مجله مهندسی مکانیک مدرس، اردیبهشت 1394، دوره 15، شماره 2، ص‌ص 243-252

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مقایسه روش‌های کاهش جریان پارازیتی در شبیه‌سازی جریان دوفازی با روش حجم سیال

نیما سام‌خانیانی[1]، محمدرضا انصاری[2*]

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی 111-14115، mra_1330@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 11 شهریور 1393
پذیرش: 10 آبان 1393
ارائه در سایت: 20 دی 1393

کلید واژگان:
روش حجم سیال
روش سطوح هم‌تراز
جریان پارازیتی
حلگر اینترفوم
فیلتر

چکیده

جریان پارازیتی از مشکلات شبیه‌سازی جریان دوفاز با روش حجم سیال است. این جریان غیرفیزیکی باعث خطا در شبیه‌سازی فصل مشترک دوفاز و تغییر شکل‌های ناخواسته‌ی فصل مشترک می‌گردد. برای کاهش جریان پارازیتی راهکارهای متفاوتی ارائه شده است. در مطالعه‌ی حاضر، کاهش جریان پارازیتی با استفاده از دو راهکار: 1- ترکیب روش حجم سیال با روش سطوح هم‌تراز (s-CLSVOF) و 2- بکارگیری فیلترها مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مطالعه سه فیلتر به حلگر اینترفوم از بسته‌ی متن باز اپن فوم افزوده می‌شود. این سه فیلتر به ترتیب به هموارسازی تابع رنگ، هموارسازی تابع انحنای سطح و فشرده‌سازی تابع رنگ اقدام می‌کند. برای بررسی عملکرد این دو راهکار، مسئله‌ی حباب ساکن شبیه‌سازی شده است. در مطالعه‌ی حاضر ابتدا به تأثیر عددی هر فیلتر بر روی جریان پارازیتی پرداخته شده است و سپس عملکرد ترکیب بهینه‌ی فیلترها با حلگر اینترفوم و روش ترکیبی s-CLSVOF مورد سنجش قرار می‌گیرد. با استفاده از فیلترها شدت جریان پارازیتی حداقل 50% نسبت به حلگر اینترفوم کاهش یافته است. همچنین مقایسه‌ی نتایج تخمین پرش فشار از حلگرهای حاضر (روش ترکیبی s-CLSVOFو فیلترها) با حلگر اینترفوم و حل تحلیلی یانگ-لاپلاس حاکی از بهبود محاسبه‌ی پرش فشار تا 400% در حلگرهای حاضر است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که فیلترها نسبت به روش s-CLSVOF عملکرد بهتری در کاهش جریان پارازیتی دارند و جایگزین مناسبی برای روش‌های ترکیبی هستند.

Comparison of Parasite Current Reduction Methods in Simulation of Two Phase Flow with VOF

Nima Samkhaniani, Mohamad Reza Ansari*

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
* P.O.B. 14115-111, Tehran, Iran, mra_1330@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 02 September 2014
Accepted 01 November 2014
Available Online 10 January 2015

Keywords:
VOF method
Level Set Method
Parasite Current
interFoam
Filter

ABSTRACT

One of the obstacles in simulation of two phase flow is parasite currents. These currents cause unphysical distortion at interface which impairs interface capturing and numerical results. In the present study, two methods (using Filter and s-CLSVOF) are implemented in OpenFOAM two phase flow solver called interFoam to reduce parasite current. Three filters are added to color function volume of fluid (CF-VOF) method. These filters reduce parasite current in different ways, one smoothes color function, one smoothes curvature and the other one compresses the interface. The original and the modified solvers are tested with a quiescent bubble bench mark to investigate the effect of each filter on parasite currents. Then, the optimum arrangement of filters is compared with s-CLSVOF method and interFoam. Present study shows parasite current magnitude can be reduced at least up to 50% in the modified solvers. Also, the comparison of pressure jump from numerical results and analytical result with Young-Laplace equation shows modified solvers can predict pressure jump better than original solver. The pressure jump error is reduced up to 400% in the modified solvers. The present study also shows filters have better performance than s-CLSVOF method and can be considered as a suitable alternative for coupled methods.

1- مقدمه

به شبیه‌سازی دقیق عددی جریان‌های دو یا چند فازی حاوی فصل مشترک در بسیاری از کاربردهای صنعتی همچون فرآیند احتراق، ریخته‌گری فلزات و خنک‌کاری نیروگاه‌های هسته‌ای نیاز است. فصل مشترک ناحیه‌ای بی‌اندازه نازک بین دوفاز است. روش‌های مختلف عددی برای محاسبه‌ی فصل مشترک در شبیه‌سازی جریان دو یا چندفازی در سه دهه‌ی اخیر توسعه یافته است[1-5]. هریک از این روش‌ها دارای مزایا و معایبی هستند و بهبود این روش‌های عددی از مباحث فعال تحقیقاتی است. در شبیه‌سازی عددی فصل مشترک سه موضوع: موقعیت فصل مشترک، نیروی کشش سطحی و محاسبه‌ی دقیق انحنای فصل مشترک همچنان مورد تحقیق و بررسی است.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
N. Samkhaniani, M. R. Ansari, Comparison of Parasite Current Reduction Methods in Simulation of Two Phase Flow with VOF, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 243-252, 2015 (In Persian)

روش‌های شبیه‌سازی جریان‌های دوفازی حاوی فصل مشترک را می‌توان براساس نوع شبکه به دو دسته‌ی روش‌های شبکه ثابت[1] و روش‌های شبکه متحرک[2] دسته‌بندی کرد. در دسته‌ی اول فصل مشترک در میان شبکه‌ای ثابت حرکت می‌کند و موقعیت فصل مشترک در هرگام زمانی در شبکه‌ی ثابت محاسبه می‌شود. روش‌های همچون حجم سیال (VOF)[1-3]، سطوح هم تراز[3] (LS) [4] و روش میدان فاز[4] (PF)[5] در این دسته‌بندی جای می‌گیرند. در روش حجم سیال از تابع پله برای تفکیک دوفاز استفاده می‌شود. برای دستیابی به مکان فصل مشترک باید معادله‌ی انتقال[5] برای این تابع در هر گام زمانی حل شود. از آنجا که تابع پله تابع هموار نیست برای جلوگیری از دیفیوژن عددی در فصل مشترک و همچنین حفظ محدوده‌ی جواب[6] باید تدابیر ویژه‌ای اندیشیده شود. برای حل معادله‌ی انتقال تابع پله دو تکنیک وجود دارد[6].

1- روش مستقیم[7]: در این دسته از روش‌های عددی وضوح بالا[8] برای تجزیه‌ی ترم جابجایی معادله‌ی انتقال استفاده می‌شود. روش‌های CICSAM[9] [2] و HRIC[10] [7] در این دسته بندی جای می‌گیرند.

2- روش بازسازی فصل مشترک: در این دسته، حل معادله‌ی انتقال در دو مرحله صورت می‌گیرد. مرحله‌ی اول بازسازی هندسی فصل مشترک و مرحله‌ی دوم جابجایی فصل مشترک. روش‌هایی که در این دسته قرار می‌گیرند عبارت‌اند از: روش گیرنده-دهنده[11][3]، بازسازی قطعه قطعه‌ی فصل مشترک (PLIC[12])[1]

فارغ از نحوه‌ی تسخیر فصل مشترک در روش حجم سیال، اعمال کشش سطحی در این روش باعث جریان‌های غیرفیزیکی اطراف فصل مشترک می‌شود که به جریان‌های پارازیتی معروف هستند[7-12]. بر اثر این جریان گردابه‌هایی اطراف فصل مشترک تشکیل می‌شود که اگرچه اندازه‌ی آن کوچک است اما ناپایداری‌های شدید عددی ایجاد می‌کند و باعث از بین رفتن فصل مشترک و جواب‌های غیرفیزیکی می‌شود[12,8]. بر روی فصل مشترک با فرض پیوستگی میدان سرعت و ویسکوزیته شرط مرزی به صورت رابطه (1) است[13]:

$$p_l - p_g = \sigma\kappa + (2\mu n\frac{\partial u}{\partial n})_l - (2\mu n\frac{\partial u}{\partial n})_g \qquad (1)$$

که σ کشش سطحی، μ ویسکوزیته، κ انحنای سطح، n بردار یکه نرمال بر سطح، u سرعت و p فشار است.

مدل‌های مختلفی همچون: روش تنش سطحی پیوسته[13] (CSS) [11, 14]، روش نیروی سطح پیوسته[14] (CSF)[9]، روش نیروی سطح تیز[15] (SSF)[15] و روش شبح[16] [16] برای اعمال نیروی کشش سطحی بر روی فصل مشترک ارائه شده است و مطالعات نشان می‌دهد که همه‌ی مدل‌های ارائه‌شده از جریان پارازیتی رنج می‌برند. عامل اصلی ایجاد جریان‌های پارازیتی، خطا در گسسته‌سازی عددی است. عدم برابری بین گرادیان فشار و نیروی کشش سطحی هنگام عبور از فصل مشترک و یا خطا در محاسبه‌ی دقیق بردار نرمال و انحنای فصل مشترک باعث ایجاد جریان گردابی پارازیتی می‌شود [13,8]. مطالعات نشان داده است که مقدار جریان پارازیتی در سمت سیال سبک‌تر (چگالی کمتر) بیشتر است زیرا که سیال سبک‌تر تحت تأثیر نیروی سطحی شتاب بیشتری نسبت به سیال سنگین‌تر می‌گیرد[13]. در جریان با اعداد کاپیلاری ($Ca=\frac{\mu U}{\sigma}$) پایین همچون جریان در میکروکانال‌ها و یا جریان در محیط‌های متخلخل روش‌هایی که به کاهش جریان پارازیتی می‌انجامد دارای اهمیت بیشتری می‌شود[15]. اصولاً جریان پارازیتی تا زمانی که عدد انسرگ ($Oh=(\frac{Ca}{Re})^{1/2}$) بسیار بزرگ باشد ناچیز است[10].

اصلاح روش محاسبه‌ی انحنای فصل مشترک منجر به کاهش جریان پارازیتی می‌شود. برای مثال می‌توان انحنای فصل مشترک را با کمک روش مجموع سطوح هم تراز [17-19] و یا تابع ارتفاع[17] (HF) [21,20] دقیق‌تر محاسبه کرد. کاهش جریان پارازیتی با این دو روش معمولاً در ازای افزایش هزینه‌ی محاسباتی است. همچنین در مورد استفاده از تابع ارتفاع زمانی که فصل مشترک بخوبی دیده نشده باشد مثلاً شعاع انحنای فصل مشترک برابر با اندازه‌ی سلول باشد، این روش تخمین اشتباهی از انحنا ارائه می‌کند[22]. روش جایگزین و ارزان‌تر از لحاظ محاسباتی استفاده از تابع هموار کننده[18] در ناحیه‌ی فصل مشترک در روش حجم سیال است. استفاده از تابع هموار در ناحیه‌ی فصل مشترک سبب می‌شود تا شیب گرادیان تابع علامت حجم سیال کاسته شود و انحنای فصل مشترک دقیق‌تر محاسبه شود[23,15,11].

دنر و همکاران [22] با بررسی مقایسه‌ای 3 روش: حجم سیال با تکنیک مستقیم (فشردگی سطح)، حجم سیال با بازسازی سطح (PLIC) و روش ترکیبی حجم سیال و سطوح هم تراز نشان دادند که قابلیت‌های روش حجم سیال با تکنیک مستقیم در مقایسه با روش PLIC و روش‌های ترکیبی با روش سطوح هم‌تراز علیرغم بازده محاسباتی بالا، امکان اعمال بر شبکه‌ی بی-ساختار و پایستاری جرم مورد بی‌لطفی قرار گرفته است و مخصوصاً استفاده از این روش باید مورد بازنگری قرار بگیرد. در این مطالعه حلگر اینترفوم[19] از نرم‌افزار متن باز اپن‌فوم[20] مورد استفاده قرار می‌گیرد. این حلگر از روش حجم سیال برای تسخیر سطح استفاده می‌کند. در این حلگر برای حل معادله‌ی انتقال تابع پله از روش مستقیم (فشردگی سطح[21]) استفاده می‌شود. بنابراین می‌توان این حلگر را بر روی هر نوع شبکه‌بندی باساختار و بی‌ساختار اعمال کرد. در این حلگر کشش سطحی بین دو فاز با روش نیروی سطح پیوسته (CSF) در نظر گرفته می‌شود. کلاسترمن و همکاران[6] به بررسی حلگر اینترفوم در جریان خیزش حباب پرداخته‌اند. آنان به ضعف این حلگر در تخمین صحیح پرش فشار هنگام عبور از فصل مشترک و وجود جریان‌های پارازیتی در شبیه‌سازی‌ها اشاره کرده‌اند و دلایلی چون خطا در روش CSF و یا خطا در محاسبه‌ی دقیق انحنا برای ضعف این حلگر برشمردند. البداوی و همکاران[17] برای بهبود محاسبه‌ی دقیق انحنای فصل مشترک این حلگر را با روش سطوح هم‌تراز ترکیب کردند سپس از این روش برای مدلسازی رشد و جدایش حباب استفاده کردند. هنگ و همکاران [23] در مدلسازی عددی جریان قطره و حباب در میکروکانال با حلگر اینترفوم برای کاهش جریان‌های پارازیتی از فیلتر هموارکننده استفاده کردند. همچنین راینی و همکاران [15]

1- fixed grid
2- moving grid
3- Level Set
4- Phase Field
5- transport equation
6- boundness
7- direct method
8- high resolution scheme
9- Compressive Interface Capturing Scheme for Arbitrary Mesh
10- High Resolution Interface Capturing Scheme
11- donor-acceptor
12- Piece-wise Linear Interface Construction
13- Continuous Surface Stress
14- Continuous Surface Force
15- Sharp Surface Force
16- ghost
17- Height Function
18- Smoothing Function
19- interFoam
20- OpenFOAM
21- surface compression

برای بهبود تخمین پرش فشار هنگام عبور از فصل مشترک و نیز کاهش جریان پارازیتی در جریان‌هایی با اعداد کلاپیلاری پایین مخصوصاً جریان در اجسام متخلخل، از فیلتر هموار کننده در حلگر اینترفوم استفاده کردند.

از آنجا که روش حجم سیال در حلگر اینترفوم از جریان پارازیتی رنج می‌برد در مطالعه حاضر با پیاده‌سازی روش‌های مختلف بهبود محاسبه‌ی انحنا و محاسبه‌ی فشار کاپیلاری سعی شده است تا این جریان غیرفیزیکی کاهش یابد. در این مطالعه سه فیلتر به حلگر اینترفوم اضافه شده است و عملکرد هریک از این فیلترها بر روی کاهش جریان پارازیتی و بهبود تخمین فشار نسبت به حلگر اینترفوم با مسئله‌ی حباب ساکن مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس روش سطوح هم تراز به حلگر اینترفوم افزوده می‌شود و عملکرد این روش در مقایسه با فیلترها مورد سنجش قرار می‌گیرد.

2- معادلات حاکم

2-1- حلگر اینترفوم (روش حجم سیال تابع رنگ)

برای مدل‌سازی جریان دوفازی در حلگر اینترفوم از مدل یک سیال[1] استفاده شده است. در این مدل تنها نیاز به حل یک دسته معادلات پایستاری برای هر دو فاز است و فصل مشترک بین دو فاز به روش حجم سیال تسخیر می‌شود. در روش حجم سیال، نشانگر فاز تابع پله است که بیانگر حجم یک فاز به حجم سلول است. مقدار α_1 در یکی از فازها مثلاً مایع یک، در فاز دیگر صفر و در فصل مشترک بین دوفاز بین صفر و یک است. طبق رابطه (2) داریم:

$$\alpha_1(\vec{x},t)=\frac{V_1}{V} \tag{2}$$

پارامترهای فیزیکی مسئله همچون چگالی، ویسکوزیته و غیره در ناحیه‌ی فصل مشترک بصورت خطی تغییر می‌کند. طبق رابطه (3) داریم:

$$y=\alpha_1 y_1+(1.0-\alpha_1)y_2 \tag{3}$$

که $y=\{\mu,\ \rho\}$ است.

معادله‌ی انتقال فصل مشترک بصورت رابطه (4) است:

$$\frac{\partial\alpha_1}{\partial t}+\vec{U}\cdot\nabla\alpha_1=0\Rightarrow\frac{\partial\alpha_1}{\partial t}+\nabla(\vec{U}\alpha_1)=\alpha_1\nabla\cdot(\vec{U}) \tag{4}$$

معادله‌ی پیوستگی کلی برای جریان دوفازی غیرقابل تراکم بصورت رابطه (5) است.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho)+\nabla\cdot(\rho\vec{U})=0\ \Rightarrow\nabla\cdot(\vec{U})=0 \tag{5}$$

بنابراین معادله‌ی انتقال فصل مشترک برای جریان دوفازی غیرقابل تراکم بصورت رابطه (6) می‌شود.

$$\frac{\partial\alpha_1}{\partial t}+\nabla\cdot(\vec{U}\alpha_1)=0 \tag{6}$$

این رابطه زمانی صحیح است که α_1 تابع پله باقی بماند. برای مثال دیفیوژن عددی در فصل مشترک مجاز نیست. همچنین با حل این معادله کران بالای تابع پله ($\alpha_1\le 1$) حفظ نمی‌شود. بنابراین برای جلوگیری از دیفیوژن عددی در فصل مشترک و همچنین حفظ کران تابع علامت، ترم فشردگی سطح بصورت زیر به رابطه‌ی 6 افزوده شده است[6]. این ترم تنها در فصل مشترک دارای مقدار است. در سایر روش‌های مستقیم حجم سیال چون CICSAM [2]و HRIC [7] این ترم در نظر گرفته نمی‌شود. طبق رابطه (7) داریم:

$$\frac{\partial\alpha_1}{\partial t}+\nabla(\vec{U}\alpha_1)+\nabla\cdot(\vec{U_c}\alpha_1(1-\alpha_1))=0 \tag{7}$$

$\vec{U}c$ سرعت فشردگی تنها در ناحیه‌ی فصل مشترک و در جهت عمود بر آن در نظر گرفته می‌شود تا از انتشار عددی جلوگیری کند و بصورت رابطه (8) محاسبه می‌شود.

$$\vec{U_c}=\min(C_\alpha\left|\vec{U}\right|,\max(\left|\vec{U}\right|))\frac{\nabla\alpha_1}{\left|\nabla\alpha_1\right|} \tag{8}$$

که C_α ضریب فشردگی سطح است و برای فشردگی بیشتر سطح اضافه شده است. $0\le C_\alpha\le 4$ در نظر گرفته می‌شود [25,24] که $C_\alpha=0$ حالت بدون فشردگی است. معادلات ناویر- استوکس بصورت رابطه (9) است.

$$\frac{\partial(\rho\vec{U})}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho\vec{U}\vec{U})=-\nabla p+\nabla\cdot(\mu((\nabla\vec{U})^T+\nabla\vec{U}))+F_\sigma \tag{9}$$

ترم آخر بیانگر اثر نیروی کشش سطحی است. در حلگر اینترفوم $F_\sigma=\sigma\kappa\nabla\alpha_1$ است. کشش سطحی در این حلگر با مدل CSF در نظر گرفته می‌شود و انحنای سطح از رابطه‌ی (10) محاسبه می‌شود.

$$\kappa=-\nabla\cdot(\frac{\nabla\alpha_1}{|\nabla\alpha_1|}) \tag{10}$$

2-2- فیلترها

در حلگر اینترفوم بردار نرمال و انحنای فصل مشترک از روی تابع پله نشانگر فاز محاسبه می‌شود. تغییرات تند مقدار تابع پله هنگام عبور از فصل مشترک باعث ایجاد خطای عددی در محاسبه‌ی انحنای سطح و بردار نرمال است[17]. این خطای عددی جریان پارازیتی ایجاد می‌کند. برای بهبود محاسبه‌ی انحنای فصل مشترک باید از تابع هموار برای محاسبه‌ی انحنا استفاده کرد. انحنای فصل مشترک در حلگر حاضر از رابطه‌ی (11) محاسبه می‌شود.

$$\kappa=-\nabla\cdot(\frac{\nabla\alpha_1'}{|\nabla\alpha_1'|}) \tag{11}$$

که α_1' با هموار کردن تابع α_1 در نزدیکی فصل مشترک بدست می‌آید[23,11]. طبق رابطه (12) داریم:

$$\alpha_{1p}'=\frac{\sum_{f=1}^{n}\alpha_{1f}S_f}{\sum_{f=1}^{n}S_f} \tag{12}$$

که زیرنویس p بیانگر مقادیر مرکز سلول و زیرنویس f بیانگر مقادیر بر روی مرکز سطح سلول است. مقدار α_f از میانیابی خطی مقادیر α_1 از مرکز سلول بدست می‌آید و s_f اندازه‌ی سطح سلول است. برای هموار شدن مقدار α_1 این فیلتر را می‌توان n بار تکرار کرد. استفاده از تابع فوق تغییرات تند α_1 را از بین می‌برد و توزیع α_{1p}' نسبت به α_1 یکنواخت‌تر است.

برای بهبود انحنای فصل مشترک در جهت عمود بر فصل مشترک m بار از فیلتر زیر استفاده می‌شود[15].

$$\kappa_{s,i+1}=2\sqrt{\alpha_1(1-\alpha_1)\kappa}+(1-2\sqrt{\alpha_1(1-\alpha_1)})(\kappa_s^*)$$
$$\kappa_{s,0}=\kappa \tag{13}$$

که

$$\kappa_s^*=\frac{\sum_{f=1}^{n}\kappa_f S_f}{\sum_{f=1}^{n}S_f} \tag{14}$$

1- One Fluid Method

برای کنترل وضوح فشار کاپیلاری بجای $\nabla\alpha_1$ از $\nabla\alpha'_c$ در F_σ استفاده می‌شود که α'_c از رابطه‌ی (15) بدست می‌آید.

$$\alpha'_c=\frac{1}{1-C_p}[\min(\max(\alpha,\frac{C_p}{2}),1-\frac{C_p}{2})-\frac{C_p}{2}] \quad (15)$$

مقدار $c_p=0$ همان مدل CSF است و هرچه مقدار c_p به یک نزدیک‌تر شود وضوح α'_c بیشتر می‌شود و ناحیه‌ی گذار فشرده می‌شود در نتیجه نیروی کاپیلاری با وضوح بیشتری محاسبه می‌شود که به آن روش SSF گفته می‌شود. برای حذف جریان پارازیتی در مسائل استاتیک مقدار $C_p=0.9-0.99$ پیشنهاد می‌شود[15]. در روش حجم سیال تابع رنگ، فصل مشترک نه یک خط بلکه یک ناحیه‌ی گذار است که بین دو تا سه سلول پخش است. با استفاده از این فیلتر بر روی تابع رنگ (شکل1)، ناحیه‌ی گذار فشرده‌تر می‌شود.

2-3- روش ترکیبی s-CLSVOF (ترکیب حجم سیال با روش سطوح هم تراز)

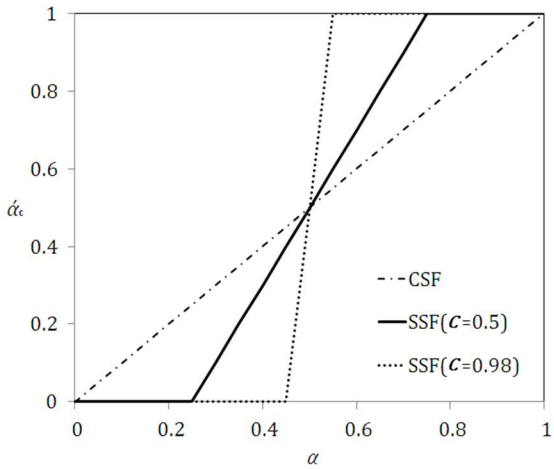
از مزایای روش ترکیبی s-CLSVOF بهره‌گیری توأمان از پایستاری جرم روش حجم سیال و نیز استفاده از فصل مشترک هموار در روش سطوح هم‌تراز است. در روش سطوح هم تراز، تابع رنگ تابع فاصله است و مقدار φ فاصله مرکز هرسلول از فصل مشترک را نشان می‌دهد. بنابراین $\varphi=0$ بیانگر فصل مشترک بین دوفاز است. در اولین گام تابع φ با استفاده از تابع α طبق رابطه‌ی (16) مقداردهی می‌شود.

$$\varphi_0=(2\alpha_1-1)\times\Gamma \quad (16)$$

که در آن Γ تابع اندازه‌ی گام سلول Δx است و مقدار آن در مطالعه‌ی حاضر $0.75\Delta x$ در نظر گرفته می‌شود. برخلاف روش استاندارد کوپل حجم سیال و سطوح هم‌تراز [26]، در این مطالعه همچون مرجع [17] برای کاهش حجم محاسبات تابع انتقال جداگانه برای φ حل نمی‌شود، بلکه در هرگام زمانی φ توسط α_1 مقداردهی می‌شود، بدین ترتیب از افزایش هزینه‌ی محاسباتی در این روش ترکیبی جلوگیری شده است. سپس $\varphi=0$ با حل تابع بازگردان فاصله (رابطه 17) بیانگر مکان فصل مشترک خواهد بود.

$$\frac{\partial\varphi}{\partial\tau}=S(\varphi_0)(1-|\nabla\varphi|)$$

$$\varphi(x,0)=\varphi_0(x) \quad (17)$$



شکل 1 اثر فیلتر رابطه (15) بر روی تابع رنگ α_1

در این رابطه τ گام زمانی حل مسئله نیست و از آن به عنوان گام زمانی مصنوعی یاد می‌شود. x بردار موقعیت و $S(\varphi_0)$ تابع علامت است. در این مطالعه $\tau=0.1\Delta x$ است و به گونه‌ای انتخاب شده است تا تغییرات تند در تابع سطوح هم‌تراز وجود نداشته باشد. با چند بار تکرار حل رابطه‌ی 17 تابع فاصله در اطراف فصل مشترک مقداردهی می‌شود که دفعات این تکرار از رابطه‌ی (18) محاسبه می‌شود.

$$\varphi_{\text{corr}}=\frac{\varepsilon}{\Delta\tau} \quad (18)$$

که ε ضخامت ناحیه‌ی فصل مشترک است و در این جا $\varepsilon=1.5\Delta x$ لحاظ شده است.

تابع فاصله برخلاف تابع پله، تابعی هموار است بنابراین با کمک روش سطوح هم‌تراز می‌توان دقیق‌تر بردار نرمال بر فصل مشترک را محاسبه کرد. در این صورت نیروی تنش سطحی F_σ در رابطه‌ی (9) بصورت رابطه (19) در خواهد آمد.

$$F_\sigma=\sigma\kappa(\varphi)\delta(\varphi)\nabla\varphi \quad (19)$$

تابع انحنای سطح $\kappa(\varphi)$ از رابطه‌ی (20) محاسبه می‌شود.

$$\kappa(\varphi)=\nabla\cdot(\frac{\nabla\varphi}{|\nabla\varphi|}) \quad (20)$$

$\delta(\varphi)$ اثر نیروی کشش سطحی را به فصل مشترک محدود می‌کند و تنها بر روی فصل مشترک دارای مقدار است. طبق رابطه (21) داریم:

$$\delta(\varphi)=\begin{cases}0 & |\varphi|>\varepsilon\\ \frac{1}{2\varepsilon}(1+\cos(\frac{\pi\varphi}{\varepsilon})) & |\varphi|\le\varepsilon\end{cases} \quad (21)$$

3- نتایج و بررسی

3-1- شبیه سازی حباب دایروی در حال تعادل

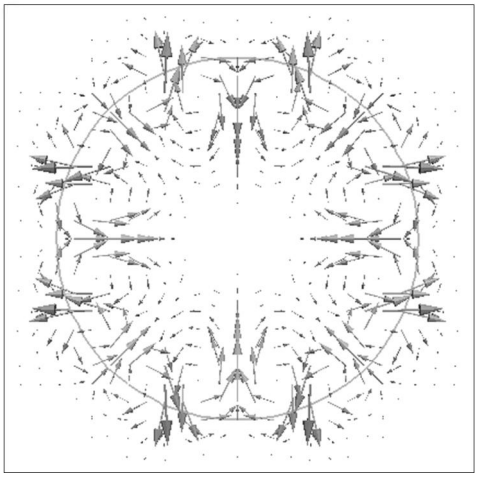
برای سنجش جریان پارازیتی حباب دایره‌ای ساکن در حالت گرانش صفر شبیه‌سازی می‌شود[17,12]. ابعاد دامنه‌ی محاسباتی $0/05\times0/05\ m^2$ است و حباب به شعاع 0/005 m در مرکز آن به عنوان شرط اولیه قرار داده شده است. پارامترهای فیزیکی شبیه‌سازی در جدول 1 ارائه شده است. از شرط مرزی گرادیان صفر برای متغیرهای α_1، p و φ و از شرط عدم لغزش برای U استفاده شده است. همانطور که در شکل 2 نشان داده شده است جریان پارازیتی اطراف فصل مشترک گرداب‌هایی را ایجاد می‌کند. در واقع در هر ربع دایره دو گردابه ایجاد می‌شود که اندازه‌ی جریان پارازیتی در سیال سبکتر (هوا) بیشتر است.

مقدار دقیق فشار از رابطه‌ی (1) محاسبه می‌شود. در جریان غیرویسکوز رابطه‌ی (1) به رابطه‌ی معروف یانگ-لاپلاس تبدیل می‌شود که برای مسئله حاضر، مقدار پرش فشار 2 pa است.

$$\Delta p_{\text{exact}}=p_l-p_g=\sigma\kappa=\frac{\sigma}{R} \quad (22)$$

جدول 1 پارامترهای فیزیکی مسئله‌ی حباب ساکن

	ابعاد	مایع	گاز
چگالی (ρ)	kg/m^3	1000	1
ویسکوزیته (μ)	kg/ms	10^{-3}	10^{-5}
کشش سطحی (σ)	N/m	0/01	



شکل 2 جریان پارازیتی اطراف فصل مشترک برای شبکه ریز با ابعاد سلول D/20

قدرت جریان پارازیتی با ماکزیمم مقدار مطلق میدان سرعت در شبکه‌ی محاسباتی رابطه‌ی (23) سنجیده می‌شود.

$$L_1 = \max(|V|) \tag{23}$$

میزان دقت در محاسبه‌ی انحنا از طریق اختلاف بین حل عددی و تحلیلی پرش فشار سنجیده می‌شود. برای محاسبه‌ی پرش فشار از حل عددی، اختلاف میانگین فشار داخل در حباب و خارج آن مدنظر قرار گرفته است و $\alpha_1 = 0.5$ در روش حجم سیال و $\varphi = 0$ در روش ترکیبی به عنوان فصل مشترک در نظر گرفته شده است. میزان خطای حل عددی از رابطه‌ی (24) سنجیده می‌شود.

$$E_0 = \frac{|\Delta p - \Delta p_{\text{exact}}|}{\Delta p_{\text{exact}}} \tag{24}$$

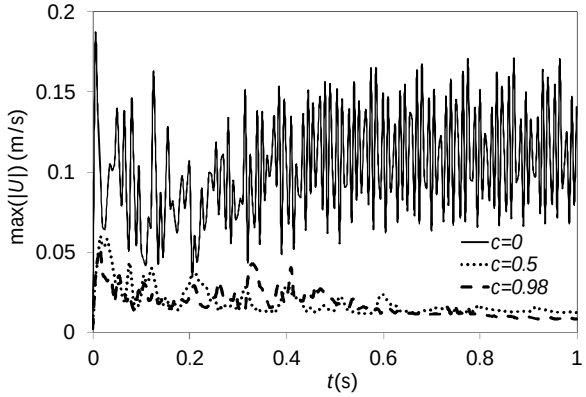
ابتدا تأثیر هر فیلتر در کاهش جریان پارازیتی بطور جداگانه مورد سنجش قرار می‌گیرد و سپس عملکرد مجموعه‌ی فیلترها نسبت به روش ترکیبی s-CLSVOF مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای بررسی کارایی هر یک از فیلترها بر کاهش جریان پارازیتی، نسبت سرعت ماکزیمم در حلگرهای حاضر به سرعت ماکزیمم در حلگر اینترفوم (رابطه 25) ملاک قرار داده شده است که در این رابطه $y = \{m, n, c\}$ است.

$$Ef = \frac{\left(\int_t \max(|U|)dt\right)_y}{\int_t \max(|U|)dt} \tag{25}$$

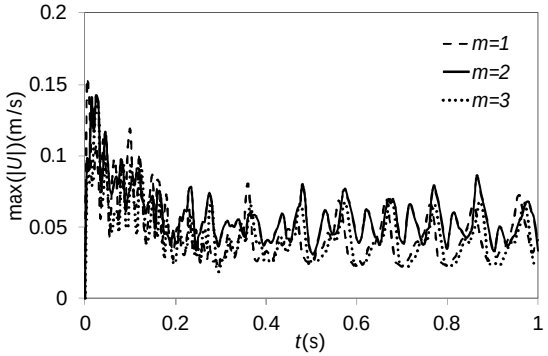
مقدار کارایی(Ef) هر یک از این فیلترها در کاهش جریان پارازیتی در جدول 2 ارائه شده است. $c = 0$ بیانگر روش CSF در شکل 3 است که در این حالت جریان‌های شدید پارازیتی مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار c وضوح فشار کاپیلاری در معادله‌ی مومنتم بیشتر می‌شود و جریان پارازیتی تا یک مقیاس در $c = 0.98$ کاهش یافته است. شکل‌های 4 و 5 به ترتیب اثر تکرار روابط 12 و 14 را بر روی جریان پارازیتی نشان می‌دهد. یک بار استفاده از فیلتر رابطه‌ی 14 ($m = 1$) جریان پارازیتی را تا 2 برابر کاهش می‌دهد و تکرار بیشتر این حلگر تأثیری بر کاهش جریان پارازیتی ندارد. استفاده از فیلتر رابطه 12 جریان پارازیتی را 2 تا 3 برابر کاهش می‌دهد. 2 بار تکرار این فیلتر ($n = 2$) برای کاهش جریان پارازیتی کفایت می‌کند. البته لازم است اشاره شود این به معنای آن نیست که ترتیب ($c = 0.98, n = 2, m = 1$) بهترین ترتیب فیلترها برای کاهش جریان پارازیتی است، با این وجود در ادامه‌ی این مطالعه از این ترتیب برای بررسی و مقایسه‌ی عملکرد فیلترها نسبت به روش ترکیبی s-CLSVOF استفاده می‌شود.

جدول 2 بررسی کارایی فیلترها بر روی جریان پارازیتی از رابطه (25)

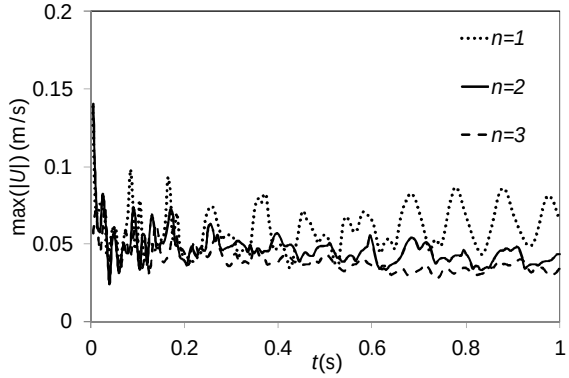
$c = 0/98$	$c = 0/5$	$c = 0$	
0/1764	0/1853	1	Ef
$m = 3$	$m = 2$	$m = 1$	
0/4368	0/5637	0/4545	Ef
$n = 3$	$n = 2$	$n = 1$	
0/3832	0/4497	0/5821	Ef



شکل 3 اثر فیلتر (رابطه 15) بر روی جریان پارازیتی



شکل 4 اثر فیلتر (رابطه14) بر روی جریان پارازیتی



شکل 5 اثر فیلتر (رابطه12) بر روی جریان پارازیتی

برای بررسی اثر تفکیک‌پذیری شبکه بر روی عملکرد حلگر حاضر و حلگر اینترفوم شبیه‌سازی بر روی شبکه‌هایی با سلول‌های یکنواخت به ابعاد $D/10$، $D/20$، $D/40$ و $D/80$ صورت گرفته است. در جدول 3 و 4 نتایج برای سه حلگر (اینترفوم، فیلترها و روش ترکیبی s-CLSVOF) ارائه شده است.

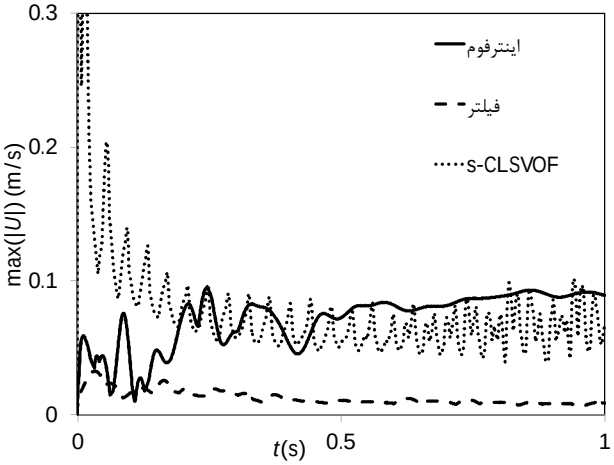
با افزایش تعداد سلول‌های شبکه‌ی محاسباتی و کوچکتر شدن اندازه‌ی سلول می‌توان فصل مشترک را با وضوح بیشتری تسخیر کرد و پرش فشار را با دقت بیشتری محاسبه کرد. بررسی جدول 3 نشان می‌دهد که در حلگر اینترفوم جریان پارازیتی وابسته به اندازه‌ی سلول است و با کاهش اندازه‌ی سلول جریان پارازیتی شدیدتر می‌شود. افزودن فیلتر به حلگر اینترفوم باعث کاهش شدید جریان پارازیتی می‌شود البته همچنان جریان پارازیتی وابسته به تفکیک‌پذیری شبکه است. کاهش جریان پارازیتی در شبکه‌ی درشت ($D/10$) حداقل100% است و در شبکه‌ی ریز ($D/80$) به بیش از 400% می‌رسد. همچنین نرخ رشد جریان پارازیتی به تفکیک‌پذیری شبکه، با استفاده از فیلتر کمتر از حلگر اینترفوم است، به عبارت دیگر با کاهش 8 برابری اندازه‌ی سلول شدت جریان پارازیتی در حلگر اینترفوم تا 5 برابر و در حلگر حاضر با استفاده از فیلتر تنها تا 2 برابر افزایش یافته است. شکل 6 نشان می‌دهد که روش ترکیبی در کاهش جریان پارازیتی چندان موثر نیست و در چند دهم ثانیه‌ی اول شبیه‌سازی حتی حلگر اینترفوم عملکرد بهتری از حلگر ترکیبی s-CLSVOF دارد اما با مرور زمان جریان پارازیتی در حلگر ترکیبی کاهش می‌یابد اما در حلگر اینترفوم با زمان جریان پارازیتی تقویت می‌شود. همچنین جریان پارازیتی در حلگر ترکیبی برخلاف حلگر اینترفوم وابسته به اندازه‌ی سلول شبکه نیست.

جدول3 میانگین ماکزیمم جریان پارازیتی (m/s) در بازه‌ی t=0.1 sec

اندازه سلول	$D/10$	$D/20$	$D/40$	$D/80$
اینترفوم	0/0452	0/0997	0/1742	0/1971
فیلترها	0/0223	0/0346	0/04119	0/0478
s-CLSVOF	0/1220	0/1876	0/1343	0/1982

جدول4 میانگین درصد خطا در محاسبه‌ی پرش فشار در بازه‌ی t=0.1 sec

اندازه سلول	$D/10$	$D/20$	$D/40$	$D/80$
اینترفوم	24/32	19/94	15/46	12/76
فیلترها	9/17	6/67	6/29	5/53
s-CLSVOF	15/25	10/04	8/62	7/27



شکل 6 اندازه‌ی ماکزیمم جریان پارازیتی بر روی شبکه با سلول‌های یکنواخت به اندازه D/10 به مدت 1 ثانیه

افزایش دقت در تخمین پرش فشار (رابطه‌ی یانگ-لاپلاس) بیانگر بهبود در محاسبه‌ی انحنای فصل مشترک است. در مقایسه با حلگر اینترفوم هر دو روش استفاده از فیلتر و روش ترکیبی s-CLSVOF عملکرد بهتری در تخمین پرش فشار دارند. بررسی جدول 4 نشان می‌دهد استفاده از فیلتر باعث می‌شود تا پرش فشار حداقل 50% با استفاده از روش ترکیبی s-CLSVOF و فیلتر نسبت به حلگر اینترفوم بهبود یابد. همچنین این مطالعه نشان می‌دهد حداقل در مسئله‌ی استاتیک فیلتر عملکرد بهتری نسبت به روش ترکیبی دارد و در کاهش جریان پارازیتی و افزایش دقت محاسبه‌ی پرش فشار بهتر از روش ترکیبی s-CLSVOF عمل می‌کند.

حل تحلیلی (رابطه‌ی یانگ-لاپلاس) بیان می‌کند که توزیع فشار برای این مسئله همچون تابع پله می‌ماند. به عبارتی دیگر اگر بر روی یک خط از دیواره به سمت مرکز حباب حرکت شود، هنگام عبور از فصل مشترک، فشار باید ناگهان زیاد گردد. همانطور که در شکل 7 دیده می‌شود استفاده از فیلتر در کار حاضر وضوح میدان فشار را بیشتر کرده است و حل عددی به حل تحلیلی نزدیک‌تر شده است. حل ترکیبی s-CLSVOF نسبت به حل اینترفوم تخمین صحیح‌تری از پرش فشار ارائه می‌کند اگرچه دره‌ی فشار در حل ترکیبی بیش از حل اینترفوم است و شکل از تابع پله در حل ترکیبی بیشتر فاصله می‌گیرد.

شکل 8 نشان می‌دهد که جریان پارازیتی در اطراف فصل مشترک ایجاد می‌شود و شدت جریان پارازیتی با استفاده از فیلتر کمتر از حل اینترفوم و حل ترکیبی است. همچنین فیلتر برخلاف روش ترکیبی سبب توزیع یکنواخت‌تر جریان پارازیتی اطراف فصل مشترک شده است.

در این بخش اثر نسبت چگالی بر روی جریان پارازیتی مورد سنجش قرار گرفت. شکل 9 نشان می‌دهد که حلگرهای حاضر (روش فیلتر و روش ترکیب s-CLSVOF) عملکرد بهتری نسبت به حلگر اینترفوم در تخمین محاسبه‌ی فشار دارند و عملکرد حلگرها در محاسبه‌ی فشار تقریباً تابع نسبت چگالی نیست. اگرچه شکل 10 نشان می‌دهد که هر چه نسبت چگالی به یک نزدیک‌تر باشد شدت جریان پارازیتی بیشتر شده است اما این افزایش سرعت به این دلیل است که در اثر نیرو کشش سطحی سیال با چگالی کمتر شتاب بیشتر می‌گیرد و شدت جریان پارازیتی بیشتر تابع اندازه‌ی چگالی در هر یک از سیال‌ها و نه نسبت چگالی آن‌ها است.

3-2- شبیه سازی تغییر شکل حباب در جریان چرخشی

در این قسمت کشیدگی و نازک شدن حباب دو بعدی در میدان جریان چرخشی شبیه سازی می‌شود. این مسئله اولین بار توسط ریدر و کوته [27] مطرح شده است و توانایی حلگر در شبیه‌سازی تغییر شکل‌های شدید پیش از جدایش فصل مشترک ناشی از خطاهای عددی را نشان می‌دهد. ابتدا یک قطره دو بعدی به شعاع 0/15 m در موقعیت (0/75 و 0/5) در میدان محاسباتی مربع شکل به ابعاد 1×1 m^2 قرار داده می‌شود. میدان سرعت در این مسئله بصورت زیر با زمان تغییر می‌کند. در مطالعه‌ی حاضر همچون مراجع [29,28]دوره تناوب T=8 sec در نظر گرفته شده است. طبق رابطه (26) داریم:

$$u=\sin^2(\pi x)\sin(2\pi y)\cos(\pi t/T)$$
$$v=-\sin^2(\pi y)\sin(2\pi x)\cos(\pi t/T) \qquad (26)$$

میدان سرعت قطره را به شکل یک روبان چرخان در می‌آورد که ماکزیمم تغییر شکل در $T/2$ رخ می‌دهد. پس از آن میدان جریان تغییر

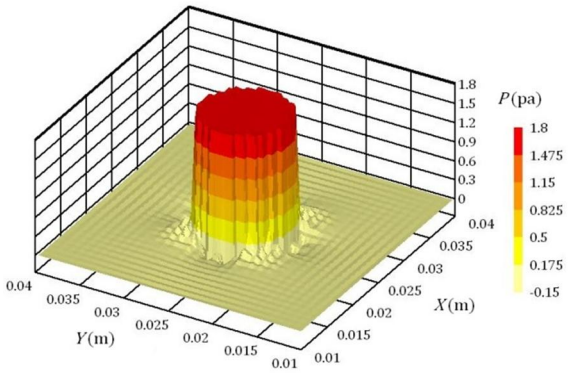
جهت می‌دهد و در ثانیه T شکل اولیه قطره باید دوباره بازسازی شود. خطای این شبیه‌سازی با رابطه‌ی (27) تعریف می‌شود که A سطح سلول و بالانویس I و F به ترتیب بیانگر ابتدا و انتهای شبیه‌سازی است.

$$\varepsilon_{2D} = \sum_{j=1}^{N} A_j \left|\alpha_j^I - \alpha_j^F\right| \tag{27}$$

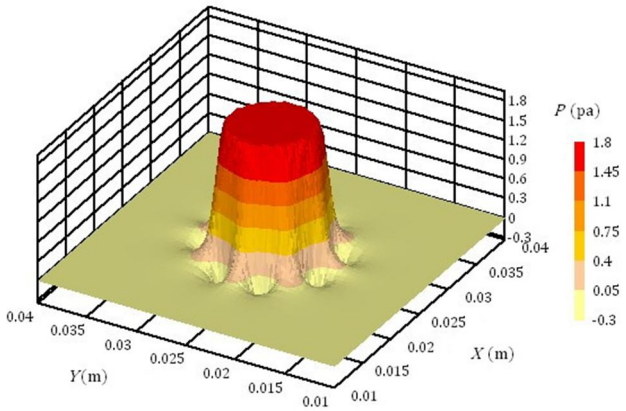
این مسئله بر روی سه شبکه با 32×32، 64×64 و 128×128 سلول مورد آزمایش قرار گرفته است و عملکرد حلگرها در جدول 5 گزارش شده است.

جدول 5 نشان می‌دهد در این مسئله، میزان خطای بازسازی سطح هر سه حلگر تقریباً از یک مقیاس است البته استفاده از فیلترها و یا ترکیب آن با روش سطوح هم‌تراز باعث کاهش اندک خطا شده است. همچنین مقایسه‌ی

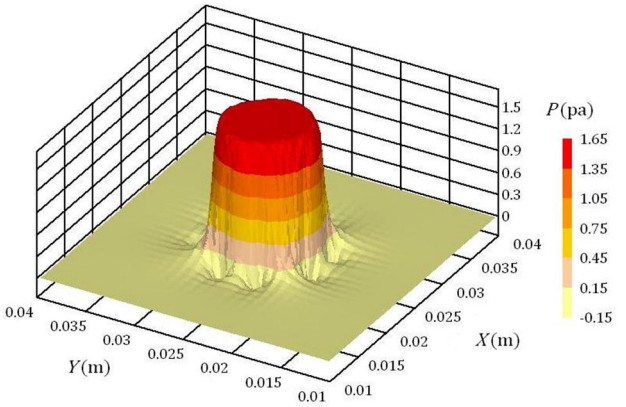
الف: فیلترها



ب: ترکیبی s-CLSVOF



ج: اینترفوم



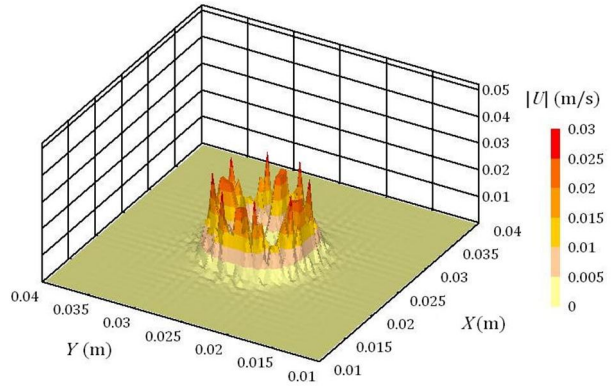
شکل 7 میدان فشار برای مسئله‌ی حباب ساکن در زمان t=0.1sec

حالت حباب در شکل 11 نشان می‌دهد که فصل مشترک با استفاده از فیلتر به دلیل کاهش جریان پارازیتی بهتر از روش ترکیبی s-CLSVOF در تغییر شکل‌های شدید مقاومت می‌کند و دیرتر دچار شکست می‌شود.

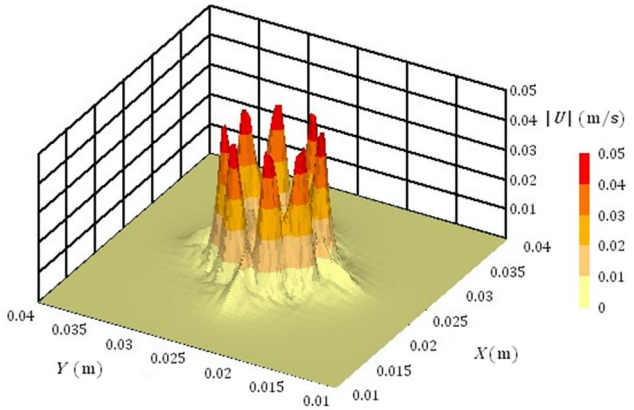
جدول 5 مقایسه میزان خطا ε_{2D} و نرخ همگرایی

اندازه سلول	32×32	نرخ	64×64	نرخ	128×128
اینترفوم	0/1287	0/47	0/0929	0/87	0/0507
فیلتر	0/1319	0/62	0/0858	0/78	0/0499
s-CLSVOF	0/1310	0/58	0/08714	0/9	0/0464

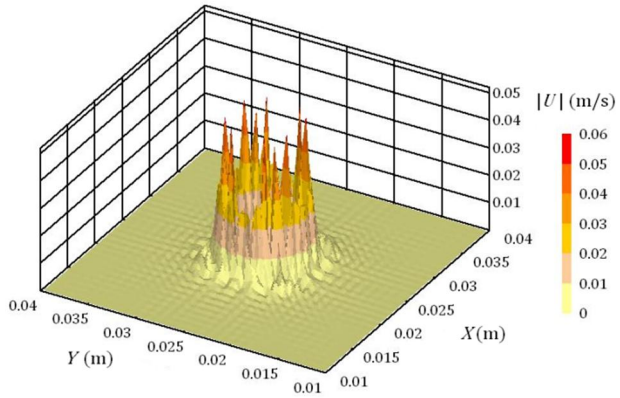
الف: فیلترها



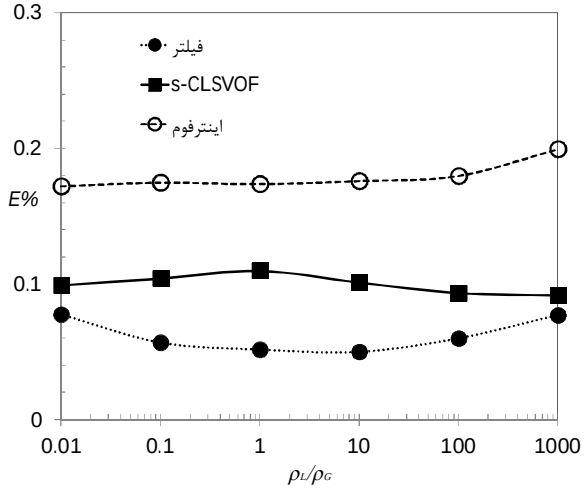
ب: ترکیبی s-CLSVOF



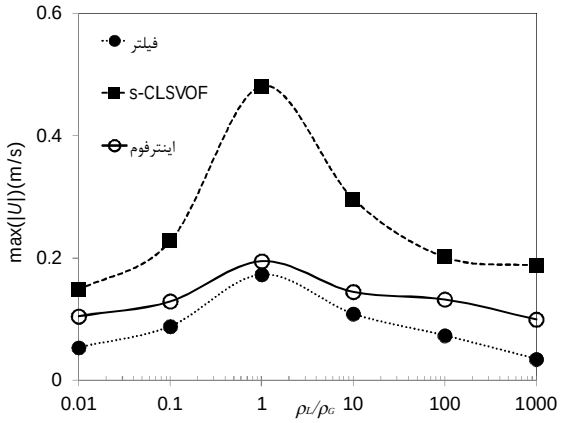
ج: اینترفوم



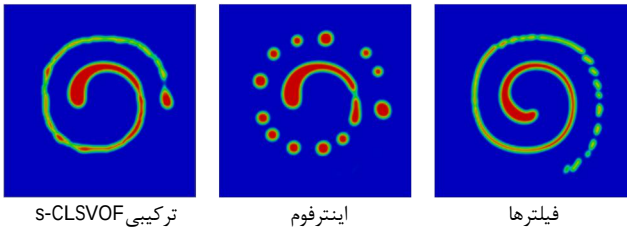
شکل 8 میدان سرعت در زمان t=0.1sec ، جریان پارازیتی در اطراف فصل مشترک ایجاد می‌شود.



شکل 9 درصد خطا در محاسبه‌ی پرش فشار (رابطه‌ی 24) در بازه زمانی t=0.1 sec



شکل 10 میانگین ماکزیمم جریان پارازیتی (رابطه 23) در بازه‌ی زمانی t=0.1 sec



شکل 11 شکل حباب در میدان چرخشی در لحظه‌ی $t=T/2$ در شبکه با 128×128 سلول

3-3- خیزش حباب در سیال ساکن

در این بخش حرکت حباب بالارونده در رژیم دامنه‌دار در حالت دو بعدی شبیه‌سازی شده است. انتخاب این رژیم برای بررسی عملکرد حلگرها به دلیل تغییر شکل عمده حباب در حین حرکت است. پارامترهای فیزیکی در جدول 6 ارائه شده است. این شبیه‌سازی بر روی شبکه‌ای با 320×480 سلول شش وجهی انجام شده است و شرایط مرزی نشان داده در شکل12برقرار است. شعاع اولیه‌ی حباب 0/031 m است.

جدول6 پارامترهای شبیه‌سازی خیزش حباب

	ابعاد	مایع	گاز
چگالی (ρ)	kg/m^3	998	1/2
ویسکوزیته (μ)	kg/ms	1/4	$1/8\times10^{-5}$
کشش سطحی (σ)	N/m	0/062	

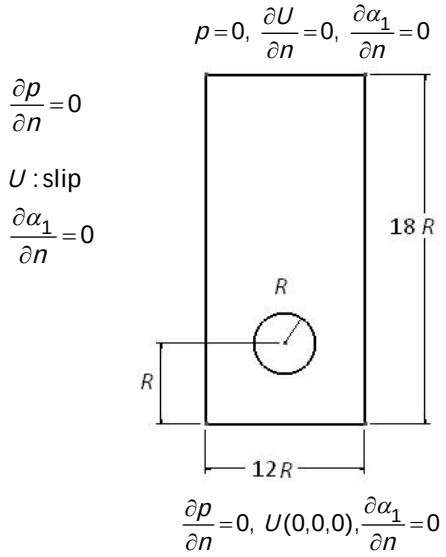
در شکل 13 تغییر مکان مرکز جرم حباب با زمان نشان داده شده است که سرعت حدی با محاسبه‌ی شیب این خطوط بدست می‌آید. در لحظات اولیه هر سه حلگر رفتار یکسانی را پیش بینی می‌کنند با گذشت زمان و تغییر شکل حباب، دنباله‌ی حباب در اینترفوم سریعتر دچار شکست می‌شود و از حباب اصلی جدا می‌گردد. آن‌گونه که در شکل 14 نشان داده شده است دنباله‌ی حباب در حلگرهای حاضر (فیلترها و روش ترکیبی s-CLSVOF) کشیده‌تر از حلگر اینترفوم شبیه سازی می‌شود. بنابراین این حلگر سرعت حدی کمتری را برای حرکت حباب پیش بینی می‌کند.

4- جمع‌بندی

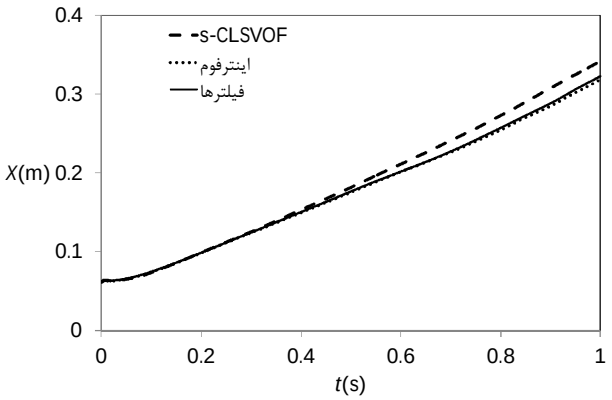
در این مطالعه جریان پارازیتی در روش حجم سیال در بسته محاسبات عددی متن‌باز اوپن‌فوم (حلگر اینترفوم) مورد سنجش قرار گرفته است. در این مطالعه برای بهبود محاسبه‌ی انحنای فصل مشترک در حلگر اینترفوم و در نتیجه بهبود محاسبه‌ی پرش فشار و کاهش جریان پارازیتی، از دو راهکار فیلترها و روش ترکیبی s-CLSVOF استفاده شده است و نتایج زیر بدست آمده است.

1- کاهش جریان پارازیتی

اندازه جریان پارازیتی با کمک حلگر حاضر (استفاده از فیلتر) در همه حالات (نسبت چگالی‌های متفاوت، تفکیک‌پذیری متفاوت شبکه) نسبت به

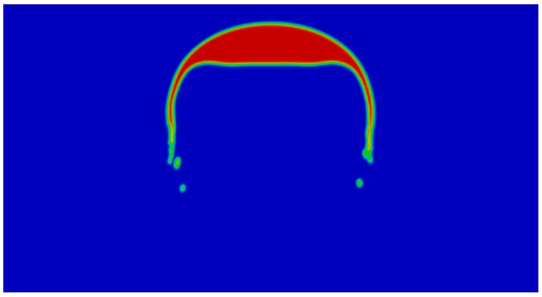


شکل 12 شرایط اولیه و مرزی برای شبیه‌سازی خیزش حباب

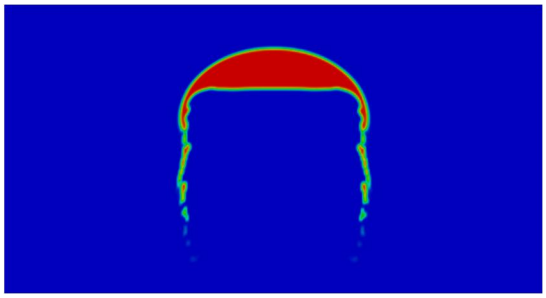


شکل 13 موقعیت مرکز جرم حباب با زمان

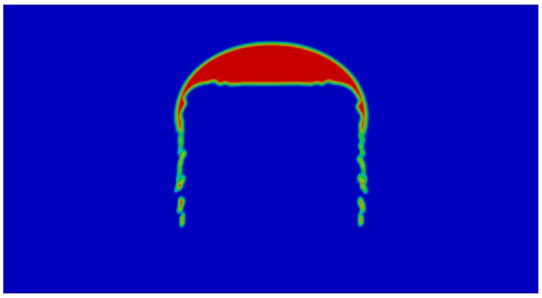
الف: ترکیبی s-CLSVOF



ب: اینترفوم



ج: فیلترها



شکل 14 شکل حباب پس از یک ثانیه

حلگر اینترفوم کاهش حداقل 100% داشته است.

2- بهبود محاسبه‌ی پرش فشار

با افزایش دقت محاسبه‌ی انحنا در حلگرهای حاضر (ترکیبی s-CLSVOF و فیلتر)، پرش فشار با دقت بیشتری تخمین زده می‌شود و خطای محاسبه‌ی پرش فشار حداقل 50% درصد در حلگرهای حاضر کم شده است.

3- کاهش جریان پارازیتی با زمان

در حلگرهای حاضر (فیلتر و ترکیبی s-CLSVOF) برخلاف حلگر اینترفوم جریان پارازیتی با زمان کاهش می‌یابد.

4- عملکرد بهتر روش فیلتر نسبت به روش ترکیبی s-CLSVOF

مقایسه روش فیلتر با روش ترکیبی s-CLSVOF در دو مسئله‌ی استاتیک و دینامیک نشان می‌دهد که فیلتر عملکرد بهتری نسبت به روش ترکیبی در کاهش جریان پارازیتی، تخمین پرش فشار و حفظ فصل مشترک ناشی از خطاهای عددی دارد.

5- ارائه تعداد دفعات تکرار مناسب برای هر فیلتر و مقایسه‌ی کارایی فیلترها نسبت به هم در حالت استاتیک

5- مراجع

[1] D. Youngs, Time-dependent multi-material flow with large fluid distortion, *Numerical methods for fluid dynamics,* Vol. 24, pp. 273-285, 1982 .

[2] O. Ubbink, R. Issa, A method for capturing sharp fluid interfaces on arbitrary meshes, *Journal of Computational Physics,* Vol. 153, No. 1, pp. 26-50, 1999 .

[3] C. W. Hirt, B. D. Nichols, Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, *Journal of Computational Physics,* Vol. 39, No. 1, pp. 201-225, 1981 .

[4] M. Sussman, P. Smereka, S. Osher ,A level set approach for computing solutions to incompressible two-phase flow, *Journal of Computational Physics,* Vol. 114, No. 1, pp. 146-159, 1994 .

[5] D. Jacqmin, Calculation of two-phase Navier–Stokes flows using phase-field modeling, *Journal of Computational Physics,* Vol. 155, No. 1, pp. 96-127, 1999 .

[6] J. Klostermann, K. Schaake, R. Schwarze, Numerical simulation of a single rising bubble by VOF with surface compression, *International Journal for Numerical Methods in Fluids,* Vol. 71, No. 8, pp. 960-982, 2013 .

[7] S. Muzaferija, M. Peri´ c, Computation of free-surface flows using the finite-volume method and moving grids, *Numerical Heat Transfer,* Vol. 32, No. 4, pp. 369-384, 1997 .

[8] M. Seifollahi, E. Shirani, N. Ashgriz, An improved method for calculation of interface pressure force in PLIC-VOF methods, *European Journal of Mechanics-B/Fluids,* Vol. 27, No. 1, pp. 1-23, 2008 .

[9] J. Brackbill, D. B. Kothe, C. Zemach, A continuum method for modeling surface tension, *Journal of Computational Physics,* Vol. 100, No. 2, pp. 335-354, 1992 .

[10] Y. Renardy, M. Renardy, PROST: a parabolic reconstruction of surface tension for the volume-of-fluid method, *Journal of Computational Physics,* Vol. 183, No. 2, pp. 400-421, 2002 .

[11] B. Lafaurie, C. Nardone, R. Scardovelli, S. Zaleski, G. Zanetti, Modelling merging and fragmentation in multiphase flows with SURFER, *Journal of Computational Physics,* Vol. 113, No. 1, pp. 134-147, 1994 .

[12] D. Gerlach, G. Tomar, G. Biswas, F. Durst, Comparison of volume-of-fluid methods for surface tension-dominant two-phase flows, *International Journal of Heat and Mass Transfer,* Vol. 49, No. 3, pp. 740-754, 2006 .

[13] Z. Wang, A. Y. Tong, A sharp surface tension modeling method for two-phase incompressible interfacial flows, *International Journal for Numerical Methods in Fluids,* Vol. 64, No. 7, pp. 709-732, 2010 .

[14] 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,* Vol. 152, No. 2, pp. 423-456, 1999 .

[15] A. Q. Raeini, M. J. Blunt, B. Bijeljic, Modelling two-phase flow in porous media at the pore scale using the volume-of-fluid method, *Journal of Computational Physics,* Vol. 23 ,1No. 17, pp. 5653-5668, 2012 .

[16] M. M. Francois, S. J. Cummins, E. D. Dendy, D. B. Kothe, J. M. Sicilian, M. W. Williams, A balanced-force algorithm for continuous and sharp interfacial surface tension models within a volume tracking framework, *Journal of Computational Physics,* Vol. 213, No. 1, pp. 141-173, 2006 .

[17] A. Albadawi, D. Donoghue, A. Robinson, D. Murray, Y. Delauré, Influence of surface tension implementation in Volume of Fluid and coupled Volume of Fluid with Level Set methods for bubble growth and detachment, *International Journal of Multiphase Flow,* Vol. 53, pp. 11-28, 2013 .

[18] M. Sussman, E. G. Puckett, A coupled level set and volume-of-fluid method for computing 3D and axisymmetric incompressible two-phase flows, *Journal of Computational Physics,* Vol. 162, No. 2, pp. 301-337, 2000 .

[19] D. Sun, W. Tao, A coupled volume-of-fluid and level set (VOSET) method for computing incompressible two-phase flows, *International Journal of Heat and Mass Transfer,* Vol. 53, No. 4, pp. 645-655 .2010 ,

[20] S. J. Cummins, M. M. Francois, D. B. Kothe, Estimating curvature from volume fractions, *Computers & structures,* Vol. 83, No. 6, pp. 425-434, 2005 .

[21] S. Popinet, An accurate adaptive solver for surface-tension-driven interfacial flows, *Journal of Computational Physics,* Vol. 228, No. 16, pp. 5838-5866, 2009 .

[22] F. Denner, D. R. van der Heul, G. T. Oud, M. M. Villar, A. d. Silveira Neto, B. G. van Wachem, Comparative study of mass-conserving interface capturing frameworks for two-phase flows with surface tension, *International Journal of Multiphase Flow,* Vol. 61, pp. 37-47, 2014 .

[23] D. A. Hoang, V. van Steijn, L. M. Portela, M. T. Kreutzer, C. R. Kleijn, Benchmark numerical simulations of segmented two-phase flows in microchannels using the Volume of Fluid method, *Computers & Fluids,* Vol. 86, pp. 28-36, 2013 .

[24] N. Samkhaniani, A. Gharehbaghi, Z. Ahmadi, Numerical simulation of reaction injection molding with polyurethane foam, *Journal of Cellular Plastics,* Vol. 49, No. 5, pp. 405-421, 2013

[25] E. Berberović, N. P. v. Hinsberg, S. Jakirlić, I. V. Roisman, C. Tropea, Drop impact onto a liquid layer of finite thickness: Dynamics of the cavity evolution, *The American Physical Society,* Vol. 79, No. 3, pp. 036306 (15), 2009 .

[26] M .Sussman, A second order coupled level set and volume-offluid

method for computing growth and collapse of vapor bubbles *J Comput Phys* Vol. 187, No. 1, pp. 110-136, 2003 .

[27] W. J. Rider, D. B. Kothe, Reconstructing Volume Tracking, *J. Comput. Phys,* Vol .141 ,No. 2 pp. 112-152, 1998 .

[28] S. S. Deshpande, L. Anumolu, M. F. Trujillo, Evaluating the performance of the two-phase flow solver interFoam, *Computational Science & Discovery*, Vol. 5, No. 1, pp. 014016, 2012 .

[29] F. Xiao, S. Ii, C. Chen, Revisit to the THINC scheme: a simple algebraic VOF algorithm, *Journal of Computational Physics*, Vol. 230, No. 19, pp. 7086-7092, 2011 .