

بهینه‌سازی چند هدفی شکل‌دهی انفجاری یک فنجان مربعی از جنس برنج

ابوالفضل خلخالی^۱، مهران غریبی^۲

^۱ دانشیار، دانشکده خودرو، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

^۲ کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، تاکستان، ایران

چکیده

در این مقاله بهینه‌سازی فرآیند شکل‌دهی انفجاری باهدف جلوگیری از گسیختگی در نمونه انجام می‌شود. برای این منظور انتخاب صحیح پارامترهایی نظیر مقدار فشار حاصل از انفجار، ضخامت ورق و شعاع ورودی قالب به‌گونه‌ای باید باشد تا از پارگی ورق در حین شکل‌گیری جلوگیری کند. از این‌رو کرنش شعاعی و ضخامتی در مسیر ۴۵ درجه و کرنش شعاعی و ضخامتی در مسیر ۰ درجه به عنوان توابع هدف در نظر گرفته می‌شوند. متغیرهای طراحی نیز عبارت‌اند از ضخامت ورق (t)، شعاع ورودی قالب (r) و مقدار فشار حاصل از انفجار (p). برای تعداد مشخصی از نقاط طراحی، مقادیر توابع هدف محاسبه شده‌اند. برای محاسبه توابع هدف، یک مدل عددی در نرم‌افزار Abaqus برای فرآیند شکل‌دهی انفجاری توسعه داده شده است. سپس برای محاسبه رابطه ریاضی توابع هدف، از شبکه عصبی GMDH استفاده شده است. از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفی NSGAII برای تعیین نقاط بهینه طراحی بهره گرفته شده است. در نهایت بعد از اتمام فرآیند بهینه‌سازی منحنی پارتو نمایش داده شده و سپس با استفاده از روش TOPSIS و NIP دونقطه بهینه (مصلحه) به دست آمده‌اند.

کلمات کلیدی: شکل‌دهی انفجاری؛ شبکه‌های عصبی نوع GMDH؛ بهینه‌سازی چند هدفی؛ الگوریتم ژنتیک؛ مرتب‌سازی نقاط غیر برتر (NSGAII)

Multi-objective optimization of explosive forming square cup from brass

A. Khalkhali¹, M. Gharibi²

¹ School of automotive engineering, Iran university of science and technology, Tehran, Iran

² Faculty of mechanical engineering, Islamic azad university of Takestan, Iran

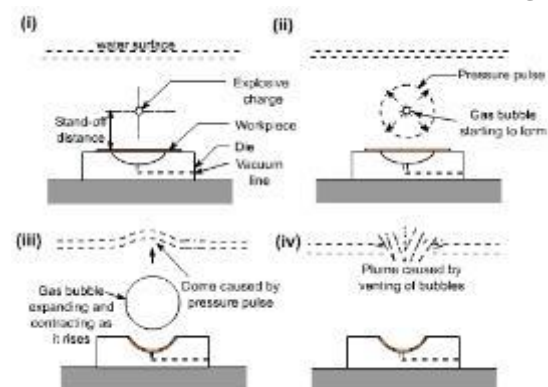
Abstract

In this paper explosive forming process optimization with the aim to prevent failures in the sample. To select the correct parameters such as sheet metal thickness, die inlet radius and explosion pressure must be a way to prevent failure of the plate during formation. Therefore, the radial and thickness strain in the direction of 45° and radial and thickness in the direction of 0° degrees is considered as objective functions. Design variables include sheet metal thickness (t), die inlet radius (r) and explosion pressure (p). Designed for a certain number of points calculated objective functions values. To calculate the objective functions, a numerical model in Abaqus software has been developed for explosive forming process. Then to calculate the mathematical relationship of the objective functions has been used GMDH neural network is used. Multi-objective optimization algorithm to determine the optimal design was used NSGAII. Finally, after completion of the optimization process Pareto curve shown and then using TOPSIS and NIP two optimum points (compromise) has been achieved.

Keywords: Explosive forming; GMDH-type neural network; Multi-objective optimization; Genetic algorithms; Non-dominant points sorting (NSGAII)

۱- مقدمه

در صنعت شکل‌دهی فلزات، بیشترین توسعه در سال‌های اخیر حاصل شده که با مقبولیت و استفاده بیشتری از اصول شکل‌دهی فلزات همراه بوده است. نتایج کارهای تجربی محققین در زمینه تغییر شکل سریع دیافراگم نازک منجر به گسترش دسته‌ای از فرایندهای شکل‌دهی موسوم به شکل‌دهی با سرعت بالا شده است [۱ و ۱۱ و ۱۲]. شکل‌دهی انفجاری قادر به تولید قطعات بزرگی است که تولید آن‌ها به روش‌های متداول غیرعملی است. در شکل ۱ شماتیک فرآیند شکل‌دهی انفجاری نشان داده شده است. مهم‌ترین اجزای مورد استفاده در روش شکل‌دهی انفجاری عبارت‌اند از: مواد منفجره، قالب به همراه سیستم نگهدارنده قطعه کار، ماده انتقال‌دهنده انرژی، مدار انفجار و سیستم خلأ. استفاده از تجهیزات جانبی دیگر، به منظور افزایش توانمندی‌ها و نیز بهبود شرایط ایمنی صورت می‌گیرد.



شکل ۱- شماتیک فرآیند شکل‌دهی انفجاری [۴]

شکل‌دهی انفجاری ذاتاً یک روش دینامیکی است و شکل‌دهی به وسیله در معرض قرار گرفتن سطوح فلز در برابر فشار امواج ناشی از انفجار انجام می‌شود. اما اعمال مستقیم فشار امواج بر روی سطح فلز باعث بالا رفتن نرخ تنش کرنش شده و پروفیل غیرقابل قبولی ارائه می‌دهد و ممکن است به پارگی ناگهانی فلز منجر شود. بنابراین برای بهبود محدوده شکل‌پذیری یک درپوش از جنس مواد نرم بین مواد منفجره که با ورق در تماس است جاسازی می‌شود، در نتیجه بجای اینکه امواج انفجار مستقیماً با ورق مواجه شوند با درپوش در تماس هستند. بسته به ضخامت ورق و درپوش و زاویه پخ درپوش پروسه شکل‌دهی به آرامی انجام می‌شود. به این دلیل

درپوش از مواد نرم ساخته می‌شود که ظرفیت جذب انرژی آن پایین بوده و این خود اجازه می‌دهد که انتقال انرژی به ورق با نرخ آرامی انجام پذیرد.

تا کنون تحقیقات متعددی به صورت تجربی و عددی در زمینه شکل‌دهی انفجاری انجام شده است. در تحقیقات تجربی آقای وب و همکارانشان [۱] فرآیند شکل‌دهی مربوط به شکل دادن یک ورق از جنس برنج به فرم فنجان در قالب مورد استفاده، می‌باشد. در آن تحقیق اثر فشار حاصل از انفجار، ضخامت ورق برنجی و شعاع ورودی قالب بر میزان توزیع کرنش حداکثر شعاعی $\epsilon_r = \ln \frac{r}{r_0}$ و کرنش حداکثر در جهت ضخامت ورق $\epsilon_t = \ln \frac{t}{t_0}$ مورد بررسی قرار گرفته است. روش دسته‌بندی گروهی داده‌های عددی (Group Method of Data Handling) یک فن‌آوری آموزش آماری شبکه‌ای است که حاصل تحقیقات سیبرنیتیکی (Cybernetic) شامل سیستم‌های خود سامانده، تئوری اطلاعات، کنترل و علم کامپیوتر می‌باشد. GMDH یک روش مدل‌سازی آماری کلاسیک نیست، این روش یک فرآیند منظم برای غلبه بر ضعف‌های آماری و شبکه‌های عصبی می‌باشد. بهینه‌یابی پارامترها در سیستم‌های مهندسی مختلف که بر پایه الگوریتم ژنتیک (GA) و یا به طور کل الگوریتم‌های تکاملی (EA) استوار است، یکی از زمینه‌های نوپا و دارای پتانسیل زیاد برای تحقیقات می‌باشد. در اکثر مسائل بهینه‌سازی مهندسی بیش از یک تابع هدف برای طراحان از اهمیت برخوردار است و معمولاً چند تابع هدف که در تضاد باهم دیگر هستند باید به طور همزمان توسط طراح بهینه شوند. الگوریتم ژنتیک در حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفی نیز بسیار خوب عمل می‌کند. دکتر K. Deb در سال‌های اخیر الگوریتمی را بر پایه الگوریتم ژنتیک برای حل مسائل چند هدفی بنیان گذاشت. این روش که مرتب‌سازی نقاط غیر برتر (NSGA) نامیده می‌شود نسبت به الگوریتم‌های قبلی در زمینه بهینه‌سازی چند هدفی از قدرت بالاتری برخوردار است. به دلیل مشکلاتی که این روش در حل مسائل بهینه‌سازی داشت، الگوریتم اصلاح شده آن چند سال بعد توسط Deb بنام "NSGAII" معرفی شد که دریافتن مجموعه جواب‌های غیر برتر سریع‌تر و بهتر عمل می‌کند. در بهینه‌سازی چند هدفی همان‌گونه که اشاره گردید چند تابع هدف به طور همزمان بهینه می‌گردند. در این گونه مسائل برخلاف مسائل تک هدفی که تنها یک نقطه اکسترمم برای مسئله وجود دارد، مجموعه‌ای

نظر گرفته شده است .

به محض انفجار مواد منفجره این مواد منجر به تولید گازهایی با فشار و دمای بسیار بالا می شوند. فشار واقعی وارد بر سطوح شکل پذیر بوسیله رابطه زیر بیان می شود:

$$P(t) = 2P_0 \exp\left[\frac{1}{\theta}\left(t - \frac{Q}{v_w}\right)\right] - \rho_c v_p$$

$$P(t) = 2P_0 \exp\left[\frac{1}{\theta}\left(t - \frac{Q}{v_w}\right)\right] - \rho_c v_p$$

هرچند که با استفاده از معادله فوق می توان بار فشاری مورد نیاز شبیه سازی المان محدود را به طور دقیق محاسبه کرد. می توان از معادله زیر به طور رضایت بخش و قابل قبولی بهره برداری نمود:

$$P(t) = 2P_0 \exp\left(-\frac{t}{\theta}\right) \quad (1)$$

$$P(t) = 2P_0 \exp\left(-\frac{t}{\theta}\right) \quad (2)$$

که در آن:

$$P_0 = A \left[\frac{w^{1/3}}{h}\right]^\alpha \quad \theta = k_\theta w^{1/3} \left[\frac{w^{1/3}}{h}\right]^{M_\theta} \quad (3)$$

$$P_0 = A \left[\frac{w^{1/3}}{h}\right]^\alpha \quad \theta = k_\theta w^{1/3} \left[\frac{w^{1/3}}{h}\right]^{M_\theta} \quad (4)$$

شکل 2 مدل المان محدود اجزای قالب و نمونه را نشان می دهد. در جدول 1 مقادیر توابع هدف که عبارتند از ϵ_1 ، کرنش شعاعی در مسیر ۴۵ درجه و ϵ_2 ، کرنش ضخامتی در سیر ۴۵ درجه و ϵ_3 ، کرنش شعاعی در مسیر ۰ درجه و ϵ_4 ، کرنش ضخامتی در مسیر ۰ درجه پنج ساختار مختلف شبکه با تعداد سلول های متفاوت آمده است و در شکل ۳ نمودار استقلال نتایج بررسی شده است.

از بردارهای طراحی به عنوان جواب به دست می آیند که اصطلاحاً نقاط Pareto خوانده می شوند و طراح مسئله بر اساس نیاز خود یکی از این نقاط را به عنوان جواب بهینه برمیگزیند. هدف اصلی این مقاله انتخاب بهینه پارامترهای فشار حاصل از انفجار، ضخامت ورق و شعاع ورودی قالب به گونه ای که از پارگی ورق در حین شکل دهی انفجاری یک فنجان مربعی از جنس برنج جلوگیری شود. از این رو کرنش شعاعی و کرنش ضخامتی در مسیر ۴۵ درجه و کرنش شعاعی و کرنش ضخامتی در مسیر ۰ درجه به عنوان توابع هدف در نظر گرفته می شود. متغیرهای طراحی نیز عبارتند از ضخامت ورق (t)، شعاع ورودی قالب (r) و مقدار فشار حاصل از انفجار (p). با استفاده از تکنیک طراحی آزمایش برای تعداد مشخصی از نقاط طراحی مقادیر توابع هدف محاسبه شده اند. برای محاسبه توابع هدف یک مدل عددی در نرم افزار Abaqus برای فرآیند شکل دهی انفجاری توسعه داده شده است. سپس برای محاسبه رابطه ریاضی توابع هدف از شبکه عصبی GMDH استفاده شده است. از الگوریتم بهینه سازی چندهدفی NSGAII برای تعیین نقاط بهینه طراحی بهره گرفته شده است و بعد از اتمام فرآیند بهینه سازی منحنی پارتو نمایش داده شده و در نهایت با استفاده از روش TOPSIS و NIP دو نقطه بهینه (مصالحه) به دست آمده اند.

۲- مدل سازی عددی

مدل مورد مطالعه دارای تقارن دوشعوره بوده به همین منظور فقط یک چهارم از هندسه مدل برای انجام آنالیزهای مورد نظر نیاز است

قالب و ورق گیر به صورت کامل مقید شده اند. ضریب اصطکاک بکار رفته برای حرکت نسبی بین ورق و قالب برابر 0.05 [۱] می باشد. هندسه و مواد و محدودیت های این مقاله مطابق کار آقای وب و همکارانش در سال ۲۰۰۵ [۱] در نظر گرفته شده است. برنج به صورت یک ماده الاستیک خطی و با سخت شوندگی غیرخطی ایزوتروپیک تعریف شده است.

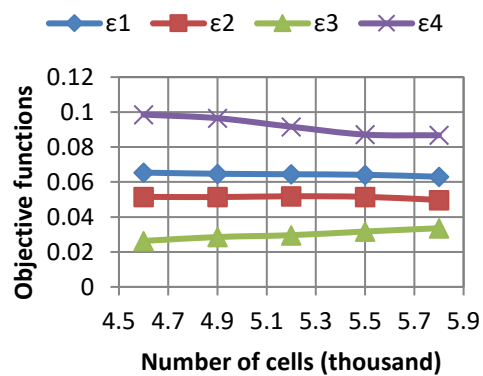
همچنین در این شبیه سازی درپوش سربی به صورت یک ماده الاستیک خطی و با سخت شوندگی غیرخطی ایزوتروپیک تعریف شده است.

مجموعه قالب بکار رفته در فرآیند شبیه سازی شکل دهی (قالب-محفظه قالب-نگهدارنده ورق) از جنس فولاد در

جدول 1- بررسی مقادیر توابع هدف در ساختارهای

شبکه‌بندی مختلف

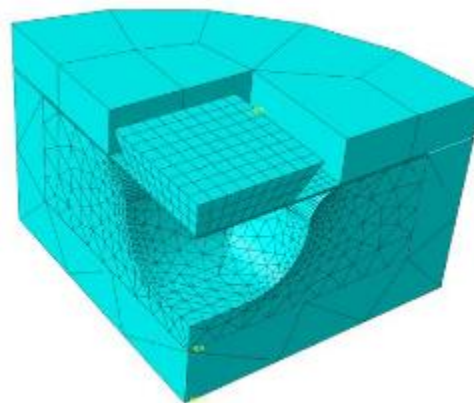
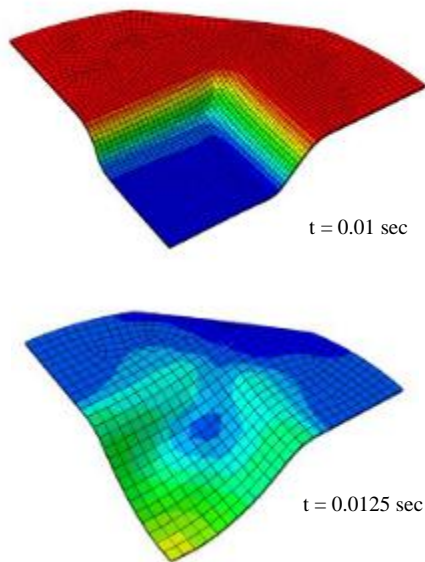
شماره ساختار	تعداد سلول‌ها (هزار)	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4
1	4.6	0.065388	0.051511	0.026289	0.098564
2	4.9	0.064719	0.051391	0.028546	0.096514
3	5.2	0.064450	0.051855	0.029600	0.091627
4	5.5	0.064136	0.051544	0.031696	0.087125
5	5.8	0.06301	0.04973	0.03357	0.08675



شکل 3- نمودار بررسی استقلال نتایج از ساختار شبکه

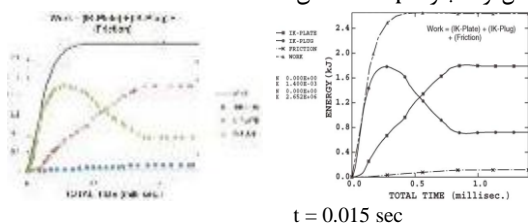
۲-۱- خروجی شبیه‌سازی المان محدود

مراحل مختلف پروسه برای نمونه با ضخامت 0.0012192 m و شعاع ورودی قالب 0.0127 m و مقدار فشار حاصل از انفجار 7.5gpa در شکل شماره 4 نشان داده شده است.



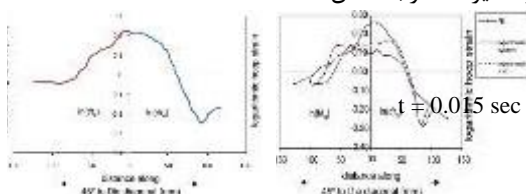
شکل 2- مدل المان محدود اجزای قالب و نمونه

در شکل ۷ نمودار انرژی برای درپوش تمام مدل با مقدار فشار حاصل از انفجار ۷.۵ Gpa نشان داده شده است.



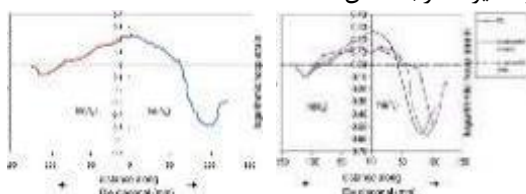
شکل ۷- نتایج شبیه‌سازی انرژی تمام مدل الف) مرجع [۱] ب) این مقاله

در شکل ۸ نمودارهای کرنش شعاعی و ضخامتی برای ورق در مسیر ۴۵ درجه نشان داده شده‌اند:



شکل ۸- نتایج شبیه‌سازی توزیع کرنش حداکثر شعاعی و ضخامتی ورق در مسیر ۴۵ درجه الف) مرجع [۱] ب) این مقاله

در شکل ۹ نمودارهای کرنش شعاعی و ضخامتی برای ورق در مسیر ۰ درجه نشان داده شده‌اند:

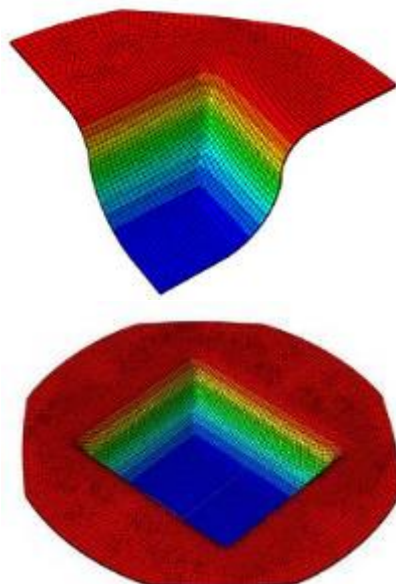


شکل ۹- نتایج شبیه‌سازی توزیع کرنش حداکثر شعاعی و ضخامتی ورق در مسیر ۰ درجه الف) مرجع [۱] ب) این مقاله

مقایسه‌ی نمودارهای انرژی و کرنش با نمودارهای انرژی و کرنش مرجع [۱] در شکل‌های ۵ تا ۹ بیانگر دقت خوب شبیه‌سازی انجام شده در این مقاله است.

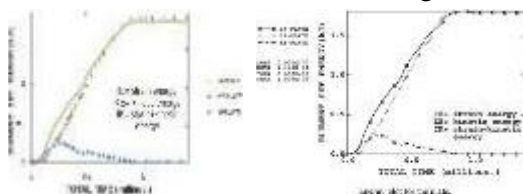
۳- مدل‌سازی با استفاده از GEvoM

برای انجام مدل‌سازی با استفاده از شبکه عصبی GMDH از نتایج ۴۰ شبیه‌سازی اجزاء محدود مختلف که مطابق با قسمت ۲ انجام شده است، استفاده می‌شود. نتایج برخی از



شکل ۴- شکل تغییر یافته ورق با ضخامت ۰.۰۰۱۲۱۹۲ m و شعاع ورودی قالب ۰.۰۱۲۷ m و مقدار فشار حاصل از انفجار ۷.۵ gpa در مراحل مختلف پروسه شکل‌دهی

در شکل ۵ نمودار انرژی برای ورق با ضخامت ۰.۰۰۱۲۱۹۲ m و شعاع ورودی قالب ۰.۰۱۲۷ m و مقدار فشار حاصل از انفجار ۷.۵ Gpa نشان داده شده است.

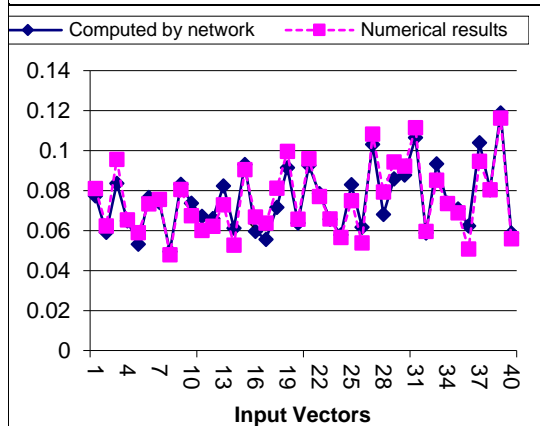
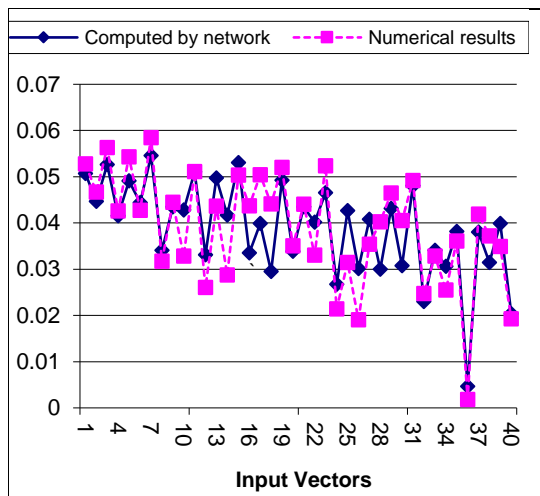


شکل ۵- نتایج شبیه‌سازی انرژی ورق الف) مرجع [۱] ب) این مقاله

در شکل ۶ نمودار انرژی برای درپوش سربی با مقدار فشار حاصل از انفجار ۷.۵ Gpa نشان داده شده است.



شکل ۶- نتایج شبیه‌سازی انرژی درپوش سربی الف) مرجع [۱] ب) این مقاله

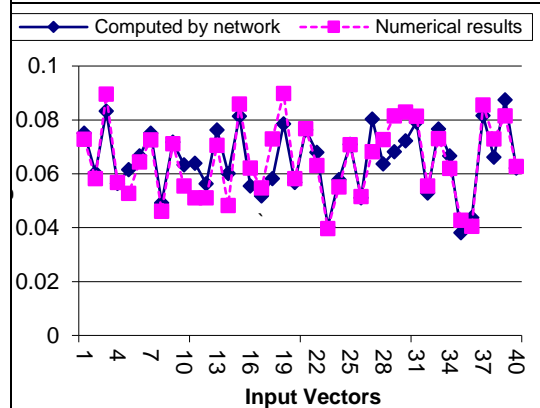
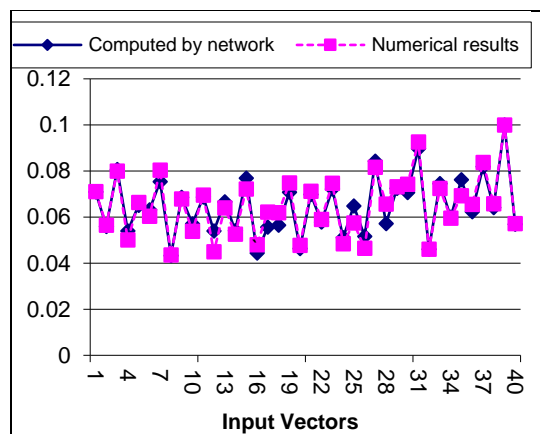


شکل 10 - نمودار نتایج عددی و محاسبه شده توسط شبکه عصبی برای الف) کرنش شعاعی در مسیر ۴۵ درجه (ϵ_1) ب) کرنش ضخامتی در مسیر ۴۵ درجه (ϵ_2) ج) کرنش شعاعی در مسیر ۰ درجه (ϵ_3) د) کرنش ضخامتی در مسیر ۰ درجه (ϵ_4)

جدول 2- نتایج برخی از شبیه سازی ها با استفاده از شبکه عصبی GMDH

Nu m	t	r	p	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4
1	0.0	0.0	87	0.0	0.0	0.0	0.0
	01	15	83	71	72	52	81
	79	87	33	04	77	75	02
	8	5	33				
			33				
3	0.0	0.0	10	0.0	0.0	0.0	0.0
	01	11	46	79	89	56	95
			11	99	62	26	73

شبیه سازی ها در جدول 2 ارائه شده است. کرنش شعاعی در مسیر ۴۵ درجه (ϵ_1)، کرنش ضخامتی در مسیر ۴۵ درجه (ϵ_2)، کرنش شعاعی در مسیر ۰ درجه (ϵ_3) و کرنش ضخامتی در مسیر ۰ درجه (ϵ_4) به عنوان خروجی و ضخامت ورق (t)، شعاع ورودی قالب (r) و مقدار فشار حاصل از انفجار (p) به عنوان ورودی در نظر گرفته می شوند. برای به دست آوردن رابطه بین ورودی ها و خروجی ها و ساختار شبکه عصبی از نرم افزار GEvoM استفاده شده است. ساختار شبکه عصبی با استفاده از الگوریتم ژنتیک طراحی شده و در این روش تعداد جمعیت اولیه معادل ۲۰، احتمال تلفیق برابر ۰.۷، احتمال جهش برابر ۰.۰۷ و ۵۰۰ بار تکرار در نظر گرفته شده است. شکل 10 نمودار نتایج عددی و محاسبه شده توسط شبکه عصبی را برای هر یک از توابع هدف نشان می دهد.



			12 3				
30	0.0 00 91 4	0.0 16 47 0	10 36 79 01 23 5	0.0 74 35	0.0 82 96	0.0 40 52	0.0 92 33
32	0.0 00 85 3	0.0 25 10 2	53 34 56 79 01	0.0 46 09	0.0 55 43	0.0 24 75	0.0 59 60
35	0.0 00 76 2	0.0 10 81 5	44 95 67 90 12	0.0 69 34	0.0 42 80	0.0 36 03	0.0 68 85
37	0.0 00 70 1	0.0 13 19 6	84 10 49 38 27	0.0 83 67	0.0 85 54	0.0 41 87	0.0 94 69
40	0.0 00 61 0	0.0 23 91 2	75 71 60 49 38	0.0 57 20	0.0 62 69	0.0 35 49	0.0 55 98

۴- بهینه‌سازی چند هدفی

آن‌چنان‌که از نتایج عنوان‌شده ضخامت ورق نمونه، شعاع ورودی قالب و مقدار فشار حاصل از انفجار بر عملکرد فرآیند شکل‌دهی انفجاری تأثیرگذار خواهد بود. درواقع نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی این امر را به‌خوبی نشان می‌دهد. در این قسمت با در نظر گرفتن ضخامت ورق، شعاع ورودی قالب و مقدار فشار حاصل از انفجار به‌عنوان متغیرهای طراحی و کرنش شعاعی در مسیر ۴۵ درجه، کرنش ضخامتی در مسیر ۴۵ درجه، کرنش شعاعی در مسیر ۰ درجه و کرنش ضخامتی در مسیر ۰ درجه به‌عنوان توابع هدف، با استفاده از الگوریتم اصلاح‌شده NSGAI بهینه‌سازی چند هدفی شکل‌دهی انفجاری انجام‌شده است. در صورتی‌که بهینه‌سازی تمام توابع هدف به‌صورت همزمان مدنظر قرار داده شوند، مجموعه‌ای از نقاط به دست می‌آیند که منحنی پارتو را تشکیل می‌دهند.

	73 7	11 3	11 11 1				
5	0.0 01 67 6	0.0 13 49 4	54 27 77 77 78	0.0 66 36	0.0 52 74	0.0 54 30	0.0 58 93
8	0.0 01 58 5	0.0 24 20 9	45 88 88 88 89	0.0 43 53	0.0 46 05	0.0 31 69	0.0 48 00
10	0.0 01 52 4	0.0 19 44 7	85 03 70 37 04	0.0 53 83	0.0 55 48	0.0 32 80	0.0 67 46
13	0.0 01 43 3	0.0 12 30 3	76 64 81 48 15	0.0 64 05	0.0 70 62	0.0 43 62	0.0 72 95
16	0.0 01 34 1	0.0 24 80 5	68 25 92 59 26	0.0 47 97	0.0 62 12	0.0 43 69	0.0 66 90
18	0.0 01 28 0	0.0 20 04 2	10 74 07 40 74 1	0.0 61 89	0.0 72 99	0.0 44 11	0.0 81 25
20	0.0 01 21 9	0.0 22 42 3	57 07 40 74 07	0.0 47 76	0.0 58 21	0.0 35 03	0.0 65 70
24	0.0 01 09 7	0.0 23 61 4	90 62 96 29 63	0.0 48 43	0.0 55 10	0.0 21 39	0.5 65 9
27	0.0 01 00 6	0.0 09 32 7	11 20 67 90	0.0 81 64	0.0 68 18	0.0 35 38	0.1 08 26

مسئله بهینه‌سازی به صورت زیر فرمول‌بندی شده است:

$$\text{Maximize } \varepsilon_1 = \varepsilon_1(t, r, p)$$

$$\text{Maximize } \varepsilon_2 = \varepsilon_2(t, r, p)$$

$$\text{Maximize } \varepsilon_3 = \varepsilon_3(t, r, p)$$

Subject to

$$0.0006096 < t < 0.0018288$$

$$0.00635 < r < 0.0254$$

$$1.13 \times 10^{10} < p < 3.75 \times 10^9$$

با توجه به روش Topsis نقطه بهینه به دست آمده برای ضخامت ورق 0.00064 m و شعاع ورودی قالب 0.00661 m و مقدار فشار حاصل از انفجار 9776881529 pa می‌باشد. با توجه به روش NIP نقطه بهینه به دست آمده برای ضخامت ورق 0.00064 m و شعاع ورودی قالب 0.00636 m و مقدار فشار حاصل از انفجار 10243592773 pa می‌باشد. مقادیر توابع هدف به دست آمده برای ضخامت اولیه ورق (0.0012192 m) و شعاع اولیه ورودی قالب (0.0127 m) و مقدار اولیه فشار حاصل از انفجار (7.5g pa) در جدول 3 نشان داده شده است:

جدول 3- مقادیر توابع هدف در مقاله کار تجربی [۱]

ε_1	ε_2	ε_3	ε_4
0.06445	0.051855	0.02960	0.095082

۵- نتایج

در جدول 4 مقادیر توابع هدف به دست آمده از بهینه‌سازی با نتایج تحلیل ABAQUS مقایسه شده است.

مقادیر توابع هدف نقاط بهینه (مصالحه) انتخاب شده توسط روش NIP 0.106662 و 0.087572 و 0.044516 و 0.119434 و توسط روش TOPSIS 0.105089 و 0.087487 و 0.044870 و 0.120819 می‌باشد.

جدول 4- مقایسه مقادیر توابع هدف به دست آمده از بهینه‌سازی با نتایج تحلیل ABAQUS

Method	t	r	p	ε_1		ε_2		ε_3		ε_4	
				NSGA II	ABAAQ US	NSGA II	ABAAQ US	NSGA II	ABAAQ US	NSGA II	ABAAQ US
TOPSIS	0.00064	0.00661	9776881529	0.105089	0.09261	0.087487	0.072504	0.04487	0.04992	0.120819	0.11153
Difference (%)				11.87 %		17.12 %		11.25 %		7.68 %	
NIP	0.00064	0.00636	10243592773	0.106662	0.09996	0.087572	0.074875	0.044516	0.047573	0.119434	0.11628
Difference (%)				6.28 %		14.49 %		6.86 %		2.64 %	

در جدول 5 درصد بهبود مقادیر توابع هدف به دست آمده از بهینه سازی نسبت به شکل اولیه نشان داده شده است.

جدول 5- درصد بهبود مقادیر توابع هدف به دست آمده از بهینه سازی نسبت به شکل اولیه

	ε_1	$\Delta \%$	ε_2	$\Delta \%$	ε_3	$\Delta \%$	ε_4	$\Delta \%$
Topsis	0.105089	38.67%	0.087487	40.72%	0.04487	34.03%	0.120819	21.30%
NIP	0.106662	39.57%	0.087572	40.78%	0.044516	33.50%	0.119434	20.38%
Primary shape	0.06445		0.051855		0.02960		0.095082	

[4] <http://nptel.iitm.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT-ROORKEE/MANUFACTURING-PROCESSES/Metal%20Forming%20&%20Powder%20metallurgy/lecture9/lecture9.htm>

[5] Gharababaei, H., "Modelling of explosive process with GMDH", MSc thesis (in Persian), The University of Guilan, Rasht, Iran

[6] D.J. Mynors, B. Zhang, "Applications and Capabilities of Explosive Forming", Materials Processing Technology J., Vol. 125-126, PP. 1-25, 2002.

[7] S.A.A. Akbari Mousavi, M. Riahi and A. Hagh Parast, "Experimental and numerical analysis of explosive free forming", Materials Processing Technology J., Vol. 187-188, PP 512-516, 2007.

[8] R. Alipour, "Simulation of explosive forming", M.sc Thesis in Mechanical Engineering, Islamic Azad university of Dezful, Iran, 2008, PP. 56-58.

[9] Theoretical and Numerical Analysis of Inhomogeneous Plates Affected by Explosive Forming, Journal of Energetic Materials, Vol.2, No.1, Spring and Summer 2007, pp.59-69

[10] Y.Q. Guo, J.L. Batoz, H.Naceur, S.Bouabdallah, F. Mercier, O. Barlet, "Recent developments on the analysis and optimum design of sheet metal forming parts using a simplified inverse approach", Comput. Struct. 78 (2000) 133-148.

[11] Michael C. Noland, "Designing For the High Velocity Metalworking Process", Machine Design, Vol.39, aug. 17, 1967, pp. 163-182

[12] Paul C. Miller, "HERF Update: High Energy Rate Forming Joins the Productivity Race", Tooling & Production, Vol. 47, No.7, Oct. 1981, pp. 90-97

[13] Farlow, S.J., ed., "Self-organizing Method in Modelling: GMDH type algorithm", Marcel Dekker Inc., (1984)

[14] Yao, X., Evolving Artificial Neural Networks, Proceedings of IEEE, 87(9):1423-1447, Sept., (1999)

۵-۱- نتیجه گیری

در این مقاله تحلیل المان محدود با استفاده از نرم افزار Abaqus انجام شده و نتایج به دست آمده، با نتایج حاصل از مقاله آقای وب و همکارانش در سال ۲۰۰۵ مقایسه شده است. برای بهینه سازی چند هدفی به منظور تعیین نقاط بهینه طراحی از الگوریتم NSGAI بهره گرفته شده است. برای نقاط طراحی مقادیر تابع هدف محاسبه شده است. سپس به منظور محاسبه فرم پارامتری توابع هدف از شبکه عصبی GMDH استفاده شده است. بعد از اتمام فرآیند بهینه سازی، جبهه جواب های بهینه روی منحنی پارتو نمایش داده شده است. در نهایت با استفاده از روش TOPSIS و NIP دونقطه بهینه (مصالحه) به دست آمده اند که توانسته اند به اندازه قابل توجهی توابع هدف را بهینه کنند.

۶- مراجع

[1] V.N. Wijayathunga, D.C. Webb, "Experimental evaluation and finite element simulation of explosive forming of a square cup from a brass plate assisted by a lead plug", School of Engineering, Leeds Metropolitan University, Calverley Street, Leeds LS1 3HE, UK.

[2] Narimanzadeh, N. Darvizeh, A. Felezi, M.E. Gharababaei, H., "Polynomial Modeling of Explosive Compaction Process of Metallic Powders Using GMDH-Type Neural Networks and Singular Value Decomposition", Modeling and Simulation in Materials Science and Engineering, Vol. 10, PP. 727-744, 2002.

[3] Narimanzadeh, N. Darvizeh, A. Jamali, A. Moeini, A., "Evolutionary design of generalized polynomial neural networks for modeling and prediction of explosive forming process", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 164-165, PP. 1561-1571, 2005.