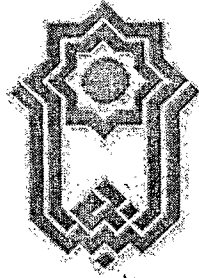


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه بوعلی سینا  
دانشکده مهندسی  
گروه مکانیک

### پایان نامه:

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک  
گرایش تبدیل انرژی

### عنوان:

شبیه‌سازی عددی جریان داخلی به روش اتلاف عددی  
غیرخطی ماتریسی

### استاد راهنما:

دکتر محمد مهدی رشیدی

انرژی و نظامات بزرگ مقیاس  
تیم مرکز

### پژوهشگر:

محمدحسین جلال‌رزاقی

۱۳۸۸ / ۵ / ۲۲

اردیبهشت ۱۳۸۷

۱۱۶۲۳۱

همه امتیازهای این پایان نامه به دانشگاه بوعلی سینا  
تعلق دارد. در صورت استفاده از تمام یا بخشی از  
مطالب پایان نامه در مجلات، کنفرانسها و یا  
سخنرانی‌ها، باید نام دانشگاه بوعلی سینا (یا استاد یا  
اساتید راهنمای پایان نامه) و نام دانشجو با ذکر ماخذ  
و ضمن کسب مجوز کتبی از دفتر تحصیلات تکمیلی  
دانشگاه ثبت شود. در غیر این صورت مورد پیگرد  
قانونی قرار خواهد گرفت.

تقدیم بہ:

مضور سبز ہمسرہ

مادر مہربانہ

و

پدر فداکارہ

و خانواده عزیزہ کہ پشتوانہ ہمیشگیہ ہستند.

نویسنده: جلال رزاقی، محمدحسین

عنوان پایان نامه:

شبیه‌سازی عددی جریان داخلی به روش اتلاف عددی غیرخطی ماتریسی

استاد راهنما: رشیدی، محمد مهدی (Ph.D.)

درجه: کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک زمینه مطالعه: دینامیک سیالات محاسباتی

دانشکده: فنی مهندسی - دانشگاه بوعلی سینا تاریخ فارغ‌التحصیلی: اردیبهشت ۱۳۸۷

واژه‌های کلیدی: نازل، شوک، معادلات TLNS، اتلاف عددی غیر خطی، حسگر شوک.

### چکیده:

شبیه‌سازی عددی میدان جریان داخلی درون نازل با استفاده از حل معادلات ناویر-استوکس در تجزیه و تحلیل حوزه جریان نازل یک امر ارزشمند و لازم می‌باشد. امروزه با استفاده از روشهای عددی که نیاز به زمان و حافظه کامپیوتری بسیار بالایی دارند، می‌توان حوزه جریان (انتقال حرارت) درون نازل را تعیین نمود، سپس با استفاده از نتایج نهایی این حوزه جریان، نیروی رانش و دیگر پارامترهای لازم را به دست آورد. برای به دست آوردن حوزه جریان جهت تحلیل انتقال حرارت در نازل که مورد نیاز تحلیل سازه‌های بدنه نازل است، تعیین ناحیه شوک امری لازم است. تشکیل شوک در داخل نازل مافوق صوت پدیده مهمی است. حضور شوک‌های مایل ناخواسته می‌تواند به میزان قابل توجهی میدان جریان پایین دست را تغییر دهد، شوک ایجاد شده نیروی جلوبرنده را کاهش می‌دهد و مشخصه‌های آکوستیکی خارجی و فشار پشت ناحیه شوک را عوض می‌کند. برای تعیین حوزه جریان درون نازل باید معادلات حاکم یعنی معادلات کامل ناویر-استوکس، حل شوند. در این تحقیق برای بررسی میدان جریان داخلی درون نازل، از سه مدل هندسی نازل یک‌گلوگانه، نازل دوگلوگانه و نازل پلاگ دار استفاده شده است. از آنجاییکه حل معادلات کامل ناویر-استوکس که نیاز به زمان و حافظه کامپیوتری بالایی می‌باشند، مشکل است، بنابراین از معادلات ناویر-استوکس تقریب زده برای تعیین حوزه جریان درون نازل استفاده شده است که نسبت به معادلات کامل ناویر-استوکس نیاز به زمان و حافظه کامپیوتری کمتری دارند و در ناحیه ایجاد شوک به دلیل وجود اندرکنش قوی بین لایه لزوج و غیرلزوج کارایی خیلی خوبی برای شبیه‌سازی عددی جریان درون نازل دارند. در حل عددی معادلات ناویر-استوکس لایه-نازک، از طرح تفاضل مرکزی استفاده شده است. روشهای تفاضل مرکزی به دلیل وجود خاصیت پراکندگی در ماهیت معادلات آنها در اطراف شوک نوسانات شدیدی بوجود می‌آورند که می‌تواند دقت حل را کم کند ولی در عوض جریان در پشت شوک را با دقت مناسبی پیش‌بینی می‌کنند. به همین منظور برای بررسی دقیق پدیده شوک در درون نازل از روش اتلاف عددی غیر خطی که قابلیت بسیار خوبی برای تسخیر شوک دارد، استفاده شده است. سه مدل اتلاف عددی غیر خطی اسکالر، اسکالر اصلاح شده و ماتریسی به معادلات تفاضل مرکزی اضافه شده‌اند. مدل‌های اتلاfi مورد استفاده به صورت هوشمند عمل می‌کنند؛ در نواحی آرام میدان جریان همانند اتلاف عددی خطی عمل می‌کنند و در نواحی که ناپیوستگی بوجود می‌آید همانند روشهای بالادست رفتار می‌کنند و نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که شوک بوجود آمده در نازل دوگلوگانه به خوبی و بدون نوسان تسخیر شده است. ناپیوستگی درون جریان در روش اتلاfi بوسیله یک حسگر شوک در میدان جریان حس می‌شود و نوع معادلات مورد استفاده را کنترل می‌کند. نتایج حل این معادلات در این سه نازل توسط سه روش فوق با هم مقایسه شده است و تواناییها و کارآمدی سه روش مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در انتها به بررسی تاثیر نوع و متغیر حسگر شوک در سرعت همگرایی و دقت حل پرداخته شده است که ۶ متغیر و سه مدل مختلف حسگر شوک مورد بررسی قرار گرفته است.

به نام ایزد یکتا

**خداوند منان را سپاس که لطف خویش را شامل حال من کرد تا بتوانم در راه کسب علم و**

**معرفت قدم نهم.**

در اینجا جا دارد که از زحمات همسر من که با صبر و شکیبایی مثال زدنی در طول مدت تحصیل من با تحمل مشکلات و مصائب، پشتیبانی خوب برای این بنده حقیر بود، تشکر و قدردانی کنم که بی‌شک اگر دلگرمی‌های ایشان نبود با توجه به سختی‌های پیشرو این مهم به خاتمه نمی‌انجامید و راهی دیگر را برمی‌گزیدم. از پدر و مادرم عزیزم نیز به جهت ایجاد زیربنای رشد و تعالی من تشکر می‌کنم که بی‌شک در ایجاد این زیربنا فداکاری‌های بی‌شائبه‌ای نشان داده‌اند و دعاهای خیر ایشان شامل حال این بنده حقیر بود. از دوستان عزیزم که در این مدت کمک‌های شایانی در انجام امور انجام داده‌اند تشکر و قدردانی می‌کنم. در انتها از استاد ارجمند و گراتقدرم جناب آقای دکتر رشیدی که بدون راهنمایی، شکیبایی و اعتماد ایشان پایان کار امکان‌پذیر نبود تشکر و قدردانی می‌کنم.

از اساتید بزرگوارم آقای دکتر گنجعلیخان‌نسب به خاطر آموزش مفاهیم مکانیک سیالات و آقای دکتر محسن گودرزی در آموزش مبانی دینامیک سیالات محاسباتی صمیمانه تشکر می‌کنم. مسلماً رساله انجام شده خالی از عیب نیست. پیشاپیش از کاستی‌هایی که ممکن است در آن وجود داشته باشد پوزش می‌طلبم. امیدوارم این تحقیق توانسته باشد گوشه‌ای از ابهامات دانش بشری را برطرف کند.

محمدحسین جلال‌رزاقی

# فهرست مطالب

## فصل اول

### دینامیک سیالات جریان داخلی

۱	۱-۱-نازل
۱	۱-۲-انواع نازلها
۲	نازلهای سرعت بالا
۲	نازلهای مغناطیسی
۳	نازلهای اسپری
۳	نازل وکیوم
۴	نازل شکل دهنده
۴	۳-۱-تئوری نازل
۴	۴-۱-شوک عمودی
۱۲	۵-۱-جریان دو بعدی مافوق صوت
۱۵	۶-۱-شوک مایل
۱۶	۷-۱-اندرکنش بین شوک و لایه مرزی

## فصل دوم

### مقدمه‌ای بر روشهای حل عددی

۲۲	۱-۲-روشهای حل عددی
۲۲	۲-۲-اتلاف عددی
۲۴	۳-۲-منشا نوسانات
۲۴	۴-۲-تاریخچه روشهای اتلافی
۲۷	

## فصل سوم

### معادلات حاکم و روش عددی

۳۰	۳-۱-معادلات کامل ناویر-استوکس در مختصات کارتزین
۳۱	۳-۲-معادلات کامل ناویر-استوکس (FNS) در مختصات عمومی منحنی الخط
۳۲	۳-۳-تقریب لایه-نازک
۳۴	۳-۴-معادلات ناویر-استوکس با تقریب لایه نازک (TLNS)
۳۶	۳-۵-حل عددی
۳۷	۳-۶-شکل قطری
۴۱	۳-۷-شرایط اولیه
۴۲	۳-۸-شرایط مرزی
۴۳	۳-۸-۱-شرط مرزی جسم صلب در دامنه محاسباتی

۴۴  
۴۵  
۴۵  
۴۵  
۴۶  
۴۶  
۴۷  
۴۷  
۴۸  
۵۰  
۵۰  
۵۴  
۵۵  
۵۹  
۵۹  
۶۱  
۶۱  
۶۱  
۶۶  
۷۰  
۷۵  
۷۵  
۷۹  
۸۴  
۸۸  
۸۸  
۹۲  
۹۷  
۱۰۱  
۱۰۱  
۱۰۶  
۱۱۰  
۱۱۴  
۱۱۶

۳-۸-۲- شرط مرزی جریان ورودی  
۳-۸-۳- شرط مرزی جریان خروجی  
۳-۸-۴- شرط مرزی صفحه تقارن  
۳-۹- شبکه بندی  
۳-۹-۱- شبکه بندی بیضوی (پواسون)  
۳-۱۰- تعریف خطا در میدان حل

### فصل چهارم

#### اتلاف عددی

۴-۱- مدل اتلاف ضمنی یا صریح خطی  
۴-۲- مدل های غیرخطی اتلاف مصنوعی  
۴-۳- مدل اتلاف غیرخطی اسکالر  
۴-۴- روش بالادست  
۴-۵- مدل اتلاف غیرخطی ماتریسی

#### فصل پنجم

#### ارائه و بررسی نتایج عددی

۵-۱- مطالعه شبکه  
روش بیم-وارمینگ  
نازل یک گلوگاهه  
نازل دو گلوگاهه  
نازل پلاگ دار  
روش اتلاف عددی اسکالر  
نازل یک گلوگاهه  
نازل دو گلوگاهه  
نازل پلاگ دار  
روش اتلاف عددی غیرخطی ماتریسی  
نازل یک گلوگاهه  
نازل دو گلوگاهه  
نازل پلاگ دار  
۵-۲- مقایسه بین سه روش  
نازل دو گلوگاهه  
نازل یک گلوگاهه  
نازل پلاگ دار  
۵-۳- بررسی تاثیر حسگرهای شوک مختلف بر متغیرهای جریان نازل و نرخ همگرایی  
روش عددی  
مدل A



۱۲۵  
۱۳۴  
۱۴۳  
۱۵۲  
۱۵۳  
۱۵۴  
۱۵۷  
۱۵۷  
۱۵۸  
۱۵۹  
۱۶۰  
۱۶۵

مدل B

مدل C

مدل D

۴-۵- بررسی نتایج

۵-۵- پیشنهاد برای کارهای آتی

مراجع

پیوستها

پیوست الف

پیوست ب

پیوست ج

پیوست د

پیوست ه

## فهرست جداول

۳۷	جدول (۱-۳): چند نمونه از روش‌هایی که در معادله (۲۴-۳) برای مقادیر $\theta_1$ و $\theta_2$ استفاده می‌شوند.
۱۰۲	جدول (۱-۵): مقایسه نقاط جدایش و برگشت جریان دوبعدی لزج درون نازل دوگلوگاهه $Re=400$
۱۰۲	جدول (۲-۵) مقایسه تعداد تکرار و CFL مورد نیاز همگرایی حل در نازل دوگلوگاهه
۱۰۲	جدول (۳-۵): مقایسه نیروی رانش در نازل دوگلوگاهه
۱۰۶	جدول (۴-۵): مقایسه تعداد تکرار و CFL مورد نیاز همگرایی حل در نازل یک گلوگاهه
۱۰۶	جدول (۵-۵): مقایسه نیروی رانش در نازل یک گلوگاهه
۱۱۰	جدول (۶-۵): مقایسه تعداد تکرار و CFL مورد نیاز همگرایی حل در نازل پلاگ‌دار
۱۱۰	جدول (۷-۵): مقایسه نیروی رانش در نازل پلاگ‌دار
۱۱۶	جدول (۸-۵) - شبکه‌بندی مورد استفاده
۱۱۶	جدول (۹-۵) - تعداد تکرارها در شبکه بندی مدل A
۱۱۷	جدول (۱۰-۵) - مقایسه تعداد تکرارها برای هر متغیر در مدل A
۱۱۷	جدول (۱۱-۵) - مقایسه تعداد تکرارها برای هر متغیر در مدل A
۱۲۵	جدول (۱۲-۵) - تعداد تکرارها در شبکه بندی مدل B
۱۲۶	جدول (۱۳-۵) - مقایسه تعداد تکرارها برای هر متغیر در مدل B
۱۲۶	جدول (۱۴-۵) - مقایسه تعداد تکرارها برای هر متغیر در مدل B
۱۳۴	جدول (۱۵-۵) - تعداد تکرارها در شبکه بندی مدل C
۱۳۴	جدول (۱۶-۵) - مقایسه تعداد تکرارها برای هر متغیر در مدل C
۱۳۵	جدول (۱۷-۵) - مقایسه تعداد تکرارها برای هر متغیر در مدل C
۱۴۳	جدول (۱۸-۵) - تعداد تکرارها در شبکه بندی مدل D
۱۴۴	جدول (۱۹-۵) - مقایسه تعداد تکرارها برای هر متغیر در مدل D
۱۴۴	جدول (۲۰-۵) - مقایسه تعداد تکرارها برای هر متغیر در مدل D

## فهرست اشکال

### فصل اول

- شکل (۱-۱) - نازل آب ۲
- شکل (۲-۱) - نازل ۵
- شکل (۳-۱) - نمودار نسبت سطح مقطع به عدد ماخ ۹
- شکل (۴-۱) - نمودارهای نشان دهنده خواص سیال در امتداد نازل برای نازل Kappa-DX ۹-۱۱
- شکل (۵-۱) - شرایط جریان در امتداد شوک عمودی ۱۳
- شکل (۶-۱) - جریان گذری مافوق صوت از یک گوشه ۱۵
- شکل (۷-۱) - شوک مایل در یک گوشه ۱۶
- شکل (۸-۱) - مشخصه شوک مایل ۱۹
- شکل (۹-۱) - تقابل بین شوک و لایه مرزی ۱۹
- شکل (۱۰-۱) - تقابل بین شوک و لایه مرزی در حالت‌های مختلف ۲۰
- شکل (۱۱-۱) - تقابل بین شوک و لایه مرزی در نازل مافوق صوت ۲۱

### فصل سوم

- شکل (۱-۳) - تبدیل از فضایی فیزیکی به فضای محاسباتی ۳۳
- شکل (۲-۳) - شبکه‌بندی ریزتر در نواحی مرزی ۳۵
- شکل (۳-۳) - شرایط مرزی لازم در شبیه‌سازی عددی نازل دو گلوگاه ۴۴

### فصل چهارم

- شکل (۱-۴) - ضریب فشار نشان‌دهنده نوسان در ناحیه شوک ۴۹

### فصل پنجم

- شکل (۱-۵) - نازل یک گلوگاه با زاویه کم ۶۰
- شکل (۲-۵) - نازل دو گلوگاه ۶۰
- شکل (۳-۵) - نازل پلاگ‌دار ۶۱
- شکل (۴-۵) - مقایسه منحنی تغییرات فشار در سطح نازل یک گلوگاهه روش بیم-وارمینگ ۶۲
- شکل (۵-۵) - مقایسه منحنی تغییرات انتروپی در سطح نازل یک گلوگاهه روش بیم-وارمینگ ۶۲
- شکل (۶-۵) - مقایسه منحنی تغییرات فشار در سطح تقارن نازل یک گلوگاهه روش بیم-وارمینگ ۶۳
- شکل (۷-۵) - مقایسه منحنی تغییرات ماخ در سطح تقارن نازل یک گلوگاهه روش بیم-وارمینگ ۶۳
- شکل (۸-۵) - مقایسه منحنی تغییرات ضریب انتقال حرارت در سطح نازل یک گلوگاهه روش بیم-وارمینگ ۶۴
- شکل (۹-۵) - مقایسه منحنی تغییرات ضریب اصطکاک در سطح نازل یک گلوگاهه روش بیم-وارمینگ ۶۴
- شکل (۱۰-۵) - بردارهای سرعت در نازل یک گلوگاهه (شبکه‌بندی  $102 \times 86$ ) روش بیم-وارمینگ ۶۵
- شکل (۱۱-۵) - خطوط فشار ثابت در نازل یک گلوگاهه (شبکه‌بندی  $102 \times 86$ ) روش بیم-وارمینگ ۶۵

- شکل (۵-۱۲) - خطوط ماخ ثابت در نازل یک گلوگاهه (شبکه‌بندی  $۱۰۲ \times ۸۶$ ) روش بیم-وارمینگ ۶۵
- شکل (۵-۱۳) - مقایسه منحنی تغییرات فشار در سطح نازل دو گلوگاهه روش بیم-وارمینگ ۶۶
- شکل (۵-۱۴) - مقایسه منحنی تغییرات انتروپی در سطح نازل دو گلوگاهه روش بیم-وارمینگ ۶۷
- شکل (۵-۱۵) - مقایسه منحنی تغییرات فشار در سطح تقارن نازل دو گلوگاهه روش بیم-وارمینگ ۶۷
- شکل (۵-۱۶) - مقایسه منحنی تغییرات ماخ در سطح تقارن نازل دو گلوگاهه روش بیم-وارمینگ ۶۸
- شکل (۵-۱۷) - مقایسه منحنی تغییرات ضریب انتقال حرارت در سطح نازل دو گلوگاهه روش بیم-وارمینگ ۶۸
- شکل (۵-۱۸) - مقایسه منحنی تغییرات ضریب اصطکاک در سطح نازل دو گلوگاهه روش بیم-وارمینگ ۶۹
- شکل (۵-۱۹) - بردارهای سرعت در نازل دو گلوگاهه (شبکه‌بندی  $۱۱۷ \times ۹۵$ ) روش بیم-وارمینگ ۶۹
- شکل (۵-۲۰) - ناحیه جدایش در نازل دو گلوگاهه (شبکه‌بندی  $۱۱۷ \times ۹۵$ ) روش بیم-وارمینگ ۷۰
- شکل (۵-۲۱) - خطوط ماخ ثابت در نازل دو گلوگاهه (شبکه‌بندی  $۱۱۷ \times ۹۵$ ) روش بیم-وارمینگ ۷۰
- شکل (۵-۲۲) - خطوط فشار ثابت در نازل دو گلوگاهه (شبکه‌بندی  $۱۱۷ \times ۹۵$ ) روش بیم-وارمینگ ۷۰
- شکل (۵-۲۳) - خطوط فشار ثابت در نازل پلاگ‌دار (شبکه‌بندی  $۱۰۷ \times ۷۶$ ) ۷۱
- شکل (۵-۲۴) - خطوط ماخ ثابت در نازل پلاگ‌دار (شبکه‌بندی  $۱۰۷ \times ۷۶$ ) ۷۱
- شکل (۵-۲۵) - مقایسه منحنی تغییرات فشار در سطح نازل پلاگ‌دار روش بیم-وارمینگ ۷۲
- شکل (۵-۲۶) - مقایسه منحنی تغییرات انتروپی در سطح نازل پلاگ‌دار روش بیم-وارمینگ ۷۲
- شکل (۵-۲۷) - مقایسه منحنی تغییرات فشار در سطح تقارن نازل پلاگ‌دار روش بیم-وارمینگ ۷۳
- شکل (۵-۲۸) - مقایسه منحنی تغییرات عدد ماخ در سطح تقارن نازل پلاگ‌دار روش بیم-وارمینگ ۷۳
- شکل (۵-۲۹) - مقایسه منحنی تغییرات ضریب انتقال حرارت در سطح نازل پلاگ‌دار روش بیم-وارمینگ ۷۴
- شکل (۵-۳۰) - مقایسه منحنی تغییرات ضریب اصطکاک در سطح نازل پلاگ‌دار روش بیم-وارمینگ ۷۴
- شکل (۵-۳۱) - بردارهای سرعت در نازل یک گلوگاهه (شبکه‌بندی  $۱۰۲ \times ۸۶$ ) ۷۵
- شکل (۵-۳۲) - مقایسه منحنی تغییرات فشار در سطح نازل یک گلوگاهه روش اسکالر ۷۶
- شکل (۵-۳۳) - مقایسه منحنی تغییرات انتروپی در سطح نازل یک گلوگاهه روش اسکالر ۷۶
- شکل (۵-۳۴) - مقایسه منحنی تغییرات فشار در سطح تقارن نازل یک گلوگاهه روش اسکالر ۷۷
- شکل (۵-۳۵) - مقایسه منحنی تغییرات ماخ در سطح تقارن نازل یک گلوگاهه روش اسکالر ۷۷
- شکل (۵-۳۶) - مقایسه منحنی تغییرات ضریب انتقال حرارت در سطح نازل یک گلوگاهه روش اسکالر ۷۸
- شکل (۵-۳۷) - مقایسه منحنی تغییرات ضریب اصطکاک در سطح نازل یک گلوگاهه روش اسکالر ۷۸
- شکل (۵-۳۸) - خطوط فشار ثابت در نازل یک گلوگاهه (شبکه‌بندی  $۱۰۲ \times ۸۶$ ) ۷۹
- شکل (۵-۳۹) - خطوط ماخ ثابت در نازل یک گلوگاهه (شبکه‌بندی  $۱۰۲ \times ۸۶$ ) ۷۹
- شکل (۵-۴۰) - بردارهای سرعت در نازل دو گلوگاهه (شبکه‌بندی  $۲۴۱ \times ۹۱$ ) ۸۰
- شکل (۵-۴۱) - ناحیه جدایش در نازل دو گلوگاهه (شبکه‌بندی  $۲۴۱ \times ۹۱$ ) ۸۰
- شکل (۵-۴۲) - خطوط ماخ ثابت در نازل دو گلوگاهه (شبکه‌بندی  $۲۴۱ \times ۹۱$ ) ۸۰
- شکل (۵-۴۳) - خطوط فشار ثابت در نازل دو گلوگاهه (شبکه‌بندی  $۲۴۱ \times ۹۱$ ) ۸۰
- شکل (۵-۴۴) - مقایسه منحنی تغییرات فشار در سطح نازل دو گلوگاهه روش اسکالر ۸۱
- شکل (۵-۴۵) - مقایسه منحنی تغییرات انتروپی در سطح نازل دو گلوگاهه روش اسکالر ۸۱
- شکل (۵-۴۶) - مقایسه منحنی تغییرات فشار در سطح تقارن نازل دو گلوگاهه روش اسکالر ۸۲
- شکل (۵-۴۷) - مقایسه منحنی تغییرات ماخ در سطح تقارن نازل دو گلوگاهه روش اسکالر ۸۲
- شکل (۵-۴۸) - مقایسه منحنی تغییرات ضریب انتقال حرارت در سطح نازل دو گلوگاهه روش اسکالر ۸۳
- شکل (۵-۴۹) - مقایسه منحنی تغییرات ضریب اصطکاک در سطح نازل دو گلوگاهه روش اسکالر ۸۳

- شکل (۵-۵) - خطوط فشار ثابت در نازل پلاگ‌دار (شبکه‌بندی  $۸۶ \times ۲ + ۱$ ) روش اسکالر ۸۴
- شکل (۵-۵۱) - خطوط ماخ ثابت در نازل پلاگ‌دار (شبکه‌بندی  $۸۶ \times ۲ + ۱$ ) روش اسکالر ۸۴
- شکل (۵-۵۲) - مقایسه منحنی تغییرات فشار در سطح نازل پلاگ‌دار روش اسکالر ۸۵
- شکل (۵-۵۳) - مقایسه منحنی تغییرات انتروپی در سطح نازل پلاگ‌دار روش اسکالر ۸۵
- شکل (۵-۵۴) - مقایسه منحنی تغییرات فشار در سطح تقارن نازل پلاگ‌دار روش اسکالر ۸۶
- شکل (۵-۵۵) - مقایسه منحنی تغییرات ماخ در سطح تقارن نازل پلاگ‌دار روش اسکالر ۸۶
- شکل (۵-۵۶) - مقایسه منحنی تغییرات ضریب انتقال حرارت در سطح نازل پلاگ‌دار روش اسکالر ۸۷
- شکل (۵-۵۷) - مقایسه منحنی تغییرات ضریب اصطکاک در سطح نازل پلاگ‌دار روش اسکالر ۸۷
- شکل (۵-۵۸) - بردارهای سرعت در نازل یک گلوگاه (شبکه‌بندی  $۷۵ \times ۹۱$ ) ۸۸
- شکل (۵-۵۹) - مقایسه تغییرات فشار در سطح نازل یک گلوگاه روش ماتریسی ۸۹
- شکل (۵-۶۰) - مقایسه تغییرات انتروپی در سطح نازل یک گلوگاه روش اتلاف ماتریسی ۸۹
- شکل (۵-۶۱) - مقایسه تغییرات فشار در خط تقارن نازل یک گلوگاه روش اتلاف ماتریسی ۹۰
- شکل (۵-۶۲) - مقایسه تغییرات عدد ماخ در خط تقارن نازل یک گلوگاه روش اتلاف ماتریسی ۹۰
- شکل (۵-۶۳) - مقایسه تغییرات ضریب انتقال حرارت در سطح نازل یک گلوگاه روش اتلاف ماتریسی ۹۱
- شکل (۵-۶۴) - مقایسه تغییرات ضریب اصطکاک در سطح نازل یک گلوگاه روش اتلاف ماتریسی ۹۱
- شکل (۵-۶۵) - خطوط فشار ثابت در نازل یک گلوگاه (شبکه‌بندی  $۷۵ \times ۹۱$ ) روش اتلاف ماتریسی ۹۲
- شکل (۵-۶۶) - خطوط ماخ ثابت در نازل یک گلوگاه (شبکه‌بندی  $۷۵ \times ۹۱$ ) روش اتلاف ماتریسی ۹۲
- شکل (۵-۶۷) - بردارهای سرعت در نازل دو گلوگاه (شبکه‌بندی  $۵۰ \times ۸۰$ ) روش اتلاف ماتریسی ۹۳
- شکل (۵-۶۸) - ناحیه جدایش در نازل دو گلوگاه (شبکه‌بندی  $۵۰ \times ۸۰$ ) روش اتلاف ماتریسی ۹۳
- شکل (۵-۶۹) - خطوط فشار ثابت در نازل دو گلوگاه (شبکه‌بندی  $۵۰ \times ۸۰$ ) روش اتلاف ماتریسی ۹۳
- شکل (۵-۷۰) - خطوط ماخ ثابت در نازل دو گلوگاه (شبکه‌بندی  $۵۰ \times ۸۰$ ) روش اتلاف ماتریسی ۹۳
- شکل (۵-۷۱) - مقایسه تغییرات فشار در سطح نازل دو گلوگاه روش اتلاف ماتریسی ۹۴
- شکل (۵-۷۲) - مقایسه تغییرات انتروپی در سطح نازل دو گلوگاه روش اتلاف ماتریسی ۹۴
- شکل (۵-۷۳) - مقایسه تغییرات فشار در خط تقارن نازل دو گلوگاه روش اتلاف ماتریسی ۹۵
- شکل (۵-۷۴) - مقایسه تغییرات عدد ماخ در خط تقارن نازل دو گلوگاه روش اتلاف ماتریسی ۹۵
- شکل (۵-۷۵) - مقایسه تغییرات ضریب انتقال حرارت در سطح نازل دو گلوگاه روش اتلاف ماتریسی ۹۶
- شکل (۵-۷۶) - مقایسه تغییرات ضریب اصطکاک در سطح نازل دو گلوگاه روش اتلاف ماتریسی ۹۶
- شکل (۵-۷۷) - خطوط فشار ثابت در نازل پلاگ‌دار (شبکه‌بندی  $۵۵ \times ۷۷$ ) روش اتلاف ماتریسی ۹۷
- شکل (۵-۷۸) - خطوط ماخ ثابت در نازل پلاگ‌دار (شبکه‌بندی  $۵۵ \times ۷۷$ ) روش اتلاف ماتریسی ۹۷
- شکل (۵-۷۹) - مقایسه تغییرات فشار در سطح نازل پلاگ‌دار روش اتلاف ماتریسی ۹۸
- شکل (۵-۸۰) - مقایسه تغییرات انتروپی در سطح نازل پلاگ‌دار روش اتلاف ماتریسی ۹۸
- شکل (۵-۸۱) - مقایسه تغییرات فشار در خط تقارن نازل پلاگ‌دار روش اتلاف ماتریسی ۹۹
- شکل (۵-۸۲) - مقایسه تغییرات عدد ماخ در خط تقارن نازل پلاگ‌دار روش اتلاف ماتریسی ۹۹
- شکل (۵-۸۳) - مقایسه تغییرات ضریب انتقال حرارت در سطح نازل پلاگ‌دار روش اتلاف ماتریسی ۱۰۰
- شکل (۵-۸۴) - مقایسه تغییرات ضریب اصطکاک در سطح نازل پلاگ‌دار روش اتلاف ماتریسی ۱۰۰
- شکل (۵-۸۵) - مقایسه تغییرات فشار در سطح نازل دو گلوگاه در روشهای مختلف ۱۰۳
- شکل (۵-۸۶) - مقایسه تغییرات عدد ماخ در خط تقارن نازل دو گلوگاه در روشهای مختلف. ۱۰۳
- شکل (۵-۸۷) - مقایسه تغییرات ضریب انتقال حرارت در سطح نازل دو گلوگاه در روشهای مختلف ۱۰۴

- شکل (۵-۸۸) - مقایسه تغییرات ضریب اصطکاک در سطح نازل دو گلوگاهه در روشهای مختلف ۱۰۴
- شکل (۵-۸۹) - مقایسه تغییرات آنژیومتری در سطح نازل دو گلوگاهه در روشهای مختلف ۱۰۵
- شکل (۵-۹۰) - مقایسه تغییرات فشار در خط تقارن نازل دو گلوگاهه در روشهای مختلف ۱۰۵
- شکل (۵-۹۱) - مقایسه تغییرات فشار در سطح نازل یک گلوگاهه در روشهای مختلف ۱۰۷
- شکل (۵-۹۲) - مقایسه تغییرات آنژیومتری در سطح نازل یک گلوگاهه در روشهای مختلف ۱۰۷
- شکل (۵-۹۳) - مقایسه تغییرات ضریب انتقال حرارت در سطح نازل یک گلوگاهه در روشهای مختلف ۱۰۸
- شکل (۵-۹۴) - مقایسه تغییرات ضریب اصطکاک در سطح نازل یک گلوگاهه در روشهای مختلف ۱۰۸
- شکل (۵-۹۵) - مقایسه تغییرات فشار در خط تقارن نازل یک گلوگاهه در روشهای مختلف ۱۰۹
- شکل (۵-۹۶) - مقایسه تغییرات عدد ماخ در خط تقارن نازل یک گلوگاهه در روشهای مختلف ۱۰۹
- شکل (۵-۹۷) - مقایسه تغییرات فشار در سطح نازل پلاگدار در روشهای مختلف ۱۱۱
- شکل (۵-۹۸) - مقایسه تغییرات آنژیومتری در سطح نازل پلاگدار در روشهای مختلف ۱۱۱
- شکل (۵-۹۹) - مقایسه تغییرات فشار در خط تقارن نازل پلاگدار در روشهای مختلف ۱۱۲
- شکل (۵-۱۰۰) - مقایسه تغییرات عدد ماخ در خط تقارن نازل پلاگدار در روشهای مختلف ۱۱۲
- شکل (۵-۱۰۱) - مقایسه تغییرات ضریب انتقال حرارت در سطح نازل پلاگدار در روشهای مختلف ۱۱۳
- شکل (۵-۱۰۲) - مقایسه تغییرات ضریب اصطکاک در سطح نازل پلاگدار در روشهای مختلف ۱۱۳
- شکل (۵-۱۰۳) تا (۵-۱۰۸) مقایسه تغییرات فشار در سطح مدل A با استفاده از متغیر فشار و حسگرهای شوک مختلف ۱۱۸
- شکل (۵-۱۰۹) تا (۵-۱۱۴) مقایسه تغییرات آنژیومتری در سطح مدل A با استفاده از حسگرهای شوک مختلف ۱۱۹
- شکل (۵-۱۱۵) تا (۵-۱۲۰) مقایسه تغییرات ضریب اصطکاک در سطح مدل A با استفاده از حسگرهای شوک مختلف ۱۲۰
- شکل (۵-۱۲۱) تا (۵-۱۲۶) مقایسه تغییرات ضریب انتقال حرارت در سطح مدل A با استفاده از حسگرهای شوک مختلف ۱۲۱
- شکل (۵-۱۲۷) تا (۵-۱۳۲) مقایسه تغییرات عدد ماخ در سطح تقارن مدل A با استفاده از حسگرهای شوک مختلف ۱۲۲
- شکل (۵-۱۳۳) تا (۵-۱۳۸) مقایسه تغییرات فشار در سطح تقارن مدل A با استفاده از حسگرهای شوک مختلف ۱۲۳
- شکل (۵-۱۳۹) تا (۵-۱۴۴) مقایسه تغییرات همگرایی مدل A با استفاده از حسگرهای شوک مختلف ۱۲۴
- شکل (۵-۱۴۵) تا شکل (۵-۱۵۰) مقایسه تغییرات فشار در سطح نازل B با استفاده از حسگرهای شوک مختلف ۱۲۷
- شکل (۵-۱۵۱) تا (۵-۱۵۶) مقایسه تغییرات آنژیومتری در سطح نازل B با استفاده از حسگرهای شوک مختلف ۱۲۸
- شکل (۵-۱۵۷) تا (۵-۱۶۲) مقایسه تغییرات ضریب اصطکاک در سطح نازل B با استفاده از حسگرهای شوک مختلف ۱۲۹
- شکل (۵-۱۶۳) تا (۵-۱۶۸) مقایسه تغییرات ضریب انتقال حرارت در سطح نازل B با استفاده از حسگرهای شوک مختلف ۱۳۰
- شکل (۵-۱۶۹) تا (۵-۱۷۴) مقایسه تغییرات عدد ماخ در سطح تقارن نازل B با استفاده از حسگرهای شوک مختلف ۱۳۱

- شکل (۱۷۵-۵) تا (۱۸۰-۵) مقایسه تغییرات فشار در سطح تقارن نازل B با استفاده از حسگرهای شوک مختلف  
۱۳۲
- شکل (۱۸۱-۵) تا (۱۸۶-۵) مقایسه تغییرات همگرایی نازل B با استفاده از حسگرهای شوک مختلف  
۱۳۳
- شکل (۱۸۷-۵) تا (۱۹۲-۵) مقایسه تغییرات فشار در سطح نازل C با استفاده از حسگرهای شوک مختلف  
۱۳۶
- شکل (۱۹۳-۵) تا (۱۹۸-۵) مقایسه تغییرات انترویی در سطح نازل C با استفاده از حسگرهای شوک مختلف  
۱۳۷
- شکل (۱۹۹-۵) تا (۲۰۴-۵) مقایسه تغییرات ضریب اصطکاک در سطح نازل C با استفاده از حسگرهای شوک مختلف  
۱۳۸
- شکل (۲۰۵-۵) تا (۲۱۰-۵) مقایسه تغییرات ضریب انتقال حرارت در سطح نازل C با استفاده از حسگرهای شوک مختلف  
۱۳۹
- شکل (۲۱۱-۵) تا (۲۱۶-۵) مقایسه تغییرات عد ماخ در سطح تقارن نازل C با استفاده از حسگرهای شوک مختلف  
۱۴۰
- شکل (۲۱۷-۵) تا (۲۲۲-۵) مقایسه تغییرات فشار در سطح تقارن نازل C با استفاده از حسگرهای شوک مختلف  
۱۴۱
- شکل (۲۲۳-۵) تا (۲۲۸-۵) مقایسه تغییرات همگرایی نازل C با استفاده از حسگرهای شوک مختلف  
۱۴۲
- شکل (۲۲۹-۵) تا (۲۳۴-۵) مقایسه تغییرات فشار در سطح نازل D با استفاده از حسگرهای شوک مختلف  
۱۴۵
- شکل (۲۳۵-۵) تا (۲۴۰-۵) مقایسه تغییرات انترویی در سطح نازل D با استفاده از حسگرهای شوک مختلف  
۱۴۶
- شکل (۲۴۱-۵) تا (۲۴۶-۵) مقایسه تغییرات ضریب اصطکاک در سطح نازل D با استفاده از حسگرهای شوک مختلف  
۱۴۷
- شکل (۲۴۷-۵) تا (۲۵۲-۵) مقایسه تغییرات ضریب انتقال حرارت در سطح نازل D با استفاده از حسگرهای شوک مختلف  
۱۴۸
- شکل (۲۵۳-۵) تا (۲۵۸-۵) مقایسه تغییرات عد ماخ در سطح تقارن نازل D با استفاده از حسگرهای شوک مختلف  
۱۴۹
- شکل (۲۵۹-۵) تا (۲۶۴-۵) مقایسه تغییرات فشار در سطح تقارن نازل D با استفاده از حسگرهای شوک مختلف  
۱۵۰
- شکل (۲۶۵-۵) تا (۲۷۰-۵) مقایسه تغییرات همگرایی نازل D با استفاده از حسگرهای شوک مختلف  
۱۵۱

## فهرست علائم

Re	عدد رینولدز	F, G, H	بردارهای شار غیرلزج در مختصات
M	عدد ماخ	S, T	بردارهای شار لزج
Pr	عدد پرانتل	A, B	ماتریس‌های ژاکوبین بردارهای F و G
u, v	مولفه‌های سرعت	L, N	ماتریس‌های ژاکوبین بردارهای S و T
x, y	مولفه‌های مختصات کارتزین	K	ماتریس‌های ژاکوبین جمله غیرلزج
T <sub>0</sub>	دمای سکون	imax, jmax	بیشینه تعداد نقاط شبکه در جهات ξ, η
Δt	گام زمانی	Y <sub>N</sub>	فاصله عمودی از سطح جسم
U, V	مولفه‌های غیرفیزیکی جریان	c	سرعت صوت
e	انرژی داخلی بر واحد جرم	I	ماتریس واحد
E	انرژی کل بر واحد حجم	J	ژاکوبین تبدیل
		Λ <sup>i</sup> <sub>ξ</sub> , Λ <sup>i</sup> <sub>η</sub> , Λ <sup>v</sup> <sub>η</sub>	ماتریس‌های قطری
		p	فشار
		p <sub>0</sub>	فشار سکون

## زیرنویس

i, j	اندیس نقاط شبکه منحنی‌الخط در جهات ξ, η
	بالانویس
n	گام زمانی
i, v	اندیس ماتریس‌های قطری لزج و غیرلزج

## فهرست علائم یونانی

Δ	عملگر تفاضل پیشرو
∇	عملگر تفاضل پسرو
ε	ضریب اتلاف
μ	ضریب لزجت
κ	ضریب انتقال حرارت رسانشی
ρ	چگالی
ξ, η	مختصات منحنی‌الخط
ξ <sub>x</sub> , ξ <sub>y</sub> , η <sub>x</sub> , η <sub>y</sub>	متریکی‌های تبدیل



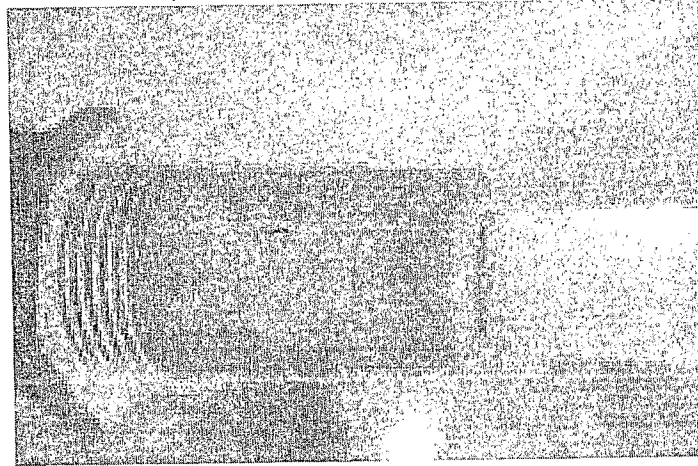
# فصل اول

## دینامیک سیالات جریان داخلی

با توجه به استفاده از جریان داخلی در صنعت امروز بعنوان یک ابزار در تکنولوژی بخصوص در صنعت هوافضا، بررسی تحولات و فعل و انفعالات صورت گرفته و شناخت ماهیت سیال و تغییرات خواص سیال در حین پروسه انجام کار، حائز اهمیت است. در صنعت هوافضا استفاده از جریان داخلی در رانش موشکها و راکتها نقش اصلی را ایفا می کند زیرا نازلها نیروی رانش را ایجاد می کنند و تحقیقات مفصلی در بالا بردن بازده بیشتر نازلها و پایین آوردن هزینه و دستیابی به اشکال مناسبتر نازل در دست اقدام است.

### ۱-۱- نازل

نازل یک وسیله مکانیکی است که برای کنترل خصوصیات سیال در خروجی یا ورودی لوله ها یا محفظه احتراق طراحی می شود. نازل معمولاً یک لوله یا یک تیوپ با سطح مقطع متغیر است و از آن برای هدایت جریان سیال ( گاز یا مایع ) استفاده می شود. از نازلها گاهی برای کنترل نرخ جریان، سرعت، جهت، جرم، شکل و فشار جریانی که از آن خارج می شود نیز استفاده می شود.



شکل (۱-۱) - نازل آب.

## ۱-۲- انواع نازل‌ها

### نازل‌های سرعت بالا

از این نازل‌ها برای افزایش انرژی جنبشی جریان با استفاده از انرژی پتانسیل و انرژی فشاری سیال استفاده می‌کنند. این نازل‌ها همگرا یا واگرا یا ترکیبی از این دو می‌باشند که معروفترین مدل از این نوع نازل‌ها، نازل دلاوال<sup>۱</sup> است که نازل همگرا واگراست.

نازل‌های همگرا برای شتاب دادن به سیال مادون‌صوت بکار می‌رود. اگر نسبت فشار مناسب باشد سرعت جریان سیال در نازل به سرعت صوت می‌رسد که در این حالت اصطلاحاً می‌گویند به حالت خفگی<sup>۲</sup> رسیده‌است که در این صورت افزایش نسبت فشار تأثیری در افزایش سرعت جریان بیش از سرعت صوت نخواهد داشت.

در نازل واگرا اگر جریان ورودی مادون‌صوت باشد سرعت کاهش می‌یابد و اگر جریان ورودی صوتی یا مافوق‌صوت باشد سرعت افزایش می‌یابد.

نازل‌های همگرا-واگرا توانایی افزایش سرعت سیالی را که به حالت خفگی رسیده‌است را تا سرعت مافوق‌صوت دارند که از این قابلیت استفاده‌های بسیاری در صنعت می‌شود. در ازای یک دبی جرمی

<sup>۱</sup> De Laval

<sup>۲</sup> Choked

خاص، بیشترین نیروی پیشران<sup>۲</sup> وقتی حاصل می‌شود که سرعت خروجی سیال بیشترین مقدار خود را داشته باشد. بنابراین در هواپیماهای مافوق صوت از نازل‌های همگرا-واگرا علی‌رغم وزن و هزینه زیاد آنها استفاده می‌کنند. موتور جت مافوق صوت مانند موتور جنگنده‌ها و هواپیماهای SST (مانند کنکورد)، از بیشترین نسبت فشار ممکن برای دستیابی به بیشترین سرعت خروجی ممکن استفاده می‌کنند.

در موتورهای جت مادون صوت چون نیازی به سرعت خروجی زیادی نیست بنابراین از نسبت فشار اپتیمم و نازل همگرای ساده استفاده می‌کنند چون بهترین بازده انرژی در سرعت‌های پایین به ازای سرعت کم خروجی بدست می‌آید.

در موتورهای راکت‌ها از نازل همگرا-واگرا استفاده می‌شود که برای افزایش نیروی پیشران و سرعت خروجی سیال از بیشترین نسبت فشار ممکن استفاده می‌شود.

عدد ماخ "یک" برای گازهای داغ سرعت بسیار بالایی است؛ و حرارت سرعت صوت را به مقدار قابل توجهی افزایش می‌دهد. بنابراین سرعت حقیقی در گلوگاه نازل بسیار بیشتر از سرعت صوت در سطح دریا است. این اصل در پرتاب موشک‌های هایپرسونیک کاربرد فراوانی دارد.

### نازل‌های مغناطیسی

نازل‌های مغناطیسی در پاره‌ای از پیشرانها مورد استفاده قرار می‌گیرد که در آن از جریان پلاسما که در یک میدان مغناطیسی هدایت می‌شود، استفاده می‌شود. این میدان مغناطیسی نقش دیواره‌های جامد در نازل را ایفا می‌کنند.

### نازل‌های اسپری

نازل‌های بسیاری مایع را تبدیل به پودر می‌کنند.

نازل‌های لوله و نتوری برای اسپری رنگ، عطر و کاربراتور و... مورد استفاده قرار می‌گیرد.

<sup>۲</sup> Thrust