



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.¹ MSc,
Bakhshan Y.¹ PhD,
Khourshidi Mal Ahmadi J.¹ PhD,
Afsari A.*² 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.

¹Department of Mechanic, Hormozgan University, Bandar Abbas, Iran

²Department 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

ABSTRACT

One of the new approaches to produce nanoscale metals with ultra 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, aluminum 7075-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 aluminum 7075-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 aluminum 7075-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 post-annealing 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- ω 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 ...

بررسی عملکرد آلومینیوم ۷۰۷۵ تحت فرآیند CGP شده به عنوان بالک سازه‌های فضایی

شاهین حیدری MSc

گروه مکانیک، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

یونس بخشان PhD

گروه مکانیک، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

جمشید خورشیدی مال احمدی PhD

گروه مکانیک، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

احمد افسری* PhD

گروه مکانیک، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

چکیده

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 CGP شده است. به دلیل نیاز به وزن کم بالک سازه‌های فضایی، ورق‌هایی از جنس آلایزهای آلومینیوم، آلومینیوم 7075-T6 و فولاد 4130 انتخاب شدند. رفتار مکانیکی ورق‌ها برای ساخت بالک به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. شبیه‌سازی برهم‌کنش میان سیال و سازه برای مدل بالک خمیده با سه آلایز مختلف انجام شد و میزان تغییر شکل به وجود آمده برای موشک در حال پرواز با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج نشان می‌دهد که اندازه ذرات بالک آلومینیوم 7075-T6، با افزایش مراحل پرسکاری از ۶ میکرون به ۲۷۰ نانومتر کاهش داشته است، در حالی که استحکام تسلیم در عبور چهارم نسبت به نمونه آیل 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 7075-T6 با فرآیند CGP شده با ۹۹/۹٪ بهبودی همراه بوده، لیکن مقدار تغییر شکل در بالک فولاد 4130، با ۰/۱٪ مجموع تغییر شکل نسبت به جنس آلومینیوم 7075-T6 کمتر است.

کلیدواژه‌ها: تغییر شکل پلاستیک، سازه‌های فضایی، پرسکاری شیری، شبیه‌سازی، رفتار مکانیکی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۶/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۱۲

*نویسنده مسئول: afsari@iaushiraz.ac.ir

۱- مقدمه

هدف اصلی از به‌کارگیری موشک‌های نظامی، رساندن یک سرچنگی ویژه به یک هدف مشخص است. سرچنگی به همراه سامانه هدایت و کنترل و همچنین موتور در درون بدنه موشک قرار می‌گیرد که نهایتاً، این بدنه باید به هدف تعیین شده برسد. در طراحی این موشک‌ها یکی از اهداف اصلی کم کردن 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 کارایی 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 می‌گیرد [1, 2].

اغلب موشک‌ها، دست کم به یکی از این سطوح آیرودینامیک

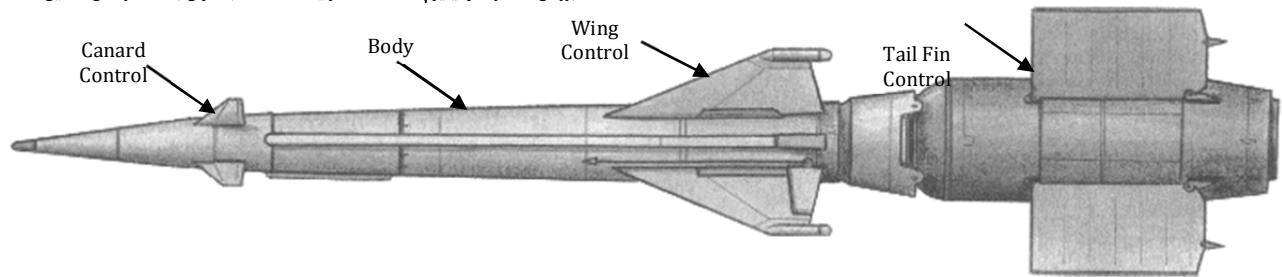
به‌ویژه بالک‌ها که پایداری پرواز موشک را ایجاد می‌کنند، مجهز می‌شوند. بالک‌ها متداول‌ترین نوع کنترل‌کننده در موشک‌ها به‌ویژه برای موشک‌های برد متوسط هوا به هوا و موشک‌های سطح به هوا هستند. دلیل اصلی برای استفاده از این سامانه کنترلی، این است که بالک کنترلی، مانورپذیری بسیار خوبی را در زوایای حمله بالا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

در سال‌های اخیر، کم کردن 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. به دلیل 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 ژيروسکوپی، آیرودینامیک یا مکانیکی از یکدیگر باز شوند. موشک‌های بالک خمیده از جمله موشک‌هایی هستند که برای رفع این نیازمندی در دهه شصت پدید آمده‌اند [3].

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 انحنا برابر با بدنه موشک است و تا هنگام باز شدن به دور بدنه موشک پیچیده می‌شوند. به دلیل 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 سکوها نگره‌دارنده و ارسال‌کننده موشک‌ها را در زیر بدنه هواپیماها و بالگردهای جنگی آسان کرده است و از پیچیدگی‌های مربوط به تماس بالک- بدنه به شدت می‌کاهد و پس از شلیک موشک و جداسازی از سکوی پرتاب، بالک‌های خمیده باز می‌شوند. میزان پیچیدگی موشک‌های بالک خمیده به تدریج از راکت‌های ساده تا موشک‌های هدایت‌شونده مرتباً افزوده می‌شود [4].

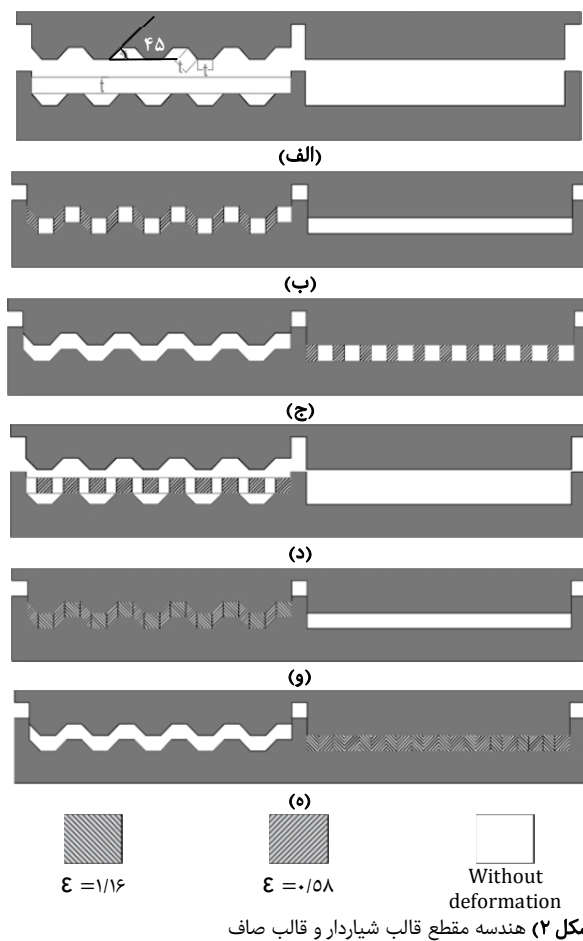
با توجه به نیاز بهینه‌سازی در تغییر وزن، به‌منظور افزایش برد این سازه‌ها، نیاز صنایع پیشرفته تکنولوژیک هوانوردی به موادی که از نسبت استحکام به وزن بالایی برخوردار باشند، بیشتر احساس می‌شود. موثرترین راهی که به‌منظور کاهش وزن بدنه سازه و افزایش کارایی آن توصیه می‌شود، کاهش چگالی مواد ۳ تا ۵ برابر بوده که موثرتر از افزایش استحکام کششی، مدخل یا تیرانس خرابی است [5].

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 آلایزهای آن در میان مهم‌ترین مطالعات و بررسی‌ها قرار گرفته و علت آن، کاربرد گسترده این فلز در صنایع هوافضا به دلیل دارا بودن ویژگی‌های منحصر به فرد آن است [6]. با توجه به پیشرفت روزافزون صنایع هوافضا، نیاز به بهبود خواص آلایزهای آلومینیوم از جمله دستیابی به استحکام‌های بالا هم‌زمان با حفظ وزن کم حس می‌شود. بسیاری از محققان کوشیدند تا از طریق آلایزسازی مکانیکی با عناصری نظیر منگنز، منیزیم، مس، سیلیسیم و روی به استحکام‌های بالا در فلز آلومینیوم دست یابند [7]. مشکل اساسی این روش استحکام‌بخشی، بروز تخلخل‌های ریز و احتمال ایجاد ترک است. روی هم‌رفته عواملی از قبیل ناخالصی‌ها به دلیل افزایش استحکام شبکه کریستالی و همچنین وجود نواقص ساختاری شامل مرزخانه‌ها و ناهم‌جایی‌ها نقش اساسی و تعیین‌کننده‌ای در ایجاد استحکام آلومینیوم دارند [8].



شکل ۱) شماتیک سطوح آیرودینامیک برای کنترل سازه هواگرد

روش‌های اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید، روش پرسکاری شیاری محدود شده بوده که به دلیل ویژگی‌های خاص، توجه بسیاری از محققان را در یک دهه اخیر به خود معطوف کرده است [11]. فرآیند پرسکاری شیاری محدود شده، روشی موثر برای تولید مواد با دانه‌های بسیار ریز است تا از این طریق خواص مکانیکی و فیزیکی آنها را به طور چشمگیری بهبود بخشد [12].



شکل ۲) هندسه مقطع قالب شیاردار و قالب صاف

شین و همکاران [11] 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 شیادهای قالب براساس عرض شیار، t و زاویه شیار θ تعریف می‌شود. همان‌طور که در شکل ۲ قابل مشاهده بوده، مقطع قالب شیاردار نامتقارن است. روند انجام فرآیند شامل چهار مرحله زیر است: مرحله اول: شیاردار کردن ورق صاف تحت پرس با قالب شیاردار (شکل ۲-الف).

با توجه به توصیفات ذکر شده، نیاز به ارایه و توسعه روشی مناسب برای بهبود خواص مکانیکی آلومینیوم با حفظ وزن آن است. در دو دهه اخیر، مواد پلی کریستال با دانه‌بندی بسیار ریز در حد نانومتر یا چندصد نانومتر (کمتر از میکرون) به دلیل 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. به طور کلی طبق رابطه ۱، رابطه (هال-پچ) استحکام ماده با عکس مجذور اندازه دانه آن ارتباط دارد. به عبارت دیگر با کوچک شدن اندازه دانه، استحکام ماده نیز افزایش می‌یابد [9].

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

در این رابطه، σ_y تنش تسلیم، σ_0 مقاومت شبکه، d 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 کم نظیر، مواد بسیار ریزدانه را برای بسیاری از کاربردهای تجاری مناسب می‌سازد. از آنجایی که تغییرات ابعادی ماده می‌تواند مانعی در مقابل میزان کرنش اعمالی باشد، بنابراین اکثر روش‌های اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید به نحوی طراحی شده‌اند که ابعاد نمونه حین فرآیند، ثابت می‌ماند و تغییر نمی‌کند [9].

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 محدود شده و پرسکاری شیاری تکراری و صاف (CGP and CGR)، پیچ خوردگی تحت فشار بالا (HPT)، اکستروژن و فشردگی 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 منحصر به 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 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 شکل نمونه تغییری نمی‌کند [10]. ویژگی دیگر این فرآیندها، افزایش استحکام و اصلاح ساختار دانه‌ها بدون اضافه کردن عناصر آلیاژی یا ذرات سرامیکی است. یکی از مهم‌ترین

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

مرحله سوم: گردش ۱۸۰ درجه ورق (شکل ۲-ج) و دوباره شیاردار کردن ورق صاف تحت پرس با قالب شیاردار (شکل ۲-د).

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

در این فرآیند، چهار مرحله پرسکاری متوالی ذکر شده، یک پاس پرسکاری نامیده می‌شود. انجام هر پاس پرسکاری همراه با ریزتر کردن 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 شیاردار ورق‌های آلومینیومی مانند سایر روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید سبب بهبود قابل توجه استحکام و سختی نمونه‌ها می‌شود. پس از آن، به‌کارگیری این روش برای ارتفاع خواص انواع آلیاژها مورد توجه محققان بسیاری قرار گرفت که در اینجا به دلیل اختصار از پرداختن به آن صرف نظر می‌شود. مطالعه در خصوص اثر هندسه قالب بر بهبود رفتار نمونه‌ها بسیار محدود و گاهی در تناقض با یکدیگر بوده است. برهانی و دی‌جوانرودی با پیشنهاد فرآیند اصلاح شده (پرسکاری شیاردار 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 ۴۵ درجه‌ای، زاویه شیار ۵۰ درجه منجر به ریزتر شدن ساختار دانه‌بندی‌های ورق می‌شود. این موضوع اگرچه سبب بهبود خواص مکانیکی ورق شد، ولی کاهش یکنواختی کرنش در نمونه‌های نهایی را به همراه داشته است [13].

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 شیاردار محدود پوششی) نشان دادند که افزایش زاویه شیار از ۴۵ به ۵۳ درجه منجر به بهبود خواص مکانیکی چشم‌گیری نمی‌شود. همچنین این تغییر قالب سبب کاهش تعداد پاس‌های قابل انجام روی ورق می‌شود [14].

پنگ و همکاران به تحلیل اثر عرض شیار قالب بر رفتار ورق از آلیاژ مس و روی تحت فرآیند پرسکاری شیاردار محدود پرداختند. نتایج حاکی از آن است که افزایش عرض شیار قالب از ۵ به ۷ میلی‌متر منجر به افزایش تعداد پاس‌های پرسکاری قابل انجام روی ورق قبل از ایجاد ترک‌های سطحی می‌شود. البته این تغییر قالب همراه با کاهش نرخ ریزساختار سازی و کاهش نرخ سخت‌تر شدن سطح بوده است [15, 16].

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 شیاردار محدود نسبت به موج‌دار و صاف کردن متوالی بیشتر است. بنابراین امکان تکرار فرآیند برای رسیدن به مقادیر بالای کرنش پلاستیک فراهم می‌شود. همچنین نمونه تغییر شکل‌یافته توسط روش فشرده‌سازی شیاردار محدود نسبت به

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

وانگ و همکاران به بررسی اثر هندسه قالب بر رفتار ورق از نیکل خالص تحت فرآیند پرسکاری شیاردار 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 شیاردار، یک نمونه ورق به ضخامت ۲ میلی‌متر، از مدل‌سازی عددی فرآیند استفاده کردند [18].

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، هزینه و زمان مواجه بود، نتایج تحقیق به بررسی تغییرات رفتار مکانیکی نمونه‌ها می‌پردازد که صرفاً محدود به ابعاد مشخصی می‌شود و به دلیل کوچک بودن بالک‌ها و با توجه به استراتژیکی بودن آنها برای سازه‌های فضایی انتخاب شده است.

در این پژوهش، با هدف برطرف کردن 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 پرسکاری شده برای ساخت بالک صورت گیرد و با شبیه‌سازی برهم‌کنش میان سیال و سازه برای مدل بالک خمیده طبق استاندارد برنامه تحقیقاتی بین‌المللی موسوم به برنامه همکاری فنی با سه جنس آلومینیوم ۷۰۷۵، آلومینیوم ۷۰۷۵-T6 7075-7075-T6 پرسکاری شیاردار محدود شده 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 ۷۰۷۵ برای تهیه بالک 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 به سبب 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 [19]. به‌منظور بالا رفتن استحکام و سختی و همچنین کاهش مقاومت به خوردگی تنش، 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 [21]. به‌منظور تهیه نمونه مناسب برای انجام فرآیند پرسکاری شیاردار محدود شده، عملیات برش در سطوح صفحه اولیه صورت گرفت. نمونه با طول ۲۰، عرض ۹ و ضخامت ۰/۵ سانتی‌متر توسط دستگاه برش تهیه شد.

جدول ۱) خواص مکانیکی این فولاد

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

جدول ۲) ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ مورد استفاده (درصد وزنی)

عنصر	Al	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Cr	Mn	Ti	Pb	Sb	V	Ni	Zr
درصد وزنی	Bal.	۰/۱۱	۲/۴۶	۱/۲۲	۰/۰۲۳	۰/۴۵	۰/۱۴	۰/۱۰۴	۰/۰۲۱	۰/۰۲۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۱۵	۰/۰۰۱
درصد وزنی [21]	Bal.	۰/۱-۰/۱	۲/۱-۲/۹	۱/۲-۲/۰	۰/۵۰	۰/۴۰	۰/۱۸-۰/۲۸	۰/۳۰	۰/۲۰			۰/۱۵		

بررسی عملکرد آلومینیوم ۷۰۷۵ تحت فرآیند CGP شده به عنوان بالک سازه‌های فضایی ۱۱۹۱ مطالعه قرار گرفت. همچنین برای ارزیابی ترکیبات شیمیایی رسوبات موجود و مورفولوژی سطح نمونه‌ها از میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) مدل 900EM (شرکت زیس) 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 یک میلی‌متر در دقیقه در دمای محیط برای کلیه نمونه‌ها و فلز پایه انجام شد [25].

۲-۶- آزمایش ریزسختی سنجی

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 متالوگراف شده در فواصل ۵ میلی‌متری از هم با اعمال نیروی ۵۰ نیوتن در مدت زمان ۱۰ ثانیه به وسیله دستگاه سختی‌سنج (مدل DHV-1000) انجام شد و نمودار تغییرات سختی برای نمونه‌های مختلف رسم شد [26].

۲-۷- ساخت بالک

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. به منظور 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 ۱۷/۸×۶/۶ سانتی‌متر برش داده شد [27]. این بالک دارای ضخامت ۰/۵ سانتی‌متر است که بعد از برش نمونه‌ها و عملیات ماشین‌کاری در دو طرف عرض بالک به وسیله عملیات سنگ‌زنی، زاویه گوه‌ای ۴۵ درجه ایجاد شد و سپس با استفاده از نورد سرد، ورق به شکل قوسی به شعاع ۴/۸ سانتی‌متر و زاویه وتر ۴۵ درجه 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، شبیه‌سازی مدل بالک خمیده طبق استاندارد برنامه همکاری فنی در نرم‌افزار SolidWorks 2016 برای سه جنس مورد استفاده در ساخت بالک‌های کنونی شامل آلومینیوم ۷۰۷۵، آلومینیوم 7075-T6 پرسکاری شیاری محدودشده در پاس چهارم و فولاد ۴۳۰ صورت گرفت (شکل ۶). سپس برای تحلیل برهم‌کنش میان سیال و سازه از نرم‌افزار Ansys 2016 استفاده شد. با توجه به نقش کم‌رنگ بدنه موشک، در تولید هندسه این بخش ساده‌سازی صورت گرفته است. ورودی و خروجی به ترتیب سرعت ۳ ماخ و فشار مرجع است. بدنه موشک نیز به عنوان دیواره در نظر گرفته شد. شرایط مرزی بدون لغزش روی سطح موشک اعمال می‌شود و زاویه حمله موشک صفر است.

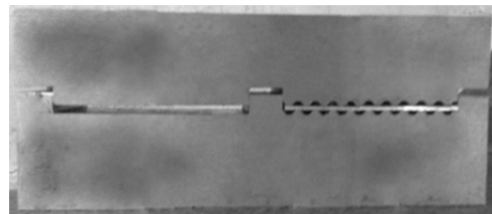
جدول ۳، خواص مکانیکی مواد مورد مطالعه و جدول ۴ [28-30] فرض‌های به‌کاربرده شده در تحلیل میدان‌های سیال و سازه را نشان می‌دهد. معادلات حاکم بر جریان سیال، معادلات متوسط‌گیری شده ناویر-استوکس (RANS) شامل معادلات پیوستگی و مومنوم است (معادلات ۲-۴).

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij}^{eff}) + G_i \quad (3)$$

۲-۲- تجهیزات فرآیند پرسکاری شیاری محدودشده

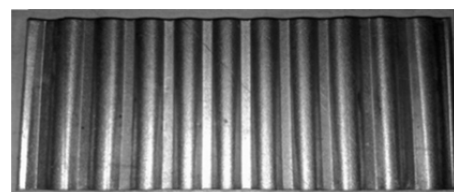
در این تحقیق، ساده‌ترین نوع قالب فرآیند پرسکاری شیاری محدودشده به کار گرفته شد، به‌گونه‌ای که دارای دو بلوک بوده و هر کدام دارای قسمت شیاردار نامتقارنی است که تغییر شکل برشی را ایجاد می‌کند و علاوه بر این شامل قالب تختی است که قطعه تغییر شکل‌یافته را صاف می‌کند. ابعاد قالب شامل طول ۵۵، عرض ۹ و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر است. ابعاد شیار در قالب شیاردار ۰/۵ معادل ضخامت ورق و زاویه ۴۵ درجه 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 قالب تحت عملیات حرارتی قرار داده شد. قالب در دمای ۸۶۰°C به مدت ۸۰ دقیقه 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 و ۴۳۰°C به مدت ۱۸۰ دقیقه انجام گرفت و سختی حدود ۵۰ را کول C در قالب ایجاد شد (شکل ۳) [22].



شکل ۳) تصویر قالب مورد استفاده

۲-۳- انجام فرآیند پرسکاری شیاری محدودشده

برای حذف تنش‌های پسماند و بالابردن استحکام و سختی نمونه‌های آلومینیوم ۷۰۷۵، آنها طبق استاندارد B918-01 ASTM تحت عملیات حرارتی T6 قرار داده شدند [23]. نمونه‌ها تا دمای ۴۷۰°C به مدت یک ساعت، گرم و بعد از آن در آب سرد شدند. فرآیند با نرخ کرنش ۱۰ s⁻¹ در دمای ۱۲۰°C صورت گرفت و برای انجام آن از دستگاه پرس داغ اینسترون ۸۵۰۲ با حداکثر بارگذاری ۲۵۰ کیلو نیوتون و مجهز به کوره به دمای ۱۰۰۰°C استفاده شد. ابتدا به مدت ۱۵ دقیقه در کوره دستگاه قرار گرفتند که قبلاً به دمای مورد نظر رسیده بود تا هم‌دمایی لازم ایجاد شود. پس از هر مرحله صاف‌کاری، ورق ۱۸۰ درجه در جهت عقربه‌های ساعت چرخانده و مجدداً در قسمت شیاردار قرار داده شد (شکل ۴). قبل از انجام آزمایش، برای کاهش اصطکاک بین فک قالب و نمونه، شیارهای قالب به همراه نمونه توسط روان‌کار شیمیایی MoS₂ روان‌کاری شدند [24].



شکل ۴) 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 صایران) مورد

جدول ۴) فرض‌های به‌کاربرده‌شده در تحلیل‌های سیال و سازه

مأزول محاسباتی	مشخصه	فرض
دینامیک سیالات محاسباتی	تحلیل سیال	جریان پایا
	جریان سیال	تراکم‌پذیر
	نوع سیال	هوا در دمای ۲۵°C و فشار مرجع ۱ اتمسفر
	مدل توربولانسی	مدل انتقال تنش برشی (SST) [29, 30]
دینامیک سازه‌های محاسباتی	مدل لایه‌مرزی	مدل اسپالارت آلماراس [29, 30]
	ابعاد میدان	میدان سیال سه‌بعدی
	تحلیل سازه	استاتیک
	بارهای وارده به بالک	نیروهای آیرودینامیک، نیروهای سازه‌ای الاستیک و نیروهای لختی
دینامیک محاسباتی	نوع برهم‌کنش	یک‌طرفه
	نوع سازه	آلومینیوم ۷۰۷۵، آلومینیوم ۷۰۷۵-7075 T6 پرس‌کاری شیاری محدودشده و فولاد ۴۱۳۰
	ابعاد میدان	سازه پیوسته دوئعدی

در حل عددی CFX در نرم افزار ANSYS، از معادلات متوسط‌گیری‌شده ناویر- استوکس با مدل توربولانس انتقال تنش برشی برای محاسبه کل نیروها استفاده شد. محاسبات استاتیک آیرودینامیک، نیروهای سازه‌ای الاستیک و نیروهای بین نیروهای آیرودینامیک، نیروهای سازه‌ای الاستیک و نیروهای لختی هستند. برای شبیه‌سازی موشک در پرواز آزاد از روش تعادل دینامیکی (اصل دالامبر) در دینامیک سازه‌های محاسباتی (CSD) استفاده شد (معادلات ۵ و ۶) [31, 32].

$Kx = F + T_F$ (۵)
 $F_t^a + M_t a_t = 0$ (۶)
 جایی که $K, x, F, T_F, F_t^a, a_t, M_t$ به ترتیب ماتریس سختی، بردار جابه‌جایی (محاسبه می‌شود)، بردار نیروی اعمال‌شده (نیروهای آیرودینامیک، محاسبه‌شده با استفاده از تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی) و بارمحموری، 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 می‌گیرد. جابه‌جایی‌هایی که در مرزهای دامنه اعمال می‌شوند با حل معادله زیر به نقاط دیگر شبکه‌بندی پخش می‌شوند:

$\nabla \cdot (\Gamma_{disp} \nabla \delta) = 0$ (۷)

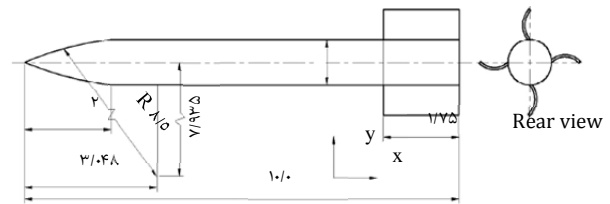
$\Gamma_{disp} = (V_{ref}/V)^{C_{stiff}}$ (۸)
 $\delta, \Gamma_{disp}, V_{ref}$ و C_{stiff} به ترتیب جابه‌جایی نسبت به نقاط قبلی شبکه‌بندی، سختی شبکه‌بندی، حجم مرجع و شاخص مدل سختی است.

در نرم‌افزار FLUENT دو نوع حل‌کننده به نام‌های حل‌کننده مبتنی بر فشار و حل‌کننده مبتنی بر چگالی در دسترس وجود دارد. حل‌کننده مبتنی بر فشار در ابتدا برای سرعت پایین توسعه داده می‌شود، در حالی که حل‌کننده مبتنی بر چگالی برای جریان سیال تراکم‌ناپذیر با سرعت بالا توسعه یافته است. در این مطالعه، معادلات حاکم که معادلات متوسط‌گیری‌شده ناویر- استوکس شامل معادلات پیوستگی و مومنتوم است، به‌طور همزمان با استفاده از حل‌کننده مبتنی بر چگالی حل می‌شوند. برای به‌دست‌آوردن یک راه‌حل همگرا، یک روش تکراری باید دنبال شود،

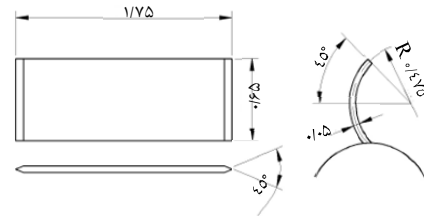
$\tau_{ij}^{eff} = -p\delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho u_i' u_j'$ (۴)

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.

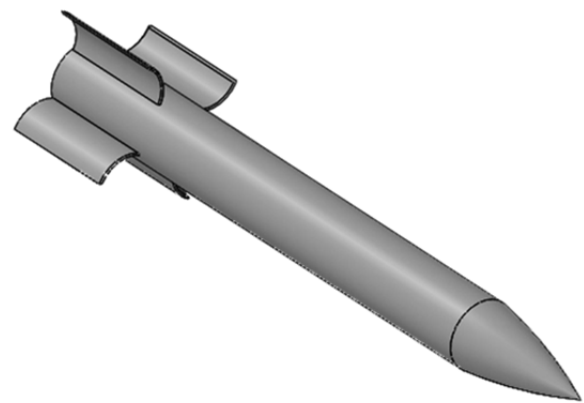


(الف)



(ب)

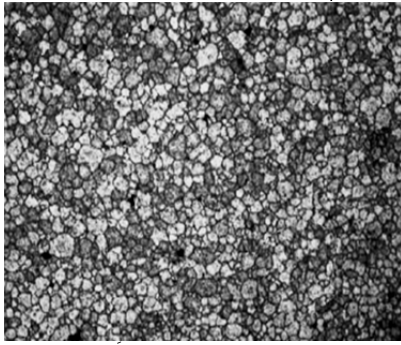
شکل ۵) هندسه مدل موشک بالک خمیده استاندارد TTCP [28]; (الف) هندسه کامل موشک؛ (ب) هندسه بالک موشک



شکل ۶) 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

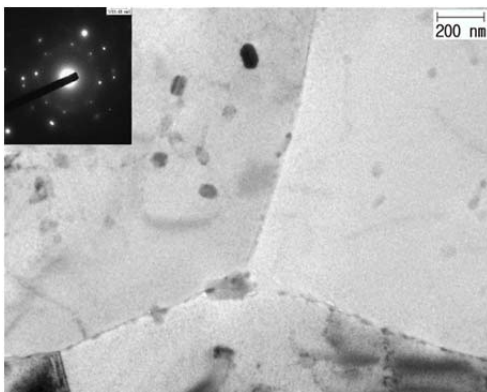
خواص مکانیکی	آلومینیوم ۷۰۷۵	آلومینیوم 7075-T6 فرآیند CGP	فولاد ۴۱۳۰
سختی	۱۵۰	۲۵۴	۲۰۷
تنش نهایی (MPa)	۵۵۳	۷۲۷	۶۷۰
تنش تسلیم (MPa)	۴۹۳	۶۷۸	۴۳۵
مدول کشسانی (GPa)	۷۲	۲۵۶	۲۰۵
نسبت پواسون	۰/۳۳	۰/۲۸	۰/۲۹
مدول برشی (MPa)	۲۷	۹۹	۸۰



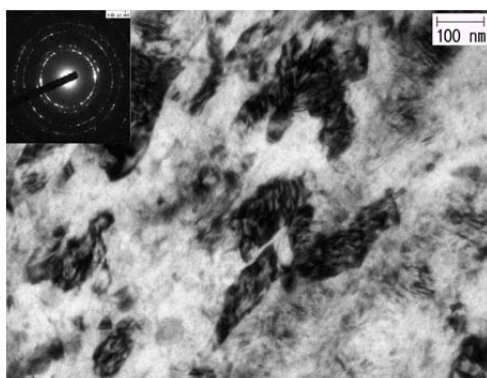
شکل ۹) تصویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع بالک نمونه مرحله ۴

همان‌طور که مشاهده می‌شود، پس از فرآیند پرسکاری شیاری محدود شده 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 محدود شده، ساختار دانه درشت نمونه اولیه به ساختار دانه بسیار ریز تبدیل شده و تخمین اندازه دانه بسیار مشکل است (شکل ۹). شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری گرفته شده از سطح نمونه آلومینیوم ۷۰۷۵-T6 و پس از چهار مرحله فرآیند پرسکاری شیاری محدود شده را نشان می‌دهد. پس از چهار مرحله اعمال فرآیند پرسکاری شیاری محدود شده آلومینیوم ۷۰۷۵-T6، ساختار دانه درشت نمونه اولیه به ساختار دانه ریز با اندازه دانه متوسط ۲۷۰ نانومتر تبدیل شده است.

محدوده اندازه دانه‌های بزرگ در نمونه بین ۲۰ تا ۱۴۰ میکرون و ذرات ریز با اندازه دانه ۱۰ میکرون بوده که میانگین اندازه دانه این میکروساختار اولیه براساس روش انحراف معیار حدود ۶۰ میکرون است.



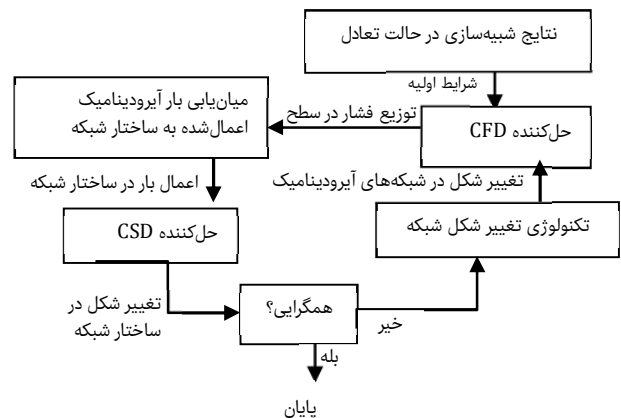
شکل ۱۰) تصویر میکروسکوپ الکترون عبوری از سطح مقطع نمونه بالک اولیه



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

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 شناخته شده و شناخته نشده در تحلیل استفاده می‌شوند. اما در تحلیل صریح فقط متغیرهای شناخته شده 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.

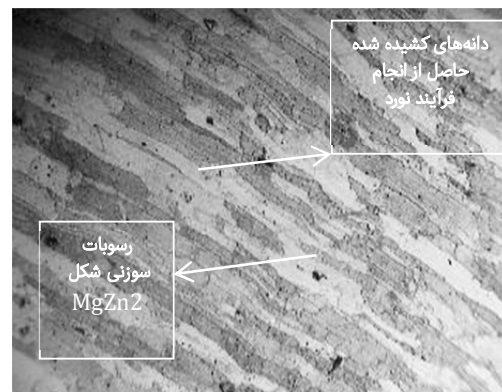


شکل ۷) الگوریتم اتصال دوطرفه نیروهای آیرودینامیک و استاتیک

۳- نتایج و بحث

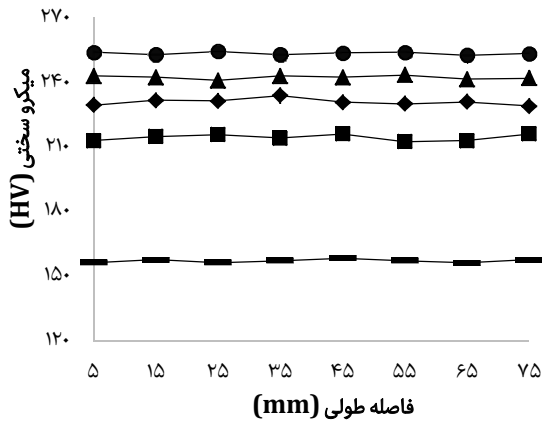
۳-۱- نتایج حاصل از بررسی ریزساختار بالک آلومینیومی

شکل‌های ۸ و ۹ تصاویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع عرضی بالک نمونه اولیه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دانه‌های کشیده شده حاصل از انجام فرآیند نورد به‌همراه رسوبات سوزنی شکل $MgZn_2$ و توزیع پراکنده رسوبات دیگر در میان دانه‌های آلومینیوم بوده که به‌صورت ذرات سیاه کوچک در شکل ۸ قابل مشاهده است.



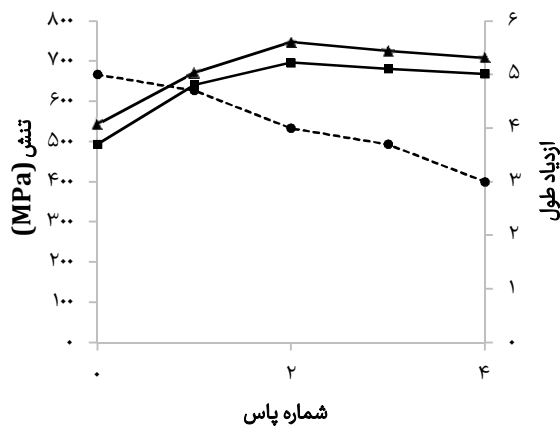
شکل ۸) تصویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع نمونه بالک اولیه

۳-۲- آزمون سختی



نمونه خام — مرحله اول — مرحله دوم — مرحله سوم — مرحله چهارم

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



ازدیاد طول --- مقاومت تسلیم — استحکام کششی

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

۳-۴- نتایج حاصل از شبیه سازی

برای شبیه سازی موشک با بالک خمیده از سه سیستم شبکه بندی در ماخ های مختلف استفاده شد که در نمودار ۴ نشان داده شده است.

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

شکل ۱۲، سیستم شبکه بندی میدان سیال موشک را نمایش می دهد. 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 [32]. فاصله بین کلاهک موشک و بالادست و انتهای راکت و پایین دست، ۱۵ برابر قطر موشک و فاصله راکت به دیوار تونل ۶ برابر قطر موشک است.

تغییرات سختی در نمونه ها به عنوان تابعی از تعداد مراحل در نمودار ۱ و همچنین مقادیر سختی برحسب فاصله طولی از یک لبه نمونه در نمودار ۲ نشان شده است. همان طور که در نمودار ۱ مشاهده می شود، سختی نمونه آلومینیوم 7075-T6 تقریباً ۱۵۷ ویکرز بوده که این مقدار در پاس اول فرآیند پرسکاری شیاری محدود شده به ۲۱۴، در پاس دوم به ۲۳۱، در پاس سوم به ۲۴۳ و در پاس چهارم به ۲۵۴ ویکرز رسیده است. البته روند افزایش سختی در پاس اول بسیار زیاد بوده و با افزایش پاس، این روند افزایش یافته است. با توجه به نمودار ۱ مشاهده می شود که با افزایش تعداد پاس های فرآیند پرسکاری شیاری محدود شده، میزان یکنواختی سختی با یکنواختی خواص مکانیکی افزایش یافته است.

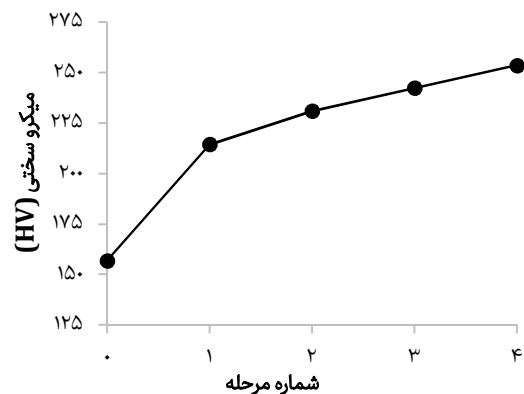
۳-۳- نتایج حاصل از استحکام کششی

نمودار ۳، تغییرات استحکام تسلیم، استحکام کششی و درصد ازدیاد طول برحسب تعداد مراحل عبور برای نمونه های عملیات پرسکاری شیاری محدود شده حاصل از آزمایش کشش تک محوری برای نمونه اولیه و نمونه های تولید شده توسط فرآیند پرسکاری شیاری محدود شده از مرحله اول تا چهارم را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، در عبور اول استحکام تسلیم از مقدار ۵۱۲ به مقدار ۶۵۸ مگاپاسکال یعنی ۲۵٪ افزایش پیدا کرده است. استحکام کششی نیز از مقدار ۵۵۳ به مقدار ۶۵۷ مگاپاسکال یعنی ۱۶٪ افزایش داشته است.

مقدار درصد ازدیاد طولی نیز در عبور اول ۷٪ کاهش می یابد. دلیل این افزایش در مقدار استحکام تسلیم و استحکام کششی و همچنین کاهش در مقدار ازدیاد طول و کارسخت شدن نمونه در عبور اول است.

در عبور چهارم، استحکام تسلیم و استحکام کششی به بالاترین مقدار خود می رسد. مقدار استحکام تسلیم در عبور چهارم با ۳۸٪ افزایش نسبت به نمونه آئیل شده به ۶۷۸ مگاپاسکال و مقدار استحکام کششی نیز با ۳۴٪ افزایش به ۷۲۷ مگاپاسکال می رسد. همچنین درصد ازدیاد طولی در عبور چهارم به پایین ترین مقدار خود یعنی ۴۰٪ کاهش پیدا می کند.

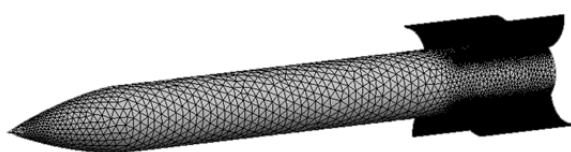
مطابق با رابطه هال-پچ، استحکام مواد تابعی از اندازه دانه آنها است. هر گونه تغییرات در اندازه ساختار کریستالی ماده سبب تغییرات قابل توجهی در استحکام و سختی آن می شود. حین فرآیند پرسکاری شیاری محدود شده، مرز دانه های زاویه بزرگ با اندازه کوچک ایجاد و از طریق رابطه هال-پچ باعث استحکام بخشی می شوند.



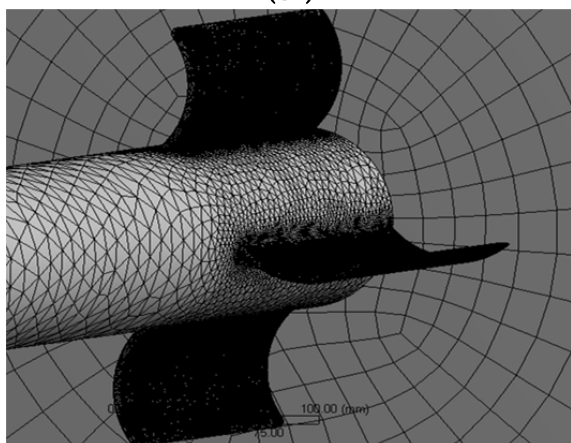
نمودار ۱) تغییرات سختی در نمونه ها به صورت تابعی از تعداد مراحل

آلومینیوم کمتر است. این در حالی است که ضریب درگ بالک با جنس آلومینیوم 7075-T6 پرکاری شیباری محدود شده نسبت به بالک آلومینیوم ۷۰۷۵ 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 ارایه شده است. شکل ۱۵- الف، مجموع انحرافات مربوط به بالک آلومینیوم ۷۰۷۵، شکل ۱۵- ب، مجموع انحرافات مربوط به بالک با جنس آلومینیوم 7075-T6 پرکاری شیباری محدود شده و شکل ۱۵- ج مجموع انحرافات مربوط به بالک فولاد ۴۱۳۰ است. مطابق با شکل، حداکثر مقدار انحراف در لبه بالک با جنس آلومینیوم 7075-T6 پرکاری شیباری محدود شده و فولاد ۴۱۳۰ به ترتیب ۰/۱۳۲۰۲ و ۰/۱۰۵۷۲ میلی‌متر بوده که نشان‌دهنده ایجاد استحکام نسبت به وزن عالی نمونه بهبود یافته آلومینیوم است.

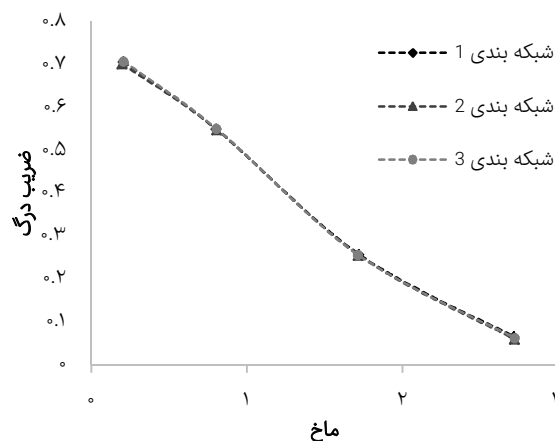


(الف)

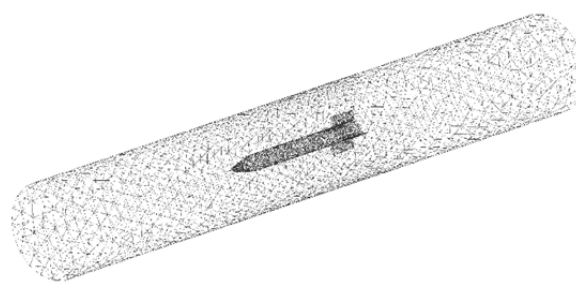


(ب)

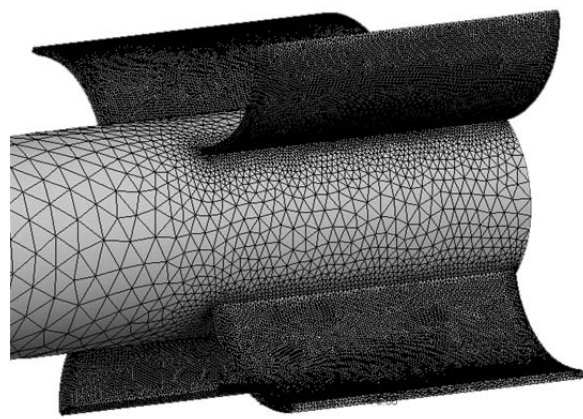
شکل ۱۳) سیستم شبکه‌بندی بدنه موشک



نمودار ۴) نتایج آیرودینامیک با استفاده از سیستم‌های مختلف شبکه‌بندی



(الف)

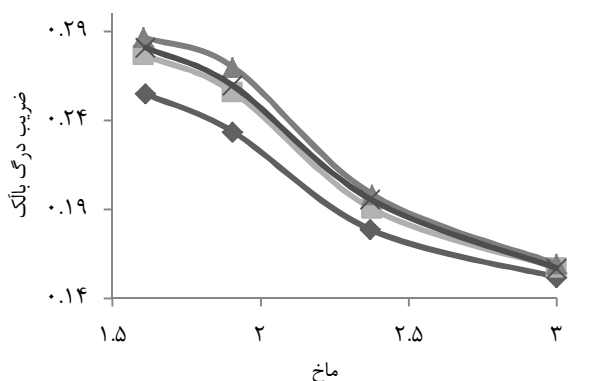


(ب)

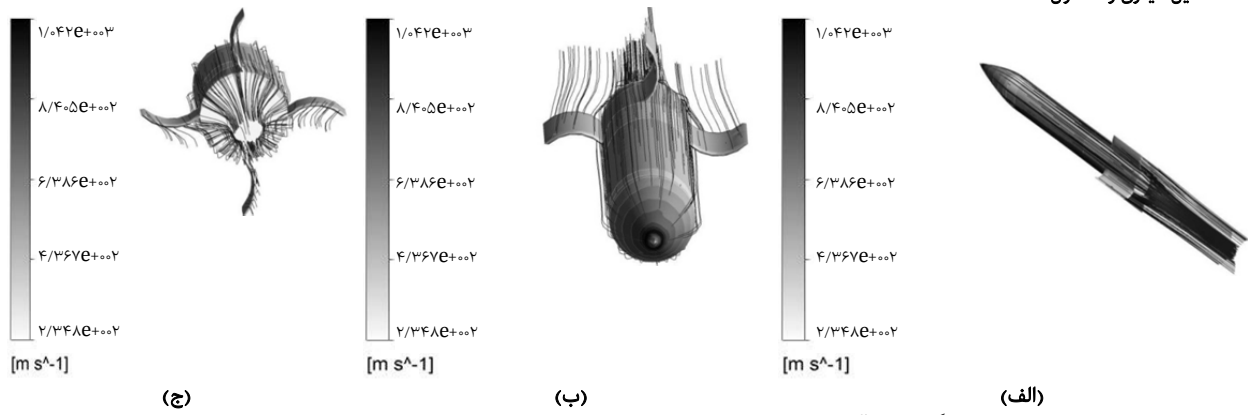
شکل ۱۲) سیستم شبکه‌بندی میدان سیال موشک

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

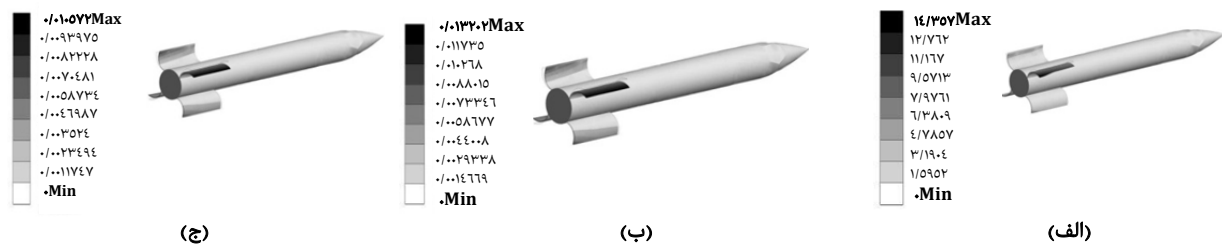
در موشک‌های بالک خمیده، چندین امکان طراحی وجود دارد. این در حالی است که چند پارامتر برای این پرتابه‌ها، اصلی‌تر است. یکی از شناخته‌شده‌ترین این پارامترها ضریب درگ بالک است [33]. برای اعتباردهی به فرآیند شبیه‌سازی در نمودار ۵، مقایسه ضریب درگ بالک نسبت به ماخ در کار حاضر با نتایج آزمایشگاهی داهلک و گرفت آورده شده است [34]. همان‌طور که مشاهده می‌شود اختلاف بسیار کم موجود نشان‌دهنده تصدیق شبیه‌سازی صورت‌گرفته بوده که در شکل ۱۴ ارایه شده است. با توجه به زبری سطح فولاد نسبت به آلومینیوم ۷۰۷۵ مشاهده می‌شود که ضریب درگ بالک



نمودار ۵) مقایسه نمودار ضریب درگ بالک نسبت به ماخ



شکل ۱۴) خطوط میدان سیال موشک با بالک جنس آلومینیوم ۷۰۷۵-T6 پرس کاری شیری محدود شده در نماهای مختلف



شکل ۱۵) مجموع انحرافات مربوط به بالکها؛ الف) بالک آلومینیوم ۷۰۷۵؛ ب) بالک با جنس آلومینیوم ۷۰۷۵-T6 پرس کاری شیری محدود شده؛ ج) بالک فولاد ۴۱۳۰

پرتابه‌ها، صرفه‌جویی بسیاری ایجاد کرد.

۴- نتیجه‌گیری

روش پرسکاری شیری محدود شده، یک فرآیند جدید برای تولید مواد نانوکریستال فرآیند پرسکاری شیری محدود شده است که باعث بهبود خواص مکانیکی و در نتیجه بهینه‌سازی در طراحی سازه‌های فضایی می‌شود. بالک آلومینیوم 7075-T6 تا ۴ مرحله با نرخ کرنش 10^{-1} در دمای 120°C تحت این فرآیند قرار گرفت. ریزساختار بالک آلومینیوم 7075-T6 از $60\ \mu\text{m}$ در مرحله اول و $270\ \text{nm}$ در مرحله آخر، کاهش اندازه داشته است. مقدار استحکام تسلیم در عبور چهارم با 38% افزایش نسبت به نمونه آنیل شده به $678\ \text{MPa}$ و مقدار استحکام کششی نیز با 34% افزایش به $727\ \text{MPa}$ می‌رسد. همچنین درصد ازدیاد طولی در عبور چهارم به پایین‌ترین مقدار خود یعنی 40% کاهش پیدا می‌کند. پس از فرآیند پرسکاری شیری محدود شده، سختی آلومینیوم 7075-T6 افزایش یافته است، به طوری که با قرارگیری ماده تحت تغییر شکل پلاستیک شدید طی چهار مرحله، سختی آن از 157 به 254 ویکرز (حدود 62% 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 7075-T6، آلومینیوم 7075-T6 پرسکاری شیری محدود شده و فولاد 4130 را نشان می‌دهد که مجموع انحرافات در بالک با جنس آلومینیوم 7075-T6 پرسکاری شیری محدود شده، 0.013202 و در آلومینیوم 7075-T6 مقدار $14/375$ میلی‌متر بوده که $99/9\%$ انحرافات این بالک به دلیل بهبود خواص مکانیکی بالک کمتر شده است. این در حالی است که در بالک فولاد 4130، مقدار انحراف 0.010572 است که $0/1\%$ مجموع انحرافات این جنس از بالک با جنس آلومینیوم 7075-T6 پرسکاری شیری محدود شده کمتر است. به طور کلی با تغییر بالک با جنس فولاد 4130 به بالک با جنس آلومینیوم 7075-T6 پرسکاری شیری محدود شده می‌توان علاوه بر بهینه‌سازی استحکام نسبت به وزن در هزینه و زمان تولید این

تشکر و قدردانی: مقاله حاضر بخشی از رساله دکتری 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

(50%)؛ یونس بخشان (نویسنده دوم)، پژوهشگر کمکی (20%)؛

جمشید خورشیدی مال احمدی (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی

(15%)؛ احمد افسری (نویسنده چهارم)، پژوهشگر کمکی (15%)

منابع مالی: تمامی منابع مالی این پژوهش به صورت کاملا

شخصی تأمین شده است.

منابع

- 1- Gülay E, Akgül A, Isaković J, Mandić S. Computational fluid dynamics and experimental investigation of wrap-around-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 wrap-around-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

- 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. 2nd 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- Gritskovich 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, Mårdian 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-3-methylimidazolium 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*. 10th 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.