

مقایسه کاربرد دو شرط مرزی در شبیه‌سازی جریان سیال درون همزن

سیدمهدی نقوی* و محمود اشرفی‌زاده

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۱۰/۱۰ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۲/۰۶/۴)

چکیده - جریان مغشوش سه‌بعدی در یک همزن با پره‌های متحرک به صورت عددی بررسی شده است. برای شبیه‌سازی عددی جریان یک حلگر موازی سه‌بعدی بر مبنای روش شبکه بولتزمن تدوین شده است. روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ برای مدل نمودن جریان مغشوش استفاده شده است. برای اصلاح نمودن دقت شبیه‌سازی جریان در همزن‌ها، یک شرط مرزی مرسوم برای دیواره‌های متحرک، به همراه یک شرط مرزی پیشنهادی دیگر، با جزئیات مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی‌های حاضر نشان می‌دهد که، روش کمانه‌کردن اصلاح شده پیشنهادی نتایج دقیق‌تری در مقایسه با نتایج حاصل از روش مرسوم میدان نیرو تولید می‌کند. در عین حال پیاده‌سازی شرط مرزی پیشنهادی برای مسائلی که دیواره پیچیده متحرک دارند خیلی دشوارتر می‌باشد.

واژگان کلیدی: روش شبکه بولتزمن، همزن، جریان مغشوش، کمانه‌کردن، پردازش موازی.

A Comparison of Two Boundary Conditions for the Fluid Flow Simulation in a Stirred Tank

S. M. Naghavi and M. Ashrafizaadeh

Mechanical Engineering Department, Isfahan University of Technology

Abstract: Three dimensional turbulent flow in a stirred tank with moving blades has been numerically studied. For the numerical simulation, a 3D parallel flow solver has been developed based on the lattice Boltzmann method. The large eddy simulation method has been used for the turbulence modeling. To improve the accuracy of the flow simulation in stirred tanks, a commonly used boundary condition for moving walls as well as a proposed alternative boundary condition have been investigated in great details. The present investigations show that the proposed improved bounce-back method generates accurate results compared with those obtained using commonly used force field method. However, the implementation of the proposed boundary condition is more difficult for cases with complex moving walls.

Keywords: Lattice Boltzmann method, stirred tank, turbulent flow, bounce back, parallel programming.

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: naghavi@me.iut.ac.ir

فهرست علائم

u	مؤلفه سرعت	A	نقطه مرجع در روش مرز شناور
w	ضریب وزنی، اندیس سرعت دیوار	c	سرعت در شبکه بولتزمن
x	مختص مکان	D	قطر پروانه
a	اندیس جهت در تابع توزیع ذره	e	جهات سرعت در شبکه بولتزمن
b	ضریب برای میان یابی در روش مرز شناور	f	تابع توزیع ذره، نقطه سیال کنار مرز جامد
h	ضریب زیرتخفیف	ff	نقطه سیال دومی در کنار مرز جامد
l	زمان آرامش	F	نیرو
n	لرخت جنبشی سیال	k	انرژی جنبشی اغتشاش
q	مختص زاویه	N	سرعت زاویه‌ای پروانه
r	چگالی سیال	Re	عدد رینولدز
t	زمان آرامش بی بعد	t	زمان

۱- مقدمه

به خاطر تفاوت‌های زیاد آن، معمولاً از آن به‌عنوان روشی مجزا یاد می‌شود. از کارهایی که به روش CFD انجام شده‌اند، می‌توان به کار یون و همکارانش اشاره کرد [۱]. در این کار، جریان داخل همزنی که دارای یک پروانه شش پره راشتون^۳ است، با روش آزمایشی و هم‌چنین CFD (با استفاده از نرم‌افزار فلونت^۴) شبیه‌سازی شده است. علاوه بر آن، با فرض جریان آرام، جریان سیال متقارن در نظر گرفته شده و ۶۰ درجه از دامنه حل برای محاسبات انتخاب شده است. قابل ذکر است که داخل همزن، پره ثابت در نظر گرفته نشده است، لذا وقتی محور مختصات با پروانه حرکت می‌کند، شرایط مرزی ثابت مانده و مشکل مرز متحرک، پیش نیامده است.

یئو و همکارانش [۲] نیز جریان داخل یک همزن را با استفاده از روش‌های مرسوم CFD شبیه‌سازی نموده‌اند. در مقاله آنها درون همزن، چهار پره ثابت و یک پروانه شش پره راشتون قرار داده شده و با توجه به مغشوش بودن جریان، از روش گردابه‌های بزرگ^۵ (LES) برای شبیه‌سازی جریان مغشوش استفاده شده است. در این مقاله هم‌چنین عنوان شده است که پره از دامنه حل حذف نشده و صرفاً اثر پره را در نظر نگرفته‌اند، بلکه خود پره را داخل دامنه قرار می‌دهند، لذا

فرایند اختلاط در بیشتر کارهای صنعتی استفاده شده و دارای اهمیت زیادی می‌باشد. از این فرایند به‌صورت گسترده‌ای در فرایندهای شیمیایی استفاده می‌شود، زیرا در سطوح تماس، باعث افزایش انتقال حرارت و جرم می‌شود. اصلاح فرایندهای اختلاط، جهت کاهش زمان فرایند، افزایش کیفیت محصول و کاهش مواد زائد، کار مفید و با ارزشی است. فقدان اطلاعات لازم از پدیده‌های جریان سیال و تأثیر آن در فرایند اختلاط، ما را به شبیه‌سازی نمودن این پدیده تشویق می‌کند. در کارهایی که در زمینه شبیه‌سازی پدیده اختلاط صورت می‌گیرد، معمولاً همزنی که توسط یک محور به‌همراه چند پره در حال دوران است، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بعضی از این کارها علاوه بر پره‌های متحرک، چند پره ثابت نیز در داخل همزن قرار داده می‌شود تا از حرکت صلب سیال جلوگیری شود. برای شبیه‌سازی عددی همزن‌ها از دو روش بهره گرفته می‌شود؛ یکی روش مرسوم دینامیک سیالات محاسباتی^۱ (CFD) و دیگری روش شبکه بولتزمن^۲ (LBM). البته لازم به ذکر است که روش شبکه بولتزمن، نوع خاصی از روش‌های CFD است که

تقریب ناشی از این کار در مقاله وجود ندارد. اعمال پره در این کار به این صورت انجام شده است که دامنه حل دو قسمت شده و یک قسمت دارای شبکه‌ای ثابت و قسمت دیگر دارای شبکه‌ای متحرک است. در قسمت ثابت، پره‌های ساکن قرار دارند و قسمت متحرک شامل پروانه متحرک می‌باشد. در محل تلاقی این دو قسمت نیز مبادله اطلاعات صورت می‌گیرد. این روش، اصطلاحاً روش چهارچوب مرجع چندتایی^۱ نامیده شده است. در این شیوه چون پره‌های ساکن و متحرک دقیقاً روی شبکه منطبق هستند و با شبکه ساکن می‌مانند یا با آن حرکت می‌کنند، پیدا کردن سرعت در نقاط شبکه، نیاز به میان‌یابی ندارد. از طرفی چون از مختصات استوانه‌ای استفاده شده است، لذا تفکیک ناحیه متحرک و ناحیه ساکن نسبتاً راحت انجام شده و تبادل اطلاعات نیز راحت‌تر از مختصات دکارتی انجام می‌شود.

هم‌چنین هاینات و همکارانش [۳] برای شبیه‌سازی جریان آب داخل یک همزن از روش‌های مرسوم CFD استفاده نموده‌اند. در این کار یک پروانه چهار پره راشتون و چهار پره ساکن در همزن قرار داده شده و به‌جای تمام دامنه حل، ۹۰ درجه از دامنه حل برای شبیه‌سازی استفاده شده است. (لازم به یادآوری است که فرض تقارن فقط برای رینولدزهای کم در جریان آرام صحیح است.) برای اینکه اثر پره‌ها اعمال شود، از دو روش استفاده شده است؛ در روش اول به‌جای گذاردن پره‌ها در همزن، یک جمله چشمه به معادلات ناویر استوکس اضافه شده که همان روش مرز شناور^۷ می‌باشد. در روش دوم، پره‌ها در همزن قرار داده شده‌اند ولی با این ترتیب که دامنه دو قسمت شده و در یک بخش شبکه با پره‌ها متحرک است و در بخش دیگر، شبکه با پره‌های ثابت، ساکن در نظر گرفته شده است. با توجه به نمودارهایی که از نتایج این دو روش عددی، به‌همراه نتایج روش‌های آزمایشگاهی ارائه شده است، جواب‌های حاصل از روش دوم (چهارچوب مرجع چندتایی)، به جواب‌های آزمایشگاهی نزدیک‌تر می‌باشد و روش مرز شناور ضعیف‌تر ارزیابی شده است.

از کارهایی که به‌روش شبکه بولتزمن انجام شده‌اند

می‌توان به مقاله‌های انگلز [۴]، درکسن و همکاران [۵-۱۰]، هولندر و همکاران [۱۱-۱۴] و هارتمن و همکاران [۱۵-۱۹] اشاره کرد. در تمام این کارها برای شبیه‌سازی جریان سیال داخل همزن، از روش شبکه بولتزمن استفاده شده و برای شبیه‌سازی جریان مغشوش، از روش LES بهره گرفته شده است. در این کارها جریان سیال در همزنی با چهار پره ثابت و یک پروانه شش پره راشتون شبیه‌سازی شده است. از آنجا که داخل همزن پره در حال دوران قرار دارد، در تمام این کارها از روش میدان نیرو^۸ برای اعمال اثر پره استفاده شده و خود پره از داخل دامنه حل حذف شده است. تفاوت عمده کارهای فوق در عدد رینولدز جریان، ابعاد همزن، و بودن یا نبودن ذرات معلق در همزن می‌باشد. لازم به‌ذکر است که تقریباً در تمام این کارها از برنامه رایانه‌ای درکسن تشکر شده و غیر از کار انگلز، تمام این کارها با یک برنامه رایانه‌ای اجرا شده است.

همان‌طور که در مروری بر کارهای انجام شده بیان شد، در تمام کارهای عددی انجام شده به‌روش شبکه بولتزمن، برای آسان شدن اعمال اثر پره‌ها به همزن، پره‌ها از داخل دامنه حل حذف شده‌اند و اثر آنها توسط روش میدان نیرو که حالت خاصی از روش مرز شناور است، اعمال شده‌اند. اما برای اعمال مرز جامد، روش دیگری نیز در روش شبکه بولتزمن وجود دارد که به‌روش کمانه‌کردن اصلاح‌شده^۹ معروف است. (جزئیات این روش در بخش‌های بعد ارائه خواهد شد.) مقایسه بین روش میدان نیرو و روش کمانه‌کردن اصلاح شده، نشان داده است که وقتی روش کمانه‌کردن اصلاح شده استفاده می‌شود، جواب‌ها به نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر است و به دقیق‌تر بودن روش کمانه‌کردن اصلاح شده تأکید شده است [۳، ۲۰، ۲۱]. به‌عنوان مثال چن و همکارانش [۲۲] با استفاده از روش میدان نیرو، ضریب پسا و ضریب برآ مربوط به جریان اطراف استوانه را در عدد رینولدز ۱۰۰ به‌دست آورده‌اند و نتایج را با جواب‌های حاصل از روش کمانه‌کردن اصلاح شده، مقایسه نموده‌اند. این نتایج در جدول ۱ نشان داده شده است. همان‌طور

جدول ۱- مقایسه نتایج حاصل از روش میدان نیرو با روش کمانه کردن اصلاح شده

حد مجاز بالا و پایین [۳۱]	روش کمانه کردن اصلاح شده [۳۲]	روش میدان نیرو [۲۲]	Re = 100
۳/۲۲-۳/۲۴	۳/۲۲۷۵	۳/۳۳۳	C _D
۰/۹۹-۱/۰۱	۱/۰۰۴۰	۱/۰۵۱۱	C _L

که در این جدول دیده می‌شود، جواب‌های حاصل از روش کمانه کردن اصلاح شده، خیلی دقیق‌تر از جواب‌های حاصل از روش میدان نیرو می‌باشد. لازم به ذکر است که مقایسه جامع‌تری نیز توسط مرجع [۲۰] انجام گرفته و در نتایج ارائه شده دقیق‌تر بودن روش کمانه کردن اصلاح شده نسبت به روش میدان نیرو تأکید شده است. در بخش‌های بعد، هندسه مسئله مورد نظر معرفی می‌گردد، پس از آن روش شبکه بولتزمن به اختصار توضیح داده می‌شود. آن‌گاه روش‌های اعمال مرز جامد در روش شبکه بولتزمن و روش مورد استفاده در کار حاضر به اختصار توضیح داده می‌شود. در ادامه روش اعمال پردازش موازی در برنامه تشریح می‌شود و در پایان نتایج حاصل از کار حاضر با نتایج عددی و آزمایشگاهی موجود مقایسه شده و نتیجه‌گیری ارائه می‌گردد.

۲- هندسه جریان

در کار حاضر جریان سیال آب، درون همزنی با ابعاد آزمایشگاهی (با حجم ۱۰ لیتر) که دارای چهار پره ثابت و یک پروانه شش پره راشتون می‌باشد، به روش عددی شبیه‌سازی شده است. این هندسه، یک هندسه مرسوم در کارهای عددی است و برای آن تعدادی نتایج عددی و آزمایشگاهی موجود است (شکل ۱). عدد رینولدز در این همزن به صورت $Re = ND^2/v$ تعریف شده و نوع جریان داخل همزن را مشخص می‌کند. در این رابطه، N سرعت زاویه‌ای پروانه (در واحد rev/s)، D قطر پروانه و n لزجت جنبشی سیال کاری است. به دلیل وجود هندسه پیچیده و دوران پروانه، عدد رینولدز جریان ۲۹۰۰۰ بوده و جریان ایجاد شده مغشوش می‌باشد. دلیل

انتخاب این عدد رینولدز، نتایج آزمایشگاهی موجود است [۲۳].

۳- روش شبکه بولتزمن

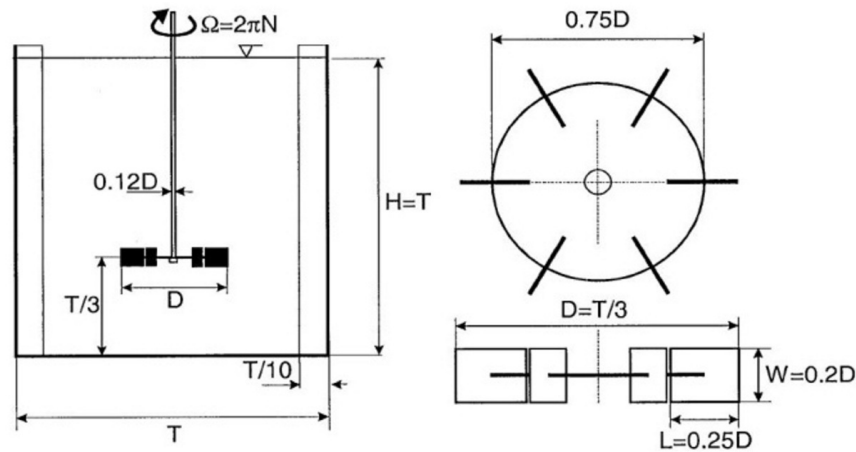
روش شبکه بولتزمن، روشی با مبنای ذره‌ای - جنبشی است که برای شبیه‌سازی جریان‌های سیال مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش، معادله جنبشی به منظور به دست آوردن تابع توزیع سرعت ذره $f(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)$ حل می‌شود که در آن \mathbf{u} بردار سرعت، \mathbf{x} بردار مکان ذره و t زمان است. کمیت‌های میکروسکوپی مانند چگالی ρ و ممتوم $\rho \mathbf{u}$ با استفاده از مقادیر تابع توزیع احتمال حضور ذره f که از حل معادله جنبشی به دست می‌آیند محاسبه می‌شوند. یک مدل جنبشی پر کاربرد، تقریب گسسته شده معادله بولتزمن با یک زمان آرامش است که به مدل BGK^۱ نیز موسوم است. شکل BGK معادله بولتزمن به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla f = -\frac{1}{\lambda}(f - f^{(eq)}) \quad (1)$$

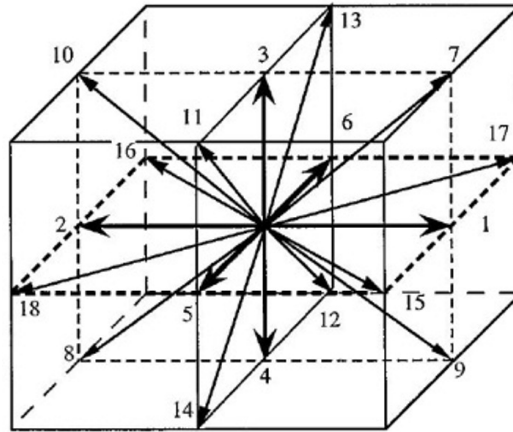
که در آن $f^{(eq)}$ ، تابع توزیع تعادلی (توزیع تعادلی ماکسول-بولتزمن) و λ زمان آرامش می‌باشد. در حالت طبیعی یک ذره سیال در بی‌نهایت جهت (\mathbf{u}) مجاز به حرکت می‌باشد. اولین گام برای حل عددی معادله (۱)، به منظور محاسبه f ، گسسته‌سازی سرعت \mathbf{u} (سرعت حرکت ذره) می‌باشد. برای این منظور بدون آن که قوانین بقاء نقض شوند، ذره به حرکت با سرعت‌های خاصی (\mathbf{u}_α) محدود می‌گردد [۲۴]:

$$\frac{\partial f_\alpha}{\partial t} + \mathbf{u}_\alpha \cdot \nabla f_\alpha = -\frac{1}{\lambda}(f_\alpha - f_\alpha^{(eq)}) \quad (2)$$

در معادله بالا $f_\alpha \equiv f(\mathbf{x}, \mathbf{u}_\alpha, t)$ ، تابع توزیع مربوط به a امین سرعت گسسته شده \mathbf{u}_α ذره است. f_α بیانگر احتمال وجود ذره‌ای در زمان t در مکان \mathbf{x} است که دارای سرعتی



شکل ۱- هندسه جریان [۷]، همزن (شکل سمت چپ) دارای چهار پره ثابت است که از دوران صلب سیال جلوگیری می‌کند، پروانه (شکل سمت راست) یک پروانه شش پره راشتون است. ضخامت دیسک و ضخامت پره‌های ثابت و متحرک $0.017D$ است



شکل ۲- یک مدل سه بعدی، شبکه نوزده سرعتی (D3Q19)

می‌شود [۲۵]:

$$w_{\alpha} = \begin{cases} \frac{1}{3} & , \alpha = 0 \\ \frac{1}{18} & , \alpha = 1-6 \\ \frac{1}{36} & , \alpha = 7-18 \end{cases} \quad (4)$$

با گسسته‌سازی فضای سرعت ذره در معادله جنبشی، چگالی و ممتوم به شکل زیر قابل محاسبه می‌باشند:

$$\rho = \sum_{\alpha=0}^{18} f_{\alpha} = \sum_{\alpha=0}^{18} f_{\alpha}^{(eq)} \quad (5)$$

$$\rho \mathbf{u} = \sum_{\alpha=1}^{18} \mathbf{e}_{\alpha} f_{\alpha} = \sum_{\alpha=1}^{18} \mathbf{e}_{\alpha} f_{\alpha}^{(eq)} \quad (6)$$

سرعت صوت در این مدل برابر است با $c_s = \frac{c}{\sqrt{3}}$ که در

برابر \mathbf{u}_{α} است و $f_{\alpha}^{(eq)}$ تابع توزیع تعادلی متناظر با آن است. مدل نوزده سرعتی سه‌بعدی شبکه بولتزمن، که به مدل معروف است (شکل ۲)، یکی از مدل‌های سه‌بعدی است که با موفقیت در حل بسیاری از مسائل سه‌بعدی جریان سیال مورد استفاده قرار گرفته است. در این مدل سرعت‌های گسسته شده ذرات، \mathbf{e}_{α} می‌باشند.

تابع توزیع تعادلی برای شبکه D3Q19 طبق رابطه زیر

تعریف می‌شود:

$$f_{\alpha}^{(eq)} = \rho w_{\alpha} \left[1 + \frac{3}{c^2} \mathbf{e}_{\alpha} \cdot \mathbf{u} + \frac{9}{2c^4} (\mathbf{e}_{\alpha} \cdot \mathbf{u})^2 - \frac{3}{2c^2} \mathbf{u} \cdot \mathbf{u} \right] \quad (3)$$

و در آن w_{α} ضریب وزنی است و طبق رابطه (۴) جایگذاری

آن $\mathbf{c} = \delta \mathbf{x} / \delta t$ و $\delta \mathbf{x}$ و δt ، به ترتیب ثابت شبکه و اندازه گام زمانی است. شکل کاملاً گسسته شده معادله (۱) با گام زمانی δt و گام مکانی $\mathbf{e}_\alpha \delta t$ به صورت زیر خواهد بود:

$$f_\alpha(\mathbf{x}_i + \mathbf{e}_\alpha \delta t, t + \delta t) - f_\alpha(\mathbf{x}_i, t) = -\frac{1}{\tau} [f_\alpha(\mathbf{x}_i, t) - f_\alpha^{eq}(\mathbf{x}_i, t)] \quad (۷)$$

که در آن $\tau = \lambda / \delta t$ زمان آرامش بدون بعد و \mathbf{x}_i مختصات یک نقطه در فضای فیزیکی می باشد. به این معادله، معادله گسسته شده بولتزمن با تقریب BGK گفته می شود. این معادله معمولاً در دو مرحله، مطابق رابطه (۸) حل می شود. در این رابطه، علامت \sim بیانگر مقدار تابع توزیع بعد از مرحله برخورد می باشد. مرحله برخورد^{۱۱}:

$$f_\alpha(\mathbf{x}_i, t + \delta t) = f_\alpha(\mathbf{x}_i, t) - \frac{1}{\tau} [f_\alpha(\mathbf{x}_i, t) - f_\alpha^{(eq)}(\mathbf{x}_i, t)]$$

مرحله جاری شدن^{۱۲}:

$$f_\alpha(\mathbf{x}_i + \mathbf{e}_\alpha \delta t, t + \delta t) = f_\alpha(\mathbf{x}_i, t + \delta t) \quad (۸)$$

در روش شبکه بولتزمن، پارامتر زمان آرامش t طبق رابطه (۹)، از لزجت جنبشی سیال محاسبه می گردد:

$$v = (\tau - 0.5) c_s^2 \delta t \quad (۹)$$

این روابط و فرضیات مرتبط با آنها باعث می گردد تا مدل BGK (رابطه (۷)) به یک روش با مرتبه دوم دقت، برای حل جریان های تراکم ناپذیر سیال تبدیل شود [۲۶]. باید به این نکته توجه کرد که مرحله برخورد در معادله (۸) کاملاً موضعی است و به داده های نقاط دیگر نیازی ندارد. مرحله جاری شدن نیز فقط با نقاط همسایه تبادل دارد و لذا به محاسبه نیاز ندارد. به دلایل فوق، این روش از قابلیت بالایی، برای پردازش موازی برخوردار است.

۴- شیوه اعمال مرز جامد در روش شبکه بولتزمن

۴-۱- روش کمانه کردن

روش کمانه کردن برای اعمال شرط مرزی عدم لغزش به کار می رود. در این روش، در کنار دیوار، مرحله برخورد انجام

می شود و در مرحله جاری شدن به جای اینکه تابع توزیع در یک جهت را به گره بعد منتقل کنند، در روی همین نقطه، جهت ورودی را برعکس می کنند؛ به عنوان مثال اگر در شکل ۲، تابع توزیع f_1 قبل از انجام گام جاری شدن به سمت دیوار برود، در گام جاری شدن روی همین گره سیال، f_2 برابر f_1 قرار داده می شود. به عبارت دیگر، تابع توزیع به جهت دور شدن از دیوار، تغییر جهت می دهد و هیچ تغییری در نقطه جامد نیاز نیست. لازم به ذکر است که اگر دیوار متحرک باشد، علاوه بر تغییر جهت دادن تابع توزیع ورودی، مقدار خروجی نیز متناسب با سرعت دیوار متفاوت خواهد بود و طبق رابطه (۱۰) مقدار تابع توزیع در جهت خروجی معین می شود:

$$f_\alpha(\mathbf{x}_f, t) = f_\alpha(\mathbf{x}_f, t) - 6w_\alpha \rho \mathbf{e}_\alpha \cdot \mathbf{u}_w \quad (۱۰)$$

در این رابطه $\bar{\alpha}$ جهت برعکس α ، w_α ضریب وزنی، ρ چگالی سیال، \mathbf{e}_α جهت ورودی، \mathbf{u}_w سرعت حرکت مرز جامد و اندیس f مربوط به سیال است. لازم به ذکر است که رابطه فوق، وقتی دیوار دقیقاً وسط فاصله دو گره قرار داشته باشد، از مرتبه دوم دقت برخوردار است، در غیر این صورت مرتبه اول دقت را داراست. برای رفع این مشکل و هم چنین برای اعمال شرط مرزی کمانه کردن بر روی مرزهای منحنی، روش کمانه کردن اصلاح شده در سال ۱۹۹۸ توسط فلیپووا و هانل پیشنهاد شد [۲۷]. این روش در سال ۱۹۹۹ توسط می و همکارانش با روابط ساده تری بیان گردید و تاکنون مورد استفاده قرار می گیرد [۲۸، ۲۹]. در روش کمانه کردن اصلاح شده، برای یک مرز منحنی که داخل سیال قرار گرفته است (شکل ۳)، مقدار $f_{\bar{\alpha}}$ طبق رابطه (۱۱) محاسبه می شود [۲۸]:

$$f_\alpha(\mathbf{x}_f, t + \Delta t) = (1 - \chi) f_\alpha(\mathbf{x}_f, t) + \chi f_\alpha^*(\mathbf{x}_b, t) - 6\rho w_\alpha \mathbf{e}_\alpha \cdot \mathbf{u}_w \quad (۱۱)$$

در رابطه فوق، پارامترهای ذکر شده به صورت ذیل تعریف می شوند:

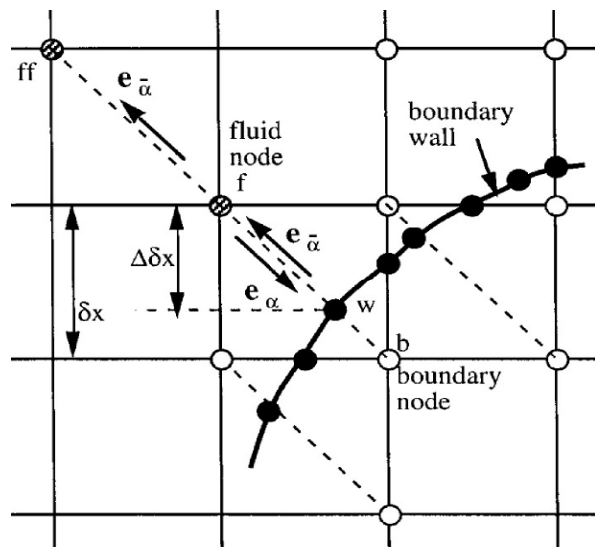
$$f_\alpha^*(\mathbf{x}_b, t) = \rho w_\alpha [1 + 3\mathbf{e}_\alpha \cdot \mathbf{u}_b + 4.5(\mathbf{e}_\alpha \cdot \mathbf{u}_f)^2 - 1.5\mathbf{u}_f \cdot \mathbf{u}_f] \quad (۱۲)$$

- به دلیل اینکه برای محاسبه $f_{\bar{a}}$ به روابط (۱۱) تا (۱۵) نیاز است، استفاده از این روش در هندسه‌های پیچیده راحت نیست. با این وجود در صورتی که روابط مذکور به طور صحیح در یک هندسه اعمال شود، جواب مسئله سریع‌تر از روش میدان نیرو به دست می‌آید زیرا به تکرار داخلی و ضریب زیر تخفیف^{۱۳} نیازی نیست.

۴-۲- روش میدان نیرو یا روش مرز شناور

در این روش که هم برای مرز ساکن و هم برای مرز متحرک به کار می‌رود، جسم جامد از درون دامنه حل حذف می‌گردد و اثر آن توسط یک سری نیرو، در نقاط ارتباط جامد و سیال اعمال می‌شود. ایده اصلی این روش در سال ۱۹۷۲ توسط فردی به نام پسکین^{۱۴} برای شبیه‌سازی دریچه‌های قلب مورد استفاده قرار گرفت، اما این روش رسماً در سال ۱۹۹۳ توسط گلداستین و همکارانش برای شبیه‌سازی شرط مرزی عدم لغزش مطرح شد [۳۰]. لازم به ذکر است که گلداستین و همکارانش این ایده را در یک کار CFD مورد استفاده قرار دادند. در سال ۱۹۹۶ این روش توسط آگلز در روش شبکه بولتزنم مورد استفاده قرار گرفت [۴]، و پس از او در سال ۱۹۹۹، به بیانی ساده‌تر، توسط درکسن و همکارانش در شبیه‌سازی جریان داخل یک همزن، به روش شبکه بولتزنم مورد استفاده قرار گرفت [۷].

روش کار نسبتاً ساده است، اما به دلیل اینکه در مراجع مذکور روش و فرمول‌بندی مورد نیاز خیلی فشرده عنوان شده است، در اینجا به بیانی ساده برای یک دامنه دوبعدی، این روش توضیح داده می‌شود. همان‌طور که در اول این بخش عنوان شد، در روش میدان نیرو، جسم جامد از داخل دامنه محاسباتی حذف می‌گردد و فقط اثر آن توسط یک سری نیرو اعمال می‌شود. برای این منظور ابتدا دامنه حل با شبکه مورد نیاز برای روش شبکه بولتزنم که یکنواخت و مربعی می‌باشد، شبکه‌بندی می‌شود؛ سپس مرزهای جسم جامد با یک سری نقاط مرجع، معین می‌شود و مختصات این نقاط و شماره‌دهنده



شکل ۳- تصویر یک شبکه یکنواخت دوبعدی و مرز منحنی

داخل آن [۲۸]

$$\mathbf{u}_{bf} = \frac{(\Delta-1)\mathbf{u}_f}{\Delta} + \frac{\mathbf{u}_w}{\Delta}, \quad \chi = \frac{2\Delta-1}{\tau}, \quad \Delta \geq 0.5 \quad (13)$$

$$\mathbf{u}_{bf} = \mathbf{u}_{ff} = \mathbf{u}_f(\mathbf{x}_{ff}, t), \quad \chi = \frac{2\Delta-1}{\tau-2}, \quad \Delta < 0.5 \quad (14)$$

$$\Delta = \frac{|\mathbf{x}_f - \mathbf{x}_w|}{|\mathbf{x}_f - \mathbf{x}_b|} \quad (15)$$

پس از انجام گام جاری شدن مطابق روابط فوق، دیگر نیاز به اعمال نیرو در نقاط شبکه نیست و شرط عدم لغزش و به تبع آن اثر مرز جامد متحرک اعمال شده است.

مزایای روش کمانه‌کردن:

- این روش، هم در مسائل جریان دائم و هم در مسائل جریان گذرا قابل استفاده است.

- به دلیل اینکه در این روش، فقط برای نقاط سیال، محاسبه و مبادله اطلاعات وجود دارد، تمام نقاط جامد از محاسبات حذف می‌شوند و توابع توزیع هم در نقاط جامد محاسبه نمی‌شوند، لذا زمان و هزینه محاسباتی به اندازه سهم نقاط جامد در بین کل نقاط کاهش می‌یابد.

عیوب روش کمانه‌کردن:

- وجود میان‌یابی در این روش، موضعی بودن روش شبکه بولتزنم را تا حدودی از بین می‌برد.

اگر به نقاط اطراف نقطه A نیروهای مناسبی وارد شود، می توان انحراف سرعت در این نقطه را برطرف نمود. لذا انحراف سرعت در نقطه A به گره های اطراف برون یابی می شود و از روی انحراف سرعت در هر نقطه شبکه، نیروی مورد نیاز برای اصلاح این انحراف به دست می آید. بنابراین مقدار نیروی مورد نیاز در هر نقطه شبکه، طبق رابطه (۱۸) به دست می آید:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{ws} &= (1-\alpha)(1-\beta)\rho\Delta\mathbf{u}_A \\ \mathbf{F}_{wn} &= (1-\alpha)\beta\rho\Delta\mathbf{u}_A \\ \mathbf{F}_{en} &= \alpha\beta\rho\Delta\mathbf{u}_A \\ \mathbf{F}_{es} &= \alpha(1-\beta)\rho\Delta\mathbf{u}_A \end{aligned} \quad (18)$$

لازم به ذکر است که این مقادیر فقط ناشی از نقطه مرجع A می باشند و برای بقیه نقاط مرجع هم، باید اثر انحراف سرعت ها محاسبه شده و به مقادیر فوق افزوده شود. لذا رابطه (۱۸) به رابطه (۱۹) تبدیل می شود که در آن مقادیر نیروی مربوط به نقاط مرجع قبلی نیز حذف نمی شوند:

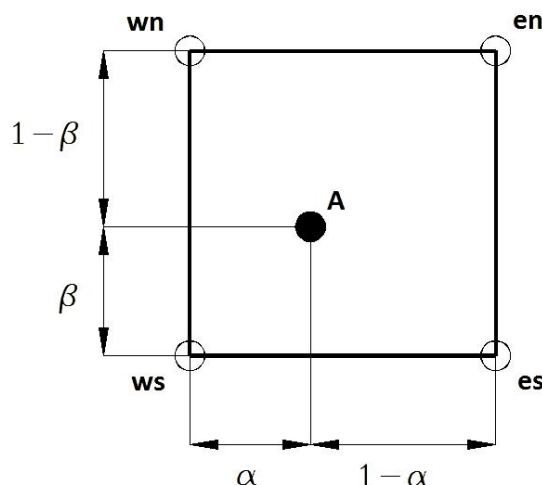
$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{ws} &= \mathbf{F}_{ws} + (1-\alpha)(1-\beta)\rho\Delta\mathbf{u}_A \\ \mathbf{F}_{wn} &= \mathbf{F}_{wn} + (1-\alpha)\beta\rho\Delta\mathbf{u}_A \\ \mathbf{F}_{en} &= \mathbf{F}_{en} + \alpha\beta\rho\Delta\mathbf{u}_A \\ \mathbf{F}_{es} &= \mathbf{F}_{es} + \alpha(1-\beta)\rho\Delta\mathbf{u}_A \end{aligned} \quad (19)$$

با توجه به اینکه تغییر شدید در نیرو باعث واگرایی برنامه می شود، در اینجا از ترکیب نیروی حاصل با نیروی گام زمانی قبلی، به همراه یک ضریب زیرتخفیف (h) استفاده می شود [۷].

یعنی داریم:

$$\mathbf{F}^t = \mathbf{F} + \eta(\mathbf{F}^t - \Delta t - \mathbf{F}) \quad (20)$$

که در آن \mathbf{F} مقدار محاسبه شده از رابطه (۱۹) است. برای اعمال نیروی به دست آمده، این نیرو به عنوان یک نیروی حجمی متغیر در نظر گرفته شده و مقدار آن در نقاط مختلف شبکه اعمال می شود. بدیهی است که وجود ضریب زیرتخفیف، اثر دیواره جامد را با تأخیر در داخل دامنه حل وارد می کند، لذا این روش برای مسائل جریان دائم مفید می باشد. لازم به ذکر است که برای افزایش دقت روش میدان نیرو، می توان در هر گام زمانی، چند بار تکرار داخلی انجام داد و نیروها را اصلاح نمود. با این کار، اثر مرز جامد نیز سریع تر در دامنه حل اعمال می شود



شکل ۴- تصویر یک نقطه مرجع جامد به همراه نقاط اطراف آن در شبکه بولتزمن

هر نقطه ذخیره می گردد. مکان این نقاط مرجع باید روی مرز جسم جامد با یک سری نقاط مرجع، معین می شود و مختصات این نقاط و شماره آن هر نقطه ذخیره می گردد. مکان این نقاط مرجع باید روی مرز جسم جامد باشند، اما محدودیتی از لحاظ انطباق با نقاط شبکه، و یا یکسان بودن فاصله ندارند و کاملاً آزادانه انتخاب می شوند. مثلاً می توان برای نقاط حساس جسم جامد، تعداد نقاط مرجع بیشتر و نزدیک تری را انتخاب نمود. فرض کنید نقطه A در شکل (۴) یک نقطه مرجع از جسم جامد باشد و نقاط اطراف آن، نقاط مربوط به شبکه بندی شبکه بولتزمن باشند. در این روش ابتدا از روی تابع توزیع هر نقطه، سرعت نقاط شبکه محاسبه می شود و با توجه به فاصله نقطه A از گره های اطراف آن، مقدار سرعت در نقطه A توسط میان یابی پیدا می شود. با توجه به شکل (۴) و نامگذاری های آن، مقدار سرعت در نقطه A از رابطه (۱۶) به دست می آید:

$$\mathbf{u}_A = (1-\alpha)(1-\beta)\mathbf{u}_{ws} + (1-\alpha)\beta\mathbf{u}_{wn} + \alpha\beta\mathbf{u}_{en} + \alpha(1-\beta)\mathbf{u}_{es} \quad (16)$$

حال با توجه به سرعت واقعی که در نقطه A مد نظر می باشد، انحراف سرعت نقطه A از سرعت واقعی، طبق رابطه (۱۷) به دست می آید:

$$\Delta\mathbf{u}_A = \mathbf{u}_{A,real} - \mathbf{u}_A \quad (17)$$

[۷]. به عنوان مثال در مرجع [۱۵] برای افزایش دقت شبیه سازی، در هر گام زمانی ده تکرار داخلی انجام شده است. مزایای روش میدان نیرو:

- این روش به سادگی در برنامه کامپیوتری قابل اعمال است.

- برنامه را برای هندسه های مختلف می توان به کار برد. برای این کار فقط نقاط مرجع جامد را باید عوض کرد و نیازی به تغییر در برنامه نیست.

عیوب روش میدان نیرو:

- وجود میان یابی در این روش، موضعی بودن روش شبکه بولتزمن را تا حدودی از بین می برد.

- وجود ضریب زیرتخفیف، کاربرد روش میدان نیرو را به حل جریان های دائم محدود می کند یا در صورت نیاز به حل جریان های غیردائم به برنامه تکرار داخلی اضافه می شود.

- وجود تکرار داخلی، زمان مورد نیاز برای رسیدن به جواب را افزایش می دهد.

- به دلیل اینکه در این روش نقاط جامد، با سیال جایگزین می شود و روابط مربوط به نقاط سیال در این نقاط اعمال می گردد، میزان محاسبات افزایش می یابد. برای اینکه میزان

افزایش حجم محاسبات مربوط به این مشکل بهتر درک شود، یک همزن استوانه ای به قطر و ارتفاع D در نظر بگیرید. با توجه به اینکه در روش شبکه بولتزمن از شبکه یکنواخت مربعی استفاده می شود، برای شبیه سازی این همزن، دامنه ای به شکل

مکعب بر آن محیط می شود. این مکعب اضلاعی به اندازه D دارد و کل این حجم در محاسبات وارد می شود. از آنجا که نقاط

بیرون استوانه در مسئله اصلی وجود نداشته، به اندازه حجم این نقاط اضافی به محاسبات افزوده شده است. با توجه به اینکه حجم مکعب D^3 ، حجم استوانه $\pi D^3/4$ و اختلاف حجم آنها

$(4-\pi)D^3/4$ می باشد، میزان محاسبات، بیست و هفت درصد از یک استوانه تنها بیشتر شده است. لازم به ذکر است که این مقدار غیر از حجم محور، پره های متحرک و ثابت می باشد، زیرا

به جای این اجسام جامد نیز سیال قرار می گیرد و در محاسبات

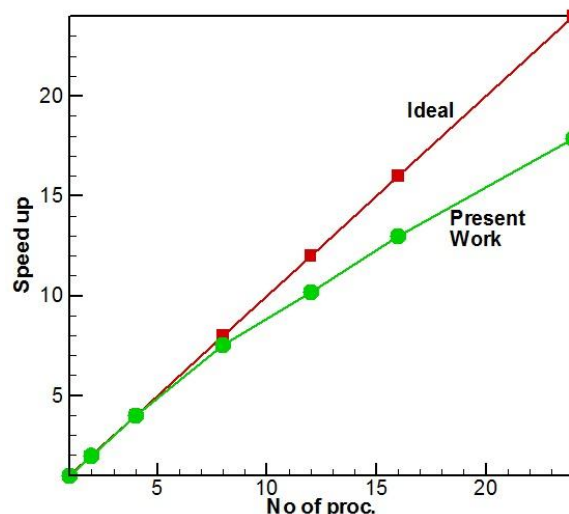
به عنوان سیال وارد می شوند. البته می توان ترکیبی از روش کمانه کردن و روش میدان نیرو را به کار برد و این مشکل را کاهش داد. به این ترتیب که در دیواره های همزن، روش کمانه کردن و برای پره های ثابت، محور و پره های متحرک روش میدان نیرو را اعمال نمود. با این کار، حجم اضافی بیرون ظرف حذف می شود و فقط نقاط حاوی پره های ثابت، پره های متحرک و محور به شکل سیال در محاسبات وارد می شوند.

در کار حاضر با توجه به نکاتی که در مورد دو روش کمانه کردن اصلاح شده و میدان نیرو عنوان شد، و داده های جدول ۱ که دقیق تر بودن روش کمانه کردن اصلاح شده را نسبت به روش میدان نیرو تأیید می کند، تا زمانی که روش کمانه کردن اصلاح شده قابل اعمال باشد، این روش نسبت به روش میدان نیرو در اعمال مرز جامد ترجیح داده می شود. لذا در کار حاضر در کنار روش شبکه بولتزمن از روش کمانه کردن اصلاح شده برای شبیه سازی مرزهای جامد بهره گرفته می شود. به این ترتیب که، مرزهای جامد (ساکن و متحرک) در داخل دامنه حل قرار گرفته و مستقیماً از طریق شرایط مرزی، اثرات خود را اعمال می کنند. لازم به ذکر است که در تمام کارهای عددی که شبیه سازی جریان داخل همزن به روش شبکه بولتزمن انجام شده، از روش میدان نیرو استفاده شده است و کار حاضر اولین کار عددی است که در آن از شرط مرزی کمانه کردن اصلاح شده در روش شبکه بولتزمن برای شبیه سازی مرزهای جامد متحرک در جریان داخل همزن بهره گرفته شده است.

۵- شبیه سازی گردابه های بزرگ

از آنجایی که کارایی روش گردابه های بزرگ، برای شبیه سازی جریان مغشوش داخل همزن ها اثبات شده است [۴]، در کار حاضر از این روش برای شبیه سازی جریان مغشوش استفاده می شود. اساس این روش، حل مقیاس های بزرگ و مدل سازی مقیاس های کوچک است. برای این منظور، مقیاس های کوچک توسط مدل زیر شبکه ای مدل شده و اثر آن به متغیرهای مقیاس شبکه اضافه می گردد. در کار حاضر برای مدل کردن

توابع کتابخانه‌های mpi^{۱۸} استفاده می‌شود. اندازه حافظه مورد نیاز، متناسب با شبکه‌بندی مورد استفاده است و بسته به تعداد پردازنده‌هایی که در اجرا استفاده می‌شود، سهم هر پردازنده معین می‌گردد. برای کنترل نمودن کیفیت پردازش موازی در برنامه تهیه شده، میزان افزایش سرعت^{۱۹}، مورد بررسی قرار می‌گیرد. به این منظور نمودار افزایش سرعت برحسب تعداد پردازنده‌ها تهیه می‌شود. شکل ۵ افزایش سرعت اجرا برحسب افزایش تعداد پردازنده‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود، برای چهار پردازنده، سرعت حدوداً چهار برابر شده است و در ۲۴ پردازنده، سرعت حدوداً ۱۸ برابر افزایش نشان داده است. این مقدار افزایش، بسیار خوب بوده و کیفیت بالای برنامه پردازش موازی تهیه شده را نشان می‌دهد.



شکل ۵- نمودار افزایش سرعت بر حسب افزایش تعداد پردازنده‌ها

۷- نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی

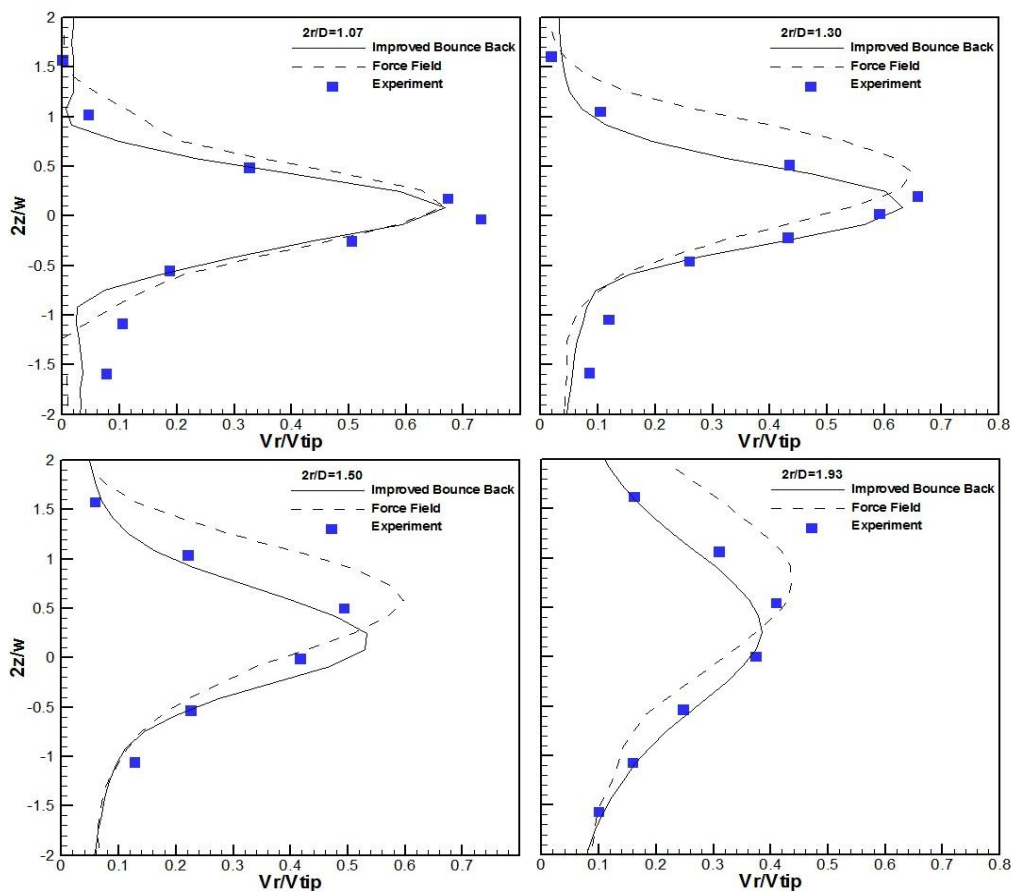
با توجه به عدد رینولدز ۲۹۰۰۰ و هندسه جریان که در شکل ۱ نشان داده شده است، جریان داخل همزن مغشوش بوده و تقارن ندارد، لذا کل دامنه حل شبیه‌سازی شده است. برای این منظور از شبکه یکنواخت مربعی ۱۸۰^۳ استفاده شده و مدل نوزده سرعتی به کار گرفته شده است. از آنجا که این حجم داده و محاسبات مربوط به آن، توسط یک رایانه قابل بررسی نمی‌باشد، همان‌طور که در بخش قبل نیز بیان شد، از ابر رایانه کمک گرفته شده و برنامه توسط پردازش موازی اجرا گردیده است. هندسه همزن مورد بحث، تاکنون از لحاظ برخی جزئیات، مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفته است. به‌عنوان مثال وو و پترسون [۲۳] سرعت متوسط فازی، در جهات مختلف مختصات را به صورت آزمایشگاهی ارائه داده‌اند. در شکل‌های ۶ و ۷ نتایج حاصل از شبیه‌سازی کار حاضر به روش کمانه کردن اصلاح شده، با نتایج آزمایشگاهی مذکور و نتایج شبیه‌سازی عددی مرجع [۷] که به روش میدان نیرو انجام شده، مقایسه شده‌اند.

برای بررسی جریان مغشوش داخل همزن، انرژی جنبشی کل نوسانات سرعت، طبق فرمول (۲۱) محاسبه شده و با نتایج عددی و آزمایشگاهی مقایسه شده است:

مقیاس زیر شبکه‌ای، از روش اسمانگورینسکی^{۱۵} استاندارد، استفاده شده است. در این روش لزجت جنبشی اغتشاش (v_t)، از روی نرخ تغییر شکل محاسبه می‌گردد و برای اعمال جریان مغشوش به روش شبکه بولتزمن، لزجت کل که مجموع این لزجت (v_t) و لزجت سیال (ν) است، در مرحله برخورد استفاده می‌شود [۷].

۶- روش اعمال پردازش موازی

برای اعمال پردازش موازی، از دو ساختار می‌توان استفاده کرد: یکی ساختار حافظه مشترک^{۱۶} و دیگری ساختار حافظه جداگانه^{۱۷}. از آنجایی که حافظه مورد نیاز در شبکه‌های متفاوت با هم فرق دارند و بعضاً از حافظه مشترک موجود بیشتر می‌باشد، برنامه به شکل کلی‌تر که همان ساختار حافظه جداگانه می‌باشد، تهیه شده است. با این کار، برنامه تهیه شده را در هر دو ساختار، می‌توان استفاده کرد. در ساختار حافظه جداگانه هر پردازنده بخشی از شبکه‌بندی عددی و داده‌های مربوط به آن را در دسترس دارد و اطلاعات مورد نیاز در مرزها را از پردازنده‌های کناری دریافت می‌کند و متقابلاً برای آنها ارسال می‌نماید. برای برقراری ارتباط بین پردازنده‌ها، از



شکل ۶- مقایسه متوسط فازی مؤلفه سرعت شعاعی در خروجی پروانه، در چند شعاع متفاوت، به روش کمانه کردن اصلاح شده (کار حاضر)، با روش میدان نیرو (نتیجه عددی محققین قبلی [۷]) و نتیجه آزمایشگاهی [۲۳]

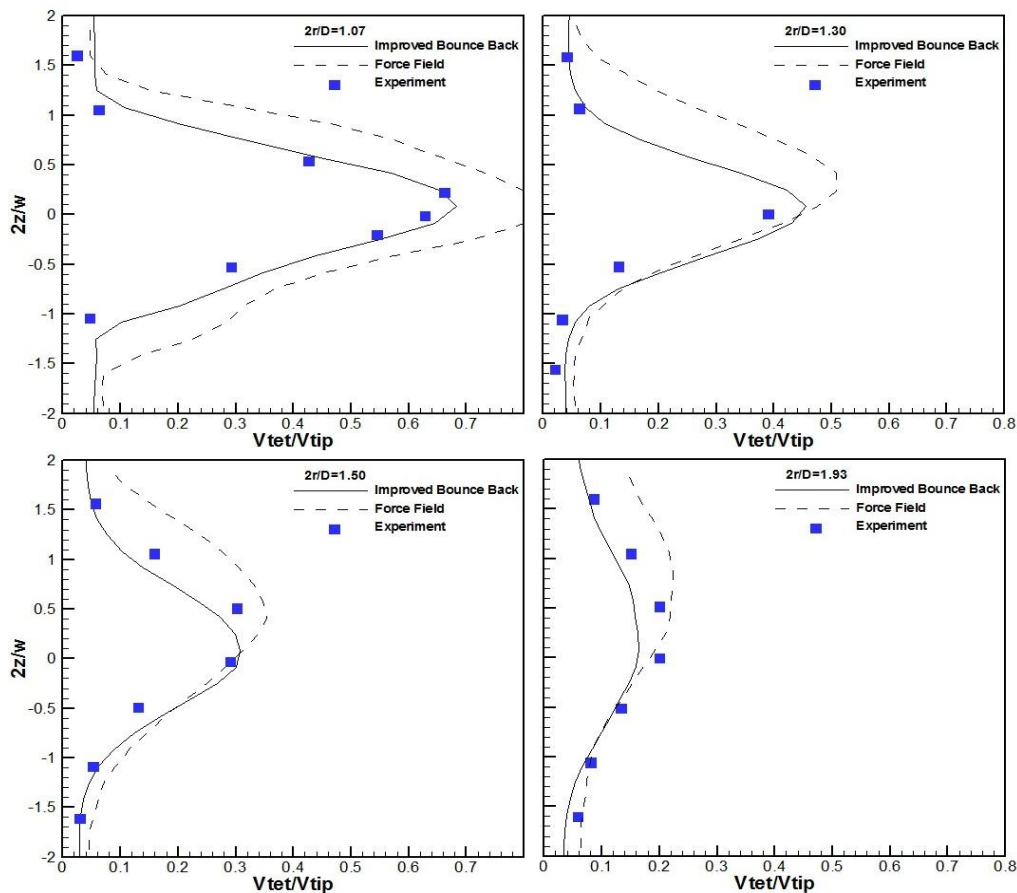
در این رابطه $\langle \theta \rangle$ مقدار متوسط در زاویه خاص θ می‌باشد و خط روی معادله، نشان دهنده متوسط‌گیری در تمام زوایا و تمام لحظات است. در دو شکل ۸ و ۹ نتایج حاصل از کار حاضر به روش کمانه کردن اصلاح شده با نتایج شبیه‌سازی عددی مرجع [۷] که به روش میدان نیرو انجام شده است و نتایج آزمایشگاهی مرجع [۲۳] مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در این دو شکل دیده می‌شود، نتایج عددی حاصل از روش کمانه کردن اصلاح شده، رفتار انرژی جنبشی اغتشاش را به‌خوبی پیش‌بینی نموده و نسبت به روش میدان نیرو [۷] تطابق بیشتری با نتایج آزمایشگاهی دارد.

از آنجایی که سرعت متوسط فازی در محدوده پره‌های متحرک (به شکل ۱۰ توجه شود)، به‌صورت آزمایشگاهی در دسترس می‌باشد [۷]، در همان محدوده توزیع سرعت متوسط

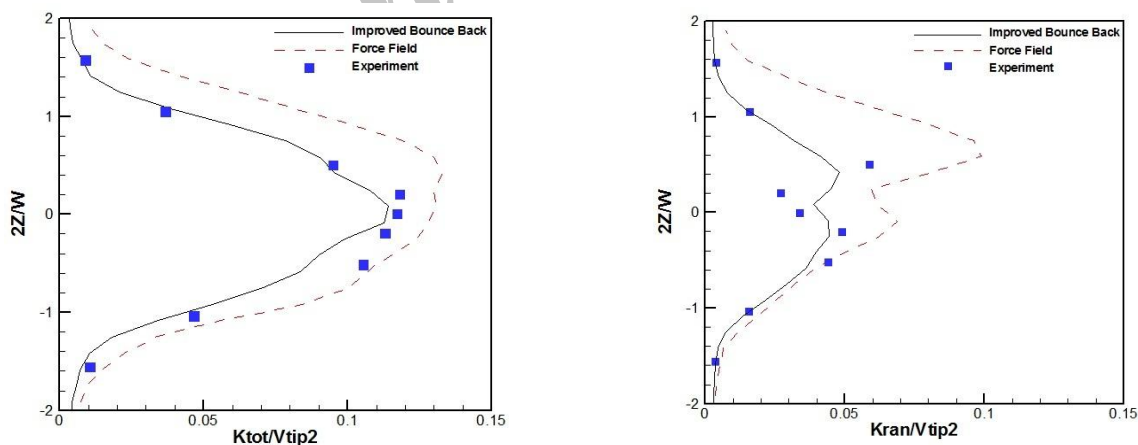
$$k_{\text{tot}} = \frac{1}{2} (\overline{u_i^2} - u_i^2) \quad (21)$$

در این معادله u_i ، امین مؤلفه سرعت می‌باشد. متوسط‌گیری در تمام زوایا و زمان‌ها انجام می‌شود و اندیس تکراری جمع روی تمام جهات مختصات را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه بخشی از نوسانات سرعت، مربوط به حرکت پربودیک پروانه همزن است، انرژی جنبشی اغتشاش به دو بخش پربودیک و تصادفی تقسیم می‌شود و بخش تصادفی نوسانات هم با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه می‌گردند. برای این منظور مقادیر بعضی از متغیرها در هر زاویه خاص به‌صورت فازی به‌دست می‌آید و سپس طبق فرمول (۲۲) بخش تصادفی انرژی جنبشی اغتشاش، محاسبه می‌شود [۷]:

$$k_{\text{ran}} = \frac{1}{2} (\langle u_i^2 \rangle_{\theta} - \langle u_i \rangle_{\theta}^2) \quad (22)$$



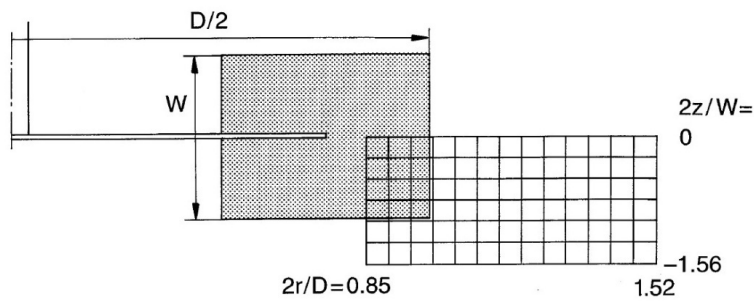
شکل ۷- مقایسه متوسط فازی مؤلفه سرعت مماسی در خروجی پروانه، در چند شعاع متفاوت، به روش کمانه کردن اصلاح شده (کار حاضر)، با روش میدان نیرو (نتیجه عددی محققین قبلی [۷]) و نتیجه آزمایشگاهی [۲۳]



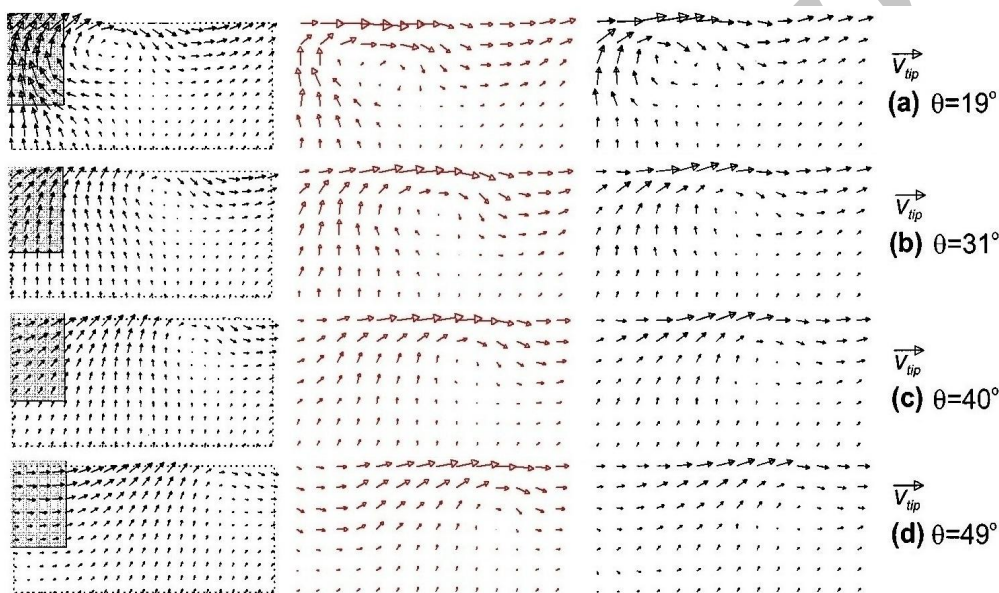
شکل ۸- مقایسه بخش تصادفی انرژی جنبشی اغتشاش (فرمول (۲۲))
 به روش کمانه کردن اصلاح شده (کار حاضر)، با روش میدان نیرو (نتیجه عددی محققین قبلی [۷]) و نتیجه آزمایشگاهی [۲۳]، برای

$$\frac{2r}{D} = 1/07$$

$$\frac{2r}{D} = 1/07$$



شکل ۱۰- دامنه استفاده شده در مرجع [۷]، برای اندازه‌گیری سرعت متوسط فازی در محدوده پروانه، شبکه نشان داده شده در یک صفحه قائم، بین دو پره ثابت قرار دارد



شکل ۱۱- میدان سرعت متوسط فازی در محدوده پره‌های پروانه، در چند زاویه نسبت به پره‌های متحرک

ستون سمت راست نتایج شبیه‌سازی آزمایشگاهی [۷]، ستون وسط روش کمانه کردن اصلاح شده (کار حاضر) و ستون سمت چپ روش میدان نیرو (نتیجه عددی محققین قبلی [۷])، برای تجسم مکان گرداب، موقعیت پره پروانه در زاویه صفر درجه در ستون سمت چپ نشان داده شده است

آمده از کار حاضر، در مقایسه با بردارهای سرعت به دست آمده از روش میدان نیرو، شباهت بیشتری با نتایج آزمایشگاهی دارد. برای اینکه مکان گرداب در جلوی پره، در دو روش میدان نیرو و روش کمانه کردن اصلاح شده، با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شوند، این مقادیر به صورت تقریبی از نتایج عددی و آزمایشگاهی موجود استخراج شده و در جدول ۲ ارائه شده

فازی با روش کمانه کردن تهیه شده و به همراه نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی قبلی که به روش میدان نیرو به دست آمده، در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، شبیه‌سازی عددی کار حاضر، هم از لحاظ کیفی و هم از لحاظ کمی تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد و بردارهای سرعت به دست

جدول ۲- مقایسه مکان گرداب در جلوی پره، برای دو روش میدان نیرو و کمانه کردن اصلاح شده با نتایج آزمایشگاهی

نتایج آزمایشگاهی [۷]	روش کمانه کردن اصلاح شده	روش میدان نیرو [۷]	متغیر مکانی	زاویه نسبت به پره پروانه
۱/۰۶	۱/۰۴	۱/۱	$\frac{2r}{D}$	۱۹°
-۰/۵۵	-۰/۵۵	-۰/۳۳	$\frac{2z}{W}$	
۱/۲۱	۱/۲۱	۱/۲۳	$\frac{2r}{D}$	۳۱°
-۰/۵۲	-۰/۴۶	-۰/۲۹	$\frac{2z}{W}$	
۱/۲۷	۱/۲۷	۱/۳۱	$\frac{2r}{D}$	۴۰°
-۰/۷۵	-۰/۶۴	-۰/۴۲	$\frac{2z}{W}$	
۱/۳۸	۱/۳۵	۱/۴۰	$\frac{2r}{D}$	۴۹°
-۰/۶۳	-۰/۷۲	-۰/۴۸	$\frac{2z}{W}$	

روش‌های موجود، روش جدیدی در قیاس با کارهای قبلی، مورد استفاده قرار گرفته است. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی کار حاضر با نتایج اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، دقت و صحت شبیه‌سازی‌های انجام شده را نشان داده و ایده پیشنهاد شده در کار حاضر، برای اصلاح شرط مرزی را تأیید نموده است.

۹- قدردانی

بدین‌وسیله از همکاری کارکنان و مسئولین محترم مرکز ابرایانش ملی شیخ‌بهایی دانشگاه صنعتی اصفهان، به‌دلیل در اختیار قرار دادن امکانات سخت‌افزاری و نرم‌افزاری، تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

است. همان‌گونه که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، شبیه‌سازی عددی کار حاضر، مکان گرداب ایجاد شده در جلوی پره را با دقت خوبی پیش‌بینی نموده و تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله جریان مغشوش داخل همزن، توسط روش گردابه‌های بزرگ مورد بررسی قرار گرفته است. در انجام این کار از روش شبکه بولتزمن که از قابلیت بالایی برای پردازش موازی برخوردار است، استفاده شده و برای انجام شبیه‌سازی از ابررایانه کمک گرفته شده است. برای افزایش دقت شبیه‌سازی عددی، نسبت به کارهای عددی گذشته، روش اعمال شرط مرزی جامد مورد بررسی قرار گرفته و با در نظر گرفتن مزایا و معایب

واژه نامه

- | | | |
|----------------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| 1. computational fluid dynamics | 8. force field | 15. Smagorinsky |
| 2. lattice boltzmann method(LBM) | 9. improved bounce back | 16. shared memory |
| 3. Rushton | 10. Bhatnagar-Gross-Krook | 17. distributed memory |
| 4. Fluent | 11. collision step | 18. message passing interface |
| 5. large eddy simulation(LES) | 12. streaming step | 19. speed up |
| 6. multiple reference frames | 13. under relaxation | |
| 7. immersed boundary | 14. Peskin | |

مراجع

- | | |
|--|---|
| 1. Yoon, H. S., Sharp, K. V., Hill, D. F., Adrian, R. J., Balachandar, S., Ha, M. Y., and Kar, K., "Integrated | Experimental and Computational Approach to Simulation of Flow in a Stirred Tank", <i>Chemical</i> |
|--|---|

- Engineering Science*, Vol. 56, pp. 6635-6649, 2001.
2. Yeoh, S. L., Papadakis, G., Lee, K. C., and Yianneskis, M., "Large Eddy Simulation of Turbulent Flow in a Rushton Impeller Stirred Reactor with Sliding-Deforming Mesh Methodology", *Chemical Engineering & Technology*, Vol. 27, pp. 257-263, 2004.
 3. Dhainaut, M., Tetlie, P., and Bech, K., "Modeling and Experimental Study of a Stirred Tank Reactor", *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, Vol. 3, pp. 61, 2006.
 4. Eggels, J. G. M., "Direct and Large-eddy Simulation of Turbulent Fluid Flow Using the Lattice-Boltzmann Scheme", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 17, pp. 307-323, 1996.
 5. Derksen, J., and Van Den Akker, H., "Parallel Simulation of Turbulent Fluid Flow in a Mixing Tank", *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 96-104, 1998.
 6. Derksen, J., "Assessment of Large Eddy Simulations for Agitated Flows", *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 79, 2001.
 7. Derksen, J., and Van Den Akker, H. E. A., "Large Eddy Simulations on the Flow Driven by a Rushton Turbine", *AIChE Journal*, Vol. 45, pp. 209-221, 1999.
 8. Derksen, J., "Large Eddy Simulations of Agitated Flow Systems Based on Lattice-Boltzmann Discretization", p. 425, 2001.
 9. Derksen, J. J., "Numerical Simulation of Solids Suspension in a Stirred Tank", *AIChE Journal*, Vol. 49, pp. 2700-2714, 2003.
 10. Derksen, J. J., "Solid Particle Mobility in Agitated Bingham Liquids", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 48, pp. 2266-2274, 2009.
 11. Hollander, E. D., Derksen, J. J., Bruinsma, O. S. L., Van Rosmalen, G. M., and Van Den Akker, H. E. A., "A Numerical Investigation Into the Influence of Mixing on Orthokinetic Agglomeration", *10th European Conference on Mixing*, pp. 221-228, 2000.
 12. Hollander, E. D., Derksen, J. J., Bruinsma, O. S. L., Van Den Akker, H. E. A., and Van Rosmalen, G. M., "A Numerical Study on the Coupling of Hydrodynamics and Orthokinetic Agglomeration", *Chemical Engineering Science*, Vol. 56, pp. 2531-2541, 2001.
 13. Hollander, E. D., Derksen, J. J., Portela, L. M., and Van Den Akker, H. E. A., "Numerical Scale-up Study for Orthokinetic Agglomeration in Stirred Vessels", *AIChE Journal*, Vol. 47, pp. 2425-2440, 2001.
 14. Hollander, E. D., Derksen, J. J., Kramer, H. M. J., Van Rosmalen, G. M., and Van Den Akker, H. E. A., "A Numerical Study on Orthokinetic Agglomeration in Stirred Tanks", *Powder Technology*, Vol. 130, pp. 169-173, 2003.
 15. Hartmann, H., Derksen, J. J., Montavon, C., Pearson, J., Hamill, I. S., and Van Den Akker, H. E. A., "Assessment of Large Eddy and RANS Stirred Tank Simulations by Means of LDA", *Chemical Engineering Science*, Vol. 59, pp. 2419-2432, 2004.
 16. Hartmann, H., Derksen, J. J., and Van Den Akker, H. E. A., "Mixing Times in a Turbulent Stirred Tank by Means of LES", *AIChE Journal*, Vol. 52, pp. 3696-3706, 2006.
 17. Hartmann, H., Derksen, J. J., and Van Den Akker, H. E. A., "An LES Investigation of the Flow Macro-Instability in a Rushton Turbine Stirred Tank", *The 11th European Conference on Mixing*, pp. 14-17, 2003.
 18. Hartmann, H., Derksen, J. J., and Van Den Akker, H. E. A., "Macroinstability Uncovered in a Rushton Turbine Stirred Tank by Means of LES", *AIChE Journal*, Vol. 50, pp. 2383-2393, 2004.
 19. Hartmann, H., Derksen, J. J., and Van Den Akker, H. E. A., "Numerical Simulation of a Dissolution Process in a Stirred Tank Reactor", *Chemical Engineering Science*, Vol. 61, pp. 3025-3032, 2006.
 20. Peng, Y., and Luo, L. S., "A Comparative Study of Immersed-Boundary and Interpolated Bounce-Back Methods in LBE", *Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal*, Vol. 8, pp. 156-167, 2008.
 21. Rohde, M., Derksen, J. J., and Van Den Akker, H. E. A., "An applicability Study of Advanced Lattice-Boltzmann Techniques for Moving, No-Slip Boundaries and Local Grid Refinement", *Computers and Fluids*, Vol. 37, pp. 1238-1252, 2008.
 22. Chen, D., Lin, K., and Lin, C., "Immersed Boundary Method Based Lattice Boltzmann Method to Simulate 2D and 3D Complex Geometry Flows", *International Journal of Modern Physics C*, Vol. 18, pp. 585-594, 2007.
 23. Wu, H., and Patterson, G. K., "Laser Doppler Measurements of Turbulent Flow Parameters in a Stirred Mixer", *Chemical Engineering Science*, Vol. 44, pp. 2207-2221, 1989.
 24. He, X., and Luo, L. S., "Theory of the Lattice Boltzmann Method: From the Boltzmann Equation to the Lattice Boltzmann Equation", *Physical Review E*, Vol. 56, pp. 6811-6817, 1997.
 25. Wolf-Gladrow, D. A., *Lattice-Gass Cellular Automata and Lattice Boltzmann Models: an Introduction*, Springer-Verlag, 2000.
 26. He, X. and Luo, L. S., "A Priori Derivation of the Lattice Boltzmann Equation", *Physical Review E*, Vol. 55, pp. 6333-6336, 1997.
 27. Filippova, O., and Hanel, D., "Grid Refinement for Lattice-BGK Models", *Journal of Computational Physics*, Vol. 147, pp. 219-228, 1998.
 28. Mei, R., Luo, L. S., and Shyy, W., "An Accurate Curved Boundary Treatment in the Lattice Boltzmann Method", *Journal of Computational Physics*, Vol. 155, pp. 307-330, 1999.

29. Mei, R., Shyy, W., Yu, D., and Luo, L. S., "Lattice Boltzmann Method for 3-D Flows with Curved Boundary", *Journal of Computational Physics*, Vol. 161, pp. 680-699, 2000.
30. Goldstein, D., Handler, R., and Sirovich, L., "Modeling a No-Slip Flow Boundary with an External Force Field", *Journal of Computational Physics*, Vol. 105, pp. 354-366, 1993.
31. Schaefer, M., Turek, S., Durst, F., Krause, E., and Rannacher, R., "Benchmark Computations of Laminar Flow Around a Cylinder", *Notes on Numerical Fluid Mechanics*, Vol. 52, pp. 547-566, 1996.
32. Mei, R., Yu, D., Shyy, W., and Luo, L. S., "Force Evaluation in the Lattice Boltzmann Method Involving Curved Geometry", *Physical Review E*, Vol. 65, p. 041203, 2002.

Archive of SID