الگوی شبکه بولتزمن دو-فازی ۱۲۱-سرعتی برای شبیهسازی کاواکزایی صوتی با استفاده از پردازش موازی مبتنی بر واحد پردازنده ترسیمی (جیپییو)

مهدی دائمی^۱، محمد طیبی رهنی^{*۱}، حمیدرضا مساح^۲ ۱. دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف ۲. دانشکده فیزیک، دانشگاه فردوسی مشهد

چکیدہ

کاواکزایی پدیدهای است که در جریان دو- فازی یا چندفازی با تأثیرات مطلوب و نامطلوب همواره وجود دارد. نیاز به مطالعه ایـن پدیـده در فهم و بکارگیری آن در جریانهای دو- فازی غیرقابل اجتناب است. از اینرو مطالعات زیادی در این رابطه توسط دانشمندان مرتبط با علوم جریانهای چند فازی صورت گرفته است. صدا به دلیل ماهیتش که همان انتشار تغییرات فشار در یک سیال است هنگام انتشار در یک مایع ممکن است موجب ایجاد کاواک در مایع شود. صدا با حبابها در مایع و قطرات در گازها اندرکنش دارد. در این مقاله بـه مقولـه کاواکزایی در یک مایع در اثر اعمال صدا پرداخته شده است. شناخت این پدیده بهرغم مطالعات زیاد آن با شیوههای معمول در دینامیک سیالات محاسباتی (سیاف دی) همچنان در برخی جنبهها ناشناخته است. شیوه شبکه بولتزمن (ال.ی.ام) دو- فازی به عنوان یک شیوه با رویکرد میان نگرانه، ضمن برخورداری از بسیاری از مزایای رویکرد خُردنگرانه به عنوان یک شیوه کارا و بازوی توانمند در سیافدی نوین پذیرفته شده است. از مزایای قابل ملاحظه آن موازی پذیری ذاتی و بکارگیری آسان آن در شرایط پیچیده مرزی است. در مطالعه حاضر با استفاده از الگوی دو- فازی شان –چن و بکارگیری آن در ال.ی.ام سه- بعدی ۱۲۱- سرعتی، برای او لیی بار، توانمندی ایـن شیوه برا مطالعه کاوکزایی صوتی نشان داده شده است. این شیوه اگر چه با فیزیک همخوانی بهتری دارد ام از قان با شیوههای معمول در پذیرفته شده است. از مزایای قابل ملاحظه آن موازی پذیری ذاتی و بکارگیری آسان آن در شرایط پیچیده مرزی است. در مطالعه حاضر با سیفاده از الگوی دو- فازی شان –چن و بکارگیری آن در ال.ی.ام سه- بعدی ۱۲۱- سرعتی، برای اولـین بـار، توانمنـدی ایـن شـیوه بـرای موازمن پیچیده تر است. پیچیدگیهای ایجاد شده از انتخاب ۱۲۱- سرعت و زمان اجرای طولانی ناشی از آن، بـا ایجاد الگـوریتم و کـد موازی و استفاده از سامانه محاسباتی مبتنی بر جی پی یو با توان محاسباتی بالا تاحد زیادی جبران شده است.

کلید واژهها: شبکه بولتزمن، ۱۲۱- سرعتی، کاواکزایی صوتی، جیپییو

۱. مقدمه

امواج صدا به تعبیری انتشار تغییرات فشار در یک سیال هستند که با سرعت وابسته به ویژگیهای سیال و بسامد صدا منتشر می گردند. از این منظر، اعمال صدا به یک مایع موجب افزایش یا کاهش فشار از وضعیت پایدار اولیه (غیراختلالی) میشود. کاهش فشار از حالت اولیه مایع را تحت کشش قرار میدهد. اگر این کشش به اندازه کافی قوی باشد موجب پارگی مایع و در نتیجه کاواکزایی می گردد. دو نوع کاواکزایی وجود دارد [۱]: کاواکزایی همگن^۲ و کاواکزایی دگرگن^۳. در کاواکزایی همگن با

* نویسنده پاسخگو: taeibi@sharif.edu

۱۳

اعمال فشار کششی به مایع، در مایع پارگی ایجاد شده و منجر به کاواکزایی میشود. اگر در مایع حباب یا حبابهایی از قبل وجود داشته باشد (در مایعات در حالت معمولی آن همیشه همین طور است) یا اینکه با شیوههایی مثل تاباندن نور لیزر یا تزریق مایع به مایع ایجاد شوند، اعمال فشار کششی موجب رشد و فروریزش آنها خواهد شد که به این امر کاواکزایی دگرگن گفته میشود. اگر حبابی که با شیوههای فوقالذکر (یا شیوههای مشابه) در مایع بوجود آمده از حد شعاع بحرانی بزرگتر نشود کشش سطحی حباب نمیتواند در مقابل فشار مایع مقاومت کند کلی این پدیدهها با شیوههای معمول سیاف دی کم و بیش انجام شده است. البیام که در سال ۱۹۸۸ توسط مکنامارا و زانتی [۲] به دنیای شبیه سازی سیالات معرفی

¹ Cavitation

² Homogenous ³ Heterogenous

$$f^{eq} = \rho \left(\frac{m}{\tau \pi k_{B}T}\right)^{D/\tau} \exp\left[\frac{-m(e-u)^{\tau}}{\tau k_{B}T}\right]$$
(Y)

در رابطه ۲، D، b_B *m*، D، b_B *m*، b، cر رابطه ۲، b_B *m*، c b_B *m*، b، خره، ثابت بولتزمن، چگالی، سرعت محیط و دما می باشند. با استفاده از شیوه هی و لو در سال ۱۹۹۷ [۱۲] و حذف جمله نیرو، معادله شبکه بولتزمن، معادله ۳ را می توان مستقیماً از معادله بولتزمن، معادله ۱، استخراج نمود: $f(x + e\Delta t.e.t + \Delta t) =$

$$(1 - \frac{\Delta t}{\tau})f(x, e, t) + \frac{\Delta t}{\tau}f^{eq}(x, e)$$
(7)

در این مقاله از شبکه سه- بعدی با الگوی ۱۲۱- سرعتی نی و همکاران [۱۳] استفاده شده است. مشخصات ۱۲۱-سرعت در جدول ۱ ارائه شده است.

در البی م تابع توزیع ماکسول - بولتزمن، بسط تیلور یا هرمیت داده می شود. در بسط تیلور بطور معمول براساس ماخ بسط داده شده و تا رتبه ۲ یا ۳ حفظ می شود. این بسط های ساده باعث بروز مشکلاتی می شوند به طوری که ال بی اِم - های معمول نمی توانند معادلات ناویه - استوکس را بخوبی باز تولید نمایند [۱۲]. بسط بر مبنای پایه هرمیتی مزایایی دارد که استفاده از آن به بسط تیلور ترجیح داده می شود از جمله:

- ۱- با بسط براساس پایـه هرمیتـی ضـرایب بسـط همـان
 ممانهای سرعتند،
- ۲- بسط تیلور براساس عدد ماخ بسط داده میشود و بنابراین برای عدد ماخهای خیلی کوچکتر از یک
 قابل استفاده است؛ در بسط بر پایه هرمیتی این
 مشکل بخوبی حل شده است.
- ۳- در بسط بر پایه هرمیتی افزایش جملات بسط در
 صورت نیاز بسیار آسان تر از بسط تیلور است.

برای بسط تابع تعادل با توجه به مزیتهای فوق الذکر، بسط پایه هرمیتی انتخاب گردید. برای تعداد جملات بسط براساس تحلیل و بررسی مرجع [۱۴] که بسط تا شش جمله را معادل معادلات هیدرودینامیک کامل دانسته به صورت زیر تا شش جمله بسط داده شده است: شد بهسرعت به رشد بالایی دست پیدا کرده و در حال حاضر به عنوان یک شیوه پرکاربرد و با پتانسیل بالا در سیافدی بکار گرفته میشود [۳]. این شیوه که به دلیـل نقصان روی کرد کلان نگرانه و از طرفی پیچیدگیهای شیوهها و حجیم بودن محاسبات در روی کرد خردنگرانه ایجاد شد با حفظ بسیاری از ویژگیهای روی کرد خردنگرانه، توانسته در جریانها تک- فازی و چندفازی با مرزهای ساده تا پیچیده را در کلان و خرد بهخوبی الگوسازی نماید [۴-۶]. در این مطالعه در ادامه تحقیقات قبلی مطالعه کاواکزایی با شیوه شبکه بولتزمن [۷]، با بهبود الگوی بکار رفته در شیوههای معمول شبکه بولتزمن، از لحاظ تعداد سرعت بكار گيرى شده، بسط هرمیتی تا مرتبه ششم برای تابع توزیع تعادلی ماکسول-بولتزمن و استفاده از معادله حالت دقيقتر (از معادله حالت واندروالس)، سعی شدہ تا به فیزیک واقعے بیشتر نزدیک شده و الگویی با تقریبهای بسیار کمتر برای مطالعه كاواكزايي صوتي ارائه شود. خاصيت موازى پذيرى ذاتی البیام و از طرفی پیشرفت های سریع در زمینه محاسباتی خصوصاً جے پے یو [۸-۹] زمان و هزينه محاسبات در اثر افزایش بعد و سرعت را تا حدی زیاد جبران کرده است. البته این الگو هنوز برای مطالعه همهجانبه کاواکزایی با جزئیات کامل فاصله دارد و نیاز است دقيق تر شود.

۲. شیوهشناختی عددی

۲–۱. شیوه شبکه بولتزمن
در این مطالعه از شیوه ال بی ام مبتنی بر گسسته سازی
تفارق متناهی
1
 معادله بولتزمن با جمله برخورد تقریب
بی جی کی (معادله بولتزمن – بی جی کی)، استفاده می گردد.
معادله بولتزمن – بی جی کی تغییرات تابع توزیع ذرات، f ،
معادله بولتزمن – بی جی کی تغییرات تابع توزیع ذرات، f ،
با مکان x ، سرعت e و زمان f را (بدون جمله نیرو)
بصورت زیر بیان می کند [۱۰–۱۱]:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + e \cdot \nabla_{x} f = -\frac{f - f^{eq}}{t_{r}}$$
(1)
$$\Sigma_{p} \text{ is } t_{r} \text{ if }$$

Downloaded from joasi.ir on 2025-07-15

¹ Finite difference

$$\begin{split} f^{(\cdot)}(e) &= \omega(e)\rho \sum_{i=\cdot}^{s} a_{\cdot}^{i} H_{i}, \\ a_{\cdot}^{i} H_{\cdot} &= i, \\ a_{\cdot}^{i} H_{\tau} &= \frac{i}{i!} u \cdot e, \\ a_{\cdot}^{i} H_{\tau} &= \frac{i}{i!} \{ (u \cdot e)^{\tau} - u^{\tau} \}, \\ a_{\cdot}^{r} H_{\tau} &= \frac{i}{i!} \{ (u \cdot e)^{\tau} - r(u \cdot e) u^{\tau} \}, \\ a_{\cdot}^{i} H_{\tau} &= \frac{i}{i!} \{ (u \cdot e)^{\tau} - s(u \cdot e)^{\tau} u^{\tau} + ru^{\tau} \}, \\ a_{\cdot}^{a} H_{a} &= \frac{i}{i!} \{ (u \cdot e)^{a} - i \cdot (u \cdot e)^{\tau} u^{\tau} + i \Delta(u \cdot e) u^{\tau} \}, \\ a_{\cdot}^{s} H_{s} &= \frac{i}{i!} \{ (u \cdot e)^{s} - i \Delta(u \cdot e)^{\tau} u^{\tau} + i \Delta(u \cdot e) u^{\tau} \}, \\ a_{\cdot}^{s} H_{s} &= \frac{i}{s!} \{ (u \cdot e)^{s} - i \Delta(u \cdot e)^{\tau} u^{\tau} + i \Delta(u \cdot e) u^{\tau} \}, \end{split}$$

۲-۲. الگوی شبکه بولتزمن دو- فازی

برای ایجاد دو فاز از الگوی شان- چن استفاده شده است. کار نو در مطالعه حاضر این بوده که پندار و اندیشه شان-چن را در شبکه بولتزمن ۱۲۱- سرعتی بکار گرفته و با اعمال نیروی زیر بین ذرات شبکه محیط دو- فازی خودکار ایجاد شده است.

$$F = - \psi(x, t) G \mathop{a}\limits_{i=1}^{m} g_i \psi(x + e_i D t, t) e_i, \qquad (\Delta)$$

 $\mathbf{g}_{\mathbf{i}}$ که در آن G شدت نیروی جاذبه، تابع ψ جرم مؤثر و وزن نيرو در ۹ اندازه سرعت متفاوت الگو و e_i سرعت ذرات هستند. جملات رابطه ۵ را می توان به تعبیری گرادیان های مختلف جملات نیرو تعبیر نمود. با این تعبیر، -g_i ها باید بگونهای تعیین گردند که برای شبیهسازی مسائلی هم چون قطره و حباب، تقارن کروی تا دقت مطلوب حفظ شود [10]. در این شبکه همانطور که در بخش قبل ذکر گردید سه لایه سرعتی وجود دارند که این امر فرآیند ایجاد دو فاز را پیچیدهتر مینماید و موجب پیچیدگیهایی در مرزها می شود. ویژگی ممتاز این الگوی پیشنهادی این است که به دلیل درگیر شدن تعداد بسیار زیادتری ذرات در اندر کنش با یک ذره، پایداری الگو نسبت به شيوه معمول البيام دو فاز در سه بعد مثل ١٩-سرعتی یا ۲۷- سرعتی افزایش مییابد. همان طور که در بخش بعد ذکر شده است استفاده از فَنّ جي پييو، تا حدى جبران زمان بسیار زیادتر محاسبات را (با هزینه کم) مىنمايد.

جدول ۱ سرعتها و وزن آنها در شبکه بولتزمن سه- بعدی ۱۲۱- سرعتی [۱۳].							
w _i	تعداد	c _i	i				

w _i	تعداد	c _i	i			
•,• ٣• ۵٩ ١۶٢	١	(•,•,•)	١			
۰,·۹۸۵۱۵۹۵	۶	(r,•,•)FS	٢			
•,• ۲۷۵۲۵ • ۱	٨	$(\pm r, \pm r, \pm r)$	٣			
•,••۶١١١٠٢	74	(r,ĭr,·)FS	۴			
•,•••۴۲۸۱۸	17	(Tr,Tr,·)FS	۵			
•,••• • • • • • • • • • • • • • • • • •	٨	(±٢r,±٢r,±٢r)	۶			
•,•••٣٢۴٧۵	۶	(۳r, ·, ·)FS	٧			
·,···\·۶۸۳	74	(r,٣r,·)FS	٨			
•,••••1487	74	(ĭr,ïr,·)FS	مر			
•,••••۶٩	٨	(±\"r,±\"r,±\"r)				
$\mathbf{r} = \mathbf{y}_{i} \mathbf{y} \mathbf{y} \mathbf{y} \mathbf{y} \mathbf{y}$						

۳. فرآیند موازیسازی (استفاده از فناوری جی پی یو) در سالهای اخیر با بوجود آمدن توانمندیهای محاسباتی بسیار سریع، استفادہ از شبکہ های پیچیدہ تے کے دارای تعداد جهت و تعداد اندازه سرعت بیشتر هستند رشد زیادی داشته است. با توجه به اینکه شیوه شبکه بولتزمن بهسادگی موازی پذیر است با استفاده از این قابلیت می توان به مراتب از زمان های اجرای طولانی منبعث از پیچیدگیهای فوقالذکر کاست. یکی فن محاسباتی موازی کـه در دهـه اخيـر مـورد توجــه قـرار گرفتـه فــناوری محاسباتي واحد پردازنده ترسيمي رايانه، جي پي يو'، است. در کنار رشد سیپییو- های چندهستهای، فناوری واحد پردازنده های ترسیمی نیز رشد بسیاری یافته است. تا قبل از سال ۲۰۰۶، جیپییو تنها در نقش اصلیاش که پردازشهای ترسیمی مورد نیاز رایانه ظاهر شده بود. جی پی یو - ها به خاطر نقش اصلی که به عهده داشتند، از سال ۱۹۹۹ به صورت چندهستهای ساخته می شدند. در حال حاضر، تعداد هسته های آن ها در قیاس با سیپییو- ها به مراتب بالاتر است مثلاً در یک رایانه شخصی این نسبت به حدود ۱۵۰ می سد. جييىيو واحد ترسيمي رايانه است كه تمامي محاسبات

¹ GPU; Graphic Processor Unit

کا ۲۰ ایکس	کا۲۰	کا۱۰	ام۲۰۹۰	سى ۲۰۵۰	سی ۸۷۰	جىپىيو تسلا	
٣,-	Ψ,Δ		٠,٢		• ,	توانمندى محاسباتي	
14	١٣	۸×۲	18	14	18	تعداد چندپردازنده	
۲۳۷٬۰	۰,۲۰۶	۰,۷۴۵	١٫٣	۱,۱۵	۱,۳۵	ساعت (کُلاک) هسته (گیگاهرتز)	
	197		٣٢		٨	تعداد هسته در چندپردازنده	
۳۹۳۵	376	۲×۲۲۸۹	۱۳۳۱	1.4.	348	توان پردازش (گیگافلاپسز)	
7888	7495	7×1038	017	447	١٢٨	تعداد هسته	

جدول ۲ مشخصات کارتهای ترسیمی سری تسلا [۸].

عظیم مربوط به نمایش و تصویر را برعهده دارد. از این فناوری در محاسبات شیوه شبکه بولتزمن نیز استفاده شده است [۹، ۱۶ و ۱۷]. در یک حالت متناظر در تحقیق قبلی [۹] برای شبیهسازی با شبکه بولتزمن ۱۲۱ – سرعتی مشاهده گردید که در یک رایانه همراه معمولی سرعت محاسبات با جیپییو ۱۵۰ برابر سیپییو میرسد. این فناوری که چند سال بیشتر از استفاده از آن در محاسبات غیرترسیمی نمیگذرد سرعت رشد بسیار بالایی داشته است. تعداد بسیار زیاد هسته های محاسباتی در جیپییو نسبت به سیپییو از یک طرف و موازیپذیر بودن (ذاتی) محاسبات ال بی از طرف دیگر، این دو را یک زوج با پتانسیل بسیار خوب برای بسیاری از شبیه سازی های سیالاتی حجیم قرار داده است.

در جدول ۲ به عنوان نمونه، فهرست انواع و مشخصات جی پی یو های محاسباتی الگوی تسلا از شرکت انوی دی ای فهرست شده است. همان طور که در جدول مشاهده می شود تعداد هسته های سری تسلا از ۱۲۸ تا ۲۶۸۸ هسته است و معمولاً می توان چندتا از آن ها را روی یک مادربورد نصب نمود. لازم به ذکر است که در صورت استفاده از دقت ۱۶ رقم، بدلیل نیاز به حافظه بیشتر، امکان استفاده از نیمی از تعداد هسته ها فوق الذکر وجود دارد. در تحقیق حاضر از جی پی یوی تسلا الگوی ام ۲۰۹۰ استفاده شده است.

۴. نتایج شبیهسازی

برای مطالعه کاواکزایی صوتی، هر دو نوع کاواکزایی همگن و دگرگن شبیهسازی شدهاند. در بخش کاواکزایی

همگن با استفاده از امواج صوتی، فشار منفی به مایع با چگالی مشخص اولیه اعمال شده است. در نتیجه، دو سیال مایع و گاز از چگالی اولیه ایجاد شدند. در شبیهسازی کاواکزایی دگرگن با استفاده از چگالی شناسایی شده از شبیه سازی کاواکزایی همگن، ایجاد کاواکزایی دگرگن مورد مطالعه قرار گرفته است. در این تحقیق از معادله حالت معادله حالت پنگ- رابینسون استفاده شده است. برای استخراج کشش سطحی مایع، نتایج شبیه سازی حباب با شعاعهای مختلف با معادله لاپلاس در مختصات کروی تطبیق داده شدند. اعتبار سنجی کد با ناپایداری ریلی- تیلور نشان داده شده است. یکاهای استفاده شده تماماً یکاهای اسآی^۳ در مختصات شبکه بولتزمن می باشند. برای معادل سازی آن با فیزیک واقعی باید آن ها را به معادل شان در فیزیک واقعی تبدیل نمود.

۴-۱. اعتبارسنجی کد

از پدیده دو- فازی ناپایداری ریلی- تیلور برای اعتبارسنجی استفاده شده است. ناپایداری ریلی- تیلور زمانی بوجود میآید که یک مایع سنگین تر روی یک مایع سبک تر قرار گیرد و یک اختلال به سطح تماس آنها اعمال شود. در این حالت وضعیتی همانند شکل ۱ برای جریان مایعات درون یکدیگر ایجاد میشود. در این شبیه سازی دامنه شبکه محاسباتی ۱۰۰۰ در ۲۰۰۰، عدد آتوود ۵/۰ و عدد رینولدز ۲۶۵ در نظر گرفته شدهاند. در شکل ۱ نتایج در چهار پله زمانی مختلف نشان داده شده است. این شکل نشان می دهد که نتایج به دست آمده با

Downloaded from joasi.ir on 2025-07-15

¹NVIDIA

² M2090

³ SI; Système International



همان طور که این شکل نشان می دهد بعد از زمان بی بعد ۱۰۰، در این دو نقط ۲ که نماینده دو ناحیه هستند دو چگالی ۱۵ و ۱ ایجاد شده است. از این دو چگالی در مرحله بعد برای مطالعه کاواکزایی دگرگن استفاده شد.

۴-۳. کاواکزایی دگرگن

در این مرحله چگالیهای بهدست آمده از کاواکزایی متقارن برای کاواکزایی دگرگن با معادله حالت پنگ-رابینسون مورد استفاده قرار گرفت. در یک شبکه ۱۰۰ در ۱۰۰ در ۱۰۰ حباب با شعاعهای مختلف با مرزهای دورهای مورد آزمون قرار گرفتند.

نتایج نشان دادند که حبابهای کوچکتر از شعاع ۱۵ واحد البی ام از بین می روند (شکل ۳) و بزرگتر از آن (به عنوان مثال شعاع ۱۸ واحد البی ام) پایدار می مانند (شکل ۴).



شکل ۲ کاواکزایی با معادله حالت پنگ- رابینسون. زمان و چگالی در واحد اِلبیام هستند. نمودار چگالی برای دو نقطه (۵۰،۵۰) و (۵۰،۵۰،۵۰) رسم شده است.



شکل ۱ نتایج شبیهسازی پدیده ناپایداری ریلی- تیلور با عدد آتوود ۰٫۵ و عدد رینولدز ۲۶۵ در زمانهای البیام، الف) ۲۰۰۰۰، ب) ۳۴۰۰۰ ج) ۴۶۰۰۰ و د) ۵۰۰۰۰.

۴–۲. کاواکزایی همگن

برای ایجاد کاواکزایی، معادله حالت پنگ- رابینسون بکار گرفته شده است. در ابتدا در تمام دامنه چگالی ۱۰ واحد اِلبی اِم انتخاب شد. این چگالی با توجه به نمودار تقریبی معادله حالت در ناحیه ناپایدار انتخاب می شود. شبکه ۲۰۰ در ۱۰۰ در ۱۰۰ بکارگیری شد. مرزها غیر از مرز ۲



شکل ۴ نمایش برشی صفحه شامل محورهای x و z از شبکه سه-بعدی ۱۰۰ در ۱۰۰ در ۱۰۰ با شعاع اولیه حباب ۱۸ واحد اِلبی ِام در زمانهای، الف) ۱۰، ب) ۵۰، ج) ۱۰۰ و د) ۱۵۰ واحد زمانی اِلبی ِاِم.



شکل ۳ نمایش برشی صفحه شامل محورهای x و z از شبکه سه-بعدی ۱۰۰ در ۱۰۰ در ۱۰۰ با شعاع اولیه حباب ۱۵ واحد اِلبیاِم در زمانهای، الف) ۱۰، ب) ۵۰، ج) ۱۰۰ و د) ۱۵۰ واحد زمانی البیام.

۱۸

نشان داده شد که پیچیدگیهای ایجاد شده از انتخاب ۱۲۱- سرعت و زمان اجرای طولانی ناشی از آن، با ایجاد الگوریتم و کد موازی و استفاده از سامانه محاسباتی مبتنی بر جیپییو با توان محاسباتی بالا تا حد زیادی، قابل جبران است.

در این تحقیق با استفاده از معادله حالت پنگ رابینسون و الگوی دو- فازی شان- چن، در ابتدا جدایش فاز بطور موفقیت آمیز ایجاد شده و براساس چگالیهایی که نتیجه شد، کاواکزایی دگرگن مورد مطالعه قرار گرفت. نشان داده شد که برای پایدار ماندن حبابها نیاز است که به یک تراز انرژی برسند که این امر خود را با شعاع حباب نشان می دهد. حبابهایی که در مایع از یک حد مشخص کوچک تر باشند از بین می روند. با استفاده از قانون لاپلاس برای حباب، کشش سطحی مایع از نتایج شبیه سازی قابل استخراج است.

۶. فهرست منابع

- M.C. Sukop, D. Or, "Lattice boltzmann method for homogeneous and heterogeneous cavitation," Physical Review E, vol. 71 pp. 046703, 2005.
- [2] G.R. McNamara, G. Zanetti, "Use of the Boltzmann equation to simulate lattice-gas automata," Physical Review Letters, vol. 61, pp. 2332-2335, 1988.
- [3] A. Prosperetti, G.E. Tryggvason, "Computational Methods for Multiphase Flow," Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [4] S. Succi, "The Lattice Boltzmann Equation for Fluid Dynamics and Beyond," Oxford: Clarendon Press, Oxford, 2001.
- [5] A.A. Mohamad, "lattice Boltzmann Method; Fundamentals and Engineering Applications with Computer Codes," London: Springer-Verlag, 2011.
- [6] M.C. Sukop, D.T. Thorne, "Lattice Boltzmann Modeling," Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.
- [7] M. Taeibi-Rahni, M. Daemi, H. Massah, "Numerical simulation of homogeneous and heterogeneous cavitation by lattice Boltzmann method," in 11th conference of Iranian aerospace society, Tehran, Iran, pp. 1-5, 2012.
- [8] G. Ruetsch, M. Fatica, "CUDA Fortran for Scientists and Engineers Best Practices for Efficient CUDA FORTRAN Programming," Santa Clara, CA: Elsevier Inc, 2014.

$$p_{z_{ij}} - p_{jij} = \frac{rS}{R}$$
 (9)

در رابطه ۶، S کشش سطحی و R شعاع حباب هستند. در شکل ۵ برای مایع و گاز مورد استفاده در این تحقیق، کشش سطحی استخراج شده است. همان طور که در این شکل نیز ذکر شده است کشش سطحی ۷٬۶۷ اِلبیاِم بهدست آمده است. خطای مشاهده شده در نمودار (فاصله خط از نقاط) به دلیل پهن بودن مرز حباب و مایع در شبیهسازی فوق الذکر است. این پهنا به ۴ الی ۵ نقطه میرسد و تعیین دقیق مرز حباب مقدور نیست.



شکل ۵ استخراج کشش سطحی بیبعد در شبیهسازی با شیوه شبکه بولتزمن معرفی شده در متن با استفاده از رابطه لاپلاس برای معادله حالت پنگ- رابینسون.

۵. نتیجه گیری
شبیه سازی با شیوه شبکه بولتزمن سه بعدی با ۱۲۱ - شبیه سازی با شیوه شبکه بولتزمن سه بعدی با ۱۲۱ - سرعت همراه با الگوی دو - فاز شان - چن برای مطالعه اولیه کاواکزایی همگن و دگر گن صوتی موفق عمل کرد.

- [15] L. Chen, Q. Kang, Y. Mua, Y.L. He, W.Q. Tao, "A critical review of the pseudopotential multiphase lattice Boltzmann model: Methods and applications," International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 76, pp. 210–236, 2014.
- [16] J. Siegel, "A CUDA optimized lattice Boltzmann method implementation using control-structure splitting techniques," in electrical and computer engineering department, University of Delaware, 2009.
- [17] C. Obrecht, F. Kuznik, B. Tourancheau, J.J. Roux, "Multi-GPU implementation of the lattice Boltzmann method," Computational and Mathematics Applications Journal, vol. 65, no. 2, pp. 252-261, 2013.
- [18] D.H. Sharp, "An overview of Rayleigh–Taylor instability," Physica, vol. 12 (D), pp. 3-18, 1984.

- [9] M. Taeibi-Rahni, M. Daemi, H. Massah, "Parallel processing of 121-velocity lattice Boltzmann method using Graphic Processing Unit (GPU)," in 13th conference of Iranian aerospace society, Tehran, Iran, pp. 1-7, 2014.
- [10] X. He, L.-S. Luo, "Theory of the lattice Boltzmann method: from the Boltzmann equation to the lattice Boltzmann equation," Physical Review E, vol. 56, no. 6, pp. 6811-6817, 1997.
- [11] X. He, L.-S. Luo, "A priori derivation of the lattice Boltzmann equation," Physical Review E, vol. 55, no. 6, pp. R6333, 1997.
- [12] X. He, L.-S. Luo, "Theory of the lattice Boltzmann method: From the Boltzmann equation to the lattice Boltzmann equation," Physical Review E, vol. 56, no. 6, pp. R6811, 1997.
- [13] X.B. Nie, X. Shan, H. Chen, "Galilean invariance of lattice Boltzmann models," EPL, vol. 81, pp. 34005, 2008.
- [14] X. Nie, X. Shan, H.Chen, "Thermal lattice Boltzmann model for gases with internal degrees of freedom," Physical Review E, vol. E 77, pp. R035701, 2008.

Journal of Acoustical Engineering Society of Iran, Vol. 2, No. 2, 2015

A 121-velocity lattice Boltzmann method for acoustic cavitation simulation by GPU based parallel processing

M. Daemi¹, M. Taeibi-Rahni^{*1}, H.R. Massah²

Dept. of Aerospace eng., Sharif Univ. of tech.
 Dept. of Physics, Ferdowsi Univ.

Abstract

Cavitation, a phenomenon with its desirable and unpleasant effects, is always present in two-phase flows. A great deal of research has been devoted to two-phase flow. Due to its nature, sound while propagating in a liquid will probably cause cavitation in that liquid and will interact with bubbles in it. In this paper by lattice Boltzmann (LB) method, cavitation phenomenon in a liquid under the effect of an applied sound field is considered. Lattice Boltzmann method as a mesoscopic approach, while enjoying many advantages of macroscopic level, has established itself as a capable method in modern CFD. Of its important features, are parallelizability and its easy utilization for complex boundary conditions. In this study, the power of this method is illustrated in investigating an acoustic cavitation by a 121-velocity lattice Boltzmann method using a Shan-Chen two-phase model. Although, this method has better conformity with physics of this problem but it requires more computational time than current LB methods. Utilizing the graphic processing unit (GPU) technology will compensate the long computational time required for this proposed LB model.

Keywords: Acoustic cavitation, 121-velocity lattice Boltzmann (LB) method, Graphic processing unit (GPU)

pp. 13-20 (In Persian)

^{*} Corresponding author E-mail: taeibi@sharif.edu