

بررسی عددی تأثیر متقابل جریان و سطح آزاد آن در یک حفره دوبعدی

محسن گودرزی، استادیار دانشکده مهندسی دانشگاه بوعلی

چکیده

در شبیه سازی جریانهای با سطح آزاد، اعمال شرط مناسب در سطح آزاد از اهمیت ویژه ای برخوردار است. جریان با سطح آزاد در یک حفره دوبعدی با سطح زیرین متحرک توسط یک روش عددی که قادر است در سطح آزاد از شرط مرزی تقریبی یا دقیق استفاده کند به صورت عددی، حل شده است. نتایج حاصل نشان می دهد در چنین جریانهایی که اصولاً گرادیان فشار غیرهیدرواستاتیک غالب جهتی وجود ندارد و این گرادیانهای فشار در کل میدان جریان کوچک هستند. تأثیر متقابل میدان جریان و جابجاییهای حتی کوچک سطح آزاد بر یکدیگر بسیار زیاد است. لذا صرف نظر کردن از جابجاییهای سطح آزاد در حل عددی دقت پیش بینی رفتار سیال را کاهش می دهد.

کلمات کلیدی: جریان با سطح آزاد، حفره دوبعدی، فشار غیر هیدروستاتیک

Numerical Study of Interaction between Flow Field and Free Surface in a Two Dimensional Cavity

M. Goodarzi Assistant Professor, Faculty of Engineering, University of Buali Sina

Abstract

It is very important to implement correct boundary condition at the free surface of a flow field. A 2D cavity with movable bottom has been solved with a numerical method which can use two types of boundary conditions at the free surface. The numerical results show that in these types of flows, which non-hydrostatic pressure gradients have not dominant direction, and they are small in the whole of the flow field, even a little displacements of the free surface have very large effects on the flow field configuration. Therefore, ignoring the free surface displacements in the numerical solution leads to some errors in flow behavior predictions.

Keywords: Free surface flow, Two dimensional cavity, Non-hydrostatic pressure

۱- مقدمه

بخش عمده ای از جریانهای تراکم ناپذیر در صنعت به جریانهای با سطح آزاد اختصاص دارد. جریان درون مخازن مایعات به خصوص در صنایع نفت و پتروشیمی نمونه های بارزی از این مقوله می باشند. لذا مطالعه این جریانها از اهمیت زیادی برخوردار است. مطالعه تجربی به امکانات آزمایشگاهی و اندازه گیری گران قیمتی نیاز دارد که در کشور ما کمتر وجود دارند. لذا بررسی عددی جریانها به منظور مطالعه پدیده های جریانهای یکی از معمولترین روشهایی است که در مراکز تحقیقاتی بدون امکانات آزمایشگاهی مورد استفاده محققین قرار می گیرد. علاوه بر این در روشهای تجربی نمی توان تمامی کمیتهای میدان جریان را اندازه گیری کرد. در مقابل روشهای عددی به شرط داشتن توانایی پیش بینی صحیح الگوی جریان، تنها به کامپیوتر مناسب نیاز دارند و تمامی کمیتهای جریان در تمام نقاط میدان جریان قابل محاسبه هستند.

مدل سازی جریانها با سطح آزاد یکی از مشکل ترین مباحث عددی در دینامیک سیالات محاسباتی است، زیرا محل سطح آزاد جریان قبل از حل عددی میدان جریان مشخص نیست و باید در روند حل عددی پیوسته آن را ردیابی کرد. این کار به کمک اعمال شرایط مرزی در سطح آزاد صورت می گیرد. برای اعمال شرط مرزی که حرکت سطح آزاد را در حل معادلات وارد کند از دو روش کلی زیر استفاده می شود:

الف- ردیابی سطح آزاد درون یک شبکه ثابت به نحوی که سطح آزاد همیشه درون شبکه باشد. در این روش از یک کمیت اسکالر که معرف محل سطح آزاد است استفاده می شود. از میان روشهای به کار رفته در این دسته به روشهای MAC [۱] و VOF [۲] می توان اشاره کرد. این روشها برای حالاتی که اختلاف ارتفاع سطح آزاد در نقاط مختلف خیلی زیاد است و یا شیبهای شدیدی در سطح آزاد نسبت به سطح افق ایجاد می شود، در مقایسه با روشهای رده بعدی مناسب هستند.

ب- ردیابی سطح آزاد به عنوان مرز شبکه حل. در این روشها شبکه حل منحصر به سیال مایع بوده و نقاط شبکه در خارج از سیال وجود ندارند و محل سطح آزاد به عنوان یکی از مرزهای میدان حل بطور پیوسته باید مشخص شود. بنابراین شبکه حل نیز در هر مرحله از محاسبات بازسازی خواهد شد. در این روش سطح آزاد بصورت یک رویه با ضخامت صفر معرفی می شود. این روشها برای جریانهایی که اختلاف ارتفاع سطح آزاد در نقاط مختلف زیاد نیست و یا شیبهای کمی در سطح آزاد وجود دارد مناسب هستند.

گودرزی و عظیمیان یک روش عددی را در سال ۱۳۸۲ معرفی کردند که صحت و دقت آنرا برای جریان درون کانالها مورد ارزیابی قرار دادند [۳، ۴، ۵ و ۶]. این روش را می توان در رده روشهای عددی نوع دوم فوق الذکر قرار داد. خصوصیت بارز این روش در مقایسه با روشهای هم رده آن این است که هم برای جریانهای با سطح آزاد و هم برای جریانهای بدون سطح آزاد می توان از آن استفاده کرد [۳] زیرا در این روش با تعریف فشار غیرهیدرواستاتیک، معادلات اندازه حرکت شبیه به معادلات اندازه حرکت در جریانهای بدون سطح آزاد می شود. همچنین ایشان شرایطی را که می توان از شرط مرزی تقریبی به جای شرط مرزی دقیق در سطح آزاد استفاده کرد برای جریان در کانالها بررسی کردند [۴ و ۷]. طبق نتایج آنها چون در کانالها گرادیان فشار غیر هیدرواستاتیک غالب در راستای کانال می باشد، در صورتی که جابجاییهای سطح آزاد کوچک باشند، صرف نظر کردن از این جابجاییهای کوچک خطای زیادی در پیش بینی رفتار جریان ایجاد نمی کند.

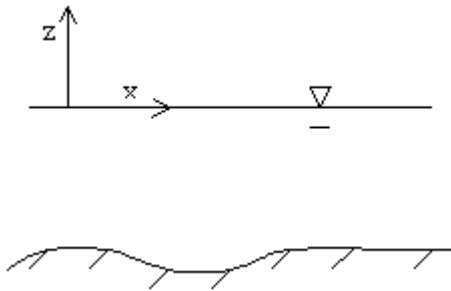
برای اطمینان کردن به یک روش عددی تازه معرفی شده باید آن روش عددی را برای موارد دیگری هم به کار گرفت تا کارایی آن مورد آزمایش قرار گیرد. علاوه بر این دقت به کارگیری شرط مرزی تقریبی برای جریانهایی که دارای گرادیان فشار غیرهیدرواستاتیک غالب در جهت خاصی نیستند باید بررسی شود. اکثر میدانهای جریان با سطح آزاد شامل جریان درون کانالهای باز است. در این جریانها اصولاً گرادیان فشار غیرهیدرواستاتیک در امتداد کانال اهمیت دارد و در جهت های دیگر در مقایسه با جهت قبلی ناچیز هستند. هدف تحقیق حاضر بررسی یک میدان جریان با گرادیان فشار غیرهیدرواستاتیک قابل توجه در تمام جهتها است. برای این منظور باید در میدان جریان گردابه ای وجود داشته باشد. جریان با سطح آزاد در یک حفره دو بعدی که سطح زیرین آن متحرک است، می تواند چنین خصوصیتهایی داشته باشد. در این جریان بر خلاف جریان در کانالها گرادیان فشار غیرهیدرواستاتیک در تمام جهتها اهمیت دارد. البته باید متذکر شد که این جریان به صورت کلاسیک توسط نویسندگان معرفی شده است و سابقه بررسی قبلی، به خصوص به صورت تجربی ندارد. این الگوی جریان می تواند مدلی برای رفتار جریان در یک مخزن نوسان گیر در مسیر کانال انتقال آب از مخزن سد به محل توربینها باشد. لذا از جنبه کاربردی مطالعه دارای اهمیت است.

از آنجا که این روش عددی بر مبنای روش تصحیح فشار تنظیم شده است [۶] برای بررسی صحت عملکرد برنامه کامپیوتری دوبعدی تهیه شده در ابتدا جریان آرام درون یک

در صورتیکه در سطح آزاد جریان تبخیر صورت نگیرد شار جرمی عبوری از سطح آزاد جریان صفر می‌باشد. بیان ریاضی این مطلب به صورت زیر است:

$$\frac{Dz}{Dt} = u_{fs} \frac{\partial h}{\partial x} = w_{fs} \quad (4)$$

پس شرط سینماتیکی در سطح آزاد جریان مبین صفر بودن شار جرمی در آن سطح است.



شکل ۱- دستگاه مختصات دکارتی و سطح مرجع

شرط دینامیکی در سطح آزاد برای برابری نیروهای وارد بر سطح آزاد ناشی از محیطهای مجاور آن می‌باشد، بدین معنی که برایند نیروهای مماسی ناشی از تنش برشی و کشش سطحی سیال و نیز برایند نیروهای عمود بر سطح ناشی از فشار سیال و فشار اتمسفر (یا فشار محیط مجاور سطح سیال) صفر می‌باشند. در اغلب موارد به علت کوچک بودن چگالی و لزجت محیط مجاور سطح آزاد سیال، از تنش برشی در سطح آزاد صرفنظر می‌کنند ($\partial u / \partial \zeta = 0.0$). در ضمن برای جریانهایی که دارای ابعاد سطح آزاد بزرگ هستند از نیروی کشش سطحی هم می‌توان صرفنظر کرد. لذا در چنین حالتی شرط دینامیکی در سطح آزاد برابری فشار سیال با فشار محیط مجاور آن، که در این متن فشار اتمسفر است، می‌باشد ($p_{fs} = p_{atm}$).

اگر فشار اتمسفریک صفر در نظر گرفته شود، با تعریف فشار غیرهیدرواستاتیک ($\tilde{P}$) می‌توان سهم نیروی ثقلی را به صورت گرایان فشار غیرهیدرواستاتیک در معادلات اندازه حرکت وارد کرد [۹ و ۸]. فشار غیرهیدرواستاتیک از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\tilde{P} = p + \rho g z \quad (5)$$

حفره با سطح فوقانی متحرک که از سیال پر شده، حل شده است. انطباق نتایج عددی با نتایج تجربی موجود، دقت مناسب روش عددی به کار گرفته شده را نشان می‌دهد. سپس برنامه کامپیوتری نوشته شده برای جریان آرام در همان حفره با سطح آزاد و سطح زیرین متحرک به کار گرفته شده است. نتایج حاصله اختلاف زیاد میدان فشار را برای دو شرط مرزی دقیق و تقریبی نشان داده است، که دلیل بر شدت تأثیر متقابل سطح آزاد و میدان جریان است. علاوه بر این بزرگ شدن سرعت حرکت سطح زیرین حفره باعث تشدید جابجایی مرکز گردابه، و تغییر سرعت دورانی آن، شده است.

۲- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر یک جریان آرام دائم دوبعدی تراکم ناپذیر شامل معادلات پیوستگی، و اندازه حرکت است. با توجه به اینکه در جریانهای با سطح آزاد نیروی ثقل یکی از نیروهای وارد بر سیال است، در اینجا فقط معادلات ممنتوم در دستگاه دکارتی (X, Z) نوشته شده‌اند. در دستگاه مختصات انتخابی محور X محور افق بوده و محور Z در امتداد قائم و در خلاف جهت شتاب ثقل قرار دارد. برای سادگی جملات جابجایی و انتشار بصورت خلاصه معرفی شده‌اند

$$(u_{convc.}) - (u_{diff.}) = - \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1)$$

$$(w_{convc.}) - (w_{diff.}) = - \frac{\partial p}{\partial z} - \rho g \quad (2)$$

شرایط مرزی برای بررسی جریان درون یک حفره با یک سطح متحرک که کاملاً سیال را محصور کرده است شرط عدم لغزش در مرزها است. اما در مورد حفره ای که در آن سیال دارای سطح آزاد است، یکی از مرزهای میدان جریان سیال سطح آزاد جریان می‌شود. در این مرز باید دو شرط سینماتیکی و دینامیکی برقرار باشند. اگر سطح آزاد جریان را به صورت یک رویه بدون شکستگی در نظر بگیریم می‌توان ارتفاع نقاط مختلف آن را نسبت به یک سطح مرجع (شکل ۱) به صورت معادله زیر در نظر گرفت:

$$z = h(x) \quad (3)$$

اما در روش معرفی شده توسط گودرزی و عظیمیان [۴] شرط سینماتیکی (که روی سرعتها اعمال می شود) برای حل معادلات در شبکه موجود به کار برده می شود و پس از حل معادلات به طور کامل در این شبکه و محاسبه فشارهای غیرهیدرواستاتیک در مرز متناظر به سطح آزاد، به کمک شرط دینامیکی (رابطه (۵)) موقعیت جدید سطح آزاد محاسبه می شود:

$$z_{fs} = \frac{\tilde{P}_{fs}}{\rho g} \quad (۸)$$

در این روش نحوه محاسبه ضرایب معادلات جبری گسسته شده در مجاورت سطح آزاد با مرزهای دیگر تفاوت ندارد. لذا از این روش بدون مرحله بازسازی شبکه حل عددی برای حل جریانهای بدون سطح آزاد هم می توان بهره گرفت. جزئیات بیشتر این روش عددی در مراجع [۶ و ۴] موجود است.

در این تحقیق از روش اخیر استفاده شده است. برای این کار یک برنامه کامپیوتری دو بعدی منطبق بر مرز با استفاده از الگوریتم حل SIMPLE [۱۱] و روش رای-چو [۱۲] برای درگیر کردن معادلات اندازه حرکت و پیوستگی در شبکه تلفیقی، نوشته شده است. برای گسسته کردن جملات جابجایی از شکل تصحیح شده روش لی و رادمن [۱۳] استفاده شده است.

۴- نتایج عددی

برای بررسی صحت عملکرد برنامه کامپیوتری تهیه شده ابتدا یک حفره دوبعدی با سطح فوقانی متحرک که دارای ابعاد واحد می باشد، توسط روش عددی حل شد. نتایج عددی بدست آمده در دو عدد رینولدز، که بر اساس سرعت سطح متحرک حفره و ارتفاع مایع درون آن محاسبه شده است، با نتایج گیا و همکارانش [۱۴] در شکل ۲ مقایسه شده اند. در این شکل و شکلهای بعدی نتایج بر حسب ارتفاع بی بعد Y ، که نسبت ارتفاع به ارتفاع مایع در حالت سکون است، نشان داده شده اند. تطابق نتایج عددی روش حاضر و مرجع [۱۴] حاکی از دقت مناسب روش عددی به کار گرفته شده است و بنابراین می توان از برنامه کامپیوتری استفاده کرد.

پس از اطمینان حاصل کردن از توانایی روش عددی، همان حفره دوبعدی با سطح زیرین متحرک و حضور سطح آزاد به جای دیوار صلب فوقانی مورد مطالعه قرار گرفت (شکل ۳). عدد رینولدز جریان در ابتدا همان مقدار ۱۰۰۰ در نظر گرفته شد. خصوصیات فیزیکی سیال به گونه ای انتخاب شده اند که سرعت سطح زیرین حفره معیار بررسی رژیمهای بعدی جریان

در رابطه فوق Z نسبت به یک نقطه مرجع واقع بر سطح آزاد جریان و در خلاف جهت شتاب ثقل اندازه گیری می شود. بنابراین Z برای سایر نقاط سطح آزاد دارای مقادیر صفر، منفی، و یا مثبت خواهد بود. با تعریف فوق معادلات اندازه حرکت نیز به صورت زیر نوشته می شوند

$$(u_{convc.}) - (u_{diff.}) = -\frac{\partial \tilde{P}}{\partial x} \quad (۶)$$

$$(w_{convc.}) - (w_{diff.}) = -\frac{\partial \tilde{P}}{\partial z} \quad (۷)$$

که شکل همان معادلات اندازه حرکت برای جریانهای بدون سطح آزاد را دارد.

۳- روش حل عددی

برای حل عددی میدان جریان باید میدان جریان شبکه بندی شود. در جریانهای با سطح آزاد مرز شبکه عددی در محل سطح آزاد از ابتدا مشخص نیست و در واقع یکی از مجهولات حل عددی همان شکل و هندسه سطح آزاد جریان است. برای حل چنین جریانهایی ابتدا باید یک شکل فرضی برای سطح آزاد در نظر گرفت و بر اساس آن شبکه اولیه را که در مرز متناظر به سطح آزاد بر سطح آزاد واقعی منطبق نیست، بوجود آورد. سپس با حل عددی میدان جریان و اعمال شرایط مرزی سینماتیکی و دینامیکی در سطح آزاد به تصحیح هندسه این مرز و متعاقباً شبکه حل عددی اقدام کرد. بهتر است در ابتدای روند حل عددی سطح آزاد را به صورت یک سطح افقی در نظر گرفت تا سطح مرجع رابطه (۵) نیز باشد.

بسیاری از محققان شرط دینامیکی را برای حل معادلات در شبکه موجود به کار برده و پس از محاسبه سرعتها در مرز متناظر به سطح آزاد از شرط سینماتیکی برای تصحیح هندسه سطح آزاد و شبکه حل استفاده کرده اند. جزئیات بیشتر مربوط به این روش در مراجع [۸ و ۹ و ۱۰] موجود است. در این روشها از همان الگوریتمهای تصحیح فشار برای حل معادلات در شبکه عددی استفاده می شود. لذا در تمامی مرزهای به جز سطح آزاد شرایط مرزی برای سرعتها اعمال می شود و در مرز سطح آزاد شرط فشار اعمال می شود. بنابراین نحوه محاسبه ضرایب معادلات جبری گسسته شده در این مرز با مرزهای دیگر متفاوت خواهد بود. پس از این روشها فقط برای حل عددی جریانهای با سطح آزاد می توان استفاده کرد.

گردابه مجزا از هم در حفره ایجاد شده اند. شکل ۸ نیز کانتورهای فشار غیرهیدرواستاتیک را برای دو شرط مرزی در این جریان نشان می دهد. در این جریان تفاوت زیادی بین دو میدان فشار دیده می شود. به گونه ای که اگر از جابجایی های سطح آزاد در حل عددی صرف نظر شود، اختلاف فشار حداکثر و حداقل در میدان جریان فقط ۶۶ کیلوپاسکال خواهد بود. در صورتیکه با در نظر گرفتن این جابجایی ها این اختلاف به بیش از بیست برابر آن در شرط مرزی تقریبی افزایش می یابد. البته در این مورد جابجایی سطح آزاد نسبت به حالت قبل بزرگ بوده و این امر مزید بر دلایل قبل خواهد بود.

سرعت سطح زیرین حفره روی الگوی جریان و شکل هندسی سطح آزاد تأثیر می گذارد. در شکل ۹ بردارهای سرعت برای چهار سرعت متفاوت نشان داده شده است. این شکل نشان می دهد که با افزایش سرعت سطح زیرین سرعت دورانی گردابه نیز افزایش یافته و در ضمن مرکز گردابه حاصل به سطح آزاد نزدیک و از دیوار عمودی سمت راست دور می شود. در شکل ۱۰ شکل سطح آزاد القایی از میدان جریانهای چهار گانه نشان داده شده است. مطابق این شکل جابجایی های سطح آزاد نسبت به سطح افقی متوسط با افزایش سرعت سطح زیرین افزایش می یابد. بر اساس این شکل تا زمانی که سرعت سطح زیرین سه برابر شده است، شکل هندسی سطح آزاد خیلی به یک منحنی سینوسی شباهت دارد. اما با چهار برابر شدن سرعت سطح زیرین و تشدید سرعت و جابجا شدن گردابه درون حفره، شکل سینوسی سطح آزاد نیز از بین رفته و برآمدگی و فرورفتگیهای بیشتری در این سطح مشاهده می شود. با افزایش بیشتر سرعت سطح زیرین علاوه بر اینکه مکانیزمهای اغتشاشی جریان به مسأله اضافه می شوند، امکان جدا شدن بخشی از سیال، به خصوص از گوشه برآمده سطح آزاد (شکل ۷)، وجود خواهد داشت. لازم به ذکر است که در صورت جدا شدن بخشی از سیال از مرز سطح آزاد آن، از روش عددی معرفی شده نمی توان استفاده کرد. زیرا شرط پیوستگی میدان جریان از بین می رود.

۵- جمع بندی

در میدان جریانهای با سطح آزادی که سیال از محدوده میدان خارج نمی شود و بنابراین جریان عبوری از آن وجود ندارد، گرادینهای فشار غیرهیدرواستاتیک کوچک می باشد. بنابراین در چنین جریانهایی حرکت سیال به شدت تحت تأثیر سطح آزاد قرار گرفته و به کار گیری شرط مرزی تقریبی در این سطح حتی با کوچک بودن جابجایی های سطح آزاد پیش بینی مناسبی از رفتار جریان ارائه نمی دهد. جریان القایی ناشی از سطح زیرین یک حفره با سطح آزاد نمونه ای از این جریانها است که تأثیر

در این حفره باشد. مطالعه شبکه حل عددی برای سرعت واحد انجام شد تا مناسب ترین شبکه برای مطالعه عددی سرعتهای بعدی انتخاب شود. نتایج مطالعه شبکه در شکل ۴ نشان داده شده اند. در این شکل مانند حفره بسته توزیع سرعت افقی در میانه حفره ترسیم شده است. این بررسی نشان داد که حل عددی در شبکه 200×200 مستقل از تعداد نقاط شبکه می شود. لذا این شبکه برای مطالعات بعدی انتخاب شد.

در الگوریتم عددی به کار رفته ابتدا حل عددی در شبکه اولیه تا رسیدن به همگرایی کامل انجام می شود [۴]. قبل از بازسازی شبکه اولیه اعمال شرط مرزی سینماتیکی به همراه صفر شدن گرادین عمودی سرعت در این مرز، در حقیقت این مرز را به یک سطح صلب افقی بدون اصطکاک تبدیل می کند. بنابراین اولین تخمین روش عددی به کار گرفته شده جواب همین حالت تقریبی خواهد بود. بسیاری از محققان در جریانهایی که سطح آزاد آنها خیلی نسبت به حالت افقی تغییر نمی کند از این شرط استفاده کرده اند. این شرط مرزی تقریبی به خصوص در مورد جریان درون کانالها که ممنتوم غالب سیال در امتداد کانال است، با دقت خوبی الگو و پدیده های جریان را پیش بینی می کند [۴].

اما در مورد حفره جریان غالب همان جریان گردابه می باشد. شکل ۵ بردارهای سرعت را برای تخمین اولیه و بدون در نظر گرفتن جابجایی سطح آزاد در مقایسه با حل نهایی ناشی از بازسازی شبکه و منظور کردن سطح آزاد جریان نشان می دهد. مقایسه این دو شکل نشان می دهد که حتی جابجایی های کوچک سطح آزاد تأثیر زیادی بر محل و سرعت چرخش گردابه بوجود آمده در حفره دارد. در شکل ۶ کانتورهای فشار غیرهیدرواستاتیک برای هر دو شرط مرزی نشان داده شده اند. در این جریان گرادین فشار در تمام جهتها اهمیت دارد و نمی توان گرادین فشار غالب افقی یا عمودی در میدان جریان مشاهده کرد. این شکل نشان می دهد که حتی جابجایی های کوچک سطح آزاد می تواند به کلی توزیع فشار را تغییر دهد، زیرا همانطور که در شکل نشان داده شده اختلاف فشار حداکثر و حداقل در میدان جریان برای شرط مرزی تقریبی ۶۶۶ کیلوپاسکال و برای شرط مرزی دقیق اندکی بیشتر از نصف آن است. با کمتر شدن ارتفاع سیال در حفره و بزرگتر شدن سرعت سطح زیرین این تغییرات تشدید می شود. شکل ۷ بردارهای سرعت و چند خط جریان را در حفره ای که ارتفاع متوسط سیال در آن ۲۵٪ پهنای حفره می باشد و سرعت سطح زیرین آن دو برابر حالت قبل است، نشان می دهد. در حالت تخمین اولیه (شرط مرزی تقریبی) فقط یک گردابه در حفره بوجود آمده است، حال آنکه با در نظر گرفتن جابجایی سطح آزاد دو

[۳] گودرزی، محسن، " بررسی پدیده پخش در محل به هم پیوستن دو کانال با سطح آزاد"، پایان نامه دکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۲

[۴] گودرزی، محسن، عظیمیان، احمدرضا، " شبیه سازی جریانهای با سطح آزاد و مقایسه شرایط مرزی تقارنی و دقیق در سطح آزاد"، نشریه علمی-پژوهشی استقلال، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۲، سال ۲۲، شماره ۲، ص.ص. ۱۶۱-۱۷۶.

[۵] گودرزی، محسن، عظیمیان، احمدرضا، " مدل سازی عددی جریان در کانال روباز به روش ردیابی سطح آزاد"، مجله دانشکده فنی دانشگاه تبریز، ۱۳۸۴، جلد ۳۱، شماره ۲، ص.ص. ۴۵-۵۷.

[6] M. Goodarzi, and A. R. Azimian, " A Pressure Correction Based Solver for Free Surface Flows ", *Proceeding of 2nd BSME-ASME International Conference on Thermal Engineering*, 2-4 January 2004, Dhaka.

[7] M. Goodarzi, and A. R. Azimian, " Mixing of Two Parallel Flows with Free Surfaces ", *Proceeding of 9ACFM*, 27-31 May, 2002, Isfahan, Iran.

[8] J. Farmer, L. Martinelli, and A. Jameson, " Fast Multigrid Method for Solving Incompressible Hydrodynamic Problems with Free Surface ", *AIAA J.*, 32(6): pp. 1175-1182, 1994.

[9] S. E. Norris, " A Parallel Navier-Stokes Solver for Natural Convection and Free Surface Flow", Ph.D. Thesis, University of Sydney, pp. 195-215, 2000.

[10] J. H. Ferziger, and M. Peric, " *Computational Methods for Fluid Dynamics*", Corrected 2nd printing, Springer, pp. 333-343, 1997.

[11] Patankar, S. (1980), " *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*", Hemisphere Publishing Corporation, McGraw Hill Book Co., New York.

[12] C. M. Rhie and W. L. Chow, "Numerical Study of the Turbulent Flow Past an Airfoil with Trailing Edge Separation", *AIAA J.*, Vol. 21, pp. 1525-1532, 1983.

[13] Y. Li, and M. Rudman, "Assesment of Higher-Order Upwind Schemes Incorporating FCT for Convection- Dominated Problems", *Numerical Heat Transfer*, Part B, 27: 1-12, 1995.

[14] U. Ghia, K. Ghia, and C. Shin, "High-re Solutions for Incompressible Flow Using the Navier-Stokes Equations and a Multigrid Method", *J. of Computational Physics*, Vol. 48, pp. 387-411, 1982.

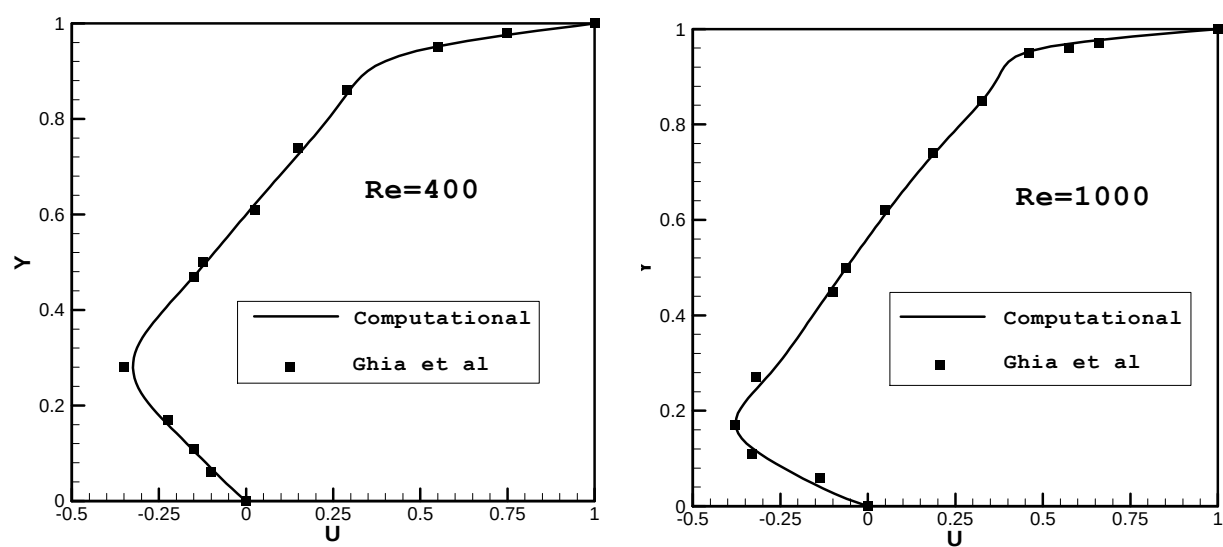
متقابل جریان و سطح آزاد بر هم در آن بسیار زیاد است. لذا صرف کوچک بودن جابجاییهای سطح آزاد نمی تواند متضمن دقت به کارگیری شرط مرزی تقریبی در این سطح باشد.

نمادها

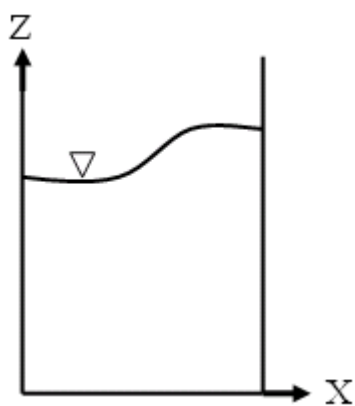
atm	زیرنویس برای خواص اتمسفر
fs	زیرنویس، برای خواص در سطح آزاد، رابطه (۴)
g	شتاب ثقل، رابطه (۲)، متر بر مجذور ثانیه
h	ارتفاع سیال نسبت به دستگاه مختصات مرجع، رابطه (۳)، متر
P	فشار استاتیک، رابطه (۱)، پاسکال
u	مؤلفه سرعت در جهت x ، رابطه (۱)، متر بر ثانیه
w	مؤلفه سرعت در جهت z ، رابطه (۲)، متر بر ثانیه
x	محور افقی مختصات، شکل ۱
z	محور عمودی مختصات، شکل ۱
ρ	چگالی سیال، رابطه (۲)، کیلوگرم بر متر مکعب
$\tilde{P}$	فشار غیر هیدروستاتیک، رابطه (۵)، پاسکال
ζ	جهت عمود بر سطح آزاد در مختصات عمومی

مراجع

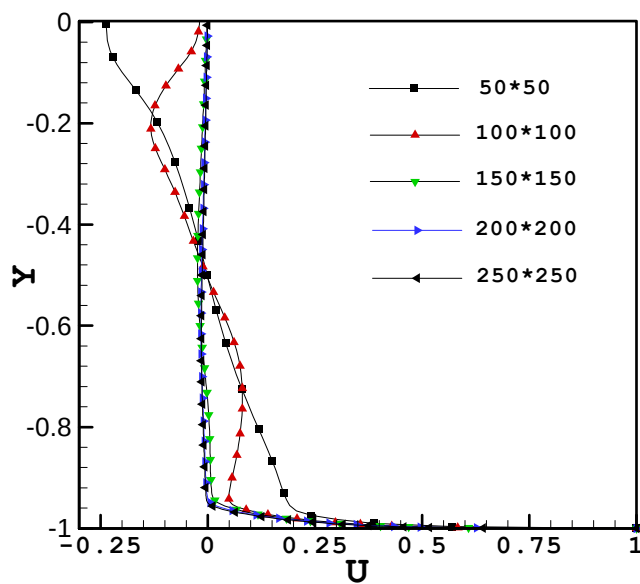
- [1] F. H. Harlow, and J. E. Welch, " Numerical Calculation of Time-dependent Viscous Incompressible Flow of Fluid with Free Surface", *Physics of Fluid*, 8 (12): pp.2182-2189, 1965.
- [2] C. W. Hirt, and B. D. Nichols, " Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries", *Journal of Computational Physics*, 39: pp. 201- 225, 1981.



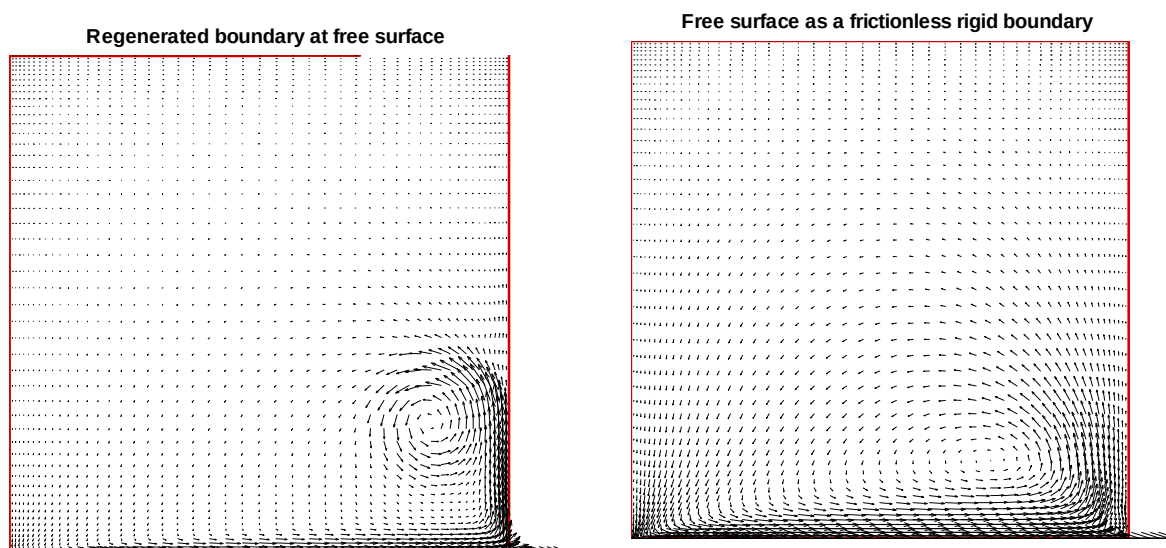
شکل ۲- توزیع مؤلفه افقی سرعت در وسط حفره با سطح فوقانی متحرک



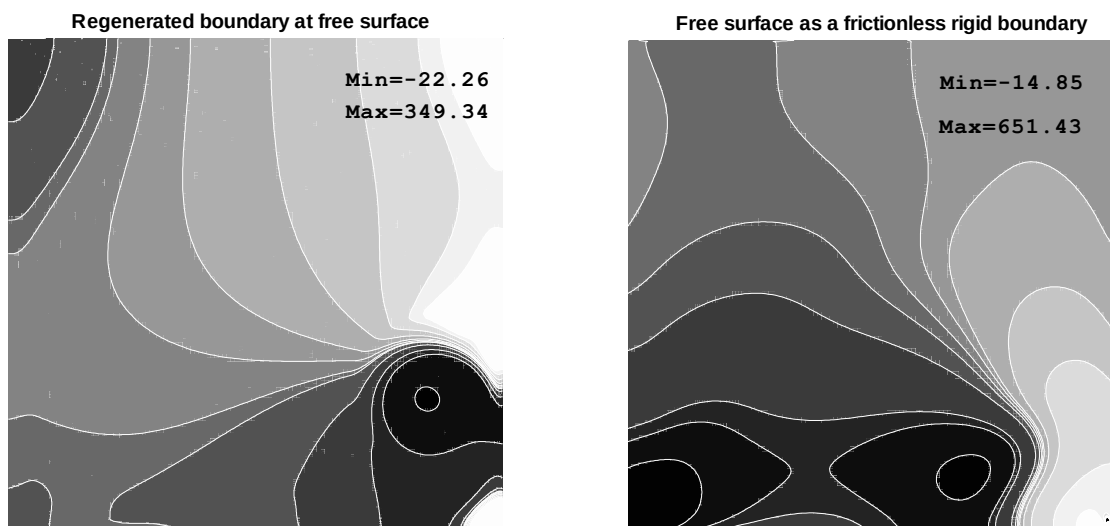
شکل ۳- هندسه حفره با سطح زیرین متحرک و مایع با سطح آزاد



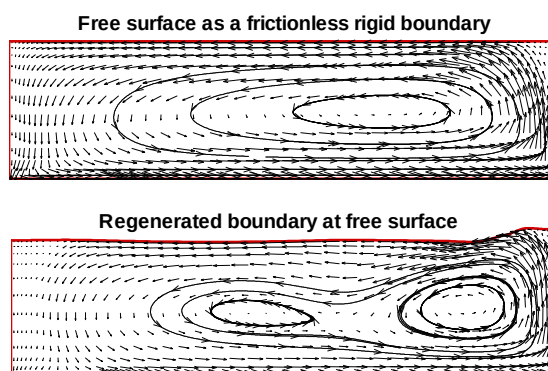
شکل ۴- توزیع مؤلفه افقی سرعت در وسط حفره برای شبکه های مختلف



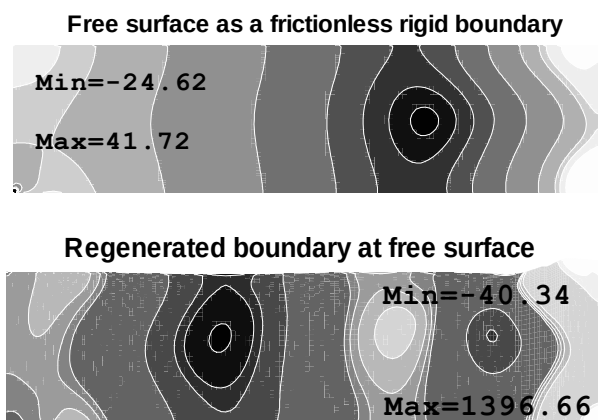
شکل ۵- بردارهای سرعت حاصل از دو شرط مرزی در سطح آزاد



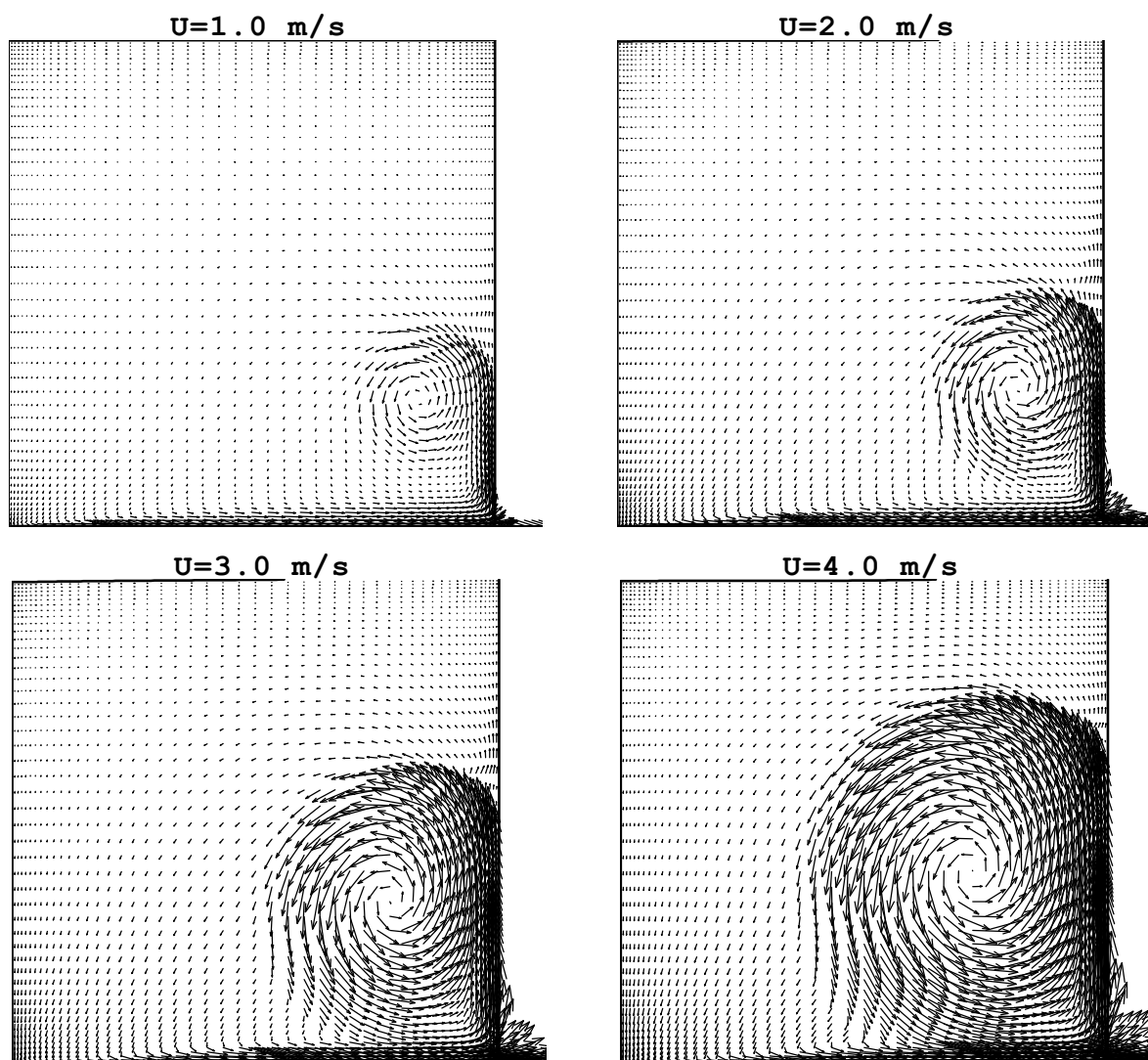
شکل ۶- کانتورهای فشار غیرهیدرواستاتیک برای دو شرط مرزی در سطح آزاد



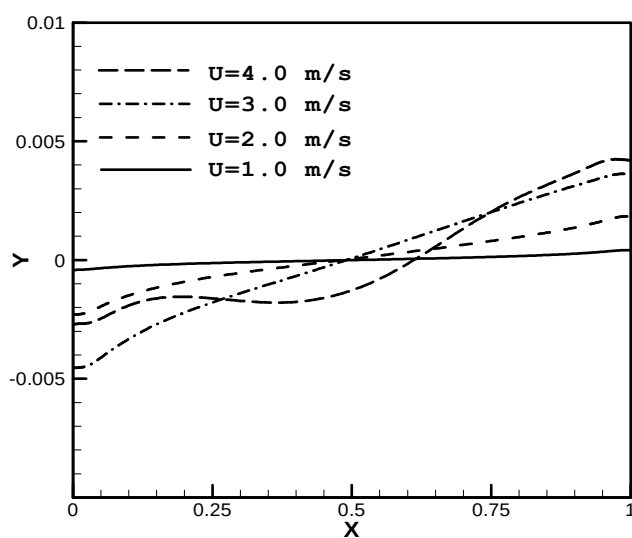
شکل ۷- بردارهای سرعت و خطوط جریان حاصل از دو شرط مرزی در سطح آزاد



شکل ۸- کانتورهای فشار غیرهیدرواستاتیک برای دو شرط مرزی در سطح آزاد



شکل ۹- بردارهای سرعت در حالات مختلف سرعت سطح زیرین حفره



شکل ۱۰- شکل سطح آزاد در حالات مختلف سرعت سطح زیرین حفره