

توسعه و پیاده‌سازی یک روش کارآمد حرکت شبکه برای مدل‌سازی جریان‌های فیلم ناپایا با استفاده از foam-extend

بهنام چراغی
دانشجوی دکتری، دانشکده‌گان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران، aer.b.cheraghi@ut.ac.ir
شیدوش وکیلی‌پور*
دانشیار، دانشکده‌گان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران، vakilipour@ut.ac.ir

چکیده

در مقاله حاضر، یک روش کارآمد جابجایی شبکه برای جریان‌های فیلم ناپایا، توسعه یافته و در بستر foam-extend پیاده‌سازی شده است. این روش، با استفاده از قابلیت‌های برنامه‌نویسی شی‌گرا و تفکیک توابع با کارکرد مستقل، علاوه بر ایجاد قابلیت پردازش موازی، مشکلات روش‌های قبلی جابجایی شبکه، همچون تداخل سطح و شبکه، را نیز رفع می‌کند. در مطالعه حاضر، نمونه آزمایش جریان ریزان با سطح آزاد بر روی صفحه با سه بسامد ۰/۰۵، ۰/۰۷۹ و ۰/۱۵ مورد ارزیابی قرار گرفته است. الگوی مشابه رفتاری در بسامدهای مختلف قابل مشاهده و ردیابی می‌باشد در حالی که با کاهش بسامد نوسان، اندازه امواج رشد می‌کنند و این افزایش منجر به ایجاد نواحی مختلف بحرانی جهت عبور امواج سطحی و تقابل شبکه سطح آزاد با نقاط داخلی شبکه میدان می‌گردد. نتایج نشان از افزایش بیش از دو برابری سرعت حل با این روش نسبت به دیگر روش‌های در دسترس جابجایی شبکه دارد. همچنین به حداقل رساندن تعداد سعی و خطا در رسیدن به شبکه‌های مکانی و زمانی مناسب از جمله دیگر مزایای استفاده از این روش جابجایی شبکه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: حرکت شبکه، جریان فیلم ناپایا، روش نسبت-ثابت، روش لاپلاس، foam-extend، برنامه‌نویسی شی‌گرا.

Development and Implementation of an Efficient Mesh Motion Method for Unsteady Liquid Film Flows using foam-extend

B. Cheraghi
Sh. Vakilipour

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

Abstract

In the present study, an efficient mesh motion method is developed and implemented for unsteady film flows using the foam-extended platform. In addition to the capability of parallel processing, this method provides solutions for issues of default mesh motion methods, e.g. collision of the free-surface and internal mesh, utilizing object-oriented programming and separation of functions with independent functionalities. In the present study, the free-surface falling film test case is evaluated with three frequencies of 0.05, 0.079 and 0.15. A similar behavior pattern can be observed and tracked at different frequencies, while with the decrease in the inflow frequency, the amplitude of the waves increases, and this increase leads to the creation of different critical areas with the free-surface wave movement and the confrontation of the free-surface nodes with the internal nodes of the domain. The results show a more than two-fold increase in the solution speed with this method compared to other available mesh motion methods. Also, minimizing the number of trials and errors in reaching the appropriate spatial and temporal grids is one of the other advantages of using this mesh motion method.

Keywords: Mesh movement, Unsteady liquid film flow, Fixed-fraction motion, Laplace, foam-extend, Object-oriented programming.

مطالعات زیادی در رابطه با فیزیک حاکم بر این نوع از جریان‌ها، صورت گرفته است. الکسینکو و همکاران تلاش‌های زیادی جهت مطالعه تجربی این جریان‌ها در دو بعد [۱] و سه بعد [۲] انجام داده‌اند. ایشان پیشنهاد نوسانی کردن ورودی را جهت کاهش طول دامنه حل ارائه دادند. همچنین ایشان نقش امواج دوبعدی اصلی در تشکیل امواج سه‌بعدی ثانویه را مورد بررسی قرار داده‌اند. موزافریجا و پریک [۳]، الگوریتمی جهت شبیه‌سازی حرکت سطح ارائه داده که در این جریان‌ها کاربرد فراوانی یافته است. مالاماتاریس و بالا کوتایا [۴]، با استفاده از الگوریتم پیشنهادی موزافریجا بسامدهای مختلفی را مورد ارزیابی قرار داده است. ایشان نشان دادند که جریان‌های برگشتی در امواج بلند تنها نقش تعیین کننده‌ای در توزیع خواص جریان در زیر امواج ایفا می‌کنند. وکیلی‌پور و همکاران [۵]، برای نخستین بار الگوریتم همگیر جریان و جابجایی سطحی را ارائه نموده و در مطالعه

۱- مقدمه

جریان‌های فیلم ریزان^۱، یکی از جریان‌های پرکاربرد در انواع صنایع خنک‌کاری و توان و تبرید می‌باشد. این جریان‌ها که در دسته جریان‌های سطح آزاد یا جریان‌های دوفازی دسته‌بندی می‌شوند، به سبب فیزیک خاص حاکم بر آنها، دارای چالش‌های متعدد و مختص به خود هستند. از جمله این چالش‌ها می‌توان به شکل‌گیری انواع امواج سطحی و نوسانات پی‌درپی این امواج ناپایا در سطح اشاره کرد. همچنین مدیریت شبکه‌های زمانی و مکانی به سبب تعداد زیاد سلول محاسباتی و نسبت طول به عرض زیاد دامنه، از دیگر چالش‌های شبیه‌سازی این نوع از جریان‌ها می‌باشد.

^۱ Falling film flows

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: vakilipour@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳/۰۱/۲۰۲۳

تاریخ پذیرش: ۲۱/۰۲/۲۰۲۳

خود بسامدهای مطالعه مالماتاریس و بالاکوتایا [۴] را مورد ارزیابی دقیق قرار داده‌اند. آلبرت و همکاران [۶]، معادله اجزا را بر معادلات جریان افزوده و نتایج کار خود که با روش حجم سیال^۱ حاصل شده‌اند را در قالب نمودارهای توزیع اجزا ارائه نموده است. وکیلی پور و حکمت‌خواه [۷] تحلیل‌های مختلف پایا و ناپایا را با افزودن معادله انرژی به معادلات جریان ارائه داده‌اند. به طور کلی، شکل‌گیری امواج سطحی و به خصوص موج اول یا موج اصلی^۲ در ابتدای حل به سبب اندازه بزرگتر و نقش آن در خارج کردن خطاهای اول حل، یکی از حساس‌ترین بخش‌های حل چنین جریان‌هایی می‌باشد [۸]. نوسانات پی‌درپی امواج نیز سبب حرکت مداوم سطح و متعاقب آن حرکت شبکه داخلی می‌شود. نتایج حاصل از به‌کارگیری روش‌های جابجایی شبکه در دسترسی که به‌صورت عمومی و در بستر foam-extend توسعه داده شده‌اند، نشان از وجود انواع چالش‌های حل و هزینه محاسباتی زیاد در مواجهه با چنین جریان‌های ناپایا و دامنه‌های طولی می‌دهد.

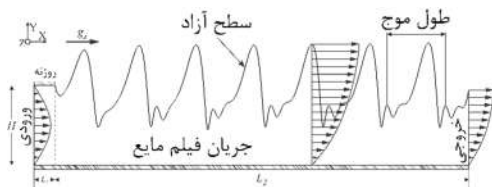
روش‌های جابجایی شبکه که در بستر foam-extend در دسترس می‌باشند، عموماً بر مبنای حل یک معادله (لاپلاس و شبه-جامد^۳) جهت یافتن موقعیت نقاط شبکه عمل می‌کنند. دسته روش‌های جابجایی شبکه در این بستر، در مطالعات یاساک و توکوویچ [۹] تشریح شده‌اند. همچنین توسعه روش‌های جابجایی شبکه در کار یاساک و توکوویچ [۱۰] برای جریان‌های فیلم، ارائه شده است. بهره بردن از قابلیت برنامه‌نویسی شی‌گرا و پردازش موازی، دو اصل در اعمال این روش‌ها است. از روش‌های مرسوم جهت جابجایی شبکه‌های متغیر با زمان و فیزیک‌های ناپایا، روش‌های مبتنی بر حل معادله جابجایی یا معادله سرعت جابجایی نقاط است. دو گزینه اصلی شامل معادله لاپلاس [۱۱] و معادله شبه-جامد [۱۲] می‌باشد. این روش‌ها علیرغم عمومیت و قابلیت‌های بالا در حل عموم مسائل، نقاط ضعف خاص خود را نیز دارند. ضخامت اندک و طول دامنه بالا در کنار امواج سطحی و ناپایا، سبب ایجاد نواحی با انحنای بالا، نواحی با ضخامت ناچیز و امواج متحرک با دامنه زیاد می‌شود که استفاده از روش‌های مرسوم و در دسترس، منجر به کاهش کارایی و یا توقف حل جریان می‌گردند. به عنوان مثال در مسائل با حرکت اجسام، حرکت‌های کشویی^۴ شبکه در کنار رویکرد اویلری-لاگرانژی دلخواه^۵ می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد [۱۳ و ۱۴]. همچنین در مسائل با سطح آزاد و حرکت‌های شدید امواج و اجسام، رویکرد اصلاح و بازتولید^۶ شبکه نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۵]. در مطالعه باتاگلیا و همکاران [۱۶]، یک تکنیک جابجایی شبکه به منظور حل جریان‌های سطح آزاد گذرا مورد استفاده قرار گرفته است که به استراتژی شبه-الاستیک^۷ موسوم است. از این روش می‌توان برای حل مسائل تلاطم سیال بهره برد [۱۶ و ۱۷]. در صورت کوتاه بودن طول دامنه یا نسبت طول به عرض در مسائل دوفازی نیز می‌توان از روش‌های متداول در این فوم همچون روش‌های حل معادله لاپلاس استفاده نمود [۱۸ و ۱۹]. در صورت استفاده از

روش‌های مرز غوطه‌ور^۸ و روش برهم نهادن شبکه‌ها^۹، عملاً نیازی به تغییر شکل شبکه زمینه^{۱۰} وجود نخواهد داشت [۲۰]، هرچند مباحث مربوط به دقت تشخیص سطح فاصل و سطح آزاد، کماکان می‌تواند از اهمیت بالایی برخوردار باشد.

در مطالعه حاضر، یک روش ابتکاری با ایده ساده ولی قدرتمند، به‌صورت خاص برای حل جریان‌های ناپایای فیلم، توسعه یافته و پیاده‌سازی شده است. این روش که در دست‌بندی‌ها به عنوان یک روش تک مرحله‌ای جبری قرار می‌گیرد، علاوه بر سادگی اعمال و منطق ریاضی، امکان تضمین کیفیت شبکه را در سرتاسر حل فراهم می‌آورد. همچنین بهره‌گیری از قابلیت برنامه‌نویسی شی‌گرا در اعمال آن، امکان رقابت در زمینه کاهش هزینه محاسباتی برای حل چنین جریان‌هایی را فراهم آورده است. به‌منظور مقایسه عملکرد روش توسعه داده شده با دیگر روش‌های در دسترس در بستر foam-extend، نمونه آزمایش جریان فیلم ریزان در سه بسامد ۰/۰۵، ۰/۰۷۹ و ۰/۱۵ مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند که با توجه به بازه بسامدی و ابعاد دامنه، شامل طیف وسیعی از امواج سطحی می‌باشند. همچنین جزئیات توابع مورد استفاده و روش کارکرد و وظایف این توابع نیز تشریح شده‌اند.

۲- بیان ریاضی مسئله

مسئله جریان فیلم ناپایا که در اینجا مورد ارزیابی قرار گرفته، دقیقاً همان مسئله مطالعات مالماتاریس و بالاکوتایا [۴] و یا وکیلی پور و همکاران [۵] است. شکل ۱، نمایش طرحواره‌ای از جریان سطح آزاد، شروط مرزی و علائم مورد استفاده در یک مسئله نمونه از جریان فیلم ریزان است.



شکل ۱- دامنه حل به همراه شروط مرزی و نمادهای مورد استفاده در یک مسئله جریان فیلم ریزان ناپایا

جریان فیلم ریزان، پس از عبور از یک بخش ورودی با طول L_1 وارد بخش اصلی به طول L_2 می‌شود. عرض اولیه سیال برابر با H و نسبت طول به عرض برابر با ۲۰۰ در نظر گرفته شده است. اندازه طول موج بر روی سطح نیز در شکل ۱ نمایش داده شده است. همچنین بردار شتاب گرانش به صورت $\mathbf{g} = g_x \mathbf{i} + g_z \mathbf{k}$ و در شکل مشخص شده است. در مطالعه حاضر، عرض بخش اول دامنه توسط معادله (۱) مشخص می‌شود که در آن h_N ضخامت فیلم ناسلت است و توسط رابطه زیر بدست می‌آید.

$$h_N = \left(\frac{3\mu\Gamma}{\rho g} \right)^{1/3} \quad (1)$$

که در آن، $\Gamma = Uh_N$ ، μ و ρ به ترتیب لزجت سیال، نرخ جریان،

⁸ Immersed boundary

⁹ Overset

¹⁰ Background

¹ VOF

² Principal wave

³ Pseudo-solid

⁴ Sliding

⁵ Arbitrary Lagrangian-Eulerian (A.L.E)

⁶ Remeshing

⁷ Pseudo-elastic

$$U(y) = 6y(1-y)[1 + \varepsilon \sin(2\pi ft)] \quad (9)$$

که در آن، f و ε به ترتیب مشخص‌کننده بسامد و دامنه موج مورد نظر می‌باشند. مطالعات عددی برای دامنه $\varepsilon = 0.5$ و سه بسامد 0.15 و 0.079 ، 0.5 انجام شده‌اند. در تمام بسامدهای گفته‌شده، امواج تک‌تی، امواج ریزه و جریان‌های چرخشی مشاهده می‌شوند [۴ و ۵]. در مطالعات و محاسبات مربوط به این جریان‌ها، پدیده‌های مختلفی همچون جابجایی، کشش سطحی و پخش، ایفای نقش می‌نمایند. علاوه بر این، امواج سطحی ناپایا و متحرک، شرایط مناسبی را جهت ارزیابی عملکرد انواع روش‌های جابجایی نقاط داخل میدان فراهم می‌آورد. در مطالعه حاضر، نتایج نمونه‌های آزمایش از مطالعات پیشین [۴ و ۵] به منظور اعتبارسنجی اولیه و مقایسه دقت نتایج مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

۳- روش‌های جابجایی شبکه

در سطوح مختلف، ابزارهای جابجایی شبکه در foam-extend یک پایه انعطاف‌پذیر و کارآمد برای شبکه‌های متحرک فراهم آورده است. در نمونه‌هایی که تغییر شکل‌های پیچیده و هندسه‌های وابسته به زمان یا حرکت‌های وابسته به حل جریان همچون فیزیک مورد مطالعه حاضر را داشته باشیم، حل یک معادله حرکت شبکه همچون معادله لاپلاس یا معادله شبه-جامد می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. همچنین قابلیت تغییر توپولوژی با ترکیب با حرکت شبکه، امکان عملکرد مناسب برای حرکت‌ها و تغییر شکل‌های بسیار پیچیده را فراهم می‌آورد. گزینه آخر نیز استفاده از جابجایی وجوه و تغییر شبکه‌بندی است برای حالتی که تغییر شکل‌های بسیار شدیدی داشته باشیم [۹]. با توجه به فیریک و هندسه جریان فیلم مورد مطالعه، نیازی به جابجایی بسیار شدید اجسام، تغییر شکل اساسی یا تغییر تعداد نقاط و اتصالات نداریم. روش‌هایی همچون روش لاپلاس^۷، شبه-جامد و لاپلاس سرعت^۸ از جمله روش‌های پیش‌فرض و در دسترس در foam-extend می‌باشند. اساس کار این سه روش در دسترس برای حلگر پیش‌فرض interTrackFoam در ادامه به صورت مختصر بیان شده است. در ادامه نیز نتایج و چالش‌های جابجایی شبکه با کمک روش توسعه داده‌شده در مقایسه با عملکرد این سه روش در دسترس مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۳-۱- روش‌های لاپلاس و شبه-جامد

همانطور که پیش‌تر اشاره شد، اگر مرز متحرک، همچون جریان‌های فیلم ناپایا، به صورت نا منظم یا متغیر با زمان باشد، روش‌های حل معادله جهت بدست آوردن مختصات نقاط شبکه داخلی پیشنهاد می‌شود. یکی از معادلات، معادله لاپلاس با انواع توزیع‌های ضریب پخش است. دیگر معادله نیز معادله شبه-جامد می‌باشد که برای جابجایی‌های کوچک پیشنهاد شده است. یک مسئله در این دسته از روش‌ها، نحوه ایجاد توزیع مناسب برای ضریب پخش است. در

چگالی سیال و سرعت مرجع در ورودی می‌باشند. اندازه طول بخش ابتدایی برابر با $L_1 = 10h_N$ و طول بخش اصلی برابر با $L_2 = 200h_N$ در نظر گرفته شده است. در مطالعه حاضر، اعداد بی‌بعد رینولدز^۱، فراد^۲ و وبر^۳ به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$Re = \left(\frac{\rho U H}{\mu} \right) \quad (2)$$

$$Fr = \left(\frac{U^2}{h_N} \right) \quad (3)$$

$$We = \left(\frac{\sigma}{\rho U^2 h_N} \right) \quad (4)$$

که در آن σ ، پارامتر کشش سطحی می‌باشد.

۲-۱- معادلات حاکم بر جریان

در حلگر پیش‌فرض foam-extend با نام interTrackFoam معادلات حاکم شامل معادلات پیوستگی، مومنتوم به همراه معادله بقای فضا است. در واقع روش جابجایی شبکه به کمک روش اولیری-لاگرانژی دلخواه برای جریان تراکم‌ناپذیر برای حجم کنترل دلخواه V که توسط یک سطح متحرک دربر گرفته شده S محصور شده است [۱۰]

$$\oint_S \rho (\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}) dS = 0 \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \mathbf{v} dV + \oint_S \mathbf{n} \cdot \rho (\mathbf{v} - \mathbf{v}_S) \mathbf{v} dS = \oint_S \mathbf{n} \cdot \rho (\mu \nabla \mathbf{v}) \mathbf{v} dS - \int_V \nabla p dV \quad (6)$$

$$\frac{d}{dt} \int_V dV + \oint_S \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_S dS = 0 \quad (7)$$

که در آن \mathbf{n} بردار قائم یکه برونسوی سطح S و \mathbf{v} و \mathbf{v}_S و p به ترتیب سرعت سیال، سرعت جابجایی سطح S و فشار می‌باشند.

۲-۲- شروط مرزی

شروط عدم لغزش جریان بر روی تمامی دیواره‌ها (بالا و پایین)، اعمال شده است. همچنین فشار و سرعت در خروجی به ترتیب به کمک شروط مقدار ثابت و گرادیان ثابت تخمین زده می‌شوند. همچنین معادلات تعادل نیروهای عمودی و مماسی که در واقع از معادلات مومنتوم استخراج شده‌اند جهت محاسبه مولفه‌های سرعت اعمال شده‌اند. موقعیت سطح آزاد سیال توسط شرط سینماتیک به دست می‌آید [۵]. براساس این شرط، هیچ جرم جابجا شونده‌ای از سطح آزاد عبور نمی‌کند. این عدم عبور جرم سبب ثابت بودن میزان جرم سیال در کل دامنه خواهد شد. همچنین این شرط بیان‌کننده برابری سرعت سطح آزاد با مولفه عمودی سیال در مجاورت سطح آزاد است [۲]. این شرط به صورت رابطه زیر قابل بیان است.

$$[(\mathbf{v} - \mathbf{v}_S) \cdot \mathbf{n}]_{\text{سطح آزاد}} = 0 \quad (8)$$

الگوریتم جابجایی سطح بر مبنای روش دومرحله‌ای موزافریجا و پریک [۳] است که در مطالعه توکوویچ و یاساک [۱۰] نیز به صورت مبسوط ارائه شده است. در مقطع ورودی، سرعت سهموی به صورت نوسانی و به کمک رابطه زیر اعمال شده است

⁴ Solitary
⁵ Capillary
⁶ Pseudo-solid
⁷ Laplace
⁸ refVelocityLaplacian

¹ Reynolds
² Froude
³ Weber

حالتی که هندسه متغیر باشد یا تغییر شکل‌ها ناشی از ناپایا بودن جریان باشد، حفظ کیفیت شبکه در نواحی مختلف می‌تواند دشوار شود. معادله لاپلاس به منظور یافتن میزان جابجایی نقاط داخلی شبکه به یکی از دو شکل زیر ارائه می‌شود [۲۳-۲۱]:

$$\nabla \cdot (k \nabla \mathbf{d}_m) = 0 \quad (10)$$

$$\nabla \cdot (k \nabla \mathbf{u}_m) = 0 \quad (11)$$

که معادلات (۱۰) و (۱۱) به ترتیب معادله لاپلاس برای جابجایی نقاط و یا سرعت حرکت نقاط مورد نظر است و در آنها، k ، \mathbf{d}_m و \mathbf{u}_m به ترتیب ضریب پخش، جابجایی و سرعت حرکت نقاط می‌باشند. با قراردادی سرعت جابجایی در رابطه زیر، موقعیت جدید نقاط حاصل می‌شود

$$\mathbf{x}_{\text{جدید}} = \mathbf{x}_{\text{قدیم}} + \Delta t \mathbf{u}_m \quad (12)$$

که \mathbf{x} ، موقعیت نقاط مورد نظر می‌باشد. در صورت استفاده از معادله لاپلاس جابجایی، رابطه (۱۲) به شکل زیر تغییر می‌یابد

$$\mathbf{x}_{\text{جدید}} = \mathbf{x}_{\text{قدیم}} + \mathbf{d}_m \quad (12)$$

همچنین معادله شبه-جامد به صورت زیر ارائه می‌گردد [۱۴]:

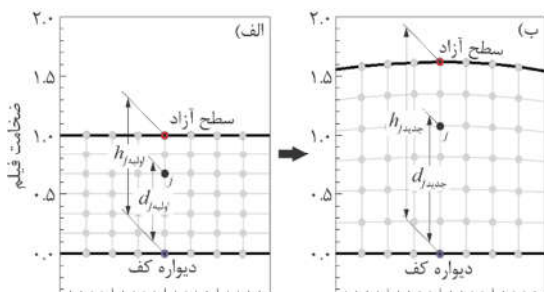
$$\nabla \cdot [\gamma (\nabla \mathbf{u}_m + (\nabla \mathbf{u}_m)^T) + \lambda \nabla \cdot \mathbf{u}_m] = 0 \quad (14)$$

در معادله (۱۴)، γ و λ ضرایب پخش و \mathbf{I} نیز ماتریس همانی می‌باشد. روش‌های حل معادلات لاپلاس جابجایی یا لاپلاس سرعت، با عنوان روش‌های پخش‌شونده شناخته می‌شوند. در این روش‌ها، امکان کنترل و تنظیم ضرایب پخش با توزیع دلخواه فراهم شده است. از جمله معروف‌ترین روش‌های توزیع ضریب پخش می‌توان به روش‌های توزیع یکنواخت، خطی، مرتبه دوم، معکوس فاصله و نمایی اشاره نمود. نکته مهم و اساسی در میزان هزینه محاسباتی روش‌های حل معادله، تعداد تکرار جهت رسیدن به حل مناسب است. در واقع در صورتی که حتی یک روش مورد نظر موفق به رسیدن به یک توزیع نهایی برای نقاط داخل شبکه نیز شود، این مهم مستلزم تعداد تکرار بالای حل معادله می‌باشد. همین امر سبب افزایش هزینه محاسباتی چنین روش‌هایی به خصوص در جریان‌های فیلم ناپایا می‌شود [۲۴]. نکته دیگر در رابطه با روش‌های جابجایی شبکه در جریان‌های فیلم ناپایا، تغییر مداوم مرزها به صورت امواج، آنهم در یک دامنه با نسبت طول به عرض بسیار زیاد (از ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ برابر) است. به عبارتی وجود امواج متحرک در یک دامنه بسیار طولانی، عملاً امکان دستیابی به یک توزیع مناسب از نقاط شبکه به صورت حل معادله را با چالش‌های جدی مواجه می‌کند.

۲-۳- روش توسعه داده شده نسبت-ثابت

این روش که بر مبنای یک ایده بسیار ساده ولی در عین حال کارآمد بنا شده است، به نحوی است که نسبت فاصله میان نقاط داخلی شبکه از دو مرز بالایی و پایینی یعنی سطح آزاد و (دیواره) کف را حفظ می‌کند. به عبارت دیگر، نسبت فاصله نقاط داخلی در هر تکرار مورد نظر، تضمین می‌شود. فرآیند کلی کار به صورتی است که نسبت فاصله هر نقطه با دو مرز بالا و پایین متناظر با خودش در ابتدای فرآیند حل محاسبه می‌شود و در هر تکرار جدید، فواصل جدید بر اساس نسبت ذخیره شده، محاسبه می‌گردد. به بیان ریاضی، برای هر نقطه داخلی، یک نسبت به صورت d_j / h_j بر مبنای فاصله عمودی میان سطح

آزاد و کف دامنه محاسبه و ذخیره می‌شود که در آن، h_j اولیه فاصله اولیه میان نقطه متناظر (با نقطه مورد نظر داخلی) بر روی سطح آزاد و نقطه متناظر روی کف است و d_j اولیه فاصله اولیه میان نقطه مورد نظر داخلی شبکه با کف است. شکل ۲ نمایش فواصل اشاره شده در لحظه اولیه و در زمان‌های بعدی حل را نمایش می‌دهد.



شکل ۲- فواصل مورد استفاده جهت محاسبه موقعیت نقاط در الف) لحظه ابتدایی و ب) در لحظات بعدی حل

فاصله جدید نقطه داخلی از کف که به صورت d_j مشخص می‌شود، به کمک اندازه جدید فاصله میان دومرز بالا و پایین (h_j) و رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$d_{j \text{ جدید}} = \left(\frac{d_{j \text{ اولیه}}}{h_{j \text{ اولیه}}} \times h_{j \text{ جدید}} \right) \quad (15)$$

اگر شبکه اولیه در مجاورت سطح آزاد دارای فشردگی یا ریزش‌دگی باشد، شبکه در طول حل نیز این نسبت خطی فشردگی را حفظ می‌کند. با توجه به فیزیک مورد مطالعه، تغییرات آتی کیفیت شبکه مطلوب نمی‌باشد، بلکه مسئله اساسی، حرکت مناسب نقاط داخل در عین حفظ کیفیت شبکه در مجاورت سطح آزاد در زمان حل می‌باشد. جابجایی مطلوب نقاط داخل و مرزهای ورودی و خروجی، بر اساس نسبت فواصل محاسبه شده در شروع حل، تضمین شده‌اند.

۴- الگوریتم حل و پیاده‌سازی روش نسبت-ثابت

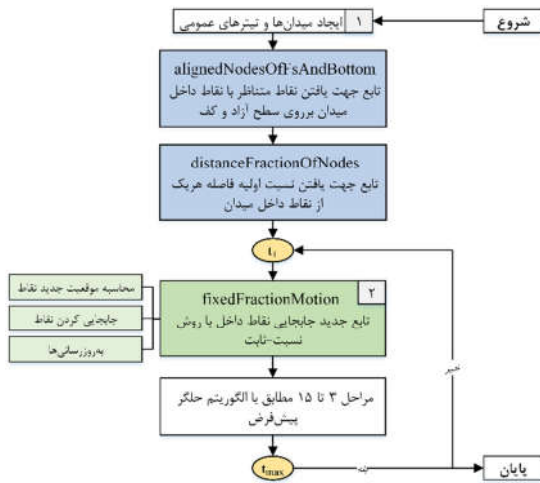
حل جریان در حلگر پیش‌فرض با الگوریتم شناخته شده PIMPLE^۱ صورت می‌گیرد. این الگوریتم که در واقع ترکیبی از دو الگوریتم SIMPLE^۲ و PISO^۳ است، قابلیت بالایی برای حل انواع جریان‌های ناپایا فراهم آورده است [۱۰]. گسسته سازی معادلات بر مبنای روش حجم محدود صورت گرفته است. همچنین روش گسسته سازی زمانی مرتبه دوم پسرو می‌باشد. در حلگر پیش‌فرض foam-extend برای حل جریان دوفازی با روش تعقیب سطح با نام interTrackFoam، پیش از شروع حلقه حل جریان یا همان حلقه اصلی PIMPLE، تعدادی از توابع مربوط به حرکت سطح و جابجایی نقاط شبکه فراخوانی می‌شوند. تابع جابجاکننده نقاط سطح آزاد^۴ که نقاط داخل شبکه را جابجا می‌کند، به صورت پیش‌فرض در حلگر فعال است

¹ Pressure Implicit Method for Pressure Linked Equations

² Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations

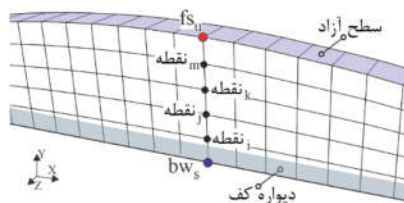
³ Pressure Implicit with Splitting of Operator

⁴ moveMeshPointsForOldFreeSurfaceDisplacement



شکل ۴- تابع fixedFractionMotion و دو تابع پیش‌نیاز آن جهت اعمال روش جابجایی نقاط نسبت-ثابت

صرفاً یکبار در ابتدای حل فراخوانی می‌شود و تمامی نقاط متناظر (با) هر یک از نقاط داخل شبکه) که بر روی دو سطح آزاد و کف قرار دارند را ذخیره‌سازی می‌نماید. شکل ۵، نمایش نقاط متناظر با هر نقطه شبکه و نحوه قرارگیری در لیست‌های مربوطه را نمایش می‌دهد. در واقع به ازای هر نقطه شبکه، یک نقطه روی سطح آزاد و یک نقطه بر روی دیواره کف پیدا می‌شود.



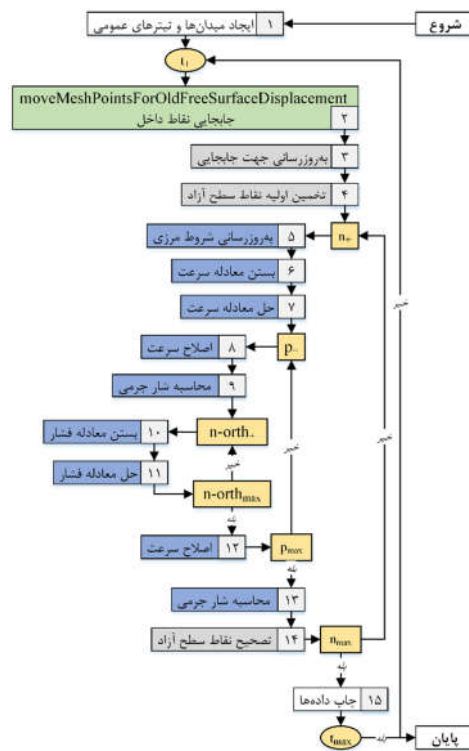
شکل ۵- نمونه نقاط داخل میدان و نقاط متناظر بر روی سطح آزاد و دیواره کف

همانطور که از شکل ۵ مشخص است، برای هر نقطه داخلی، یک نقطه متناظر بر روی سطح آزاد و یک نقطه متناظر بر روی سطح کف پیدا می‌شود. در واقع این تابع به کمک توابع و الگوریتم‌های جستجو، برای هر نقطه داخلی میدان، دو نقطه یکی بر روی سطح آزاد و دیگری بر روی کف را پیدا و ذخیره‌سازی می‌کند. تابع دوم که distanceFractionOfNodes نام نهاده شده است، وظیفه دریافت موقعیت نقاط و محاسبه نسبت فاصله برای هر نقطه داخل میدان را به کمک رابطه (۱۵) برعهده دارد. در نهایت تابع سوم با نام fixedFractionMotion، وظیفه محاسبه فواصل جدید و جابجایی نقاط متناسب با آن و به‌روزرسانی‌ها را برعهده دارد. این تابع برخلاف دو تابع قبلی، پس از هر تکرار و بعد از هر به‌روزرسانی جریان، فعال می‌شود. بهره‌گیری از اشاره‌گرهای هوشمند در این توابع، سرعت بالای عملکرد این توابع را باعث شده است.

۵- اعتبارسنجی نتایج

به‌منظور اعتبارسنجی نتایج، شکل امواج سطح آزاد و همچنین

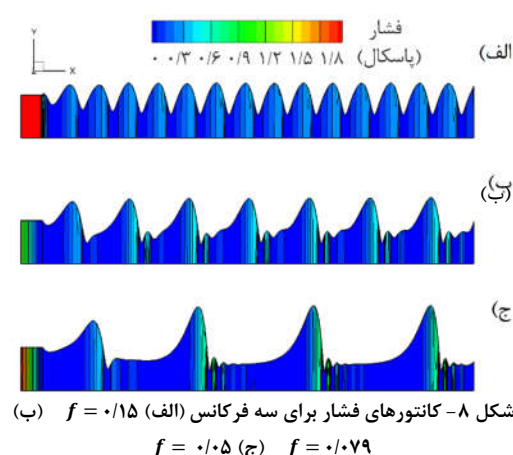
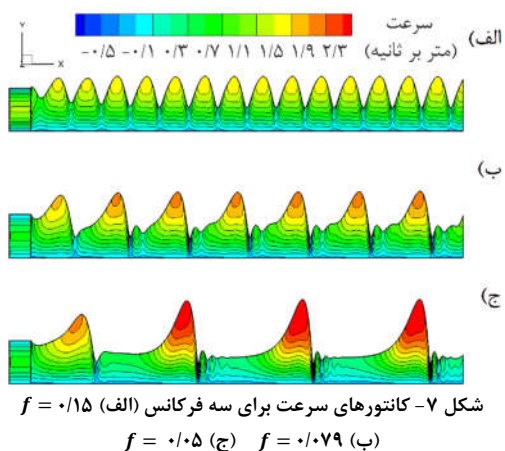
و تماماً در کلاس freeSurface از حلگر تعریف شده است. شکل ۳، الگوریتم حلگر interTrackFoam شامل حلقه زمانی، حلقه جریان، توابع جابجایی سطح و شبکه را نمایش می‌دهد.



شکل ۳- الگوریتم حلگر پیش‌فرض با روش حل جریان PIMPLE [۱۰]

همان‌گونه که در شکل ۲ نمایش داده شده، بلافاصله پس از شروع حلقه زمانی، توابع جابجایی شبکه فعال می‌شوند. این توابع که به کمک الگوریتم موزافریجا و پریک [۳] و همچنین با بهره‌بردن از انواع روش‌های جابجایی، وظیفه جابجایی نقاط سطح و نقاط داخل را برعهده دارند. به‌منظور پیاده‌سازی روش جابجایی نقاط شبکه نسبت-ثابت، تابعی با نام fixedFractionMotion به‌جای تابع ذکر شده تعریف شده است. شکل ۴ نمایش الگوریتمی از تابع جدید به همراه کارکرد توابع داخلی و دو تابع پیش‌نیاز آن را نمایش می‌دهد.

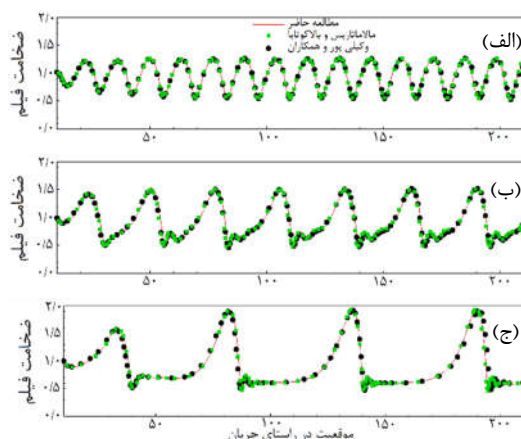
در شکل ۴، توابع alignedNodesOfsAndBottom، distanceFractionOfNodes و fixedFractionMotion، سه تابع اصلی جهت انجام کلیه فرآیندهای مربوط به جستجو، محاسبات نسبت‌ها و محاسبات فواصل جدید نمایش داده شده‌اند. دو تابع با اول، صرفاً یکبار در شروع کار فراخوانی می‌شوند و تابع سوم نیز، به تعداد موردنیاز فراخوانی و اجرا می‌گردد. این توابع که از قابلیت اشاره‌گرهای دینامیک به همراه مدیریت هسته‌های موازی بهره می‌برند، امکان یافتن نقاط متناظر با هر نقطه داخلی شبکه و انجام محاسبات را فراهم می‌آورند. تابع اول که alignedNodesOfsAndBottom نام نهاده شده است،



۶- چالش‌های اصلی جابجایی شبکه در جریان‌های فیلم ناپایا

با تشکیل امواج بر روی سطح آزاد و حرکت این امواج از بالادست به سمت پایین‌دست جریان، سه دسته اصلی از امواج قابل مشاهده هستند. این سه دسته با توجه به ایجاد نواحی بحرانی و حرکت سطح، هریک به نحوی می‌تواند در ایجاد چالش‌ها یا مشکلات حرکت شبکه نقش ایفا کنند. اولین موج شکل‌گیرنده بر روی سطح، دارای بزرگترین اندازه دامنه است. با حرکت این موج اول یا موج اصلی [۲۵] به تدریج از بالادست به سمت پایین‌دست، دامنه این موج بزرگتر می‌شود به نحوی که در انتهای دامنه حل، دارای بزرگترین اندازه دامنه است. نواحی جلو و عقب این موج اول از جمله نواحی بحرانی و حساس جهت حرکت شبکه است. دومین نوع امواج، موج دوم بعد از موج اول است. فاصله زیاد موج دوم با موج اول، سبب شکل‌گیری یک ناحیه میانی با ضخامت کم می‌شود که می‌تواند مشکلاتی را برای جابجایی شبکه ایجاد نماید. امواج بعد از موج دوم را می‌توان به عنوان امواج تکرارشونده قلمداد کرد چراکه اندازه دامنه و طول موج آنها تفاوت چندانی با یکدیگر ندارد و درواقع الگوی آنها با ادامه حل، تکرار می‌شود.

خطوط جریان در سه بسامد 0.05 ، 0.079 و 0.15 با نتایج کارهای وکیلی پور و همکاران [۵] و مالماتاریس و بالاکوتایا [۴] مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. در حل این مسائل، گام زمانی 0.001 تا 0.005 به عنوان گام زمانی مناسب انتخاب شده است. برای تمام نمونه‌ها، از شبکه‌های مکانی و زمانی پیشنهاد شده توسط وکیلی پور و همکاران [۵] استفاده شده است. مقایسه میان شکل امواج سطحی برای سه بسامد ذکر شده به صورت شکل ۶ ارائه شده‌اند.



شکل ۶- موقعیت سطح آزاد سیال در سه بسامد (الف) $f = 0.15$ (ب) $f = 0.079$ (ج) $f = 0.05$ و مراجع [۴] و [۵]

همانطور که از شکل ۶ مشاهده می‌شود، در هر سه بسامد، مطابقت نسبتاً کاملی میان نتایج با دیگر مطالعات قابل مشاهده است. همچنین در جدول ۱، مقایسه میان نقطه قله بزرگترین موج ارائه شده است. مقایسه میان نتایج، اختلاف حداکثر $1/3$ درصدی میان نتایج را نشان می‌دهد که می‌تواند به عنوان یک مقدار قابل قبول در این مطالعه در نظر گرفته شود.

جدول ۱- مقایسه میان حداکثر اندازه ارتفاع امواج سطح آزاد سیال برای سه بسامد موردنظر

حداکثر Δy (بیشینه ارتفاع سطح)			
$f = 0.15$	$f = 0.079$	$f = 0.05$	
۱/۲۵۵	۱/۵۱۴	۱/۹۲۶	الکسینکو و همکاران [۱]
۱/۲۶۳	۱/۵۱۱	۱/۹۴۵	مالماتاریس و بالاکوتایا [۴]
۱/۲۶۴	۱/۵۲۵	۱/۹۳۷	وکیلی پور و همکاران [۵]
۱/۲۷۲	۱/۵۲۹	۱/۹۵۰	مطالعه حاضر
۱/۳	۰/۹	۱/۲	اختلاف نسبی با [۱] (%)
۰/۷	۱/۱	۰/۲	اختلاف نسبی با [۴] (%)
۰/۶	۰/۳	۰/۷	اختلاف نسبی با [۵] (%)

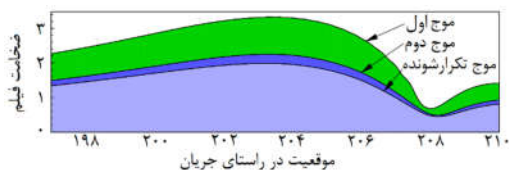
شکل ۷ و ۸، کانتورهای سرعت و فشار را برای هر سه فرکانس اشاره شده نمایش می‌دهند.

¹ Principal wave

انحنای زیاد در ناحیه جبهه موج اول، کاهش ضخامت شدید در ناحیه جلوی موج دوم و همینطور فشردگی نقاط شبکه در ناحیه خروجی جریان با تکرار نوسانات امواج در خروج از جمله اصلی‌ترین چالش‌های نشان داده‌شده در شکل ۱۱ است. در ادامه، هریک از این چالش‌ها مورد بررسی دقیق‌تر قرار می‌گیرد و رفتار روش‌های مختلف در دسترس جابجایی شبکه در بستر foam-extend در مقایسه با روش توسعه داده شده با نام روش نسبت-ثابت، مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

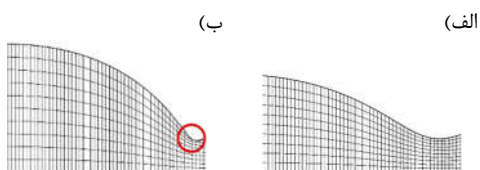
۶-۱- چالش اول: عبور و خروج موج اول از دامنه حل

می‌توان ادعا نمود که اساسی‌ترین مشکل جابجایی شبکه در جریان‌های لایه‌ای نازک، حرکت موج اول و خروج موفق از دامنه حل است. این موج که به دلیل شروط مرزی و شرایط حاکم بر مسئله در ابتدای حل تشکیل می‌شود، در صورت اعمال صحیح شروط اولیه و مرزی، یک موج کاملاً فیزیکی خواهد بود [۸]. شکل ۱۲ نمایش مقایسه میان امواج مختلف شامل موج اول، موج دوم و امواج تکرارشونده ناپایا می‌باشد.



شکل ۱۲- اندازه و انحنای سه نوع موج اصلی شکل‌گیرنده بر سطح آزاد

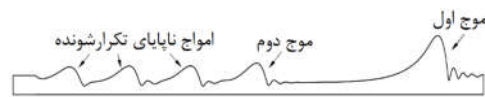
همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، قله موج اول تقریباً دو برابر دیگر امواج است. همچنین با پیشروی امواج، اندازه و انحنای ناحیه جبهه و جلوی موج نیز زیادتر می‌شود. بنابراین، بحرانی‌ترین حالت زمانی رخ می‌دهد که موج در نزدیکی مرز خروجی قرار گیرد. مشکلی که در رابطه با حرکت شبکه و موج اول ایجاد می‌شود، نزدیک شدن تدریجی نقاط سطح آزاد با نقاط داخل میدان در مجاورت سطح است. در واقع با ادامه حرکت موج از پایین دست به بالادست، امکان برخورد نقاط داخل شبکه با سطح افزایش می‌یابد. شکل ۱۳ نمایش حرکت موج اول و نزدیک شدن تدریجی شبکه داخل به سطح را نمایش می‌دهد.



شکل ۱۳- حرکت موج اول و نزدیک شدن نقاط سطح آزاد به نقاط داخل دامنه در مجاورت سطح آزاد

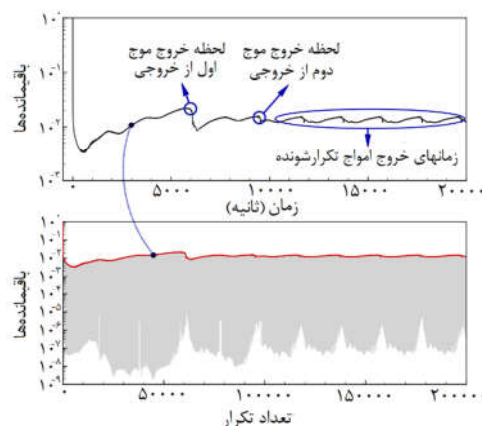
شکل ۱۳-الف، نمایش موج اول در میانه میدان است در حالی که با حرکت به سمت خروجی (شکل ۱۳-ب)، رفته رفته سطح آزاد به نقاط داخل میدان نزدیک‌تر می‌شود و در نهایت با پیشروی بیشتر موج به

به علت درستی امواج در بسامد ۰/۰۵، عموماً بحرانی‌ترین شرایط در کمترین بسامد رخ می‌دهد. شکل ۹، یک الگوی کلی از سه نوع امواج شکل‌گیرنده بر سطح تا رسیدن حل به حل ناپایای نهایی را نمایش می‌دهد.



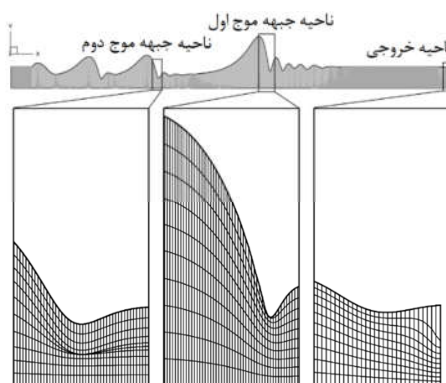
شکل ۹- سه نوع از امواج سطحی شکل‌گیرنده بر روی سطح آزاد

همچنین لحظات مرتبط با ایجاد سه‌دسته موج ذکر شده در زمان حل و در نمودار باقیمانده‌ها نیز به وضوح قابل مشاهده و تفکیک است. شکل ۱۰ نیز نمایش باقیمانده‌ها برای متغیر سرعت بر حسب زمان و تعداد تکرار را نمایش می‌دهد.



شکل ۱۰- نمایش باقیمانده برای متغیر سرعت به همراه زمان‌های خروج موج اول و موج دوم از خروجی دامنه

در این شکل، زمان‌ها یا لحظات خروج موج اول از دامنه حل، خروج موج ثانویه و همچنین توسعه امواج تکرارشونده نهایی به وضوح قابل مشاهده می‌باشد. این امواج و دیگر امواج بعدی، تلاش‌های پی‌درپی حلگر برای رسیدن به امواج تکرارشونده نهایی است و در صورت اعمال صحیح شروط اولیه و شروط مرزی، امواجی کاملاً مطابق با فیزیک می‌باشند [۲۵]. شکل ۱۱ نواحی مستعد چالش‌های جابجایی شبکه را نمایش داده است.



شکل ۱۱- نمایش سه ناحیه اصلی مستعد برای بروز مشکلات شبکه

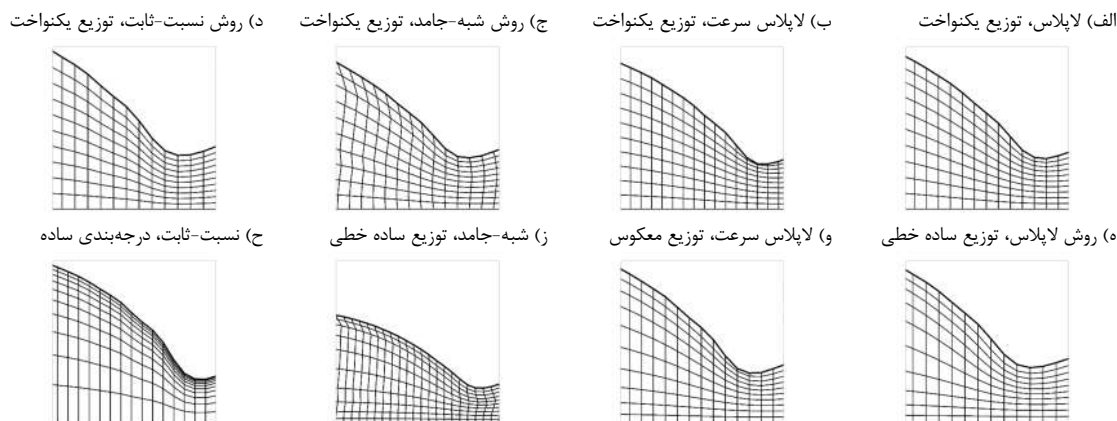
سمت مرز خروجی، برخورد و توقف حل صورت می‌گیرد. با اعمال روش‌های در دسترس جابجایی شبکه و همچنین اعمال توزیع‌های متفاوت ضریب پخش، حرکت شبکه داخل و تقابل آن با سطح آزاد مورد ارزیابی قرار گرفته است. شکل ۱۴، نمایش اعمال روش‌های مختلف در دسترس در بستر foam-extend بر موج اول را نمایش می‌دهد. همانطور که از شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، روش لاپلاس و شبه-جامد با توزیع یکنواخت ضریب پخش با موفقیت می‌توانند موج اول را از دامنه خارج نمایند (شکل ۱۴-الف و -ج). هرچند که اعوجاجات ایجاد شده در ساختار شبکه توسط روش شبه-جامد منجر به افت کیفیت شبکه و به هم‌ریختگی زیاد سلول‌ها می‌شود (شکل ۱۴-ج، -ز). روش مبتنی بر لاپلاس سرعت با داشتن ضریب پخش یکنواخت در کل دامنه، نمی‌تواند موج اول را از دامنه خارج نماید (شکل ۱۴-ب).

بررسی توزیع یکنواخت اندازه سلول‌ها و همچنین حفظ تعامد سلول‌ها نشان داده که دو روش لاپلاس و لاپلاس سرعت برای عبور از چالش موج اول مناسب هستند. روش نسبت-ثابت توسعه داده شده از هردو منظر توزیع یا تجمع کیفیت سلول‌ها در نواحی میانی و هم کنترل کیفیت در مجاورت سطح آزاد یک روش، کارآمد می‌باشد. به همین دلیل است که مشکل برخورد سطح آزاد با شبکه داخلی به حداقل می‌رسد (شکل ۱۴-د و -ح). در صورت انتخاب شبکه مکانی اولیه مناسب، توزیع کیفیت شبکه در سرتاسر حل تضمین می‌شود. مشکل و چالش حرکت موج اول را می‌توان با کاهش اندازه گام زمانی، همچنین کاهش تعداد سلول‌ها در راستای عرضی و یا افزایش تعداد سلول‌ها در راستای طولی، تا حدی کاهش داد. هرچند که این تغییرات نیاز به سعی و خطا و صرف هزینه محاسباتی زیادی دارد. برای مثال، برای دامنه با نسبت طول به عرض ۲۰۰ و درسامد ۰/۰۵، شده، در صورتی که تعداد سلول‌های راستای عرضی به ۴۰ افزایش یابد نیاز به ایجاد شبکه با تعداد سلول ۲۰۰۰ در راستای طولی و ۲۰ سلول در راستای عرضی با گام زمانی ۰/۰۱ است. با گام زمانی اشاره شده، در صورتی که تعداد سلول‌های راستای عرضی به ۴۰ افزایش یابد یا تعداد سلول‌ها در راستای طولی به ۱۰۰۰ کاهش یابد، برخورد موج اول با شبکه داخلی منجر به توقف حل خواهد شد، بنابراین نیاز به کاهش گام زمانی و در نتیجه افزایش زمان محاسبه می‌باشد. به بیان

بهرتر، برای روش لاپلاس سرعت با توزیع ضریب پخش معکوس فاصله با گام زمانی ۰/۰۱، حداقل شبکه مکانی ۲۰×۲۰۰۰ مورد نیاز است. این در حالی است با روش توسعه داده شده نسبت-ثابت، امکان کار با شبکه ۲۰×۱۰۰۰ یا ۴۰×۲۰۰۰ را حتی با گام زمانی بزرگتر (تا حد ۰/۰۱) نیز فراهم شده است. نکته بسیار مهم در استفاده از این روش، عدم نیاز یا کاهش چشمگیر تعداد سعی و خطا در یافتن شبکه‌های زمانی و مکانی مناسب به دلیل تضمین حفظ کیفیت و حد فاصل میان نقاط داخل با سطح آزاد سیال است. شایان ذکر است که تمامی شبیه‌سازی‌ها به کمک یک رایانه با پردازنده‌ی ۸ هسته‌ای از نوع Intel(R) Core(TM) i9-9900K 3.6 GHz و ۳۲ گیگابایت حافظه موقت انجام شده‌اند.

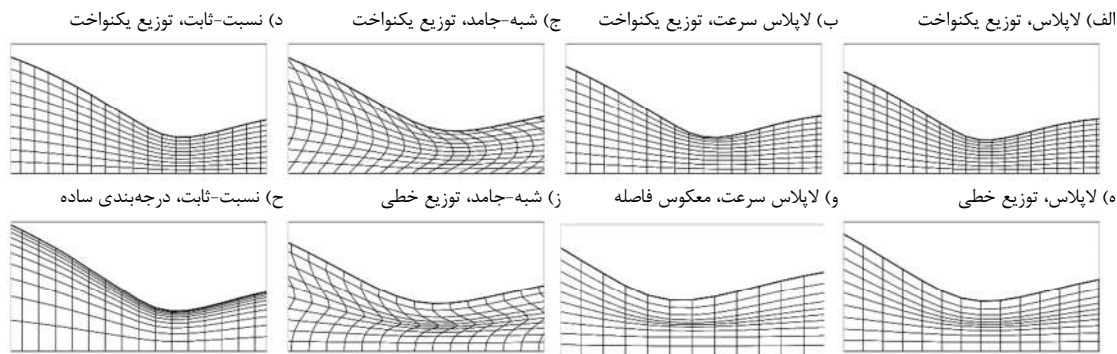
۲-۶- چالش دوم: فشردگی ناحیه جبهه موج دوم

پس از حرکت موج اول از ابتدای دامنه به سمت انتها، ناحیه پشت موج اول و نزدیک به موج دوم تشکیل یک گلوگاه می‌دهد. در واقع فاصله زیاد میان موج اول و دوم را می‌توان علت این مقدار از تورفتگی دانست. این فشردگی و نزدیک شدن سطح آزاد به مرز کف منجر به فشردگی شبکه میانی و در مواردی برخورد و توقف حل می‌گردد. با اعمال روش‌های مختلف جابجایی شبکه و توزیع‌های متفاوت از ضریب پخش، نتایج شکل ۱۵ حاصل شده‌اند. مطابق با آنچه در شکل ۱۵ قابل مشاهده است، دو روش لاپلاس و شبه-جامد با توزیع یکنواخت ضریب پخش، توزیع نسبتاً مناسبی از اندازه سلول‌ها را در راستای عرضی تولید می‌کنند (شکل ۱۵-الف و -ج) در حالی که اعوجاجات ایجاد شده در روش شبه-جامد، کیفیت و تعامد سلول‌ها را به شدت تحت تأثیر قرار داده است (شکل ۱۵-ج و -ز). همچنین روش لاپلاس سرعت با توزیع ضریب پخش به روش معکوس فاصله نیز علاوه بر تأمین کیفیت و فشردگی مناسب سلول‌ها، سبب عبور موفق حل از این چالش می‌گردد (شکل ۱۵-و). در صورت استفاده از توزیع نمای ضریب پخش، روش لاپلاس سرعت نمی‌تواند به خوبی فشردگی شبکه را کنترل نماید و به سبب برخورد سلول‌ها، حل متوقف می‌گردد. در نهایت روش نسبت-ثابت در هر دو حالت توزیع یکنواخت و توزیع گرادینتی، بدون هیچ مشکل و برخورد شبکه، حل را ادامه می‌دهد (شکل ۱۵-د و -ح).



شکل ۱۴- اندازه و انحنای سه نوع موج اصلی شکل‌گیرنده بر سطح آزاد.

الف، ه) روش لاپلاس، ب، و) روش لاپلاس سرعت، ج، ز) روش شبه-جامد، د، ح) روش نسبت-ثابت



شکل ۱۵- نمایش رفتار روش‌های مختلف جابجایی شبکه به همراه انواع توزیع ضریب پخش در دسترس برای هر روش بر روی ناحیه جبهه موج دوم، الف، ه) روش لاپلاس، ب، و) روش لاپلاس سرعت، ج، ز) روش شبه-جامد، د، ح) روش نسبت-ثابت

جدول ۲- زمان محاسبه با هریک از روش‌های جابجایی شبکه (در صورت همگرایی) با یک شبکه مکانی یکسان 20×2000 و گام زمانی 0.001

زمان محاسبات (ثانیه)			
$f = 0.15$	$f = 0.079$	$f = 0.05$	
واگرا	۵۷۷۶	۳۶۴۹	روش لاپلاس
۶۹۱۰	۵۷۱۹	۳۴۸۳	روش لاپلاس سرعت
۲۲۶۴	۱۸۹۰	۱۱۸۹	روش نسبت-ثابت
-	۲۰۶	۲۰۷	اختلاف با لاپلاس (%)
۲۰۵	۲۰۲	۱۹۳	اختلاف با لاپلاس سرعت (%)

همچنین امکان کنترل کیفیت سلول‌ها به بهترین وجه فراهم شده است. به طور خلاصه، روش نسبت-ثابت برای عبور موج دوم از دامنه حل، کاملاً موفق عمل نموده است.

۳-۶- مقایسه سرعت روش‌های جابجایی شبکه

با توجه به بهره‌گیری از قابلیت برنامه‌نویسی موازی، امکان مقایسه سرعت روش‌های مختلف جابجایی شبکه فراهم گردیده است. در مقایسه میان سرعت حل روش‌های مختلف، از شبکه‌های زمانی و مکانی یکسان استفاده شده است درحالی‌که الزاماً این شبکه مکانی یا زمانی، شبکه ایده‌آل برای روش توسعه یافته نسبت-ثابت نمی‌باشد. به عبارت بهتر، به علت تضمین حرکت مناسب نقاط و عبور از چالش‌های ذکر شده در بخش‌های قبل، روش نسبت-ثابت قابلیت کار در شبکه‌های مکانی و زمانی بهینه‌تر از منظر سرعت و دقت محاسبات را نیز دارد. جدول ۲، مقایسه میان زمان محاسبات با شبکه زمانی و مکانی یکسان را ارائه می‌دهد. همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، زمان حل با روش نسبت-ثابت نسبت به دیگر روش‌ها، کمتر از نصف (حدود یک سوم) شده است. برای توسعه کامل امواج سطحی، زمان حل برای بسامد 0.05 تا 200 ثانیه، برای بسامد 0.079 تا 250 و برای بسامد 0.15 تا 300 ثانیه در نظر گرفته شده است. با استفاده از روش لاپلاس در بسامد 0.15 به دلیل نوسانات زیاد امواج در مرز خروجی و فشردگی نقاط، حل دچار واگرایی و توقف می‌گردد. روش لاپلاس با شبکه 20×2000 امکان همگرایی در بسامد 0.15 را ندارد درحالی‌که با افزایش تعداد سلول‌ها در راستای طولی به 3000 ، این روش می‌تواند با موفقیت شبکه را تا همگرایی جابجا نماید. در روش نسبت-ثابت نیز، به دلیل تضمین جابجایی مناسب، می‌توان تعداد سلول‌ها در راستای طولی را به نصف رساند، یعنی شبکه 20×1000 درحالی‌که دقت محاسبات کماکان تغییر چندانی نمی‌کنند. استفاده از گام زمانی بالاتر برای روش نسبت-ثابت، منجر به کاهش بیشتر زمان حل نیز می‌گردد.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش جابجایی شبکه بر اساس یک ایده ساده و در عین حال کارآمد به صورت کاملاً اختصاصی برای جریان‌های فیلم ناپایا، توسعه داده شده و در بستر foam-extend پیاده‌سازی شده است. این روش درمقایسه با روش‌های موجود و در دسترس foam-extend امکان فعال‌سازی با حلگر interTrackFoam را دارند، مورد مقایسه قرار گرفته است. زمان محاسبات با این روش، درحالی‌که شبکه‌های مکانی و زمانی یکسانی مورد استفاده قرارگیرد، حدود نصف تا یک‌سوم کاهش می‌یابد. ازجمله اصلی‌ترین قابلیت روش توسعه داده شده، تضمین کیفیت شبکه در نواحی مختلف و مجاورت مرزها و درعین حال، عدم مواجهه با مشکلات رایج در روش‌های جابجایی شبکه مرسوم می‌باشد. همچنین تضمین رسیدن به پاسخ مناسب در این روش، سبب کاهش چشمگیر تعداد فرآیند سعی و خطا به‌منظور پیدا کردن شبکه مناسب مکانی و زمانی گردیده است. روش‌های در دسترس موجود برای جابجایی شبکه درچنین جریان‌هایی، عموماً براساس حل معادلاتی همچون لاپلاس موقعیت یا لاپلاس سرعت مراکز سلول‌ها هستند که حتی در صورت ایجاد یک شبکه مناسب برای عبور از چالش‌ها و مشکلات چنین جریان‌هایی، دارای هزینه محاسباتی بسیار بالاتری هستند. به عبارت دیگر، روش‌های پیش‌فرض، حداقل به تعدادی تکرار جهت رسیدن به پاسخ (در صورت قابل پذیرش بودن) نیازمند هستند درحالی‌که در روش توسعه داده شده، موقعیت نقاط با اولین تکرار و محاسبه، تضمین شده است. دیگر قابلیت این روش توسعه داده شده، امکان بهره‌گیری از قابلیت پردازش موازی است. درنهایت می‌توان گفت

که این روش، علیرغم سادگی، به شدت در حل جریان‌های فیلم ناپایا، چالاک و کارآمد می‌باشد.

۸- مراجع

- [18] Cheraghi B, Vakili-pour S. 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 Jun 20.
- [19] Karmakar A, Acharya S. Numerical simulation of falling film flow hydrodynamics over round horizontal tubes. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021 Jul 1;173:121175.
- [۲۰] علی نژاد ج، ابوالفضلی ج. Simulation of Red blood Cell Deformation and Drug Delivery Using LBM. دانشگاه تبریز. ۲۰۱۷ 47(3):159-67.
- [21] Kassiotis C. Which strategy to move the mesh in the Computational Fluid Dynamic code OpenFOAM. Report École Normale Supérieure de Cachan. Available online: <http://perso.crans.org/kassiotis/openfoam/movingmesh.pdf>. 2008 Apr 12.
- [22] Jasak H, Tukovic Z. Automatic mesh motion for the unstructured finite volume method. Transactions of FAMENA. 2006 Nov;30(2):1-20.
- [23] Jasak H. Dynamic mesh handling in OpenFOAM. In 47th AIAA aerospace sciences meeting including the new horizons forum and aerospace exposition 2009 Jan 5 (p. 341).
- [24] González AO, Vallier A, Nilsson H. Mesh motion alternatives in OpenFOAM. PhD course in CFD with OpenSource software. 2009 Dec.
- [25] Kahouadji L, Batchvarov A, Adebayo IT, Jenkins Z, Shin S, Chergui J, Juric D, Matar OK. A numerical investigation of three-dimensional falling liquid films. Environmental Fluid Mechanics. 2022 Jun;22(2):367-82.
- [1] Alekseenko SV, Nakoryakov VE, Pokusaev BG. Wave formation on vertical falling liquid films. International journal of multiphase flow. 1985 Sep 1;11(5):607-27.
- [2] Alekseenko SV, Antipin VA, Guzanov VV, Kharlamov SM, Markovich DM. Three-dimensional solitary waves on falling liquid film at low Reynolds numbers. Physics of Fluids. 2005 Dec 1;17(12).
- [3] Muzafferija S, Perić M. Computation of free-surface flows using the finite-volume method and moving grids. Numerical Heat Transfer. 1997 Dec 1;32(4):369-84.
- [4] Malamatari NA, Balakotaiah V. Flow structure underneath the large amplitude waves of a vertically falling film. AIChE journal. 2008 Jul;54(7):1725-40.
- [5] Vakili-pour S, Mohammadi M, Ormiston S. A fully coupled ALE interface tracking method for a pressure-based finite volume solver. Journal of Computational Physics. 2021 Feb 15;427:110054.
- [6] Albert C, Marschall H, Bothe D. Direct numerical simulation of interfacial mass transfer into falling films. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2014 Feb 1;69:343-57.
- [7] Vakili-pour S, Hekmatkhan R. Investigation of water vapour absorption into wavy falling films by developing a fully coupled interface tracking finite volume method. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022 Apr 1;185:122397.
- [8] Kahouadji L, Batchvarov A, Adebayo IT, Jenkins Z, Shin S, Chergui J, Juric D, Matar OK. A numerical investigation of three-dimensional falling liquid films. Environmental Fluid Mechanics. 2022 Jun;22(2):367-82.
- [9] Jasak H, Tuković Ž. Dynamic mesh handling in OpenFOAM applied to fluid-structure interaction simulations. In Proceedings of the V European Conference on Computational Fluid Dynamics ECCOMAS CFD 2010 2010.
- [10] Tuković Ž, Jasak H. A moving mesh finite volume interface tracking method for surface tension dominated interfacial fluid flow. Computers & fluids. 2012 Feb 15;55:70-84.
- [11] Löhrner R, Yang C. Improved ALE mesh velocities for moving bodies. Communications in numerical methods in engineering. 1996 Oct;12(10):599-608.
- [12] Beaudoin M, Jasak H. Development of a generalized grid interface for turbomachinery simulations with OpenFOAM. In Open source CFD International conference 2008 Dec 4 (Vol. 2). Germany: Berlin.
- [13] Greco F, Lonetti P, Pascuzzo A. A moving mesh FE methodology for vehicle-bridge interaction modeling. Mechanics of Advanced Materials and Structures. 2020 Jul 15;27(14):1256-68.
- [14] You Y, Wang S, Lv W, Chen Y, Gross U. A CFD model of frost formation based on dynamic meshes technique via secondary development of ANSYS fluent. International Journal of Heat and Fluid Flow. 2021 Jun 1;89:108807.
- [15] Zhu Q, Xu F, Xu S, Hsu MC, Yan J. An immersed geometric formulation for free-surface flows with application to marine engineering problems. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2020 Apr 1;361:112748.
- [16] Battaglia L, D'Elia J, Storti M, Nigro N. Numerical simulation of transient free surface flows using a moving mesh technique. 2006 Nov 11;20(14):1-9.
- [17] Cheraghi B, Mirzavand Boroujeni B, Shafae M. Hydroelastic coupled vibrations in spherical containers of membrane bottom, partially filled with frictionless liquids. Modares Mechanical Engineering. 2016 Jun 10;16(4):155-62..