بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی

گروه مکانیک

پایان‌نامه ارائه شده جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد

تولید شبکه‌ی بی‌سازمان متحرک و حل جریان لزج حول یک جسم با سقوط آزاد

نگارنده

پدرام پاک‌سرشت

استاد راهنما

دکتر سید سعید بحرینیان

استاد مشاور

دکتر رضا باهوش‌کازرونی

تیر ۸۹

بسمه تعالی

دانشگاه شهید چمران اهواز

مدیریت تحصیلات تکمیلی

(نتیجه ارزشیابی پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد)

بدین وسیله گواهی می‌گردد پایان‌نامه آقای **پدرام پاک‌سرشت** دانشجوی رشته **مهندسی مکانیک** گرایش **تبدیل انرژی** از دانشکده **مهندسی** به شماره دانشجویی **۸۶۲۴۹۰۱** تحت عنوان **تولید شبکه‌ی بی‌سازمان متحرک و حل جریان لزج حول یک جسم با سقوط آزاد** جهت اخذ درجه‌ی کارشناسی ارشد در تاریخ **۸۹/۴/۷** توسط هیئت داوران مورد ارزشیابی قرار گرفت و با درجه‌ی **بسیار خوب** تصویب گردید.

۱- اعضا هیئت داوران:	مرتبه علمی	امضا
الف- استاد راهنما: **دکتر سید سعید بحرینیان**	استادیار	
ب- استاد مشاور: **دکتر رضا باهوش‌کازرونی**	استادیار	
ج– داور ۱: **دکتر عزیز عظیمی**	استادیار	
د– داور ۲: **دکتر ابراهیم حاجی‌دولو**	دانشیار	
هـ– نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه (استاد ناظر): **دکتر مرتضی بهبهانی‌نژاد**	استادیار	
۲- مدیر گروه: **دکتر افشین قنبرزاده**	استادیار	
۳- معاون پژوهشی دانشکده: **دکتر کریم انصاری اصل**	استادیار	
۴- مدیر کل تحصیلات تکمیلی: **دکتر رحیم پیغان**	استاد	

چکیده

نام خانوادگی: **پاک‌سرشت** نام: **پدرام**

عنوان پایان نامه: **تولید شبکه‌ی بی‌سازمان متحرک و حل جریان لزج حول یک جسم با سقوط آزاد**

استاد راهنما: **دکتر سید سعید بحرینیان** استاد مشاور: **دکتر رضا باهوش‌کازرونی**

درجه تحصیلی: **کارشناسی ارشد** رشته: **مهندسی مکانیک** گرایش: **تبدیل انرژی**

محل تحصیل(دانشگاه): **دانشگاه شهید چمران اهواز**

دانشکده: **مهندسی**

تاریخ فارغ‌التحصیلی: **۱۳۸۹/۴/۷** تعداد صفحه: **۱۱۳**

واژه‌های کلیدی: **شبکه‌ی بی‌سازمان متحرک، حذف و اضافه سازی گره، مرز متحرک، منطقه‌ی متحرک، منطقه‌ی تغییرپذیر**

جدایش ذخائر از اجسام پرنده یکی از مسائلی است که در زمره‌ی مسائل با مرز متحرک قرار می‌گیرد. حل دقیق چنین مسئله‌ای نیازمند یک روش سریع تولید شبکه‌ی متحرک با کیفیت بالا در یک ناحیه‌ی بزرگ محاسباتی می‌باشد. روشی که بتواند چنین شبکه‌ای را شبیه‌سازی نماید از اهمیت ویژه‌ای در حل جریان سیال آن برخوردار می‌باشد. در این پایان‌نامه روشی برای این منظور ارائه شده است. نوع حرکت جسم درون شبکه سقوط آزاد انتخاب شده است. روش تقسیم سلولی با جایگذاری گره به عنوان روش تولید شبکه‌ی بی‌سازمان ثابت بیان شده است. در روش ارائه شده از الگوریتم‌های بهبود کیفیت شبکه که شامل تعویض‌ضلع و هموارسازی می‌باشند، استفاده شده است. به منظور کنترل اندازه‌ی سلول‌ها و ضلع‌ها، از تابع چشمه خطی استفاده شده است. در ساختمان داده‌ها، دو ماتریس ذخیره‌سازی اطلاعات سلول‌ها و ضلع‌ها به صورت هم‌زمان به کار گرفته شده است. استفاده‌ی هم‌زمان از دو ساختمان داده‌ها، سبب کاهش زمان جستجوی اطلاعات در برنامه‌ی کامپیوتری شبکه می‌شود. پس از تولید شبکه‌ی ثابت یک روش به منظور حرکت شبکه‌های بی‌سازمان ارائه شده است. روش ارائه شده از حذف و اضافه سازی گره‌ها استفاده می‌نماید. الگوریتم حذف گره یک فرایند در بازسازی ساختمان داده‌ها می‌باشد. در این روش تنها بخش مجاور به مرز متحرک در طول حرکت تغییر می‌نماید و نواحی دور از مرز متحرک بدون تغییر باقی می‌مانند. به منظور حفظ کیفیت سلول‌های اطراف جسم، یک شبکه‌ی دو منطقه‌ای تعریف شده است. این شبکه‌ی دو منطقه‌ای با استفاده از الگوریتم‌های موجود تولید شده است. شبکه‌ی دو منطقه‌ای شامل یک منطقه‌ی متحرک و بدون تغییر و یک منطقه‌ی تغییرپذیر می‌باشد. جسم متحرک درون منطقه‌ی متحرک قرار گرفته و هر دو بر روی منطقه‌ی تغییرپذیر حرکت می‌نمایند. روش ارائه شده برای حرکت‌های با دامنه‌ی جابجایی زیاد همانند سقوط آزاد مناسب می‌باشد. شبیه‌سازی‌های انجام شده شامل حل جریان دائم سیال لزج، آرام و تراکم‌ناپذیر در زمان‌های متوالی حرکت بوده است. حجم‌محدود به عنوان روش حل انتخاب شده است. برای کوپل سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل استفاده شده است. سه بسته‌ی نرم‌افزاری با زبان برنامه‌نویسی فرترن نوشته شده است. این بسته‌ها شامل تولید شبکه‌ی بی‌سازمان ثابت، شبکه‌ی بی‌سازمان متحرک و حل جریان آرام می‌باشند.

تقدیم

به

پدر، مادر و برادرم

تقدیر و تشکر

لازم می‌دانم از مساعدت و راهنمایی‌های استاد ارجمند جناب آقای دکتر سید سعید بحرینیان کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم. ایشان نه تنها در جایگاه استاد راهنمای این پایان‌نامه، بلکه به عنوان پدری دلسوز و مهربان همواره مرا تحمل کرده و مورد لطف و محبت خود قرار داده‌اند. کمک‌های ایشان چه در دوران تحصیل و چه در انجام این پایان‌نامه همواره باعث دلگرمی و راهنمایی اینجانب بوده است. از جناب آقای دکتر رضا باهوش‌کازرونی که همواره یار و همراه اینجانب بوده‌اند نیز سپاسگزارم. کمک‌های ایشان در طول این پایان‌نامه فراتر از عنوان استاد مشاور بوده است.

از اساتید محترم، آقایان دکتر ابراهیم حاجی‌دولو، دکتر مرتضی بهبهانی‌نژاد، دکتر امین‌رضا نقره‌آبادی و دکتر عزیز عظیمی که در طول انجام این پایان‌نامه و دوران تحصیل، سوالات اینجانب را بی‌پاسخ نگذاشته‌اند، نیز سپاسگزارم. آرزوی سلامتی و توفیقات روزافزون را برای این اساتید محترم خواستارم. امید آنکه مجالی جهت جبران لطف، محبت و آموزش‌های این عزیزان باشد. از دوست خود مهندس سعید توسل‌پور که از کمک‌های بی‌دریغ ایشان، همواره کمال بهره را برده‌ام نیز سپاسگزارم.

در پایان، بر خود لازم می‌دانم از زحمات بی‌دریغ پدر و مادرم که در طول سالیان تحصیل برای من متحمل شده‌اند، قدردانی به عمل آورم. آرزوی سلامتی و تندرستی روز افزون را برای این عزیزان، از درگاه خداوند منان خواستارم.

فهرست مطالب

موضوع **صفحه**

فرم‌ارزشیابی.....الف
چکیده‌ی فارسی.....ب
تقدیم.....ت
تقدیر و تشکر.....ث
فهرست مطالب.....ج
فهرست شکل‌ها.....د
فهرست جدول‌ها.....ز
فهرست علامت‌ها و اختصارها.....س

فصل اول

مقدمه و مروری بر پژوهش‌های پیشین ۱
۱-۱ مقدمه ۱
۱-۲ مروری بر پژوهش‌های پیشین ۴
۱-۳ هدف از انجام این پژوهش ۱۳

فصل دوم

آشنایی با شبکه‌های محاسباتی ۱۴
۲-۱ شبکه‌های محاسباتی ۱۴
۲-۲ شبکه‌های محاسباتی باسازمان ۱۶
۲-۳ شبکه‌های محاسباتی بی‌سازمان ۱۸
۲-۴ شبکه‌های بی‌سازمان متحرک ۲۲

فصل سوم

تولید شبکه‌ی بی‌سازمان مثلثی متحرک ۲۶
۳-۱ تولید شبکه‌ی بی‌سازمان ۲۶
۳-۲ شبکه‌ی اولیه ۲۷

۳-۳ ساختمان داده‌ها ۲۷
۳-۴ بیان الگوریتم تولید شبکه ۳۵
۳-۵ بهبود کیفیت شبکه ۳۹
۳-۶ تعویض ضلع ۳۹
۳-۷ چشمه در شبکه ۴۵
۳-۸ هموارسازی ۴۷
۳-۹ جابجایی هندسی ۵۰
۳-۱۰ تولید شبکه‌ی بی‌سازمان متحرک ۵۲
۳-۱۱ الگوریتم حذف المان ۵۷
۳-۱۲ نمایه‌گذاری در ساختمان داده‌ها ۶۱
۳-۱۳ جابجایی سطرها در ساختمان داده‌ها ۶۲
۳-۱۴ الگوریتم اضافه سازی گره ۶۶
۳-۱۵ چشمه‌ی متحرک ۶۹
۳-۱۶ ترکیب الگوریتم‌های حذف و اضافه سازی گره ۶۹
۳-۱۷ شبکه‌ی متحرک دو منطقه‌ای ۷۱

فصل چهارم

معادلات حاکم بر جریان سیال ۷۶
۴-۱ معادلات حاکم ۷۶
۴-۲ متغیرهای بی‌بعد ۷۷
۴-۳ معادلات بی‌بعد ۷۷
۴-۴ شکل اندیسی معادلات حاکم ۷۸
۴-۵ روابط انتگرالی معادلات حاکم ۷۹
۴-۶ گسسته‌سازی معادلات ۷۹
۴-۷ الگوریتم حل معادلات ۸۷
۴-۸ الگوریتم سیمپل ۸۷
۴-۹ شرایط مرزی ۹۲

فصل پنجم

بررسی نتایج ۹۴
۵-۱ نتایج شبکه‌ی بی‌سازمان متحرک ۹۴
۵-۲ نتایج حل جریان ۱۰۱

فصل ششم

نتیجه‌ی پایانی و پیشنهادها ۱۰۸
۶-۱ نتیجه‌ی پایانی ۱۰۸
۶-۲ پیشنهادها ۱۰۹

مراجع ۱۱۱
چکیده‌ی انگلیسی ۱۱۴

فهرست شکل‌ها

شکل ۲-۱: نمونه‌ای از یک شبکه‌ی باسازمان ۱۶
شکل ۳-۱: میدان محاسباتی و هندسه‌ی ساده‌ی اولیه ۲۷
شکل ۳-۲: اولین مثلث‌های ممکن در شبکه‌ی اولیه ۲۷
شکل ۳-۳: شبکه‌ی محاسباتی اولیه با شماره‌گذاری سلول‌ها، ضلع‌ها و گره‌ها ۲۸
شکل ۳-۴: قرارداد چیدمان ضلع‌ها و گره‌های مرتبط با هر سلول در ماتریس اتصال سلول‌ها ۲۹
شکل ۳-۵: الگوی مورد نیاز برای ساختمان داده‌های ضلع‌ها ۳۲
شکل ۳-۶: نمایش جایگذاری گره و تقسیم سلولی برای ضلع‌های مرزی ۳۶
شکل ۳-۷: نمایش جایگذاری گره و تقسیم سلولی برای ضلع‌های داخلی ۳۶
شکل ۳-۸: تقسیم اولین سلول در اولین مرحله از ریزسازی شبکه ۳۷
شکل ۳-۹: شش مرحله ریزسازی ۳۸
شکل ۳-۱۰: وضعیت دو سلول قبل و بعد از الگوریتم تعویض ضلع ۴۰
شکل ۳-۱۱: مراحل ریزسازی به همراه الگوریتم تعویض ضلع با معیار دایره‌های محیطی و محاطی مثلث ۴۳
شکل ۳-۱۲: مراحل ریزسازی به همراه الگوریتم تعویض ضلع با معیار ارتفاع- قاعده مثلث ۴۴
شکل ۳-۱۳: هشت و ده مرحله ریزسازی به همراه الگوریتم تعویض ضلع و اعمال چشمه‌ی خطی ۴۶
شکل ۳-۱۴: وضعیت سلول‌ها قبل و بعد از هموارسازی ۴۷
شکل ۳-۱۵:هشت و ده مرحله ریزسازی به همراه الگوریتم تعویض ضلع، چشمه و هموارسازی ۴۸
شکل ۳-۱۶: شبکه‌ی بی‌سازمان با چشمه‌های متفاوت ۴۹
شکل۳-۱۷: وضعیت شبکه قبل و بعد از جابجایی هندسی ۵۱
شکل ۳-۱۸: یک شبکه‌ی نهایی با اعمال تمامی الگوریتم‌های بهبود کیفیت، چشمه و جابجایی هندسی ۵۱
شکل ۳-۱۹: نمای نزدیک جسم در حالت سکون و ۰/۰۷ ثانیه پس از شروع حرکت ۵۳
شکل ۳-۲۰: نمای نزدیک جسم در حالت سکون و ۰/۱۵ ثانیه پس از شروع حرکت ۵۳
شکل ۳-۲۱: نمای نزدیک جسم در ۰/۱۵ ثانیه پس از حرکت سقوط آزاد ۵۴
شکل ۳-۲۲: سلول‌های درشت و کشیده در ۰/۱۵ ثانیه پس از حرکت سقوط آزاد ۵۵
شکل ۳-۲۳: سلول‌های با مساحت منفی در ۰/۱۵ ثانیه پس از حرکت سقوط آزاد ۵۶
شکل ۳-۲۴: سلول‌های با زوایای نامناسب در ۰/۱۵ ثانیه پس از حرکت سقوط آزاد ۵۶
شکل ۳-۲۵: نامگذاری ضلع‌ها و گره‌های مرتبط با مرز متحرک ۵۷
شکل ۳-۲۶: نمایش ضلع‌های مورد نیاز برای فرایند حذف المان ۵۸

شکل ۳-۲۷: نمایش سلول‌های مورد نیاز برای فرایند حذف المان ۵۸
شکل ۳-۲۸: جابجایی مرز و کاهش کیفیت سلول‌های NC و NCR ۵۹
شکل ۳-۲۹: شماتیک فرایند حذف گره NVU و سلول‌های NC و NCR ۵۹
شکل ۳-۳۰: جابجایی مرز و کاهش کیفیت سلول‌های NC و NCL ۶۰
شکل ۳-۳۱: شماتیک فرایند حذف گره NVU و سلول‌های NC و NCL ۶۱
شکل ۳-۳۲: فرایند جابجایی سطرها در حذف المان ۶۲
شکل ۳-۳۳: فرایند حذف سطرهای آخر ۶۳
شکل ۳-۳۴: مثالی برای الگوریتم حذف یک ضلع ۶۴
شکل ۳-۳۵: دو وضعیت از جسم در زمان‌های متوالی سقوط آزاد با اعمال الگوریتم حذف ۶۵
شکل ۳-۳۶: وضعیت اول شبکه در لحظه‌ی سکون ۶۵
شکل ۳-۳۷: وضعیت دوم شبکه پس از جابجایی مرز جسم ۶۶
شکل ۳-۳۸: دو وضعیت از جسم در زمان‌های متوالی سقوط آزاد حرکت با اعمال الگوریتم ریزسازی ۶۷
شکل ۳-۳۹: وضعیت اول شبکه در لحظه‌ی سکون ۶۸
شکل ۳-۴۰: وضعیت دوم شبکه پس از جابجایی مرز ۶۸
شکل ۳-۴۱: نمایش ۲۳ مرحله از حرکت ۷۰
شکل ۳-۴۲: چهار وضعیت شبکه‌ی متحرک در حرکت سقوط آزاد ۷۰
ادامه‌ی شکل ۳-۴۲: چهار وضعیت شبکه‌ی متحرک در حرکت سقوط آزاد ۷۱
شکل ۳-۴۳: شبکه‌ی اولیه جهت تولید شبکه‌ی دو منطقه‌ای ۷۲
شکل ۳-۴۴: نمای نزدیک از جسم و نمایان سازی مرز متحرک، منطقه‌ی متحرک و تغییرپذیر ۷۴
شکل ۳-۴۵: شبکه‌ی متحرک در شروع و ۱/۰۵ ثانیه پس از سقوط آزاد ۷۵
شکل ۳-۴۶: شبکه‌ی متحرک در ۱/۴ و ۱/۶۵ ثانیه پس از سقوط آزاد ۷۵
شکل ۴-۱: نمایش دو نوع حجم محدود در شبکه‌های بی‌سازمان..... ۸۰
شکل ۴-۲: نمایش دو حجم محدود مجاور و بردار نرمال سطح در روش مرکز- سلول ۸۳
شکل ۴-۳: نمایش سه گره‌ی مجاور با گره‌ی P..... ۸۹
شکل ۴-۴: نمایش موقعیت فشارهای مورد نیاز در جمله‌ی اتلاف رای- چاو ۹۱
شکل ۵-۱: شبکه‌ی بی‌سازمان دو منطقه‌ای ثابت حول یک جسم دایره‌ای ۹۵
شکل ۵-۲: نمای نزدیک از جسم و نمایان سازی مرز متحرک، منطقه‌ی متحرک و تغییرپذیر ۹۵
شکل ۵-۳: نمای نزدیک سقوط آزاد جسم با فواصل زمانی ۰/۰۱ ثانیه ۹۶
شکل ۵-۴: سقوط آزاد جسم با فواصل زمانی ۰/۰۱ ثانیه ۹۷
شکل ۵-۵: نمای نزدیک حرکت پرتابی جسم با فواصل زمانی ۰/۰۱ ثانیه ۹۸

شکل ۵-۶: حرکت پرتابی جسم با فواصل زمانی ۰/۰۱ ثانیه ۹۹
شکل ۵-۷: جابجایی جسم متحرک در حرکت سقوط آزاد با فواصل زمانی ۰/۰۱ ثانیه ۱۰۰
شکل ۵-۸: تعداد سلول‌های شبکه در حرکت سقوط آزاد با فواصل زمانی ۰/۰۱ ثانیه ۱۰۱
شکل ۵-۹: نمای نزدیک شبکه‌ی مورد نیاز برای حل جریان سیال..... ۱۰۲
شکل ۵-۱۰: کانتور فشار در $Re = 40$..... ۱۰۲
شکل ۵-۱۱: کانتور سرعت u در $Re = 40$ ۱۰۳
شکل ۵-۱۲: کانتور سرعت v در $Re = 40$ ۱۰۳
شکل ۵-۱۳: خطوط جریان در $Re = 40$ ۱۰۴
شکل ۵-۱۴: ضریب فشار بر روی استوانه در $Re = 40$..... ۱۰۴
شکل ۵-۱۵: نمای نزدیک از شبکه‌ی متحرک در ۰/۶ ثانیه پس از سقوط آزاد ۱۰۵
شکل ۵-۱۶: کانتور فشار در ۰/۶ ثانیه پس از حرکت و $Re = 40$ ۱۰۵
شکل ۵-۱۷: نمای نزدیک از شبکه‌ی متحرک در ۱/۲ ثانیه پس از سقوط آزاد.....۱۰۶
شکل ۵-۱۸: کانتور فشار در ۱/۲ ثانیه پس از حرکت و $Re = 40$.....۱۰۶
شکل ۵-۱۹: نمای نزدیک از شبکه‌ی متحرک در ۱/۶ ثانیه پس از سقوط آزاد ۱۰۷
شکل ۵-۲۰: کانتور فشار در ۱/۶ ثانیه پس از حرکت و $Re = 40$ ۱۰۷

فهرست جدول‌ها

جدول ۳-۱: ماتریس اتصال سلول‌ها ۳۱
جدول ۳-۲: نمایان سازی نوع ضلع در ساختمان داده‌ها ۳۲
جدول ۳-۳: ماتریس اتصال ضلع‌ها ۳۳
جدول ۳-۴: نمایان سازی نوع گره در ساختمان داده‌ها ۳۴
جدول ۳-۵: مختصات گره‌ها ۳۴
جدول ۳-۶: نوع گره‌ها ۳۵
جدول ۳-۷: ماکزیمم و مینیمم طول مطلوب برای چشمه ۴۵
جدول ۳-۸: ماکزیمم و مینیمم طول مطلوب برای چشمه ۴۸
جدول ۳-۹: رابطه‌ی چشمه برای توابع مختلف ۴۹
جدول ۳-۱۰: نمایان سازی نوع ضلع در ساختمان داده‌های شبکه‌ی دو منطقه‌ای ۷۳
جدول ۳-۱۱: نمایان سازی نوع گره در ساختمان داده‌های شبکه‌ی دو منطقه‌ای ۷۳
جدول ۳-۱۲: نمایان سازی نوع سلول در ساختمان داده‌های شبکه‌ی دو منطقه‌ای ۷۳

فهرست علامت‌ها و اختصارها

مساحت مثلث	A
طول مشخصه‌ی جسم	a
ضریب سرعت حدسی حجم محدود P در معادله‌ی گسسته‌ی مومنتوم	a_P
ضریب سرعت حدسی حجم محدود R در معادله‌ی گسسته‌ی مومنتوم	a_R
متوسط ضرایب a_P حجم محدودهای مجاور به مرز m	a_m
ضریب فشار تصحیحی مرکز حجم محدود P	b_P
ضرایب فشار تصحیحی مراکز حجم محدودهای مجاور به P	b_1, b_2, b_3
جزء دیفرانسیلی مساحت	dA
قطر دایره‌ی محیطی مثلث	$D_{\text{محیطی}}$
قطر دایره‌ی محاطی مثلث	$D_{\text{محاطی}}$
قابلیت نفوذ در سطح سلول	D
جمله‌ی اتلاف رای- چاو	Dis
عمل‌گر دیورژانس	div
جزء دیفرانسیلی حجم	dV
شار جرم جابجا شده در واحد سطح حجم محدود	F
نیروهای حجمی در راستای j	f_j
عمل‌گر گرادیان	$grad$
ارتفاع مثلث	h
قاعده‌ی مثلث	l
طول مطلوب برای ضلع‌های شبکه	l_{Des}
سلول مجاور به مرز متحرک	NC
سلول‌های مورد نیاز در الگوریتم حذف المان	NCLU, NCRU
ضلع روی مرز متحرک	NE
دو ضلع سلول NC	NEL, NER
ضلع‌های مورد نیاز در الگوریتم حذف المان	NELL, NERR, NELU, NERU
گره‌های روی مرز متحرک NE و موجود در سلول NC	NVL, NVR

یک گره‌ی سلول NC	NVU
بردار نرمال سطح	$\boldsymbol{n}$
مولفه‌ی بردار نرمال سطح در راستای j	n_j
فشار سیال	p
فشار بی‌بعد	p^*
فشار تصحیحی	$p^{'}$
عدد بی‌بعد پکلت	Pe
فشارهای مورد نیاز در جمله‌ی اتلاف رای- چاو	p_{RR}, p_R, p_P, p_{PL}
عبارت چشمه در تصحیح فشار	Q^*
عدد رینولدز	Re
عبارت‌های چشمه در معادله‌های گسسته‌ی مومنتوم	S_u, S_v
عبارت چشمه	S_Φ
مولفه‌های سرعت	u, v
مولفه‌های سرعت بدون‌بعد	u^*, v^*
مولفه‌های سرعت حدسی در معادله‌ی گسسته‌ی مومنتوم	u^*, v^*
مولفه‌های تصحیحی سرعت مرکز حجم محدود	$u_P^{'}, v_P^{'}$
مولفه‌های تصحیحی سرعت مرزهای حجم محدود	$u_m^{'}, v_m^{'}$
سرعت جریان آزاد	u_∞
بردار سرعت سیال	$\boldsymbol{V}$
مختصات	x, y
مختصات بدون بعد	x^*, y^*
بردار موقعیت گره‌ی i در مرحله‌ی زمانی n جهت هموارسازی	$\vec{x}_i^n$
بردار موقعیت گره‌ی i در مرحله‌ی زمانی $n+1$ جهت هموارسازی	$\vec{x}_i^{n+1}$
خاصیت بقایی	Φ
مقدار Φ در حجم محدود در برگیرنده‌ی گره‌ی R	Φ_R
مقدار Φ در حجم محدود در برگیرنده‌ی گره‌ی P	Φ_P
مقدار Φ در مرز حجم محدود	Φ_m
مساحت سطح حجم محدود	ΔA
ضریب نفوذ	Γ
عمل‌گر گرادیان	∇

اختلاف فاصله‌ی افقی گره‌های P و R	δx_{RP}
اختلاف فاصله‌ی عمودی گره‌های P و R	δy_{RP}
لزجت دینامیکی سیال	μ
چگالی سیال	ρ

فصل اول

مقدمه و مروری بر پژوهش‌های پیشین

۱-۱ مقدمه

با نگرشی بر محیط پیرامون، مسائل بیشماری را می‌توان مشاهده نمود که در آن‌ها جریانی از سیال در ارتباط با اجسام با مرزهای متحرک[۱] می‌باشد. از این دسته مسائل می‌توان به جریان خون درون رگ‌ها با دیواره‌های انعطاف‌پذیر، جریان هوای دم و بازدم درون شش‌ها، حرکت کشتی‌ها بر روی امواج دریاها، پرواز پرندگان، جدایش ذخایر[۲] از هواپیماها، رهاشدن بمب و موشک از جنگنده‌ها، نوسانات ایروالاستیک[۳] بال‌ها، فرود هواپیماها بر روی باند پرواز، حرکت پیستون‌ها در موتورهای احتراق داخلی و بسیاری دیگر از این مسائل را نام برد.

شناخت این گونه مسائل و بررسی عملکرد آن‌ها، مستلزم آگاهی از جریان سیال مرتبط با آن‌ها می‌باشد. آگاهی از جریان سیال نیز مستلزم حل معادلات حاکم بر آن می‌باشد. جریان سیال به سه روش آزمایشگاهی، عددی و دقیق بررسی می‌شوند. از آنجایی‌که معادلات حاکم بر جریان‌های پیچیده‌ی سیال حل دقیق ندارند، به منظور بررسی جریان سیال دو روش عددی و آزمایشگاهی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. هرکدام از این دو روش معایب و مزایای مخصوص به خود را دارا می‌باشند. روش‌های آزمایشگاهی اگر چه دارای دقتی بالا می‌باشند، اما محدود، زمان‌بر و گران می‌باشند. در مقابل روش‌های عددی مقرون به صرفه و اقتصادی می‌باشند. اگر چه روش‌های عددی به دلیل وجود منابع متعدد خطا می‌توانند حلی متفاوت با فیزیک واقعی مسئله ارائه دهند، ولی در صورت ارزیابی با نتایج معتبر موجود می‌توانند مطلوب تلقی شوند.

---

[۱] Moving boundary

[۲] Store separation problem

[۳] Aeroelastic fluctuation

شبیه‌سازی جریان سیال در مسائل با مرز متحرک غالبا از دو بخش تشکیل می‌شوند. این دو بخش شامل تولید شبکه‌ی محاسباتی متحرک و حل جریان گذرای سیال می‌باشند. هرکدام از این دو بخش خود به تنهایی مبحثی جداگانه جهت مطالعه و بررسی می‌باشند. این امر سبب پیدایش شاخه‌هایی جدید تحت عناوین دینامیک سیالات محاسباتی با مرزهای متحرک[۱] و شبکه‌های متحرک[۲] شده است.

در اکثر روش‌های عددی نیاز به یک شبکه‌ی محاسباتی امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. تحلیل مسائل با مرز متحرک نیز نیازمند مطالعه‌ی شبکه‌ی مورد نیاز برای شبیه‌سازی جریان سیال می‌باشد. در این گونه مسائل یک شبکه‌ی ثابت به تنهایی نمی‌تواند پاسخگوی فیزیک واقعی مسئله باشد. چرا که جسم در لحظه‌های مختلف در مکان‌های متفاوت قرار می‌گیرد. بنابرین در هر لحظه باید شبکه‌ای متناسب با مکان جسم در اطراف آن تولید گردد. این امر منجر به ایجاد نگرشی جدید در تولید شبکه‌های محاسباتی، به عنوان شبکه‌های محاسباتی متحرک شده است.

روش‌ها و الگوریتم‌های بسیاری برای شبکه‌های متحرک رشد و توسعه یافته‌اند. هرکدام از این روش‌ها متناسب با نوع حرکت جسم تولید شده‌اند. به بیانی دیگر شبکه و روش مورد نیاز برای حرکت‌های با دامنه‌ی جابجایی پائین می‌تواند متفاوت با شبکه و روش به کار رفته در حرکت‌های با دامنه‌ی جابجایی زیاد قرار گیرد. به همین منظور نوع حرکت جسم و میزان جابجایی، به عنوان عوامل اصلی در انتخاب روش‌های تولید شبکه‌های متحرک شناخته شده‌اند.

امروزه بحث اصلی بر روی شبکه‌های متحرک، روش‌ها و الگوریتم‌هایی است که توانایی شبیه‌سازی حرکت‌های با دامنه جابجایی زیاد[۳] را داشته باشند. چرا که در این حرکت‌ها مناطق بیشتری از شبکه‌های محاسباتی تحت تاثیر قرار می‌گیرند. به عنوان نمونه از این حرکت‌ها می‌توان به مسئله‌ی جدایش ذخائر و یا سقوط موشک از جنگنده‌ها اشاره نمود. در انتخاب روش، برای حرکت شبکه‌های محاسباتی، عوامل متفاوتی تاثیر گذارند. از جمله این عوامل می‌توان به نوع حرکت جسم، هندسه‌ی جسم و نوع شبکه‌ی آن، اشاره نمود. به طور مثال روشی که برای حرکت‌های خطی استفاده می‌شود، متفاوت با حرکت‌های چرخشی می‌باشد. همچنین روشی که

[۱] Computational fluid dynamic with moving boundaries

[۲] Moving grid

[۳] Large displacement

برای حرکت شبکه‌های باسازمان[۱] به کار می‌رود متفاوت با شبکه‌های بی‌سازمان[۲] می‌باشد. به همین منظور با در نظر گرفتن هندسه‌ی جسم، نوع حرکت آن و نوع شبکه‌ی محاسباتی، می‌توان یک روش برای حرکت شبکه‌های محاسباتی تولید نمود.

معمولا متناسب با نوع روش عددی و نوع هندسه‌ی یک جسم شبکه‌های محاسباتی متفاوتی برای تحلیل مسائل به کار می‌روند. به طور مثال برای تحلیل جریان در اطراف هندسه‌های مستطیلی از شبکه‌های محاسباتی باسازمان بیشتر استفاده می‌شود و برای هندسه‌های منحنی‌الشکل شبکه‌های بی‌سازمان بهتر واقع شده‌اند. در مسائل با مرز متحرک مرزهای میدان در مراحل زمانی تغییر می‌کنند. این تغییرات و جابجایی‌ها الزاما در یک راستا نمی‌باشند و می‌توانند در راستاهای منحنی‌الخط قرار بگیرند. به همین منظور نمی‌توان این گونه مسائل را به راحتی در شبکه‌های باسازمان مدل کرد. اکثرا این گونه مسائل در شبکه‌های بی‌سازمان که مدل‌سازی هندسی در آن‌ها قدرتمندتر است انجام می‌گیرد. این امر سبب شده است که بحث تولید شبکه‌های متحرک در شاخه‌ی شبکه‌های بی‌سازمان قرار گیرد و معمولا از آن تحت عنوان شبکه‌های بی‌سازمان متحرک[۳] نام برده می‌شود.

شبکه‌های بی‌سازمان در روش‌های متفاوتی تولید می‌شوند. متناسب با نوع روش‌های تولید شبکه‌ی بی‌سازمان می‌توان روش‌هایی را انتخاب نمود که بتوان در آن‌ها بهترین شبکه‌ی متحرک را تولید نمود. زمان تولید شبکه‌ی متحرک، کیفیت سلول‌های شبکه در مراحل زمانی متوالی و جستجو در میان اطلاعات شبکه از جمله عواملی است که در انتخاب روش تولید شبکه‌ی متحرک موثر واقع می‌شود.

پس از مطالعه‌ی روش‌ها و الگوریتم‌ها جهت مدل‌سازی شبکه‌های متحرک برای حرکت‌های مختلف، نیاز به آگاهی از چگونگی حل جریان در این گونه مسائل احساس می‌شود. در مسائل معمولی که جسم مورد مطالعه در مکان ثابتی قرار دارد، شبکه‌ی محاسباتی ثابت بوده و تحلیل جریان می‌تواند متناسب با نوع مسئله به صورت پایدار[۴] و یا گذرا انجام شود. دسترسی به اطلاعات

---

[۱] Structured grid

[۲] Unstructured grid

[۳] Moving unstructured grid

[۴] Steady state

جریان در شبکه‌های ثابت در زمان‌های متوالی به راحتی امکان‌پذیر است. زیرا مکان ذخیره‌سازی اطلاعات جریان در مراحل زمانی متوالی ثابت است و تغییر نمی‌کنند. این در حالی است که در مسائل با مرز متحرک در هر لحظه‌ی زمانی مکان جسم تغییر کرده و متناسب با آن، شبکه‌ی اطراف جسم نیز تغییر می‌کند. در این حالت مکان ذخیره‌سازی اطلاعات درون شبکه در زمان‌های متوالی در حال تغییر است. لذا نیاز به یک سری درونیابی‌های اطلاعات در طول حرکت می‌باشد. این امر سبب می‌شود که بررسی نحوه‌ی حل جریان در این شبکه‌ها خود به عنوان مبحثی در کنار روش‌ها و الگوریتم‌های تولید این شبکه‌ها قرار بگیرد. بدین منظور آگاهی از نحوه‌ی حل جریان سیال می‌تواند تاثیر بزرگی بر انتخاب روش حرکت شبکه و یا مدل‌سازی آن نماید.

۱-۲ مروری بر پژوهش‌های پیشین

اگر چه در دو دهه‌ی اخیر پژوهش‌ها و مطالعاتی در زمینه‌ی شبکه‌های بی‌سازمان متحرک و جریان‌های آن‌ها انجام گرفته است، اما نیاز به مطالعه و بررسی بیشتر در این گونه مسائل امری ضروری می‌باشد. معمولا هرکدام از دو زمینه‌ی شبکه‌های متحرک و حل جریان گذرا[۱]، جداگانه بررسی می‌شوند. به همین منظور در ذیل به پژوهش‌هایی که در این دو زمینه صورت گرفته است، به طور جداگانه پرداخته شده است. پژوهش‌ها و روش‌های موجود در هر بخش با توجه به تقدم زمانی ارائه شده‌اند.

پژوهش‌های شبکه‌های متحرک

باتینا[۲] در سال ۱۹۹۰ مدل فنر خطی[۳] را برای حرکت شبکه روی شبکه‌های بی‌سازمان دو بعدی ارائه نمود. این روش به منظور حل غیردائم جریان اویلر اطراف بال نوسان کننده ارائه شده است. در این مدل هر ضلع از شبکه با یک فنر خطی شبیه‌سازی می‌شود. سختی هر فنر معادل با

[۱] Unsteady

[۲] Batina

[۳] Lineal spring