

مطالعه پارامترهای آیرودینامیکی موشک بالک خمیده و تخت با دو جنس آلومینیوم و فولاد و تاثیر آن بر تغییر شکل الاستیک به روش برهم کنش دو طرفه میان سیال و سازه

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران،
heidari.shahin1@gmail.com
استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران،
younesbakhshan2222@gmail.com
دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران،
jkhoshidi@yahoo.com
دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی شیراز، شیراز، ایران،
dr.afsari1@yahoo.com

شاهین حیدری

یونس بخشان*

جمشید خورشیدی مال احمدی

احمد افسری

چکیده

برای پیش بینی دقیق رفتار آیروالاستیک ایستایی، از روش برهم کنش دو طرفه میان سیال و سازه (FSI) برای محاسبه تغییر شکل های ایستایی و مشخصات آیرودینامیکی موشک تغییر شکل یافته استفاده می شود. با توجه به مطالعات انجام شده تحقیقات کمی در زمینه کاهش وزن سازه های فضایی انجام گرفته است بنابراین به دلیل استراتژیک بودن بالک سازه های فضایی، رفتار مکانیکی ورق ها برای ساخت بالک به صورت تجربی به روش پرس کاری شیاری محدود شده (CGP) مورد مطالعه قرار داده شده و با شبیه سازی FSI برای مدل بالک خمیده و بالک تخت با دو جنس آلومینیوم ۷۰۷۵-T۶ و فولاد ۴۱۳۰ میزان تغییر شکل به وجود آمده موشک در حال پرواز در ماک ها و زوایای حمله مختلف مقایسه گردید. نتایج فرایند CGP نشان می دهد با افزایش مراحل این فرایند، آلومینیوم ۷۰۷۵-T۶ با ۳۸ درصد افزایش در استحکام تسلیم در عبور چهارم، ۳۴ درصد افزایش در مقدار استحکام کششی، کاهش ۴۰ درصد ازدیاد طول و افزایش ۶۲ درصدی سختی نسبت به نمونه اولیه تولید می شود. مجموع تغییر شکل در بالک خمیده بسیار کمتر از بالک تخت می باشد همچنین تغییر شکل بالک با جنس آلومینیوم ۷۰۷۵-T۶CGP کمتر از بالک با جنس فولاد ۴۱۳۰ می باشد.

واژه های کلیدی: بالک خمیده، بالک تخت، آلومینیوم ۷۰۷۵، فولاد ۴۱۳۰، خصوصیات آیرودینامیکی، تحلیل ایروالاستیک.

Study of Aerodynamic Parameters of WAF and Flat Fins Rocket with Two Materials of Aluminum & Steel and Its Effect on Elastic Deformation by Two-way FSI Method

Sh. Heidari

Y. Bakhshan

J. Khorshidi Mal Ahmadi

A. Afsari

Department of Mechanical Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

Department of Mechanical Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

Department of Mechanical Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University of Shiraz, Shiraz, Iran

Abstract

To predict static aeroelastic behavior accurately, two-way fluid and structure interaction (FSI) coupling methods are used to calculate the static deformations and aerodynamic characteristics of the deformed rocket. According to the studies, little research has been done on the weight reduction of space structures. Therefore, due to the stratigicness of the Fin of space structures, the mechanical behavior of the sheets for the construction of the Fin has been experimentally studied using a constrained groove pressing (CGP) method and a comparison has been done between the amounts of deviation caused for a rocket flying in different Mach numbers and different angles of attack, by simulating a two-way FSI Method for WAF and Flat Fins models with two types of material, the CGP 7075-T6 aluminum, and the 4130 steel. Results of constrained groove pressing show that with the increase in the steps of this process, 7075-T6 aluminum with 38% increase of yield strength in fourth transit, 34% increase in tensile strength, 40 percent decrease in elongation, and 62% increase in toughness relative to the prototype, will be produced. The total deviation in WAF Fin is much less than the flat Fin. Also, deviations of Fin made of CGP 7075-T6 aluminum is less than the Fin made of 4130 steel.

Keywords: WAF, Flat Fin, 7075 Aluminum, 4130 Steel, Aerodynamic Properties, Aeroelastic analysis.

۱- مقدمه

سازه در زمان برخاست و درعین حال افزایش ظرفیت بار محموله می باشد که منجر به افزایش سهم انرژی پرتابه و در نتیجه افزایش کارایی آن می شود. بدیهی است که بخش عمده ای از وزن این سازه ها مربوط به بدنه و سطوح آیرودینامیک این موشک ها می باشد. با توجه به نیاز بهینه سازی در تغییر وزن به منظور افزایش برد این سازه ها نیاز صنایع پیشرفته فناوریانه هوانوردی به موادی که از نسبت استحکام به وزن بالایی برخوردار باشند بیشتر احساس می شود. مؤثرترین راهی که

آیروالاستیسیته رشته ای است از علم مکانیک که دربرگیرنده یک اثر متقابل قوی بین نیروهای آیرودینامیک و نیروهای سازه ای است که بیشتر جهت مطالعه سازه های هوایی و فضایی مورد استفاده قرار می گیرد [۱-۲].

در طراحی سازه های هوایی یکی از اهداف اصلی کم کردن وزن

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: younesbakhshan2222@gmail.com

به منظور کاهش وزن بدنه سازه و در عین حال افزایش استحکام آن توصیه می‌شود افزایش چگالی به واسطه افزایش فشار بر روی بدنه می‌باشد [۳]. بدین منظور امروزه بررسی خواص مکانیکی فلزات و بهبود آن مطالعات بسیاری از محققان را به خود اختصاص داده است. در این رابطه آلومینیوم و آلیاژهای آن در میان مهم‌ترین مطالعات و بررسی‌ها قرار گرفته است. علت این موضوع کاربرد گسترده این فلز در صنایع هوافضا به دلیل دارا بودن ویژگی‌های منحصربه‌فرد آن می‌باشد [۴].

در دو دهه اخیر مواد پلی کریستال با دانه‌بندی بسیار ریز در حد نانو- متر و یا چند صد نانومتر (کمتر از میکرون) به دلیل برخورداری از خواص مکانیکی و فیزیکی ویژه، شدیداً مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند. یکی از رویکردهای جدید برای تولید مواد نانو کریستال و مواد با دانه‌های بسیار ریز، اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید بر روی نمونه اولیه با دانه‌های درشت می‌باشد. در این روش با اعمال کرنش‌های شدید به نمونه، طی چندین مرحله اندازه دانه‌های آن تا مقیاس نانومتری کاهش می‌یابد و این امر باعث بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی بسیار مطلوبی در ماده می‌شود. این خواص کم‌نظیر، مواد بسیار ریزدانه را برای بسیاری از کاربردهای تجاری مناسب می‌سازد [۵].

در فرآیندهای متداول ساخت فلز، هنگام کرنش پلاستیک شدید، ضخامت و قطر بسیار نازک می‌شود. تاکنون فرآیندهای متعددی برای اعمال تغییر شکل شدید پلاستیک در مواد فلزی و رسیدن به ساختارهای نانومتری یا بسیار ریز از قبیل کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار، پرس‌کاری شیاری محدود شده و پرس‌کاری شیاری تکراری و صاف، پیچ‌خوردگی تحت فشار بالا، اکستروژن و فشرده‌سازی چرخشی، فرآیند نورد تجمعی، فرآیند نورد از مجرای زاویه‌دار، فورجینگ چند محور سایشی، اکستروژن پیچیده وجود دارد. ویژگی مشترک و منحصربه‌فرد اکثر این فرآیندها، ثابت بودن ابعاد سطح نمونه در حین فرآیند می‌باشد که در نتیجه آن محدودیت در اعمال کرنش از بین می‌رود و دستیابی به کرنش‌های بسیار بالا در ماده به راحتی میسر است. به این ترتیب در اثر اعمال کرنش، امکان اصلاح ریزساختار، کاهش اندازه دانه‌ها تا مقیاس نانومتر و بهبود خواص مکانیکی نمونه فلزی فراهم می‌آید، در حالی که ابعاد سطح نمونه تغییری نمی‌کند [۶].

ویژگی دیگر این فرآیندها افزایش استحکام و اصلاح ساختار دانه‌ها بدون اضافه کردن عناصر آلیاژی یا ذرات سرامیکی است. یکی از مهم‌ترین روش‌های اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید، روش پرس‌کاری شیاری محدود شده می‌باشد که به دلیل ویژگی‌های خاص، توجه بسیاری از محققان را در یک دهه اخیر به خود معطوف کرده است [۷].

فرآیند پرس‌کاری شیاری محدود شده روشی مؤثر جهت تولید مواد با دانه‌های بسیار ریز بوده تا از این طریق خواص مکانیکی و فیزیکی آن‌ها را به طور چشمگیری بهبود بخشد. اخیراً محققان با استفاده از این فرآیند موفق به تغییر خواص مکانیکی فلز آلومینیوم و دستیابی به استحکام بالا هم‌زمان با حفظ وزن گشته‌اند [۸].

زمانی که از سازه‌های با وزن کم استفاده می‌شود استحکام کاهش می‌یابد که باعث مشکلات آیرودینامیک جدی برای سازه فضایی می‌شود. از آنجا که هر پاسخ ناپایدار به بارگیری آیرودینامیکی ممکن است به سرعت منجر به شکست ساختاری فاجعه‌آمیز گردد، که یقیناً نیاز به اصلاحات هزینه بر دارد، باید در فاز اولیه طراحی ساختار سازه فضایی

مشکل آیرودینامیک مد نظر قرار گیرد. آزمون‌های پرواز و تونل‌های باد جهت رفع این مشکل دو روش زمان بر و گران قیمت می‌باشند که در مرحله آخر طراحی انجام می‌شوند. از این رو، از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی به منظور محاسبه خصوصیات آیرودینامیک موشک در طول مراحل توسعه آن مورد استفاده قرار می‌گیرند. با استفاده از فناوری دینامیک سیالات محاسباتی و پیشرفت روزافزون توان محاسباتی آن در تجزیه و تحلیل مهندسی به کمک رایانه که تحلیل جامع دینامیک سیالات محاسباتی می‌باشد می‌توان ضرایب آیرودینامیکی بسیاری از هندسه‌های پیچیده و پدیده‌های جریان مختلط را به درستی محاسبه نمود [۹،۱۰].

به دلیل نیاز به بسته بندی کم حجم تر و حمل و نقل آسانتر، از موشک‌هایی با بالک خمیده به صورت گسترده استفاده می‌شود. اصطلاح بالک خمیده معمولاً به سطوح خمیده ای اطلاق می‌شود که از آنها در اشیاء پرنده به عنوان سطوح پایدار کننده و یا سطوح کنترل کننده استفاده می‌شود و دارای شعاع انحنایی برابر با بدنه موشک بوده و تا هنگام باز شدن به دور بدنه موشک پیچیده می‌شوند. پس از شلیک موشک و جدا شدن از سکوی پرتاب، بالک‌های خمیده باز می‌شود [۱۱].

با توجه به مطالعات انجام شده تحقیقات اندکی در زمینه کاهش وزن بدون کاهش استحکام سازه‌های فضایی و بررسی پارامترهای آیرودینامیکی آن صورت گرفته است. در این پژوهش، باهدف برطرف کردن این محدودیت و بررسی پارامترهای آیرودینامیکی به صورت شبیه سازی دو طرفه برهم‌کنش میان سیال و سازه، امکان توسعه مطالعات در زمینه کاهش وزن سازه‌های فضایی به واسطه تغییرات رفتار مکانیکی در جنس بدنه و بررسی میزان تغییر شکل به وجود آمده دو راکت با مدل بالک خمیده و بالک تخت با دو جنس آلومینیوم T6-۷۰۷۵ پرس‌کاری شیاری محدود شده و فولاد ۴۱۳۰ در حال پرواز مقایسه گردیده است. برای پیش بینی دقیق رفتار آیرودینامیک ایستایی از روش اتصال دو طرفه برای محاسبه تغییر شکل‌های ساکن و مشخصات آیرودینامیکی موشک تغییر شکل یافته استفاده شد. ابتدا ضرایب آیرودینامیکی موشک محاسبه می‌شود و با داده‌های تجربی مقایسه شد تا صحت خروجی CFD را تأیید کند.

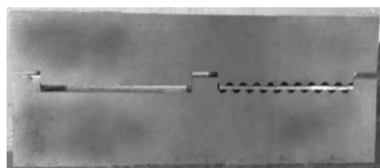
۲- مواد و روش آزمایش

۲-۱- ماده اولیه

در این تحقیق از آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ جهت تهیه بالک خمیده جایگزین بالک فولاد ۴۱۳۰ استفاده شد. خواص مکانیکی این فولاد در جدول ۱ آورده شده است. از آنجا که آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ قابلیت عملیات حرارتی و نسبت استحکام به وزن بالایی به سبب اندازه ریز و یکنواخت رسوب‌های فاز ثانویه در شبکه طی عملیات پیر سختی دارد با اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید بر روی آن، گزینه مناسبی برای جایگزینی با فولاد ۴۱۳۰ در صنایع هوا-فضا می‌باشد [۱۲]. جهت بالا رفتن استحکام و سختی و همچنین کاهش مقاومت به خوردگی تنشی، عملیات پیرسختی T6 در طی فرآیند صورت پذیرفت [۱۳].

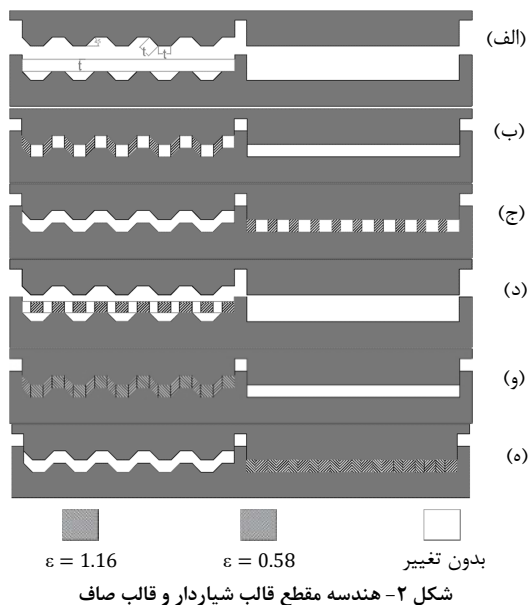
جدول ۱- خواص مکانیکی فولاد مورد استفاده در بالک سازی مرسوم به

انجام گرفت و سختی حدود ۵۰ راکول C در قالب ایجاد گردید.



شکل ۱- تصویر قالب مورد استفاده

جهت حذف تنش‌های پسماند و بالا بردن استحکام و سختی نمونه‌های آلومینیوم ۷۰۷۵، آن‌ها را طبق استاندارد ASTM B918-01 تحت عملیات حرارتی T6 قرار می‌دهیم [۱۵]. نمونه‌ها تا دمای ۴۷۰ درجه سلسیوس به مدت یک ساعت گرم شد و بعد از آن در آب سرد گشت. فرآیند با نرخ کرنش $10s^{-1}$ در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس صورت گرفت و برای انجام آن از دستگاه پرس داغ با حداکثر بارگذاری ۲۵۰ کیلو نیوتون و مجهز به کوره تا دمای ۱۰۰۰ درجه سلسیوس استفاده گردید. ابتدا به مدت ۱۵ دقیقه در کوره دستگاه که قبلاً به دما رسیده بود قرار گرفتند تا هم‌دمایی لازم انجام شود. مطابق شکل ۲ پس از هر مرحله صاف‌کاری، ورق ۱۸۰ درجه در جهت عقربه‌های ساعت چرخانده شده و دوباره در قسمت شیاردار قرار گرفت.



شکل ۲- هندسه مقطع قالب شیاردار و قالب صاف

قبل از انجام آزمایش، جهت کاهش اصطکاک بین فک قالب و نمونه، شیادهای قالب به همراه نمونه توسط روان کار شیمیایی MoS2 روان کاری شدند. شکل ۳ تصویر نمونه پرس‌کاری شیاری محدود شده را نمایش می‌دهد.

مقدار	ویژگی‌های مکانیکی
۲۰۷	سختی ویکرز
۶۷۰ MPa	استحکام کششی نهایی
۴۳۵ MPa	استحکام تسلیم

ترکیبات شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ که توسط طیف‌سنج جرقه‌ای (SES) اندازه‌گیری و با استاندارد ASTM B210 مقایسه شده است، در جدول ۲ نشان داده شده است [۱۴].

جدول ۲- ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ مورد استفاده %WT

عنصر	درصد وزنی استاندارد [۱۴]	درصد وزنی اندازه گیری شده
Al	پایه	پایه
Zn	۵/۱۱	۵/۱-۶/۱
Mg	۲/۴۶	۵۲/۱-۲/۹
Cu	۱/۲۲	۱/۲-۲/۰
Fe	۰/۵۲۳	۰/۵۰
Si	۰/۴۵	۰/۴۰
Cr	۰/۱۴	۰/۱۸-۰/۲۸
Mn	۰/۱۰۴	۰/۳۰
Ti	۰/۰۲۱	۰/۲۰
Pb	۰/۰۲۱	۰/۱۵
Ni	۰/۱۵	
V	۰/۰۰۲	
Sb	۰/۰۰۲	
Zr	۰/۰۰۱	

به‌منظور تهیه نمونه مناسب جهت انجام فرآیند پرس‌کاری شیاری محدود شده عملیات برش در سطوح صفحه اولیه صورت گرفت. نمونه با طول ۲۰ سانتیمتر، عرض ۹ سانتیمتر و ضخامت ۰/۵ سانتیمتر توسط دستگاه برش تهیه شد.

۲-۲- فرآیند پرس‌کاری شیاری محدود شده

در این پژوهش ساده‌ترین نوع قالب فرآیند پرس‌کاری شیاری محدود شده شامل قالب شیاردار و قالب تخت به‌کاربرده شد. قالب شیاردار دارای دو بلوک می باشد که هرکدام شامل قسمت شیاردار نامتقارن است و تغییر شکل برشی ایجاد می‌کند و قالب تخت دارای دو بلوک تخت می باشد که قطعه تغییر شکل یافته را صاف می‌کند. طول قالب ۵۵۰ میلیمتر، عرض ۹۰ میلیمتر و ارتفاع ۲۰۰ میلیمتر می‌باشد. ابعاد شیار در قالب شیاردار ۵ میلیمتر، معادل ضخامت ورق و زاویه ۴۵ درجه می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود این قالب توسط عملیات ماشین‌کاری ایجاد شده است. جنس به کار گرفته شده برای ساخت قالب، فولاد ابزار AISI 1.6580 می‌باشد. برای ایجاد شیادهای قالب، ابتدا عملیات ماشین‌کاری بر روی بلوک‌های فولادی صورت گرفت. سپس قالب تحت عملیات حرارتی قرار گرفت. قالب در دمای ۸۶۰ درجه سلسیوس به مدت ۸۰ دقیقه تحت عملیات انحلال (شامل آنیلینگ، تنش‌زدایی و سخت‌کاری) قرار گرفته و سپس جهت انجام عملیات کوئنچ در محیط روغن، سرد گردید. عملیات باز پخت نیز در سه دمای ۲۱۰، ۳۶۰ و ۴۳۰ درجه سلسیوس به مدت ۱۸۰ دقیقه

به صورتی که:

$$\begin{aligned} Q &= [\rho, \rho u, \rho w, \rho E]^T, \\ E &= [\rho u, \rho u^2 + p, \rho uv, \rho uw, (\rho E + p)u]^T, \\ F &= [\rho v, \rho vu, \rho v^2 + p, \rho vw, (\rho E + p)v]^T, \\ G &= [\rho w, \rho wu, \rho vw, \rho w^2 + p, (\rho E + p)w]^T, \\ E_v &= [0, \tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \beta_x]^T, \\ F_v &= [0, \tau_{yx}, \tau_{yy}, \tau_{yz}, \beta_y]^T, \\ G_v &= [0, \tau_{zx}, \tau_{zy}, \tau_{zz}, \beta_z]^T, \end{aligned} \quad (2)$$

که در آن ρ چگالی سیال است، (u, v, w) سه مولفه سیستم مختصات دکارتی هستند، p فشار است و E انرژی کل در واحد جرم است.

معادلات N-S در دستگاه مختصات چرخان به شرح زیر می باشد:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho w_j) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho w_j u_i + p \delta_{ij}) &= \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij}) + \rho F_i \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho w_j E + w_j p) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(w_i \tau_{ij} + k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \rho \bar{q} + \rho f_i w_i \end{aligned} \quad (3)$$

به صورتی که:

$$\begin{aligned} \tau_{ij} &= \mu \left[\left(\frac{\partial w_i}{\partial x_j} + \frac{\partial w_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial w_k}{\partial x_k} \right] \\ F_i &= f_i - 2e_{ijk} \omega_j w_k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\omega^2 R^2}{2} \right) \\ E' &= e + \frac{W^2}{2} - \frac{\omega^2 R^2}{2} = \frac{P}{\rho(\gamma - 1)} + \frac{W^2}{2} - \frac{\omega^2 R^2}{2} \end{aligned} \quad (4)$$

که در آن W سرعت نسبی، E' انرژی کل چرخش نسبی است و $\bar{q}$ گرمای تابشی است (در مطالعه حاضر $\bar{q} = 0$). F نیروی خارجی، شامل نیروی حجمی و نیروی گریز از مرکز است. ω سرعت زاویه‌ای چرخش و R شعاع گردش است.

برای بسته شدن معادلات بالا، از مدل آشفتگی تنش برشی $k-\omega$ توسعه داده شده استفاده شده است. مدل آشفتگی تنش برشی مزایای لایه مرزی استاندارد $k-\epsilon$ و $k-\omega$ را در داخل و خارج تلفیق می‌کند. k و ω معادله انتقال را می‌توان به شکل نوشت [۲۲-۲۳].

$$\begin{aligned} \frac{d(\rho k)}{dt} &= \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \\ \frac{d(\rho \omega)}{dt} &= \frac{\gamma \rho}{\mu_t} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2\rho(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \end{aligned} \quad (5)$$

به صورتی که τ_{ij} تنش برشی می باشد

$$\tau_{ij} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (6)$$

تابع ترکیبی F_1 :

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4) \quad (7)$$

به صورتی که

$$\begin{aligned} \arg_1 &= \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{0.09 \omega y}, \frac{500 v}{y^2 \omega} \right), \frac{4 \rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{kw} y^2} \right] \\ CD_{kw} &= \max \left(2 \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-20} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

لزجت جریان مخالف به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu_t = \frac{\rho \alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, \Omega F_2)} \quad (9)$$

که در آن Ω مقدار مطلق جریان مخالف است. F_2 می‌شود:

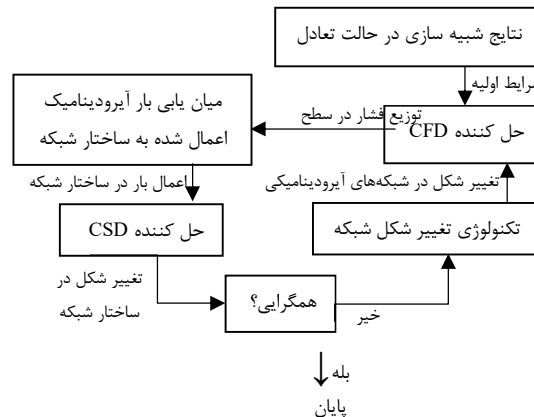
$$F_2 = \tanh(\arg_2^2) \quad (10)$$

به صورتی که

$$\arg_2 = \max \left(\frac{2 \sqrt{k}}{0.09 \omega y}, \frac{500 \mu}{y^2 \rho \omega} \right)$$

(۱۰) مراحل ۹-۴ را تکرار می‌کنیم تا جابجایی و ضریب آیرودینامیکی تغییر نکند.

جهت تحلیل برهم‌کنش میان سیال و سازه از نرم‌افزار Ansys استفاده شد. با توجه به نقش کمرنگ بدنه موشک، در تولید هندسه این بخش ساده‌سازی صورت گرفته است و جهت تحلیل میدان‌های سیال و سازه مطابق جدول ۳ فرض‌هایی به‌کاربرده شده است.



شکل ۷- الگوریتم اتصال دوطرفه نیروهای آیرودینامیک و استاتیک

جدول ۳- فرض‌های به‌کاربرده شده در تحلیل‌های سیال و سازه

فرض	مشخصه
جریان غیر پایا	تحلیل سیال
دینامیکی	تحلیل سازه
میدان سیال سه بعدی، سازه پیوسته سه بعدی	ابعاد میدان‌ها
دو طرفه	نوع برهم‌کنش
هوا در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و فشار مرجع ۱ اتمسفر	نوع سیال
• آلومینیوم ۷۰۷۵-T۶ پرس کاری شیری محدود شده • فولاد ۴۱۳۰	نوع سازه
تراکم پذیر	جریان سیال
مدل آشفتگی تنش برشی $k-\omega$	مدل آشفتگی
نیروهای آیرودینامیک، سازه‌ای الاستیک و لختی	بارهای وارده
از صفر الی ۱۰	زاویه حمله
دو	عدد ماخ

۲-۶- معادلات

برای مسایل دینامیک سیالات محاسباتی، شبیه‌سازی عددی مستقیم معادلات ناویر-استوکس را به طور مستقیم بدون مدل آشفتگی که به خاطر غیر خطی بودن و پیچیدگی بالای آن‌ها به کامپیوتر حافظه قوی نیاز دارد، حل می‌کند. پذیرش این روش در مهندسی عملی غیر ممکن است. تقسیم معادلات ناویر-استوکس به معادلات ناویر-استوکس به روش میانگین‌گیری رینولدز امکان شبیه‌سازی مسایل دینامیک سیالات مهندسی را فراهم می‌کند. معادلات ناویر-استوکس به روش میانگین‌گیری رینولدز را می‌توان به شکل زیر بیان کرد:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} + \frac{\partial G}{\partial z} = \frac{\partial E_v}{\partial x} + \frac{\partial F_v}{\partial y} + \frac{\partial G_v}{\partial z} \quad (11)$$

ثابت $\emptyset$ مدل آشفستگی تنش برشی از ثابت‌های، $\emptyset_1$ و $\emptyset_2$ به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\emptyset = F_1 \emptyset_1 + (1 - F_1) \emptyset_2 \quad (11)$$

در جایی که $(\emptyset_1)$ ثابت مدل $k-\omega$ است و $(\emptyset_2)$ ثابت مدل $k-\epsilon$ است ثابت های $(\emptyset_1)$ به شرح زیر است

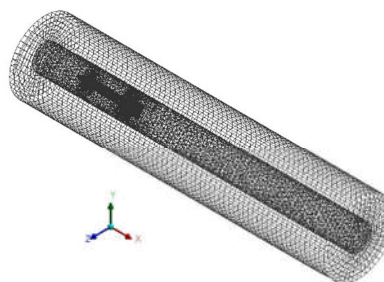
$$\sigma_{k1}=0.5, \sigma_{\omega 1}=0.5, \beta_1=0.075, \beta^*=0.09, \kappa=0.41, \gamma_1=\left(\frac{\beta_1}{\beta^*}\right)-\left(\frac{\sigma_{\omega 1} \kappa^2}{\sqrt{\beta^*}}\right) \quad (12)$$

ثابت های $(\emptyset_2)$ به شرح زیر است

$$\sigma_{k2}=1.0, \sigma_{\omega 1}=0.856, \beta_2=0.0828, \beta^*=0.09, \kappa=0.41, \gamma_2=\left(\frac{\beta_2}{\beta^*}\right)-\left(\frac{\sigma_{\omega 2} \kappa^2}{\sqrt{\beta^*}}\right) \quad (13)$$

تمام پارامترهای دیگر در منبع [۲۳] آورده شده است.

در این کار، شرایط جریان میدان آزاد با مرز بسیار دور، دارای دما و فشار استاندارد است (۱۰۱/۳۲۵ کیلو پاسکال، ۲۸۸ کلوین) و مرز دور از میدان مبتنی بر ثابت ریمان است که شرایط مرزی را منعکس می‌کند. مدل قاب مرجع برای انجام مساله پرتاب راکت مورد استفاده قرار می‌گیرد. هوا به عنوان یک گاز ایده‌آل فرض شده‌است و لزجت با دما مطابق با فرمول‌های ضریب سه ساترلند تغییر می‌کند. روش حل ضمنی و روش عددی بالادست است. روش عددی بالادست که بر پایه روش حجم محدود استوار است و از آن به منظور جدا کردن فضای میدان سیال مورد استفاده قرار می‌گیرد. از طرح مرتبه دوم خلاف جهت باد بر روی جریان جابه‌جایی و لزجت آشفستگی استفاده می‌شود. شکل ۸ نمایی از شبکه میدان جریان را نمایش می‌دهد. تعداد شبکه میدان جریان ۱۲۰۰۰۰، ۱۵۰-۴۵ γ^+ است. [۲۴]



شکل ۸- شبکه میدان جریان

با حل معادلات بالا، تراکم، سرعت، فشار و غیره می‌تواند در هر گره شبکه محاسبه شود. سپس پارامترهای ضرایب نرمال، محوری، برآ، پسا، گشتاور رول و مرکز فشار را می‌توان به ترتیب با معادلات زیر بدست آورد:

$$C_N = \frac{N}{q_{\infty} S} \quad (14)$$

$$C_A = \frac{A}{q_{\infty} S} \quad (15)$$

$$C_L = C_N \times \cos \alpha - C_A \times \sin \alpha \quad (16)$$

$$C_D = C_N \times \cos \alpha + C_A \times \cos \alpha \quad (17)$$

$$C_l = \frac{\text{rolling moment}}{q_{\infty} S l} \quad (18)$$

$$x_{cp} = x_{cg} - \left(\frac{C_l}{C_N}\right) \quad (19)$$

که در آن q_{∞} ، α ، S ، x_{cp} و x_{cg} فشار دینامیک، زاویه حمله، سطح

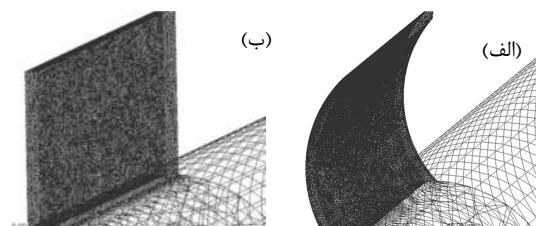
مرجع، مرکز فشار و مرکز ثقل می باشد. l طول موشک است. راس کلاهک نقطه مرجع است.

۷-۲- معادلات تحلیل ساختار استاتیک

در تحلیل ساختاری استاتیک، جابجایی‌ها، تنش‌ها، کرنش‌ها و نیروها را در سازه‌ها یا اجزای ایجاد شده توسط بارهای که اثرات اینرسی و میرایی قابل‌توجهی ایجاد نمی‌کند، تعیین می‌شود. شرایط بارگیری و پاسخ پایدار فرض می‌شود. به این معنا که، فرض می‌شود که بارهای وارده و پاسخ سازه به کندی با توجه به زمان تغییر می‌کنند. این یک مساله الاستیک خطی است. معادله تحلیل ساختار استاتیک را می‌توان به شکل زیر نوشت

$$[K]\{\delta\}=\{F\} \quad (20)$$

که در آن $[K]$ ماتریس سختی است، δ بردار جابجایی است و $\{F\}$ بردار نیروی است. شکل ۹ شبکه بدنه و بالک خمیده و تخت را نمایش می‌دهد. برای بدست آوردن شبکه کیفیت بالا در راکت جهت انجام تحلیل ساختار استاتیکی، ۱۵۰۰ گره شش ضلعی با متوسط ابعادی $10 \times 1/2$ میلی‌متر مکعب که برای پوشش بالک و ۲۵۰ گره چهار ضلعی با متوسط ابعادی 10×3 میلی‌متر مکعب برای بخش هندسی ساده استفاده می‌شود. برای این مسائل مکانیک ساختاری الاستیک خطی، K ثابت و F یک نیروی آیرودینامیکی می باشد که با کد دینامیک سیالات محاسباتی محاسبه می‌شود. سپس، تغییر شکل δ به دست می‌آید.



شکل ۹- شبکه بدنه و بالک
(الف) بالک خمیده (ب) بالک تخت

برای تعیین اتصال سطوح تماسی از روش قید چند نقطه ای استفاده شده‌است. نیروی نرمال و نیروی مماسی هر بخش از طریق سطوح تماسی منتقل می‌شوند. روش اینرسی ترمیم که مبتنی بر اصل دالامبر است و برای شبیه‌سازی راکت‌های بدون قید در پرواز مورد استفاده قرار می‌گیرد و اطمینان حاصل می‌کند که موشک جا به جایی جسم صلب ندارد، با حل‌کننده خطی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به علاوه، چون بدنه در حال چرخش است، یک سرعت زاویه‌ای گردان بر روی بدنه موشک اعمال می‌شود. اینرسی ترمیم روشی است که در آن نیروها و گشتاورهای اعمال‌شده توسط نیروهای اینرسی ناشی از یک میدان شتاب متوازن می‌شوند. استفاده از یک میدان شتاب (برای محاسبه) را در نظر بگیرید که دقیقاً کاربردهای موجود را متعادل می‌کند

$$\{F_i^a\} + [M_i]\{a_i^a\} = \{0\} \quad (20)$$

$$\{F_i^a\} + [M_i]\{a_i^a\} = \{0\}$$

$\{F_i^a\}$ = مؤلفه های نیرو بردار بار اعمال شده

$\{F_i^a\}$ = مؤلفه مومنوم بردار بار اعمال شده،

معادله (۲۳) با روش حجم محدود گسسته می‌شود و ماتریس حاصل به صورت تکراری با استفاده از حل‌کننده جبری حل می‌شود. راه‌حل سلول محور برای سرعت جابجایی از (۲۳) روی گره‌ها با استفاده از میانگین گیری وزنی معکوس داده می‌شود و موقعیت گره مطابق با به روز می‌شود [۲۶].

$$\bar{x}_{new} = \bar{x}_{old} + \bar{u} \Delta t \quad (24)$$

برای معادله (۲۵)، Δt یک گام جفت کننده است که شامل $1 \sim 3$ تکرار و یک تکرار شامل ۳۰ گام تکرار حل‌کننده سیال است که اطمینان حاصل می‌کند که هر گام تکرار جفت شدگی همگرا می‌شود. استفاده از این روش، باعث کاهش نفوذ در سلول‌های بزرگ‌تری می‌شود که بیشترین حرکت شبکه را جذب کنند. بهتر است که کیفیت سلول‌های کوچک‌تر که به حرکت مرزی نزدیک هستند حفظ شود و بنابراین دقت محاسبات را حفظ کند.

۳- نتایج

۳-۱- نتایج حاصل از فرآیند پرس‌کاری شیاری

محدودشده

پس از فرآیند پرس‌کاری شیاری محدودشده به‌واسطه اعمال کرنش در هر مرحله ساختار کریستالی نمونه‌ها به مقدار قابل ملاحظه‌ای ریز گردیده است. سختی مکانیکی در نمونه‌ها از ۱۵۷ ویکرز به ۲۵۴ ویکرز رسیده است. استحکام تسلیم در عبور اول از مقدار ۵۱۲ مگاپاسکال به مقدار ۶۷۸ مگا پاسکال افزایش پیدا کرده است و همچنین استحکام کششی نیز از مقدار ۵۵۳ مگاپاسکال به مقدار ۷۲۷ مگاپاسکال افزایش یافته است. این در حالی است که مقدار درصد ازدیاد طولی نیز در عبور اول ۴۰ درصد و مدول یانگ از ۷۲ گیگاپاسکال به ۵۸ گیگاپاسکال کاهش یافته است.

۳-۲- نتایج حاصل از شبیه‌سازی

ابتدا، ضرایب آیرودینامیکی بالک‌ها محاسبه می‌شود. یکی از شناخته‌شده‌ترین این ضرائب، ضریب غلت می‌باشد [۲۷]. جهت اعتباردهی به فرآیند شبیه‌سازی مقایسه ضریب غلت بالک نسبت به ماخ در کار حاضر با نتایج دیگران آورده شده است. [۱۸] همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌گردد اختلاف بسیار کم موجود نشان دهنده تصدیق شبیه‌سازی صورت گرفته می‌باشد.

$\{a_i^1\}$ بردار شتاب انتقالی به خاطر اینرسی ترمیم (که باید تعیین شود)،

$\{a_i^1\}$ بردار شتاب چرخشی ناشی از اینرسی ترمیم (که باید تعیین شود)

$$r = \text{موقعیت بردار } [x, y, z]^T$$

$[M_T]$ تانسور جرمی برای کل مدل آلمان محدود (در زیر توسعه یافته^۱ است)،

$[M_T]$ ممان جرمی و حاصلضرب جرم تانسور اینرسی برای کل مدل آلمان محدود (در زیر توسعه یافته است).

هنگامی که M_T و M_T توسعه داده می‌شوند و F_i^a و F_i^a را می‌توان از خروجی دینامیک سیالات محاسباتی بدست آورد، سپس a_i^1 و a_i^1 در (۲۱) می‌توان حل کرد. خلاصه اینرسی ترمیم خروجی شامل a_i^1 (خروجی به عنوان شتاب‌های انتقالی) و a_i^1 (خروجی به عنوان شتاب‌های چرخشی) می‌شود.

۲-۸- اتصال شرایط مرزی به شبکه

در این تعامل سیال و سازه، مرزی وجود دارد که در آن فعل و انفعالات دامنه سیال و سازه در این مرز رخ می‌دهد. شرایط سازگاری تغییر شکل و تعادل نیرو باید از رابط اتصال سیال - سازه به شکل زیر باشند [۲۵].

$$\begin{aligned} d_i &= d_s \\ n_i \tau_i &= n_s \tau_s \\ q_i &= q_s \\ T_i &= T_s \end{aligned} \quad (21)$$

که در آن d ، q ، T ، τ جابجایی، شار حرارتی، دما و میدان تنش در فصل مشترک اتصال سیال - ساختار هستند. n مسیر نرمال رابط است. f و s سیال و جامد را نشان می‌دهد.

برای انتقال داده‌ها از شبکه‌های مختلف، عمل درون‌یابی یک گام ضروری است. درون‌یابی نام‌گذاری شده در سطح جهانی در این مقاله مورد استفاده قرار می‌گیرد. آن گره‌های رابط را از کد دینامیک سیالات محاسباتی جمع‌آوری می‌کند، نگاشت را انجام می‌دهد، و کنترل حلقه را با کد دینامیک سیالات محاسباتی نشان می‌دهد. نگاشت تولید شده توسط کد انسیس برای درون‌یابی بارها بین شبکه‌های مختلف در دو طرف رابط جفت کننده مورد استفاده قرار می‌گیرد. هر حل‌کننده میدانی از طریق دنباله‌ای از تکرارهای سرعتی (جفت شدن) در هر مرحله جفت شدگی پیشروی می‌کند. در طول هر تکرار، هر یک از حل‌کننده میدانی بارها را جمع‌آوری می‌کند که از دیگر حل‌کننده‌ها میدان نیاز دارد و سپس زمینه‌های فیزیکی آن را حل می‌کند. حرکت شبکه‌های میدان جریان با روش انتشار مبتنی بر نفوذ به دست می‌آید و حرکت شبکه توسط معادله نفوذ کنترل می‌شود:

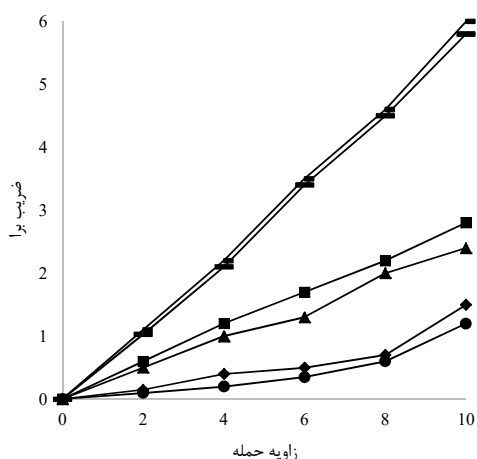
$$\nabla \cdot (\gamma \nabla \bar{u}) = 0 \quad (22)$$

که در آن $\bar{u}$ سرعت جابجایی مش و γ ضریب انتشار است

$$\gamma = \frac{1}{V^\alpha} \quad (23)$$

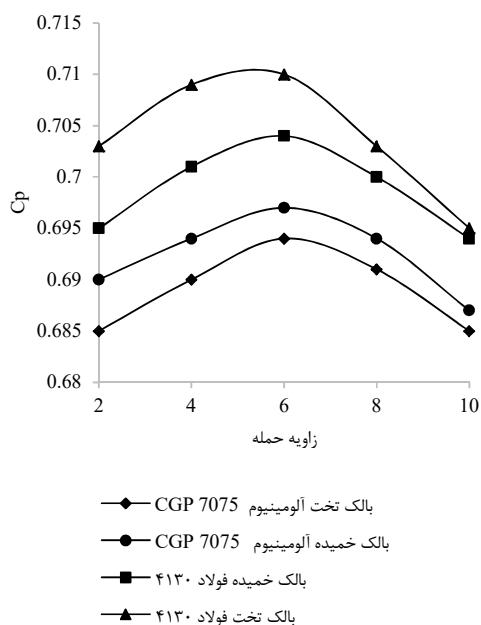
که در آن V حجم سلول نرمال شده و α پارامتر ورودی کاربر $\alpha=1/9$ در مطالعه حاضر) است. شرایط مرزی برای (۲۳) از حرکت مرزی محاسبه شده بدست می‌آید.

¹ developed below

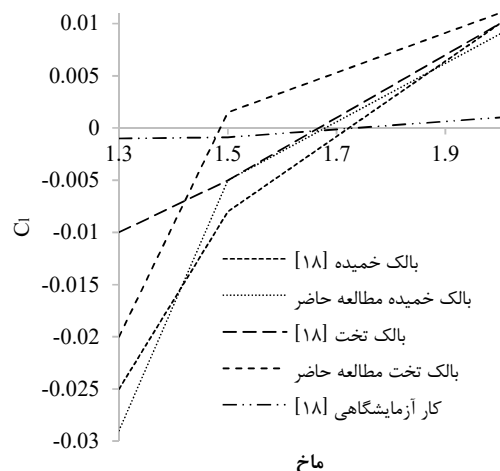


شکل ۱۲- ضریب بر با زاویه حمله در ماخ ۲

شکل ۱۳ ضریب فشار اعمالی بر روی بالک‌های مورد مطالعه را در زاویه حمله مختلف نمایش می‌دهد. با توجه به شکل ۱۳ با افزایش زاویه حمله ضریب فشار اعمالی بر روی بالک‌های مورد مطالعه کاهش پیدا می‌کند.



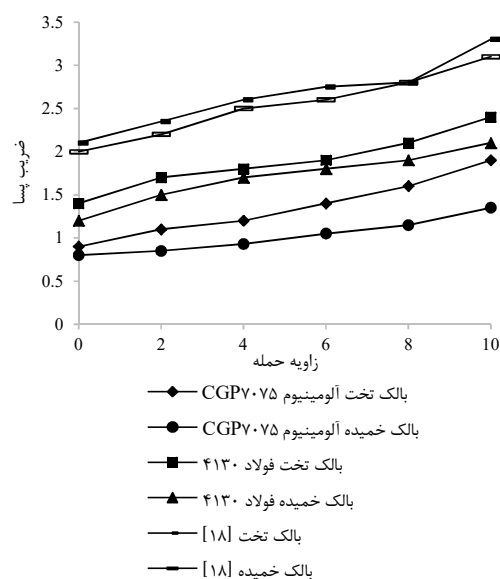
شکل ۱۳- ضریب فشار با زاویه حمله در ماخ ۲



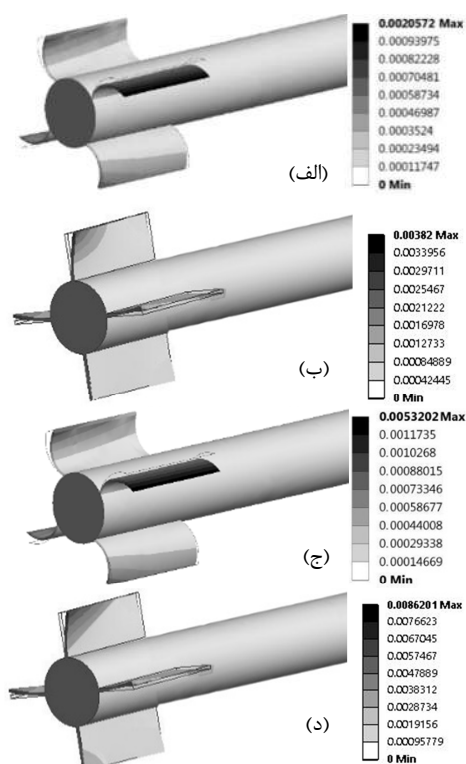
شکل ۱۰- ضرایب لحظه غلت و بالک‌های مختلف

خواص مکانیکی نقش مهمی در سختی، بارگذاری کششی، بارگذاری فشاری، برشی، پیچشی و خمشی دارند. در اثر اعمال کرنش زیاد، اندازه دانه‌ها تا مقیاس نانومتر کاهش میابد و باعث کاهش چگالی و در نتیجه بهبود خواص مکانیکی نمونه فلزی می‌گردد. با توجه به تغییرات در خواص ماده بالک تخت و خمیده با جنس آلومینیوم T6-7075 می‌تواند بر رفتار آیرودینامیک بالک که اثر مستقیمی بر انرژی جذب‌شده از جریان سیال دارد، تاثیر بگذارد. جریان سیال از موارد بسیار ضروری در آیرودینامیک می‌باشد. [۲۸]

شکل ۱۱ و ۱۲ مقایسه ضرایب پسا و بر با زاویه حمله در ماخ ۲ و بالک‌های مختلف را نشان می‌دهند. زاویه‌های حمله ۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰ می‌باشد. نتایج ضرایب نیروی بر و پسا بالک خمیده کمتر از بالک تخت می‌باشد. همچنین این ضرایب در بالک خمیده و بالک تخت با جنس آلومینیوم T6-7075 نسبت به بالک خمیده و بالک تخت با جنس فولاد ۴۱۳۰ کمتر می‌باشد.



شکل ۱۱- ضریب پسا با زاویه حمله در ماخ ۲

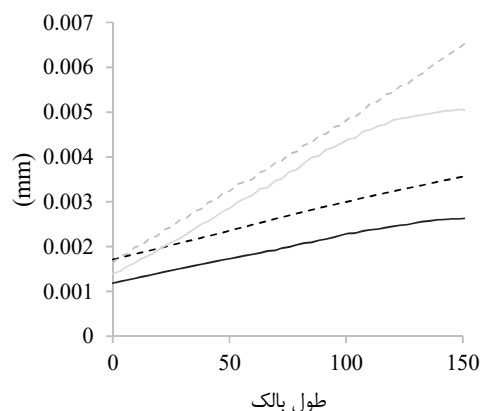


شکل ۱۵- مجموع تغییر شکل بالک‌های مورد مطالعه در ماخ ۲ و زاویه حمله صفر (الف) بالک خمیده آلومینیوم CGP ۷۰۷۵ (ب) بالک تخت آلومینیوم CGP ۷۰۷۵ (ج) بالک خمیده آلومینیوم فولاد ۴۱۳۰ (د) بالک تخت فولاد ۴۱۳۰

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله به وسیله فرآیند پرس کاری شیاری محدود شده که یک فرآیند جدید برای تولید مواد نانو کریستال می‌باشد و باعث بهبود خواص مکانیکی و در نتیجه بهینه‌سازی در طراحی سازه‌های فضایی می‌شود بالک با جنس آلومینیوم ۷۰۷۵-T۶ با ۳۸ درصد افزایش در استحکام تسلیم در عبور چهارم، ۳۴ درصد افزایش در مقدار استحکام کششی، کاهش ۴۰ درصد ازدیاد طول و افزایش ۶۲ درصدی سختی نسبت به نمونه اولیه تولید شد. به منظور مقایسه بالک تغییر خواص پیدا کرده نسبت به نمونه فولاد ۴۱۳۰ مورد استفاده در صنعت، شبیه سازی دو طرفه برهم‌کنش میان سیال و سازه برای دو بالک خمیده و تخت صورت گرفت تا رفتار آیرودلاستیک ایستایی و پایداری آنها مقایسه شود. بدیهی است که با افزایش عدد ماخ و زاویه حمله، تغییر شکل‌های موشک بزرگ‌تر می‌شود. تغییر شکل در بالک خمیده و بالک تخت به خاطر تاثیر بارهای آیرودینامیکی بر روی آنها رخ می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که تغییر شکل تأثیر قابل توجهی بر مشخصه‌های آیرودینامیک بالک خمیده و بالک تخت دارد. این بدان معناست که تغییر شکل‌های الاستیک به کاهش پایداری موشک کمک می‌کنند. با توجه به نتایج آیرودینامیک بالک تخت و خمیده بدست آمده با افزایش عدد ماخ و زاویه حمله ضرایب نیروی برا و پسا بالک خمیده کمتر از بالک تخت می‌باشد. این نتایج نشان دهنده تغییر شکل کمتر در موشک با بالک خمیده نسبت به بالک تخت و پایداری بیشتر آن می‌باشد.

بدیهی است که با افزایش عدد ماخ، تغییر شکل‌های موشک بزرگ‌تر می‌شود. تغییر شکل در بالک خمیده و بالک تخت به خاطر تاثیر بارهای آیرودینامیکی بر روی آنها رخ می‌دهد. نتایج در شکل ۱۴ میانگین مجموع تغییر شکل مربوط به بالک‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. تغییر شکل در سطوح کنترل ممکن است باعث عدم پایداری کافی برای کنترل موشک از نظر آیرودینامیکی شود. این بدان معناست که تغییر شکل‌ها در بالک‌های مورد مطالعه به کاهش پایداری موشک کمک می‌کنند. حداکثر مقدار مجموع تغییر شکل در انتهای بالک‌ها رخ داده است. با مقایسه نمودار مجموع تغییر شکل بالک‌ها مشخص می‌گردد کمترین تغییرات در موشک با بالک خمیده و با جنس آلومینیوم ۷۰۷۵-T۶ پرس کاری شیاری محدود شده می‌باشد که این امر نشان دهنده ایجاد استحکام نسبت به وزن عالی نمونه بهبود یافته آلومینیوم می‌باشد که باعث برتری ضرایب آیرودینامیک و پایداری عملیاتی نسبت به طرح‌ها و جنس‌های دیگر می‌گردد.



شکل ۱۴- مجموع تغییر شکل مربوط به بالک‌های مورد مطالعه

شکل ۱۵ مجموع تغییر شکل بالک‌های مورد مطالعه در ماخ ۲ و زاویه حمله صفر را نمایش می‌دهد. در این شکل نمایی قبل و بعد از مجموع تغییر شکل بالک‌های مورد مطالعه نمایش داده شده است. با مقایسه کانتور رنگ شکل‌ها مشخص می‌گردد همانطور که در شکل ۱۴ بیان شد، کمترین تغییرات در موشک با بالک خمیده و با جنس آلومینیوم ۷۰۷۵-T۶ پرس کاری شیاری محدود شده می‌باشد.

باشد. در تمامی نتایج به دست آمده در موشک با بالک خمیده و بالک تخت با جنس آلومینیوم ۷۰۷۵-T۶ نسبت به موشک با بالک خمیده و بالک تخت با جنس فولاد ۴۱۳۰ تغییر شکل کمتر و در نتیجه پایداری بیشتری ایجاد می شود.

۵- مراجع

- [18] Liu, X., Tang, S. J., & Guo, J. Comparison of the wrap-around fins and the planar fins in aerodynamic parameter. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 444, pp. 347-351). Trans Tech Publications, 2014.
- [19] Wright J. R., & Cooper J. E. *Introduction to aircraft aeroelasticity and loads* (Vol. 20). John Wiley & Sons, 2008.
- [20] Fluent, I. N. C. *FLUENT 6.3 user's guide*. Fluent documentation, 2006.
- [21] Spalart P., & Allmaras S. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows. In *30th aerospace sciences meeting and exhibit* (p. 439), 1992.
- [22] Menter F. Zonal two equation kw turbulence models for aerodynamic flows. In *23rd fluid dynamics, plasmadynamics, and lasers conference* (p. 2906), 1993.
- [23] Menter F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *ALAA Journal*, 40(2): 254-266, 2002
- [24] White, F. M. *Viscous Fluid Flow*, McGraw-Hill, New York, 1991.
- [25] Dongyang C., Abbas L. K., Xiaoting R., & Guoping W. Aerodynamic and static aeroelastic computations of a slender rocket with all-movable canard surface. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: *Journal of Aerospace Engineering*, 232(6): 1103-1119, 2018.
- [26] Fluent A. N. S. Y. S. Release 14.5. User's Guide, 2013
- [27] Chen, Z. T., & Sun, Q. Applications of inertia relief method in aircraft static aero-elasticity. *Flight Dynamics*, 5, 71-74, 2008.
- [28] Rafiee R, Moradi M, Khanpour M. The influence of material properties on the aeroelastic behavior of a composite wind turbine blade. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. Nov 28;8(6):063305, 2016.
- [1] Kafkas A., & Lampeas G.. Static Aeroelasticity Using High Fidelity Aerodynamics in a Staggered Coupled and ROM Scheme. *Aerospace*, 7(11), 164, 2020.
- [2] شامیرزایی جشوقانی صن، بلوچستانی اصل و. طراحی موشک های راهبردی و ماهواره ربر. موسسه فرهنگی هنری دیباگران تهران، ۱۳۹۴
- [3] Ross C. T. A conceptual design of an underwater missile launcher. *Ocean Engineering*, 32(1): 85-99, 2005.
- [4] Kunčická L., & Kocich R.. Correlating Structure and Electrical Properties in Rotary Swaged Al/Cu Clad Composites. In *Key Engineering Materials* (Vol. 865, pp. 85-90). Trans Tech Publications Ltd, 2020
- [5] Dehghan M., Qods F., & Gerdooei M. Investigation of microstructure and anisotropy of mechanical properties of ARB-processed commercial purity Aluminium with interpassing heat treatment. *Modares Mechanical Engineering*, 13(2): 123-132, 2013.
- [6] Sieber H., Wilde G., & Perepezko J. H. Thermally activated amorphous phase formation in cold-rolled multilayers of Al-Ni, Al-Ta, Al-Fe and Zr-Cu. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 250: 611-615, 1999.
- [7] Shin, D. H., Park, J. J., Kim, Y. S., & Park, K. T. Constrained groove pressing and its application to grain refinement of aluminum. *materials Science and Engineering: A*, 328(1-2): 98-103, 2002.
- [8] Jandaghi M. R., & Pouraliakbar H. Study on the effect of post-annealing on the microstructural evolutions and mechanical properties of rolled CGPed aluminum-manganese-silicon alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 679: 493-503, 2017.
- [9] DeSpirito J., & Plostins P. CFD prediction of M910 projectile aerodynamics: unsteady wake effect on magnus moment. In *AIAA atmospheric flight mechanics conference and exhibit* (p. 6580), 2007.
- [10] Danowsky, B., Thompson, P., Farhat, C., Lieu, T., Harris, C., & Lechniak, J. A complete aeroservoelastic model: incorporation of oscillation-reduction-control into a high-order CFD/FEM fighter aircraft model. In *AIAA atmospheric flight mechanics conference* (p. 5708), 2009.
- [11] Li M., Abbas L. K., Rui X., & Xiaolingwei N. The simulation of wraparound fins' aerodynamic characteristics. *Wseas Transactions on Applied and Theoretical Mechanics*, 10: 247-252, 2015.
- [12] Handbook M. Vol. 2-Properties and Selection: *Nonferrous Alloys and Special-Purpose Mater*. ASM Inter. 1119-1124, 1990.
- [13] Park J. K., & Ardell A. J. Microstructures of the commercial 7075 Al alloy in the T651 and T7 tempers. *Metallurgical Transactions A*, 14(10): 1957-1965, 1983.
- [14] *ASTM B210 / B210M-19, Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Drawn Seamless Tubes*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, www.astm.org
- [15] Designation: B918-01, *Standard Practice for Heat Treatment of Wrought Aluminum Alloys*, *The Annual Book of ASTM Standards, Section 03 (Mechanical Testing_ Elevated and Low-Temperature Tests_ Metallography)*, Volume 02.02 (Aluminum and Magnesium Alloys), ASTM International, United States, 2003.
- [16] *A. Standard, E8/E8M-16a. Standard test methods for tension testing of metallic materials*. ASTM international, West Conshohocken PA; 2016. doi: 10.1520, E0008-E0008M-09, www. astm. org, pp, 2016
- [17] *A. International, ASTM E384-99-Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials*, ASTM International West Conshohocken, 1999.