simulation.

1- Introduction

To optimize the Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC) systems and reduce energy consumption, a fast airflow simulation model is necessary. Multizone models are widely used in indoor airflow simulations [1]. However, this model fails to correctly predict the airflow where the flow regime is stratified or has high momentum as it assumes homogenous flow characteristics in the room [2]. Computational Fluid Dynamic (CFD) method can be used alternatively to achieve accurate airflow simulation; however, this method is restricted due to its high computational cost. To overcome these issues, Fast Fluid Dynamics (FFD) method can be used as an intermediate approach between multizone and CFD techniques. FFD was firstly introduced by Stam for creating realistic visual effects of fluid flow in computer games [3]. Zuo et al. showed that FFD model has proper accuracy for indoor airflow simulation [4].

The main focus of the present study is increasing the computational speed of FFD by modifying the sequence of equations and using suitable numerical methods for solving each equation. To evaluate the modified FFD model, four case studies of lid-driven cavity flow, flow in a channel, natural and forced flow convection are simulated and the results are validated with experimental data, CFD results, and analytical solution.

2- Methodology

The FFD model is based on the time splitting technique through which the momentum equation (Eq. (1)) is split into four sub-equations (Eqs. (2) to (5)) which are solved successively.

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j^2} + f_i \quad (1)$$

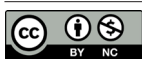
$$\frac{\partial U_i^{(1)}}{\partial t} = -U_j \frac{\partial U_i^{(1)}}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\frac{U_i^{(2)} - U_i^{(1)}}{\Delta t} = \nu \frac{\partial^2 U_i^{(2)}}{\partial x_j^2} \quad (3)$$

$$U_i^{(3)} = U_i^{(2)} + \Delta t f_i \quad (4)$$

$$\frac{U_i^{(4)} - U_i^{(3)}}{\Delta t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} \quad (5)$$

*Corresponding author's email: pasdar@modares.ac.ir



Other sequences of equations have also been implemented in previous studies; however, the proposed sequence of equations (Eqs. (2) to (5)) was found to be the most efficient among the other possible sequence of equations.

In Eqs. (1) to (5), U_i is velocity in x_i direction, x_i is position component in x_i direction, ν is kinematic viscosity, ρ is density, P is pressure and F_i is volumetric force component in x_i direction. Furthermore, $U_i^{(n)}$ and $U_i^{(n+1)}$ are the temporary velocities which are transferred as the initial conditions to the next sub-equation and $U_i^{(n+1)}$ is the velocity domain in the next time step. Therefore, the complex momentum equation is split into four much simpler equations which can be solved separately with proper numerical methods. In FFD, the convection equation (Eq. (2)) is solved by a semi-Lagrangian approach [5], which makes the FFD model as an unconditionally stable method. The diffusion equation (Eq. (3)) is solved implicitly by the Gauss-Seidel method. Eq. (4) is solved through simple algebraic operations. To solve Eq. (5) the pressure domain is needed, which is unknown up to this step. In FFD, the coupling between velocity and pressure is solved by pressure projection scheme [6] through which Eq. (5) is coupled with continuity equation (Eq. (6)), which leads to a stiff equation called pressure Poisson equation (Eq. (7)).

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \tag{6}$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x_i^2} = \frac{\rho}{\Delta t} \frac{\partial U_i^{(3)}}{\partial x_i} \tag{7}$$

Using a proper numerical scheme to solve Eq. (7) highly improves the FFD computational speed. This study applied the Alternative Direction Implicit (ADI) method to solve Eq. (7). Therefore by substituting the calculated pressure from pressure Poisson equation into Eq. (5) the velocity domain is calculated and the solver moves on to the next time step.

3- Results and Discussion

2.1. Flow In A Lid-Driven Cavity

The first case study simulated with the proposed FFD model is a lid-driven cavity flow with a Reynolds number of 100 (Fig. 1).

The results of horizontal velocity on x axis and vertical velocity on y axis are presented in Fig. 2.

The CFD results have been obtained using ANSYS FLUENT software. A 64×64 grid and time step of 0.02 s are implemented in both FFD and CFD simulations. Also, Ghia et al., [7] experimental data have been used for the validation of numerical results. The horizontal and vertical velocity

results obtained from the FFD model match well with CFD results and experimental data.

2.2. Natural Flow Convection

The natural flow convection problem with the Rayleigh number of 10^6 is another case study simulated with the proposed FFD model (Fig. 3).

The temperature results on x , y and z axes are presented in Fig. 4.

A 20×40 grid and time step of 0.05 s are implemented in both FFD and CFD simulations. Also, Betts et al., [8] experimental data have been used for the validation of numerical results. The temperature results agree well with the experimental measurements.

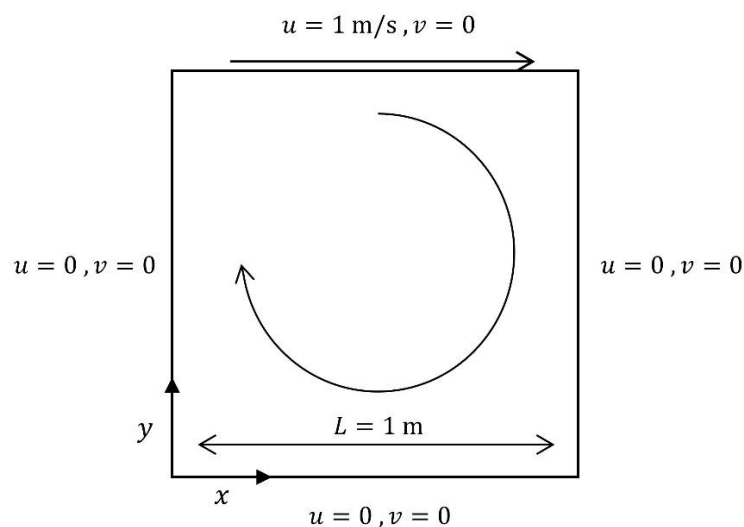


Fig. 1. Geometry and boundary conditions of lid-driven cavity flow problem

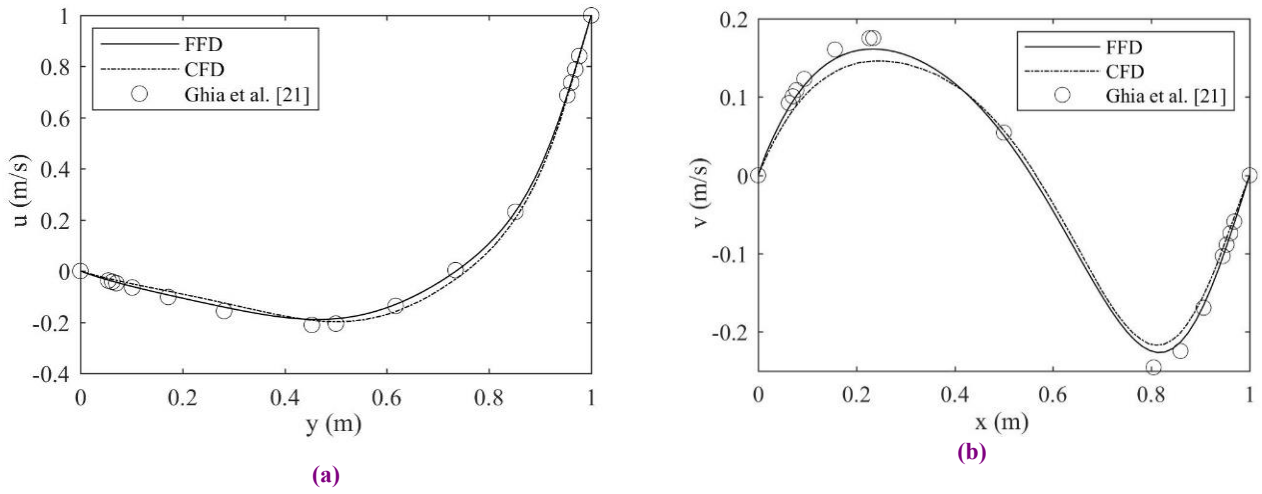


Fig. 2. Simulation results of lid-driven cavity flow problem with $Re=100$ (a) horizontal velocity (b) vertical velocity

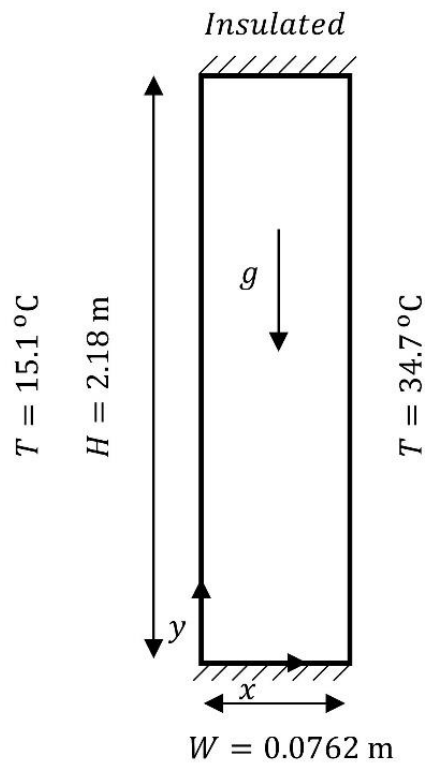
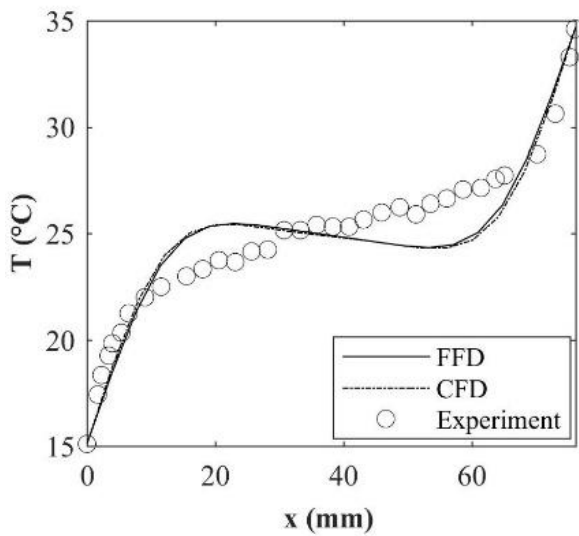
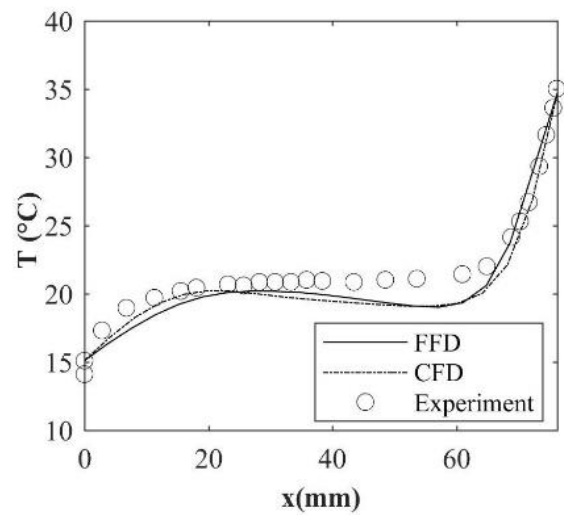


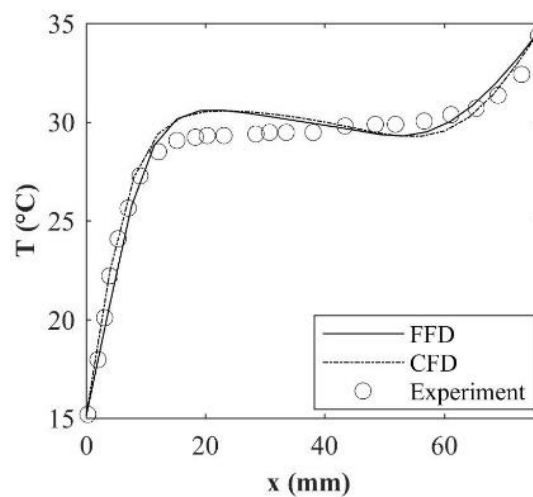
Fig. 3. Geometry and boundary conditions of natural flow convection problem



(b)



(a)



(c)

Fig. 4. Temperature results of natural flow convection problem (a) $y=0.218$ m (b) $y=1.090$ m (c) $y=1.926$ m

In addition to the above problems, the case studies of lid-driven cavity flow with , channel flow with and forced flow convection with have also been simulated with the proposed FFD model and validated with CFD results, analytical solution, and experimental data. In all cases, the FFD computational time was not only faster than real-time but also 52 to 94 percent faster than CFD simulation.

4- Conclusions

In this paper, a modified FFD model with a revised sequence of equations and implementing proper numerical methods for solving each equation was proposed and validated

with CFD results, analytical solution, and experimental data. In all cases, the FFD simulation on a regular computer was faster than real-time and also 52 to 92 percent faster than CFD simulation. Three prominent features of FFD, i.e., fast computations, proper accuracy, and an unconditionally stable algorithm, make this model a potential method to be widely used in a variety of building energy simulation problems, which demands more research and development.

REFERENCES

- [1] J. Axley, Multizone Airflow Modeling in Buildings: History and Theory, HVAC&R Research, 13(6) (2007)

907-928.

- [2] W. Tian, X. Han, W. Zuo, M.D. Sohn, Building energy simulation coupled with CFD for indoor environment: A critical review and recent applications, *Energy and Buildings*, 165 (2018) 184-199.
- [3] J. Stam, Stable fluids, in: *Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1999, pp. 121-128.
- [4] W. Zuo, Q. Chen, Real-time or faster-than-real-time simulation of airflow in buildings, *Indoor air*, 19(1) (2009) 33.
- [5] R. Courant, E. Isaacson, M. Rees, On the solution of nonlinear hyperbolic differential equations by finite differences, *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 5(3) (1952) 243-255.
- [6] A.J. Chorin, A numerical method for solving incompressible viscous flow problems, *Journal of computational physics*, 2(1) (1967) 12-26.
- [7] U. Ghia, K.N. Ghia, C. Shin, High-Re solutions for incompressible flow using the Navier-Stokes equations and a multigrid method, *Journal of computational physics*, 48(3) (1982) 387-411.
- [8] P. Betts, I. Bokhari, Experiments on turbulent natural convection in an enclosed tall cavity, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 21(6) (2000) 675-683.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Seyedi, H. Pasharshahi, *Accurate and faster than real-time simulation of indoor airflow by using fast fluid dynamics. Amirkabir J. Mech. Eng., 53(special issue 3) (2021). 443-448.*

DOI: [10.22060/mej.2020.17222.6538](https://doi.org/10.22060/mej.2020.17222.6538)





شبیه‌سازی دقیق و سریعتر از زمان واقعی جریان هوا در ساختمان با استفاده از دینامیک سیالات سریع

میرمسعود سیدی، هادی پاسدارشهری*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۲۳

بازنگری: ۱۳۹۸/۱۰/۰۹

پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۲۰

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۱/۰۳

کلمات کلیدی:

دینامیک سیالات سریع

دینامیک سیالات محاسباتی

شبیه‌سازی جریان سیال

تهویه

شبیه‌سازی انرژی در ساختمان

خلاصه: یکی از مرسوم‌ترین روشهای مدلسازی انرژی در ساختمان، روش چند ناحیه‌ای است. مشکل اساسی این روش عدم توانایی ارائه اطلاعات جزئی و دقیق از جریان هوا می‌باشد. برای دستیابی به اطلاعات جزئی‌تر میتوان از روش دینامیک سیالات محاسباتی استفاده نمود، اما زمان محاسبات طولانی، کاربرد این روش را محدود می‌سازد. بنابراین نیاز است از روشی با سرعت محاسبات بالا با توانایی ارائه جزئیات جریان هوا با دقت کافی استفاده نمود. بدین منظور در این پژوهش روش دینامیک سیالات سریع که دارای الگوریتم حل بدون قید و شرط پایدار می‌باشد ارائه شده است. برای بررسی این روش، چهار مسئله جریان درون حفره، جریان درون کانال، جریان با جابجایی طبیعی و جریان با جابجایی اجباری بررسی شده و نتایج با داده‌های آزمایشگاهی، نتایج تحلیلی و نتایج دینامیک سیالات محاسباتی مقایسه و صفحه‌گذاری شده است. تمرکز اصلی این پژوهش، افزایش سرعت حل به روش دینامیک سیالات سریع می‌باشد. بدین منظور زنجیره معادلات اصلاح شده و از روش عددی مناسب برای حل معادلات استفاده شده است. با بکارگیری این حلگر، زمان شبیه‌سازی مسائل فوق بین ۵۲ تا ۹۴ درصد نسبت به روش دینامیک سیالات محاسباتی کاهش یافته و شبیه‌سازی آنها به صورت سریعتر از زمان واقعی روی یک سیستم کامپیوتری معمولی میسر شده است.

۱- مقدمه

تهویه مطبوع و محل قرارگیری آن، هندسه اولیه ساختمان را نیز به گونه‌ای طراحی نمود که با توجه به شرایط آب و هوایی منطقه، تهویه مناسبی داشته باشد.

یکی دیگر از کاربرد های شبیه‌سازی سریع جریان هوا در ساختمان، مدیریت بهتر شرایط اضطراری مانند آتش سوزی، انتشار دود و نشتی ماده سمی به منظور کاهش تلفات می‌باشد. در صورتی که این حوادث به صورت سریعتر از زمان واقعی شبیه‌سازی شوند می‌توان استراتژی مناسبی را برای عملکرد بهتر سیستم تهویه اتخاذ کرده و یک مسیر فرار امن برای افراد داخل ساختمان ایجاد نمود.

با وجود پیشرفت مدل‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی جریان هوا در ساختمان، همچنان مدل‌ها در بسیاری از شرایط هندسی و محیطی دارای خطای زیادی می‌باشند. مرسوم‌ترین مدل مورد

امروزه حدود ۴۰ درصد از انرژی مصرفی در دنیا به ساختمان‌ها اختصاص دارد که قسمت عمده آن مربوط به سیستم تهویه مطبوع می‌باشد [۱]. بنابراین بهینه‌سازی شرایط داخلی ساختمان‌ها اهمیت بسزایی در کاهش مصرف انرژی دارد. به منظور بهینه‌سازی شرایط داخلی ساختمان‌ها نیاز است که جریان هوا در فضاهای داخلی و بیرونی شبیه‌سازی شده و سپس مصرف انرژی سیستم تهویه مطبوع برای رسیدن به شرایط آسایش مورد بررسی قرار گیرد. بنابراین حلگر شبیه‌سازی جریان هوا می‌بایست قابلیت ارائه جزئیات مشخصات جریان هوا در نقاط مختلف دامنه حل از جمله سرعت و دما را در زمان کوتاه داشته باشد. به واسطه یک حلگر سریع و دقیق می‌توان بدون ورود به شبیه‌سازی‌های پیچیده و زمانبر علاوه بر طراحی بهینه سیستم *نویسنده عهده‌دار مکاتبات: pasdar@modares.ac.ir

استفاده در این زمینه، مدل چند ناحیه‌ای است که تاکنون مطالعات گسترده‌ای در زمینه انرژی در ساختمان با استفاده از این مدل انجام شده است [۲]. فرض اساسی در این مدل یکنواخت بودن توزیع سرعت و دمای هوا، درون فضا می باشد [۳] و همین امر باعث می شود در شرایطی که رژیم جریان سیال به صورت لایه‌ای بوده و یا در شرایطی که سیال دارای ممنتوم بالا باشد این مدل با خطای زیادی همراه باشد [۴]. در این روش، هر یک از فضاها با یک نقطه محاسباتی مدل‌سازی شده و به همین دلیل قابلیت ارائه مشخصات جریان هوا در نقاط مختلف دامنه حل را ندارد. برای حل این مشکل یکی از راهکارهایی که پژوهشگران حوزه انرژی در ساختمان استفاده نموده‌اند بکارگیری روش دینامیک سیالات محاسباتی^۱ (سی اف دی) است [۵]. با استفاده از مدل‌سازی سی اف دی می توان توزیع سرعت، دما و همچنین غلظت ذرات و آلودگی را در فضا بدست آورد. اما مهم ترین چالش استفاده از مدل‌سازی سی اف دی زمان محاسبات طولانی آن در فضاهای بزرگ نظیر ساختمان می باشد که کاربرد این روش را محدود می سازد.

برای پرهیز از مشکلات حلگرهای فوق، روشی که اخیراً مورد استفاده پژوهشگران قرار گرفته و دارای سرعت و دقت مناسب برای مسائل انرژی در ساختمان است، روش دینامیک سیالات سریع^۲ (اف اف دی) می باشد. دینامیک سیالات سریع روشی است که ابتدا در سال ۱۹۹۹ برای ایجاد جلوه‌های بصری واقعی از حرکت سیال در بازی‌های کامپیوتری توسعه داده شد [۶]. در این روش معادلات حالت گذار ناویر-استوکس^۳ با یک الگوریتم بدون قید و شرط پایدار با هزینه محاسباتی پایین به گونه‌ای حل می گردد که قابلیت شبیه‌سازی حرکت جریان سیال به صورت زمان واقعی را فراهم می سازد. چند نمونه از مطالعاتی که با استفاده از این روش انجام شده عبارت است از: شبیه‌سازی انفجار [۷]، شبیه‌سازی حرکت ابرها [۸] و شبیه‌سازی حرکت دود [۹].

کاربرد موفقیت آمیز مدل‌سازی با اف اف دی در بازی‌های کامپیوتری، نظر پژوهشگران در زمینه انرژی در ساختمان را به استفاده از این روش در تحقیقات خود جلب کرده است. ژو [۱۰] کاربرد اف اف دی را در مسائل انرژی در ساختمان بررسی نمود و نشان داد که این روش دارای دقت کافی در مسائل انرژی در ساختمان می باشد. همچنین ژو

1 Computational Fluid Dynamics (CFD)
2 Fast Fluid Dynamics (FFD)
3 Navier-Stokes Equations

طی مطالعه‌ای دیگر [۱۱] برای افزایش دقت اف اف دی از روش عددی حجم محدود به جای روش اختلاف محدود استفاده نمود و همچنین برای برقراری بهتر قانون بقای جرم یک تابع اصلاحی برای تصحیح سرعت سیال خروجی معرفی نمود. یکی از ویژگی‌های مهم اف اف دی قابلیت پردازش موازی آن روی واحد پردازش گرافیکی^۴ می باشد. طی یک مطالعه [۱۲] ضمن ارائه الگوریتم موازی سازی اف اف دی روی واحد پردازش گرافیکی مشخص شد، در صورتی که تعداد نقاط محاسباتی دامنه حل از مضرب ۲۵۶ باشد شبیه‌سازی جریان با روش اف اف دی روی واحد پردازش گرافیکی، ۳۰ برابر سریعتر از شبیه‌سازی روی واحد پردازش مرکزی^۵ خواهد بود. پس از بکارگیری روش اف اف دی در شبیه‌سازی جریان هوا در داخل ساختمان، جین [۱۳] با استفاده از این روش، جریان هوا در اطراف ساختمان را شبیه‌سازی کرد و تاثیر ساختمان‌های اطراف ساختمان مورد نظر را بر روی تهویه طبیعی بررسی نمود. او همچنین در پژوهشی دیگر [۱۴] برای شبیه‌سازی جریان هوای حاصل از نیروی شناوری، مدل ستون گرمایی^۶ را با اف اف دی ترکیب نمود و مسئله تهویه جابجایی را درون یک اتاق با منابع حرارتی مختلف شبیه‌سازی نمود. برای بررسی عملکرد روش اف اف دی با شبکه‌های محاسباتی ساختاریافته^۷ و غیر ساختاریافته^۸، لیو [۱۵] الگوریتم اف اف دی را بر روی نرم افزار این فوم^۹ پیاده‌سازی نمود و با شبیه‌سازی چند مسئله به این نتیجه رسید که روش اف اف دی با هر دو نوع شبکه محاسباتی به نتایج یکسانی می رسد. او همچنین در مطالعه‌ای دیگر [۱۶] برای افزایش سرعت اف اف دی دو روش تولید شبکه محاسباتی سازگار با مسئله را ارائه نمود.

با توجه به مطالعات فوق ملاحظه می شود که روش اف اف دی با یک الگوریتم حل سریع و بدون قید و شرط پایدار دارای پتانسیل استفاده در بسیاری از مسائل شبیه‌سازی جریان و انرژی در ساختمان بوده و در سالیان اخیر پژوهش‌های گسترده‌ای برای توسعه آن انجام شده است. در پژوهش حاضر تمرکز اصلی، کاهش زمان محاسباتی روش اف اف دی می باشد. برای این منظور ابتدا روابط حاکم بر الگوریتم اف اف دی استخراج شده است و سپس به منظور بهینه‌سازی و کاهش

4 Graphics Processing Unit (GPU)
5 Central Processing Unit (CPU)
6 Thermal Plume Model
7 Structured
8 Unstructured
9 OpenFOAM

$$U_i^{(3)} = U_i^{(2)} + \Delta t f_i \quad (4)$$

$$\frac{U_i^{(4)} - U_i^{(3)}}{\Delta t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} \quad (5)$$

در روابط (۲) تا (۵)، پارامترهای $U_i^{(1)}$ ، $U_i^{(2)}$ و $U_i^{(3)}$ سرعت‌های موقتی را نشان می‌دهند که از هر زیر-مرحله به عنوان شرایط اولیه به زیر-مرحله بعدی انتقال پیدا می‌کنند و $U_i^{(4)}$ میدان سرعت در گام زمانی بعدی می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌شود در این روش معادلات به صورت زنجیره‌ای و پشت سرهم حل شده و میدان سرعت در گام زمانی بعدی بدست می‌آید. به عبارت دیگر، ابتدا معادله جابجایی (رابطه (۲)) حل شده و میدان سرعت بر اساس آن به روز شده و میدان سرعت $U_i^{(1)}$ بدست می‌آید (مرحله ۱). سپس با انتقال $U_i^{(1)}$ به معادله نفوذ (رابطه (۳)) به عنوان شرایط اولیه و حل معادله نفوذ میدان سرعت مجدد به روز شده و میدان سرعت $U_i^{(2)}$ بدست می‌آید (مرحله ۲). به همین شکل معادله نیروی حجمی (رابطه (۴)) حل شده و میدان به روز شده $U_i^{(3)}$ بدست می‌آید (مرحله ۳). در نهایت نیز با حل معادله گردیان فشار (رابطه (۵)) میدان سرعت در گام زمانی بعدی محاسبه می‌شود (مرحله ۴). بنابراین ملاحظه می‌شود با حل معادلات طی ۴ مرحله در این روش میدان سرعت در گام زمانی جدید بدست می‌آید. در واقع با شکسته شدن معادله کلی ممنوم به معادلات کوچکتر نه تنها از حل معادله پیچیده ممنوم جلوگیری می‌شود بلکه می‌توان برای حل هر یک از معادلات کوچکتر از روش عددی مختص آن معادله استفاده نمود که این امر یکی از دلایل مهم سرعت بالای روش افافدی در مقایسه با روش سی‌افدی می‌باشد.

در افافدی برای حل معادله جابجایی (رابطه (۲)) در مرحله اول از روش تقسیم زمانی، از روش شبه-لاگرانژی استفاده می‌شود [۱۷]. برای این منظور رابطه (۲) به صورت رابطه (۶) بازنویسی می‌گردد.

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = 0 \quad (6)$$

حال با استفاده از تعریف مشتق مادی، معادله (۶) به صورت رابطه (۷) قابل بازنویسی است.

$$\frac{DU_i}{Dt} = 0 \quad (7)$$

زمان محاسبات، زنجیره حل معادلات اصلاح شده و برای حل معادلات از روش عددی مناسب استفاده شده است. در قدم بعدی برای ارزیابی مدل اصلاح شده، چهار مسئله جریان درون حفره، جریان درون کانال، جریان با جابجایی طبیعی و جریان با جابجایی اجباری با استفاده از این روش شبیه‌سازی شده و نتایج آن با نتایج حاصل از شبیه‌سازی سی‌افدی و داده‌های تجربی و یا تحلیلی مقایسه و صحت‌گذاری شده است. هر یک از مسائل نمونه مورد بررسی در این پژوهش شبیه‌ساز یکی از رژیم‌های جریان هوای متداول درون ساختمان می‌باشد.

۲- معادلات حاکم و روش حل عددی

اساس کار افافدی استفاده از روش تقسیم زمانی^۱ است. در روش تقسیم زمانی معادلات دیفرانسیل مشتقات جزئی پیچیده به چند معادله کوچکتر یا زیر-مرحله تقسیم شده و هر یک از این معادلات کوچکتر با روش‌های عددی ساده‌تر و مختص آن معادله حل می‌شود. سپس نتیجه هر زیر-مرحله به عنوان شرایط اولیه در حل معادله مربوط به زیر-مرحله بعدی استفاده می‌شود. برای شبیه‌سازی جریان سیال به روش افافدی نیاز است که این الگوریتم بر روی معادلات بقای ممنوم (رابطه (۱)) اعمال شود.

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j^2} + f_i \quad (1)$$

در رابطه (۱) U_i مولفه سرعت در جهت i ، x_i مولفه مکان در جهت i ، ν لزجت سینماتیک، ρ چگالی، P فشار و f_i مولفه i از نیروهای حجمی را نشان می‌دهد. حال با اعمال روش تقسیم زمانی بر روی معادله (۱)، این معادله مطابق با روابط (۲) تا (۵) به ۴ زیر-مرحله تقسیم می‌شود.

$$\frac{\partial U_i^{(1)}}{\partial t} = -U_j \frac{\partial U_i^{(1)}}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\frac{U_i^{(2)} - U_i^{(1)}}{\Delta t} = \nu \frac{\partial^2 U_i^{(2)}}{\partial x_j^2} \quad (3)$$

بزرگتر از یک باشد و برای پایداری حل، نیازی به انتخاب گام زمانی کوچک نیست.

در مرحله دوم از روش افافدی برای حل معادله نفوذ (رابطه (۳))، با استفاده از روش تماماً ضمنی دستگاه معادلات تشکیل می‌شود که به روش گوس-سایدل حل شده و میدان سرعت بر اساس آن به روز می‌شود. در مرحله سوم برای حل معادله مربوط به نیروهای حجمی نیازی به تشکیل دستگاه نیست و همانطور که در رابطه (۴) نشان داده شده است به صورت جبری حل می‌گردد.

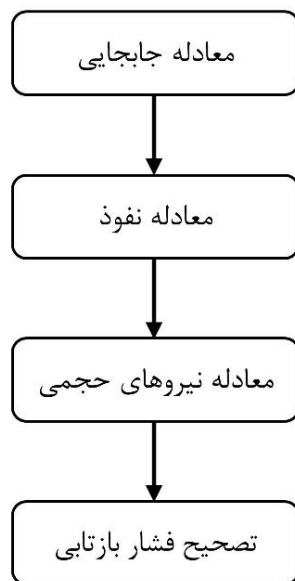
در مرحله چهارم (رابطه (۵)) نیاز به دانستن میدان فشار می‌باشد. اما در سیالات تراکم‌ناپذیر معادله مختص فشار وجود نداشته و ضروری است که روشی برای اعمال همبستگی بین سرعت و فشار پیدا نمود تا پس از محاسبه میدان فشار، میدان سرعت بر اساس رابطه (۵) در زمان جدید بدست آید. در روش افافدی کوپل بین سرعت و فشار با روش تصحیح فشار بازتابی^۲ برطرف می‌شود که توسط کورین [۱۹] ارائه شده است. مزیت روش تصحیح فشار بازتابی این است

در رابطه (۷)، D عملگر مشتق مادی می‌باشد. با توجه به این رابطه، مطابق با تعریف مشتق مادی سرعت سیال در مکان j به صورت رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

$$U_i^{(1)}(x_j) = U_i^{(0)}(x_j - \Delta t U_j^{(0)}) \quad (8)$$

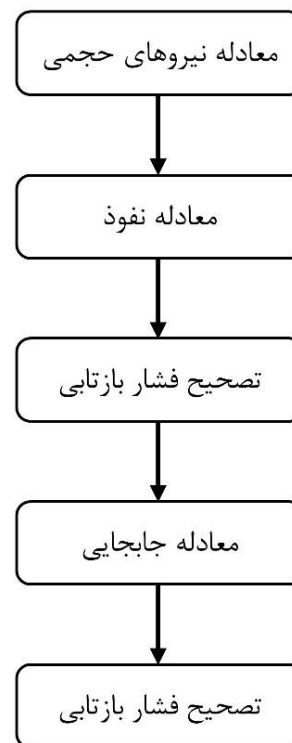
در رابطه (۸)، عبارات (x_j) و $(x_j - \Delta t U_j^{(0)})$ به ترتیب محل ذره فرضی در گام زمانی جدید و محل همان ذره در گام زمانی قبل را نشان می‌دهد. در واقع طبق دیدگاه لاگرانژی و رابطه (۷)، سرعت در مکان جدید ذره برابر با سرعت در مکان قبلی ذره می‌باشد. بنابراین همانطور که ملاحظه می‌شود در روش شبه-لاگرانژی نیاز به تشکیل دستگاه معادلات نمی‌باشد و این امر یکی دیگر از عوامل کاهش زمان محاسبات می‌باشد. ویژگی دیگر روش شبه-لاگرانژی عدم وابستگی آن به عدد کورانت^۱ می‌باشد [۱۸]. در واقع با استفاده از این روش، شبیه‌سازی همواره پایدار بوده و عدد کورانت می‌تواند

2 Pressure-Correction Projection Scheme



ب

1 Courant-Friedrichs-Lewy Number (CFL)



الف

شکل ۱: فلوچارت ترتیب حل معادلات الف) مطالعات پیشین ب) مطالعه حاضر

Fig. 1. Sequence of solving equations flowchart (a) previous studies (b) current study

از $U_i^{(3)}$ حل معادله مربوط به نیروهای حجمی در زیر-مرحله قبل بدست آمده و معلوم است.

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x_i^2} = \frac{\rho}{\dot{A}t} \frac{\partial U_i^{(3)}}{\partial x_i} \quad (10)$$

رابطه (۱۰) به معادله پواسون فشار^۴ معروف است. اکنون با حل رابطه (۱۰) توزیع فشار در میدان حل بدست آمده و سپس با استفاده از معادله (۵) میدان سرعت تصحیح شده و میدان سرعت در گام زمانی بعدی ($U_i^{(4)}$) بدست می‌آید. در مطالعه حاضر مشخص شد که معادله پواسون فشار در مقایسه با معادله نفوذ، معادله سخت‌تری^۵ بوده و تعداد تکرار بسیار بیشتری جهت همگرایی نیاز دارد. دو مرحله دیگر روش افافدی یعنی حل معادلات انتقال و نیروهای حجمی مطابق با توضیحات ارائه‌شده نیاز به حل دستگاه معادلات

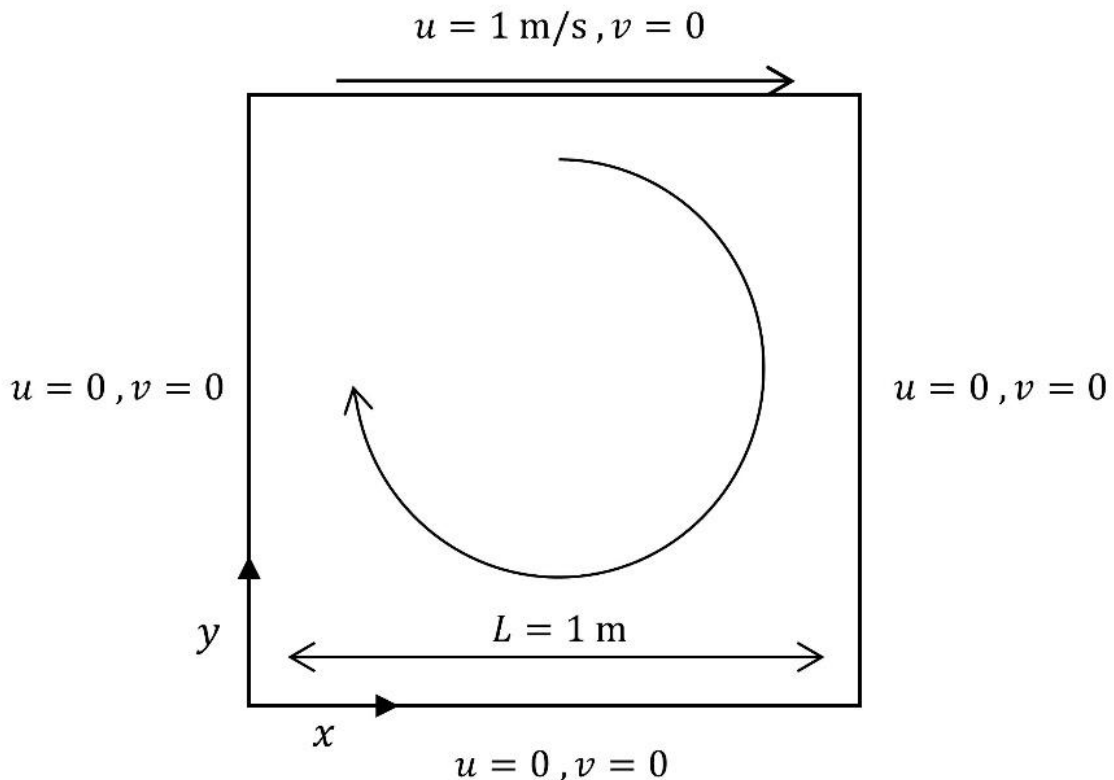
که برخلاف روش‌های دیگر برطرف‌کننده کوپل بین سرعت و فشار مورد استفاده در الگوریتم‌هایی مانند سیمپل^۱ و سیمپل‌سی^۲ نیازی به تکرار^۳ نداشته و همین امر سبب افزایش سرعت محاسبات می‌شود. در این روش برای محاسبه میدان فشار از معادله پیوستگی استفاده می‌شود که در رابطه (۹) ارائه شده است.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (9)$$

میدان سرعت می‌بایست در معادله پیوستگی نیز صدق کند بنابراین با ترکیب دو رابطه (۵) و (۹)، یک رابطه بین میدان فشار و میدان سرعت $U_i^{(3)}$ بدست می‌آید (رابطه (۱۰)). میدان سرعت

-
- 1 SIMPLE
 - 2 SIMPLEC
 - 3 Iteration

4 Pressure Poisson Equation
5 Stiff Equation



شکل ۲: هندسه مسئله حفره به همراه شرایط مرزی

Fig. 2. Geometry and boundary conditions of lid-driven cavity flow problem

میدان سرعت تاثیرگذار نباشد و یا بتوان از اثر آن صرف نظر نمود، می توان ابتدا میدان سرعت را برای کل بازه زمانی بدست آورد و سپس معادله انتقال آن کمیت را حل نمود. اما در مسائلی که کمیت مورد نظر بر روی میدان سرعت تاثیر گذار باشد می بایست در هر گام زمانی معادله انتقال را حل نمود. مسئله سوم مورد بررسی در این پژوهش، مسئله جریان با جابجایی طبیعی می باشد که جریان سیال به سبب نیروی شناوری حاصل از گرادیان دمایی ایجاد می شود. بنابراین نیاز است که در هر گام زمانی معادله انتقال دما حل شده و میدان سرعت را بر اساس آن اصلاح نمود. برای این منظور در هر گام زمانی پس از محاسبه میدان سرعت و سپس حل معادله انتقال دما، نیروی شناوری بر واحد جرم در میدان حل با استفاده از مدل بوزینسک^۲ بر اساس رابطه (۱۲) محاسبه می شود.

$$f_y = -\beta(T - T_0)g_y \quad (12)$$

در رابطه (۱۲)، β ضریب انبساط حجمی، T دمای بدست آمده از حل معادله انتقال، T_0 دمای مبنا در میدان حل، g_y شتاب گرانشی در راستای محور عمودی و f_y نیروی شناوری بر واحد جرم می باشد. با جایگذاری نیروی شناوری بر واحد جرم بدست آمده از رابطه (۱۲) در معادله بقای ممنتوم (رابطه (۱))، رابطه (۳) مربوط به نیروهای حجمی به روز شده و میدان سرعت اصلاح می شود و این روند به صورت تکراری تا حصول همگرایی ادامه می یابد. در این پژوهش از نرم افزار متلب^۳ جهت پیاده سازی الگوریتم اف اف دی استفاده شده است. کد هر یک از زیر-مرحله ها به صورت جداگانه نوشته شده و در یک کد کلی تر ترتیب حل معادلات تعیین شده است و در یک حلقه زمانی مطابق با زنجیره حل ارائه شده در شکل ۱-ب اطلاعات حل مربوط به هر زیر-مرحله به زیر-مرحله بعدی انتقال داده شده و در پایان هر گام زمانی میدان حل به روز می گردد.

۱- معرفی مسئله

در این بخش چهار مسئله نمونه جریان درون حفره، جریان دورن کانال، جریان با جابجایی طبیعی و جریان با جابجایی اجباری مورد

نداشته و بنابراین حل معادله پوآسون فشار در مقایسه با مراحل دیگر، زمان برترین مرحله از روش اف اف دی می باشد و انتخاب روش عددی مناسب برای حل این معادله، اهمیت بسزایی در کاهش زمان محاسبات دارد. در این پژوهش برای حل رابطه (۱۰) از حلگر عددی خط به خط سطری-ستونی^۱ استفاده شده است.

در غالب پژوهش های گذشته در زمینه شبیه سازی جریان سیال به روش اف اف دی، معادله جابجایی بعد از معادله نفوذ حل شده است. از آنجاکه برای حل معادله جابجایی به روش شبه-لاگرانژی نیاز است که میدان سرعت معادله پیوستگی را ارضا کند [۱۱]، در زنجیره حل معادلات مطابق با فلوجارت ارائه شده در شکل ۱-الف، مرحله تصحیح فشار بازتابی یکبار قبل از حل معادله جابجایی و یکبار نیز در انتهای زنجیره حل انجام شده است.

همانطور که ذکر شد معادله پوآسون فشار مربوط به مرحله تصحیح فشار بازتابی یک معادله سخت بوده و حل آن در مقایسه با دیگر مراحل روش اف اف دی زمان بر می باشد. در این مطالعه برای کاهش تعداد دفعات انجام مرحله تصحیح فشار بازتابی، زنجیره حل معادلات مطابق با فلوجارت ارائه شده در شکل ۱-ب اصلاح شده است. از آنجاکه در انتهای گام زمانی قبل، مرحله تصحیح فشار بازتابی انجام شده و میدان سرعت رابطه پیوستگی را ارضا می کند، با حل معادله جابجایی در ابتدای زنجیره حل نیازی به انجام مرحله تصحیح فشار قبل از حل معادله جابجایی نبوده و با کاهش تعداد دفعات حل معادله پوآسون فشار و همچنین استفاده از روش خط به خط سطری-ستونی برای حل آن، زمان محاسباتی روش اف اف دی کاهش می یابد. برای محاسبه کمیت های عددی مانند دما و یا غلظت یک ماده در میدان حل، معادله انتقال حل می شود که در رابطه (۱۱) ارائه شده است.

$$\frac{\partial}{\partial t} \bar{O} = -U_j \frac{\partial}{\partial x_j} \bar{O} + K \frac{\partial^2}{\partial x_j^2} \bar{O} + S \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)، Φ دما یا غلظت، K ضریب نفوذ دما یا ماده و S منبع تولید حرارت و یا آلودگی می باشد. با محاسبه میدان سرعت به روش اف اف دی، رابطه (۱۱) با روش های متداول عددی قابل حل می باشد. در مسائلی که کمیت حل شده توسط معادله انتقال بر روی

2 Boussinesq

3 MATLAB

1 Alternating Direction Implicit Method (ADI)

به صورت کاملاً توسعه یافته باشد.

۳-۳ مسئله جریان با جابجایی طبیعی

یکی دیگر از مسائل متداول مبحث انرژی در ساختمان، تحلیل جریان هوای جابجایی طبیعی حاصل از اثر دودکشی در ساختمان می‌باشد. مطابق شکل ۳ هندسه این مسئله شامل یک حفره با ارتفاع ۲/۱۸ متر و عرض ۰/۰۷۶۲ متر است که دمای ضلع چپ و راست آن به ترتیب برابر ۱۵/۱ و ۳۴/۷ درجه سلسیوس می‌باشد. شرایط مرزی ضلع بالا و پایین نیز به صورت عایق قرار داده شده است.

عدد رایلی حاکم بر مسئله تقریباً 0.186×10^6 می‌باشد و از رابطه (۱۴) محاسبه می‌گردد.

$$Ra = \frac{g \rho \beta W^3 \Delta T}{\mu \alpha} \quad (14)$$

در رابطه (۱۴)، $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ شتاب گرانش، kg/m^3 چگالی سیال، $\rho = 1.2198 \text{ kg/m}^3$ چگالی، $\beta = 0.0035 \text{ 1/K}$ ضریب انبساط حرارتی، $W = 0.0762 \text{ m}$ عرض حفره، $\Delta T = 19.6 \text{ K}$ اختلاف دمای دیوارهای راست و چپ، $\mu = 1.8 \times 10^{-10} \text{ Pa.s}$ لزجت دینامیکی و $\alpha = 2.3278 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ضریب نفوذ گرمایی می‌باشد.

۴-۳ مسئله جریان با جابجایی اجباری

مسئله جریان با جابجایی اجباری نیز یکی دیگر از مسائل پایه‌ای است که برای مدل‌سازی تهویه مکانیکی اتاق مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مسئله مطابق با شکل ۴ جریان از گوشه چپ و بالا به صورت افقی وارد اتاق شده و از گوشه راست و پایین اتاق خارج می‌شود. ارتفاع اتاق برابر با $H = 3 \text{ m}$ ، طول اتاق $L = 9 \text{ m}$ و همچنین ارتفاع دهانه ورودی سیال به اتاق $h_{in} = 0.056 H$ و ارتفاع دهانه خروجی $h_{out} = 0.16 H$ می‌باشد.

در این مسئله سرعت سیال ورودی $u_{in} = 0.455 \text{ m/s}$ ، چگالی سیال $\rho = 1.2210 \text{ kg/m}^3$ ، لزجت دینامیکی سیال $\mu = 1.8 \times 10^{-10} \text{ Pa.s}$ و عدد رینولدز بر اساس سرعت ورودی و

بررسی در این پژوهش معرفی شده و شرایط حاکم بر هر مسئله ارائه می‌شود. هر یک از این مسائل نماینده یکی از رژیم‌های جریان هوای متداول درون اتاق و یا ساختمان می‌باشد که اغلب در مطالعات تحلیل جریان هوا و انرژی در ساختمان مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۱-۳ مسئله جریان درون حفره

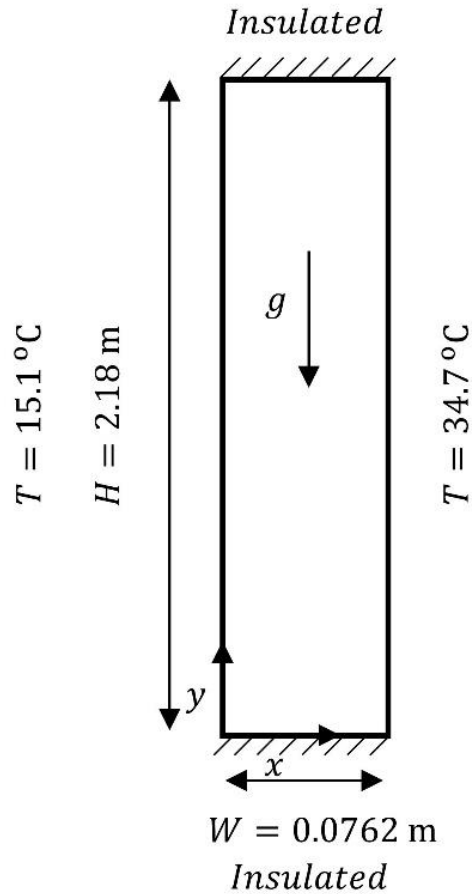
مسئله حفره یکی از مسائل متداول برای بررسی و صحت‌گذاری روش‌ها و کدهای جدید حل جریان سیال می‌باشد. این مسئله شبیه‌سازی اتاق با جریان هوای چرخشی می‌باشد. در شکل ۲ هندسه این مسئله به همراه شرایط مرزی ارائه شده است. هندسه این مسئله شامل یک مربع به ضلع ۱ متر می‌باشد که سه ضلع آن دیوار با شرایط عدم لغزش و ضلع چهارم آن درب یا سیال متحرک می‌باشد. با توجه به شرایط مسئله می‌توان با تقریب مناسبی از بعد سوم یا همان عمق اتاق صرف نظر نموده و مسئله را به صورت دو بعدی بررسی نمود. عدد رینولدز حاکم بر مسئله برابر ۱۰۰ بوده و از رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود.

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} \quad (13)$$

در رابطه (۱۳)، سرعت حرکت درب حفره $u = 1 \text{ m/s}$ ، اندازه ضلع حفره $L = 1 \text{ m}$ ، چگالی سیال فرضی $\rho = 100 \text{ kg/m}^3$ و لزجت دینامیکی سیال فرضی $\mu = 1 \text{ Pa.s}$ می‌باشد. همچنین برای بررسی بیشتر عملکرد روش افافدی این مسئله برای عدد رینولدز $Re = 1000$ ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$) نیز حل شده و نتایج آن ارائه شده است.

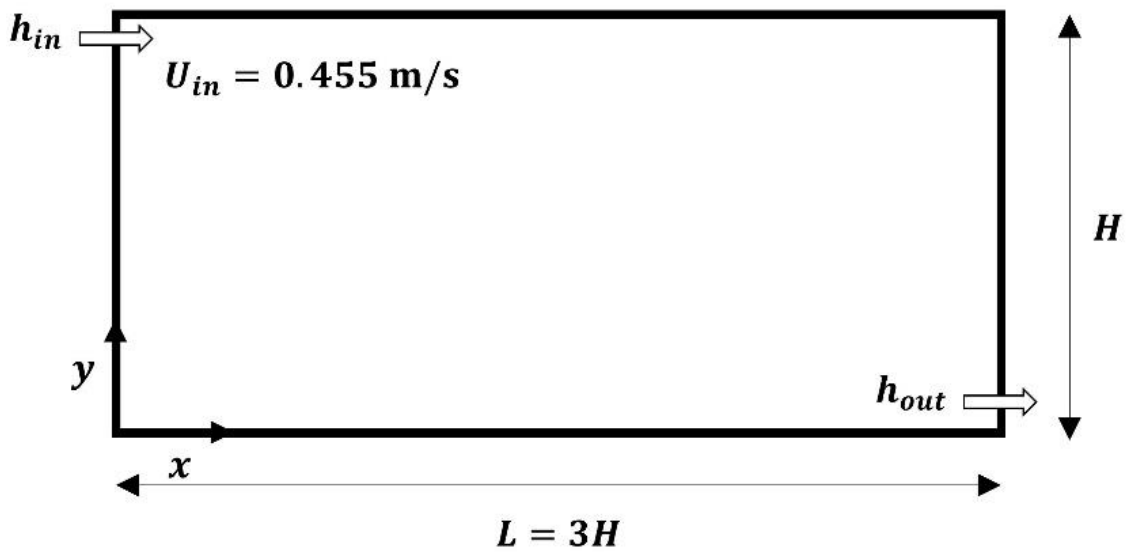
۲-۳ مسئله جریان درون کانال

مسئله جریان درون کانال مشابه مسئله جریان هوا درون راهروی ساختمان می‌باشد. در این مسئله رژیم جریان به صورت آرام و توسعه یافته با عدد رینولدز $Re = 1000$ بر اساس عرض کانال و سرعت ورودی به کانال می‌باشد. هندسه مورد استفاده در شبیه‌سازی عددی افافدی و سی‌افدی به صورت یک کانال دو بعدی با طول ۳۰ متر و عرض ۰/۵ متر می‌باشد. همچنین پروفیل سرعت ورودی به کانال به صورت یکنواخت با سرعت ۱ متر بر ثانیه می‌باشد. طول کانال به اندازه کافی طولانی در نظر گرفته شده است تا جریان در انتهای کانال



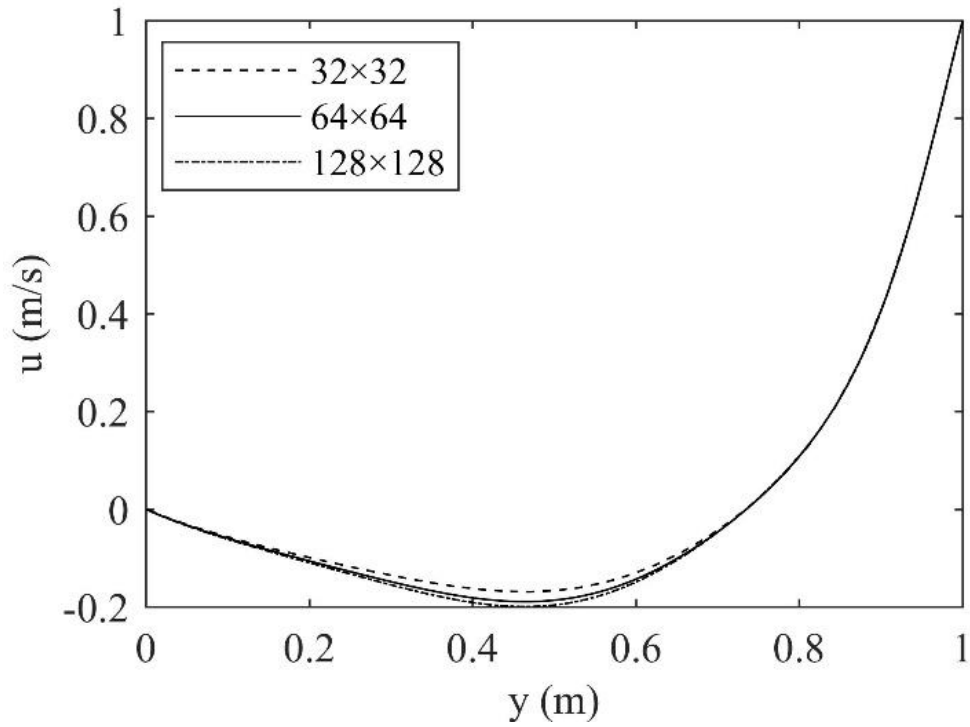
شکل ۳: هندسه مسئله جریان با جابجایی طبیعی به همراه شرایط مرزی

Fig. 3. Geometry and boundary conditions of natural flow convection problem



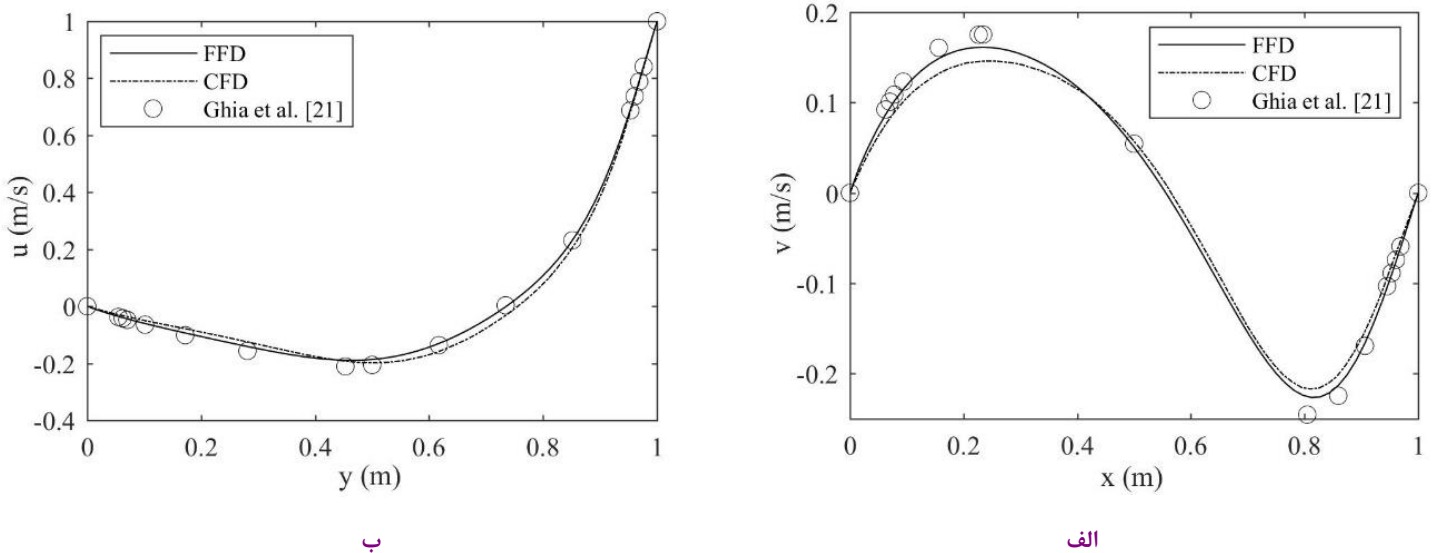
شکل ۴: هندسه مسئله جریان با جابجایی اجباری

Fig. 4. Geometry of forced flow convection problem



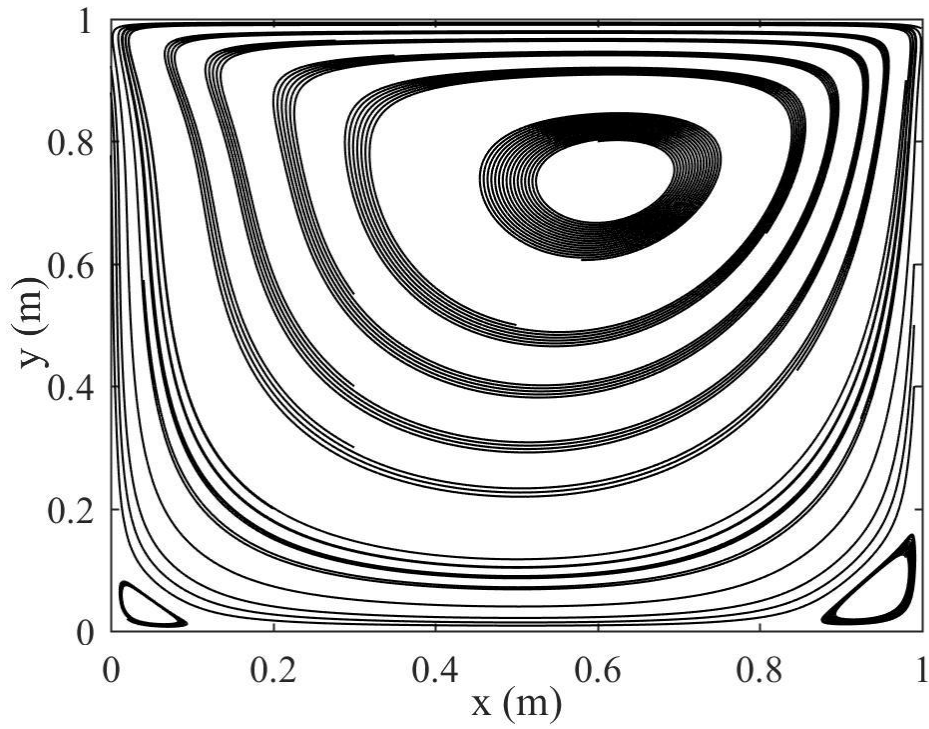
شکل ۵: نتایج بررسی استقلال از شبکه مسئله حفره با عدد رینولدز ۱۰۰

Fig. 5. Grid independency results of lid-driven cavity flow problem with $Re=100$



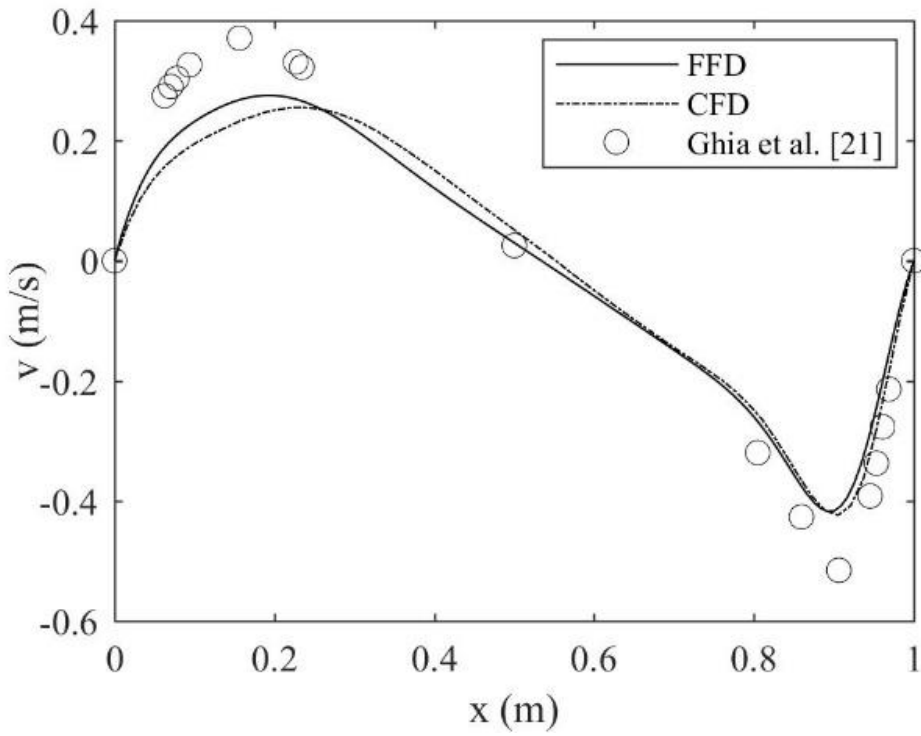
شکل ۶: نتایج شبیه‌سازی مسئله حفره با عدد رینولدز ۱۰۰ (الف) سرعت افقی (ب) سرعت عمودی

Fig. 6. Simulation results of lid-driven cavity flow problem with $Re=100$ (a) horizontal velocity (b) vertical velocity

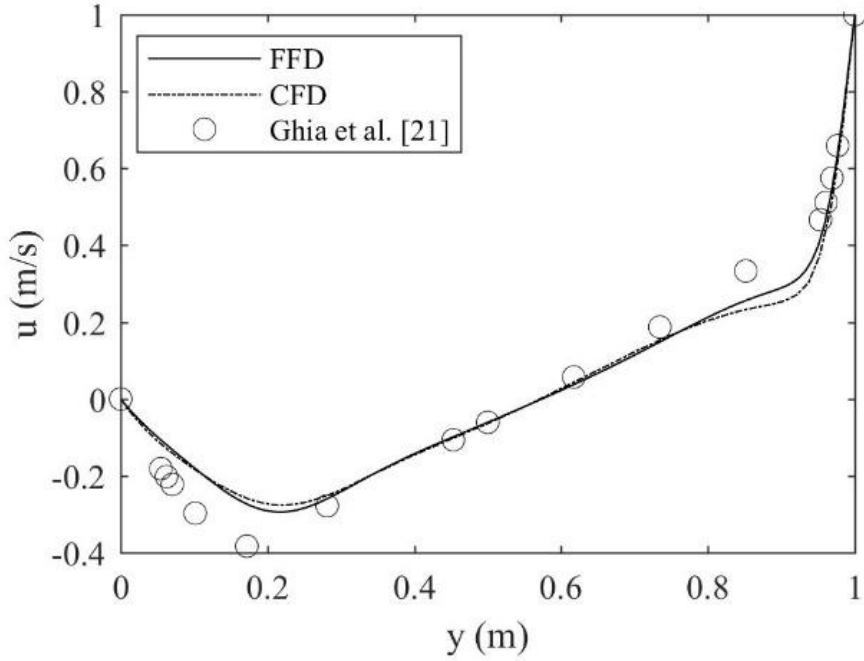


شکل ۷: نتایج خطوط جریان بدست آمده از روش افافدی برای مسئله حفره با عدد رینولدز ۱۰۰

Fig. 7. Streamlines obtained from FFD method for lid-driven cavity flow problem with $Re=100$



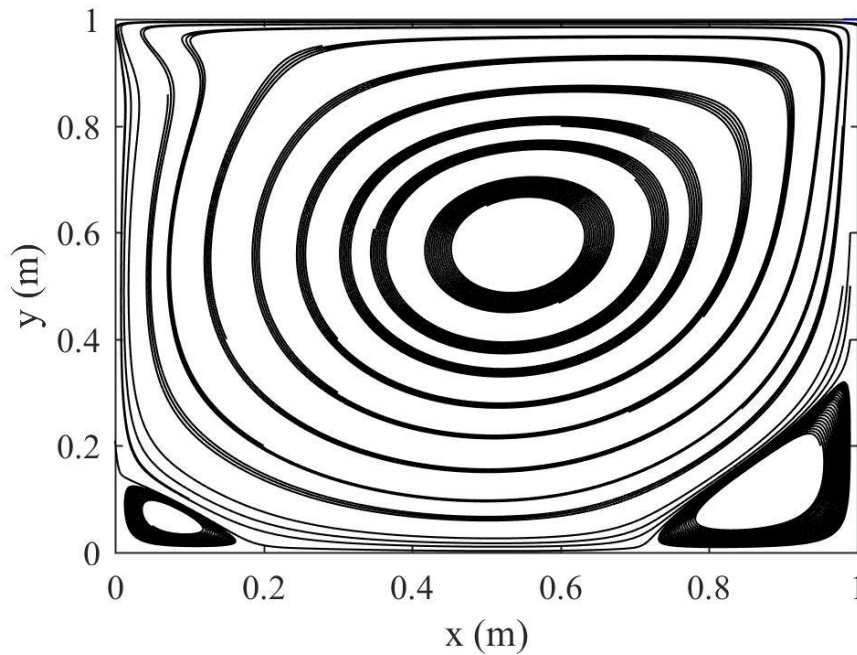
الف



ب

شکل ۸: نتایج شبیه‌سازی مسئله حفره با عدد رینولدز ۱۰۰۰ (الف) سرعت افقی (ب) سرعت عمودی

Fig. 8. Simulation results of lid-driven cavity flow problem with $Re=1000$ (a) horizontal velocity (b) vertical velocity



شکل ۹: نتایج خطوط جریان بدست آمده از روش افاددی برای مسئله حفره با عدد رینولدز ۱۰۰۰

Fig. 9. Streamlines obtained from FFD method for lid-driven cavity flow problem with $Re=1000$

روش افافدی مقایسه شده است. جهت بررسی بهتر عملکرد روش افافدی، هر یک از مسائل به صورت گذرا و با گام زمانی یکسان با حلگرهای افافدی و سی افدی شبیه سازی شده و همچنین شبکه محاسباتی مورد استفاده در هر دو حلگر نیز یکسان می باشد. برای صحت گذاری روش افافدی، نتایج بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی و یا حل تحلیلی مقایسه شده است.

۱-۴ مسئله حفره

برای بررسی استقلال نتایج از شبکه محاسباتی ابتدا مسئله حفره با عدد رینولدز ۱۰۰ با استفاده از روش افافدی برای سه شبکه محاسباتی ۳۲×۳۲، ۶۴×۶۴ و ۱۲۸×۱۲۸ حل شده و نتایج پروفیل سرعت مقایسه شده است. شکل ۵ نتایج حالت پایای پروفیل سرعت افقی را روی محور $x = 0.5$ m نشان می دهد.

ملاحظه می شود که نمودار سرعت افقی برای شبکه با تعداد نقاط محاسباتی ۶۴×۶۴ تقریباً مستقل از شبکه محاسباتی شده و با افزایش تعداد نقاط محاسباتی تفاوت چشمگیری در نتایج ملاحظه نمی شود. در این مسئله شبکه محاسباتی ۶۴×۶۴ برای بررسی بیشتر مسئله انتخاب شده است. در شکل های ۶- الف و ۶- ب به ترتیب نتایج

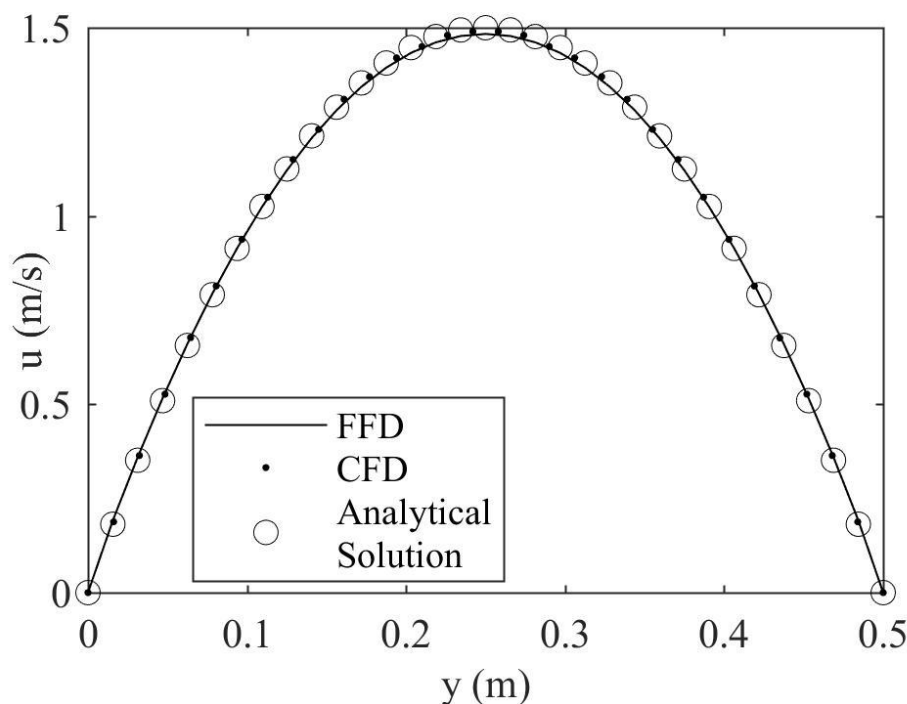
ارتفاع دهانه ورودی $Re = 5000$ می باشد. لازم به ذکر است که برای صحت گذاری نتایج شبیه سازی از نتایج آزمایشگاهی مرجع [۲۰] استفاده شده است. آزمایش مذکور به گونه ای طراحی شده است که میدان جریان به صورت دو بع تشکیل شود و در این مطالعه نیز مسئله فوق به صورت دو بعدی شبیه سازی شده است.

همانطور که ملاحظه می گردد در مسئله های اول و دوم و چهارم حرکت سیال ناشی از ممنوع سیال ورودی به دامنه می باشد در حالی که مسئله سوم حرکت سیال به سبب نیروی شناوری ایجاد شده و برای شبیه سازی جریان سیال علاوه بر معادلات ممنوع و پیوستگی نیاز به حل معادله انرژی نیز می باشد.

۲- نتایج

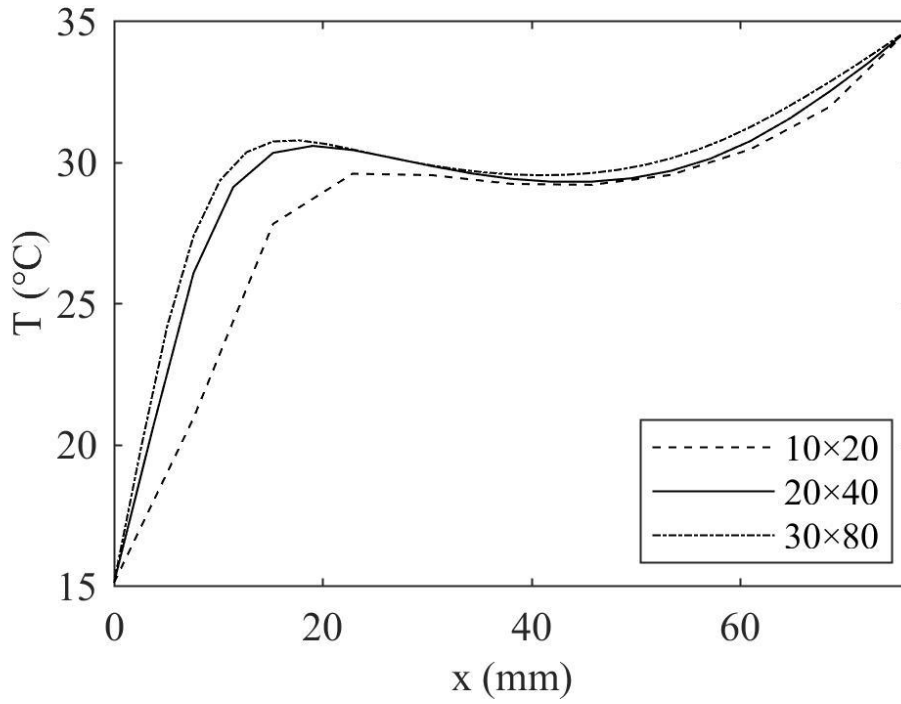
در این بخش مسائل معرفی شده در قسمت قبل بررسی شده و نتایج پروفیل سرعت و دمایی بدست آمده از روش افافدی ارائه می گردد. همچنین با استفاده از نرم افزار انسیس فلونت ۱ هر یک از مسائل با روش سی افدی نیز شبیه سازی شده و نتایج آن با نتایج

1 ANSYS FLUENT



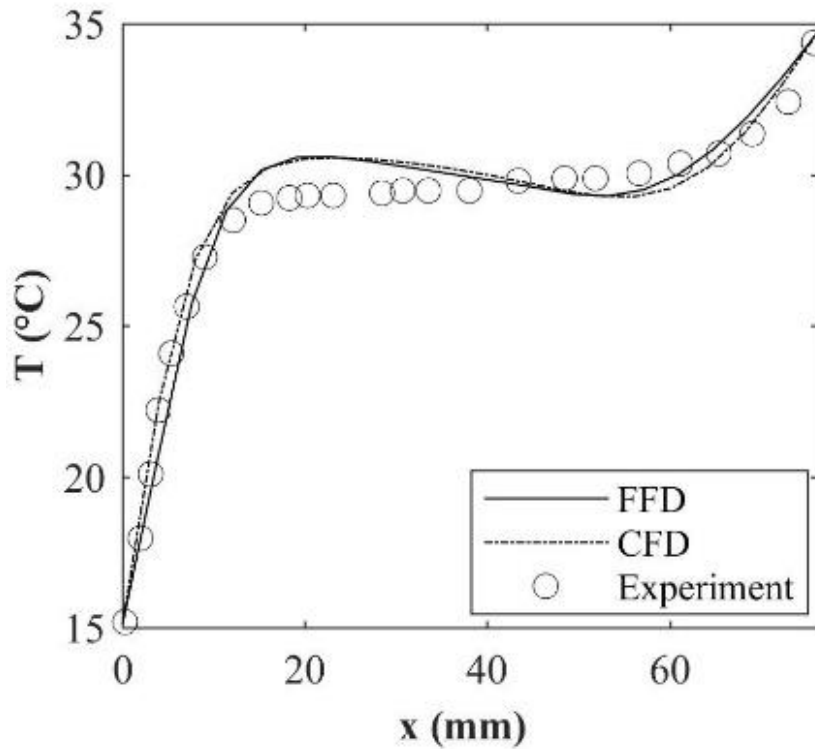
شکل ۱۰: نتایج پروفیل سرعت افقی مسئله جریان درون کانال

Fig. 10. Horizontal velocity results of channel flow problem

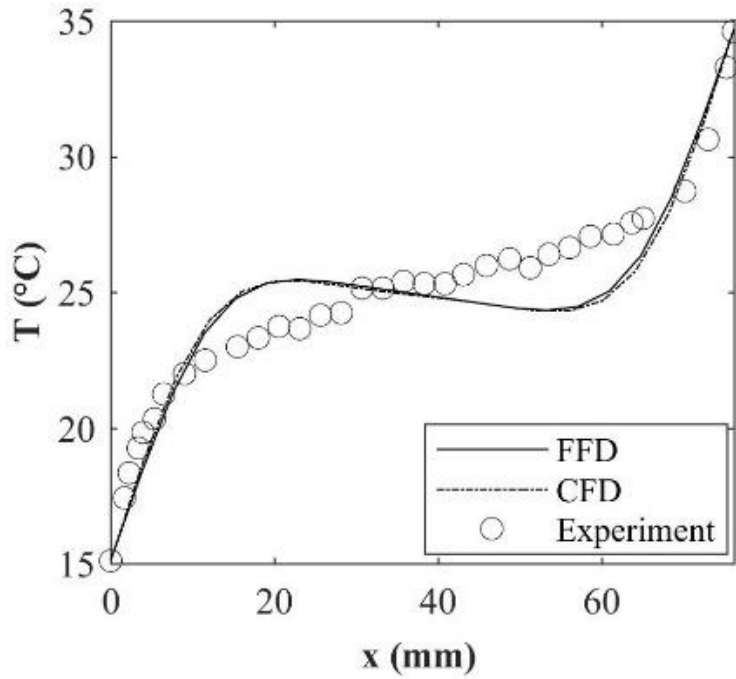


شکل ۱۱: نتایج بررسی استقلال از شبکه مسئله جریان با جابجایی طبیعی

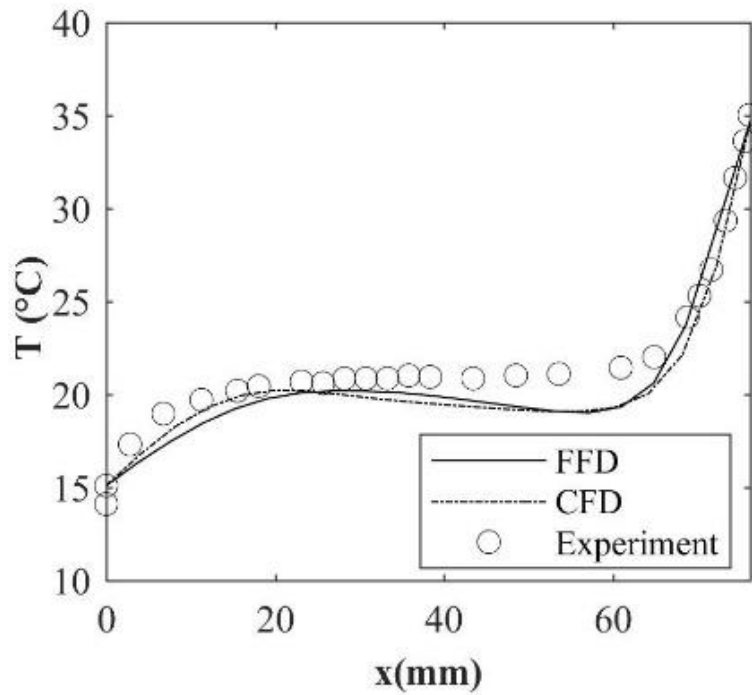
Fig. 11. Grid independency results of natural flow convection problem



الف



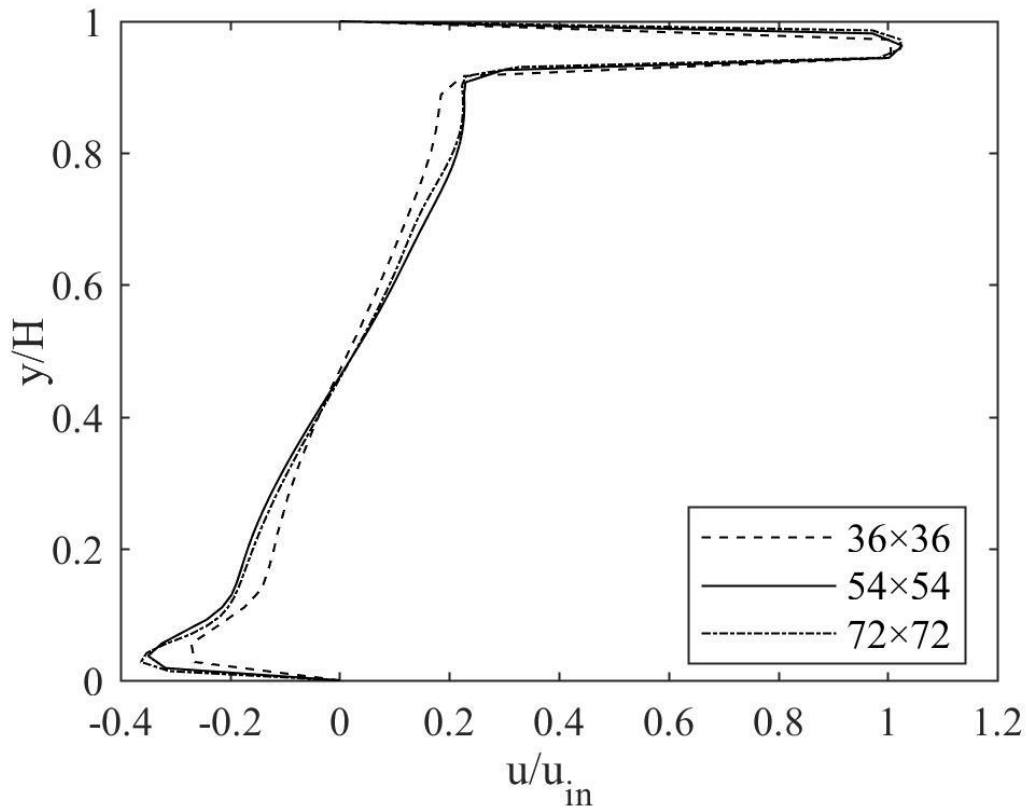
ب



ج

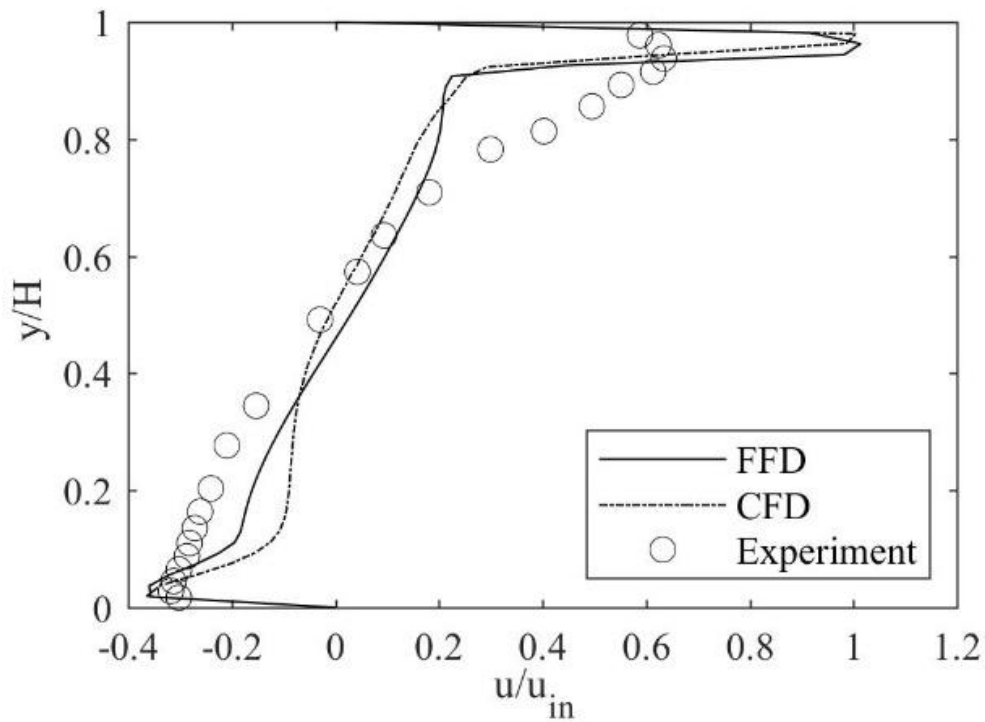
شکل ۱۲: نتایج پروفیل دمای مسئله جریان با جابجایی طبیعی الف) مقطع (ب) $y=0.218$ م (ج) $y=1.090$ م (د) $y=1.926$ م

Fig. 12. Temperature results of natural flow convection problem (a) $y=0.218$ m (b) $y=1.090$ m (c) $y=1.926$ m

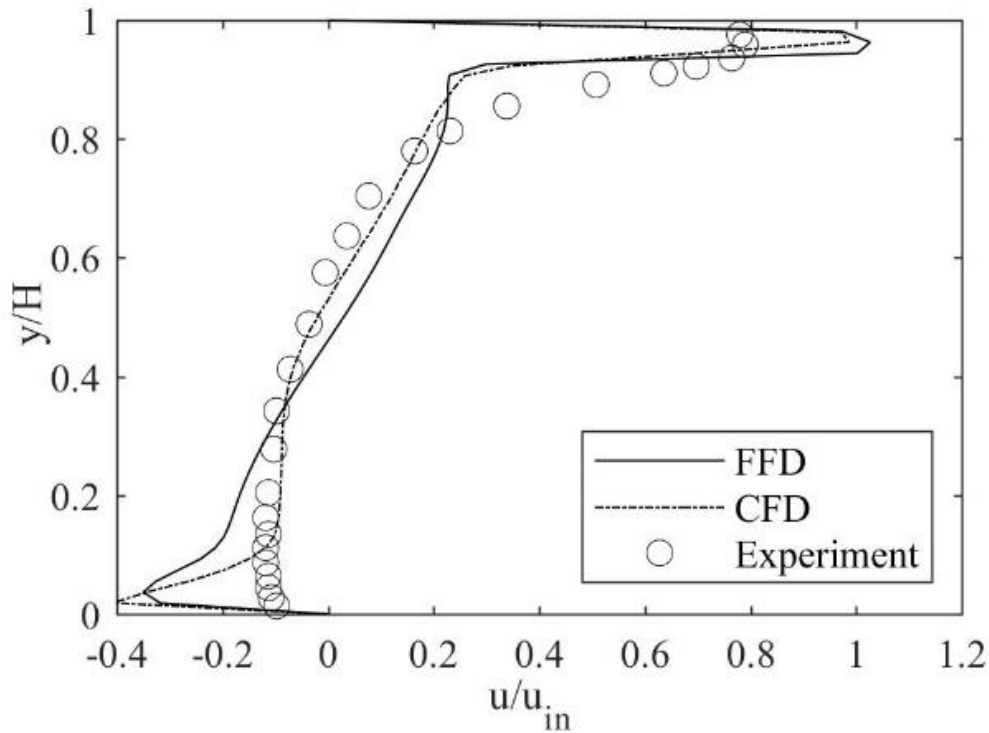


شکل ۱۳: نتایج بررسی استقلال از شبکه مسئله جریان با جابجایی اجباری

Fig. 13. Grid independency results of forced flow convection problem



الف



ب

شکل ۱۴: نتایج پروفیل سرعت افقی مسئله جریان با جابجایی اجباری الف) مقطع $x=H$ ب) مقطع $x=2H$

Fig. 14. Horizontal velocity results of forced flow convection problem (a) $x=H$ (b) $x=2H$

جدول ۱: مقایسه زمان شبیه‌سازی حلگر افاددی با زمان شبیه‌سازی حلگر سی‌افدی و زمان واقعی هر مسئله

Table 1. Comparison of computational time of FFD solver with CFD solver and the real time of each problem

زمان (ثانیه)					
مسئله حفره	مسئله حفره ($Re = 100$)	مسئله جریان درون کانال	مسئله جابجایی طبیعی	مسئله جابجایی اجباری	
۱۰	۳۰	۵۰	۸۰	۵۰۰	پدیده واقعی
۹	۲۵	۱۳	۵۱	۲۴۱	افاددی
۱۰۱	۳۸۲	۲۷	۹۱۵	۳۴۴۱	سی‌افدی

در شکل‌های ۶-الف و ۶-ب ملاحظه می‌شود که پروفیل سرعت‌های افقی و عمودی بدست آمده از روش افاددی با نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی سی‌افدی و نتایج گیا مطابقت دارد. در نتایج بدست آمده از روش افاددی بیشینه خطای نسبی سرعت‌های افقی و عمودی نسبت به نتایج گیا به ترتیب برابر با ۱۰٪ و ۸٪ می‌باشد که برای بکارگیری در مسائل تحلیل جریان و انرژی در

پروفیل سرعت افقی روی محور $x = 0.5 \text{ m}$ و پروفیل سرعت عمودی روی محور $y = 0.5 \text{ m}$ بدست آمده از روش افاددی به همراه نتایج حل سی‌افدی ارائه شده است. تعداد نقاط محاسباتی شبکه در هر دو روش افاددی و سی‌افدی یکسان بوده و گام زمانی برابر ۰/۰۲ ثانیه قرار داده شده است. در شکل ۶ برای صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی، از نتایج گیا و همکاران [۲۱] استفاده شده است.

محدوده آرام قرار دارد و بررسی رژیم‌های جریان با اعداد رینولدز بالا و رژیم‌های تماماً مغشوش از هدف مطالعه حاضر خارج است. در شکل ۹ ساختار خطوط جریان بدست آمده از روش افاددی برای مسئله حفره با عدد رینولدز ۱۰۰۰ ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که مطابق با نتایج مطالعه گیا، گردابه اصلی نسبت به نتایج عدد رینولدز ۱۰۰ به مرکز اتاق نزدیک‌تر شده است و همچنین اندازه گردابه‌های ثانویه نیز بزرگتر شده است.

۲-۴ مسئله جریان درون کانال

برای بررسی این مسئله از یک شبکه با تعداد نقاط محاسباتی 64×32 استفاده شده است. با توجه به اینکه عدد رینولدز حاکم بر مسئله ۱۰۰۰ می‌باشد جریان آرام بوده و می‌توان برای صحت‌سنجی حل عددی بدست آمده، از حل تحلیلی یا همان پروفیل سهموی جریان کاملاً توسعه‌یافته مطابق با معادله (۱۵) استفاده نمود.

$$u(y) = 1.5U_{in} \left(\frac{4y}{h} - \left(\frac{2y}{h} \right)^2 \right) \quad (15)$$

در معادله (۱۵)، y فاصله از دیوار کانال، h عرض کانال و U_{in} سرعت سیال ورودی به کانال می‌باشد. پروفیل سرعت بدست‌آمده از حل عددی و تحلیلی برای جریان کاملاً توسعه‌یافته در انتهای کانال در شکل ۱۰ ارائه شده است. برای حل عددی از گام زمانی 0.5 ثانیه استفاده شده و نتایج در زمان $t = 50s$ ارائه شده است.

همانطور که ملاحظه می‌شود هر دو حل عددی بدست‌آمده از افاددی و سی‌افدی بر پاسخ تحلیلی منطبق می‌باشد. نکته حائز اهمیت در رابطه با این مسئله وجود محل ورود و خروج سیال در میدان حل می‌باشد و انطباق کامل حل عددی بدست‌آمده از روش افاددی بر پاسخ بدست‌آمده از سی‌افدی و حل تحلیلی نشان از برقراری کامل قانون بقای جرم در میدان حل و عملکرد درست مرحله تصحیح فشارتابی می‌باشد.

۳-۴ مسئله جابجایی طبیعی

برای بررسی استقلال نتایج از شبکه محاسباتی ابتدا مسئله برای

ساختمان دقت مناسبی است. لازم به ذکر است که در صورت استفاده از شبکه با تعداد نقاط محاسباتی بیشتر حصول نتایج با دقت بالاتر نیز ممکن است که مورد نیاز هدف این مطالعه نیست. همچنین ملاحظه می‌شود که توزیع سرعت درون میدان حل کاملاً غیریکنواخت بوده و شبیه‌سازی این مسئله با روش چند ناحیه‌ای تنها با یک نقطه محاسباتی با خطای قابل ملاحظه‌ای روبرو خواهد بود.

در شکل ۷ ساختار خطوط جریان بدست‌آمده از روش افاددی برای مسئله حفره با عدد رینولدز ۱۰۰ ارائه شده است.

ملاحظه می‌شود که مطابق با نتایج مطالعه گیا، نتایج خطوط جریان علاوه بر گردابه اصلی دو گردابه ثانویه در گوشه‌های پایینی میدان حل را نیز نشان می‌دهند.

در ادامه برای بررسی بیشتر روش افاددی، نتایج شبیه‌سازی مسئله حفره با عدد رینولدز ۱۰۰۰ نیز ارائه شده است. شکل‌های ۸-الف و ۸-ب به ترتیب نتایج پروفیل سرعت افقی روی محور $x = 0.5 \text{ m}$ و پروفیل سرعت عمودی روی محور $y = 0.5 \text{ m}$ بدست‌آمده از روش افاددی به همراه نتایج حل سی‌افدی را ارائه می‌دهد. تعداد نقاط محاسباتی شبکه در هر دو روش افاددی و سی‌افدی برابر 120×120 بوده و گام زمانی برابر 0.2 ثانیه قرار داده شده است. همچنین برای صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی، از نتایج گیا استفاده شده است.

ملاحظه می‌شود که در شرایط یکسان، نتایج بدست‌آمده از روش‌های افاددی و سی‌افدی بر هم منطبق است. در نتایج ارائه‌شده، بیشینه خطای نسبی پروفیل سرعت‌های افقی و عمودی بدست‌آمده از روش افاددی نسبت به نتایج گیا به ترتیب 2.3% و 2.6% می‌باشد. ملاحظه می‌شود که با افزایش عدد رینولدز و مغشوش‌تر شدن رژیم جریان بیشینه خطای نسبی نیز افزایش یافته است اما همچنان محل‌های بیشینه و کمینه پروفیل سرعت‌های افقی و عمودی درست شناسایی شده است و نتایج مدل افاددی به درستی شکل کلی نتایج گیا را شبیه‌سازی کرده است در حالی که در صورت همگن‌فرض‌نمودن توزیع سرعت درون میدان حل و استفاده از مدل‌های ناحیه‌ای، محاسبات با خطای قابل ملاحظه‌ای روبرو خواهد بود. لازم به ذکر است که در غالب مسائل تحلیل جریان و انرژی در ساختمان، رژیم جریان هوا در محدوده آرام و یا نزدیک به

الف، ۱۴- ب برای صحت‌سنجی نتایج، از داده‌های آزمایشگاهی [۲۰] استفاده شده است.

در شکل‌های ۱۴- الف، ۱۴- ب ملاحظه می‌شود که نتایج پروفیل سرعت بدست‌آمده از روش افافدی و سی‌افدی تقریباً دارای دقت یکسانی هستند و همچنین برای بکارگیری در مسائل تحلیل جریان و انرژی در ساختمان دارای انطباق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی هستند. در این مسئله نیز ملاحظه می‌شود که توزیع سرعت در فضای اتاق کاملاً ناهمگن بوده و در صورت استفاده از مدل‌های چندناحیه‌ای و همگن در نظر گرفتن خصوصیات سیال در تمام اتاق، نتایج با خطای زیادی روبرو خواهد بود.

۴-۵ مقایسه زمان محاسبات

با بررسی چهار مسئله فوق ملاحظه شد که حلگر افافدی با دقت مناسبی با نتایج سی‌افدی و داده‌های آزمایشگاهی و حل تحلیلی مطابقت دارد. اکنون لازم است برای بررسی جامع‌تر عملکرد افافدی، زمان محاسبات آن با زمان محاسبات حلگر سی‌افدی مقایسه شود. در جدول ۱ زمان محاسبات شبیه‌سازی مسائل فوق با استفاده از حلگرهای افافدی و سی‌افدی ارائه شده است. مشخصات سیستم مورد استفاده برای شبیه‌سازی به روش‌های افافدی و سی‌افدی در این پژوهش به صورت ۸ گیگابایت حافظه تصادفی^۱ و سرعت پردازش ۲/۲ گیگا هرتز می‌باشد.

با توجه به نتایج ارائه‌شده در جدول ۱، زمان شبیه‌سازی به روش افافدی نسبت به روش سی‌افدی در مسائل جریان درون کانال، حفره با عدد رینولدز ۱۰۰، حفره با عدد رینولدز ۱۰۰۰، جابجایی اجباری و جابجایی طبیعی به ترتیب ۵۲، ۹۱، ۹۳، ۹۳، ۹۴ درصد کاهش یافته است. در مسئله جریان درون کانال، حرکت سیال یک بعدی و در راستای محور اصلی کانال می‌باشد اما در مسئله حفره حرکت سیال دو بعدی بوده و شبیه‌ساز حرکت چرخشی هوا درون اتاق می‌باشد. جریان هوا در مسئله جابجایی اجباری نیز دو بعدی بوده و همانند تهویه مکانیکی اتاق دارای دریچه ورودی و خروجی سیال می‌باشد. در مسئله جابجایی طبیعی نیز حرکت سیال دوبعدی می‌باشد با این تفاوت که علاوه بر معادلات بقای جرم و ممنتوم، معادله بقای انرژی نیز حل می‌گردد. ملاحظه می‌شود که هر قدر بر پیچیدگی

سه شبکه با تعداد نقاط محاسباتی 10×20 ، 20×40 و 30×80 حل شده است و مطابق با شکل ۱۱ پروفیل دما روی محور $m = 1/926$ برای سه شبکه محاسباتی با یکدیگر مقایسه شده است. محور $y = 1/926 m$ به دلیل اینکه در نزدیکی مرز بالایی و در لایه مرزی قرار دارد حساسیت بالاتری نسبت به تغییرات شبکه محاسباتی داشته و انتخاب مناسب‌تری برای بررسی استقلال نتایج از شبکه است.

همانطور که در شکل ۱۱ ملاحظه می‌شود پروفیل دما برای استفاده در مسائل انرژی در ساختمان با تعداد نقاط محاسباتی 20×40 مستقل از شبکه محاسباتی می‌شود.

در شکل‌های ۱۲- الف، ۱۲- ب و ۱۲- ج پروفیل‌های دما به ترتیب برای سه مقطع $y = 0/218 m$ ، $y = 1/090 m$ و $y = 1/926 m$ حاصل از حل عددی افافدی و سی‌افدی با شبکه محاسباتی 20×40 و گام زمانی $0/05$ ثانیه ارائه شده است. همچنین برای صحت‌سنجی نتایج، از داده‌های آزمایشگاهی [۲۲] استفاده شده است. ملاحظه می‌گردد که نتایج پروفیل دمای بدست‌آمده از افافدی کاملاً بر نتایج سی‌افدی منطبق بوده و همچنین نتایج عددی با دقت مناسبی در مسائل انرژی در ساختمان با نتایج آزمایشگاهی مطابقت دارد.

۴-۴ مسئله جابجایی اجباری

برای بررسی استقلال نتایج از شبکه محاسباتی ابتدا مسئله برای سه شبکه با تعداد نقاط محاسباتی 36×36 ، 54×54 و 72×72 حل شده است و مطابق با شکل ۱۳ پروفیل بی بعد سرعت افقی با توجه به شکل ۴ در مقطع $x = H$ برای سه شبکه محاسباتی با یکدیگر مقایسه شده است.

همانطور که در شکل ۱۳ ملاحظه می‌شود پروفیل سرعت با تعداد نقاط محاسباتی 54×54 مستقل از شبکه محاسباتی می‌شود.

در شکل‌های ۱۴- الف، ۱۴- ب نتایج پروفیل بی‌بعد شده سرعت افقی روی محورهای $x = H$ و $x = 2H$ بدست‌آمده از روش افافدی به همراه نتایج حل سی‌افدی ارائه شده است. تعداد نقاط محاسباتی شبکه در هر دو روش افافدی و سی‌افدی یکسان بوده و گام زمانی برابر $0/05$ ثانیه قرار داده شده است. در شکل‌های ۱۴-

شبیه‌سازی مسائل مذکور را به صورت سریعتر از زمان واقعی بر روی یک سیستم کامپیوتری معمولی میسر ساخت. نتایج این پژوهش نشان داد که روش افافدی در مسائل پیچیده‌تر، موثرتر بوده و زمان محاسبات نسبت به روش سی‌افدی بیشتر کاهش می‌یابد. سه ویژگی مهم روش افافدی یعنی سرعت محاسبه بالا در مقایسه با روش سی‌افدی، دقت بالا در مقایسه با روش چند ناحیه‌ای و الگوریتم بدون قید و شرط پایدار حل سبب پتانسیل بالای این روش برای بکارگیری گسترده در شبیه‌سازی سیال در مسائل انرژی در ساختمان از جمله طراحی بهینه طرح مفهومی هندسه اتاق و ساختمان، طراحی بهینه سیستم تهویه و ارزیابی عملکرد آن و همچنین مدیریت بهتر شرایط اضطراری مانند آتش‌سوزی و پیش‌بینی حرکت دود به منظور کاهش تلفات می‌گردد که این مهم نیازمند توسعه بیشتر روش افافدی می‌باشد.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

f_i	مولفه i از نیروهای حجمی، N/kg
g	شتاب گرانش، m/s^2
h	عرض کانال، m
K	ضریب نفوذ متغیر عددی در معادله کلی انتقال
L	اندازه ضلع حفره با درب متحرک، m
P	فشار، Pa
Ra	عدد رایلی
Re	عدد رینولدز
S	منبع تولید متغیر عددی در معادله کلی انتقال
t	زمان، s
T	دما، K
T_0	دمای مینا، K
u	سرعت افقی، m/s
U_i	مولفه سرعت در جهت i ، m/s
U_{in}	سرعت سیال ورودی به کانال، m/s
W	عرض حفره با جریان جابجایی طبیعی، m

مسئله افزوده می‌شود عملکرد حلگر افافدی بهتر مشخص شده و کاهش زمان محاسبات نسبت به روش سی‌افدی افزایش می‌یابد. همچنین در هر چهار مسئله مورد بررسی زمان محاسبات حلگر افافدی نه تنها از حلگر سی‌افدی به صورت قابل ملاحظه‌ای کوتاه‌تر می‌باشد بلکه از زمان واقعی پدیده شبیه‌سازی شده نیز سریع‌تر است. به عبارت دیگر با استفاده از حلگر افافدی ارائه‌شده در این پژوهش، شبیه‌سازی مسائل مذکور به صورت سریعتر از زمان واقعی و با دقتی مناسب میسر شده است.

بنابراین روش افافدی به عنوان روش بدون قید و شرط پایدار و با قابلیت ارائه مشخصات سیال در نقاط مختلف میدان حل به صورت بسیار جزئی‌تر از روش‌های چند ناحیه‌ای و در زمان به مراتب کوتاه‌تر از روش سی‌افدی، می‌تواند روشی مناسب برای استفاده گسترده در مسائل تحلیل و بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان باشد. از دیگر ویژگی‌های مهم حلگر افافدی قابلیت پردازش موازی آن روی واحد پردازش گرافیکی می‌باشد که شبیه‌سازی مسائل پیچیده‌تر را با زمان بسیار کمتر از سی‌افدی و به صورت زمان واقعی و یا سریعتر از زمان واقعی امکان‌پذیر می‌سازد.

۳- نتیجه‌گیری

در این پژوهش روش دینامیک سیالات سریع به عنوان روشی بدون قید و شرط پایدار برای شبیه‌سازی جریان هوا و انرژی در ساختمان ارائه شد. برای بررسی کارایی این روش چهار مسئله نمونه جریان درون حفره، جریان درون کانال، جریان با جابجایی طبیعی و جریان با جابجایی اجباری مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آن به همراه نتایج سی‌افدی با نتایج آزمایشگاهی و یا تحلیلی مقایسه و صحت‌گذاری شد. در مطالعه حاضر مشخص شد که زمان‌برترین مرحله حل به روش افافدی مربوط به حل معادله پوآسون فشار می‌باشد که سرعت همگرایی آن نسبت به معادلات دیگر افافدی به مراتب پایین‌تر است. برای افزایش سرعت حل معادله پوآسون، از روش حل دستگاه معادلات خط به خط سطری-ستونی استفاده شد. همچنین با اصلاح زنجیره حل معادلات، تعداد دفعات حل معادله پوآسون کاهش یافته و این امر به همراه بکارگیری روش حل دستگاه معادلات خط به خط سطری-ستونی، نه تنها سبب کاهش ۵۲ تا ۹۴ درصدی زمان شبیه‌سازی مسائل نمونه نسبت به روش سی‌افدی گردید بلکه

Simulation of cloud dynamics on graphics hardware, in: Proceedings of the ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS conference on Graphics hardware, Eurographics Association, 2003, pp. 92-101.

- [9] R. Fedkiw, J. Stam, H.W. Jensen, Visual simulation of smoke, in: Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, ACM, 2001, pp. 15-22.
- [10] W. Zuo, Q. Chen, Real-time or faster-than-real-time simulation of airflow in buildings, *Indoor air*, 19(1) (2009) 33.
- [11] W. Zuo, J. Hu, Q. Chen, Improvements in FFD modeling by using different numerical schemes, *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, 58(1) (2010) 1-16.
- [12] W. Zuo, Q. Chen, Fast and informative flow simulations in a building by using fast fluid dynamics model on graphics processing unit, *Building and environment*, 45(3) (2010) 747-757.
- [13] M. Jin, W. Zuo, Q. Chen, Simulating natural ventilation in and around buildings by fast fluid dynamics, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 64(4) (2013) 273-289.
- [14] M. Jin, W. Liu, Q. Chen, Simulating buoyancy-driven airflow in buildings by coarse-grid fast fluid dynamics, *Building and Environment*, 85 (2015) 144-152.
- [15] W. Liu, M. Jin, C. Chen, R. You, Q. Chen, Implementation of a fast fluid dynamics model in OpenFOAM for simulating indoor airflow, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 69(7) (2016) 748-762.
- [16] W. Liu, Q. Chen, Development of adaptive coarse grid generation methods for fast fluid dynamics in simulating indoor airflow, *Journal of Building Performance Simulation*, 11(4) (2018) 470-484.
- [17] R. Courant, E. Isaacson, M. Rees, On the solution of nonlinear hyperbolic differential equations by finite differences, *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 5(3) (1952) 243-255.
- [18] M. Jin, Q. Chen, Improvement of fast fluid dynamics with a conservative semi-Lagrangian scheme, *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 25(1) (2015) 2-18.
- [19] A.J. Chorin, A numerical method for solving incompressible viscous flow problems, *Journal of computational physics*, 2(1) (1967) 12-26.
- [20] A.d.O. Restivo, *Turbulent flow in ventilated rooms*, University of London (Imperial College of Science and Technology), 1979.
- [21] U. Ghia, K.N. Ghia, C. Shin, High-Re solutions for incompressible flow using the Navier-Stokes equations and a multigrid method, *Journal of computational physics*,

مکان در راستای محور افقی، m x

مولفه مکان در جهت i ، m x_i

مکان در راستای محور عمودی، m y

علائم یونانی

ضریب نفوذ حرارتی، m^2/s α

ضریب انبساط حجمی، $1/K$ β

لزجت دینامیکی، Pa.s μ

چگالی، kg/m^3 ρ

اختلاف دمایی، K ΔT

گام زمانی، s Δt

لزجت سینماتیک، m^2/s ν

متغیر عددی معادله کلی انتقال Φ

منابع

- V. Harish, A. Kumar, A review on modeling and simulation [1] of building energy systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56 (2016) 1272-1292.
- [2] J. Axley, Multizone Airflow Modeling in Buildings: History and Theory, *HVAC&R Research*, 13(6) (2007) 907-928.
- [3] A.C. Megri, F. Haghghat, Zonal Modeling for Simulating Indoor Environment of Buildings: Review, Recent Developments, and Applications, *HVAC&R Research*, 13(6) (2007) 887-905.
- [4] W. Tian, X. Han, W. Zuo, M.D. Sohn, Building energy simulation coupled with CFD for indoor environment: A critical review and recent applications, *Energy and Buildings*, 165 (2018) 184-199.
- [5] X. Zhao, Q. Chen, Inverse design of indoor environment using an adjoint RNG k-epsilon turbulence model, *Indoor air*, 29(2) (2019) 320-330.
- [6] J. Stam, Stable fluids, in: Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1999, pp. 121-128.
- [7] G.D. Yngve, J.F. O'Brien, J.K. Hodgins, Animating explosions, in: Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 2000, pp. 29-36.
- [8] M.J. Harris, W.V. Baxter, T. Scheuermann, A. Lastra,

convection in an enclosed tall cavity, International Journal of Heat and Fluid Flow, 21(6) (2000) 675-683.

48(3) (1982) 387-411.
[22]P. Betts, I. Bokhari, Experiments on turbulent natural

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Seyedi, H. Pasdarsahri. Accurate and faster than real-time simulation of indoor airflow by using fast fluid dynamics. Numerical simulation of droplet formation in a T-shape microchannel using two-phase level-set method. Amirkabir J. Mech Eng., 53(special issue 3) (2021). 1839-1860.

DOI: [10.22060/mej.2020.17222.6538](https://doi.org/10.22060/mej.2020.17222.6538)



