

## بهینه‌سازی ابعاد پلیسه، قطعه کار و فاکتور اصطکاک در فورجینگ سرد با قالب بسته

مهدی ظهور<sup>۱</sup> حسین شاهوردی<sup>۲</sup> امین تفکری<sup>۳</sup>

\* نویسنده مسئول: mzohoor@kntu.ac.ir

### چکیده

در این مقاله، در طراحی فرایند فورجینگ با قالبهای بسته غیر دقیق برای قطعات متقارن محوری، سه پارامتر نسبت عرض به ضخامت پلیسه، نسبت ارتفاع به قطر قطعه کار (بیلت) و فاکتور اصطکاک، با روش اجزا محدود مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین دو عامل مهم در فرایند فورج شامل نیروی لازم برای فورج و مقدار پرشدن فضای داخلی قالب بررسی گردید. با کنترل ابعاد پلیسه، امکان کاهش مقدار دور ریز مواد مصرفی و افزایش درصد پرشدن قالب ایجاد می‌شود. برای اعتبار سنجی نتایج این کار تحقیقاتی، مقدار نیروی به دست آمده از روش اجزا محدود با مقدار نیروی کار تجربی مقایسه شده است. برای هماهنگ کردن و ارتباط دادن بین پارامترهای مذکور و به دست آوردن تابع عملکرد، شبکه عصبی دولایه بکار گرفته شده است. با به کارگیری تابع به دست آمده از شبکه عصبی و استفاده از الگوریتم ژنتیک، فاکتور اصطکاک و ابعاد پلیسه و قطعه کار برای کاهش مقدار نیرو و افزایش درصد پر شدن قالب به دست آمد. سپس، این مقادیر با نتایج کار تجربی مرجع دیگر، مقایسه شده است. الگوریتم ژنتیک تخمین قابل قبولی برای پارامترهای مؤثر در فرایند فورج ارائه کرد، به طوری که تطابق و نزدیکی خوبی بین نتایج این الگوریتم و روش تجربی وجود دارد.

**واژه‌های کلیدی:** ابعاد پلیسه و قطعه کار، اصطکاک، فورج، قالب بسته، روش المان محدود، شبکه عصبی، الگوریتم ژنتیک.

۱- استادیار، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی و دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشکده مهندسی مکانیک.

۲- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا.

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا.

## ۱- مقدمه

به حداقل رساندن دور ریز مواد به منظور صرفه‌جویی اقتصادی و همچنین اعمال نیروی کمتر با هدف کاهش تنش‌های عملی بر روی قالبها و افزایش عمر آنها از اهداف مهم طراحی قالب فورج است [۱]. رسیدن به این اهداف مستلزم زمان و هزینه زیاد برای ساخت قالب و انجام فرایند فورج است. بنابراین، محققان تلاش کرده‌اند تا با بهینه کردن پارامترهای طراحی قالب و قطعه کار با استفاده از روشهای مختلف تحلیل عددی و شبیه‌سازیهای فیزیکی، هزینه و زمان لازم برای تولید قطعات فورج را کاهش دهند. در ناحیه پلیسه وقتی دو قالب به هم نزدیک می‌شوند فلز اضافی به صورت نوار نازکی به بیرون از قالب هدایت می‌شود [۲]. پارامترهای نسبت عرض به ضخامت پلیسه، نسبت ارتفاع به قطر قطعه کار و فاکتور اصطکاک، میزان نیرو و درصد حجمی داخل قالب را تعیین می‌کنند.

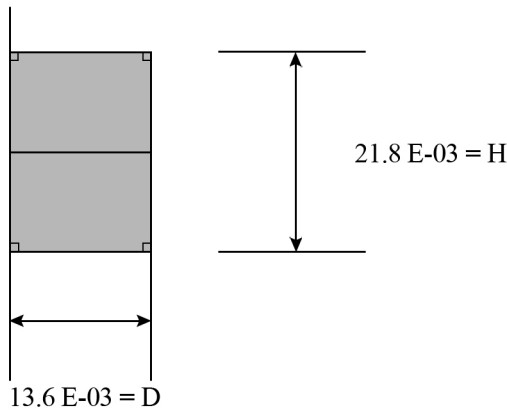
تعیین ضخامت پلیسه تابع تجهیزات فورج، ماده، وزن و پیچیدگی قطعه فورج است. روشهایی که برای تعیین ضخامت پلیسه استفاده می‌شود به دو دسته تجربی و تئوری تقسیم بندی می‌شوند. روابط تجربی توسط تعدادی از محققان، با بررسی نتایج آزمایشهای فورج و آنالیز آماری به دست آمده است [۱]. برای تعیین ابعاد بهینه پلیسه می‌توان از تحلیلهای عددی مانند روش انرژی، میدان خطوط لغزش، میدان کران بالا و روش اجزا محدود استفاده کرد. راناتانگا و گوناسکارا از روش کران بالایی و اجزا محدود برای طراحی پلیسه فورج قالب بسته قطعات تقارن محوری استفاده کردند [۳]. آنها از این روش برای تحلیل نیروی فورج، پرشدن قالب، توزیع تنش و کرنش استفاده کردند و سپس مقایسه نتایج تحلیلی و عددی را ارائه کردند. مقصودی و همکارانش مقادیر بهینه ابعاد هندسی قالب فورج و قطعه کار را با تحلیل اجزا محدود و آزمایشهای فیزیکی پیشنهاد دادند [۱]. در تحقیقات انجام شده در این زمینه در گذشته هیچگاه بهینه‌سازی انجام نشده است و تنها محققان با انجام چندین آزمایش بهترین مقادیر را در میان تستهای انجام شده ارائه کرده‌اند.

با کاهش ضخامت پلیسه نیروی زیادی برای راندن حجم اضافی ماده به درون ناحیه پلیسه لازم است که در چنین شرایطی نیروی فورج بیشتر صرف پر شدن حفره قالب می‌شود. بنابراین می‌توان ابعاد پلیسه را به گونه‌ای تعیین کرد که بیشترین بازده حجمی به دست آید و در نتیجه مقدار دور ریز مواد به حداقل برسد [۴]. با کاهش بیشتر ضخامت پلیسه درصد پر شدن قالب افزایش می‌یابد اما باعث افزایش نیروی فورج و تنش برشی در ناحیه پلیسه می‌شود و طول عمر قالب کاهش می‌یابد. فاکتور اصطکاک برای افزایش درصد حجمی داخل قالب بسیار حائز اهمیت است. اصطکاک موجود در قسمت پلیسه باعث پر شدن حفره‌های داخل قالب می‌شود. بدیهی است که با افزایش اصطکاک نیروی فورج نیز افزایش می‌یابد. بنابراین، لازم است رابطه‌ای برای بهینه کردن این سه عامل و مقدار نیروی فورج و درصد حجمی شناسایی شود. در این مقاله، به کمک شبکه عصبی رابطه‌ای بین پارامترهایی مانند نسبت ابعاد پلیسه، نسبت ابعاد قطعه کار، مقدار فاکتور اصطکاک شناسایی شد و سپس این رابطه توسط الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی گردید.

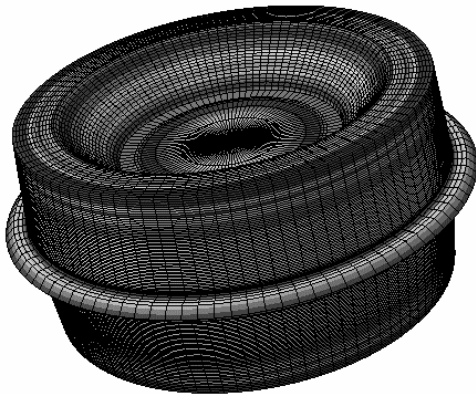
## ۲- روش تحقیق

تحلیل‌هایی که برای طراحی بهینه ابعاد پلیسه، ابعاد قطعه کار و مقدار اصطکاک صورت گرفت، شامل شبیه‌سازی دینامیکی توسط نرم افزار ABAQUS به صورت تقارن محوری و آنالیز عددی المان محدود توسط این نرم افزار است. اطلاعات خروجی حاصل از نرم افزار توسط نرم افزار MATLAB و به وسیله شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک بهینه شد.

در این مقاله، ابتدا برای شبیه‌سازی دینامیکی و تحلیل اجزا محدود توسط نرم افزار ABAQUS، از یک قطعه متقارن محوری ساخته شده با کار تجربی توسط صانعی و جعفری [۵]، مطابق شکل (۱)، استفاده شد. هدف از کار تجربی و شبیه‌سازی صانعی و همکارانش مقایسه نیروی فورج به دست آمده از سه روش تختال<sup>۱</sup>، تجربی و اجزا محدود است.

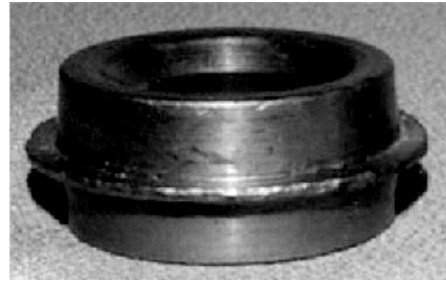


شکل (۴) شکل هندسی قطعه کار ( $H$  = ارتفاع قطعه کار و  $D$  = قطر قطعه کار).



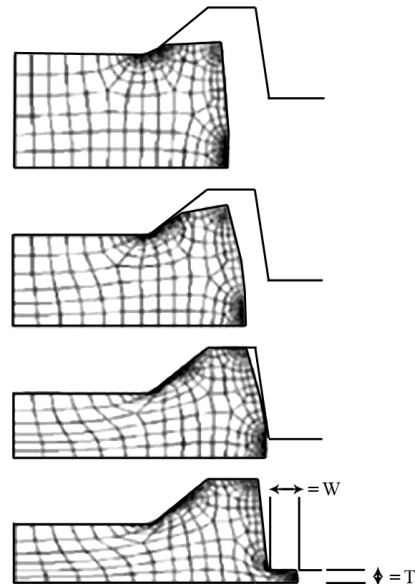
شکل (۵) نمای سه بعدی قطعه.

برای المان بندی قطعه کار از المانهای چهار گره ای استفاده شد. چون قطعه کار در طول فرایند تغییر شکل زیادی دارد، قسمتهایی از قطعه کار که دچار تغییر شکل زیاد می شوند باید دارای المان بندی ریزتر از سایر قسمتهای قطعه کار باشند. در نتیجه با استفاده از دستور Seed Edge Biased قطعه کار المان بندی شد. در این روش لبه های قطعه کار به قسمتهای کوچکی تقسیم شده و اندازه این قسمتها در طول لبه قطعه کار، از ابتدا تا انتهای لبه کوچکتر می شود. در مسائلی که دارای تغییر شکل زیادی در حین انجام فرایند می باشند، المانها نیز به شدت تغییر شکل می یابند. این پیچیدگی و اعوجاج شدید المانها می تواند به توقف حل مسئله منجر شود. لذا به المان بندی مجدد<sup>۱</sup> برای تحلیل دقیقتر نیاز است. با

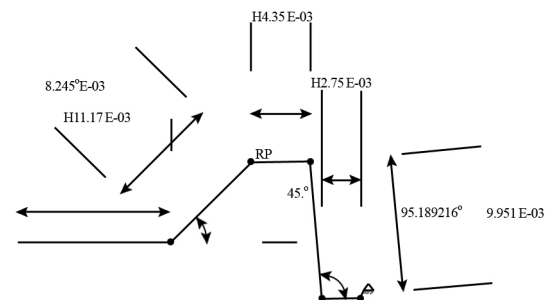


شکل (۱) قطعه متقارن محوری تولید شده با فرایند فورج [۵].

این قطعه مطابق شکل (۲) در نرم افزار ABAQUS به صورت متقارن محوری شبیه سازی شد. شکل هندسی قطعه کار و قالب مطابق شکلهای (۳) و (۴) است. شکل (۵) نشان دهنده نمای سه بعدی قطعه شبیه سازی شده است.



شکل (۲) مراحل مختلف جریان فلز در داخل قالب با استفاده از تکنیک اجزا محدود، ( $W$  = عرض پلیسه و  $T$  = ضخامت پلیسه).



شکل (۳) شکل هندسی قالب.

مقادیر پارامترهای مورد بررسی شامل نسبت اندازه ارتفاع به اندازه قطر قطعه کار  $A = \frac{H}{D}$ ، نسبت عرض به ضخامت پلیسه  $B = \frac{W}{T}$  و مقدار فاکتور اصطکاک  $m$  هستند که در جدول (۳) ذکر شده‌اند.

جدول (۳) مقادیر پارامترها.

$B$	$A$	$m$
۰/۵	۱	۰/۰۵
۱	۱/۲	۰/۱
۱/۵	۱/۳	۰/۱۵
۲	۱/۴	۰/۲
۲/۵	۱/۵	۰/۳
۳	۱/۶	۰/۳۵
۳/۵	۱/۷	۰/۴
۴	۱/۸	۰/۴۵
۴/۵	۱/۹	۰/۵۵
۵	۲	۰/۶۵

از کل حالت‌های ممکن برای تحلیل که از جدول (۳) به دست می‌آید و شامل  $1000 = (10 \times 10 \times 10)$  مورد است، ۱۲۰ مورد به صورت تصادفی توسط نرم افزار MATLAB انتخاب شد. این تحلیل دارای ۳ پارامتر ورودی (نسبت ابعاد پلیسه، نسبت ابعاد قطعه کار و فاکتور اصطکاک) و ۲ پارامتر خروجی (نیرو و درصد پر شدن قالب) است. در هر یک از این ۱۲۰ حالت، شکل هندسی قطعه کار اولیه بر اساس نسبت ابعادی آن تغییر کرده و مقدار فاکتور اصطکاک مربوطه به نرم افزار وارد شد. در لحظه‌ای که نسبت عرض به ضخامت زانده به نسبت مورد نظر رسید تغییر شکل متوقف می‌شود. پس از این مرحله حجم ماده درون قالب اندازه گیری شده و بازده حجمی که عبارت است از نسبت حجم ماده درون قالب به حجم اولیه، در هر حالت محاسبه شد. سپس نیروی فورج از نرم افزار استخراج گردید.

#### ۴- شبکه عصبی

شبکه‌های عصبی به صورت گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف نظیر کنترل، بهینه‌سازی، تشخیص الگو، فشرده‌سازی و طبقه‌بندی اطلاعات، پیش‌بینی آب و هوا، پردازش تصویر و

استفاده از روش المان‌بندی تطبیقی ALE می‌توان مسائل را سریعتر و دقیقتر تحلیل کرد. هنگام استفاده از این روش المانها می‌توانند مستقل از ماده حرکت کنند. در نتیجه پس از یک مقدار مشخص تغییر شکل، المان‌بندی مجدد انجام می‌شود و کیفیت المانها در حین انجام فرایند در حد مطلوبی باقی می‌ماند. برای اعتبار سنجی کار شبیه‌سازی این مقاله، نیروی فورج به دست آمده از نرم افزار ABAQUS با مقادیر نیروهای مرجع [۵] مقایسه شد. در جدول (۱) نیروهای فورج حاصل از دو روش کار تجربی و اجزا محدود نرم افزار ANSYS به همراه نیروی به دست آمده در این مقاله ارائه شده است. درصد خطای هر کدام از دو نیروی حاصل از نرم افزارهای ANSYS و ABAQUS نسبت به نیروی حاصل از کار تجربی نیز آورده شده است. مقایسه درصد خطای این دو نیرو با یکدیگر نشان می‌دهد که روش شبیه‌سازی در این مقاله قابل قبول است.

جدول (۱) مقایسه نیروی به دست آمده از تحلیل المان محدود ABAQUS با مقادیر مرجع [۵].

خطا % ABAQUS	خطا % ANSYS [۵]	ABAQUS (kN)	ANSYS [۵] (kN)	تجربی [۵] (kN)
+۱/۹۵	+۶/۷۵	۳۷۵/۹	۳۹۳/۶	۳۶۸/۷

#### ۳- بررسی پارامترهای فرایند فورجینگ

فرایند شبیه‌سازی با ABAQUS برای تحلیل پارامترهای مورد نظر انجام شد. تحلیل بر روی آلیاژ AI 2024T4 انجام گرفت که خواص مکانیکی آن در جدول (۲) آمده است [۶].

جدول (۲) خواص مکانیکی آلیاژ AI 2024T4.

۷۳/۸ GPa	مدول یانگ
۲۶۰ MPa	تنش تسلیم
۰/۳۳	نسبت پواسون
۲/۷۸ g/cc	چگالی
۶۹۰ MPa	K
۰/۱۶	n

میانگین مربعات خطا  $(MSE)^2$ ، کسر مطلق واریانس  $(R^2)^3$  و درصد ضریب واریانس  $(COV)^4$  برای بررسی صحت نتایج مورد استفاده قرار می‌گیرند.

خطا در طول آموزش با میانگین مربعات خطا مشخص می‌شود که به صورت رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (t_j - o_j)^2 \quad (1)$$

که در آن  $t$  مقدار هدف،  $o$  مقدار خروجی و  $n$  بیانگر تعداد خروجیهای شبکه عصبی است. برای افزایش دقت و یادگیری شبکه، مقادیر خروجی به شبکه عصبی در بازه صفر تا یک نرمالیزه شده‌اند. ورودی‌ها و خروجی‌های مورد نظر برای تست و آموزش شبکه به صورت ماتریس نشان داده شده و در رابطه (۲) و (۳) چیدمان شده‌اند.

$$Input = \begin{bmatrix} m_1 & A_1 & B_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ m_{12} & A_{12} & B_{12} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$Output = \begin{bmatrix} F_1 & V_1 \\ \vdots & \vdots \\ F_{12} & V_{12} \end{bmatrix} \quad (3)$$

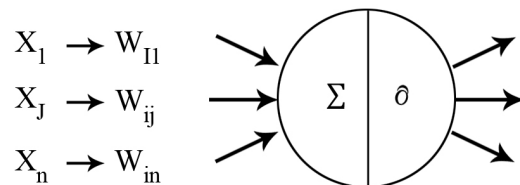
این مقادیر براساس نتایج مدل‌سازی فرایند فورجینگ به دست آمده است.

## ۵- شناسایی شبکه عصبی برای فرایند فورجینگ

### براساس پارامترهای ورودی و خروجی

شبکه‌های عصبی با پردازش روی داده‌های موجود، دانش یا قانون نهفته در ورای داده‌ها را شناسایی می‌کنند. در این مقاله با به کارگیری شبکه‌های عصبی، رابطه عملکرد فرایند فورجینگ براساس پارامترهای ورودی و خروجی شناسایی شده است. نرخ اصطکاک، نسبت اندازه ارتفاع به اندازه قطر قطعه کار و نسبت عرض به ضخامت پلیسه به عنوان ورودی‌های شبکه در نظر گرفته

صدا به کار برده می‌شوند. شبکه‌های عصبی برای غلبه بر محدودیت‌های روش‌های مرسوم در حل مسائل پیچیده آموزش داده می‌شوند. اصلی‌ترین جزء شبکه عصبی سلول نام دارد. اساساً سلول‌های بیولوژیکی با دریافت ورودیها از برخی منابع، آنها را از طرق مختلفی با یکدیگر ترکیب می‌نمایند و سپس با انجام عملیات غیرخطی بر روی نتایج، خروجی نهایی را ارائه می‌کنند. شبکه‌های عصبی غالباً شامل یک لایه ورودی، یک یا چند لایه میانی و یک لایه خروجی اند [۷]. هر ورودی در وزن مربوط به خودش ضرب می‌گردد. در ساده‌ترین حالت، ورودی‌ها و بایاس‌ها با یکدیگر جمع و سپس از یک تابع فعال‌سازی که برای تولید خروجی به کار برده می‌شود، عبور می‌نمایند. در شکل (۶) نحوه پردازش اطلاعات داخل یک سلول شبکه عصبی نمایش داده شده که در آن خروجی برای سلول  $i$ ام نشان داده شده است.



شکل (۶) پردازش اطلاعات در یک سلول شبکه عصبی.

شبکه‌های دارای بایاس رابطه بین ورودی‌ها و خروجی‌ها را بسیار راحت تر از شبکه‌های بدون بایاس به دست می‌آورند [۸]. توابع فعال‌سازی به طور کلی از روابط جبری خطی و غیرخطی تشکیل شده است [۹]. بهترین مرحله در شبکه‌های عصبی بخش آموزش شبکه است. انتخاب بهترین و سریع‌ترین الگوریتم آموزش برای حل مسائل مشکل، بسیار مهم است. رایج‌ترین الگوریتم آموزش، الگوریتم آموزشی پس انتشار خطا است. شبکه عصبی به کمک الگوریتم پس انتشار خطا از طریق تغییر وزن لایه‌های میانی آموزش می‌بیند و این تغییرات به عنوان مفروضات شبکه ذخیره می‌شوند. برخی از روشهای آماری مانند ریشه میانگین مربعات خطا  $(RMS)^1$ ،

۲ - Mean Square Error

۳ - Absolute Fraction of Variance

۴ - Coefficient of Variation in Percent

۱ - Root Mean Square

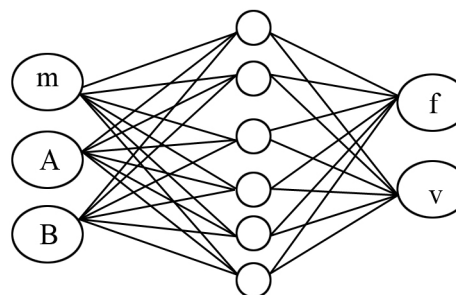
تعداد سلول این آموزش ۲۰ بار تکرار گردید. کیفیت آموزشی شبکه عصبی جهت گزینش بهترین ساختار برای آن براساس بررسی آماری نتایج آموزش شبکه حاصل می‌شود. در نهایت شبکه ای که مقدار میانگین مربعات خطای آن نسبت به سایر سلول‌ها کمتر بوده، به عنوان شبکه عصبی نهایی انتخاب شد. نتایج آماری مربوط به شبیه‌سازی فرایند فورجینگ در جدول (۴) نشان داده شده است. نتایج به‌دست آمده براساس نیروی فورج شبکه عصبی با چهار سلول در لایه پنهان را پیشنهاد می‌نماید و همچنین نتایج به‌دست آمده براساس درصد حجمی، شبکه عصبی با پنج سلول در لایه پنهان را پیشنهاد می‌نماید.

جدول (۴) بررسی آماری اثر تعداد سلولهای لایه پنهان برای F و V براساس مقادیر مورد استفاده جهت تست شبکه عصبی.

درصد حجمی	شبکه عصبی	نیروی فورج	شبکه عصبی	MSE
نورون	MSE	نورون	MSE	
۲	۱۶/۷۱۱۱۱	۲	۰/۰۲۵۲۵۵	
۳	۱۸/۲۰۷۶۴	۳	۰/۰۳۵۳۶۲	
۴	۱۶/۱۱۲۲۶	۴	۰/۰۱۸۴۷۱	
۵	۱۳/۰۵۹۴	۵	۰/۰۲۶۲۹۹	
۶	۱۳/۷۷۰۹۳	۶	۰/۰۳۰۶۵۶	
۷	۱۸/۳۸۶۲۷	۷	۰/۰۳۳۶۸	
۸	۲۰/۸۱۵۴۴	۸	۰/۰۳۷۲۷۵	
۹	۱۷/۸۰۹۸۵	۹	۰/۰۲۸۸۵۴	
۱۰	۲۲/۷۰۰۶۱	۱۰	۰/۰۴۸۱۵۲	
۱۱	۱۶/۳۳۵۵۹	۱۱	۰/۰۴۴۵۴۵	
۱۲	۲۲/۲۰۶۴۶	۱۲	۰/۰۵۱۰۸	
۱۳	۱۷/۴۱۱۵۳	۱۳	۰/۰۳۸۶۹۸	
۱۴	۱۷/۸۳۷۸۶	۱۴	۰/۰۴۸۲۰۴	
۱۵	۱۸/۸۷۷۴۷	۱۵	۰/۰۴۵۱۹۷	
۱۶	۲۵/۸۴۵۲۴	۱۶	۰/۰۳۰۰۴۹	
۱۷	۲۵/۱۲۵۲۷	۱۷	۰/۰۶۹۵۷	
۱۸	۲۱/۱۷۸۸	۱۸	۰/۰۵۸۱۰۵	
۱۹	۲۵/۷۷۹۴۵	۱۹	۰/۰۵۰۱۹۹	
۲۰	۲۷/۲۶۶۳۲	۲۰	۰/۰۷۱۲۹۸	

شده‌اند. همچنین درصد حجمی  $V$  و نیروی فورج  $F$  به‌عنوان خروجیهای شبکه عصبی در نظر گرفته شده‌اند. مقادیر مورد استفاده در این شبکه براساس نتایج مدل‌سازی فرایند فورجینگ به‌دست آمده‌اند. در این مقاله از دو شبکه عصبی استفاده شده است. یک شبکه برای پارامترهای ورودی و نیروی فورج و شبکه دیگر برای پارامترهای ورودی و درصد حجمی. برای شناسایی رابطه بین این پارامترها از شبکه عصبی پرسپترون دو لایه استفاده شده است. به کمک این مقادیر، امکان شناسایی اثر پارامترهای ورودی بر روی درصد حجمی و نیروی فورج فراهم می‌شود.

مطابق شکل (۷)، شبکه مورد استفاده دارای یک لایه ورودی، یک لایه خروجی و یک لایه میانی از توابع غیرخطی پیوسته و مشتق پذیر تانژانت سیگموئید است. در این تحقیق از الگوریتم پس انتشار خطای لونیبرگ-مارکوارت که از روشهای بهینه‌سازی مرتبه دوم مبتنی بر مشتقات مرتبه دوم تابع خطا می‌باشد، استفاده شده است [۱۰].



شکل (۷) ساختار آموزش شبکه عصبی با یک لایه میانی.

کارایی شبکه‌های عصبی را می‌توان به کمک میانگین مربعات خطا (MSE) مورد ارزیابی قرار داد.

## ۶- نتایج شبیه‌سازی

**۷- بهینه‌سازی به کمک الگوریتم ژنتیک**  
الگوریتم‌های ژنتیک، الگوریتم‌های جستجوگری هستند که بر پایه مکانیزم ژنتیک طبیعی کار می‌کنند. این الگوریتم‌ها که جزو روش‌های ابتکاری برای بهینه‌سازی هستند با استفاده از بهترین نتایج، نسل جدیدی از جوابهای بهینه را تولید می‌کنند. در هر نسل، مجموعه‌ای از رشته‌های جدید از اجزای نسل قبل

برای آموزش و تست شبکه عصبی از ۱۲۰ حالت استفاده شد. از این تعداد، ۸۴ دسته برای آموزش شبکه و ۳۶ دسته باقیمانده جهت تست شبکه استفاده شد. برای شناسایی بهترین ساختار برای شبکه عصبی تعداد سلول‌های لایه پنهان از ۲ تا ۲۰ سلول تغییر داده شد. سپس شبکه عصبی با تعداد سلول‌های متفاوت در لایه پنهان، جداگانه آموزش داده شد و برای هر

برای تعیین بیشینه  $V$  برای فرایند فورجینگ، تابع هدف الگوریتم ژنتیک برحسب درصد حجمی تعریف می‌شود. در این حالت تابع هدف به صورت زیر است:

$$Cost Function = MAX(V)$$

باید در نظر داشت که در این حالت بیشترین مقدار برای درصد حجمی به دست می‌آید و این حالت نشان دهنده حداکثر پر شدن فضای داخل قالب است.

همچنین برای تعیین کمترین مقدار نیروی فورج، تابع هدف الگوریتم ژنتیک (برای شبکه عصبی نیروی فورج) برحسب نیروی فورج تعریف می‌شود. در این حالت تابع هدف به صورت زیر است:

$$Cost Function = MIN(F)$$

در این حالت کمترین مقدار برای نیروی فورج به دست می‌آید که به این معناست که تنش‌های عمودی وارد بر قالب دارای کمترین مقدار است.

مقادیر به دست آمده از الگوریتم ژنتیک به همراه مقادیر به دست آمده از کار تجربی مقصودی و همکارانش [۱] در جدول (۶) ارائه شده است. الگوریتم ژنتیک تخمین قابل قبولی برای پارامترهای مؤثر در فرایند فورج ارائه می‌کند به طوری که تطابق و نزدیکی خوبی بین نتایج این الگوریتم و روش تجربی وجود دارد.

جدول (۶) مقادیر به دست آمده از الگوریتم ژنتیک و کار تجربی

مرجع [۱].

$B$	$A$	$m$	
۱/۸۴۵	۱/۵۶۸	۰/۱۸۷۵	مقاله حاضر
۲	۱/۵	۰/۳	کار تجربی
۷/۸ %	۴/۵ %	۳۷/۵ %	مقدار خطا

مقدار فاکتور اصطکاک پیشنهادی به روش تجربی، در تمامی آزمایشهای مقصودی و همکارانش ثابت بوده است و تاثیر تغییرات آن را در فرایند فورج مورد بررسی قرار نداده‌اند. در نتیجه مقدار فاکتور اصطکاک به دست آمده از الگوریتم ژنتیک با مقدار فاکتور اصطکاک پیشنهادی به روش تجربی

ایجاد می‌شود و نسل جدید به دقت مورد بررسی قرار می‌گیرد. این الگوریتم تا حد قابل توجهی از اطلاعات قبلی استفاده می‌کند تا در مرحله جدید جستجو نقاطی را انتخاب کند که به نتیجه بهتری منجر شود. الگوریتم ژنتیک توسط جان هلند، همکاران و دانشجویانش در دانشگاه میشیگان توسعه یافت [۸]. الگوریتم ژنتیک ساده از اجزای زیر تشکیل شده است [۹]:

- مکانیزم رمزگذاری و رمزگشایی دانسته‌ها به صورت رشته‌های دودویی
- ایجاد جمعیتی اولیه از رشته‌های دودویی
- تعیین تابع صلاحیت
- مکانیزم انتخاب
- عملکردهای ژنتیکی (ترکیب و جهش)
- پارامترهای کنترلی

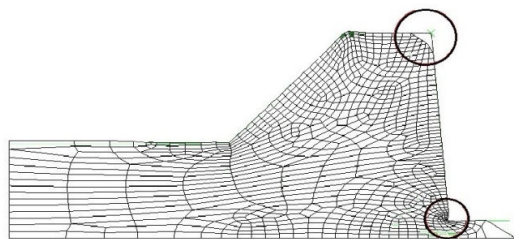
## ۸- نتایج بهینه سازی

نهایتاً شبکه‌های عصبی آموزش داده شده در یک الگوریتم ژنتیک چند هدفی به کار برده شدند. بهینه سازی چند هدفی به معنای یافتن یک مجموعه بردار از متغیرهای طراحی است که قیود را برآورده ساخته و بردار هدف را که نشاندهنده مقادیر توابع هدف مسئله است، بهینه کنند. در این مسائل هدف یافتن جواب قابل قبولی است که مقادیر کلیه توابع هدف را که اغلب در تعارض با یکدیگر هستند، به طراح می‌دهد. بعد از مشخص شدن این مجموعه جواب که مجموعه جواب پارتو نامیده می‌شود، طراح می‌تواند تصمیم بگیرد که کدام یک از بردارهای طراحی برای مسئله مناسب است. در این تحقیق مبنای کار به کارگیری الگوریتم ژنتیک چند هدفی قرار گرفت.

الگوریتم ژنتیک استفاده شده در این مقاله دارای مشخصات ذکر شده در جدول (۵) است.

جدول (۵) مشخصات الگوریتم ژنتیک.

۱۰۰	جمعیت اولیه
۲۰۰	تعداد نسله‌ها
Use conraied dependant default	جهش
intermediata	Crossover
NSGA-II (gamultiobj)	حل کننده (Solver)



شکل (۱۱) وضعیت نهایی فضای داخلی قالب مدل شبیه‌سازی شده با مقادیر کار تجربی. (دایره‌های موجود در شکل نشان دهنده فضای خالی داخل قالب‌اند).

نتایج ذکر شده در این بخش بر اساس شبیه‌سازی نرم‌افزار ABAQUS است و مقدار نیروی فورج نیز از این نرم‌افزار استخراج شده است. مقدار خطای این نرم‌افزار نسبت به کار تجربی مطابق جدول (۱) برابر با  $1/95 +$  است.

## ۹- نتیجه‌گیری

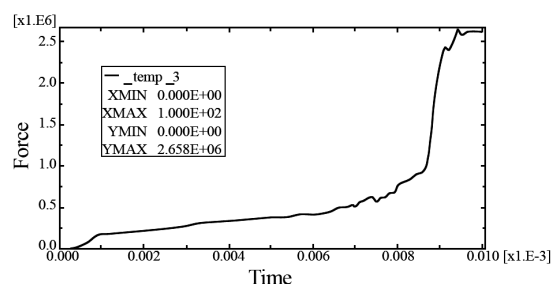
در این مقاله، در طراحی فرایند فورجینگ در قالبهای بسته غیر دقیق برای قطعات متقارن محوری با آلیاژ آلومینیوم، سه پارامتر نسبت عرض به ضخامت پلیسه، نسبت ارتفاع به قطر قطعه کار و فاکتور اصطکاک مورد بررسی قرار گرفت. با کنترل سه پارامتر مذکور، امکان کاهش مقدار دور ریز مواد مصرفی، کاهش نیروی فورج و افزایش درصد پرشدن قالب فراهم می‌شود.

تحلیل‌هایی که برای طراحی بهینه ابعاد پلیسه، ابعاد قطعه کار و مقدار اصطکاک صورت گرفت، شامل شبیه‌سازی دینامیکی توسط نرم‌افزار ABAQUS به صورت تقارن محوری و آنالیز عددی المان محدود توسط این نرم‌افزار است. برای المان‌بندی قطعه کار از المانهای چهار گره‌ای استفاده شد. چون قطعه کار در طول فرایند تغییر شکل زیادی دارد، در قسمتهایی از قطعه کار که دچار تغییر شکل زیاد شده، از المانهای ریزتر استفاده شد و همچنین روش المان بندی مجدد برای تحلیل دقیقتر مورد استفاده قرار گرفت.

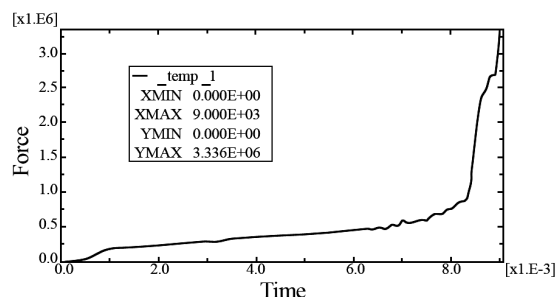
برای اعتبار سنجی کار شبیه‌سازی این مقاله، نیروی فورج به دست آمده از روش المان محدود نرم‌افزار ABAQUS با

اختلاف قابل توجهی دارد، زیرا در الگوریتم ژنتیک این پارامتر بهینه شده است.

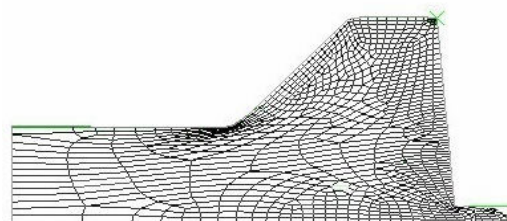
برای مقایسه مقادیر به دست آمده از الگوریتم ژنتیک با مقادیر به دست آمده از کار تجربی مقصودی و همکارانش، فرایند فورج قطعه نمونه با مقادیر مذکور شبیه‌سازی شد. مقایسه مقادیر نیروی فورج مطابق شکل‌های (۸) و (۹) و مقدار پر شدن فضای داخلی قالب مطابق شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نشان می‌دهد که مقادیر پیش‌بینی شده در الگوریتم ژنتیک بهینه‌تر از مقادیر کار تجربی مرجع [۱] است.



شکل (۸) نیروی فورج به دست آمده از مدل شبیه‌سازی شده با مقادیر الگوریتم ژنتیک.



شکل (۹) نیروی فورج به دست آمده از مدل شبیه‌سازی شده با مقادیر کار تجربی.



شکل (۱۰) وضعیت نهایی فضای داخلی قالب مدل شبیه‌سازی شده با مقادیر الگوریتم ژنتیک.



$B$	نسبت ابعادی پلیسه
$MSE$	میانگین مربعات خطا
$m$	فاکتور اصطکاک

### مراجع

[۱] اسماعیل مقصودی، غلامحسین دانشی، عباس اکبرزاده، طراحی بهینه شکل و ابعاد هندسی قالب فورج به روش شبیه سازی فیزیکی، چهاردهمین کنفرانس سالانه (بین المللی) مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اردیبهشت ۱۳۸۵.

[2] Sheridan S. A., Forging Design HandBook, American Society For Metals, MetaPark, Ohio, 1972.

[3] Ranatunga V. R., Gunasekera J. S., Use of UBET For Design Of Flash Gap in Closed Die Forging, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 111, 2001, pp. 107-112.

[4] Tavangar R., Taheri A. K. *Prediction of Optimum Flash Dimension in Axisymmetric Closed Die Forging*, Second. Mech. Int. Conf., Shiraz University, May 1996.

[5] Saniee F., Jaafari M., Analytical, numerical and experimental analyses of the close die forging, *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, pp. 334-340.

[6] www.matweb.com

[7] Rumelhart D. E., Hinton G. E., Williams R.J., Learning internal representation by error propagation, *Parallel Distributed Processing*, Vol. 1, 1986, pp. 318-362 .

[8] Holland J. H., *Genetic Algorithm Scientific American*, ASM Intl, July 1992, pp 44-50.

[10] Gen M., Cheng R., *Genetic Algorithm and Engineering Design*, ASM Intl, 1997.

[9] Hagan M. T., Menhaj M., *Training feed forward networks with the marquardt algorithm*, IEEE Transactions on Neural Network, 1994, pp. 989-993.

نیروی حاصل از کار تجربی مقایسه شد و درصد خطای این نرم افزار نسبت به کار تجربی برابر با  $1/95+$  می باشد که نشان می دهد کار شبیه سازی این مقاله صحیح است.

برای تعیین روابط بین ورودیهای نرم افزار المان محدود (مثل فاکتور اصطکاک، نسبت ابعادی قطعه کار و نسبت ابعادی پلیسه) و خروجیهای نرم افزار المان محدود (مثل نیرو و درصد پر شدن قالب)، از دو شبکه عصبی استفاده گردید.

نتایج آماری به دست آمده براساس مقدار میانگین مربعات خطا، شبکه عصبی با چهار سلول در لایه پنهان را برای پارامترهای ورودی و نیروی فورج و همچنین شبکه عصبی با پنج سلول در لایه پنهان را برای پارامترهای ورودی و درصد حجمی پیشنهاد نمود. سپس، از الگوریتم ژنتیک دو هدفی برای انتخاب مقادیر بهینه ورودی جهت به دست آوردن مقادیر خروجی مناسب استفاده شد.

مقایسه مقادیر به دست آمده از الگوریتم ژنتیک با مقادیر به دست آمده از کار تجربی نشان می دهد که الگوریتم ژنتیک تخمین قابل قبولی برای پارامترهای مؤثر در فرایند فورج ارائه می کند به طوری که تطابق و نزدیکی خوبی بین نتایج این الگوریتم و روش تجربی وجود دارد. با توجه به نتایج، پارامترهای بهینه برای پر شدن فضای داخلی قالب به طور کامل با حداقل نیرو در فرایند فورجینگ با قالبهای بسته غیر دقیق برای قطعات متقارن محوری ارائه شد.

### فهرست علائم

$D$	قطر قطعه کار
$H$	ارتفاع قطعه کار
$W$	عرض پلیسه
$T$	ضخامت پلیسه
$W_1$	وزن سلولهای میانی
$V$	درصد حجمی قالب
$F$	نیروی فورج
$A$	نسبت ابعادی قطعه کار

