

# Investigating the Behavior of Aluminum 7075 under the Process of CGP as the Fin of Space Structures

#### ARTICLE INFO

Article Type Original Research

#### Authors

Heidari Sh.<sup>1</sup> *MSc*, Bakhshan Y.<sup>1</sup> *PhD*, Khourshidi Mal Ahmadi J.<sup>1</sup> *PhD*, Afsari A.<sup>\*2</sup> *PhD* 

#### How to cite this article

Heidari Sh, Bakhshan Y, Khourshidi Mal Ahmadi J, Afsari A. Investigating the Behavior of Aluminum 7075 under the Process of CGP as the Fin of Space Structures. Modares Mechanical Engineering. 2019; 19(5):1177-1186. ABSTRACT

One of the new approaches to produce nanoscale metals with ultera fine grains is applying severe plastic deformation on initial sample with coarse grains. In this method, by applying intense strain to the sample in several steps, the size of the grain decreases to a nanoscale, which results in the improvement of the mechanical and physical properties of the metals. One of the most important methods for this purpose is the constrained groove pressing (CGP) method. Due to the need for a small weight of space structures, sheets of aluminum alloys, aluminum7075-T6, and steel 4130 were selected. The mechanical behavior of the sheets was studied experimentally. The simulation of the interaction between the fluid and the structure was performed for a curved fin model with three different alloys and the deformation of the flying rocket was compared. The results show that the size of the aluminum7075-T6 block decreases from 60 microns to 270 nm with increasing the stages of the process, while the yield strength in the fourth pass increases compared to the annealed sample by 38%. The tensile strength increased by 34%, and the length elongation in the fourth passes reduced by 40%. The total deformation in the fin of the aluminum 7075-T6 improved to 99.9% with the CGP process. However, the amount of deformation in the steel 4130 fin compared to the CGPed aluminum7075-T6 is less than 0.1% of the total deformation.

**Keywords** Plastic Deformation; Spatial Structures; Constrained Groove Pressing; Simulation; Mechanical Behavior

#### CITATION LINKS

[1] Computational fluid dynamics and experimental investigation ... [2] Sliding-mode control for integrated missile ... [3] Magnus effects on stability of wraparound ... [4] An experimental study of the aerodynamic behavior ... [5] A conceptual design of an underwater missile ... [6] Kocich R. Study of deformation behavior, structure and mechanical ... [7] Electrodeposition of Al-Mn-Zr ternary alloy films from the Lewis ... [8] High strength and high ductility behavior of 6061-T6 ... [9] Investigation of microstructure and anisotropy of mechanical ... [10] Thermally activated amorphous phase formation in cold-rolled ... [11] Constrained groove pressing and its application to grain ... [12] Study on the effect of postannealing on the microstructural evolutions ... [13] Rubber pad-constrained groove pressing process: Experimental ... [14] Experimental and numerical investigation of Al properties ... [15] Grain refinement and crack prevention in constrained ... [16] Microstructure dependence of a Cu-38Zn alloy on processing ... [17] A comparative study between deformation behavior... [18] Influences of die structure on constrained groove pressing ... [19] Metals handbook: Properties and selection ... [20] Microstructures of the commercial 7075 Al alloy in the ... [21] ASTM B210-12, standard specification for aluminum and ... [22] Heat treater's guide: Practices and procedures for ... [23] Designation: B918-01, standard practice for heat treatment of wrought ... [24] A characterization for the flow behavior of as-extruded 7075 ... [25] ASTM E8/E8M-16a, standard test methods for tension testing of metallic ... [26] ASTM E384-99, standard test method for microindentation hardness ... [27] Aerodynamic analysis of a rolling wraparound fin projectile in ... [28] Development of DDES and IDDES formulations for the k- $\omega$  shear ... [29] Comparative analysis of the calculation data on an unsteady flow around ... [30] Modification of Spalart-Allmaras model with consideration of turbulence ... [31] Selecting boundary conditions in physiological strain analysis of the femur ... [32] Aerodynamic and static aeroelastic computations of a slender rocket with ... [33] Applications of inertia relief method in aircraft static ... [34] The effect of wrap-around fins on aerodynamic stability and rolling moment ...

<sup>1</sup>Department of Mechanic, Hormozgan University, Bandar Abbas, Iran <sup>2</sup>Department of Mechanic, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran

#### \*Correspondence

Address: Department of Mechanic, Islamic Azad University, 5th Kilometer Of Sadra Highway, Shiraz, Iran Phone: +98 (71) 36410041 Fax: +98 (71) 36410059 afsari@iaushiraz.ac.ir

#### Article History

Received: August 31, 2018 Accepted: December 03, 2018 ePublished: May 01, 2019

Copyright© 2019, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

# بررسی عملکرد آلومینیوم ۲۰۷۵ تحت فرآیند CGPشده بهعنوان بالَک سازههای فضایی

**شاهین حیدری MSc** گروه مکانیک، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران گروه مکانیک، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران **جمشید خورشیدیمال|حمدی PhD** گروه مکانیک، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران **احمد افسری**• PhD گروه مکانیک، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

#### چکیدہ

یکی از رویکردهای جدید برای تولید مواد با دانههای بسیار ریز، اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید روی نمونه اولیه با دانههای درشت است. در این روش با اعمال چندین مرحله کرنشهای شدید روی نمونه، اندازه دانهها تا مقیاس نانومتری کاهش مییابد و منجر به بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی در فلز میشود. یکی از مهمترین روشها برای این منظور، فرآیند CGPشده است. بهدلیل نیاز به وزن کم بالُک سازههای فضایی، ورقهایی از جنس آلیاژهای آلومینیوم، آلومینیوم T6-7075 و فولاد ۴۱۳۰ انتخاب شدند. رفتار مکانیکی ورقها برای ساخت بالک بهصورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. شبیهسازی برهمکنش میان سیال و سازه برای مدل بالَک خمیده با سه آلیاژ مختلف انجام شد و میزان تغییر شکل بهوجودآمده برای موشک در حال پرواز با یکدیگر مقایسه شدند. نتايج نشان مىدهد كه اندازه ذرات بالَک آلومينيوم T6-7075، با افزايش مراحل پرسکاری از ۶۰میکرون به ۲۷۰نانومتر کاهش داشته است، در حالی که استحکام تسلیم در عبور چهارم نسبت به نمونه آنیل شده ۳۸% افزایش مییابد. مقدار استحکام کششی نیز با ۳۴% افزایش، بهبود یافته و درصد ازدیاد طولی در عبور چهارم به پایینترین مقدار خود، یعنی ۴۰% کاهش پیدا کرده است. مجموع تغییر شکل در بالک با جنس آلومینیوم T6-7075 با فرآیند CGPشده با ۹۹/۹% بهبودی همراه بوده، لیکن مقدار تغییر شکل در بالَک فولاد ۴۱۳۰، با ۰/۱% مجموع تغيير شكل نسبت به جنس آلومينيوم T6-7075 كمتر است.

**کلیدواُژهها:** تغییر شکّل پلاستیک، سازههای فضایی، پرسکاری شیاری، شبیهسازی، رفتار مکانیکی

> تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۶/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۱۲ \*ئویسنده مسئول: afsari@iaushiraz.ac.ir

#### ۱– مقدمه

هدف اصلی از بهکارگیری موشکهای نظامی، رساندن یک سرجنگی ویژه به یک هدف مشخص است. سرجنگی بههمراه سامانه هدایت و کنترل و همچنین موتور در درون بدنه موشک قرار میگیرد که نهایتاً، این بدنه باید به هدف تعیینشده برسد. در طراحی این موشکها یکی از اهداف اصلی کمکردن وزن سازه در زمان برخاست و در عین حال افزایش ظرفیت بار آن است که منجر به افزایش سهم انرژی پرتابه و در نتیجه افزایش کارآیی آن میشود. بدیهی است که بخش عمدهای از وزن این سازهها مربوط به بدنه و سطوح آیرودینامیک این موشکها است. اغلب موشکها از سطوح آیرودینامیک برای کنترل استفاده میکنند و همانطور که در شکل ۱ مشاهده میشود، عموماً طراحان این سازهها، این سطوح را در سه گروه اصلی شامل کاناردها، بالها و بالکها تقسیمبندی مینمایند. رفتار سطوح حالتهای گوناگونی دارد که بسته به موقعیت آنها نسبت به مرکز جرم سازه، متفاوت است. عموماً یک بال، سطح نسبتاً بزرگی است که پشت مرکز جرم قرار میگیرد. این در حالی است که کانارد سطحی نزدیک به نوک سازه و بالک در انتهای دم سازه قرار می گیرد<sup>[1, 2]</sup>.

اغلب موشکها، دست کم به یکی از این سطوح آیرودینامیک

بهویژه بالکها که پایداری پرواز موشک را ایجاد میکنند، مجهز میشوند. بالکها متداولترین نوع کنترلکننده در موشکها بهویژه برای موشکهای برد متوسط هوا به هوا و موشکهای سطح به هوا هستند. دلیل اصلی برای استفاده از این سامانه کنترلی، این است که بالک کنترلی، مانورپذیری بسیار خوبی را در زوایای حمله بالا ایجاد میکند. البته قبلاً از بالک برای مانورپذیری هواپیماها بسیار استفاده میشد<sup>[1]</sup>.

در سالهای اخیر، کمکردن وزن سازه و استفاده بهتر از فضا، بستهبندی راحت و افزایش قابلیت اطمینان موتور برای پرتاب موشک، طراحان پرتابگرها را به سمت استفاده از لوله، رهنمون ساخت. بهدلیل قیود بستهبندی در پرتاب موشک با استفاده از لوله، نیاز به پایدارکنندههای آیرودینامیک بود تا در کنار هم، روی بدنه موشک جای داده شوند و بلافاصله پس از پرتاب بر اثر نیروهای ژیروسکوپی، آیرودینامیک یا مکانیکی از یکدیگر باز شوند. موشکهای بالک خمیده از جمله موشکهایی هستند که برای رفع این نیازمندی در دهه شصت پدید آمدهاند<sup>[3]</sup>.

اصطلاح بالک خمیده معمولاً به سطوح خمیدهای اطلاق میشود که از آنها در اشیای پرنده تحت عنوان سطوح پایدارکننده یا سطوح کنترلکننده استفاده میشود و دارای شعاع انحنایی برابر با بدنه موشک است و تا هنگام بازشدن به دور بدنه موشک پیچیده میشوند. بهدلیل قابلیت بستهبندی کمحجمتر و حمل و نقل آسانتر، از این بالکها بهطور گسترده در موشکهایی استفاده میشود که از داخل لوله پرتاب میشوند. این نوع بالکها، طراحی سکوهای نگهدارنده و ارسالکننده موشکها را در زیر بدنه هواپیماها و بالگردهای جنگی آسان کرده است و از پیچیدگیهای موشک و جداشدن از سکوی پرتاب، بالکهای خمیده باز میشوند. میزان پیچیدگی موشکهای بالک خمیده بهتدریج از راکتهای میزان پیچیدگی موشکهای بالک خمیده موشد<sup>[4]</sup>.

با توجه به نیاز بهینهسازی در تغییر وزن، بهمنظور افزایش برد این سازهها، نیاز صنایع پیشرفته تکنولوژیک هوانوردی به موادی که از نسبت استحکام به وزن بالایی برخوردار باشند، بیشتر احساس میشود. موثرترین راهی که بهمنظور کاهش وزن بدنه سازه و افزایش کارآیی آن توصیه میشود، کاهش چگالی مواد ۳ تا ۵برابر بوده که موثرتر از افزایش استحکام کششی، مدخل یا تلرانس خرابی است<sup>[3]</sup>.

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 و علت آن، کاربرد گسترده این فلز در صنایع هوافضا بهدلیل دارابودن ویژگیهای منحصربهفرد آن است<sup>[6]</sup>. با توجه به پیشرفت روزافزون صنایع هوافضا، نیاز به بهبود خواص آلیاژهای آلومینیوم از جمله دستیابی به استحکامهای بالا همزمان با حفظ وزن کم حس میشود. بسیاری از محققان کوشیدند تا از طریق آلیاژسازی مکانیکی با عناصری نظیر منگنز، منیزیم، مس، سیلیسیم و روی به استحکامهای بالا در فلز آلومينيوم دست يابند<sup>[7]</sup>. مشكل اساسى اين روش استحكامبخشى، بروز تخلخلهای ریز و احتمال ایجاد ترک است. روی همرفته عواملی از قبیل ناخالصیها بهدلیل افزایش استحکام شبکه کریستالی و همچنین وجود نواقص ساختاری شامل مرزدانهها و نابهجاییها نقش اساسی و تعیینکنندهای در ایجاد استحکام آلومينيوم دارند<sup>[8]</sup>.



**شکل ۱)** شماتیک سطوح آیرودینامیک برای کنترل سازه هواگرد

با توجه به توصیفات ذکرشده، نیاز به ارایه و توسعه روشی مناسب برای بهبود خواص مکانیکی آلومینیوم با حفظ وزن آن است. در دو دهه اخیر، مواد پلیکریستال با دانهبندی بسیار ریز در حد نانومتر یا چندصدنانومتر (کمتر از میکرون) بهدلیل برخورداری از خواص مکانیکی و فیزیکی ویژه، شدیداً مورد توجه محققان قرار گرفته است. خواص مکانیکی و فیزیکی مواد کریستالی تحت تاثیر فاکتورهای متعددی هستند که اندازه متوسط دانه در تعیین این خواص تاثیر بسزایی دارد. بهطور کلی طبق رابطه ۱، رابطه (هال-بهعارات دیگر با کوچکشدن اندازه دانه، استحکام ماده نیز افزایش مییابد<sup>[9]</sup>.

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-\frac{1}{2}}$$

در این رابطه،  $\sigma_v$  تنش تسلیم،  $\sigma_v$  مقاومت شبکه، b اندازه دانه و  $k_y$  ثابتی است که به جنس ماده بستگی دارد (ضریب هال– پچ). یکی از رویکردهای جدید برای تولید مواد نانوکریستال و مواد با دانههای بسیار ریز، اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید روی نمونه اولیه با دانههای درشت است. در این روش با اعمال کرنشهای شدید به نمونه، طی چندین مرحله، اندازه دانههای آن تا مقیاس نانومتری کاهش مییابد و این موضوع باعث بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی بسیار مطلوبی در ماده میشود. این خواص مناسب میسازد. از آنجایی که تغییرات ابعادی ماده میتواند مانعی در مقابل میزان کرنش اعمالی باشد، بنابراین اکثر روشهای اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید بهنحوی طراحی شدهاند که ابعاد نمونه حین فرآیند، ثابت میماند و تغییر نمیکند<sup>[9]</sup>.

تاکنون فرآیندهای متعددی برای اعمال تغییر شکل شدید پلاستیک در مواد فلزی و رسیدن به ساختارهای نانومتری یا بسیار ریز از قبیل کانالهای هممقطع زاویهدار (ECAP)، پرسکاری شیاری محدودشده و پرسکاری شیاری تکراری و صاف CGP and شیاری محدودشده و پرسکاری شیاری تکراری و صاف CGP and (RGP)، پیچخوردگی تحت فشار بالا (HPT)، اکستروژن و فشردهسازی چرخشی (TE and TAE)، فرآیند نورد تجمعی (ARB)، فرآیند نورد از مجرای زاویهدار (ECAR)، فورجینگ سایشی چندمحوری (MDF) و اکستروژن پیچیده (TE) وجود دارد.

ویژگی مشترک و منحصربه فرد اکثر این فرآیندها، ثابت بودن ابعاد و عدم تغییر شکل ظاهری ماده در حین فرآیند است که در نتیجه آن، محدودیت در اعمال کرنش از بین می ود و دستیابی به کرنشهای بسیار بالا در ماده به راحتی میسر است. به این ترتیب در اثر اعمال کرنش، امکان اصلاح ریز ساختار، کاهش اندازه دانه ها تا مقیاس نانومتر و بهبود خواص مکانیکی نمونه فلزی فراهم می آید، در حالی که شکل نمونه تغییری نمی کند<sup>[10]</sup>. ویژگی دیگر این فرآیندها، افزایش استحکام و اصلاح ساختار دانه ها بدون اضافه کردن عناصر آلیاژی یا ذرات سرامیکی است. یکی از مهم ترین

Volume 19, Issue 5, May 2019

روشهای اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید، روش پرسکاری شیاری محدودشده بوده که بهدلیل ویژگیهای خاص، توجه بسیاری از محققان را در یک دهه اخیر به خود معطوف کرده است<sup>[11]</sup>. فرآیند پرسکاری شیاری محدودشده، روشی موثر برای تولید مواد با دانههای بسیار ریز است تا از این طریق خواص مکانیکی و فیزیکی آنها را بهطور چشمگیری بهبود بخشد<sup>[11]</sup>.





شین و همکاران<sup>[11]</sup> برای نخستین بار این فرآیند را در تولید ورقهای نانوکریستالی از جنس آلومینیوم خالص استفاده کردند. برای انجام این فرآیند، نیاز به دو مجموعه قالب شیاردار و قالب صاف است. طبق شکل ۲، ابعاد هندسی شیارهای قالب براساس عرض شیار، t و زاویه شیار  $\theta$  تعریف می شود. همان طور که در شکل ۲ قابل مشاهده بوده، مقطع قالب شیاردار نامتقارن است. روند انجام فرآیند شامل چهار مرحله زیر است:

مرحله اولُ: شیاردارکردن ُورق صاف تحت پرس با قالب شیاردار (شکل۲–الف).

#### ۱۱۹۰ شاهین حیدری و همکاران ـ

مرحله دوم: صاف کردن ورق شیاردار تحت پرس با قالب صاف (شکل ۲- ب).

مرحله سوم: گردش ۱۸۰درجه ورق (شکل ۲– ج) و دوباره شیاردارکردن ورق صاف تحت پرس با قالب شیاردار (شکل ۲–د). مرحله چهارم: صافکردن ورق شیاردار تحت پرس با قالب صاف (شکل ۲–ه).

در این فرآیند، چهار مرحله پرسکاری متوالی ذکرشده، یک پاس پرسکاری نامیده میشود. انجام هر پاس پرسکاری همراه با ریزترکردن دانهبندیهای ورق میتواند منجر به افزایش استحکام و سختی ورق شود، ولی با افزایش تعداد پاسها اثرات فرآیند بر بهبود رفتار مکانیکی ورق کاهش مییابد. همچنین ایجاد ترکهای سطحی و کاهش شکلپذیری نمونه از عوامل محدودکننده تعداد پاسهای قابل انجام برای یک ورق است. نتایج پژوهش *شین* و همکاران[11] نشان داد که پرسکاری شیاری ورقهای آلومینیومی مانند سایر روشهای تغییر شکل پلاستیک شدید سبب بهبود قابل توجه استحکام و سختی نمونهها می شود. پس از آن، به کارگیری این روش برای ارتفاع خواص انواع آلیاژها مورد توجه محققان بسیاری قرار گرفت که در اینجا بهدلیل اختصار از پرداختن به آن صرف نظر می شود. مطالعه در خصوص اثر هندسه قالب بر بهبود رفتار نمونهها بسیار محدود و گاهی در تناقض با یکدیگر بوده است. *برهانی* و د*یجوانرودی* با پیشنهاد فرآیند اصلاحشده (پرسکاری شیاری محدود همراه با تشک لاستیکی) به بررسی تجربی اثر عرض و زاویه شیار بر رفتار ورق نانوکریستال شده پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که در مقایسه با زاویه شیار مرسوم ۴۵درجهای، زاویه شیار ۵۰درجه منجر به ریزترشدن ساختار دانهبندیهای ورق می شود. این موضوع اگرچه سبب بهبود خواص مکانیکی ورق شد، ولی کاهش یکنواختی کرنش در نمونههای نهایی را بههمراه داشته است<sup>[13]</sup>.

از دیدگاه طراحی مهندسی، یکنواختی کرنش در ورق نهایی از نظر دستیابی به قابلیت اطمینان بالا و کاهش نامعینیهای احتمالاتی دارای اهمیت است. *سجادی* و همکاران با پیشنهاد فرآیند (پرسکاری شیاری محدود پوششی) نشان دادند که افزایش زاویه شیار از ۴۵ به ۵۳درجه منجر به بهبود خواص مکانیکی چشمگیری نمیشود. همچنین این تغییر قالب سبب کاهش تعداد پاسهای قابل انجام روی ورق میشود<sup>[11]</sup>.

*پنگ* و همکاران به تحلیل اثر عرض شیار قالب بر رفتار ورقی از آلیاژ مس و روی تحت فرآیند پرسکاری شیاری محدود پرداختند. نتایج حاکی از آن است که افزایش عرض شیار قالب از ۵ به ۲میلیمتر منجر به افزایش تعداد پاسهای پرسکاری قابل انجام روی ورق قبل از ایجاد ترکهای سطحی می شود. البته این تغییر قالب همراه با کاهش نرخ ریزساختارسازی و کاهش نرخ سخت ترشدن سطح بوده است<sup>(15, 16]</sup>.

رحیمی و همکاران به بررسی رفتار تغییر شکل آلومینیوم خالص در فرآیندهای CGP و RCS با استفاده از آنالیز المان محدود پرداختند. آنها مشاهده کردند که مقدار پُرشدن فضای قالب در روش فشردهسازی شیاری محدود نسبت به موجدار و صافکردن متوالی بیشتر است. بنابراین امکان تکرار فرآیند برای رسیدن به مقادیر بالای کرنش پلاستیک فراهم میشود. همچنین نمونه تغییر شکلیافته توسط روش فشردهسازی شیاری محدود نسبت به

روش دیگر، کرنش بیشتری متحمل شده است. علاوه بر این، توزیع کرنش بهصورت یکنواختتری در نمونه اعمال شده است<sup>[17]</sup>.

*وانگ* و همکاران به بررسی اثر هندسه قالب بر رفتار ورقی از نیکل خالص تحت فرآیند پرسکاری شیاری پرداختند. آنها همزمان اثر تغییرات زاویه و عرض شیار بر رفتار مکانیکی ورق پس از فرآیند را مطالعه کردند. برای تعیین زاویه و عرض بهینه قالب برای پرسکاری شیاری، یک نمونه ورق به ضخامت ۲میلیمتر، از مدلسازی عددی فرآیند استفاده کردند<sup>[18]</sup>

با توجه به مطالعات انجامشده، تحقیقات اندکی در زمینه کاهش وزن بدون کاهش استحکام سازههای فضایی انجام گرفته است. از آنجایی که این پروژه با محدودیتهایی برای مطالعه تجربی آن در اندازه هندسه قالب، هزينه و زمان مواجه بود، نتايج تحقيق به بررسی تغییرات رفتار مکانیکی نمونهها میپردازد که صرفاً محدود به ابعاد مشخصی میشود و بهدلیل کوچکبودن بالکها و با توجه به استراتژیکیبودن آنها برای سازههای فضایی انتخاب شده است. در این یژوهش، با هدف برطرفکردن این محدودیت و امکان توسعه مطالعات در زمینه کاهش وزن سازههای فضایی بهواسطه تغییرات رفتار مکانیکی، سعی شده است که مطالعه تجربی روی رفتار مکانیکی ورقهای پرسکاریشده برای ساخت بالک صورت گیرد و با شبیهسازی برهمکنش میان سیال و سازه برای مدل بالک خميده طبق استاندارد برنامه تحقيقاتي بينالمللي موسوم به برنامه همکاری فنی با سه جنس آلومینیوم ۲۰۷۵، آلومینیوم T075-T6 یرسکاری شیاری محدودشده و فولاد ۴۱۳۰، میزان انحرافات بهوجودآمده موشک در حال پرواز مقایسه شده است.

### ۲ – مواد و روش آزمایش ۲ –۱ – ماده اولیه

در این تحقیق از آلیاژ آلومینیوم ۲۰۷۵ برای تهیه بالُک خمیده جایگزین بالک فولاد ۴۱۳۰ استفاده شد. خواص مکانیکی این فولاد در جدول ۱ آورده شده است. از آنجایی که آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵، قابلیت عملیات حرارتی و نسبت استحکام به وزن بالایی بهسبب اندازه ریز و یکنواخت رسوبهای فاز ثانویه در شبکه طی عملیات پیر سختی دارد، با اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید روی آن، گزینه مناسبی برای جایگزینی با فولاد ۴۱۳۰ در صنایع هوا- فضا است<sup>[19]</sup>. بهمنظور بالارفتن استحكام و سختى و همچنين كاهش مقاومت به خوردگی تنشی، عملیات پیرسختی T6 در طی فرآیند صورت پذیرفت[20]. همچنین ترکیبات شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ توسط طیفسنج جرقهای (SES)، اندازهگیری و با استاندارد ASTM B210 مقایسه و در جدول ۲ نشان داده شده است<sup>[21]</sup>. بهمنظور تهیه نمونه مناسب برای انجام فرآیند یرسکاری شیاری محدودشده، عملیات برش در سطوح صفحه اولیه صورت گرفت. نمونه با طول ۲۰، عرض ۹ و ضخامت ۵/۰سانتیمتر توسط دستگاه برش تهیه شد.

### **جدول ۱)** خواص مکانیکی این فولاد

مقدار	ویژگیهای مکانیکی			
۲.٧	سختى ويكرز			
<b>۶ү</b> •МРа	مقاومت کششی نهایی			
۴۳۵MPa	مقاومت تسليم			

جدول ۲) ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۷۵ مورداستفاده (درصد وزنی)

Al	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Cr	Mn	Ti	Pb	Sb	V	Ni	Zr	عنصر
Bal.	0/11	۲/٤٦	1/44	+/٥٢٣	•/٤0	•/1٤	•/1•£	٠/٠٢١	•/•71	•/••Y	•/••Y	•/10	•/••1	درصد وزنی
Bal.	0/1-7/1	۲/۱_۲/۹	1/4-4/+	•/0•	•/٤•	•/\X _•/YX	٠/٣٠	•/٢•			•/10			درصد وزنی[21]

ماهنامه علمی–پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس

#### ۲-۲- تجهیزات فرآیند پرسکاری شیاری محدودشده

در این تحقیق، سادهترین نوع قالب فرآیند پرسکاری شیاری محدودشده به کار گرفته شد، بهگونهای که دارای دو بلوک بوده و هر کدام دارای قسمت شیاردار نامتقارنی است که تغییر شکل برشی را ایجاد میکند و علاوه بر این شامل قالب تختی است که قطعه تغییر شکلیافته را صاف میکند. ابعاد قالب شامل طول ۵۵، عرض ۹ و ارتفاع ۲۰سانتیمتر است. ابعاد شیار در قالب شیاردار ۱/۵ معادل ضخامت ورق و زاویه ۴۵درجه بوده که توسط عملیات ماشینکاری ایجاد شده است. جنس بهکاررفته برای ساخت قالب، فولاد ابزار AISI 1.6580 است. برای ایجاد شیارهای قالب، ابتدا عملیات ماشینکاری روی بلوکهای فولادی صورت گرفت و سپس مالب تحت عملیات حرارتی قرار داده شد. قالب در دمای  $^{\circ}C$ بهمدت ۸۰دقیقه تحت عملیات انحلال (شامل آنیلینگ، تنشزدایی و سختکاری) قرار گرفت و سپس برای انجام عملیات کوئنچ در محیط روغن، سرد شد. عملیات بازپخت نیز در سه دمای ۲۱۰، ۳۶۰ C و  $^\circ$ ۴۳۰° بهمدت ۱۸۰دقیقه انجام گرفت و سختی حدود ۵۰راکول در قالب ایجاد شد (شکل ۳) <sup>[22]</sup>.



**شکل ۳)** تصویر قالب مورد استفاده

### ۲–۳– انجام فرآیند پرسکاری شیاری محدودشده

برای حذف تنشهای پسماند و بالابردن استحکام و سختی نمونههای آلومینیوم ۲۰۷۵، آنها طبق استاندارد D918-01 ASTM تحت عملیات حرارتی T6 قرار داده شدند<sup>[23]</sup>. نمونهها تا دمای  $^{\circ}$  ۲۹۷ بهمدت یک ساعت، گرم و بعد از آن در آب سرد شدند. فرآیند با نرخ کرنش <sup>1-</sup> ۱۰۶ در دمای  $^{\circ}$  ۲۰۱ صورت گرفت و برای انجام آن از دستگاه پرس داغ اینسترون ۸۵۰۲ با حداکثر شد. ابتدا بهمدت ۵۱دقیقه در کوره دستگاه قرار گرفتند که قبلاً به شد. ابتدا بهمدت ۵۱دقیقه در کوره دستگاه قرار گرفتند که قبلاً به مرحله صافکاری، ورق ۸۵۰درجه در جهت عقربههای ساعت مرحله مافکاری، ورق ۸۵درجه در جهت عقربههای ساعت انجام آزمایش، برای کاهش اصطکاک بین فک قالب و نمونه، شیارهای قالب بههمراه نمونه توسط روانکار شیمیایی  $MoS_2$ 



**شکل ٤)** تصویر نمونه پرسکاری شیاری محدودشده

#### ۲\_۴\_ بررسی ریزساختار

ریزساختار سطح مقطع فلز پایه و نمونه آلومینیوم 7075-T6 تحت عملیات پرسکاری شیاری محدودشده توسط میکروسکوپ نوری IEI- IMM420 Microscope (شرکت صاایران) مورد

Volume 19, Issue 5, May 2019

ـ بررسی مملکرد آلومینیوم ۲۰۷۵ تحت فرآیند GGPشده بهعنوان بالک سازههای فضایی ۱۱۱۱ مطالعه قرار گرفت. همچنین برای ارزیابی ترکیبات شیمیایی رسوبات موجود و مورفولوژی سطح نمونهها از میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) مدل 900EM (شرکت زایس) استفاده شد و آنالیز تصاویر ریزساختار توسط نرمافزار MIP4student انجام گرفت.

#### ۲-۵- آزمون کشش

کلیه نمونهها برای آزمون کشش طبق استاندارد ASTM E8/E8M-16a آماده شد و با استفاده از دستگاه وایرکات به ابعاد مورد نظر رسید. آزمون کشش با سرعت ثابت یکمیلیمتر در دقیقه در دمای محیط برای کلیه نمونهها و فلز پایه انجام شد<sup>[25]</sup>.

# ۲–۶– آزمایش ریزسختیسنجی

آزمون سنجش ریزسختی طبق استاندارد ASTM E384-99 و براساس معیار ویکرز با فرورونده مربع القاعده الماسی انجام شد که برای این منظور، نوک فرورونده روی خط میانی مقطع عرضی نمونههای متالوگرافشده در فواصل ۵میلیمتری از هم با اعمال نیروی ۵۰نیوتن در مدتزمان ۱۰ثانیه بهوسیله دستگاه سختیسنج (مدل DHV-1000) انجام شد و نمودار تغییرات سختی برای نمونههای مختلف رسم شد<sup>[26]</sup>.

# ۲-۲- ساخت بالَک

بالک مورد مطالعه در این پژوهش، مدل بالک خمیده بوده که طبق استاندارد برنامه تحقیقاتی بینالمللی موسوم به برنامه همکاری فنی (TTCP) ساخته شده است. بهمنظور ساخت این بالک، نمونه اولیه و نمونه تولیدشده در پاس چهارم با استفاده از دستگاه وایرکات با توجه به هندسه موجود در شکل ۵ به طول و عرض ۸/۱۷/×۶/۶سانتیمتر برش داده شد<sup>[22]</sup>. این بالک دارای ضخامت ۵/۰سانتیمتر است که بعد از برش نمونهها و عملیات ماشینکاری در دو طرف عرض بالک بهوسیله عملیات سنگزنی، زاویه گوهای ۴۵درجه ایجاد شد و سپس با استفاده از نورد سرد، ورقی به شکل قوسی به شعاع ۸/۴سانتیمتر و زاویه وتر ۴۵درجه بین مرکز سطح مقطع و نوک بالک در محور طولی ایجاد شد.

#### ۲–۸– شبیهسازی برهمکنش میان سیال و سازه

با توجه به هندسه موجود، شبیه سازی مدل بالک خمیده طبق استاندارد برنامه همکاری فنی در نرم افزار SolidWorks 2016 برای سه جنس مورد استفاده در ساخت بالکهای کنونی شامل آلومینیوم ۲۰۷۵، آلومینیوم ۲۵-۲075 پرسکاری شیاری محدودشده در پاس چهارم و فولاد ۴۱۳۰ صورت گرفت (شکل ۶). Ansys برای تحلیل برهم کنش میان سیال و سازه از نرم افزار Ansys 2016 استفاده شد. با توجه به نقش کمرنگ بدنه موشک، در تولید هندسه این بخش ساده سازی صورت گرفته است.

ورودی و خروجی بهترتیب سرعت ۳ ماخ و فشار مرجع است. بدنه موشک نیز بهعنوان دیواره در نظر گرفته شد. شرایط مرزی بدون لغزش روی سطح موشک اعمال میشود و زاویه حمله موشک صفر است.

جدول ۳، خواص مکانیکی مواد مورد مطالعه و جدول ۴ <sup>[28-30]</sup> فرضهای بهکاربردهشده در تحلیل میدانهای سیال و سازه را نشان میدهد. معادلات حاکم بر جریان سیال، معادلات متوسطگیریشده ناویر– استوکس (RANS) شامل معادلات پیوستگی و مومنتوم است (معادلات ۴–۲).

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{(Y)}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \tau_{ij}^{eff} \right) + G_i \tag{(7)}$$

**Modares Mechanical Engineering** 

۱۱۹۲ شاهین حیدری و همکاران ــ

$$\tau_{ij}^{eff} = -p\delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - \rho u_i' u_j' \tag{F}$$

در این معادلات، *u* بردار سرعت، t معرف زمان و *x* بردار مکان بوده و شرط مرزی انتهای بالک، تکیهگاه ثابت قرار داده شده است. ترم آخر در معادله ۳، ترم تنش رینولدزی است که توسط مدل توربولانسی انتخابشده مدل میشود.

معادلات حاصل غیرخطی هستند و استفاده از راهحل مستقیم امکانپذیر نیست. بنابراین، از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) بهدنبال راهحلهای عددی برای نسخههای خطیشده از این معادلات غیرخطی استفاده شد.



**شکل 0)** هندسه مدل موشک بالَک خمیده استاندارد TTCP <sup>[28]</sup>؛ الف) هندسه کامل موشک؛ ب) هندسه بالَک موشک



**شکل ٦)** شبیهسازی مدل بالک خمیده طبق استاندارد برنامه تحقیقاتی بینالمللی موسوم به برنامه همکاری فنی در نرمافزار SolidWorks 2016

جدول ۳) خواص مکانیکی مواد مورد مطالعه

فولاد ۴۱۳۰	آلومينيوم 7075-T6 با فرآيند CGP	آلومينيوم ٧٠٧۵	خواص مکانیکی
4.1	206	۱۵۰	سختی
۶۲۰	۲۲۷	۵۵۳	تنش نهایی (MPa)
۴۳۵	۶۷۸	K9M	تنش تسليم (MPa)
۲.۵	208	٧٢	<b>مدول کشسانی</b> (GPa)
۰/۲۹	•/۲٨	۰/۳۳	نسبت پواسون
٨٠	٩٩	۲۷	مدول برشی (MPa)

ماهنامه علمی– پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس

<b>جدول ٤)</b> فرضهای بهکاربردهشده در تحلیلهای سیال و سازه						
فرض	مشخصه	ماژول محاسباتی				
جریان پایا	تحليل سيال					
تراكمپذير	جريان سيال					
هوا در دمای C°۵۵ و فشار مرجع ۱ اتمسفر	نوع سيال	دینامیک سیالات				
مدل انتقال تنش برشی (SST) <sup>[298]</sup>	مدل توربولانسی	محاسباتي				
مدل اسپالارت آلماراس <sup>[29, 30]</sup>	مدل لايەمرزى					
میدان سیال سەبُعدی	ابعاد ميدان					
استاتیک	تحليل سازه					
نیروهای آیرودینامیک، نیروهای سازهای الاستیک و نیروهای لَختی	بارهای وارده به بالَک					
یکطرفه	نوع برهمكنش	ديناميک				
آلومينيوم ٧٠٧۵، آلومينيوم -7075		مدردهای محاسباتی				
T6 پرسکاری شیاری محدودشده و فولاد ۴۱۳۰	نوع سازه					
سازه پيوسته دوبُعدي	ابعاد ميدان					

در حل عددی CFX در نرم افزار ANSYS، از معادلات متوسط گیری شده ناویر – استوکس با مدل توربولانس انتقال تنش برشی برای محاسبه کل نیروها استفاده شد.

محاسبات استاتیک آیروالاستیسیته، دربرگیرنده اثر متقابل قوی بین نیروهای آیرودینامیک، نیروهای سازهای الاستیک و نیروهای لَختی هستند. برای شبیهسازی موشک در پرواز آزاد از روش تعادل دینامیکی (اصل دالامبر) در دینامیک سازههای محاسباتی (CSD) استفاده شد (معادلات ۵ و ۶) [<sup>31, 32</sup>].

$$Kx = F + T_F \tag{(a)}$$

$$F_t^a + M_t a_t = 0 \tag{9}$$

جایی که K، K،  $F_t$ ،  $F_t$ ,  $F_t$ ,  $F_t$ ,  $F_t$ , K متریب ماتریس سختی، بردار جابهجایی (محاسبه میشود)، بردار نیروی اعمالشده (نیروهای آیرودینامیک، محاسبهشده با استفاده از تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی) و بارمحوری، اجزای نیروهای بردار بار اعمالشده، بردار شتاب ناشی از تعادل دینامیکی (محاسبه میشود) و تانسور کل مدل عناصر محدود است. شبیهسازی برهمکنش میان سیال و سازه با ادغام محاسبات دینامیک سیالات محاسباتی و دینامیک سازههای محاسباتی صورت می گیرد. جابهجاییهایی که در مرزهای دامنه اعمال میشوند با حل معادله زیر به نقاط دیگر شبکهبندی پخش میشوند:

$$\nabla \left( \Gamma_{disp} \nabla \delta \right) = 0 \tag{Y}$$

$$\Gamma_{disp} = \left( V_{ref} / V \right)^{C_{stiff}} \tag{A}$$

و  $V_{ref}$  و  $V_{ref}$  بهترتیب جابهجایی نسبت به نقاط قبلی  $\delta$  شبکهبندی، سختی شبکهبندی، حجم مرجع و شاخص مدل سختی است.

در نرم افزار FLUENT دو نوع حل کننده به نامهای حل کننده مبتنی بر فشار و حل کننده مبتنی بر چگالی دردسترس وجود دارد. حل کننده مبتنی بر فشار در ابتدا برای سرعت پایین توسعه داده می شود، در حالی که حل کننده مبتنی بر چگالی برای جریان سیال ترا کمناپذیر با سرعت بالا توسعه یافته است. در این مطالعه، معادلات حاکم که معادلات متوسط گیری شده ناویر – استوکس شامل معادلات پیوستگی و مومنتوم است، به طور همزمان با استفاده از حل کننده مبتنی بر چگالی حل می شوند. برای به دست آوردن یک راه حل همگرا، یک روش تکراری باید دنبال شود،

چون معادلات غیرخطی هستند. هر دو حلگر بهطور ضمنی با یک الگوریتم جفتکننده قوی کوپل شدهاند. در حلکننده مبتنی بر چگالی، معادلات حاکم را میتوان با تحلیل صریح یا ضمنی حل کرد. در تحلیل ضمنی، برای حل یک متغیر، هر دو متغیر شناختهشده و شناختهنشده در تحلیل استفاده میشوند. اما در تحلیل صریح فقط متغیرهای شناختهشده برای حل متغیر مورد نظر استفاده میشوند. در نتیجه، تمام متغیرها بین تمام سلولها بهصورت ضمنی و تمام متغیرهای درون یک سلول بهصورت صریح حل شدهاند.

شبیهسازی CFD که در این پروژه استفاده میشود، از یک حلکننده جداگانه مبتنی بر فشار برای سرعتهای زیر صوت خواهد بود، در حالی که برای مسایل مافوق صوت از حلکننده ضمنی مبتنی بر چگالی به خاطر مشکلات همگرایی که در هنگام استفاده از حلکنندههای مجزا مبتنی بر فشار پیش میآید، استفاده میشود. شکل ۷، روش اتصال دوطرفه نیروهای آیرودینامیک و استاتیک را نشان میدهد.



شکل ۲) الگوریتم اتصال دوطرفه نیروهای آیرودینامیک و استاتیک

## ۳- نتایج و بحث

# ۳–۱– نتایج حاصل از بررسی ریزساختار بالَک آلومینیومی

شکلهای ۸ و ۹ تصاویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع عرضی بالک نمونه اولیه را نشان میدهد. همانطور که مشاهده میشود، دانههای کشیدهشده حاصل از انجام فرآیند نورد بههمراه رسوبات سوزنیشکل MgZn2 و توزیع پراکنده رسوبات دیگر در میان دانههای آلومینیم بوده که بهصورت ذرات سیاه کوچک در شکل ۸ قابل مشاهده است.



**شکل ۸)** تصویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع نمونه بالَک اولیه Volume 19, Issue 5, May 2019

بررسی عملکرد آلومینیوم ۲۰۷۵ تحت فرآیند CGPشده بهعنوان بالَک سازههای فضایی ۱۱۹۳



**شکل ۹)** تصویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع بالَک نمونه مرحله ۴

همانطور که مشاهده میشود، پس از فرآیند پرسکاری شیاری محدودشده به واسطه اعمال کرنش در هر مرحله، ساختار کریستالی نمونهها به مقدار قابل ملاحظهای ریز شده است. پس از اعمال چهار مرحله فرآیند پرسکاری شیاری محدودشده، ساختار دانهدرشت نمونه اولیه به ساختار دانه بسیار ریز تبدیل شده و تخمین اندازه دانه بسیار مشکل است (شکل ۹). شکلهای ۱۰ و ۱۱ بهترتیب تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری گرفتهشده از سطح نمونه آلومینیوم 56-7075 و پاس چهارم فرآیند پرسکاری شیاری محدودشده را نشان میدهد. پس از چهار مرحله اعمال فرآیند پرسکاری شیاری محدودشده آلومینیوم 76-7075، ساختار دانه درشت نمونه اولیه به ساختار دانه ریز با اندازه دانهمتوسط درشت نمونه اولیه به ساختار دانه ریز با اندازه دانهمتوسط

محدوده اندازه دانههای بزرگ در نمونه بین ۲۰ تا ۱٤۰میکرون و ذرات ریز با اندازه دانه ۱۰میکرون بوده که میانگین اندازه دانه این میکروساختار اولیه براساس روش انحرافمعیار حدود ٦٠میکرون است.



شکل ۱۰) تصویر میکروسکوپ الکترون عبوری از سطح مقطع نمونه بالَک اولیه



**شکل ۱۱)** تصویر میکروسکوپ الکترون عبوری از سطح مقطع نمونه بالُک مرحله ۴

**Modares Mechanical Engineering** 

#### ۱۱۹۴ شاهین حیدری و همکاران . ۳–۲ – آزمون سختی

تغییرات سختی در نمونهها بهعنوان تابعی از تعداد مراحل در نمودار ۱ و همچنین مقادیر سختی برحسب فاصله طولی از یک لبه نمونه در نمودار ۲ نشان شده است. همانطور که در نمودار ۱ مشاهده میشود، سختی نمونه آلومینیوم T6-7075 تقریباً محدودشده به ۲۱۴، در پاس اول فرآیند پرسکاری شیاری محدودشده به ۲۱۴، در پاس دوم به ۲۳۱، در پاس سوم به ۲۴۳ و در پاس چهارم به ۲۵۴ویکرز رسیده است. البته روند افزایش سختی در پاس اول بسیار زیاد بوده و با افزایش پاس، این روند افزایش تعداد پاسهای فرآیند پرسکاری شیاری محدودشده، میزان افزایش تعداد پاسهای فرآیند پرسکاری شیاری محدودشده، میزان یکنواختی سختی با یکنواختی خواص مکانیکی افزایش یافته است.

## ۳–۳– نتایج حاصل از استحکام کششی

نمودار ۳، تغییرات استحکام تسلیم، استحکام کششی و درصد ازدیاد طول برحسب تعداد مراحل عبور برای نمونههای عملیات پرسکاری شیاری محدودشده حاصل از آزمایش کشش تکمحوری برای نمونه اولیه و نمونههای تولیدشده توسط فرآیند پرسکاری شیاری محدودشده از مرحله اول تا چهارم را نشان میدهد. همانطور که مشاهده میشود، در عبور اول استحکام تسلیم از مقدار ۲۱۵ به مقدار ۵۸۸مگاپاسکال یعنی ۲۵% افزایش پیدا کرده است. استحکام کششی نیز از مقدار ۵۵۳ به مقدار ۵۷۸مگاپاسکال یعنی ۱۶% افزایش داشته است.

مقدار درصد ازدیاد طولی نیز در عبور اول ۲% کاهش مییابد. دلیل این افزایش در مقدار استحکام تسلیم و استحکام کششی و همچنین کاهش در مقدار ازدیاد طول و کارسختشدن نمونه در عبور اول است.

در عبور چهارم، استحکام تسلیم و استحکام کششی به بالاترین مقدار خود میرسد. مقدار استحکام تسلیم در عبور چهارم با ۳۸% افزایش نسبت به نمونه آنیلشده به ۲۷۸مگاپاسکال و مقدار استحکام کششی نیز با ۳۴% افزایش به ۲۲۷مگاپاسکال میرسد. همچنین درصد ازدیاد طولی در عبور چهارم به پایینترین مقدار خود یعنی ۴۰% کاهش پیدا میکند.

مطابق با رابطه هال- پچ، استحکام مواد تابعی از اندازه دانه آنها است. هر گونه تغییرات در اندازه ساختار کریستالی ماده سبب تغییرات قابل توجهی در استحکام و سختی آن میشود. حین فرآیند پرسکاری شیاری محدودشده، مرزدانههای زاویه بزرگ با اندازه کوچک ایجاد و از طریق رابطه هال- پچ باعث استحکام بخشی میشوند.



**نمودار ۱)** تغییرات سختی در نمونهها بهصورت تابعی از تعداد مراحل ماهنامه علمی-پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس



**نمودار ۲)** مقادیر سختی برحسب فاصله طولی از یک لبه نمونه



**نمودار ۳)** تغییرات استحکام تسلیم، استحکام کششی و درصد ازدیاد طول

# ۳–۴– نتایج حاصل از شبیهسازی

برای شبیه سازی موشک با بالک خمیده از سه سیستم شبکهبندی در ماخهای مختلف استفاده شد که در نمودار ۴ نشان داده شده است.

شبیهسازیهای عددی برای کل منطقه سه بعدی میدان جریان با استفاده از شبکه بندی بی سازمان و سلول های چهاروجهی به تعداد تقریباً ۲۲۰میلیون، ۲۷۰میلیون و ۳۴۰ میلیون است. از نمودار ۴ می توان نتیجه گرفت که حداکثر تفاوت نتایج آیرودینامیک با استفاده از سیستمهای مختلف شبکه بندی بسیار اندک است که استقلال شبکه بندی را تایید میکند. براساس نتایج، برای شبیه سازی مدل موشک با بالک خمیده از شبکه بندی ۱ استفاده شد.

شکل ۱۲، سیستم شبکهبندی میدان سیال موشک را نمایش میدهد. در این مطالعه، برای به حداقل رساندن اثرات شرایط مرزی دامنه میدان سیال نسبت به موشک، در دوردست دامنه سیال و به شکل استوانه انتخاب شده است<sup>[32]</sup>. فاصله بین کلاهک موشک و بالادست و انتهای راکت و پایین دست، ۱۵برابر قطر موشک و فاصله راکت به دیوار تونل ۶برابر قطر موشک است.











شکل ۱۲) سیستم شبکهبندی میدان سیال موشک

شکل ۱۳، سیستم شبکهبندی بدنه موشک را نمایش میدهد که بهصورت شبکه بیسازمان متشکل از تعداد تقریباً ۱۰هزار سلول سهضلعی است. همانطور که گفته شد، با توجه به نقش کمرنگ بدنه موشک، تمرکز شبکهبندی روی بالک موشک قرار گرفت.

. در موشکهای بالک خمیده، چندین امکان طراحی وجود دارد. این در حالی است که چند پارامتر برای این پرتابهها، اصلیتر است. یکی از شناختهشدهترین این پارامترها ضریب درگ بالک است<sup>[33]</sup>. برای اعتباردهی به فرآیند شبیهسازی در نمودار ۵، مقایسه ضریب درگ بالک نسبت به ماخ در کار حاضر با نتایج آزمایشگاهی *داهلک* و بالک نسبت به ماخ در کار حاضر با نتایج آزمایشگاهی *داهلک* و بسیار کم موجود نشاندهنده تصدیق شبیهسازی صورتگرفته بوده که در شکل ۱۴ ارایه شده است. با توجه به زیری سطح فولاد نسبت به آلومینیوم ۷۰۷۵ مشاهده میشود که ضریب درگ بالک

ــ بررسی عملکرد آلومینیوم ۲۰۷۵ تحت فرآیند CGPشده بهعنوان بالک سازههای فضایی ۱۱۹۵ آلومینیوم کمتر است. این در حالی است که ضریب درگ بالک با جنس آلومینیوم T075-T6 پرسکاری شیاری محدودشده نسبت به بالک آلومینیوم ۲۰۷۵ تفاوت بسیار اندکی دارد.

شکل ۱۴– ب و ج، جریانهای سرعت را در بخش بالک نشان میدهد. توزیع خطوط جریان، پیچیده، اما متقارن است. در شکل ۱۵، مجموع انحرافات مربوط به بالکهای مورد مطالعه در ۳ ماخ آلومینیوم ۲۰۷۵، شکل ۱۵– الف، مجموع انحرافات مربوط به بالک با جنس آلومینیوم ۲۵-7077 پرسکاری شیاری محدودشده و شکل ۱۵– ج مجموع انحرافات مربوط به بالک فولاد ۴۱۳۰ است. مطابق با شکل، حداکثر مقدار انحراف در لبه بالک با جنس آلومینیوم ۲۵-7075 پرسکاری شیاری محدودشده و فولاد ۴۱۳۰ به ترتیب ۲۰۲۲/۱۰ و ۲۵-۱۰/۱۰میلیمتر بوده که نشاندهنده ایجاد استحکام نسبت به وزن عالی نمونه بهبود یافته آلومینیوم است.





شکل ۱۳) سیستم شبکهبندی بدنه موشک





Volume 19, Issue 5, May 2019

**Modares Mechanical Engineering** 



شکل ۱٤) خطوط میدان سیال موشک با بالَک جنس آلومینیوم ۲۰۷۵–۲۵ پرسکاری شیاری محدودشده در نماهای مختلف



شکل ۱۵) مجموع انحرافات مربوط به بالَکها؛ الف) بالَک آلومینیوم ۲۰۷۵؛ ب) بالَک با جنس آلومینیوم ۲۰۷۵–Tb پرسکاری شیاری محدودشدهً؛ ج) بالَک فولاد ٤١٣٠

# ۴- نتیجهگیری

روش یرسکاری شیاری محدودشده، یک فرآیند جدید برای تولید مواد نانوکریستال فرآیند پرسکاری شیاری محدودشده است که باعث بهبود خواص مکانیکی و در نتیجه بهینهسازی در طراحی سازههای فضایی میشود. بالک آلومینیوم 76-7075 تا ۴ مرحله با نرخ کرنش I⋅s<sup>-1</sup> در دمای C°۱۲۰ تحت این فرآیند قرار گرفت. ریزساختار بالک آلومینیوم T6-7075 از ۶۰میکرون در مرحله اول و ۲۷۰نانومتر در مرحله آخر، کاهش اندازه داشته است. مقدار استحکام تسلیم در عبور چهارم با ۳۸% افزایش نسبت به نمونه آنیل شده به ۶۷۸مگایاسکال و مقدار استحکام کششی نیز با ۳۴% افزایش به ۷۲۷مگایاسکال میرسد. همچنین درصد ازدیاد طولی در عبور چهارم به پایینترین مقدار خود یعنی ۴۰% کاهش پیدا میکند. پس از فرآیند پرسکاری شیاری محدودشده، سختی آلومینیوم T6-7075 افزایش یافته است، بهطوری که با قرارگیری ماده تحت تغییر شکل پلاستیک شدید طی چهار مرحله، سختی آن از ۱۵۷ به ۲۵۴ویکرز (حدود ۶۲% نمونه اولیه) افزایش مییابد. از سوی دیگر، روند استحکام و سختی ماده کم و بیش روندی مشابه دارند. شبیهسازی برهمکنش میان سیال و سازه برای مدل بالک خمیده طبق استاندارد برنامه همکاری فنی با سه جنس آلومینیوم ۲۰۷۵، آلومینیوم T6-7075 یرسکاری شیاری محدودشده و فولاد ۴۱۳۰ را نشان میدهد که مجموع انحرافات در بالَک با جنس آلومینیوم T6-7075 یرسکاری شیاری محدودشده، ۰/۰۱۳۲۰۲ و در آلومینیوم ۷۰۷۵ مقدار ۱۴/۳۷۵میلیمتر بوده که ۹۹/۹% انحرافات این بالک بهدلیل بهبود خواص مکانیکی بالک کمتر شده است. این در حالی است که در بالک فولاد ۴۱۳۰، مقدار انحراف ۰/۰۱۰۵۷۲ است که ۰/۱% مجموع انحرافات این جنس از بالک با جنس آلومینیوم 7075-T6 یرسکاری شیاری محدودشده کمتر است. بهطور کلی با تغییر بالک با جنس فولاد ۴۱۳۰ به بالک با جنس آلومینیوم 7075-T6 يرسكارى شيارى محدودشده مىتوان علاوه بر بهینهسازی استحکام نسبت به وزن در هزینه و زمان تولید این

پرتابهها، صرفهجویی بسیاری ایجاد کرد.

**تشکر و قدردانی:** مقاله حاضر بخشی از رساله دکترای تخصصی مهندسی مکانیک مصوب دانشگاه هرمزگان میباشد که نویسندگان بر خود لازم میدانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از مسئولان پژوهشی دانشکده مهندسی و هیئت داوران پایاننامه که ما را در انجام و ارتقاء کیفی این پژوهش یاری دادند، اعلام نمایند.

**تاییدیه اخلاقی:** در جریان اجرای این تحقیق و تهیه مقاله کلیه اصول اخلاق حرفهای مرتبط با موضوع تحقیق از جمله رعایت حقوق آزمودنیها، سازمانها و نهادها و نیز مولفین و مصنفین، رعایت شده است.

تعارض منافع: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

**سهم نویسندگان**: شاهین حیدری (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۲۵%)؛ یونس بخشان (نویسنده دوم)، پژوهشگر کمکی (۲۰%)؛ جمشید خورشیدیمال احمدی (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی (۱۵%)؛ احمد افسری (نویسنده چهارم)، پژوهشگر کمکی (۱۵%)

منابع مالی: تمامی منابع مالی این پژوهش به صورت کاملا شخصی تامیین شده است.

# منابع

1- Gülay E, Akgül A, Isaković J, Mandić S. Computational fluid dynamics and experimental investigation of wraparound-fins missile rolling moment. Scientific Technical Review. 2011;61(3-4):8-15.

2- Shima T, Idan M, Golan OM. Sliding-mode control for integrated missile autopilot guidance. Journal of guidance, control, and dynamics. 2006;29(2):250-260.

3- Omer T, Gokmen M. Magnus effects on stability of wraparound-finned missiles. Journal of Spacecraft and Rockets. 1998;35(4):467-472.

4- Soltani MR, Fazeli H, Farahanieh B, Davari AR. An experimental study of the aerodynamic behavior of the

ـ بررسی عملکرد آلومینیوم ۷۰۷۵ تحت فرآیند CGPشده بهعنوان بالک سازههای فضایی ۱۱۹۷

21- ASTM International. ASTM B210-12, standard specification for aluminum and aluminum-alloy drawn seamless tubes [Internet]. West Conshohocken: ASTM International; 2014 [cited 01 Aug 2018]. Available from: https://www.astm.org/Standards/B210.htm

22- Chandler H. Heat treater's guide: Practices and procedures for irons and steels. 2<sup>nd</sup> Edition. Russell Township: ASM International; 1995.

23- ASTM. Designation: B918-01, standard practice for heat treatment of wrought aluminum alloys. In: American society for testing and materials. The annual book of ASTM standards. West Conshohocken: ASTM International; 2003.

24- Quan GZ, Li GS, Wang Y, Lv WQ, Yu CT, Zhou J. A characterization for the flow behavior of as-extruded 7075 aluminum alloy by the improved Arrhenius model with variable parameters. Materials Research. 2013;16(1):19-27.

25- ASTM International. ASTM E8/E8M-16a, standard test methods for tension testing of metallic materials [Internet]. West Conshohocken: ASTM International; 2016 [cited 01 Aug 2018]. Available from: https://www.astm.org/Standards/E8

26- ASTM International. ASTM E384-99, standard test method for microindentation hardness of materials [Internet]. West Conshohocken: ASTM International; 1999 [cited 01 Aug 2018]. Available from: https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/ E384-99.htm

27- Kim JY, Cho SI, Lee I, Na HJ, Jung SY. Aerodynamic analysis of a rolling wraparound fin projectile in supersonic flow. International Journal of Modern Physics Conference Series. 2012;19:276-282.

28- Gritskevich MS, Garbaruk AV, Schütze J, Menter FR. Development of DDES and IDDES formulations for the k- $\omega$  shear stress transport model. Flow, Turbulence and Combustion. 2012;88(3):431-449.

29- Isaev SA, Baranov PA, Kudryavtsev NA, Lysenko DA, Usachev AE. Comparative analysis of the calculation data on an unsteady flow around a circular cylinder obtained using the VP2/3 and fluent packages and the Spalart-Allmaras and Menter turbulence models. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2005;78(6):1199-1213.

30- Liu Y, Lu L, Fang L, Gao F. Modification of Spalart– Allmaras model with consideration of turbulence energy backscatter using velocity helicity. Physics Letters A. 2011;375(24):2377-2381.

31- Heyland M, Trepczynski A, Duda GN, Zehn M, Schaser KD, Märdian S. Selecting boundary conditions in physiological strain analysis of the femur: Balanced loads, inertia relief method and follower load. Medical Engineering and Physics. 2015;37(12):1180-1185.

32- Dongyang Ch, Abbas LK, 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. 2018;232(6):1103-1119.

33- Chen Z, Sun Q. Applications of inertia relief method in aircraft static aero-elasticity. Flight Dynamics. 2008;5:71-74. [Chinese]

34- Dahlke CW, Craft JC. The effect of wrap-around fins on aerodynamic stability and rolling moment variations (No. RD-73-17). Alabama: Army Missile Research Development And Engineering Lab Redstone Arsenal Al Aeroballistics Directorate; 1973. two wrap around fin missiles. Journal of Computational Methods in Engineering. 2002;21(1):141-152. [Persian] 5- Ross CT. A conceptual design of an underwater missile launcher. Ocean Engineering. 2005;32(1):85-99.

6- Naizabekov AB, Andreyachshenko VA, Kocich R. Study of deformation behavior, structure and mechanical properties of the AlSiMnFe alloy during ECAP-PBP. Micron. 2013;44:210-217.

7- Yang J, Chang L, Jiang L, Wang K, Huang L, He Z, et al. Electrodeposition of Al-Mn-Zr ternary alloy films from the Lewis acidic aluminum chloride-1-ethyl-3methylimidazolium chloride ionic liquid and their corrosion properties. Surface and Coatings Technology. 2017;321:45-51.

8- Irizalp SG, Saklakoglu N. High strength and high ductility behavior of 6061-T6 alloy after laser shock processing. Optics and Lasers in Engineering. 2016;77:183-190.

9- Dehghan M, Qods F, Gerdooei M. Investigation of microstructure and anisotropy of mechanical properties of the ARB-processed commercial purity Aluminium with interpassing heat treatment. Modares Mechanical Engineering. 2013;13(2):123-132. [Persian]

10- Sieber H, Wilde G, Perepezko JH. Thermally activated amorphous phase formation in cold-rolled multilayers of Al-Ni, Al-Ta, Al-Fe and Zr-Cu. Journal of Non-Crystalline Solids. 1999;250-252(Part 2):611-615.

11- Shin DH, Park JJ, Kim YS, Park KT. Constrained groove pressing and its application to grain refinement of Aluminum. Materials Science and Engineering A. 2002;328(1-2):98-103.

12- Jandaghi MR, 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. 2017;679:493-503.

13- Borhani M, Djavanroodi F. Rubber pad-constrained groove pressing process: Experimental and finite element investigation. Materials Science and Engineering A. 2012;546:1-7.

14- Sajadi A, Ebrahimi M, Djavanroodi F. Experimental and numerical investigation of Al properties fabricated by CGP process. Materials Science and Engineering A. 2012;552:97-103.

15- Peng K, Su L, Shaw LL, Qian KW. Grain refinement and crack prevention in constrained groove pressing of two-phase Cu-Zn alloys. Scripta Materialia. 2007;56(11):987-990.

16- Peng K, Zhang Y, Shaw LL, Qian KW. Microstructure dependence of a Cu-38Zn alloy on processing conditions of constrained groove pressing. Acta Materialia. 2009;57(18):5543-5553.

17- Rahimi F, Mohammad Sadeghi B, Ahmadi M. A comparative study between deformation behavior of pure Aluminum in CGP and RCS by finite element analysis. Metallurgical Engineering. 2014;17(53):25-32. [Persian]

18- Wang ZS, Guan YJ, Wang GC, Zhong CK. Influences of die structure on constrained groove pressing of commercially pure Ni sheets. Journal of Materials Processing Technology. 2015;215:205-218.

19- ASM International. Metals handbook: Properties and selection. 10<sup>th</sup> Edition.. Russell Township: ASM International; 1990.

20- Park JK, Ardell AJ. Microstructures of the commercial 7075 Al alloy in the T651 and T7 tempers. Metallurgical Transactions A. 1983;14(10):1957-1965.

**Modares Mechanical Engineering**