



Developing a Coupled Free-Surface Flow Solver using Interface Tracking Algorithm in foam-extend

Behnam Cheraghi ^{ID}, Shidvash Vakili-pour ^{ID}

College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran

ABSTRACT: In the present study, the implementation of a coupled implicit solver is presented for solving the free-surface flows. The implementation of the coupled pressure and velocity along with the default interface tracking algorithm has led to the creation of a solver equivalent to the basic foam-extend solver, which is called interTrackFoam. All of the features of the foam-extend platform can still be used i.e. mesh motion and parallel processing. Also, the libraries related to the block matrices available in foam-extend are used in the developed solver. The block matrix system is utilized as the basis of the coupled solver. The single-step solution of pressure and velocity is known as one of the main differences with the default solver. The ability of the developed solver to solve various test cases including a three-dimensional tank, solving the free-surface flow around an airfoil, and the flow passing over the ramp is demonstrated. The simultaneous solution capability has provided the possibility of reducing the number of iterations or considering a relatively higher time step related to solving the flow field. This aforementioned solver is the first step towards the velocity, pressure, temperature, and species-coupled solver with heat and mass transfer capability.

Review History:

Received: Jun. 24, 2023

Revised: Jun. 13, 2024

Accepted: Jun. 16, 2024

Available Online: Jun. 29, 2024

Keywords:

Coupled Solver

Free-Surface Flow

Interface Tracking Algorithm

Foam-Extend

OpenFOAM

1- Introduction

One of the fundamental methods for studying two-phase flows involves analyzing fluid flow with a free surface. In free-surface flows, one fluid is fully simulated, and the influence of the second fluid is modeled using specific boundary conditions at the interface. The interTrackFoam solver is well-known for its capabilities in solving various free-surface and two-phase problems. It operates using the PIMPLE flow solution algorithm and the surface displacement algorithm by Muzzafarija and Peric [1]. In problems where temperature and species equations are activated and mass and heat transfer occur at the free surface, the boundary conditions of the free surface and within the field can be highly interdependent. For instance, in the studies of Cheraghi and Vakili-pour [3] and Havestini and Ormiston [3], the convergence rate of the problem is significantly reduced with segregated algorithms, which is why they have moved towards coupled algorithms [4]. The existence of two default solvers, i.e. interTrackFoam and pUCoupledFoam, has provided the possibility of developing a partially coupled solver that operates with the interface-tracking displacement algorithm. The interTrackFoam solver has a very high speed in solving free-surface flows. The only challenge to the performance of this solver arises when different phenomena with high physical coupling are involved in the problem.

Specifically, in the present study, a solver equivalent to the default solver, interTrackFoam, but with a coupled flow algorithm, has been developed and evaluated. The coupled algorithm involves solving velocity and pressure simultaneously and implicitly within a single system and matrix system, which is implemented using another default solver pUCoupled within the foam-extend. Initial efforts for the simultaneous pressure and velocity solution algorithm were initiated by Patankar [5], and further advanced by works from Schneider and Karimian [6], Darwish et al. [7], Vakili-pour and Ormiston [8]. To verify the performance of this solver, various two-dimensional and three-dimensional test cases are considered. These include flow over a ramp, flow around an airfoil underneath the free surface, and finally, flow within a three-dimensional tank. Comparisons between the results of both the default and developed solvers, as well as with results from other studies, show very good agreement and validate the performance of this solver. Furthermore, the coupled algorithm enhances the convergence rate and reduces the number of solution iterations, although in flow solution problems, the default segregated solver, i.e. interTrackFoam, demonstrates relatively higher computational speed.

2- Test Cases

Three test cases are examined to evaluate the performance

*Corresponding author's email: vakili-pour@ut.ac.ir



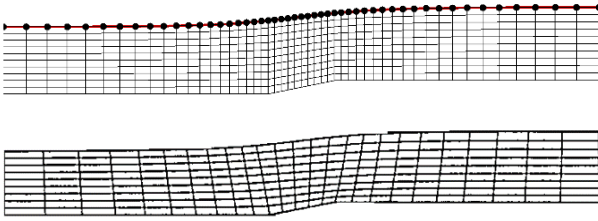


Fig. 1. Comparison of the final position of the free-surface, up) Default solver (black dots) and developed solver (red line), deown) Muzaferija and Peric [1]

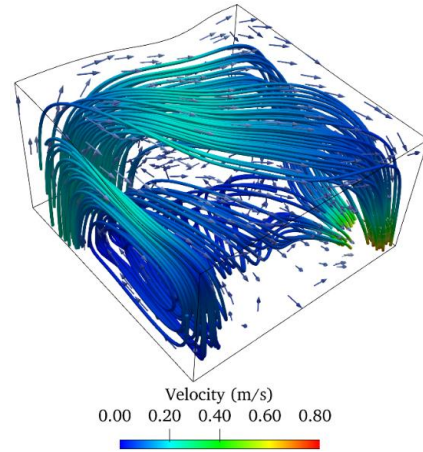


Fig. 3. Flow structure and velocity contour for the three-dimensional tank

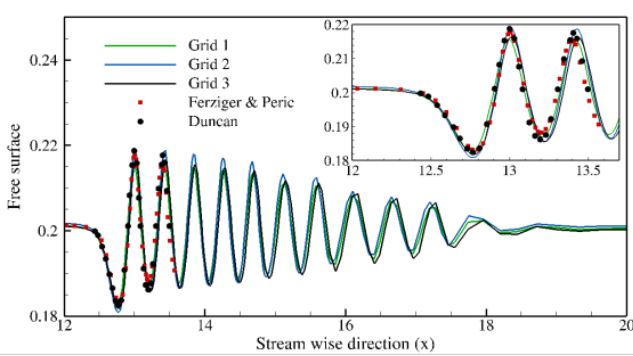


Fig. 2. Comparison of results for three grids with different resolutions and also comparison of free-surface waves with numerical and experimental results of [9]

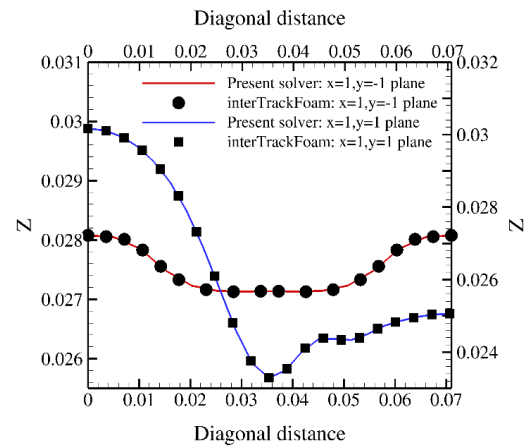


Fig. 4. Comparison of the free-surface position in two inclined planes for a three-dimensional tank

of the solver. The first example is flow over a ramp. The final free-surface shape is shown in Figure 1.

The second case is the hydrofoil problem [9]. The free-surface shape in comparison with the literature are shown in Figure 2.

The third case is a three-dimensional flow in a cubical tank. In these test cases, accuracy, velocity and pressure distribution, convergence behavior, and surface motion are investigated. The flow structure and velocity contours are presented in Figure 3.

Also, the final shape of the free surface for the three-dimensional tank is shown in Figure 4.

3- Conclusion and Results

In the present study, the development, implementation, and comparison of results of a velocity-pressure coupled solver operating with the interface-tracking algorithm [1,10] are presented. This solver has been evaluated on various problems, yielding the following results:

- It can be asserted that the pressure equation limits the convergence rate of a single loop. In comparison to the default solver, the coupled solver shows approximately 10, 4, and 6 times fewer pressure solution iterations for the ramp, hydrofoil, and 3D tank cases, respectively.

- The overall flow solution speed for the coupled solver relative to the default solver is 0.67, 2.2, and 1.24 times for the aforementioned cases. In other words, despite a higher number of pressure equation iterations, the interTrackFoam solver exhibits a more desirable computational speed.

- All object-oriented programming capabilities, including classes related to parallel programming, working with mesh displacement libraries, using functions of the free Surface class, and working with functions of coupled solver classes, are preserved in this solver.

- For solving flows, the interTrackFoam solver is

recommended as the preferred solver because it allows separate control over the number of iterations for each of the velocity or pressure equations, enabling optimization of the number of iterations while increasing computational speed. However, in the presence of strong coupling and physical complexity, this trend might reverse, or convergence challenges for this solver may arise.

References

- [1] S. Muzaferija, M. Perić, Computation of free-surface flows using the finite-volume method and moving grids, *Numerical Heat Transfer*, 32(4) (1997) 369-384.
- [2] B. Cheraghi, S. Vakilipour, Developing an Interface Tracking Coupled Solver for Solving two Phase Flow Fields at Low Reynolds Numbers in foam-extend Platform, *Sharif Journal of Mechanical Engineering*, (2024), pp.-. (in Persian).
- [3] R.A. Haverstini, S.J. Ormiston, An elliptic numerical analysis of water vapour absorption into a falling film in vertical parallel plate channels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 150 (2020) 119266.
- [4] S. Vakilipour, M. Mohammadi, S. Ormiston, A fully coupled ALE interface tracking method for a pressure-based finite volume solver, *Journal of Computational Physics*, 427 (2021) 110054.
- [5] S. Patankar, *Numerical heat transfer and fluid flow*, Taylor & Francis, 2018.
- [6] S. Karimian, G. Schneider, Pressure-based computational method for compressible and incompressible flows, *Journal of thermophysics and heat transfer*, 8(2) (1994) 267-274.
- [7] M. Darwish, I. Sraj, F. Moukalled, A coupled incompressible flow solver on structured grids, *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, 52(4) (2007) 353-371.
- [8] S. Vakilipour, S. Ormiston, A coupled pressure-based co-located finite-volume solution method for natural-convection flows, *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, 61(2) (2012) 91-115.
- [9] J.H. Ferziger, M. Perić, *Computational methods for fluid dynamics*, in, Springer, 2002.
- [10] Ž. Tuković, H. Jasak, A moving mesh finite volume interface tracking method for surface tension dominated interfacial fluid flow, *Computers & fluids*, 55 (2012) 70-84.



توسعه یک حلگر هم‌گیر جریان جهت حل جریان سطح آزاد با الگوریتم تعقیب سطح فاصل در بستر فوم‌اکستند

بهنام چراغی^{ID}، شیدوش و کیلی پور^{ID*}

دانشکده‌گان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۰۳
بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۲۴
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۷
ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۰۴/۰۹

کلمات کلیدی:

حلگر هم‌گیر
جریان سطح آزاد
الگوریتم تعقیب سطح فاصل
فوم‌اکستند
این-فوم

خلاصه: در مقاله حاضر، پیاده‌سازی یک حلگر هم‌گیر همزمان و ضمنی فشار و سرعت جهت حل جریان‌های سطح آزاد در بستر فوم‌اکستند ارائه شده است. پیاده‌سازی حلگر هم‌گیر فشار و سرعت در کنار الگوریتم تعقیب سطح پیش‌فرض موجود در فوم‌اکستند، منجر به ایجاد حلگری معادل با حلگر پیش‌فرض در فوم‌اکستند با نام اینترترک فوم، شده است. الگوریتم حاضر تماماً به کمک ساختارها، کلاس‌ها و توابع موجود در بستر فوم‌اکستند اعمال شده و تمامی قابلیت‌های این بستر کماکان قابل استفاده می‌باشد. همچنین در این حلگر از کتابخانه‌های مربوط به ماتریس‌های بلوکی موجود به همراه قابلیت حل موازی استفاده شده است. سیستم دستگاه ماتریسی بلوکی، به عنوان پایه‌ی حلگر هم‌گیر مورد استفاده قرار گرفته است. کاهش تعداد حلقه‌های داخلی و همین‌طور حل یک مرحله‌ای فشار و سرعت به عنوان یکی از اصلی‌ترین تفاوت‌های ذاتی با حلگر پیش‌فرض است. با ساختار استفاده‌شده برای حلگر هم‌گیر، امکان هم‌گیر کردن دیگر متغیرها در کنار سرعت و فشار نیز ایجاد شده است. در واقع، این حلگر اولین گام به سوی حلگر هم‌گیر سرعت، فشار، دما و اجزا با قابلیت انتقال حرارت و جرم است. توانایی حلگر توسعه داده‌شده در حل نمونه‌های آزمایش مختلفی شامل مخزن سه‌بعدی، حل جریان سطح آزاد حول ایرفویل، جریان در عبور از سطح شیب‌دار، نشان داده شده است. با توجه به قابلیت حل همزمان فشار و سرعت در حلگر حاضر، انتظار است که کاربرد این حلگر در فیزیک و هندسه‌های پیچیده با درجه هم‌گیری بالا، چشمگیر باشد. قابلیت حل همزمان، امکان کاهش تعداد تکرار یا در نظر گرفتن گام زمانی نسبتاً بالاتر مربوط به حل جریان را فراهم آورده است. نتایج نشان می‌دهد که برای حل جریان بدون انتقال حرارت و جرم، حلگر پیش‌فرض علاوه بر تعداد تکرار بیشتر برای حل معادله فشار، حداقل به مقدار چهار برابر، سرعت حل بالاتری از خود نشان داده است.

۱- مقدمه

شبیه‌سازی چنین جریان‌هایی وجود دارد. در یک نگرش، مرز میان دوسیال یا سطح آزاد به صورت یک ناحیه تقریبی و هاله‌ای، پیدا یا تخمین زده می‌شود. در واقع در این رویکرد، به همراه محاسبات مربوط به جریان، محاسباتی مربوط به پیدا کردن موقعیت تقریبی سطح براساس نسبت حجمی محاسبه شده برای هر یک از فازها نیز انجام می‌شود. روش‌های معروف حجم سیال^۱ و تنظیم سطح^۲ از جمله این نگرش‌ها هستند [۱ و ۲]. رویکرد دیگر در بررسی سطح آزاد یا سطح فاصل میان دوفاز، در نظر گرفتن مرز به صورت زنجیره‌ای از سطوح شبکه است. در این رویکرد که اصطلاحاً به رویکرد تعقیب سطح^۳ سطح شناخته می‌شود، مرز به صورت کاملاً تیز^۴ است و در هر مرحله

امروزه جریان‌های دو یا چندفازی به دلیل در نظر گرفتن همزمان چند فاز در کنار یکدیگر و حل یکپارچه فیزیک موردنظر، از اهمیت بالایی در صنایع مختلف همچون سامانه‌های توان و تبرید، خنک‌کننده‌ها، سامانه‌های کنترل یخ هواپیما، انواع سامانه‌های دریایی و دیگر سامانه‌ها برخوردارند. یکی از پایه‌ای‌ترین رویکردها جهت بررسی و تحلیل جریان‌های دوفازی، در نظر گرفتن جریان سیال به همراه سطح آزاد است. به طور مشخص، در جریان سطح آزاد، یک سیال به صورت کامل شبیه‌سازی می‌گردد و مدل سیال دیگر، به صورت اعمال شرایط مرزی خاص بر مرز سیال اولیه، اعمال اثر می‌نماید. تحلیل جریان‌های سطح آزاد را می‌توان به عنوان اساس و مبنای تحلیل جریان‌های چندفازی مورد ارزیابی قرارداد. نگرش‌های مختلفی جهت

- 1 Capture
- 2 Volume of fluid (VOF)
- 3 Level set
- 4 Track
- 5 Sharp

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: vakilipour@ut.ac.ir



آورده است. این حلگر پیش فرض، سرعت بسیار بالایی در حل جریان سطح آزاد دارد. همچنین قابلیت کنترل تعداد حلقه‌های محاسباتی بر روی ماتریس ضرایب سرعت و فشار به صورت جداگانه، امکان حل مسائل مختلف جریان را با بهینه‌ترین زمان فراهم آورده است. تنها زمانی کارایی این حلگر با چالش مواجه می‌شود که پدیده‌های مختلف با هم‌گیری فیزیکی بالا در مسئله درگیر شوند. حال در مقاله حاضر، اولین گام تا رسیدن به حلگر کاملاً هم‌گیر سرعت، فشار، دما و اجزا یعنی حلگر هم‌گیر جریان مورد مطالعه بوده است.

به طور مشخص، در مطالعه حاضر، حلگر معادل با حلگر پیش فرض یعنی اینترترک فوم ولی با الگوریتم حل جریان به صورت هم‌گیر توسعه داده شده و مورد ارزیابی قرار گرفته است. الگوریتم هم‌گیر به معنای حل همزمان و ضمنی سرعت و فشار در یک دستگاه و سامانه ماتریسی است که در حلگر پیش فرض پی‌یوکاپلدفوم^۷ در بستر فوم‌اکستند پیاده‌سازی شده است. تلاش‌های اولیه برای الگوریتم حل همزمان فشار و سرعت توسط پاتانکار^۸ [۱۱] و با کارهای انجام شده دیگر توسط اشنایدر و کریمیان^۹ [۱۲ و ۱۳]، درویش و همکاران^{۱۰} [۱۴ و ۱۵] و دیگر مطالعات کیسلینگ و همکاران [۱۶] و وکیلی‌پور و اورمیستون [۱۷]، به بلوغ رسیده است. در سال ۲۰۲۱ وکیلی‌پور و همکاران [۴] الگوریتم هم‌گیر را در حالت دوبعدی به همراه روش تعقیب سطح فاصل ارائه کردند اما تا کنون اعمال الگوریتم هم‌گیر به صورت کاملاً سه‌بعدی در کنار روش تعقیب سطح فاصل و برای جریان دوفازی گزارش نشده است. در واقع می‌توان ادعا نمود که حلگر حاضر اولین نمونه از اعمال روش هم‌گیر همزمان و ضمنی سرعت-فشار در کنار الگوریتم تعقیب سطح فاصل در سه‌بعد و به کمک کتابخانه‌های بستر فوم‌اکستند می‌باشد. در این حلگر، تمامی سرفایل‌های^{۱۱} مربوط به ایجاد میدان مشترک سرعت-فشار، توابع کنترلی، توابع مربوط به محاسبه شارجرمی بر روی سطوح سلول‌ها و تابع مربوط به روزرسانی شارجرمی براساس سرعت حرکت سطوح شبکه مطابق با کلاس‌های حلگر هم‌گیر اضافه شده‌اند. همچنین بخش به روزرسانی شروط مرزی بعد از جابجایی سطح آزاد نیز مطابق با داده‌های سرعت و فشار در حلگر هم‌گیر، اصلاح شده‌اند. این حلگر با هدف هموار نمودن مسیر رسیدن به حلگر تماماً هم‌گیر سرعت، فشار، دما و اجزا جهت حل جریان با انتقال جرم و حرارت است و اولین گام در این مسیر به شمار می‌آید. هرچند انتظار می‌رود که هم‌گیری فشار و سرعت در این حلگر منجر

با تغییر شرایط، مرز، موقعیت جدید خود را بازیابی می‌کند. به عبارت دیگر با توجه به تعادل نیرویی و شرایط حاکم بر سطح و مجاورت سطح، شبکه تغییر کرده و با شرایط جدید مطابقت می‌یابد. روش‌های ماک^۱، دنبال کردن جبهه^۲ و تعقیب سطح^۳ نیز در این دسته بندی قرار می‌گیرند [۳-۶]. روش دنبال کردن سطح به سبب دقت بالا در تعیین موقعیت و نیروهای سطحی، یکی از روش‌های مورد توجه برای کاربردهای عملیاتی جهت بررسی امواج سطحی نیز می‌باشد [۷ و ۸].

در بستر فوم‌اکستند که یک شاخه از سه شاخه اصلی نرم‌افزار این فوم می‌باشد، حلگر پیش فرض با نام اینترترک فوم^۴ بر مبنای رویکرد تعقیب سطح ایجاد شده است که قابلیت‌های شناخته شده‌ای در حل مسائل مختلف سطح آزاد و دوفازی دارد. این حلگر با استفاده از الگوریتم حل جریان پیمپل^۵ و الگوریتم جابجایی سطح باروش موزافریجا و پریک^۶ عمل می‌کند. در مسائلی که معادلات دما و اجزا فعال باشند و در سطح آزاد انتقال جرم و حرارت صورت گیرد، شروط مرزی سطح آزاد و داخل میدان می‌تواند به شدت به یکدیگر وابسته باشند. به عنوان مثال در مطالعات چراغی و وکیلی‌پور [۹] و هوستینی و اورمیستون [۱۰] با الگوریتم جدا از هم امکان همگرایی مسئله به شدت کاهش می‌یابد و به همین دلیل بوده که به سمت الگوریتم‌های هم‌گیر پیش‌رفته‌اند [۴ و ۹ و ۱۰]. هرچند در مطالعات ذکر شده، از کدهای شخصی و دوبعدی بهره برده شده است، اما عدم امکان همگرایی معادلات اجزا با وجود ضریب پخش پایین‌تر از مقدار ۱۰^{-۸} گزارش شده است. به عبارت بهتر، به منظور رسیدن به حل معادلات دما و اجزا در حلگر حاضر، به ناچار باید سراغ هم‌گیر کردن متغیرهای مختلف حرکت کنیم. علت اصلی گزارش شده نیز هم‌گیری شدید متغیرها در سطح آزاد و داخل میدان است که مارا وادار به محاسبه هم‌زمان همه متغیرها می‌کند. در واقع می‌توان گفت که اولین گام جهت رسیدن به حلگری با توانایی حل جریان با انتقال حرارت و انتقال دما، ایجاد حلگر هم‌گیر فشار و سرعت است. هرچند در مطالعات مختلف ذکر شده توانایی حلگرهای هم‌گیر مورد بررسی بوده، اما در بستر فوم‌اکستند و در شرایط حالت سه‌بعدی، قابلیت‌های چنین حلگری کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. وجود حلگر پیش فرض اینترترک فوم این امکان را جهت توسعه یک حلگر هم‌گیر که با الگوریتم جابجایی تعقیب سطح عمل کند، فراهم

- 1 Marker and cell (MAC)
- 2 Front tracking
- 3 Interface tracking (IT)
- 4 interTrackFoam
- 5 Pressure Implicit Method for Pressure Linked Equations (PIMPLE)
- 6 Muzaferija and Peric

- 7 pUCoupledFoam
- 8 Patankar
- 9 Schnieder and Karimian
- 10 Darwish
- 11 Header file

شبکه، لزجت دینامیکی و فشار دینامیکی می‌باشند. همچنین در این مطالعه، مشخصات سیال همچون ضرایب لزجت و دیگر مشخصات، ثابت در نظر گرفته شده‌اند. گسسته‌سازی معادلات به روش حجم محدود انجام شده است. همچنین روش گسسته‌سازی عبارت جابجایی با دو روش شناخته شده گاوس خطی^۱ و گاما گاوس^۲، روش گسسته‌سازی عبارت گردانی، گاوس خطی و عبارت لزجی، گاوس خطی اصلاح شده^۳ انتخاب شده‌اند.

۲-۲- شروط مرزی حاکم بر سطح آزاد و دیگر مرزها

شروط حاکم بر سطح سیال شامل شروط مرزی دینامیکی و سینماتیکی است که شرط مرزی دینامیکی، اعمال کننده تعادل نیرو بر سطح آزاد است. این شرط که به صورت تعادل نیرو در سه راستای عمودی، مماسی و سمتی تعریف می‌شود، از معادله بقای مومنتوم تبعیت می‌کند و استخراج شده است [۳]. در حالت ساده شده، برابری تنش‌های دوطرف سطح ویا با صرف نظر از لزجت، برابری فشار دوطرف سطح توسط این شرط تعیین می‌گردد [۱۸]. با استفاده از معادلات تعادل نیرو اختلاف فشار یا پرش فشاری در عبور از سطح قابل محاسبه شده است. شرط مرزی دینامیکی سطح آزاد به صورت زیر بیان گردیده‌است. برای تعادل مماسی داریم:

$$\mu_A ((\mathbf{n} \cdot \nabla \mathbf{v})_A + \nabla_S (\mathbf{n} \cdot \mathbf{v})) + \nabla_S \sigma = 0 \quad (4)$$

و برای تعادل نیروی عمودی نیز داریم:

$$\sigma K + (2\mu_A) \nabla_S \cdot \mathbf{v} + p_A = p_B \quad (5)$$

که در آنها، A و B مشخص کننده دو سمت از سطح آزاد هستند. همچنین σ کشش سطحی و K انحنای سطح می‌باشند. \mathbf{v}_t نیز سرعت مماس بر سطح است. در مسائل سطح آزاد، فشار سمت گاز را که به صورت یک فشار نسبی در نظر می‌گیریم، عموماً برابر با صفر قرار می‌دهیم و فشار سطح مایع براساس شرط تعادل نیروی عمودی حاصل می‌شود. معادله سینماتیکی بیان کننده برابری سرعت سطح آزاد با سیال در مرز است. یا به عبارت دیگر با معادلات حاضر، عدم عبور جرم از طریق سطح آزاد را تضمین می‌کند که

به کاهش تعداد تکرار تا رسیدن به حل نهایی شود، ولی درگیر و فعال تر شدن ماتریس‌های ضرایب در یک دستگاه یکپارچه نیز، می‌تواند منجر به کند شدن حل دستگاه شود. بنابراین، در این مطالعه، ملاحظات مختلف همچون نرخ همگرایی و زمان محاسباتی نیز مورد توجه قرار گرفته شده است.

جهت صحت‌سنجی عملکرد این حلگر، نمونه‌های مورد آزمایش دوبعدی و سه‌بعدی مختلفی در نظر گرفته شده است. از جمله جریان در عبور از سطح شیبدار، جریان حول یک ایرفویل در دامنه طویل و در نهایت، جریان درون مخزن سه‌بعدی. مقایسه میان نتایج هر دو حلگر پیش فرض و حلگر توسعه داده شده و همچنین نتایج مطالعات دیگر، نشان از مطابقت بسیار خوب و صحت عملکرد این حلگر می‌دهد. همچنین الگوریتم هم‌گیر سبب ارتقاء نرخ همگرایی و کاهش تعداد تکرارهای حل می‌شود، هر چند که در مسائل حل جریان، حلگر غیر هم‌گیر سرعت نسبتاً بالاتری را از خود نشان می‌دهد. همچنین قابلیت کنترل تعداد تکرار برای هر یک از دو معادله فشار و سرعت در حلگر غیر هم‌گیر، امکان مدیریت بهتر تعداد تکرارها را با نوع مسئله فراهم می‌آورد.

۲-۲- مدل‌سازی ریاضی

۲-۱- معادلات حاکم بر هر یک از دوفاز سیال

معادلات حاکم بر هر یک از دوفاز سیال شامل معادلات جریان تراکم‌ناپذیر و سیال نیوتنی در یک حجم دلخواه V و محدوده سطح متحرک S می‌باشد و شامل معادلات پیوستگی جرم، معادلات مومنتوم و معادله بقای فضا می‌باشد که به صورت زیر ارائه شده‌اند:

$$\oint_S \rho \mathbf{n} \cdot \mathbf{v} dS = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \mathbf{v} dV + \oint_S \rho (\mathbf{v} - \mathbf{v}_S) dS = - \oint_S \nabla p dV + \oint_S (\mu \nabla \mathbf{v}) dS \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} \int_V dV = \oint_S \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_S dS \quad (3)$$

که در آنها، \mathbf{n} بردار عمود به سمت خارج از سطح و روی S می‌باشد، ρ ، \mathbf{v}_S ، μ و p به ترتیب چگالی سیال، سرعت سیال، سرعت سطح

- 1 Gauss linear
- 2 Gauss gamma VDC
- 3 Gauss linear corrected

به صورت زیر ارائه شده است:

$$\frac{d(\rho_p \mathbf{v}_p V_p)}{dt} + \sum_f (\dot{m}_f - \rho_f V_f) \mathbf{v}_f = (\nabla p)_p V_p + \sum_f \mu \mathbf{n}_f (\nabla \mathbf{v})_f S_f \quad (9)$$

$$[(\mathbf{v}-\mathbf{v}_s) \cdot \mathbf{n}]_{\text{free surface}} = 0 \quad (6)$$

که در آنها، پایین نویس P و f مشخص کننده مرکز سلول و مرکز سطوح اطراف سلول می‌باشد. شار جرمی به صورت $\dot{m}_f = \rho_p (\mathbf{n}_f \cdot \mathbf{v}_f) S_f$ تعریف شده و باید معادله پیوستگی را برآورده نماید درحالی که شار جرمی بر روی سطوح (V_f) نیز باید معادله بقای فضا^۴ را برآورده نماید (رابطه (۳)). در حلگر پیش فرض، گسسته‌سازی با الگوریتم جدا از هم^۵ و برطبق مراجع [۳ و ۱۵] انجام شده است. شار جرمی در معادله مومنتوم به منظور ارتباط و هم‌گیری سرعت و فشار، به کمک روش شناخته شده ری و چاو^۶ محاسبه می‌شود. میان‌یابی به روش ری و چاو در شکل گسسته شده به صورت شکل زیر ارائه می‌شود [۱۵]:

$$\sum_f \rho_f [\bar{\mathbf{v}}_f - \bar{\mathbf{D}}_f (\nabla p_f - \bar{\nabla} p_f)] \cdot S_f = 0 \quad (10)$$

که خط بالای حروف نشانگر محاسبه مقادیر روی سطوح به روش درونیابی است. اوپراتور \mathbf{D}_f عبارت است از نسبت حجم سلول به ضرایب قطری شکل گسسته شده از ماتریس ضرایب معادله مومنتوم (رابطه (۹)) که به صورت زیر ارائه می‌گردد:

$$\mathbf{D}_f = \begin{bmatrix} \frac{V_p}{a_p^x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{V_p}{a_p^y} & \\ 0 & 0 & \frac{V_p}{a_p^z} \end{bmatrix} \quad (11)$$

که a_p^i شامل مولفه i ام قطری ماتریس ضرایب معادله مومنتوم می‌باشد. با قراردادی میان‌یابی ری و چاو و بازنویسی معادله پیوستگی در شکل گسسته شده (رابطه (۸))، می‌توان معادله پیوستگی را به شکل زیر ارائه نمود:

شرط مرزی گرادیان صفر برای فشار یا سرعت، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\nabla \phi \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (7)$$

۳- مدل‌سازی عددی و جزئیات الگوریتم حلگر

در حلگر توسعه داده شده، روش گسسته‌سازی حجم محدود^۱ برای حل معادلات سیال داخل میدان و روش سطح محدود^۲ برای حل معادلات بر روی سطح آزاد مورد استفاده قرار گرفته است. هر دو روش گسسته‌سازی حجم / سطح محدود، بر مبنای شکل انتگرالی معادلات بر روی یک حجم / سطح کنترلی متحرک بنا شده است. گسسته‌سازی شبکه مکانی برای داخل میدان متناسب با روش حجم محدود توسط کلاس پایه fvMesh و گسسته‌سازی برای سطوح سطح آزاد که بر مبنای روش سطح محدود است، توسط کلاس پایه faMesh صورت گرفته است.

۳-۱- گسسته‌سازی معادلات

گسسته‌سازی مرتبه دوم معادلات، در واقع امکان تبدیل معادلات انتگرالی روی سطوح به شکل مجموعه‌ای از تقریب‌ها روی وجوه سلول‌ها و انتگرال‌های حجمی با دقت مرتبه دوم به کمک قانون نقطه-مرکزی^۳ به صورت تقریبی از نقاط مرکزی فراهم آورده است. شکل گسسته شده معادلات حاکم پیوستگی و مومنتوم به صورت زیر می‌باشد:

$$\sum_f \dot{m}_f = 0 \quad (8)$$

4 Space conservation law (SCL)
5 Segregated
6 Rhie and Chow

1 Finite volume
2 Finite area
3 Mid-point rule

به منظور اعمال معادله بقای فضا در معادلات مومنتوم و پیوستگی و بهره‌گیری از جابجایی شبکه، فرزیگر و پریک [۲۲] با کمک مفهوم حجم جابجا شده^۱، معادله بقای فضا را در معادلات دیگر تلفیق نموده‌اند. در واقع نشان داده‌اند که با در نظر گرفتن یک سرعت نسبی در عبارت جابجایی، عملاً اثر جابجایی شبکه و سطوح سلول‌ها در نظر گرفته می‌شود و همزمان نیز معادله بقای فضا ارضا می‌گردد. همچنین پریک [۲۲] استفاده از روش گسسته‌سازی زمانی یکسان برای عبارت‌های زمانی را برای معادلات همراه با معادله بقای فضا الزامی دانسته‌اند.

به منظور پیاده‌سازی حلگر هم‌گیر در بستر فوم‌اکستند با چهار متغیر فعال (سه مولفه سرعت و یک اسکالر فشار)، بردار حل برای سلول حاضر P به صورت زیر اعمال شده است:

$$x^P = \begin{bmatrix} u^P \\ v^P \\ w^P \\ p^P \end{bmatrix} \quad (16)$$

ایجاد این بردار حل در سرفایل^۲ مربوط به میدان‌ها^۳ و با کد زیر صورت گرفته است:

```
volVector4Field pU
(
  IOobject
  (
    "pU",
    runTime.timeName(),
    mesh,
    IOobject::NO_READ,
    IOobject::NO_WRITE
  ),
  mesh,
  dimensionedVector4
  ("zero", dimless, vector4::zero)
);
```

همچنین برای ایجاد یک سیستم بلوکی که شامل ماتریس ضرایب، ماتریس مجهولات و ماتریس مقادیر سمت راست^۴ باشد، کد زیر مورد استفاده قرار گرفته است:

$$\sum_f \rho_f \left[-\overline{\mathbf{D}_f} (\nabla p_f) \right] \cdot S_f + \sum_f \dot{m}_f = \sum_f \rho_f \left(\overline{\mathbf{D}_f} \nabla p_f \right) \cdot S_f \quad (12)$$

که عبارت سمت راست به صورت عبارت چشمه و با نگرش صریح، و عبارات سمت چپ نیز به همراه معادلات مومنتوم، تشکیل چهار معادله با هم‌گیری فشار و مولفه‌های سرعت را به صورت ضمنی، می‌دهند. سرعت در عبارت جابجایی (\mathbf{v}_f) در معادله مومنتوم به روش بالادست خطی گسسته شده و مشتق عمودی $(\mathbf{n}_f \cdot (\nabla \mathbf{v}))_f$ در عبارت پخش به صورت زیر گسسته‌سازی شده است:

$$\mathbf{n}_f \cdot (\nabla \mathbf{v})_f = |\Delta_f| \frac{\mathbf{v}_N - \mathbf{v}_P}{|d_f|} + (n_f - \Delta_f) \cdot (\nabla \mathbf{v})_f \quad (13)$$

که در آن، $\Delta_f = d_f / d_f \cdot n_f$ تعریف هندسی بر مبنای فاصله میان مرکز سلول حاضر و سلول همسایه (d_f) می‌باشد. رویکرد مواجهه با عبارت اول از سمت راست در رابطه (۱۲) به صورت ضمنی و برای عبارت دوم به صورت صریح است. همچنین عبارت شار جرمی در عبارت جابجایی معادله مومنتوم نیز به صورت صریح که از گام زمانی قبل حاصل شده، مورد استفاده قرار گرفته است. عبارت زمانی مورد نیاز نیز به صورت مرتبه دوم پسرو به شکل کلی زیر گسسته شده است:

$$\left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} \right) = \frac{3\mathbf{v} - 4\mathbf{v}^o + \mathbf{v}^{oo}}{2\delta t} \quad (14)$$

که متغیر بدون بالانویس در زمان حاضر و نمادهای O و OO به ترتیب برای زمان گذشته در گام قبل و زمان پیش‌از آن در دو گام زمانی قبل‌اند. در انتهای فرآیند حل متغیرهای فشار و سرعت، به منظور بدست آوردن شار جرمی برای گام زمانی بعدی و قراردادی این شار جرمی در معادله مومنتوم، مقدار شار جرمی به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\dot{m}_f = \rho_f \left[\overline{\mathbf{v}_f} + \overline{\mathbf{D}_f} (\mathbf{v}_f^o - \overline{\mathbf{v}_f^o}) - \overline{\mathbf{D}_f} (\nabla p_f - \overline{\nabla p_f}) \right] \cdot S_f \quad (15)$$

- 1 Swept volume
- 2 Header file
- 3 createFiles
- 4 Right hand side (RHS)

عمودی به صورت زیر محاسبه شده است [۳ و ۱۸]:

$$p_{fs} = -\rho_A \mathbf{g} \cdot \mathbf{r}_{fs} - (\sigma K)_{fs} - 2\mu_A (\nabla_s \cdot \mathbf{v})_{fs} \quad (17)$$

که در آن، \mathbf{r}_{fs} بردار موقعیت مرکز سطح است. دیورژانس سطحی بردار سرعت $(\nabla_s \cdot \mathbf{v})_{fs}$ نیز به کمک تئوری انتگرال گوس محاسبه می‌شود. مشتق بردار سرعت عمودی نیز به کمک گرادیان سرعت عمودی با کمک معادله تعادل نیروی مماسی به صورت زیر محاسبه می‌شود [۳]:

$$\mathbf{n}_f \cdot (\nabla \mathbf{v})_{fs} = \frac{1}{\mu_A} (\nabla_s \sigma)_f - \mathbf{n}_f \cdot (\nabla_s \cdot \mathbf{v})_f - (\nabla_s \mathbf{v})_{fs} \cdot \mathbf{n}_f \quad (18)$$

که در آن \mathbf{n}_f بردار یکه عمودی بر سطح است. مشخصات متغیرهای روی سطح آزاد درست در شروع هر تکرار حل جریان صورت می‌گیرد. به عبارت دیگر، به کمک این شروط، شرایط مرزی برای حل میدان سیال داخل فراهم می‌گردد.

پس از انجام محاسبات جریان، با یک شبکه ثابت، شار جرمی کلی که از سطح آزاد عبور می‌کند مخالف صفر است. در واقع عبارت زیر در ابتدای حل برقرار است:

$$(\dot{m}_{fs} - \rho_A \dot{V}_{fs}) \neq 0 \quad (19)$$

که \dot{m}_f شار جرمی در عبور از سطح آزاد و \dot{V}_{fs} شار حجمی ناشی از حرکت سطح است. در واقع در ابتدای هر گام زمانی، مقدار حرکت سطح به اندازه میزان سرعت حرکت سیال نمی‌باشد. به منظور تصحیح شار جرمی کل، می‌بایست نقاط سطح آزاد به نحوی جابجا شوند که در هر تکرار، میزان اختلاف میان این دو شار حجمی توسط حرکت شبکه، تا حدی جبران شود. نحوه رسیدن به میزان جابجایی نقاط اطراف برمبنای میزان اختلاف شار حجمی، توسط روند پیشنهادی موزافریجا و پریک [۱۸] صورت گرفته است. هرچند قابلیت استفاده از الگوریتم پیشنهادی وکیلی پور و همکاران [۴] جهت جابجایی نقاط سطح آزاد نیز وجود دارد. روند رسیدن به مقدار مناسب جابجایی نقاط در ادامه ارائه شده است. با محاسبه اختلاف شار حجمی ناشی از سرعت سیال و شار حجمی ناشی از جابجایی سطح، مقدار مورد نیاز برای

`fvBlockMatrix<vector4> UpEqn (Up) ;`

که در آن، کلاس پایه `fvBlockMatrix` وظیفه مدیریت سیستم بلوکی را با ارث‌بری از کلاس `fvMatrix` عهده‌دار است. به منظور گسسته‌سازی معادله مومنتوم و پیوستگی، مشابه با الگوی دیگر حلگرهای بستر فوم‌اکستند عمل می‌شود و برای اختصار در اینجا بازنویسی نمی‌شوند. صرفاً بخش مربوط به هم‌گیری معادلات مومنتوم و پیوستگی که شامل عبارت‌های گرادیان فشار درون معادلات مومنتوم به صورت زیر اعمال شده است:

```
BlockLduSystem<vector,
vector> pInU (fvm::grad (p) );
```

و عبارت دیورژانس سرعت درون معادله پیوستگی به صورت زیر است:

```
BlockLduSystem<vector,
scalar> UInp (fvm::UDiv (U) );
```

که در واقع کلاس `blockLduSystem` وظیفه محاسبات مربوط به این دو تابع را برعهده دارد. پس از آن به کمک توابع درونی مناسب برای کلاس اشاره شده، این مقادیر در سیستم ماتریسی نهایی، سرهم‌بندی می‌شوند.

۳-۲- گسسته سازی شروط مرزی سطح آزاد

مطابق با آنچه پیشتر در بخش (۲) گفته شد، شروط مرزی بر روی سطح آزاد شامل دو شرط مرزی دینامیکی و سینماتیکی می‌شود. گسسته‌سازی این دو شرط و هرآنچه که در ارتباط با اعمال این دو شرط است، به کمک شبکه سطحی^۲ و روش سطح محدود^۳ صورت می‌گیرد. مدل‌سازی عددی جریان سطح آزاد به صورت مرز تیز^۴ و به کمک فرآیند دنبال کردن سطح^۵ صورت گرفته است. شروط مرزی با استفاده از دو شرط دینامیکی و سینماتیکی به صورت زیر حاصل می‌شوند. مقدار فشار بر روی سطح با کمک تعادل نیروی

-
- 1 Assemble
 - 2 faMesh
 - 3 Finite area
 - 4 Sharp
 - 5 Track

حجم جاروب شده محاسبه می‌گردد.

```
interface.updateBoundaryConditions();
|-> updateVelocity();
|-> updatePressure();
```

$$V'_{fs} = V'^n_{fs} - V'_{fs} \quad (20)$$

که با فراخوانی تابع اول توسط شی `interface`، عملاً دو تابع بعدی فراخوانی می‌شوند. در تابع اول که مربوط به به روزرسانی متغیر سرعت است، هدف رسیدن به گرادیان سرعت (رابطه (۱۸)) به کمک محاسبه نیروهای کشش سطحی و تعادل نیرویی است. در نهایت محاسبه گرادیان سرعت به صورت زیر انجام می‌شود:

$$\delta V'_{fs} = \frac{2}{3} V'_{fs} \Delta t \quad (21)$$

```
vectorField nGradU =
tangentialSurfaceTensionForce/
(muFluidA().value() + VSMALL)
- nA*fac::div(Us())().internalField()
- (fac::grad(Us())().internalField()&nA);
```

در ادامه با داشتن مقدار مشخص از حجم جاروب شده مورد نیاز، میزان ارتفاع مورد نیاز برای جابجایی نقاط کنترلی^۱ روی هر سطح محاسبه می‌گردد:

$$h'_{fs} = \frac{\delta V'_{fs}}{S_{fs} \mathbf{n}_f \cdot \mathbf{f}_{fs}} \quad (22)$$

که معادل با رابطه (۱۸) است و در آن گرادیان سرعت، به کمک تعادل نیروی کشش مماسی حاصل شده است. همچنین با فراخوانی تابع دوم که مربوط به به روزرسانی متغیر فشار است، مقدار فشار روی سطح، طی چند مرحله توسط دستورات زیر اصلاح می‌شود:

که در آن، S_{fs} ، \mathbf{n}_f و \mathbf{f}_{fs} ، به ترتیب مساحت، بردار یکه عمود بر سطح و جهت بردار جابجایی نقاط می‌باشند. بر مبنای جابجایی نقاط کنترلی و روش‌های میانابایی هندسی، جابجایی نقاط اطراف نیز به راحتی قابل محاسبه می‌باشد.

```
p -= cleanInterfaceSurfTension().value()*K;
p -= 2.0*muFluidA().value()*fac:
:div(Us())().internalField();
```

به منظور پیاده‌سازی شروط روی سطح آزاد، ابتدا با ایجاد یک شی از کلاس `freeSurface` در سرفایل مربوط به ایجاد میدان‌ها، شروع می‌کنیم:

که در واقع معادل با رابطه (۱۸) می‌باشند و مقدار فشار بر مبنای کشش سطحی و دیورژانس سرعت سطح اصلاح می‌شود.

```
freeSurface interface
(mesh, rho, U, p, phi);
```

در نهایت، توابع مربوط به جابجایی نقاط سطح آزاد با فراخوانی تابع `movePoints` به صورت زیر عمل می‌کنند. ابتدا با محاسبه حجم جاروب شده، فرآیند محاسبات یافتن میزان جابجایی نقاط سطح آزاد شروع می‌گردد:

که در واقع، این شی، دریافت کننده شبکه، چگالی، سرعت، فشار و شار جرمی بخش‌های مختلف است و امکان کار و تصحیح مقادیر مرزی را فراهم می‌آورد. پس از آن، این شی با فراخوانی توابع مختلف، وظیفه به روزرسانی مقادیر مرزی با اعمال شروط دینامیکی، جابجایی نقاط سطح آزاد با اعمال معادله سینماتیکی و دیگر موارد اشاره شده را برعهده دارد. تابع مربوط به فرآیند به روزرسانی سرعت و فشار به صورت زیر استفاده شده‌اند:

```
scalarField sweptVolCorr =
interfacePhi
- fvc::meshPhi(rho()),
U())().boundaryField()[aPatchID()];
```

1 Control points

۴- فرآیند حل و نمودار داده

الگوریتم حلگر مطابق با الگوی کلی دیگر حلگرهای پیش فرض بستر فوم اکستند شامل سرفایل های مشترک و اختصاصی می باشد. کلاس ها و توابع اصلی مورد استفاده شامل انواع مربوط به ساختار بلوک بندی جهت گردآوری همزمان ضرایب مربوط به سرعت و فشار است. حلگر توسعه داده شده، در واقع الگوریتم جابجایی شبکه و نقاط را از حلگر پیش فرض اینترترک فوم و الگوریتم حل جریان را از حلگر پیش فرض پی یو کاپلد فوم به ارث برده است. قراردادن الگوریتم حل جریان هم گیر، سبب حذف حلقه های داخلی شده است. ترتیب قرارگیری توابع اصلاح شار جرمی و نیز توابع مربوط به انتقال و دریافت داده های مرزی به کلاس freeSurface، از جمله تغییراتی است که برای عملکرد صحیح حلگر جدید ضروری می باشد. حل همزمان و هم گیر جریان در کنار حل سطح آزاد به روش موزافریجا و پریک [۱۸] تاکنون در بستر فوم اکستند یا دیگر شاخه های این فوم میسر نبوده که حلگر توسعه داده شده حاضر، این امکان را فراهم آورده است. به عبارت بهتر، این حلگر اولین حلگر هم گیر جزئی جریان دوفاز باروش تعقیب سطح در تمام بسترهای این فومی است. شکل ۱، جزئیات الگوریتم حلگر را نمایش داده است:

الگوریتم پیمپل^۵ (شکل ۱-الف) در واقع ترکیبی از دو الگوریتم شناخته شده پیژو^۶ و سیمپل^۷ می باشد که با توجه به تفکیک شدن دستگاه ضرایب سرعت و دستگاه ضرایب فشار، به ناچار دارای حلقه های مجزای حل می باشد. در واقع الگوریتم حلگر پیش فرض اینترترک فوم، شامل حلقه زمانی، حلقه حل میدان سرعت، حلقه حل معادله فشار و در نهایت حلقه مربوط به مدیریت عبارات غیرمتمماد می باشد. با شروع حلقه زمانی، توابع جابجایی شبکه و تخمین اولیه جابجایی سطح آزاد فراخوانی می شوند (شکل ۱-الف-مراحل ۲ تا ۴). پس از آن مرحله به روزرسانی شروط مرزی با توجه به تغییر شبکه صورت گرفته نیز انجام می گردد (شکل ۱-الف-مرحله ۵). سرهم بندی معادله مومنتوم و حل اولیه آن و ورود به حلقه معادله فشار در ادامه صورت می گیرد (شکل ۱-الف-مراحل ۶ تا ۱۲). اصلاح شار جرمی روی سطوح نیز در انتهای حلقه سرعت انجام می شود (شکل ۱-الف-مرحله ۱۳). اصلاح و تغییر اصلی در سطح آزاد سیال در انتهای حلقه سرعت و پس از حاصل شدن نسبی جریان انجام می گیرد (شکل ۱-الف-مرحله ۱۴). در حالی که در الگوریتم هم گیر

که تفاضل میزان شار حجمی ناشی از سرعت سیال در سطح را با میزان شار حجمی ناشی از حرکت سطح را پیدا می کند و معادل است با رابطه (۲۰). در ادامه بر مبنای روش گسسته سازی زمانی، ضرایب مورد نظر به همراه گام زمانی را در مقدار حجم جاروب شده ضرب کرده و میزان ارتفاع مورد نیاز جهت جابجایی نقاط کنترلی محاسبه می شود:

$$\text{scalarField deltaH} = \text{sweptVolCorr} / (\text{SF} * (\text{Nf} \ \& \ \text{facesDisplacementDir}()));$$

که این دستورات، عملاً پیاده سازی رابطه (۲۲) می باشد. در نهایت با انتقال این مقادیر، به تابع مناسب، جابجایی نقاط اطراف نیز براساس روش های هندسی و میانبایی، به کمک تابع زیر محاسبه می شود:

$$\text{pointField displacement} = \text{pointDisplacement}(\text{deltaH});$$

که تابع pointDisplacement وظیفه محاسبه جابجایی نقاط اطراف را برعهده دارد. در نهایت مقادیر محاسبه شده توسط تابع مناسب از کلاس شبکه^۸، نقاط سطح را به مکان جدید منتقل می نماید.

۳-۳- روش جابجایی نقاط داخلی شبکه

روش جابجایی نقاط داخلی شبکه، بسته به نوع مسئله متفاوت است. روش های بر مبنای حل معادله لاپلاس به علت عمومیت و قابلیت بالا در بسیاری از مسائل مورد استفاده قرار گرفته است [۱۹ و ۲۰]. روش نسبت-ثابت نیز به عنوان یک روش ابتکاری جهت حل جریان هایی با هندسه بلند (نسبت طول به عرض بالا) مورد استفاده قرار گرفته که سرعتی بالاتر و قابلیت اطمینان بیشتری نسبت به روش های مبتنی بر حل معادله لاپلاس دارد. با استفاده از قابلیت برنامه نویسی شی گرا در بستر فوم اکستند، روش های متنوع دیگری نیز در دسترس هستند. چهار روش لاپلاس^۲، لاپلاس سرعت^۳، شبه-جامد^۴ و روش نسبت-ثابت مورد توجه بوده اند.

5 Pressure Implicit Method for Pressure Linked Equations (PIMPLE)

6 Pressure Implicit with Splitting of Operator (PISO)

7 Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations (SIMPLE)

1 fvMesh

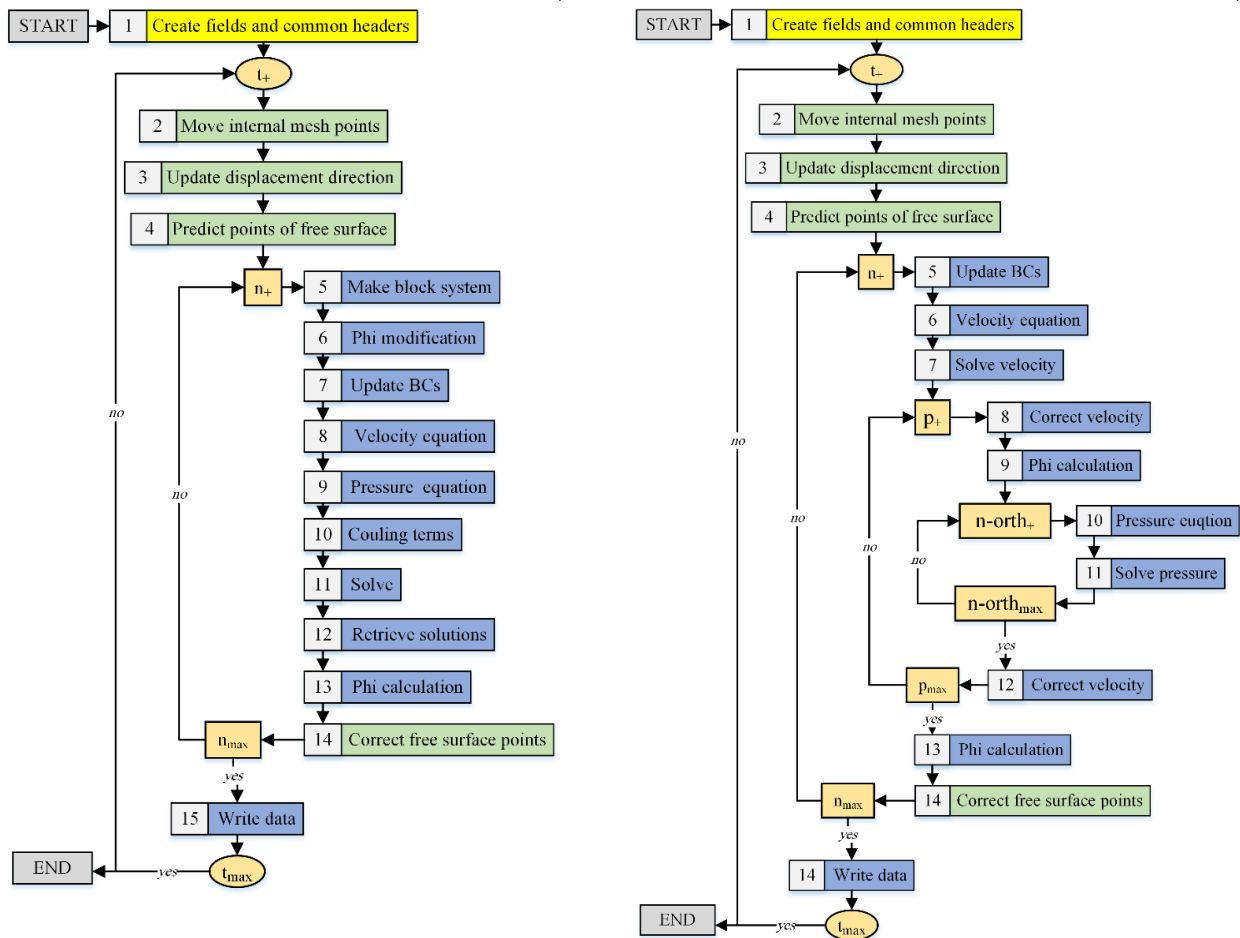
2 laplace

3 refVelocityLaplacian

4 psuedoSolid

(الف)

(ب)



شکل ۱. الگوریتم مورد استفاده در حلگرهای جریان دوفازی با روش تعقیب سطح فاصل: (الف) حلگر پیش فرض، (ب) حلگر هم گیر

Fig. 1. The algorithm used in two-phase flow solvers with the interface-tracking method: a) default solver, b) coupled solver

حرکت شبکه در مرحله ۶ و به کمک تابع meshPhi و محاسبه شار جرمی باروش ری و چاو^۱ در مرحله ۱۳ از الگوریتم هم گیر (شکل ۱-ب) صورت گرفته است. در نهایت نیز مراحل ۱۱ و ۱۲ نیز جهت حل دستگاه ماتریسی و بازیابی میدان های سرعت و فشار قرار گرفته اند. الگوی استفاده شده برای ایجاد سیستم بلوکی ماتریسی و همچنین الگوی محاسبه ضرایب مربوط به سرعت و فشار (مراحل ۸، ۹ و ۱۰) به کمک حلگر پیش فرض پی یو کالدفوم موجود در بستر فوم اکستند ایجاد و اعمال شده اند. بردار حل شامل یک ماتریس با چهار درایه برای سه مولفه سرعت و یک درایه برای مولفه فشار است که در ابتدای کار برای سیستم بلوکی ماتریسی تعریف شده است. یکی

مورد استفاده، عموم عملیات محاسباتی درون صرفاً یک حلقه داخلی مربوط به خطی سازی، انجام شده است. بلوک بخش ۱ در واقع نماینده بلوک های مشترک میان عموم حلگرها می باشد که شامل سرفایل ها و تعریف میدان ها و لیست های مورد نیاز است. بلوک های سبز رنگ (مراحل ۲ تا ۴ و ۱۴) مربوط به جابجایی نقاط سطح آزاد و نقاط داخلی شبکه می باشند که براساس روش موزافریجا و پریک پی ریزی شده اند. مرحله ۵ شامل ایجاد شی از کلاس fvBlockMatrix است و در واقع سیستم بلوکی ماتریسی برای دو متغیر عددی فشار و برداری سرعت در این مرحله شکل می گیرد. فرآیند محاسبه ضرایب معادلات مومنتوم و فشار و همچنین عبارات مربوط به هم گیری معادلات در مراحل ۸، ۹ و ۱۰ انجام شده است. اصلاح شار جرمی باتوجه به

زمانی مناسب با توجه به مراجع و مطالعات شبکه، انتخاب شده و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در تمام مسائل مورد مطالعه، با توجه به ماهیت پایای حل نهایی، پاسخ آخر به خصوص روی سطح آزاد هدف اصلی حل بوده و عملاً حل‌های میانی اهمیت چندانی ندارند. بنابراین تمایل ما در استفاده از بزرگترین گام زمانی مناسب برای همگرایی و دقت مطلوب می‌باشد. در مسائل سطح آزاد، سه گام زمانی مختلف تعریف می‌شود که این سه گام زمانی، به ترتیب گام زمانی جابجایی، گام زمانی لزج و گام زمانی کشش سطحی نامگذاری شده‌اند که به صورت زیر بیان می‌شوند [۴].

$$\Delta t_c = \frac{\Delta h}{|v|_{\max}}, \quad \Delta t_v = \frac{\Delta h^2}{4\nu}, \quad \Delta t_\sigma = \sqrt{\frac{(\rho_L) \Delta h^3}{4\pi\sigma}} \quad (23)$$

که در آن، Δt_c ، Δt_v و Δt_σ به ترتیب گام زمانی جابجایی، گام زمانی لزج و گام زمانی کشش سطحی است. با بدست آوردن گام زمانی حداقل از میان این گام‌های زمانی و با در نظر گرفتن یک ضریب تخفیف مناسب، می‌توان رفتار مطلوبی جهت همگرایی و دقت را داشته باشیم. بنابر جمیع موارد ذکر شده همچون پایا بودن حل نهایی، در مسائل مورد بررسی مطالعه شبکه زمانی نسبت به مطالعات شبکه مکانی یا اندازه دامنه حل، از اولویت کمتری برخوردار بوده و تمایل ما بر استفاده از بالاترین گام زمانی مناسب جهت به حداقل رساندن تعداد تکرار است.

۵-۱- جریان غیر لزج در عبور از سطح شیب‌دار^۲

جریان غیر لزج در عبور از سطح شیب‌دار به عنوان یک نمونه آزمایش استاندارد برای جریان‌های سطح آزاد شناخته می‌شود که با توجه به هندسه و فیزیک نسبتاً ساده مورد توجه قرار گرفته‌است. هندسه و شبکه مورد استفاده به همراه مرزها در شکل ۲ نمایش داده شده است.

هندسه مورد استفاده دارای طول ۹ و عرض ۱ می‌باشد که نقطه شکستگی سمت چپ در فاصله طولی صفر و نقطه دوم در فاصله طولی ۱ و عرض صفر واقع شده‌اند. با توجه به مرجع مورد استفاده [۱۸]، شبکه مکانی مورد استفاده تعداد ۵۰ سلول در راستای طولی و ۱۰ سلول در راستای عرضی برای حالت دوبعدی و در حالت سه‌بعدی، ۱۰ سلول نیز در راستای عمق ایجاد شده است. عدد فراد^۲ استفاده شده برابر با ۱/۹۲، چگالی برابر ۱ کیلوگرم بر مترمکعب، سرعت در ورودی ۶ متر بر ثانیه در راستای X تنظیم شده است.

- 2 Ramp
- 3 Froude number

از برتری‌های حلگر هم‌گیر اعمال شده نسبت به حلگر پیش‌فرض، کاهش تعداد تکرار و حذف دو حلقه داخلی است. تجمیع حلقه‌های سرعت و فشار و حلقه عدم-تعامل^۱ در یک حلقه داخلی که به حلقه خطی‌سازی معروف است، از بارزترین تفاوت‌های دو الگوریتم حل محسوب می‌شود. الگوریتم ساده‌تر با حلقه‌های داخلی کمتر هم‌گیر، عملاً امکان هم‌گیر کردن معادلات دیگر همچون دما و اجزای با کمترین میزان تغییر فراهم می‌آورد. همچنین امکان تغییر روش خطی‌سازی به روش‌های مرتبه بالاتر یا دیگر تغییرات را نیز با حداقل جابجایی در ساختار کلی الگوریتم فراهم می‌کند.

۴-۱- قابلیت‌ها، تفاوت‌ها و چالش‌های پیاده‌سازی حلگر هم‌گیر

حلگر جدید (موسوم به اینترترک کاپلد)، در واقع حل جریان را به روش هم‌گیر و جابجایی سطح را به روش تعقیب سطح فاصل انجام می‌دهد. به عبارتی، سرعت و فشار به صورت هم‌گیر در داخل میدان حل می‌شود و شروط حاکم بر سطح آزاد به صورت جداگانه در مرحله‌ای دیگر اعمال و به عنوان شروط مرزی برای تکرار بعدی ایفای نقش می‌کند. در این حلگر، عملاً الگوریتم حل جریان پیمپل برداشته شده و حلقه حل جریان هم‌گیر جایگزین آن شده است. به منظور کارکرد صحیح حلگر جدید که به نوعی با ادغام و اصلاح دو الگوریتم حلگرهای اینترترک فوم و پی‌یو کاپلدفوم ایجاد شده است، چالش‌های متعددی از جمله انتقال و افزودن توابع در موقعیت الگوریتمی صحیح، حذف توابع یا سرفایل‌های غیرضروری یا مخرب، ایجاد بستر تغییر توابع (همچون توابع اصلاح شار جرمی، توابع جابجایی شبکه و توابع مربوط به شروط مرزی سطح آزاد) پشت سر گذاشته شده‌است. اساسی‌ترین بخش‌های استفاده شده به همراه نوع انتقال یا اصلاح آنها در جدول ۱ بیان شده‌اند.

۵- نمونه‌های آزمایش جهت بررسی عملکرد

با توجه به معادلات و الگوریتم جابجایی شبکه، نمونه‌های آزمایش مختلفی جهت بررسی عملکرد حلگر حاضر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نتایج گرفته‌شده در کنار نتایج حلگر پیش‌فرض فوم‌اکستند با نام اینترترک فوم و همچنین نتایج موجود در مطالعات گذشته (موزافریجا و پریک) مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته‌است. نمونه آزمایش جریان در عبور از سطح شیب‌دار، جریان هایدروفویل و جریان درون مخزن سه‌بعدی به عنوان نمونه‌های آزمایش شناخته‌شده که در خود بستر فوم‌اکستند نیز مورد استفاده بوده‌اند به عنوان نمونه انتخاب شده‌اند با این تفاوت که ابعاد دامنه، شبکه مکانی و شبکه

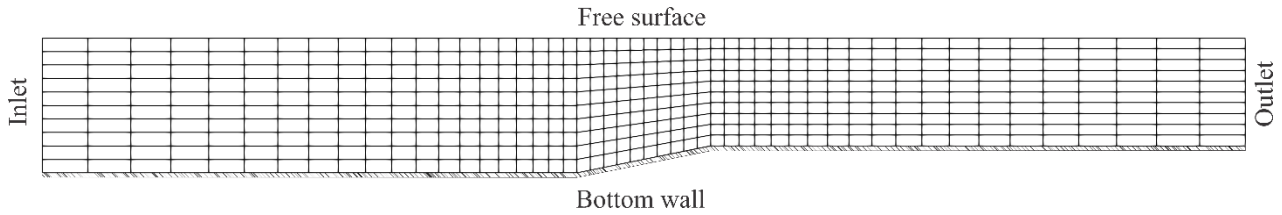
- 1 Non-orthogonal

جدول ۱. نحوه به خدمت گیری، افزودن یا اصلاح بخش‌های دو حلگر اینترترک فوم و پی‌یوکاپلدفوم جهت ایجاد حلگر هم‌گیر توسعه داده شده

Table 1. The method of employing, adding, or modifying parts of the two interTrackFoam and pUCoupled-Foam solvers to create the developed coupled solver

افزودن کتابخانه اصلی مورد نیاز، شامل:	
کتابخانه fvBlockMatrix جهت استفاده از قابلیت‌های سیستم بلوکی	الگوریتم موجود در حلگر اینترترک فوم اصلاح شده و این کتابخانه به آن افزوده شده است.
انتقال بستر دستگاه‌ها، معادلات، سیستم حل و دریافت میدان، شامل:	
بستر ترکیب دومعادله مومنوم و پیوستگی در شی UpEqn	این موارد از الگوریتم حلگر پی‌یوکاپلدفوم استفاده شده و به الگوریتم حاضر منتقل شده‌اند.
عبارات هم‌گیری در معادلات مومنوم و پیوستگی یا دیگر معادلات محاسبه شار جرمی در انتهای حلقه خطی سازی	
معادلات مومنوم	برای اعمال این دو معادله از شکل معادلات حلگر اینترترک فوم استفاده شده است.
معادله پیوستگی	
بخش مربوط به به روز رسانی شروط مرزی سطح آزاد و اعمال شروط	
تابع updateBoundaryConditions	استفاده از الگوریتم موجود در حلگر اینترترک فوم، همچنین ایجاد توابع جایگزین جهت تغییر الگوریتم جابجایی و اعمال شروط مرزی بر روی سطح آزاد
تابع و الگوریتم اصلاح شار جرمی شامل:	
تابع اصلاح شار بر مبنای جابجایی سطوح شبکه و شار جرمی	از الگوریتم حلگر اینترترک فوم استفاده شده و در بخش میانی از الگوریتم هم‌گیر جا داده شده است. همچنین امکان تغییر این تابع با تابع makeRelative در صورت تغییر معادلات به فرم بدون چگالی فراهم شده است.
جابجایی شبکه سطح و شبکه داخلی شامل توابع:	
تابع moveMeshPointsForOldFreeSurfDisplacement	عینا از توابع موجود در حلگر اینترترک فوم استفاده شده است. هرچند روش جدید نسبت-ثابت ^۱ نیز به روش‌های در دسترس اضافه شده است.
تابع updateDisplacementDirections	
تابع predictPoints	
تابع correctPoints	در الگوریتم حلگر هم‌گیر جدید، امکان استفاده از تابع جابجایی نقاط سطح در بیرون از حلقه خطی سازی نیز فراهم شده. هرچند در مسائل مورد بررسی، در انتهای حلقه خطی سازی قرار داده شده است.
موارد حذف شده از هر دو حلگر که در الگوریتم حلگر هم‌گیر جدید وارد نشده‌اند:	
تابع اعمال ضریب تخفیف، مربوط به متغیر فشار	از الگوریتم پی‌یوکاپلدفوم حذف شده است.
تابع storePrevIter متغیر فشار در ابتدای حلقه خطی سازی	از الگوریتم پی‌یوکاپلدفوم حذف شده است.
سرفایل scalePhi جهت تغییر در شار جرمی	از الگوریتم اینترترک فوم حذف شده است.
سرفایل setReference جهت اختصاص نقطه مرجع فشار	از الگوریتم اینترترک فوم حذف شده است و در الگوریتم حاضر، در صورت نیاز به انتهای بخش معادله پیوستگی اضافه شده است.
ایجاد توابع کنترل شروط خروج از حلقه خطی سازی:	
تنها پارامتر کنترلی در هر دو حلگر اینترترک فوم و پی‌یوکاپلدفوم تعداد تکرار حلقه خطی سازی می‌باشد.	در الگوریتم حاضر، شرط کنترل مقدار باقیمانده افزوده شده است.

¹ Fixed-fraction



شکل ۲. دامنه و مرزها برای جریان در عبور از سطح شیبدار

Fig. 2. The domain and boundaries for the flow over the ramp

جدول ۲. شروط مرزی برای نمونه آزمایش سطح شیبدار

Table 2. The boundary conditions for ramp test case

حرکت نقاط	فشار	سرعت	مرز
مقدار ثابت	گرادین صفر	لغزشی	دیواره کف
لغزشی	گرادین صفر	مقدار ثابت	ورودی
لغزشی	گرادین صفر	گرادین صفر	خروجی
مقدار ثابت	مقدار ثابت	گرادین ثابت	سطح آزاد
تقارن	تقارن	تقارن	دیواره‌های جلو و عقب

خلاصه شده‌اند.

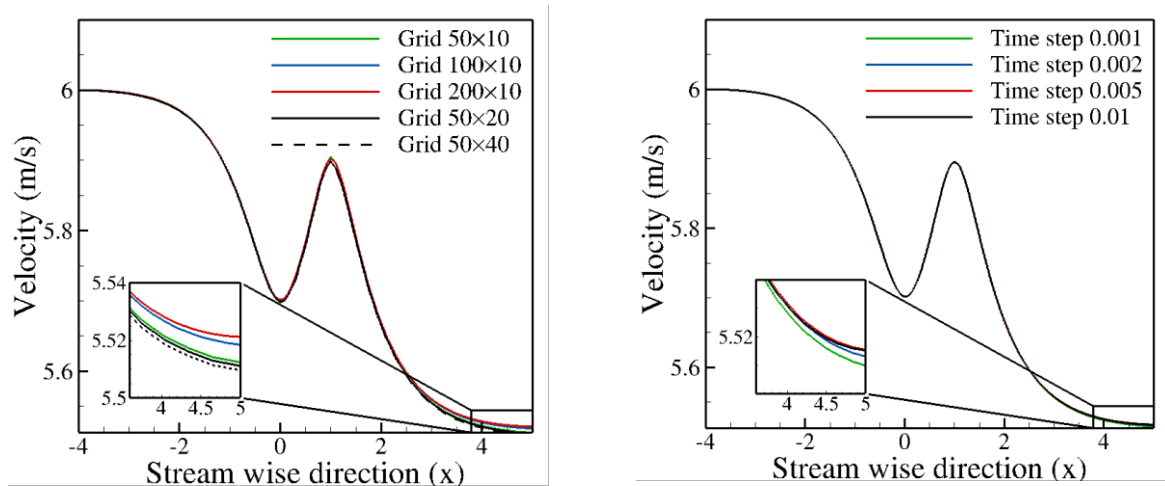
به منظور اعتبارسنجی اولیه نتایج، با تغییر شبکه‌های مکانی و زمانی، مقایسه‌ای میان نتایج صورت گرفته‌است. بدین منظور، علاوه بر شبکه اصلی که دارای ۵۰ سلول در راستای طولی و ۱۰ سلول در راستای عرضی است، ۲ شبکه یکی با ۱۰۰ سلول در راستای طولی و دیگری با ۲۰۰ سلول در راستای طولی تولید شده‌است. همچنین ۲ شبکه یکی با ۲۰ سلول در راستای عرض و دیگری با ۴۰ سلول در راستای عرضی تولید شده‌است. برای مطالعه شبکه زمانی نیز، ۴ گام زمانی ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۵ و ۰/۰۱ در نظر گرفته شده‌اند. مقایسه نتایج سرعت جریان حاصل از تغییر شبکه‌های مکانی و زمانی در قالب شکل ۳ و جدول ۳ ارائه شده‌اند:

همانطور که از شکل و نمودار بالا مشاهده می‌شود، الگوی جریان در تمام شبکه‌ها مشابه یکدیگر هستند، همچنین بیشترین اختلاف نمودارها که در مقطع انتهایی است، حداکثر به میزان ۰/۱۶ درصد می‌باشد. بنابراین شبکه مناسب و پیشنهادی مکانی را همان شبکه ۵۰ در ۱۰ و گام زمانی پیشنهادی

در خروجی نیز شروط مرزی گرادین فشار و گرادین سرعت صفر اعمال شده است. همچنین گام زمانی به اندازه ۰/۰۱ انتخاب شده است. در نهایت شتاب گرانش نیز ۹/۸۱ در جهت Y منفی تنظیم شده است.

شروط مرزی سرعت بر روی دیواره‌ها به صورت عدم لغزش، بر روی ورودی مقدار ثابت ۶ درجهت X ($\mathbf{v} = [6, 0, 0]$)، در خروجی گرادین صفر یا نیومن، بر سطح آزاد گرادین ثابت و بر دیواره‌های جلو و عقب به صورت متقارن تنظیم شده‌اند. شروط مرزی فشاری نیز برای دیواره‌ها، ورودی و خروجی گرادین صفر یا برون‌یابی به کمک سلول‌های داخلی، بر سطح آزاد مقدار مشخص و ثابت فشار نسبی صفر و بر روی دیواره‌های جلو و عقب شرط مرزی تقارن اعمال شده است. شروط مرزی جهت حرکت شبکه نیز بر روی دیواره‌ها و سطح آزاد به صورت مقدار ثابت، بر ورودی و خروجی به صورت لغزان^۱ و بر دیواره‌های جلو و عقب به صورت متقارن اعمال شده‌اند. شروط مرزی تنظیم شده برای جریان در عبور از سطح شیبدار در جدول ۲

1 Slip



شکل ۳. مقایسه نمودار سرعت و توزیع فشار در مقطع $y = 0.7$ (راست) مطالعه شبکه زمانی و چپ) مطالعه شبکه مکانی

Fig. 3. Comparison of velocity and pressure distribution graphs at the $y = 0.7$ cross-section: right) temporal grid study, and left) spatial grid study

جدول ۳. مقایسه نتایج میان شبکه‌های مختلف مکانی و زمانی

Table 3. Comparison of results for different spatial and temporal grids

درصد اختلاف	سرعت در مقطع آخر	گام زمانی	درصد اختلاف	سرعت در مقطع آخر	شبکه مکانی
۰/۰۰	۵/۵۱۴	۰/۰۰۱	۰/۱۶	۵/۵۱۲	۱۰ در ۵۰
۰/۰۳	۵/۵۱۶	۰/۰۰۲	۰/۰۵	۵/۵۱۸	۱۰ در ۱۰۰
۰/۰۵	۵/۵۱۷	۰/۰۰۵	۰/۰۰	۵/۵۲۱	۱۰ در ۲۰۰
۰/۰۵	۵/۵۱۷	۰/۰۱۰	۰/۰۵	۵/۵۱۲	۱۰ در ۵۰
			۰/۰۴	۵/۵۱۱	۲۰ در ۵۰
			۰/۰۰	۵/۵۰۹	۴۰ در ۵۰

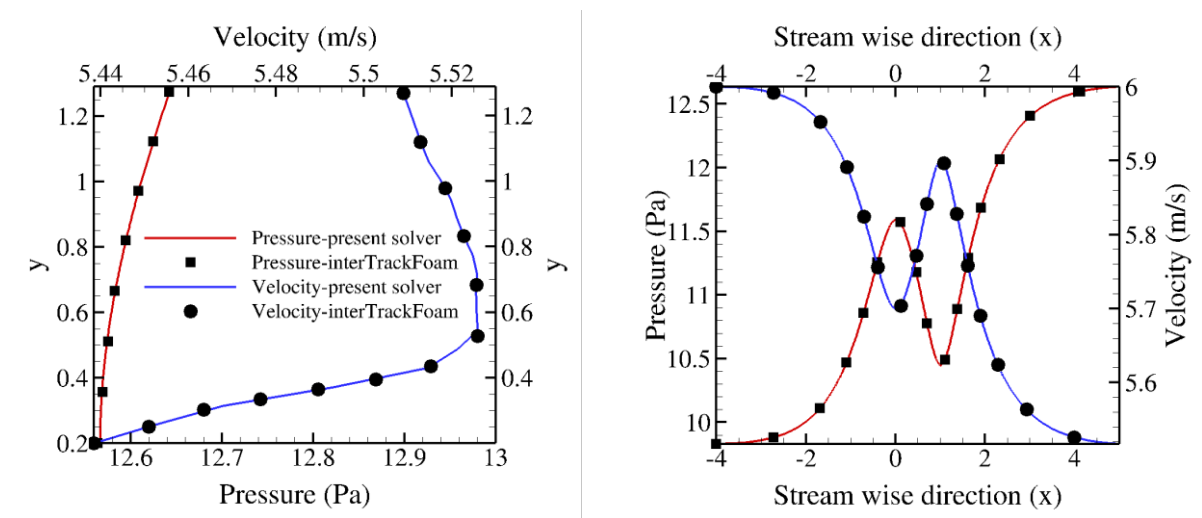
دانست که باتوجه به تعادل نیروها و توزیع فشار مناسب، این حرکت حاصل شده است. همچنین مقایسه میان توزیع سرعت و فشار در مقطع عرضی به فاصله ۴ و طولی در فاصله ۰/۷، در شکل ۵ ارائه شده است که مطابقت بسیار خوب نتایج را نشان می‌دهد. توزیع فشار و سرعت برای جریان در عبور از سطح شیبدار به صورت شکل ۶ ارائه شده است.

نیز ۰/۰۱ در نظر گرفته شده‌است. توجه شود که اندازه نهایی فاصله سطح آزاد از کف در مقطع خروجی را می‌توان به صورت تحلیلی نیز به دست آورد [۱۸]. شکل ۴ مقایسه‌ای است میان نتایج حلگر توسعه داده‌شده، حلگر پیش فرض فوم‌اکستند و نتایج موزافریجا و پریک [۱۸]. همانطور که مشخص است، مطابقت بسیار خوبی میان نتایج مشاهده می‌شود. علت اصلی حرکت سطح را می‌توان نیاز برای عبور مناسب دبی جرم



شکل ۴. مقایسه حالت نهایی سطح آزاد. چپ) حلگر پیش فرض (نقاط مشکی رنگ) و حلگر توسعه داده شده (خط قرمز رنگ)، راست) موزافریجا و پریک [۱۵]

Fig. 4. Comparison of the final position of the free-surface, Left) Default solver (black dots) and developed solver (red line), right) Muzafferija and Peric [15]



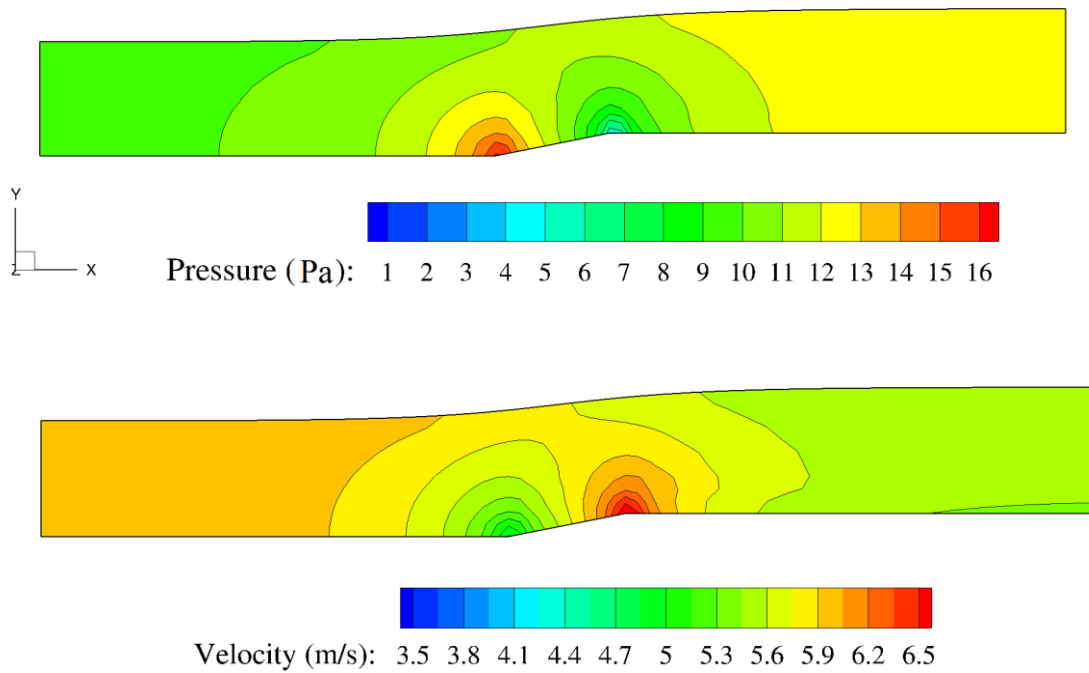
شکل ۵. مقایسه نمودار سرعت و توزیع فشار در مقطع: راست) $y = 0.7$ و چپ) $x = 4$

Fig. 5. Comparison of velocity and pressure distribution in: right) $y = 0.7$ and left) $x = 4$

تعیین تعداد تکرار به نحوی بوده که با حداقل تعداد تکرار، حل فیزیکی صحیحی ایجاد شود. به عبارت دیگر، با تنظیم کمتر تعداد تکرار، حل همگرا نمی شود یا حل صحیحی حاصل نمی گردد. تعداد تکرار حلقه خطی سازی در حلگر اینترترک فوم برابر ۳ و تعداد تکرار حلقه مربوط به معادله فشار ۵ تنظیم شده است. برای حلگر هم گیر نیز تعداد حلقه خطی سازی برابر ۲ قرار داده شده است. همچنین معیار همگرایی نیز عدد 10^{-8} در نظر گرفته شده است. رفتار همگرایی دو حلگر برای نمونه آزمایش جریان در عبور از سطح شیب دار برحسب زمان و همینطور برحسب تعداد تکرار به ترتیب در شکل های ۸ و ۹ نشان داده شده است.

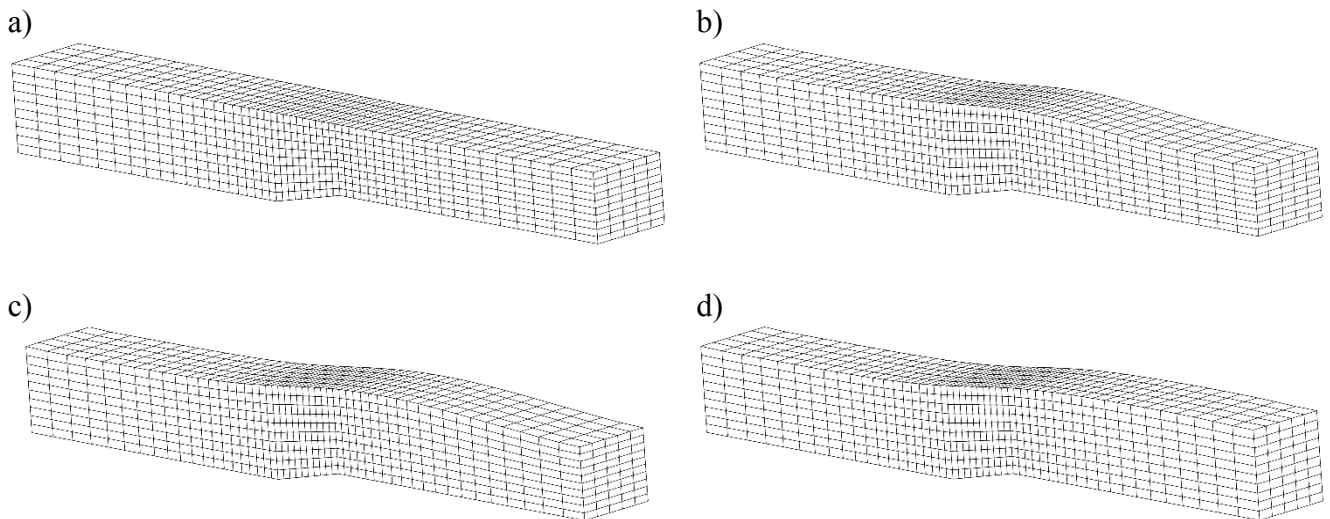
نقاط شکستگی به ترتیب شامل نقطه حداکثر فشار و حداقل فشاری می باشند. همچنین نقطه شکستگی اول دارای کمترین سرعت در دامنه حل است. روند رسیدن از حالت اولیه تا حالت نهایی سطح به صورت زیر (شکل ۷) نمایش داده شده است.

همانطور که مشاهده می شود، حرکت سه بعدی سطح آزاد باتوجه به وجود تقارن فیزیکی به خوبی انجام شده است. همچنین جابجایی نقاط داخلی شبکه نیز به صورت یکنواخت و با حل معادله لاپلاس صورت گرفته است. در نهایت، رفتار باقیمانده ها در دو حلگر مورد نظر برحسب زمان و همین طور برحسب تعداد تکرار در ادامه مورد ارزیابی قرار گرفته است. روند



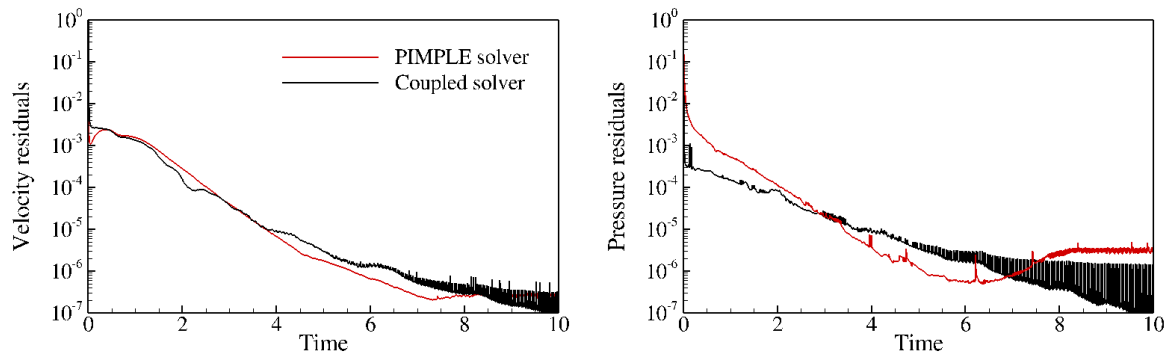
شکل ۶. توزیع سرعت و فشار برای جریان در عبور از سطح شیبدار (بالا) فشار، (پایین) سرعت

Fig. 6. Velocity and pressure distribution for flow over a ramp, up) pressure, down) velocity



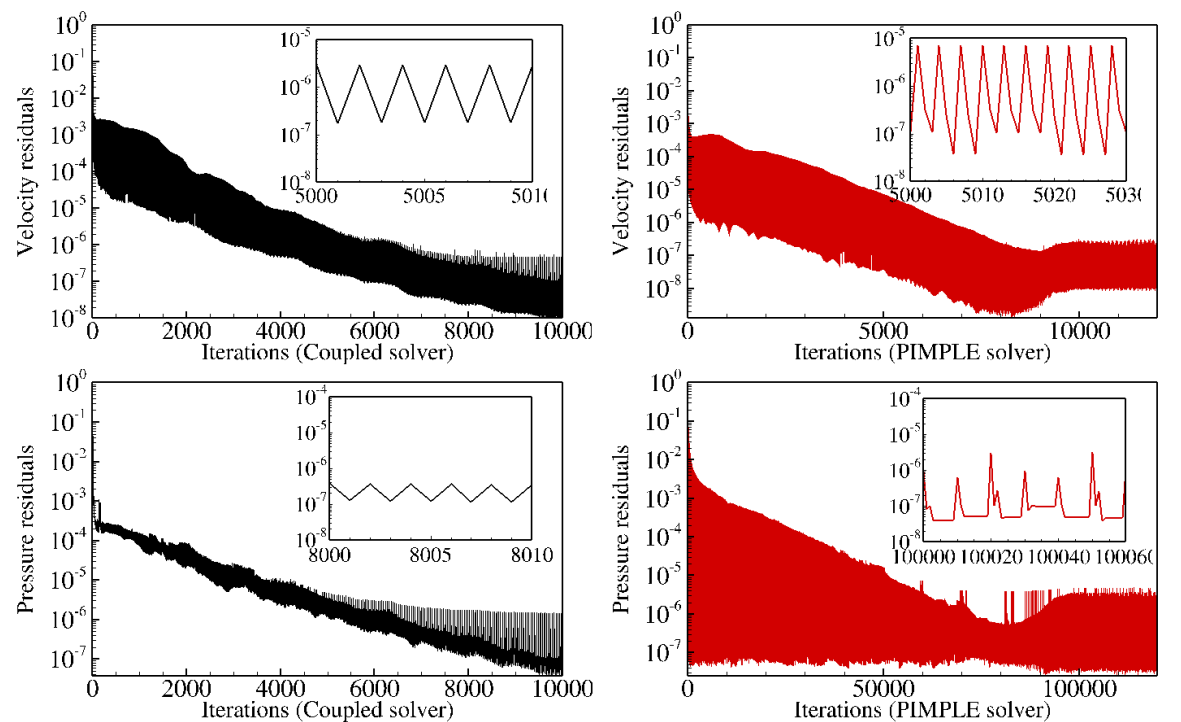
شکل ۷. روند حرکت سطح تا رسیدن به حالت نهایی در جریان در عبور از سطح شیبدار

Fig. 7. The surface moving process until reaching the final position in the flow over the ramp



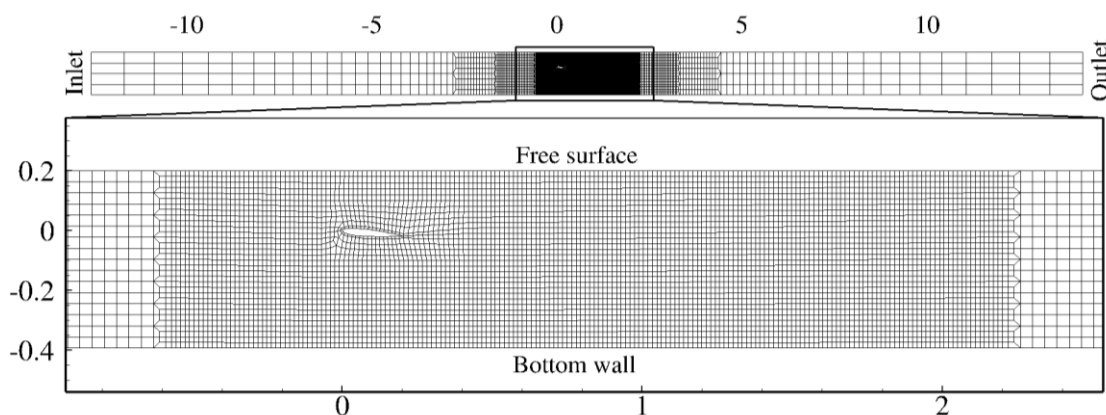
شکل ۸. مقایسه رفتار همگرایی برای نمونه آزمایش جریان در عبور از سطح شیبدار برحسب زمان

Fig. 8. Comparison of the convergence behavior for the ramp test case in terms of time



شکل ۹. مقایسه رفتار همگرایی برای نمونه آزمایش جریان در عبور از سطح شیبدار برحسب تعداد تکرار

Fig. 9. Comparison of the convergence behavior for the ramp test case in terms of iteration numbers



شکل ۱۰. نمایش دامنه حل، شبکه و مرزهای مسئله هایدروفویل

Fig. 10. The domain and boundaries for the hydrofoil test case

مرزی حاکم بر آن، به نوعی نماینده طیف گسترده‌ای از مسائل سطح آزاد سیال محسوب می‌شود. ورودی جریان به صورت سرعت ثابت با ضخامت عرضی ثابت اعمال شده که در واقع ثابت بودن میزان ورود جرم از ورودی را نشان می‌دهد. چگالی سیال ۱۰۰۰ و لزجت دینامیکی برابر با 0.001 در نظر گرفته شده است. شتاب گرانش نیز برابر با $9/81$ در جهت منفی y اعمال شده است.

شرط مرزی سرعت بر روی دیواره کف به صورت سرعت لغزش و بر روی ایرفویل به صورت عدم لغزش، روی سطح آزاد گرادیان ثابت، در خروجی گرادیان صفر و برای صفحات جلو و عقب به صورت متقارن اعمال شده‌اند. برای شروط فشار بر دیواره کف، روی ایرفویل، خروجی و ورودی به صورت گرادیان صفر ($\nabla p_i \cdot \mathbf{n} = 0$)، بر روی سطح آزاد به صورت مقدار مشخص ثابت صفر برای فشار نسبی و بر صفحات جلو و عقب به صورت متقارن اعمال شده است. همچنین اعمال شروط مرزی بر روی مقطع بال دوبعدی به صورت دیواره تنظیم شده است. به عبارت بهتر، سرعت صفر و گرادیان فشار صفر بر روی مقطع بال تنظیم شده است. شروط مرزی جهت اعمال برای معادله جابجایی شبکه نیز برای دیواره کف، ایرفویل و سطح آزاد به صورت مقدار ثابت و در سطوح ورودی و خروجی به صورت لغزشی اعمال شده است. شروط مرزی تنظیم شده برای نمونه آزمایش هایدروفویل در جدول ۴ خلاصه شده‌اند.

به منظور اعتبارسنجی اولیه نتایج، با تغییر شبکه‌های مکانی و اندازه دامنه حل، مقایسه‌ای میان نتایج صورت گرفته‌است. همچنین نتایج با نتایج

همانطور که از شکل ۹ مشخص است، تعداد تکرار معادله مربوط به فشار در حلگر پیش‌فرض تفاوت چشمگیری با حلگر هم‌گیر دارد. علت این تفاوت نیز مربوط به الگوریتم جدا از هم سرعت و فشار است. در واقع به نظر می‌رسد که معادله محدودکننده در حلگر پیش‌فرض برای جریان در عبور از سطح شیبدار، معادله فشار است. می‌توان گفت که عدم حل همزمان معادلات سرعت و فشار سبب می‌شود که نیاز به تکرار حل در معادله فشار جهت همگرایی آن به شدت افزایش یابد. تعداد تکرار معادله فشار در حلگر پیش‌فرض در حدود ۱۰ برابر حلگر هم‌گیر است. همچنین زمان حل در حلگر اینترترک فوم $59/42$ ثانیه و در حلگر هم‌گیر $39/79$ ثانیه بوده‌است. تمامی نتایج به کمک یک سیستم Intel Core™ i7-7700HQ 2.8GHz با مقدار 16 گیگابایت رم محاسبه شده‌اند.

۵-۲- هایدروفویل

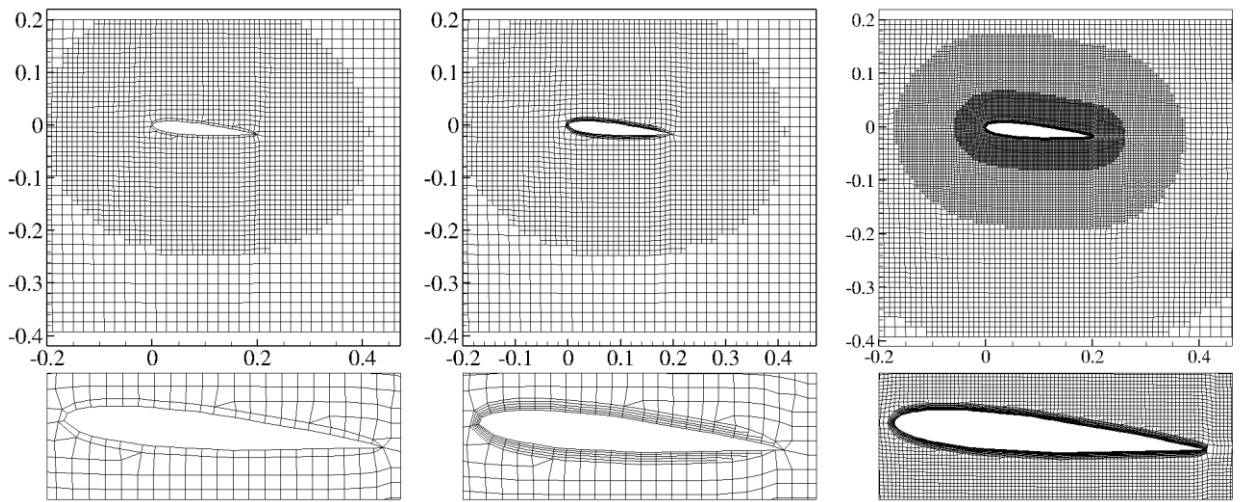
نمونه مورد آزمایش بعدی شامل یک دامنه نسبتاً طولانی از جریان با وجود قرارگیری یک مقطع دوبعدی بال در مسیر جریان است [۲۱]. مقطع بال بین دو مرز سطح آزاد و کف قرار دارد. شکل ۱۰ نمایش دامنه، شبکه و مرزهای مربوط به این نمونه آزمایش می‌باشد.

ابعاد دامنه برابر با $26/77$ در $0/6$ در $0/5$ است. قطر ایرفویل $0/2$ و مقطع آن یک ایرفویل متقارن با زاویه ۵ درجه است که نقطه لبه حمله آن در مختصات صفر و صفر طولی و عرضی قرار دارد. جزئیات مسئله در مراجع [۲۱ و ۲۲] ذکر شده‌اند. این نمونه آزمایش، به دلیل ساختار فیزیکی و شروط

جدول ۴. شروط مرزی برای نمونه آزمایش هایدروفویل

Table 4. The boundary conditions for hydrofoil test case

حرکت نقاط	فشار	سرعت	مرز
مقدار ثابت	گرادیان صفر	لغزشی	دیواره کف
لغزشی	گرادیان صفر	مقدار ثابت	ورودی
لغزشی	گرادیان صفر	گرادیان صفر	خروجی
مقدار ثابت	مقدار ثابت	گرادیان ثابت	سطح آزاد
تقارن	تقارن	تقارن	دیواره‌های جلو و عقب



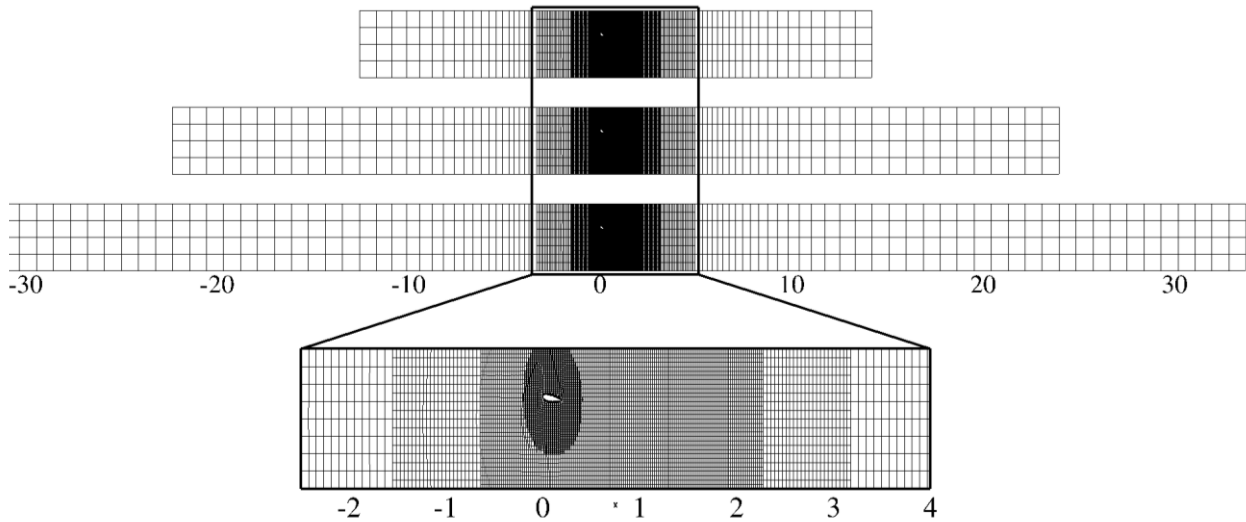
شکل ۱۱. سه شبکه مکانی با کیفیت متفاوت اطراف ایرفویل جهت مطالعه اثر آن بر مقادیر روی سطح آزاد

Fig. 11. Three spatial grids with different qualities around the airfoil to study their effect on the values on the free-surface

به میزان $9/76$ و $19/52$ افزایش طول در راستای طولی داده شده‌اند. در واقع با ثابت نگه‌داشتن ناحیه اطراف ایرفویل و میانی دامنه، صرفاً طول ابتدا و انتهای دامنه زیاده‌تر شده است. شکل ۱۱ نمایش سه کیفیت شبکه مختلف جهت مطالعه شبکه و اثر آن بر دقت مقادیر روی سطح آزاد است. همچنین سه شبکه جهت تولید شده جهت مقایسه طول دامنه محاسباتی نیز به صورت شکل ۱۲ ارائه شده است.

نتایج حاصل از مقایسه سه شبکه با کیفیت‌های مختلف مکانی، در شکل ۱۳ به ترتیب برای امواج روی سطح آزاد، متغیر سرعت و متغیر فشار ارائه

عددی و تجربی در مراجع [۲۲ و ۲۳] نیز مقایسه شده‌اند. بدین منظور، تعداد سه شبکه با بهبود کیفیت شبکه اطراف سطح مقطع ایرفویل و نواحی اطراف آن، و سه دامنه با طول مختلف تولید شده‌اند. شبکه‌های تولید شده با اصلاح کیفیت، شامل شبکه با تعداد ۷۲۰۰ سلول، ۸۱۰۰ سلول و ۱۹۸۰۰ سلول هستند که در شبکه اول، دوم و سوم گفته شده به ترتیب ۱، ۵ و ۱۰ ردیف سلول مرزی نزدیک ایرفویل تولید شده است. همچنین متناسب با این بهبود کیفیت، نواحی اطراف ایرفویل نیز از نظر کیفیت شبکه، اصلاح شده‌اند. همچنین به منظور مطالعه طول دامنه، دو دامنه دیگر به ترتیب از هر طرف



شکل ۱۲. سه شبکه با طول متفاوت جهت مطالعه اثر اندازه طول دامنه

Fig. 12. Three grids with different lengths to study the effect of domain length

امواج ایجاد شده بر روی سطح آزاد را به همراه توزیع فشار و سرعت نمایش داده است.

مقایسه میان نتایج حلگر پیش فرض اینترترک فوم و حلگر هم گیر توسعه داده شده به صورت مقایسه میان امواج سطح آزاد و همچنین مقایسه توزیع خواص جریان در قالب شکل ۱۶ ارائه شده است. نتایج شکل ۱۶ نشان از مطابقت تقریباً کامل نتایج حاصل از دو حلگر دارد. مقدار فشار از میزان حدوداً ۱۹۸۰ تا ۲۰۹۰ از کف تا سطح در مقطع با فاصله یک قطر عقب تر از ایرفویل، تغییر می کند. همچنین سرعت از میزان تقریبی ۰/۸ تا ۰/۷۳ متغیر است. امواج سطح سیال بلافاصله بعد از ایرفویل به صورت شکل ۱۷ نمایش داده شده است.

همانطور که دیده می شود، مطابقت کاملاً مناسبی میان نتایج حاصل از حلگر پیش فرض فوم اکستند و حلگر هم گیر توسعه داده شده وجود دارد. در واقع می توان ادعا نمود که با شرایط مرزی و کلاس های یکسان برای جابجایی سطح، عملاً سطح سیال در حالت نهایی مطابق با سطح سیال حاصل از حل با حلگر پیش فرض می گردد.

برای نمونه آزمایش های دروفویل نیز رفتار باقیمانده ها در دو حلگر مورد نظر برحسب زمان و همین طور برحسب تعداد تکرار مورد ارزیابی قرار

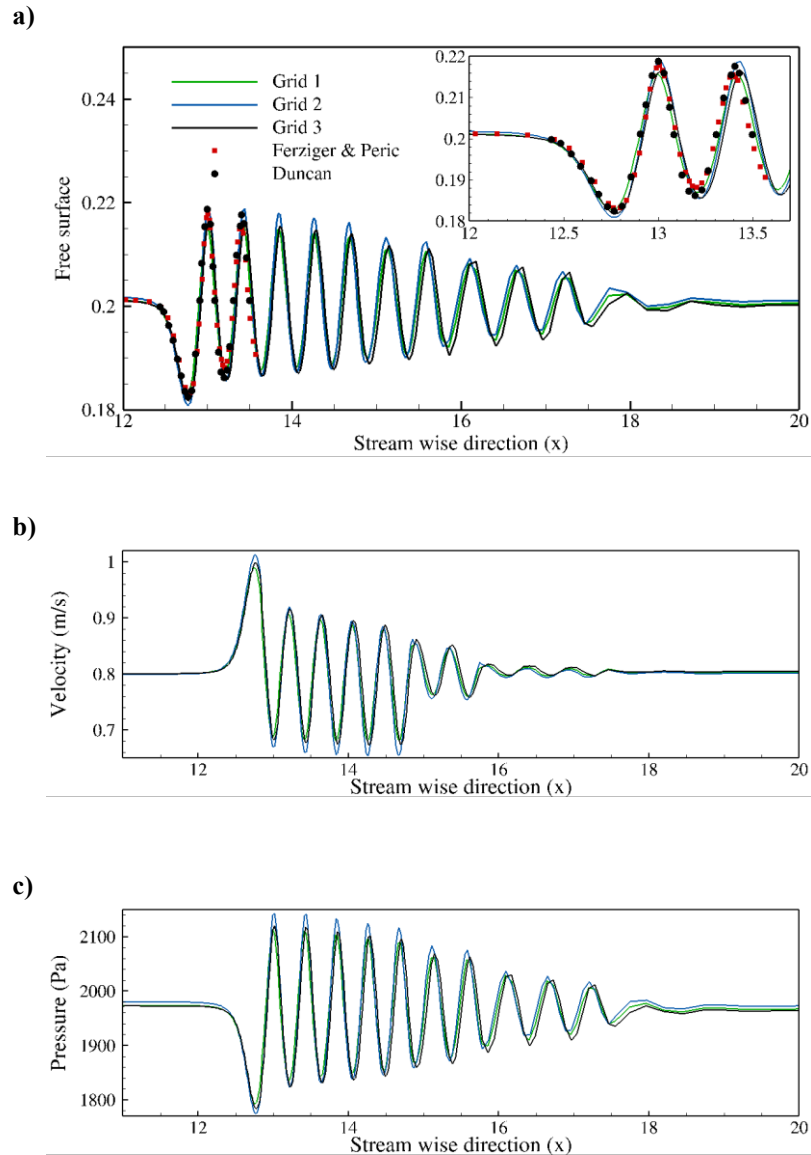
شده است.

همچنین نتایج مربوط به سه شبکه با طول دامنه متفاوت نیز در شکل ۱۴ ارائه شده است.

همانطور که از نتایج شبکه های مختلف مکانی واضح است، مطابقت الگوها میان نتایج با نتایج عددی و تجربی گزارش شده مشاهده می شود. علاوه بر الگوی یکسان نتایج، سه کیفیت مختلف شبکه حول ایرفویل نیز اثر چندانی بر الگوی متغیرها بر روی سطح آزاد ندارند. همینطور افزایش طول دامنه نیز تغییر چندانی در الگوی امواج سطح ایجاد نکرده است. به منظور بررسی جزئی تر و عددی نتایج نیز،

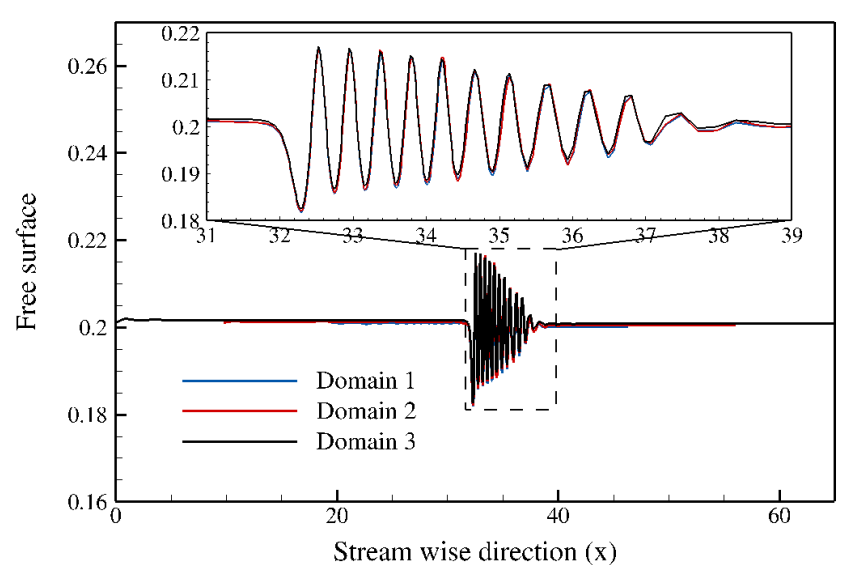
باتوجه به نتایج، شبکه با کمترین طول دامنه و همینطور شبکه با کمترین تعداد سلول یعنی شبکه ۷۲۰۰ سلولی به عنوان شبکه انتخابی پیشنهاد می شود. به عبارت دیگر، علاوه بر حفظ الگوی نتایج در شبکه ها، دقت حدود ۱ درصد که می تواند در کار ما دقت قابل قبولی باشد، با شبکه اول قابل دستیابی می باشد.

توزیع فشار ناشی از حرکت جریان در عبور از مقطع بال، سبب ایجاد امواج و انتشار آنها به بر روی پایین دست سطح آزاد می گردد. شکل ۱۵



شکل ۱۳. مقایسه نتایج برای سه شبکه با کیفیت متفاوت و همچنین مقایسه امواج سطح آزاد با نتایج عددی و تجربی از مراجع [۲۲ و ۲۳]

Fig. 13. Comparison of results for three grids with different resolutions and also comparison of free-surface waves with numerical and experimental results of [22, 23]



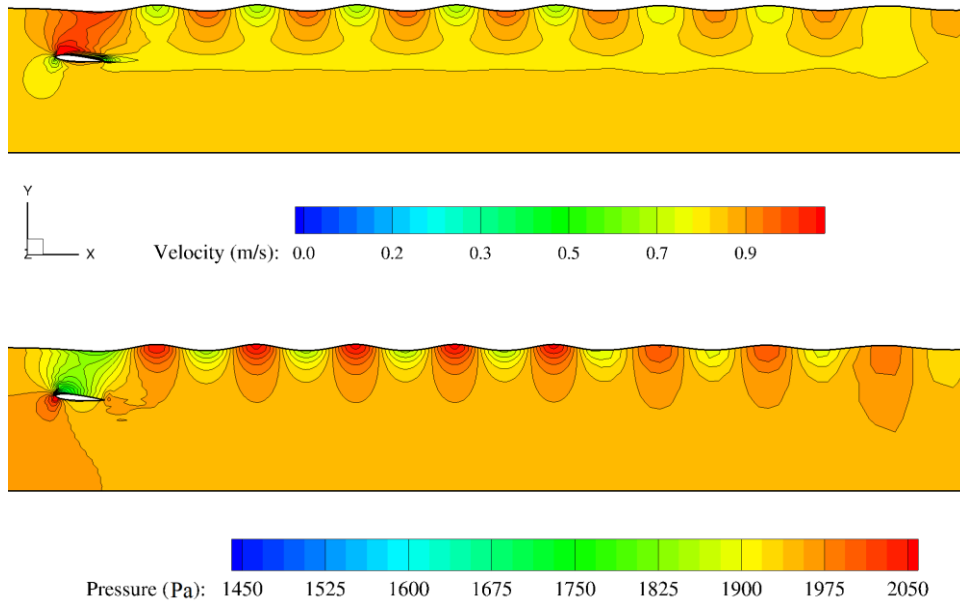
شکل ۱۴. مقایسه نتایج برای سه شبکه با سه طول متفاوت

Fig. 14. Comparison of results for three grids with three different lengths

جدول ۵. مقایسه نتایج میان شبکه‌های مختلف با کیفیت شبکه متفاوت و همینطور طول دامنه متفاوت

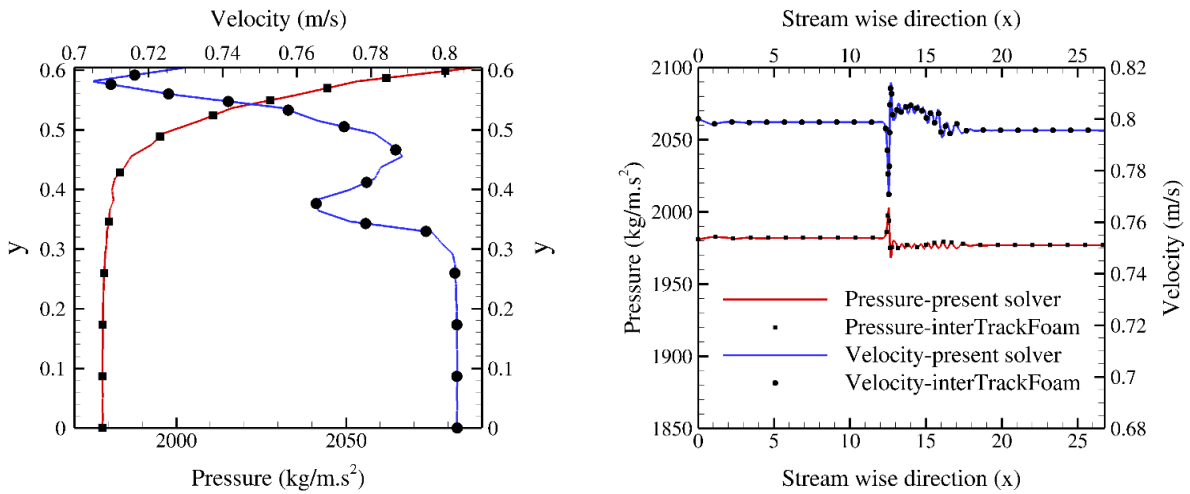
Table 5. Comparison of results between different grids with different qualities and also different domain lengths

درصد اختلاف	اندازه موج در قله آخر	طول دامنه	درصد اختلاف	اندازه موج در قله اول	کیفیت شبکه
۰/۹۳	۰/۲۰۰۳	۲۶/۷۷	۰/۱۶	۰/۱۸۴۳	شبکه ۱: ۷۲۰۰ سلول
۰/۸۴	۰/۲۰۰۵	۴۶/۲۹	۰/۵۹	۰/۱۸۲۹	شبکه ۲: ۸۱۰۰ سلول
۰/۰۰	۰/۲۰۲۲	۶۵/۸۱	۰/۱۱	۰/۱۸۳۸	شبکه ۳: ۱۹۸۰۰ سلول
			۰/۴۳	۰/۱۸۴۸	فرزیگر و پریک [۱۹]
			۰/۰۰	۰/۱۸۴۰	دونکان [۲۰]



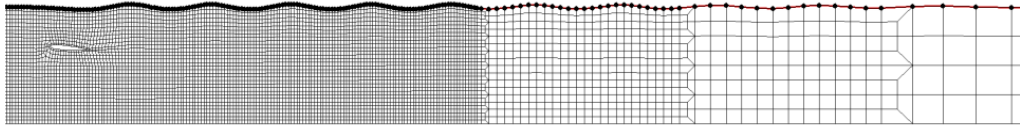
شکل ۱۵. امواج سطح آزاد و توزیع فشار و سرعت، بالا) سرعت، و پایین) فشار

Fig. 15. Free-surface waves and velocity and pressure distribution, up) velocity, and down) pressure



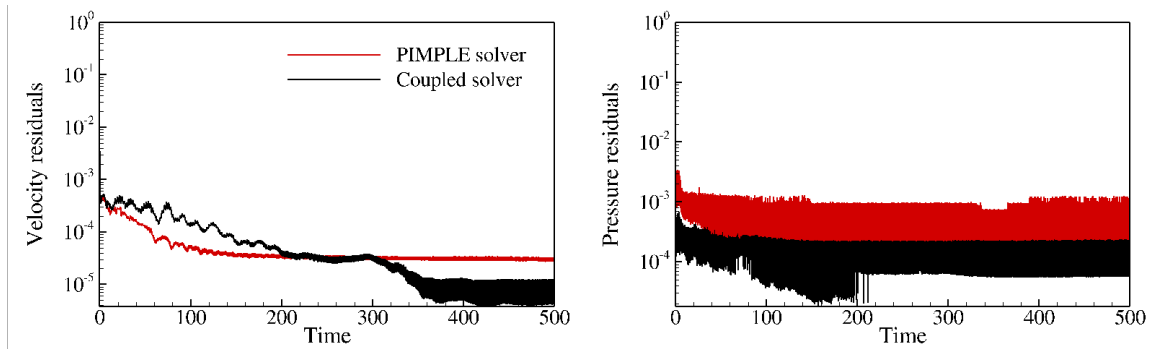
شکل ۱۶. مقایسه توزیع فشار و سرعت برای دو حلگر پیش فرض و توسعه داده شده (چپ) فاصله یک قطر عقب تر از ایرفویل، راست) در فاصله میانه عرض

Fig. 16. Comparison of pressure and velocity distributions for two default and developed solvers, left) one diameter distance behind the airfoil, and right) at mid-width distance



شکل ۱۷. امواج شکل گرفته بر روی سطح آزاد سیال بعد از ایرفویل، نقاط مشکی رنگ برای حلگر پیش فرض و خط قرمز رنگ برای حلگر توسعه داده شده

Fig. 17. Waves formed on the free-surface of the fluid behind the airfoil, black dots for the default solver and red line for the developed solver



شکل ۱۸. مقایسه رفتار همگرایی برای نمونه آزمایش هایدروفویل برحسب زمان

Fig. 18. Comparison of the convergence behavior for the hydrofoil test case in terms of time

هم‌گیر است. زمان حل نمونه آزمایش هایدروفویل در حلگر اینترترک فوم ۱۰/۱۵ ساعت و در حلگر هم‌گیر ۲۲/۳ ساعت بوده است.

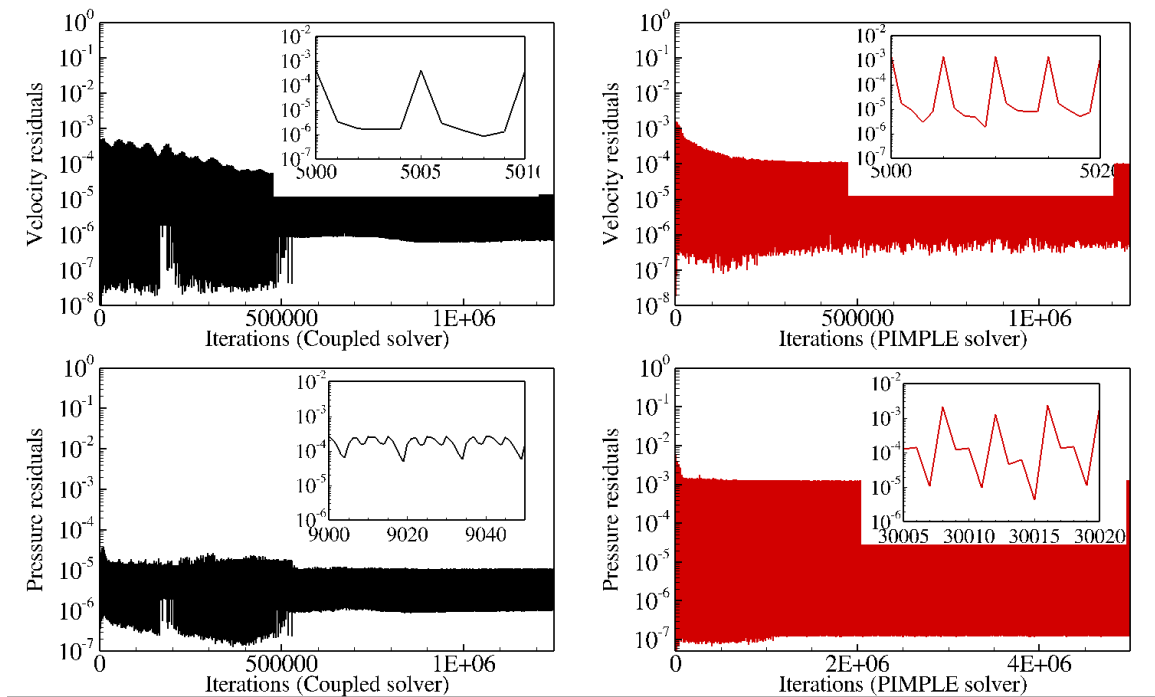
۵-۳- مخزن سه بعدی

این نمونه آزمایش شامل جریان درون یک مخزن مربع شکل سه بعدی می‌شود. هندسه، شبکه و مرزهای مختلف این مسئله در شکل ۲۰ نمایش داده شده است.

ابعاد مخزن ۰/۰۵ در ۰/۰۵ در ۰/۰۳ به ترتیب در سه راستای X، Y و Z می‌باشد. سرعت یکنواخت ۰/۲۵ در ورودی، شتاب گرانش ۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه در راستای محور Z و جهت منفی و مقدار فشار در خروجی، صفر تنظیم شده‌اند. همچنین بر روی سطح آزاد فشار صفر اعمال شده

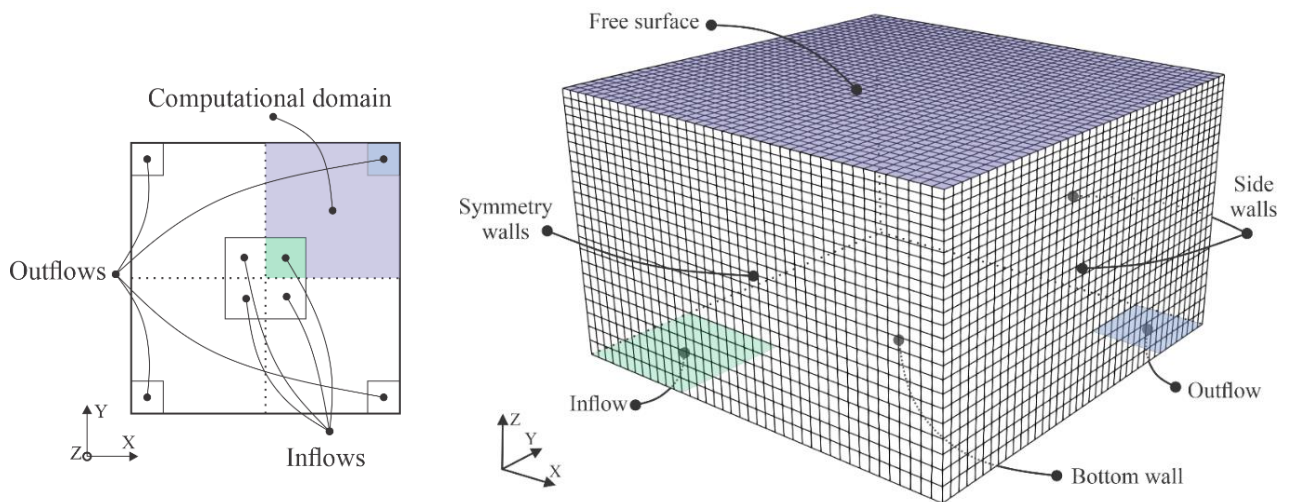
گرفته است. تعداد تکرار حلقه خطی سازی در حلگر اینترترک فوم برابر ۵ و تعداد تکرار حلقه مربوط به معادله فشار ۲ تنظیم شده است. برای حلگر هم‌گیر نیز تعداد حلقه خطی سازی برابر ۵ قرار داده شده است. همچنین معیار همگرایی نیز عدد 10^{-8} در نظر گرفته شده است. رفتار همگرایی دو حلگر برای نمونه آزمایش هایدروفویل برحسب زمان و هم‌بند برحسب تعداد تکرار به ترتیب در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ نشان داده شده است.

توجه داریم که بخش نوسانی ابتدایی در شکل ۱۸ به سبب شکل‌گیری امواج سطح آزاد تا آخرین موج است که پس از طی این مرحله سطح آزاد تغییر چشمگیری از خود نشان نمی‌دهد. همانطور که از شکل ۱۹ مشخص است، تعداد تکرار معادله مربوط به فشار در حلگر پیش فرض در این نمونه آزمایش نیز تفاوت چشمگیری با حلگر هم‌گیر دارد و چیزی در حدود ۴ برابر در حلگر



شکل ۱۹. مقایسه رفتار همگرایی برای نمونه آزمایش هایدروفویل برحسب تعداد تکرار

Fig. 19. Comparison of the convergence behavior for the hydrofoil test case in terms of iteration numbers



شکل ۲۰. دامنه، شبکه و مرزهای جریان درون مخزن سه بعدی

Fig. 20. The domain, grid and boundaries of the flow inside the 3D tank

جدول ۶. شروط مرزی برای نمونه آزمایش مخزن سه‌بعدی

Table 6. The boundary conditions for the 3D tank test case

حرکت نقاط	فشار	سرعت	مرز
مقدار ثابت	گرادیان صفر	مقدار ثابت	دیواره کف
مقدار ثابت	گرادیان صفر	مقدار ثابت	ورودی
مقدار ثابت	مقدار ثابت	گرادیان صفر	خروجی
مقدار ثابت	مقدار ثابت	گرادیان ثابت	سطح آزاد
لغزشی	گرادیان صفر	لغزشی	دیواره‌های جانبی
تقارن	تقارن	تقارن	دیواره‌های جلو و عقب

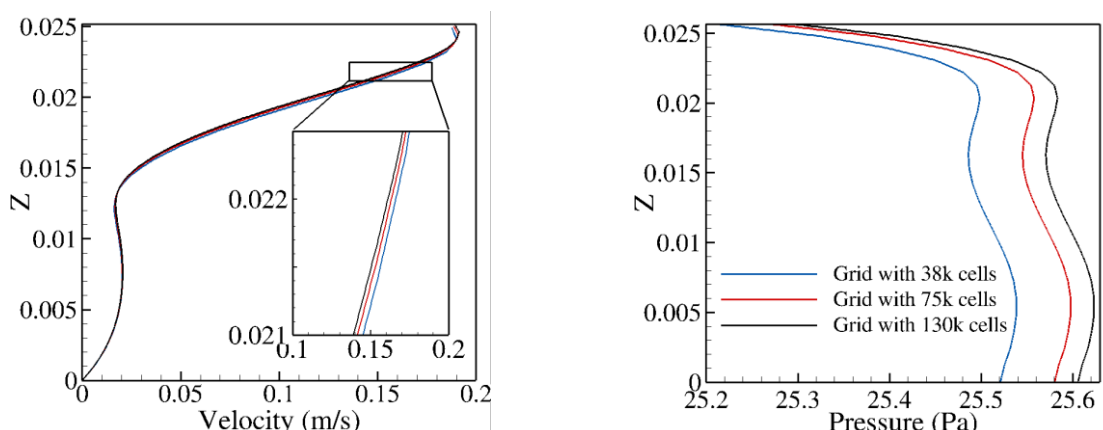
پایا بودن آن، تا حد امکان گام زمانی را به حد بالای آن نزدیک می‌نماییم. در واقع بعد از قرارگیری گام زمانی در محدوده مناسب همگرایی، به منظور کاهش تعداد تکرار و رسیدن به پاسخ نهایی، این کار صورت می‌گیرد. گام زمانی پیشنهاد شده یعنی $0/001$ برای همه نمونه‌ها اعمال می‌گردد. مقایسه نتایج سرعت جریان حاصل از تغییر شبکه‌های مکانی در قالب شکل ۲۱ و جدول ۷ ارائه شده‌اند:

همانطور که از شکل و نمودار بالا مشاهده می‌شود، الگوی جریان در تمام شبکه‌ها مشابه یکدیگر هستند، همچنین بیشترین اختلاف نمودارها در ارتفاع نزدیک به $0/02$ ، حداکثر به میزان $4/38$ درصد می‌باشد. بنابراین شبکه با تعداد ۳۸ هزار سلول می‌تواند به عنوان شبکه‌ای قابل قبول در نظر گرفته شود. به طور کلی جریان درون مخزن سه‌بعدی شامل ساختارهای مختلف جریان در مجاورت ورودی و خروجی و همینطور در بخش میانی است که در شکل ۲۲ نمایش داده شده‌اند.

باتوجه به جهت جریان ورودی، جریان در ابتدا به سمت بالا سرعت می‌گیرد و با در نظر گرفتن تمایل آن برای خروج از بخش خروجی، ناحیه‌ای چرخشی را از ورود به سمت خروج طی می‌نماید. علاوه بر نواحی پرسرعت ورودی و خروجی، ناحیه حلقوی میانی نیز قابل مشاهده می‌باشد. ناحیه مقابل با ناحیه خروجی بر روی سطح آزاد، دارای بیشترین فشار است که حرکت سطح آزاد به سمت بالا نیز متأثر از همین بخش پرفشار می‌باشد. می‌توان گفت که بهترین راه حل فیزیک سیال برای خارج شدن از بخش خروجی،

است. لزجت دینامیکی $0/01$ و چگالی سیال 100 در نظر گرفته شده است. موقعیت اولیه سطح آزاد در فاصله $0/3$ از کف است. به دلیل تقارن هندسی، صرفاً یک‌چهارم از مخزن مدل شده است. باتوجه به مرجع [۱۸]، مجموعاً 38400 سلول برای این هندسه ایجاد شده که به ترتیب 40 عدد در راستای X ، 40 عدد در راستای Y و 24 عدد سلول نیز در راستای Z در نظر گرفته شده است. گام زمانی $0/001$ باتوجه به مرجع [۱۸] اعمال شده است. شروط مرزی سرعت بر روی دیواره‌های جانبی به صورت لغزشی، بر روی دیواره‌های کف و ورودی به ترتیب به صورت مقدار ثابت صفر و $0/25$ در راستای Z ($\mathbf{v} = [0, 0, 0/25]$)، بر سطح آزاد گرادیان ثابت، در خروجی گرادیان صفر و دیگر دیواره‌ها به صورت متقارن اعمال شده است. همچنین شروط مرزی فشاری بر دیواره‌های جانبی، کف و ورودی به صورت گرادیان صفر، بر سطح آزاد و خروجی مقدار ثابت صفر برای فشار نسبی و دیواره‌های دیگر شرط تقارن اعمال شده است. در نهایت شروط مرزی معادله جابجایی نقاط جهت حرکت نقاط مرزی عبارت است از: بر روی دیواره‌های جانبی شرط لغزشی، دیواره‌های ورودی، خروجی، کف و سطح آزاد شرط مقدار ثابت و دیگر دیواره‌ها شرط تقارن اعمال شده است. شروط مرزی تنظیم شده برای نمونه آزمایش مخزن سه‌بعدی در جدول ۶ خلاصه شده‌اند.

به منظور اعتبارسنجی اولیه نتایج، با تغییر شبکه مکانی، مقایسه‌ای میان نتایج صورت گرفته‌است. بدین منظور، سه شبکه به ترتیب با ۳۸ هزار، ۷۵ هزار و ۱۳۰ هزار سلول تولید شده است. همچنین به دلیل فیزیک حاکم و



شکل ۲۱. مقایسه نمودار سرعت و توزیع فشار در مقطع $y = +0.7$ (راست) فشار و چپ) سرعت

Fig. 21. Comparison of velocity and pressure distribution in $y=0.7$ section: right) pressure, and left) velocity

جدول ۷. مقایسه نتایج میان شبکه‌های مختلف مکانی برای نمونه آزمایش مخزن سه‌بعدی

Table 7. Comparison of results for different spatial grids for 3D tank test case

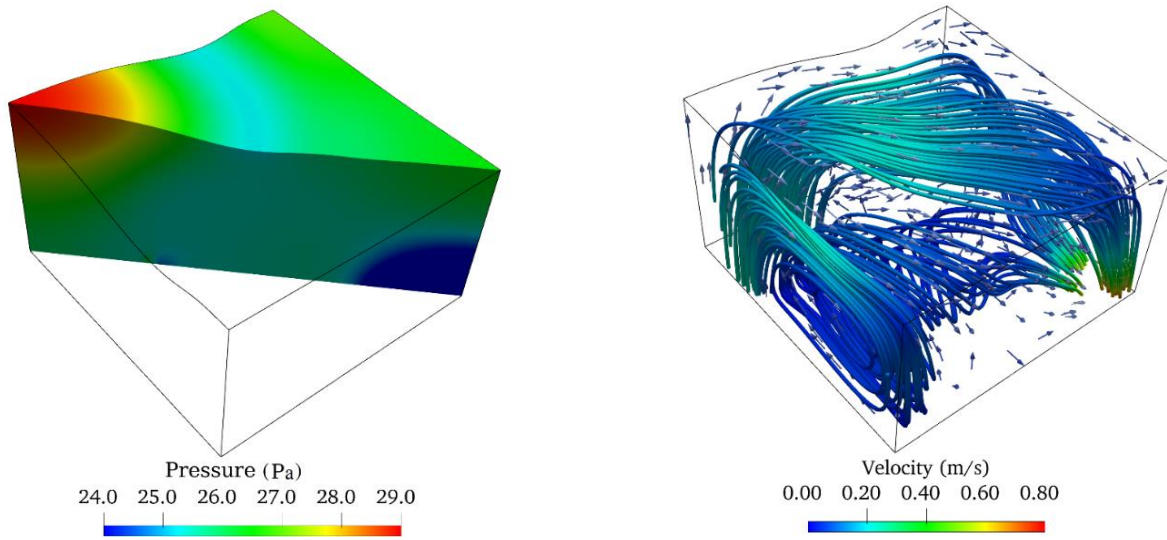
درصد اختلاف	سرعت در مقطع با بیشترین اخلاف	شبکه مکانی
۴/۳۸	۰/۱۲۰	۳۸ هزار سلول
۲/۶۱	۰/۱۱۸	۷۵ هزار سلول
۰/۰۰	۰/۱۱۵	۱۳۰ هزار سلول

مربوط به شکل ۲۴ نمایش داده شده است. در این نمونه آزمایش برخلاف مسئله تالطم سیال [۲۴]، سطح آزاد بعد از مدتی به موقعیتی ثابت و بدون تغییر می‌رسد.

همانطور که مشاهده می‌شود، تا رسیدن به حالت نهایی سطح آزاد، امواج رفت و برگشتی به صورت پی‌درپی ایجاد می‌شوند و به دو سمت ناحیه بالایی ورودی و خروجی جریان در حرکت هستند. در صورتی که هر چهار قطاع از مخزن اصلی را کنار هم داشته باشیم، یک ناحیه گمبیدی شکل در وسط مخزن شکل می‌گیرد که همان ناحیه حداکثر فشاری است. حرکت سه‌بعدی سطح باتوجه به الگوریتم موزافریجا و پریک و همینطور جابجایی

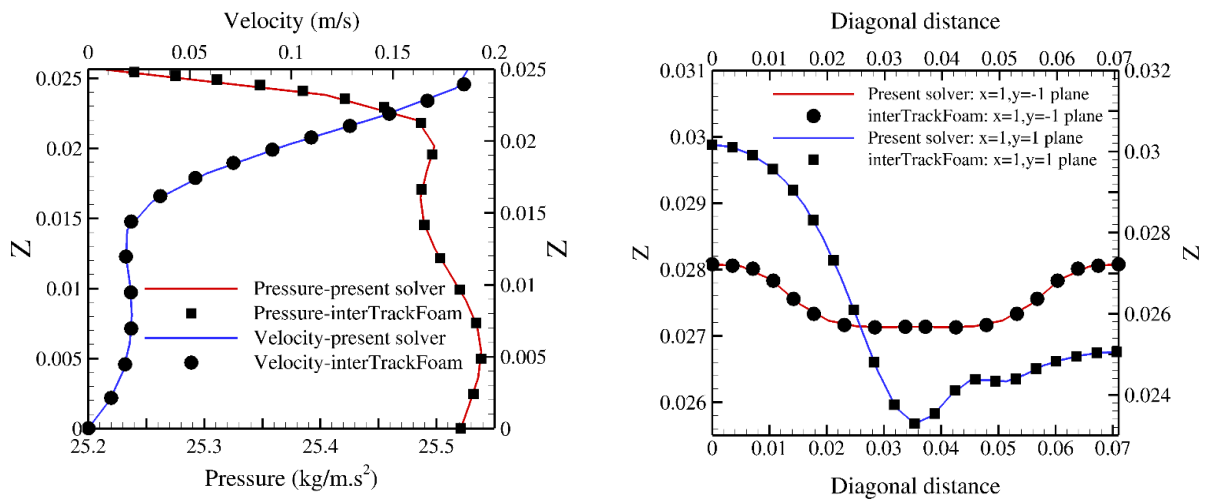
در واقع حرکت منحنی شکل سه‌بعدی از بخش‌های میانی و کناری به سمت مرز خروجی است که سبب ایجاد بالازدگی در ناحیه مرکزی مخزن شده است. مقایسه میان شکل سطح سیال و همچنین متغیرهای جریان بر روی خط میانی در شکل ۲۳ ارائه شده است.

مطابقت مناسب نتایج حاصل از دو حلگر هم در توزیع فشار و سرعت و هم در شکل سطح سیال در دو مقطع موردنظر به وضوح قابل مشاهده است. فشار در خط میانی از میزان $25/2$ در کف تا مقدار تقریبی $25/54$ در سطح آزاد متغیر است در حالی که سرعت از مقدار $0/19$ در سطح تا 0 در کف تغییر می‌کند. همچنین روند رسیدن سطح سیال به حالت نهایی در قالب تصاویر



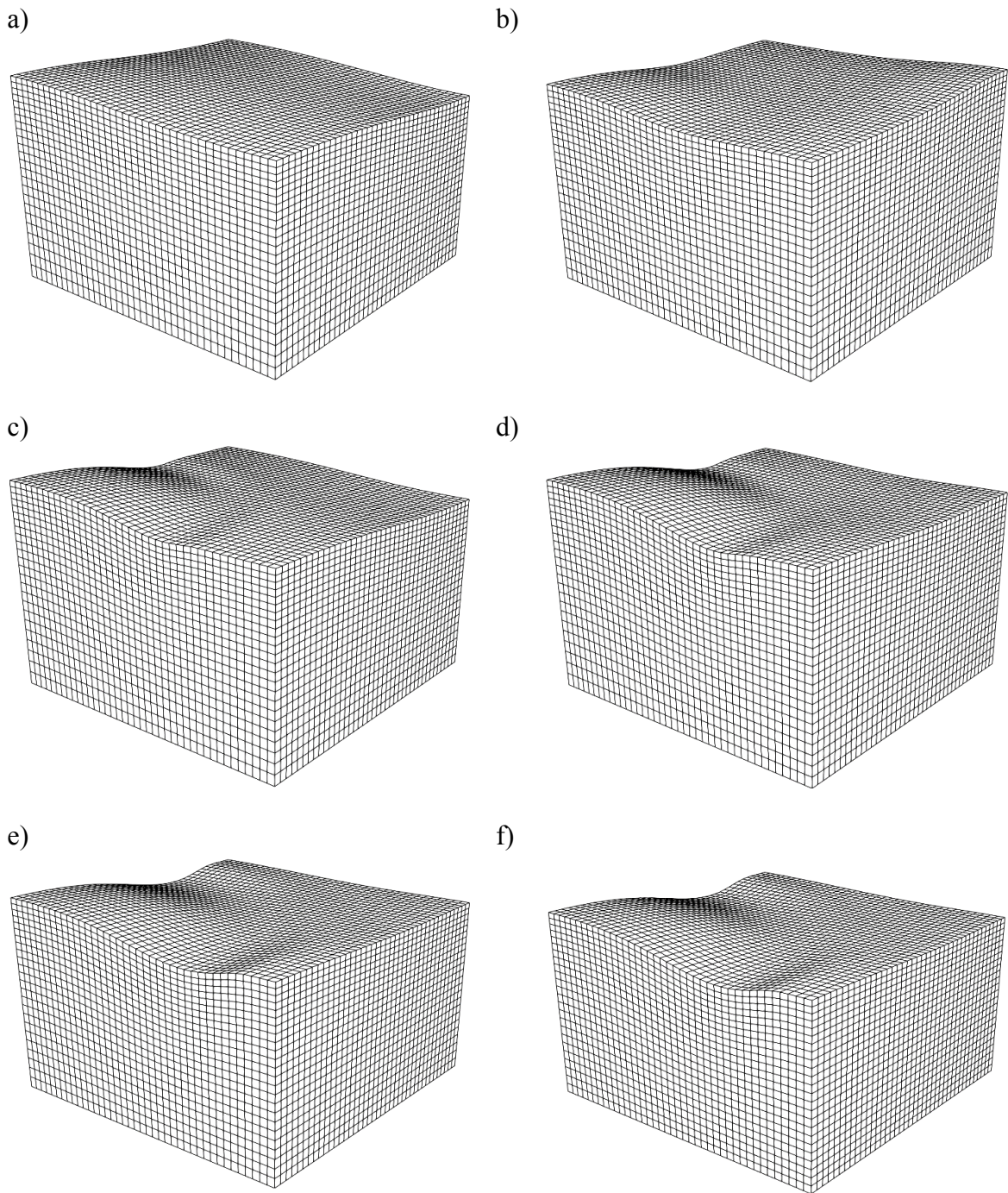
شکل ۲۲. ساختار جریان و فشار در نواحی مختلف مخزن سه‌بعدی، راست) سرعت و چپ) فشار

Fig. 22. Comparison of velocity and pressure distribution in $y=0.7$ section: right) pressure, and left) velocity Flow and pressure structure in different areas of the 3D tank, right) velocity and left) pressure



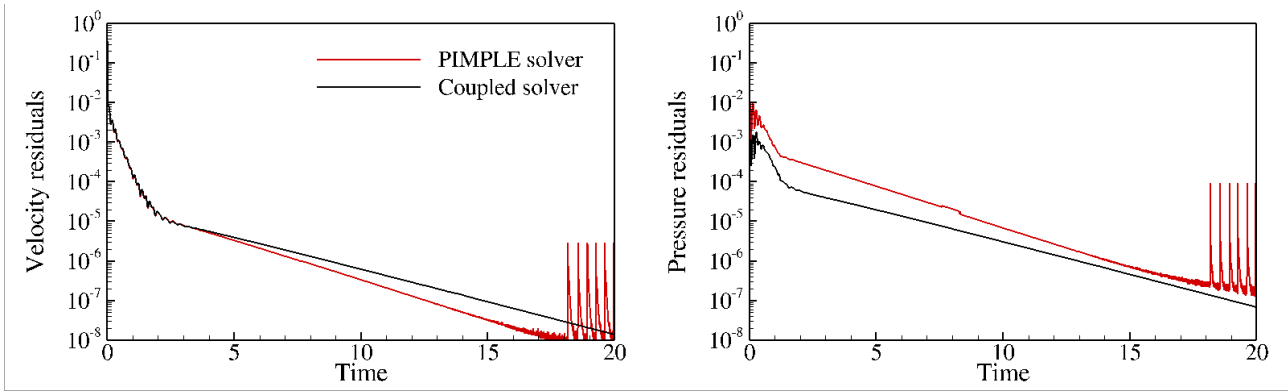
شکل ۲۳. مقایسه موقعیت سطح سیال در دو صفحه مایل و هم‌بند نمودار سرعت و فشار در خط میانی برای دو حلگر مورد نظر، راست) سطح آزاد و چپ) نمودار سرعت و فشار

Fig. 23. Comparison of the fluid surface position in two inclined planes as well as the velocity and pressure distribution in the mid-line for two aforementioned solvers, right) free-surface, and left) velocity and pressure



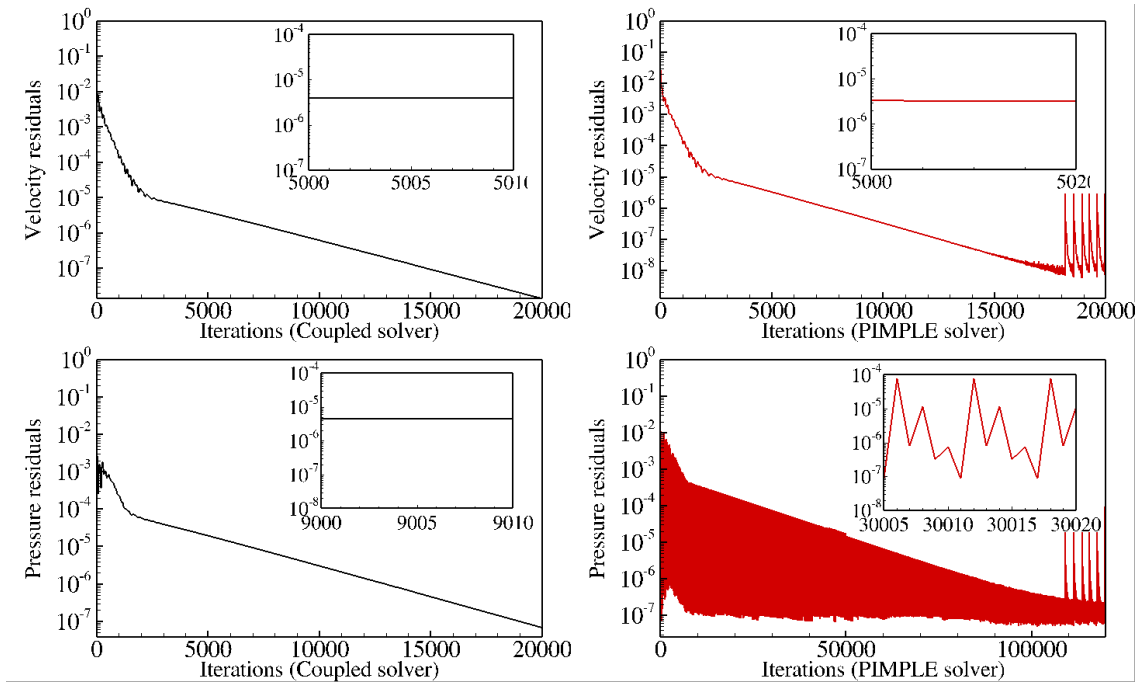
شکل ۲۴. مراحل رسیدن سطح آزاد از حالت اولیه به حالت نهایی

Fig. 24. The steps of reaching the free-surface from the initial to the final position



شکل ۲۵. مقایسه رفتار همگرایی برای نمونه آزمایش مخزن سه بعدی برحسب زمان

Fig. 25. Comparison of the convergence behavior for the 3D tank test case in terms of time



شکل ۲۵. مقایسه رفتار همگرایی برای نمونه آزمایش مخزن سه بعدی برحسب تعداد تکرار

Fig. 25. Comparison of the convergence behavior for the 3D tank test case in terms of iteration numbers

شده است. برای حلگر هم‌گیر نیز تعداد حلقه خطی‌سازی برابر ۱ قرار داده شده است. همچنین معیار همگرایی نیز عدد 10^{-8} در نظر گرفته شده است. رفتار همگرایی دو حلگر برای نمونه آزمایش مخزن سه بعدی برحسب زمان و همین‌طور برحسب تعداد تکرار به ترتیب در شکل‌های ۲۵ و ۲۶ نشان داده شده است.

در این نمونه آزمایش نیز همچون دو نمونه قبل نیز تفاوت اصلی در تعداد

نقاط داخلی شبکه با حل معادله لاپلاس و توزیع ضریب پخش یکنواخت صورت گرفته است.

همچون دو نمونه آزمایش قبلی، برای نمونه آزمایش مخزن سه بعدی نیز رفتار باقیمانده‌ها در دو حلگر موردنظر برحسب زمان و همین‌طور برحسب تعداد تکرار مورد ارزیابی قرار گرفته است. تعداد تکرار حلقه خطی‌سازی در حلگر اینترترک فوم برابر ۱ و تعداد تکرار حلقه مربوط به معادله فشار ۳ تنظیم

- تمامی قابلیت‌های برنامه‌نویسی شی‌گرا شامل کلاس‌های مربوط به حل موازی، کار با کتابخانه‌های جابجایی شبکه، استفاده از توابع مربوط به کلاس freeSurface وهمینطور کار با توابع کلاس‌های حلگر هم‌گیر در این حلگر حفظ شده است.

- شکل نهایی سطح آزاد و همینطور مقادیر سرعت و فشار در هر دو حلگر پیش‌فرض و حلگر توسعه داده شده مطابقت نسبتاً کاملی بایکدیگر دارند.

- امکان هم‌گیر کردن متغیرهای دیگری همچون دما یا غلظت اجزا باتوجه به ساختار ماتریس بلوکی استفاده شده نیز فراهم شده است.

- جهت حل جریان، حلگر با الگوریتم غیر هم‌گیر به عنوان حلگر مطلوب پیشنهاد می‌شود چرا که باتوجه به قابلیت کنترل مجزای تعداد تکرار بر روی هر یک از معادلات سرعت یا فشار، امکان بهینه کردن تعداد تکرار حل معادلات درعین افزایش سرعت فراهم می‌شود. هرچند در صورت وجود هم‌گیری و پیچیدگی فیزیکی قوی، انتظار معکوس شدن این روند یا ایجاد چالش‌های همگرایی برای این حلگر وجود دارد.

۷- فهرست علائم

علائم انگلیسی

A	مشخص کننده بخش سیال از سطح آزاد
\mathbf{n}	بردار عمود بر سطح به سمت خارج
p	فشار دینامیکی
S	سطح سلول
\mathbf{v}	بردار سرعت سیال
\mathbf{v}_s	بردار سرعت سطح شبکه

علائم یونانی

ρ	چگالی، kg/m^3
μ	لزجت دینامیکی سیال Pa.s

منابع

- [1] D. Gueyffier, J. Li, A. Nadim, R. Scardovelli, S. Zaleski, Volume-of-fluid interface tracking with smoothed surface stress methods for three-dimensional flows, *Journal of Computational physics*, 152(2) (1999) 423-456.
- [2] C.W. Hirt, B.D. Nichols, Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, *Journal of computational physics*, 39(1) (1981) 201-225.

تکرار معادله فشار است، به طوری که تعداد تکرار در حلگر پیش‌فرض حدوداً ۶ برابر تعداد تکرار در حلگر هم‌گیر است. زمان حل نمونه آزمایش مخزن سه‌بعدی در حلگر پیش‌فرض یا اینترترک فوم ۷۱۶۲ ثانیه و در حلگر هم‌گیر ۸۸۷۴ ثانیه بوده است.

۶- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر الگوریتم توسعه، پیاده‌سازی و مقایسه نتایج یک حلگر هم‌گیر سرعت و فشار که با الگوریتم تعقیب سطح عمل می‌کند، ارائه شده است. این حلگر با حفظ تمامی قابلیت‌های برنامه‌نویسی شی‌گرا در بستر فوم‌اکستند، قابلیت حل انواع جریان‌های سطح آزاد با الگوریتم موزافریجا و پریک [۳ و ۱۸] را دارد. در واقع میتوان گفت که حلگر توسعه داده شده، نسخه معادل ولی هم‌گیر کردن حلگر پیش‌فرض فوم‌اکستند یعنی اینترترک فوم می‌باشد. این حلگر بر روی مسائل جریان در عبور از سطح شیب‌دار، مسئله هایدروفویل یا جریان در عبور از مقطع بال و جریان درون مخزن سه‌بعدی، مورد ارزیابی قرار گرفته است که نتایج زیر حاصل شده است:

- تعداد تکرار معادله سرعت که برابر با تعداد تکرار حلقه داخلی است، در مسائل مورد بررسی، در یک محدوده تنظیم شده و می‌توان ادعا نمود که معادله محدود کننده همگرایی معادله فشار است. در حلگر پیش‌فرض نسبت به حلگر هم‌گیر به ترتیب در سه مسئله جریان در عبور از سطح شیب‌دار، هایدروفویل و مخزن سه‌بعدی، تعداد تکرار معادله فشار حدود ۱۰، ۴ و ۶ برابر بیشتر است.

- سرعت حل کل جریان در سه مسئله جریان در عبور از سطح شیب‌دار، هایدروفویل و مخزن سه‌بعدی برای حلگر هم‌گیر نسبت به حلگر پیش‌فرض به ترتیب برابر ۰/۶۷، ۲/۲ و ۱،۲۴ بوده است. به عبارت دیگر، حلگر با الگوریتم غیر هم‌گیر علاوه بر تکرار بالاتر معادله فشار، سرعت حل مطلوب‌تری از خود نشان داده است.

- حلگر هم‌گیر قابلیت حل انواع مسائل دوبعدی و سه‌بعدی سطح آزاد سیال را با دقت قابل قبول دارا می‌باشد.

- می‌توان از قابلیت‌های این حلگر جهت حل جریان‌هایی با هم‌گیری و یا درگیری فیزیکی بالاتر نیز بهره برد. به عبارت بهتر، هم‌گیر شدن فشار و سرعت و حل همزمان آنها، امکان مناسبی را جهت بررسی فیزیک جریان‌های با هم‌گیری بالا فراهم می‌نماید. جریان‌هایی همچون سقوط سیال لایه‌ای بر روی سطوح دو یا سه‌بعدی به همراه پدیده‌های انتقال دمای یا انتقال جرم.

- [13] S.M.H. Karimian, G. Schneider, Pressure-based control-volume finite element method for flow at all speeds, *AIAA journal*, 33(9) (1995) 1611-1618.
- [14] M. Darwish, I. Sraj, F. Moukalled, A coupled incompressible flow solver on structured grids, *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, 52(4) (2007) 353-371.
- [15] M. Darwish, I. Sraj, F. Moukalled, A coupled finite volume solver for the solution of incompressible flows on unstructured grids, *Journal of Computational Physics*, 228(1) (2009) 180-201.
- [16] K. Kissling, J. Springer, H. Jasak, S. Schutz, K. Urban, M. Piesche, A coupled pressure based solution algorithm based on the volume-of-fluid approach for two or more immiscible fluids, in: *European Conference on Computational Fluid Dynamics* (2010).
- [17] S. Vakilipour, S. Ormiston, A coupled pressure-based co-located finite-volume solution method for natural-convection flows, *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, 61(2) (2012) 91-115.
- [18] S. Muzafertija, M. Perić, Computation of free-surface flows using the finite-volume method and moving grids, *Numerical Heat Transfer*, 32(4) (1997) 369-384.
- [19] H. Jasak, Ž. Tuković, Dynamic mesh handling in openfoam applied to fluid-structure interaction simulations, in: *European Conference on Computational Fluid Dynamics*, (2010).
- [20] H. Jasak, Dynamic mesh handling in openfoam, in: *47th AIAA aerospace sciences meeting including the new horizons forum and aerospace exposition, 2009*, pp. 341.
- [21] A. Rynell, CFD with openSource software openfoam 1.5. dev tutorial of intertrackfoam-solver Peer Reviewed by Anton Berce and Jelena Andric. (2010).
- [22] J.H. Ferziger, M. Perić, *Computational methods for fluid dynamics*, in, Springer, 2002.
- [23] J.H. Duncan, The breaking and non-breaking wave resistance of a two-dimensional hydrofoil, *Journal of fluid mechanics*, 126 (1983) 507-520.
- [3] Ž. Tuković, H. Jasak, A moving mesh finite volume interface tracking method for surface tension dominated interfacial fluid flow, *Computers & fluids*, 55 (2012) 70-84.
- [4] S. Vakilipour, M. Mohammadi, S. Ormiston, A fully coupled ALE interface tracking method for a pressure-based finite volume solver, *Journal of Computational Physics*, 427 (2021) 110054.
- [5] S. McKee, M.F. Tomé, V.G. Ferreira, J.A. Cuminato, A. Castelo, F. Sousa, N. Mangiavacchi, The MAC method, *Computers & Fluids*, 37(8) (2008) 907-930.
- [6] G. Tryggvason, B. Bunner, A. Esmaeeli, D. Juric, N. Al-Rawahi, W. Tauber, J. Han, S. Nas, Y.-J. Jan, A front-tracking method for the computations of multiphase flow, *Journal of computational physics*, 169(2) (2001) 708-759.
- [7] L. Huang, Y. Li, D. Benites-Munoz, C.W. Windt, A. Feichtner, S. Tavakoli, J. Davidson, R. Paredes, T. Quintana, E. Ransley, A review on the modelling of wave-structure interactions based on OpenFOAM, *OpenFOAM journal*, (2022) 116-142.
- [8] D. Gründing, An arbitrary Lagrangian-Eulerian method for the direct numerical simulation of wetting processes, *Institute of Numerical Methods in Mechanical Engineering (FNB)*, (2020).
- [9] B. Cheraghi, S. Vakilipour, Developing an Interface Tracking Coupled Solver for Solving two Phase Flow Fields at Low Reynolds Numbers in foam-extend Platform, *Sharif Journal of Mechanical Engineering*, (2024), pp.-. (in Persian).
- [10] R.A. Havestini, S.J. Ormiston, An elliptic numerical analysis of water vapour absorption into a falling film in vertical parallel plate channels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 150 (2020) 119266.
- [11] S. Patankar, *Numerical heat transfer and fluid flow*, Taylor & Francis, 2018.
- [12] S. Karimian, G. Schneider, Pressure-based computational method for compressible and incompressible flows, *Journal of thermophysics and heat transfer*, 8(2) (1994) 267-274.

- [24] B. Cheraghi, B. Mirzavand Boroujeni, M. Shafaei, Hydroelastic coupled vibrations in spherical containers of membrane bottom, partially filled with frictionless liquids, *Modares Mechanical Engineering*, 16(4) (2016) 155-162 (in Persian).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

B. Cheraghi, S. Vakilipour, Developing a Coupled Free-Surface Flow Solver using Interface Tracking Algorithm in foam-extend, Amirkabir J. Mech Eng., 56(2) (2024) 149-184.

DOI: [10.22060/mej.2024.22507.7635](https://doi.org/10.22060/mej.2024.22507.7635)



