

## (یادداشت مهندسی)

## شبیه‌سازی عددی اثر بالک مشبک بر نیروهای آیرودینامیکی یک موشک

علی اصغر نادری <sup>۱</sup>	خشایار یزدانی سنگده <sup>۲</sup>	امیر حمزه فرج‌الهی* <sup>۳</sup>	محسن رستمی <sup>۴</sup>	محمد رضا سلیمی <sup>۵</sup>
دانشکده مهندسی دانشگاه امام علی (ع)	دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه گیلان	دانشکده مهندسی دانشگاه امام علی (ع)	دانشکده مهندسی دانشگاه امام علی (ع)	پژوهشکده سامانه‌های فضانوردی پژوهشگاه هوافضا

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۰۲)

## چکیده

در تحقیق حاضر با استفاده از حل عددی به پیش‌بینی میدان جریان و نیروهای آیرودینامیکی سه نوع موشک با طراحی مختلف بالک‌ها و نیز مقایسه بالک معمولی و مشبک پرداخته شده است. یکی از مهم‌ترین پارامترهایی که در پایداری و عملکرد موشک بسیار حائز اهمیت است، بالک‌ها هستند. طراحی و بهینه‌سازی این بالک‌ها می‌تواند اثرات قابل توجهی در کارایی آیرودینامیکی و مانورپذیری موشک داشته باشند. نتایج در محدوده اعداد ماخ ۰/۵ تا ۳ و زاویه حمله ۰ تا ۱۰ درجه استخراج شده‌اند. در این مطالعه پارامترهایی نظیر نیروی پسا، نیروی برآ، میدان جریان و توزیع عدد ماخ مورد تحلیل قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که بالک مشبک در موقعیت دم، بیشترین نیروی پسا را ایجاد می‌کند. همچنین نتایج نشان دادند که نیروی برآ برای موشک با بالک مشبک در موقعیت دم، از دو موشک دیگر (موشک معمولی و موشک کانارد مشبک) بیشتر است و با افزایش زاویه حمله مقدار نیروی برآ نیز بیشتر می‌شود. گشتاور لولایی نیز برای بالک‌های قرارگرفته در موقعیت کانارد، برای بالک مشبک مقادیر کمتری را نسبت به بالک معمولی نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده نیروی پسا از اعداد ماخ زیر صوت به سمت اعداد ماخ فراصوت روند افزایشی داشته و در اعداد ماخ مافوق صوت کاهش پیدا کرده است. علاوه بر این، با افزایش عدد ماخ به سمت اعداد ماخ فراصوتی، امواج عمودی در جلوی بالک تشکیل شده و سبب افزایش شدید در نیروی پسا شده است.

واژه‌های کلیدی: بالک معمولی، بالک مشبک، حل عددی، نیروهای آیرودینامیکی

## Numerical Investigation of the Effect of Lattice Fin on the Aerodynamic Forces of a Missile

A.A. Naderi	R. Yazdani Sangdeh	A.H. Farajollahi	M. Rostami	M.R. Salimi
Engineering Department of Imam Ali University	Mechanical Engineering Department of Gilan University	Engineering Department of Imam Ali University	Engineering Department of Imam Ali University	Astronautical Systems Research Institute Aerospace Research

(Received:; Accepted.)

## ABSTRACT

In the present study, using numerical solution to predict the flow field and aerodynamic forces of three types of missile with the different designs of the fin and also to comparison of the ordinary and lattice fin. One of the most important parameters in the stability and performance of a missile is the fins. The design and optimization of these fins can have significant effects on the aerodynamic efficiency and maneuverability of the missile. The results are presented in the range of Mach numbers 0.5 to 3 and the angle of attack 0 to 10 degrees. In this study, parameters such as drag force, lift force, flow field, and Mach number distribution were analyzed. The results showed that missile with lattice fin in the tail position; it produced the greatest drag force. Also, the lift force for the missile with lattice fin in the tail position is higher than the other two missiles (ordinary and lattice canard) and increases with increasing angle of attack. The momentum forces for fins located in the canard position shows less value for the lattice fin than the flat fin. The results show that the drag force also increased from subsonic Mach numbers to supersonic Mach numbers, and then decreased with rising Mach numbers. In addition, with the increase of Mach number to the hypersonic Mach numbers, normal shock waves are formed in front of the fin, causing a sharp increase in drag force.

Keywords: Ordinary fin, Lattice fin, numerical solution, aerodynamic forces.

۱- استادیار: aa.naderi@yahoo.com

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد: kh.yazdani@gmail.com

۳- استادیار (نویسنده پاسخگو): a.farajollahi@sharif.edu

۴- دانشجوی دکتری: mohsen.rostami@modares.ac.ir

۵- استادیار: mohammadsalimi@ari.ac.ir

## ۱- مقدمه

نیروهای آیرودینامیکی توسط برنر و دوپس [۳] انجام شد. این آزمایش نشان داد که تغییر زاویه انحراف تأثیر قابل توجهی بر ضرایب آیرودینامیکی موشک دارد. همچنین مشاهده شد که در زوایای انحراف بالا در رژیم زیرصوتی گشتاور پیچشی افزایش می‌یابد. پروزان و همکاران [۴] در تحقیقی با استفاده از آزمایش تونل باد به بررسی تأثیر بالک مشبک در جریان زیر صوت و فراصوت در اعداد ماخ ۰/۵ تا ۲/۵ پرداختند. آن‌ها در این آزمایش ۴ بالک مشبک را در بدنه موشک نصب کردند. همچنین در این تحقیق به بررسی زاویه پس‌گرایی<sup>۱</sup> بالک مشبک پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که در تمامی زوایا بالک مشبک موجب افزایش پایداری موشک می‌شود، اما در زوایای بالاتر پایداری موشک بیشتر خواهد بود که با افزایش عدد ماخ تأثیر تغییر زاویه نیز کاهش می‌یابد.

شبیه‌سازی عددی با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی نیز به‌عنوان یک روش کارآمد و کم‌هزینه برای بررسی و بهینه‌سازی خصوصیات آیرودینامیک یک موشک در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه محققین قرار گرفته است. لین و همکاران [۵] برای بررسی تأثیر بالک مشبک بر مشخصه‌های آیرودینامیکی، جریان عبوری از یک بالک مشبک مجزا را مورد بررسی قرار داد. همچنین آن‌ها بالک مشبک نصب‌شده بر روی بدنه موشک را نیز مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها در قالب کانتورهای فشار و اعداد ماخ برای مشخص شدن خصوصیات آیرودینامیکی و میدان جریان رسم شده‌اند. هاگسون [۷] به بررسی جریان مافوق صوت از طریق شبکه‌بندی بر روی بالک‌های مشبک و استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی پرداخت و نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌داد که در اعداد ماخ فراصوت، یک موج فشاری عمودی در پشت بالک‌ها تشکیل می‌شود. نرخ جریان درون سلول‌ها بر اثر موج فشاری درون شبکه کاهش می‌یابد و به‌طور مؤثر به‌عنوان مانعی برای جریان عمل می‌کند. سپس یک موج فشاری عمودی در جلوی بالک مشبک با افزایش پسای همراه، توسعه می‌یابد. در سرعت بالاتر، این موج فشاری توسط شبکه بلعیده می‌شود و بنابراین، پسای کاهش می‌دهد. فرج‌الهی و همکاران [۶] اثر مؤلفه‌های هندسی بالک‌ها بر عملکرد موشک معمولی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. همچنین تأثیر تعداد ردیف‌های

هدف از به‌کارگیری بالک، متعادل نگه‌داشتن موشک و تأمین پدیداری آن (انطباق محور موشک با زاویه حرکت)، در مسیر پرواز است، به همین علت به بالک‌ها تثبیت‌کننده نیز اطلاق می‌شود. به‌طور معمول برای دم موشک از بالک‌های معمولی استفاده می‌شود، اما اخیراً بالک مشبک نیز به‌دلیل مزایای فراوان مورد استفاده قرار می‌گیرد. بالک‌های مشبک سازه‌ای متشکل از چندین سطح آیرودینامیکی هستند که توسط یک چارچوب مشترک در کنار هم قرار گرفته و یک دستگاه آیرودینامیکی همه‌کاره را ایجاد می‌کنند [۱]. این وسیله می‌تواند به‌عنوان تثبیت‌کننده آیرودینامیکی، بالابر یا وسیله کنترلی استفاده شود. در شکل ۱ یک نمونه از بالک مشبک و نیز بالک معمولی نشان داده شده است.



شکل (۱): بالک مشبک (سمت راست)، بالک معمولی متداول (سمت چپ)

برخلاف بالک‌های متداول که به موازات جهت جریان هوا قرار دارند، یک بالک مشبک عمود بر جهت جریان قرار گرفته و اجازه می‌دهد که جریان از داخل شبکه مشبک آن عبور کند. مطالعات بسیاری با استفاده از آزمایش تونل باد برای بررسی تأثیر بالک مشبک بر رفتار جریان سیال اطراف موشک انجام شده است. میلر و واشنگتون [۲] مدل‌های مختلف از بالک مشبک را در تونل باد و ۳ آزمایش پرواز بررسی کردند و به نتایجی از قبیل عملکرد بهتر بالک مشبک در ماخ‌ها و زوایای حمله بالاتر دست یافتند و از دیگر یافته‌های آن‌ها تأثیر تغییرات میزان تراکم شبکه‌ها بود که با بیشتر شدن آن‌ها میزان نیروی عمودی افزایش می‌یافت و با شکل‌دهی ساده مقطع بیرونی و کاهش ضخامت دیواره یا ترکیب وابسته به آن می‌توان به‌طور قابل توجهی کارایی آیرودینامیکی را افزایش داد. آزمایش تونل باد برای بررسی تأثیر زاویه انحراف بالک مشبک بر روی

نتایج عددی به دست آمده در این تحقیق توافق خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد و تأیید می‌کند که این روش یک روش مؤثر برای شبیه‌سازی عددی جریان لزج بر روی بالک مشبک است. علاوه بر این، نتایج تحلیل گرمایش نشان ایشان می‌دهد، به دلیل اینکه بیشینه شار گرمای در ناحیه تعامل موج شوک، کوچک‌تر از مقدار آن در لبه پیشانی بالک مشبک قرار دارد، در حفاظت حرارتی از بالک مشبک تأثیر نمی‌گذارد. تربیاتی و همکاران [۱۴] به صورت تجربی به بررسی و مقایسه اثر الگوهای مختلف هندسی بالک‌های مشبک بر نیروهای آیرودینامیکی پرداختند. آن‌ها در این تحقیق ساختارهای مختلف هندسه پره‌های موجود در بالک مشبک و نیز فاصله پره‌ها را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که طرح الماسی شکل پره‌ها با فاصله بیشینه، بهترین عملکرد را در افزایش ضریب برآ و نیز افزایش زاویه واماندگی<sup>۲</sup> موشک دارد.

در این زمینه، بر روی موشک‌های موجود در داخل کشور، هنوز کارهای جدی صورت نگرفته است. با انجام این طرح و کارهای مشابه می‌توان اطلاعات خوبی در زمینه استفاده از بالک مشبک به عنوان جایگزینی برای بالک مشبک هم در موقعیت کانارد و نیز در موقعیت دم بر روی نیروهای آیرودینامیکی وارد بر موشک‌های موجود تشکیل داد و کارایی این روش برای موشک‌های مورد بررسی را تعیین نمود. اثر استفاده از بالک بر ضرایب آیرودینامیکی موشک‌ها مانند اثر مولدهای گردابه‌ها بوده که موجب شکستن گردابه‌ها بهبود کارایی آیرودینامیکی می‌شود [۱۵]. لازم به ذکر است که در این مقاله، اثرات بالک مشبک هم در موقعیت کانارد و هم در دم موشک بر ضرایب آیرودینامیکی یک موشک که در واقع شامل اثرات تداخلی بال و بدنه است، مورد مطالعه قرار گرفته است. البته، این موضوع به صورت تجربی قبلاً مطالعه شده که تنها ضرایب نیروهای آیرودینامیکی موشک ارائه شده و هیچ اطلاعاتی راجع به جزئیات توزیع فشار روی بدنه موشک و اثرات بالک مشبکی بر خطوط جریان ارائه نشده است. با توجه به لزوم اعمال تغییرات توزیع فشار روی بدنه موشک در محاسبات سازه‌ای آن، نتایج ارائه شده در این مقاله برای انجام طراحی مجدد و یا بهینه‌سازی موشک‌های موجود بسیار حیاتی است.

بالک نیز مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که با افزایش تعداد ردیف ضریب نیروی برآ و همچنین ضریب نیروی پسا افزایش پیدا می‌کند، اما به دلیل اینکه شدت افزایش ضریب نیروی برآ بیشتر است نسبت ضریب نیروی برآ به ضریب نیروی درگ نیز با بیشتر شدن تعداد ردیف بالک، افزایش می‌یابد. زنگ [۸] مطالعاتی را برای کاهش پسا در بالک مشبک انجام داد. نتایج حاصل نشان می‌دهد وقتی که عدد ماخ به رژیم گذر صوتی نزدیک می‌شود، نیروی پسا آرام زیاد شده و با افزایش بیشتر عدد ماخ، از شرایط گذر صوتی به مافوق صوت، نیروی پسا به صورت نسبتاً آرام کم می‌شود. اعتقاد پژوهشگران بر این است که می‌توان این را به توقف جریان در سلول‌های شبکه در شرایط گذر صوتی نسبت داد. محمد بک [۹] به صورت تجربی در تونل باد و عددی در اعداد ماخ مادون صوت بالک مشبک را مورد بررسی قرار داد و به این نتیجه رسید که در زاویه حمله و سرعت‌های بالا، بالک مشبک عملکرد بهتری دارد و بیشترین اختلاف بین نتایج عددی و تجربی در زاویه حمله ۵ درجه رخ داده است. کریشناپ و همکارانش [۱۰] بر روی بالک مشبک موشک G16 در سرعت‌های مادون صوت و مافوق صوت به صورت تجربی و عددی بررسی انجام دادند و نشان دادند که در زوایای حمله بالا نسبت نیروی برآ به پسا بهبود یافته و همچنین نیروی پسا نیز کمتر شده است. در مجموع نتایج آن‌ها نشان داد که بالک‌های مشبک در زوایای حمله بالا در سرعت‌های مافوق صوت دارای عملکرد بهتری هستند. هانگ و همکاران [۱۱] به شبیه‌سازی‌های هوایی استاتیکی جریان هوا بر روی یک موشک با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی در جریان‌های صوتی و مافوق صوت انجام دادند. نتایج آن‌ها برای یک باله مشبک عمودی و افقی نصب شده بر روی بدنه ارائه شده است. فاذا و همکاران [۱۲] در مورد ویژگی‌های آیرودینامیکی باله‌های مشبک در مقایسه با باله‌های مشبک دیگر با زاویه انحراف<sup>۱</sup> مختلف با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی صحبت کردند. لئو و همکاران [۱۳] جریان لزج بر روی موشک با دم کنترل شده با باله‌های مشبک در عدد ماخ ۲/۵ و چندین زاویه حمله با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی محاسبه را بررسی کردند. علاوه بر این، آن‌ها توزیع شار حرارتی بر روی باله‌های مشبک را بررسی کرده و اثرات متقابل موج شوک بر روی شار گرما را بررسی کردند.

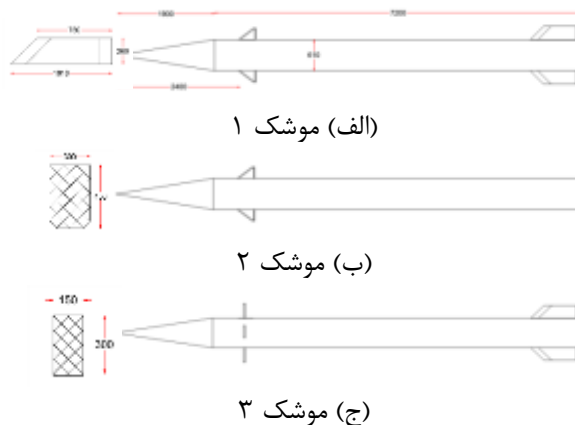
## ۲- مدل محاسباتی

هندسه مورد بررسی در این تحقیق یک موشک کانارد کنترل است. در این هندسه چهار بالک معمولی در دم و چهار بالک در موقعیت کانارد مطابق شکل ۲ قرار دارند.



شکل (۲): هندسه موشک کانارد کنترل با بالک‌های معمولی

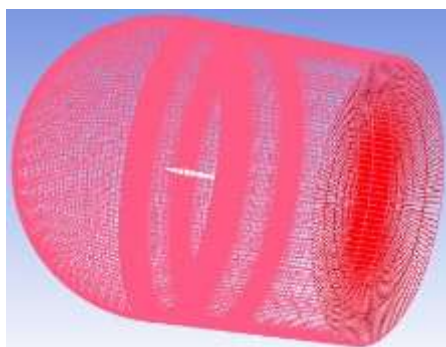
در این تحقیق موشک فوق که دارای بالک‌های مسطح است (موشک شماره ۱)، با دو موشک دیگر که دارای بالک‌های مشبک در موقعیت دم (موشک شماره ۲) و موقعیت کانارد (موشک شماره ۳) است، مقایسه شده است. ابعاد هندسی این سه موشک و نیز جانمایی بالک مشبک در دو موشک یادشده در شکل ۳ نمایش داده شده است. طول کلی موشک برابر ۹/۱ متر که طول بخش ثابت موشک ۷/۲ متر و طول نوک موشک برابر ۱/۹ متر است. قطر موشک نیز در این تحقیق برابر ۰/۶۱ متر در نظر گرفته شده است. در بالک‌های مشبک این ایرفویل‌ها در زاویه ۴۵ نسبت به محور موشک و ۹۰ نسبت به یکدیگر قرار گرفته و شبکه‌ای متقاطع را تشکیل می‌دهند.



شکل (۳): ابعاد هندسی موشک کانارد کنترل در سه

هندسه مختلف (ابعاد به میلی‌متر)

به‌منظور شبکه‌بندی هندسه موردنظر، از نرم‌افزار گمبیت<sup>۱</sup> استفاده شده است. همچنین با توجه به ابعاد بزرگ موشک، دامنه حل به‌صورتی انتخاب شده است که بتوان برای ورود جریان و همچنین جریان اطراف آن از شرط میدان فشار دوردست استفاده کرد (شکل ۴). همچنین برای خروج جریان از شرط فشار خروجی و برای دیواره‌های موشک و بالک‌ها از شرط عدم لغزش و نفوذناپذیری استفاده شده است. فشار استاتیک جریان آزاد ۱ اتمسفر و دمای آن ۳۰۰ کلون است. جریان هوا از رفتار گاز ایده آل پیروی می‌کند.



شکل (۴): دامنه حل عددی

لازم به ذکر است که با توجه به ابعاد کوچک بالک‌های نصب‌شده بر روی سطح موشک و نظر به اینکه بیشترین تغییرات در مؤلفه‌های حرکتی و حرارتی در این ناحیه اتفاق می‌افتد، تعداد سلول‌های محاسباتی لازم برای به دست آوردن جواب صحیح و دقیق بسیار افزایش می‌یابد. در این راستا برای موشک شماره یک از شبکه‌ای با تعداد ۲۳۵۷۸۸۶ سلول و با ساختار با سازمان استفاده شده است. موشک شماره ۲ و ۳ به‌دلیل داشتن بالک‌های مشبک و نظر به پیچیدگی هندسه این بالک‌ها نیاز به تعداد شبکه‌های بیشتری برای حصول جواب قابل قبول خواهند بود. بدین منظور برای موشک شماره ۲ از شبکه‌ای با تعداد ۵۶۲۰۵۱۴ سلول استفاده شده است. همچنین برای موشک شماره ۳ از شبکه‌ای با تعداد ۳۴۸۳۵۴۶ سلول در نظر گرفته شده است. دلیل کاهش تعداد سلول‌های موشک ۳ نسبت به موشک شماره دو، کوچک‌تر و کم‌تر بودن تعداد شبکه‌های بالک مشبک است. در «شکل ۵» نمایی از شبکه تولیدشده در اطراف انواع مختلف بالک نمایش داده شده است.

هوا از رفتار گاز ایده‌آل پیروی می‌کنند. محاسبات برای اعداد ماخ و برای زاویه حمله‌های مختلف انجام شده است.

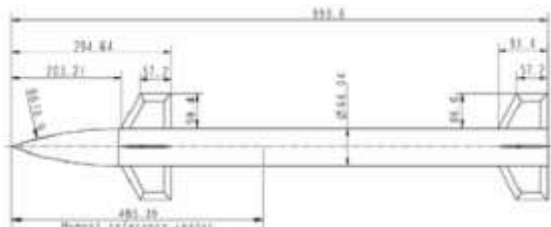
#### ۴- بررسی استقلال حل از شبکه و صحت سنجی نتایج

به‌منظور بررسی عدم وابستگی نتایج حل عددی به شبکه محاسباتی، ضریب پسا برای عدد ماخ در زاویه حمله ۱۰ درجه به‌عنوان پارامتر استقلال از شبکه انتخاب شده است. همان‌گونه که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، برای مطالعه استقلال از شبکه از شبکه از پنج شبکه‌بندی مختلف استفاده شده است. با توجه به شکل برای موشک موردنظر از شبکه‌ای با تعداد ۲۳۵۷۸۸۶ سلول و با ساختار با سازمان به‌عنوان شبکه مناسب انتخاب شده است. لازم به ذکر است که استقلال از شبکه برای دیگر شرایط نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول (۱): تغییرات ضریب پسا بر حسب تعداد سلول

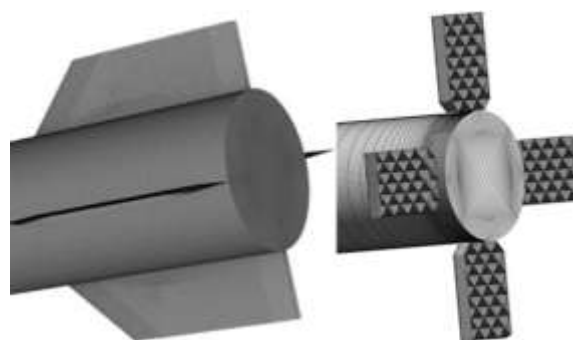
تعداد شبکه	ضریب پسا	درصد تغییرات
۶۸۵۸۸۷	۰/۳۸	-
۹۵۲۴۵۶	۰/۳۵۲	۱۰
۱۵۲۳۶۵۶	۰/۳۲۲	۸/۷۷
۲۳۵۷۸۸۶	۰/۲۹۵	۵/۴۵
۲۸۶۵۳۵۲	۰/۲۹۲	۱/۰۲

به‌منظور بررسی صحت نتایج عددی حاضر، نتایج پژوهش حاضر با نتایج آگول و همکاران [۱۶] مقایسه شده است. ابعاد موشک مورد بررسی آن‌ها به‌صورت شکل ۶ است.



شکل (۶): هندسه دوبعدی موشک تحقیق مرجع [۱۶] (ابعاد به سانتی‌متر)

به این منظور نتایج ضریب پسا در عدد ماخ ۱/۷۵ در زاویه حمله ۵- تا ۳۰ درجه مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل (۵): نمایی از شبکه تولیدشده در سطوح بالک‌ها

#### ۲-۱- معادلات حاکم

در این پژوهش برای شبیه‌سازی عددی و گسسته‌سازی معادلات حاکم بر جریان سیال اطراف جسم از روش حجم محدود استفاده شده است. معادلات حاکم برای تحقیق حاضر که جریان آن تحت شرایط سه بعدی، لزج، تک فاز با صرف‌نظر از نیروهای حجمی قرار دارد، شامل معادلات پیوستگی، مومنتم (ناویر استوکس) و انرژی است و به ترتیب توسط روابط زیر توصیف می‌شوند [۱۵].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \Delta(\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\vec{V}) + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \right] = -\nabla p + \bar{\tau} + \rho f \quad (2)$$

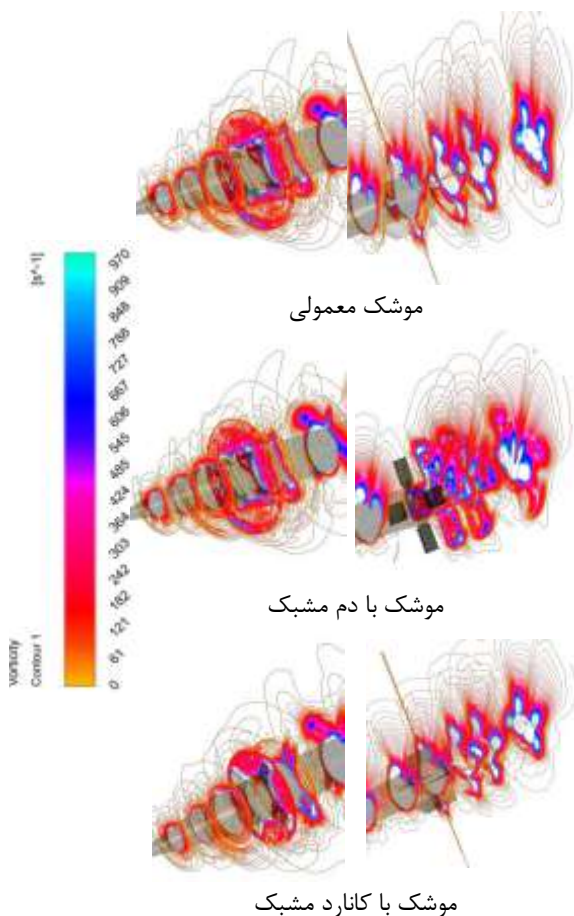
$$\rho \left[ \frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot (h \vec{V}) \right] = -\frac{Dp}{Dt} + \nabla \cdot [K \nabla T] + \bar{\tau} \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \quad (3)$$

در رابطه (۲) مجموع نیروهای حجمی بر واحد جرم است. همچنین در رابطه (۳)، رابطه  $\partial h = c_p \partial T$  برقرار است. در روابط فوق لزجت حاصل مجموع لزجت سیال و لزجت آشفتگی می‌باشد که لزجت آشفتگی از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

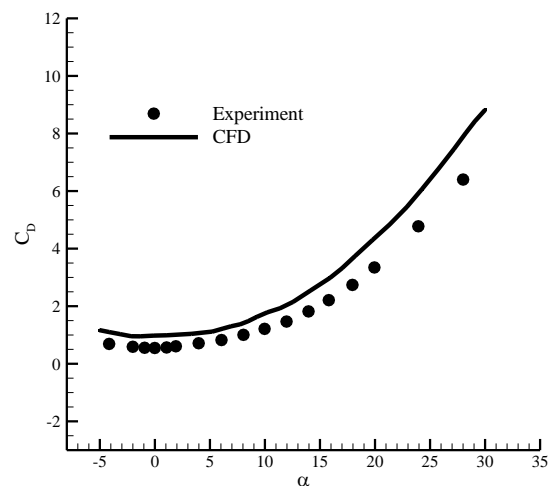
در رابطه (۴) انرژی جنبشی آشفتگی و  $\varepsilon$  نرخ اضمحلال انرژی جنبشی آشفتگی است. برای ورود جریان به دامنه حل و همچنین اطراف دامنه حل از شرط میدان فشار دوردست استفاده شده است و برای خروج جریان از شرط فشار خروجی و برای دیواره‌های موشک و بالک‌ها از شرط عدم لغزش و نفوذناپذیری استفاده شده است. فشار استاتیکی جریان آزاد ۱ اتمسفر و دمای آن ۳۰۰ کلوین است. جریان

بشتری به سطح چسبیده و جدایش آن به تعویق می‌افتد، این امر سبب می‌شود که موشک در زوایای حمله بالاتری نیز کارایی داشته باشد. لذا بررسی دقیق آن‌ها در اطراف موشک می‌تواند در درک بهتر چگونگی تغییرات در مؤلفه‌های آیرودینامیکی مؤثر باشد. بدین منظور گردابه‌های ایجادشده در اطراف موشک برای هر سه موشک در زاویه حمله ۱۰ درجه و عدد ماخ ۳ در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به شکل، گردابه ایجادشده در موشک با دم مشبک بزرگ‌تر و قوی‌تر از موشک‌های دیگر است. این موضوع به‌خصوص در پشت بالک‌های انتهایی موشک مشخص‌تر دیده می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که گردابه ایجادشده در نزدیکی بالک‌های جلویی موشک با کانارد مشبک در مقایسه با موشک معمولی دارای قدرت بیشتری است. درحالی‌که گردابه ایجادشده در پشت بالک انتهایی این دو موشک تفاوت چندانی ندارد.



شکل (۸): گردابه ایجادشده در اطراف موشک‌ها در عدد ماخ ۳ در زاویه حمله ۱۰

همان‌گونه که از شکل ۷ مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه حمله ضریب پسا افزایش می‌یابد و با جدایش جریان این افزایش به‌صورت ناگهانی خواهد بود. در ضمن تا زاویه حدود ۲۰ درجه اختلاف حل عددی صورت گرفته با داده‌های تجربی ناچیز بوده است. در زاویه حمله ۳۰ درجه نتایج مربوط به ضریب پسا با خطای ۱۷ درصد با نتایج تجربی تطابق دارد.

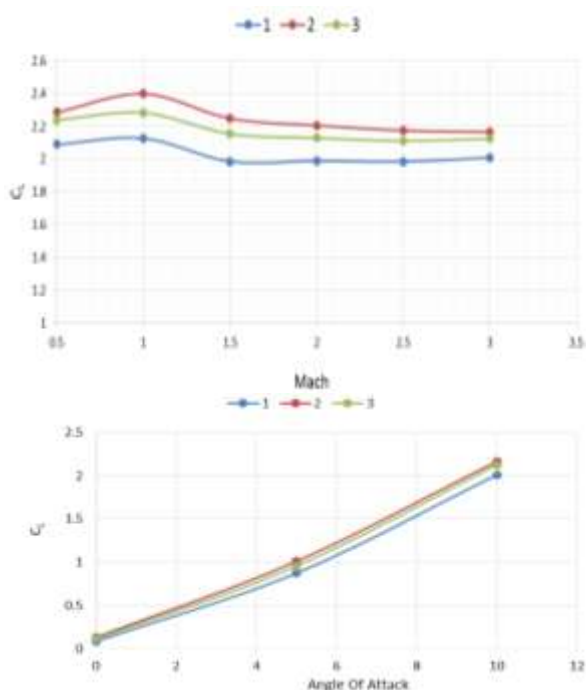


شکل (۷): مقایسه ضریب پسا حل عددی حاضر با نتایج تجربی

## ۵- نتایج و بحث

در این بخش، موشک دارای بالک‌های مسطح به‌اختصار موشک معمولی، موشک دارای بالک‌های مشبک در موقعیت دم موشک با دم مشبک و موشک دارای بالک‌های مشبک در موقعیت کانارد موشک با کانارد مشبک نام‌گذاری شده است. جریان حول سطوح موشک و به‌خصوص جریان در اطراف بالک‌های یک موشک به‌منظور بررسی اثرات تغییر هندسه بر نیروها و مؤلفه‌های آیرودینامیکی آن از اهمیت بالایی برخوردار است. گردابه‌های ایجادشده در اطراف بدنه موشک ممکن است تأثیرات مختلفی بر روی نیروهای وارده بر موشک داشته باشد. از طرفی این گردابه‌ها می‌تواند تأثیر منفی داشته و منجر به چرخش موشک می‌شود. از طرفی دیگر، گردابه‌های ایجادشده در صورت داشتن قدرت کافی می‌تواند با تأخیر انداختن در جدا شدن جریان، احتمال ایجاد حالت واماندگی را در زاویه حمله بالا کاهش دهند. در این صورت با مهیا شدن شرایط پرواز در زوایای حمله بالا، موشک دارای توانایی مانور پذیری بیشتری می‌شود. به‌عبارت‌دیگر با افزایش قدرت گردابه، جریان به میزان

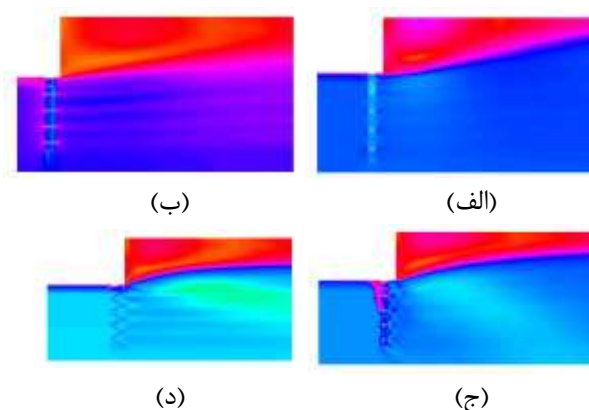
در ادامه این بخش به بررسی تغییرات ضرایب آیرودینامیکی تحت تأثیر تغییر عدد ماخ و زاویه حمله در سه موشک مورد بررسی، پرداخته می‌شود. در اولین مورد نیروی برآ به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ضرایب آیرودینامیکی و پروازی موشک در هر سه موشک بررسی شده است و نتایج در قالب نمودارهایی در شکل ۱۰ بر حسب تغییرات عدد ماخ و زاویه حمله نمایش داده شده است. با توجه به شکل، مقدار نیروی برآ از اعداد ماخ زیر صوت به سمت ماخ یک افزایش می‌یابد و سپس با حرکت به سمت اعداد ماخ مافوق صوت روند کاهشی دارد. این پدیده به علت تشکیل امواج ضربه‌ای بر روی سطوح کنترلی می‌باشد. همچنین می‌توان دید که افزایش زاویه حمله موجب بهبود نیروی برآ در هر سه موشک شده است. در مقایسه بین سه موشک می‌توان مشاهده نمود که موشک با دم مشبک در بهترین حالت موجب افزایش ۱۵/۷ درصدی و موشک با کانارد مشبک موجب افزایش ۹/۵ درصدی نسبت به موشک معمولی خواهد شد.



شکل (۱۰): ضریب نیروی برآ برای سه موشک مورد بررسی برای عدد ماخ (بالا) و زاویه حمله (پایین) مختلف

در ادامه نیروی پسا در اعداد ماخ و زاویه حمله مختلف، در شکل ۱۱ ارائه شده است. همان‌طور که از این نمودار مشخص است نیروی پسا در موشک با دم مشبک به

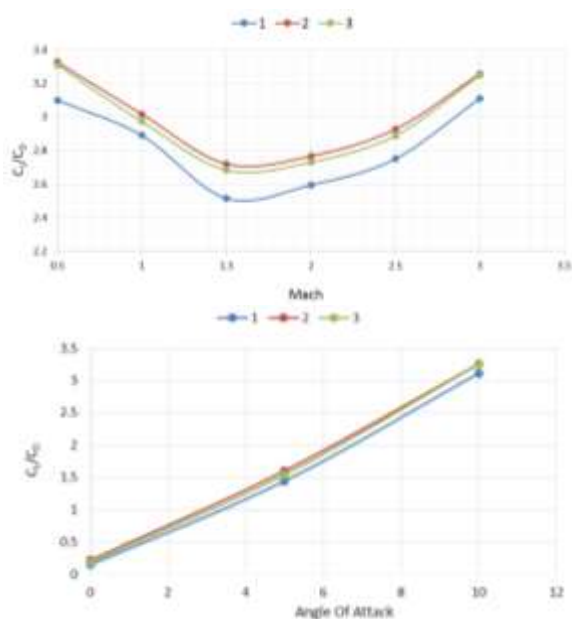
عدد ماخ تأثیر بسیار زیادی بر نیروهای آیرودینامیکی و به‌خصوص نیروی پسا یک موشک دارد، بنابراین، برای درک بهتر دلایل تغییرات در نیروهای آیرودینامیکی و نیز بررسی اثر بالک مشبک بر توزیع عدد ماخ، تغییرات عدد ماخ بر روی سطح موشک در شکل ۹ برای اعداد ماخ ورودی مختلف برای بالک مشبک موشک با دم مشبک (به‌عنوان نمونه) نمایش داده شده است. در سرعت‌های پایین، به‌دلیل نازک بودن دیواره‌های بالک مشبک و ایجاد اختلال اندکی در جریان هوای عبوری از موشک، تغییر زیادی در توزیع عدد ماخ در هنگام عبور از بالک مشبک دیده نمی‌شود. با این‌حال این رفتار در عدد ماخ نزدیک ۱ تغییر می‌کند. در جریان‌های فراصوتی به‌دلیل وقوع پدیده خفگی<sup>۱</sup> در جلوی بالک مشبک، جریان هوا در این منطقه دچار تغییرات بیشتری می‌شود. این موضوع به این دلیل است که شبکه مشبک به‌طور مؤثر به‌عنوان مانعی بر سر راه جریان عمل می‌کند و کاهش نرخ جریان عبوری از بالک را به همراه دارد. با توجه به تشکیل امواج عمودی<sup>۲</sup>، پسا به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته و توانایی کنترل آن کاهش می‌یابد. در سرعت‌های بالاتر و در جریان‌های مافوق صوت، شوک عمودی مستهلک شده و در عوض، امواج شوک بر روی لبه-ها به‌صورت مایل تشکیل می‌شوند. زاویه مورب با افزایش عدد ماخ، کاهش می‌یابد تا شوک‌های ایجادشده بدون تقاطع با یکدیگر از آن عبور کنند. در این رژیم پسا کاهش چشم‌گیری می‌یابد و قابلیت کنترل بالک مشبک بهتر می‌شود.



شکل (۹): توزیع عدد ماخ برای موشک شماره دو برای اعداد ماخ الف) ۰/۵، ب) ۰/۸، ج) ۱/۵ و د) ۳

1- Choke  
2- Normal Shock

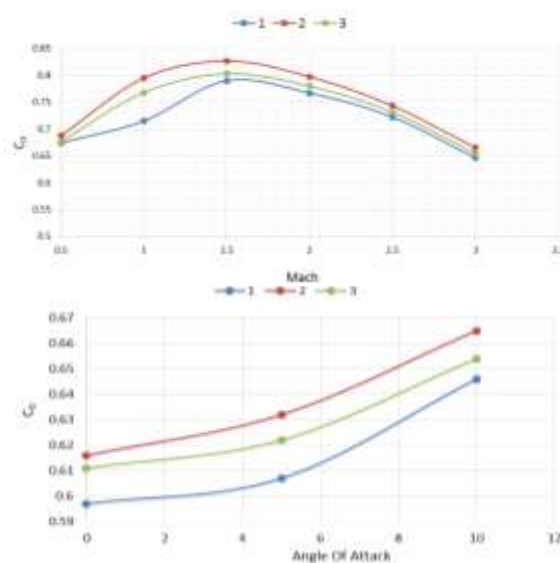
نیروی پسا در موشک با دم مشبک به بیشترین مقدار خود رسیده است ولی به دلیل اینکه این موشک دارای لیفت بالاتری نیز است، نسبت نیروی برآ به پسا این موشک همچنان دارای بیشینه مقدار است. نکته مهم دیگر این است که نسبت نیروی برآ به پسا در موشک با کانارد مشبک کمتر از موشک با دم مشبک است. در خصوص تغییرات این نسبت به زاویه حمله مشاهده می‌شود که همانند نتایج قبلی، با افزایش زاویه حمله این نسبت نیز افزایش می‌یابد. همچنین نسبت ضریب لیفت به پسا از اعداد ماخ زیرصوتی به سمت اعداد ماخ فراسوتی افزایش یافته و به بیشینه مقدار خود می‌رسد، این صوت این ضریب دوباره افزایش می‌یابد. همان‌طور که قبلاً گفته شد، این پدیده به دلیل تشکیل موج شوک و کاهش پسای موجی بر روی بالک‌هاست.



شکل (۱۲): نسبت ضریب نیروی برآ به ضریب نیروی پسا برای سه موشک مورد بررسی برای عدد ماخ (بالا) و زاویه حمله (پایین) مختلف

نسبت گشتاور پیچشی به تغییر زاویه حمله نشان‌دهنده پایداری موشک است که مقادیر منفی این نسبت نشان از پایداری موشک دارد. در نمودار شکل ۱۳ این نسبت برای هر سه موشک در زاویه حمله ۱۰ و اعداد ماخ مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که از نمودارها مشخص است برای موشک با دم مشبک گشتاور پیچشی بیشتری به موشک

بیشترین مقدار خود رسیده است. موشک با کانارد مشبک پسا بیشتری را نسبت به بالک‌های مسطح نشان می‌دهد، درحالی‌که پسا ایجادشده در آن از موشک با دم مشبک کمتر است. افزایش پسا در موشک‌های با دم و کانارد مشبک نسبت به موشک معمولی را می‌توان به علت وجود بالک مشبک دانست. همان‌طور که قبلاً ذکر شد یکی از معایب این بالک‌ها، پسا بالاتر آن‌ها نسبت به بالک‌های مسطح است. ضریب پسا از اعداد ماخ زیرصوتی به سمت اعداد ماخ فراسوتی افزایش یافته و به بیشینه مقدار خود می‌رسد، این افزایش پسا به علت ایجاد موج عمودی در جلوی بالک است که مانعی بر سر عبور جریان ایجاد می‌کند. سپس با افزایش عدد ماخ به سمت مافوق صوت این ضریب دوباره کاهش می‌یابد. این امر به دلیل تشکیل امواج ضربه‌ای بر روی بالک‌ها است که سبب ایجاد پسای موجی<sup>۱</sup> کمتری می‌شود. همچنین نیروی پسا با افزایش زاویه حمله در هر سه موشک روند صعودی دارد.

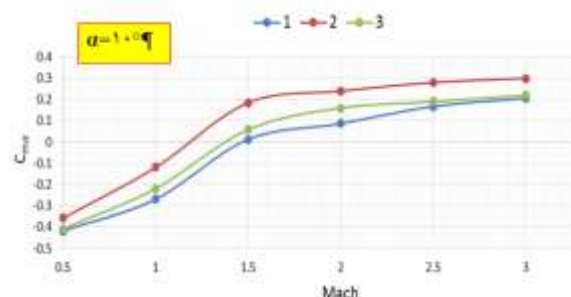
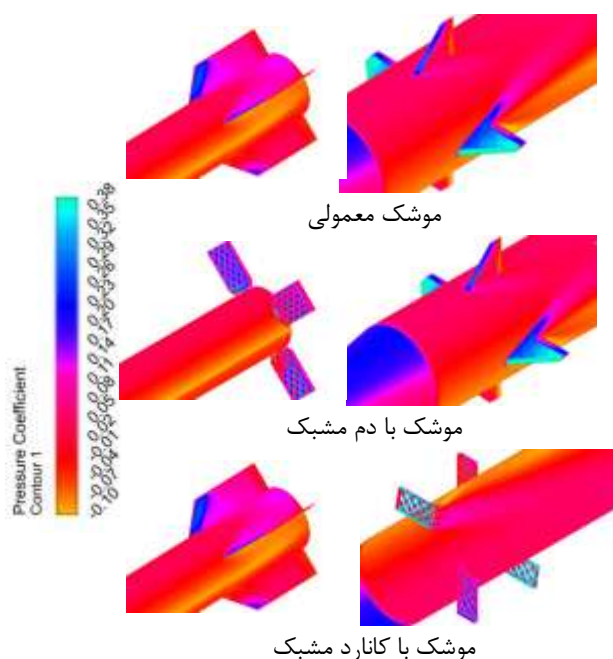


شکل (۱۱): ضریب نیروی پسا برای سه موشک مورد بررسی برای عدد ماخ (بالا) و زاویه حمله (پایین) مختلف

نسبت نیروی برآ به نیروی پسا که منتج از دو نتیجه بحث شده قبلی است، یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های قابل بررسی در شرایط پروازی است. به همین دلیل نتایج این مؤلفه در قالب نمودارهایی در اعداد ماخ و زاویه حمله مختلف، در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. علی‌رغم اینکه



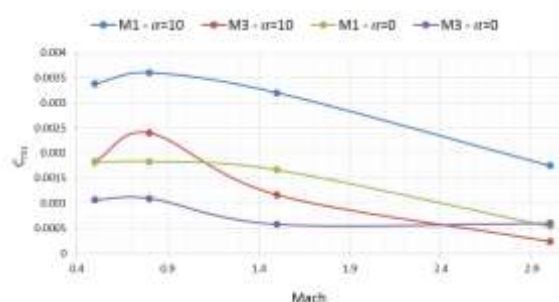
مشبک نواحی با ضریب فشار بزرگ‌تر در ناحیه مشبک به‌شدت بیشتر و وسیع‌تر از دو موشک دیگر است. دلیل این امر شکل‌گیری گردابه با قدرت بیش‌تر در بالک‌های مشبک است. همین پدیده در قسمت کانارد برای موشک با کانارد مشبک نیز دیده می‌شود، اما به‌دلیل کوچک‌تر بودن قسمت مشبک در موشک با کانارد مشبک، این پدیده در نیروهای آیرودینامیکی تأثیر کمتر و گذرابی دارد.



شکل (۱۳): نسبت ضریب گشتاور پیچشی

گشتاور لولایی (چرخش حول محور عرضی یا گام) برای موشک معمولی و موشک با کانارد مشبک در زاویه حمله صفر و ۱۰ درجه در شکل ۱۴ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مشخص است گشتاور اعمالی به بالک مشبک مقادیر کمتری نسبت به بالک معمولی دارد که این ویژگی سبب استفاده از سیستم محرک کوچک‌تری برای آن‌ها می‌شود. همچنین دیده می‌شود که اختلاف گشتاور ایجادشده در محدوده جریان صوتی بیشینه است.

شکل (۱۵): توزیع ضریب فشار فشار در عدد ماخ ۳ و زاویه حمله ۱۰ برای هر سه موشک



شکل (۱۴): گشتاور لولایی بالک معمولی و مشبک در موقعیت کانارد برای زاویه انحراف ۱۰ درجه

۶- نتیجه‌گیری  
در این مقاله با استفاده از شبیه‌سازی سه‌بعدی عددی، جریان سیال عبوری از یک موشک با طراحی مختلف بالک (موشک شماره یک با بالک معمولی در دو موقعیت کانارد و دم، موشک شماره ۲ با بالک معمولی در موقعیت کانارد و بالک مشبک در موقعیت دم، موشک شماره ۳ با بالک مشبک در موقعیت کانارد و بالک معمولی در موقعیت دم) مورد بررسی قرار گرفت و نتایج مختلف از قبیل ضریب نیروی پسا (CD)، ضریب نیروی برآ (CL)، گشتاور خمشی (CM)، توزیع عدد ماخ و فشار و گردابه جریان ارائه گردید. با اینکه نسبت سطح تماس برای بالک‌های هر سه مدل تقریباً مشابه است اما از نتایج به‌دست‌آمده مشخص گردید که موشک شماره دو دارای بیشینه تولید نیروی پسا بوده است.

در شکل ۱۵ توزیع ضریب فشار در عدد ماخ ۳ و زاویه حمله ۱۰ برای هر سه موشک در اطراف بالک‌های انتهایی و جلویی موشک نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، توزیع این ضریب در ابتدای بالک‌های معمولی دارای بیشینه مقدار است. همچنین مقادیر این ضریب در پره‌های بالک مشبک نیز قابل توجه است. در موشک با دم

3. Berner, C. and Dupuis, A., "Wind tunnel tests of a grid finned projectile configuration", In 39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, pp. 105, 2001.
4. Pruzan, D., Mendenhall, M., Rose, W., and Schuster, D., "Grid fin Stabilization of the Orion Launch Abort Vehicle", In 29th AIAA Applied Aerodynamics Conference, pp. 3018, 2011.
5. Lin, H., Huang, J. C., and Chieng, C. C., "Navier-Stokes Computations for Body/Cruciform Grid Fin Configuration", Journal of spacecraft and rockets, Vol. 40, no. 1, pp. 30-38, 2003.
6. Hughson, M., Blades, E., and Abate, G., "Transonic Aerodynamic Analysis of Lattice Grid Tail Fin Missiles", In 24th AIAA Applied Aerodynamics Conference, pp. 3651, 2006.
7. Farajollahi, A. H., Yazdani, K., and Naderi, A. A., "The Effect of the Geometric Parameters of the Fin on Aerodynamic Performance of Missile", Fluid Mechanics and Aerodynamics Journal, Vol. 8-2, pp. 141-151, 2020, URL: [https://fma.ihu.ac.ir/article\\_205276.htm](https://fma.ihu.ac.ir/article_205276.htm).
8. Zeng, Y., Cai, J., Debiassi, M., and Chng, T. L., "Numerical Study on Drag Reduction for Grid-Fin Configurations", In 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition, pp. 1105, 2009.
9. Bak, K. M. "Experimental Investigation and Computational Fluid Dynamics Analysis of Missile with Grid Fin in Subsonic Flow", International Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 2, no. 11, pp. 6214-6220, 2010.
10. Prashanth, H. S., Ravi, K. S., and Krishnappa, G. B., "Aerodynamic Characteristics of G16 Grid Fin Configuration at Subsonic and Supersonic Speeds", International Journal of Engineering Research and General Science, Vol. 2, no. 5.14, pp. 129-135, 2014.
11. Huang, C., Wen, L. I. U., and Guowei, Y. A. N. G., "Numerical Studies of Static Aeroelastic Effects on Grid Fin Aerodynamic Performances", Chinese Journal of Aeronautics, Vol. 30, no. 4, pp. 1300-1314, 2017.
12. Faza, G. A., Fadillah, H., Silitonga, F. Y., and Moelyadi, M. A., "Study of Swept Angle Effects on Grid Fins Aerodynamics Performance", In Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1005, No. 1, p. 012013, 2018.
13. Liu, Y., Xia, Z. X., and Liu, J., "Numerical Simulation of Aerodynamic Characteristics and Heating for Grid Fin Missiles", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G",

علت این موضوع علاوه بر وجود بالک مشبک، اندازه بزرگتر این نوع بالک و نیز موقعیت بالک مشبک نسبت به موشک شماره سه است. لازم به ذکر است که نیروی پسا در هر سه موشک، با افزایش اعداد ماخ زیرصوتی به سمت اعداد ماخ فراصوت روند افزایشی داشته و در اعداد ماخ مافوق صوت دوباره کاهش پیدا کرده است. نیروی برآ برای موشک دوم بیشتر از موشک اول و برای موشک سوم بیشتر از موشک دوم است. نیروی برآ در اعداد ماخ زیرصوتی روند افزایشی و در اعداد ماخ مافوق صوت روند کاهشی دارد. نکته دیگر این است که نیروی پسا و برآ با افزایش زاویه حمله، افزایش پیدا کرده است. توزیع عدد ماخ بر روی بالک مشبک نشان می‌دهد که با افزایش عدد ماخ به سمت اعداد ماخ فراصوتی، امواج عمودی در جلوی بالک تشکیل شده و سبب افزایش شدیدی در نیروی پسا شده است. همچنین بالک مشبک موجب می‌شود که گردابه‌های ایجادشده در اطراف موشک قوی‌تر شود.

## ۷. فهرست علائم

### علائم انگلیسی

$C_\mu$	ضریب ثابت مدل آشفته‌گی $k-\epsilon$
$c_p$	ظرفیت گرمایی ویژه، $J/kg \cdot K$
$h$	انتالی، $J/kg$
$k$	انرژی جنبشی آشفته‌گی، $J$
$K$	ضریب رسانش حرارتی، $K/m \cdot K$
$T$	دما، $^\circ C$

### علائم یونانی

$\epsilon$	نرخ اضمحلال انرژی جنبشی آشفته‌گی، $W$
$\rho$	چگالی، $kg/m^3$

## ۸- مراجع

1. Zeng, Y., Cai, J., Debiassi, M., and Chng, T. L., "Numerical Study on Drag Reduction for Grid-Fin Configurations", In 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition, pp. 1105, 2009.
2. Washington, W. D. and Miller, M. S., "Experimental Investigations of Grid Fin Aerodynamics: a Synopsis of Nine Wind Tunnel and Three Flight Tests", In AGARD Applied Vehicle Technology Panel Symposium and Meeting on Missile Aerodynamics, Paper, Vol. 10, 1998.

Journal of Aerospace Engineering, Vol. 233, no. 7, pp. 2368-2377, 2019.

14. Tripathi, M., Sucheendran, M. M., and Misra, A., "Experimental Analysis of Cell Pattern on Grid Fin Aerodynamics in Subsonic Flow. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G", Journal of Aerospace Engineering, 0954410019872349, 2019.
15. Yue, C. G., Chang, X. L., Yang, S. J., and Zhang, Y. H., "Numerical Simulation on Aerodynamic Characteristic of an Air-to-Air Missile", In International Workshop on Computer Science for Environmental Engineering and EcoInformatics, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 472-476, 2011.