



پاسخ دینامیکی سپر انفجاری ساندویچی مدور با هسته لوله‌ای تحت بار انفجار آزاد

مجتبی قمری زاده^۱، حسین خدارحمی^{۲*} و توحید میرزابابای مستوفی^۳

^۱ دانشجوی دکترا، دانشگاه جامع امام حسین (ع) و مربی، دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (ع)، تهران، ایران

^۲ استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

^۳ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ایوان کی، ایوان کی، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۰۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۳/۰۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۱۷

چکیده

ورق‌های ساندویچی سازه‌های رایجی برای جذب انرژی انفجار و استفاده به‌عنوان سپر انفجار هستند. در این مقاله عملکرد و پاسخ دینامیکی نوع جدیدی از سازه‌های ورق ساندویچی فلزی و مدور به‌عنوان جاذب انرژی انفجار با هسته لوله‌ای شعاعی غیر هم‌مرس تحت بار انفجار مورد بررسی قرار گرفته است. از روش‌های تحلیلی، تجربی و عددی برای ارزیابی پاسخ دینامیکی سازه ورق ساندویچی استفاده شده است. در روش تحلیلی پاسخ سازه به سه مرحله زمانی مجزا و متوالی تقسیم شده است؛ مرحله اول شامل تداخل سازه و سیال، مرحله دوم تراکم و له‌شدگی هسته و مرحله سوم پاسخ دینامیکی و خمش کل سازه ورق ساندویچی است. با استفاده از قوانین بنیادین علم مکانیک مانند قوانین بقاء جرم و بقاء ممنتوم، پاسخ تحلیلی تغییر شکل و معادلات حاکم بر آن فرمول‌بندی شده است و معادله‌ای به شکل بسته برای خیز سازه و مقدار بیشینه آن به‌دست آمده است. آزمایش تجربی با ساخت یک ورق ساندویچی تحت بار انفجار و به روش انفجار آزاد، به‌منظور ارزیابی و صحت‌سنجی نتایج تحلیلی و عددی انجام شده است. حل عددی در نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS و با تولید تابع فشار به روش CONWEP انجام شده است. نتایج با هم مقایسه شده‌اند و انطباق خوبی بین نتایج روش‌های مختلف وجود دارد.

کلمات کلیدی: ورق ساندویچی؛ هسته لوله‌ای؛ بار انفجاری؛ پاسخ دینامیکی.

Dynamic Response of Circular Sandwich Blast Shield with Tubular Core under Free Blast Load

M. Ghamrizadeh¹, H. Khodarahmi^{2,*}, T. Mirzababaei Mostofi³

¹ Ph.D. Student, Mech. Eng., Imam Hossein Comprehensive Univ., Tehran, Iran and Instructor, Imam Hossein University For Training Officers & Guards, Tehran, Iran.

² Prof., Mech. Eng., Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran.

³ Assist. Prof., Mech. Eng., Eyvanekey University, Eyvanekey, Iran.

Abstract

Sandwich panels are common structures for absorbing explosion energy and used as an explosion shield. In this paper, the performance and dynamic response of a new type of metal and circular sandwich sheet structures as blast energy absorbers with radial tube cores under blast load are investigated. Analytical, experimental and numerical methods have been used to evaluate the dynamic response of the sandwich panel structure. In the analytical method, the response of the structure is divided into three separate and consecutive time stages. The first stage includes the interaction of structure and fluid, the second stage is the compression and crushing of the core and the third stage is the dynamic response and bending of the whole structure of the sandwich panel. Using the basic laws of mechanics, such as the laws of mass and momentum conservation, the analytical response of the deformation and the governing equations have been formulated, and a closed equation for the rise of the structure and its maximum value has been obtained. The experiment was performed by making a sandwich panel under the blast load and by free blasting method in order to evaluate and validate the analytical and numerical results. Numerical solution is performed in ABAQUS finite element software by generating pressure function by CONWEP method. The results are compared and there is good agreement between the results in different ways.

Keywords: Sandwich Shield; Tube Core; Explosive Load; Dynamic Response.

۱- مقدمه

سازه‌های ساندویچی از گزینه‌های مورد تأکید برای جذب انرژی انفجار و استفاده به‌عنوان سپر انفجار هستند. ساختار ساندویچی با هسته لوله‌ای متقارن، جهت استفاده در سیستم‌هایی پیشنهاد می‌شود که سازه جاذب انرژی دارای ساختاری مدور و متقارن باشد. از موارد کاربرد چنین ساختارهایی می‌توان به استفاده آن‌ها در بدنه موشک‌ها، درب نفربرها و دریچه‌های دسترسی به زیرسیستم‌هایی اشاره کرد که در معرض انفجار هستند. برای مثالی در مورد کاربرد سپرهای انفجاری می‌توان به استفاده آن‌ها در سرجنگی دومرحله‌ای در موشک‌ها و راکت‌ها اشاره کرد که برای جلوگیری از آسیب و اثرات نامطلوب انفجار مرحله اول بر مرحله دوم به‌کاربرده می‌شود.

تحقیقات زیادی برای بررسی پاسخ دینامیکی ورق‌های ساندویچی مدور فلزی با هسته‌های رایجی مانند لانه‌نبوری، پروفیل‌های فلزی و فوم‌های فلزی و غیرفلزی انجام شده است. در زمینه سازه‌های ساندویچی با هسته لوله‌ای شعاعی تحقیقاتی انجام نشده است. تحقیقات کمی برای سازه‌های ساندویچی با هسته‌های لوله‌ای با چیدمان موازی انجام شده است که غالباً به روش تجربی و عددی است و به روش تحلیلی تحقیقاتی در این زمینه انجام نشده است.

تیلور گام اولیه‌ای را با ارائه مدل یک‌بعدی تداخل سازه و سیال برای انجام مطالعات تحلیلی برداشت [۱]. او با تقسیم‌بندی فرآیند تغییر شکل سازه تحت انفجار به ۳ مرحله مجزا و متوالی، روشی را برای ارائه حل‌های تحلیلی سازه‌هایی مانند تیرها و صفحات ساندویچی با هسته‌های مختلف پایه‌ریزی کرد. در برخی کتب مرجع و دانشگاهی هم آنالیز تحلیلی سازه‌های ساده‌ای مانند تیرها و ورق‌ها مورد بررسی قرار گرفته است [۲]. این روش‌ها عموماً مبتنی بر روش‌های انرژی و تشکیل لولای پلاستیک و مکانیسم هستند. مطالعاتی بر اساس روش تیلور برای آنالیز تحلیلی تیرهای با هندسه‌های ساده ساندویچی با هسته‌های مختلف تحت بارگذاری انفجار انجام شده است [۹-۳]؛ همچنین بر اساس این روش، تحقیقاتی هم برای آنالیز تحلیلی صفحات ساندویچی با هسته‌ها و هندسه‌های مختلف تحت بار انفجار انجام شده است [۱۲-۱۰]. در این تحلیل‌ها غالباً هندسه سازه به ساده‌ترین شکل ممکن و مواد تشکیل‌دهنده تیر یا

صفحه ساندویچی هم از مواد همگن و پیوسته تشکیل شده است. تحلیل و آزمایش سازه‌های مختلفی مانند تیرهای یکسر گیردار و همچنین تعیین الگوی حاکم بر تغییر شکل آن‌ها و رفتار لولای متحرک پلاستیک در برخی از گزارش‌های فنی منتشر شده است [۱۳]. بررسی تجربی تغییر شکل پلاستیک ورق‌های نازک و شناسایی و بررسی حالت‌های مختلف واماندگی ورق‌های مدور، مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته است [۱۴ و ۱۵]. در تحقیقاتی که به روش تجربی و تحلیلی توسط میرزا بابای مستوفی و همکاران انجام شده است، اثر بار انفجار محلی و یکنواخت مخلوط گاز روی رفتار دینامیکی ورق‌های مختلف مدور و مستطیلی مورد بررسی قرار گرفته است [۲۰-۱۶].

با مرور مطالعات پیشین این نتیجه حاصل شد که تحقیقاتی برای پاسخ دینامیکی ورق‌های ساندویچی مدور با هسته لوله‌ای شعاعی وجود ندارد. تحقیقات کمی در مورد پاسخ دینامیکی ورق‌های ساندویچی غیر مدور با هسته لوله‌ای موازی وجود دارد که اغلب به روش تجربی و عددی انجام شده‌اند. مهم‌ترین نوآوری‌های تحقیق حاضر، معرفی ساختار و مکانیسم جدیدی برای جذب انرژی، بررسی تحلیلی رفتار ورق‌های ساندویچی مدور با هسته لوله‌ای شعاعی غیر هم‌مرس، استخراج معادله حاکم و به دست آوردن عبارتی به‌صورت شکل بسته برای خیز ماکزیمم سازه است. تحلیل در بخش عددی نیز، با بهره‌گیری از نرم‌افزار المان محدود آباکوس و پس از صحت‌سنجی نتایج عددی به کمک نتایج آزمایشگاهی انجام شده در این تحقیق، انجام شده است. نتایج تحلیلی و عددی برای ساختارهایی با هسته‌های دارای سه چیدمان ۶، ۸ و ۱۰ لوله‌ای شعاعی، سه ضخامت رویه‌های مختلف ۱، ۱/۱ و ۱/۲ میلی‌متر و لوله‌های هسته‌ها با دو مقطع مختلف با قطرهای داخلی ۸ و ۱۰ میلی‌متر و قطرهای متناظر خارجی ۱۰ و ۱۲ میلی‌متر تحت بار انفجاری انجام شده است و نتایج باهم مقایسه شده‌اند.

۲- حل تحلیلی

برای آنالیز تحلیلی سازه ورق ساندویچی تحت بار انفجاری، کل پاسخ دینامیکی سازه به ۳ مرحله مجزا و متوالی تقسیم‌بندی می‌شود. این مراحل به ترتیب شامل مرحله تداخل سازه و سیال، مرحله تراکم و تغییر شکل هسته و

ضربه منتقل شده- در صورت تراکم ناچیز محیط سیال- می‌تواند به صورت رابطه (۳) بیان شود که رابطه بین ایمپالس منتقل شده به سازه با ایمپالس کل است. ایمپالس منتقل شده به سازه‌ای که کاملاً صلب نباشد، کمتر از مقدار ایمپالس کل است [۱].

$$I_{trans} = \gamma I \quad (3)$$

که $\gamma = \psi^{1/(1-\psi)}$ و $\psi = \rho_{air} C_{air} \theta / (\rho h)$ است. h ضخامت رویه، C_{air} سرعت انتشار موج در هوا، ρ چگالی رویه‌ها و لوله‌های هسته سازه و ρ_{air} چگالی هوا است که موج انفجار در آن حرکت می‌کند و به سازه می‌رسد [۱].

ایمپالس منتقل شده به سازه ورق ساندویچی، سرعت اولیه ثابت و یکنواختی برابر $v_0 = I_{trans} / (\rho h)$ به صفحه رویی آن می‌دهد. این سرعت مبنای محاسبه ممنتوم و انرژی جنبشی در سازه قبل از تراکم و تغییر شکل هسته است. انرژی ناشی از انفجار ماده منفجره از طریق ایمپالس حاصل از تداخل سازه و سیال که به سازه منتقل می‌شود و باعث سرعت دادن به سازه می‌شود، به معادلات تحلیلی وارد می‌شود.

۲-۲- مرحله تراکم و تغییر شکل هسته

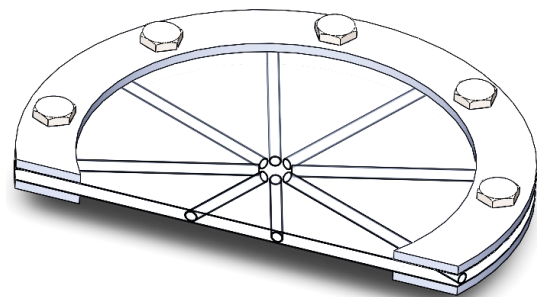
در شروع این مرحله ورق ساندویچی با هسته لوله‌ای به قطر خارجی D ، قطر داخلی d و با رویه‌هایی به جرم m_f در نظر گرفته می‌شود. این ورق ساندویچی به صورت سازه معادلی در نظر گرفته می‌شود که رویه‌های آن دارای ضخامت h و چگالی ρ و هسته یکنواخت آن دارای ضخامت D و چگالی ρ_c است.

سختی خمشی ثابت در نظر گرفته می‌شود، لذا سازه معادل سازه‌ای با چگالی ρ_c و ضخامت c_{eq} خواهد شد. با فرض ثابت بودن سختی خمشی، ضخامت هسته معادل c_{eq} از رابطه (۴) به صورت رابطه (۵) به دست می‌آید [۲۱ و ۲۲].

$$(EI)_{eq} = (E_c I_c) + 2(E_f I_f) \quad (4)$$

که I و E به ترتیب ممان اینرسی مقطع و مدول یانگ است و زیرنویس‌های c ، f و e ، به ترتیب مبین سازه معادل، هسته و رویه است. از محاسبه ممان اینرسی هسته و رویه‌ها در عبارت‌های سمت راست معادله (۴) مقدار ممان اینرسی مقطع معادل در سمت چپ همین معادله به دست می‌آید. از محاسبه ممان اینرسی معادل، ارتفاع مقطعی محاسبه می‌شود

مرحله پاسخ دینامیکی سازه ورق ساندویچی است. در مرحله تداخل سازه و سیال، سرعت اولیه سازه متأثر از ایمپالس یا شدت انفجار محاسبه می‌شود. در مرحله دوم یا مرحله تراکم و تغییر شکل هسته از قوانین بقاء ممنتوم، بقاء انرژی و بقاء جرم پارامترهایی مانند عمق له‌شدگی هسته ناشی از پیمایش موج شوک پلاستیک و زمان تراکم محاسبه خواهد شد. در مرحله سوم یا مرحله پاسخ دینامیکی سازه ورق ساندویچی، معادلات حاکم بر حرکت سازه بر اساس تشکیل لولای پلاستیک استخراج شده و پاسخ دینامیکی سازه ارزیابی می‌شود. در این مسئله ورق ساندویچی مورد بررسی قرار می‌گیرد که نمای برش خورده آن مشابه آنچه به‌طور شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است بین دو کلمپ فولادی نصب شده است و تحت بار انفجاری قرار دارد. در این مسئله لبه پیرامونی دارای شرایط مرزی گیردار است و بار انفجاری به صورت انفجار آزاد بر سازه اعمال می‌شود.



شکل ۱- نمای برش خورده سازه بین دو کلمپ

۲-۱- مرحله تداخل سازه و سیال

در این مرحله، توزیع فشار و بارگذاری ناشی از انفجار با رابطه نمایی زیر به سازه ورق ساندویچی وارد می‌شود که p_0 فشار ماکزیمم و θ ثابت زمانی است [۱]:

$$p = p_0 e^{-t/\theta} \quad (1)$$

ایمپالس کل با رابطه (۲) تعریف شده است. ضریب ۲ در این رابطه ناشی از انعکاس کامل موج فشار است. انعکاس کامل زمانی حاصل می‌شود که سازه ورق ساندویچی به صورت کاملاً صلب در نظر گرفته شود.

$$I = 2 \int_0^{\infty} p_0 e^{-t/\theta} dt = 2p_0 \theta \quad (2)$$

تیلور پاسخ یک ورق صلب را مدل‌سازی کرد که توسط یک موج انفجاری دوبعدی بارگذاری شده بود و نشان داد که

تراکم آن تلف می‌شود. میانگین کرنش ε_c در فرآیند تراکم هسته با ترکیب روابط انرژی اتلاف شده و نسبت انرژی اتلاف شده به انرژی جنبشی اولیه صفحه رویی به صورت عبارت (۱۰) به دست می‌آید [۷]:

$$\varepsilon_c = \frac{\varepsilon_D}{2} \frac{1 + \bar{\rho}}{2 + \bar{\rho}} \bar{I}^2 \quad (10)$$

که $\bar{\rho} = \rho_c c_{eq} / m_f$ و $\bar{I} = I_{trans} / \sqrt{m_f \sigma_{ny} \varepsilon_D c_{eq}}$ است. مقدار کرنش هسته سازه پس از له‌شدگی کامل هسته و تراکم نهایی آن برابر ε_D است. مقدار کرنش پس از تراکم نهایی برابر $\varepsilon_D = \Delta c / c = d / D$ در نظر گرفته می‌شود. ε_D مقدار حد بالای کرنش است و اگر در محاسبات مقدار کرنش میانگین ε_c بزرگ‌تر از مقدار کرنش تراکم نهایی ε_D به دست آید، مقدار کرنش میانگین ε_c برابر مقدار کرنش تراکم نهایی ε_D در نظر گرفته می‌شود. حال ورق ساندویچی با جرم رویه m_f بر واحد سطح و با هسته‌ای به ضخامت معادل اولیه c_{eq} و چگالی نسبی ρ_c در نظر گرفته می‌شود. سرعت اولیه صفحه رویی $v_0 = I_{trans} / (\rho h)$ و هسته و صفحه زیرین هنوز در حال سکون هستند. رفتار هسته به صورت صلب-پلاستیک ایده آل در نظر گرفته می‌شود و تا کرنش تراکم نهایی ε_D دارای استحکام تسلیم فشاری σ_{ny} است. پس از ضربه صفحه رویی به هسته، موج شوک پلاستیک با سرعت C_{pl} حرکت می‌کند. فرض می‌شود، مطابق شکل ۲ این موج در زمان t به اندازه $X(t)$ پیشروی کند. در بالادست موج شوک پلاستیک صفحه زیرین و بخش تغییر شکل نیافته هسته دارای سرعت v_u است و در پایین‌دست، بخش متراکم شده هسته دارای کرنش پس از تراکم نهایی ε_D و دارای سرعت برابر با سرعت صفحه رویی v_d است.

از قوانین بقاء ممنتوم، بقاء انرژی و بقاء جرم بین بالادست و پایین‌دست موج شوک پلاستیک به ترتیب روابط (۱۱) تا (۱۳) نتیجه می‌شود:

$$[m_f + \rho_c(c_{eq} - X)]v_u + [m_f + \rho_c X]v_d = m_f v_0 \quad (11)$$

$$\frac{1}{2} [m_f + \rho_c(c_{eq} - X)]v_u^2 + \frac{1}{2} [m_f + \rho_c X]v_d^2 + \sigma_{ny} \varepsilon_D X = \frac{1}{2} m_f v_0^2 \quad (12)$$

$$C_{pl} \varepsilon_D = v_d - v_u \quad (13)$$

که در واقع مقطع معادل است و از این رابطه ضخامت یا ارتفاع هسته معادل به صورت رابطه (۵) به دست می‌آید:

$$c_{eq} = \sqrt[3]{\frac{6\pi(D^4 - d^4) + 2bh^3 + 6bhd^2}{b}} \quad (5)$$

چگالی هسته معادل برابر $\rho_c = \beta \cdot \rho_{tube}$ در نظر گرفته می‌شود که β برابر نسبت حجم ماده هسته لوله‌ای به حجم معادل است.

$$\beta = \frac{V_p}{V_{eq}} = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{b \cdot c_{eq}} = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{\sqrt[3]{6\pi b^2(D^4 - d^4) + 2b^3 h^3 + 6b^3 h d^2}} \quad (6)$$

در نتیجه سازه معادل، سازه‌ای است با رویه‌های معادل با سازه اصلی و هسته‌ای یکنواخت با چگالی ρ_c و ضخامت هسته c_{eq} است.

در این مرحله صفحه رویی دارای سرعت v_0 است و در این شرایط هسته و صفحه زیرین هنوز در حال سکون هستند. به تدریج صفحه رویی هسته را متراکم می‌کند. تراکم هسته با تنش تسلیم فشاری σ_c باعث کاهش سرعت و شتاب منفی حرکت صفحه رویی سازه ورق ساندویچی و هم‌زمان باعث افزایش شتاب و سرعت گرفتن صفحه زیرین می‌شود. سرعت برابر همه اجزاء سازه ورق ساندویچی با استفاده از بقاء ممنتوم و نسبت انرژی اتلاف شده به انرژی جنبشی اولیه $I^2 \xi^2 / (2\rho_f h)$ صفحه رویی سازه ورق ساندویچی به دست می‌آید.

$$(2m_f + \rho_c c_{eq})v_f = m_f v_0 \quad (7)$$

v_f سرعت نهایی کل سازه ورق ساندویچی و سرعت اولیه برابر $v_0 = I_{trans} / (\rho h)$ است. سرعت نهایی v_f کل سازه ورق ساندویچی نیز عبارت است از:

$$v_f = \frac{I}{2m_f + m_c} \quad (8)$$

که m_c و m_f به ترتیب جرم رویه و هسته بر واحد سطح است.

نسبت انرژی اتلاف شده به انرژی جنبشی اولیه صفحه رویی نیز با رابطه (۹) ارائه شده است [۷]:

$$\frac{U_{lost}}{m_f v_0^2 / 2} = \frac{1 + \bar{\rho}}{2 + \bar{\rho}} \quad (9)$$

که $\bar{\rho} = \rho_c c_{eq} / m_f$ نسبت جرم هسته به جرم صفحه ورق ساندویچی و انرژی اتلاف شده هم برابر $U_{lost} = \sigma_{ny} \varepsilon_c c_{eq}$ است. این انرژی به وسیله اتلاف پلاستیک هسته در فرآیند

$$\bar{T}_C = \frac{T_C v_0}{\varepsilon_D c_{eq}} = \int_0^{\bar{X}_C} \frac{1}{\bar{v}_d - \bar{v}_u} d\bar{X} \quad (18)$$

که $\bar{X}_C = X_C / c_{eq}$ ، $\bar{v}_d = v_d / v_0$ ، $\bar{v}_u = v_u / v_0$ و $\bar{X} = X / c_{eq}$ است.

در رابطه (۱۸) پس از انجام محاسبات ریاضی عبارت $\bar{v}_d - \bar{v}_u$ به صورت زیر تابعی از \bar{X} است [۷]:

$$(\bar{v}_d - \bar{v}_u)^2 = \frac{1 + \bar{\rho}(2 - \bar{X}) + \bar{\rho}^2(1 - \bar{X})}{[1 + \bar{\rho}(1 - \bar{X})]^2(1 + \bar{\rho}\bar{X})} - \frac{2(2 + \bar{\rho})\bar{\rho}\bar{X}}{[1 + \bar{\rho}(1 - \bar{X})](1 + \bar{\rho}\bar{X})\bar{I}^2} \quad (19)$$

برای حالتی که $\bar{X} = X / c_{eq} < 1$ باشد، \bar{T}_C بر اساس رابطه (۱۸) به صورت تابعی از \bar{I} خواهد بود و $\bar{v}_d - \bar{v}_u$ نیز بر اساس رابطه (۱۹) و حد بالای انتگرال $\bar{X}_C = \varepsilon_c / \varepsilon_D$ هم بر اساس رابطه (۱۰) به شکل تابعی از \bar{I} است. اگر ایمپالس \bar{I} به اندازه کافی بزرگ باشد، موج شوک پلاستیک همه ضخامت هسته را می‌پیماید.

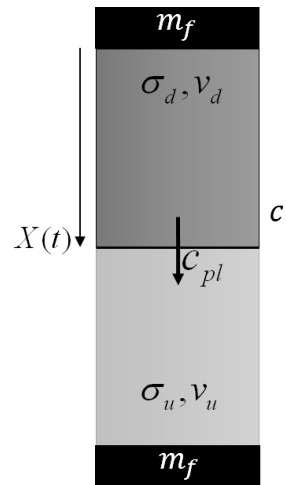
۲-۳- مرحله پاسخ دینامیکی سازه ورق ساندویچی

در پایان مرحله دوم هسته و رویه‌ها دارای سرعت برابر و یکنواخت v_f هستند که از رابطه (۸) به دست می‌آیند. مرحله نهایی پاسخ سازه از اتلاف انرژی جنبشی در مراحل ۱ و ۲ ناشی از ترکیب خمش و کشش طولی ورق ساندویچی حاصل می‌شود. مسئله حاصل یک سازه معادل به صورت قطاعی از یک ورق ساندویچی مدور به شعاع R است و با جرم میانگین m بر واحد شعاع سازه ساندویچی است.

هسته این سازه از نوع لوله‌ای با چیدمان شعاعی غیر هم‌مرس است. سطح‌رویی این ورق ساندویچی تحت سرعت اولیه عرضی v_f است. فرض می‌شود که شرایط تسلیم متأثر از نیروی طولی حاصله N و گشتاور خمشی حاصله M ایجاد می‌شود. شکل منحنی یا سطح تسلیم به شکل سطح مقطع، استحکام نسبی، هندسه هسته (لوله) و سطوح بستگی دارد. برای سادگی، منحنی تسلیم با رابطه زیر تخمین زده می‌شود.

$$|M| = M_0 \quad (20)$$

که M_0 مقدار گشتاور خمشی پلاستیک سازه است. هرگاه این رابطه تأمین شود، تسلیم حاصل شده است. با تخمین خوبی می‌توان منحنی تسلیم را محیط در دایره به صورت زیر در نظر گرفت. از عبارت زیر برای بیان معیار شکست احتمالی در سازه استفاده می‌شود.



شکل ۲- انتشار موج شوک پلاستیک یک‌بعدی در هسته

تنش فشاری در بالادست موج مرتبط با جرم و شتاب مواد بالادست آن است؛ بنابراین می‌توان نوشت:

$$\sigma_u = [m_f + \rho_c(c_{eq} - X)]\dot{v}_u \quad (14)$$

به طور مشابه تنش فشاری پایین‌دست جریان عبارت است از:

$$\sigma_d = -[m_f + \rho_c X]\dot{v}_d \quad (15)$$

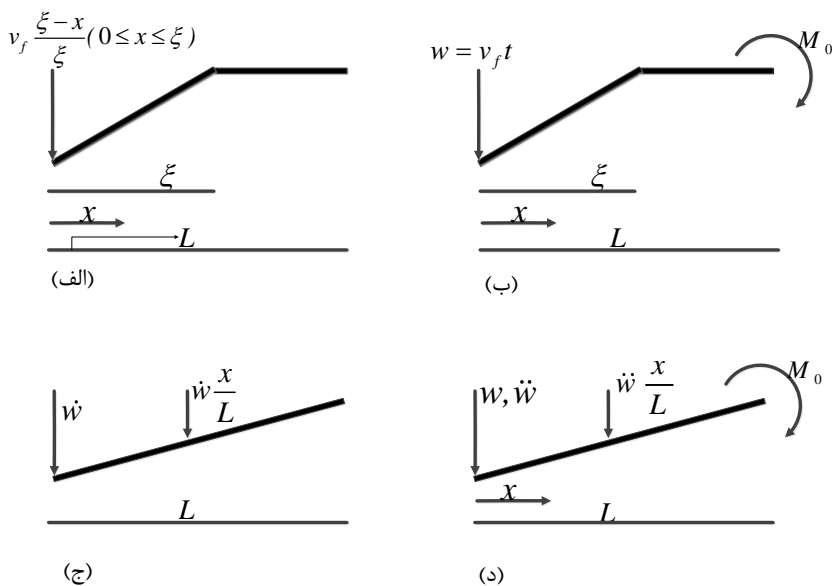
با دیفرانسیل‌گیری از رابطه قانون بقا ممنتوم (۱۱) و استفاده از روابط تنش در بالادست (۱۴) و تنش در پایین‌دست (۱۵) برای حذف \dot{v}_d و \dot{v}_u از عبارت حاصل، رابطه (۱۶) برای بقا ممنتوم برای طرفین موج شوک پلاستیک حاصل می‌شود.

$$\sigma_u - \sigma_d = \rho_c C_{pl}(v_u - v_d) \quad (16)$$

با پیشروی موج شوک پلاستیک در هسته به تدریج از سرعت آن کاسته می‌شود و بسته به سرعت اولی v_0 صفحه رویی پس از پیمایش $X(C)$ (کمتر از ضخامت هسته معادل c_{eq}) متوقف می‌شود. با توجه به اینکه $\dot{X} = C_{pl}$ است، زمان له‌شدگی T_C از رابطه بین مسافت، سرعت و زمان محاسبه می‌شود:

$$T_C = \int_0^{X_C} \frac{dX}{C_{pl}} = \int_0^{X_C} \frac{\varepsilon_D}{v_d - v_u} dX \quad (17)$$

از روابط (۱۱) و (۱۲) مقدار $(v_d - v_u)$ به صورت تابعی از X به دست می‌آید. بدین ترتیب می‌توان با جایگزینی آن در رابطه (۱۷) و پس از انتگرال‌گیری، زمان را به شکل رابطه (۱۸) محاسبه کرد.



شکل ۳- الف) پروفیل سرعت در مرحله اول، ب) نمودار جسم آزاد در مرحله اول، ج) پروفیل سرعت در مرحله دوم و د) نمودار جسم آزاد و شتاب در مرحله دوم

$$T_1 = \frac{L^2 m v_f}{3M_0} \quad (24)$$

تغییر مکان w_1 در پایان مرحله اول و در مرکز ورق ساندویچی مدور عبارت است از:

$$w_1 = v_f T_1 = \frac{L^2 m v_f^2}{3M_0} \quad (25)$$

در مرحله دوم، لولای پلاستیک در انتهای گیردار سازه معادل (لبه‌های گیردار ورق ساندویچی مدور) به وجود می‌آید و بر اساس مشاهدات تجربی پروفایل سرعت همانند شکل ۳-ج مثلی است.

معادله حرکت حاکم بر سازه معادل مطابق شکل ۳-د عبارت است از:

$$2M_0 = - \int_0^L m \ddot{w} \frac{x}{L} dx = -m \frac{L^2}{3} \ddot{w} \quad (26)$$

$$\ddot{w} = -6 \frac{M_0}{m \cdot L^2}$$

که x مختصات محوری است که از مرکز ورق ساندویچی مدور اندازه‌گیری می‌شود. با حل این معادله دیفرانسیل توابع سرعت و تغییر مکان برحسب زمان به ترتیب به صورت روابط (۲۷) و (۲۸) به دست می‌آید:

$$\dot{w} = -6 \frac{M_0}{m \cdot L^2} t + A \quad (27)$$

و

$$|M| = 0.5M_0 \quad (21)$$

بر اساس نتایج تجربی، جابجایی سازه را می‌توان یک مرحله‌ای در نظر گرفت. در این جابجایی فرض می‌شود، سازه از یک نقطه در فاصله معینی از تکیه‌گاه تشکیل لولای پلاستیک و مکانیسم می‌دهد [۱۳]. مطابق الگوی تغییر شکل پروفیل سرعت در مرحله اول، نمودار جسم آزاد در مرحله اول، پروفیل سرعت در مرحله دوم، نمودار جسم آزاد در مرحله دوم و شتاب در شکل ۳ ارائه شده است.

بر اساس نمودار جسم آزاد شکل ۳-ب از تعادل گشتاور حول تکیه‌گاه بعد از زمان t نتیجه می‌شود:

$$\left(m \cdot L \cdot \frac{v_f}{t}\right) \left(\frac{L}{2}\right) = m \cdot \frac{v_f}{t} (L - \xi) \left(\xi + \frac{L - \xi}{2}\right) + M_0 + \int_0^\xi m \cdot \frac{v_f}{t} \frac{\xi - x}{\xi} (x) dx \quad (22)$$

که مقدار ξ پس از انجام محاسبات به شرح زیر به دست می‌آید.

$$\xi = \sqrt{\frac{3M_0 t}{m \cdot v_f}} \quad (23)$$

مرحله اول تا وقتی لولای پلاستیک به تکیه‌گاه برسد ($\xi = L$) ادامه می‌یابد؛ لذا زمان لازم برای پایان مرحله اول عبارت است از:

$$M_0 = 2 \left[bh \left(\frac{D-d}{2} + \frac{h}{2} \right) + \frac{\pi \left(\frac{D+d}{2} \right)^2}{2} \frac{D-d}{2} \right] \sigma_{yd} \quad (35)$$

تنش تسلیم دینامیکی با $\sigma_d = \lambda \sigma_0$ بیان می‌شود. در رابطه تنش تسلیم دینامیکی ضریب λ از رابطه کوپر-سیمندز با رابطه (۳۶) بیان می‌شود.

$$\lambda = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D} \right)^{\frac{1}{q}} \quad (36)$$

پارامترهای D و q ثابت‌های ماده هستند و مقادیر آنها برای فولاد با نرخ کرنش متناسب با پدیده انفجار به ترتیب برابر ۴۰/۴ و ۵ است [۲۴ و ۲۵].

۳- شبیه‌سازی عددی

برای شبیه‌سازی و تحلیل به روش عددی از کد ABAQUS استفاده شده است. در این روش مدل‌سازی هندسی سازه ورق ساندویچی متشکل از اجزاء مختلف آن انجام می‌شود. مدل شبکه‌بندی می‌شود و سپس مدل مادی مواد تعریف می‌شود. با اعمال شرایط مرزی و بارگذاری انفجاری شبیه‌سازی عددی انجام و نتایج ثبت می‌شود. زمان لازم برای انجام شبیه‌سازی بر اساس مشاهده رفتار سازه در زمان‌های مختلف ارزیابی می‌شود. در این مقاله زمان ۰/۰۲۵ ثانیه، زمانی است که سازه به بیشترین تغییرمان خود می‌رسد و پس از آن شروع نوسان می‌کند. این عدد زمان لازم جهت انجام شبیه‌سازی است.

انرژی ناشی از انفجار از رویه فوقانی به رویه تحتانی به‌وسیله هسته انتقال داده می‌شود؛ لذا بین رویه فوقانی و هسته و همچنین بین هسته و رویه تحتانی اصطکاک قابل‌چشم‌پوشی نیست و ضریب اصطکاک بین اجزاء در برنامه ABAQUS تعریف می‌شود.

در این مقاله ۳ گروه به تفکیک تعداد لوله‌های هسته برحسب ضخامت رویه و ابعاد مقطع لوله‌های هسته مطابق جدول ۱ برای بررسی در نظر گرفته شده است. نتایج به روش‌های مختلف مطابق این گروه‌بندی ارائه خواهند شد.

۳-۱- مدل مادی

جهت ارزیابی اثر بارگذاری انفجار بر سازه، مشخصه‌های مکانیکی و حرارتی مواد نقش مهمی بر پاسخ نهایی دارند و تأثیر این پارامترها بر دقت نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی

$$w = -3 \frac{M_0}{m \cdot L^2} t^2 + At + B \quad (28)$$

که A و B ثابت‌های انتگرال‌گیری هستند و با استفاده از شرایط اولیه حاکم بر تغییر مکان و سرعت به‌صورت زیر به دست می‌آیند.

$$\dot{w}(T_1) = v_f \rightarrow A = v_f + 6 \frac{M_0}{m \cdot L^2} T_1 \quad (29)$$

$$w(T_1) = w_1 \rightarrow B = -3 \frac{M_0}{m \cdot L^2} T_1^2 \quad (30)$$

از جایگزینی روابط (۲۹) و (۳۰) در رابطه (۲۸) تابع نهایی تغییر مکان دینامیکی سازه برحسب زمان به‌صورت رابطه (۳۱) به دست می‌آید.

$$w = -3 \frac{M_0}{m \cdot L^2} t^2 + \left(v_f + 6 \frac{M_0}{m \cdot L^2} T_1 \right) t - 3 \frac{M_0}{m \cdot L^2} T_1^2 \quad (31)$$

بیشترین مقدار تغییر مکان w در سر آزاد سازه معادل در زمان T وقتی ایجاد می‌شود که تابع تغییر مکان نسبت به زمان اکسترمم یعنی $\dot{w}(T) = 0$ شود. مقدار ماکزیمم تغییر مکان با اکسترمم کردن تابع تغییر مکان نسبت به T به دست می‌آید.

$$\frac{\partial w}{\partial t} = 0 \rightarrow T = T_1 + \frac{L^2 m v_f}{6 M_0} \quad (32)$$

نهایتاً از جایگزینی تابع زمان (۳۲) در رابطه (۳۱) ماکزیمم تغییر مکان در وسط ورق ساندویچی با هسته لوله‌ای شعاعی غیر هم‌مرس تحت بار انفجار به‌صورت زیر به دست می‌آید.

$$w_{\max} = \frac{v_f^2 m \cdot L^2}{12 M_0} + v_f T_1 = \frac{v_f^2 m \cdot L^2}{12 M_0} + w_1 \quad (33)$$

که L برابر شعاع سازه مدور برابر ورق ساندویچی و w_1 نیز با رابطه (۲۵) تعریف شده است.

با جایگذاری مقدار v_f و w_1 به ترتیب از روابط (۸) و (۲۵) عبارت نهایی ماکزیمم تغییر مکان در وسط سازه ورق ساندویچی مسطح با هسته لوله‌ای شعاعی غیر هم‌مرس تحت بار انفجار به‌صورت رابطه (۳۴) به دست می‌آید.

$$w_{\max} = \frac{v_f^2 m \cdot L^2}{12 M_0} + \frac{v_f^2 m \cdot L^2}{3 M_0} = \frac{5}{12} \frac{m}{M_0} \left(\frac{I \cdot L}{2m_f + m_c} \right)^2 \quad (34)$$

که مقدار گشتاور پلاستیک سازه با هسته لوله‌ای پس از تراکم کامل هسته عبارت است از:

جدول ۲- خواص فولاد st12

| مدل مواد | | | | |
|----------|--------|--------|--------|---|
| A(MPa) | B(MPa) | C | n | m |
| ۲۲۱/۱۴ | ۴۶۹/۳۵ | ۰/۰۱۱۳ | ۰/۶۸۹۵ | ۱ |

با توجه به مشاهدات تجربی و انجام آزمایش‌ها در تحقیق حاضر، تغییر شکل سازه منجر به شکست و پارگی در هیچ کجای سازه حتی در تکیه‌گاه‌ها نمی‌شود؛ لذا در شبیه‌سازی عددی نیازی به بیان مدل شکست نیست.

۳-۲- بارگذاری انفجاری

مطالعه حاضر بر تغییر شکل پلاستیک و پاسخ دینامیکی ورق‌های ساندویچی با هسته لوله‌ای شعاعی تحت بارگذاری انفجاری با توزیع یکنواخت تمرکز دارد. مؤثرترین روش توصیف بار انفجار روی سازه می‌تواند تبدیل انفجار به فشار سطحی باشد. با این حال، برای مواردی که بار انفجاری در فاصله‌های بزرگ‌تر از شعاع ورق منفجر شود، برای اعمال بار روی صفحه باید از معادلات فضای اویلری-لاگرانژی و روابط کانوپ [۲۳] استفاده کرد. در روش اول، محیط اویلری از محصولات منفجره و هوا تشکیل شده و از فرمول‌های اویلری استفاده می‌کند؛ درحالی‌که نقاط مش ساختاری توسط فرمولاسیون لاگرانژی تعریف شده‌اند. این روش زمان محاسبات را به میزان زیادی افزایش می‌دهد؛ بنابراین به‌منظور کوتاه کردن زمان بارگذاری روی مدل عددی فرض می‌شود که برای شبیه‌سازی بارگذاری انفجار آزاد از تابع فشار CONWEP برای مدل‌سازی بارگذاری استفاده شده است. در تابع فشار CONWEP که با رابطه (۳۹) تعریف می‌شود، تابع فشار وابسته به زمان است و بر رویه فوقانی ورق ساندویچی اعمال می‌شود [۲۳].

$$P(t) = P_r \cos^2 \theta + P_i(1 + \cos^2 \theta - 2 \cos \theta) \quad (39)$$

که P_r و P_i ترتیب فشار انعکاسی و فشار مواجهه و θ زاویه مواجهه است.

۳-۳- هندسه و شرایط مرزی

در این پژوهش، مدل‌های سه‌بعدی ورق‌های ساندویچی با هسته لوله‌ای شعاعی در مقیاس کامل با استفاده از نرم‌افزار

جدول ۱- گروه‌بندی مدل‌های مورد مطالعه

| گروه | تعداد لوله | ضخامت رویه‌ها |
|------|------------|---------------|
| ۱ | ۴ | ۱/۲۵ |
| | ۱ | ۱/۵ |
| ۲ | ۶ | ۱/۲۵ |
| | ۱ | ۱/۵ |
| ۳ | ۸ | ۱/۲۵ |
| | ۱ | ۱/۵ |
| ۴ | ۱۰ | ۱/۲۵ |
| | ۱ | ۱/۵ |

عدد بسیار زیاد است؛ لذا در پژوهش حاضر، برای انجام شبیه‌سازی‌ها از مدل الاستو ویسکو-پلاستیک و شکست جانسون-کوک که پیش‌تر در سال ۱۹۸۵ میلادی ارائه شده، استفاده می‌شود که اثر نرخ کرنش و تغییرات دمایی را روی تنش تسلیم در نظر می‌گیرد [۲۶-۳۱]. مدل الاستو ویسکو-پلاستیک جانسون-کوک شامل اثر تنش تسلیم، جریان پلاستیک، سخت‌شوندگی نرخ کرنش، ترموالاستیسیته خطی و نرم شدن به دلیل گرمایش آدیاباتیک است. این مدل با رابطه (۳۷) بیان می‌شود.

$$\sigma_y = [A + B\bar{\epsilon}_p^n][1 + C \ln(\dot{\epsilon}^*)][1 - (T^*)^m] \quad (37)$$

که:

$$\dot{\epsilon}^* = \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0}, \quad T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (38)$$

در این مدل A تنش تسلیم اولیه، B ضریب کرنش سختی، n توان کرنش سختی، $\bar{\epsilon}_p$ کرنش پلاستیک مؤثر، $\dot{\epsilon}_p$ نرخ کرنش پلاستیک مؤثر، $\dot{\epsilon}_0$ نرخ کرنش مرجع و C ضریب نرخ کرنش است. این معادله نشان می‌دهد که مدل تسلیم از دمای اتاق T_r تا دمای ذوب T_m معتبر است. ضرایب مدل مادی جانسون-کوک که با رابطه (۳۳) تعریف شده است، برای فولاد st12 مورد استفاده در این مدل در جدول ۲ ارائه شده است [۳۲ و ۳۳].

نشان داده شده است. در این تحلیل به منظور بررسی همگرایی نتایج، استقلال نتایج از شبکه بررسی شده است.

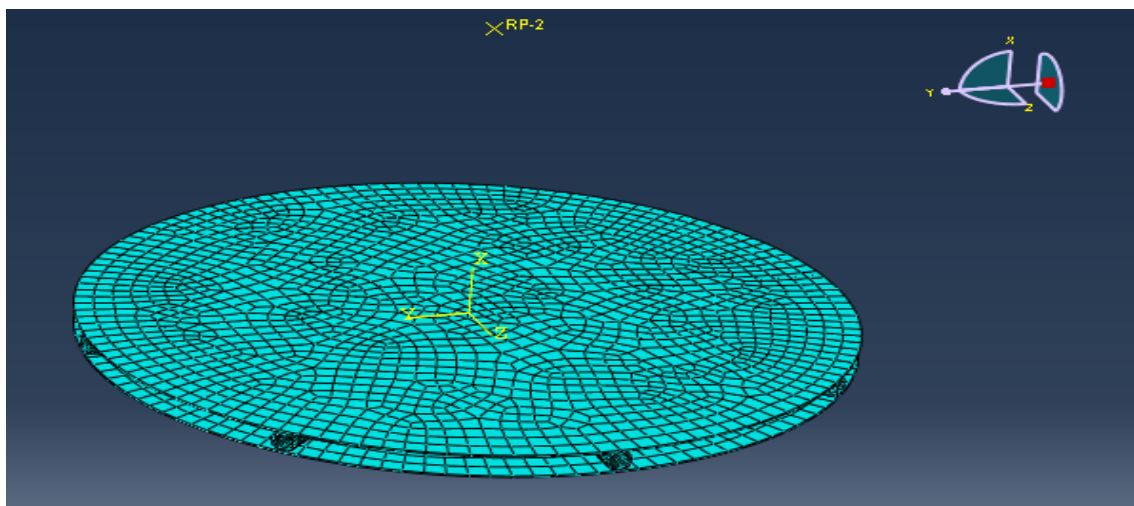
۴- بررسی نتایج

در این مقاله به روش تحلیلی و عددی مقدار خیز پلاستیک ماکزیمم در نقطه میانی سازه که در رویه تحتانی ایجاد می‌شود، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج برای ۴ نوع چیدمان لوله‌های هسته شامل، چیدمان ۴، ۶، ۸ و ۱۰ عددی و ۳ نوع رویه به ضخامت‌های ۱، ۱/۲۵ و ۱/۵ میلی‌متر با مقطع لوله‌های هسته به قطر داخلی ۸ و قطر خارجی ۱۰ میلی‌متر مطابق جدول ۳ ارائه شده است. آزمایش برای نمونه شماره ۱۰ انجام شده است و مقدار خیز ماکزیمم در این نمونه ۳۸ میلی‌متر به دست آمده است. مقایسه مقدار خیز

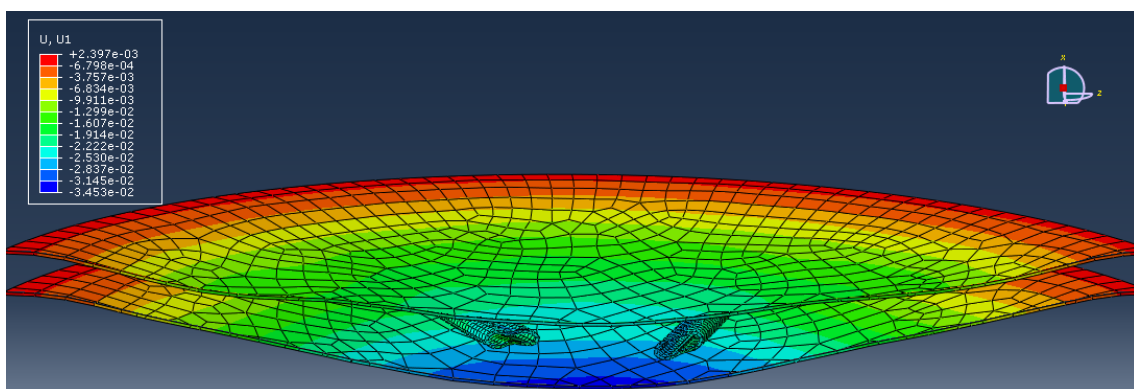
آباکوس توسعه داده شده است. شرایط مرزی برای همه سطح پیرامونی ورق ساندویچی شامل رویه‌ها و مقاطع لوله‌ای هسته به صورت گیردار تعریف شده است. ابعاد، سطح بارگذاری، تولید مش و شرایط مرزی برای یک ورق‌های ساندویچی با هسته لوله‌ای شعاعی در شکل ۴ نشان داده شده است.

۳-۴- صحت سنجی

برای بررسی نتایج شبیه‌سازی از نتایج تحلیلی بخش ۲ و آزمایش تجربی همین مقاله استفاده شده است. با توجه به انطباق خوب نتایج شبیه‌سازی با نتایج تحلیلی و تجربی مقدار ضریب مقیاسی که لازم است برای بارگذاری استفاده شود، برابر واحد در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۵ مقطع برش خورده تغییر مکان سازه ناشی از بارگذاری انفجاری



شکل ۴- مدل اجزاء محدود سازه



شکل ۵- تغییر مکان ناشی از بارگذاری انفجاری سازه

هسته‌ای با تعداد لوله ۴ عدد به مقدار ۴۹/۵ درصد اتفاق افتاده است.

جدول ۳- نتایج عددی و تحلیلی

| نمونه | تعداد لوله | ضخامت (mm) | خیز ماکزیمم (mm) | |
|-------|------------|------------|------------------|------|
| | | | تحلیلی | عددی |
| ۱ | | ۱ | ۵۴ | ۳۴/۸ |
| ۲ | ۴ | ۱/۲۵ | ۳۷ | ۳۰/۲ |
| ۳ | | ۱/۵ | ۲۷/۲۷ | ۲۵/۳ |
| ۴ | | ۱ | ۴۴ | ۳۰/۸ |
| ۵ | ۶ | ۱/۲۵ | ۳۱/۷۵ | ۳۰/۵ |
| ۶ | | ۱/۵ | ۲۳/۵۵ | ۲۵/۱ |
| ۷ | | ۱ | ۳۷/۴ | ۳۹/۵ |
| ۸ | ۸ | ۱/۲۵ | ۲۷/۴۳ | ۳۲/۳ |
| ۹ | | ۱/۵ | ۲۱ | ۲۷/۳ |
| ۱۰ | | ۱ | ۳۳ | ۳۸ |
| ۱۱ | ۱۰ | ۱/۲۵ | ۲۵ | ۳۲/۳ |
| ۱۲ | | ۱/۵ | ۱۹ | ۲۷/۶ |

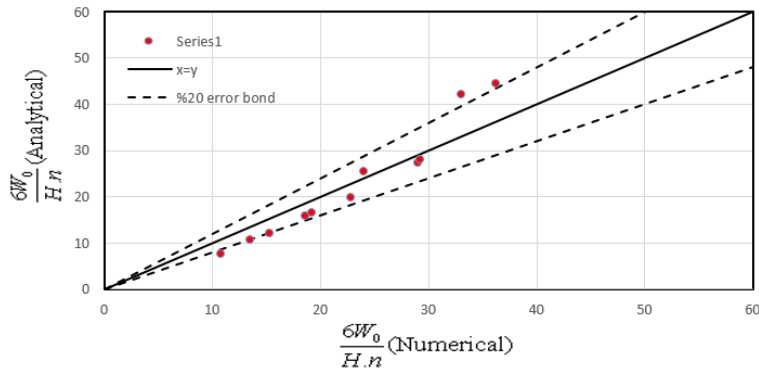
ماکزیمم منتج از آزمایش این نمونه (۳۸ میلی‌متر) با نتایج تحلیلی و عددی که به ترتیب برابر ۳۷/۴ و ۳۹/۵ میلی‌متر است، نشان از انطباق خوب نتایج تحلیلی و عددی با نتیجه تجربی دارد. ملاحظه می‌شود که نتیجه آزمون انجام شده بیشتر از حل تحلیلی و کمتر از حل عددی است. در شکل ۶ تغییر شکل رویه تحتانی و مقدار خیز ماکزیمم آن به روش تجربی نشان داده شده است.

در جدول ۳ نتایج خیز w_{max} ورق ساندویچی به روش تحلیلی و عددی برای ۱۲ نمونه با مشخصه‌های هندسی مختلف ارائه و مقایسه شده است. در شکل ۷ نتایج عددی و تحلیلی با هم مقایسه شده‌اند. در تعداد کمی از نقاط مقداری خطا بین نتایج عددی و تحلیلی مشاهده می‌شود که با تعریف مدل شکست عددی قابل بهبود است.

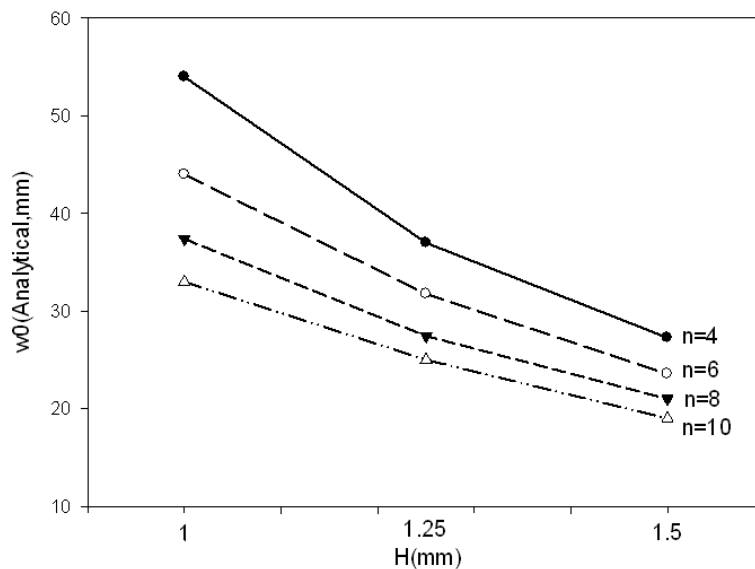
پس از مقایسه نتایج عددی و تحلیلی، برای همه نمونه‌های جدول ۳ مقدار خیز به تفکیک تعداد لوله‌ها بر حسب ضخامت رویه‌های ورق ساندویچی به روش تحلیلی به دست آمده است. مقایسه نتایج در شکل ۸ نشان داده شده است. بر اساس نتایج مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد لوله‌ها از ۴ به ۶، ۸ و ۱۰ عدد، مقدار خیز در همه ضخامت‌ها کاهش می‌یابد. با افزایش تعداد لوله‌ها از ۴ به ۱۰ عدد، مقدار خیز در ضخامت‌های ۱، ۱/۲۵ و ۱/۵ میلی‌متر به ترتیب ۳۸/۸، ۳۲/۳ و ۳۰/۳۲ درصد کاهش یافته است؛ همچنین بیشترین نرخ کاهش خیز با افزایش ضخامت از ۱ به ۱/۵ میلی‌متر با



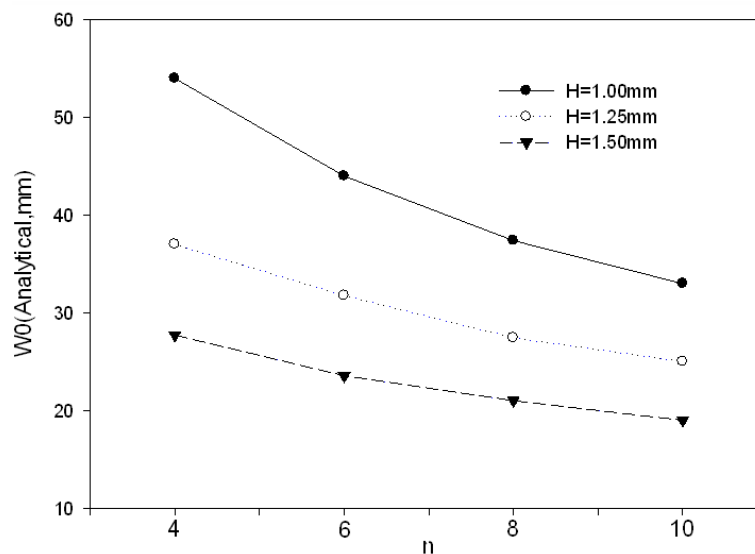
شکل ۶- تغییر شکل رویه تحتانی و مقدار خیز ماکزیمم در آزمایش تجربی



شکل ۷- مقایسه نتایج عددی و تحلیلی



شکل ۸- خیز سازه به تفکیک تعداد لوله‌ها برحسب ضخامت رویه‌های ورق ساندویچی



شکل ۹- خیز سازه به تفکیک ضخامت رویه‌ها برحسب تعداد لوله‌های هسته

۶، ۸ و ۱۰ عددی به ترتیب ۴۹/۵، ۴۶/۴، ۴۳/۸ و ۴۲/۴ درصد کاهش یافته است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله مکانیسم ساندویچی جدیدی با هسته لوله‌ای شعاعی تحت بار انفجاری مورد مطالعه تحلیلی و عددی قرار

مقدار خیز نمونه‌ها به تفکیک ضخامت رویه‌ها برحسب تعداد لوله‌های هسته ورق ساندویچی نیز به روش تحلیلی در شکل ۹ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت از ۱ به ۱/۲۵ و ۱/۵ میلی‌متر برحسب تعداد لوله‌ها، مقدار خیز کاهش می‌یابد. با افزایش ضخامت رویه‌ها از ۱ به ۱/۵ میلی‌متر، مقدار خیز در ورق ساندویچی با هسته‌های ۴،

- plates with metallic foam cores to simulated blast loading. *Int J Solid Struct* 43(7-8): 2243-2259.
- [12] McShane GJ, Radford DD, Deshpande VS, Fleck NA (2006) The response of clamped sandwich plates with lattice cores subjected to shock loading. *Eur J Mech A-Solid* 25(2): 215-229.
- [13] Baker WE (1987) Prediction and scaling of reflected impulse from strong blast waves. *Int J Mech Sci* 9(1): 45-51.
- [14] Olson MD (1991) Efficient modelling of blast loaded stiffened plate and cylindrical shell structures. *Comput Struct* 40(5): 1139-1449.
- [15] Teeling-Smith RG, Nurick GN (1991) The deformation and tearing of thin circular plates subjected to impulsive loads. *Int J Impact Eng* 11(1): 77-91.
- [16] Mostofi TM, Babaei H, Alitavoli M (2017) The influence of gas mixture detonation loads on large plastic deformation of thin quadrangular plates: Experimental investigation and empirical modelling. *Thin Walled Struct* 118:1-11.
- [17] Mostofi TM, Babaei H, Alitavoli M (2016) Theoretical analysis on the effect of uniform and localized impulsive loading on the dynamic plastic behavior of fully clamped thin quadrangular plates. *Thin-Walled Struct* 109: 367-376.
- [18] Mirzababaie Mostofi T, Babaei H, Alitavoli M (2017) Experimental and theoretical study on large ductile transverse deformations of rectangular plates subjected to shock load due to gas mixture detonation. *Strain* 53(4): e12235.
- [19] Mostofi TM, Golbaf A, Mahmoudi A, Alitavoli M, Babaei H (2018) Closed-form analytical analysis on the effect of coupled membrane and bending strains on the dynamic plastic behaviour of fully clamped thin quadrangular plates due to uniform and localized impulsive loading. *Thin-Walled Struct* 123: 48-56.
- [20] Babaei H, Mostofi TM, Alitavoli M (2020) Experimental investigation and analytical modelling for forming of circular-clamped plates by using gases mixture detonation. *Proc Inst Mech Eng-Part C J Mech Eng Sci* 234(5): 1102-1111.
- [21] Theulen JC, Peijs AA (1991) Optimization of the bending stiffness and strength of composite sandwich panels. *Compos Struct* 17(1): 87-92.
- [22] Demsetz LA, Gibson LJ (1987) Minimum weight design for stiffness in sandwich plates with rigid foam cores. *Mater Sci Eng* 85: 33-42.
- [23] Kingery CN, Bulmash G (1984) Airblast parameters from TNT spherical air burst and hemispherical surface burst. US Army Armament and Development Center, Ballistic Research Laboratory.
- گرفت. در روش تحلیلی معادلات حاکم بر رفتار ورق ساندویچی به دست آمده است و رابطه‌ای به عنوان تابع تغییر شکل و همچنین رابطه‌ای به شکل بسته برای تغییر شکل ماکزیمم سازه ورق ساندویچی معرفی شده است. نتایج نشان می‌دهد، با افزایش تعداد لوله‌ها، مقدار خیز در همه ضخامت‌ها کاهش می‌یابد؛ همچنین کمترین خیز در نمونه‌ای با بیشترین ضخامت رویه‌ها و با هسته‌ای با بیشترین تعداد لوله اتفاق می‌افتد. با افزایش ضخامت رویه‌ها در سازه‌ای با هر تعداد لوله در هسته آن، مقدار خیز کاهش می‌یابد.

۶- مراجع

- [1] Taylor GI (1963) The pressure and impulse of submarine explosion waves on plates. The scientific papers of GI Taylor 3: 287-303.
- [2] Mostofi TM, Babaei H, Alitavoli M, Lu G, Ruan D (2019) Large transverse deformation of double-layered rectangular plates subjected to gas mixture detonation load. *Int J Impact Eng* 125: 93-106.
- [3] Mousavi MV, Khoramishad H (2020) Investigation of energy absorption in hybridized fiber-reinforced polymer composites under high-velocity impact loading. *Int J Impact Eng* 146: 103692.
- [4] Zamani J, Mousavi MV, Khalili SM (2015) Numerical investigation of formation of Mach reflection in explosive free forming of confined cylindrical shells. *Modares Mechanical Engineering* 10;14(13): 131-142.
- [5] Côté F, Fleck NA, Deshpande VS (2007) Fatigue performance of sandwich beams with a pyramidal core. *Int J Fatigue* 29(8): 1402-1412.
- [6] Deshpande VS, Fleck NA (2001) Collapse of truss core sandwich beams in 3-point bending. *Int J Solid Struct* 38(36-37): 6275-6305.
- [7] Fleck NA, Deshpande VS (2004) The resistance of clamped sandwich beams to shock loading. *J Appl Mech* 71(3): 386-401.
- [8] Qiu X, Deshpande VS, Fleck NA (2003) Finite element analysis of the dynamic response of clamped sandwich beams subject to shock loading. *Eur J Mech A-Solid* 22(6): 801-814.
- [9] Radford DD, Fleck NA, Deshpande VS (2006) The response of clamped sandwich beams subjected to shock loading. *Int J Impact Eng* 32: 968-987.
- [10] Xue Z, Hutchinson JW (2004) A comparative study of impulse-resistant metal sandwich plates. *Int J of Impact Eng* 30(10): 1283-1305.
- [11] Radford DD, McShane GJ, Deshpande VS, Fleck NA (2006) The response of clamped sandwich

- Experimental studies, *J Solid Fluid Mech* 9(1): 71-83.
- [29] Mostofi TM, Babaei H (2019) Plastic deformation of polymeric-coated aluminum plates subjected to gas mixture detonation loading: Part II: Analytical and empirical modelling, *J Solid Fluid Mech* 9(2): 15-29.
- [30] Mostofi TM, Sayah-Badkhor M, Rezasefat M, Ozbakkaloglu T, Babaei H (2020) Gas mixture detonation load on polyurea-coated aluminum plates. *Thin Wall Struc* 155: 106851.
- [31] Mostofi TM, Badkhor MS, Ghasemi E (2019) Experimental investigation and optimal analysis of the high-velocity forming process of bilayer plates, *J Solid Fluid Mech* 9(3): 65-80.
- [32] Foroozan MR, Hafshjani M, Jamshidian S (2016) Simulation of St12 guillotine section of steel sheet using Johnson-cook damage model. 18th National Conference on Steel Symposium, 2016, Tehran, Iran. (In Persian)
- [33] Babaei H, Mostofi TM, Alitavoli M, Saeidinejad A (2017) Experimental investigation and dimensionless analysis of forming of rectangular plates subjected to hydrodynamic loading. *J Appl Mech Tech Phys* 58(1): 139-47.
- [24] Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Armoudli E (2017) On dimensionless numbers for the dynamic plastic response of quadrangular mild steel plates subjected to localized and uniform impulsive loading. *Proc Inst Mech Eng-Part E J Process MechEng* 231(5): 939-950.
- [25] Babaei H, Mirzababaie Mostofi T (2020) New dimensionless numbers for deformation of circular mild steel plates with large strains as a result of localized and uniform impulsive loading. *Proc Inst Mech Eng-Part L J Mater Des Appl* 234(2): 231-245.
- [26] Rezasefat M, Mirzababaie Mostofi T, Babaei H, Ziya-Shamami M, Alitavoli M (2019) Dynamic plastic response of double-layered circular metallic plates due to localized impulsive loading. *Proc Inst Mech Eng-Part L J Mater Des Appl* 233(7): 1449-1471.
- [27] Rezasefat M, Mostofi TM, Ozbakkaloglu T (2019) Repeated localized impulsive loading on monolithic and multi-layered metallic plates. *Thin Wall Struc* 144: 106332.
- [28] Mostofi TM, Babaei H (2019) Plastic deformation of polymeric-coated aluminum plates subjected to gas mixture detonation loading: Part I: