

طراحی، شبیه‌سازی و آنالیز فرایند تولید برآمدگی لوله به روش شکل‌دهی انفجاری

مهدی ظهور* (دانشیار)

محمد رضوانی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

مهندسی مکانیک شریف
دوره ۳-۲۸، شماره ۱، ص. ۶۵-۵۷

این تحقیق به منظور طراحی، آنالیز و تولید برآمدگی لوله به روش شکل‌دهی انفجاری با واسطه‌ی آب انجام شد. همچنین اثر پارامترهای فرایند بر روی کیفیت محصول مورد مطالعه قرار گرفت. بعد از انتخاب ماده‌ی منفجره و با استفاده از روش‌های عددی، داگلاس^[۱] و انرژئ^[۲]، مقدار ماده‌ی منفجره‌ی مورد نیاز برای تغییر شکل انفجاری محاسبه شد. برای ساخت محصول مورد نظر به روش فیزیکی، یک سری قالب و چیدمان ماده‌ی منفجره طراحی شد. همچنین به منظور مدل‌سازی فرایند تغییر شکل انفجاری، از نرم‌افزارهای AUTOCAD و HYPERMESH استفاده شد. سپس، برای شبیه‌سازی و آنالیز فرایند انفجاری به روش اجزاء محدود، از نرم‌افزار LS-DYNA استفاده شد. سرانجام، اعتبارسنجی نتایج عددی به دست آمده، با استفاده از روش داگلاس و روش انرژئ صورت گرفت.

واژگان کلیدی: برآمدگی لوله، شکل‌دهی انفجاری، ماده‌ی منفجره، روش اجزاء محدود، روش داگلاس، روش انرژئ.

mzohoor@kntu.ac.ir
mohammad.rezvani.429@yahoo.com

مقدمه

روش انفجاری یکی از روش‌های تولید با نرخ انرژئ بالا است.^[۳] امروزه بسیاری از قطعات تجاری و نظامی با این روش تولید می‌شوند. «شکل‌دهی انفجاری» فرایندی است که در آن ماده‌ی منفجره در فاصله‌ی معینی از قطعه‌کار قرار می‌گیرد و انرژئ آزادشده‌ی حاصل از انفجار، از طریق یک محیط واسطه — مانند هوا، روغن، یا آب — به قطعه‌کار منتقل می‌شود. اگرچه شروع فعالیت‌های مختلف در زمینه‌ی شکل‌دهی انفجاری به چندین دهه‌ی قبل برمی‌گردد، تکنولوژی آن — به دلیل کاربرد نظامی — استفاده‌ی همگانی نداشته است. تحقیقات در این زمینه به روش عملی و شبیه‌سازی رایانه‌ی بوده است. در سال ۱۹۸۴ بعضی از این روش‌های تولید مقایسه شده است.^[۴] این روش‌ها از نقطه‌نظر سرمایه‌گذاری، نوع و میزان مصرف مواد و انرژئ، زمان تولید و کیفیت محصول بررسی شدند. مزایای بیان‌شده برای شکل‌دهی انفجاری عبارت است از: کم‌بودن هزینه‌ی سرمایه‌گذاری اولیه، کم‌بودن تعداد عملیات و صرفه‌جویی ۱۰ الی ۲۰ درصدی در مواد به دلیل پایین بودن مقدار ضایعات مواد و پایین بودن هزینه‌ی انرژئ است.

پژوهش‌گران در مقالات خود مفصلاً مزایا و روش‌های استفاده از مواد اپوکسی در تهیه قالب‌های انفجاری را تشریح کرده‌اند.^[۷] به‌باور آنان، با ظهور فناوری جدید مواد بسیاری، استفاده از قالب‌های ریخته‌شده‌ی فلزی، هیچ‌گونه توجیه اقتصادی و فنی ندارد. بسپارها به‌طور کامل یا به‌عنوان پوشش قالب می‌توانند تا ۹۰ درصد جایگزین مواد قبلی شوند.

در سال ۱۹۶۴ میلادی، بلازینسکی در مقاله‌ی بی‌اهمیت طراحی دقیق قالب‌ها اشاره کرد و نوشت: «برگشت فتری بستگی به توازن مناسب شکل قالب، پرهیز از لبه‌های تیز و شیارهای عمیق و باریک، و اجتناب از تغییرات تند و ناگهانی در شکل دارد. با افزایش مقدار خرج، برگشت فتری کاهش می‌یابد اما هرگز به صفر نمی‌رسد».^[۸]

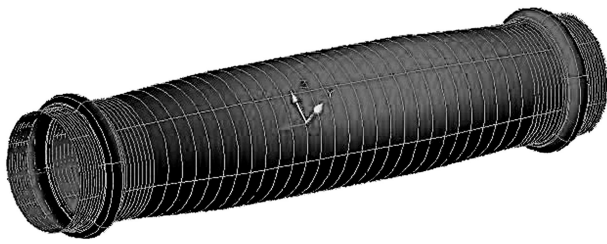
برای به دست آوردن میزان خرج مورد نیاز به منظور شکل‌دهی لوله‌های استوانه‌ی توخالی، آزمایشی انجام شد که به نتایجی مطلوب منتهی شد.^[۱] در بحث شکل‌دهی، آنچه که باعث انجام کار می‌شود موج شوک^۲ است. مزیت شکل‌دهی انفجاری

از روش‌های تولید با نرخ انرژئ بالا است.^[۳] امروزه بسیاری از قطعات تجاری و نظامی با این روش تولید می‌شوند. «شکل‌دهی انفجاری» فرایندی است که در آن ماده‌ی منفجره در فاصله‌ی معینی از قطعه‌کار قرار می‌گیرد و انرژئ آزادشده‌ی حاصل از انفجار، از طریق یک محیط واسطه — مانند هوا، روغن، یا آب — به قطعه‌کار منتقل می‌شود. اگرچه شروع فعالیت‌های مختلف در زمینه‌ی شکل‌دهی انفجاری به چندین دهه‌ی قبل برمی‌گردد، تکنولوژی آن — به دلیل کاربرد نظامی — استفاده‌ی همگانی نداشته است. تحقیقات در این زمینه به روش عملی و شبیه‌سازی رایانه‌ی بوده است. در سال ۱۹۸۴ بعضی از این روش‌های تولید مقایسه شده است.^[۴] این روش‌ها از نقطه‌نظر سرمایه‌گذاری، نوع و میزان مصرف مواد و انرژئ، زمان تولید و کیفیت محصول بررسی شدند. مزایای بیان‌شده برای شکل‌دهی انفجاری عبارت است از: کم‌بودن هزینه‌ی سرمایه‌گذاری اولیه، کم‌بودن تعداد عملیات و صرفه‌جویی ۱۰ الی ۲۰ درصدی در مواد به دلیل پایین بودن مقدار ضایعات مواد و پایین بودن هزینه‌ی انرژئ است.

در سال ۱۹۶۳ میلادی مزایای شکل‌دهی انفجاری به صورت صرفه‌جویی قابل توجه در هزینه‌های قالب‌سازی، قابلیت تولید شکل‌های پیچیده، تولید قطعات بسیار بزرگ، کاهش تعداد فرایندهای بازپخت، کاهش زمان شکل‌دهی و برگشت فتری کم‌تر، دسته‌بندی شد.^[۵] در سال ۱۹۶۰ جنس قالب‌های انفجاری مورد بررسی قرار گرفت.^[۶] در این بررسی‌ها جنس قالب‌های انفجاری مورد استفاده در عملیات

* نویسنده مسئول

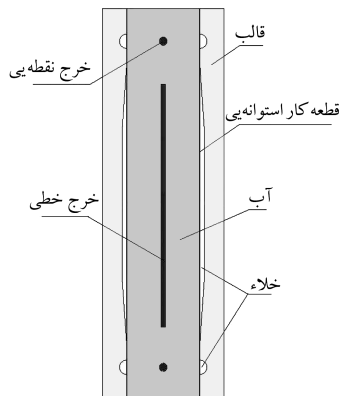
تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۷/۱۰، اصلاحیه ۱۳۹۰/۳/۱۶، پذیرش ۱۳۹۰/۴/۲۲.



شکل ۱. قطعه‌ی تولیدشده (برآمدگی لوله).

جدول ۱. خواص مکانیکی فلزات به کار رفته در آنالیز [۳].

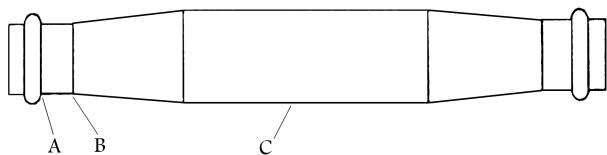
جنس قطعه کار	ضریب کرنش سختی	توان کرنش	تنش تسلیم
	K (Mpa)	n سختی	σ_y (Mpa)
فولاد زنگ نزن ۳۲۱ (SS۳۲۱)	۱۲۷۵	۰٫۴۵	۲۷۶
آلومینیوم ۶۰۶۱ (Al-۶۰۶۱)	۲۰۵	۰٫۲	۱۵۵



شکل ۲. نحوه‌ی قرارگیری قطعه‌ی اولیه در قالب و خروج گذاری سیستم.

جدول ۲. خواص کار بردی مواد منفجره [۲].

نام تجاری	تری نیترو تولوئن	پنتا اریتول تترا نیترات
نام شیمیایی	TNT	PETN
انرژی ویژه α (J/kg)	۷۸۰	۱۳۰۰
حداکثر فشار (GPa)	۱۶٫۵	۲۲٫۱
سرعت انفجار (m/s)	۷۰۱۰	۸۲۹۰
چاشنی مورد نیاز	z-۲	No.۶



شکل ۳. نمایش ابعاد سه قسمت مهم در نقشه مهندسی قطعه [۱].

عبارت است از: نرخ کرنش بالا^۳، بارگذاری لحظه‌یی^۴، زمان تولید بسیار کم آن و عدم نیاز به دستگاه‌های شکل‌دهی سنتی مانند پرس، سنبه و غیره.^[۲]

«شکل‌دهی انفجاری» اصطلاح وسیعی است که بسیاری از متغیرهای فرایند را پوشش می‌دهد. این روش در اواخر قرن نوزدهم و اوایل قرن بیستم در صنعت ظاهر شد. کاربردهای موفقیت‌آمیز این روش بعد از سال ۱۹۷۰ به صورت محصولات آلومینیومی و فولادی به بازار آمد.^[۹] پژوهش‌گران یک قطعه‌ی آلومینیومی مدور را به روش شکل‌دهی آزاد انفجاری شبیه‌سازی کرده‌اند.^[۱۰] طبق گزارش آن‌ها، نتایج شبیه‌سازی در همه‌ی فرایندهای شکل‌دهی انفجاری کاربرد دارد. به منظور مطالعه و کسب اطلاعات در مورد تولید قطعات توخالی از طریق تغییر شکل انفجاری، یک لوله‌ی جدارنازک تحت فشار انفجاری مورد آنالیز قرار گرفت.^[۱۱] مقدار جذب انرژی لوله‌های دایره‌یی و مربعی شکل از جنس آلیاژ آلومینیوم به کمک بارگذاری انفجاری تخمین زده شده است.^[۱۲] در سال ۲۰۱۰، به منظور ساخت عدسی‌های لبه‌دار از آلومینیوم به روش شکل‌دهی انفجاری، ابتدا سخت‌افزاری طراحی و تهیه شد^[۱۳] و سپس مطالعه در مورد ابعاد ورق، شکل‌گیری عدسی‌ها و توزیع کرنش به کسب نتایج مناسبی منجر شد.

پژوهش‌گران ایرانی نیز برای بالابردن چگالی و سختی پودر تنگستن و آلیاژهای آن، از فرایند شکل‌دهی انفجاری به طور عملی استفاده کردند و نتایج تجربی خود را با شبیه‌سازی عددی مقایسه کردند.^[۱۴-۱۷] آن‌ها نشان دادند که فرایند شکل‌دهی انفجاری در مقایسه با سایر روش‌ها، به افزایش چگالی و سختی بیشتر در تنگستن و آلیاژهای آن می‌انجامد. آنان در سال ۲۰۰۷، برای تعیین سرعت موج شوک لازم در فرایند متالورژی پودر انفجاری -- به عنوان یکی از پارامترهای اساسی مؤثر بر فرایند -- با استفاده از معادله‌ی هاگونیوت پودر تنگستن، یک روش تحلیلی ارائه دادند و رابطه‌یی تحلیلی برای انتخاب نوع ماده‌ی منفجره به دست آوردند.^[۱۸] در سال ۲۰۰۹ نیز مطالعاتی پیرامون تغییر شکل در صفحه‌های فولادی مدور با استفاده از فرایند تغییر شکل انفجاری زیر آب انجام^[۱۹] و نتایج آن با نتایج نظری مقایسه شد. آن‌ها نتیجه گرفتند که معادله‌ی تجربی راجندران برای محاسبه‌ی میزان انحراف در صفحه‌های فولادی مناسب‌ترین معادله است.

تعریف مسئله و ابعاد قطعه

قطعه‌ی مورد نظر، یک برآمدگی لوله (شکل ۱)، از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ است.^[۱] در تحلیل عددی، علاوه بر فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱، از آلومینیوم ۶۰۶۱ نیز استفاده شده است. خصوصیات مکانیکی فلزات مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است. طبق شکل ۲، لوله‌ی استوانه‌یی به عنوان قطعه کار در قالب قرار داده شد و داخل آن از آب (محیط واسط) پر شد. در محل برآمدگی سر لوله، خروج نقطه‌یی و در وسط آن خروج خطی قرار داده شد. انتخاب شکل خروج با توجه به طول شکل‌دهی صورت گرفته است. خواص مواد منفجره‌ی مورد استفاده در جدول ۲ آمده است.

ابعاد سه قسمت از قطعه کار (A, B, C)، که مبنای طراحی در نقشه‌ی مهندسی است در شکل ۳ نشان داده شده است. این ابعاد همراه با تولرانس مورد نظر در جدول ۳ ارائه شده است. علاوه بر این، ابعاد میانگین ۲۵ قطعه‌ی تولید شده با روش انفجاری، در جدول ۳ آمده است.^[۱]

با توجه به متقارن بودن لوله نسبت به محور Y، در تحلیل اجزاء محدود از روش تقارن محوری استفاده شد. تقارن نسبت به محور X نیز در نظر گرفته شد و یک چهارم قطعه مدل‌سازی شد.

جدول ۳. ابعاد نقشه مهندسی و نتایج آزمایش عملی (mm). [۱]

ابعاد بعد از تغییر شکل فیزیکی قطعه ۲۵	ابعاد نقشه مهندسی		موقعیت روی شکل ۳
میانگین	بیشینه	کمینه	
۹۰,۲۴۶	۹۰,۴۲۴	۹۰,۰۱۸	قطر داخلی A
۸۶,۸۱۷	۸۶,۹۴۴	۸۶,۶۱۴	قطر داخلی B
۱۰۱,۱۹۴	۱۰۱,۳۴۶	۱۰۱,۰۴۱	قطر خارجی C

محاسبه‌ی جرم خرج

روش داگلاس: در این روش برای محاسبه‌ی کم‌ترین جرم خرج مورد نیاز، با استفاده از رابطه‌ی ۱ فشار استاتیک P_y محاسبه می‌شود و با اعمال ضریب تصحیح K_1 به معادل دینامیکی (P_{ex}) تبدیل می‌شود (رابطه‌ی ۲). از تقسیم فشار معادل (P_{ex}) به فشار حاصل از نمودار داگلاس (P) (شکل ۴)، جرم ماده‌ی منفجره به دست می‌آید (رابطه‌ی ۳). [۲۰]

$$P_y = \frac{2 \times \sigma_y \times t}{D} \quad (۱)$$

$$P_{ex} = K_1 \times P_y \quad (۲)$$

$$w = \frac{P_{ex}}{P} \quad (۳)$$

روش انرژی: در روش انرژی کرنش، با استفاده از رابطه‌های ۴ تا ۸، انرژی کرنش مورد نیاز (U) برای تغییر شکل دو قسمت سر و وسط قطعه به‌طور جداگانه به دست می‌آید. سپس این مقدار را برابر با انرژی ویژه آزاد شده توسط خرج قرار می‌دهیم (رابطه‌ی ۹). بدین ترتیب، مقدار جرم خرج از روش انرژی کرنش نیز به دست می‌آید. [۲۱] رابطه‌ی ۶ مربوط به قسمت سر به‌صورت خرج‌گذاری کروی و رابطه‌های

۷ و ۸ مربوط به قسمت وسط به‌صورت انبساط حلقوی در نظر گرفته شده است.

$$U = \frac{K_1}{n+1} \varepsilon_{eff}^{n+1} = \frac{2\pi K_1 S}{n+1} (D-t) t \left[\ln \frac{D_d}{D} \right]^{n+1} \quad (۴)$$

$$\varepsilon_{eff} = \left[\frac{2}{3} (\varepsilon_t^2 + \varepsilon_r^2 + \varepsilon_\theta^2) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (۵)$$

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon_\theta = \ln \frac{D_d}{D} \quad (۶)$$

$$\varepsilon_t = \ln \frac{t_r}{t_1} = \ln \frac{A_1}{A_r} \quad (۷)$$

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon_r = -0.5 \varepsilon_t \quad (۸)$$

$$W_1 = E L = \eta w \alpha \quad (۹)$$

محاسبه‌ی ابعاد قالب

شعاع خارجی قالب با استفاده از رابطه‌های ۱۰ و ۱۱، و اعمال ضریب اطمینان ۱۰ به دست می‌آید (داگلاس مقدار ضریب اطمینان را برابر ۱۰ پیشنهاد کرده است). [۱]

نتایج ابعاد قالب در جدول ۴ ارائه شده است.

چنان‌که مشاهده می‌شود، تغییر جنس قطعه‌کار تأثیر چشم‌گیری بر ضخامت کمینه‌ی قالب نداشته است، زیرا ضخامت بسیار کم قطعه‌کار باعث کم‌رنگ شدن اثر جنس قطعه‌کار می‌شود.

$$\sigma_t = \frac{\sigma_y}{X} \quad (۱۰)$$

$$R_o = R_i \left[\frac{\sigma_t + P_{ex}}{\sigma_t - P_{ex}} \right]^{0.5} \quad (۱۱)$$

بنابراین ضخامت دیواره‌ی قالب از رابطه‌ی ۱۲ به دست می‌آید:

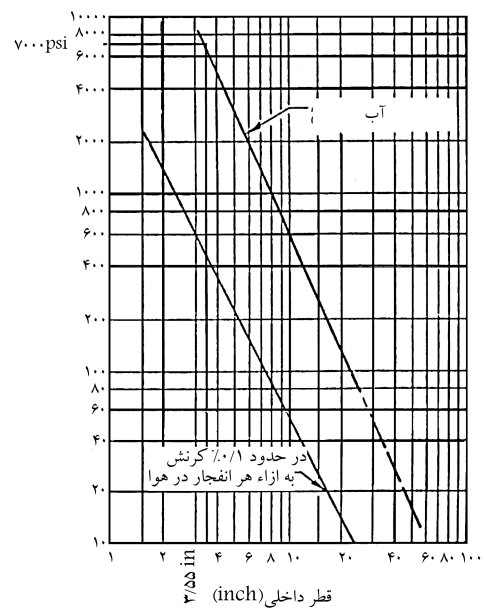
$$T = R_o - R_i \quad (۱۲)$$

آنالیز عددی

برای تحلیل عددی، ابتدا هندسه‌ی قطعه‌کار به‌صورت تقارن محوری در نظر گرفته شد. با استفاده از نرم‌افزار ۲۰۰۵-AUTOCAD مختصات مدل به دست آمد، و از آن در نرم‌افزار Hypermesh برای ساختن نیمه‌ی مدل استفاده شد. سپس با انتخاب اجزاء پوسته‌ی ۵، عمل مش‌بندی انجام گرفت. برای تأیید مش حاصل، از پارامترهای کنترل‌کننده‌ی چون ژاکوین ۶ و نسبت ابعادی ۷ استفاده شد. [۲۱] به‌منظور استفاده از مدل تهیه‌شده در نرم‌افزار LS-DYNA، فایل هندسه‌ی به دست آمده با پسوند «k» ذخیره شد. در مرحله‌ی بعد، کدنویسی صریح در نرم‌افزار LS-DYNA انجام شد و در انتهای کد نیز هندسه‌ی مدل شده فراخوانی، و آنالیز لازم انجام شد. بسته‌ی نرم‌افزاری LS-DYNA، یک نرم‌افزار عمومی برای شبیه‌سازی پیش‌رفته‌ی چندمنظوره است که توسط شرکت LSTC نوشته شده است. این نرم‌افزار از قابلیت‌های

جدول ۴. نتایج مربوط به ابعاد قالب.

نوع قطعه‌کار	کم‌ترین قطر خارجی قالب، R_o (mm)	کم‌ترین ضخامت قالب در قسمت «C»، T (mm)
فولاد ۳۲۱	۷۴۸	۲۶۶
آلومینیوم ۶۰۶۱	۷۴۲	۲۶۳



شکل ۴. نمودار داگلاس. [۱]

جدول ۵. نتایج آنالیز عددی فرایند تغییر شکل انفجاری (خرج: PETN).

شماره چیدمان جرم خرج	جرم خرج قسمت وسط (گرم)	جرم خرج قسمت سر (گرم)	جنس قطعه کار	وضعیت تغییر شکل قسمت سر (%)	وضعیت تغییر شکل قسمت وسط (%)
۱	۱٫۳	۱	ST	۱۰۰	۱۰۰
۲	۵	۱	ST	پارگی رخ می‌دهد	پارگی رخ می‌دهد
۳	۱٫۳	۰٫۵	ST	۸۴	۱۰۰
۴	۳	۰٫۵	ST	۹۴	۱۰۰
۵	۰٫۲	۰٫۴	AL	۸۵	۱۰۰
۶	۰٫۵	۰٫۴	AL	۱۰۰	۱۰۰
۷	۰٫۱	۰٫۳	AL	۷۰	۱۰۰
۸	۰٫۲	۰٫۳	AL	۷۵	۱۰۰
۹	۱۰	۱	AL	۱۰۰	۱۰۰

جدول ۶. نتایج آنالیز عددی فرایند تغییر شکل انفجاری (خرج: TNT).

شماره چیدمان جرم خرج	جرم خرج قسمت وسط (گرم)	جرم خرج قسمت سر (گرم)	جنس قطعه کار	وضعیت تغییر شکل قسمت سر (%)	وضعیت تغییر شکل قسمت وسط (%)
۱۰	۲٫۵	۱	ST	۱۰۰	۱۰۰
۱۱	۵	۱	ST	پارگی رخ می‌دهد	۱۰۰
۱۲	۱٫۳	۰٫۵	ST	۸۲	۱۰۰
۱۳	۳	۰٫۵	ST	۹۲	۱۰۰
۱۴	۰٫۴	۰٫۶	AL	۸۲	۱۰۰
۱۵	۰٫۷	۰٫۶	AL	۱۰۰	۱۰۰
۱۶	۰٫۳	۰٫۴	AL	۶۸	۱۰۰
۱۷	۰٫۴	۰٫۴	AL	۷۱	۱۰۰
۱۸	۱۰	۱	AL	۱۰۰	۱۰۰

جدول ۷. نتایج مربوط به محاسبه جرم خرج مورد نیاز.

موقعیت	جنس قطعه‌کار	نوع ماده‌ی منفجره	جرم ماده‌ی منفجره		
			روش انرژی روش داگلاس (gr)	روش انرژی روش داگلاس (gr)	روش انرژی روش داگلاس (gr)
قسمت سر	فولاد	PETN	۰٫۴۱۹۴	۰٫۸۰۶	۱
		TNT	۰٫۶۹۹۰	۰٫۹۳۵	۱
قطعه‌کار	آلومینیوم	PETN	۰٫۱۲۱۸	۰٫۴۵۰	۰٫۴
		TNT	۰٫۲۰۳۱	۰٫۵۲۲	۰٫۶
قسمت وسط	فولاد	PETN	۲٫۱۱۶۰	۱٫۸۴۲	۱٫۳
		TNT	۳٫۵۲۷	۲٫۱۳۶۷	۲٫۵
قطعه‌کار	آلومینیوم	PETN	۰٫۷۳۷	۰٫۵۸۷۶	۰٫۵
		TNT	۱٫۲۳۰	۰٫۶۸۱۶	۰٫۷

فراوان -- نظیر تحلیل دینامیکی غیرخطی اجزاء محدود با نرخ کرنش بالا -- برخوردار است و به همین لحاظ، برای شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی انفجاری بسیار مناسب است.

برای چهار پارامتر موجود -- ماده‌ی منفجره، محیط واسط (آب)، قطعه‌ی استوانه‌یی و قالب -- مدل ماده‌ی و معادله‌ی حالت مناسب تعریف شد. برای ماده‌ی منفجره، مدل ماده‌ی با شدت انفجار بالا^۸ و معادله‌ی حالت JWL^۹، برای آب مدل ماده‌ی نول^{۱۰} و معادله‌ی حالت مای-گرونیسن^{۱۱}، برای قطعه‌ی استوانه‌یی مدل ماده‌ی خمیری سینماتیک^{۱۲} (کوپر سیموندز^{۱۳}) و برای قالب مدل ماده‌ی کشسان تعریف شد. برای فلز (قطعه‌کار و قالب) به دلیل ثابت بودن حجم معادله‌ی حالت در نظر گرفته نمی‌شود.^[۱۲] در این تحقیق هیچ‌یکه آنالیز انجام شد. در هر آنالیز پارامترهایی مانند جرم ماده‌ی منفجره، نوع ماده‌ی منفجره (TNT و PETN) و جنس قطعه‌کار (فولاد ۳۲۱ و آلومینیوم ۶۰۶۱) تغییر داده شد.

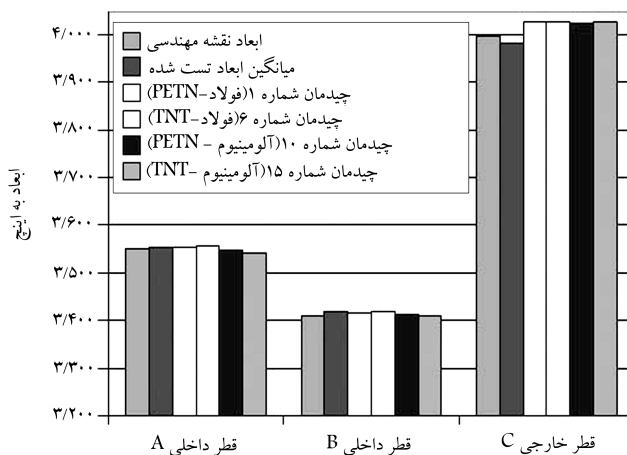
داگلاس و آنالیز عددی برای قسمت‌های سر و وسط قطعه آورده شده است. با توجه به چیدمان‌های ماده‌ی منفجره (جدول‌ها ۵ و ۶)، خرج‌گذاری قسمت سر و وسط بر یکدیگر اثر می‌گذارد. لذا برای مقایسه‌ی سه روش و انتخاب فرایند بهینه، مقدار خرج‌های سر و وسط با هم جمع شد. سپس خطای روش عددی نسبت به دو روش دیگر محاسبه شد (جدول ۸). نمودار این نتایج در شکل ۵ رسم شده است.

نتایج آنالیز عددی

نتایج عددی به دست آمده در ارتباط با فرایند تغییر شکل انفجاری برای تولید محصول با استفاده از PETN و TNT، به ترتیب در جدول‌های ۵ و ۶ ارائه شده است. در جدول ۷ جرم ماده‌ی منفجره‌ی به دست آمده طی سه روش انرژی، روش

جدول ۸. مقادیر جرم مورد نیاز برای شکل‌دهی و بررسی خطاها.

جنس قطعه‌کار	نوع ماده‌ی متفجره	جرم ماده‌ی منفجره		
		روش انرژی (gr)	روش داگلاس (gr)	روش عددی (gr)
فولاد	PETN	۲,۵۳۵۴	۲,۶۴۸	۲,۳
	TNT	۴,۲۲۶	۳,۰۷۲	۳,۵
آلومینیوم	PETN	۰,۸۵۸۸	۱,۰۳۷۶	۰,۹
	TNT	۱,۴۳۳۱	۱,۲۰۳۶	۱,۳



شکل ۶. نمودار مقایسه‌ی ابعاد محصول تولیدشده از طریق انفجار حقیقی و آنالیز عددی (انفجار مجازی)، با ابعاد واقعی در نقشه‌ی مهندسی.

جدول ۱۰. خطای ابعاد آزمون عملی و آنالیز عددی نسبت به نقشه‌ی مهندسی.

موقعیت در شکل ۳	خطای تست نسبت به نقشه مهندسی (%)	خطای آنالیز عددی (%)			
		جنس فولاد ۳۲۱		جنس آلومینیوم ۶۰۶۱	
		TNT	PETN	TNT	PETN
قطر داخلی A	+۰,۰۸	چیدمان ۱	چیدمان ۶	-۰,۰۵۶	+۰,۱۱۳
قطر داخلی B	+۰,۲۳۴	چیدمان ۱	چیدمان ۶	+۰,۰۵۹	+۰,۲۳۵
قطر خارجی C	-۰,۴۰۰	چیدمان ۱	چیدمان ۶	+۰,۶۲۵	+۰,۷۵۰

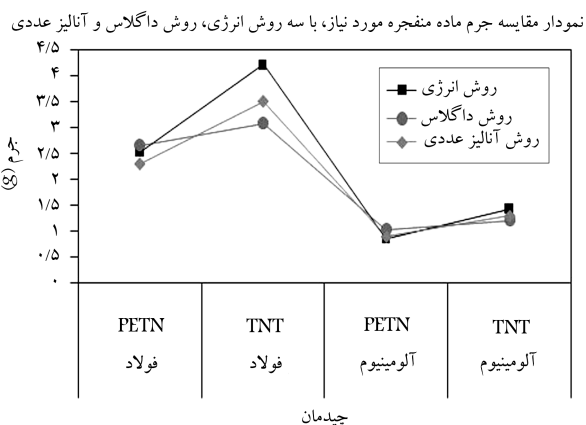
ون‌میسز در قطعه‌کار مربوط به این دو چیدمان و در زمان‌های متفاوت، به ترتیب در شکل‌های ۹ و ۱۰ ارائه شده است.

انتخاب جنس قالب

انتخاب جنس قالب براساس دو پارامتر تنش تسلیم ماده محصول و تیراژ تولید صورت می‌گیرد (جدول ۱۱).^[۲]

آنالیز تنش و کرنش در قالب

در عملیات شکل‌دهی، تنش بیشینه در قالب نباید از تنش تسلیم ماده‌ی قالب بیشتر باشد. به عبارت دیگر، قالب همواره باید در ناحیه‌ی کشسان باشد تا محصولی



شکل ۵. نمودار مقایسه جرم ماده‌ی منفجره‌ی مورد نیاز به سه روش انرژی، داگلاس و آنالیز عددی.

بررسی ابعاد قطعه‌کار

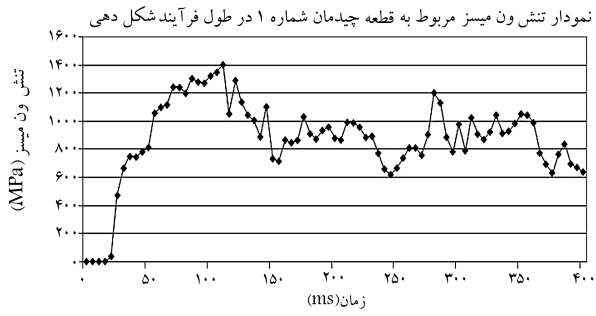
در جدول ۹ نتایج ابعاد هندسی محصول تولیدشده بعد از انفجار مجازی نوشته شده است. در شکل ۶ مقادیر ابعاد به دست آمده حاصل از تولید فیزیکی و آنالیز عددی، با ابعاد نقشه‌ی مهندسی بر روی نمودار مقایسه شده است. خطای مربوط به این دو روش نیز در جدول ۱۰ محاسبه شده است.

آنالیز تنش و کرنش در قطعه‌کار

کانتور تنش ون‌میسز مربوط به قطعه‌کار در دو چیدمان مطلوب (چیدمان شماره ۱ از جنس فولاد ۳۲۱ و خرج PETN، و چیدمان شماره ۱۵ از جنس آلومینیوم ۶۰۶۱ و خرج TNT) به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ نمایش داده شده است. بیشینه تنش

جدول ۹. نتایج ابعاد آنالیز عددی.

شماره چیدمان	۱	۱۰	۶	۱۵
جنس قطعه‌کار	فولاد		آلومینیوم	
نوع خرج	PETN	TNT	PETN	TNT
قطر داخلی A	۸۹,۹۶۷	۹۰,۱۱۹	۹۰,۳۴۸	۹۰,۲۷۲
قطر داخلی B	۸۶,۶۱۴	۸۶,۶۶۵	۸۶,۸۱۷	۸۶,۷۹۲
قطر خارجی C	۱۰۲,۳۳۷	۱۰۲,۲۳۵	۱۰۲,۳۶۲	۱۰۲,۳۱۱



شکل ۹. نمودار بیشینه تنش ون میسر، چیدمان شماره ۱.



شکل ۱۰. نمودار بیشینه تنش ون میسر، چیدمان شماره ۱۵.

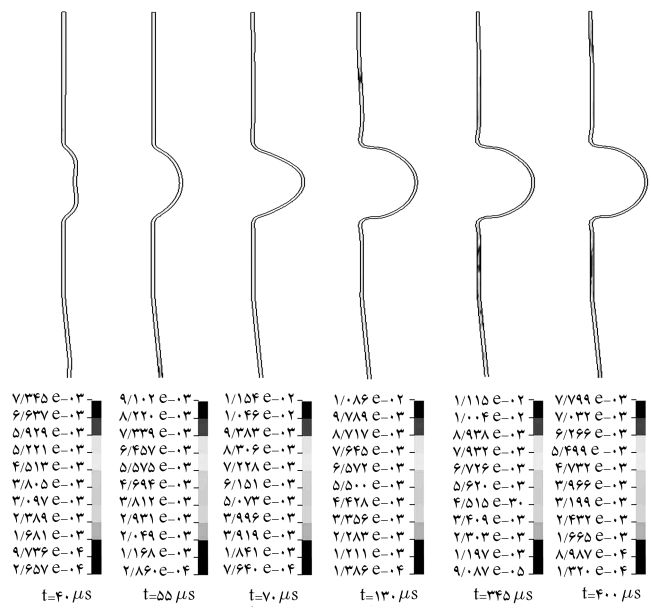
جدول ۱۱. جنس مادهی قالب برحسب استحکام قطعه و حجم تولید. [۲]

تنش تسلیم مادهی مورد شکل دهی (MPa)			تعداد قطعه
۴۱۴ و بالاتر	۲۰۷-۴۱۴	۶۹-۲۰۷	
فولاد ریخته‌گری	KirkSITE	اپوکسی	۱-۱۰
فولاد ریخته‌گری	KirkSITE	KirkSITE	۱۰-۲۰
فولاد ریخته‌گری	فولاد ریخته‌گری	KirkSITE	۲۰-۱۰۰

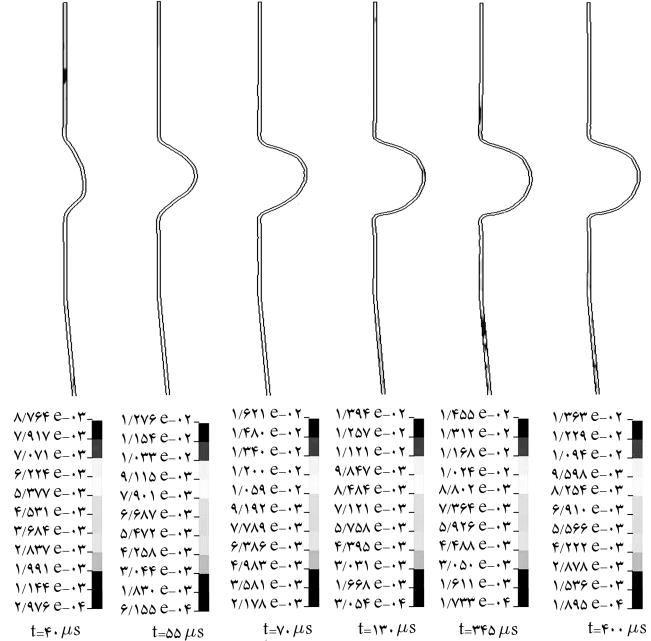
ارائه داده است. با توجه به شکل ۵، از مقایسهی نتایج آنالیز عددی با دو روش انرژی و داگلاس، می‌توان نتیجه گرفت که برای تغییر شکل قطعهی فولادی، بهتر است از مادهی منفجره PETN، و برای تغییر شکل قطعهی آلومینیومی از هر دو مادهی منفجره PETN و TNT استفاده شود. روش اجزاء محدود نشان‌گر درصد خطای بالایی برای تولید قطعات فولادی با مادهی منفجره TNT است. لذا تولید قطعات فولادی با مادهی منفجره TNT به دلیل بالا بودن خطای آنالیز عددی نسبت به دو روش دیگر توصیه نمی‌شود. مقادیر جرم مادهی منفجره که در این نوشتار محاسبه شده، در حد ایده‌آل است. عملاً باید مقدار مادهی منفجره انتخاب شده قدری بیشتر از مقدار محاسبه شده باشد؛ زیرا تجربه نشان داده که مقدار بسیار کم مادهی منفجره گاهی منجر نمی‌شود.

با توجه به شکل ۶، مقایسهی ابعاد محصول تولیدشده با انفجار حقیقی و شبیه‌سازی عددی، تطابق خوبی نشان می‌دهد. با توجه به نتایج جدول ۱۰، به منظور تولید این قطعه از جنس فولاد، مادهی منفجره TNT توصیه می‌شود (چیدمان شماره ۱۰). این چیدمان نسبت به چیدمان شماره ۱ دارای خطای ابعادی کم‌تری است. به منظور تولید این قطعه از جنس آلومینیوم مادهی منفجره TNT توصیه می‌شود (چیدمان شماره ۱۵). این چیدمان نیز نسبت به چیدمان شماره ۶ دارای خطای ابعادی کم‌تری است.

در میان چهار چیدمان مربوط به آنالیز عددی، کم‌ترین خطای ابعادی مربوط



شکل ۷. تراز تنش ون میسر، چیدمان شماره ۱.

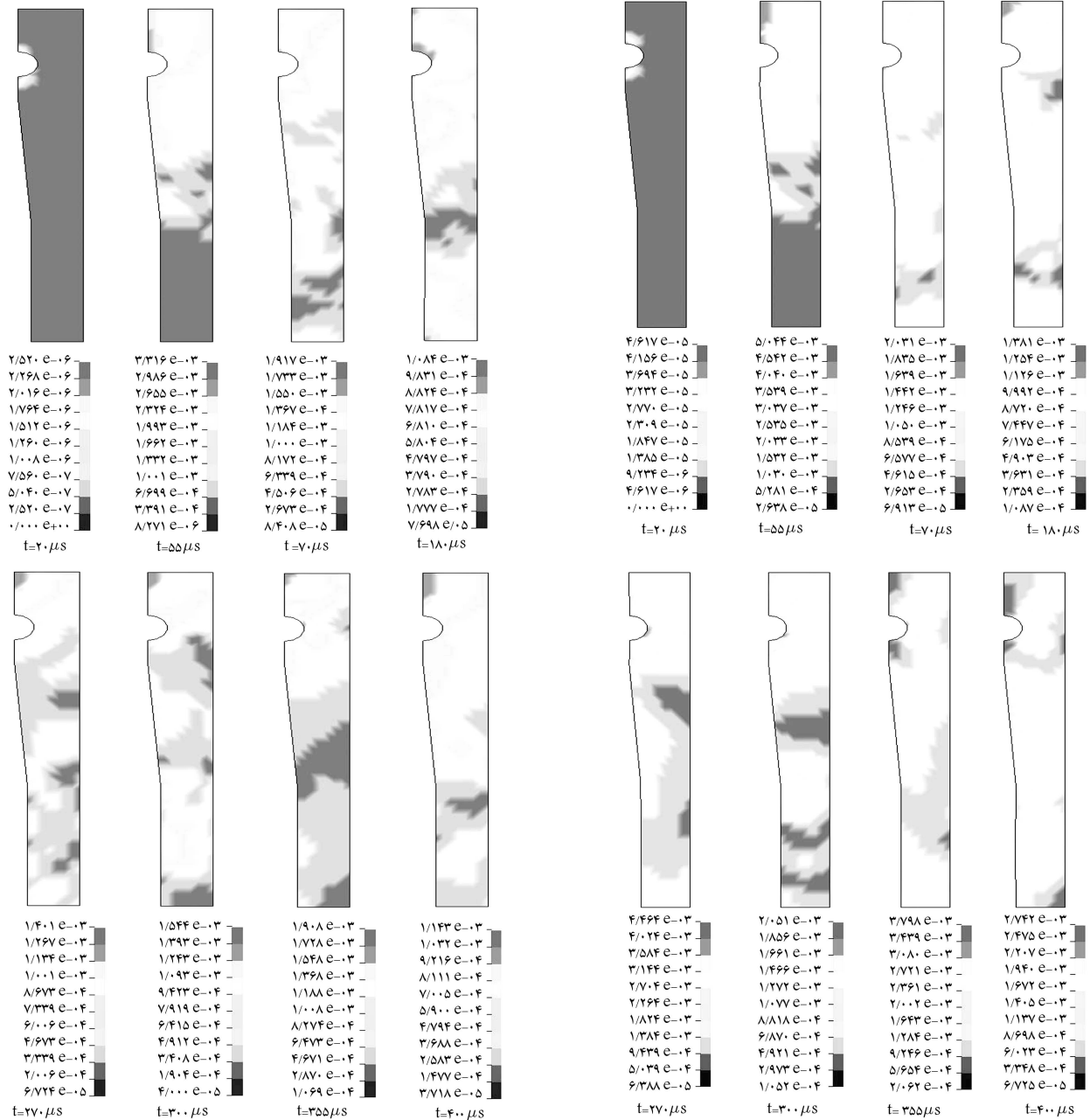


شکل ۸. تراز تنش ون میسر، چیدمان شماره ۱۵.

با ابعاد مورد نظر تولید شود. با توجه به نتایج عددی، تراز و مقادیر تنش ون میسر مربوط به قالب از جنس فولاد ریخته‌گری نسبت به زمان به ترتیب مطابق شکل‌های ۱۱ و ۱۲ است. به همین ترتیب، تراز و مقادیر تنش ون میسر مربوط به قالب از جنس KirkSITE نسبت به زمان به ترتیب مطابق شکل‌های ۱۳ و ۱۴ است.

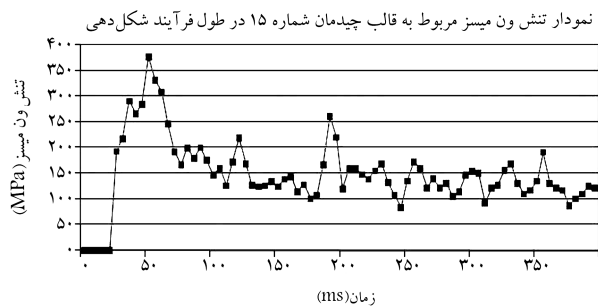
بحث

بررسی نتایج ثبت شده در جدول ۸ نشان می‌دهد که آنالیز عددی نسبت به روش‌های انرژی و داگلاس، تخمین بسیار خوبی را برای انتخاب نوع و جرم مادهی منفجره



شکل ۱۳. تراز تنش ون میسز قالب از جنس Kirksite، مربوط به چیدمان شماره ۱۵.

شکل ۱۱. تراز تنش ون میسز قالب از جنس فولاد ریخته‌گری، مربوط به چیدمان شماره ۱.



شکل ۱۴. مقادیر تنش ون میسز قالب از جنس Kirksite، مربوط به چیدمان شماره ۱۵.



شکل ۱۲. مقادیر تنش ون میسز قالب از جنس فولاد ریخته‌گری، مربوط به چیدمان شماره ۱.

۲. خرج‌گذاری قسمت سر و وسط از یکدیگر مستقل نیستند. با ثابت نگه‌داشتن جرم خرج قسمت سر و افزایش جرم خرج قسمت وسط، میزان تغییر شکل قسمت سر نیز افزایش می‌یابد. هنگامی که فاصله‌ی دو نقطه‌ی خرج‌گذاری به اندازه کافی زیاد باشد، ممکن است از اثرات آن‌ها بر یکدیگر بتوان صرف‌نظر کرد.
۳. برای دقت ابعادی بیشتر، بهتر است از ماده‌ی منفجره‌ی TNT استفاده شود. برای قطعه‌کار فولادی، چیدمان 10° و برای قطعه‌کار آلومینیومی چیدمان 15° توصیه می‌شود که کم‌ترین خطای ابعادی را نسبت به نقشه‌ی مهندسی قطعه‌کار دارند.
۴. صافی سطح و یکنواختی شکل در قطعات فولادی بالاتر از قطعات آلومینیوم است.
۵. حساسیت فلزات به نرخ کرنش سبب افزایش تنش شکست در فلزات می‌شود. این پدیده از رابطه‌ی کوپر-سیموندز تبعیت می‌کند.
۶. کم‌ترین نرخ کرنش برابر 479° بر ثانیه (مربوط به چیدمان شماره ۱۵) و بیشترین نرخ کرنش برابر با 559° بر ثانیه (مربوط به چیدمان شماره 10°) است. هرگاه بیشترین نرخ کرنش مورد نظر باشد چیدمان 10° و هرگاه کم‌ترین نرخ کرنش مورد نظر باشد چیدمان 15° پیشنهاد می‌شود.
۷. زمان مفید شکل‌دهی در چیدمان‌های مورد قبول، تقریباً 125 میکروثانیه است. مابقی زمان تا 400 میکروثانیه صرف کوبش و کم‌کردن برگشت فزنی می‌شود.
۸. با توجه به مقایسه‌ی نتایج در جدول ۸، بهتر است برای تغییر شکل قطعه‌ی فولادی از ماده‌ی منفجره‌ی PETN، و برای تغییر شکل قطعه‌ی آلومینیومی از هر دو ماده‌ی منفجره‌ی TNT و PETN استفاده شود.
۹. آنالیز عددی نسبت به روش‌های انرژی و داگلاس، تخمین بسیار خوبی برای انتخاب جرم ماده‌ی منفجره ارائه داده است. در عمل باید مقدار ماده‌ی منفجره را قدری بیشتر از مقدار محاسبه شده در نظر گرفت. این مقدار با تجربه به دست می‌آید و بستگی به شرایط آزمایش دارد.
۱۰. انتخاب جنس قالب براساس تنش تسلیم ماده‌ی محصول و تیراژ تولید صورت گرفته است. بنابراین، برای تولید قطعه از جنس فولاد 321 قالب از جنس فولاد ریخته‌گری، و به‌منظور تولید قطعه از جنس آلومینیوم 6061 ، قالب از جنس Kirksite انتخاب شده است.
- به چیدمان شماره 10° است. این چیدمان در قسمت‌های A و B خطای ابعادی کم‌تری نسبت به آزمون عملی نیز دارد.
- با توجه به شکل‌های ۹ و ۱۰، بررسی آنالیز عددی نشان داد که در زمان 125 میکروثانیه، کرنش خمیری ثابت می‌ماند. دلیل این امر رسیدن قطعه کار به ته حفره‌ی قالب و ختم شکل‌دهی است. مابقی زمان تا 400 میکروثانیه صرف کوبش و کاهش برگشت فزنی می‌شود. بیشینه‌ی کرنش در چهار چیدمان ذکر شده در حدود $45/0^\circ$ است.
- مطابق جدول ۱۱، با فرض این که تعداد قطعه‌ی مورد نیاز 25 عدد است و تنش تسلیم مربوط به فولاد و آلومینیوم به ترتیب برابر $275/997$ و $154/994$ مگاپاسکال است، جنس ماده‌ی قالب مربوط به قطعه‌ی فولادی از نوع فولاد ریخته‌گری، و جنس قالب مربوط به قطعه‌ی آلومینیومی از نوع Kirksite انتخاب می‌شود. اگر بخواهیم از یک قالب برای تولید هر دو جنس استفاده کنیم، قالب از نوع فولاد ریخته‌گری مناسب است. با توجه به شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ نکات قابل ذکر عبارت‌اند از:
۱. مطابق انتظار، تنش بیشینه در قالب فولادی در چیدمان شماره ۱، از 504 مگاپاسکال تجاوز نمی‌کند (تنش تسلیم ماده قالب مساوی 523 مگاپاسکال است).^[۱۳] فولادهای ریخته‌شده‌ی قالب نیز چون دارای تنش تسلیم بالاتر از این مقدار هستند، انتخاب شده‌اند؛ در نتیجه قالب در شرایط مطلوبی قرار دارد. از طرفی می‌توان گفت که قسمت سر قالب نسبت به قسمت وسط حساس‌تر است. اگر قبل از تولید، در قسمت سر قالب عملیات سخت‌کاری انجام شود، نتایج بهتری در تولید فیزیکی به دست می‌آید.
 ۲. تنش بیشینه در قالب با جنس Kirksite در چیدمان شماره ۱۵، از 377 مگاپاسکال تجاوز نمی‌کند (تنش تسلیم ماده قالب مساوی 379 مگاپاسکال است).^[۱۳] انتخاب جنس Kirksite نیز به دلیل این که تنش تسلیم بالاتر از این مقدار دارد صورت گرفته است.
 ۳. نقاط بحرانی قالب در هر دو نوع جنس در قسمت سر قرار دارد. این نقاط در قسمت‌های تقریباً نیز قالب و در انتهای گودی قسمت سر قرار دارد. لازم است قبل از تولید فیزیکی، عملیات سخت‌کاری در این نقاط انجام گیرد.
 ۴. تغییرات در مقدار تنش بعد از مقدار بیشینه‌ی آن، به دلیل انعکاس موج داخل استوانه است. انفجار داخلی در مقایسه با انفجار خارجی با فاکتور شوک یکسان، دارای شدت اثر بالاتری است، که دلیل آن پدیده‌ی انعکاس موج است. در این تحقیق همان‌طور که گفته شد، مقادیر تنش حاصل از انعکاس از مقدار تنش حاصل از موج مستقیم پایین‌تر است؛ این پدیده به کم‌کردن برگشت فزنی کمک به‌سزایی می‌کند و آثار مطلوب دارد.

فهرست علائم

P_y : فشار استاتیک Pa
t : ضخامت اولیه ورق قطعه کار m
D : قطر داخلی قطعه کار m
$P_{e,x}$: فشار دینامیک معادل داگلاس Pa
K_1 : ضریب تصحیح فشار دینامیکی
w : جرم خرج Kg
E_T : انرژی حاصل از انفجار J
c : ضریب مربوط به نوع ماده‌ی منفجره
S : نصف طول استوانه m
U : انرژی کرنش تغییر شکل J
n, K_2 : ضرایب کرنش سختی فلز

نتیجه‌گیری

برای تولید ۲۵ قطعه، تولید از نوع تولید متوسط یا دسته‌ی است. لذا، برای اقتصادی بودن فرآیند توصیه می‌شود تولید از طریق شکل‌دهی انفجاری انجام گیرد. از طرف دیگر با توجه به پیچیدگی قطعه، روش انفجاری مناسب‌ترین روش برای تولید آن قطعه است. علاوه بر آن، موارد ذیل را می‌توان نتیجه‌گیری کرد:

۱. از مجموعه چیدمان‌های ذکر شده در این مقاله (جدول‌های ۵ و ۶)، چیدمان‌های ۱ و 10° برای تولید برآمدگی لوله از جنس فولاد زنگ‌نزن 321 ، و چیدمان‌های ۶ و 15° برای تولید برآمدگی لوله از جنس آلومینیوم 6061 مناسب‌اند.

r : شعاع داخلی قالب
 σ_y : تنش تسلیم فلز Pa
 λ : نصف طول خرج خطی m
 $\varepsilon_{eff}, \varepsilon_{\theta}, \varepsilon_r, \varepsilon_T$: کرنش موثر، محیطی، شعاعی، ضخامتی

Da : قطر داخلی قالب m
 A : مساحت m^2
 X : ضریب اطمینان $4 \leq X \leq 6$
 R : شعاع خارجی قالب m

پانوشت

1. Epoxy Resin
2. shock wave
3. high strain rate
4. impulsive loading
5. shell element
6. Jacobian
7. aspect ratio
8. high explosive
9. Jones-Wilkins-Lee (JWL)
10. Null material model
11. Mie-gruneisen
12. plastic kinematics
13. Cowper Symonds

منابع (References)

1. Rinehart, J.S. and Pearson, J., *Explosive Working of Metals*, Macmillan Company, New York (1963).
2. Javabvar, D. and Liaghat, G.H. "Introduction to explosive forming", Imam-hosseini University Press (2004).
3. Zohoor, M. "Metalworking", Second Edition, K.N. Toosi University of Technology Press (2008).
4. Neubauer, A. "New processes for explosive metal forming of sheet parts in batch production", *Advanced Technology of Plasticity*, **1**, pp. 379-384 (1984).
5. Baro, HG. And E.del, C. "Explosive forming" *Metallurgical Review*, **8**, (1963).
6. Pipher, F.C. "Lockheed aircraftcorp", A.M.C. Tech. Rep., 60-7-588 (1960).
7. Brayane, B.J. "Epoxy dies for explosive forming", *The Tool Engineer*, **2**, pp. 97-102 (1960).
8. Blazynski, T.Z. "Experimental and theoretical development of high-energy rate forming processes", *The Engineer*, pp. 1117-1127 (1964).
9. Mynors, D.J. and Zhang, B. "Applications and capabilities of explosive forming", *Journal of Materials Processing Technology*, **125-126**, pp. 1-25 (2002).
10. Akbari Mousavi, S.A.A.; Riahi, M. and Hagh Parast, A. "Experimental and numerical analyses of explosive free forming", *Journal of Materials Processing Technology*, **187-188**, pp. 512-516 (2007).
11. Moshksar, M.M. and Borji, S. "End effect in the explosive forming of tubes", *Journal of Materials Processing Technology*, **42**, pp. 431-441 (1994).
12. Karagiozova, D.; Nurick, G.N. and Chung Kim Yuen, S. "Energy absorption of aluminium alloy circular and square tubes under an axial explosive load", *Thin-Walled Structures*, **43**, pp. 956-982 (2005).
13. Borgi, S. "Experimental development of explosive forming for production of metallic lenses using male die", *Journal of High Energy-rate Materials, Tehran*, **5**(1), (2010).
14. Zohoor, M. and Mehdipoor, A. "Explosive compaction of tungsten powder using a converging underwater shock wave", *Journal of Materials Processing Technology*, **209**(8), pp. 4201-4206 (2009).
15. Zohoor, M. and Mehdipoor, A. "Comparative study on particles bonding of tungsten samples which were produced by powder metallurgy method and underwater explosive compaction technique", *Association of Metallurgical Engineers of Serbia, Metalurgija Journal of Metallurgy*, **13**(3), pp. 197-202 (2008).
16. Zohoor, M. and Mehdipoor, A. "Numerical simulation of underwater explosive compaction process for compaction of tungsten powder", *Journal of Materials Science Forum*, **566**, pp. 77-82 (2008).
17. Zohoor, M. and Mehdipoor, A. "Compaction of tungsten powder using an explosive compaction setup and numerical simulation of the process", *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics, ISSN: 1991-8747*, **1**(1), pp. 62-69 (2008).
18. Mehdipoor Omrani, A.; Zohoor, M.; Khalili, S.M.R. and Parvin, N. "Theoretical analysis of explosive compaction of tungsten powder", *Journal of Mechanical and Aerospace, Tehran*, **3**(1), pp.23-32 (2007).
19. Sheikhi Kohsar, A.; Zohoor, M. and Rezvani, M., *Experimental Study of Underwater Explosion on Circular Steel Plates*, International Conference on Advanced Manufacturing and Automation, Kalasalingam University, Krishnankoil-626190, Tamil Nadu, India (2009).
20. Zohoor, M. and Eshkevar, S.A., *Determination of Mass Quantity and Shape of the Explosive Materials for Manufacturing of Cylindrical Shells by Using Explosive Forming*, 10th Annual International Mechanical Engineering Conference, ISME (2002).
21. Altair Engineering, Inc. "HyperMesh advanced training", (2001).
22. *Livemore Software Technology Corporation*, "LS-DYNA keyword user's manual", **1**, V. 970 (2003).
23. Hoyt Samuel, L., *American Society of Mechanical Engineering (ASME)*, Mc Graw-Hill Book Company Inc., Newyork, Toronto, London (1967).