بسم الله الرحمن الرحيم

٣٢٧٧٣

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مکانیک

مدل تلاطم بر مبنای مقیاس طولی برای جریانهای تراکم پذیر و تقارن محوری با سرعت زیاد

پایان نامه دکترا مکانیک تبدیل انرژی

حسین احمدی کیا

۱۰۰۱۵

استاد راهنما

دکتر ابراهیم شیرانی

۱۳۷۹

۳۲۷۷۳

۱۳۸۰ /۱/ ۱۰

مرکز اطلاعات علمی ایران

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مکانیک

رساله دکترای مهندسی مکانیک-گرایش تبدیل انرژی آقای حسین احمدی کیا

تحت عنوان

مدل تلاطم بر مبنای مقیاس طولی برای جریانهای تراکم پذیر و تقارن محوری با سرعت زیاد

در تاریخ ۱۳۷۹/۹/۲ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و اصالت و صحت مطالب رساله مورد تأئید قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای رساله (رئیس هیئت داوران) دکتر ابراهیم شیرانی

۲- استاد مشاور دکتر محمد سعید سعیدی

۳- استاد مشاور دکتر احمدرضا پیشه‌ور

٤- سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده دکتر حسن خادمی‌زاده

کلیه حقـــوق مـادی مرتبـت بـر نتـایج مطالعـات،

ابتکارات و نوآوریهای ناشـــی از تحقیـق موضـوع

این پایان متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
چکیده	۱
فصل اول: مقدمه	۲
۱-۱ خصوصیات جریانهای ابرصوتی	۲
۱-۲ بررسی جریان روی جسم تقارن محوری	٤
۱-۳ حل عددی جریان روی جسم تقارن محوری	٥
۱-٤ هدف و مراحل انجام کار	٦
فصل دوم: مدلهای تلاطم برای جریانهای تراکم پذیر	۸
۲-۱ مقدمه	۸
۲-۲ مدلهای تلاطم صفر معادله‌ای برای جریانهای تراکم پذیر	۹
۲-۳ مدلهای تلاطم دو معادله‌ای برای جریانهای تراکم پذیر	۱۰
۲-۳-۱ مدل رابطه "دیلاتاسیون- اتلاف"	۱۱
۲-۳-۲ مدل رابطه "فشار-دیلاتاسیون"	۱۲
۲-٤ ارزیابی مدلهای تلاطم دو معادله‌ای برای جریانهای تراکم پذیر	۱۳
۲-٥ شبیه سازی مدل تلاطم بر مبنای مقیاس طولی	۱٤
۲-٥-۱ معادله حاکم بر همبستگی های آماری دو نقطه‌ای	۱۷
۲-٦ استخراج مدل دو معادله‌ای $k-\ell$	۲۱
۲-۷ توابع دیوار در مدل $k-\ell$	۲۳
۲-۸ مدل تلاطم $k-\ell$ در جریانهای تراکم پذیر با سرعت زیاد	۲٤
۲-۹ ناحیه انتقالی در جریان فراصوتی برای مدل $k-\ell$	۲٥
فصل سوم : معادلات حاکم برجریان	۳۰
۳-۱ معادلات حاکم بر جریان در مختصات فیزیکی	۳۰
۳-۲ تبدیل معادلات حاکم از فضای فیزیکی به فضای محاسباتی	۳۲
۳-۳ ضریب لزجت و هدایت حرارتی ملکولی	۳۳
۳-٤ اثر گازهای حقیقی و واکنشهای شیمیایی در دماهای زیاد	۳۳
۳-٥ خواص کلی مخلوط گاز در جریان با واکنشهای شیمیایی	۳٥

۳-٦-۱ تعیین نرخ واکنشها، $\dot{\omega}_i$ ۳۵
۳-٦-۲ ضریب دیفیوژن جرم، D_{im} ۳٦

فصل چهارم: روش حل عددی جریان و شرایط مرزی ۳۸
٤-۱ مقدمه ۳۸
٤-۲ روش حل ریمان رو ۳۹
٤-۳ استفاده از توابع محدودکننده در روشهای با دقت مرتبه دوم ٤۰
٤-٤ شرط انتروپی ٤۳
٤-۵ روش حل عددی با در نظر گرفتن گاز حقیقی ٤۵
٤-٦ شرایط مرزی ٤۷
٤-٦-۱ شرایط مرزی برای متغیرهای جریان، u، v، p و T ٤۷
٤-٦-۲ شرایط مرزی برای کمیتهای مدل تلاطم دو معادله‌ای ٤۷
٤-٦-۳ شرط مرزی برای جرم اجزاء در جریانهای با واکنش شیمیایی ٤۹
٤-۷ محدودیتهای اعمال شده برای کمیتهای مدل تلاطم دو معادله‌ای ٤۹

فصل پنجم: تولید و تطبیق شبکه ۵۱
۵-۱ مقدمه ۵۱
۵-۲ روش جبری تولید شبکه ۵۲
۵-۳ روش دیفرانسیلی تولید شبکه ۵۲
۵-٤ شبکه جابجا شده ۵۳
۵-٤-۱ روش حل معادلات بیضوی تولید شبکه ۵٤

فصل ششم: بررسی نتایج ۵٦
٦-۱ مقدمه ۵٦
٦-۲ ارزیابی روش حل عددی در جریان لزج ابرصوتی ۵٦
٦-۲-۱ جریان آرام روی جسم نیمه بینهایت تقارن محوری ۵۷
٦-۲-۲ جریان آرام ابرصوتی روی جسم نیمه بینهایت دو بعدی ۵۸
٦-۲-۳ مقایسه محدودکننده‌ها و شرایط انتروپی ۵۹
٦-۳ انکسار موج ضربه‌ای از یک استوانه و کره ٦۰
٦-٤ جریان لایه مرزی انتقالی روی صفحه تخت ٦۱
٦-۵ جریان متلاطم پشت جسم تقارن محوری ٦۲

۶-۵-۱ مقایسه مدلهای تلاطم بدون تصحیحات تراکم پذیری ۶۲
۶-۵-۲ مدلهای تلاطم با تصحیحات تراکم پذیری پشت استوانه تقارن محوری ۶۵
۶-۵-۳ ارزیابی مدلهای تلاطم در پیش‌بینی جریان پشت جسم ۶۵
۶-۶ جریان گذر صوتی و تقارن محوری روی پرتابه ۶۶
۶-۷ جریان روی یک استوانه توخالی با گوشه تراکمی ۶۸
۶-۸ جریان روی یک جسم هذلولوی با گوشه تراکمی..... ۷۰
۶-۹ جریان ابرصوتی روی یک دماغه کروی با گازهای حقیقی و واکنشهای شیمیایی..... ۷۱
۶-۱۰ جمع بندی ۷۳
۶-۱۱ پیشنهاد برای ادامه کار..... ۷۶

پیوستها ۱۰۱
منابع ۱۰۹
چکیده انگلیسی..... ۱۱۶

چکیده

جریانهای تراکم پذیر با سرعتهای زیاد با استفاده از مدلهای تلاطم جبری و دو معادله‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته و یک روش شبیه سازی تلاطم بر مبنای مقیاس طولی ارائه شده است. مدل دو معادله‌ای $k-k\ell$ از معادله حاکم بر همبستگی آماری دو نقطه‌ای بدست آمده است. سپس مدل تلاطم دو معادله‌ای $k-\ell$ از بسط مدل $k-k\ell$ استخراج شده و ضرایب مدل با استفاده از جریانهای ساده بدست آمده‌اند. این مدل برای جریانهای تراکم پذیر و ناحیه انتقالی توسعه داده شده است.

یک برنامه کامپیوتری برای حل عددی جریان آرام و متلاطم با فرضهای گاز کامل، متعادل و نامتعادل ترمودینامیکی بر اساس روش حل ریمان رو با دقت مکانی مرتبه دوم به صورت صریح و ضمنی تدوین شده است. ابتدا اثرمحدودکننده‌ها و شرایط انتروپی مختلف مورد بررسی قرار گرفته و با انتخاب محدودکننده مناسب برای جریانهای تراکم پذیر مختلف، مدل تلاطم $k-\ell$ به همراه مدلهای بالدوین - لوماکس، $k-\varepsilon$ و $k-\omega$ مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. در جریانهای تراکم‌پذیر پشت جسم، مدل $k-\ell$ دقتی مشابه با مدل $k-\varepsilon$ دارد و مدل $k-\omega$ خطای بیشتری در پیش بینی آرایش جریان و نقطه بازیابی مجدد در ناحیه دنباله جسم داشته است. تصحیحات تراکم پذیری سرکار و زمن نتوانسته‌اند دقت مدلهای $k-\varepsilon$ و $k-\omega$ را بهبود بخشند. کلیه مدلهای تلاطم از جمله مدل $k-\ell$ در پیش بینی ناحیه جدایش جریان ابرصوتی روی گوشه تراکمی موفق بوده‌اند، اما ماکزیمم نرخ انتقال گرما توسط هیچکدام از مدلها خوب پیش بینی نشده است. مدل $k-\ell$ در جریانهای تراکم‌پذیر دقتی معادل با مدل $k-\varepsilon$ داشته و بعضاً بهتر از مدل $k-\omega$ بوده است. همچنین این مدل رفتار ناحیه انتقالی را خوب پیش بینی کرده است. مدل بالدوین- لوماکس در اغلب جریانها به جز جریان فراصوتی پشت جسم دقت و پایداری خوبی داشته است.

برای کاهش زمان محاسبات در جریانهای ابرصوتی (خصوصاً برای جریانهای با واکنشهای شیمیایی)، یک روش انطباق شبکه با استفاده از حل معادلات پویسان بر مبنای طول قوس خطوط شبکه ارائه گردیده است. این روش برای جریان روی دماغه کروی با فرضهای گاز کامل، متعادل و نامتعادل ترمودینامیکی به خدمت گرفته شده است. همواری و سرعت همگرایی این روش بسیار خوب است و برای اتصال به برنامه کامپیوتری مناسب می‌باشد.

فصل اول

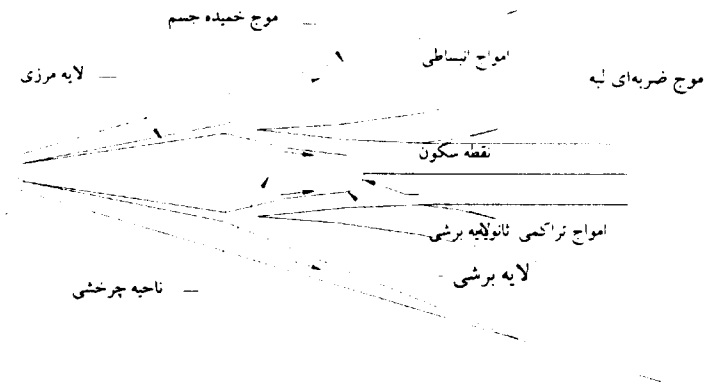
مقدمه

۱-۱ خصوصیات جریانهای ابرصوتی

جریان لزج ابرصوتی[1] روی جسم تقارن محوری در صنعت هوا فضا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. طراحی صحیح و اصولی موشکها، دماغه فضاپیماها و اغلب پرتابه‌ها[2] نیاز به اطلاعات کاملی از توزیع فشار، ضریب اصطکاک و گرمایش آیرودینامیکی در طی زمان پرواز دارد. این اطلاعات جهت طراحی سیستمهای جلوبرنده، هدایت و کنترل جسم و نیز تعیین خصوصیات متالورژیکی سطح مورد استفاده قرار می‌گیرد.

از جمله مسایل بسیار مهم در طراحی اجسام پرنده، شناخت رخدادهای فیزیکی حاکم بر دینامیک حرکت آنهاست. خصوصیات جریانهای تراکم پذیر، اغتشاش در جریان و حضور امواج ضربه‌ای و انبساطی قوی و اندرکنش آنها با لایه لزج نزدیک دیوار، جریان حول جسم را پیچیده می‌کند. خصوصیات جریان فراصوتی روی یک جسم تقارن محوری و ناحیه دنباله پشت آن به طور شماتیک در شکل ۱-۱ نشان داده شده است. عدد ماخ، عدد رینولدز و هندسه جسم نقش زیادی در آرایش جریان دارند. جریان پشت جسم پیچیده بوده و شامل جریان لایه برشی آزاد، جریان چرخشی، جدایش جریان و الحاق دوباره آن و تداخل امواج ضربه‌ای و انبساطی با لایه مرزی و ناحیه گردابی می‌باشد. بنابراین در جسم تقارن محوری اغلب جریانهای پایه در مکانیک سیالات موجود است.

1- Hypersonic
2- Projectile



شکل ۱-۱ خصوصیات جریان ابرصوتی روی جسم تقارن محوری

جریان لزج ابرصوتی روی یک جسم تقارن محوری با دماغه پخ[1] دارای خصوصیات زیر است.

۱- لایه موج ضربه‌ای[2] نازک

با افزایش عدد ماخ، موج ضربه‌ای قویتر شده و چگالی پشت آن افزایش می‌یابد و در نتیجه سطح مقطع عبوری جریان کمتر شده و فاصله بین موج ضربه‌ای و جسم کاهش می‌یابد (شکل ۱-۱). کاهش لایه موج ضربه‌ای اندرکنش آن را با لایه مرزی بیشتر می‌کند.

۲- لایه انتروپی[3]

افزایش عدد ماخ موجب نازک شدن لایه موج ضربه‌ای شده و موج ضربه‌ای در نزدیک دماغه جسم انحنای زیادی پیدا می‌کند. در این حالت تغییرات انتروپی جریان اطراف موج ضربه‌ای شدیداً افزایش می‌یابد. خط جریانی که از قسمت تقریباً عمودی موج ضربه‌ای عبور می‌کند تحت تأثیر انتروپی زیاد از این ناحیه به ناحیه ضعیف‌تر موج ضربه‌ای قرار می‌گیرد و در نتیجه گرادیان شدید انتروپی در ناحیه دماغه ایجاد می‌شود. تغییرات شدید انتروپی در ناحیه دماغه باعث تشکیل لایه انتروپی در پایین دست جریان می‌شود. ضخامت لایه مرزی در نزدیک سطح و داخل لایه انتروپی افزایش پیدا کرده و روی آن اثر می‌گذارد، در نتیجه لایه مرزی با لایه انتروپی اندرکنش می‌کند. لایه انتروپی یک ناحیه با چرخش زیاد است و گاهی آن را لایه ورتیسیته نیز می‌نامند.

۳- اندرکنش ویسکوز[4]

انرژی جنبشی زیاد جریانهای ابرصوتی در ناحیه لزج نزدیک دیوار، توسط اثر لزجت سریعاً کاهش یافته و به انرژی داخلی در گاز تبدیل می‌شود که آن را اتلاف ویسکوز می‌نامیم. در این حالت دما در لایه مرزی سریعاً افزایش می‌یابد. افزایش دما باعث کاهش چگالی و افزایش لزجت ملکولی در این ناحیه شده و در نتیجه ضخامت لایه مرزی بیشتر می‌شود. افزایش

1- Blunt body
2- Shock layer
3- Entropy layer
4- Viscous interaction

ضخامت لایه مرزی مشابه ضخیم‌تر شدن جسم بوده که خود موجب جابجایی موقعیت موج ضربه‌ای می‌شود. متقابلاً تغییر محل موج ضربه‌ای روی ضخامت لایه مرزی اثر مـی‌گذارد. ایـن فرآینـد اندرکنـش ویسـکوز نـامیده می‌شـود. اندرکنـش ویسـکوز نیروهای آئرودینامیکی و گرمایش آئرودینامیکی را به شدت افزایش می‌دهد.

٤- دمای زیاد، گرمایش آئرودینامیکی و تجزیه شیمیایی

افزایش دما به دلیل حضور موج ضربه‌ای و اتلاف ویسکوز، انرژی ارتعاشـی مولکولـهای گاز را زیـاد نمـوده و ممکـن است موجب تجزیه شیمیایی و یونیزه شدن گازها شود. مسئله گرمایش آئرودینامیکی در لایه مرزی ابرصوتی جدی‌تر بـوده بـه طوری که افزایش دمای سطح از چالشهای اساسی در طراحی وسایل ابرصوتی محسوب می‌شود. از طرف دیگر افزایـش دمـای سطح و لایه داغ گاز، انتقال گرما در مود تشعشعی به محیـط اطـراف را افزایـش می‌دهـد. تجزیـه شـیمیایی گاز روی نیروهـای آیرودینامیکی و گرمایش آیرودینامیکی تأثیر زیادی می‌گذارد.

٥- کم بودن چگالی در ارتفاعات بالا

از آنجایی که اغلب اجسام پرنده با سرعتهای ابرصوتی در ارتفاعات بالا پرواز می‌کنند، کـاهش چگالـی در ایـن ناحیـه می‌تواند تأثیر زیادی در نیروها و ممانهای آئرودینامیکی بگذارد. در این حالت عـدد نادسـن[1]، $Kn = \lambda / d$ مـهم خواهـد بـود (λ پویش آزاد ملکولها و d یک طول مشخصه است). در اعداد $Kn > 0.2$ فرض پیوستگی سیال صحیـح نبـوده و نمی‌تـوان معادلات ناویه- استوکس[2] را بکار برد. تا ارتفاع ٤٠ کیلومتری از سطح دریا می‌توان هوا را پیوسته در نظر گرفت. در ارتفاع ۹۲ کیلومتری نیز می‌توان هوا را پیوسته در نظر گرفت، اما در این ارتفاع شرط عدم لغزش روی سطح برقرار نیست و دمای سطح با دمای گاز مجاور آن تفاوت دارد [۱]. در ارتفاعات بالاتر هوا پیوسته نبوده و بایستی از تئوری جنبشی گازها مسئله را حل نمود.

٦- اغتشاش در جریان

در برخی از موارد عملی عدد رینولدز جریان بزرگ بوده و جریان متلاطم می‌باشـد. بـرای تخمیـن صحیح‌تـر نیروهـا و گرمایش آیرودینامیکی، لازم است مدلهای مناسبی برای تقریب اثـر اغتشـاش اسـتفاده شـود. پیچیـدگی مدلـهای تلاطـم بـرای جریانهای تراکم پذیر تحلیل جریان را مشکل می‌کند. اضافه نمودن اثرات تراکم پذیری و اثرات دیواره در مدلهای تلاطم برای پیش‌بینی بهتر ضرایب اصطکاک و انتقال گرما در سطح جسم الزامی به نظر می‌رسد.

۱-۲ بررسی جریان روی جسم تقارن محوری

یکی از پارامترهای مهم در تحلیل حرکت هر جسم پرنده تعیین نیروهای آئرودینامیکی وارد بر آن است. عمومـاً بـه دو طریق تجربی و محاسباتی می‌توان تخمینی از این نیروها بدست آورد که هر دو مزایا و معایب خاص خـود را دارنـد. بـه عنـوان مثال می‌توان با استفاده از تونلهای باد ابرصوتی نیروهای وارد بر یک جسم را برای محدوده‌ای از اعـداد مـاخ تعییـن نمـود، امـا

1- Knudsen number
2- Navier-Stokes

استفاده از روشهای تجربی بسیار پر هزینه و وقت‌گیر بوده و در مواردی ناممکن است. از طرف دیگر انجام تحلیلهای محاسباتی مستلزم وجود مدلهای ریاضی حاکم بر فرایند مورد نظر و توان محاسباتی مورد نیاز است. متأسفانه در برخی موارد این روشها در دسترس و یا قابل اعتماد نیستند. با این وجود ظهور روشهای عددی کارآمد در دهه‌های گذشته حداقل امکان حل بسیاری از مسائل پیچیده را با استفاده از فرضیات ساده کننده برای طراحان فراهم آورده است، به طوری که درک فیزیک حاکم بر این مسائل و همچنین تخمین اولیه از مقادیر مورد نیاز در طراحی به کمک این روشهای قدرتمند نیاز دارد.

بررسی میدان جریان تراکم پذیر و لزج هوا روی یک جسم تقارن محوری در هر زمان مستلزم حل کامل معادلات ناویه- استوکس تراکم پذیر است. هرچند هندسه جسم تقارن محوری نسبتاً ساده است، اما با توجه به خصوصیات ذکر شده در جریانهای ابرصوتی حل صحیح چنین میدان جریانی نیاز به روشهای عددی پیشرفته دارد که به وسیله آنها بتوان با شبکه و گامهای زمانی مناسب در یک مدت زمان معقول (با توجه به کامپیوترهای قابل دسترس) رفتار میدان جریان را بررسی نمود.

جریان روی جسم تقارن محوری با دماغه پخ توسط محققین زیادی مورد مطالعه قرار گرفته است، اما خصوصیات جریانهای ابرصوتی (خصوصاً روی جسم تقارن محوری و دنباله پشت آن) با در نظر گرفتن اغتشاش جریان، فرض گاز حقیقی و واکنشهای شیمیایی هنور جای بحث و تأمل دارد. بدون شک حل و بررسی خصوصیات چنین جریانهایی می‌تواند راهگشای حل جریانهای پیچیده‌تر گردد.

همانطور که گفته شد به دلیل وجود امواج ضربه‌ای قوی و نیز اتلافات ویسکوز، دمای سطح و گازهای پشت موج ضربه‌ای زیاد می‌باشد و ممکن است تحت این شرایط گازها تجزیه شوند و فرض گاز کامل صحیح نباشد. در این حالت خواص فیزیکی سیال ثابت نبوده و رابطه فشار و دما از روابط تجربی به جای رابطه گاز کامل بدست می‌آید. همچنین باید معادلات مربوط به اجزاء تجزیه شده گاز حل شوند.

۱-۳ حل عددی جریان روی جسم تقارن محوری

در سالهای ۱۹۵۰ تا ۱۹۶۰ تحقیقات بسیار زیادی برای حل میدان جریان ابرصوتی روی جسم تقارن محوری انجام شد که سودی نداشتند، زیرا حضور موج ضربه‌ای خمیده و نواحی زیر صوت و فراصوت پشت آن و در نتیجه تفاوت ریاضی معادلات بیضوی حاکم در ناحیه زیر صوت و معادلات هذلولی در ناحیه فراصوت، نیازمند روش عددی مناسبی می‌باشد که کل ناحیه را شامل شود. در سال ۱۹۶۶ مورتی و ابت [۲] با بکار بردن مفهوم روش وابسته به زمان[1] برای جریان دائم کمک زیادی به حل میدان جریان فراصوتی روی جسم نمودند. بعد از سال ۱۹۶۶ مؤسسات تحقیقاتی و نظامی به سرعت این روش محاسباتی را بکار بردند و آن را توسعه دادند. روشهایی که اخیراً کاربرد زیادی پیدا نموده‌اند مبتنی بر استفاده از مفهوم شرط پایداری غیرخطیTVD[2] است (برای مثال به مرجع [۳] رجوع شود). این روشها در میدانهای دارای ناپیوستگی خاصیت مطلوبی دارند. در این تحقیق از روش تقسیم شاره رو[3] استفاده شده است [٤ تا ۷]. این روش ابتدا برای حل معادلات اویلر استفاده شد و سپس برای جریانهای لزج توسعه داده شده است.

1- Time-dependent
2- Total variations diminishing
3- Roe's flux difference splitting

۱-٤ هدف و مراحل انجام کار

اگر جریان فراصوتی روی جسم متلاطم باشد به یک مدل تلاطم مناسب برای پیش‌بینی دقیق اندرکنشهای بین جریان لزج و امواج ضربه‌ای و انبساطی و نیز تعیین بارهای آئرودینامیکی و گرمایش آئرودینامیکی نیاز است. اغلب مدلهای تلاطم استفاده شده در حل جریانهای ابرصوتی اختلاف زیادی با نتایج تجربی دارند [۸]. پیچیدگیهای هندسی و فیزیکی میدان جریان، کارایی مدلهای تلاطم در جریانهای ابرصوتی را کم می‌کند. با توجه به تحقیقات گسترده‌ای که در چند سال اخیر روی مدلهای تلاطم تراکم پذیر انجام گرفته است در می‌یابیم که دانش پایه ما در باره اثرات تراکم پذیری در مدلهای تلاطم بسیار اندک است. استفاده از مدلهای تلاطم تراکم ناپذیر برای جریانهای تراکم پذیر از دقت کافی برخوردار نیستند [۸]. اغلب این مدلها بر مبنای جریانهای تراکم ناپذیر همگن بدست آمده‌اند. اثرات تراکم پذیری، اثرات دیواره، اندرکنشهای قوی امواج ضربه‌ای و انبساطی با ناحیه لزج نزدیک دیواره، نواحی جدایش جریان پشت جسم و واکنشهای شیمیایی در دماهای بالا می‌توانند بر روی دقت مدلهای تلاطم بسیار مؤثر باشند. لازم است این مدلها برای جریان با خصوصیات پیچیده نظیر اجسام تقارن محوری مورد بررسی بیشتری قرار گیرند.

روشهای شبیه سازی جریانهای متلاطم همگی بر وارد نمودن دوباره اطلاعات مفقود شده طراحی می‌گردند. در این روشها، اطلاعات تجربی و گاه نظری موجود در باره جریان متلاطم به شکل مناسب و با فرمولاسیون درست پیشنهاد شده و به معادلات حاکم افزوده می‌شوند. بنابراین روشهایی که بتوانند اطلاعات بیشتر و مستقیم‌تری از جریان را وارد مطالعات بنمایند، اصولاً مقبول‌تر و قابل دفاع‌ترند. هدف اصلی در این پروژه بررسی کارایی و دقت مدلهای تلاطم جبری و دو معادله‌ای موجود در جریانهای تراکم پذیر با سرعت زیاد و بدست آوردن یک مدل دو معادله‌ای بر مبنای مقیاسهای سرعت و طولی برای این نوع جریانها می‌باشد. در این پروژه یک روش شبیه سازی تلاطم بر مبنای پارامتری به نام مقیاس طولی ارائه می‌شود. این پارامتر یکی از اساسی ترین اجزاء در هر مدل تلاطم است. به دلیل ضعفهای اساسی ذکر شده توسط محققین مختلف برای مدلهای جبری و دو معادله‌ای (که عمدتاً به خاطر تعیین مقیاس طولی در آنها می‌باشد)، مدل دو معادله‌ای $k-\ell$ بر مبنای مقیاسهای سرعت و طولی با استفاده از مفهوم همبستگی آماری دو نقطه‌ای بدست آمده است. این مدل در سال ۱۹۵۱ توسط روتا [۹] ارائه شده است، اما به دلیل مشکلات عددی و دقت کم آن، تحقیقات بسیار کمی روی این مدل انجام گرفته است.

در فصل دوم مدلهای بالدوین- لوماکس، $k-\varepsilon$ و $k-\omega$ بررسی شده و اثرات تراکم پذیری در این مدلها مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین برای تعیین خصوصیات جریان روی سطح، اثرات دیواره در این مدلها بررسی شده‌اند. سپس مدل دو معادله‌ای $k-\ell$ مستقلاً بدست آمده و ثابتهای مدل با توجه به خصوصیات جریانهای ساده و مدلهای یک معادله‌ای موجود (که مقیاس طولی در آنها از نتایج تجربی بدست آمده است) تعیین شده‌اند. همچنین با توجه به تحقیقات پژوهشگران مختلف روی اثرات دیواره و جریان انتقالی[1] در مدلهای جبری و یک معادله‌ای، توابع دیوار برای این مدل

1- Transition

ارائه شده و مدلی برای انتقال از آرام به متلاطم در آن بدست آمده است. دقت و کارایی حل عددی در مدل ارائه شده $k-\ell$ و نیز مدلهای بالدوین- لوماکس، $k-\varepsilon$ و $k-\omega$ (به همراه تصحیحات مختلف در آنها) در برخی از جریانهای تقارن محوری با سرعت زیاد در فصل ششم مورد بررسی قرار گرفته‌اند. سعی شده است مثالهایی انتخاب شوند که مدلهای تلاطم در آنها ضعیف گزارش شده‌اند.

بررسی مدلهای تلاطم در جریانهای با سرعت زیاد نیازمند یک روش عددی با کارایی بالا می‌باشد. برای این منظور روش عددی رو انتخاب شده است که قابلیت زیادی در حل جریانهای ابرصوتی دارد. قبل از بررسی مدلهای تلاطم، این روش برای جریانهای ابرصوتی آرام روی اجسام با دماغه پخ[1] مورد ارزیابی قرار گرفته و تأثیر انواع محدود کننده‌ها[2] و شرایط انتروپی[3] مختلف در تعیین خواص سطحی (نظیر فشار، ضریب اصطکاک و نرخ انتقال گرما) بررسی شده است. روش حل عددی رو برای جریان با فرض گاز کامل، جریان متعادل ترمودینامیکی و جریان با واکنشهای شیمیایی در فصل چهارم ارائه شده است.

از اهداف دیگر این تحقیق بررسی خصوصیات جریان ابرصوتی روی جسم تقارن محوری نظیر جریان گاز متعادل ترمودینامیکی، جریان گاز با واکنشهای شیمیایی و جریان گذرا است. در نظر نگرفتن این خصوصیات در حل عددی، حتی ممکن است از در نظر نگرفتن اثر اغتشاش در جریانهای متلاطم بیشتر باشد.

عدم انتخاب صحیح شبکه منجر به نتایج نامطلوبی می‌گردد و در بعضی موارد موجب ناپایداری حل عددی می‌شود. از آنجایی که معادلات در شبکه محاسباتی حل می‌شوند، نیاز به یک شبکه هموار و بدون اعوجاج داریم. همچنین خطوط شبکه باید حتی الامکان متعامد باشند. برای ایجاد شبکه‌های محاسباتی مورد نیاز در شبیه‌سازیها، از روشهای جبری و حل معادلات بیضوی استفاده شده است. برای کاهش حجم محاسبات و افزایش کارایی حل عددی، یک روش جدید برای انطباق شبکه[4] بر مبنای طول کمان خطوط شبکه ارائه شده است. در این روش سلولهای شبکه حوالی نواحی با گرادیان زیاد خواص در راستای یکی ازخطوط شبکه تمرکز می‌یابند. این روش انطباق شبکه برای جریانهای فراصوتی روی جسم تقارن محوری بسیار مناسب می‌باشد. روشهای تولید و انطباق شبکه در فصل پنجم ارائه شده‌اند.

در فصل ششم نتایج حل عددی جریان روی اجسام دو بعدی و تقارن محوری بررسی شده‌اند. در این فصل ابتدا روش حل عددی در جریان آرام با اعداد ماخ بالا مورد بررسی قرارگرفته و سپس دقت مدلهای تلاطم مختلف با اثرات تراکم پذیری و تصحیحات دیواره روی برخی از اجسام تقارن محوری و در ناحیه پشت جسم در سرعتهای بالا ارزیابی شده است. جریان متلاطم تراکم پذیر روی این اجسام با استفاده از مدل $k-\ell$ حل شده و با نتایج تجربی و مدلهای تلاطم دیگر مقایسه شده است. سپس اثرات گاز واقعی و تجزیه شیمیایی در جریان روی جسم تقارن محوری در سرعتهای زیاد و ارتفاعات فوقانی جو مورد مطالعه قرار گرفته است. درخاتمه جمع بندی از نتایج ارائه شده است.

1- Blunt
2- Limiter
3- Fix entropy condition
4- Adaptive grid

فصل دوم

مدلهای تلاطم برای جریانهای تراکم پذیر

۲-۱ مقدمه

بررسی جریانهای متلاطم یکی از پیچیده ترین شاخه‌های مکانیک سیالات است. یکی از اساسی ترین گامها برای حل جریان متلاطم پیشنهاد رینولدز برای تجزیه مقادیر مشخصه دینامیکی مانند، سرعت، فشار و دما به دو جزء نوسانی و متوسط می‌باشد. معمولاً متغیرهای دما و سرعت به صورت متوسط گیری وزنی[1] (که آن را با بالانویس " نشان می‌دهیم) و متغیرهای فشار و چگالی به صورت متوسط گیری رینولدز (که آن را با بالانویس ' و یا با حروف کوچک نشان می‌دهیم) تعریف می‌شوند.

مدلهای متفاوتی برای جریانهای متلاطم در سرعتهای زیاد معرفی شده‌اند. آنها را می‌توان در مدلهای صفر، یک و دو معادله‌ای، تنش رینولدز، شبیه سازی ادیهای بزرگ[2] و غیره تقسیم بندی نماییم. علاوه بر دقت و پایداری این مدلها در کاربردهای مهندسی، زمان حل عددی آنها نیز اهمیت دارد. مدلهای دو معادله‌ای حد وسطی از این مدلها هستند که علاوه بر دقت نسبتاً مناسب، زمان محاسبات کمتری نسبت به مدلهای مرتبه بالاتر نظیر مدل تنش رینولدز و شبیه سازی ادیهای بزرگ دارد.

در مدلهای صفر معادله‌ای، معادله انتقال برای جریان متلاطم وجود ندارد. این مدلها از مفهوم ادی- لزجت[3] استفاده می‌کنند. بر اساس چگونگی مفهوم ادی- لزجت مدلهای تلاطم متفاوتی وجود دارند که در مراجع [۱۰و۱۱] به طور کامل معرفی شده‌اند. مدلهای تلاطم دو معادله‌ای نیاز به دو مقیاس سرعت و طولی دارند. مطمئناً مهمترین کمیت برای تعیین مقیاس سرعت ادیها، انرژی جنبشی اغتشاشات می‌باشد که در همه مدلهای دو معادله‌ای بکار رفته است. اما در اغلب مدلهای دو

1- Faver (density-weighted) averages
2- Large eddy simulation
3- Eddy-viscosity