

# بررسی اثرات اصطکاک و انتقال حرارت بر جریان داخل چندراهه ورودی موتور احتراق داخلی با روش حجم محدود

سید اسماعیل رضوی\*  
دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز  
razavi@tabrizu.ac.ir

رضا عمرانی  
کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز  
reom1365@yahoo.com

\* نویسنده مسئول/تاریخ دریافت: ۸۹/۱۱/۱۲ پذیرش نهایی مقاله: ۹۰/۰۴/۰۵

## چکیده

طراحی و بهینه‌سازی چندراهه، که خود شامل محاسبه عملکرد موتور نیز می‌شود، یکی از مهم‌ترین مراحل در روند طراحی و توسعه موتورهای احتراق داخلی است. این فعالیت در طول سالیان گذشته یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های مراکز تحقیق و توسعه موتور در دنیا بوده است. در این مقاله جریان سیال تراکم پذیر داخل چندراهه ورودی یک موتور احتراق داخلی با روش‌های عددی تحلیل شده است. برای تعیین شرایط جریان سیال عبوری، جهت حل معادلات حاکم بر مسأله، برنامه‌های رایانه‌ای به زبان FORTRAN، با استفاده از روش‌های مختلف حجم محدود، نوشته و توسعه داده شده است. برای گسسته‌سازی معادلات پیوستگی، اندازه حرکت و انرژی، سه روش میانگین‌گیری مرتبه دوم، بالادست مرتبه اول و روش Roe مرتبه دوم استفاده شده و از نظر عملکرد و کارایی محاسباتی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. شرایط مرزی در ورود و خروج، برای حالات پایا و ناپایا به صورت ترکیبی از روش مشخصه‌ها و برون‌یابی به کار رفته است. برای به دست آوردن نتایج دقیق و واقعی، عوامل اصطکاک و انتقال گرما افزوده شد و اثرات عوامل اصطکاک دیواره با سیال و انتقال حرارت از سیال به دیواره بر رفتار جریان، بررسی و مقایسه شده‌اند. استفاده از طرح Roe مرتبه دوم همراه با افزودن عوامل اصطکاک و انتقال حرارت، سبب بهبود دقت نتایج و کاهش زمان اجرای برنامه می‌شود که هماهنگی خوبی با نتایج به دست آمده از روش‌های سه‌بعدی دارد.

شبیه‌سازی و تحلیل بخش‌های مختلف موتور، نقش بسیار مهمی را در پیشرفت موتورها ایفا می‌کند. شبیه‌سازی موتور در تجزیه و تحلیل بخش‌های مختلف موتور کمک بسیاری می‌کند بدون آنکه موتور به صورت واقعی ساخته شود، در نتیجه زمان و هزینه‌ها را برای طراحی یک موتور جدید کاهش می‌دهد. برنامه‌های تجاری بسیاری برای شبیه‌سازی موتور در دسترس است. چندراهه‌های ورودی و خروجی موتور، تأثیر زیادی بر روی کارکرد موتور، جلوگیری از صداهای مزاحم و آلودگی محیط زیست دارند. طبیعت جریان عبوری از چندراهه، به دلیل باز و بسته شدن یک

کلید واژه‌ها: موتور احتراق داخلی، چندراهه ورودی، اصطکاک و انتقال حرارت، روش حجم محدود، جریان تراکم پذیر

## ۱- مقدمه

طراحی و بهینه‌سازی چندراهه، که خود شامل محاسبه عملکرد موتور نیز می‌شود، یکی از مهم‌ترین مراحل در روند طراحی و توسعه موتورهای احتراق داخلی به شمار می‌رود. این فعالیت در طول سالیان گذشته یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های مراکز تحقیق و توسعه موتور در دنیا بوده است.

خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشته و دقت بهتری نسبت به روش‌های یک‌بعدی دارد.

سومان [۶] در پایان‌نامه خود، روش عملکرد موج را برای تحلیل جریان داخل چندراهه به کار برده و برای حل معادلات تفاضلی هذلولی غیر خطی، از روش مشخصه‌ها استفاده کرده است. او برنامه رایانه‌ای را برای به دست آوردن فشار و سرعت در شرایط مرزی مختلف توسعه داده است.

در کار لیانگ [۷]، تحلیل جریان در داخل چندراهه خروجی موتور احتراق داخلی انجام گرفته است. در این تحلیل اثرات اصطکاک دیواره و انتقال گرما از سیال به دیواره، الگوسازی شده‌اند. دو مجموعه معادلات شبه یک‌بعدی الگوسازی شده، با رانگ کوتای مرتبه چهار، برای زمان و طرح بدون نوسان وزنی از مرتبه پنج حل شده‌اند که نتایج به دست آمده، هماهنگی خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند.

در کار روسلو [۸]، برای تحلیل جریان داخل چندراهه ورودی و خروجی یک موتور احتراق داخلی، یک حل تقریبی چند جمله‌ای، بر اساس طرح Cauchy-Kovalevskaya، برای حل معادلات اویلر یک‌بعدی ارائه شده است. نتایج به دست آمده از حل تحلیلی، با نتایج روش عددی MacCormack مقایسه شده است که هماهنگی خوبی با نتایج عددی دارد.

کسگین [۹]، در پژوهش خود برای تحلیل جریان داخل موتور احتراق داخلی گازسوز، از یک الگوی صفربعدی برای جریان داخل استوانه و یک الگوی یک‌بعدی برای جریان داخل چندراهه‌های ورودی و خروجی استفاده کرده است. در این کار، اثرات متغیرهای مختلف سامانه‌های ورودی و خروجی، مانند زمان باز شدن دریچه‌ها، قطر دریچه‌ها، قطر و طول چندراهه‌های ورودی و خروجی و... بر روی عملکرد موتور ارزیابی شده است. برای تحلیل جریان یک‌بعدی از داخل چندراهه‌ها، از روش Lax-Wendroff استفاده شده است.

در کار هاریسون [۱۰]، یک الگوی صوتی خطی، برای تحلیل پویای امواج داخل چندراهه ورودی موتور احتراق داخلی با تنفس طبیعی، استفاده شده است. این روش در اکثر چندراهه‌های با هندسه پیچیده قابل استفاده است. الگوی استفاده شده، از چند زیر الگو مانند الگویی برای لوله مستقیم با دو انتهای باز، الگویی برای محفظه انبساط، الگویی برای شاخه‌های کناری و اتصال سه راهه و الگویی برای ساسات ورودی تشکیل یافته است.

در کار گوپال [۱۱]، برای افزایش بازده احتراقی موتور احتراق داخلی، با کاهش فشار پشت چندراهه خروجی، از روش‌های CFD استفاده شده

در میان دریچه‌های ورودی و خروجی، یک طبیعت گذرا و پالسی است. این طبیعت گذرا، زمینه‌ساز تولید موج‌های فشاری در چندراهه‌های ورودی و خروجی می‌شود. نسبت بزرگی از صداهای ایجاد شده در موتور خودروها به واسطه موج‌های فشاری منتشر شده در چندراهه‌های ورودی و خروجی خواهد بود. شبیه‌سازی یک‌بعدی جریان، ابزار قدرتمندی برای ارزیابی عملکرد موتورها بوده ولی در بسیاری از حالات پیچیده مانند اتصال‌ها، به عنوان یک طراحی اولیه به کار گرفته می‌شود.

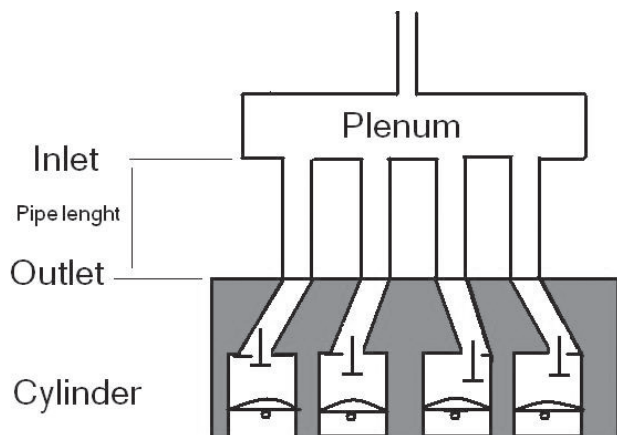
بنسون [۱،۲]، برای اولین بار، برنامه‌ای را برای حل معادلات یک‌بعدی حاکم بر جریان گاز داخل چندراهه ارائه کرد. این برنامه بر اساس روش مشخصه‌ها پایه‌گذاری شده بود. با این روش، معادلات تفاضلی جزئی به معادلات تفاضلی معمولی در طول خطوط مشخصه تبدیل می‌شود. نسخه‌های مختلفی از این برنامه، امروزه نیز استفاده می‌شود. مشکل اصلی روش مشخصه‌ها، زمان اجرای برنامه بود. هنگامی که زمان انجام محاسبات دارای اهمیت بود، محققان سعی می‌کردند از تعداد محاسبات کاسته شود تا زمان اجرای برنامه بهبود یابد که باعث کاهش دقت محاسبات می‌شد. از دیگر معایب روش مشخصه‌ها، ناپایستار بودن آن است و نیز، در برخورد با ناپیوستگی‌هایی مثل عبور از شوک، کارایی لازم را ندارد. همچنین این روش، قادر به تحلیل موج‌های فشاری بزرگ نیست.

در پژوهش وینتربون و پیرسون [۳]، اثرات متغیرهای چندراهه، بر روی عملکرد موتور بررسی شد. که در این کار از الگو موج‌های خطی، جهت تحلیل جریان داخل چندراهه استفاده شده و برنامه رایانه‌ای برای حل آن توسعه داده شده است. این روش ۲۲۰ برابر تندتر از برنامه‌ای بود که براساس روش مشخصه‌ها توسعه داده شده بود. برای غلبه بر این مشکلات، محققان مطالعاتی را بر روی روش‌های جدیدتر اختلاف محدود و حجم محدود انجام دادند.

در کار اصفهانیان [۴]، برای تعیین شرایط جریان عبوری از داخل چندراهه ورودی، یک برنامه رایانه‌ای برای حل معادلات اویلر شبه یک‌بعدی، با روش تجزیه شار نوشته شده است. شرایط مرزی مورد نیاز در حل این مسأله، با داده‌های تجربی به همراه معادلات نیمه تجربی، الگوسازی شده است.

در کاری که توسط جورجیو [۵] ارائه شد، به جای معادلات یک‌بعدی، از ترکیب معادلات شبه سه‌بعدی با سه‌بعدی در الگوسازی جریان داخل چندراهه استفاده شده که منجر به دقت بهتر نسبت به حالت یک‌بعدی شده است. برای صخه‌گذاری نتایج به دست آمده، یک موتور تحقیقاتی AVL۵۲۰ تک استوانه، استفاده شده است، با استفاده از مشخصات این موتور، تحلیل شبه سه‌بعدی انجام شد. نتایج به دست آمده هماهنگی

در معادلات فوق،  $A(x)$  سطح مقطع لوله،  $\rho$  چگالی سیال،  $u$  سرعت،  $e_0$  انرژی کل سیال در واحد جرم،  $h_0$  انتالپی کل سیال در واحد جرم،  $f$  ضریب اصطکاک،  $D$  قطر لوله،  $P$  فشار،  $G$  عامل اصطکاک سیال با دیواره و  $Q$  عامل انتقال حرارت از سیال به دیواره چندراهه است.



شکل ۱ طرحواره مسیر مکش هوا به موتور

### ۱-۲- محاسبه ضریب اصطکاک دیواره لوله

معمولاً در الگوسازی عملکرد موج، از یک مقدار ثابت  $f$ ، بین محدوده  $0.004 - 0.01$  استفاده می‌کنند. برای اعداد رینولدز در محدوده  $10^3 \leq Re \leq 5 \times 10^3$  و مقدار زبری در محدوده  $10^{-2} \leq (\frac{k}{D}) \leq 10^{-6}$ ، سوام و جین، معادله زیر را پیشنهاد دادند: [۱۲]

$$f = \frac{0.25}{\left[ \log\left(\frac{k}{D}\right) \times \frac{1}{3.7} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right]^2} \quad (2)$$

در معادله بالا،  $D$  قطر لوله، و عدد رینولدز با استفاده از معادله (۳)

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} \quad (3)$$

بلایر [۱۳]، معادله زیر را برای محاسبه گرانیوی گاز پیشنهاد کرده است که در آن  $T$  برحسب کلونین و  $\mu$  برحسب  $N.S/m^2$  می‌باشد.

$$\mu = 7.457 \times 10^{-6} + 4.1547 \times 10^{-8} T - 7.4793 \times 10^{-12} T^2 \quad (4)$$

### ۲-۲- الگوسازی عامل انتقال گرما

عامل انتقال گرما،  $Q$  در معادله انرژی، برای نشان دادن انتقال گرمای شعاعی از گاز به سمت دیواره لوله و نیز افزایش گرمای ناشی از احتراق در چندراهه، استفاده می‌شود. معادله تقریبی، برای به دست آوردن  $Q$  توسط بنسون [۱۴]، به صورت زیر است:

است. یک موتور CONTESSA با توان ۲۰ اسب بخار، در سرعت بیشینه ۲۰۰۰ دور بر دقیقه، برای این تحلیل بکار رفته است. جریان داخل چندراهه خروجی با اعمال فشار، سرعت و دما به عنوان شرایط مرزی، در FLUENT شبیه‌سازی شده و نتایج به دست آمده، هماهنگی خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.

در این تحقیق، برای محاسبه تعیین شرایط جریان سیال عبوری، برنامه‌های رایانه‌ای به زبان FORTRAN، جهت حل معادلات اویلر، با استفاده از روش حجم محدود، نوشته و توسعه داده شده است. برای محاسبه شارهای عبوری از مرز سلول‌ها، از طرح‌های میانگین‌گیری مرتبه دوم، بالادست مرتبه اول و Roe مرتبه دوم، استفاده شده است و شرایط مرزی در ورودی و خروجی چندراهه، اعمال شده‌اند. برای به دست آوردن نتایج دقیق و واقعی، عوامل اصطکاک و انتقال گرما افزوده شده است. برای صحت‌گذاری نتایج، مقایسه‌ای بین نتایج به دست آمده از این تحقیق، با نتایج تحلیل سه‌بعدی گوپال [۱۱] انجام شد. استفاده از طرح Roe مرتبه دوم همراه با افزودن عوامل اصطکاک و انتقال حرارت، سبب بهبود دقت نتایج نسبت به سایر روش‌های یک‌بعدی شده و هماهنگی خوبی با نتایج تحلیل سه‌بعدی دارد و برنامه‌های توسعه داده شده، در زمان کمتری نسبت به تحلیل سه‌بعدی اجرا می‌شود.

### ۲- معادلات حاکم

برای شبیه‌سازی جریان سیال تراکم پذیر داخل لوله‌های چندراهه هوا مطابق شکل ۱، معادلات اویلر به کار گرفته شده‌اند. معادلات اویلر را می‌توان به شکل پایستاری زیر نوشت:

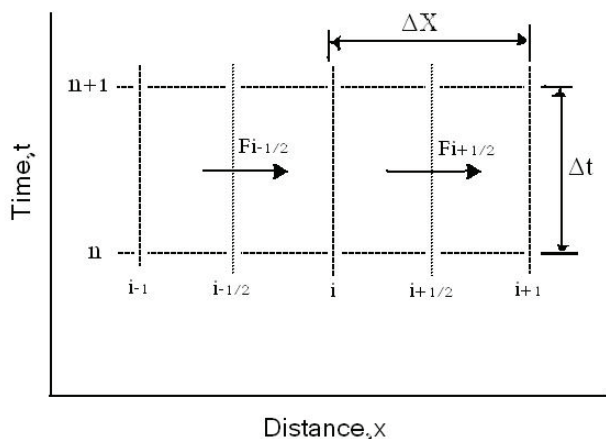
$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial F(W)}{\partial x} + C(W) = 0 \quad (1)$$

$$W = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho e_0 \end{bmatrix}, \quad F(W) = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho u h_0 \end{bmatrix}$$

$$C(W) = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 \\ \rho u h_0 \end{bmatrix} \frac{d(\ln F)}{dx A} + \begin{bmatrix} 0 \\ \rho G \\ \rho Q \end{bmatrix}$$

$$G = \frac{1}{2} u |u| f \frac{4}{D}$$

گسسته‌سازی زمان، دو روش اویلر جلو رونده و رانگ کوتای مرتبه چهار به کار رفته که به دلیل انطباق خیلی زیاد و کاهش زمان محاسبات، اویلر جلو رونده ترجیح داده شد.



شکل ۲: شارهای عبوری از مرز سلول‌ها

$$Q = \frac{4h}{\rho D} (T_w - T_g) \quad (5)$$

در این معادله،  $h$  ضریب انتقال گرما،  $T_w$  و  $T_g$  به ترتیب، دمای لوله و گاز و  $D$  قطر لوله است. براساس شبیه‌سازی رینولدز، ضریب انتقال گرما مانند زیر به دست می‌آید:

$$h = \frac{f}{2} \rho u c_p \quad (6)$$

برای گاز ایده‌ال، معادله (۵)، به صورت زیر خواهد شد [۱۶]:

$$q = \frac{2fu}{D} \frac{KR}{K-1} (T_w - T_g) \quad (7)$$

### ۳- روش حجم محدود

شکل انتگرالی معادلات حاکم مانند زیر است [۱۵، ۱۶]:

$$\iint_x \left( \frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial F(W)}{\partial x} + C(W) \right) dx dt = 0 \quad (8)$$

معادله (۸) پس از اعمال قضیه گرین و گسسته‌سازی به شکل زیر در می‌آید:

$$W_i^{n+1} = W_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (F_{i+1/2}^n - F_{i-1/2}^n) - \frac{\Delta t}{2} (C_{i+1}^n + C_{i-1}^n) \quad (9)$$

در معادله بالا،  $w$ ، مقدار میانگین متغیرهای وابسته سلول‌ها و  $F$ ، میانگین شار عبوری از مرزهای سلول‌ها، مطابق شکل ۲، بر روی بازه زمانی  $\Delta t$  و اویلر جلو رونده است. برای رفع مشکل ناپایداری و جلوگیری از ایجاد نوسانات شدید معادله (۹) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$W_i^{n+1} = \frac{1}{2} (W_{i+1}^n + W_{i-1}^n) - \frac{\Delta t}{\Delta x} (F_{i+1/2}^{n-1} - F_{i-1/2}^{n-1}) - \frac{\Delta t}{2} (C_{i+1}^n + C_{i-1}^n) \quad (10)$$

طرح‌های مختلفی برای محاسبه شارها در معادلات (۳) و (۴)، توسعه داده شده‌اند که در این پژوهش از طرح‌های میانگین‌گیری مرتبه دوم<sup>۱</sup>، بالادست مرتبه اول<sup>۲</sup> و Roe مرتبه دوم<sup>۳</sup> استفاده شده است. برای

### ۳-۱- روش میانگین‌گیری مرتبه دوم

برای محاسبه شارها در معادله (۳)، با طرح میانگین‌گیری، به صورت زیر عمل می‌شود [۱۷]:

$$F_{i-1/2} = \frac{1}{2} [F(W_i) + F(W_{i-1})] \quad (11)$$

$$F_{i+1/2} = \frac{1}{2} [F(W_{i+1}) + F(W_i)]$$

در واقع، برای محاسبه شار  $i + \frac{1}{2}$ ، در مرز سلول، از میانگین شارهای عبوری از مرز  $i + I$  و  $i$ ، و به گونه مشابه، برای محاسبه شار  $i - \frac{1}{2}$ ، در مرز سلول، از میانگین شارهای عبوری از مرز  $i - I$  و  $i$  استفاده شد. اعمال روش میانگین‌گیری، و ساده‌سازی معادلات، نتیجه می‌دهد:

$$W_i^{n+1} = W_i^n - \frac{\Delta t}{2\Delta x} [F_{i+1}^n - F_{i-1}^n] - \frac{\Delta t}{2} (C_{i+1}^n + C_{i-1}^n) \quad (12)$$

### ۳-۲- روش بالادست مرتبه اول

برای محاسبه شارها در معادله (۳)، با طرح بالادست مرتبه اول، به صورت زیر عمل می‌شود [۱۷]:

۱- Second order averaging

۲- First order upwind

۳- Second order Roe

$$\alpha_1 = \frac{1}{2a} \left[ \Delta p - \bar{\rho} \bar{a} \Delta u \right]$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{a} \left[ a^{-2} \Delta \rho - \Delta p \right]$$
(۱۷)

$\alpha_1 = \frac{1}{2a} \left[ \Delta p - \bar{\rho} \bar{a} \Delta u \right]$   
 در روابط بالا، از مقادیر متوسط سرعت گاز، سرعت صوت، انتالپی و چگالی استفاده شده، که با روابط زیر تعیین می شوند:

$$\bar{u} = \frac{\rho_L^{1/2} u_L + \rho_R^{1/2} u_R}{\rho_L^{1/2} + \rho_R^{1/2}}$$

$$\bar{\rho} = \rho_L \rho_R$$

$$\bar{a} = (k-1) \left[ \bar{h} - \frac{1}{2} \bar{u}^2 \right]$$

$$\bar{h} = \frac{\rho_L^{1/2} h_L + \rho_R^{1/2} h_R}{\rho_L^{1/2} + \rho_R^{1/2}}$$
(۱۸)

$$\Delta u = u_R - u_L \quad \Delta \rho = \rho_R - \rho_L \quad \Delta p = p_R - p_L$$

با محاسبه  $a_k$ ،  $\lambda_k$ ،  $e_k$ ، شار عبوری از مرز  $i + \frac{1}{2}$ ، از معادله (۹)

به دست می آید. برای محاسبه شار عبوری از مرز  $i - \frac{1}{2}$  نیز، به طریق مشابه عمل می شود:

$$F_{i-1/2} = \frac{1}{2} (F_L + F_R) - \frac{1}{2} \sum_1^3 \alpha_k |\lambda_k| e_k$$
(۱۹)

### ۴- تلفات مصنوعی

یکی از مشکلات طرح های مرتبه دوم، تولید نوساناتی در هنگام عبور از شوک است. برای حذف این نوسانات و یا کاهش آنها، افزودن جملاتی از مرتبه دوم یا چهارم ضروری است. تلفات مصنوعی به شرح زیر به معادله (۹)، اضافه می شود [۱۸]:

$$W_i^{n+1} = \frac{1}{2} [W_{i+1}^n + W_{i-1}^n] - \frac{\Delta t}{2\Delta x} [F_{i+1}^n - F_{i-1}^n] + S_i^n$$
(۲۰)

$$F_{i+1/2} = F(W_i) \quad ; \quad F_{i-1/2} = F(W_{i-1})$$
(۱۳)

پس از قرار دادن شارهای به دست آمده با طرح بالادست مرتبه اول و ساده سازی معادلات، معادله کلی به صورت زیر حاصل می شود:

$$W_i^{n+1} = W_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} [F_i^n - F_{i-1}^n] - \frac{\Delta t}{2} (C_{i+1}^n + C_{i-1}^n)$$
(۱۴)

### ۳-۳- روش Roe مرتبه دوم

Roe، حل تقریبی معادلات ریمن را به جای حل دقیق آنها، پیشنهاد کرد که از زمان کمتری نسبت به روش گودنف، برخوردار بود [۱۶]. در روش Roe، برای مرز  $i + \frac{1}{2}$ ، نقاط  $i$  و  $i+1$ ، به ترتیب به صورت  $L$  و  $R$  و برای مرز  $i - \frac{1}{2}$ ، نقاط  $i-1$  و  $i$ ، به ترتیب به صورت  $R$  و  $L$  نشان داده می شوند. شار روی مرز  $i + \frac{1}{2}$ ، به صورت زیر است:

$$F_{i+1/2} = \frac{1}{2} (F_L + F_R) - \frac{1}{2} \sum_1^3 \alpha_k |\lambda_k| e_k$$
(۱۵)

در معادله بالا،  $a_k$ ، شدت موج  $k$ ،  $\lambda_k$ ، مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین و  $e_k$ ، بردارهای ویژه سمت راست ماتریس  $A$  هستند. متغیرهای  $\lambda_k$ ،  $a_k$  و  $e_k$ ، عبارتند از:

$$e_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{\bar{u} - \bar{a}} \\ \frac{1}{\bar{h} - \bar{u}\bar{a}} \end{bmatrix}$$

$$e_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{\bar{u}} \\ \frac{1}{2} \frac{\bar{u}^{-2}}{\bar{u}} \end{bmatrix}$$

$$e_3 = \begin{bmatrix} \frac{1}{\bar{u} + \bar{a}} \\ \frac{1}{\bar{h} + \bar{u}\bar{a}} \end{bmatrix}$$
(۱۶)

$$\lambda_1 = \bar{u} - \bar{a} \quad ; \quad \lambda_2 = \bar{u} \quad ; \quad \lambda_3 = \bar{u} + \bar{a}$$

که در معادله (۱۶)،  $\lambda$ ها مقادیر ویژه متناظر با بردارهای ویژه راست را نشان می دهند. توان موج متناظر با بردارهای ویژه فوق عبارتند از:

و عامل  $S_i^n$ ، مانند زیر تعریف می‌شود:

$$S_i^n = C_x \frac{|p_{i+1} - 2p_i + p_{i-1}|}{|p_{i+1}| + |2p_i| + |p_{i-1}|} (W_{i+1} - 2W_i + W_{i-1}) \quad (21)$$

در معادله بالا،  $C_x$ ، به صورت دلخواه از ۰,۰۱ تا ۰,۳ انتخاب می‌شود.

## ۵- شرایط مرزی

اهمیت شناخت مرزها، یکی از جنبه‌های مهم در حل معادله‌های حاکم و دست‌یابی به نتایج مفید است. برای یک لوله، می‌توان دو مرز در دو انتها در نظر گرفت که این مرزها می‌توانند انواع گوناگونی داشته باشند. مرزها می‌توانند به صورت انتها باز، انتها بسته، ریزش درونی از یک مخزن، دریچه‌ها، انتها نیمه باز، اتصالات و ... باشند. فرض شبه پایا بودن جریان عبوری از مرزها از نظر فیزیکی، در بردارنده این مفهوم است که می‌توان از اندازه فیزیکی مرز در مقایسه با طول لوله مرتبط با آن صرف‌نظر کرد. معادلات جریان پایا، می‌تواند به طور محلی برای این ناحیه بسیار کوچک به کار رود. در این تحقیق، چندراهه ورودی به صورت یک لوله مستقیم شبه‌سازی شده است که جریان هوا از مخزن پلنوم وارد لوله شده و پس از عبور از دریچه‌ها به استوانه می‌رسد. برای جریان یک‌بعدی تراکم پذیر در داخل لوله، برای مرزهای ورودی و خروجی، سه متغیر  $u$ ،  $P$  و  $\rho$  وجود دارد که بعضی از این متغیرها بسته به نوع جریان (فروصوت یا فراصوت)، معلوم یا مجهول خواهد بود که با اجرای برنامه، متغیرهای مجهول در سلول‌های مختلف تعیین می‌شود. نمودار تغییرات سرعت در چندراهه ورودی در سرعت ۵۰۰۰ دور بر دقیقه، در انتهای لوله، (شکل ۱۰) به عنوان شرط مرزی خروجی برای حالت جریان ناپایا اعمال شده است [۱۹]. با جای‌گذاری مقادیر نمودار در برنامه توسعه داده شده و اجرای آن، مقادیر فشار، سرعت و چگالی در سلول‌های دیگر نیز محاسبه می‌شود.

## ۶- توسعه برنامه رایانه‌ای و اجزای آن

با داشتن معادلات گسسته شده و شرایط مرزی در ورود و خروج لوله چندراهه، برنامه رایانه‌ای به صورت جداگانه برای هر یک از طرح‌های مختلف حجم محدود، توسعه داده شد. برای گسسته‌سازی زمان، از دو روش اویلر جلو برنده و رانگ کوتای مرتبه چهار استفاده شد. از این میان، روش اویلر جلو رونده به دلیل انطباق خیلی زیاد و کاهش زمان محاسبات مورد استفاده قرار گرفت. برنامه رایانه‌ای، برای تعداد سلول‌های مختلف

اجرا و در نهایت، به دلیل دقت بالا و زمان کمتر اجرای برنامه، تعداد پنجاه سلول، برای اجرای برنامه رایانه‌ای استفاده شد که در این تعداد سلول، استقلال جواب‌ها از شبکه به دست آمد. برنامه‌های توسعه داده شده برای طرح‌های مختلف، برای عدد کورانت<sup>۱</sup> یک، با FORTRAN۹۰، اجرا و نتایج به دست آمده، رسم شد. برنامه رایانه‌ای توسعه داده شده برای دو حالت، جریان هوای تراکم پذیر یک‌بعدی پایا و جریان هوای تراکم پذیر یک‌بعدی ناپایا برای هر یک از طرح‌ها اجرا می‌شود.

در حالت جریان پایا، با اعمال شرایط مرزی در ورودی و خروجی چندراهه، برنامه اجرا شده و نتایج به دست آمده، به صورت تغییرات  $u$ ،  $P$  و  $\rho$ ، نسبت به طول چندراهه رسم می‌شود. در حالت جریان ناپایا، با استفاده از نمودار تغییرات سرعت در انتهای چندراهه ورودی نسبت به زاویه میل‌لنگ، برنامه در مراحل زمانی مختلف، برای هر سه طرح اجرا شده و نتایج به دست آمده، به صورت تغییرات  $u$ ،  $P$  و  $\rho$ ، نسبت به زاویه میل‌لنگ رسم می‌شود.

مقایسه‌ای بین دو حالت جریان با اصطکاک و انتقال حرارت و حالت جریان بدون اصطکاک و انتقال حرارت انجام شد که این مقایسه در هر دو حالت جریان پایا و ناپایا بررسی شد. برای صحت‌گذاری به نتایج به دست آمده، مقایسه‌ای ما بین نتایج شبه‌سازی یک‌بعدی با نتایج حاصل از شبه‌سازی شبه‌سه‌بعدی و آزمایشگاهی، انجام گرفت. تطابق، دقت مناسب، زمان کمتر اجرای برنامه و سادگی برنامه توسعه داده شده نسبت به شبه‌سازی شبه‌سه‌بعدی و آزمایشگاهی مشاهده شد.

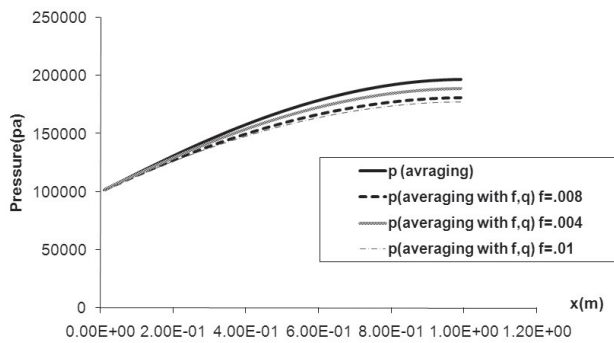
## ۷- نتایج عددی

بعد از توسعه برنامه برای هر یک از طرح‌های شار، برنامه‌ها در دو حالت جریان پایا و جریان ناپایا اجرا شدند. شکل‌های ۳ تا ۶ برای حالت پایا و شکل‌های ۷ تا ۱۴ برای حالت ناپایا رسم شده‌اند.

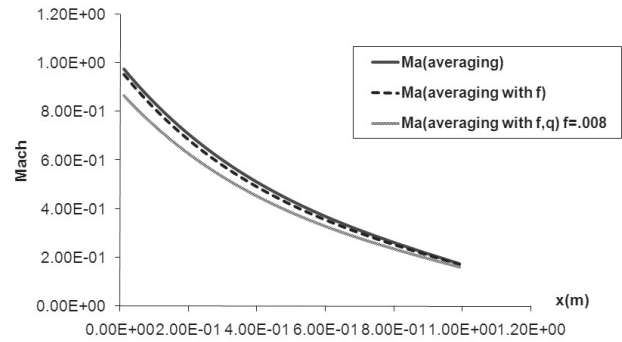
شکل (۳)، تغییرات عدد ماخ را در طول لوله چندراهه نشان می‌دهد زمانی که لوله دارای اصطکاک و انتقال حرارت باشد. مشاهده می‌شود که برای جریان فروصوت در طول لوله چندراهه، عدد ماخ کاهش پیدا می‌کند. شکل (۴) نیز تغییرات فشار را در طول چندراهه نشان می‌دهد. فشار در طول لوله چندراهه ورودی برای جریان فرو صوت، با کاهش سرعت، افزایش می‌یابد. مشاهده می‌شود که افت فشار در حالتی که اصطکاک سیال با دیواره و انتقال گرما از سیال به دیواره وجود دارد، بیشتر از حالت بدون اصطکاک و انتقال گرما است.

۱- Courant number



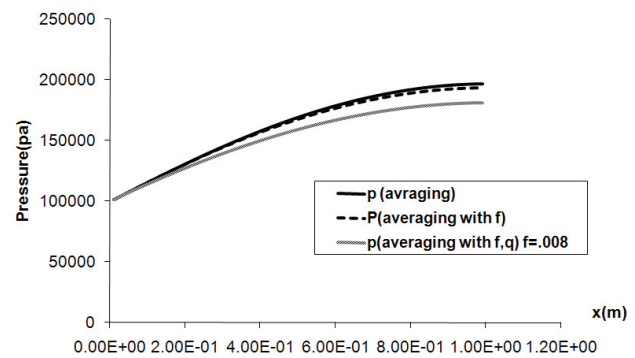


شکل ۶ مقایسه تغییرات فشار در طول چندراهه برای ضرایب اصطکاک مختلف

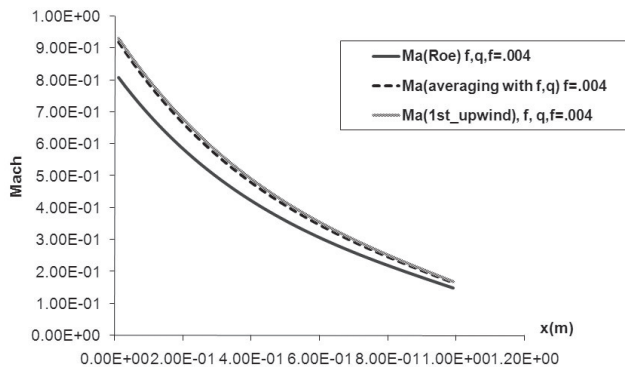


شکل ۷ مقایسه تغییرات ماخ در طول چندراهه در دو حالت با و بدون اصطکاک و انتقال گرما

شکل‌های (۷) و (۸) تغییرات ماخ و فشار را در طول چندراهه برای طرح‌های مختلف، مقایسه می‌کنند. روش‌های میانگین‌گیری مرتبه دوم و بالادست مرتبه اول اختلاف کمتری با هم دارند ولی دقت روش میانگین‌گیری مرتبه دوم به دلیل استفاده از سه سلول در معادله گسسته شده، بیشتر از روش بالادست مرتبه اول است که فقط از دو سلول در معادله گسسته شده بهره می‌برد. روش Roe نیز که دارای دقت مرتبه دوم بوده و با داشتن معادلات ریمن در معادله گسسته شده، دارای دقت بهتری نسبت به دو طرح دیگر است.

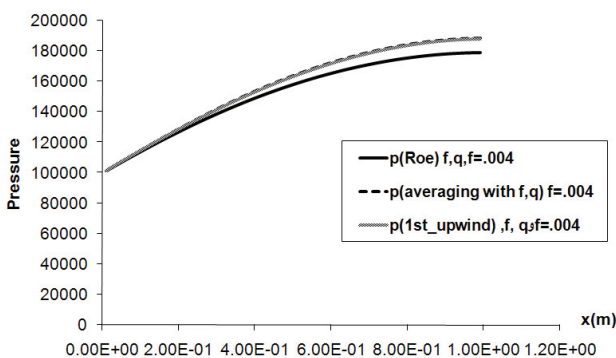


شکل ۸ مقایسه تغییرات فشار در طول چندراهه در دو حالت با و بدون اصطکاک و انتقال گرما

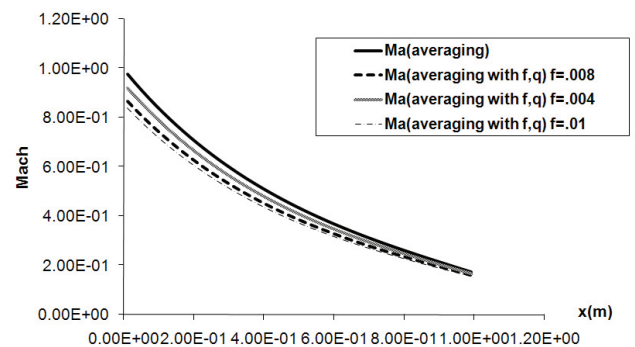


شکل ۹ مقایسه تغییرات ماخ در طول چندراهه برای طرح‌های مختلف

شکل‌های (۵) و (۶) تغییرات ماخ و فشار را در ضرایب اصطکاک مختلف نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش ضریب اصطکاک، افت ماخ و فشار افزایش پیدا می‌کند.

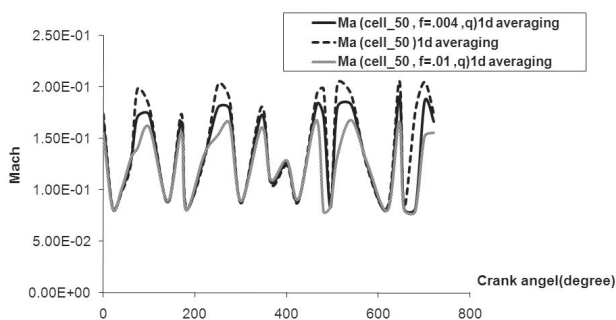


شکل ۱۰ مقایسه تغییرات فشار در طول چندراهه برای طرح‌های مختلف

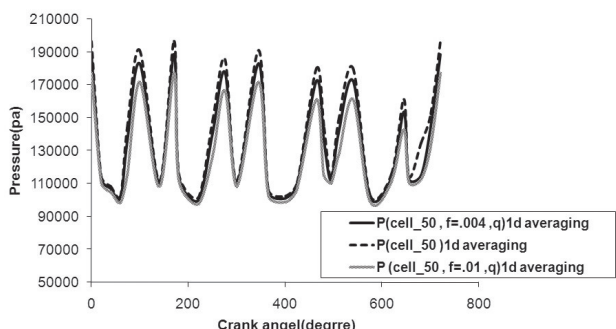


شکل ۱۱ مقایسه تغییرات ماخ در طول چندراهه برای ضرایب اصطکاک مختلف

شکل‌های (۱۱) و (۱۲) به ترتیب تغییرات عدد ماخ و فشار را نسبت به زاویه میل‌لنگ در سلول ۵۰ در سرعت ۵۰۰۰ دور بر دقیقه برای ضرایب اصطکاک مختلف نشان می‌دهد. جریان هوا بعد از عبور از این سلول، وارد استوانه می‌شود. با افزایش ضریب اصطکاک، افت ماخ و فشار در حالت ناپایا نیز افزایش می‌یابد.



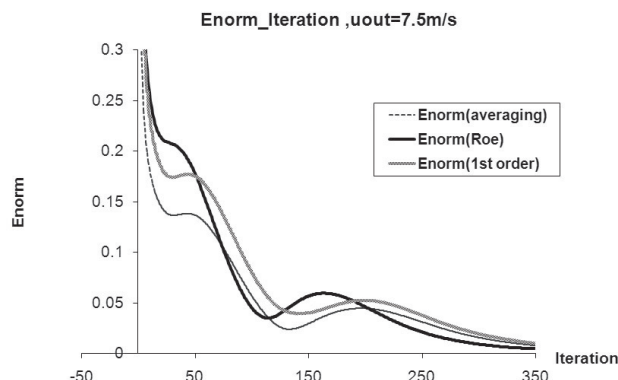
شکل ۱۱ مقایسه تغییرات ماخ نسبت به زاویه میل‌لنگ برای ضرایب اصطکاک مختلف در حالت ناپایا



شکل ۱۲ مقایسه تغییرات فشار نسبت به زاویه میل‌لنگ برای ضرایب اصطکاک مختلف در حالت ناپایا

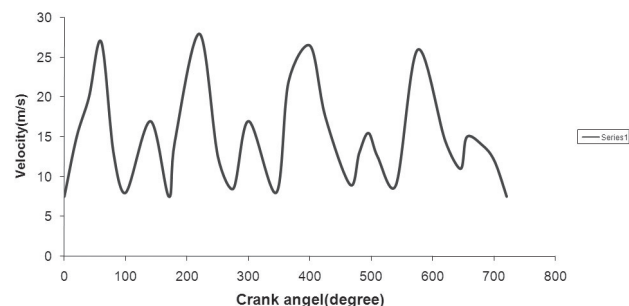
شکل‌های (۱۳) و (۱۴) نیز به ترتیب تغییرات عدد ماخ و فشار را نسبت به زاویه میل‌لنگ در سلول ۵۰، در سرعت ۵۰۰۰ دور بر دقیقه، برای طرح‌های مختلف نشان می‌دهد. بیشینه فشار داخل چندراهه ورودی، قبل از بسته شدن دریچه‌های ورودی و یا بعد از باز شدن دریچه‌های ورودی حاصل می‌شود که زاویه دقیق میل‌لنگ در این حالت بستگی به سرعت موتور دارد. کمینه فشار داخل چندراهه ورودی نیز، قبل از باز شدن دریچه‌های ورودی و یا بعد از باز شدن دریچه‌های خروجی خواهد بود. افزایش سرعت موتور باعث افزایش نقاط بیشینه و کاهش نقاط کمینه نمودار تغییرات فشار در داخل چندراهه ورودی خواهد شد. مشاهده می‌شود که تغییرات ماخ و فشار برای هر سه طرح، اختلاف ناچیزی با یکدیگر دارند.

شکل (۹) سرعت همگرایی در سه طرح را با یکدیگر مقایسه می‌کند. مشاهده می‌شود که برای تعداد تکرار مشخص، طرح Roe تندتر از دو طرح دیگر همگرا می‌شود.



شکل ۹ مقایسه سرعت همگرایی در طرح‌های مختلف

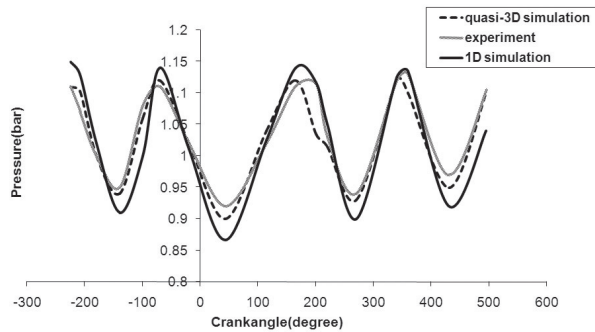
نمودار تغییرات سرعت [۱۹]، در چندراهه ورودی پیکان RD، در دور ۵۰۰۰ دور بر دقیقه در شکل (۱۰) نشان داده شده است که به عنوان شرط مرزی خروجی، در حالت ناپایا در برنامه استفاده می‌شود تا تغییرات ماخ و فشار نسبت به زاویه میل‌لنگ به دست آید. جریان داخل چندراهه ورودی به دلیل حرکت تناوبی سمبه و دریچه‌ها ناپایا است. باز و بسته شدن تناوبی دریچه‌های ورودی و خروجی، موج‌های فشاری و انبساطی با دامنه محدود در داخل چندراهه ورودی ایجاد می‌کند که با سرعت صوت در داخل چندراهه جریان می‌یابد. با افزایش سرعت موتور، بسامد و دامنه موج‌های فشاری ایجاد شده در داخل چندراهه ورودی افزایش می‌یابد [۲۰].



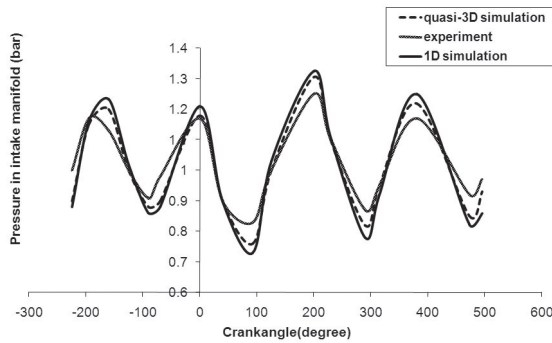
شکل ۱۰ تغییرات سرعت در چندراهه ورودی در سرعت ۵۰۰۰ دور بر دقیقه برای پیکان RD



کمتر اجرای برنامه توسعه داده شده و دقت خوب نتایج حاصله، شبیه‌سازی یک‌بعدی ترجیح داده می‌شود.



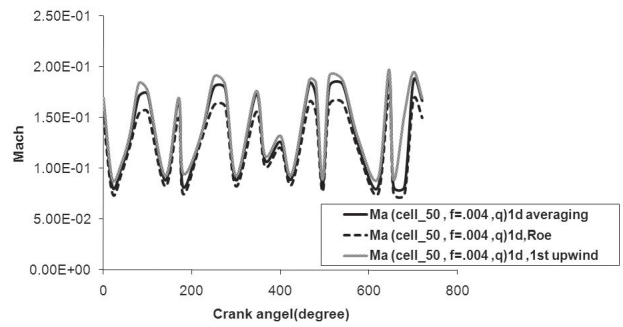
شکل ۱۴ مقایسه تغییرات فشار نسبت به زاویه میل‌لنگ در انتهای چندراهه ورودی برای شبیه‌سازی یک‌بعدی و شبه سه‌بعدی  $N=1955$  دور بر دقیقه



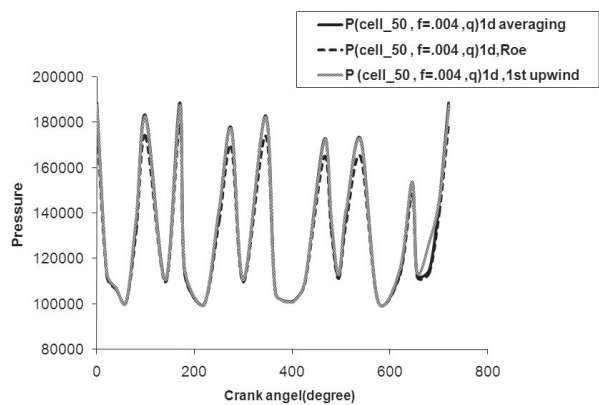
شکل ۱۵ مقایسه تغییرات فشار نسبت به زاویه میل‌لنگ در انتهای چندراهه ورودی برای شبیه‌سازی یک‌بعدی و شبه سه‌بعدی  $N=2248$  دور بر دقیقه

### نتیجه‌گیری

عملکرد و کارایی سه طرح مختلف برای محاسبه شار جابه جایی، در دو حالت پایا و ناپایا برای چندراهه ورودی بررسی شد. روش میانگین‌گیری مرتبه دوم به علت داشتن دقت مرتبه دو، نتایج دقیق‌تری نسبت به روش بالادست مرتبه اول دارد و روش Roe مرتبه دوم نیز با داشتن معادلات تقریبی ریمن، دقت بهتری نسبت به هر دو روش میانگین‌گیری مرتبه دوم و بالادست مرتبه اول دارد. همچنین طرح Roe، تندتر از دو طرح دیگر همگرا می‌شود. اثرات عوامل اصطکاک و انتقال گرما نیز، برای هر سه طرح در هر دو حالت پایا و ناپایا الگوسازی شد. افزودن عوامل اصطکاک سیال با دیواره چندراهه و انتقال گرما از سیال به دیواره چندراهه، به نتایج دقیق‌تری نسبت به حالت بدون اصطکاک و انتقال گرما منتج شد. تحلیل یک‌بعدی انجام شده در این پژوهش، به دلیل داشتن دقت مطلوب، هماهنگی مناسب با نتایج آزمایشگاهی، زمان کمتر اجرای برنامه و سادگی برنامه توسعه داده شده، نسبت به شبیه‌سازی شبه سه‌بعدی و سه‌بعدی، ترجیح داده می‌شود.



شکل ۱۳ مقایسه تغییرات ماخ نسبت به زاویه میل‌لنگ برای طرح‌های مختلف در حالت ناپایا



شکل ۱۴ مقایسه تغییرات فشار نسبت به زاویه میل‌لنگ برای طرح‌های مختلف در حالت ناپایا

اختلاف بین فشار بیشینه و کمینه در نمودار تغییرات فشار در سلول اول، کمتر از سلول‌های ۲۵ و ۵۰ است؛ زیرا سلول اول به خاطر مجاورت با مخزن پلنوم که شرایط نسبتاً پایا و یکنواختی دارد، دارای تغییرات فشار و ماخ کمتری خواهد بود و با فاصله گرفتن سلول‌ها از مخزن پلنوم، حالت ناپایداری به دلیل حرکت نوسانی سمبه و باز و بسته شدن تناوبی دریچه‌ها بیشتر و اختلاف بین فشار بیشینه و کمینه، بیشتر خواهد شد. برای صحت‌گذاری نتایج به دست آمده، مقایسه‌ای بین نتایج شبیه‌سازی یک‌بعدی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی شبه سه‌بعدی و آزمایشگاهی جورجیو [۵]، انجام گرفته و در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است. نتایج به دست آمده در دو سرعت مختلف موتور در انتهای چندراهه ورودی با یکدیگر مقایسه شده است. جهت اجرای برنامه توسعه داده شده، از داده‌ها و نمودارهای موتور تحقیقاتی AVL۵۲۰ تک استوانه، که توسط جورجیو [۵] برای شبیه‌سازی شبه سه‌بعدی استفاده شده، بهره برده می‌شود. نتایج حاصل از تحلیل یک‌بعدی که در این پژوهش انجام گرفته هماهنگی خوبی با نتایج شبیه‌سازی شبه سه‌بعدی و آزمایشگاهی دارد. با وجود اینکه دقت شبیه‌سازی سه‌بعدی، بهتر از دقت شبیه‌سازی یک‌بعدی است ولی به دلیل سادگی تحلیل یک‌بعدی و زمان

۱- Plenum

## References:

1. Benson, R.S., Garg, R.D., and Woollatt, D. "A numerical solution to the unsteady flow problem", *Int.J.Mech.Sci.*, 6, 117-144, 1964.
2. Benson, R.S. "A comprehensive digital computer program to simulate a compressive ignition engine including intake and exhaust systems", *SAE Paper 710773*, 1971.
3. Pearson, R.J. and Winterbone, D.E. "A rapid wave action simulation technique for intake manifold design", *SAE Paper 900676*, 1990.
4. Isfahanian, V. and Sobhani, E. "Analysis fluid flow inside the manifold of internal combustion engine by solving one dimensional euler equations", *3rd Congress of Internal Combustion Engines*, 2005.
5. Gheorghiu, V. "High accuracy through combining of quasi-3D with true-3D manifold flow models", *SAE Paper 20010119B*, 2001.
6. Suman, V. "Simulation of fluid flow in internal combustion engines using wave action simulation", *M.S. Thesis, the Graduate Faculty of Texas Tech University*, 2004.
7. Liang, S.M. "An effective approach for calculation of exhaust pipe flows", *Journal of Mechanics*, Vol. 25, No. 2, 2009.
8. Rosello, M.D. "Analytic-Numerical approach to flow calculation in intake and exhaust systems of internal combustion engines", *Mathematical and Computer Modeling*, 36, 33-45, 2002.
9. Kesgin, U. "Study on the design of inlet and exhaust system of a stationary internal combustion engine", *Energy Conversion and Management* 46, 2258-2287, 2005.
10. Harrison, M.F. "A linear acoustic model for multi-cylinder I.C. engine intake manifolds including the effects of the intake throttle", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 278, Issues 4-5, 975-1011, 2004.
11. Gopal, P. and Kumar, T.S. "Analysis of flow through the exhaust manifold of a multi cylinder petrol engine for improved volumetric efficiency", *International Journal of Dynamics of Fluids*, ISSN 0973-1784, Vol. 5, 5-26, 2009.
12. Swamee, P.k. and Jain, A.K. "Explicit equation for pipe flow problems", *J.Hydraulic Div. Proc. ASCE*, 657-664, 1976.
13. Blair, G.P. "Design and simulation of two stroke engines", *Society of Automotive Engineers, Warrendal, PA.*, 1996.
14. Benson, R.S. "Numerical solution of one dimensional non-steady flow with supersonic and subsonic flow and heat transfer", *Int. J. Mech. Sci.*, 14, 653-642, 1972.
15. Pearson, R.J. and Winterbone, D.E., Design technique for engine manifolds, *Professional Engineering Publication Limited*, 1999.
16. Pearson, R.J. and Winterbone, D.E., Theory of engine manifold design, *Professional Engineering Publication Limited*, 2000.
17. Hoffman, K.A. and Chiang, S.T., Computational fluid dynamics forth edition, Vol. 2, *A Publication of Engineering Education System, Wichita, Kansas, 67208-1078, USA*, 2000.
18. Anderson, J.D., Computational fluid dynamics, the basics with applications, *W- New York, Mc Graw-Hill, 2 Inc*, 1995.
19. Salari, M. "Numerical analysis of 3D flow in catalyst convertor of Paycan RD", *M.S. Thesis, Dept of Automotive Engineering, Iran University of Science and Technology*, 2002.
20. Ferguson, C.R. and Kirkpatrick, A.T., *Internal combustion engines applied thermosciences, second edition, John Wiley and Sons, Inc.*, 2001.