

بهینه‌سازی یک دیفیوزر تونل باد مافوق صوت با دیواره‌های انعطاف‌پذیر با کمک الگوریتم

ژنتیک

سید مرتضی جوادپور^{۱*}، سعید فراهت^۲ و حسام‌الدین ابن‌الدین^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>واژگان کلیدی: تونل باد، دینامیک سیالات عددی، دیفیوزر مافوق صوت، الگوریتم ژنتیک، جریان تراکم‌پذیر، AUSM+</p>	<p>امروزه تونل باد به عنوان یک آزمایشگاه تجربی کاربردهای فراوانی دارد. نصب تونل باد بسیار هزینه بر است بنابراین طراحان سعی می‌کنند که با طراحی بهینه اجزای مختلف تونل باد هزینه نصب و تست تونل باد را به حداقل برسانند. در این مقاله با بهینه‌سازی و ارائه طرح جدیدی از یک دیفیوزر تونل باد، هزینه به حداقل رسیده و راندمان افزایش داده شده است. در بسیاری از تونل‌های باد مافوق صوت، قسمت هم‌گرای دیفیوزر تونل باد دیواره‌هایی با شیب ثابت دارد. به علت تاثیر زیاد هندسه دیواره‌های دیفیوزر بر روی عملکرد تونل باد، روند بهینه‌سازی بر این اساس انجام شد. در ادامه، مدل جدیدی از دیفیوزر تونل باد مافوق صوت ارائه شده است. این مدل از دیفیوزر، شامل یک دیواره‌ی انعطاف‌پذیر و سه جک در راستای آن می‌باشد. سپس جریان مغشوش و تراکم‌پذیر به صورت دوبعدی با مدل اغتشاش $k-\omega$ SST و با استفاده از روش AUSM+ در تونل باد مافوق صوت تحلیل شد. در نهایت، با کمک الگوریتم ژنتیک و در ماخ ۴، مدل جدید دیفیوزر تونل باد مافوق صوت با هدف کمترین افت فشار کلی بهینه گردید. جهت بررسی عملی، از نمونه دیفیوزر تونل باد مافوق صوت مرکز قدر استفاده شده است. نتایج حاکی از آن است که تونل باد بهینه جدید نسبت به نمونه تونل باد موجود در مرکز قدر ۸۳ درصد افزایش راندمان داشته است.</p>

۱- مقدمه

افزایش راندمان دیفیوزرهای تونل باد دو مزیت عمده دارد:

۱- با افزایش راندمان دیفیوزر می‌توان محدوده سرعت و ماخ جریان تونل باد را افزایش داد.

۲- افزایش راندمان دیفیوزر در کاهش هزینه نصب تونل باد بسیار موثر است، به طوری که جهت رسیدن به سرعت مورد نظر به تعداد موتور کمتر با قدرت پایین‌تر نیاز می‌باشد.

هدف دیفیوزر مافوق صوت کاهش سرعت جریان هوا به ماخ یک در ورودی گلوگاه ونتوری است. بعد از شوک

امروزه بیشتر آزمایشات آیرودینامیکی در تونل‌های باد انجام می‌گیرد. یکی از موثرترین روش‌های افزایش راندمان تونل باد، افزایش عملکرد دیفیوزر آن است.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: javadpour_m@yahoo.com

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان

۳. استادیار، مرکز تحقیقات قدر، دانشکده هوافضا، دانشگاه علوم و تحقیقات تهران

مافوق صوت با ماخ $2/2$ در کار ران و همکاران [۱۰] مورد بررسی قرار گرفت.

اسلاتر [۱۱] نیز با تحلیل عددی یک ورودی مافوق صوت، با دو مدل اغتشاش SST و S-A، نشان داده است که وای پلاس در محدوده $30-100$ مناسب می‌باشد.

در مطالعاتی که تا کنون در زمینه دیفیوزر صورت گرفته، دیواره دیفیوزر شیب ثابتی داشته است. انعطاف‌پذیری دیواره دیفیوزر به عنوان یک پارامتر موثر در راندمان تونل باد کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. ضیایی‌راد و همکاران [۱۲] و دادون و همکاران [۱۳] از محدود محققانی می‌باشند که در این زمینه تلاش‌هایی نموده‌اند. طراحی معکوس یک دیفیوزر مافوق صوت با دیواره انعطاف‌پذیر و با کمک الگوریتم ژنتیک توسط ضیایی‌راد و همکاران مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها دو روند بهینه‌سازی را برای دیواره دیفیوزر پیش گرفتند، که یکی بر اساس تابع هایپربولیک با سه متغیر و دیگری یک تابع منحنی مختلط با چهار متغیر بود. دادون و همکاران، در تحقیقات خود به طراحی معکوس یک دیفیوزر مافوق صوت و گذر صوت با دیواره‌های انعطاف‌پذیر پرداختند. در طراحی معکوس دیفیوزر با ماخ‌های ۲ و $1/3$ از یک تابع درجه سه استفاده شده است. با توجه به فعالیت‌های پیشین در این زمینه، وجه تمایز در این تحقیق به موارد ذیل خلاصه می‌شود:

۱- پروفیل قسمت انعطاف‌پذیری دیفیوزر به یک تابع ریاضی محدود نیست.

۲- بهینه‌سازی بر اساس افزایش راندمان تونل باد انجام می‌شود.

۳- وجود ضخامت موثری از لایه مرزی در ابتدای دیفیوزر

۴- روند تحلیل و مطالعه دیفیوزر بر اساس یک نمونه عملی انجام می‌شود.

۵- استفاده از روش AUSM+ در تحلیل عددی جریان تحقیقات نشان می‌دهد که راندمان دیفیوزر سهم و نقش بسزایی در راندمان کلی تونل باد دارد. افزایش راندمان دیفیوزر کاهش هزینه‌های اولیه و جاری تونل باد را به

سرعت جریان مادون صوت به واسطه حرکت در مقطع واگرا کاهش می‌یابد، تا سرعت هنگام ورود به موتور (تونل‌های باد مکشی) مادون صوت باشد [۱].

هر چه افت فشار کلی در تونل باد کمتر باشد راندمان تونل باد افزایش می‌یابد. در تونل باد مافوق صوت، منبع اصلی افت فشار کلی دیفیوزر است. کمتر بودن افت فشار کلی در دیفیوزر به معنای کوچکتر بودن نسبت فشار لازم برای راه اندازی تونل باد مافوق صوت است.

محققین به تاثیر پارامترهای مختلف تونل باد بر روی راندمان دیفیوزرهای مافوق صوت پرداخته‌اند. برای مثال، تاثیر نسبت سطح مقطع گلوگاه دیفیوزر به محفظه آزمایش و طول قسمت گلوگاه دیفیوزر توسط میتال و همکاران [۲] مورد بررسی قرار گرفته است. پیتر [۳] نیز تاثیر عدد رینولدز، عدد ماخ و ضخامت لایه مرزی را بر روی بازیابی فشار در دیفیوزرهای مافوق صوت با مقطع مستطیلی را مورد مطالعه قرار داد.

مدل‌های اغتشاش و الگوریتم حل جریان تونل باد در کارهای کارل [۴] و اسپلوتر و همکاران [۵] مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. بر اساس نتایج آن‌ها روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) برای پیش‌بینی میدان جریان مناسب می‌باشد. تاها [۶] در تحلیل عددی یک دیفیوزر مادون صوت از چندین مدل اغتشاش استفاده نمود. نتایج نشان داد که مدل اغتشاش $k-\epsilon$ نسبت به شرایط ورودی جریان از حساسیت کمتری برخوردار است. مقایسه دو روش شبیه‌سازی SIMPLE و SIMPLEC در تحلیل جریان یک دیفیوزر مادون صوت توسط ایکارینو [۷] انجام شد. در دیفیوزر مادون صوت، تورنبولم [۸] و دیویدسون [۹] نیز در راستای حل جریان تلاش‌هایی نموده‌اند.

تحقیق حاضر مربوط به دیفیوزرهای تونل باد و یا ورودی‌هایی با وجود لایه مرزی می‌باشد. اگرچه ورودی‌های بدون لایه مرزی هم در تحقیقات پیشین مورد مطالعه قرار می‌گرفت. برای نمونه، جریان یک دیفیوزر

۳- معادلات حاکم

معادلات حاکم برای جریان در داخل تونل باد معادلات جریان مغشوش برای سیال تراکم پذیر می‌باشد که در ادامه معادلات حاکم و مدل سازی جریان مغشوش آورده شده است.

- معادله پیوستگی

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

- معادله ممنتوم

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho u_i' u_j') \quad (2)$$

- معادله انرژی

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[u_i \rho \left(h + \frac{1}{2} u_i u_i \right) \right] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i (\tau_{ij})_{\text{eff}} \right], \quad (3)$$

$$k_{\text{eff}} = K + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t}$$

رابطه آخر سمت راست معادله مومنتوم از جنس تنش می‌باشد و مقدار تنش برشی مؤثر در معادله انرژی به ترتیب با رابطه ۴ و ۵ جایگزین می‌شوند.

$$-\overline{\rho u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} (\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k}) \delta_{ij} \quad (4)$$

$$(\tau_{ij})_{\text{eff}} = \mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu_{\text{eff}} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (5)$$

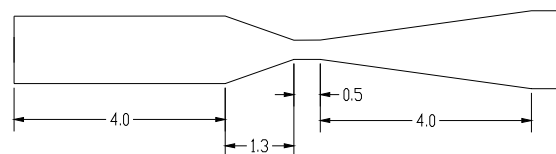
در رابطه‌های ذکر شده، k انرژی جنبشی مغشوش می‌باشد. رابطه ۴ به رابطه بوزینسک مشهور است. برای حل معادلات رینولدز باید روابط نوسانی به مقادیر متوسط ربط داده شوند. همانطور که از رابطه بوزینسک مشخص می‌شود برای حل دستگاه معادلات کافی است تا μ_t محاسبه شود. مدل $k-\omega$ یک مدل نسبتاً کامل و عمومی می‌باشد که برای تشریح آشفتگی کاربرد دارد. در این مدل دو معادله انتقال، یکی برای انرژی جنبشی آشفته، k (m^2/s^2) و دیگری برای نرخ جدایش ω حل می‌شود.

دنبال دارد. لذا برآن شدیم تا با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری قسمت همگرای دیفیوزر و بهینه‌سازی آن، راندمان دیفیوزر تونل باد را افزایش دهیم. برای تحقق این عمل، جهت انعطاف‌پذیری دیواره، در قسمت همگرای دیفیوزر از سه جک استفاده شده است.

۲- تعریف مسئله

در تونل باد مرکز قدر، هوای آزاد به صورت مکشی از ابتدای تونل باد وارد می‌شود. سپس جریان، قسمت‌های مختلف تونل باد مافوق صوت را اعم از نازل، محفظه آزمایش، توری‌های ضد اغتشاش و ... را پشت سر می‌گذارد و در انتها با عبور از داخل دیفیوزر از تونل باد خارج می‌شود. جهت افزایش سرعت در تونل باد باید قدرت مکش افزایش یابد و این عمل را می‌توان با افزایش تعداد موتورهای تونل باد انجام داد. اما این امر هزینه بسیاری در بر دارد، لذا طراحی دیفیوزر در اینجا نقش موثری ایفا می‌کند. بنابراین اگر بتوان دیفیوزری ایده‌ال طراحی کرد می‌توان افت فشار را در تونل باد به صفر رساند (حالت غیرممکن) و سرعت آن را به حداکثر مقدار خود رساند.

در حال حاضر، قسمت همگرای دیفیوزر تونل باد مافوق صوت مرکز قدر و اغلب تونل‌های باد مافوق صوت، به صورت خطی می‌باشد (شکل ۱). بنابراین تصمیم گرفته شد مدلی جدیدی از یک دیفیوزر ارائه شود و در نهایت، با بهینه آن بتوان به مدلی دست یافت که کمترین افت فشار کلی را در برداشته باشد. در این مدل جدید، قسمت همگرای دیفیوزر تونل باد مافوق صوت، یک دیواره انعطاف پذیر می‌باشد.



شکل ۱- مشخصات دیفیوزر تونل باد مافوق صوت مرکز قدر

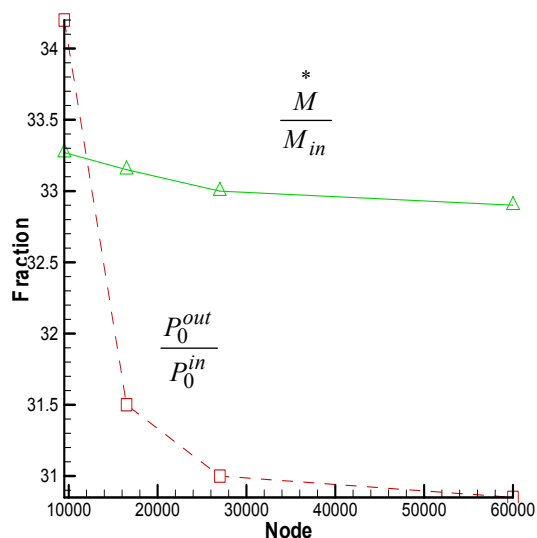
جدول ۱- چهار نوع شبکه مسئله

n=9500	n=16000	n=27000	n=60000	شبکه
475 × 20	550 × 30	650 × 42	1100 × 55	

۱- مرجع [۶] از شبکه 370 × 70 برای یک دیفیوزر مادون صوت به طول ۴/۲ متر استفاده کرده و مرجع [۷] از یک شبکه 280 × 120 برای یک دیفیوزر مادون صوت به طول ۲/۱ متر الگو گرفته است.

۲- همگرا شدن شبکه بندی بسیار ریز (n=60000)، زمان بر است و افزایش حجم محاسباتی را در پی دارد.
۳- مطابق شکل مقدار درصد اختلاف نسبت ها در شبکه ریز (n=27000) نسبت به شبکه بسیار ریز (n=60000) کمتر از ۰/۵ درصد می‌باشد.

در نهایت، همانطور که از شکل ۲ نمایان است و با توجه به موارد فوق، مناسب است که از شبکه ریز (شکل ۳) استفاده شود. محدوده این شبکه در قسمت همگرای دیفیوزر در شکل ۳ قابل مشاهده است.



شکل ۲- تغییرات نسبت فشار کل و ماخ برای چهار حالت شبکه (n=9500, n=16000, n=27000, n=60000)

همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌کنید در تولید شبکه سعی شده است که مقدار وای پلاس در ناحیه زیرلایه لاج قرار گیرد.

مدل SST در مقایسه با دیگر مدل های اغتشاش با دقت و اطمینان بیشتر برای گستره زیادی از جریان‌ها به ویژه جریان‌های با گرادیان فشار مخالف، جریان روی ایرفویل و شوک‌های گذر صوت، می‌توان بکار برد.

در مدل SST معادلات انتقال به صورت زیر بیان می‌شود [۱۴]:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_k - Y_k \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega \quad (7)$$

که $S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) G_k = \mu_t 2S_{ij} S_{ij}$ تولید انرژی

جنبشی مغشوش، $G_\omega = \alpha \frac{\omega}{k} G_k$ نرخ اتلاف تولیدی،

روابط اتلاف دو $Y_\omega = \rho \beta f_\beta \omega^2$ و $Y_k = \rho \beta^* f_\beta \cdot k \omega$

معادله می‌باشند.

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (8)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (9)$$

$$\beta^* = \beta_i^* [1 + \zeta^* F(M_t)] \quad (10)$$

$$\beta = \beta_i \left(1 - \frac{\beta_i^*}{\beta_i} \zeta^* F(M_t) \right) \quad (11)$$

$$F(M_t) = \begin{cases} 0 & M_t \leq M_{t0} \\ M_t^2 - M_{t0}^2 & M_t > M_{t0} \end{cases} \quad (12)$$

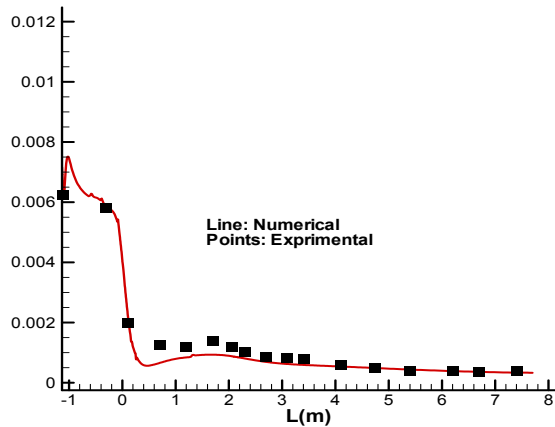
$$M_{t0}^2 = \frac{2k}{a^2}, a = \sqrt{\gamma RT} \quad (13)$$

$$M_{t0} = 0.25, \zeta^* = 0.25$$

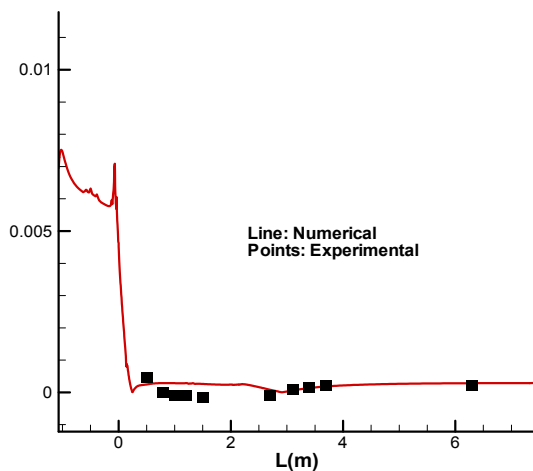
$$\beta_i^* = 0.09, f_\beta = 1$$

۴- استقلال شبکه و اعتبارسنجی

در این بخش استقلال شبکه مورد بررسی قرار می‌گیرد، به طوری که چهار نوع شبکه بندی تحلیل مطابق جدول ۱ و در نهایت با توجه به موارد ذیل شبکه بندی مناسب تعیین شد.



شکل ۶- مقایسه نتایج عددی و تجربی ضریب اصطکاک دیواره بالا در زاویه ۱۰ درجه



شکل ۷- مقایسه نتایج عددی و تجربی ضریب اصطکاک دیواره پایین در زاویه ۱۰ درجه

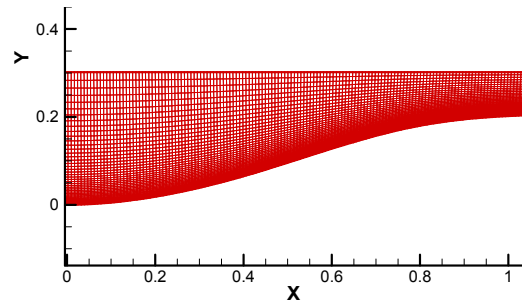
۵- روش حل

۵-۱- روش عددی

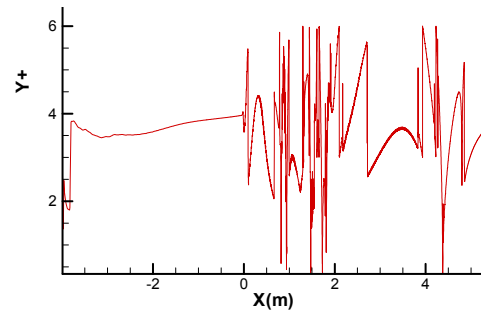
در روش‌های گسسته سازی، روش‌های FVS^1 دارای دقت کمتر همراه با هزینه پایین تر و روش‌های FDS^2 دارای دقت بالا همراه با پیچیدگی و هزینه بیشتر می باشند. حال بایستی به دنبال روشی باشیم که دقت بالای روش‌های FDS را به همراه هزینه اندک روش FVS و پیچیدگی اندکی داشته باشد. این در واقع اساس و پایه ای

¹ Flux Vector Splitting Schemes

² Flux Difference Splitting Schemes

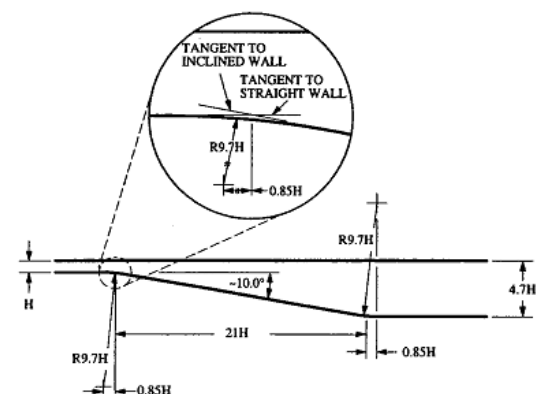


شکل ۳- شبکه حل مسئله در قسمت همگرای دیفیوزر



شکل ۴- مقدار Y^+ مسئله

پس از انتخاب مدل اغتشاش مناسب و تولید شبکه مستقل از جواب به مقایسه ضریب اصطکاک سطحی با نتایج تجربی مرجع [۴] پرداخته شد. دیفیوزر تونل باد با دیواره شیب ثابت با زاویه ۱۰ درجه مطابق شکل مدل و تحلیل گردید. همانطور که در نمودار شکل (۶ و ۷) مشاهده می‌کنید مقایسه نتایج عددی و تجربی در مجموع نشان‌دهنده تطابق بالای ۹۰ درصد بین این دو می‌باشد. اختلاف نتایج در محدوده $x=0.5$ تا $x=1.5$ ناشی عدم مدل نمودن منحنی بین دیواره شیب ۱۰ درجه و دیواره افقی تونل باد و همچنین اثر پدیده انبساطی جریان می‌باشد.



شکل ۵- مشخصات دیفیوزر با زاویه نصب ۱۰ درجه [۴]

الگوریتم ژنتیک برای آن اجرا شود حجم محاسبات افزایش پیدا می‌کند، لذا می‌بایست روندی جهت کاهش محاسبات در نظر گرفته شود. با توجه به حساسیت ضخامت و وجود لایه مرزی در ورودی دیفیوزر، اجزای قبل از دیفیوزر به صورت یک کانال با سطح مقطع یکنواخت درآورده شد تا مسئله جهت اجرای الگوریتم ژنتیک ساده‌تر شود. جهت محقق نمودن این امر از کدی جهت تعیین طول کانال استفاده شده است با این شرط که ضخامت لایه مرزی اندازه گیری شده (۰/۰۴m) در ورودی تونل باد مرکز قدر با ضخامت ورودی در مدل تونل باد شکل ۱ یکسان باشد. طول کانال با اعمال شرط فوق $L=4m$ به دست می‌آید.

پس از تحلیل جریان در دیفیوزر، الگوریتم ژنتیک اجرا می‌شود. تابع هدف الگوریتم ژنتیک، حداقل کردن اختلاف ماخ خروجی از قسمت همگرای دیفیوزر تونل باد با ماخ یک می‌باشد.

برای محاسبه تابع هدف مراحل زیر طی می‌شود.

۱. محاسبه زاویه موج با استفاده از سرعت‌های قبل از

موج ضربه ای رابطه ۲۳

۲. محاسبه ماخ عمودی قبل از ایجاد موج رابطه ۲۴

۳. محاسبه ماخ عمودی بعد از ایجاد موج رابطه ۲۵

۴. محاسبه زاویه انحراف رابطه ۲۶

۵. محاسبه ماخ بعد از موج ضربه ای رابطه ۲۷

۶. محاسبه تابع هدف رابطه ۲۸

$$\tan \beta = \frac{u_1}{w_1} \quad (23)$$

$$M_{n,1} = M_1 \sin \beta \quad (24)$$

$$M_{n,2} = \frac{1 + [(\gamma - 1)/2] M_{n,1}^2}{\gamma M_{n,1}^2 - (\gamma - 1)/2} \quad (25)$$

$$\tan \alpha = 2 \cot \beta \frac{M_1^2 \sin^2 \beta - 1}{M_1^2 (\gamma + \cos 2\beta) + 2} \quad (26)$$

است که بر اساس آن روش AUSM¹ ابداع گردیده است [۱۷-۱۵].

برای حل معادلات مسئله و گسسته سازی آن‌ها از روش AUSM+ استفاده شد. در این روش شار بر روی هر وجه سلول به دو قسمت جابجائی و فشاری تبدیل می‌شود. شار عبوری از وجه (j+1/2) یا k به صورت زیر تجزیه می‌شود:

$$F_k = \rho U_{\perp} \phi + Pg \quad (14)$$

که در آن

$$\phi = [1, u, v, H]^T \quad (15)$$

$$U_{\perp} = un_x + vn_y \quad (16)$$

$$g = [0, n_x, n_y, 0]^T \quad (17)$$

$$n_x = \Delta y, n_y = -\Delta x \quad (18)$$

در نهایت پس از ساده سازی و جاگذاری روابط، شار کلی در وجه سلول به شکل ذیل است:

$$F_k = \begin{cases} \rho_L \xi_s \tilde{a} M_k \phi_L + g P_k & \text{if } M_k \geq 0 \\ \rho_R \xi_s \tilde{a} M_k \phi_R + g P_k & \text{else} \end{cases} \quad (19)$$

که در آن \tilde{a} مقدار عددی صوت و

$$\xi_s = \sqrt{n_x^2 + n_y^2} \quad (20)$$

$$M_k = M^+ + M^- \quad (21)$$

$$P_k = P^+ p_L + P^- p_R \quad (22)$$

که M^{\pm}, P^{\pm} توابعی از اعداد ماخ چپ و راست می‌باشد.

۵-۲- الگوریتم ژنتیک

تفاوت اساسی دیفیوزر تونل باد با دیفیوزرهای هواپیما و یا دیگر پرتابه‌ها این است که در ورودی دیفیوزرهای پرتابه‌ها ضخامت لایه مرزی بسیار ناچیز است. با آنکه در ورودی دیفیوزرهای تونل باد، وجود لایه مرزی باعث پیچیدگی جریان و ایجاد فعل و انفعالات شوک و لایه مرزی می‌شود.

به دلیل پیچیدگی مجرای تونل باد به جهت وجود نازل و دیگر قسمت‌های آن، اگر کل تونل باد مدل شود و

¹ Advection Upstream Splitting Method

در بهینه‌سازی این مسئله از نرخ احتمال پیوند ۱ و نرخ احتمال جهش 0/3 استفاده شد. همچنین طول هر رشته ۱۲ بیت و تعداد جمعیت در هر مرحله ۱۶ حالت می‌باشد.

۵-۳- تحلیل کامل تونل باد و تعیین راندمان

پس از همگرا شدن الگوریتم ژنتیک، جهت مدل نمودن کل تونل باد از بهترین‌های الگوریتم ژنتیک برای قسمت همگرای دیفیوزر تونل باد استفاده می‌شود. با توجه به عدم اطلاع دقیق فشار خروجی تونل باد، بدین صورت عمل شد: ابتدا فشار خروجی از تونل باد ۱۰۵۰۰ پاسکال در نظر گرفته شد (این مقدار حداکثر فشاری می‌باشد که در حال حاضر برای دیفیوزر تونل باد مرکز قدر، هنگامی که قسمت همگرای دیفیوزر حالت خطی داشته باشد، وجود دارد). بعد از همگرایی مسئله (مرتبه همگرایی 10^{-6}) فشار خروجی تونل باد ۵۰۰ پاسکال افزایش داده شد (۱۱۰۰۰ پاسکال) و مجدد جریان در این حالت تحلیل می‌شود. این روند (افزایش فشار خروجی با پررود ۵۰۰ پاسکال) ادامه داده می‌شود تا شرایط جریان برگشتی در مجرا به وجود نیاید. برای حالات دیگر دیفیوزر (منحنی‌های متفاوت دیواره قسمت همگرا) همین روند افزایش فشار خروجی را دنبال شد تا در نهایت بیشترین فشار خروجی ممکن برای هر حالت به دست آید.

۶- نتایج

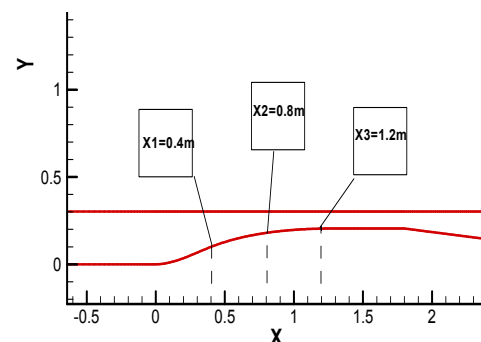
۶-۱- الگوریتم ژنتیک

بعد از اجرای مراحل فوق، الگوریتم ژنتیک بعد از ۵۱ تکرار همگرا می‌شود. شکل ۹ مقادیر میانگین ماخ خروجی از قسمت همگرای دیفیوزر هر تکرار را نشان می‌دهد. سپس تحلیل عددی جریان در تونل باد مافوق صوت مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج الگوریتم ژنتیک با کمک مدل جریان مغشوش SST استخراج شد.

$$M_2 = \frac{M_{n,2}}{\sin(\beta - \alpha)} \quad (27)$$

$$f = \text{Min} \left(\frac{\sum_{n=1}^m (M_2)}{m} - 1 \right) \quad (28)$$

که m تعداد نقاط شبکه در راستای عرضی است. الگوریتم ژنتیک بر اساس مدل شکل ۸ اجرا شده و سه نقطه، با مختصات‌های طولی $X_1 = 0.4m$ و $X_2 = 0.8m$ و $X_3 = 1.2m$ در قسمت همگرای دیفیوزر با فاصله‌های یکسان انتخاب شده است. راندمان در این تحقیق مطابق معادله ۲۹ به صورت نسبت فشار کل خروجی از تونل باد به فشار کل ورودی دیفیوزر می‌باشد.



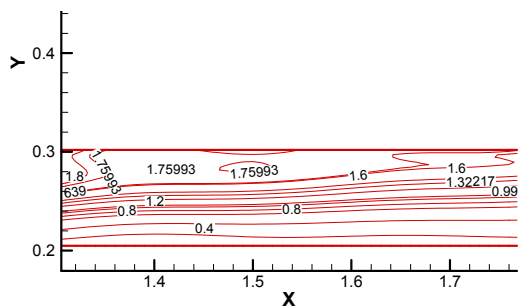
شکل ۸- نمایش مدل الگوریتم ژنتیک

$$\eta = \frac{p_0^{OUT}}{p_0^{IN}} \quad (29)$$

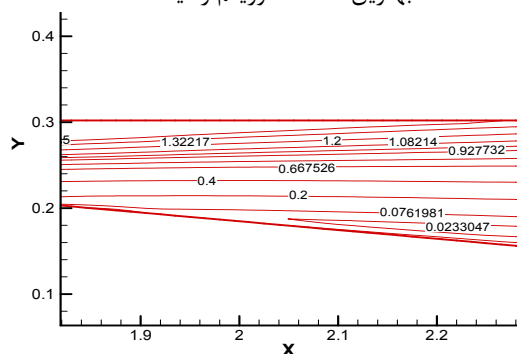
در اجرای الگوریتم ژنتیک و تحلیل مدل دیفیوزر تونل باد، محدودیت‌هایی ذیل وجود دارد:

- ۱- قسمت ابتدایی پروفیل دیواره قسمت همگرا باید از شیب صفر برخوردار باشد.
- ۲- قسمت انتهایی پروفیل دیواره قسمت همگرا باید از شیب صفر برخوردار باشد.
- ۳- باید وجود و ضخامت لایه مرزی جریان در هنگام ورود به دیفیوزر لحاظ شود.

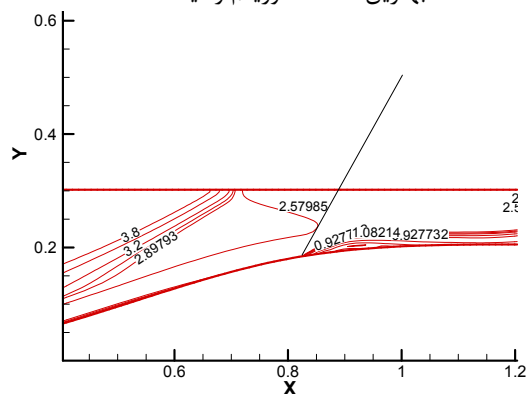
جریان از $X=0.82m$ رشد چشمگیری پیدا می‌کند و جریان را تحت تاثیر قرار می‌دهد. به طوری که مقداری از جریان مادون صوت می‌شود.



شکل ۱۰- نمایش کانتر ماخ قسمت ثابت دیفیوزر برای بهترین حالت الگوریتم ژنتیک



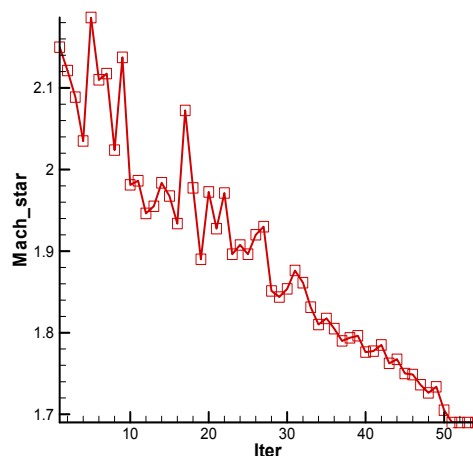
شکل ۱۱- نمایش کانتر ماخ قسمت واگرای دیفیوزر برای بهترین حالت الگوریتم ژنتیک



شکل ۱۲- نمایش کانتر ماخ قسمت همگرا دیفیوزر برای بهترین حالت الگوریتم ژنتیک

مطابق شکل ۱۳، در قسمت واگرای دیفیوزر مرکز قدر، سه ناحیه جدایش به هم پیوسته تشکیل شده است که طول این سه ناحیه جدایش از $x=1.8$ شروع و در مختصات $x=4.3$ به پایان می‌پذیرد. در مقابل همانطور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌کنید طول ناحیه جدایش در

مختصات بهترین دیفیوزرهای به دست آمده در جدول ۲ خلاصه شده است.



شکل ۹- نمودار میانگین M^* جمعیتها بر حسب تعداد تکرارهای الگوریتم ژنتیک

جدول ۲- راندمان دیفیوزر تونل باد مافوق صوت در بهترین حالت به دست آمده

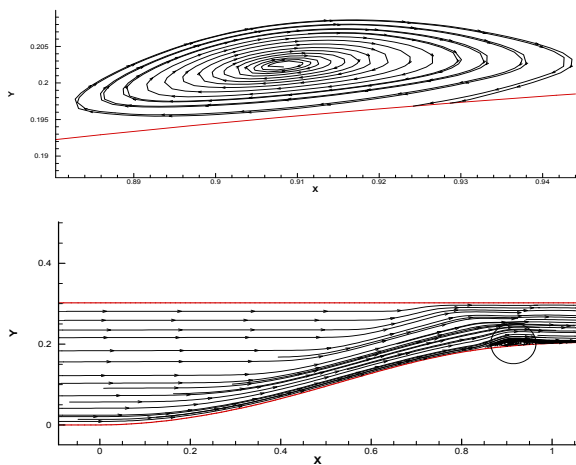
الویت بهترین ها	مختصات عمودی نقطه اول	مختصات عمودی نقطه دوم	مختصات عمودی نقطه سوم	راندمان تونل باد
۱	0/065	0/18	0/205	٪۳۳
۲	0/1	0/18	0/205	٪۳۱،۵
۳	0/11	0/18	0/205	٪۳۰
۴	0/095	0/16	0/2	٪۳۰
۵	0/1	0/16	0/205	٪۲۹

۲-۶- جدایش

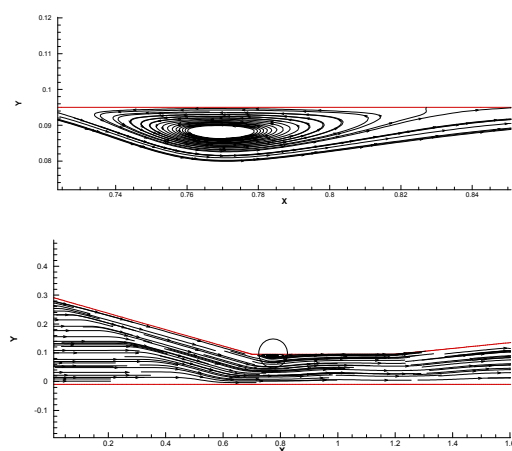
در شکل ۱۰ کانتر ماخ قسمت ثابت بهترین حالت دیفیوزر تونل باد مافوق صوت با مدل اغتشاش SST نمایش داده شده است. با توجه به شکل، جریان به هنگام ورود به قسمت واگرای دیفیوزر، به جز در خط مرکزی آن کاملاً مادون صوت می‌باشد. به عبارتی دیگر در انتهای قسمت ثابت، جریان مادون صوت غالب می‌شود. با توجه به شکل ۱۱، جریان در $X=2.2m$ کاملاً مادون صوت می‌شود و اثر شوک از بین رفته است.

در شکل ۱۲ کانتر ماخ قسمتی از همگرای بهترین حالت دیفیوزر تونل باد مافوق صوت با مدل اغتشاش SST نمایش داده شده است. با توجه به شکل، لایه مرزی

جدایش از انتهای قسمت همگرای دیفیوزر شروع و تا $x=0.82$ ادامه دارد. همان طور که در شکل ۱۷ مشاهده می‌کنید ناحیه جدایش در قسمت همگرای دیفیوزر بهینه کمی جلوتر از ناحیه جدایش دیفیوزر مرکز قدر تشکیل می‌شود. این ناحیه از مختصات $x=0.88$ شروع می‌شود و طول آن $0.07m$ می‌باشد. با بررسی به عمل آمده، طول ناحیه جدایش در قسمت همگرای دیفیوزر بهینه نسبت به دیفیوزر قدر ۲۲.۲ درصد کاهش یافته است. همانطور که در شکل ۱۸ مشاهده می‌کنید مقدار راندمان دیفیوزر حدوداً ۳۱ درصد می‌باشد.

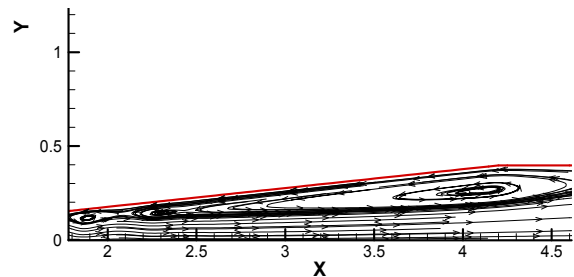


شکل ۱۶- نمایش خطوط جریان قسمت همگرا دیفیوزر برای بهترین حالت الگوریتم ژنتیک

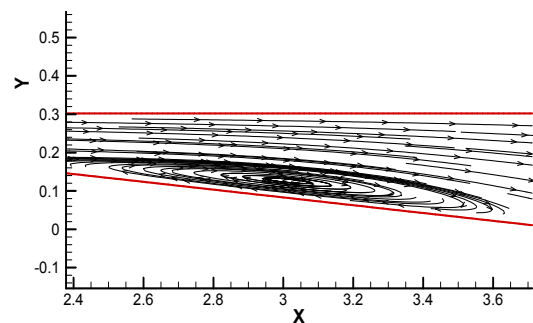


شکل ۱۷- نمایش خطوط جریان قسمت همگرا دیفیوزر تونل باد مرکز قدر

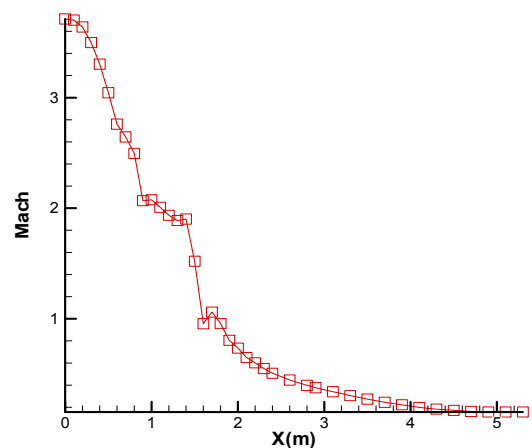
قسمت واگرای مدل جدید و بهینه دیفیوزر ۱/۱ متر می‌باشد. با مقایسه دو شکل، نتیجه می‌شود طول ناحیه جدایش ۵۶ درصد کاهش یافته است. همانطور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌کنید نوسانات ماخ در خط مرکزی ناشی از شوک‌های جریان می‌باشد. و حدوداً موقعیت شوک را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳- نمایش خطوط جریان قسمت واگرای دیفیوزر تونل باد مرکز قدر



شکل ۱۴- نمایش خطوط جریان قسمت واگرای دیفیوزر برای بهترین حالت الگوریتم ژنتیک



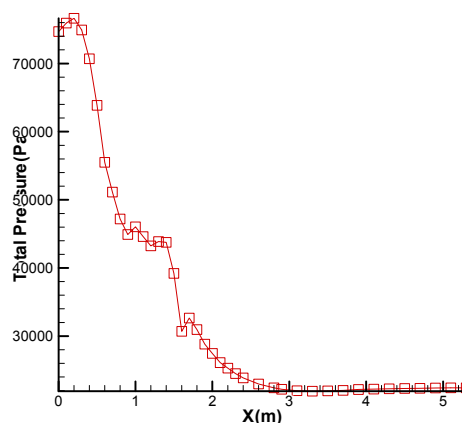
شکل ۱۵- میانگین ماخ در هر مقطع از ابتدای شروع دیفیوزر

بطور مشابه در قسمت همگرای دیفیوزر تونل باد مرکز قدر طول ناحیه جدایش می‌باشد. مطابق شکل ۱۶ این ناحیه

۳-۶- مقایسه نتایج (نسبت فشار کل)

در این بخش راندمان به دست آمده از طریق الگوریتم ژنتیک با حالت عادی نصب دیفیوزر مقایسه شده است. در حال حاضر دیواره قسمت همگرای دیفیوزر تونل باد مافوق صوت مرکز قدر انعطاف‌پذیر نیست و با شیب ثابتی نصب شده است (شکل ۱). در این حالت راندمان دیفیوزر حدود ۱۸ درصد می‌باشد. در مدل بهینه دیفیوزر، راندمان تقریباً دو برابر راندمان دیفیوزر تحلیل شده مرکز قدر می‌باشد یا به عبارت دیگر راندمان دیفیوزر بهینه افزایش ۸۳ درصدی را در بر داشت.

در شرایط جریان این تحقیق (ماخ ورودی به تونل باد $4M_\infty$ و مقدار ماخ ورودی به دیفیوزر $3.6M_s$) نسبت فشار کل گلوگاه به فشار کل ابتدای دیفیوزر $\frac{P_{0,s}}{P_{0,\infty}}$ 0.33 می‌باشد. این در حالی است که مرجع [۱۸] بیان می‌کند این نسبت فشار در $3.5M_s$ (ماخ ورودی به دیفیوزر) اتفاق می‌افتد. این مطلب بیانگر ۲/۸ درصد اختلاف در نتایج می‌باشد که این اختلاف ناشی از تفاوت در روش حل مسئله می‌باشد.



شکل ۱۸- میانگین فشار کل در هر مقطع از ابتدای شروع دیفیوزر

۷- جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی و ارائه مدلی بهینه از یک دیفیوزر مافوق صوت تونل باد پرداخته شد و پس از تحلیل عددی آن به کمک روش AUSM+ و بهینه‌سازی آن با روش الگوریتم ژنتیک نتایج زیر در مورد این مدل دیفیوزر به دست آمده اند:

- ۱- الگوریتم ژنتیک نخبه‌گرا روشی توانمند در پاسخ‌های بهینه برای مدل دیفیوزر تونل باد می‌باشد.
- ۲- انعطاف‌پذیری قسمت همگرای دیفیوزر و بهینه کردن دیفیوزر افزایش ۸۳ درصدی راندمان را در برداشت.
- ۳- تاثیر نقطه اول پروفیل قسمت همگرای دیواره دیفیوزر نسبت به دیگر نقاط در افزایش یا کاهش راندمان محسوس تر است.
- ۴- استفاده از روش AUSM+ در تحلیل جریان در نزدیکی دیواره و مرکز دیفیوزر و آنالیز ناپیوستگی‌های جریان همچون شوک و فن‌های انبساطی بسیار مناسب است.
- ناحیه جدایش در قسمت همگرا 22.2 درصد و در قسمت واگرای دیفیوزر ۵۶ درصد کاهش یافت.

۸- تشکر و قدردانی

نویسندگان از زحمات کارشناسان و محققین مرکز تحقیقات آیرودینامیک قدر به ویژه مدیریت مرکز دکتر حسنی تشکر و قدردانی می‌نمایند.

مراجع

- [1] Anderson, J.D. (2010). "Fundamentals of Aerodynamics". 5th Edition, McGraw Hill.
- [2] Mittal, S., Yadav, S. (2001). "Computation of flows in supersonic wind-tunnels". Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 191, pp. 611-634.

- [3] Peter, E. (1976). "Pressure recovery in rectangular constant area supersonic diffusers". AIAA journal, Vol. 14, No. 2, pp. 168-172.
- [4] Buice, C.U. (1997). "Experimental investigation of flow through an asymmetric plane diffuser". Doctoral dissertation, Stanford University.
- [5] Schluter, J.U., Wu, X., Pitsch, H. (2005). "Large-Eddy simulations of a separated plane diffuser". 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV.
- [6] Taha, O.Y. (2004). "Formulation implementation and testing of $k-\omega$ model in an asymmetric plane diffuser". Thesis of Master of Science, Chalmers university of Technology, Goteborg, Sweden.
- [7] Iaccarino, G. (2000). "Prediction of the turbulent flow in a diffuser with commercial CFD codes". Center for Turbulence Research Annual Research Briefs, pp. 271-278.
- [8] Tornblom, O. (2003). "Experimental study of the turbulent flow in a plane asymmetric diffuser". Technical Reports from Royal Institute of Technology, Sweden.
- [9] Davidson, L. (2006). "Evaluation of the SST-SAS Model: hannel Flow, asymmeric diffuser and axisymmetric hill". European Conference on Computational Fluid Dynamics, Netherlands.
- [10] Ran, H., Mavris, D. (2005). "Preliminary design of a 2D supersonic inlet to maximize total pressure recovery". AIAA 5th Aviation, Technology, Integration and Operations Conference, Virginia.
- [11] Slater, J.W. (2004), "CFD methods for computing the performance of supersonic inlets". 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Florida.
- [12] Ziaei-Rad, S., Ziaei-Rad, M. (2006). "Inverse design of supersonic diffuser with flexible walls using a Genetic Algorithm". Journal of Fluids and Structures, Vol. 22, pp. 529-540.
- [13] Anton, P. (2004). "Wind Tunnel and propulsion test facilities". An Assessment of NASA's Capabilities to Serve National Needs, Santa Monica, CA: RAND Corporation.
- [14] Wilcox, D. C. (1998). "Turbulence Modeling for CFD". DCW Industries, Inc., La Canada, California.
- [15] Liou, M.S., Steffen, C. (1993). "A new flux splitting scheme". Journal of Computational Physics, Vol. 107, pp. 23-39.
- [16] Liou, M. S. (1996). "A sequel to ausm: ausm+". Journal of Computational Physics, Vol. 129, pp. 364-382.
- [17] Liou, M. S. (2006). "A sequel to ausm, part ii: ausm+-up". Journal of Computational Physics, Vol. 214, pp. 137- 170.
- [18] Seddon, J., Goldsmith, E.L. (1985). "Intake Aerodynamic". William Collins Sons, London.