

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



تحلیل عددی جریان جابجایی طبیعی مغشوش در حفره با استفاده از روش شبکه بولتزمان

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

رشته مهندسی مکانیک-گرایش تبدیل انرژی

اساتید راهنما:

دکتر مفید گرجی بندپی

دکتر داوود دمیری گنجی

زنده یاد دکتر سید فرید حسینی زاده

نگارش:

حسن سجادی

پاییز ۱۳۹۰

تقدیم بہ

ہمسفر عزیزم

روح بزرگ مادرم

و دست های پاک و مینہ بستہ پدرم

برفود لازم می دانم در ابتدا از زحمات مرحوم زنده یاد **دکتر سید فرید حسینی زاده** که راهنمایی های ایشان همیشه مشکل گشا بود تقدیر و تشکر نمایم روحش شاد و یادش گرامی، همچنین از زحمات و مساعدت **پروفسور مفید گرجی** و **دکتر داوود دمیری گنجی** که راهگشای انجام این پایان نامه بوده است تشکر و قدردانی می نمایم. از سایر اساتید ارزنده دانشکده مهندسی مکانیک از جمله دکتر رنجبر، دکتر صدیقی و دکتر فرهادی که در طی این دوره از وجودشان بهره مند شده تقدیر و تشکر می نمایم. از همسر و خانواده عزیزم که در تمام مراحل مشوق من بودند سپاسگذارم. در آخر از دوست خوبم غلامرضا کفایتی که در کنار هم مشکلات انجام پروژه را با کمک یکدیگر از پیش روی برداشتیم تشکر می کنم.

چکیده

در این پایان‌نامه، شبیه‌سازی عددی جریان و انتقال حرارت جابجایی طبیعی آشفته در داخل یک حفره قائم الزاویه با نسبت منظرهای مختلف بوسیله روش شبکه بولتزمن (LBM)^۱ بر پایه مدل ادی های بزرگ (LES)^۲ بررسی شده است. جریان و انتقال حرارت در محدوده عدد رایلی بین 10^7 تا 10^{10} بررسی شده است. در اینجا تاثیر نسبت منظرهای مختلف و همچنین تاثیر عدد پراتل مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج شامل خطوط جریان، کانتور دما، توزیع محلی و متوسط عدد ناسلت، توزیع دما و سرعت در وسط حفره برای نسبت منظرهای مختلف ($0/5 < AR < 2$)، اعداد رایلی و پراتل متفاوت ($Pr=6/2, 4, 2, 0/71$) می باشد. مقایسه نتایج این پژوهش با نتایج آزمایشگاهی و عددی منتشر شده قبلی، نشان می‌دهد که این روش دارای دقت بالایی می‌باشد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که با افزایش عدد رایلی شدت آشفتنگی و به دنبال آن عدد ناسلت افزایش می‌یابد و با افزایش نسبت منظر عدد ناسلت میانگین کاهش پیدا می‌کند، همچنین با افزایش عدد پراتل به علت افزایش ویسکوزیته سیال میزان اغتشاش موجود در جریان کاهش پیدا می‌کند. با توجه با نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود که بیشترین گردابه‌ها در گوشه بالای دیواره گرم و پایین دیواره سرد تشکیل می‌شود که در این نواحی بیشترین مقدار سرعت و عدد ناسلت نیز مشاهده می‌گردد.

کلمات کلیدی: جریان آشفته، روش شبکه بولتزمن (LBM)، مدل ادی های بزرگ (LES)، نسبت منظر، عدد پراتل.

^۱ Lattice Boltzmann Method

^۲ Large Eddy Simulation

فهرست مطالب

۱	فصل اول.....
۱-۱-۱	مقدمه
۲-۱	مروری بر کارهای انجام شده
۵	فصل دوم.....
۱-۲	مقدمه
۲-۲	روش دینامیک مولکولی
۳-۲	شبکه خودکار سلول گاز
۴-۲	روش شبکه بولتزمن
۵-۲	گسسته کردن فضای فاز
۶-۲	ارتباط با معادله ناویر-استوکس
۷-۲	الگوریتم حل
۸-۲	تفاوت حلگر ناویر-استوکس و بولتزمن
۹-۲	شرایط مرزی سرعت
۱۰-۲	شرایط مرزی باز (سرعت)
۱-۱۰-۲	شرط مرزی پرپودیک
۲-۱۰-۲	شرط مرزی تقارن
۳-۱۰-۲	شرط مرزی با سرعت معلوم در مرز
۴-۱۰-۲	شرط مرزی خروجی گرادینان صفر
۱۱-۲	شرایط مرزی دیوار (سرعت)
۱-۱۱-۲	کمانه کردن روی گره ها و کمانه کردن روی لینک ها
۱۲-۲	معادله بولتزمن برای دما
۱۳-۲	شرایط مرزی دما
۱-۱۳-۲	شرط مرزی خروجی

۲-۱۳-۲- شرایط مرزی دمایی روی مرزهای آدیاباتیک ۲۹

۲-۱۳-۳- شرایط مرزی دمایی با دمای مشخص ۲۹

فصل سوم ۳۰

۱-۳- جریان توربولانس ۳۱

۲-۳- خصوصیات جریان توربولانس ۳۱

۳-۳- روش های مدل سازی جریان آشفته ۳۲

۴-۳- معادلات متوسط گیری شده ناویر-استوکس ۳۳

۵-۳- ویسکوزیته آشفتگی ۳۵

۱-۵-۳- رابطه بوزینسک ۳۵

۲-۵-۳- رابطه اسپیزال ۳۶

۳-۵-۳- رابطه لاندر ۳۶

۶-۳- مدل های آشفتگی ۳۷

۱-۶-۳- مدل صفر معادله ای ۳۸

۲-۶-۳- مدل یک معادله ای ۳۸

۳-۶-۳- مدل دو معادله ای ۳۹

۱-۳-۶-۳- مدل $k - \epsilon$ ۴۰

۲-۳-۶-۳- مدل استاندارد $k - \omega$ ۴۱

۴-۶-۳- مدل ادیهای بزرگ (LES) ۴۲

۱-۴-۶-۳- اسماغورنسکی و مدل های مربوطه ۴۴

۵-۶-۳- شبیه سازی مستقیم عددی (DNS) ۴۶

فصل چهارم ۴۹

۱-۴- هندسه مورد بررسی ۵۰

۲-۴- روش شبکه بولتزمن بر پایه مدل ادیهای بزرگ ۵۱

۱-۲-۴- مدل ادی های بزرگ اسماغورنسکی ۵۱

۲-۲-۴- اعمال مدل ادیهای بزرگ اسماغورنسکی در روش شبکه بولتزمن ۵۲

۱-۲-۲-۴- نحوه بدست آوردن مقدار اولیه زمان آرامش ۵۳

۲-۲-۲-۴- نحوه بدست آوردن تانسور تنش (\overline{S}) ۵۴

- ۳-۴- اعمال مدل $k-\epsilon$ در روش شبکه بولتزمن ۵۵
- ۴-۴- جزئیات حل عددی ۵۷
- ۴-۴-۱ بررسی استقلال از شبکه و انتخاب شبکه مناسب ۵۷

فصل پنجم ۶۰

- ۱-۵- اعتبارسنجی ۶۱
- ۱-۱-۵- پروفیل دما ۶۱
- ۲-۱-۵- پروفیل سرعت ۶۱
- ۳-۱-۵- عدد ناسلت ۶۲
- ۴-۱-۵- کانتور جریان و دما ۶۳
- ۲-۵- نتایج ۶۷
- ۱-۲-۵- نتایج برای سیال هوا ($Pr=0.71$) ۶۷
- ۲-۲-۵- نتایج برای سیال آب ($Pr=6/2$) ۷۷
- ۳-۵- مقایسه نتایج برای سیال هوا و آب ۸۵
- ۴-۵- تاثیر عدد پراتل ۸۶
- ۵-۵- تاثیر نسبت منظر ۸۸
- ۶-۵- تاثیر عدد رایلی ۸۹

فصل ششم ۹۱

- ۱-۶- نتیجه گیری ۹۲
- ۲-۶- پیشنهادات ۹۲

منابع ۹۳

فهرست شکل‌ها

فصل دوم

- شکل (۱-۲): ماهیت میکروسکوپی سیال..... ۷
- شکل (۲-۲): مدل FHP..... ۹
- شکل (۳-۲): مرحله برخورد در مدل شش سرعتی..... ۱۰
- شکل (۴-۲): مرحله برخورد در مدل شش سرعتی بصورت متغیر بولی..... ۱۱
- شکل (۵-۲): طرحواره تغییرات سیستم از لحظه t به $t + \delta t$ ۱۱
- شکل (۶-۲): شبکه D2Q9..... ۱۴
- شکل (۷-۲): مقادیر مجهول توابع توزیع درون کانال..... ۱۸
- شکل (۸-۲): نمایش شرایط پرپودیک در دامنه حل..... ۱۹
- شکل (۹-۲): نمایش چگونگی قرار گرفتن مرزهای ورودی و خروجی پرپودیک و تبادل مقادیر \tilde{f}_α در آنها..... ۲۰
- شکل (۱۰-۲): شرط مرزی تقارن..... ۲۱
- شکل (۱۱-۲): کمانه کردن روی نقاط مرزی جسم جامد..... ۲۵
- شکل (۱۲-۲): چگونگی قرارگیری مرز خمیده بر روی شبکه..... ۲۷

فصل سوم

- شکل (۱-۳): نمایش شماتیک حرکت آشفته (چپ) و وابستگی زمانی مؤلفه سرعت در یک نقطه (راست)..... ۴۲

فصل چهارم

- شکل (۱-۴): هندسه مورد بررسی..... ۵۰
- شکل (۲-۴): تغییرات دما در وسط حفره در حالت $RA=10^7$ و $AR=2$ برای شبکه بندی های مختلف..... ۵۸
- شکل (۳-۴): تغییرات سرعت عمودی در وسط حفره در حالت $RA=10^7$ و $AR=2$ برای شبکه بندی های مختلف..... ۵۸
- شکل (۴-۴): تغییرات دما در وسط حفره در حالت $RA=10^8$ و $AR=1$ و $PR=2$ برای شبکه بندی های مختلف..... ۵۹
- شکل (۵-۴): تغییرات سرعت افقی در وسط حفره در حالت $RA=10^8$ و $AR=1$ و $PR=2$ برای شبکه بندی های مختلف..... ۵۹

فصل پنجم

- شکل (۵-۱): مقایسه پروفیل دمای بدست آمده از تحقیق حاضر در وسط حفره مربعی برای عدد رایلی $1/58 \times 10^9$ با نتایج آزمایشگاهی..... ۶۱
- شکل (۵-۲): مقایسه سرعت عمودی بدست آمده از تحقیق حاضر برای عدد رایلی $1/58 \times 10^9$ در وسط حفره مربعی با نتایج آزمایشگاهی..... ۶۲
- شکل (۵-۳): مقایسه عدد ناسلت موضعی بر روی دیواره گرم بدست آمده از تحقیق حاضر برای عدد رایلی $1/58 \times 10^9$ با نتایج آزمایشگاهی..... ۶۲
- شکل (۵-۴): مقایسه کانتور دما (الف) و جریان (ب) بدست آمده از تحقیق حاضر (چپ) برای عدد رایلی 10^8 با نتایج بدست آمده توسط دیکزیت و بابو (راست)..... ۶۴
- شکل (۵-۵): مقایسه کانتور دما (الف) و جریان (ب) بدست آمده از تحقیق حاضر (چپ) برای عدد رایلی 10^7 با نتایج بدست آمده توسط دیکزیت و بابو (راست)..... ۶۵
- شکل (۵-۶): مقایسه نتایج بدست آمده از تحقیق حاضر (چپ) برای کانتور دما (الف) و جریان (ب) در عدد رایلی 10^7 با نتایج جهانشاهی و همکاران (راست) (خط چین برای سیال آب)..... ۶۶
- شکل (۵-۷): کانتور جریان برای اعداد رایلی مختلف در نسبت منظرهای متفاوت برای سیال هوا ($Pr=0.71$)..... ۶۸
- شکل (۵-۸): کانتور دما برای اعداد رایلی مختلف در نسبت منظرهای متفاوت برای سیال هوا ($Pr=0.71$)..... ۷۰
- شکل (۵-۹): توزیع عدد ناسلت موضعی بر روی دیواره سرد و گرم در نسبت منظرهای مختلف برای عدد رایلی 10^7 (الف)، 10^8 (ب) و 10^9 (پ)..... ۷۱
- شکل (۵-۱۰): تغییرات سرعت عمودی در وسط حفره در نسبت منظرهای مختلف برای اعداد رایلی 10^7 (الف)، 10^8 (ب) و 10^9 (پ)..... ۷۲
- شکل (۵-۱۱): تغییرات سرعت عمودی در وسط حفره در نسبت منظر ۱ برای اعداد رایلی مختلف..... ۷۳
- شکل (۵-۱۲): تغییرات ناسلت موضعی روی دیواره سرد و گرم در نسبت منظر ۱ برای اعداد رایلی مختلف..... ۷۳
- شکل (۵-۱۳): نمودار تغییر دما در وسط حفره در نسبت منظرهای مختلف برای اعداد رایلی 10^7 (الف)، 10^8 (ب)، 10^9 (پ)..... ۷۴
- شکل (۵-۱۴): نمودار تغییر دما در وسط حفره در نسبت منظر ۱ برای اعداد رایلی مختلف..... ۷۵
- شکل (۵-۱۵): نمودار عدد ناسلت میانگین برای نسبت منظرهای مختلف و اعداد رایلی متفاوت..... ۷۶
- شکل (۵-۱۶): تغییرات عدد ناسلت بی بعد شده نسبت به عدد ناسلت میانگین در نسبت منظر ۰/۵ برای اعداد رایلی و نسبت منظرهای مختلف..... ۷۶
- شکل (۵-۱۷): کانتور جریان برای اعداد رایلی مختلف در نسبت منظرهای متفاوت برای سیال آب ($Pr=6/2$)..... ۷۸
- شکل (۵-۱۸): کانتور دما برای اعداد رایلی مختلف در نسبت منظرهای متفاوت برای سیال آب ($Pr=6/2$)..... ۷۹
- شکل (۵-۱۹): توزیع عدد ناسلت موضعی بر روی دیواره سرد و گرم در نسبت منظرهای مختلف برای عدد رایلی 10^7 (الف)، 10^8 (ب) و 10^9 (پ)..... ۸۰

- شکل (۵-۲۰): تغییرات سرعت افقی در وسط حفره در نسبت منظرهای مختلف برای اعداد رایلی 10^y (الف)، 10^a (ب) و 10^9 (پ) ۸۱
- شکل (۵-۲۱): تغییرات سرعت عمودی در وسط حفره در نسبت منظرهای مختلف برای اعداد رایلی 10^y (الف)، 10^a (ب) و 10^9 (پ) ۸۲
- شکل (۵-۲۲): تغییرات سرعت عمودی در وسط حفره برای اعداد رایلی مختلف و نسبت منظر ۱. ۸۳
- شکل (۵-۲۳): تغییرات سرعت افقی در وسط حفره برای اعداد رایلی مختلف و نسبت منظر ۱. ۸۳
- شکل (۵-۲۴): نمودار تغییر دما در وسط حفره در نسبت منظرهای مختلف برای اعداد رایلی 10^y (الف)، 10^a (ب)، 10^9 (پ) ۸۴
- شکل (۵-۲۵): مقایسه تغییرات سرعت عمودی در وسط حفره مربعی برای عدد رایلی 10^9 و اعداد پرانتل مختلف. ۸۵
- شکل (۵-۲۶): مقایسه تغییرات دما در وسط حفره مربعی در عدد رایلی 10^9 برای اعداد پرانتل مختلف. ۸۶
- شکل (۵-۲۷): کانتور دما در عدد رایلی 10^8 و نسبت منظر ۱ برای اعداد پرانتل مختلف (الف: $Pr=0/71$ ، ب: $Pr=2$ ، پ: $Pr=4$ ، ت: $Pr=6/2$) ۸۷
- شکل (۵-۲۸): کانتور جریان در عدد رایلی 10^8 و نسبت منظر ۱ برای اعداد پرانتل مختلف (الف: $Pr=0/71$ ، ب: $Pr=2$ ، پ: $Pr=4$ ، ت: $Pr=6/2$) ۸۷
- شکل (۵-۲۹): تغییرات دما در وسط حفره مربعی برای عدد رایلی 10^8 و اعداد پرانتل مختلف. ۸۸
- شکل (۵-۳۰): کانتور دما در عدد رایلی 10^8 و پرانتل ۴ برای نسبت منظرهای مختلف (الف: $AR=0/5$ ، ب: $AR=1$ ، پ: $AR=1/5$) ۸۸
- شکل (۵-۳۱): نمودار تغییرات سرعت افقی در وسط حفره برای نسبت منظرهای مختلف در عدد رایلی 10^8 و پرانتل ۴ ۸۹
- شکل (۵-۳۲): کانتور دما در عدد پرانتل $6/2$ و نسبت منظر $0/5$ برای اعداد رایلی مختلف (الف: $Ra=10^7$ ، ب: $Ra=10^8$ ، پ: $Ra=10^9$ ، ت: $Ra=10^{10}$) ۸۹
- شکل (۵-۳۳): تغییرات دما در وسط حفره در نسبت منظر $0/5$ و عدد پرانتل $6/2$ برای اعداد رایلی مختلف. ۹۰
- شکل (۵-۳۴): تغییرات سرعت عمودی در وسط حفره در نسبت منظر $0/5$ و عدد پرانتل $6/2$ برای اعداد رایلی مختلف. ۹۰

فهرست جداول

فصل سوم

- جدول (۱-۳): ضرایب پیش فرض برای معادله لاندنر..... ۳۷
- جدول (۲-۳): پارامترهای مختلف به عنوان متغیر دوم در مدل دو معادله‌ای..... ۳۹
- جدول (۳-۳): ثوابت مدل $k - \mathcal{E}$ ۴۱
- جدول (۴-۳): ثوابت مدل $k - \omega$ ۴۲

فصل پنجم

- جدول (۱-۵): مقایسه عدد ناسلت میانگین روی دیواره گرم بدست آمده با نتایج عددی قبلی..... ۶۳
- جدول (۲-۵): عدد ناسلت میانگین در اعداد رایلی و نسبت منظرهای مختلف برای سیال هوا..... ۷۷
- جدول (۳-۵): عدد ناسلت میانگین در اعداد رایلی و نسبت منظرهای مختلف برای سیال آب..... ۸۵

فهرست علائم

x	جهت افقی
y	جهت قائم
f	تابع توزیع سرعت قبل از برخورد
f^{eq}	تابع توزیع تعادلی سرعت
e	سرعت گسسته شده شبکه بولتزمن
w	فاکتور وزنی
c	سرعت در مقیاس شبکه بولتزمن
u	سرعت در راستای افقی
v	سرعت در راستای قائم
\tilde{f}	تابع توزیع سرعت بعد از برخورد
T	دما
g	تابع توزیع دما قبل از برخورد
\tilde{g}	تابع توزیع دما بعد از برخورد
g^{eq}	تابع توزیع تعادلی دما

C_{μ}	ضریب لزجت در مدل آشفتگی
$C_{1\varepsilon}$	مقدار ثابت در معادله اضمحلال لزج
$C_{2\varepsilon}$	مقدار ثابت در معادله اضمحلال لزج
K	ضریب رسانش حرارتی
T_H	دمای دیواره گرم
T_C	دمای دیواره سرد
L	عرض حفره
H	ارتفاع حفره
AR	نسبت منظر $(\frac{L}{H})$
Ra	عدد رایلی $\left(\frac{g \beta \Delta T M^3}{\alpha \nu}\right)$
$ \bar{S} $	تانسور تنش
Ma	عدد ماخ
Pr	عدد پرانتل (ν / σ)

فهرست علائم یونانی

ρ	چگالی سیال
τ_m	زمان آرامش شبکه برای سرعت
ν	لزجت سینماتیکی سیال
τ_h	زمان آرامش شبکه برای دما
σ	ضریب نفوذپذیری سیال
ϕ	متغیر
Γ	ضریب نفوذ
μ	ویسکوزیته
ω	فرکانس انحلال
ε	نرخ انحلال لزج
ν_t	ادی ویسکوزیتی

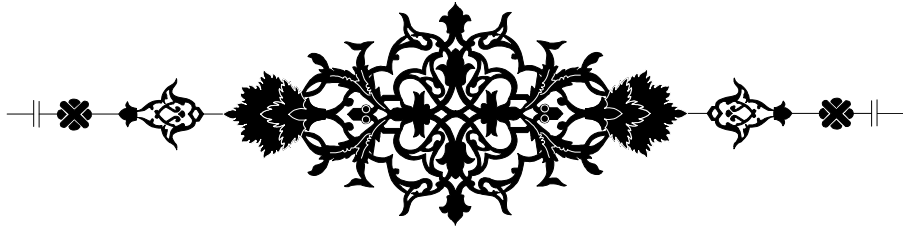
فهرست زیرنویسها

α	شماره گر جهت گسسته شده بردار شبکه بولتزمن
m	ممنتوم
s	سرعت صوت
x	جهت افقی
y	جهت قائم
w	دیواره
t	توربولانس

فهرست بالانویسها

'	ترمهای نوسانی
—	ترمهای متوسط

فصل اول



مقدمہ

۱-۱- مقدمه

در دهه اخیر روش شبکه بولتزمن برای شبیه‌سازی جریان سیال و انتقال حرارت مورد توجه بسیاری از مهندسين قرار گرفته است. برخلاف روشهای CFD^۳ مرسوم، روش شبکه بولتزمن بر پایه مدل میکروسکوپی و معادله جنبشی مزوسکوپی^۴ استوار است که مجموعه رفتار ذرات در یک سیستم، برای شبیه‌سازی مکانیک پیوسته به کار گرفته می‌شود. در روش شبکه بولتزمن، کلیه محاسبات صریح بوده و نیاز به حل هیچ دستگاهی از معادلات نمی‌باشد. به دلیل ماهیت موضعی محاسبات، این روش به سادگی قابلیت موازی شدن را دارد. همچنین به دلیل سهولت اعمال شرایط مرزی، برای حل مسائلی که دارای هندسه پیچیده می‌باشند دارای کاربرد فراوانی است. از کاربردهای مهم آن می‌توان به شبیه‌سازی جریان سیال و انتقال حرارت در مسائلی مانند جریان درهم، جریان با مرزهای پیچیده (اجسام متخلخل، سطوح منحنی متحرک و...)، جریان چند فازی، جریان سیال غیر نیوتنی (شبیه‌سازی‌های جریان خون) و... اشاره کرد. جریان مغشوش علی‌رغم پیشرفت بسیار زیاد علوم در سده گذشته هنوز یکی از مشکلات بزرگ برای دانشمندان و مهندسين می‌باشد. [۱] علی‌رغم کوشش‌های بسیاری که تا به امروز در این زمینه صورت گرفته است به علت پیچیدگی، این نوع جریان هنوز از مسائل حل نشده و پیچیده علوم فیزیک می‌باشد. برای حل جریان مغشوش مدل‌های مختلفی ارائه شده است که هر کدام برای رژیم‌های خاص جریان و حتی در ناحیه خاصی از جریان معتبر می‌باشند یکی از این مدل‌های که امروزه بسیار مورد توجه می‌باشد مدل‌های بزرگ می‌باشد. در روش‌های بزرگ معادلات نسبت به فواصل بسیار کوچک انتگرالگیری می‌شود و در نتیجه اغتشاشات بسیار کوچک که مربوط به ادی‌های کوچک در جریان می‌باشد از معادلات حذف می‌گردند. معادلات بدست آمده معرف رفتار ادی‌های بزرگ در جریان می‌باشند. اثرات ادی‌های کوچک بر روی ادی‌های بزرگ از طریق مدل کردن آنها در معادلات منظور می‌گردد.

۱-۲- مروری بر کارهای انجام شده

مطالعات گسترده‌ای در زمینه جریان داخل حفره مربعی در رژیم جریان آرام [۶-۲] و همچنین جریان در حالت گذار و رژیم مغشوش [۷-۹] توسط محققین انجام شده است. رژیم جریان جابجایی آزاد برای اعداد رایلی کمتر از 10^6 ، آرام و برای اعداد رایلی بزرگتر از 10^6 ، مغشوش می‌باشد. محققین زیادی جریان جابجایی آزاد آرام داخل حفره مربعی را با استفاده از روش شبکه بولتزمن مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۷-۱۰] اما با توجه به پیچیدگی جریان مغشوش و تازگی

^۳ Computational Fluid Dynamics

^۴ Mesoscopic

روش شبکه بولتزمن متأسفانه مطالعات کمی در زمینه تحلیل جریان مغشوش با استفاده از روش بولتزمن انجام شده است [۲۱-۱۸]. کارهای مختلفی نیز در مورد جریان نانو سیال با استفاده از روش شبکه بولتزمن انجام شده است [۲۴-۲۲]. اولین قدمی که در رابطه با روش ادی‌های بزرگ برداشته شد توسط اسماگورونسکی^۵ [۲۵] بود که جریان سه بعدی هوای اطراف جو را بررسی و ادی‌های بزرگ جریان را از ادی‌های کوچک جدا نموده و ادی‌های بزرگ را مورد مطالعه قرار داده است. البته در آن زمان به علت کمبود حافظه کامپیوتری وی توانست فقط برای حالتی که تعداد نقاط داخل جریان سیال نسبتاً کم باشند مسئله را حل کند. دیردارف^۶ [۲۶] جریان در داخل کانال را با استفاده از روش ادی‌های بزرگ بررسی نمود و نتایج بسیار جالب و اساسی از جریان داخل کانال ارائه داد. سپس شومان^۷ [۲۷] و گرتزباخ^۸ [۲۸] روش وی را دنبال کرده و توسعه دادند. آمپوفو و کارایانیس^۹ [۲۹] تحلیل آزمایشگاهی بر روی جریان مغشوش داخل حفره مربعی انجام دادند. آنها حفره‌ای با ابعاد 0.75×0.75 با عمق $1/5$ را طراحی کردند که می‌توان گفت جریان ۲ بعدی را ایجاد می‌کند. آنها دمای دیواره سرد و گرم را به ترتیب در 10 و 50 درجه سانتی‌گراد ثابت نگه داشتند که با این اعداد عدد رایلی برابر $10^9 \times 1/58$ بدست می‌آید. آنها مقادیر مختلف سرعت و دما را در محل‌های مختلف حفره با استفاده از سرعت سنج و ترموکوپل‌های مختلف ارائه دادند. آنها مشاهده کردند که به دلیل ضخامت کم لایه مرزی حرارتی در پایین دیواره گرم و بالای دیواره سرد بیشترین مقدار ناسلت موضعی در این مناطق می‌باشد. همچنین آنها پیش‌بینی کردند که مدل ادی‌های بزرگ و $k - \varepsilon$ برای حل این نوع از جریان مناسب می‌باشند که البته مدل ادی‌های بزرگ بهتر و دقیقتر می‌تواند این نوع جریان را مدل کند. لیو و همکاران^{۱۰} [۱۸] تحلیل عددی جریان جابجایی آزاد همراه با تولید حرارت داخل حفره مربعی را با استفاده از روش شبکه بولتزمن انجام دادند و نتایج را برای اعداد رایلی بالا گزارش نمودند. آنها نشان دادند که با افزایش عدد رایلی اغتشاش داخل جریان و عدد ناسلت که نشان دهنده انتقال حرارت می‌باشد افزایش می‌یابد. آونالا و همکارانش^{۱۱} [۳۰] جریان جابجایی آزاد مغشوش داخل حفره مربعی با دیواره موجی و تاثیر تغییر زاویه حفره را بر روی انتقال حرارت با استفاده از نرم افزار فلوننت مورد بررسی قرار دادند. آنها مدل‌های مختلفی را برای حل جریان مغشوش مورد بررسی قرار دادند و نتایج بدست آمده را با نتایج آزمایشگاهی آمپوفو و کارایانیس مقایسه کردند و مدل $k - \omega$ را با توجه به اینکه همخوانی بهتری با نتایج آزمایشگاهی داشت استفاده کردند. کفایتی و همکارانش [۳۱]

^۵ Smagoronsky

^۶ Deardorff

^۷ Schumann

^۸ Gortzbaach

^۹ Ampofo and Karayiannis

^{۱۰} Liu et al.

^{۱۱} Aounallah et al.

جریان جابجایی آزاد آرام نانوسیال داخل حفره مربعی را با استفاده از روش شبکه بولتزمن مورد بررسی قرار داده و نتایج را برای نسبت منظرهای مختلف حفره ارائه کردند. آن‌ها مشاهده کردند که با افزایش نسبت منظر ناسلت میانگین در حالت آب خالص کاهش می‌یابد همچنین با افزایش عدد رایلی مقدار ناسلت متوسط افزایش می‌یابد. علیرغم انجام کارهای مختلف، تحلیل جریان جابجایی آزاد مغشوش داخل حفره مربعی با نسبت منظرهای مختلف با روش شبکه بولتزمن مورد بررسی قرار نگرفته است. در این پروژه جریان مغشوش داخل حفره با نسبت منظرها و اعداد پرانتل مختلف با استفاده از روش شبکه بولتزمن تحلیل شده است و مشاهده می‌گردد که نتایج همخوانی خوبی با دیگر روشهای تحلیل جریان سیالات دارند.

در فصل دوم این پروژه روش شبکه بولتزمن معرفی و برخی از خصوصیات این روش ذکر می‌شود. در این فصل ابتدا به معرفی روش دینامیک سیالات پرداخته شده است و در ادامه آن شبکه خودکار سلول گاز و روش شبکه بولتزمن آورده شده است. سپس گسسته‌سازی فضای فاز، معادلات بولتزمن و رابطه‌ی آنها با معادلات ناویر استوکس شرح داده شده است. همچنین در این فصل توضیح جامعی راجع به شرایط مرزی سرعت، دما و نحوه اعمال آنها داده شده است. در فصل سوم جریان مغشوش، پدیده‌ها و معادلات حاکم بر آن و نحوه مدل کردن آن بحث می‌شود و در فصل چهارم در مورد هندسه مورد بررسی و نحوه اعمال مدل ادی‌های بزرگ در روش شبکه بولتزمن و استفاده از این روش جدید برای این مساله بحث شده است. در نهایت در فصل پنجم نتایج بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی و عددی موجود مقایسه و نتایج بدست آمده ارائه شده است. در انتهای کار در فصل ششم نتیجه گیری و پیشنهادات برای کارهای آینده ارائه شده است.

در این پروژه هدف بررسی جریان جابجایی طبیعی مغشوش داخل حفره می‌باشد برای رسیدن به این هدف چهار سیال مورد بررسی قرار گرفته است که عدد پرانتل آنها به ترتیب برابر 0.71 ، 2 ، 4 و $6/2$ ثابت شده است و از آنجایی که در جابجایی طبیعی هنگامی که عدد رایلی بالاتر از 10^6 می‌باشد جریان به سمت مغشوش شدن می‌رود در این پروژه اعداد رایلی بین 10^7 تا 10^{10} مورد بررسی قرار گرفت، علاوه بر آن تاثیر تغییر نسبت منظر بر روی انتقال حرارت مورد بررسی قرار گرفته است. برای حل جریان مغشوش از روش شبکه بولتزمن بر پایه مدل ادی‌های بزرگ استفاده شده است.