

حل معادله‌های جریان تراکم پذیر در داخل اجکتور

محمد-رضا امیدخواه*⁺، محمد-حسین نوید فامیلی و ابراهیم جلیلی کشتیان

تهران، دانشگاه تربیت مدرس، بخش مهندسی شیمی، صندوق پستی ۴۸۳۸-۱۴۱۵۵

چکیده: اجکتور یکی از دستگاه‌های مهم برای ایجاد خلاء و اختلاط سیالات است. در این تحقیق سعی شده تا با شبیه‌سازی جریان سیال در داخل اجکتور درک بهتری از رفتار جریان به دست آید. با توجه به اینکه سه رژیم زیر صوت، در حد صوت و بالای صوت به طور همزمان در داخل اجکتور وجود دارد، متغیر فشار به عنوان متغیر اصلی برای حل در نظر گرفته شده و چگالی، به عنوان متغیر ثانویه از معادله حالت به دست آمده است. برای گسسته سازی معادله‌ها از روش حجم محدود در مختصات چسبیده به مرز براساس شبکه هم مکان استفاده شده است. به منظور حل معادله‌ها، روش SIMPLEC برای جریان تراکم پذیر توسعه داده شده و برای حل مشکل تفکیک میدان فشار و سرعت از روش Rhie-Chow در یک شبکه هم مکان استفاده شده است. برای تقریب چگالی روی مرزهای المان حجم از روش تقریب مرکزی و برای ترم تصحیح چگالی روش بالا دست مورد استفاده قرار گرفته است. برای تقریب کمیت‌های انتقال روی سطح‌های المان حجم از روش‌های دوگانه بالا دست و QUICK و روش حداقل شیب استفاده شده است. ماتریس ضریب‌ها با استفاده از روش حل ماتریس‌های سه قطری حل شده‌اند. برای مقایسه نتیجه‌ها با کارهای دیگران، از این روش برای حل یک نازل همگرا و اگر استفاده شده و با کارهای عددی و تجربی موجود در منابع مقایسه شده است. نتیجه‌ها برای نازل همگرا و اگر نشان می‌دهد که برای سیال غیرلزج استفاده از تقریب‌های مرتبه اول بهتر از تقریب‌های مرتبه دوم است، زیرا دقت نتیجه‌ها تفاوت زیادی ندارد ولی پایداری روش‌های با دقت مرتبه اول بهتر است. در حالیکه برای سیالات لزج تقریب‌های با دقت مضاعف، فیزیک جریان را بهتر و دقیق‌تر نشان می‌دهند. همچنین نتیجه‌های حاصل از حل جریان در داخل اجکتور نشان می‌دهد که رفتار جریان در داخل اجکتور بسیار پیچیده است و وجود موج انبساطی اثر شدیدی روی توزیع فشار به ویژه در نزدیکی دیواره اجکتور دارد. برای تقریب کمیت‌های انتقالی از روش دوگانه بالا دست و حداقل شیب که دقت مضاعف دارد استفاده شده است. روش QUICK در داخل اجکتور ناپایداری تولید کرده و مانع از همگرایی کامل روش حل می‌شود ولی روش حداقل شیب به خوبی همگرا شده و رفتار موج انبساطی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: اجکتور، جریان تراکم‌پذیر، روش حجم محدود، روش SIMPLEC، رفتار شوک، ناپایداری، سیال لزج، سیال غیرلزج

KEY WORDS: Ejector, Compressible flow, Finite volume, SIMPLEC method, Shock behaviour, Instability, Viscous fluid, Inviscid fluid

مقدمه

که کاربردهای متفاوتی پیدا کند. برای نمونه می‌توان به جایگزینی اجکتور با کمپرسور در یک سیکل تبرید اشاره کرد [۴]. اجکتور از چهار قسمت عمده تشکیل شده که عبارت‌اند از: نازل

اجکتور یکی از دستگاه‌های مهم مورد استفاده در صنایع، به ویژه صنایع شیمیایی است که برای ایجاد خلاء و مخلوط کردن سیالات استفاده می‌شود. ویژگی‌های خاص اجکتور باعث می‌شود

⁺E-mail:omidkhah@modares.ac.ir

*عهد دار مکاتبات

روش‌های توانا برای حل این معادله‌هاست [۱۲] زیرا این روش نیم‌ضمنی بوده و نیاز به حافظه بسیار کمتری نسبت به روش‌های ضمنی دارد. در این روش ماتریس معادله‌های جبری، قطری هستند لذا روش حل ماتریس‌های سه قطری، زمان کامپیوتری مورد نیاز را بسیار کاهش می‌دهد و این یکی از بارزترین مزیت‌های روش SIMPLE است. در اینجا از روش SIMPLEC که یکی از روش‌های مبتنی بر روش SIMPLE است [۱۷] برای حل استفاده می‌شود.

معادله‌های حاکم بر جریان سیال

معادله‌های حاکم بر جریان سیال تراکم‌پذیر شامل بقای جرم، بقای ممتوم و بقای انرژی و معادله‌های حالت فشار و انرژی، در حالت کلی به صورت زیر است.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \Phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \right) + S_\Phi \quad (1)$$

که در آن Φ یک کمیت انتقالی عمومی بوده و با توجه به معادله مورد نظر می‌تواند شامل U و V و H و یا هر کمیت انتقالی باشد. Γ_Φ و S_Φ به ترتیب ضریب‌های نفوذ و چشمه هستند. این فرم معادله‌ها اغلب در روش حجم محدود استفاده می‌شود. به منظور ارتباط میان چگالی و فشار و دما، نیاز به یک معادله حالت است. معادله حالت گاز کامل به صورت زیر بیان می‌شود:

$$P = (\gamma - 1)\rho e \quad (2)$$

که در آن e انرژی داخلی گاز است.

انفصال معادله‌های حاکم

در روش حجم محدود برای گسسته‌سازی معادله‌های حاکم، از فرم بقایی معادله‌ها بر روی المان حجم، انتگرال‌گیری می‌شود. برای این کار شکل ۱ در نظر گرفته شده و شار عبوری از سطح به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$I_j = \rho u_j - \Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} \quad (3)$$

با انتگرال‌گیری از معادله کلی (۱) بر روی این حجم کنترل خواهیم داشت:

ابتدایی، محفظه اختلاط، دیفیوزر و قسمت تخلیه. نحوه عملکرد اجکتور به این صورت است که سیال با فشار بالا وارد نازل ابتدایی شده و هنگام عبور از نازل ابتدایی سرعت سیال به شدت افزایش پیدا می‌کند، در نتیجه فشار سیال به شدت کم شده و فشار داخل اجکتور نسبت به بیرون آن کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. این عمل باعث ایجاد خلاء شده و سیال از فرایند به محفظه اختلاط کشیده شده و با سیال داخل اجکتور مخلوط و با عبور از دیفیوزر و قسمت تخلیه از اجکتور خارج می‌شود.

نداشتن قسمت‌های متحرک و دستگاه‌های کنترل از مزیت‌های اصلی اجکتور، و مصرف انرژی زیاد و حساسیت شدید نسبت به شرایط خارج از طراحی، از معایب آن است. به منظور انجام محاسبه‌های لازم برای اجکتور از منحنی‌های تجربی که در دهه ۱۹۴۰ و ۱۹۵۰ تهیه شده، استفاده می‌شود [۱۸]. این منحنی‌ها براساس شرایط بخار ورودی و خلاء مورد نیاز و پارامترهای دیگر، اطلاعات کلی از اجکتور را ارائه می‌دهند. با توجه به حساسیت فوق‌العاده جریان نسبت به مشخصات هندسی، این اطلاعات برای ساخت اجکتور کافی نیست. در اینجا سعی بر این است که با استفاده از حل معادله‌های حاکم بر جریان در داخل هندسه اجکتور، درک بهتری از رفتار جریان به دست آید.

برای شبیه‌سازی جریان در داخل اجکتور، معادله‌های بقای جرم، ممتوم و انرژی باید در داخل هندسه اجکتور حل شوند. با توجه به شرایط فوق‌العاده متغیر و وجود رژیم‌های متفاوت زیر صوت، در حد صوت و بالای صوت، نیاز به روشی است که قابلیت حل جریان را برای تمام سرعت‌ها داشته و از دقت و نرخ‌همگرایی مناسب برخوردار باشد. برای حل معادله‌های جریان تراکم‌پذیر به طور معمول متغیر چگالی به عنوان متغیر اصلی استفاده می‌شود و فشار از معادله حالت به دست می‌آید [۱ و ۹].

این روش‌ها در عدد ماخ کم $Ma < 0.3$ به علت جزئی شدن تغییرهای چگالی دارای محدودیت بوده [۳] و به این دلیل نیاز به تدابیر ویژه‌ای از جمله استفاده از شبه تراکم دارند [۲]. روش استفاده از متغیر فشار برای حل جریان تراکم‌پذیر به صورت وسیعی مورد استفاده قرار گرفته و در حل جریان‌های بسیار پیچیده موفق بوده است [۱۶، ۱۱، ۲۶، ۵، ۳]. مزیت این دسته از روش‌ها در این است که تغییرهای فشار حتی در عددهای پایین در حدی است که خطای محاسباتی زیادی وارد سیستم نکند. بیشتر این روش‌ها از بسط و توسعه روش‌های به کار رفته برای جریان تراکم‌ناپذیر به دست می‌آیند. روش حل SIMPLE یکی از

فشار و مولفه های بردار سرعت به عنوان متغیر میدان حل استفاده می شود. در روش هایی که از متغیر فشار به عنوان متغیر اصلی برای حل میدان استفاده شود، اغلب مسأله تفکیک میدان فشار و سرعت وجود دارد [۱۲]. اگر معادله های ممتوم در جهت X و Y را به ترتیب معادله انتقال برای U و V در نظر بگیریم در این صورت معادله انتقالی برای P وجود ندارد و به علت ظاهر نشدن ترم فشار در معادله بقای جرم این امکان بالقوه وجود دارد که در معادله های جبری تفکیک شده میدان فشار از میدان سرعت تفکیک شود و میدان های سرعت و فشار غیرفیزیکی در آنها صدق کند و جواب های دندانهای ظاهر شود [۱۲]. برای حل مشکل تفکیک میدان فشار و سرعت، به طور معمول از شبکه جا به جا شده استفاده می شود [۱۲، ۶]. به کارگیری این روش در یک هندسه پیچیده بسیار مشکل است [۶]. یک ایده اساسی برای حل مشکل تفکیک میدان فشار، وارد کردن ترم فشار در معادله بقای جرم است. به این روش ها، روش های هم مکان گفته می شود. در اینجا از روش هم مکان Rhie-Chow [۱۳، ۱۴] استفاده می شود.

ایده اساسی در این روش آن است که با معلوم بودن میدان فشار معادله های ممتوم قابل حل هستند. در این روش میدان فشار P* حدس زده می شود و با استفاده از میدان فشار P* و حل معادله های ممتوم، میدان سرعت محاسبه می شود. از معادله بقای جرم طبق یک استراتژی، فشار محاسبه می شود و چون میدان سرعت از میدان فشار فرضی به دست آمده، در معادله بقای جرم صدق نخواهد کرد. لذا میدان فشار به دست آمده جایگزین میدان اولیه می شود و حل چندین بار تکرار می شود تا همگرایی حاصل شود.

برای توصیف روش SIMPLE فرض می کنیم P* فشار حدس زده شده باشد و از روی آن u* و v* مقدارهای سرعت محاسبه شده باشند. اگر P* با مقدار واقعی P به اندازه P' اختلاف داشته باشد با اعمال تصحیح در ترم فشار سرعت نیز به دنبال آن تصحیح خواهد شد. بنابراین، خواهیم داشت:

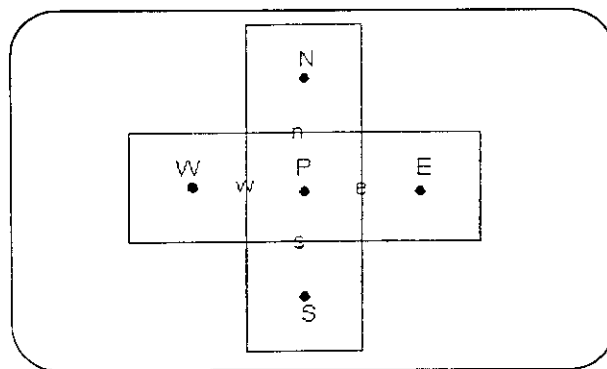
$$P = P^* + P' \quad (7)$$

$$u = u^* + u' \quad (8)$$

$$v = v^* + v' \quad (9)$$

برای ارتباط u' و v' با P' از فرم ساده شده معادله ممتوم به صورت زیر استفاده می کنیم [۱۲].

$$u' = \frac{\delta V}{a_p} \frac{\partial P'}{\partial x} \quad (10)$$



شکل ۱- المان حجم و علائم و نقاط اطراف آن

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \Phi dv + \int_A l \cdot dA = \int_V S_\Phi dv \quad (4)$$

بسط انتگرال بالا با توجه به شکل ۱ به صورت زیر خواهد شد:

$$\frac{(\Phi_p - \dot{\Phi}_p) \rho \delta V}{\delta t} + (l \cdot A)_e + (l \cdot A)_w + (l \cdot A)_n + (l \cdot A)_s = S_\Phi \delta V \quad (5)$$

که در آن بالا نویس ° نشانگر زمان قبل و زیرنویس های e, w, s, n نشانگر سطح های حجم کنترل و P نمایانگر مرکز المان حجم است با انجام تقریب های مناسب بر روی ترم های مختلف معادله بالا، در نهایت معادله های تفکیک شده را به صورت عمومی زیر می توان نوشت:

$$a_p \Phi_p = \sum a_{NB} \Phi_{NB} + S_c \quad (6)$$

که در آن a_p ضریب متغیر در مرکز المان و زیرنویس NB نمایانگر نقاط همسایه المان حجم است و S_c شامل تمام ترم های صریح است. برای به دست آوردن معادله بالا، باید تقریب های متفاوتی روی هر یک از ترم ها انجام داد که توضیح داده خواهد شد.

روش حل عددی

برای حل از روش SIMPLEC استفاده شده است. به منظور تشریح روند حل، ابتدا روش SIMPLE به دلیل سادگی توصیف و سپس روند حل SIMPLEC بیان خواهد شد.

معادله سیال تراکم ناپذیر را در نظر می گیریم. در سیالات تراکم ناپذیر معادله انرژی از معادله بقای ممتوم و جرم تفکیک می شود. برای حل جریان سیال تراکم ناپذیر، به طور معمول از

بیشتر محققین از ترم آخر که غیرخطی است صرف نظر کرده‌اند [۱۵] ما نیز با توجه به کوچک بودن و از بین رفتن آن در هنگام هم‌گرایی، از آن صرف نظر کردیم.

تقریب مقادارها روی وجوه حجم کنترل

در دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و به ویژه در روش‌های حجم محدود چگونگی برآورد مقادارها روی نقاط انتگرال‌گیری، تأثیر زیادی در پایداری و نرخ هم‌گرایی روش‌ها دارند. در این مطالعه برای تقریب چگالی از تقریب بالا دست استفاده شده که دقت تقریب بالا دست از مرتبه یک بوده و اتلاف آن زیاد است ولی پایداری خوبی دارد، به دلیل اینکه ترم تصحیح چگالی در هنگام هم‌گرایی به سمت صفر میل خواهد کرد. بنابراین، دقت میان‌یابی آن تأثیری در روی دقت جواب نهایی نخواهد داشت. به همین دلیل در اینجا از تقریب بالا دست استفاده شده است تا پایداری روش بهبود یابد.

برای چگالی از تقریب مرکزی و بالا دست استفاده شده است. روش بالا دست به دلیل اتلاف زیاد قادر به نشان دادن گرادین‌های شدید نیست. به منظور رفع این مشکل از تقریب مرکزی استفاده شده که دارای دقت مرتبه دو است. برای ترم‌های نفوذ از روش تقریب مرکزی استفاده شده و به دلیل فرم بیضوی معادله‌های نفوذ، استفاده از تقریب مرکزی به طور کامل با فیزیک آن تطابق دارد. در مورد ترم‌های جابجایی از روش‌های بالا دست و دو گانه بالا دست و QUICK و حداقل شیب استفاده شده است. نحوه تقریب ترم‌های جابجایی تأثیر زیادی در روی پایداری و دقت جواب‌های نهایی دارد که در نتیجه‌های به دست آمده اثرهای آنها به طور کامل مشهود است و در بررسی نتیجه‌ها به آن پرداخته خواهد شد. با توجه به هم‌مکان بودن شبکه محاسباتی مورد استفاده، برای جلوگیری از نوسان‌های فشار که در صورت عدم ارتباط میدان فشار و سرعت رخ می‌دهد از روش میان‌یابی Rhie-Chow [۱۳] برای تعیین سرعت در روی مرز سلول‌های محاسباتی استفاده شده است. این روش نه تنها مشکل تفکیک میدان فشار و سرعت را از بین می‌برد بلکه با افزودن مشتق چهارم فشار، باعث استهلاک نوسان‌های غیرفیزیکی می‌شود و پایداری روش را بهبود می‌بخشد.

$$v' = \frac{\delta V}{a_{\mu}} \frac{\partial P'}{\partial y} \quad (11)$$

اگر u و v در معادله بقای جرم جای گذاری و انتگرال‌گیری شود برای P' معادله‌ای به دست خواهد آمد و از حل آن P' محاسبه شده و سرعت‌ها تصحیح خواهند شد.

$$a_p P' = \sum a_{NB} P'_{NB} + S_C \quad (12)$$

بعد از محاسبه میدان سرعت، معادله انرژی حل خواهد شد.

تعمیم روش برای جریان تراکم‌پذیر

در جریان تراکم‌ناپذیر، چگالی ثابت است و میدان سرعت نیز از میدان انرژی جدا می‌شود و معادله تصحیح فشار، فرم بیضوی دارد. برای تعمیم روش به جریان تراکم‌پذیر باید ارتباط فشار و چگالی و دما را بیان و آن را در روش حل وارد کرد. با توجه به اینکه معادله‌های حاکم بر حرکت سیال تراکم‌پذیر فرم هذلولی دارند باید معادله تصحیح فشار فرم هذلولی پیدا کند تا انتشار فشار از مرزها به داخل میدان حل، با فیزیک حاکم بر جریان سازگار باشد. برای بیان معادله تصحیح فشار، شار جرمی روی یک سطح المان حجم در نظر گرفته می‌شود:

$$(\rho u) = (\rho^* + \rho')(u^* + u') = \rho^* u^* + \rho' u^* + \rho^* u' + \rho' u' \quad (13)$$

برای محاسبه ترم‌های معادله بالا باید ρ' را به p' مربوط کرد. برای این کار، روش کارکی (۱۹۸۸) به کار گرفته شده است:

$$\rho' = \frac{\partial \rho}{\partial p} p' = k p' \quad (14)$$

کارکی، برای محاسبه k جریان را آیزنتروپ فرض کرد. ولی در اینجا ما جریان را آنتالپی ثابت فرض کرده و با استفاده از معادله حالت خواهیم داشت:

$$k = \frac{1}{(\gamma - 1) \left(C_p T_0 - \frac{|V \cdot V|}{\gamma} \right)} \quad (15)$$

Cheng و Shyy نیز این روش را به کار برده‌اند [۱۵]. مقدار K تأثیری روی جواب نهایی ندارد زیرا با رسیدن به هم‌گرایی مقدار ترم تصحیح فشار، بسیار کوچک خواهد شد ولی مقدار k روی نرخ هم‌گرایی اثر گذار است. تصحیح فشار روی چگالی باعث می‌شود که معادله تصحیح فشار فرم هذلولی پیدا کند، که این با فرم معادله‌ها و با طبیعت معادله‌های حاکم سازگار است.

نمای کلی روش

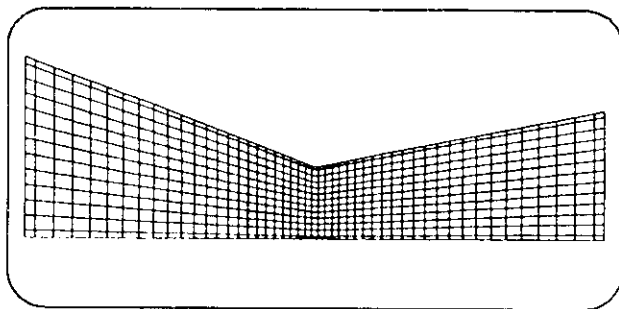
- ۱- میدان اولیه جریان حدس زده می شود و چگالی از معادله حالت به دست می آید.
- ۲- با توجه به میدان فشار و چگالی، معادله های سرعت حل می شوند و میدان سرعت محاسبه می شود.
- ۳- با استفاده از میدان سرعت به دست آمده، معادله تصحیح فشار حل می شود.
- ۴- با استفاده از ترم تصحیح فشار، ترم های سرعت و چگالی تصحیح می شوند.
- ۵- معادله انرژی و سایر معادله های انتقالی با استفاده از مقدارهای سرعت و فشار و چگالی حل می شوند.
- ۶- در صورت رسیدن به همگرایی، روند حل خاتمه یافته و در غیر این صورت مقدارهای جدید به عنوان حدس اولیه در نظر گرفته شده و روند محاسبات از مرحله یک ادامه پیدا می کند.

بررسی نتیجه ها

برای بررسی و مقایسه نتیجه های حاصل از روش عددی، از آن برای حل جریان در داخل یک نازل همگرا واگرا استفاده شد و نتیجه ها با برخی از منابع موجود مقایسه شدند. برای اجکتور، در منابع موجود موردی به منظور مقایسه پیدا نشد.

تحلیل جریان در داخل نازل

برای بررسی نتیجه های حاصل از روش عددی، جریان سیال تراکم پذیر در یک نازل همگرا واگرا حل شد. هندسه و شبکه بندی آن شبیه کار کارکی [۶] انتخاب شد. نتیجه های حاصل با کارهای کارکی و داده های تجربی ماسون [۱۰] مورد مقایسه قرار گرفت و از دو تقریب دوگانه بالا دست و QUICK برای مقایسه استفاده شد. شکل ۲ شبکه مورد استفاده برای نازل را نشان می دهد. در شکل های ۳ تا ۶ به ترتیب توزیع فشار در داخل نازل برای تقریب مرتبه اول دوگانه بالا دست و QUICK برای سیال لزج و غیرلزج نشان داده شده است. با دقت در اشکال بالا می توان مشاهده کرد که تقریب مرتبه اول قادر به نشان دادن موج انبساطی که بعد از گلوگاه نازل رخ می دهد نیست ولی تقریب QUICK به خوبی آنرا نشان می دهد. تقریب مرتبه اول به دلیل اتلاف زیاد، گرادیان های



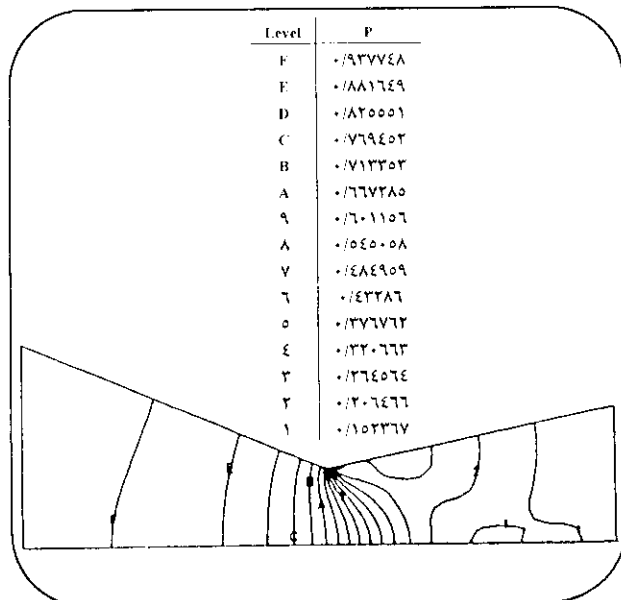
شکل ۲- شبکه مورد استفاده برای نازل

شدید را حذف می کند و به همین علت موج انبساطی را نشان نمی دهد. برای مقایسه دقیق نتیجه ها، توزیع فشار در مرکز و روی دیواره نازل برای سیال لزج و غیرلزج با کارهای کارکی [۶] و نتیجه های تجربی ماسون [۱۰] در شکل های ۷ تا ۱۰ مقایسه شده اند. مقایسه توزیع فشار در مرکز نازل نشان می دهد که برای سیال غیرلزج نتیجه ها برای هر دو روش دوگانه بالا دست و QUICK تقریباً نتیجه های یکسانی نشان می دهند ولی در سیال لزج برای روش QUICK در خروجی نازل یک انحنای مشاهده می شود و داده های تجربی تطابق بهتری با روش QUICK دارند. انحنای روش QUICK ناشی از وجود موج انبساطی است که روش های با دقت مرتبه اول قادر به نشان دادن آن نیستند ولی روش دوم QUICK به خوبی آنرا نشان می دهد. در شکل های ۸ و ۱۰ توزیع فشار در نزدیکی دیواره برای سیال لزج و غیرلزج رسم شده است. دقت در دو شکل مذکور نشان می دهد که گرادیان شدیدی در نزدیکی گلوگاه روی دیواره نازل وجود دارد و روش QUICK گرادیان تندی را نشان می دهد. مقایسه نتیجه ها نشان می دهد که روش QUICK تطابق بهتری با داده های تجربی به ویژه برای سیال لزج نشان می دهد. در یک نتیجه گیری کلی می توان گفت که روش QUICK نتیجه های بهتری به ویژه برای سیال لزج ارائه می دهد ولی برای سیال غیرلزج نتیجه ها زیاد متفاوت نیستند. با توجه به پایداری بسیار خوب روش دوگانه بالا دست، به نظر می رسد استفاده از آن برای جریان های ساده و سیالات غیرلزج بهتر بوده و روش های با دقت مرتبه دوم برای جریان سیال لزج و نشان دادن رفتار جریان در گرادیان های شدید مناسب تر است.

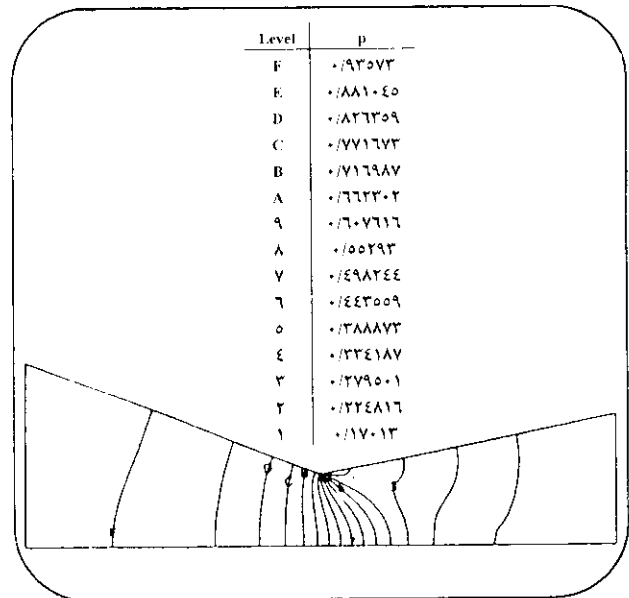
تحلیل جریان در داخل اجکتور

است. ورودی به اجکتور زیر صوت در نظر گرفته شده و دما و فشار سکون به عنوان مقدار مرزی در آن ثابت فرض شده است. نتیجه‌ها برای تقریب دوگانه بالا دست و روش حداقل شیب که دقت مرتبه دوم دارد ارائه شده است. تقریب QUICK در فضای اجکتور هم‌گرا نمی‌شد.

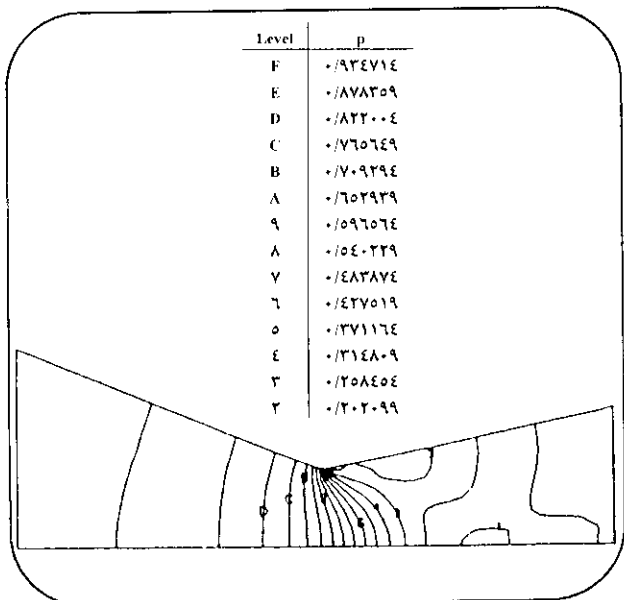
برای حل معادله‌های جریان در داخل اجکتور از شکل ساده‌ای از آن استفاده شده که شامل نازل ابتدایی، دیفیوزر و تخلیه است. شبکه مورد استفاده در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نازل ابتدایی شکل سهموی دارد واز محفظه اختلاط صرف نظر شده



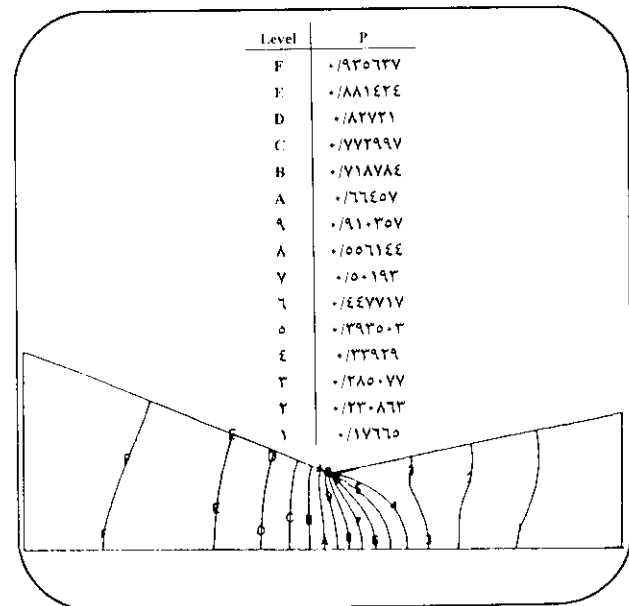
شکل ۴ - توزیع فشار در داخل نازل برای سیال غیرلزج و تقریب QUICK



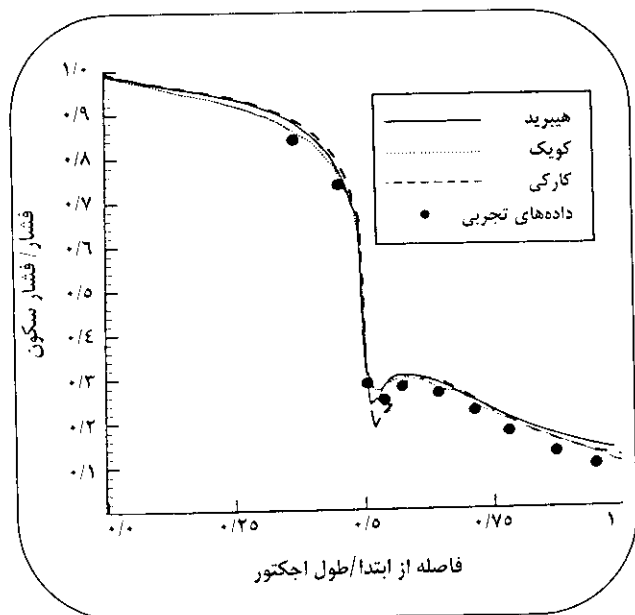
شکل ۳ - توزیع فشار در داخل نازل برای سیال غیرلزج و تقریب دوگانه بالا دست



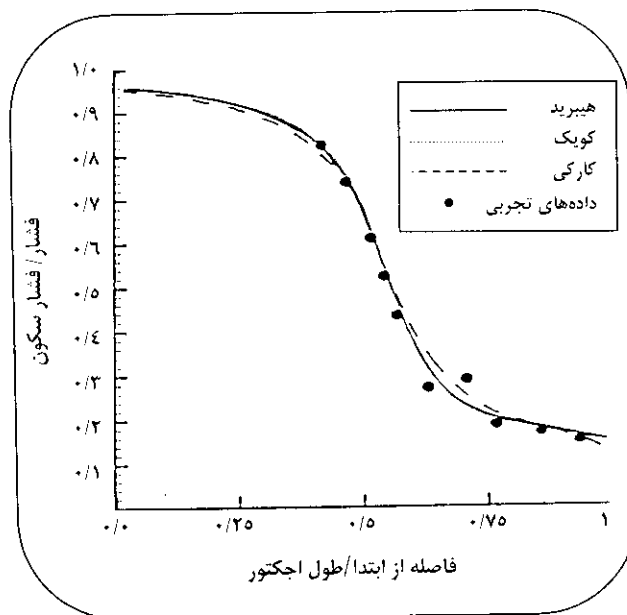
شکل ۶ - توزیع فشار در داخل نازل برای سیال لزج و تقریب QUICK



شکل ۵ - توزیع فشار در داخل نازل برای سیال لزج و تقریب دوگانه بالا دست



شکل ۸ - توزیع فشار در نزدیکی دیواره نازل برای سیال غیرلزج



شکل ۷ - توزیع فشار در خط مرکزی نازل برای سیال غیرلزج

نشان می دهد و نشان دهنده آن است که در عدد ماخ بیش از ۲/۵ نیز این روش به خوبی قادر به شبیه سازی جریان است. همچنین مشاهده می شود که در قسمت خروجی، کمی مقدار فشار زیاد و مقدار عدد ماخ کم شده است. این کاهش به دلیل انعکاس موج انبساطی است که در خروجی اجکتور روی خط مرکزی جریان رسیده و باعث افزایش فشار شده است. وجود موج انبساطی تأثیر شدیدی روی عملکرد اجکتور دارد زیرا بعد از نازل ابتدایی باید فشار کاهش یافته و ایجاد خلاء کند ولی موج انبساطی باعث افزایش فشار در نزدیکی دیواره می شود، به همین دلیل باید در ساخت اجکتور این اثر به دقت مد نظر قرار گیرد و ناحیه ورود سیال به درستی انتخاب شود.

بحث و نتیجه گیری

نتیجه های حاصل از به کارگیری روش عددی به خوبی نشان دهنده توانایی این روش در حل معادله های جریان است. این روش به خوبی رفتار جریان سیال را در سه رژیم زیر صوت، در حد صوت و مافوق صوت به صورت هم زمان مدل می کند. نتیجه ها نشانه دهنده آن است که به کارگیری تقریب های مرتبه اول و دوم برای سیال غیرلزج تفاوت زیادی با هم نشان نمی دهند بنابراین، با توجه به اینکه در سیالات غیرلزج ترم لزجت وجود ندارد و این ترم

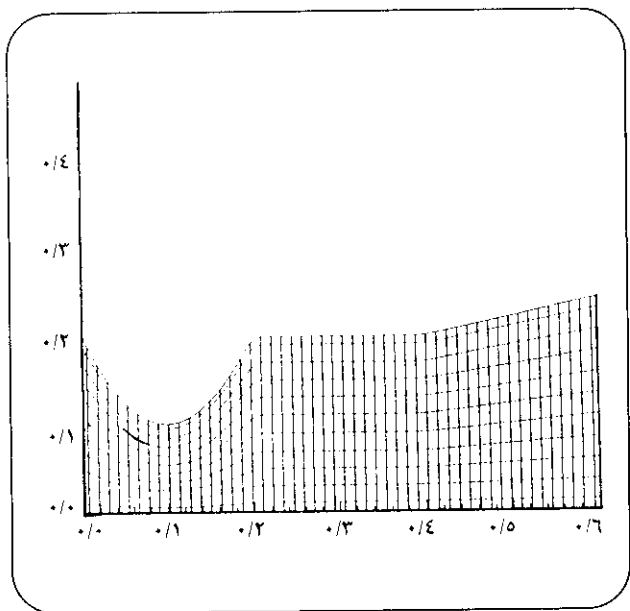
در شکل ۱۲ توزیع فشار برای سیال لزج با تقریب دوگانه بالا دست نشان داده شده است. مشاهده می شود که بیشترین تغییرها در گلوگاه نازل اتفاق می افتد و در ناحیه اتصال نازل و دیفیوزر یک موج انبساطی وجود دارد. اثر موج انبساطی فقط در ناحیه مجاور آن بروز کرده و اثر آن در ناحیه دور از آن، مستهلک شده است که این امر به دلیل اتلاف زیاد روش دوگانه بالا دست می باشد. در شکل ۱۳ توزیع فشار در داخل اجکتور با استفاده از تقریب حداقل شیب نشان داده شده است. مشاهده می شود که این روش به خوبی انعکاس موج انبساطی را در طول اجکتور نشان می دهد. برای درک بهتری از توزیع فشار در داخل میدان حل، توزیع فشار در روی دیواره و مرکز اجکتور رسم می شود که در شکل ۱۴ این توزیع نشان داده شده است. همان گونه که دیده می شود بعد از نازل، موج انبساطی باعث افزایش شدید فشار در نزدیکی دیواره شده و اثر آن در امتداد اجکتور مستهلک می شود.

این در حالی است که موج انبساطی هیچ اثری روی توزیع فشار در خط مرکزی نگذاشته است. در شکل ۱۵ توزیع فشار در نزدیکی دیواره اجکتور برای تقریب حداقل شیب رسم شده است. مشاهده می شود که شدت موج انبساطی ضعیف تر از روش دوگانه بالا دست است ولی اثر موج انبساطی در طول اجکتور باقی مانده است. همچنین مشاهده می شود که این روش گرادیان شدیدتری را نشان می دهد. شکل ۱۶ توزیع فشار و ماخ را در مرکز اجکتور

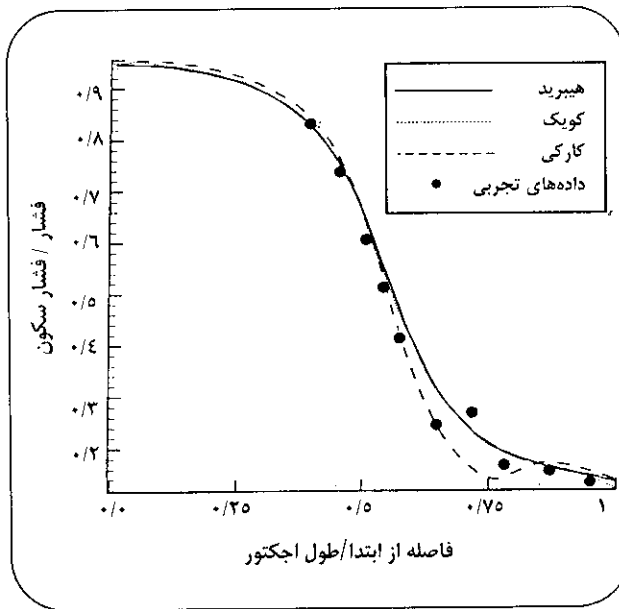
حاکمی از آن است که جریان در داخل اجکتور بسیار پیچیده بوده و هندسه اجکتور تأثیر شدیدی روی رفتار جریان و در نتیجه کارکرد اجکتور دارد و در ساخت اجکتور باید این مورد مد نظر قرار گیرد.

تاریخ دریافت: ۷۹/۱۱/۵، تاریخ پذیرش: ۸۱/۳/۲۰

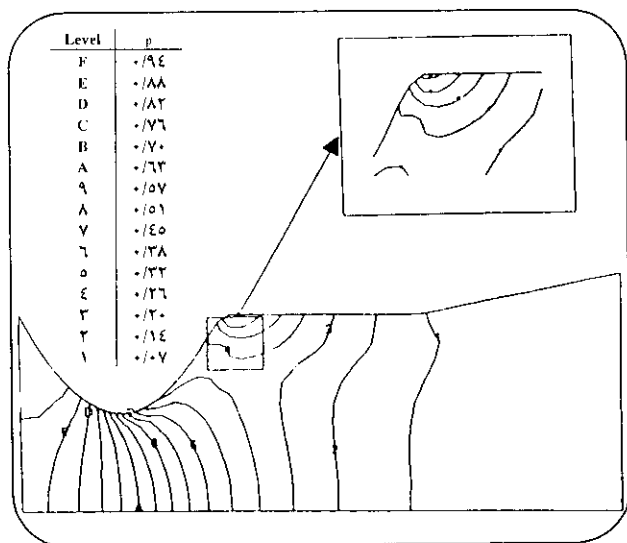
طبیعت بیضوی داشته و باعث استهلاك نوسانات غیرفیزیکی می شود پس بهتر است که از تقریب‌های مرتبه اول که پایداری بهتری دارند استفاده کرد. نتیجه‌های حاصل برای تقریب‌های مرتبه اول و دوم برای سیال لزج نشان می دهد که نتیجه‌ها کمی متفاوت بوده و روش‌های مرتبه اول قادر به مدل کردن رفتار پیچیده در نزدیکی گرادین‌های شدید نیستند. نتیجه‌های حاصل



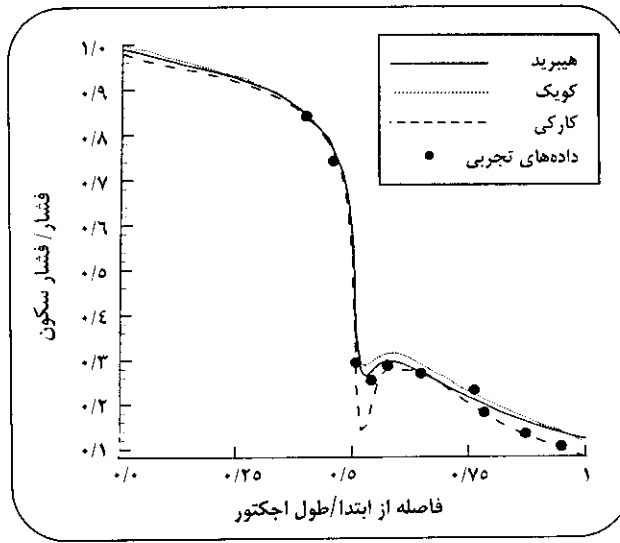
شکل ۱۱ - شبکه مورد استفاده برای اجکتور



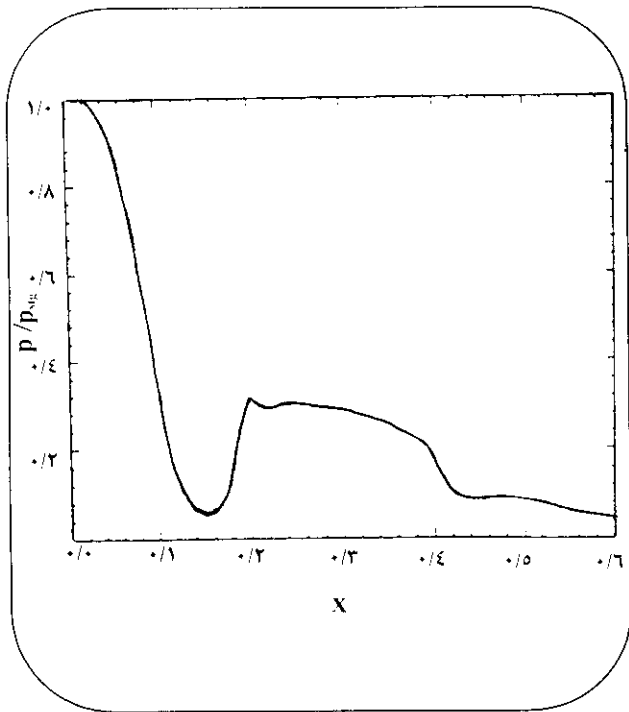
شکل ۹ - توزیع فشار در خط مرکزی نازل برای سیال لزج



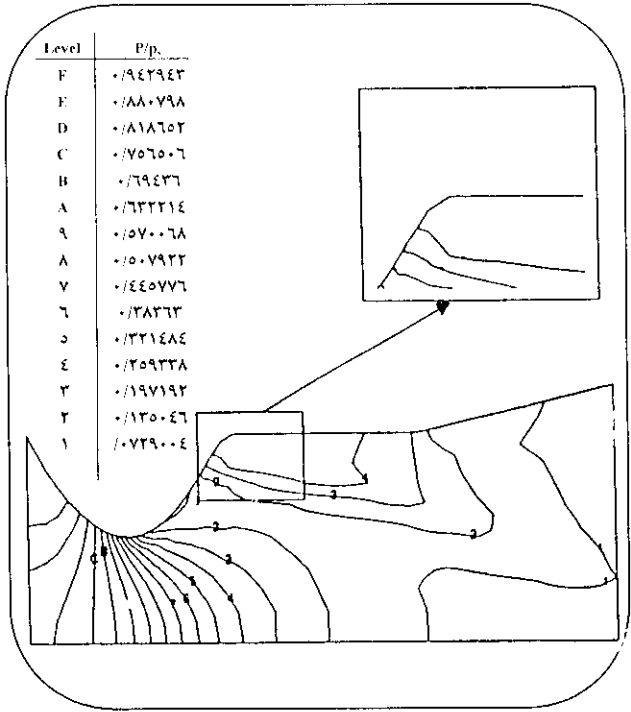
شکل ۱۲ - توزیع فشار در داخل اجکتور برای سیال لزج و تقریب دوگانه بالا دست



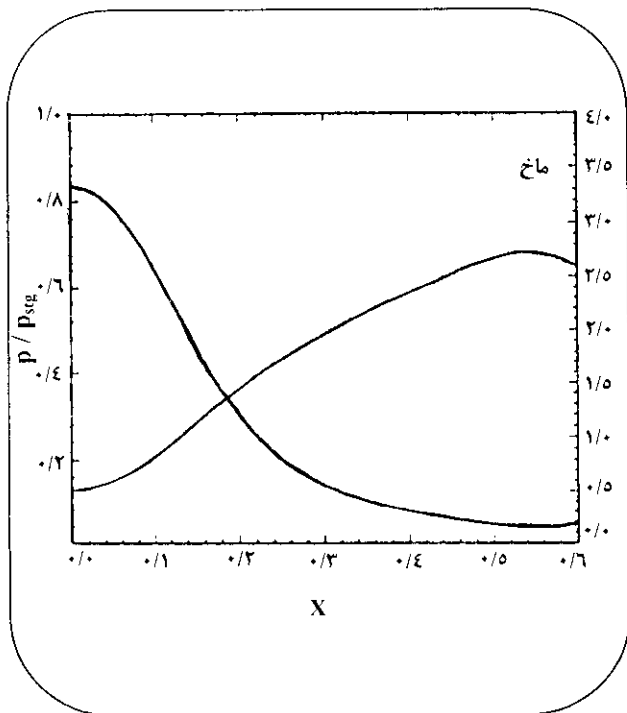
شکل ۱۰ - توزیع فشار در نزدیکی دیواره نازل برای سیال لزج



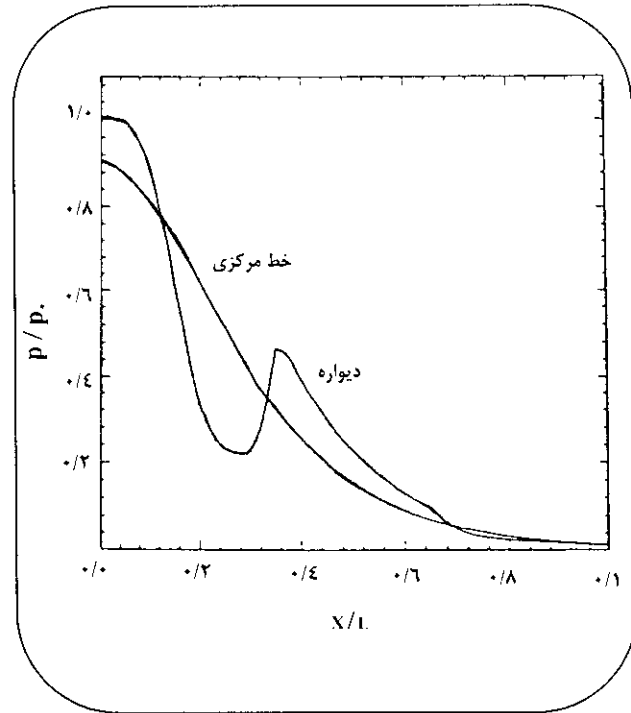
شکل ۱۵- توزیع فشار در نزدیکی دیواره اجکتور برای سیال لزج و تقریب حداقل شیب



شکل ۱۳- توزیع فشار در داخل اجکتور برای سیال لزج و تقریب حداقل شیب



شکل ۱۶- توزیع فشار و ماخ در خط مرکزی اجکتور برای سیال لزج و تقریب حداقل شیب



شکل ۱۴- توزیع فشار در خط مرکزی و در نزدیکی دیواره اجکتور برای سیال لزج و تقریب دوگانه بالادست

مراجع

- [1] Beam, R.M. and Warming, R.F., An Implicit Factored Scheme for the Compressible Flow, *AIAA Journal*, **16** (4), 393 (1978).
- [2] Chang, J.W.C. and Kwak, D., On the Method of Pseudo Compressibility for Numerical Solving Incompressible Flows, *AIAA Journal*, **84** – 0252 Jan., (1984).
- [3] Delaney, M. and Essers, J.A., Quadratic Reconstruction Finite Volume Scheme for Compressible Flow on Unstructured Flows on Unstructured Adaptive Grids, *AIAA Journal*, **35** (4), 631 (1997).
- [4] Da-Wen, S., Variable Geometry Ejectors and Their Applications in Ejector Refrigeration Systems, *Energy*, **21** (10), 919 (1996).
- [5] Greyventein. G.P. and Meyer. J.P., Differencing in Compressible Flow for a Pressure – Based Approach , *AIAA Journal*, **32**(2), 659 (1993).
- [6] Karki, K.C. and Patankar, S.V., Pressure - Based Calculation Procedure for Viscous Flows at all Speeds in Arbitrary Configurations, *AIAA Journal*, **27**(9), 1167 (1989).
- [7] Karamian, S.M.H. and Schneider, G.E., Pressure – Based Control Volume Finite Element Method for Flow at all Speeds, *AIAA Journal*, **33** (9) , 1611 (1995).
- [8] Leonard, B.P., A Stable and Accurate Convective Modeling Procedure Based on Quadratic Upstream Interpolation, *Computer Method in Applied Mechanics and Engineering*, **19**, 59(1979).
- [9] Mac Cormack, R.W., A Numerical Method for Solving the Equations of Compressible Viscous Flow, *AIAA Journal*, **20** (9), (1982).
- [10] Mason, M.L. and Putuam, L.E., The Effect of Throat Contouring on Two – Dimensional Converging – Diverging Nozzles at Static Conditions, *NASA TP 1704*, (1980).
- [11] Mc Gurik, J.J. and Page, G.J., Shock Capturing Using a Pressure – Correction Method, *AIAA Journal*, **28** (10), 1751 (1989).
- [12] Patankar, S.V. and Spalding, D.B., A Calculation Procedure Heat, Mass and Momentum Transfer in Three – Dimensional Parabolic Flows, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **15**, 1787, (1972).
- [13] Rhie, C.M. and Chow, W.L., Study of the Turbulent Flow Pass on Airfoil with Trailing Edge Separation, *AIAA Journal*, **21** (11), 1525 (1983).
- [14] Rhie, C.M., Pressure Based Navier – Stokes Solvers Using Multi-grid Method, *AIAA Journal*, **27** (8), 1017 (1987).

- [15] Shyy, W. and Chen, M.H., Pressure –Based Algorithm for Flow at All Speeds, *AIAA Journal*, **30** (11), 2660 (1992).
- [16] Tamamidis, P. and Assanis, D.N., Predict of Three – Dimensional Steady Incompressible Flows Using Body – Fitted Coordinates, *J. of Fluid Engineering*, **28** (10), 1851 (1989).
- [17] Van Doormole, J.P. and Raithy, G.D., Enhancement of the Simple Method for Predicting Incompressible Fluid Flows, *Numerical Heat Transfer*, **7**, 147 (1984)
- [18] Walas, S.M., Chemical Process Equipment Selection and Design Butter Worth Heinemann, (1990).