شبیه سازی شکل دهی انفجاری ورق از جنس آلیاژ آلومینیوم

مهدی ظهور[۱]، مسعود کریمی[۲]

چکیده

در سالهای اخیر ورق‌های آلیاژ آلومینیوم در صنعت خودروسازی کاربرد ویژه‌ای پیدا کرده‌اند. شکل‌دهی این مواد با روش‌های استاتیکی مانند هیدروفرمینگ و پرس بسیار مشکل است چرا که این ورق‌ها محدوده پلاستیک پیش از پارگی کمتری نسبت به ورق‌های فولادی معمول دارند. در این پژوهش شکل‌دهی آزاد آلیاژ آلومینیوم به عنوان مطالعه پایه‌ای بررسی شده است که با استفاده از موج شوک حاصل از انفجار در زیر آب و ماده منفجره SEP و تغییر پارامتر ضخامت ورق انجام می‌شود.

جهت معتبرسازی تحلیل عددی نرم افزار LS DYNA یکی از این ضخامت‌ها با نتایج بدست آمده در مقالات معتبر مقایسه شده که همخوانی مناسبی دارد و می‌توان از آن جهت اعتبار بخشی به آنالیز انجام شده و نتایج حاصل کمک گرفت.

کلمات کلیدی: شکل‌دهی انفجاری- ورق آلیاژ آلومینیوم- سرعت تغییر شکل- شکل‌دهی با قالب

۱- مقدمه

استفاده از ورق‌های آلیاژ آلومینیوم در صنعت اتومبیل سازی امروز رو به گسترش است. در مقایسه با آلیاژهای معمول فولاد، آلیاژ آلومینیوم در شکل‌دهی محدودیت دارد. با استفاده از روش شکل دهی انفجاری می‌توان در جهت رفع محدودیت‌های آلیاژ آلومینیوم تلاش کرد. از این رو در این پژوهش شبیه سازی عددی در مورد فرایند تغییر شکل ورق آلومینیوم با استفاده از انفجار در زیر آب انجام می‌شود.

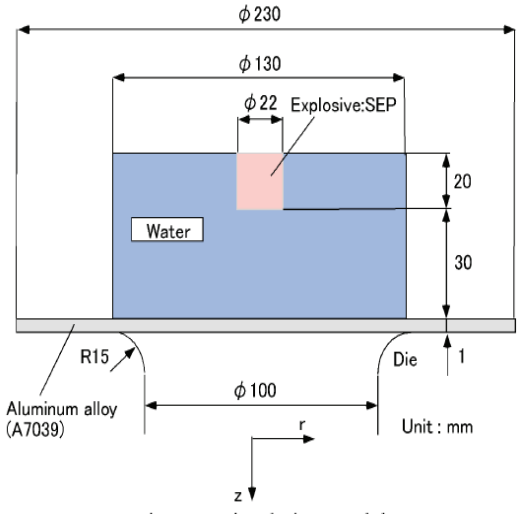
۲- روش شبیه سازی

شکل (۱) مدل شبیه سازی شکل دهی انفجاری این مقاله را نشان می‌دهد. ورق آلومینیوم دایره‌ای به قطر ۲۳۰ و ضخامت ۱ میلی متر و آلومینیوم آنیل شده A۷۰۳۹ می‌باشد. قطر حجم آب روی ورق ۱۳۰ میلی متر و ارتفاع آن ۵۰ میلی متر است و مخزن مقوایی می‌تواند به عنوان ظرف این حجم آب در نظر گرفته شود. ماده منفجره قوی SEP با قطر ۲۲ و طول ۲۰ میلی متر در نظر گرفته شده است که چگالی آن $1/31 Kg/M^3$ و فشار انفجار آن ۱۵/۹ GPa است. قطر دهانه قالب ۱۰۰ و شعاع آن ۱۵ میلی متر و فاصله ماده منفجره از ورق ۳۰ میلی متر است.

به عنوان شرایط مرزی بدنه قالب صلب در نظر گرفته می‌شود. پس از انفجار با توجه به وجود ورق گیر، ورق در راستای z مشخص شده در شکل تغییر شکل می‌دهد.

۱- استادیار دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ساخت و تولید

۲ - محقق ارشد دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ساخت و تولید



شکل (۱): مدل شبیه‌سازی

۲-۱-نحوه مدلسازی در نرم افزار LS Dyna

۲-۱-۱-مشخصات مواد وقطعات بکار رفته

جدول (۱): مشخصات مواد به کار رفته در مدلسازی

	Mat	Prop	EOS
ورق	Johnson cook	Section Shell	No
آب	Null	Section solid ALE	Gruneisen
نگه دارنده ورق	Rigid	Section Shell	No
قالب	Rigid	Section Shell	No
مواد منفجره	High explosive	Section solid ALE	JWL

۲-۱-۲- نوع مش‌بندی

۲-۱-۲-۱- آب وماده انفجاری به صورت SOLID node و ELFORM 11 مدل شده‌اند.

۲-۱-۲-۲- ورق و سنبه و نگه دارنده ورق به صورت Shell node با ELFORM 1 مدل شده‌اند.

۲-۱-۲-۳- از آنجائیکه SOLID ALE با ELFORM 11 به EOS نیاز دارد بدین منظور از EOS_Gruneisen استفاده شده است.

۲-۱-۲-۴- قطعات قالب و ورق از نوع لاگرانژی و آب و ماده انفجاری به صورت اویلری مدل شده‌اند.

۲-۲- معادلات مدلسازی

محاسبه فشار آب با معادله حالت مای – گرونایزن حل شده است [۱]:

$$P=\frac{\rho_0 c_0^2\eta}{(1-s\eta)^2}\left[1-\frac{\Gamma_0\eta}{2}\right]+\Gamma_0\rho_0 E \qquad (۱)$$

که در آن ρ_0 چگالی اولیه است. E انرژی درونی، Γ_0 پارامتر گرونایزن، $\eta=1-\frac{\rho_0}{\rho}$ و S ثوابت ماده می‌باشند. برای ماده واسطه در این مقاله که آب است، مقادیر این ثوابت در جدول (۱) آمده‌اند.

جدول (۲): پارامترهای معادله حالت مای – گرونایزن

ماده	$\rho_0\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	$C_0\left(\frac{m}{s}\right)$	S	Γ_0
آب	۱۰۰۰	۱۴۹۰	۱/۷۹	۱/۶۵

فشار در ماده منفجره با استفاده از JWL (جونز- ویلکینز- ویلیام) محاسبه می‌شود [۲].

معادله حالت بیان این معادله به صورت زیر است:

$$P=A\left[1-\frac{\omega}{VR_1}\right]\exp(-R_1V)+B\left[1-\frac{\omega}{VR_2}\right]\exp(-R_2V)+\frac{\omega E}{V} \qquad (۲)$$

که در آن A، B، R_1، R_2، C و ω پارامترهای JWL هستند. V نسبت حجم گازهای حاصل به حجم اولیه ماده منفجره پیش از انفجار است. برای ماده منفجره SEP این ثوابت در جدول (۲) آمده‌اند.

جدول (۲): پارامترهای JWL برای SEP

ω	R_2	R_1	B(GPa)	A(GPa)
۰/۲۸	۱/۱۰	۴/۳۰	۲/۳۱	۳۶۵

برای محاسبه ماده منفجره اولیه جهت سوختن حجم C-J [۳] به کار رفته است.

هنگامی که حجم ماده منفجره اولیه در محاسبه با حجم مواد حاصل از انفجار در حالت چاپمن- جوگت (C-J) برابر شود، فرض بر تجزیه کامل ماده منفجره به محصولات گازی قرار می‌گیرد. اگر V_0 حجم اولیه ماده منفجره و V_{CJ} حجم محصولات انفجار در حالت C-J باشد، نرخ واکنش ماده منفجره به صورت زیر بیان می‌شود:

$$W = 1 - \frac{V_0 - V}{V_0 - V_{CJ}} \qquad (۳)$$

$$P = (1 - W)P_g \qquad (۴)$$

که در آن W نسبت ماده منفجره واکنش نداده است. لذا قبل از واکنش W=1 و بعد از واکنش W= 0 و P_g فشار محصولات انفجار است.

فرض می شود فشار P برابر با فشاری است که از واکنش قسمتی از ماده منفجره که طی انفجار می‌سوزد حاصل شود. فشار، حجم و انرژی ماده منفجره واکنش داده با معادله حالت JWL که در بالا در مورد آن بحث شد با هم مرتبط می‌شوند.

معادله اساسی مربوط به ورق آلومینیوم در زیر بیان می‌شود که به معادله جانسون-کوک موسوم است:

$$\sigma_y = (A + B\varepsilon^n)(1 + C\ln\dot{\varepsilon})\left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)^m\right] \qquad (۵)$$

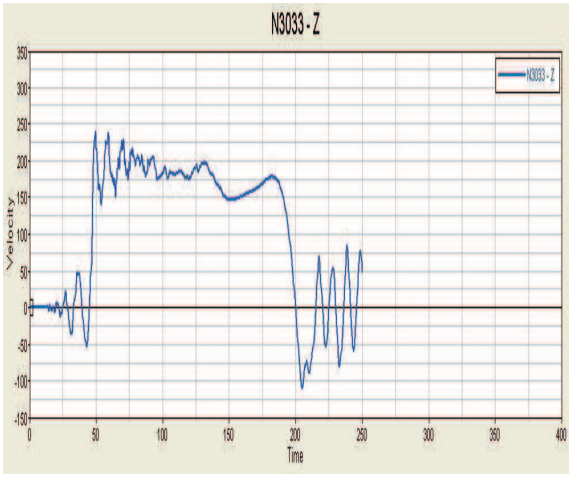
که درآن σ_y نقش معادل، ε کرنش معادل و $\dot{\varepsilon}$ نرخ کرنش معادل است. A، B، C، m و n ثوابت ماده‌اند که برای آلومینیوم A۷۰۳۹ در جدول (۳) آمده‌اند [۴].

جدول (۳): ثوابت ماده معادله جانسون-کوک برای A۷۰۳۹

m	n	C	B(MPa)	A(MPa)
۱/۰۰	۰/۴۱	۰/۰۱	۳۳	۳۳۷

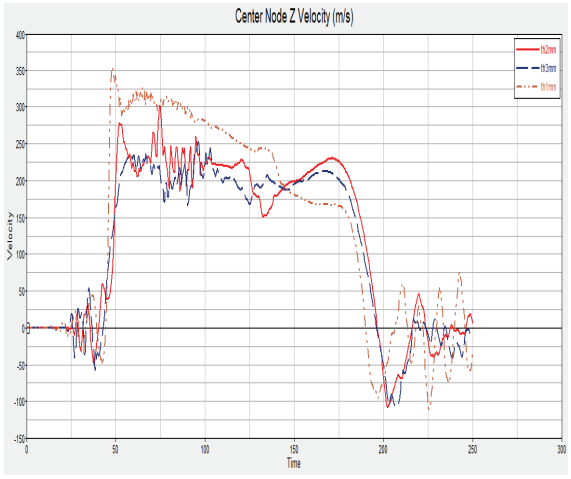
۳- آنالیز و تحلیل

آنالیز انجام شده برای شعاع لبه قالب ۳۰ میلیمتر و ضخامت ۱ میلیمتر از نظر سرعت تغییر شکل مرکز ورق در جهت Z در شکل زیر دیده می‌شود که همخوانی مناسبی با پژوهشهای انجام شده دارد [۵].



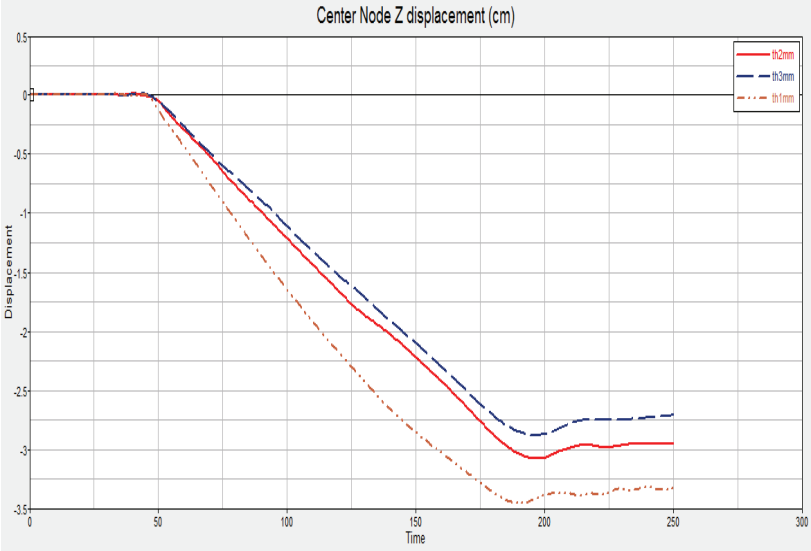
شکل (۲): سرعت تغییر شکل مرکز ورقبا شعاع لبه قالب ۳۰ میلیمتر وضخامت ۱میلیمتر

اکنون با توجه به اعتبار روش تحلیل، به بررسی آنالیز عددی ضخامتهای ۱،۲و۳ میلیمتر ورق از نظر سرعت المان مرکزی ورق در جهت Z، جابجایی آن و تنش اعمال شده به آن در طی فرایند انفجار می‌پردازیم.



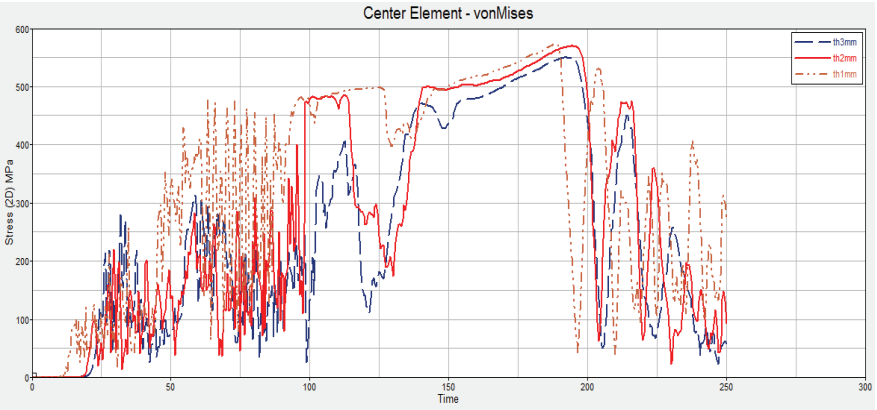
شکل (۳): مقایسه سرعت حرکت مرکز ورقبا شعاع لبه قالب ۳۰میلیمتر و ضخامتهای ۱،۲و۳ میلیمتر

چنانچه مشاهده می‌شود در محدوده زمان ۵۰ میلی‌ثانیه سرعت حرکت ورق ۱ میلیمتری بسیار بیشتر از سایر ضخامتها است و برعکس آنها که تا زمان حدود ۱۷۰میکروثانیه به صورت یکسان باقی می‌مانند،تا این زمان به صورت تقریبا خطی کاهش می‌یابد.



شکل (۴): مقایسه جابجایی ورق‌با شعاع لبه قالب ۳۰ میلیمتر وضخامتهای ۲،۱و۳ میلیمتر

در این مورد نیز ورق ۱ میلیمتری اختلاف تغییر شکل نسبتا بیشتری با سایر ضخامتها دارد.



شکل (۵): مقایسه تنش‌های اعمال شده به المان مرکزی ورق با شعاع لبه قالب ۳۰ میلیمتر وضخامتهای ۲،۱و۳ میلیمتر

چنانچه مشاهده می‌شود بین زمانهای ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌ثانیه تنش اعمال شده به ورق ۱ میلیمتری بسیار بیشتر از سایر ضخامتها است.

۴- نتیجه گیری

با توجه به اینکه برای هر سه ضخامت فرایند شکل دهی در حدود ۲۵۰ ثانیه به اتمام رسیده است می‌توان گفت فقط موج شوک اولیه ناشی از انفجار در برخورد با ورق عامل اصلی تغییر شکل بوده و موجهای ثانویه ناشی از انبساط، انقباض و برخورد حبابهای گازی ایجاد شد هدر طی انفجار نقشی در عملیات شکل‌دهی نداشته‌اند.

با توجه به رویکرد کنونی صنایع به استفاده ازورقهای آلیاژ آلومینیوم تحقیق بیشتر در این زمینه در جهت پیشرفت صنایع کشور ضروری به نظر می‌رسد.

مراجع

1- McQueen G., Marsh S. P., Taylor J. W., Fritz J. N., and Carter W. J., "The Equation of Solids from Shock Wave Studies", High-Velocity-Impact Phenomena, 2006.
2- Lee E., Finger M., and Collins W., "JWL Equation of State Coefficient for High Explosives", Lawrence Livermore National Laboratory report UCID-16189, 2004.
3- Mader C., Numerical Modeling of Detonations, University of California Press, 2008.
4- Meyers M. A., "Dynamic Behavior of Materials", Wiley-Interscience, pp. 327-328, 1994.
5- Iyama H. ,Takahashi K., Hinata T., and Itoh S.,"Numerical Simulation of Aluminum Alloy Using Underwater Shock Wave",8th International LS-DYNA Users Conference, 2004.