

بررسی تاثیر دهانه بالک شبکه‌ای بر عملکرد موشک در تحلیل آیرو دینامیکی آن

مهران نصرت‌الهی^۱، مهدی هاشم‌آبادی^۲

۱ و ۲ مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۰۹/۱۴

پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۰۳/۱۲

چکیده

در این تحقیق، موشک‌های دارای بالک‌های شبکه‌ای بررسی و ضرایب آیرو دینامیکی این موشک‌ها تعیین شد. همچنین اثر تغییر ارتفاع بالک بر روی عملکرد موشک مورد ارزیابی قرار گرفت. برای تحلیل از دینامیک سیالات محاسباتی لرح استفاده شده است. امروزه با پیشرفت الگوریتم‌های عددی و افزایش سرعت کامپیوترها یکی از مناسب‌ترین روش‌های تحلیل، دینامیک سیالات محاسباتی است که دقت بسیار بالایی نیز دارد. به همین دلیل در ابتدا به مطالعه و بررسی این بالک‌ها پرداخته شده و سپس بالکی با دهانه‌های مختلف مورد تحلیل قرار گرفته تا تاثیر دهانه بالک از لحاظ عملکردی مورد بررسی قرار گیرد. در نهایت دو بالک انتخابی روی موشک کامل قرار گرفته و تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی روی کل موشک در ماک‌ها و زاویه حمله‌های متفاوت انجام شده است. در ادامه ضرایب آیرو دینامیکی موشک محاسبه شده و کلیه خصوصیات میدان حل اطراف موشک در اختیار قرار می‌گیرد. برای اعتبارسنجی نتایج نیز، داده‌های به‌دست آمده با داده‌های تجربی مقایسه شده‌اند که نتایج بیانگر دقت خوب این تحلیل می‌باشد.

کلید واژه

آیرو دینامیک موشک، بالک شبکه‌ای، دینامیک سیالات محاسباتی، دهانه بالک.

مقدمه

بالک‌های شبکه‌ای، فناوری آیرو مکانیک نسبتاً جدیدی برای موشک‌های کنترل دمی^۱ هستند. طراحی این بالک‌های شبکه‌ای اجازه می‌دهد که یک وسیله کنترل آیرو دینامیکی موثر در طول بدنه موشک قرار گیرد، بدون آنکه باعث افزایش ابعاد کلی موشک شود. ساختار شبکه داخلی بالک‌های شبکه‌ای که به صورت صفحات متقاطع می‌باشند، مقاومت بالایی بر حسب نسبت وزنی در مقایسه با بالک‌های معمولی فراهم می‌کنند. بالک‌های شبکه‌ای در هنگام تغییر زاویه مسیر موشک، دارای گشتاور لولایی خیلی کم و کارایی کنترلی بسیار بالایی در سرعت‌های مافوق صوت و همچنین در سرعت‌های مادون صوت پایین می‌باشند اما در سرعت‌های گذر صوت، عملکرد موشک به دلیل تشکیل شوک عمودی در جلو بالک به شدت کاهش می‌یابد. بنابراین برای موشک‌های با بالک‌های شبکه‌ای، ابعاد و وزن سامانه‌های فعال کننده سطوح

بر اساس اسناد و مدارک موجود، نخستین بار روس‌ها (اتحاد جماهیر شوروی) بودند که به‌طور عملیاتی از بالک‌های شبکه‌ای در برخی موشک‌های خود استفاده نمودند. بالک شبکه‌ای یک سطح برآزا و کنترلی است که با نمونه‌های معمولی بالک‌ها متفاوت است. بالک شبکه‌ای به صورت لانه زنبوری طراحی شده است که اجازه می‌دهد هوا از داخل بالک عبور کند. این نوع بالک به‌طور معمول دارای یک قاب بیرونی است و صفحات شبکه‌ای که کوچک و متقاطع هستند را در برمی‌گیرد. به‌خاطر مزایای این نوع بالک نسبت به بالک‌های صفحه‌ای معمول، تمایل به بهره‌گیری از این بالک‌ها در سال‌های اخیر افزایش چشمگیری یافته تا حدی که استفاده از این نوع بالک‌ها بر روی موشک‌های زمین به زمین روسیه نیز دیده شده است [۱].

۱. استادیار، m_nosratollahi@sbu.ac.ir

۲. پژوهشگر، m_hashem_abadi@yahoo.com (نویسنده مخاطب)

از آنجایی که بررسی و تحلیل این بالک‌ها با توجه به مزایای زیاد آنها حایز اهمیت می‌باشد، از تحقیقات انجام شده در این زمینه می‌توان به تحقیقات دینامیک سیالات محاسباتی غیرلزج که توسط سان و خلید^۲ انجام شده است، اشاره کرد که نتایج قابل قبولی برای نیروی عمودی بالک‌ها در مقایسه با نتایج تجربی به دست آوردند [۴]. دسپیریتو^۳ و همکارانش که محاسبات لزوج بر روی بالک‌های شبکه‌ای انجام دادند، به این نتیجه رسیدند که نیروی برآ یا نیروی عمودی در حدود ۱۱ درصد با داده‌های تجربی اختلاف دارد در حالی که نیروی پسا تنها ۶/۵ درصد خطا را نشان می‌داد. هنگامی که در حالت بدون لزجت نتایج به دست آمد، نیروها حدود ۱۸ درصد با داده‌های تجربی اختلاف داشتند [۵].

همچنین محاسبات همراه با لزجت به وسیله لایبراتور تحقیقاتی مذکور برای توسعه آیرودینامیک موشک با بالک‌های شبکه‌ای در رژیم مافوق صوت ادامه پیدا کرد [۶]. این بار نتایج در ماخ ۲ و ۳ همچنین در زاویه حمله‌های ۱۵- تا ۱۵+ درجه به دست آمدند. نتایج بسیار خوبی از این محاسبات به دست آمد تا آنجا که نیروی برآ (نیروی عمودی) و نیروی پسا (نیروی محوری) تنها حدود ۸٪ خطا با داده‌های تجربی داشتند. البته نتایج گشتاور پیچشی حدود ۱۶ تا ۲۷ درصد خطا داشت. لایبراتور مذکور سپس تحقیقات خود را روی بررسی‌های دینامیک سیالات محاسباتی روی موشک‌های کنترل-کاناردی که دارای بالک‌های معمولی و شبکه‌ای بودند، ادامه داد. اجراهای دینامیک سیالات محاسباتی در اعداد ماخ ۱/۵ و ۳ و زاویه حمله‌های مختلف بین ۱۵- تا ۱۵+ درجه انجام شد. نتایج به دست آمده از این اجراها بسیار شبیه نتایج آزمایش‌ها تجربی بود. آنها به این نتیجه رسیدند که بالک‌های شبکه‌ای کارایی غلت^۴ کاناردها در سرعت‌های مافوق صوت پایین را بهبود می‌بخشند.

شرکت DRDC-Valcartier در کانادا نیز بررسی و تحقیقات جامعی پیرامون بالک‌های شبکه‌ای و کارایی این نوع بالک‌ها به روش دینامیک سیالات محاسباتی انجام داد. آنها تاثیر آیرودینامیکی یک پله صیقلی که در قسمت پایینی بالک شبکه‌ای قرار گرفته و همچنین تاثیر ضخامت را مورد مطالعه قرار داده‌اند. متوجه شدند که سطح صیقلی پایین بالک شبکه‌ای می‌تواند عملکرد بالک را با کاهش جریان عمودی در انتهای بالک شبکه‌ای، افزایش دهد [۷].

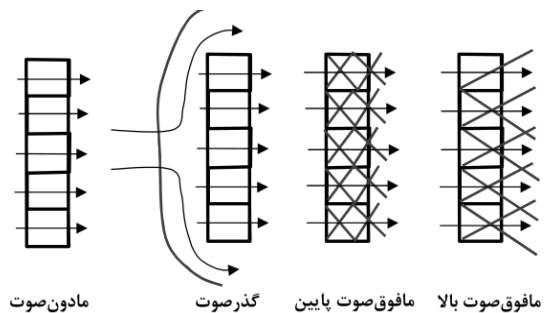
مطالعات اندکی در زمینه بالک‌های شبکه‌ای انجام شده است و با توجه به استراتژیک بودن استفاده از بالک‌های شبکه‌ای، داده‌های بسیار کمی در این زمینه وجود دارد. با توجه به مزایایی که این بالک‌ها نسبت به بالک‌های معمولی دارند که در این تحقیق در

کنترلی کاهش می‌یابد. یکی دیگر از مزایای عالی بالک‌های شبکه‌ای این است که این بالک‌ها برخلاف بالک‌های معمول در زوایای حمله بالا و اماندگی ندارند [۲]. عیب این بالک‌ها، پتانسیل سطح مقطع راداری بالای آنها می‌باشد که سبب ایجاد تشدید با طول موج راداری می‌شود. شکل (۱) خصوصیات دو نوع بالک معمولی را با یک بالک شبکه‌ای مقایسه می‌کند. به جز در سطح مقطع راداری، بالک شبکه‌ای عملکرد خوب تا عالی در موشک‌های مافوق صوت دارد. سطح مقطع راداری نیز تنها زمانی که تشدید بین ابعاد بالک و طول موج رادار وجود داشته باشد، افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، یک بالک شبکه‌ای با ابعاد $1 \times 1 \times 1$ اینچ هنگامی دارای سطح مقطع راداری بالایی خواهد بود که با یک باند x رادار (فرکانس ۱۰ گیگاهرتز با طول موج ۱ اینچ) پرتو افکنی شود. همچنین به دلیل طول وتر کمتری که بالک‌های شبکه‌ای در مقایسه با بالک‌های معمولی دارند، تغییر موقعیت مرکز فشار بالک‌ها کمتر شده و ممان لولایی کمتری ایجاد خواهد شد. نحوه عملکرد بالک شبکه‌ای در رژیم‌های مختلف در شکل (۲) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل هم مشخص است، این بالک‌ها در سرعت‌های گذر صوت کارایی خوبی ندارند [۳].

نوع کنترل دمی	کارایی کنترل	پسا	ممان لولایی	سطح مقطع راداری
تمام بالک‌ها قابلیت حرکت دارند	●	●	●	●
تنها فلپ قابلیت حرکت دارد	○	●	-	●
بالک شبکه‌ای	●	●	●	-

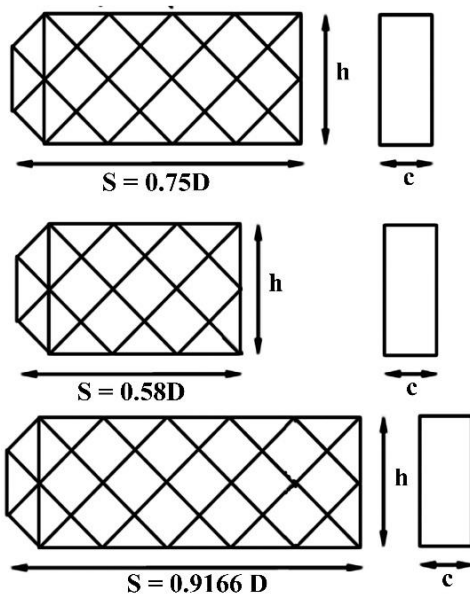
تذکر: ● عالی ○ متوسط - ضعیف

شکل ۱. مقایسه کارایی بالک‌های مختلف [۳]



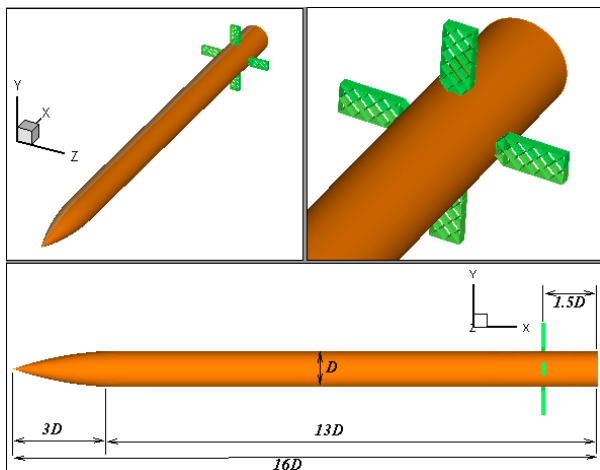
شکل ۲. نحوه عملکرد بالک شبکه‌ای در رژیم‌های مختلف [۲]

برابر قطر بدنه است، انتخاب شد که بالک شبکه‌ای در فاصله ۱/۵ برابر قطر بدنه از انتهای موشک قرار دارد. این موشک دارای چهار بالک شبکه‌ای است که این بالک‌ها به صورت صلیبی (+) قرار گرفته‌اند. قطر بدنه موشک ۳۰ میلی‌متر می‌باشد و در شکل (۴) نشان داده شده است. دهانه بالک (ارتفاع بالک) $0.75D$ ، عرض بالک $0.333D$ و ضخامت یا وتر بالک هم $0.118D$ است که نوع شبکه‌های آن و تعداد آن در شکل دیده می‌شود.



شکل ۳. سه بالک با ارتفاع‌های مختلف

در این تحقیق به دلیل مقارن بودن موشک نسبت به صفحه XZ تنها نیمی از موشک مدل شده است. داده‌های تونل باد برای این موشک برای زاویه حمله‌های ۱۲- تا ۱۲+ درجه موجود می‌باشد که در تحلیل حاضر در ماخ ۲ نتایج در سه زاویه حمله ۰، ۵ و ۱۰ درجه و در ماخ ۳ نتایج در شش زاویه حمله ۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ درجه ارائه می‌شود.



شکل ۴. شکل موشک دارای بالک شبکه‌ای ($D=30\text{mm}$)

مورد آن بحث شده است. در این تحقیق سعی شده که علاوه بر تحلیل کامل موشک دارای بالک شبکه‌ای و اعتبارسنجی آن، بالک‌های مختلف در رژیم مافوق صوت به تنهایی اجرا شود و اثر آن در حالت بالک تنها و مجموعه کامل موشک و بالک به دست آید. هدف این مقاله بررسی میزان تاثیر افزایش دهانه بالک بر روی ضرایب آیرودینامیکی و اعتبارسنجی کامل روش حل و نرم‌افزار می‌باشد که کمتر روی آن بحث شده است. این کار سبب می‌شود که با ایجاد بستر مناسب و ایجاد اجزای بیشتر الگوریتم، طراحی کاملی را برای این نوع بالک‌ها، به دست آید. لازم به ذکر است با توجه به شکل خاص و نامتعارف بالک‌ها تحلیل آیرودینامیکی این نوع بالک‌ها مشکل بوده و نیاز به تولید شبکه بیشتری دارند و همگرایی این نوع بالک‌ها نسبت به بالک‌های معمولی مشکل‌تر است. در تحقیق حاضر با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت علاوه بر بررسی دینامیک سیالات محاسباتی موشک‌های دارای بالک شبکه‌ای تاثیر ارتفاع بالک بر روی عملکرد موشک نیز مورد بررسی قرار گرفته است. به همین منظور ابتدا نتایج برای سه بالک تکی با ارتفاع‌های متفاوت به دست آمده و سپس با قرار دادن دو بالک بر روی بدنه موشک و تحلیل موشک کامل در ماخ‌ها و سرعت دورانی‌های مختلف نتایج با داده‌های تجربی مورد سنجش و اعتبارسنجی قرار گرفته و ارایه شده‌اند.

خط مشی کلی

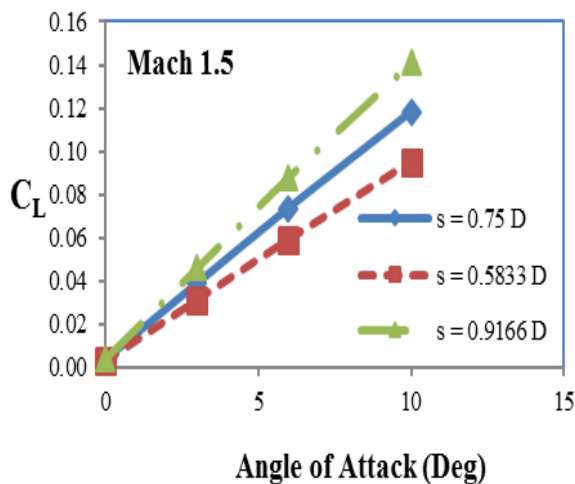
محاسبات در حالت پایا و برای بالک‌های تکی در ماخ‌های ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ و زوایای حمله ۰، ۳، ۶ و ۱۰ درجه و برای موشک کامل در دو ماخ ۲ و ۳ و چندین زاویه حمله انجام شده است. شرایط در تحلیل بالک‌های تکی شرایط سطح دریا است. این سه بالک در شکل (۳) نشان داده شده‌اند. ارتفاع این سه بالک $0.75D$ ، $0.58D$ و $0.9166D$ می‌باشد و $D=30\text{mm}$ ، وتر بالک‌ها $D(C)$ $0.118D$ ، عرض بالک‌ها $D(h)$ $0.333D$ و ضخامت شبکه‌ها $0.05D$ می‌باشد. برای موشک کامل به دلیل ارزیابی و مقایسه نتایج با داده‌های تجربی [۸]، برای ماخ ۲ شرایط جریان آزاد به این صورت است که دمای استاتیکی 166K و فشار استاتیکی $1.268 \times 10^4\text{Pa}$ و برای ماخ ۳، دمای استاتیکی 107K و فشار استاتیکی $2.77 \times 10^3\text{Pa}$ می‌باشد. برای تحلیل یک موشک کامل که دارای بالک شبکه‌ای می‌باشد، باید یک مدل مناسب برای تحلیل انتخاب می‌شود که در عین حال بتواند نتایج را با داده‌های تجربی موجود برای آن مقایسه کند. به همین دلیل یک موشک هوا به هوا کنترل دمی^۵ که طول کل آن ۱۶ برابر قطر بدنه و دماغه آن اجیو بوده و طول دماغه آن ۳

بالک انتخاب شده و این بالک‌ها روی موشک کامل قرار می‌گیرند و نتایج در ماخ‌ها و زاویه حمله‌های متفاوت به دست می‌آید و با مقایسه نتایج با داده‌های تجربی، از صحت نتایج به دست آمده برای بالک‌های تکی و موشک کامل اطمینان حاصل می‌گردد.

نتایج برای سه بالک با ارتفاع‌های متفاوت

در این تحقیق در ابتدا نتایج برای سه بالک شبکه‌ای با دهانه‌های متفاوت $0.75D$ ، $0.9166D$ و $0.5833D$ در ماخ‌های $1/5$ ، $2/5$ و $3/5$ و زوایای حمله 0° ، 3° ، 6° و 10° درجه در شرایط سطح دریا محاسبه شده‌اند. که نتایج ضریب برا و پسا بر حسب زاویه حمله برای این سه بالک در ماخ‌های $1/5$ ، $2/5$ و $3/5$ به ترتیب در شکل‌های (۷-۵) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که متوسط مقدار Y^+ روی این سه بالک در ماخ $1/5$ ، $2/5$ و $3/5$ زاویه حمله صفر درجه، به ترتیب 46 ، 63 و 75 است که این مقادیر بیانگر دقت مناسب مش‌بندی ایجاد شده روی بالک و اطراف آن می‌باشد. چون بالک با ارتفاع بیشتر سطح بیشتری برای شبکه‌بندی خواهد داشت بنابراین تعداد سلول با افزایش ارتفاع افزایش می‌یابد که برای این سه بالک با افزایش ارتفاع تعداد سلول‌های ایجاد شده به ترتیب برابر با 1290000 ، 1560000 و 1800000 سلول ایجاد شده است.

شکل‌های (۵) تا (۷) ضریب برا و ضریب پسا را بر حسب زاویه حمله برای سه بالک با ارتفاع‌های مختلف به ترتیب در ماخ‌های $1/5$ ، $2/5$ و $3/5$ مورد مقایسه قرار داده‌اند. از شکل‌ها مشخص است که با افزایش ارتفاع بالک، ضریب برا و ضریب پسا افزایش می‌یابد که درصد تأثیر این دو تقریباً "یکسان" می‌باشد.



(الف)

در این تحلیل از حل کننده صریح استفاده شده و شبکه حول موشک به جز در قسمت کوچکی از اطراف بالک، در بقیه نواحی شبکه سازمان یافته است. و معادلات ناویر-استوکس متوسط شده رینولدز با استفاده از روش حجم محدود حل شده‌اند:

$$\frac{\delta}{\delta t} \int_V w dV + \oint [F-G] dA = \int_V H dV \quad (1)$$

جایی که w بردار متغیرهای بقایی و F و G به ترتیب بردارهای شار غیرلزج و لزج می‌باشند که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

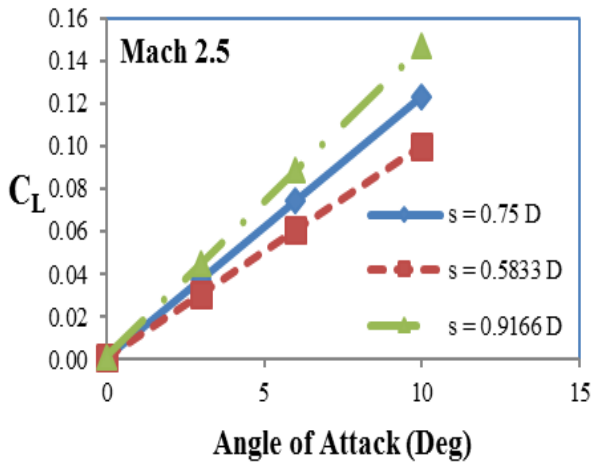
$$W = \begin{Bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho E \end{Bmatrix}, F = \begin{Bmatrix} \rho v \\ \rho v u + p i \\ \rho v v + p j \\ \rho v w + p k \\ \rho v E + p v \end{Bmatrix}, G = \begin{Bmatrix} 0 \\ \tau_{xi} \\ \tau_{yi} \\ \tau_{zi} \\ \tau_{ij} v_j + q \end{Bmatrix} \quad (2)$$

H بردار عبارت‌های منبع، V حجم سلول و A مساحت سطحی سلول است. بردار شار غیرلزج (F) با استفاده از اختلاف شار بالادست استاندارد مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای معادلات از مدل آشفتگی اسپالارت-آلماراس^۶ در محاسبات استفاده شده است. مدل اسپالارت-آلماراس، یک مدل تک معادله‌ای می‌باشد که برای کاربردهای هوافضا ارایه شده است [۹]. این مدل برای لایه‌های مرزی که در معرض گرادیان‌های معکوس قرار می‌گیرند، جواب‌های خوبی ارایه می‌دهد و به دلیل تک معادله‌ای بودن، هزینه محاسباتی کمتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد. در این تحلیل، ارزیابی این مدل اغتشاشی نیز صورت می‌گیرد. همچنین از گسسته‌سازی بالادست با دقت مرتبه دوم برای متغیرهای جریان و معادله لزجت آشفتگی استفاده شده است. لازم به ذکر است که ضریب پسا به دقت گسسته‌سازی حساس بوده و دقت مرتبه دوم برای محاسبه پسا مناسب می‌باشد.

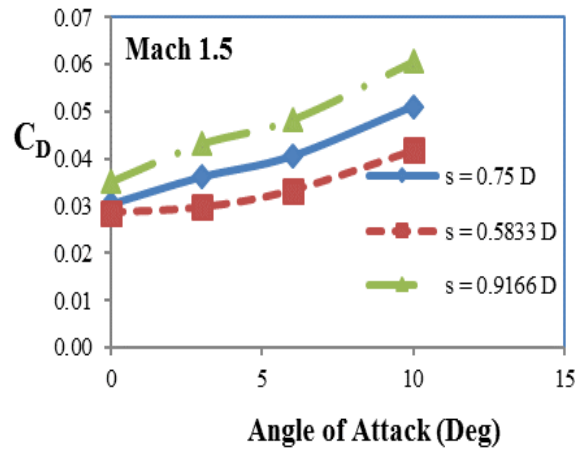
شرایط مرزی انتخابی برای این مدل نیز بدین صورت است که برای ناحیه بیرونی از شرط میدان فشار دوردست استفاده شده است. ویژگی این شرط مرزی این است که از نوع غیرانعکاسی می‌باشد و شوک‌ها به طور غیرفیزیکی به داخل میدان منعکس نمی‌گردد. برای موشک و بالک‌ها شرط مرزی دیواره و برای مرز تقارن موشک نیز شرط تقارن^۷ انتخاب شده است.

نتایج و بحث

با استفاده از تحلیل حاضر ضریب نیروی محوری، ضریب نیروی عمودی و ضریب گشتاور پیچشی برای موشک محاسبه می‌شوند. در ابتدا نتایج برای سه بالک با اندازه دهانه‌های متفاوت به دست می‌آید که این نتایج پس از بررسی و مطالعه شبکه ایجاد شده پیرامون این بالک‌ها و بررسی Y^+ روی بالک می‌باشد. در ادامه دو

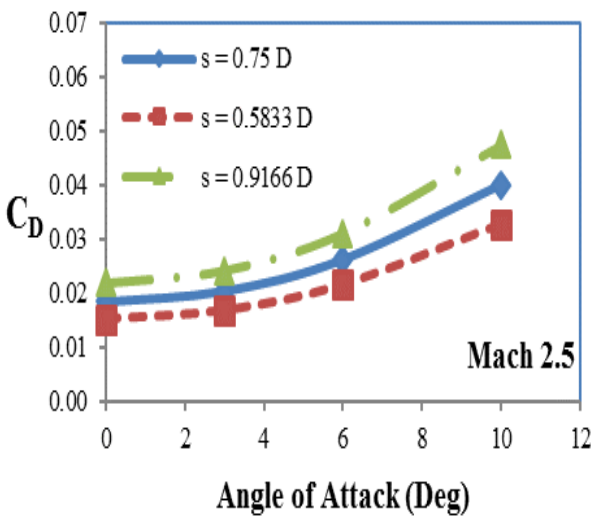


(الف)



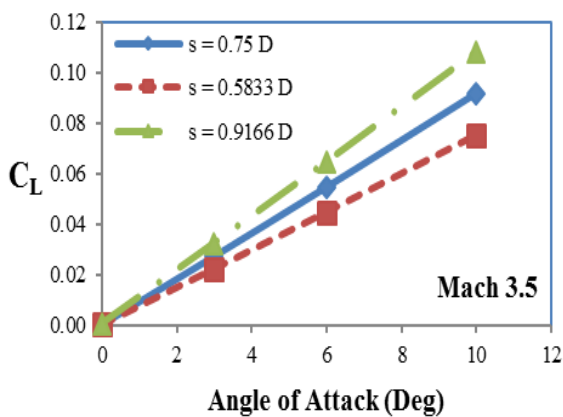
(ب)

شکل ۵. مقایسه ضرایب آیرودینامیکی بر حسب زاویه حمله برای سه بالک با ارتفاع متفاوت در ماخ ۱/۵. (الف) ضریب برا (ب) ضریب پسا



(ب)

شکل ۶. مقایسه ضرایب آیرودینامیکی بر حسب زاویه حمله برای سه بالک با ارتفاع متفاوت در ماخ ۲/۵. (الف) ضریب برا (ب) ضریب پسا



(الف)

با دقت بیشتری که انجام شد مشخص شده است که نسبت L/D برای بالک با ارتفاع $0.75D$ کمی بیشتر از دو بالک دیگر است و بیانگر مناسب بودن این بالک برای استفاده می‌باشد (شکل ۸). با توجه به اینکه ضریب برا و پسا با عکس مربع سرعت متناسب است بنابراین باید با افزایش ماخ (سرعت) ضریب برا و پسا کاهش یابد اما با دقت در نتایج مشخص است که برای هر بالک، ضریب پسا با افزایش ماخ کاهش می‌یابد ولی در مورد ضریب برا، مقدار ضریب برا در ماخ $2/5$ کمی بیشتر از مقدار ضریب برا در ماخ $1/5$ است. دلیل این قضیه این است که در ماخ $1/5$ شوک عمودی در لبه جلویی ایجاد می‌شود و بنابراین شوک از قدرت بیشتری برخوردار است و اختلاف دما و فشار قبل و بعد از شوک زیاد می‌باشد که این امر سبب کاهش عملکرد بالک می‌شود.

شکل (۹) کانتور ماخ در صفحه طولی بالک با ارتفاع $0.5833D$ را در دو ماخ $1/5$ و $2/5$ نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل هم مشخص است در ماخ $1/5$ در لبه جلویی بالک شوک عمودی تشکیل شده است در حالی که در ماخ $2/5$ شوک مایل تشکیل گردیده است. بعد از تداخل دو شوک لبه بالایی و پایینی، شوک‌ها دوباره به سطح بالک برخورد نمی‌کنند که سبب کاهش عملکرد شوند. لازم به ذکر است که برای بالک‌های تکی از شبکه بی‌سازمان استفاده و در تعیین این نتایج در ابتدا مطالعه شبکه انجام شده است. شبکه مناسب با توجه به نتایج به دست آمده است که به منظور بررسی صحت نتایج مقدار متوسط Y^+ بر روی بالک ارایه می‌شود.

نتایج برای موشک کامل با دو نوع بالک

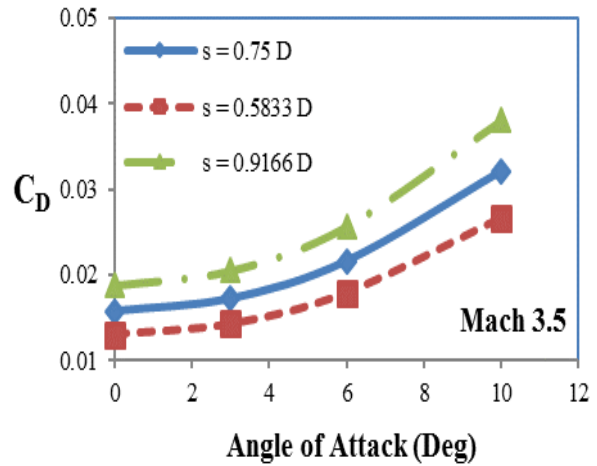
اینجا نتایج موشک با بالک شبکه‌ای با ارتفاع $0.75D$ که مشخصات آن در بخش‌های قبل آورده شد با داده‌های تجربی [۸] مقایسه می‌شود تا نتایج اعتبارسنجی گردد. در ادامه نتایج برای موشک کامل دارای بالک شبکه‌ای با ارتفاع $0.5833D$ ارایه می‌شود و نتایج نیز مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

نتایج برای موشک دارای بالک با ارتفاع $0.75D$

در این قسمت نتایج به‌دست آمده برای موشک کامل در دو ماخ ۲ و ۳ و زوایای حمله مختلف ارایه می‌شود. مشخصات موشک در قسمت‌های قبل آورده شده است. در این‌جا نتایج این موشک با بالک شبکه‌ای با ارتفاع $0.75D$ با داده‌های تجربی مقایسه می‌گردد تا نتایج اعتبارسنجی شود.

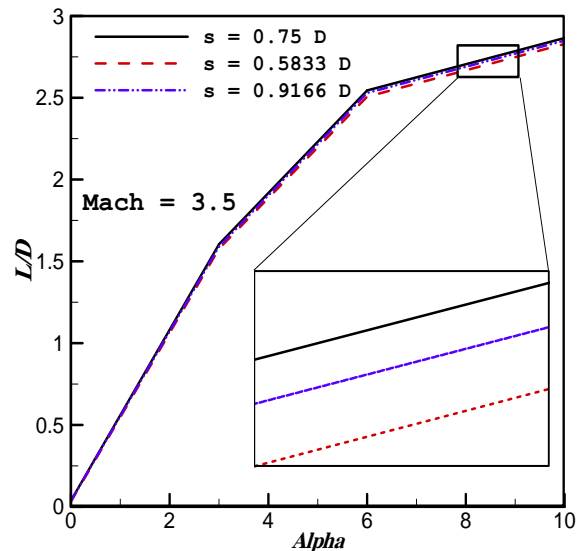
در تولید شبکه، از لایه مرزی بر روی بدنه استفاده شده است که فاصله مرکز اولین سلول از دیواره 0.04 میلی‌متر انتخاب شده و همه شبکه‌ها با نسبت $1/25$ منبسط می‌شوند. تمام شبکه دارای شبکه باسازمان می‌باشد به‌جز ناحیه کوچک اطراف بالک‌ها که در آن از شبکه بی‌سازمان استفاده شده است. به منظور بررسی عدم وابستگی حل به شبکه، سه شبکه با تعداد سلول‌های $1/4$ ، $2/2$ و $3/2$ میلیون ایجاد شد که مقدار ضریب نیروی محوری در ماخ ۲ و زاویه حمله صفر برای این شبکه‌ها به ترتیب 0.532 ، 0.5079 و 0.5026 می‌باشند. با توجه به این داده‌ها شبکه دارای $2/2$ میلیون سلول، به‌عنوان شبکه مناسب برای مدل به‌دست آمده است که البته این تعداد شبکه برای نصف موشک می‌باشد و در نتیجه تعداد شبکه برای کل آن $4/4$ میلیون شبکه است. شکل (۱۰) نمایی از شبکه حول بدنه و بالک و شکل (۱۱) نمایی از شبکه در مقطع $11/6D$ و $14/5D$ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است در مقطع $11/6D$ شبکه حول بدنه، شبکه با سازمان است و در مقطع $14/5D$ بالک قرار دارد که محدوده اطراف بالک دارای شبکه بی‌سازمان و بعد از آن دارای شبکه باسازمان است.

نتایج موشک مورد نظر در عدد ماخ ۲ در حالت دقت مرتبه دوم در سه زاویه حمله 0 ، 5 و 10 درجه محاسبه شده است. در این سه زاویه حمله نتایج ضریب نیروی محوری، ضریب نیروی عمودی و ضریب گشتاور پیچشی و موقعیت مرکز فشار محاسبه شده‌اند که در جدول (۱) آورده شده است. نتایج با نتایج تجربی مقایسه شده و درصد خطای هریک در این جدول نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ضریب نیروی محوری در زاویه حمله 0 ، 5 و 10 درجه به ترتیب 1.063 ٪، 1.122 ٪ و 1.15 ٪ با داده‌های تجربی [۸]

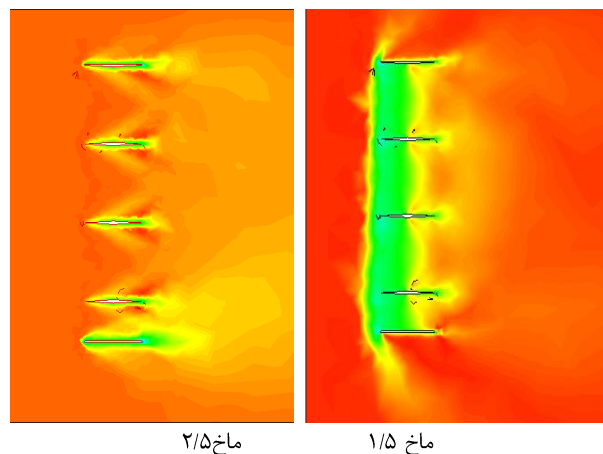


(ب)

شکل ۷. مقایسه ضرایب آیرودینامیکی بر حسب زاویه حمله برای سه بالک با ارتفاع متفاوت در ماخ $3/5$. (الف) ضریب پرا (ب) ضریب پسا

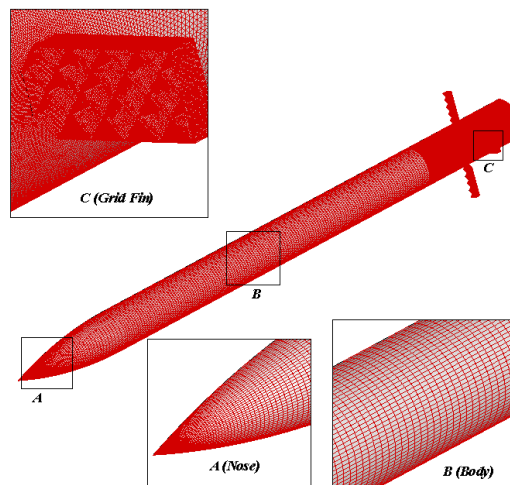


شکل ۸. مقایسه نسبت L/D بر حسب زاویه حمله برای سه بالک در ماخ $3/5$

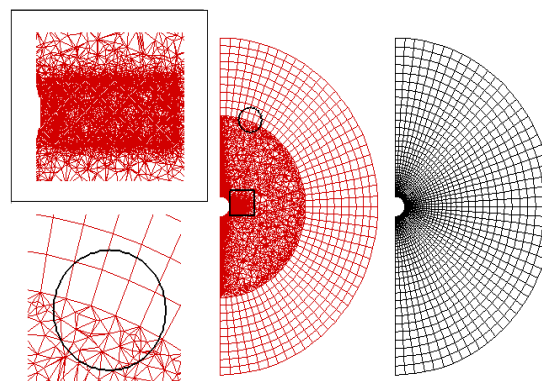


شکل ۹. کانتور ماخ روی صفحه طولی وسط بالک با ارتفاع $0.5833D$ در دو ماخ $1/5$ و $2/5$ و زاویه حمله صفر

اختلاف دارد که این اختلاف‌ها کمتر از ۱۵٪ می‌باشد و نشان می‌دهد که تحلیل حاضر با دقت مناسبی ضریب نیروی محوری را به دست آورده است.



شکل ۱۰. نمایی از شبکه ایجاد شده بر روی بدنه و بالک



در فاصله ۱۱/۶D از نوک در فاصله ۱۴/۵D از نوک

شکل ۱۱. نمایی از شبکه ایجاد شده در دو مقطع مختلف

ضریب نیروی عمودی نیز در دو زاویه حمله ۵ و ۱۰ درجه به ترتیب حدود ۱۲٪ و ۱۵٪ با داده‌های تجربی اختلاف دارد که این اختلاف‌ها کمتر از ۱۵٪ بوده و در نتیجه تحلیل حاضر با مطابقت خوبی ضریب نیروی عمودی را به دست آورده است. ضریب گشتاور پیچشی نیز در دو زاویه حمله ۵ و ۱۰ درجه به ترتیب حدود ۱۶٪ و ۲۴٪ با داده‌های تجربی [۸] اختلاف دارد. و در نهایت موقعیت مرکز فشار در این ماخ در دو زاویه حمله ۵ و ۱۰ درجه ۳٪ و ۱۰٪ با داده‌های تجربی اختلاف دارد.

نتایج موشک مورد نظر در عدد ماخ ۳ در حالت دقت مرتبه دوم در شش زاویه حمله ۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ درجه محاسبه شده است. در این شش زاویه حمله نتایج ضریب نیروی محوری، ضریب نیروی عمودی و ضریب گشتاور پیچشی و موقعیت مرکز فشار محاسبه شده‌اند که در جدول (۲) نتایج در سه زاویه حمله ۰، ۵ و

۱۰ درجه که داده‌های تجربی این زوایا نیز موجود می‌باشند، آمده است. در ادامه میزان اختلاف نتایج به دست آمده با داده‌های تجربی مورد ارزیابی قرار گرفته است. همان‌طور که از جدول (۲) پیداست ضریب نیروی محوری در زاویه حمله ۰، ۵ و ۱۰ درجه به ترتیب حدود ۹٪، ۱۱٪ و ۱۲٪ با داده‌های تجربی اختلاف دارد که این اختلاف‌ها بیان‌گر دقت مناسب پیش‌بینی ضریب نیروی محوری را نشان می‌دهد. ضریب نیروی عمودی نیز در دو زاویه حمله ۵ و ۱۰ درجه به ترتیب حدود ۱۱٪ و ۱۳٪ با داده‌های تجربی اختلاف دارند که این اختلاف‌ها بیانگر این مسئله است که نتیجه تحلیل حاضر با مطابقت خوبی ضریب نیروی عمودی را به دست آورده است. ضریب گشتاور پیچشی نیز در دو زاویه حمله ۵ و ۱۰ درجه به ترتیب حدود ۱۹٪ و ۱۵٪ با داده‌های تجربی اختلاف دارند و در نهایت موقعیت مرکز فشار در این ماخ در دو زاویه حمله ۵ و ۱۰ درجه ۷٪ و ۵٪ با داده‌های تجربی اختلاف دارد (لازم به ذکر است که موقعیت مرکز فشار با قطر موشک بی‌بعد شده است).

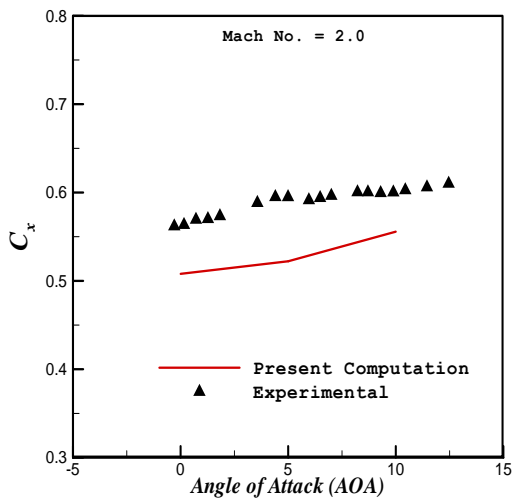
لازم به ذکر است که هیچ حل عددی را نمی‌توان کاملاً دقیق دانست و تمامی روش‌های حل عددی دارای خطا هستند. دلیل استفاده از حل بر پایه دینامیک سیالات محاسباتی دقت بیشتر این روش‌ها نسبت به روش‌های مهندسی و تحلیلی است. روش‌های مهندسی و تحلیلی برای هندسه‌ها و جریان‌های پیچیده قابل پیاده‌سازی نیستند و درصد خطای آنها به دلیل ساده‌سازی‌های زیاد به مراتب بیشتر از حل‌های عددی است. حتی داده‌های تجربی نیز به دلایلی همچون دقت سنسورها، دقت ساخت، نسبت انسداد^۹ و صلب نبودن مدل (مخصوصاً در سرعت‌های بالا) دارای خطاهایی است. معمولاً ضریب نیروی محوری به دلیل رفتار غیرخطی آن با تغییرات جریان و زوایای حمله، حساسیت بیشتری داشته و گسسته‌سازی معادلات و خطاهای برشی گسسته‌سازی روی ضرایب آیرودینامیکی تاثیر می‌گذارد. از طرفی در زوایای حمله بالا و حتی در زوایای حمله پایین (وابسته به هندسه و گردابه‌های تشکیل شده) بحث بافتینگ^۹ که ناشی از اندرکنش سازه و سیال است سبب نوسانات بالک شده و ضرایب آیرودینامیکی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. لازم به ذکر است که هرچه جریان پیچیده‌تر باشد، نیاز به گسسته‌سازی با مراتب بالاتر ضروری خواهد بود که البته باید این نکته را نیز مدنظر قرار داد که گسسته‌سازی با مراتب بالاتر سبب افزایش محاسبات شده و زمان تحلیل را به شدت زیاد می‌کند. لازم به ذکر است که اگر خطاهای داده‌های تجربی در نظر گرفته نشود و این داده‌ها دقیق شمرده شود (که در عمل این‌گونه نیست) خطاهای ضریب نیروی محوری تا ۱۵٪ برای هندسه‌های

پیچیده منطقی است. شکل‌های (۱۲) و (۱۳) به ترتیب تغییرات ضریب نیروی محوری و ضریب نیروی عمودی برحسب زاویه حمله را در ماخ ۲ نشان می‌دهد. در این دو شکل نتایج با نتایج تجربی [۸] مورد مقایسه قرار گرفته است.

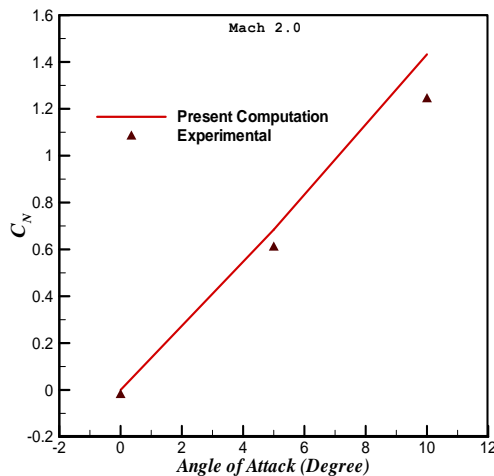
جدول ۱. مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج تجربی در ماخ ۲

X_{cp}/D	C_x	C_m	C_N		α
۲۷/۰۹۶۴	۰/۵۰۷۹	-۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۰۰۳	تحلیل	۰
۱۲/۵	۰/۵۶۲	۰/۲۵۸۷	۰/۰۲۱۵	نتایج	
-	%۱۰/۶۳	-	-	اختلاف	
۹/۳۴۷۷	۰/۵۲۲۲	-۶/۳۷۶۲	۰/۶۸۴۱	تحلیل	۵
۸/۹۹	۰/۵۹۴۸	-۵/۴۶۶۷	۰/۶۰۷۸	نتایج	
%۳/۹۸	%۱۲/۲	%۱۶/۶۴	%۱۲/۵۶	اختلاف	
۹/۰۰۴۸	۰/۵۵۵۷	-۱۳/۴۱۰۴	۱/۴۳۲۳	تحلیل	۱۰
۸/۱۴	۰/۶۰۱	-۱۰/۱۰۲۹	۱/۲۴۱۱	نتایج	
%۱۰/۶۲	%۸/۱۵	%۲۴/۶۶	%۱۵/۴۱	اختلاف	

می‌یابد و کارایی کم می‌شود و بعد از آن با افزایش زاویه حمله بالک کمی بهتر می‌شود. با وجود این هنوز هم این بالک باعث کاهش عملکردی موشک می‌شود اما این مطلب را باید مورد نظر داشت که در زاویه حمله ۳۰ درجه سهم جریان عرضی زیاد شده و گردابه‌های قوی در قسمت بالایی موشک و بدنه ایجاد می‌کند. در ادامه اغتشاشات شدید می‌شود و آشفتگی و اغتشاشات همیشه سه‌بعدی و تصادفی می‌باشند. در حالی که برای بالک‌های ۲ و ۳ با افزایش زاویه حمله، مقدار ضریب نیروی عمودی افزایش می‌یابد. مقدار متوسط Y^+ روی بدنه موشک که از تحلیل به دست آمده است برای ماخ ۲، ۳۵ و مقدار متوسط این پارامتر در ماخ ۳ حدود ۲۷ است که با توجه به این که مقدار بهینه Y^+ در حدود ۳۰ تا ۶۰ است، این مقادیر به دست آمده نشانگر شبکه مناسب ایجاد شده حول موشک دارند.



شکل ۱۲. تغییرات ضریب نیروی محوری برحسب زاویه حمله در ماخ ۲ و مقایسه آن با داده‌های تجربی



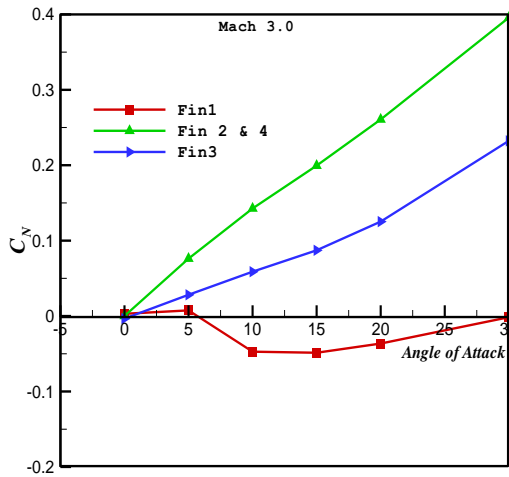
شکل ۱۳. تغییرات ضریب نیروی عمودی برحسب زاویه حمله در ماخ ۲ و مقایسه آن با داده‌های تجربی

شکل (۱۴) ضریب نیروی عمودی اختصاصی هر بالک را در ماخ ۲ نشان می‌دهد. شکل (۱۵) و شکل (۱۶) به ترتیب تغییرات ضریب نیروی محوری و ضریب نیروی عمودی برحسب زاویه حمله را در ماخ ۳ نشان می‌دهد. در این دو شکل نتایج با نتایج تجربی [۸] مورد مقایسه قرار گرفته است که نمودارها بیانگر دقت خوب نتایج می‌باشند.

جدول ۲. مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج تجربی در ماخ ۳

X_{cp}/D	C_x	C_m	C_N		α
۱۳/۳۴۴	۰/۴۷۳۵	-۰/۰۰۰۵۱	۰/۰۰۰۰۴	تحلیل	۰
۵/۰۳	۰/۵۲	۰/۰۵۶۳	-۰/۰۲۱۵	نتایج	
-	%۹/۸۲	-	-	اختلاف	
۷/۸۴۵۳	۰/۴۸۳۵۶	-۴/۳۹۰۱	۰/۵۵۸۸	تحلیل	۵
۷/۳	۰/۵۳۹	-۳/۶۶۱۵	۰/۵۰۱۵	نتایج	
%۷/۴۷	%۱۱/۴۶	%۱۹/۹	%۱۱/۴۴	اختلاف	
۷/۸۵۴	۰/۴۷۶۰	-۱۲/۰۹۳۴	۱/۵۳۹۷	تحلیل	۱۰
۷/۴۸	۰/۵۳۷	-۱۰/۱۷۴	۱/۳۵۹۵	نتایج	
%۵	%۱۲/۸۱	%۱۸/۸۶	%۱۳/۲۶	اختلاف	

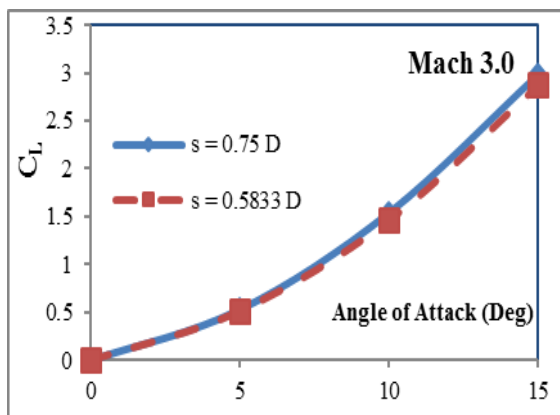
شکل (۱۷) ضریب نیروی عمودی اختصاصی هر بالک را در ماخ ۳ نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل پیداست مقدار ضریب نیروی عمودی بالک شماره ۱ (بالکی که روی قسمت بالایی بدنه قرار دارد) با افزایش زاویه حمله تا ۵ درجه کمی افزایش می‌یابد و سپس تا زاویه حمله ۱۰ درجه این مقدار کاهش



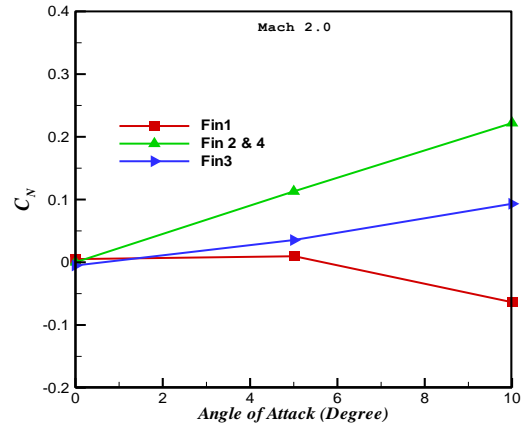
شکل ۱۷. ضریب نیروی عمودی اختصاصی هر بالک در زاویه حمله‌های مختلف در ماخ ۳

نتایج برای موشک دارای بالک با ارتفاع $0.5833D$

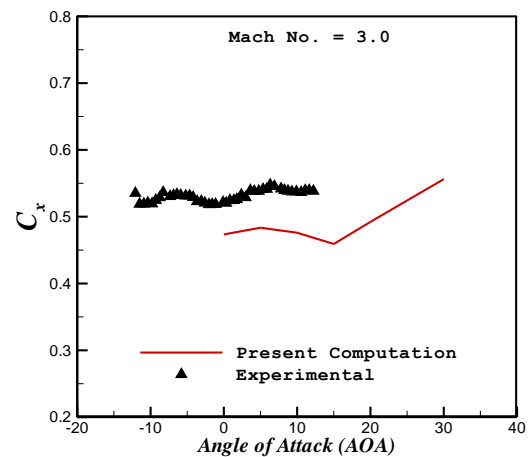
در این قسمت مشابه قسمت قبل نتایج برای موشک کامل دارای بالک با ارتفاع $0.5833D$ در ماخ ۳ و زاویه حمله‌های ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه محاسبه شده و نتایج آن با نتایج موشک دارای بالک با ارتفاع $0.75D$ مقایسه گردیده است. در شکل‌های (۱۸) و (۱۹) به ترتیب ضریب برا و ضریب پسا برای موشک کامل با دو نوع ارتفاع بالک $0.75D$ و $0.5833D$ در ماخ ۳ مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. همان‌طور که از نتایج بالک‌های تکی به‌دست آمد پیش‌بینی شد که با افزایش ارتفاع بالک مقدار ضریب برا و پسا تقریباً به‌طور یکسان افزایش یابند که این روند، هنگامی که این بالک‌ها نیز بر روی موشک کامل قرار می‌گیرند نیز حفظ می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که ضریب برا و ضریب پسا با مقدار افزایشی که در ارتفاع بالک در نظر گرفته شده است بین ۳ تا ۵ درصد افزایش یافته است.



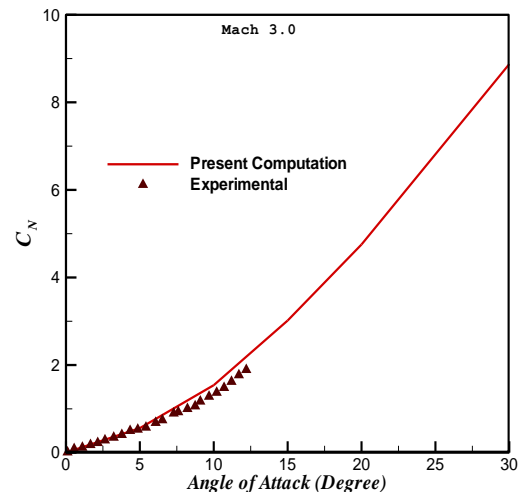
شکل ۱۸. مقایسه ضریب برا برای موشک کامل با دو نوع ارتفاع بالک $0.75D$ و $0.5833D$ در ماخ ۳



شکل ۱۴. ضریب نیروی عمودی اختصاصی هر بالک در زاویه حمله‌های مختلف در ماخ ۲

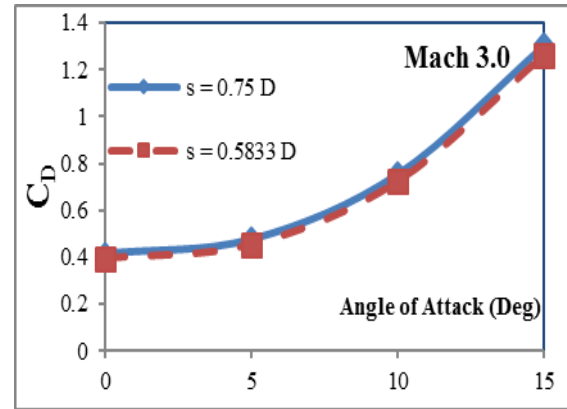


شکل ۱۵. تغییرات ضریب نیروی محوری برحسب زاویه حمله در ماخ ۳ و مقایسه آن با داده‌های تجربی



شکل ۱۶. تغییرات ضریب نیروی عمودی برحسب زاویه حمله در ماخ ۳ و مقایسه آن با داده‌های تجربی

5. DeSpirito, J., E. L. Harris, P. Weinacht, J. Sahu, and S. Dinavahi. 2000. CFD Analysis of Grid Fins for Maneuvering Missiles. *AIAA* 2000-0391.
6. DeSpirito, J., and S. Jubaraj. 2001. Viscous CFD Calculations of Grid Fin Missile Aerodynamics in the Supersonic Flow Regime. 39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV. *AIAA* 2001-0257.
7. Fournier, E.Y. 2001. Wind Tunnel Investigation of Grid Fin and Conventional Planar Control Surfaces. 39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV. *AIAA* 0256.
8. Fournier, E.Y. 2001. Wind Tunnel Investigation of High L/D Projectile with Grid Fin and Conventional Planar Control Surface. 19th International Symposium of Ballistics.
9. Spalart, P.R., and S. R. Allamaras. 1992. A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamics Flows. *AIAA Paper* 92-0439.



شکل ۱۹. مقایسه ضریب پسا برای موشک کامل با دو نوع ارتفاع بالک $0.75D$ و $0.5833D$ در ماخ ۳

نتیجه گیری

در این تحقیق بالک‌های شبکه‌ای و موشک دارای بالک شبکه‌ای در ماخ‌ها و زوایای حمله متفاوت مورد تحقیق و تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی قرار گرفته است. در ادامه با دقت مناسبی ضرایب آیرودینامیکی و جزییات جریان پیرامون موشک و بالک‌های شبکه‌ای تعیین شده و تاثیر ارتفاع بالک شبکه‌ای بر روی عملکرد و ضرایب آیرودینامیکی مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از نتایج به دست آمده مشخص می‌شود که با افزایش ارتفاع بالک‌های شبکه‌ای، ضریب برا و ضریب پسا موشک تقریباً به نسبت مساوی افزایش می‌یابند. بنابراین می‌توان این گونه گفت که علاوه بر بحث آیرودینامیک، تعیین اندازه بهینه بالک وابسته به عوامل مختلفی از جمله سازه، مشکلات ساختی، هزینه و ... می‌باشد و باید در جای خود مورد بررسی و تحقیق قرار گیرد.

پی‌نوشت

1. Tail Control
2. Sun and Khalid
3. DeSpirito
4. Roll Performance
5. Tail Control Air to Air Missile
6. Spalart-Allamaras
7. Symmetry
8. Blockage Ratio
9. Buffeting

مراجع

1. Alman, Munawar. 2010. Analysis of Grid Fins as Efficient Control Surface in Comparison to Conventional Planar Fins. 27th International Congress of the Aeronautical Sciences.
2. Karl, S. Orthner. 2004. Aerodynamic Analysis of Lattice Grid Fins in Transonic Flow. Master of Science thesis in Aeronautical Engineering, Air Force Institute of Technology.
3. Fleeman, Eugene L. 2006. *Tactical Missile Design*. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc.
4. Sun, Y., and M. Khalid. 1998. A CFD Investigation of Grid Fin Missiles. *AIAA Paper* 98-3571.