

بررسی اثر نرخ کرنش در ورق‌های دایروی تحت بارگذاری دینامیکی با معرفی نسبت واماندگی دینامیکی به استاتیکی

جمال زمانی^{۱*}، سید هادی معتمد الشریعتی^۲، علی کدخدای قمصری^۳، علی اصغر شیخی کوهسار^۴

۱ و ۳ - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲ - دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(تاریخ وصول: ۸۹/۵/۴، تاریخ پذیرش: ۸۹/۹/۶)

چکیده

در این مقاله اثر نرخ کرنش در رفتار ورق‌های دایروی کاملاً گیردار تحت بارگذاری دینامیک با استفاده از معیار جدیدی تحت عنوان نسبت فشار واماندگی دینامیکی به استاتیکی مورد بررسی قرار گرفته است. برای به دست آوردن این نسبت، ابتدا یک مدل ساده فرض گردیده است، سپس با استفاده از روابط تحلیلی موجود و وارد کردن اثر نرخ کرنش با به کارگیری رابطه کاپر- سایموندز و لحاظ کردن ساده‌سازی‌های ارائه شده توسط پرون و بادرا، میزان نرخ کرنش میانگین محاسبه شده است. برای بررسی تجربی اثر پدیده نرخ کرنش، یک سری آزمایش روی ورق‌های آلومینیومی آلیاژ AA5010 و فولاد St37 تحت بارگذاری انفجاری زیر آب طراحی و اجرا شده است. با به کارگیری میزان تغییر شکل ایجاد شده در نمونه‌ها و رابطه انرژی ذخیره شده در ورق ارائه شده توسط دافی، فشار واماندگی دینامیکی نمونه‌ها محاسبه و با میزان استاتیکی آن مقایسه گردیده است. نتایج نشان داد که با افزایش نرخ کرنش، میزان تنش تسلیم دینامیکی میانگین برای فولاد ۲/۳ برابر و برای آلومینیوم ۱/۵ برابر تنش تسلیم استاتیکی افزایش یافته است.

واژه‌های کلیدی: بارگذاری انفجاری، انفجار زیر آب، رفتار دینامیکی در نرخ کرنش بالا، حساسیت نسبت به نرخ کرنش.

۱- مقدمه

دادند، منکز و اپت بودند که آزمایشات خود را در سال ۱۹۷۳ بر روی تیرهایی از جنس آلومینیوم آلیاژ AA6061-T6 انجام دادند [۱]. در ادامه جونز این مساله را به صورت تحلیلی و با استفاده از مدل صلب-پلاستیک کامل مورد مطالعه قرار داد [۲]. او با استفاده از مدل بنیادین کاپر- سایموندز^۵ و ساده‌سازی‌های پرون^۶ و بادرا، اثر نرخ کرنش را وارد محاسبات خود کرد. بررسی پاسخ دینامیکی ورق‌های

یکی از پدیده‌های جالب در طبیعت، وابسته بودن رفتار یک سازه به نرخ کرنش ایجاد شده در اثر بارگذاری می‌باشد. با افزایش نرخ کرنش مواد غالباً با مقاومت در برابر جریان پلاستیک، استحکام بیشتری از خود نشان می‌دهند. این پدیده وابسته به جنس سازه بوده و از هندسه سازه مستقل می‌باشد. اولین محققانی که رفتار دینامیکی سازه را به صورت تجربی مورد بررسی قرار

* E-mail: zamani@kntu.ac.ir

5- Cowper- Symonds

6- Perrone

۱- دانشیار

۳- کارشناس ارشد.

۳- کارشناس ارشد.

۴- کارشناس ارشد

که بر اساس آن نرخ کرنش به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\dot{\epsilon} = \frac{W\dot{W}}{L^2} \quad (5)$$

با توجه به این که حجم دو سیم ثابت است می‌توان گفت:

$$A = \frac{A_0 L}{\sqrt{W^2 + L^2}} \quad (6)$$

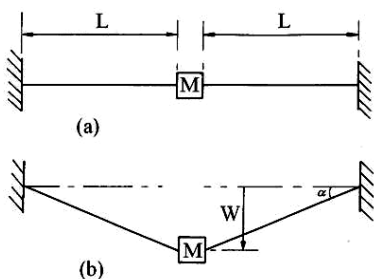
برای وارد کردن اثر نرخ کرنش در محاسبات مدل‌های متعددی ارائه گردیده است. یکی از مدل‌های رایج که در این مقاله نیز مورد استفاده قرار گرفته است رابطه کاپر-سایموندز می‌باشد:

$$\frac{\sigma'_0}{\sigma_0} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D}\right)^q \quad (7)$$

که در آن D و q ثوابتی هستند که به جنس ماده بستگی دارند. با توجه به روابط (۲)، (۵)، (۶) و (۷) خواهیم داشت:

$$M \frac{d(V^2)}{dW} = -\frac{4A_0 L \sigma_0 W}{L^2 + W^2} \left\{ 1 + \left(\frac{Wv}{DL^2}\right)^q \right\} \quad (8)$$

$$v = \frac{dW}{dt} \quad \text{که در آن}$$



شکل ۱- مدل وزنه و سیم.

با توجه به این که برای حل چنین مدل ساده‌ای احتیاج به بکارگیری روش‌های عددی وجود دارد، در مورد سازه‌های پیچیده‌تر به مشکلات بیشتری خواهیم خورد. به همین دلیل پرون و بادرا یک روش تقریبی ارائه دادند [۱۰]. ایشان با انجام یک سری آزمایشات تجربی دریافتند که نرخ کرنش ماکزیمم در سرعت $\frac{V_0}{\sqrt{2}}$ و جابه‌جایی عرضی $\frac{2}{3} W_f$ اتفاق می‌افتد. بنابراین نرخ کرنش میانگین را به صورت زیر بازنویسی کردند:

$$\dot{\epsilon} \cong \left(\frac{2W_f}{3}\right) \left(\frac{V_0}{\sqrt{2}}\right) \left(\frac{1}{2L^2}\right) \quad (9)$$

به منظور محاسبه میزان نرخ کرنش میانگین، ابتدا باید مقادیر شعاع ورق، میزان تغییرشکل ماکزیمم نهایی و سرعت اولیه ورق مشخص گردند. مقدار تغییر شکل ماکزیمم نهایی W_f از روی نمونه‌های بارگذاری شده قابل اندازه

دایروی کاملاً گیردار تحت بارگذاری حاصل از انفجار در هوا و زیرآب؛ توسط محققین مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است [۳-۶]. بررسی اثر نرخ کرنش در مواد مختلف و آلیاژهای خاص برای ارائه ضرایب مدل‌های رایج از جمله کاپر-سایموندز و جانسون-کوک نیز زمینه دیگری می‌باشد که در دهه اخیر مورد توجه قرار گرفته است [۷ و ۸]. اما این تحقیقات غالباً به صورت تجربی و توسط دستگاه میله هاپکینسون^۱ صورت پذیرفته است و نویسندگان این مقاله در مطالعات خود به موردی که در آن به بررسی تئوری و تجربی اثر نرخ کرنش روی ورق‌های دایروی گیردار به این روش پرداخته شده باشد، برخورد نکرده‌اند.

در راستای محاسبه فشار واماندگی استاتیک ورق دایروی کاملاً گیردار هاپکینسون^۲ و پراگر رابطه زیر را ارائه دادند [۹].

$$P_C \cong 11.26 \left(\frac{\sigma_0 H^2}{4R^2} \right) \quad (1)$$

که در آن H ضخامت ورق، R شعاع دایره و σ_0 تنش تسلیم ماده می‌باشند. با توجه به تابعیت رفتار سازه از نرخ بارگذاری وارد بر آن، مدل کردن پاسخ سازه در برابر بارهای دینامیکی با در نظر گرفتن اثر نرخ کرنش از مقوله‌های جذاب در زمینه پوسته و ورق می‌باشد. برای وارد کردن اثر نرخ کرنش در رفتار سازه‌های ساده پرون و بادرا مدل ساده شکل (۱) را در نظر گرفتند [۱۰]. در این مدل جرم صلب M توسط دو سیم بدون وزن به طول L و از جنس صلب-حساس به نرخ کرنش، مهار شده است. ایشان با صرف نظر کردن از تاثیر ممان خمشی و نیروهای برشی، اثر نیروهای غشایی و تغییرات هندسی را در سیم‌ها هنگامی که جرم تحت سرعت ضربه‌ای v_0 قرار می‌گیرد، بررسی کردند. معادله تعادل جرم M عبارت است از:

$$M \frac{d^2W}{dt^2} = -2\sigma'_x A \sin \alpha \quad (2)$$

که در آن A سطح مقطع سیم و σ'_x تنش جریان دینامیک می‌باشد. کرنش مهندسی در هر سیم عبارت است از:

$$\epsilon = \frac{\sqrt{L^2 + W^2} - L}{L} \quad (3)$$

برای ساده‌سازی رابطه (۳) با استفاده از بسط مک لارن $(\sqrt{1+x^2} \approx 1 + \frac{x^2}{2})$

داریم:

$$\epsilon \cong \frac{W^2}{2L^2} \quad (4)$$

1- Hopkinson
2- Hopkins

$$I = 5760 \left(W^{1/3} \right) \left(\frac{W^{1/3}}{S} \right)^{0.891} \quad (14)$$

که در آن W میزان معادل ماده منفجره C4 نسبت به TNT بر حسب kg، S فاصله از ماده منفجره بر حسب متر و I میزان ایمپالس حاصل از انفجار بر حسب Pa.sec می‌باشند. نسبت انرژی ورودی به انرژی تغییر شکل ورق معیاری برای راندمان انتقال انرژی توسط محیط واسط می‌باشد. با توجه به روابط (۹)، (۱۱) و (۱۳) میزان فشار واماندگی دینامیک ورق دایروی کاملاً گیردار قابل محاسبه می‌باشد. ضریب واماندگی فشار دینامیک به استاتیک در واقع نشان دهنده میزان حساسیت به نرخ کرنش ماده می‌باشد. هر چه مقدار این ضریب برای یک ماده بالاتر باشد، حساسیت نسبت به نرخ کرنش بالاتر بوده و به عبارت دیگر، ماده در نرخ کرنش‌های بالا مقاومت بیشتری در برابر جریان پلاستیک از خود، نشان می‌دهد.

۲- آزمایشات تجربی

در راستای بررسی تجربی رفتار ورق‌های دایروی تحت بارگذاری ضربه‌ای و نرخ کرنش بالا، یک سری آزمون‌های انفجار زیر آب طراحی و اجرا شد. آزمایشات در استخری سرپوشیده با سطح مقطع $2/9 \times 1/9$ m و عمق آب $10 \text{ Cm} \pm 2/2$ ، و در حالتی که دیواره‌های آن توسط لایه ای از حباب هوا محافظت می‌گردید، پیاده شد. آزمون‌ها بر روی ورق‌های دایروی از جنس آلومینیوم آلیاژ AA5010 و فولاد St37 با ضخامت 3 mm و قطر 17 Cm (قطر ورق در معرض انفجار) انجام شد. برای استخراج خصوصیات مکانیکی نمونه‌ها بر روی هر جنس سه تست کشش تک محوره صورت پذیرفت که نتایج آن در جدول (۱) ارائه گردیده است. آلومینیوم به کار رفته، همان گونه که در جدول (۱) مشاهده می‌شود، در مقایسه با آلیاژهای رایج آلومینیوم دارای استحکام بالا و کارسختی و انعطاف پذیری کمتری می‌باشد. بارگذاری انفجاری با استفاده از ماده منفجره C4 (1.34×TNT) و چاشنی شماره ۸ ایجاد گردید.

جدول ۱- مشخصات مکانیکی نمونه‌های مورد آزمایش به دست آمده از آزمون کشش تک محوره.

تنش تسلیم (MPa)	تنش حد نهایی (MPa)	ازدیاد طول (%)	کرنش شکست (%)
۲۱۵	۲۱۸	۷/۱	۵/۵
۲۹۰	۳۳۰	۳۳	۳۹

گیری می‌باشد. برای محاسبه سرعت ورق احتیاج به بکارگیری روابط بیشتری وجود دارد. در حین فرآیند تغییر شکل، انرژی ایجاد شده از پدیده انفجار باعث شتاب گرفتن ورق می‌شود. بر اساس قانون بقای انرژی، انرژی حاصل از انفجار به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود. ورق این انرژی جنبشی را جذب کرده و در قالب تغییر شکل پلاستیک دائم، ذخیره می‌کند. به عبارت دیگر:

$$E_{kinetic} = E_{deformation} \quad (10)$$

محاسبه میزان انرژی تغییر شکل به چندین روش ممکن می‌باشد. اولین روش توسط کول^۱ [۱۱] ارائه گردید که در ادامه توسط نوبل و آکسلی^۲ بهینه شد. در این روش فرض بر این است که میزان انرژی تغییر شکل برابر با کار انجام شده برای افزایش سطح از یک دایره در ابتدا تا یک عرقچین پس از تغییر شکل است. اما دافی^۳ از یک روش ساده سازی شده استفاده کرد. ایشان مقدار انرژی کرنشی را با انرژی حاصل از انفجار برابر قرار داد [۱۲]. آزمایشات انجام شده توسط نیوریک^۴ نشان داد، که رابطه دافی تطابق بهتری با نتایج تجربی دارد [۳]. مطابق روش دافی میزان انرژی تغییرشکل از این رابطه به دست می‌آید [۱۳]:

$$E_{def} = \frac{\pi^3 H \sigma_y W_f^2}{4(1-\nu+\nu^2)^{1/2}} \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{\pi^2} \right) \quad (11)$$

با توجه به روابط (۱۰) و (۱۱)، می‌توان میزان سرعت را از رابطه زیر به دست آورد:

$$V = \sqrt{\frac{2E_{def}}{m}} \quad (12)$$

میزان انرژی حاصل از انفجار را می‌توان از روی میزان ضربه وارد شده بر روی ورق به دست آورد:

$$E_{input} = \frac{I_{tot}^2}{2\rho h \pi R^2} \quad (13)$$

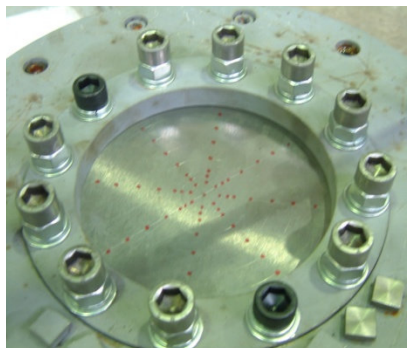
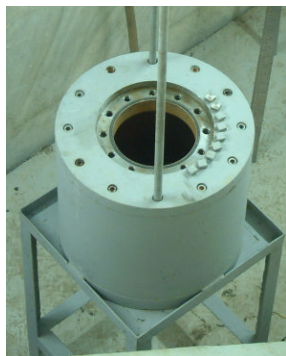
که در آن ρ چگالی ورق می‌باشد.

برای محاسبه میزان ایمپالس می‌توان از رابطه تجربی کول استفاده نمود [۸]:

- 1- Cole
- 2- Noble
- 3- Duffey
- 4- Nurick

جدول ۲- درصد وزنی عناصر موجود در آلیاژ آلومینیوم مورد استفاده (نتایج تست کوآنومتری).

عنصر	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Sb	Ti
درصد	۰/۲۶	۰/۳۶	۰/۰۰۴	۰/۲۳	۰/۳۶	۰/۰۰۲	۰/۰۰۳	۰/۰۰۲	۰/۰۱	۰/۲



شکل ۲- قید طراحی شده برای دستگاه.

ورق) تغییر می‌یافت. شرح تست‌های انجام شده در جدول (۳) ارائه گردیده- است. برای هر آزمون ابتدا ماده منفجره بر روی محور تقارن دایره و در فاصله مشخصی ثابت می‌گردید، سپس فیکسچر به کمک یک جرثقیل سقفی درون استخر قرار می‌گرفت. کمیت‌هایی که در این آزمایشات مورد اندازه‌گیری قرار گرفته‌است و به عنوان خروجی تست‌های تجربی و ورودی روابط تئوری مد نظر استفاده گردید، عبارتند از: میزان تغییر شکل ماکزیمم ورق پس از بارگذاری انفجاری، میزان وزن ماده منفجره، میزان فاصله ماده منفجره تا سطح ورق. با توجه به تقارن ورق و قرار گرفتن ماده منفجره بر روی محور مرکز ورق دایروی، آشکار است که این تغییر شکل ماکزیمم در مرکز ورق روی می‌دهد.

برای ایجاد شرایط مرزی کاملاً گیردار نمونه‌ها در دهانه محفظه‌ای بزرگ از جنس فولاد زنگ نزن با ضخامت دیواره ۵۰mm ساخته شده بود، قرار می‌گرفت (شکل ۱). برای ایجاد شرایط کاملاً گیردار از یک رینگ فولادی با ضخامت ۲۰mm و ۱۲ پیچ M1۶ به همراه واشر فنری استفاده شد. برای کاهش بازتاب‌های موج از دیواره و همچنین محافظت دیواره‌های استخر و با کمک یک پمپ یک لایه حباب ایجاد گردید. این امر با به کارگیری یک سری لوله که به فاصله متوسط ۱۶ Cm از دیواره کار گذاشته شده بودند و با ایجاد ۴۰ سوراخ با قطر ۲ mm با فاصله‌های مساوی و اعمال فشار هوای ۳ bar، میسر شد. برای ایجاد بارگذاری‌های متنوع بر روی ورق‌های دایروی کاملاً گیردار، دو پارامتر ماده منفجره (جرم ماده منفجره و میزان فاصله آن از

جدول ۳- آزمون‌های طراحی و پیاده شده برای بررسی تجربی نسبت واماندگی استاتیکی به دینامیکی.

شماره تست	جنس ورق	میزان ماده منفجره (g)	فاصله از ورق (cm)	Z (m/kg1/3)	ایمپالس (N.sec)
۱	Al5010	۱۵	۲۵	۰/۹۱۹	۳۸/۳۰۸
۲	Al5010	۲۰	۲۵	۰/۸۳۵	۴۵/۹۲۵
۳	Al5010	۳۰	۳۰	۰/۸۷۶	۵۰/۴۰۷
۴	Al5010	۳۰	۲۵	۰/۷۳۰	۵۹/۲۹۸
۵	Al5010	۳۰	۲۰	۰/۵۸۴	۷۲/۳۴۲
۶	St37	۳۰	۳۰	۰/۸۷۶	۵۰/۴۰۷
۷	St37	۳۰	۱۵	۰/۴۳۸	۹۳/۴۷۸
۸	St37	۱۵	۱۰	۰/۳۶۸	۸۶/۶۶۸
۹	St37	۳۰	۱۰	۰/۲۹۲	۱۳۴/۱۵۵
۱۰	St37	۲۰	۵	۰/۱۶۷	۱۹۲/۶۷۷

میزان تغییر شکل ماکزیمم نهایی اندازه‌گیری شده و سرعت اولیه ورق به دست آمده (۱۲) و به کمک رابطه (۹) میزان نرخ کرنش را تعیین کرده و با توجه به آن و با کمک مدل کاپر- سایموندز تنش دینامیکی را به دست آورد. برای محاسبه این نرخ کرنش میانگین، باید شعاع ورق، میزان تغییر شکل ماکزیمم نهایی و سرعت اولیه ورق مشخص و سپس دو کمیت اول با استفاده از اندازه‌گیری تعیین گردد. برای به دست آوردن میزان سرعت اولیه ورق، فرض گردیده‌است که تمام انرژی جنبشی اولیه ورق در قالب تغییر شکل پلاستیک در ورق ذخیره می‌شود. از برابر قرار دادن انرژی جنبشی و رابطه انرژی ذخیره شده در ورق دایروی ارائه شده توسط دافی، سرعت اولیه ورق به دست می‌آید [۱۳]. با استفاده از این مقادیر می‌توان نرخ کرنش میانگین را محاسبه کرد. برای محاسبه تنش دینامیکی از ضرایب پیشنهاد شده در مرجع [۱۴] $(D=3/2$ و $q=4$) استفاده گردید. با استفاده از تنش دینامیکی به دست آمده و رابطه (۱) فشار واماندگی دینامیکی و متعاقباً نسبت حد واماندگی دینامیکی به استاتیکی محاسبه می‌گردد. این نسبت به دست آمده نشان دهنده میزان حساسیت نسبت به نرخ کرنش جنس ورق می‌باشد. هر چقدر این نسبت بالاتر باشد میزان حساسیت نسبت به نرخ کرنش بالاتر می‌باشد. نتایج در جداول (۴) و (۵) آورده شده‌است.



شکل ۳- قید طراحی شده برای آزمون.

۳- نتایج و بحث

پس از انجام آزمون های انفجار، موقعیت فضایی نقاط مختلف پروفیل تغییر شکل یافته توسط دستگاه CMM تعیین گردید. با انتقال این نقاط به نرم افزار Solidworks، میزان تغییر شکل ماکزیمم ورق‌های دایروی که در مرکز ورق صورت می‌گیرد اندازه‌گیری گردید. نتایج در جدول (۳) ارائه گردیده است. با توجه به روابط (۹) تا (۱۱) و (۱۳) می‌توان نسبت فشار شکست استاتیکی به دینامیکی را محاسبه کرد. برای این امر کافی است با استفاده از

جدول ۴- نسبت فشار شکست استاتیکی به دینامیکی (ورق های آلومینیومی).

شماره تست	میزان تغییر شکل (mm)	انرژی تغییر شکل (J)	سرعت (m/sec)	انرژی ورودی (J)	راندمان محیطی وسط [*]	نرخ کرنش میانگین (1/Sec)	فشار واماندگی دینامیک (MPa)	نسبت فشار واماندگی دینامیک به استاتیک
۱	۲۵/۵۹	۱۳۳۷/۴۵	۱۱۶/۹۴	۳۷۵۱/۱۴	۳۵/۶۵	۹۷/۶۳	۱/۱۵۲	۱/۴۳۱
۲	۳۰/۲۹	۱۸۷۲/۹۸	۱۳۸/۴۲	۵۳۹۱/۰۰	۳۴/۷۶	۱۳۶/۷۹	۱/۱۹۶	۱/۴۸۵
۳	۳۱/۵۹	۲۰۳۷/۷۹	۱۴۴/۳۴	۶۴۹۴/۷۲	۳۱/۳۸	۱۴۸/۷۵	۱/۲۰۷	۱/۴۹۹
۴	۴۶/۱۴	۴۳۴۸/۳۰	۲۱۰/۸۵	۸۹۸۷/۹۷	۴۸/۳۸	۳۱۷/۴۱	۱/۳۲۲	۱/۶۴۲
۵	۶۵/۵۸	۸۷۸۲/۴۷	۲۹۹/۶۷	۱۳۳۷۶/۸۹	۶۵/۶۶	۶۴۱/۱۷	۱/۴۴۹	۱/۸۰۱

* نسبت انرژی ورودی به انرژی ذخیره شده در ورق در قالب تغییر شکل پلاستیک

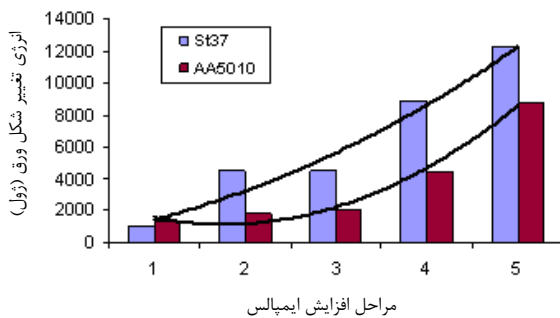
جدول ۵- نسبت فشار شکست استاتیکی به دینامیکی (ورق های فولادی).

شماره تست	میزان تغییر شکل (mm)	انرژی تغییر شکل (J)	سرعت [*] (m/sec)	انرژی ورودی (J)	راندمان محیطی وسط ^{**}	نرخ کرنش میانگین (1/Sec)	فشار واماندگی دینامیک (MPa)	نسبت فشار واماندگی دینامیک به استاتیک
۶	۲۰/۳۸۹	۱۰۵۵/۶۷	۶۵/۲۶۱	۲۵۶۲/۸۰	۴۱/۱۹	۴۳/۴۱	۱/۸۲۱	۲/۰۱۴
۷	۴۱/۹۱۰	۴۴۶۰/۲۷	۱۳۴/۱۴۰	۸۸۱۳/۵۳	۵۰/۶۱	۱۸۳/۴۱	۲/۱۲۸	۲/۳۵۳
۸	۴۲/۱۹۰	۴۵۲۰/۰۳	۱۳۵/۰۴۰	۷۵۷۶/۱۰	۵۹/۶۶	۱۸۵/۸۶	۲/۱۳۱	۲/۳۵۷
۹	۵۹/۲۳۷	۸۹۱۰/۷۶	۱۸۹/۶۰۰	۱۸۱۵۲/۸۳	۴۹/۰۹	۳۶۶/۴۱	۲/۳۰۹	۲/۵۵۴
۱۰	۶۹/۴۸۱	۱۲۲۵۹/۱۳	۲۲۲/۳۹۰	۳۷۴۴۴/۴۵	۳۲/۷۴	۵۰۴/۱۰	۲/۴۰۲	۲/۶۵۷

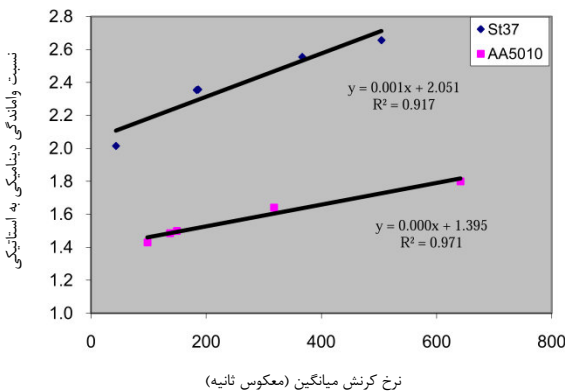
* با توجه به رابطه ۱۲

** نسبت انرژی ورودی به انرژی ذخیره شده در ورق در قالب تغییر شکل پلاستیک

مدل کرد. محور افقی در شکل (۴) بر اساس دفعات آزمایش مرتب شده است و مبین میزان انرژی لازم برای تغییر شکل انجام شده می‌باشد. از طرف دیگر همان‌گونه که در نمودار شکل (۵) مشخص می‌باشد، در هر دو ماده با افزایش میزان نرخ کرنش میانگین، نسبت حد واماندگی دینامیکی به استاتیکی به صورت خطی افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر با افزایش نرخ کرنش میزان افزایش تنش تسلیم دینامیکی به استاتیکی افزایش می‌یابد. با استفاده از رگرسیون خطی می‌توان مدل رفتار ماده را بر اساس نرخ کرنش میانگین استخراج نمود (شکل ۵). با استفاده از این مدل می‌توان رفتار ماده را در این بازه از نرخ کرنش پیش بینی کرد. همان‌گونه که از جداول مشخص است میانگین نسبت حد واماندگی دینامیکی به استاتیکی برای فولاد St37، ۲/۳ و برای آلیاژ AA5010، ۱/۵ می‌باشد.



شکل ۴- رابطه ایمپالس و انرژی ذخیره شده در ورق.



شکل ۵- رابطه نرخ کرنش میانگین و نسبت حد واماندگی دینامیکی به استاتیکی.

با توجه به این که نسبت حد واماندگی دینامیکی به استاتیکی و به عبارت دیگر حساسیت به نرخ کرنش؛ آلیاژ AA5010 کمتر است. هر چند آلیاژ AA5010 در حالت استاتیکی در مقایسه با فولاد St37 دارای استحکام قابل قبولی است، اما در نرخ‌های بارگذاری‌های بالا مثل انفجار زیرآب، میزان

از نکات قابل بحث در خصوص نتایج حاصل از آزمایش‌ها، فرآیند افزایش انرژی تغییر شکل می‌باشد، به‌صورتی که برای هر میلی‌متر تغییر شکل ورق، میزان انرژی مصرفی در سری اول آزمایش‌های در حدود ۵۲۷ ژول می‌باشد. اما با افزایش میزان تغییر شکل در مراحل بعدی میزان انرژی مصرفی بصورت تقریبی برای هر میلی‌متر جابجائی حدود ۱۰۰ ژول است و در ادامه آزمایش‌ها میزان انرژی مصرفی برای هر میلی‌متر جابجائی به ۱۵۱ و ۱۷۹ ژول رسیده است. این موضوع مبین مصرف انرژی بیشتر برای جابجائی‌های نهائی در ورق خواهد بود، که به معنی متفاوت بودن الگوی رفتاری سازه در بارگذاری‌های استاتیکی و دینامیکی می‌باشد.

البته میزان انرژی مصرفی برای هر میلی‌متر جابجائی از صفحه برای ورق‌های فولادی و آلومینیومی در کمترین میزان جابجائی برابر با ۵۲ و ۵۱ ژول می‌باشد و لکن برای بیشترین تغییر فرم‌های انجام شده میزان انرژی مصرفی برای هر میلی‌متر جابجائی در ورق فولادی و آلومینیومی برابر با ۱۷۷ و ۱۳۵ ژول می‌باشد که این موضوع کاملاً با تصورات اولیه مبتنی بر اینکه انرژی لازم برای جابجائی آلومینیوم می‌بایست کمتر از فولاد باشد، هم‌خوانی دارد. در ضمن نسبت انرژی لازم برای تغییر شکل نهائی اطلاعات مفیدی برای طراحی‌های آینده فراهم می‌نماید.

از دیگر مباحث غیر منتظره نسبت فشار واماندگی دینامیک به استاتیک می‌باشد که این نسبت همواره در فولاد بیشتر از آلومینیوم بوده که نشانگر حساسیت بیشتر فولاد به بارگذاری دینامیک یا نرخ کرنش‌های بالا می‌باشد. همچنین از آزمایش‌های انجام شده مشخص گردید که میزان راندمان محیط واسط از یک قاعده کلی تبعیت نمی‌نماید، و تغییرات در یک محدوده قابل قبول رخ نداده است، بنوعی که فرآیند افزایش انرژی تغییر شکل الزاماً باعث کاهش و یا افزایش همیشگی و مستمر راندمان محیط واسط نمی‌گردد.

البته علت ناهمگونی در برخی از نتایج، به دلیل استفاده از معادله (۱۴) که برابر با میزان ایمپالس وارده به سطح ورق است می‌باشد، چون بسیاری از محققین این کمیت را تابعی از میزان Z و برخی این کمیت را همزمان تابعی از W و Z می‌دانند. که این بحث می‌تواند به‌عنوان یک موضوع جدید در دستور کار تحقیقات آتی قرار گیرد.

با توجه به نمودار شکل (۴) می‌توان دریافت که میزان انرژی ذخیره شده در قالب تغییر شکل پلاستیک در ورق برای فولاد St37 بیشتر از AA5010 بوده است. همان‌گونه که در شکل (۴) مشخص است میزان انرژی ذخیره شده در ورق را می‌توان با رگرسیون درجه دو با دقت بسیار خوبی برحسب ایمپالس

- [4]. Jacob, N.; Nurick, G. N.; Langdon, G. S. "The Effect of Stand off Distance on the Failure of Fully Clamped Circular Mild Steel Plates Subjected to Blast Loads."; Engineering Structures 2007,
- [5]. Rajendran, R.; Narasimhan, K. "Performance Evaluation of HSLA Steel Subjected to Underwater Explosion."; Journal of Materials Engineering and Performance 2001, 10, 66-74.
- [6]. Neuberger, A.; Peles, S.; Rittel, D. "Scaling the Response of Circular Plates Subjected to Large and Close-Ranged Spherical Explosions. Part I: Air-Blast Loading." International Journal of Impact Engineering 2007, 34, 859-873.
- [7]. Smerd, R.; Winkler, S.; Salisbury, C.; Worswick, M.; Lloyd, D.; Finn, M. "High Strain Rate Tensile Tearing of Automotive Aluminum Alloy Sheet."; International Journal of Impact Engineering 2005, 32, 541-560.
- [8]. Picu, R. C.; Vincze, G.; Ozturk, F.; Gracio, J. J.; Barlat, F.; Maniatty, A. M. "Strain Rate Sensitivity of the Commercial Aluminum Alloy AA5182-O."; Materials Science and Engineering A 2005, 390, 334-343.
- [9]. Hopkins, H. G.; Prager, W. "The Load Carrying Capacities of Circular Plates."; Journal of the Mech. and Physics of Solids 1953, 2, 13.
- [10]. Perrone, N.; Bhadra, P. "Simplified Method to Account for Plastic Rate Sensitivity with Large Deformation."; Journal of Applied Mechanics 1979, 46, 811-16.
- [11]. Cole, R.; "Underwater Explosions."; NJ, Princeton University Press, USA; 1948.
- [12]. Noble, C. F.; Oxely, P. L. B., "Estimating the Charge Size in Explosive Forming of Sheet Metal."; PhD thesis, The College of Aeronautics, Cranfield, 1964.
- [13]. Duffey, T. A., "The Large Deflection Dynamic Response of Clamped Circular plates Subjected to Explosive Loading."; Sandia Research Laboratories Report, SC-RR-67-532, 1967.
- [14]. Zamani, J.; Ghamsari, A. K. "Theoretical and Experimental Analysis of Plastic response of Isotropic Circular Plates Subjected to Underwater Explosion Loading."; Material Wissenschaft und Werkstofftechnik 2008, 38, 171-175.

افزایش استحکام فولاد St37 به طور قابل توجهی بالاتر از آلیاژ AA5010 می‌باشد. این نکته باید در طراحی سازه‌های مقاوم در برابر انفجار مورد توجه قرار گیرد. در ضمن میزان راندمان محیط واسط برابر است با:

$$100 \times \left(\frac{\text{شکل تغییر انرژی - ورودی انرژی}}{\text{ورودی انرژی}} \right) - 100 = \text{راندمان محیط واسط}$$

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از نتایج آزمایشات تجربی انجام شده و مدل‌های ریاضی موجود، نرخ کرنش در ورق‌های دایروی مورد بررسی قرار گرفت، و همچنین میزان نسبت حد واماندگی دینامیکی به استاتیکی برای دو آلیاژ پرکاربرد محاسبه گردید. نسبت میانگین فشار واماندگی دینامیکی به استاتیکی برای فولاد St37، ۲/۳ و برای آلومینیوم AA5010، ۱/۵ به دست آمد. با توجه به ارائه این نسبت برای این ماده خاص، و عدم وجود نتیجه مشابه در دیگر مقالات مرتبط با این ماده، امکان مقایسه نتیجه فوق‌الذکر غیر ممکن می‌باشد. البته صحت نتایج مستلزم تأیید دیگر محققین و یا انجام آزمایشات جدید خواهد بود که در آینده می‌بایست انجام پذیرد. یکی دیگر از نتایج جالبی که در این بررسی مشاهده شد این بود که میزان انرژی ذخیره شده در ورق با مربع ایمپالس رابطه مستقیم دارد. همچنین مشخص گردید که نرخ کرنش میانگین نیز به صورت خطی با نسبت واماندگی دینامیکی به استاتیکی رابطه دارد. برای هر کدام از جنس‌های استفاده شده، یک مدل برای پیش‌بینی رفتار سازه در موارد مشابه ارائه گردید که هر کدام توانایی پیش‌بینی خوبی از خود نشان می‌دهند.

مراجع

- [1]. Menkes, S.B.; Opat H. J. "Tearing and Shear Failure in Explosively Loaded Clamped Beams."; Experimental Mechanics 1973, 13, 480-6.
- [2]. Jones, N. "Structural Impact."; Cambridge University Press, U.K 1989.
- [3]. Teeling-Smith R. G.; Nurick G. N. "The Deformation and Tearing of Thin Circular Plates Subjected to Impulsive Loads."; Int. J. Impact Eng. 1991, 11, 77-91.