



Simulation of a Viscous Two-Phase Flow with Complex Interface Deformations

E. Jahanbakhsh¹, R. Panahi²
and M. S. Seif³

Abstract

In this paper a compatible computational fluid dynamics procedure is presented for calculation of immiscible viscous incompressible fluids separated by a well-defined interface. Two fluids are modeled as a single continuum with a fluid property jump at the interface by solving a scalar transport equation for volume fraction. The conservation equations for mass and momentum are solved using fractional step method. A Finite Volume discretisation and colocated arrangement are used. Also, the pressure integral term in Navier-Stokes equation is discretised based on a newly developed interpolation which results in non-oscillatory velocity field especially at the interface of two high density ratio phases. Finally, computer code is developed based on the above mentioned algorithm and is verified using dam breaking problem with and without obstacle and Raleigh-Taylor instability. The results showed a good concordance with available experimental and numerical data.

Keywords: Volume Method, Fractional Step Method, Two-phase Flow, Piecewise Linear Interpolation

مدل سازی عددی جریان لزج همراه با تغییر شکل های پیچیده سطح آزاد

ابراهیم جهان بخش^۱، روزبه پناهی^۲
و محمد سعید سیف^۳

چکیده

در این مقاله الگوریتم عددی حجم محدود برای مدل سازی جریان گذرای لزج غیر قابل تراکم همراه با سطح آزاد ارائه شده است. برای حل میدان سرعت و فشار از روش گام جزئی استفاده گردیده است. به علاوه، به منظور مدل سازی مناسب تغییر شکل های پیچیده در سطح آزاد مثل شکست موج (که در کاربردهای عملی بسیار اتفاق می افتد) روش حجمی و حل معادله انتقال نسبت حجمی بکار برده شده است. استفاده از روش مذکور، به خصوص در زمانی که دو فاز سیال با اختلاف نسبت حجمی بالا (مثل آب و هوا) در میدان محاسباتی وجود داشته باشند، با مشکلاتی مثل نوسانات غیر فیزیکی میدان سرعت در ناحیه فصل مشترک دو فاز سیال همراه است. در این مقاله، با ارائه میانمایی جدید خط شکسته برای گسسته سازی جمله انتگرال فشار که در معادلات ناویر - استوکس ظاهر می شود، این مشکل حل شده و نتایج بسیار مناسبی در مدل سازی ها بدست آمده است. برای بررسی دقت و صحت الگوریتم پیشنهادی از مسأله ناپایداری رایلی - تیلور استفاده گردیده است. در مسأله دیگر، شکستن دیواره آب درون مخزن در دو حالت بدون مانع و با مانع مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی، بیانگر توانایی رویه مورد استفاده و اهمیت مدل سازی دو فاز سیال (در مقابل مدل سازی یک فاز) برای نزدیک شدن به مدل سازی واقعی می باشد.

کلمات کلیدی: روش حجمی، روش گام جزئی، جریان دو فازی، میانمایی خط شکسته

تاریخ دریافت مقاله: ۸ شهریور ۱۳۸۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۲۳ مرداد ۱۳۸۷

1- Research Assistant, Marine Laboratory, Sharif University of Technology

2- Research Assistant, Maritime Division, Transportation Research Institute

3- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology

۱- کارشناس ارشد پژوهشی، آزمایشگاه دریا، دانشگاه صنعتی شریف

۲- کارشناس ارشد پژوهشی، بخش حمل و نقل و تکنولوژی دریایی، پژوهشکده حمل و نقل وزارت راه و ترابری

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

مدل سازی جریان همراه با سطح آزاد را می توان به دو بخش (الف): محاسبه توزیع سرعت و فشار و یا به عبارت دیگر حل معادلات ناویر - استوکس و پیوستگی و (ب): مدل سازی سطح آزاد تفکیک نمود. روشهای مختلفی برای حل همزمان و غیر هم زمان معادلات ناویر - استوکس و پیوستگی وجود دارد. رویکردهای حل همزمان معادلات با هزینه بالای محاسباتی همراه بوده و از اینرو، رویکرد حل غیر همزمان چهار معادله مذکور (در حالت سه بعدی، سه معادله اندازه حرکت و یک معادله پیوستگی وجود دارد) بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. این رویکرد به سه دسته اصلی تخمین - اصلاح^۱ مثل سیمپل^۲ Patankar and Spalding (1972) و پیرو^۳ Issa (1986)، تراکم پذیری مصنوعی^۴ و گام جزئی^۵ Brown et al. (2001) تقسیم می شود. در تحقیق حاضر از رویکرد گام جزئی استفاده شده است که با یک بار حل معادله فشار در هر گام زمانی، شرط پیوستگی را ارضاء نموده و بر این اساس، انتخاب مناسبی برای حل مسائل گذرا محسوب می شود. Ferziger and Peric (2002) جزئیات بیشتر در رابطه با این روش در تحقیق Panahi et al. (2006) ارائه شده است.

همانگونه که اشاره شد، مسأله مهم دیگر مدل سازی سطح آزاد است که روشهای اصلی آن عبارتند از: روشهای سطحی یا تعقیب سطح آزاد^۶ و روشهای حجمی یا تسخیر سطح آزاد^۷ Panahi et al. (2005). اگرچه به طور کلی روشهای سطحی در مقایسه با روشهای حجمی، سطح آزاد را به صورت دقیق تری پیش بینی می نمایند، اما در مدل سازی تغییر شکل های پیچیده با محدودیت مواجه هستند (Ubbink, O. and Issa (1999) از اینرو، در تحقیق حاضر از یک روش حجمی مدل سازی سطح آزاد استفاده شده که به حل معادله انتقال نسبت حجمی دو فاز سیال موجود در میدان محاسباتی می پردازد.

در ادامه، معادلات اساسی حاکم بیان گردیده و به میانمایی های مورد استفاده در گسسته سازی حجم محدود معادلات اشاره شده است. سپس، مسأله شکستن دیواره آب درون مخزن در دو حالت بدون مانع و با مانع برای بررسی صحت مدل سازی و مسأله ناپایداری رایلی - تیلور برای بررسی دقت مدل سازی، مورد استفاده قرار گرفته اند. مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج مشابه عددی و آزمایشگاهی، بیانگر توانایی الگوریتم پیشنهادی در مدل سازی جریانهای واقعی همراه با تغییر شکل های پیچیده در سطح آزاد می باشد.

۲- معادلات اساسی حاکم

همانگونه که بیان گردید، در تحقیق حاضر برای مدل سازی سطح آزاد همراه با تغییر شکل های پیچیده مثل شکست موج، از رویکرد حجمی استفاده شده است. بر این اساس، با محاسبه توزیع دو فاز سیال در میدان محاسباتی (که نتیجه حل معادله انتقالی مطابق رابطه (۱) می باشد) می توان فرض نمود که یک سیال مؤثر به جای دو سیال مثل آب و هوا، در میدان محاسباتی وجود دارد. بدین ترتیب، معادلات ناویر - استوکس و پیوستگی برای یک سیال (که لزجت و جرم حجمی آن در ناحیه فصل مشترک دو فاز تغییر می کند) حل می گردد. معادله انتقال نسبت حجمی عبارتست از:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot (\alpha \bar{u}) = 0 \quad (1)$$

بدین ترتیب، پس از حل معادله (۱)، توزیع نسبت حجمی (α) (که در واقع درصد حضور دو سیال درون هر سلول محاسباتی می باشد) به صورت رابطه (۲) خواهد بود:

$$\alpha = \begin{cases} 1 & \text{for cells inside fluid 1} \\ 0 & \text{for cells inside fluid 2} \\ 0 < \alpha_0 < 1 & \text{for transitional area} \end{cases} \quad (2)$$

جرم حجمی و لزجت سیال مؤثر در هر سلول محاسباتی، با رابطه (۳) محاسبه می گردد:

$$\begin{aligned} \rho_{cell} &= \alpha \rho_1 + (1 - \alpha) \rho_2 \\ \nu_{cell} &= \alpha \nu_1 + (1 - \alpha) \nu_2 \end{aligned} \quad (3)$$

در رابطه (۳)، زیر نویس های ۱ و ۲ بیانگر دو فاز سیال (برای مثال آب و هوا) است.

در ادامه و با محاسبه جرم حجمی و لزجت مؤثر، معادلات ناویر - استوکس و پیوستگی برای سیال مؤثر حل می شوند. این معادلات عبارتند از:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + g_i \quad (4)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

در روابط (۴) و (۵) u_i مؤلفه سرعت، P فشار و g_i مؤلفه نیروی ثقل می باشند.

۳- گسسته سازی معادلات

در تحقیق حاضر از رویکرد حجم محدود برای گسسته‌سازی معادلات دیفرانسیلی حاکم استفاده شده است. براین اساس از معادلات موجود

بر روی حجم و زمان انتگرال گرفته می‌شود. با تبدیل رابطه (۱) به شکل حجم محدود، استفاده از قضیه گاوس^{۱۰} برای گسسته‌سازی مکانی و طرح کرنک - نیکلسون^{۱۱} برای گسسته‌سازی زمانی، رابطه (۶) بدست می‌آید (Panahi et al. (2005):

$$(\alpha^{t+\delta t} - \alpha^t) \frac{V}{\Delta t} + \frac{1}{2} \left(\sum_{f=1}^n \alpha_f^{t+\delta t} F_f^{t+\delta t} + \sum_{f=1}^n \alpha_f^t F_f^t \right) = 0$$

در رابطه (۶)، α_f نسبت حجمی روی سطح سلول بوده و به کمک میانبایی سیکسم^{۱۰} براساس مقدار مرکز سلول‌های مجاور سطح تقریب زده می‌شود. میانبایی مذکور روش ترکیبی بوده و از سی بی سی^{۱۱} (Gaskell and Lau (1988) و یو کیو^{۱۲} (Leonard (1991) برای بالابردن توانایی تقریب استفاده می‌نماید. $F_f = \bar{U}_f \cdot \bar{A}_f$ شار عبوری از روی سطح سلول بوده و در آن \bar{U}_f سرعت سیال روی سطح سلول است. از آنجا که در تحقیق حاضر از چیدمان هم مکان برای نگهداری اطلاعات سلول محاسباتی استفاده شده است، محاسبه سرعت سیال روی سطح نیازمند توجه خاصی می‌باشد که در بخش الگوریتم حل میدان سرعت و فشار به این موضوع اشاره شده است. برای گسسته مکانی جملات نفوذ^{۱۳} و جابجایی^{۱۴} در معادلات ناویر - استوکس به ترتیب از میانبایی‌های اور - ریلکسد^{۱۵} و گاما^{۱۶} استفاده شده است (Jasak (1996). برای گسسته سازی زمانی آنها نیز از میانبایی کرنک - نیکلسون استفاده گردیده است. گسسته سازی جمله انتگرال فشار در معادلات ناویر - استوکس، به خصوص در زمانی که دو فاز سیال با اختلاف نسبت حجمی بالا مثل آب و هوا وجود داشته باشند، بسیار مهم بوده و استفاده از میانبایی‌های خطی موجب بوجود آمدن میدان سرعت نوسانی در ناحیه گذر بین دو فاز می‌شود. برای رفع این مشکل، در تحقیق حاضر از میانبایی جدید خط شکسته استفاده شده است (Jahanbakhsh et al. (2007). بر

اساس میانبایی خط شکسته، مقدار فشار روی سطح سلول (P_f) بر اساس مقدار فشار مرکز سلول‌های مجاور آن (P_A و P_B) با رابطه (۷) تقریب زده می‌شود:

$$P_f = P_A \frac{\rho_B \delta_B}{\rho_A \delta_A + \rho_B \delta_B} + P_B \left(1 - \frac{\rho_B \delta_B}{\rho_A \delta_A + \rho_B \delta_B} \right) \quad (7)$$

در رابطه (۷)، ρ_B و ρ_A جرم حجمی سلول‌های مجاور سطح A و B بوده و δ_A و δ_B فاصله مرکز این سلول‌ها از مرکز سطح می‌باشند.

۴- الگوریتم حل میدان‌های سرعت و فشار

در تحقیق حاضر از رویکرد گام جزئی (Kim and Choi (2000) برای حل میدان‌های سرعت و فشار استفاده شده است. ترتیب روابط

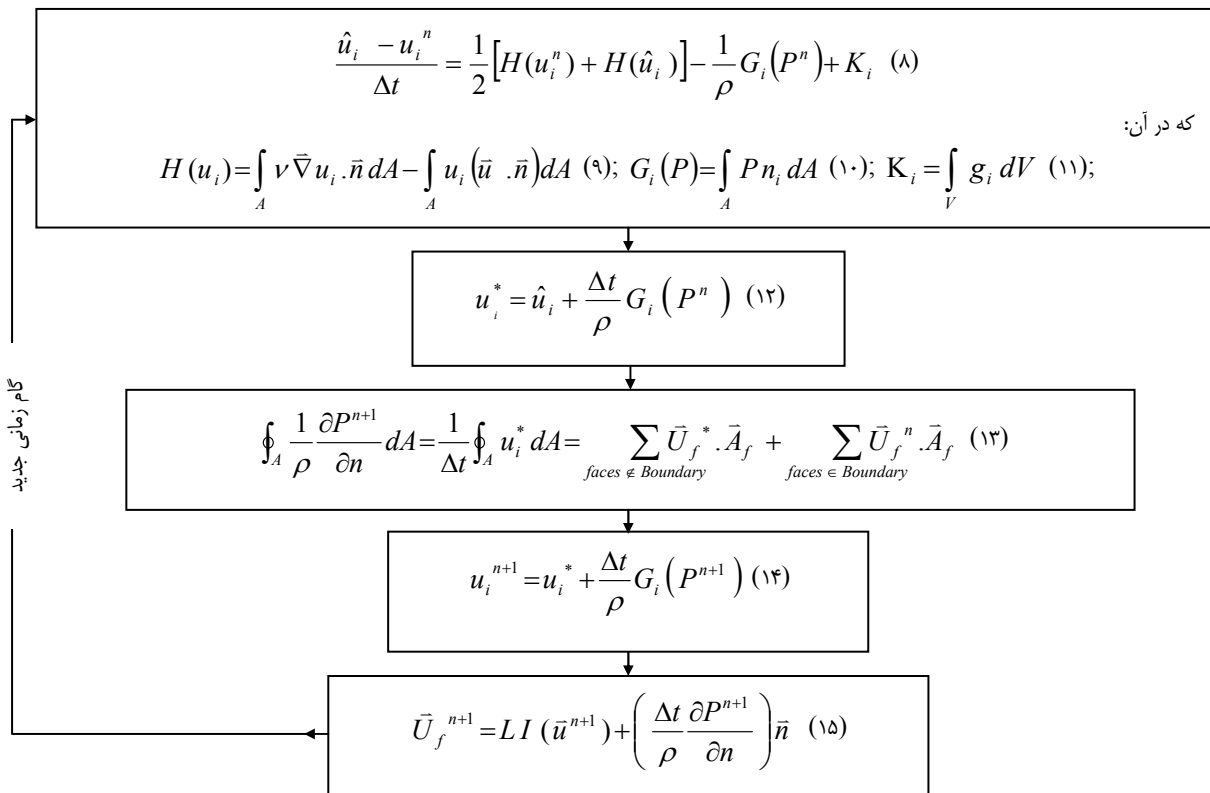
اساسی بکار برده شده در شکل ۱ مشاهده می‌شود. بر این اساس، در ابتدا سرعت‌های میانبایی \hat{u}_i و u_i^* با حل معادلات (۸) و (۱۲) بدست آمده و در ادامه معادله (۱۳) برای محاسبه میدان فشار P حل می‌شود. در رابطه (۱۳)، \bar{U}^* با میانبایی خطی محاسبه می‌شود. بدین ترتیب سرعت‌های فیزیکی u_i که شرط پیوستگی را ارضاء می‌نمایند، با استفاده از رابطه (۱۴) محاسبه می‌شوند. نکته دیگر، استفاده از میانبایی‌های معمول برای تقریب سرعت سیال روی سطح سلول در چیدمان هم مکان (که تمامی متغیرهای اصلی جریان در مرکز سلول محاسبه و نگهداری می‌شود) می‌باشد. این کار موجب بوجود آمدن نوسانات غیر فیزیکی در میدان فشار شده و برای جلوگیری از آن باید از میانبایی‌های خاصی استفاده نمود. بر این اساس، آنگونه که Zang et al. (1994) پیشنهاد نموده‌اند، مقدار سرعت روی سطح سلول (\bar{U}_f) با وارد کردن اثر گرادیان فشار مطابق رابطه (۱۵) محاسبه می‌شود. در رابطه (۱۵)، $LI(\dots)$ بیانگر میانبایی خطی سرعت سیال در سلول‌های مجاور سطح است.

۵- نتایج عددی

در این قسمت، برای بررسی دقت و صحت الگوریتم ارائه شده، دو مسأله ناپایداری رایلی - تیلور و شکستن دیواره آب درون مخزن بدون مانع و با مانع مدل‌سازی شده‌اند. مقایسه نتایج بدست آمده در مسأله رایلی - تیلور با کار عددی مشابه انجام شده، بیانگر دقت رویه عددی پیشنهادی می‌باشد. به علاوه، مسأله شکستن ستون آب درون مخزن به خصوص در حالت با مانع از مسائل پیچیده در مدل‌سازی سطح آزاد است. در مسأله شکستن دیواره آب درون مخزن با مانع، اهمیت مدل‌سازی سیال هوا و اثر آن بر نحوه تغییر شکل سطح آزاد به خوبی مشاهده می‌شود.

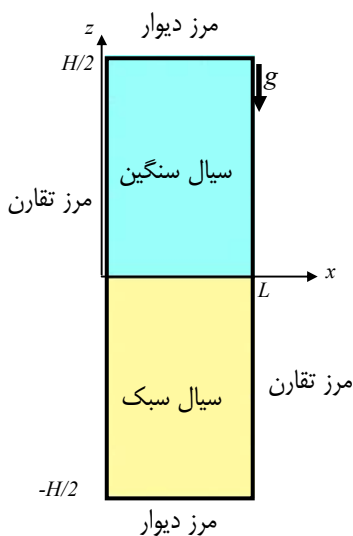
۵-۱- ناپایداری رایلی - تیلور با تحریک اولیه سرعت

در این مسأله، بطور کلی یک سیال سنگین بر روی یک سیال سبک نگه داشته شده و پس از رها سازی، جای دو سیال با توجه به اثر شتاب گرانش عوض می‌شود. نحوه این جابجایی، وابسته به نوع تحریک اولیه دو سیال متفاوت می‌باشد. در مسأله حاضر، سرعت اولیه مطابق رابطه (۱۶) به عنوان تحریک اولیه برای دو سیال (با نسبت جرم حجمی ۲ و لزجت یکسان) در نظر گرفته شده است. شکل ۲ بیانگر ابعاد، هندسه و شرایط مرزی مورد استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که مشخصات دو سیال در مسأله حاضر، با توجه به عدد رینولدز مورد بررسی (که در ادامه به آن پرداخته شده است) بطور دقیق تنظیم می‌شود.



شکل ۱- ترتیب روابط مورد استفاده در پیاده سازی الگوریتم گام جزئی Kim and Choi (2000)

شده است. مشاهده گردیده است که در لحظات نخست جابجایی دو سیال، تغییر شکل فصل مشترک ماهیتی متقارن داشته و در ادامه این تقارن از بین می‌رود. برای بررسی اثر عدد رینولدز در شکل گیری فصل مشترک نیز، مسأله رایلی - تیلور در اعداد رینولدز مختلف مدل سازی شده و تغییر شکل فصل مشترک در زمان بی بعد ۴/۸ برای سه عدد رینولدز در شکل ۴ نمایش داده شده است.



در این مسأله، شرط عدم لغزش در مرزهای بالا و پایین و شرط تقارن در مرزهای کناری بر میدان سرعت اعمال شده است. به علاوه، گرادینان قائم صفر برای فشار در تمام مرزها در نظر گرفته شده است.

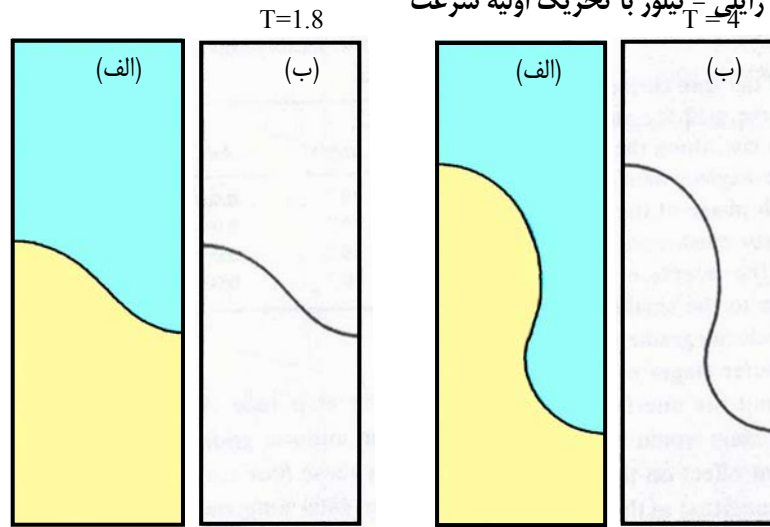
$$\frac{u}{V} = \begin{cases} \alpha \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) \exp\left(-\frac{\pi |y|}{L}\right) & \frac{y}{L} > 0 \\ -\alpha \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) \exp\left(-\frac{\pi |y|}{L}\right) & \frac{y}{L} < 0 \end{cases}$$

$$\frac{v}{V} = \alpha \cos\left(\frac{\pi x}{L}\right) \exp\left(-\frac{\pi |y|}{L}\right) \quad (۱۶)$$

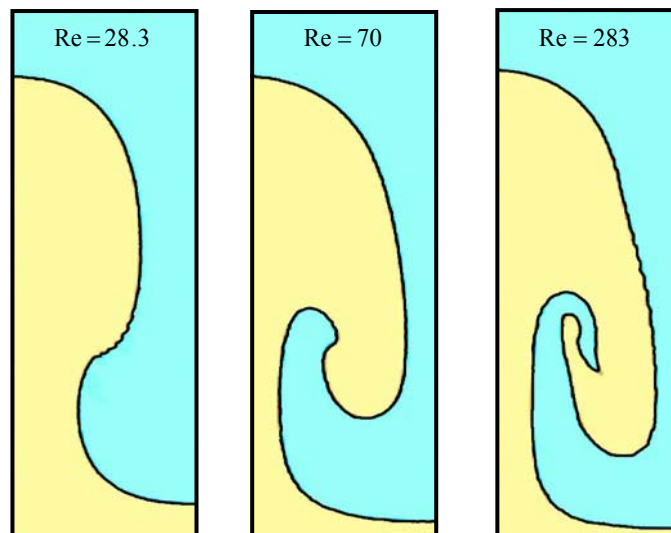
$$\alpha = \frac{\pi A \Delta y}{2V L}$$

در رابطه (۱۶)، $A = \sqrt{gL}$ ، دامنه اغتشاش برابر $2L$ و Δy عرض سلول‌های مورد استفاده در شبکه بندی یکنواخت می‌باشد. برای بررسی دقت مدل سازی عددی از مسأله رایلی- تیلور در تحقیق مشابه انجام شده توسط Kelcey and Pletcher (1997) استفاده گردیده است. بر این اساس، عدد رینولدز مسأله $Re = \rho_r V L / \mu_r$ (که با توجه به خصوصیات سیال سنگین تعریف می‌شود) برابر $28/3$ می‌باشد. نتایج تحقیق حاضر و تحقیق عددی مشابه در شکل ۳ با یکدیگر مقایسه گردیده‌اند. لازم به ذکر است که تحقیق مشابه از روش تراکم پذیری مصنوعی برای حل میدان سرعت و فشار استفاده نموده است. زمان بی بعد مورد استفاده به صورت $T = t \sqrt{g/L}$ تعریف

شکل ۲- ابعاد، هندسه، موقعیت دو سیال و شرایط مرزی مورد استفاده در مسأله رایلی-تیلور با تحریک اولیه سرعت



شکل ۳- مقایسه نحوه جابجایی دو سیال در مسأله رایلی - تیلور با تحریک اولیه سرعت در دو زمان بی بعد، (الف): نتایج عددی تحقیق حاضر، (ب): نتایج تحقیق عددی مشابه انجام شده توسط Kelcey and Pletcher (1997)



شکل ۴- بررسی اثر تغییر عدد رینولدز مسأله رایلی - تیلور با تحریک اولیه سرعت در نحوه جابجایی دو سیال؛

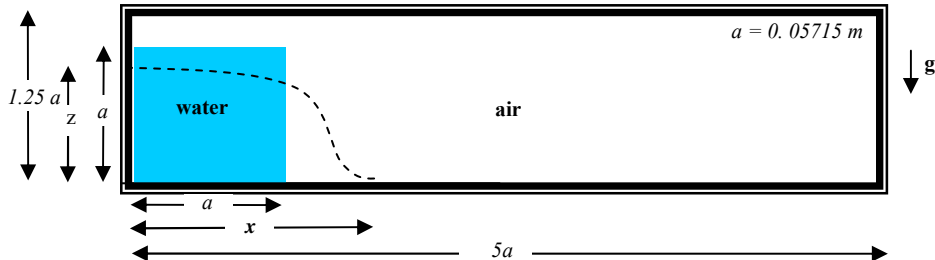
۲-۵- شکستن دیواره آب درون مخزن

مسئله شکستن دیواره آب درون مخزن از مسائل رایج برای بررسی صحت مدل‌سازی سطح آزاد در کارهای عددی می‌باشد. در این مسئله برای مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی از مقدار پیش روی و کاهش ارتفاع ستون آب درون مخزن استفاده می‌گردد. هندسه مسئله مورد بررسی در شکل ۵ نشان داده است، که در آن $a = 0.05715$ متر می‌باشد.

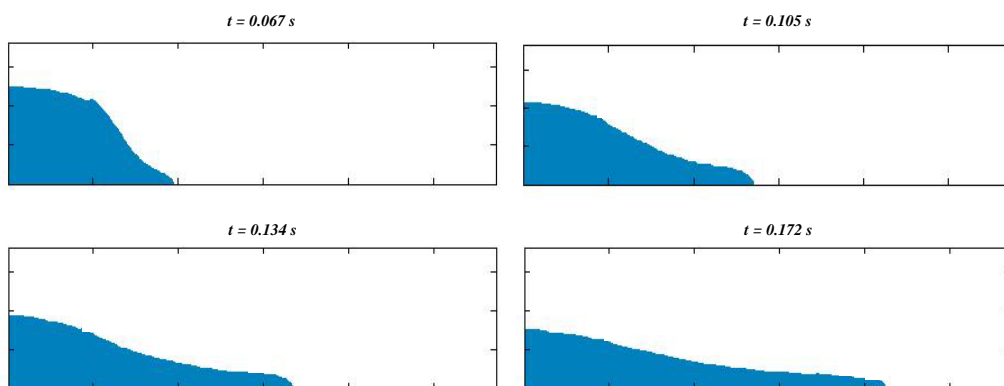
در اینجا از شرط مرزی عدم لغزش برای سرعت و گرادیان قائم صفر برای فشار در تمامی سطوح استفاده شده است. همچنین، شبکه یکنواخت 40×160 و گام زمانی 10^{-5} ثانیه مورد استفاده قرار گرفته است. جابجایی سطح آزاد تا قبل از برخورد به دیواره مخزن در چند گام زمانی در شکل ۶ نشان داده شده است. به علاوه، مدل‌سازی سه بعدی مسئله مذکور نیز مطابق شکل ۵ و با عرضی معادل a با استفاده از شبکه یکنواخت $20 \times 20 \times 80$ و گام زمانی 10^{-4} ثانیه انجام شده است. برای بررسی صحت کار انجام شده، مقدار پیش روی و کاهش ارتفاع ستون آب (که در حالت سه بعدی روی

صفحه تقارن اندازه‌گیری می‌شود) با نتایج آزمایشگاهی گردیده‌اند. اگرچه دقت نتایج بدست آمده قابل قبول می‌باشد، اما عده‌ای برای مقایسه کار خود با نتایج آزمایشگاهی مذکور، اطلاعات خود را در زمان به جلو می‌برند (Croce et al. (2004). این کار بر اساس احتمال عدم تطابق بین زمان شروع کار تجربی و عددی انجام می‌پذیرد. همان طور که می‌توان مشاهده نمود، با انجام این عمل نتایج عددی به گونه مناسبی با نتایج آزمایشگاهی منطبق خواهند شد. ذکر این نکته ضروری است که در تحقیق حاضر اثر کشش سطحی در نظر گرفته نشده است که می‌تواند عامل دیگری در وجود این اختلاف باشد.

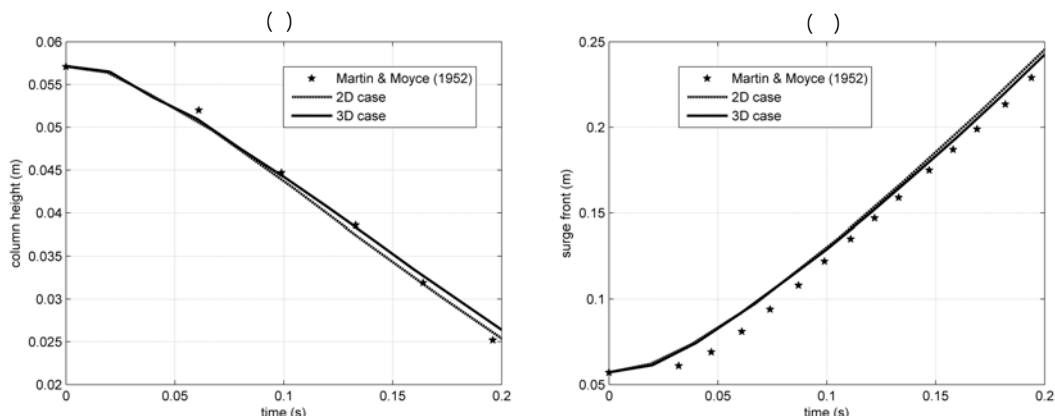
همانگونه که در نمودارهای شکل ۷ مشاهده می‌شود، اختلاف کمی بین نتایج مدل‌سازی‌های دو بعدی و سه بعدی وجود دارد. علت این مسئله را می‌توان در بالا بودن عدد رینولدز جریان و در نتیجه کاهش اثر دیواره‌ها بر روی جریان جستجو کرد. به هر حال، نتایج سه بعدی به داده‌های آزمایشگاهی نزدیک تر می‌باشند.



شکل ۵- مشخصات مسئله شکستن دیواره آب درون مخزن بدون مانع



شکل ۶- پیشروی آب درون مخزن بدون مانع در زمانهای مختلف پس از رها سازی ستون



شکل ۷- مقایسه نتایج عددی تحقیق حاضر و نتایج آزمایشگاهی (Martin and Moyce 1952)؛

(الف): پیش روی آب در مخزن، (ب): کاهش ارتفاع آب در مخزن

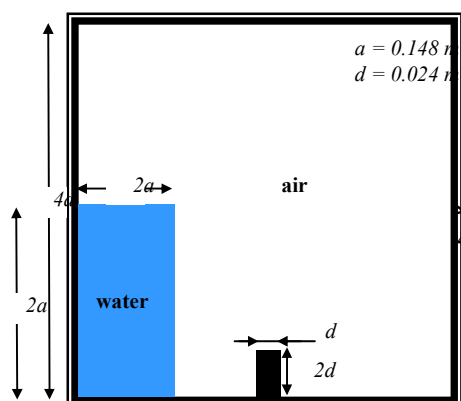
مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی Koshizuka et al. (1995) در شکل ۱۰، بیانگر توانایی الگوریتم ارائه شده در مدل سازی تغییر شکل های پیچیده سطح آزاد است.

۶- نتیجه گیری

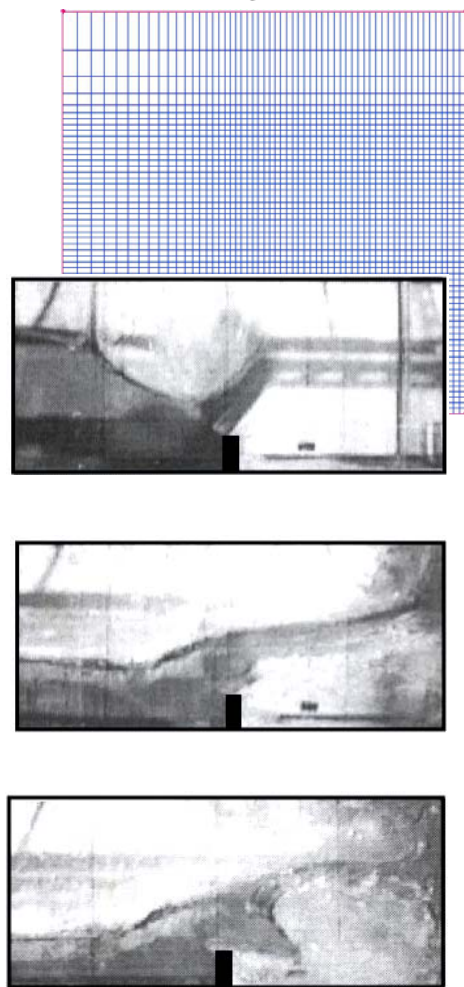
مدل سازی جریان لزج همراه با تغییر شکل های پیچیده در سطح آزاد، در بسیاری از مسائل عملی کاربرد دارد. در این مقاله از روش گام جزئی برای حل میدان سرعت و فشار استفاده شده است که به کوتاه شدن زمان حل در مسائل گذرا کمک می کند. به علاوه، از روش حجمی و حل معادله انتقال نسبت حجمی برای مدل سازی سطح آزاد استفاده گردیده که توانایی مدل سازی پدیده هایی مثل شکست موج را داراست. ترکیب این دو روش (به خصوص برای مدل سازی سطح آزاد بین دو سیال با اختلاف جرم حجمی بالا) با مشکل نوسان میدان سرعت در ناحیه گذر بین دو فاز روبرو می باشد. برای حل این مشکل، میانمایی جدید خط شکسته در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. مقایسه نتایج بدست آمده با کارهای عددی و تجربی مشابه، بیانگر دقت و صحت الگوریتم ارائه شده و امکان استفاده از آن در کاربردهای عملی می باشد.

حضور مانع در مسیر آب جاری شده در مسأله شکستن دیواره آب، باعث بروز تغییر شکل های پیچیده در سطح آزاد شده و مدل سازی آن را سخت تر می نماید. بر این اساس، از مسأله مذکور برای تأیید کارایی الگوریتم پیشنهادی استفاده شده است. شکل ۸ هندسه مسأله شکستن دیواره آب درون مخزن با مانع را نمایش می دهد. شرایط مرزی مورد استفاده مشابه مسأله قبل بوده و از ۴۵۰۰۰ سلول محاسباتی مطابق شکل ۹ و گام زمانی 10^{-4} استفاده شده است.

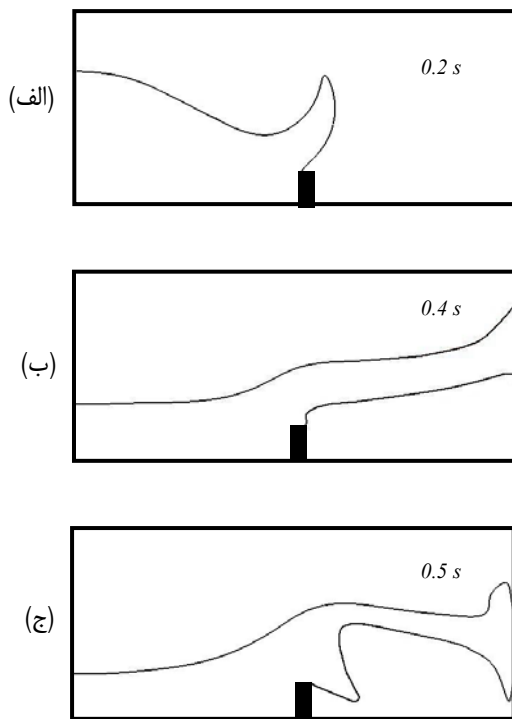
چند نکته مهم در مدل سازی این مسأله وجود دارد. نخست آنکه به دلیل محبوس شدن هوا در میان آب، حل جریان هوا نیز همانند آب ضروری می باشد. در این حالت، هوای محبوس بین آب و دیواره مخزن (شکل ۱۰- ب) موجب نازک شدن تدریجی و در نهایت گسستگی نوار آب پاشیده شده بعد از زمان ۰/۵ ثانیه (شکل ۱۰- ج) می گردد. لازم به ذکر است که در مسأله شکست ستون مایع دوبعدی و سه بعدی درون مخزن بدون مانع نیز جریان در هر دو فاز حل گردید، اما می توان نشان داد که صرف نظر کردن از حل جریان در فاز هوا تأثیری بر روی فیزیک آن مسأله نمی گذارد. نکته دیگری که باید مورد توجه قرار گیرد، ایجاد جت کوچکی است که پس از برخورد آب با مانع در زمان ۰/۴ ثانیه (شکل ۱۰- ب) در روی مانع شکل گرفته و در ادامه، مشابه زمان ۰/۵ ثانیه در شکل ۱۰- ج به سمت پایین رشد می کند. مشاهده شده است که بالا بردن دقت شبکه محاسباتی با ریز کردن آن در اطراف مانع، تأثیر زیادی بر روی ایجاد جت مذکور دارد. به بیان دیگر، در شبکه های درشت تر این جت بوجود نیامده و مدل سازی فیزیک مسأله با مشکل روبرو خواهد شد.



شکل ۸- هندسه مسأله شکستن دیواره آب درون مخزن با مانع



شکل ۹- شبکه بندی دامنه محاسباتی در مسأله شکستن دیواره آب درون مخزن با مانع



شکل ۱۰- مقایسه نحوه تغییر شکل سطح آزاد در میان نتایج عددی تحقیق حاضر (سمت چپ) و نتایج آزمایشگاهی Koshizuka et al. (1995) (سمت راست) پس از زمان رها شدن ستون آب

5. Fractional Step
6. Surface Tracking
7. Surface Capturing
8. Gauss Theorem
9. Crank-Nicholson
10. Compressive Interface Capturing Scheme for Arbitrary Meshes-CICSAM

پی نوشتها

1. Predictor-Corrector
2. Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations-SIMPLE
3. Pressure Implicit with Splitting of Operators-PISO
4. Artificial Compressibility

- incompressible flow with hybrid unstructured grids”, *Journal of Computational Physics*, 162, pp. 411-428.
- Koshizuka, S., Tamako, H. and Oka, Y. (1995), “A particle method for incompressible viscous flow with fluid fragmentation”, *Computational Fluid Dynamics Journal*, 4 (1), pp. 29-46.
- Leonard, B.P., (1991) “The ULTIMATE conservation difference scheme applied to unsteady one dimensional direction”, *Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 88, pp. 17-74.
- Martin, J.C. and Moyce, W.J. (1952), “An experimental study of the collapse of liquid columns on a rigid horizontal plane”, *Philosophy Transcript of Royal Society of London*, A244, pp. 312-324.
- Panahi, R., Jahanbakhsh, E. and Seif, M.S. (2005), “Effect of interpolation in interface capturing methods”, *8th Numerical Towing Tank Symposium (NuTTs)*, Varna, Bulgaria.
- Panahi, R., Jahanbakhsh E. and Seif, M.S. (2005), “Comparison of interface capturing methods in two phase flow”, *Iranian Journal of Science & Technology*, Transaction B: Technology, 29(B6), pp. 539-548.
- Panahi, R., Jahanbakhsh, E. and Seif, M.S. (2006), “Development of a VOF-fractional step solver for floating body motions simulation”, *Applied Ocean Research*, 28, pp. 171-181.
- Patankar, S.V. and Spalding, D.B., (1972), “A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three dimensional parabolic flows”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 15, 1787 p.
- Ubbink, O. and Issa, R.I. (1999), “A method for capturing sharp fluid interfaces on arbitrary meshes”, *Journal of Computational Physics*, 153, pp. 26-50.
- Zang, Y., Street, R.L. and Koseff, J.R. (1994), “A non-staggered fractional step method for time-dependent incompressible Navier-Stokes equations in curvilinear Coordinate”, *Journal of Computational Physics*, 114: pp. 18-33.
11. Convection Boundedness Criteria-CBC
 12. ULTIMATE QUICKEST-UQ
 13. Diffusion Term
 14. Convection Term
 15. Over-Relaxed
 16. Gamma

۷- مراجع

- Brown, D.L., Cortez, R. and Minion, M.L. (2001), “Accurate projection methods for the incompressible Navier-Stokes equations”, *Journal of Computational Physics*, 168, pp. 464-499.
- Croce, R., Griebel, M. and Schweitzer, M. A. (2004) “A parallel level-set approach for two-phase flow problems with surface tension in three space dimensions”, *Preprint 157, Sonderforschungsbereich 611*, Universitat Bonn.
- Ferziger, J.H. and Peric, M. (2002), *Computational methods for fluid dynamics*, 3rd Ed., Springer.
- Gaskell, H. and Lau, A.K.C. (1988), “Curvature-compensated convective transport: SMART, a new boundedness-preserving transport algorithm”, *International Journal of Numerical Methods in Fluids*, 8, pp. 617-641.
- Issa, R.I. (1986), “Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting”, *Journal of Computational Physics*, 62(1), pp. 40-65.
- Jahanbakhsh, E., Panahi, R. and Seif, M.S. (2007), “Numerical Simulation of Three-Dimensional Interfacial Flows”, *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 17(4), pp. 384-404.
- Jasak, H. (1996), “Error analysis and estimation for finite volume method with application to fluid flows”, *PhD Thesis*, University of London.
- Kelcey, F.J. and Pletcher, R.H. (1997), “The development of free surface capturing approach for multidimensional free surface flows in closed containers”, *Journal of Computational Physics*, 138, pp. 939-980.
- Kim, D. and Choi, H. (2000), “A second-order time-accurate finite volume method for unsteady