



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک

گروه حرارت و سیالات

رساله دکتری

شبیه‌سازی نانوسیالات با استفاده از روش شبکه بولتزمن

احد ضرغامی

استاد راهنما:

دکتر محمد جواد مغربی

پاییز ۱۳۹۰





دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک

گروه حرارت و سیالات

شبیه سازی نانوسیالات با استفاده از روش شبکه بولتزمن

دانشجو: احد ضرغامی

استاد راهنما: دکتر محمد جواد مغربی

استاد مشاور: دکتر جلال قاسمی

رساله جهت اخذ درجه دکتری در رشته مهندسی مکانیک – تبدیل انرژی

زمستان ۱۳۹۰



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مکانیک

گروه حرارت و سیالات

رساله دکتری آقای احد ضرغامی

تحت عنوان: شبیه سازی نانوسیالات با استفاده از روش شبکه بولتزن

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک دکتری مورد ارزیابی و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	رتبه علمی	استاد راهنما
	دانشیار	دکتر محمد جواد مغربی

امضاء	رتبه علمی	استاد مشاور
	استادیار	دکتر جلال قاسمی

امضاء	رتبه علمی	اساتید داور

امضاء	رتبه علمی	نماینده تحصیلات تکمیلی

این رساله را با افتخار تقدیم می‌کنم به:

همسر م

اسطوره زندگیم، پناه محبتگیم و امید بودنم

او که سایه مهربانش سایه سار و وجودش کرمانش زندگیم می‌باشد، او که اسوه صبر و تحمل بوده و از آغاز راه بهواره مشوق، پشتیبان

و بهکام من بوده و مشکلات مسیر را برایم تسهیل نموده است.

من لم یسکر المخلوق، لم یسکر الخالق

الهی! ای کریمی که بنشده عطایی و ای حکیمی که پوشنده خطایی و ای صدی که از ادراک خلق جدایی و ای صدی که در ذات و صفات بی‌همتایی و ای خالق که راهنمایی، جان ما را صفای خود ده و دل ما را هوای خود ده و چشم ما را ضیای خود ده و ما را آن ده که ما را به و مگذارد ما را به که و مه. الهی! دی ده که طاعت افزاید. طاعتی ده که به بهشت رساند. عملی ده که در او آتش جوانبند. عملی ده که در او آب ریانبود. دیده ای ده که غر ربوبیت تو بیند و جانی ده که زهر حکمت را به طبع نوش کند. الهی! به لطف ما را دستگیر و به کرم پای دار. جان در انتظار و در پیش، حجابها بسیار. حجابها از پیش ما بردار و ما را به ما و مگذارد. یا رحیم! یا غفار! یا حلیم و یا سار... .

خداوند مهربان را شاکرم که مرا توفیق بخشید تا نگارش رساله پیش رو را به اتمام برسانم. اکنون بر خود لازم می‌دانم کمال تقدیر و تشکر خود را نثار کسانی کنم که در این مسیر پر فراز و نشیب لحظه ای از راهنمایی، پشتیبانی و تشویق من دریغ نوریذند.

از پدر بزرگوارم که از کودکی، شور دانستن و لذت جستجو را در من بیدار کرد و استقامت در تلاش را به من آموخت، سپاسگزارم. از مادرم، دریای بی کران فداکاری و عشق که وجودم برایش همه رنج بود و وجودش برایم همه مهر نیز با تمام وجود قدردانی می‌کنم. دعاها و امیدواری‌های این دو عزیز در تمامی این سالها بسیاری دشواری‌ها را بر من آسان می‌نمود. حال پس از گذشت سالها نه می‌توانم موهایشان را که در راه عزت من سفید شد، سیاه کنم و نه برای دستهای پینه بسته شان که ثمره تلاش برای افتخار من است، مرهمی گذارم. پس خدایا از تو می‌خواهم که توفیق دهی که هر لحظه شکر گزارشان باشم و ثنیه‌های عمرم را در عصای دست بودنشان بگذرانم.

از استاد ارجمندم، جناب آقای دکتر محمد جواد مغربی، دانشیار دانشگاه فردوسی مشهد، که بیش از هفت سال افتخار شاگردی ایشان را داشته‌ام، نهایت تشکر را دارم. سالهایی که تحت نظارت ایشان مشغول به تحصیل بودم همواره سرشار از آموختن توأمان علم و اخلاق بود.

از استاد مشاور گرامی جناب آقای دکتر جلال قاسمی، استادیار دانشگاه زنجان، که قدم به قدم در تمامی مراحل این پژوهش مرا همراهی کردند نیز کمال تشکر را دارم. همچنین لازم است از اساتید محترم، پروفیسور Sauro Succì استاد برجسته دانشگاه هاروارد آمریکا و موسسه تحقیقات ملی ایتالیا و پروفیسور Stefano Ubertini استاد دانشگاه ناپل ایتالیا که دوستانه در تکمیل و ارتقاء سطح کیفی این رساله و مقالات مستخرج از آن مرا یاری نمودند، تشکر نمایم. از خداوند متعال برای همگی آرزوی سلامتی و موفقیت روزافزون مسئلت می‌کنم.

دانشجو تأیید می نماید که مطالب مندرج در این رساله نتیجه تحقیقات خودش می باشد و در صورت استفاده از نتایج دیگران مرجع آن را ذکر نموده است.

کلیه حقوق مادی مترتب از نتایج مطالعات، آزمایشات و نوآوری ناشی از تحقیق موضوع این رساله متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد .

زمستان ۱۳۹۰

چکیده

در این رساله سعی بر آن شده است که با استفاده از روش شبکه بولتزمن و ترکیب آن با روش حجم محدود، رفتارهای ترمو - هیدرودینامیکی جریانهای سیالات و نانوسیالات دوبعدی تراکم ناپذیر مورد بررسی قرار گیرند. برای این منظور مدل متداول D_2Q_9 انتخاب و از طرح مرکزیت سلول برای گسسته سازی معادلات جریان و انرژی بولتزمن بر روی شبکه چهارضلعی بی سازمان استفاده گردیده است. با قرار دادن یک شبکه مجازی بر روی ضلع منطبق بر مرز، اعمال شرایط مرزی برای روش مورد استفاده به خوبی و با دقت بالایی قابل اجرا گردید. به منظور افزایش پایداری حل از فاکتورهای تصحیح برای محاسبه جمله شار در معادلات جریان و انرژی استفاده شده است. همچنین برای کاهش نوسانات عددی در هنگام شبیه سازی به خصوص در جریانهایی با رینولدزهای بالاتر و یا توام با جریانهای برگشتی از جمله ائتلاف مصنوعی مرتبه چهارم بهره گرفته شده است. استفاده از موارد فوق به همراه بهره گیری از روش رانگ - کوتای مرتبه پنجم برای پیشروی معادلات در زمان باعث افزایش چشمگیر دقت و صحت نتایج و کاهش مدت زمان شبیه سازی گردید. جهت تحلیل گرمایی جریان از روش تابع توزیع دوگانه استفاده گردید که دارای پایداری بهتری نسبت به سایر روشها می باشد. همچنین از روش تجزیه تابع توزیع انرژی به دو بخش تعادلی و غیرتعادلی برای اعمال شرایط مرزی گرمایی استفاده شد که در نتیجه آن نتایج قابل قبولی بدست آمد. به منظور تحلیل نانوسیالات مختلف نیروهای وارده از سیال به نانوذره که شامل نیروی شناوری و جاذبه، براونی، درگ و جاذبه و دافعه DLVO در معادلات بولتزمن وارد گردیدند. به منظور ارزیابی نتایج و دقت روش مورد استفاده آنالیز رفتارهای ترمو - هیدرودینامیکی طیف وسیعی از جریانهای متداول در مکانیک سیالات انجام گردید و تلاش شد که نتایج بدست آمده از شبیه سازیهای انجام شده با نتایج معتبر سایر محققان مقایسه گردد. بطور کلی نتایج بیانگر دقت خوب و قابل قبول روش پیشنهادی در تحلیل جریانهای سیال و نانوسیال می باشد. تحلیل نتایج نانوسیالات نشان داد که نانوسیالات توام با نانوذرات با چگالی کمتر دارای سرعت بیشتری نسبت به نانوسیالات توام با ذرات سنگین تر می باشند. همچنین نشان داده شد که در نواحی خارج از جریانهای برگشتی، نانوذراتی که دارای ضریب هدایت حرارتی بزرگتری هستند، باعث رشد بیشتر عدد ناسلت و در نتیجه انتقال حرارت می شوند در حالیکه در داخل جریانهای برگشتی این مطلب برعکس می باشد، یعنی نانوذرات با ضریب هدایت حرارتی کوچکتر افزایش بیشتری در مقدار ناسلت را نشان می دهند.

► *ISI Journals:*

- 1- **A. Zarghami**, M.J.Maghrebi, S. Ubertini, S. Succi, "Modeling of bifurcation phenomena in suddenly expanded flows with a new finite volume lattice Boltzmann method", *International Journal of Modern Physics C*, Vol. 22, No. 9, pp. 977-1003, 2011. (DOI: 10.1142/S0129183111016737)
- 2- **A. Zarghami**, M.J. Maghrebi, J.Ghasemi, S. Ubertini, "Lattice Boltzmann Finite Volume Formulation with Improved Stability", *Communications in Computational Physics*, Vol. 12, No. 1, pp. 42-64, 2012. (DOI: 10.4208/cicp.151210.140711a)
- 3- **A. Zarghami**, M.J. Maghrebi, "Mixing Flow Calculations using Lattice Boltzmann Method", (Under Review)
- 4- **A. Zarghami**, M.J. Maghrebi, "FV-LB Method for Incompressible Nano-Fluids", (Under Review).

► *Other Peer Reviewed Journals*

- 5- M.J. Maghrebi, **A. Zarghami**, "Thermo-Hydrodynamic Analysis of Fluid Flow using Lattice Boltzmann Method", *Journal of Structures and Fluid Mechanics* (Accepted).
- 6- **A. Zarghami**, M.J. Maghrebi, J. Ghasemi, "Finite Volume-Lattice Boltzmann Modeling of Viscous Flows", *Majlesi Journal of Mechanical Engineering*, Vol.4, No.2, pp.11-19, 2011.

► *Presentation in Conference*

- 7- **A. Zarghami**, M.J.Maghrebi, J.Ghasemi, "Analysis of Expansion Ratio in Suddenly Enlarged Flows using Lattice Boltzmann Method", The 19th Annual/International Conference on Mechanical Engineering, *ISME2011*, May 10-12, 2011, Birjand, Iran.

فهرست مطالب

۱	۱. مقدمه
۳	۱-۱- دینامیک سیالات محاسباتی: معادلات ناویر- استوکس
۴	۲-۱- دینامیک سیالات محاسباتی: روش شبکه بولتزمن
۵	۳-۱- اهداف رساله
۶	۴-۱- ساختار رساله
۷	۲. مروری بر تحقیقات گذشته
۸	۱-۲- مقدمه
۸	۲-۲- روش شبکه گاز
۹	۱-۲-۲- مدل HPP
۱۲	۱-۲-۲- مدل FHP
۱۴	۳-۲- تاریخچه روش شبکه بولتزمن و هیدرودینامیک
۱۷	۴-۲- تاریخچه روش شبکه بولتزمن و ترموهیدرودینامیک
۱۹	۳. نانوسیالات (معرفی، کاربرد و تحقیقات پیشین)
۲۰	۱-۳- مقدمه
۲۰	۲-۳- معرفی، کاربرد و تحقیقات پیشین
۲۳	۳-۳- رسانش گرمایی نانوسیالات
۲۳	۱-۳-۳- حرکت براونی ذرات
۲۵	۲-۳-۳- لایه بندی ملکولی سیال بر روی نانوذرات
۲۵	۳-۳-۳- ماهیت انتقال حرارت در نانوذرات
۲۶	۴-۳-۳- توده‌ای شدن نانوذرات
۲۷	۴-۳-۳- نیروهای وارد بر نانوذرات
۳۷	۴. تئوری روش شبکه بولتزمن
۳۸	۱-۴- مقدمه
۳۸	۲-۴- از معادله بولتزمن تا معادله شبکه بولتزمن
۳۹	۳-۴- روش شبکه بولتزمن
۴۲	۳-۴- اعمال نیروی خارجی در روش شبکه بولتزمن
۴۴	۱-۳-۴- تعریف نیرو به شکل تابع پتانسیل
۴۴	۲-۳-۴- محاسبه تابع توزیع تعادلی با سرعت اصلاح شده
۴۴	۳-۳-۴- افزودن جمله اضافی به جمله برخورد
۴۵	۴-۳-۴- روش ترکیبی
۴۵	۳-۴- مدل گرمایی روش شبکه بولتزمن
۴۵	۱-۳-۴- روش تابع توزیع دوگانه
۴۸	۴-۴- مدل شبکه بولتزمن برای نانوسیالات

۵۰	۵. فرمول بندی ریاضی
۵۱	۵-۱- مقدمه
۵۱	۵-۲- روش حجم محدود - شبکه بولتزمن
۵۵	۵-۲-۱- پیشرفت معادلات در زمان
۵۶	۵-۳- شرایط مرزی جریان
۵۶	۵-۳-۱- شرط مرزی ورودی و خروجی
۵۷	۵-۳-۲- شرط مرزی لغزش آزاد
۵۸	۵-۳-۳- شرط مرزی تناوبی
۵۹	۵-۳-۴- شرط مرزی دیوار صلب
۵۹	۵-۳-۴- شرط مرزی دیوار متحرک
۶۰	۵-۳-۵- شرط مرزی دیوار در گوشه ها
۶۱	۵-۳-۶- شرایط مرزی در هندسه پیچیده
۶۲	۵-۴- شرایط مرزی گرمایی
۶۳	۵-۴-۱- شرط مرزی دما ثابت
۶۴	۵-۴-۲- شرط مرزی آدیاباتیک
۶۴	۵-۴-۳- شرط مرزی ورودی با دمای ثابت
۶۵	۶. نتایج ۱ (هیدرودینامیک)
۶۶	۶-۱- مقدمه
۶۶	۶-۲- جریان پوزیه صفحه‌ای
۶۷	۶-۲-۱- هندسه و شرایط مرزی
۶۹	۶-۲-۲- نتایج شبیه‌سازی
۷۸	۶-۳- جریان تیلور - ورتکس
۸۰	۶-۴- جریانهای برشی آزاد
۸۱	۶-۴-۱- جریان لایه مرزی آرام
۸۴	۶-۴-۲- جریان لایه اختلاطی صفحه‌ای
۸۶	۶-۴-۳- جریان جت صفحه‌ای
۹۰	۶-۵- جریان انبساط ناگهانی در کانال متقارن
۹۰	۶-۵-۱- هندسه و شرایط مرزی
۹۱	۶-۵-۲- بررسی تاثیر فاکتورهای تصحیح بر شبیه سازی
۹۳	۶-۵-۳- بررسی تاثیر روش پیشروی زمانی در محاسبات
۹۵	۶-۵-۴- نتایج شبیه سازی
۱۱۳	۶-۶- جریان حول استوانه مدور
۱۱۳	۶-۶-۱- هندسه و شرایط مرزی
۱۱۴	۶-۶-۲- آنالیز خطا
۱۱۶	۶-۶-۳- نتایج شبیه سازی

۱۲۳	۷. نتایج ۲ (ترموهیدرودینامیک)
۱۲۴	۷-۱- مقدمه
۱۲۴	۷-۲- جریانهای توام با انتقال گرما
۱۲۴	۷-۲-۱- انتقال حرارت در جریان پوازی صفحه‌ای
۱۲۷	۷-۲-۲- انتقال حرارت در جریان پله وارون
۱۳۶	۷-۲-۳- جریان گرمایی حول استوانه
۱۴۲	۷-۳- ترمو - هیدرودینامیک نانوسیالات
۱۴۴	۷-۳-۱- جریان نانوسیال بین دو صفحه موازی
۱۴۸	۷-۳-۲- جریان نانوسیال درون پله وارون
۱۵۵	۸. نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۱۵۶	۸-۱- جمع بندی
۱۵۷	۸-۲- پیشنهادات
۱۵۸	۹. مراجع
۱۷۲	۱۰. ضمیمه الف
۱۷۳	۱۰-۱- بدست آوردن معادله ناویر - استوکس و معادله شبکه بولتزمن
۱۷۶	چکیده انگلیسی

فهرست شکلها و نمودارها

فصل دوم: مروری بر تحقیقات گذشته

- شکل ۱-۲: بردارهای سرعت مدل HPP.
- شکل ۲-۲: حرکت ذرات در مدل HPP در طی یک گام زمانی.
- شکل ۳-۲: قانون برخورد سر به سر بین دو ذره در مدل HPP.
- شکل ۴-۲: بردارهای سرعت مدل FHP.
- شکل ۵-۲: قانون برخورد سر به سر در مدل FHP و مسیرهای مجاز پس از برخورد.
- شکل ۶-۲: قانون برخورد بین سه ذره در مدل FHP.
- شکل ۷-۲: شماتیک روش شبکه بولتزمن در برابر روش شبکه گاز.

فصل سوم: نانوسیالات (معرفی، کاربرد و تحقیقات پیشین)

- شکل ۱-۳: شماتیک حرکت تصادفی یک ذره درون سیال آب.
- شکل ۲-۳: دیاگرام تغییرات انرژی در برابر جدایش ذرات بر طبق تئوری DLVO. انرژی خالص بصورت مجموع نیروهای جاذبه واندروالس و دافعه الکترواستاتیک ذرات که به هنگام نزدیک شده به یکدیگر تجربه می کنند، محاسبه می شود [۸۳].
- شکل ۳-۳: دیاگرام امکان وجود نقطه مینیمم ثانویه در یک محلول غلیظ نمک [۸۳].
- شکل ۴-۳: تغییرات پتانسیل زتا برای نانوسیال آب- اکسید آلومینیوم و آب - اکسید تیتانیوم بصورت تابعی از PH [۸۴].
- شکل ۵-۳: تغییرات پتانسیل زتا در برابر نسبت جرمی های مختلف برای نانوسیال آب - اکسید آلومینیوم در PH=8 [۸۵].

فصل چهارم: تئوری روش شبکه بولتزمن

- شکل ۱-۴: مدل‌های مورد استفاده در شبیه سازی دوبعدی، راست: D_2Q_5 ، وسط: D_2Q_7 و چپ: D_2Q_9
- شکل ۲-۴: انواع مدل‌های مورد استفاده در شبیه سازی سه بعدی، راست: D_3Q_{15} و چپ: D_3Q_{19}
- شکل ۳-۴: جهت سرعت های گسسته در مدل D_2Q_9

فصل پنجم: فرمول بندی ریاضی

- شکل ۱-۵: روش حجم محدود با طرح مرکزیت سلول
- شکل ۲-۵: شماتیک شرایط مرزی در دامنه محاسباتی
- شکل ۳-۵: شماتیک شرایط مرزی دیوار صلب و دیوار متحرک
- شکل ۴-۵: گره مرزی در گوشه. سطح هاشور خورده بیانگر فضای خارج از دامنه محاسباتی می باشد. توابع توزیع معلوم یعنی f_3, f_4, f_7 که از داخل دامنه محاسبه می شوند با خطوط ممتد نشان داده شده اند و دیگر توابع توزیع مجهول با خط چین مشخص گردیده اند.
- شکل ۵-۶: گره مجازی مرزی در مرز ورودی و خروجی
- شکل ۶-۵: گره مجازی مرزی بر روی دیوار صلب نامنظم

فصل ششم: نتایج ۱ (هیدرودینامیک)

- ۶۷ شکل ۶-۱: شکل شماتیک جریان پوازی صفحه ای
- ۶۷ شکل ۶-۲: قسمتی از شبکه بندی جریان پوازی صفحه‌ای
- ۶۸ شکل ۶-۳: پروفیل جریان در ناحیه ورودی جریان پوازی در $Re = 1600$
- ۶۹ شکل ۶-۴: بردارهای سرعت حاصل از شبیه سازی در قسمتی از دامنه در $Re = 29$
- ۷۰ شکل ۶-۵: کانتور بردار سرعت، الف) مولفه در جهت جریان و ب) مولفه عرضی جریان در $Re = 29$
- ۷۱ شکل ۶-۶: پروفیل مولفه سرعت u در ایستگاههای مختلف در $Re = 29$
- ۷۱ شکل ۶-۷: توزیع سرعت در ناحیه توسعه یافته و مقایسه آن با حل تحلیلی [۱۰۹]
- ۷۲ شکل ۶-۸: پروفیل مولفه سرعت v در ایستگاههای مختلف در $Re = 29$
- ۷۳ شکل ۶-۹: سرعت خط مرکزی جریان بین دو صفحه و مشخص کردن طول توسعه یافتگی در $Re=29$
- ۷۳ شکل ۶-۱۰: کانتور فشار (چگالی شبکه) در جریان بین دو صفحه در $Re = 29$
- ۷۳ شکل ۶-۱۱: توزیع فشار در خط مرکزی کانال در $Re = 29$
- ۷۴ شکل ۶-۱۲: شکل شماتیک المان سیال به طول dx و نیروهای وارد بر آن
- ۷۵ شکل ۶-۱۳: ضریب اصطکاک دارسی در جریان بین دو صفحه
- ۷۶ شکل ۶-۱۴: توزیع سرعت سهموی در $Re = 72$
- ۷۹ شکل ۶-۱۵: مقایسه بین نتایج عددی و تحلیلی پروفیل سرعت در جهت جریان u ، الف) $\tau = 0.1, 0.01$ و ب) $time=5, 250$
- ۸۱ شکل ۶-۱۶: هندسه و شبکه بندی مورد استفاده برای جریانهای لایه اختلاطی و جت
- ۸۲ شکل ۶-۱۷: شکل شماتیک جریان لایه مرزی بر روی صفحه مسطح
- ۸۲ شکل ۶-۱۸: بردارهای سرعت جریان لایه مرزی در $Re=25$
- ۸۳ شکل ۶-۱۹: رفتار خودتشابهی الف) سرعت و ب) گردابه در ایستگاههای مختلف در جریان لایه مرزی و مقایسه آن با حل تحلیلی
- ۸۳ شکل ۶-۲۰: رشد ضخامت لایه مرزی آرام و مقایسه آن با حل تحلیلی
- ۸۴ شکل ۶-۲۱: شکل شماتیک جریان لایه اختلاطی صفحه‌ای
- ۸۵ شکل ۶-۲۲: الف) رشد لایه اختلاطی در جهت طولی جریان که با $\delta_w = 0.2875\sqrt{x+12.371}$ تطبیق داده شده است و ب) پروفیل سرعت بی‌بعد در $x = L_x$ و در سرعت های مختلف
- ۸۶ شکل ۶-۲۳: رفتار خودتشابهی یا تغییرات عرضی الف) سرعت و ب) گردابه در ایستگاههای مختلف جریان لایه اختلاطی
- ۸۷ شکل ۶-۲۴: شکل شماتیک جریان جت صفحه ای آرام
- ۸۸ شکل ۶-۲۵: الف) رشد نیم عرض جت و ب) کاهش سرعت خط مرکزی جت
- ۸۹ شکل ۶-۲۳: رفتار خودتشابهی یا تغییرات عرضی الف) سرعت و ب) گردابه در ایستگاههای مختلف جریان جت
- ۹۰ شکل ۶-۲۴: شکل شماتیک جریان انبساط ناگهانی
- ۹۲ شکل ۶-۲۵: مقایسه همگرایی حل با استفاده از روشهای مختلف محاسبه شار الف) $Re=25, ER=3$ و ب) $Re=50, ER=3$
- ۹۳ شکل ۶-۲۶: تاثیر افزودن جمله اتلاف مصنوعی به روش محاسبه شار با استفاده از ضرایب تصحیح، الف) $Re=25, ER=3$ و ب) $Re=120, ER=3$

- شکل ۶-۲۷: تاثیر روش پیشروی در زمان بر همگرایی (الف) $Re=25, ER=3$ و (ب) $Re=50, ER=3$
- شکل ۶-۲۸: سه نوع مختلف شبکه بندی مورد استفاده در شبیه سازی برای $ER = 3$. (الف) شبکه بندی مربعی، (ب) شبکه بندی مستطیلی یکنواخت، (ج) شبکه بندی مستطیلی فشرده
- شکل ۶-۲۹: مقایسه سرعت محور تقارن کانال با استفاده از شبکه بندیهای مختلف در $Re = 26$ و $ER = 3$ و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی [۱۱۷].
- شکل ۶-۳۰: (الف) بردارهای سرعت، (ب) خطوط جریان بدست آمده از شبیه سازی در $Re = 26$ و $ER = 3$ و مقایسه آن با (ج) نتایج آزمایشگاهی [۱۱۷]
- شکل ۶-۳۱: پروفیل سرعت در فواصل $x = 1.25h, 2.5h, 5h$ ، $Re = 26$ ، $ER = 3$ و مقایسه نتایج با نتایج آزمایشگاهی [۱۱۷].
- شکل ۶-۳۲: خطوط جریان در کانال با نسبت انبساط $ER = 3$ و (الف) $Re = 9$ ، (ب) $Re = 16$ (ج) $Re = 35$. در اینجا عدد رینولدز بصورت $Re = U_{ave} h / \nu$ تعریف شده است.
- شکل ۶-۳۳: طول جریان برگشتی نسبت به رینولدز در $ER = 3$ و $ER = 4$.
- شکل ۶-۳۴: شکل شماتیک جریان پایدار نامتقارن در هندسه انبساط ناگهانی
- شکل ۶-۳۵: خطوط جریان در (الف) $Re = 44$ ، (ب) $Re = 46$ و (ج) $Re = 48$ برای $ER = 3$.
- شکل ۶-۳۶: نمودار دوشاخگی و مقایسه نتایج شبیه سازی با نتایج تجربی و عددی [۱۱۷]
- شکل ۶-۳۷: (الف) بردارهای سرعت، (ب) خطوط جریان بدست آمده از شبیه سازی در $Re = 80$ ، $ER = 3$ و مقایسه آن با (ج) نتایج آزمایشگاهی [۱۱۷]
- شکل ۶-۳۸: پروفیل سرعت در فواصل $x = 1.25h, 2.5h, 5h, 10h, 20h$ ، $Re = 80$ ، $ER = 3$ و مقایسه نتایج با نتایج آزمایشگاهی [۱۱۷]
- شکل ۶-۳۹: خطوط جریان در (الف) $Re = 120$ ، (ب) $Re = 125$ و (ج) $Re = 130$ برای $ER = 3$
- شکل ۶-۴۰: خطوط جریان در $Re = 140$ برای $ER = 3$ ، (الف) روش حجم محدود - شبکه بولتزمن و (ب) نتایج عددی [۱۱۷]
- شکل ۶-۴۱: پروفیل سرعت در فواصل $x = 1.25h, 2.5h, 5h, 10h, 20h, 40h$ ، $Re = 140$ ، $ER = 3$ و مقایسه نتایج با نتایج آزمایشگاهی [۱۱۷]
- شکل ۶-۴۲: نمودار دوشاخگی در $ER = 3$ و مقایسه نتایج شبیه سازی با نتایج عددی [۱۱۷].
- شکل ۶-۴۳: خطوط جریان در (الف) $ER = 3$ ، (ب) $ER = 4$ (ج) $ER = 5$ و (د) $ER = 10$ برای $Re = 60$
- شکل ۶-۴۴: اندازه جریانهای برگشتی در رینولدزهای مختلف برای $ER = 3, 5$.
- شکل ۶-۴۵: ضریب اصطکاک C_f برای $ER = 3$ ، (الف) $Re = 25$ (ب) $Re = 80$ (ج) $Re = 130$
- شکل ۶-۴۶: ضریب اصطکاک C_f در $Re = 60$ برای (الف) $ER = 3$ (ب) $ER = 4$ و (ج) $ER = 5$
- شکل ۶-۴۷: هندسه و دامنه محاسباتی مورد استفاده در شبیه سازی جریان حول استوانه
- شکل ۶-۴۸: بخشی از شبکه بندی مورد استفاده در شبیه سازی جریان حول استوانه
- شکل ۶-۴۹: تاثیر استفاده از جمله اتلاف مصنوعی ($\varepsilon_x = \varepsilon_y = 5$) در همگرایی جریان حول استوانه، (الف) روش میانگین گیری در $Re=80$ و (ب) روش محاسبه شار با استفاده از فاکتورهای تصحیح در $Re=100$
- شکل ۶-۵۰: خطوط جریان و گردابه های حول استوانه در (الف) $Re=10$ ، (ب) $Re=20$ و (ج) $Re=40$

- شکل ۶-۵۱: رفتار همگرایی جریان در حالت ناپایدار و نوسانات تشکیل گردابه ها در $Re=60,65,100$ ۱۱۹
- شکل ۶-۵۲: ضریب پسا برای جریان حول استوانه در $Re=100$ ۱۱۹
- شکل ۶-۵۳: الف و ب) خطوط جریان، ج و د) گردابه در جریان حول استوانه در $Re=100$ ۱۲۰
- شکل ۶-۵۴: خطوط جریان در دو زمان متفاوت برای جریان حول استوانه در $Re=150$ ۱۲۱
- شکل ۶-۵۵: مقایسه گرافیکی عدد استروهال بدست آمده با استفاده از روش حجم محدود - شبکه بولتزمن با دیگر نتایج معتبر. ۱۲۲

فصل هفتم: نتایج ۲ (ترموهیدرودینامیک)

- شکل ۷-۱: توزیع ناسلت بر روی دیواره پایینی کانال برای الف) حالت ۱، ب) حالت ۲، ج) حالت ۳ و د) حالت ۴. ۱۲۶
- شکل ۷-۲: الف) شماتیک و ب) شبکه بندی دامنه محاسباتی جریان پله وارون ۱۲۷
- شکل ۷-۳: خطوط جریان پله وارون با $ER=2$ در الف) $Re=100$ ، ب) $Re=200$ ، ج) $Re=300$ ، د) $Re=400$ ، ه) $Re=500$ ، و) $Re=600$ ۱۲۸
- شکل ۷-۴: نمودار دوشاخگی جریان پله وارون با $ER=2$ ۱۲۹
- شکل ۷-۵: الف) توزیع ناسلت بدست آمده از روش عددی برای جریان پله با $ER = 1.5$ و $Pr = 0.7$ برای شرط مرزی گرمایی حالت اول و مقایسه آن با نتایج [۱۵۱] و ب) توزیع ناسلت در برابر x/X_1 ۱۳۱
- شکل ۷-۶: الف) تاثیر نسبت انبساط بر روی توزیع ناسلت در حالت ۱ شرط مرزی گرمایی و $Re = 105$ و $Pr = 0.7$ و ب) توزیع ناسلت در برابر x/X_1 ۱۳۲
- شکل ۷-۷: توزیع عدد ناسلت در دیواره پایینی کانال برای شرایط مرزی گرمایی حالت ۲، $ER = 2$ و $Pr = 0.7$ و مقایسه آن با نتایج [۱۴۶] ۱۳۳
- شکل ۷-۸: تاثیر نسبت انبساط کانال بر روی توزیع عدد ناسلت برای شرط مرزی گرمایی حالت ۲، $Re = 105$ و $Pr = 0.7$. نتایج عددی با نتایج مرجع [۱۵۲] مقایسه شده‌اند. ۱۳۴
- شکل ۷-۹: تاثیر عدد پراتل بر روی توزیع ناسلت برای شرط مرزی گرمایی حالت ۲، $Re = 100$ و $ER = 2$ ۱۳۴
- شکل ۷-۱۰: تاثیر فاکتورهای تصحیح دما بر روی دقت و همگرایی حل در جریان درون پله برای الف) $Re=100$ و ب) $Re=200$ ۱۳۵
- شکل ۷-۱۱: شکل شماتیک جریان گرمایی حول استوانه با شرایط مرزی و ابعاد در نظر گرفته شده برای شبیه سازی ۱۳۶
- شکل ۷-۱۲: پروفیل بی بعد سرعت در ایستگاههای مختلف در بالادست استوانه برای الف) $BR=0.2$ و ب) $BR=0.5$ ۱۳۷
- شکل ۷-۱۳: پروفیل بی بعد سرعت در ایستگاههای مختلف در پایین دست استوانه برای الف) $BR=0.2$ و ب) $BR=0.5$ ۱۳۸
- شکل ۷-۱۴: پروفیل بی بعد دما در ایستگاههای مختلف در بالا دست استوانه برای الف) $BR=0.2$ و ب) $BR=0.5$ ۱۳۹
- شکل ۷-۱۵: پروفیل بی بعد دما در ایستگاههای مختلف در پایین دست استوانه برای الف) $BR=0.2$ و ب) $BR=0.5$ ۱۴۰

- شکل ۷-۱۶: توزیع ناسلت بر روی سطح استوانه برای $BR=0.2$ و $BR=0.5$ ۱۴۱
- شکل ۷-۱۷: تاثیر فاکتورهای تصحیح دما بر روی دقت و همگرایی حل در جریان گرمایی حول استوانه در $Re=40$ ۱۴۱
- شکل ۷-۱۸: توزیع عدد ناسلت در طول کانال برای نانوذرات مختلف ۱۴۵
- شکل ۷-۱۹: بردارهای نیروهای وارد بر نانوسیال آب - مس ۱۴۵
- شکل ۷-۲۰: تغییرات ناسلت متوسط جریان برای نانوسیالات مختلف در جریان بین دو صفحه موازی و $Re=75$ ۱۴۶
- شکل ۷-۲۱: مقایسه بین حل دوفازی و تک فازی در پیش بینی تغییرات ناسلت در جریان آب - اکسید مس ۱۴۶
- شکل ۷-۲۲: مقایسه ضریب هدایت حرارتی موثر جریان نانوسیال آب - اکسید مس با نتایج معتبر تجربی ۱۴۷
- شکل ۷-۲۳: پروفیل سرعت u برای نانوذرات مختلف در جریان درون پله در الف) $x=h$ ب) $x=2h$ و ج) $x=40h$ ۱۴۹
- شکل ۷-۲۴: شرایط مرزی گرمایی برای جریان نانوسیال درون پله وارون ۱۵۰
- شکل ۷-۲۵: توزیع عدد ناسلت بر روی دیواره های الف) بالا و ب) پایین کانال برای جریان نانوسیال آب - مس با کسر حجمی متفاوت در $Re=200$ ۱۵۱
- شکل ۷-۲۶: توزیع عدد ناسلت بر روی دیواره های الف) بالا و ب) پایین کانال برای جریان نانوسیال آب - مس با کسر حجمی متفاوت در $Re=400$ ۱۵۲
- شکل ۷-۲۷: توزیع ناسلت برای نانوذرات مختلف با $\phi = 0.1$ و $Re=400$ برای الف) دیوار بالا و ب) دیوار پایین ۱۵۳
- شکل ۷-۲۸: مقدار ناسلت متوسط برای نانوذرات مختلف، الف) دیوار بالا و ب) دیوار پایین ۱۵۴
- شکل ۷-۲۹: تاثیر نیروهای مختلف بر روی افزایش انتقال حرارت و توزیع ناسلت، الف) نیروی پسا، ب) نیروی شناوری و گرانش، ج) نیروی پتانسیل DLVO و د) نیروی براونی ۱۵۵

فهرست جداول

فصل سوم: نانوسیالات (معرفی، کاربرد و تحقیقات پیشین)

جدول ۳-۱: خاصیت هدایت حرارتی مواد مختلف در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد ۲۱

فصل ششم: نتایج ۱ (هیدرودینامیک)

جدول ۶-۱: خطای نسبی سرعت بر اثر تغییرات گام زمانی در روش میانگین گیری شار ۷۸

جدول ۶-۲: خطای نسبی سرعت بر اثر تغییرات گام زمانی در روش بالادست ۷۸

جدول ۶-۳: خطای نسبی سرعت در زمان $time=200$ ۸۰

جدول ۶-۴: خطای نسبی ویسکوزیته در زمان $time=200$ و $\Delta t = \tau/2$ ۸۰

جدول ۶-۵: مقایسه عدد رینولدز بحرانی بدست آمده از تحقیقات مختلف عددی و تجربی با نتایج شبیه سازی ۱۰۳

جدول ۶-۶: نتایج بررسی تراکم شبکه برای جریان حول استوانه در $Re=30$ ۱۱۳

جدول ۶-۷: خطای نسبی روشهای مختلف محاسبه شار در جریان حول استوانه ۱۱۶

جدول ۶-۸: مقایسه بین پارامترهای فیزیکی و دینامیکی جریان هوا استوانه با نتایج معتبر. در اینجا L طول گردابه، d شعاع سیلندر و θ_s معرف زاویه جدایش می باشد. ۱۱۸

جدول ۶-۹: مقایسه بین ضریب پسا و عدد استروهل برای جریان حول استوانه در $Re=100$ ۱۲۰

فصل هفتم: نتایج ۲ (ترموهیدرودینامیک)

جدول ۷-۱: مقایسه بین عدد ناسلت در ناحیه کاملاً توسعه یافته با شرایط مرزی مختلف ۱۲۷

جدول ۷-۲: مقایسه بین مقادیر بی بعد شده X_1, X_2 و X_3 برای جریان پله وارون با نسبت انبساط $ER=2$ ۱۲۹

جدول ۷-۳: مشخصات ترموفیزیکی مواد مختلف ۱۴۲

جدول ۷-۴: درصد افزایش ناسلت در ناحیه توسعه یافته برای نانوسیالات مختلف ۱۴۶

جدول ۷-۵: مقدار ناسلت متوسط جریان نانوسیال آب - مس و مقایسه آن با نتایج مرجع [۱۷۰] ۱۴۸

"Boltzmann's work met with mixed reactions during his life and continuous to do so even today..."

Stanford Encyclopedia of Philosophy

"Everything should be made as simple as possible, but no simpler..."

Albert Einstein

"Reaching full maturity is just a matter of time and labour, no conceptual hurdles in sight..."

Sauro Succi

فصل اول

مقدمه



Ludwig Eduard Boltzmann (1844 – 1906)