

# SID



سرویس های ویژه



سرویس ترجمه تخصصی



کارگاه های آموزشی



بلاگ مرکز اطلاعات علمی



عضویت در خبرنامه



فیلم های آموزشی

## کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی



کارگاه آنلاین آشنایی با پایگاه های اطلاعات علمی بین المللی و ترند های جستجو



مباحث پیشرفته یادگیری عمیق؛ شبکه های توجه گرافی (Graph Attention Networks)



کارگاه آنلاین مقاله نویسی IEEE و ISI ویژه فنی و مهندسی

# شبیه‌سازی عددی جریان سه‌بعدی مافوق صوت لزج حول هندسه‌های پیچیده با استفاده از روش چندناحیه‌ای

محمد مهدی رشیدی\* و وحید اصفهانیان\*

دانشگاه بوعلی سینا - دانشکده مهندسی

## چکیده

در این مقاله از روش TVD (که قابلیت خوبی برای تسخیر شوک دارد) برای حل عددی جریان سه‌بعدی و مافوق صوت لزج استفاده شده است. معادلات مورد استفاده معادلات ناویر-استوکس لایه-نازک هستند، این معادلات دارای دقت بسیار خوبی هستند و در اعداد رینولدز بالا اعتبار دارند. از آنجا که حل عددی میدان جریان سه‌بعدی مستلزم استفاده از تعداد نقاط زیادی است، با استفاده از کامپیوتر شخصی نمی‌توان این کار را انجام داد. در این تحقیق میدان جریان به چند ناحیه تقسیم شده است تا بتوان حل عددی هندسه‌های سه‌بعدی را توسط کامپیوتر شخصی میسر نمود.

کلمات کلیدی: روش چند ناحیه‌ای - معادلات ناویر-استوکس لایه نازک - روش کاهش تغییرات کل<sup>۱</sup>

## مقدمه

در هندسه‌های پیچیده تولید شبکه با سازمان یکپارچه بسیار مشکل و بعضاً غیرممکن است. یکی از روشهای غلبه بر این مشکل استفاده از روشهای تولید شبکه بی‌سازمان<sup>۲</sup> می‌باشد [۱-۲]. روش دیگری که برای تولید شبکه و حل عددی میدان‌های پیچیده بکار می‌رود تجزیه میدان حل به چند ناحیه<sup>۳</sup> [۳] و یا چند بلوک<sup>۴</sup> [۴] می‌باشد. مزیتی که روشهای چندناحیه‌ای و چند بلوکی بر روش اول (استفاده از روش تولید شبکه بی‌سازمان) دارند، این است که با تقسیم میدان جریان به چند قسمت تعداد نقاط مورد استفاده در حل عددی کاهش می‌یابد، این عامل باعث می‌شود که بتوان میدان‌های جریان دارای ابعاد بزرگ را تحلیل عددی نمود. علاوه بر این استفاده از روش فوق باعث کاهش زمان حل خواهد شد [۵].

\* استادیار، دانشگاه بوعلی سینا، دانشکده مهندسی

\* دانشیار، دانشگاه تهران، دانشکده فنی

<sup>۱</sup> Total variation diminishing (TVD)

<sup>۲</sup> Unstructured grid

<sup>۳</sup> Multi zone

<sup>۴</sup> Multi block

در روشهای فوق اعمال شرایط مرزی در ناحیهٔ جدایش بین نواحی از اهمیت بسزایی برخوردار است، یکی دیگر از مزایای روشهای فوق این است که با توجه به فیزیک حاکم می‌توان در هر ناحیه از حل‌کننده‌های مختلف استفاده نمود. به‌عنوان مثال در نواحی دارای شوک می‌توان از روش‌های بالادست و در نواحی فاقد شوک (و یا دارای شوک‌های ضعیف) از روشهای مرکزی استفاده نمود. اینکار باعث می‌شود که دقت تسخیر شوک افزایش یافته و زمان حل عددی نیز کاهش یابد.

در روش بکار رفته در این تحقیق ابتدا با توجه به ملاحظات فیزیکی و عددی حاکم بر مسئله، میدان حل به چند قسمت تقسیم شده و هر ناحیه به‌صورت مجزا حل می‌شود. انتخاب محل مناسب مرزها از اهمیت بسزایی برخوردار است و باید دقت کافی در این خصوص مبذول شود. مقادیر مرزی مورد استفاده برای ناحیهٔ بعدی با استفاده از میان‌یابی قابل محاسبه می‌باشد. برای میان‌یابی مقادیر می‌توان از روشهای بقایی<sup>6</sup> و غیر بقایی<sup>7</sup> استفاده نمود. در این تحقیق از روش غیر بقایی برای میان‌یابی مقادیر در مرزهای مشترک استفاده شده‌است.

پدیده شوک در جریان مافوق صوت دارای اهمیت زیادی است، در عین حال بسیاری از روشهای عددی مورد استفاده در نزدیکی شوک رفتار خوبی از خود نشان نمی‌دهند و دچار نوسان (و یا ناپایداریهای غیرخطی) می‌شوند. دو روش کلی برای جلوگیری از نقایص فوق و یا کاهش آنها وجود دارد، استفاده از جملات اتلاف عددی مصنوعی و استفاده از ماهیت بالادست بودن. در این تحقیق از روشهای بالادست TVD [۶-۷]، استفاده شده‌است.

## معادلات و روابط حاکم

معادلات ناویر-استوکس لایه-نازک برای حالت سه‌بعدی به‌فرم بقایی در مختصات محاسباتی به‌صورت زیر نوشته

می‌شوند:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial \xi} + \frac{\partial G}{\partial \eta} + \frac{\partial H}{\partial \zeta} = \frac{1}{Re} \frac{\partial S}{\partial \eta} \quad (1)$$

$$U = J^{-1} \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ E \end{bmatrix}, \quad F = J^{-1} \begin{bmatrix} \rho U \\ \rho u U + \xi_x p \\ \rho v U + \xi_y p \\ \rho w U + \xi_z p \\ (E + p)U \end{bmatrix}, \quad G = J^{-1} \begin{bmatrix} \rho V \\ \rho u V + \eta_x p \\ \rho v V + \eta_y p \\ \rho w V + \eta_z p \\ (E + p)V \end{bmatrix}, \quad H = J^{-1} \begin{bmatrix} \rho W \\ \rho u W + \zeta_x p \\ \rho v W + \zeta_y p \\ \rho w W + \zeta_z p \\ (E + p)W \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

$$S = \frac{\mu}{J} \begin{bmatrix} 0 \\ m_1 u_\eta + \frac{1}{3} m_2 \eta_x \\ m_1 v_\eta + \frac{1}{3} m_2 \eta_y \\ m_1 w_\eta + \frac{1}{3} m_2 \eta_z \\ m_1 m_3 + \frac{1}{2} (\eta_x u + \eta_y v + \eta_z w) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$m_1 = \eta_x^2 + \eta_y^2 + \eta_z^2 \quad (7)$$

$$(8)$$

<sup>5</sup> Solvers

<sup>6</sup> Conservative

<sup>7</sup> Nonconservative

$$m_2 = \eta_x u_\eta + \eta_y v_\eta + \eta_z w_\eta$$

$$m_3 = \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2)_\eta + \text{Pr}^{-1}(\gamma - 1)(e^2)_\eta \quad (9)$$

این معادلات تقریب بسیار مناسبی از معادلات کامل ناویر-استوکس هستند که با حذف عبارتهای لزج در امتداد جریان به دست می آید. این معادلات در اعداد رینولدز بالا اعتبار دارند و به دلیل متغیر بودن فشار در داخل لایه مرزی قابلیت حل میدان دارای جدایش و جریان معکوس توسط آنها وجود دارد.

در صورتی که معادلات فوق با استفاده از روش بقایی منفصل شوند، می توان با کمک آنها جریان دارای شوک را تحلیل نموده و مشخصات شوک را بدست آورد. از آنجا که عبارتهای لزج ظاهر شده در معادلات فوق دارای ماهیت پخشی هستند، برای انفصال عددی آنها می توان از روش مرکزی استفاده نمود. انفصال عددی ترمهای جابجایی در معادلات ناویر-استوکس (بویژه در مسائل دارای شوک) همواره با مشکلاتی توأم می باشد. در این تحقیق برای رفع مشکل فوق، جهت انفصال عبارتهای جابجایی از روش بالادست استفاده شده است.

در روش TVD متغیرها توسط رابطه زیر متوسط گیری وزنی می شوند:

$$R_{i+\frac{1}{2},j,k} = \sqrt{\frac{\rho_{i+1,j,k}}{\rho_{i,j,k}}} \quad (10)$$

$$S_{i+\frac{1}{2},j,k} = \frac{R_{i+\frac{1}{2},j,k} S_{i+1,j,k} + S_{i,j,k}}{1 + R_{i+\frac{1}{2},j,k}} \quad (11)$$

پارامتر S می تواند با مقادیر سرعت و انتالپی جایگزین شود. سرعت صوت (در مختصات کارتزین) از رابطه زیر به دست می آید:

$$c_{i+\frac{1}{2},j,k} = \sqrt{(\gamma - 1) \left( h_{i+\frac{1}{2},j,k} - \frac{u_{i+1/2,j,k}^2 + v_{i+1/2,j,k}^2 + w_{i+1/2,j,k}^2}{2} \right)} \quad (12)$$

بردار شار غیرلزج مورد استفاده در روش عددی با استفاده از رابطه زیر به دست آمده است:

$$\overline{F}_{i+\frac{1}{2},j,k} = \frac{1}{2}(F_{i,j,k} + F_{i+1,j,k}) - \frac{1}{2} \sum_k R_{i+\frac{1}{2},j,k} \left| \lambda_{i+\frac{1}{2},j,k} \right| R_{i+\frac{1}{2},j,k}^{-1} (U_{i+1,j,k} - U_{i,j,k}) \quad (13)$$

ماتریس R در رابطه فوق ماتریس راست بردار ویژه ماتریس ژاکوبین مربوط به بردار غیرلزج F می باشد.  $\lambda$  نشاندهنده مقدار ویژه ماتریس ژاکوبین بردار شار می باشد. برای حل به روش ضمنی معادله فوق خطی سازی شده است. جهت اعمال شرط آنتروپی رابطه زیر مورد استفاده قرار گرفته است:

$$\lambda(x) = \begin{cases} |x| & |x| \geq \varepsilon \\ \frac{x^2 + \varepsilon^2}{2\varepsilon} & |x| < \varepsilon \end{cases} \quad (14)$$

مقدار  $\varepsilon$  می تواند در محدوده زیر  $0.02 \leq \varepsilon \leq 0.25$  تغییر کند. تابع آنتروپی فوق از ناپایداری حل عددی جلوگیری می نماید. ذکر این نکته حائز اهمیت است که تابع فوق مقداری لزجت عددی به حل اعمال خواهد نمود. در جریانهای با عدد ماخ خیلی زیاد (جریان ماوراء صوت<sup>8</sup>) تابع فوق باید اصلاح شود. برای اصلاح تابع فوق در جریانهای ماوراء صوت از بردارهای پادوردای سرعت<sup>9</sup> و سرعت صوت استفاده می شود.

<sup>8</sup> Hypersonic

<sup>9</sup> Contravariant velocities

## روش حل عددی

روش اختلاف محدود بکار رفته، یک الگوریتم فاکتورگیری شده تقریبی، ضمنی، غیر تکراری و به شکل دلتا می باشد. فرمولاسیون روش عددی بکار رفته برای حالت غیر لزج به صورت زیر است:  
 جاروب در جهت  $\xi$ :

$$\left[ I + \Delta t \Lambda_{i+\frac{1}{2},j,k}^{\xi} - \Delta t \Lambda_{i-\frac{1}{2},j,k}^{\xi} \right] \Delta U^{**} = -\Delta t \left[ \bar{F}_{i+\frac{1}{2},j,k} - \bar{F}_{i-\frac{1}{2},j,k} + \bar{G}_{i,j+\frac{1}{2},k} - \bar{G}_{i,j-\frac{1}{2},k} \right] - \Delta t \left[ \bar{H}_{i,j,k+\frac{1}{2}} - \bar{H}_{i,j,k-\frac{1}{2}} - \frac{1}{\text{Re}} \frac{S_{i,j+1,k} - S_{i,j-1,k}}{2} \right] \quad (15)$$

جاروب در جهت  $\eta$ :

$$\left[ I + \Delta t \Lambda_{i,j+\frac{1}{2},k}^{\eta} - \Delta t \Lambda_{i,j-\frac{1}{2},k}^{\eta} \right] \Delta U^* = \Delta U^{**} \quad (16)$$

جاروب در جهت  $\zeta$ :

$$\left[ I + \Delta t \Lambda_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{\zeta} - \Delta t \Lambda_{i,j,k-\frac{1}{2}}^{\zeta} \right] \Delta U = \Delta U^* \quad (17)$$

بردار جواب از رابطه زیر به دست می آید:

$$U^{n+1} = U^n + \Delta U \quad (18)$$

در روابط فوق از اپراتورها و توابع زیر استفاده شده است:

$$\Lambda_{i+\frac{1}{2},j,k}^{\xi} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} A_{i+1,j,k} + R_{i+\frac{1}{2},j,k}^{\xi} & \lambda_{i+\frac{1}{2},j,k}^{\xi} & R_{i+\frac{1}{2},j,k}^{-1\xi} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\Lambda_{i,j+\frac{1}{2},k}^{\eta} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} B_{i,j+1,k} + R_{i,j+\frac{1}{2},k}^{\eta} & \lambda_{i,j+\frac{1}{2},k}^{\eta} & R_{i,j+\frac{1}{2},k}^{-1\eta} \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\Lambda_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{\zeta} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} C_{i,j,k+1} + R_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{\zeta} & \lambda_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{\zeta} & R_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{-1\zeta} \end{bmatrix} \quad (21)$$

عبارتهای اول داخل براکتها نشاندهنده ماتریسهای ژاکوبین بردارهای شار  $F, G, H$  می باشند. برای محاسبات حالت

دائم می توان از روابط زیر استفاده نمود:

$$\Lambda_{i+\frac{1}{2},j,k}^{\xi} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} A_{i+1,j,k} + \lambda_{i+\frac{1}{2},j,k}^{\xi} & I \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\Lambda_{i,j+\frac{1}{2},k}^{\eta} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} B_{i,j+1,k} + \lambda_{i,j+\frac{1}{2},k}^{\eta} & I \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\Lambda_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{\zeta} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} C_{i,j,k+1} + \lambda_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{\zeta} & I \end{bmatrix} \quad (24)$$

استفاده از معادلات (۲۲-۲۴) به جای معادلات (۱۹-۲۱) در محاسبات حالت دائم می تواند زمان محاسبات را به طرز

محسوسی کاهش دهد (بخاطر عملیات ریاضی کمتر) [۸].

## اعمال شرایط مرزی و شرایط اولیه

شرط مرزی روی جسم به دلیل لزج بودن سیال شرط عدم لغزش می‌باشد، گرادیان عمودی فشار روی سطح برابر صفر در نظر گرفته شده‌است، به دلیل آدیاباتیک بودن، گرادیان عمودی دمای روی سطح نیز برابر صفر فرض شده‌است. در مرز سمت چپ از شرط تکیدگی استفاده شده‌است، شرط مرزی بالایی شرط جریان آزاد می‌باشد و در خروجی نیز از بیرون‌یابی استفاده شده‌است. از آنجا که برای اعمال شرایط مرزی میان‌یابی غیربقایی مورد استفاده قرار گرفته‌است، نیازی به استفاده از قانون بقای حاکم بر مسئله نیست. البته ممکن است با استفاده از روشهای بقایی دقت حل در نواحی مرزی (و در نتیجه در کل میدان) افزایش یابد، که باید این مسئله را مورد بررسی دقیق‌تری قرار داد.

با استفاده از معادلات آیزونتروییک توزیع اولیه‌ای برای کمیت‌های فشار، چگالی و سرعت به‌عنوان مقادیر اولیه برای اولین ناحیه به‌دست آمده‌است. برای جریان لزج، توزیع خطی در درون لایه مرزی برای مقادیر سرعت در نظر گرفته شده‌است. مقادیر اولیه نواحی بعدی (نواحی دوم و بعد از آن) با استفاده از میان‌یابی مقادیر همگرا شده ناحیه قبلی بدست آمده است. از آنجا که در روش چند ناحیه‌ای حل ناحیه قبلی به‌صورت کامل همگرا شده‌است، شرایط اولیه بدست آمده توسط این روش به حل نهایی نزدیک (و بعضاً بسیار نزدیک) می‌باشد. این موضوع موجب می‌شود که اولاً تعداد تکرار برای رسیدن به جواب نهایی کاهش یابد و ثانیاً همگرایی حل عددی تا حد زیادی تضمین شود. زیرا در حالت تئوری شرایط اولیه می‌توانند به‌صورت دلخواه انتخاب شوند، ولی در عمل شرایط اولیه نامناسب تعداد تکرار را برای همگرایی تا حد بسیار زیادی افزایش می‌دهد و ممکن است مانع از رسیدن حل به جواب نهایی شوند. در بعضی از اجراها مشاهده شده‌است که میان‌یابی شرایط اولیه با استفاده از اطلاعات ناحیه قبلی (به‌جای استفاده از روش معمول برای بدست آوردن شرایط اولیه) تعداد تکرار را تا حد نصف (و گاهی بیشتر از نصف) کاهش داده است.

## بررسی نتایج عددی

در شکل ۱ شکل هندسی مورد استفاده برای حل عددی نشان داده شده است، اعداد ماخ و رینولدز برابر ۳ و  $2/13 \times 10^7$  می‌باشد. به دلیل مغشوش بودن جریان از مدل جبری بالدوین لومکس استفاده شده‌است. برای حل این هندسه هشت ناحیه مورد استفاده قرار گرفته‌است، مزیت دیگر روش بکار رفته نسبت به روشهای معمولی این است که می‌توان بر حسب ضرورت از حل کننده‌های مختلف استفاده نمود، در عین حال از آنجا که در نواحی بعدی (نواحی دوم به بعد) از اطلاعات همگرا شده ناحیه قبلی استفاده می‌شود (و مقادیر فوق به حل نهایی در این ناحیه نزدیک می‌باشند)، دلیل مناسب بودن شرایط اولیه زمان حل عددی کاهش خواهد یافت [۹]. برای تولید شبکه می‌توان از روش جبری یا بیضوی استفاده نمود. در جدول ۱ مشخصات شبکه هندسی بکار رفته ارائه شده‌است.

در شکل‌های ۲ و ۳ توزیع فشار روی سطح در جهت‌های روبه‌باد و پشت‌به‌باد در زوایای حمله  $6/34$  و  $10/4$  درجه ارائه شده و نتایج به‌دست آمده با نتایج تجربی و عددی [۱۱-۱۰] مقایسه شده‌اند. در شکل ۴ مشاهده می‌شود که تطابق خوبی بین ضریب نیروی عمودی بر حسب زاویه حمله که توسط روش TVD بدست آمده، با نتایج تجربی وجود دارد. در شکل‌های ۵ و ۶ خطوط فشار ثابت و ماخ ثابت آمده‌است. همانگونه که مشاهده می‌شود هیچگونه نوسانی در منحنی‌های ترسیم شده وجود ندارد و روش عددی توانسته است شوک را بخوبی تسخیر نماید. با مقایسه نتایج حل عددی با روش بیم-وارمینگ<sup>۱۰</sup> (که یکی از روشهای تفاضل محدود مرکزی است) مشاهده شده‌است که شکل شوک تسخیر شده دارای دقت بالاتری است [۱۲]. ذکر این نکته ضروری است که روش فوق نسبت به روش بیم-وارمینگ دارای زمان محاسباتی بیشتری می‌باشد. در شکل‌های فوق نواحی مورد استفاده به‌وضوح نشان داده شده‌اند.

<sup>10</sup> Beam & Warming

به‌منظور نشان دادن قابلیت نرم افزار تدوین شده، اجرای عددی برای هندسه یک موشک (شکل ۷) در جریان مافوق صوت انجام شده‌است. اعداد رینولدز، ماخ و زاویه حمله برابر  $10^7 \times 1/3$ ،  $2/0.1$  و  $12/41$  می‌باشند. در شکل ۸ شبکه سطحی تولید شده در اطراف موشک ارائه شده‌است. شایان ذکر است که در قسمت میانی موشک تمام نقاط بکار رفته در جهت طولی نشان داده نشده‌اند تا از وضوح شکل کاسته نشود. شکل ۹ مقطع عرضی شبکه تولید شده در اطراف بالک موشک را نشان می‌دهد. در شکل ۱۰ توزیع فشار اطراف بالک و در شکل ۱۱ توزیع فشار پشت به‌باد و روبه‌باد بدست آمده از حل عددی ارائه شده‌است.

## بحث و نتیجه‌گیری

با مقایسه منحنیهای فشار و ماخ (شکل‌های ۵ و ۶) مشاهده می‌شود که روش بکار رفته در این تحقیق دارای قدرت تفکیک بسیار خوبی در ناحیه شوک می‌باشد و از ایجاد نوسانات ناخواسته و غیرفیزیکی جلوگیری می‌کند. همانگونه که از مقایسه نتایج مشاهده می‌شود، توزیع فشار روی سطح حاصل از روش نیز دارای دقت مناسبی بوده و با نتایج بدست آمده از منابع تجربی و عددی بخوبی همخوانی دارد. تفکیک میدان حل به چند ناحیه این قابلیت را ایجاد کرده‌است که بتوان هندسه‌های عملی را با استفاده از کامپیوترهای شخصی تحلیل نمود. نکته حائز اهمیت این است که در روش بکار رفته (علیرغم تفکیک میدان حل به نواحی مختلف) در منحنی‌های بدست آمده نوسان و ناپیوستگی محسوسی مشاهده نمی‌شود. مزیت دیگر روش بکار رفته این است که حل عددی در نواحی دوم و بعد از آن با تعداد تکرار کمتری بدست آمده‌است، علت این موضوع این است که مقادیر اولیه مورد استفاده برای نواحی دوم به‌بعد از استفاده از حل نواحی قبلی میانبایی شده‌اند، از آنجا که مقادیر میانبایی شده به حل نواحی فوق نزدیک می‌باشد، لذا تعداد تکرار برای حل نهایی کاهش خواهد یافت. شایان ذکر است که با افزایش بیشتر تعداد نواحی، تعداد تکرار نواحی دوم به‌بعد برای رسیدن به حل نهایی باز هم کاهش خواهد یافت.

## تشکر و قدردانی

نگارندگان از دانشگاه بوعلی سینا و پژوهشکده سیستم‌های پدافند هوایی که از انجام این پروژه حمایت کافی را به‌عمل آوردند، کمال تشکر را دارند.

## مراجع

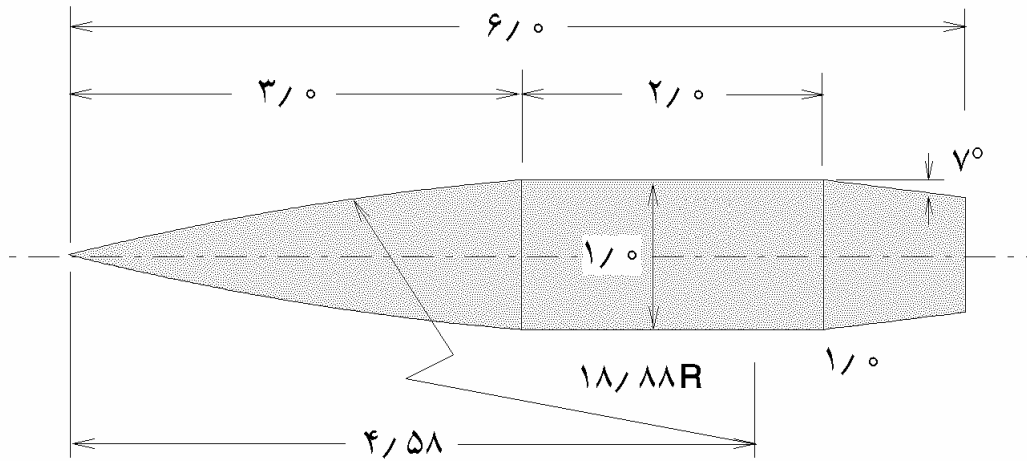
- [1] Vnkatakrishnan, V., "Convergence to Steady State Solutions of the Euler Equations on Unstructured Grids with Limiters," J. of comp. Phys., Vol. 118, pp. 120-130, 1995.
- [2] Tanaka, T., "Finite Volume TVD Schemes on an Unstructured Grid System for Three-Dimensional MHD Simulation of Inhomogeneous Systems Including Strong Background Potential Fields," J. of comp. Phys., Vol. 111, pp. 381-389, 1994.
- [3] Chen, C. L., Ramakrishnan, S., and Szema, K. Y., "Multizonal Navier-Stokes Solutions for the Multibody Space Shuttle Configurations," J. of Spacecraft and Rockets, Vol. 29, pp. 129-137, January-February, 1992.
- [4] Gnoffo, P. A., Weilmuensters, K. J., and Alters, S. J., "Multiblock Analysis for Shuttle Orbiter Reentry Heating from Mach 24 to Mach 12," J. of Spacecraft and Rockets, Vol. 31, pp. 367-377, May-June, 1994.
- [5] Esfahanian, V., Azimi, A., and Hejranfar, K., "Practical Prediction of Supersonic Viscous Flows over Complex Configurations Using Personal Computers," J. of Spacecraft and Rockets, Vol. 38, No. 5, pp. 1-4, September-October, 2001.
- [6] Yee, H.C., "On the Implementation of a Class of Upwind Schemes for System of Hyperbolic Conservation Law", NASA Technical Memorandum 86839. Sept 1985.

- [7] Yee, H.C., "Upwind and Symmetric Shock-Capturing Schemes", NASA TM. 89464, May 1987.
- [8] Yee, H.C., "A Class of High-Resolution Explicit and Implicit Shock-Capturing Methods", NASA TM 101088, Feb 1989
- [9] Esfahanian, V., Azimi, A., and Hejranfar, K., "Practical Prediction of Supersonic Viscous Flows over Complex Configurations Using Personal Computers," J. of Spacecraft and Rockets, Vol. 38, No. 5, pp. 1-4, September-October, 2001.
- [10] Kaser, L.D., and Sturek, W. B., "Turbulent Boundary Layer Measurements on the Boattaile Section of Yawed, Spinning Projectile Shape at Mach 3", BRL Memorandum Report, No. ARBRL-MR-02880, November 1978.
- [11] Kaser, L.D., and Sturek, W. B., "Experimental Measurements in the Turbulent Boundary Layer of a Yawed, Spinning Ogive-Cylinder Body of Revolution a Mach 3", BRL Memorandum Report, No. ARBRL-MR-02813, March 1978.
- [۱۲] اصفهانیان. و.، رشیدی. م.م.، حیدری نژاد. قاسم، "حل عددی جریان تقارن محوری و مافوق صوت با استفاده از معادلات ناویر-استوکس لایه نازک توسط روش TVD"، چهارمین کنفرانس بین‌المللی و هشتمین کنفرانس انجمن مهندسان ایران

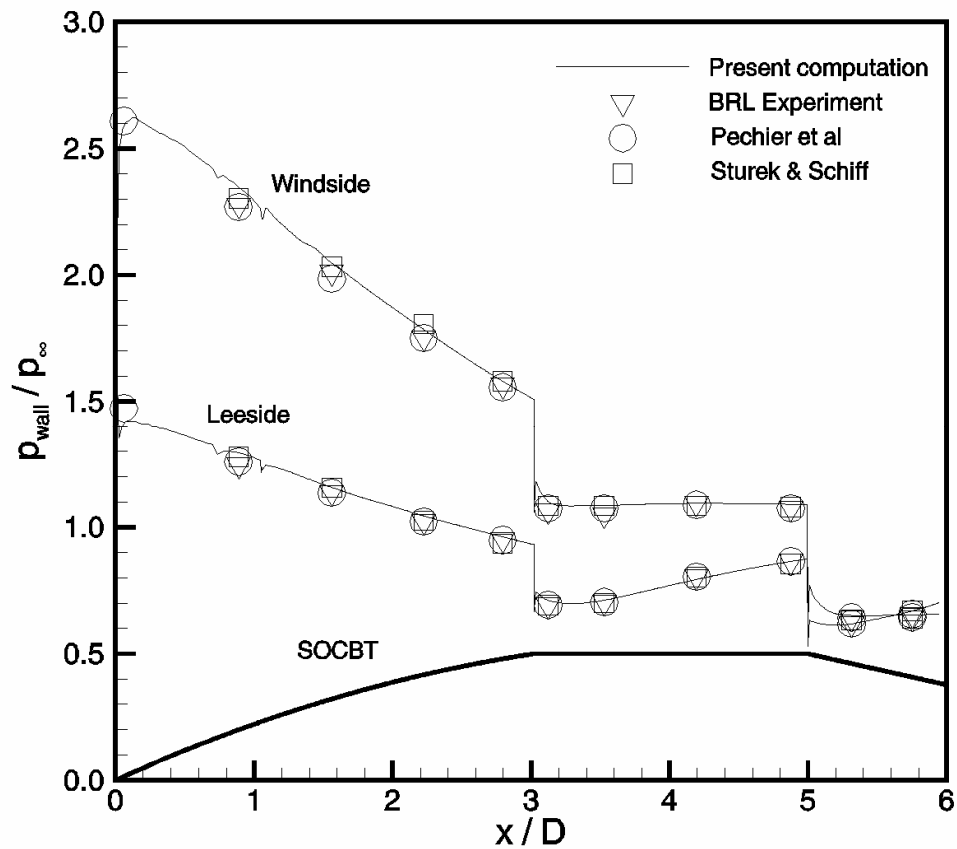
جدول ۱- مشخصات شبکه مورد استفاده برای هندسه SOCBT

شماره ناحیه	تعداد نقاط	ضریب کشش شبکه
۱	۳۰×۵۱×۳۰	۱/۰۱
۲	۱۰×۵۱×۷۱	۱/۰۰۵
۳	۳۰×۵۱×۷۱	۱/۰۰۵
۴	۳۰×۵۱×۷۱	۱/۰۰۵
۵	۳۰×۵۱×۷۱	۱/۰۰۵
۶	۳۰×۵۱×۷۱	۱/۰۰۵
۷	۴۱×۵۱×۷۱	۱/۰۰۵
۸	۴۱×۵۱×۷۱	۱/۰۰۵

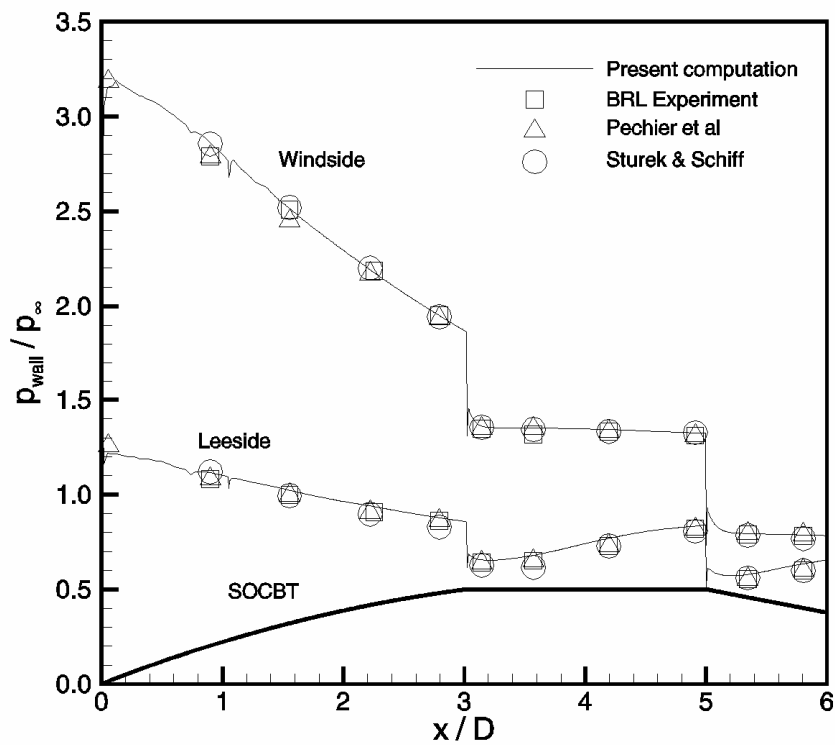




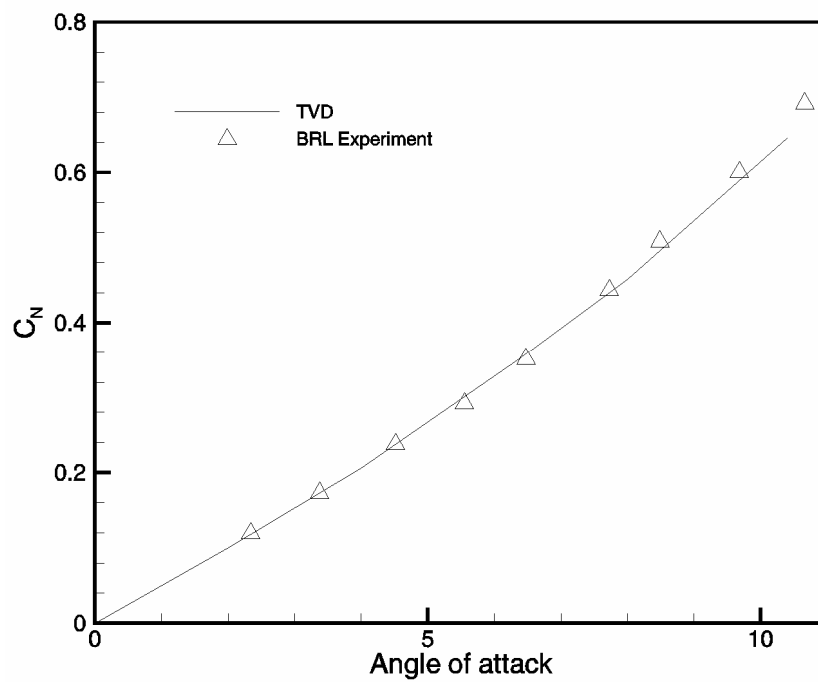
شکل ۱- شکل شماتیک هندسهٔ SOCBT (ابعاد بر حسب کالیبر بی بعد شده‌اند)



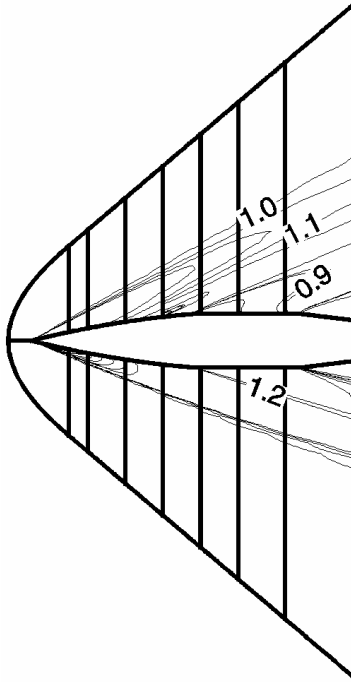
شکل ۲- توزیع فشار روی سطح در جهت‌های روبه‌باد و پشت‌به‌باد در زاویه حملهٔ ۶/۳۴ درجه



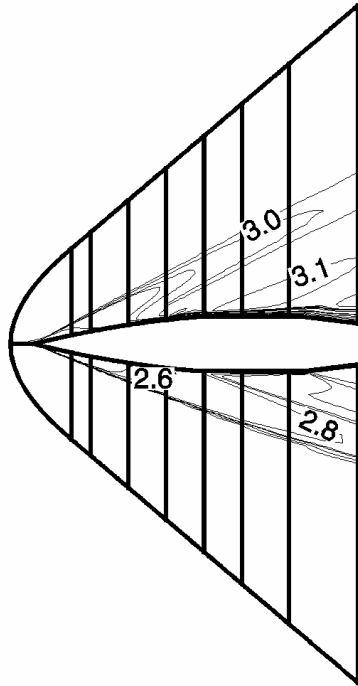
شکل ۳- توزیع فشار روی سطح در جهت‌های روبه‌باد و پشت‌به‌باد در زاویه حمله ۱۰/۴ درجه



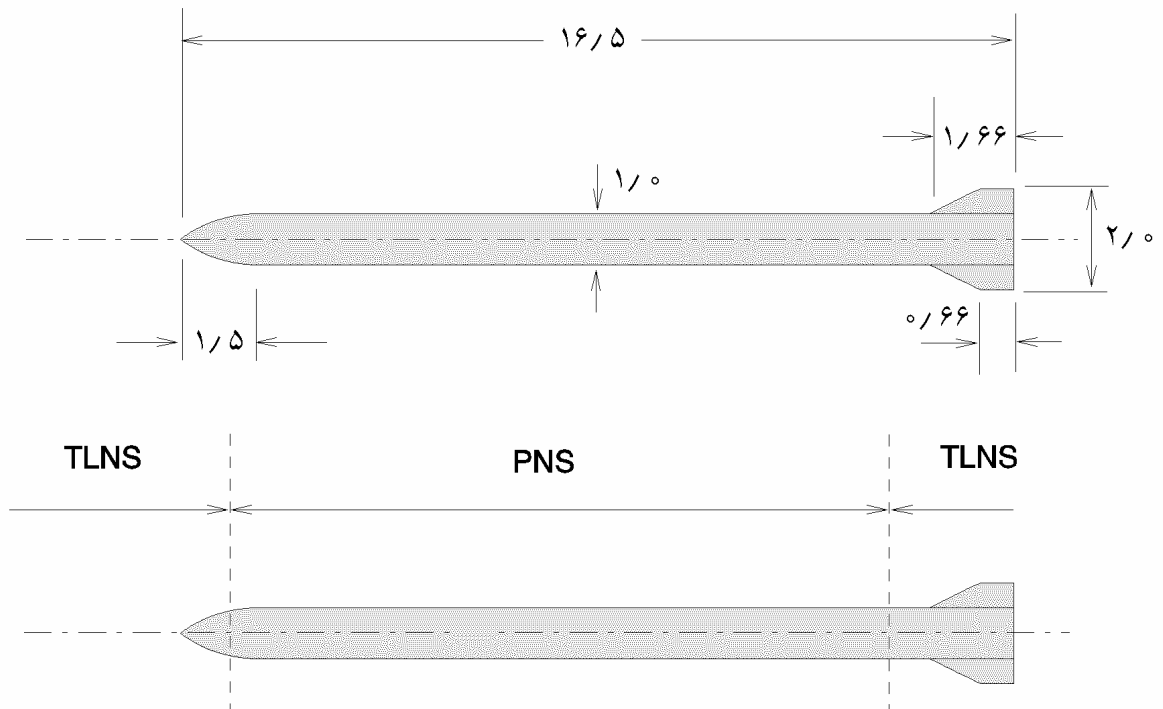
شکل ۴- منحنی ضریب نیروی عمودی بر حسب زاویه حمله



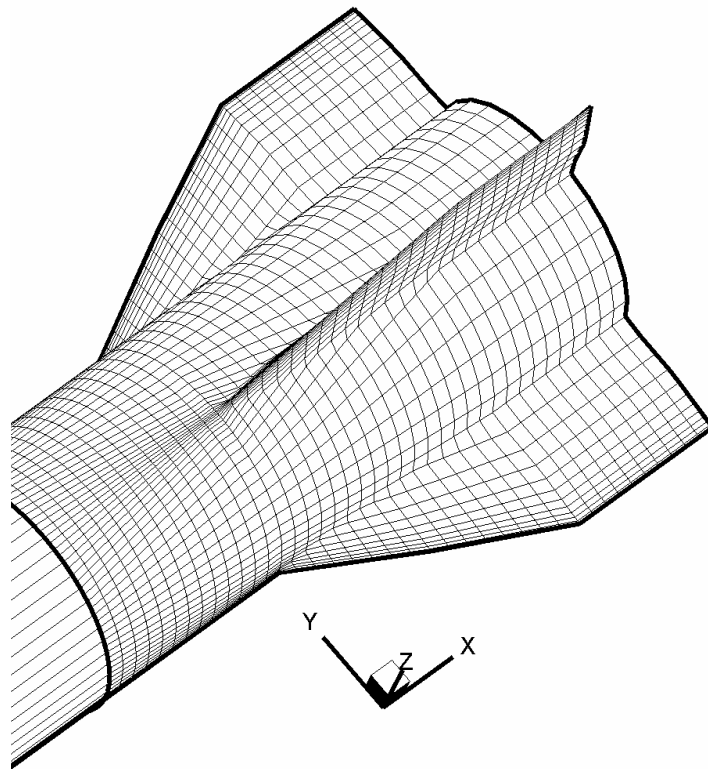
شکل ۵- خطوط همتراز فشار



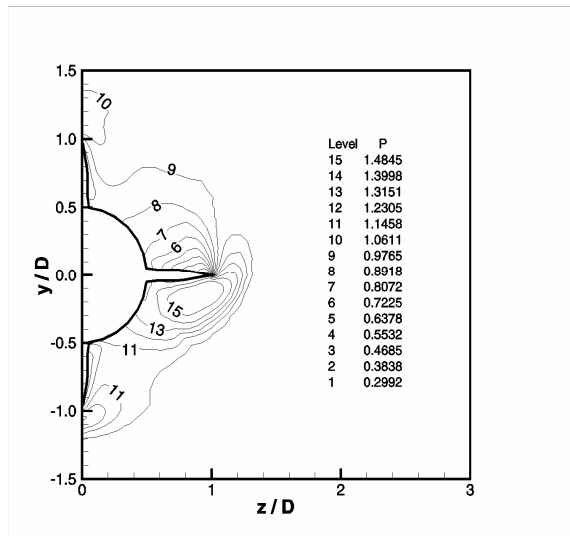
شکل ۶- خطوط همتراز ماخ



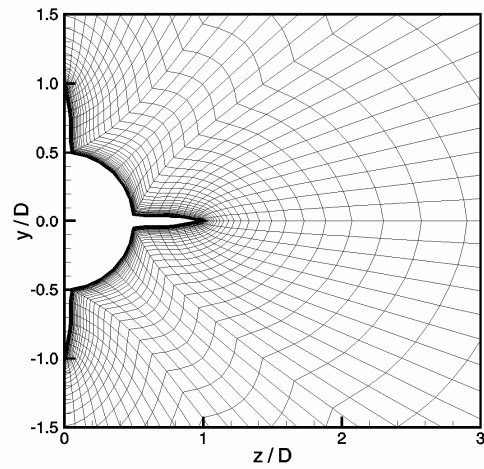
شکل ۷- هندسه موشک و استراتژی حل عددی



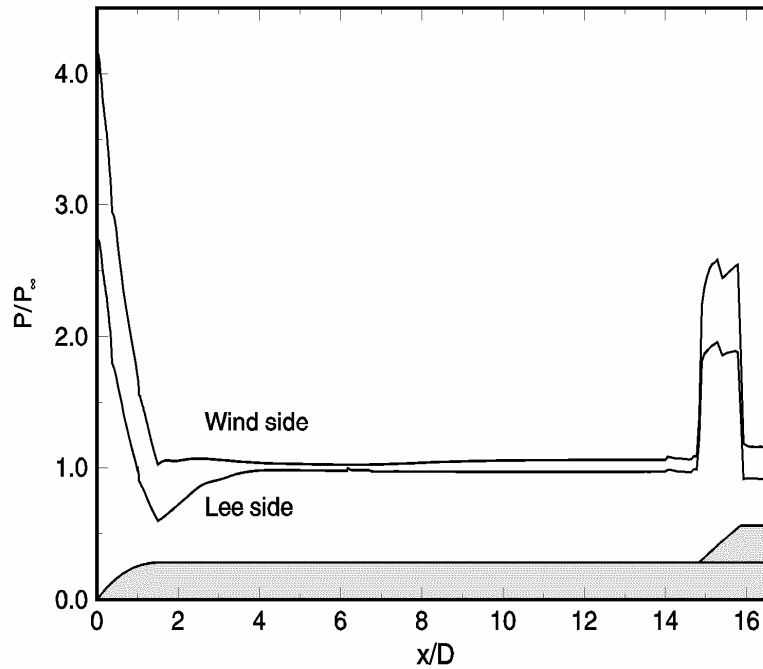
شکل ۸- شبکه سطحی تولید شده در اطراف بالک موشک



شکل ۱۰- توزیع فشار عرضی در اطراف بالک



شکل ۹- شبکه عرضی ایجاد شده در اطراف بالک



شکل ۱۱- توزیع فشار در امتداد موشک در جهت‌های روبه‌باد و پشت‌به‌باد

$$M_{\infty} = 2.01, \alpha = 12.41, \text{Re} = 1.3 \times 10^7$$

# SID



سرویس های ویژه



سرویس ترجمه تخصصی



کارگاه های آموزشی



بلاگ مرکز اطلاعات علمی



عضویت در خبرنامه

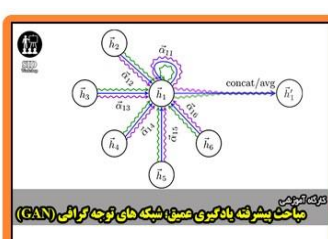


فیلم های آموزشی

## کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی



کارگاه آنلاین آشنایی با پایگاه های اطلاعات علمی بین المللی و ترند های جستجو



مباحث پیشرفته یادگیری عمیق؛ شبکه های توجه گرافی (Graph Attention Networks)



کارگاه آنلاین مقاله نویسی IEEE و ISI ویژه فنی و مهندسی