

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه مازندران

# بررسی عددی جریان و انتقال حرارت بر روی استوانه های در حال چرخش با استفاده از روش شبکه‌ی بولتزمن

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد  
رشته مهندسی مکانیک-گرایش تبدیل انرژی

اساتید راهنما:  
دکتر کورش صدیقی  
دکتر موسی فرهادی

نگارش:  
حسن نعمتی

بهار ۱۳۸۹

منت خدای را عزوجل که طاعتش موجب قربت است و به شکراندرش فرید نعمت.

*Laudation to the GOD of majesty and glory obedience to him is cause of approach and gratitude in increase of benefits.*

هر نفسی که فرومی رود مدحیات است و چون برمی آید منفرح ذات. پس در هر نفسی دو نعمت موجود است و بر هر نعمت شکر می واجب.

*Every inhalation of the breath prolongs life and expiration of it gladdens our nature. Wherefore every breath confers two benefits and for every benefit, gratitude is due.*

از دست و زبان که برآید که از عمده شکرش به درآید.

*Whose hand and tongue is capable to fulfill the obligation of thanks to him.*

باران رحمت بی حسابش همه را رسیده و خوان نعمت بی دریغش همه جا کشیده.

*The shower of his boundless mercy has penetrated to every spot and banquet of his unstinted liberality is spreaded out everywhere.*

برخود لازم می دانم از زحمات **دکتر کورش صدیقی** و **دکتر موسی فرهادی** که زحمات و مساعدت ایشان راهگشای انجام این پایان نامه بوده است تشکر و قدردانی نمایم. همچنین از سایر اساتید ارزنده دانشکده مهندسی مکانیک از جمله دکتر گرجی، دکتر دومیری گنجی، دکتر رنجبر و دکتر حسینی زاده که در طی این دوره از وجودشان بهره مند شدم تقدیر و تشکر می نمایم.

از دوستان فویم که در مدت تحصیل در دانشگاه سفتی و مشکلات گذراندن واحد های درسی و انجام پایان نامه را به لظفات فوش و فاطره انگیز تبدیل نمودند تشکر می کنم. امین گلاهدوز، مهدی فاموری، فواد نوری، محمد محمدی پیروز، مجید جانی پور، کیوان اسکندری، مرتضی علی پناه، احسان قتایی، امیر بناری، حسن برارنیا، نیما نیک صفت، حامد ابراهیم نژاد، حمید مستاجران، امیر عزیزفانی، میثم حاجی بابایی، حسام نعیمی، اسماعیل کریمی نژاد، مجتبی پرویزی و علی زحمت کش از جمله دوستانی بودند که ذکر نام هرکدامشان، تداعی بخش دوران فوش دانشگاه می باشد، و از خدای بزرگ سلامتی و موفقیت روز افزون برای تمامشان فواهانم. همچنین از دوست عزیزم خانم نغمه یزدانی تشکر و قدردانی می نمایم. در انتها از زحمات برادرم **حسین** که راهگشای من برای ورود به این رشته ی تحصیلی بود قدردانی می نمایم.

**حسن نعمتی**

اردیبهشت ۱۳۸۹

تقدیم بہ دست ہامی پاک وینہ بستہ می

دروماہ

♦

عزیز تر از جانم

## چکیده

در این پایان‌نامه شبیه‌سازی جریان آرام و انتقال حرارت بر روی سیلندرهاى چرخان بوسیله روش شبکه بولتزمن (LBM) بررسی شده است. برای مدل کردن جریان و انتقال حرارت بر روی مرزهای منحنی از مدل جدیدی که دارای دقت مرتبه دوم می‌باشد استفاده شده است. تاثیر فاصله‌ی طولی بین سیلندرها و نسبت سرعت دورانی آنها در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته است. شبیه‌سازی برای عدد پرانتل  $0.71$  و عدد رینولدز  $100$  انجام شده است. نتایج شامل خطوط جریان، ضرایب آنی و متوسط درگ و لیفت توزیع فشار، کانتور دما و گردابه، توزیع محلی و متوسط محلی ناسلت می‌باشد. برای بالا بردن دقت شبیه‌سازی از روش شبکه بولتزمن با ضریب برخورد چندتایی (MRT) استفاده شده است. 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 سرعت زاویه ای جریان از حالت پریودیک به صورت جریان پایا گرایش پیدا می‌کند و همچنین افزایش فاصله‌ی طولی بین سیلندرها باعث کاهش تاثیر سیلندرها بر یکدیگر، هم در جریان و هم انتقال حرارت می‌شود.

**کلمات کلیدی:** جریان آرام، روش شبکه بولتزمن (LBM)، فاصله‌ی طولی، نسبت سرعت دورانی، ضریب تخفیف چندتایی (MRT).

# فهرست مطالب

۱	فصل اول: مقدمه
۲	۱-۱- مقدمه
۲	۲-۱- مروری بر کارهای انجام شده
۴	۳-۱- چکیده‌ای از فصلهای بعد
۵	فصل دوم: روش شبکه بولتزمن
۶	۱-۲- مقدمه
۷	۲-۲- روش دینامیک مولکولی
۸	۳-۲- شبکه خودکار سلول گاز
۱۱	۴-۲- روش شبکه بولتزمن
۱۳	۵-۲- گسسته کردن فضای فاز
۱۴	۶-۲- معادله بولتزمن برای سرعت
۱۶	۷-۲- ارتباط با معادله ناویر-استوکس
۱۶	۸-۲- الگوریتم حل
۱۷	۹-۲- تفاوت حلگر ناویر-استوکس و بولتزمن
۱۸	۱۰-۲- شرایط مرزی سرعت
۱۹	۱۱-۲- شرایط مرزی باز (سرعت)
۱۹	۱-۱۱-۲- شرط مرزی پرودیک
۲۱	۲-۱۱-۲- شرط مرزی تقارن
۲۱	۳-۱۱-۲- شرط مرزی با سرعت معلوم در مرز
۲۳	۴-۱۱-۲- شرط مرزی خروجی گرادیان صفر
۲۴	۱۲-۲- شرایط مرزی دیوار (سرعت)
۲۴	۱-۱۲-۲- کمانه کردن روی گره‌ها و کمانه کردن روی لینک‌ها
۲۶	۱۳-۲- معادله بولتزمن برای دما
۲۷	۱۴-۲- شرایط مرزی دما
۲۷	۱-۱۴-۲- شرط مرزی خروجی
۲۸	۲-۱۴-۲- شرایط مرزی دمایی روی مرزهای آدیاباتیک
۲۸	۳-۱۴-۲- شرایط مرزی دمایی با دمای مشخص
۲۹	فصل سوم: هندسه مورد بررسی
۳۰	۱-۳- طرح مسئله
۳۰	۲-۳- مرزهای منحنی در روش شبکه بولتزمن
۳۱	۳-۳- بررسی روش فیلیپوا و هانل

۳-۴- بهبود روش..... ۳۴

۳-۵- شرایط مرزی حرارتی در مرزهای منحنی..... ۳۵

۳-۶- محاسبه‌ی نیروی وارد بر سیلندر..... ۳۶

۳-۷- جزئیات حل عددی..... ۳۶

۳۸..... فصل چهارم: زمان تخفیف بر خورد پذیری

۴۴..... فصل پنجم: نتایج

۵-۱- اعتبارسازی..... ۴۵

۵-۱-۱- میدان سرعت..... ۴۵

۵-۱-۲- میدان دما..... ۵۰

۵-۲- نتایج..... ۵۲

۵-۲-۱- تک سیلندر..... ۵۲

۵-۲-۲- دو سیلندر..... ۵۹

۵-۲-۳- سه سیلندر..... ۷۱

۷۸..... فصل ششم

۶-۱- نتیجه گیری..... ۷۹

۶-۲- پیشنهادات..... ۸۰

۸۱..... منابع و مراجع



# 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..... ۱۰
- شکل (۵-۲): طرحواره تغییرات سیستم از لحظه  $t$  به  $t + \delta t$ ..... ۱۱
- شکل (۶-۲): شبکه D2Q9..... ۱۳
- شکل (۷-۲): طرحواره روش شبکه بولتزمن برای شبکه D2Q9..... ۱۵
- شکل (۸-۲): مقادیر مجهول توابع توزیع درون کانال..... ۱۹
- شکل (۹-۲): نمایش شرایط پرئودیک در دامنه حل..... ۲۰
- شکل (۱۰-۲): نمایش چگونگی قرار گرفتن مرزهای ورودی و خروجی پرئودیک و تبادل مقادیر  $\tilde{f}_\alpha$  در آن‌ها..... ۲۰
- شکل (۱۱-۲): شرط مرزی تقارن..... ۲۱
- شکل (۱۲-۲): کمانه کردن روی نقاط مرزی جسم جامد..... ۲۴
- شکل (۱۳-۲): چگونگی قرارگیری مرز خمیده بر روی شبکه..... ۲۶

## فصل سوم

- شکل (۱-۳): شماتیک هندسه مورد بررسی..... ۳۰
- شکل (۲-۳): چگونگی قرارگیری مرز خمیده بر روی شبکه..... ۳۱

## فصل چهارم

- شکل (۱-۴): طرحواره MRT..... ۴۳

## فصل پنجم

- شکل (۱-۵): شکل گیری گردابه در  $Re = 200, \beta = 0.5$ ..... ۴۵
- شکل (۲-۵): شکل گیری گردابه در  $Re = 200, \beta = 1$ ..... ۴۵
- شکل (۳-۵): خطوط جریان برای  $Re = 200, \beta = 1$  در  $t^* = 6$ ..... ۴۸
- شکل (۴-۵): کانتور گردابه برای  $Re = 200, \beta = 0.5$ ..... ۴۹
- شکل (۵-۵): رشد زمانی پروفیل سرعت بر روی محور  $x$  برای  $Re = 200, \beta = 0.5$ ..... ۴۹
- شکل (۶-۵): رشد زمانی پروفیل سرعت  $u^*$  روی محور  $y$  برای  $Re = 200, \beta = 0.5$ ..... ۵۰
- شکل (۷-۵): توزیع ناسلت میانگین بروی سطح برای  $Re = 200, \beta = 0, Pr = 0.71$ ..... ۵۰
- شکل (۸-۵): مقایسه توزیع دما بروی محور  $x$ ها برای  $Re = 200, \beta = 0.5, Pr = 0.5$ ..... ۵۱
- شکل (۹-۵): خطوط جریان و کانتور دما برای  $Re = 200, \beta = 0.5, Pr = 0.5$ ..... ۵۱

- شکل (۵-۱۰): عدد استروهال براساس  $\beta$  مختلف ..... ۵۳
- شکل (۵-۱۱): شکل گیری گردابه برای جریان گذرا از روی تک سیلندر برای  $\beta = 1$  در یک پریود زمانی ..... ۵۳
- شکل (۵-۱۲): متوسط زمانی ضرایب لیفت و درگ براساس  $\beta$  مختلف ..... ۵۴
- شکل (۵-۱۳): توزیع متوسط زمانی ضریب فشار بر روی سطح سیلندر ..... ۵۴
- شکل (۵-۱۴): رشد زمانی ضرایب لیفت و درگ براساس  $\beta$  مختلف ..... ۵۵
- شکل (۵-۱۵): کانتر گردابه و دما برای جریان گذرا از روی تک سیلندر برای  $\beta = 1$  در یک پریود زمانی ..... ۵۶
- شکل (۵-۱۶): ب توزیع ناسلت پریودیک بر روی سطح سیلندر برای  $\beta$  مختلف ..... ۵۷
- شکل (۵-۱۷): توزیع دما برای جریان گذرا از روی تک سیلندر برای  $t^* = 466$  ..... ۵۸
- شکل (۵-۱۸): توزیع ناسلت متوسط پریودیک و سطح بر روی سطح سیلندر برای  $\beta$  مختلف ..... ۵۸
- شکل (۵-۱۹): شکل گیری گردابه برای جریان گذرا از روی دو سیلندر برای  $\beta = 0.5$  و  $g^*$  مختلف در یک پریود زمانی ..... ۵۹
- شکل (۵-۲۰): شکل گیری گردابه برای جریان گذرا از روی دو سیلندر برای  $g^*$  و  $\beta$  مختلف در  $t^* = 466$  ..... ۶۱
- شکل (۵-۲۱): عدد استروهال براساس  $\beta$  و برای  $g^*$  مختلف ..... ۶۲
- شکل (۵-۲۲): متوسط زمانی ضرایب لیفت و درگ برای سیلندر اول براساس  $\beta$  و برای  $g^*$  مختلف ..... ۶۳
- شکل (۵-۲۳): توزیع متوسط زمانی ضریب فشار بر روی سطح سیلندر اول برای  $\beta$  و  $g^*$  مختلف ..... ۶۳
- شکل (۵-۲۴): متوسط زمانی ضرایب لیفت و درگ برای سیلندر دوم براساس  $\beta$  و برای  $g^*$  مختلف ..... ۶۴
- شکل (۵-۲۵): توزیع متوسط زمانی ضریب فشار بر روی سطح سیلندر دوم برای  $\beta$  و  $g^*$  مختلف ..... ۶۵
- شکل (۵-۲۶): کانتر گردابه و دما برای جریان گذرا از روی دو سیلندر برای  $\beta = 0.5$  و  $g^*$  مختلف در یک پریود زمانی ..... ۶۶
- شکل (۵-۲۷): توزیع ناسلت پریودیک بر روی سطح سیلندرها برای  $g^*$  و  $\beta$  مختلف ..... ۶۸
- شکل (۵-۲۸): توزیع ناسلت پریودیک بر روی سطح سیلندر برای  $\beta = 0$  و  $g^*$  مختلف ..... ۶۹
- شکل (۵-۲۹): توزیع ناسلت پریودیک بر روی سطح سیلندر برای  $\beta = 1$  و  $g^*$  مختلف ..... ۷۰
- شکل (۵-۳۰): توزیع ناسلت متوسط پریودیک و سطح براساس  $\beta$  و برای  $g^*$  مختلف ..... ۷۰
- شکل (۵-۳۱): شکل گیری گردابه برای جریان گذرا از روی سه سیلندر برای  $g^* = 0.2, 1.5$  و  $\beta$  مختلف در  $t^* = 566$  ..... ۷۱
- شکل (۵-۳۲): متوسط زمانی ضرایب لیفت و درگ برای سیلندر اول براساس  $\beta$  و برای  $g^*$  مختلف ..... ۷۲
- شکل (۵-۳۳): توزیع متوسط زمانی ضریب فشار بر روی سطح سیلندر اول برای  $\beta$  و  $g^*$  مختلف ..... ۷۲
- شکل (۵-۳۴): متوسط زمانی ضرایب لیفت و درگ برای سیلندر دوم براساس  $\beta$  و برای  $g^*$  مختلف ..... ۷۳
- شکل (۵-۳۵): توزیع متوسط زمانی ضریب فشار بر روی سطح سیلندر دوم برای  $\beta$  و  $g^*$  مختلف ..... ۷۳
- شکل (۵-۳۶): متوسط زمانی ضرایب لیفت و درگ برای سیلندر سوم براساس  $\beta$  و برای  $g^*$  مختلف ..... ۷۴
- شکل (۵-۳۷): توزیع متوسط زمانی ضریب فشار بر روی سطح سیلندر سوم برای  $\beta$  و  $g^*$  مختلف ..... ۷۴
- شکل (۵-۳۸): توزیع ناسلت پریودیک بر روی سطح سیلندر برای  $\beta = 0$  و  $g^*$  مختلف ..... ۷۵
- شکل (۵-۳۹): توزیع ناسلت پریودیک بر روی سطح سیلندر برای  $\beta = 1$  و  $g^*$  مختلف ..... ۷۶
- شکل (۵-۴۰): توزیع ناسلت متوسط پریودیک و سطح براساس  $\beta$  و برای  $g^*$  مختلف ..... ۷۷

# فهرست جداول

## فصل چهارم

۳۹.....	جدول (۱-۴): مشخصه جریان.....
۴۰.....	جدول (۲-۴): توابع برخورد در SRT.....
۴۱.....	جدول (۳-۴): توابع برخورد در MRT.....

## فهرست علائم

$D$	$(m)$	قطر سیلندر
$x$		محور افقی
$y$		محور قائم
$x^*$	$(2x / D)$	محور افقی بی بعد
$y^*$	$(2y / D)$	محور قائم بی بعد
$t^*$	$(2Ut / D)$	زمان بی بعد
$U$	$(m/s)$	سرعت ورودی
$u$	$(m/s)$	سرعت در راستای افقی
$v$	$(m/s)$	سرعت در راستای قائم
$T$		دما $(^{\circ}C)$
$u^*$	$(u / U)$	سرعت بی بعد در راستای افقی
$v^*$	$(v / U)$	سرعت بی بعد در راستای قائم
$T^*$	$((T - T_{\infty}) / (T_h - T_{\infty}))$	دما بی بعد
$g$	$(m)$	فاصله بین سیلندرها
$g^*$	$(g / D)$	فاصله بی بعد بین سیلندرها
$F$	$(N)$	نیروی وارده بر سیلندر
$F_x$	$(N)$	نیرو در راستای افقی
$F_y$	$(N)$	نیرو در راستای قائم
$T_h$	$(^{\circ}C)$	دمای سیلندر
$T_{\infty}$	$(^{\circ}C)$	دمای سیال ورودی
$Re$	$(UD / \nu)$	عدد رینولدز
$Pr$	$(\nu / \sigma)$	عدد پرانتل

$c_s$	سرعت صوت در مقیاس شبکه بولتزمن
$e_a$	سرعت گسسته شده شبکه بولتزمن
$f_a$	تابع توزیع سرعت قبل از برخورد
$\tilde{f}_a$	تابع توزیع سرعت بعد از برخورد
$f_a^{eq}$	تابع توزیع تعادلی سرعت
$g_a$	تابع توزیع دما قبل از برخورد
$\tilde{g}_a$	تابع توزیع دما بعد از برخورد
$g_a^{eq}$	تابع توزیع تعادلی دما
$w_a$	فاکتور وزنی
$CL$	ضریب لیفت $\frac{2F_x}{\rho U^2 D}$
$CD$	ضریب درگ $\frac{2F_y}{\rho U^2 D}$
$Cp$	ضریب فشار $\frac{p - p_\infty}{\rho U^2 / 2}$
$Nu$	عدد ناسلت موضعی $-\frac{D}{(T_h - T_\infty)} \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_{cylinders\ surface}$
$\overline{Nu}$	عدد ناسلت متوسط پریودیک $\frac{1}{t_p} \int_{t_p} Nu dt$
$\langle Nu \rangle$	عدد ناسلت متوسط سطح $\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} Nu d\theta$
$\langle \overline{Nu} \rangle$	عدد ناسلت متوسط سطح و پریودیک $\frac{1}{t_p} \int_{t_p} \langle Nu \rangle dt$
$t_p$	پریود نوسانات (s)
$f$	فرکانس نوسانات (1/s)
$Sr$	عدد استروهل $Df / U$

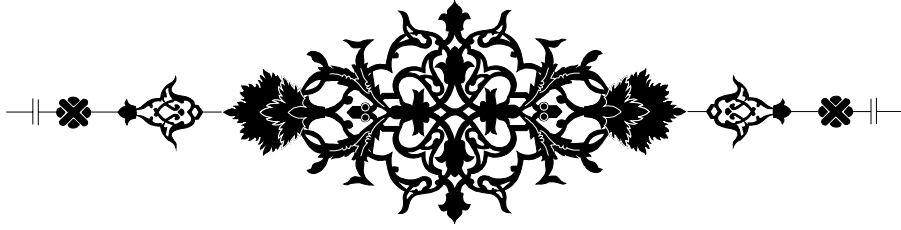
## فهرست علائم یونانی

$\omega$	(1/s)	سرعت زاویه‌ای سیلندر
$\beta$	( $\omega D / 2U$ )	نسبت سرعت زاویه‌ای
$\rho$	(Kg/m <sup>3</sup> )	چگالی سیال
$\tau_m$		زمان آرامش شبکه برای معادله‌ی ممنتوم
$\tau_h$		زمان آرامش شبکه برای معادله‌ی انرژی
$\nu$	(m <sup>2</sup> /s)	لزجت سینماتیکی سیال
$\sigma$	(m <sup>2</sup> /s)	ضریب نفوذپذیری سیال

## فهرست زیرنویسها

$\alpha$		شماره‌گر جهت گسسته شده بردار شبکه بولتزمن
$m$		ممنتوم
$h$		انرژی
$s$		سرعت صوت
$x$		جهت افقی
$y$		جهت قائم

# 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<sup>۱</sup> مرسوم، روش شبکه بولتزمن بر پایه مدل میکروسکوپیک و معادله جنبشی مزوسکوپیک<sup>۲</sup> استوار است که مجموعه رفتار ذرات در یک سیستم برای شبیه‌سازی مکانیک پیوسته از یک سیستم به کار گرفته می‌شود. در روش شبکه بولتزمن، کلیه محاسبات صریح بوده و نیازی به حل هیچ دستگاهی از معادلات نمی‌باشد. به دلیل ماهیت موضعی محاسبات، این روش به سادگی دارای قابلیت موازی شدن است. همچنین به دلیل سهولت اعمال شرایط مرزی، برای حل مسایلی که دارای هندسه پیچیده می‌باشند دارای کاربرد فراوانی می‌باشد. از کاربردهای مهم آن می‌توان از شبیه‌سازی جریان سیال و انتقال حرارت در مسائلی مانند جریان با مرزهای پیچیده (اجسام متخلخل، سطوح منحنی متحرک و...)، جریان چند فازي، جریان سیال غیر نیوتنی (شبیه‌سازی‌های جریان خون)، جریان درهم و... نام برد.

جریان حول سیلندرهایی چرخان هم‌دما که در این پایان‌نامه به بررسی آن پرداخته شده است، یک هندسه‌ی پر کاربرد در بسیاری از فرآیندهای صنعتی می‌باشد. از جمله کاربردهای صنعتی آن می‌توان از سیلندرهای خشک کن تماسی در فرآیندهای شیمیایی، غذایی، کاغذسازی، نساجی و همچنین لوازم خنک‌کننده استوانه‌ای در صنعت شیشه و پلاستیک نام برد. اگرچه استوانه‌ها چرخان پیکربندی ساده‌ای دارند اما جریان و انتقال حرارت حول آنها بسیار پیچیده است. فاکتورهای زیر که در تحلیل جریان مورد بحث هستند همچون، شکل‌گیری و از بین رفتن گردابه، تاثیر دوران سیلندرها بر روی نیروی بالابرنده، انتقال حرارت محلی روی سطح سیلندر، رشد میدان دما با زمان، سختی تحلیل چنین هندسه‌ای را افزایش داده است.

## ۱-۲- مروری بر کارهای انجام شده

در دهه‌های اخیر مطالعات عددی، آزمایشگاهی و تحلیلی زیادی بر روی میدان جریان حول سیلندر چرخان هم‌دما [۷-۱] یا سیلندر ثابت با چشمه گرمایی [۸-۱۲] صورت گرفته است. تا به الان مطالعاتی را که بر روی سیلندرهایی چرخان با چشمه گرمایی انجام شده است علی‌رغم تکنیک‌های قابل فهم به دلیل وجود جسم جامد متحرک با مرزهای منحنی محدود می‌باشند. اکثر مطالعات آزمایشگاهی پیشین در چنین جریان‌هایی توسط پلر<sup>۳</sup> و همکارانش انجام شده است [۱۳-۱۵]. در آزمایش‌های آنها، انتقال حرارت جابجایی از سیلندرهایی چرخان و

<sup>۱</sup> Computational Fluid Dynamics

<sup>۲</sup> Mesoscopic

<sup>۳</sup> Peller



گرم شده در جریان متقاطع و همچنین در لایه‌های مرزی روی سطح سیلندر در رینولدزهای بحرانی اندازه‌گیری شده است. در آزمایش انجام شده توسط اوزردوم<sup>۱</sup> [۱۶] ضرایب انتقال حرارت جابجایی متوسط از یک سیلندر چرخان در هوای ساکن بدست آورده شد. بر طبق نتایج آزمایشگاهی یک رابطه بین عدد ناسلت متوسط و عدد رینولدز بدست آمد. البته باید توجه شود که نتایج آزمایشگاهی بالا برای بازه خاصی از عدد رینولدز انجام شده‌اند و توانایی محاسبه مقادیر آنی انتقال حرارت برای قسمت‌های خاص سیلندر را نداشته‌اند.

کندوش<sup>۲</sup> [۱۷] یک مدل تقریبی-تحلیلی برای محاسبه‌ی انتقال حرارت جابجایی بر روی سطح سیلندرهای چرخان با دمای ثابت که در آن عدد ناسلت میانگین تابعی از عدد رینولدز و پراکتل است ارائه کرد. این رابطه فقط برای انتقال حرارت ناشی از چرخش خالص سیلندر معتبر می‌باشد، زیرا در آن اثر جریان عمود بر سیلندر در نظر گرفته نشده است. یکی از کارهای برجسته در این زمینه حل عددی انتقال حرارت حول یک سیلندر چرخان گرم شده با روش حجم محدود است [۱۸]. در این مدل سازی نیز اثر جریان عمود بر سیلندر در نظر گرفته نشده است. در حقیقت استفاده از مختصات استوانه‌ای در این مدل‌سازی یک ضعف اساسی در رفتار مرزها دارد و آن این است که برخلاف مرزهای داخلی، مرزهای بیرونی دامنه جریان مستطیلی می‌باشند. بنابراین انجام مطالعات بیشتر بر روی مسائل انتقال حرارت جابجایی با جریان گذرنده از روی سیلندر چرخان مستلزم این است تا محدودیت‌های اشاره شده در بالا از بین بروند.

مدلهای موجود روش شبکه‌ی بولتزمن<sup>۳</sup> به دو دسته‌ی جداگانه تقسیم می‌شوند، دسته‌ی اول مربوط به مدل چند سرعت [۲۰-۲۲] است که توزیع تعادلی چگالی با یک ترم اضافی سرعت برای بدست آوردن معادله‌ی انرژی و توزیع تعادلی دما استفاده می‌شود. دسته دوم مربوط به مدل‌های چندگانه توزیع تعادلی [۲۳-۲۸] می‌باشد که در آنها علاوه بر توزیع تعادلی چگالی، یک تابع توزیع برای دما نیز ارائه شده است. مدل دوم محدودیت‌های مدل‌های چند سرعت را ندارد و پایداری حل را نیز بهبود بخشیده است [۲۴].

مهمترین قسمت شبیه‌سازی جریان حول یک سیلندر چرخان اعمال شرایط مرزی سرعت و دما بر روی منحنی می‌باشد. فیلیپوا و هانل<sup>۴</sup> [۲۹] با استفاده از برون‌یابی خطی مدلی را برای اعمال شرایط مرزی سرعت ارائه کردند که دارای محدودیت‌هایی بود که در فصل‌های بعد به آن اشاره می‌کنیم. رنوی می و همکارانش<sup>۵</sup> [۳۰] مدلی ارائه دادند که توانست مدل پیشنهادی فیلیپوا و هانل را بهبود داده و محدودیت‌های موجود را از بین ببرد. برای

<sup>۱</sup> Özerdem

<sup>۲</sup> Kendoush

<sup>۳</sup> Lattice Boltzmann Method

<sup>۴</sup> O. Filippova and D. Hänel

<sup>۵</sup> Renwei Mei et al.

بررسی شرایط مرزی دما روی سطوح منحنی یان و زو<sup>۱</sup> [۳۱] برای اولین بار توانستند مدل جدیدی ارائه کنند که نتایج آن مطابقت بسیار خوبی با نتایج عددی و آزمایشگاهی داشته است. در این پایان‌نامه از مدل‌های رنوی می و همکاران [۳۰] و یان و زو [۳۱] به ترتیب برای مدل‌سازی میدان سرعت و دما استفاده شده است.

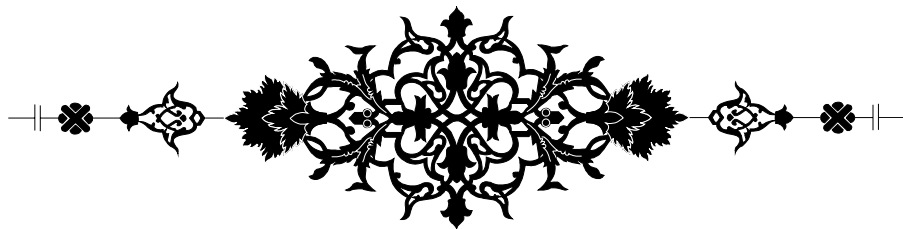
### ۳-۱- محتوای فصل‌های بعد

در فصل دوم این رساله روش شبکه بولتزمان 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 بولتزمان آورده شده است. سپس گسسته سازی فضای فاز، معادلات بولتزمان و رابطه‌ی آنها با معادلات ناویر استوکس شرح داده شده‌اند. همچنین در این فصل توضیح جامعی راجع به شرایط مرزی سرعت، دما و نحوه اعمال آنها داده شده است. فصل سوم این رساله حاوی اطلاعاتی راجع به هندسه مورد بررسی است و روش‌های استخراج معادلات برای مرزهای منحنی سرعت و دما از معادلات شبکه بولتزمان در آن آورده شده است. در نهایت به معرفی جزئیات کامل حل این معادلات در هندسه‌ی مورد بررسی پرداخته شده است. در فصل چهارم راجع به ضریب برخورد چند تایی (MRT)<sup>۲</sup>، معادلات آن و نحوه‌ی اعمال آن در برنامه توضیحات کاملی ارائه شده است. در فصل پنجم نیز به تطابق نتایج حل عددی با نتایج آزمایشگاهی و حل‌های تحلیلی دیگر در صورت وجود و سپس معرفی نتایج هندسه مورد بررسی پرداخته شده‌است.

<sup>۱</sup> Y.Y. Yan and Y.Q. Zu

<sup>۲</sup> Multi Relaxation Time

# فصل دوم



روش سبک بولترمن

## ۲-۱- مقدمه

در سال‌های اولیه که علم مکانیک سیالات برای حل و شبیه‌سازی جریان‌های سیال به کار گرفته شد، یک فرض بسیار مهم در بین روش‌ها و معادلات مختلف همواره ثابت بود: فرض پیوسته بودن سیال. در واقع در این فرض سیال یک محیط کاملاً پیوسته در نظر گرفته می‌شود که در آن دیگر به اتم‌ها و مولکول‌های سازنده سیال توجهی نمی‌شود. سپس با این فرض کمیت‌های ماکروسکوپیک مانند فشار، دما، سرعت، چگالی برای درک و تعریف خصوصیات سیال تعریف شدند و معادلاتی که روند تغییرات این مقادیر ماکروسکوپیک را مشخص می‌کردند پس از ساده‌سازی‌های مختلف بدست آمدند. معادلاتی مانند ناویر استوکس، اویلر، برنولی و پواسون. روش‌های فوق در حقیقت جوابگوی بسیاری از جریان‌های سیال بودند و توانستند گام‌های بلندی برای پیشرفت علم مکانیک سیالات بردارند.

اما ناکارآمدی روش‌های سنتی فوق در بعضی از سیستم‌های سیالاتی با گذشت زمان بتدریج نمایان شد. جریان با مرزهای متحرک، مقیاس‌های میکرو نانو، جریان‌های چند فاز، سیالات غیرنیوتنی، سیالات چند جزئی، جریان تراکم‌پذیر و... از جمله مواردی بودند که اعمال روش‌های سنتی مکانیک سیالات در آنها با مشکلات بسیاری از جمله عدم دقت و یا پیچیدگی اعمال مواجه بودند. این مشکلات دانشمندان را بر آن داشت تا معادلات و روش‌های جدیدی بدست بیاورند تا در تمام مسائل پاسخگو باشد. برای نیل به این موضوع محققین چاره‌ای نداشتند تا مهمترین فرض خود یعنی پیوسته‌بودن سیال را نادیده بگیرند. در واقع با این تصمیم نوعی بازگشت به ماهیت اصلی سیال یعنی ماده‌ای تشکیل شده از ذرات بسیار ریز انجام شد. با حذف فرض پیوسته بودن سیال شاید اینطور به نظر برسد دیگر کمیت‌های ماکروسکوپیک مانند سرعت و فشار، نباید به عنوان مشخصات جریان سیال معرفی شوند. در واقع همین‌طور است، زیرا کمیت‌های ماکروسکوپیک در واقع یک تعریف و یک مدل برای ساده‌سازی رفتار پیچیده ذرات سیال می‌باشند. برای مثال این که گفته می‌شود سرعت سیال در نقطه  $(x, y)$  برابر  $(0.2i + 0j) \text{ m/s}$  است بدین معنی است که در یک المان بسیار کوچک به اندازه  $dx dy$  در نقطه  $(x, y)$  میانگین برداری سرعت ذرات در آن نقطه  $0.2 \text{ m/s}$  به سمت راست می‌باشد و ذره‌ای می‌تواند در آن نقطه کاملاً در جهت عکس نیز حرکت داشته باشد (شکل ۲-۱). همین‌نین تعریف مشابه‌ای را می‌توان برای فشار، چگالی، ویسکوزیته و... نیز بکار برد.

بنابراین این طور به نظر می‌رسید که با مطالعه رفتار حرکت ذرات سیال و مشخص شدن مکان و سرعت ذرات و سپس با متوسط‌گیری بتوان کمیت‌های ماکروسکوپیک را تعیین کرد. اما نکته بسیار مهم تعداد ذرات