



طراحی بهینه قالب اکستروژن متقارن با استفاده از روش بهینه‌سازی فراابتکاری ترکیبی رقابت امپریالیستی-مورچه

مجتبی شیخی ازغندی^۱، مهدی حسن زاده^{۲*}

^۱ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

^۲ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد گرگان، دانشگاه آزاد اسلامی، گرگان، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۱۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۰۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۴

چکیده

در پژوهش حاضر طراحی بهینه شکل قالب در فرایند شکل‌دهی فلزات با استفاده از اکستروژن مورد بررسی قرار گرفته است. باتوجه به وجود تغییر شکل‌های بزرگ در حین شکل‌دهی و در نتیجه ورود به ناحیه مومسان ماده، برای تحلیل مسئله در این ناحیه روش المان محدود به کار گرفته شده و مدل‌سازی در دستگاه اویلری انجام پذیرفته است. در این مطالعه تابع هدف رسیدن به کمترین انرژی کل مورد نیاز برای تغییر شکل در فرایند اکستروژن است. متغیر طراحی مورد نظر شکل قالب بوده و برای تولید شکل قالب از منحنی‌های اسپیلاین با در نظر گرفتن چند نقطه کنترلی استفاده شده است. با توجه به ماهیت غیرخطی بودن مسئله شکل‌دهی فلزات، پیچیدگی و حجم زیاد محاسبات در حین تحلیل مسئله، برای طراحی شکل بهینه قالب از یک روش بهینه‌سازی فراابتکاری ترکیبی قدرتمند الهام گرفته شده از دو روش رقابت امپریالیستی و الگوریتم مورچه (ICACO) کمک گرفته شده است. برای اعتبارسنجی نتایج به دست آمده برای شکل هندسی قالب در پژوهش حاضر، از مقایسه آن‌ها با نتایج ارائه شده در تحقیقات گذشته استفاده شد و میزان خطا کمتر از ۲ درصد به دست آمد و هم‌خوانی خوبی مشاهده گردید. نتایج به دست آمده باعث کاهش قابل توجه مصرف انرژی کل در حین تغییر شکل به میزان حدودی ۱۲٪ نسبت به حالت مرسوم خطی شده است.

کلمات کلیدی: روش فراابتکاری ترکیبی؛ تحلیل المان محدود؛ بهینه‌سازی شکلی؛ منحنی اسپیلاین؛ رقابت امپریالیستی؛ گروه مورچه.

Optimum Shape Design of Axisymmetric Extrusion Die by using Hybrid Meta-Heuristic Optimization (ICACO)

M. Sheikhi Azqandi^{1a,b}, M. Hassanzadeh^{2*}

^{1a} Assist. Prof., Mech. Eng., University of Birjand., Birjand, Iran

^{1b} Assist. Prof., Mech. Eng., Bozorgmehr University of Qaenat., Qaen, Iran

² Assist. Prof., Mech. Eng., Islamic Azad University, Gorgan, Iran

Abstract

The present study investigates the optimal design of the die shape in the metal forming process using extrusion. Due to the large deformations that occur during the forming process and the resulting entry into the plastic deformation zone, the finite element method is used to analyze the problem in this area, and the modeling is performed in the Eulerian system. The objective function of this study is to minimize the total energy required for deformation in the extrusion process. The design variable is the die shape, and spline curves with multiple control points are used to generate the die shape. Due to the nonlinear nature of the forming problem, the complexity, and the large amount of computation required during the analysis, a powerful combination of two metaheuristic optimization methods, the Imperialist Competitive Algorithm and Ant Colony Algorithm (ICACO), has been inspired for the optimal design of the die shape. To validate the obtained results for the die geometry, they are compared with the results presented in previous studies. The error was less than 2%, showing a good agreement. The results obtained have led to a significant reduction in the total energy consumption during deformation by approximately 12% compared to the conventional linear mode.

Keywords: Hybrid metaheuristic Method; Finite element analysis; Shape optimization; Spline; Imperialist competitive algorithm; Ant colony Optimization.

۱- مقدمه

در دو دهه اخیر به‌کارگیری روش‌های بهینه‌سازی به ویژه فراابتکاری^۱ برای حل مسائل مهندسی دارای رشد قابل توجهی شده است [۱]. در این راستا محققان با ادغام روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری توانستند، روش‌های بهینه‌سازی ترکیبی را ابداع نمایند که دارای کارایی مناسبی در حل مسائل می‌باشند [۱ و ۲]. اگر چه تاکنون استفاده از روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری در بهینه‌سازی سازه‌ها و حل مسائل مهندسی به طور گسترده به کار رفته است، اما کاربرد آن‌ها در زمینه شکل‌دهی و مسائل مربوط به طراحی ابزار نادر بوده است. این در حالی است که بهینه‌سازی شکلی در فرآیندهای شکل‌دهی یک چالش رایج است [۳ و ۴].

بنت و همکارانش مروری جامع بر استراتژی‌های مختلف بهینه‌سازی در فرآیندهای شکل‌دهی فلزات را به سرانجام رسانده‌اند و توانسته‌اند یک طبقه‌بندی کلی برای الگوریتم‌های بهینه‌سازی شامل تکراری، تکاملی، تقریبی و تطبیقی ارائه دهند [۵]. یکی از فرآیندهای شکل‌دهی فلزات، اکستروژن است. تلاش برای به دست آوردن اکستروژن مورد نظر با طراحی قالب (حدیده) به دهه ۱۹۵۰ و ۱۹۸۰ بر می‌گردد [۶]. در پژوهش‌های اولیه، طراحی قالب بر اساس تحلیل‌های ساده، تجربی و قوانین سرانگشتی انجام می‌گرفت. پیتمن [۷] در تحقیقی به مرور روش‌های مختلف برای بهینه‌سازی پروفیل قالب‌های اکستروژن با استفاده از روش‌های ریاضی پرداخته است. در اکثر مطالعات انجام شده تاکنون، با تعیین یک تابع هدف مناسب، عملکرد قالب ارزیابی شده و سپس با کمک روش بهینه‌سازی سعی می‌شود با طراحی پروفیل یک قالب مناسب به بهترین حالت ممکن دست یابد.

بهر و همکاران [۸] و الگتی و همکاران [۹] برای تحلیل مسئله اکستروژن روشی را با استفاده از شبیه‌سازی‌های جریان سیال به کمک روش اجزای محدود پیشنهاد کرده‌اند. هدف در نظر گرفته شده در این دو تحقیق رسیدن به حداقل توزیع سرعت همگن در خروجی قالب بوده است. لی و همکاران [۱۰] به طراحی بهینه یک قالب متقارن در فرآیند اکستروژن پرداخته‌اند. در این مطالعه تحلیل مسئله در ناحیه پلاستیک با روش اجزای محدود به صورت صلب- ترموویسکوپلاستیک انجام

گرفته و سپس با کمک منحنی‌های بزیبر شکل قالب مدل-سازی می‌گردد. در نهایت طرح بهینه قالب برای یکنواختی دانه‌بندی محصول ساخته می‌شود.

یولیس [۱۱] با استفاده از روش تحلیلی به محاسبه حساسیت نحوه شارش ماده نسبت به شکل قالب پرداخته و سپس با استفاده از نتایج گرفته شده به بهینه‌سازی شکل قالب در فرآیند اکستروژن می‌پردازد. تابع هدف در نظر گرفته در پژوهش مذکور کنترل شارش در خروجی قالب است. رسیدن به طرح بهینه قالب اکستروژن برای یک مقطع غیرمتقارن به فرم L شکل توسط یان و شیا [۱۲] انجام پذیرفته است. در این تحقیق تابع هدف، سرعت شارش ماده در نظر گرفته شده که با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی مقدار آن تخمین زده می‌شود و سپس با کمک الگوریتم ژنتیک متغیرهای طراحی بهینه محاسبه می‌گردد. گوردونا و همکاران [۱۳] طراحی بهینه شکل قالب برای رسیدن به حداقل فشار متوسط اکستروژن را با روش حد بالا و در نظر گرفتن چند میدان سرعت برای قالب اکستروژن در حالت متقارن به سرانجام رسانده‌اند. بخشی جویباری و همکاران [۱۴] با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، روش المان محدود و روش ترکیبی حد بالا و قاجی، طراحی قالب اکستروژن را انجام دادند. بیرانوند و حقیقت [۱۵] با استفاده از روش المان محدود و حد بالا به تحلیل اکستروژن لوله‌های دو فلزی برای یک قالب مخروطی پرداخته‌اند. گیارمس و تزتسیس [۱۶] به مروری بر تحقیقات انجام شده بر روی طراحی قالب اکستروژن برای آلیاژ آلومینیوم با استفاده از روش المان محدود پرداخته است.

روش طراحی قالب در فرآیند اکستروژن محدود به شکل‌دهی فلزات نیست. بلکه می‌توان از این روش برای تغییر شکل موادی دیگر از جمله کامپوزیت‌ها، پلیمرها، پلاستیک‌ها و غیره استفاده کرد. به عنوان نمونه اسپنچارد و همکاران [۱۷] به بهینه‌سازی شکل قالب اکستروژن به صورت سه بعدی پرداخته است. در این پژوهش رفتار ماده به صورت ویسکوالاستیسیته در نظر گرفته شده و از روش المان محدود برای تحلیل استفاده شده است.

در این صورت به‌کارگیری قالب اکستروژن، محدود به مسئله شکل‌دهی فلزات نیست؛ بنابراین روش ارائه شده در تحقیق

^۱ Meta heuristic

و ماده به صورت یک سیال در حال عبور از حجم کنترل مورد تحلیل و بررسی قرار خواهد گرفت. در این صورت المان‌بندی را می‌توان در ناحیه تغییر شکل در نظر گرفت. با صرف نظر از نیروهای حجمی و اینرسی معادله تعادل برای مواد در دامنه Ω و دارای مرز $\partial\Omega$ به صورت روابط (۱) تا (۴) خواهد بود [۱۸].

$$\nabla \cdot \sigma = 0 \text{ @ } \Omega \quad (۱)$$

$$(\sigma n) \cdot e_i = T_i^0 \text{ @ } \Omega_{ti}, \quad i = 1, 2 \quad (۲)$$

$$u \cdot e_i = u_i^0 \text{ @ } \Omega_{ui}, \quad i = 1, 2 \quad (۳)$$

$$\partial\Omega = \partial\Omega_t + \partial\Omega_u \quad (۴)$$

در روابط فوق σ تانسور تنش، T_i^0 نیروی سطحی در قسمتی از مرز Ω_t و مولفه‌های سرعت u_i^0 در سطح باقیمانده Ω_u بردار یک‌جهت عمود بر مرز $\partial\Omega$ ، e_i بردار یک‌جهت مختصات دکارتی و u بردار سرعت است. در این فرمول‌بندی تانسور نرخ کرنش ($\dot{\epsilon}$) با سرعت (u) در حالت متقارن محوری به صورت روابط (۵) تا (۸) رابطه خواهد شد.

$$\dot{\epsilon}_{rr} = \frac{\partial u_r}{\partial r} \quad (۵)$$

$$\dot{\epsilon}_{\theta\theta} = \frac{u_r}{r} \quad (۶)$$

$$\dot{\epsilon}_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (۷)$$

$$\dot{\epsilon}_{rz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) \quad (۸)$$

با توجه اینکه در حین تغییر شکل، ماده در منطقه مومسان وارد می‌شود، با فرض تراکم ناپذیر بودن ماده، معادله پیوستگی (۹) در هر نقطه در دامنه $\partial\Omega$ برقرار باشد.

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (۹)$$

تانسور تنش انحرافی S_{ij} با نرخ کرنش $\dot{\epsilon}_{ij}$ در فرایند اکستروژن در فرمول‌بندی شارش به صورت روابط (۱۰) تا (۱۲) توصیف می‌شود.

$$S = \sigma - PI \quad (۱۰)$$

$$S_{ij} = 2\mu\dot{\epsilon}_{ij} \quad (۱۱)$$

$$\mu = \frac{\sigma_e}{3\dot{\epsilon}_e} \quad (۱۲)$$

حاضر کاربرد گسترده‌ای برای تحلیل مسائل مهندسی داشته و می‌تواند به محققان زیادی کمک کند.

در اکثر موارد ذکر شده تاکنون برای تحلیل مسئله از روش المان محدود و فرمول‌بندی لاگرانژی استفاده شده است. این در حالی است که تحلیل و طراحی در مسائل مربوط به فرایندهای شکل‌دهی مستقیماً به شارش ماده مربوط می‌شوند. شکل‌دهی با پیچیدگی‌های بسیاری از جمله رفتار غیرخطی ماده، تغییر شکل‌های بزرگ و بنابراین وجود تغییر شکل‌های مومسان و شرایط مرزی تماس در سطح مشترک ماده و ابزار مواجه است.

در تحقیق حاضر یکی از نقاط قوت پژوهش حاضر نسبت به تحقیقات گذشته در این است که برای تحلیل مسئله در فرایند اکستروژن از المان‌بندی اویلری استفاده شده است. مش اویلری در فضا ثابت است و برخلاف المان‌بندی لاگرانژی، از بین رفتن المان‌ها و مشکلات ناشی از آن رخ نخواهد داد. در این پژوهش، طراحی بهینه قالب متقارن برای اکستروژن میله، به منظور حداقل کردن نرخ مصرف انرژی شکل‌دهی انجام شده است.

برای این مهم با شروع از یک مجموعه طرح به صورت تصادفی و با استفاده از روش بهینه‌سازی ترکیبی فراابتکاری ICACO، شکل بهینه منحنی قالب به دست آمده است. استفاده از این روش بهینه‌سازی تاکنون در مسئله رسیدن به شکل بهینه در فرایند شکل‌دهی فلزات به کار نرفته است. روش ICACO می‌تواند با ایجاد توازن مناسب بین فاز استخراج و اکتشاف به جواب بهینه کلی مسئله همگرا گردد. برای پیاده‌سازی روش ارائه شده یک برنامه کامپیوتری در محیط نرم‌افزار (MATLAB) تهیه شده و کلیه مراحل محاسباتی از جمله تولید منحنی، تحلیل با روش المان محدود، به دست آوردن تابع هدف و در نهایت بهینه‌سازی شکل قالب در آن گنجانده شده و به هم ارتباط داده شده‌اند.

۲- مدل‌سازی فرایند شکل‌دهی با المان‌بندی اویلری

مدل‌سازی اویلری برای فرایندهای شکل‌دهی از جمله نورد، کشش عمیق و اکستروژن مناسب است که در آن‌ها تغییر شکل ماده بزرگ و به صورت پیوسته است (نظیر تحلیل سیالات) و وارد منطقه مومسان می‌شود. در این فرمول‌بندی معادلات برای یک ناحیه ثابت در فضا به نام حجم کنترل در نظر گرفته شده

نیروهای سطحی اعمال شده به المان نظیر نیروی اصطکاک و D ماتریس ضرایب مربوط به رابطه بین نرخ تنش-کرنش است.

$$K = \int_{\Omega} 2\mu B^T D B d\Omega + \int_{\Omega} \beta B^T w w^T B d\Omega \quad (18)$$

$$\hat{f} = \int_{\partial\Omega} N^T T^0 ds \quad (19)$$

ماتریس D به صورت قطری بوده و دارای مولفه‌های ۱ و ۵/۰ است؛ همچنین، w برداری است که نرخ کرنش را به نرخ کرنش حجمی تبدیل می‌کند. پارامتر β نیز ضریب جریمه است و دارای مقدار بزرگی است تا قید تراکم ناپذیری ماده برقرار گردد. در این حالت تنش اصطکاکی به صورت فاکتور اصطکاک m با رابطه (۲۰) بیان می‌شود.

$$f_k = m \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}} \quad (20)$$

همان‌طور که پیشتر ذکر شد، المان‌بندی اولیه بر خلاف لاگرانژی در فضا ثابت است؛ در نتیجه در تحلیل مسئله با فرمول‌بندی اولیه تخریب المان‌بندی وجود ندارد؛ بنابراین برای حل مسئله نیازی به استفاده از گام به گام کردن آن (به-روزرسانی المان بندی در هر مرحله) نیست و این کار یک مرحله‌ای انجام می‌پذیرد.

۳- منحنی اسپیلاین برای تولید شکل قالب

در این مقاله، ایجاد شکل قالب در فرایند اکستروژن میله، برای نسبت اکستروژن داده شده و شعاع اولیه شمش با استفاده از منحنی‌های اسپیلاین انجام شده است. منحنی‌های اسپیلاین به صورت گسترده در زمینه طراحی به کمک کامپیوتر استفاده می‌شود [۲۱]. اسپیلاین مجموعه‌ای از توابع چند جمله‌ای تکه‌تکه با شرایط پیوستگی شامل خود تابع و مشتق‌های آن را ایجاد می‌کند و به همین دلیل می‌تواند به منحنی هموار با ویژگی‌های منحصر به فرد دست پیدا کرد. این منحنی می‌تواند هر گونه تغییر متغیر وابسته y را با متغیر مستقل x به طور دلخواه در فواصل دلخواه نشان دهند. علاوه بر این، با توجه به ویژگی‌های محلی توابع اسپیلاین، ابزاری عالی برای تمایز و یکپارچه‌سازی داده‌های تجربی است. منحنی اسپیلاین ابزاری

در روابط فوق P فشار هیدرواستاتیکی، μ ویسکوزیته موثر ماده، I ماتریس همانی، σ_e نامتغیر دوم تنش (تنش موثر) و $\hat{\epsilon}_e$ نامتغیر دوم نرخ کرنش (نرخ کرنش موثر) می‌باشند و به صورت روابط (۱۳) تا (۱۴) محاسبه می‌شوند.

$$\sigma_e = C \hat{\epsilon}_e \quad (13)$$

$$\hat{\epsilon}_e^2 = \frac{2}{3} \hat{\epsilon}_{ij} \hat{\epsilon}_{ij} \quad (14)$$

در روابط فوق C و d مشخصه‌های ماده ویسکوپلاستیک است. در این پژوهش ماده‌ای که در فرایند اکستروژن به کار گرفته شده، آلیاژ آلومینیوم ۲۰۱۷ است که دارای مقادیر ثابت C و d به ترتیب برابر ۸۶/۱۲۵ مگاپاسکال و ۰/۱۲۸ است [۱۹]. به علت شکل‌پذیری آلومینیوم ۲۰۱۷، برای تغییر شکل نیروی پایین‌تری نسبت به فولادها نیاز است. از این رو انجام فرایند اکستروژن بر روی آن به راحتی قابل انجام است؛ بنابراین استفاده از این نوع شکل‌دهی برای آلومینیوم در صنعت کاربرد فراوانی داشته و به این دلیل در این تحقیق نیز به شکل‌دهی آلومینیوم پرداخته شد.

در تحقیق حاضر برای تحلیل مسئله مقادیر مرزی از روش المان محدود کمک گرفته شده است. سرعت در نقاط داخلی المان‌ها u به وسیله درون‌یابی مقادیر گره‌ای سرعت \hat{u} به صورت رابطه (۱۵) قابل محاسبه است.

$$u = N \hat{u} \quad (15)$$

در رابطه فوق N ماتریس توابع شکل است. همچنین، میدان نرخ کرنش $\hat{\epsilon}$ داخل المان از ماتریس نرخ کرنش B و مقادیر گره‌ای المان به صورت رابطه (۱۶) به دست می‌آید.

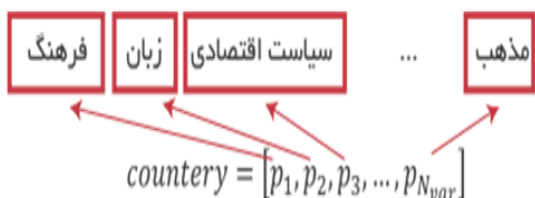
$$\hat{\epsilon} = B \hat{u} \quad (16)$$

با استفاده از راه حل عمومی المان محدود، معادله ماتریسی زیر برای به دست آوردن سرعت‌های گره‌ای استفاده می‌شود [۲۰].

$$K \hat{u} = \hat{f} \quad (17)$$

در این رابطه K ماتریس سفتی المان است که به صورت غیرخطی بوده و از رابطه (۱۸) محاسبه می‌شود. \hat{f} بردار

بین ملل مختلف است [۲۲]. در حقیقت خصوصیت‌های مختلف ملل به صورت شکل ۱ به عنوان متغیرهای طراحی مسئله در نظر گرفته می‌شوند.



شکل ۱- تناظر بین متغیرهای طراحی با خصوصیات مختلف ملل در الگوریتم بهینه‌سازی [۱]

تمامی ملت‌ها متعلق به چند امپراطوری است و از طرفی دیگر تمامی این ملل در الگوریتم به دو دسته ملت‌های استعمارگر و مستعمره تقسیم می‌شوند. ملل استعمارگر با در پیش گرفتن سیاست جذب در زمینه‌های مختلف، ملل مستعمره را به سمت خود می‌کشند و باعث پیشرفت آن‌ها خواهند شد. رقابت‌های سیاسی در کنار سیاست جذب، یکسان‌سازی و انقلاب هسته اصلی این الگوریتم را تشکیل داده و باعث می‌شود که ملل به سمت پیشرفته شدن (مینیمم مطلق تابع) حرکت کنند. در حل یک مسئله بهینه‌سازی، این روش به دنبال یافتن ملتی با بهترین خصوصیات به لحاظ تمام پارامترهای اجتماعی، سیاسی، فرهنگی و ... است. به عبارت بهتر هدف رسیدن به متغیرهای بهینه مسئله است که بهترین مقدار تابع هدف را به وجود آورند. در ادامه شبه کد روش رقابت امپریالیستی ارائه شده است.

گام اول: تولید چند ملت با خصوصیات مختلف (متغیرهای طراحی) به صورت تصادفی
گام دوم: تقسیم ملل به دو دسته کشورهای مستعمره و استعمارگر بر اساس تابع هدف
گام سوم: تشکیل امپراطوری‌های اولیه و تقسیم ملل مستعمره بین ملل استعمارگر بر اساس قدرت هر امپراطوری
گام چهارم: حرکت مستعمرات به سمت کشور استعمارگر در راستای سیاست همسان‌سازی و جذب
گام پنجم: عوض کردن جای مستعمره‌ای در یک امپراطوری با ملل استعمارگر در صورتی که دارای قدرت بیشتری شود.
گام ششم: محاسبه قدرت هر امپراطوری

برای مهندسان برای ترسیم منحنی‌های یک‌دست با استفاده از تعدادی نقاط محدود است. ایده اصلی روش مذکور در این است که یک تابع تکه‌تکه به فرم کلی زیر برآزش می‌شود.

$$S(x) = \begin{cases} s_1(x) & \text{if } x_1 \leq x \leq x_2 \\ s_2(x) & \text{if } x_2 \leq x \leq x_3 \\ \vdots \\ s_{n-1}(x) & \text{if } x_{n-1} \leq x \leq x_n \end{cases} \quad (21)$$

که در آن s_i ها چند جمله‌ای‌های درجه سوم (درجه چند جمله‌ای وابسته به تعداد نقاط در نظر گرفته شده در هر بازه) است که توسط رابطه (۲۲) تعریف می‌شود.

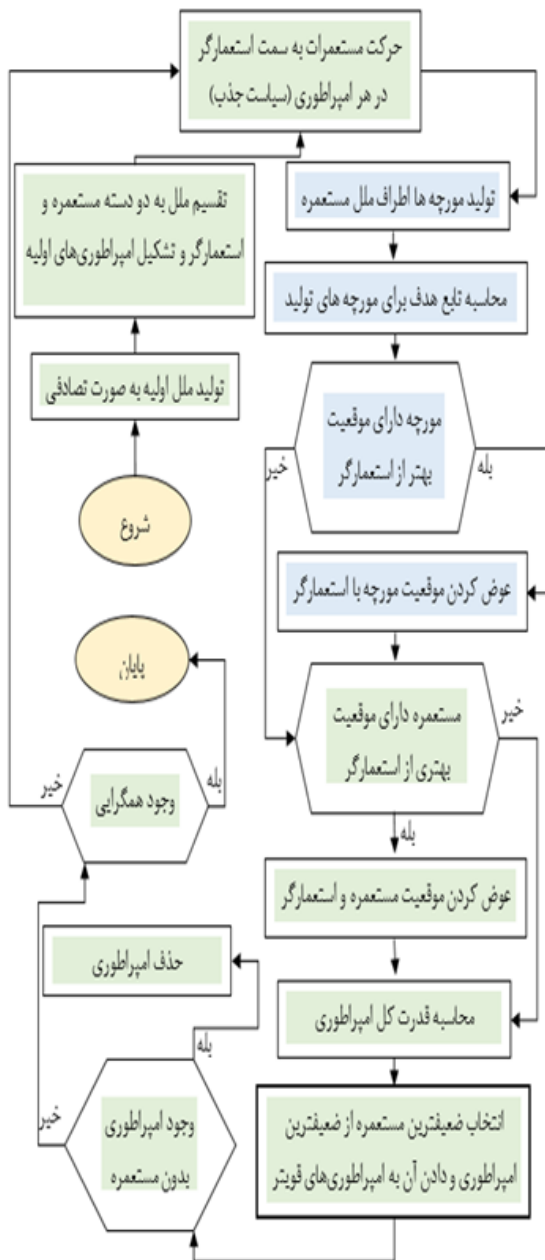
$$s_i(x) = a_i(x - x_i)^3 + b_i(x - x_i)^2 + c_i(x - x_i) + d_i, \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (22)$$

منحنی‌های اسپلاین در نظر گرفته شده در این پژوهش با توجه به درجه سه بودن، باید دارای شرایط زیر باشد.

- ۱- تابع تکه‌ای $S(x)$ تمام نقاط در دامنه مورد بررسی $[x_1, x_n]$ را درون‌یابی می‌کند.
 - ۲- تابع $S(x)$ در کل بازه مورد بررسی $[x_1, x_n]$ پیوسته است.
 - ۳- مشتق اول تابع $S(x)$ در کل بازه مورد بررسی $[x_1, x_n]$ پیوسته است.
 - ۴- مشتق دوم تابع $S(x)$ در کل بازه مورد بررسی $[x_1, x_n]$ پیوسته است.
- با شرایط فوق می‌توان ضرایب مربوط به رابطه (۲۲) را برای هر بازه مورد نظر با استفاده از حل یک دستگاه معادلات خطی به دست آورد.

۴- روش بهینه‌سازی ترکیبی فراابتکاری

در این پژوهش برای طراحی شکل بهینه از یک روش بهینه‌سازی فراابتکاری ترکیبی قدرتمند استفاده شده است. برای این منظور ابتدا به بررسی نقاط قوت و ضعف روش بهینه‌سازی رقابت امپریالیستی پرداخته شده و سپس با استفاده از ترکیب آن با الگوریتم گروه مورچه‌ها، نقاط ضعف الگوریتم رقابت امپریالیستی برطرف گردیده و نقاط قوت آن نیز تقویت شده است. پایه‌ریزی الگوریتم رقابت امپریالیستی از مدل‌سازی ریاضی فرایند تکامل در روابط اجتماعی، سیاسی، فرهنگی و ...



شکل ۲ - فلوجارت الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی رقابت امپریالیستی-مورچه‌ها

گام هفتم: جذب ملل مستعمره در امپراطوری با قدرت کمتر به سمت امپراطوری‌های با قدرت بیشتر
 گام هشتم: حذف امپراطوری ضعیف و بدون مستعمره
 گام نهم: توقف الگوریتم در صورت وجود یک امپراطوری و رسیدن به قدرت برابر بین تمامی مستعمرات و استعمارگر و در غیر این صورت رفتن به گام چهارم
 قدرت و کارایی روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری وابسته به دو فاز مهم اکتشاف و بهره‌برداری است. فاز اکتشاف به جستجوی سراسری در کل فضای مجاز و شناختن نواحی بهتر اطلاق می‌شود. در مرحله استخراج (جستجوی محلی)، به جستجوی دقیق‌تر نواحی که در فاز اکتشاف در الگوریتم مشخص شده‌اند، پرداخته می‌شود [۲۳]. در الگوریتم ترکیبی رقابت امپریالیستی-مورچه، از الگوریتم رقابت امپریالیستی به عنوان ابزار جستجوی کلی و از الگوریتم گروه مورچه به عنوان جستجوی محلی استفاده شده است [۲۴]. به عبارتی از الگوریتم گروه مورچه‌ها با استفاده از مکانیزم فرمون برای اصلاح موقعیت ملل در الگوریتم رقابت امپریالیستی استفاده می‌شود. در مرحله جستجوی محلی توسط الگوریتم گروه مورچه‌ها، ابتدا به تعداد ملل مستعمره هر امپراطوری، مورچه اطراف استعمارگر آن امپراطوری پخش می‌شود [۲۵]. در شکل ۲ فلوجارت روش بهینه‌سازی فراابتکاری ترکیبی رقابت امپریالیستی-مورچه ارائه شده است. در این شکل قسمت‌های سبز رنگ برگرفته از روش بهینه‌سازی رقابت امپریالیستی است و قسمت‌های آبی رنگ مربوط بر اساس مفاهیم حاکم بر روش بهینه‌سازی مورچگان است. الگوریتم بهینه‌سازی به کار رفته در تحقیق حاضر، همان الگوریتم مورد استفاده در مرجع [۲۶] است. خوانندگان محترم برای اطلاع از جزئیات بیشتر می‌توانند به آن مراجعه نمایند.

۵- نتایج عددی

در تحقیق حاضر هدف مسئله تعیین شکل بهینه منحنی قالب به گونه‌ای است که نرخ مصرف انرژی مورد نیاز تغییر شکل آلومینیوم در فرایند اکستروژن حداقل گردد. برای طراحی شکل قالب از منحنی‌های اسپیلاین با ۵ نقطه کنترلی استفاده

مساله اشاره شده برای محاسبه نیروی میانگین مورد نیاز برای تغییر شکل به صورت رابطه (۲۶) است [۲۷].

$$\frac{P}{\sigma_y} = \left(1 + \frac{m}{\sin(2\theta)}\right) \varepsilon + \frac{2}{3} \tan(\theta) \quad (26)$$

در رابطه فوق θ زاویه مرکزی قالب خطی، m فاکتور اصطکاک، ε کرنش طولی در کل فرآیند، σ_y تنش تسلیم و P فشار میانگین اعمالی به قطعه است. برای مشخصات ارائه شده در جدول ۱ و قالب مخروطی، میزان خطای بین مقدار به دست آمده با دو روش تحلیلی و المان محدود برای نیروی مورد نیاز برابر با ۱/۹۹ درصد به دست آمد. بر این اساس برنامه نوشته شده از دقت خوبی برخوردار است.

در فرایند اکستروژن مواد یکی از فاکتورهای مهم، مصرف انرژی است که با حداقل کردن آن می توان مقدار هزینه تولید را به صورت قابل توجهی کاهش داد. در فرایند اکستروژن با قالب متقارن نرخ انرژی مصرفی را می توان به صورت رابطه (۲۷) محاسبه کرد [۱۸].

$$\dot{E} = \sum_i \int_{e_i} \sigma_e \dot{\varepsilon}_e dV \quad (27)$$

در جدول ۲ مقادیر مختصات نقاط کنترلی و همچنین میزان نرخ مصرف انرژی در حالت بهینه ارائه شده است. میزان نرخ مصرف انرژی برای قالب با شکل مخروطی با استفاده از حل تحلیلی (با بهره گیری از رابطه (۲۶) و مشخصات ارائه شده در جدول ۱) برابر با ۳۷۵/۲۷ ژول بر ثانیه به دست آمد. در حالی همان طور که جدول ۲ ارائه شد، برای شکل بهینه قالب طراحی شده با روش پیشنهادی نرخ مصرف انرژی برابر با ۳۳۳/۸۷ ژول بر ثانیه است؛ بنابراین میزان مصرف انرژی حالت بهینه نسبت به حالت مخروطی حدود ۱۲ درصد کاهش را نشان می دهد.

جدول ۲- مقادیر مختصات نقاط کنترلی و همچنین میزان نرخ مصرف انرژی در حالت بهینه

شماره نقطه	مختصات x (mm)	مختصات y (mm)
۱	۱۸/۰۰	۰/۰۰۰
۲	۱۶/۹۴	-۵/۰۰
۳	۱۴/۹۹	-۱۰/۰۰
۴	۱۲/۳۵	-۱۵/۰۰
۵	۱۰/۳۹	-۲۰/۰۰
نرخ مصرف انرژی (J/s)		۳۳۳/۸۷

شده است. دو نقطه، نقاط ابتدا و انتهای قالب بوده و بنابراین دارای موقعیت ثابتی می باشند و سه نقطه میانی در نظر گرفته شده است؛ در نتیجه در حین فرایند بهینه سازی در مجموع ۶ متغیر طراحی وجود دارد که شامل مختصات نقاط کنترلی میانی است. شایان ذکر است، برای منطقی شدن فرآیند طراحی، روابط (۲۳) و (۲۴) به عنوان قیدهای طراحی مد نظر قرار گرفته است.

$$x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq x_4 \leq x_5 \quad (23)$$

$$\begin{cases} y_2 \leq R_i \\ y_4 \geq R_o \end{cases} \quad (24)$$

در این روابط x_1 تا x_5 مختصات نقاط کنترلی و R_i و R_o به ترتیب شعاع اولیه و نهایی قالب اکستروژن است. باتوجه به حجم زیاد محاسبات در هر مرحله بهینه سازی و همچنین برای رسیدن به همگرایی بهتر در الگوریتم، مختصات نقاط کنترلی در راستای y با فواصل مساوی در نظر گرفته شده است. تمامی مراحل ذکر شده در این تحقیق شامل طراحی و تولید پروفیل قالب، تحلیل مسئله با روش المان محدود و پیاده سازی الگوریتم بهینه سازی در نرم افزار مطلب برنامه نویسی و اجرا شده است. در این مسئله برای طراحی بهینه شکل قالب از نسبت اکستروژن (λ) برابر ۳ استفاده شده و شبیه سازی عددی به صورت تکراری انجام می شود. نسبت اکستروژن با استفاده از فرمول (۲۵) محاسبه می شود.

$$\lambda = R_i^2 / R_o^2 \quad (25)$$

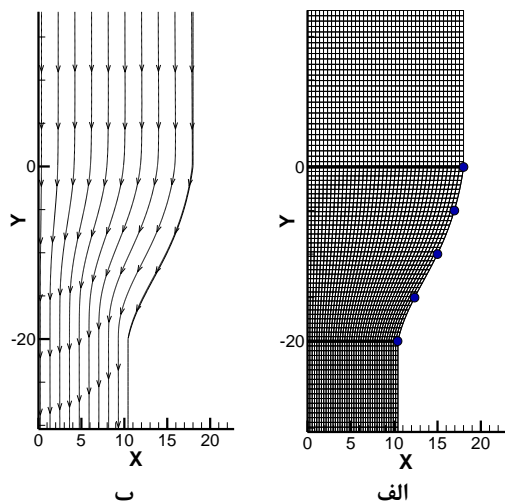
در جدول ۱ مشخصات ورودی قالب و جزئیات در فرایند اکستروژن ارائه شده است که در طول تحلیل ثابت خواهد بود.

جدول ۱- مشخصات ورودی قالب در فرایند اکستروژن

پارامترهای فرایند	داده ورودی
قطر اولیه (mm)	۳۶
قطر نهایی حالت اول (mm)	۲۰/۷۸
طول قالب (mm)	۲۰
سرعت ورودی (mm/s)	۲
فاکتور اصطکاک	۰/۵

برای اعتبارسنجی برنامه المان محدود نوشته شده، فرایند اکستروژن با یک قالب خطی (مخروطی) که حل تحلیلی آن در مطالعات گذشته ارائه شده است، تحلیل گردید. در این حالت ماده پلاستیک کامل در نظر گرفته شد. حل تحلیلی

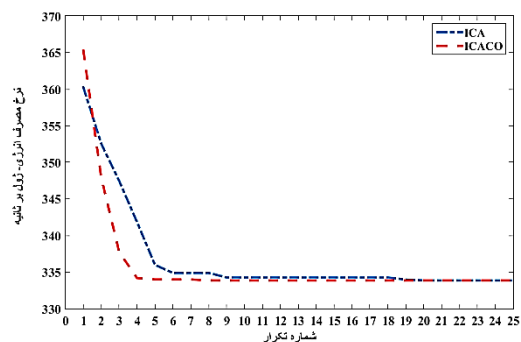
ماده می‌گردد. به این خاطر کار ورود و خروج در فرایند اکستروژن به حداقل خود رسیده است و در نتیجه میزان انرژی مورد نیاز برای تغییر شکل به حداقل مقدار خود رسیده است. به عبارت دیگر شکل قالب میزان کار اضافی انجام شده در طول تغییر شکل را کنترل کرده و مقدار آن را تا حد ممکن کاهش داده است.



شکل ۴- الف- پروفیل بهینه قالب اکستروژن، موقعیت نقاط کنترلی و نحوه المان‌بندی ب- نحوه تشکیل خطوط لودر در هنگام شارش ماده (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

در قسمت‌های الف و ب شکل‌های ۵ تا ۹ به ترتیب نحوه توزیع مولفه‌های مختلف تنش در دستگاه مختصات استوانه‌ای شامل تنش معادل موثر، شعاعی، تنش برشی در صفحه شعاعی-محوری، تنش مماسی و محوری بر حسب مگاپاسکال ارائه شده است.

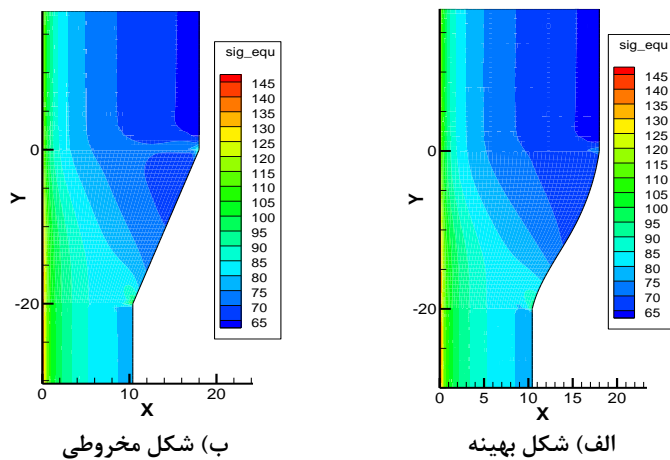
همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان مصرف انرژی در تکرار اول حدوداً برابر با ۳۶۵ ژول بر ثانیه است که الگوریتم مذکور توانسته در کمتر از ۱۰ تکرار به همگرایی دست پیدا کند و میزان نرخ مصرف انرژی را به میزان حدودی ۱۰ درصد نسبت به بهترین شکل قالب در تکرار اول کاهش دهد و به مقدار ۳۳۳/۸۷ ژول بر ثانیه برساند. این درحالی است که روش بهینه‌سازی رقابت استعماری بعد از گذشت ۱۹ تکرار به جواب مسئله همگرا شده است. در عین حال جواب بهینه نهایی به دست آمده با این روش در تعداد حداکثر تکرار مشخص شده در الگوریتم به مقدار ۳۳۳/۹۸ همگرا شده است.



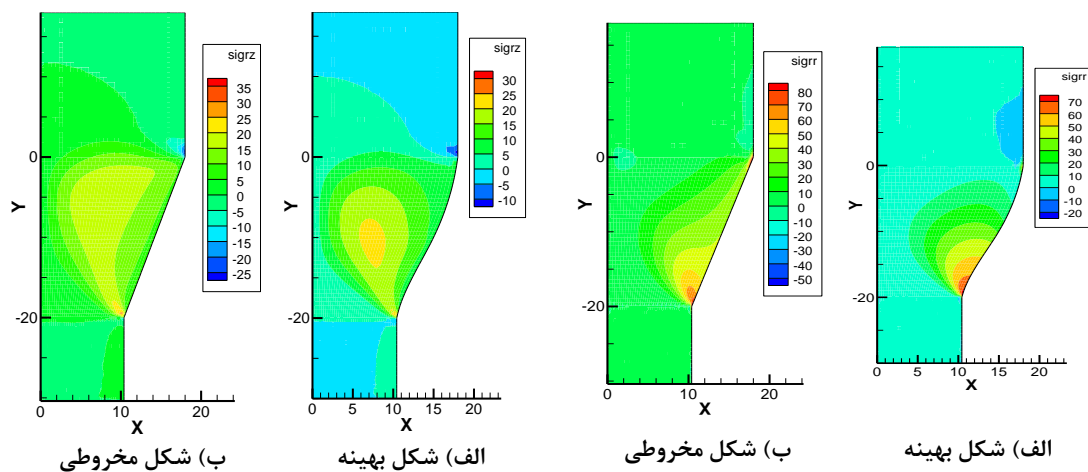
شکل ۳- نمودار همگرایی به شکل قالب بهینه با روش بهینه‌سازی فراابتکاری ترکیبی رقابت امپریالیستی-مورچه‌ها و روش رقابت استعماری

در شکل ۴ قسمت الف پروفیل بهینه قالب اکستروژن به همراه موقعیت نقاط کنترلی به صورت دایره‌های آبی رنگ بر روی محیط آن و همچنین نحوه المان‌بندی قالب برای تحلیل مسئله ارائه شده است. در قسمت ب این شکل چگونگی تشکیل خطوط لودر در حین تغییر شکل ماده در قالب و نحوه شارش ماده مشخص است.

همان‌طور که در شکل ۴ قسمت ب مشاهده می‌شود، شکل بهینه قالب به گونه‌ای است که باعث خط جریانی شدن شارش

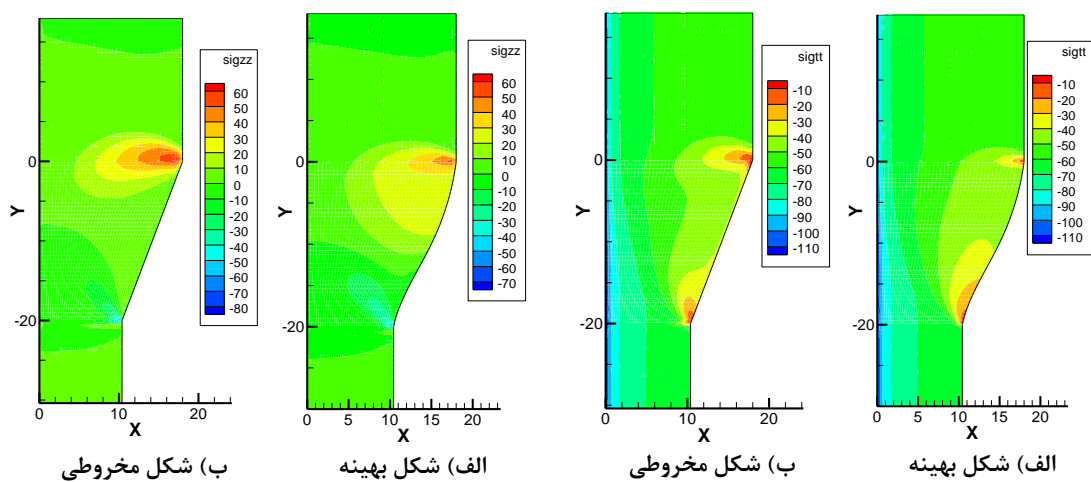


شکل ۵- نحوه توزیع تنش موثر بر حسب مگاپاسکال در حین شارش ماده در قالب



شکل ۷- نحوه توزیع تنش برشی شعاعی-محوری بر حسب مگاپاسکال در حین شارش ماده در قالب

شکل ۶- نحوه توزیع تنش شعاعی بر حسب مگاپاسکال در حین شارش ماده در قالب



شکل ۸- نحوه توزیع تنش مماسی بر حسب مگاپاسکال در حین شارش ماده در قالب

در تمام این شکل‌ها در قسمت الف توزیع تنش برای قالب دارای شکل بهینه به دست آمده با الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی و در قسمت ب برای حالت مخروطی ترسیم شده است.

بر اساس نتایج ارائه شده، مقدار مولفه مماسی تنش، دارای مقادیر بزرگتری نسبت به دیگر مولفه‌های تنش است و در نتیجه بیشترین تاثیر را در تنش موثر دارد. با توجه به اینکه مقدار تنش مماسی در مرکز دارای حداکثر مقدار خود است، به طبع آن مقدار تنش موثر نیز در این ناحیه دارای مقدار ماکزیمم شده است.

۶- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، یک روش طراحی جدید برای بهینه‌سازی پروفیل قالب جهت رسیدن به کمترین مقدار مصرف انرژی تغییر شکل در فرایند اکستروژن ارائه گردید. در تحلیل المان محدود برای شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی از فرمول‌بندی شارش در دستگاه اولبری استفاده شد. با توجه به اینکه تحلیل مسئله مورد نظر در این تحقیق نیاز به انجام محاسبات زمان‌بر و پیچیده برای هر طرح مورد نظر در الگوریتم بهینه‌سازی دارد، از یک روش بهینه‌سازی فراابتکاری ترکیبی قوی به نام رقابت امپریالیستی-مورچه که برای رسیدن به طرح بهینه پروفیل منحنی قالب به تعداد کم آنالیز تابع هدف نیاز دارد، استفاده شد. برای تولید منحنی قالب، منحنی‌های اسپیلاین درجه سوم با تعداد پنج نقطه کنترلی به کارگیری شد. نتایج حاکی از آن است که استفاده از روش پیشنهادی توانست میزان مصرف انرژی را نسبت به بهترین طراحی اولیه حدود ۱۰ درصد و نسبت به حالت مرسوم مخروطی حدود ۱۲ درصد کاهش دهد. با توجه به قدرتمند بودن و همچنین عدم نیاز به محاسبات اضافی برای بهینه‌سازی با استفاده از روش ارائه شده می‌توان تعداد متغیرهای طراحی بیشتری در حین طراحی قالب در نظر گرفت و میزان مصرفی انرژی کلی در حین فرایند شکل‌دهی را مجدد کاهش داد.

۷- تقدیر و تشکر

شکل ۹- نحوه توزیع تنش محوری بر حسب مگاپاسکال در حین شارش ماده در قالب

این تحقیق در قالب طرح پژوهشی به شماره ابلاغیه ۳۹۱۸۷ و با استفاده از اعتبارات پژوهشی دانشگاه بزرگمهر فائزات انجام شده است که بدین‌وسیله تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

- [۱] قدوسیان ع، شیخی ازغندی م، (۱۳۹۳) روش‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری در مهندسی، انتشارات دانشگاه سمنان.
- [2] Sheikhi Azqandi M, (2021) A Novel Hybrid Genetic Modified Colliding Bodies Optimization for Designing of Composite Laminates, Mech Adv Comp Struct 8: 203 – 212.
- [3] Michael C, Phillipp L, Paul S (2020) Shape Optimization of a Backward Extrusion Process Using a Non-Invasive Form Finding Algorithm. Procedia Manufacturing 47: 873–880.
- [4] Sheikhi Azqandi, M, Nooredin N, Ghoddosian A (2018) Optimization of spring back in U-die bending process of sheet metal using ANN and ICA. Struct Eng Mech 65(4) 447-452.
- [5] Bonte MHA, Van den B, Huétink J (2008) An optimisation strategy for industrial metal forming processes. Structural and Multidisciplinary Optimization. 35: 571–86.
- [6] Summers JW, Brown RJ (1981) Practicle principles of die design - a simplified procedure, in table form, for rigid PVC, J. Vinyl Technol. 3: 215–218.
- [7] Pittman JFT (2011) Computer-aided design and optimization of profile extrusion dies for thermoplastics and rubber: a review. J Process Mech Eng 225: 280–321.
- [8] Behr M, Michaeli W, Elgeti S, Nicolai M, Probst M, Fink B, Windeck C (2009) Towards shape optimization of extrusion dies using finite elements. J Plast Technol 5: 411–427.
- [9] Elgeti S, Probst M, Windeck C, Behr M, Michaeli W, Hopmann C, (2012) Numerical shape optimization as an approach to extrusion die design. Finite Elem Anal Des 61: 35–43.
- [10] Lee SK, Ko DC, Kim BM (2000) Optimal die profile design for uniform microstructure in hot extrusion product. Int J Mach Tool Manuf. 40: 1457–1478.
- [11] Ulysse P (2002) Extrusion die design for flow balance using FE and optimization methods, Int J of Mecha Sci 44: 319–341.

- [21] R. V. Dukkipati, (2018) Applied Numerical Methods with MatLab, McGraw-Hill Education.
- [۲۲] قدوسیان ع، اسکندر ه، شیخی ازغندی م (۱۳۹۲) طراحی بهینه ی مخازن جدار نازک با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری، نشریه علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک. ۱(۲۵): ۱۲۵-۱۳۴.
- [23] Arjmand M, Sheikhi Azqandi M, Delavar M (2018) Hybrid improved dolphin echolocation and ant colony optimization for optimal discrete sizing of truss structure, J Rehab Civ Eng 6(1): 70-87.
- [۲۴] شیخی ازغندی م، صفایی فرح (۱۴۰۱) بهینه سازی عملکرد میراگر غیرخطی ضربه ای صلب سه جرمی در ارتعاشات آزاد با روش ترکیبی فراکوشی، مجله مهندسی مکانیک تبریز. ۵۲ (۳): ۹۵-۱۰۳.
- [25] Ghoddosian A, Sheikhi Azqandi M, (2013) A Hybrid Imperialist Competitive Ant Colony Algorithm for Optimum Geometry Design of Frame Structures. Struct Eng Mech 46(3): 403-416.
- [26] Safaeifar H, Sheikhi Azqandi M (2021) Optimal design of the impact damper in free vibrations of SDOF system using ICACO. Int J Opti Civ Eng 11(3): 461-479.
- [27] Hosford W. F., Caddell R. M (2007) . Metal forming: mechanics and metallurgy ,Cambridge University Press.
- [12] Yan H, Xia J (2006) An approach to the optimal design of technological parameters in the profile extrusion process. Sci Tech Adv Mat. 7: 127-131.
- [13] Gordona WA, Van Tyneb CJ, Moon YH (2007) Axisymmetric extrusion through adaptive dies- Part 3: Minimum pressure streamlined die shapes, Int J Mech Sci 49: 104-115.
- [14] Bakhshi-Jooybari M, Saboori M, Noorani-Azad M, Hosseinipour SJ (2007) Combined upper bound and slab method, finite element and experimental study of optimal die profile in extrusion, Mat Des, 28: 1812-1818.
- [۱۵] بیرانوند م، حقیقت ح (۱۳۹۶) یک مدل تغییر شکل جدید برای فرآیند اکستروژن لوله های دو فلزی، نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، ۴۹ (۴): ۸۱۹-۸۲۸.
- [16] Giarmas E, Tzetzis D (2022) Optimization of die design for extrusion of 6xxx series aluminum alloys through finite element analysis: a critical review. Int J Adv Manufac Tech 119: 5529-5551.
- [17] Spanjaards MMA, Hulsen MA, Anderson PD, (2021) Die shape optimization for extrudate swell using feedback control, Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics 293 104552.
- [18] Dixit PM, Dixit US (2008) Modeling of Metal Forming and Machining Processes, Springer, London,.
- [19] Altan T, Oh SI, Gegel HL (1983) Metal Forming Fundamentals and Applications, American Society of Metals, Cleveland, OH.
- [20] Young WK, Hyochoong B (2018) The Finite Element Method Using MATLAB, CRC Press.