مجله مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دوره 15، شماره 11، ص‌ص 88-96

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تحلیل تئوری اثر زمان کاویتاسیون بر رفتار الاستوپلاستیک ورق دایروی مستقر زیرآب تحت بار انفجاری

حبیب رمضان نژاد آزاربنی[1]، منصور درویزه[2*]، ابوالفضل درویزه[3]، رضا انصاری[4]

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت
2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت
3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بندرانزلی، بندرانزلی
4- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت
*رشت، 41635-3756، darvizeh@guilan.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 28 خرداد 1394
پذیرش: 28 مرداد 1394
ارائه در سایت: 19 مهر 1394

کلید واژگان:
بارگذاری انفجاری
ورق دایروی
زمان کاویتاسیون
زمان تسلیم
رفتار الاستوپلاستیک

چکیده

در این مقاله رفتار الاستوپلاستیک یک ورق دایروی ایزوتروپیک از جنس مس، فولاد و آلومینیم مستقر در زیرآب با شرط مرزی گیردار تحت بار انفجاری مورد مطالعه قرارگرفته است.کاویتاسیون از پدیده‌های است که ممکن است در فرایند شکل‌دهی انفجاری ورق‌ها در زیرآب رخ دهد. با صفر شدن فشار کل ناشی از انفجار در زمان کاویتاسیون بر روی ورق، معادلات حاکم بر حرکت ورق در زمان قبل و بعد از زمان کاویتاسیون متفاوت خواهند بود. به‌این‌علت در بررسی رفتار یک جسم تحت بارگذاری انفجاری زیرآب زمان کاویتاسیون از اهمیت بالایی برخوردار است. با استفاده از روش انرژی و اصل هامیلتون معادلات حاکم بر حرکت ورق دایروی استخراج‌شده و سپس با حل دقیق ارتعاشات آزاد ورق شکل مدهای ورق محاسبه شده است. از این شکل مدها برای حل تحلیلی پاسخ اجباری ورق استفاده‌شده است. در ادامه با به‌دست‌آوردن سرعت ورق در زمان کاویتاسیون و محاسبه‌ی تنش ایجادشده و مقایسه آن با تنش تسلیم، امکان تشخیص زمان بروز کاویتاسیون در محدوده‌ی الاستیک یا پلاستیک فراهم می‌شود. با مشخص شدن زمان کاویتاسیون در محدوده‌ی الاستیک یا پلاستیک روابط میدان جابجایی و سرعت تعیین و مقادیر آن‌ها در کل دوره بارگذاری محاسبه می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که زمان کاویتاسیون از مرتبه میکروثانیه بوده و با توجه به مقادیر خرج انفجاری و محل استقرار این زمان در محدوده‌ی الاستیک یا پلاستیک رخ می‌دهد.

Analytical theory of cavitation time effect on elstoplastic response of circular underwater plate subjected to explosive loading

Habib Ramezannezhad Azarboni[1], Mansoor Darvizeh[1*], Aboolfazl Darvizeh[2], Reza Ansari[1]

1-Department of Mechanical Engineering, Guilan University, Rasht, Iran.
2-Department of Mechanical Engineering, Bandar Anzali branch, Islamic Azad University, Bandar Anzali, Iran.
*P.O.B.41635-3756 Rasht, Iran,darvizeh@guilan.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 18 June 2015
Accepted 19 August 2015
Available Online 11 October 2015

Keywords:
Explosive loading
Circular plate
Cavitationtime
Yield time
Elastoplatic response

ABSTRACT

In this paper, the elastoplastic response of copper, steel and aluminum circular plates with clamped boundary conditions subjected to underwater explosion loading is investigated. Cavitation is a phenomenon that can be occurred forplatesin the process of underwater explosive forming. The total pressure of the explosion becomes zero at the cavitation time, so that the governing equations of motion time will be different before and after the cavitation. As a result, in terms of analysis and design, the cavitation time is significant in studying the behavior of a circular plate at underwater explosive loading. By applying the energy method and based on Hamilton principle and variation methodthe equations of motion of an underwatercircular plate subjected to explosive loading are derived. Then, in order to obtain the forced response of the circular plate, the exact free vibration solution is derived to calculate the mode shapes. Then, the velocity and generated stress of plate during cavitation time are calculated and compared with the yield stress plates. Using this method, one can distinguish the occurance of cavitation with in the elastic or plastic regimes.By recognizing the time of cavitation in the range of elastic or plastic, the displacement and velocity field of plate are determined in duration of explosive loading. Results show that the cavitation time is on the order of microsecond. Depending on amount of charge mass and stand-off, the cavitation time may be occurred in elastic or plastic regime.

1- مقدمه

تحلیل اثرات بار دینامیکی لحظه‌ای در زیر آب بر روی سازه‌های مختلف و بررسی مکانیسم تغییرشکل آن‌ها همواره از مسائل موردتوجه دانشمندان و محققین بوده است. یکی از این نوع بارگذاری‌های دینامیکی بارگذاری

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

H. Ramezannezhad Azarboni, M. Darvizeh, A. Darvizeh, R. Ansari, Analytical theory of cavitation time effect on elstoplastic response of circular underwater plate subjected to explosive loading, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 15, No. 11, pp. 88-96, 2015 (In Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-24]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.11.29.5]

انفجاری است که همواره با تغییرشکل‌های بزرگ، نرخ‌های کرنش بالا، تحلیل‌های مادی و هندسی غیرخطی و برهمکنش سیال – سازه همراه است. اهمیت اصلی تحلیل رفتار دینامیکی ورق زیر آب تحت بار انفجاری بروز پدیده‌ای تحت عنوان کاویتاسیون یا خلأزایی بوده که در زمان ایجاد این پدیده فشار کل وارد بر ورق به دلیل ایجاد حباب صفر می‌شود. بنابراین معادلات حاکم بر ورق در زمان قبل و بعد از این پدیده متفاوت خواهد بود. تحقیقات تجربی و عددی زیادی در زمینه بررسی تغییرشکل ورق مستقر در آب تحت بار انفجاری توسط محققین انجام شده است. کاویتاسیون به عنوان فرایند تشکیل فاز بخار یک مایع زمانی‌که تحت فشار کاهشی در یک دمای محیط تقریبا ثابت تعریف می‌شود. علت اصلی سایش در سیستم‌هایی که برهمکنش سازه-سیال در آن‌ها وجود دارد کاویتاسیون است. به این صورت که با تشکیل حباب در زمان کاویتاسیون و ورود آن‌ها به مناطق پر فشار باعث ایجاد تنش در سطوح فلزی می‌شوند که نتیجه آن اثر پدیده خستگی در سطح فلزات و تشکیل حفره می‌باشد. بنابراین در طراحی سازه‌هایی که با سیال برهمکنش دارند در نظر گرفتن اثر کاویتاسیون از اهمیت بالایی برخوردار است. عامل حرکت تیغه پروانه و ملخ سیال‌هایی مانند هوا و آب هستند. با جریان شتاب‌دار سیال از روی تیغه‌ها نواحی کم فشار شکل به وجود می‌آید. هر چه سیال سریعتر گذر کند فشار بیشتر کاهش می‌یابد تا به فشار بخار مایع برسد و حباب‌های کوچکی تشکیل شوند که با ترکیدن آن‌ها روی سطح مکش ایجاد می‌کنند. در شکل‌دهی انفجاری زیرآب نیز امکان وقوع کاویتاسیون وجود داشته که در طی آن با ایجاد حباب شکل نهایی سازه مطلوب تحت تأثیر قرار گرفته و پروفیل مورد نظر تولید نخواهد شد. بنابراین در این فرایند زمان کاویتاسیون از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. مطالعه بر روی تأثیر بارگذاری انفجاری بر روی تغییرشکل ورق دایروی با شرایط مرزی گیردار صرف‌نظر از نرخ کرنش توسط هودسن در سال 1951 انجام شد [1]. جونز و همکارانش تغییرشکل دینامیکی ورق‌های دایره‌ای در محدوده‌ی خیزهایی که نیروهای غشایی و ممان‌های خمشی هم‌زمان بر رفتار ورق حاکم هستند، برای اولین بار در سال 1968 مورد بررسی و تحلیل قرار داد. این تحلیل تغییرشکل‌های نهایی را که توسط فلورنس در سال 1966ثبت شده بود، به‌طور قابل ملاحظه‌ای بهتر از مدل ونگ پیش‌بینی کرد [2]. با بهبود مدل دینامیکی ورق در سال1970 توسط ویرزبایکی و فلورنس [3] و در نظر گرفتن نرخ کرنش رفتار ورق دایروی مورد بررسی قرار گرفت. مدل ارائه شده سازگاری بسیار خوبی با نتایج تجربی حاصل از شکل-دهی انفجاری ورق‌های دایروی با شرایط مرزی گیردار دارد. در سال 1971، باترا و دوبی رفتار ورق‌های دایره‌ای را در محدوده‌ای که اثرات نیروهای غشایی و ممان‌های خمشی، هر دو حائز اهمیت هستند، مورد مطالعه قرارداد. در این بررسی از اثر نرخ کرنش صرف‌نظر شد ولی حرکت افقی ورق در تحلیل وارد شد [4]. نوریک و مارتین در مدل ارائه‌شده برای ورق‌های دایروی و مستطیلی جابجایی‌های قائم و جابجایی‌های افقی را باهم در نظر گرفت. با این نگرش نسبت به مدل کردن رفتار ورق‌های دایروی و مستطیلی توزیع کرنش محیطی نیز حاصل شد. این پیش‌بینی‌ها حاکی از به وجود آمدن کرنش‌های بزرگ در قسمت مرکزی و کرنش‌های کوچک در دیگر نواحی است که مطابقت کاملی با داده‌های آزمایشگاهی دارد [5]. در سال 2009 راجدران به تحلیل عددی رفتار دینامیکی ورق دایروی و مستطیلی تحت بار انفجاری زیرآب پرداخت. شبیه‌سازی انجام شده بر اساس نتایج تجربی صورت گرفت [6].

درویزه و همکارانش در سال‌های 2012 و 2014 رفتار پلاستیک ورق‌های دایروی از جنس فولاد نرم، مس و آلومینیم تحت بارگذاری ضربه‌ای را مورد بررسی قراردادند [7-8]. در این تحقیقات دو مدل تحت عنوان مدل استاتیکی و دینامیکی بیان شده که در مدل استاتیکی متغیر نرخ کرنش متوسط به عنوان یک پارامتر در نظر گرفته نشده درحالی‌که در مدل دینامیکی این متغیر در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از این تحقیق در پیش‌بینی تغییرشکل عرضی ورق با نتایج تجربی تطابق بسیار بالایی داشته است [10،9].

رمضان‌نژاد و همکارانش در سال 2014 به استخراج زمان کاویتاسیون ورق مستطیلی تحت بار انفجاری پرداختند. در این تحقیق اثرات جرم خرج انفجاری، فاصله استقرار خرج انفجاری تا نمونه مورد آزمایش، ابعاد هندسی ورق مستطیلی از جنس‌های مس و فولاد بر زمان کاویتاسیون مورد بررسی قرار گرفته است [11]. زمانی و گودرزی در سال 2014 به بررسی تجربی و عددی ماکزیمم خیز ورق‌های دایروی تحت اثر موج شوک یکنواخت و غیریکنواخت ناشی از انفجار پرداختند. راستی آزمایی نتایج تجربی با مدل شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار ال-اس داینا و نتایج محققان دیگر صورت گرفته است [12].

در این مقاله پاسخ دینامیکی الاستوپلاستیک یک ورق داروی ایزوتروپیک با شرط مرزی گیردار تحت بار انفجاری مستقر در زیرآب با در نظر گرفتن زمان کاویتاسیون به‌صورت تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته است. خلاءزایی یا کاویتاسیون ازجمله پدیده‌های مهمی است که در زمان بارگذاری دینامیکی ممکن است در این فرایند بروز دهد. با توجه به اینکه در زمان کاویتاسیون فشار کل ناشی از انفجار صفر می‌شود معادلات حاکم بر رفتار دینامیکی ورق در زمان قبل و بعد از کاویتاسیون متفاوت خواهد بود. به‌این‌علت استخراج این زمان به‌منظور بررسی دقیق رفتار دینامیکی ورق تحت بارگذاری انفجاری زیرآب اهمیت بالایی برخوردار است. برای محاسبه‌ی زمان کاویتاسیون ابتدا معادلات حاکم بر حرکت ورق دایروی استخراج شده و با حل این معادلات تابع جابجایی و سرعت ورق به دست آمد. با به دست آوردن سرعت ورق و استفاده از رابطه‌ی فشار کل زمان کاویتاسیون به دست می‌آید. همچنین با محاسبه تنش ایجاد شده در هر بازه زمانی و استفاده از معیار تسلیم وون میزز زمان تسلیم نیز محاسبه و به منظور تعیین وقوع کاویتاسیون در محدوده الاستیک یا پلاستیک با زمان کاویتاسیون مقایسه شده است. در این تحلیل مدل رفتار ماده به صورت الاستیک – کارسختی خطی در نظر گرفته‌شده است. در ادامه اثرات جرم خرج انفجاری و جنس ورق بر میدان سرعت و تغییرشکل ورق در محدوده الاستوپلاستیک مورد بررسی قرار گرفته است. این روش برای نخستین بار بر روی ورق دایروی مستقر در زیرآب تحت بار انفجاری انجام شده که در آن میدان سرعت و جابجایی برای محدوده الاستیک و پلاستیک به صورت تحلیلی استخراج شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که مقدار خرج انفجاری و جنس ورق مورد استفاده بر بروز زمان کاویتاسیون در محدوده الاستیک یا پلاستیک مؤثر بوده و در فرایند شکل‌دهی انفجاری در زیرآب میدان جابجایی و سرعت ورق باید با در نظر گرفتن اثر کاویتاسیون محاسبه شود.

2- استخراج معادلات حرکت

فرضیات اصلی نظریه‌ی خیز کوچک خمش یا آنچه نظریه‌ی کلاسیک نامیده می‌شود برای ورق نازک، الاستیک، همگن و همسانگرد که مبتنی بر هندسه‌ی تغییرشکل می‌باشد به این صورت است که 1- ضخامت ورق در مقایسه با دیگر ابعاد کوچک است. 2- سطح میانی ورق بعد از تغییر شکل خمشی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-24]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.11.29.5]

سطح میانی باقی می‌ماند. این فرض منجر به صرف‌نظر کردن از ε_{xz} و ε_{yz} بوده که z جهت ضخامت ورق است. 3- خیز سطح میانی در مقایسه با ضخامت ورق کوچک است. بنابراین شیب سطح خیزدار بسیار کوچک و مقدار مجذور شیب در مقایسه با واحد قابل صرف‌نظر است. 4- کرنش نرمال در جهت ضخامت قابل صرف‌نظر است. بنابراین تنش نرمال σ_{zz} در مقایسه با دیگر اجزای تنش ناچیز است. رابطه کرنش کل ورق دایروی را می‌توان به‌صورت رابطه‌ی (1) بیان نمود [14،13].

$$U_s = \frac{D}{2}\iint_A \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2}\right)^2 - 2(1-\nu) \left\{\frac{\partial^2 w}{\partial r^2}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2}\right) - \left[\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial w}{\partial \theta}\right)\right]^2\right\} r\mathrm{d}r\mathrm{d}\theta \quad (1)$$

در رابطه‌ی (1) U_s نشان‌دهنده‌ی انرژی پتانسیل ورق و D سفتی خمشی ورق است. همچنین هرگاه از اثر اینرسی دورانی صرف‌نظر کرده و حرکت ورق فقط به‌صورت عرضی فرض شود، انرژی جنبشی ورق به‌صورت رابطه‌ی (2) قابل‌بیان است.

$$K_t = \frac{\rho h}{2}\iint_A \left(\frac{\partial w}{\partial t}\right)^2 r\mathrm{d}r\mathrm{d}\theta \quad (2)$$

با درنظر گرفتن بار عرضی به‌صورت $f(r,t)$ اعمال‌شده بر ورق، کار غیرپایستار انجام‌شده روی ورق توسط بار خارجی به فرم رابطه‌ی (3) نوشته می‌شود.

$$W_{nc} = \iint_A f(r,t)\cdot w \cdot r\mathrm{d}r\mathrm{d}\theta \quad (3)$$

در ادامه با اعمال اصل هامیلتون طبق رابطه‌ی (4)،

$$\delta\left(\int_{t_0}^{t_1}(K_t - U_s + W_{nc})\mathrm{d}t\right) = 0 \quad (4)$$

و با قراردادن انرژی‌های جنبشی ، پتانسیل و کار نیروی خارجی، روابط (1) تا (3)، در رابطه‌ی (4) معادله‌ی حرکت ورق به فرم رابطه‌ی (5) استخراج می‌شود.

$$D\Delta^4 w = q - \rho_p h\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (5)$$

3- تعیین تابع فشار ناشی از انفجار

معادله‌ی فشار کل $P(t)$، ناشی از موج انفجار را می‌توان از به‌صورت رابطه‌ی (6) تعیین نمود [15].

$$P(t) = 2P_f\cdot e^{-\frac{t}{\theta}} - \rho_0 C_0\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} \quad (6)$$

در معادله‌ی (6)، ρ_0 چگالی سیال و C_0 سرعت صوت در سیال، P_f بیانگر فشار ماکزیمم و θ نیز معرف ثابت میرایی است. معادله‌ی (6) تا هنگامی‌که $P(t)$ صفر شود معتبر است برای تمام زمان‌های بزرگ‌تر از لحظه‌ی آغاز کاویتاسیون مقدار $P(t)$ برابر با صفر فرض می‌شود. مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که روابط مربوط به فشار ماکزیمم و ثابت زمانی میرایی را با معادلات تجربی (7) و (8) می‌توان نشان داد [15].

$$P_f = A\left(\frac{W^{\frac{1}{3}}}{R}\right)^{\alpha} \quad (7)$$

$$\theta = B\left(W^{\frac{1}{3}}\right)\left(\frac{W^{\frac{1}{3}}}{R}\right)^{\beta} \quad (8)$$

درروابط (7) و (8) W معرف وزن خرج انفجاری و R بیان‌کننده‌ی فاصله از محل قرارگیری خرج انفجاری است. ثوابت β, α, B, A برای خرج‌های انفجاری مختلف تعیین‌شده است [15].

4- حل معادله‌ی ورق تحت بار انفجاری

با توجه به روابط بیان شده می‌توان معادله دیفرانسیل حاکم بر حرکت ورق تحت بار لحظه‌ای ناشی از انفجار را به‌صورت رابطه‌ی (9) استخراج نمود [14].

$$D\Delta^4 w = 2P_m\cdot e^{-\frac{t}{\theta}} - \rho_0 C_0\frac{\partial w}{\partial t} - \rho_p h\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (9)$$

که در رابطه‌ی (9) ρ_p و ρ_0 به ترتیب چگالی ورق و چگالی سیال است. برای شروع حل ابتدا باید مد تغییرشکل را برای ورق دایروی تحت شرایط مرزی حاکم بر آن به دست آورد.

4-1- حل همگن معادله‌ی ورق دایروی

ورق الاستیک، همگن و ایزوتروپیکی را با ضخامت h، مدول یانگ E، ضریب پواسون ν و چگالی ρ در نظر بگیرید. برای استخراج مدهای تغییر شکل تابع جابجایی به‌صور ت $w(r,t) = T(t)R(r)$ در نظر گرفته می‌شود. با جایگذاری آن در معادله همگن رابطه‌ی (10) نتیجه می‌شود.

$$T(t)D\Delta^4 R(r) + \rho_0 C_0\dot{T}(t)R(r) + \gamma h\ddot{T}(t)R(r) = 0 \quad (10)$$

با تقسیم کلیه‌ی جملات بر $T(t)R(r)$ می‌توان به معادلات زیر رسید.

$$\frac{D\Delta^4 R}{R} + \rho_0 C_0\frac{\dot{T}}{T} + \gamma h\frac{\ddot{T}}{T} = 0$$
$$\frac{\Delta^4 R}{R} = \frac{-\rho_0 C_0}{D}\frac{\dot{T}}{T} - \frac{\gamma h}{D}\frac{\ddot{T}}{T} = \lambda^4 \quad (11)$$

با جداسازی معادله دیفرانسیل‌های بالا، مدهای تغییر شکل به فرم (12) نوشته می‌شوند.

$$\Delta^4 R - \lambda^4 R = 0 \quad (12)$$

این معادله فقط دارای دو پاسخ است که در $r = 0$ مقدار معین دارند. با استفاده از این حقیقت که مسئله دارای تقارن محوری است، پاسخ به‌صورت (13) نوشته می‌شود.

$$R(r) = \alpha_1 J_0(\lambda r) + \alpha_2 I_0(\lambda r) \quad (13)$$

که J_0 و I_0 به ترتیب تابع بسل از مرتبه صفر و تابع بهینه بسل از مرتبه متناظر است.

$$J_0(i\lambda r) = I_0(\lambda r) \quad (14)$$

شرایط مرزی در انتهای گیردار عبارت‌اند از:

$$R(a) = 0$$
$$\frac{\mathrm{d}R(a)}{\mathrm{d}r} = 0 \quad (15)$$

$2a$ فطر دهانه‌ی قالب است بنابراین:

$$\alpha_1 J_0(\lambda a) + \alpha_2 I_0(\lambda a) = 0$$
$$-\alpha_1\lambda J_1(\lambda a) + \alpha_2\lambda I_1(\lambda a) = 0 \quad (16)$$

که J_1 و I_1 به ترتیب تابع بسل مرتبه اول و تابع بهینه بسل مرتبه اول است. برای پاسخ‌های غیر صفر برای α_1 و α_2 لازم است که دترمینان ضرایب برابر صفر باشد.

$$\begin{vmatrix} J_0(\lambda a) & I_0(\lambda a) \\ -J_1(\lambda a) & I_1(\lambda a)\end{vmatrix} = 0 \quad (17)$$

از بسط دترمینان معادله (17) حاصل می‌شود.

$$J_0(\lambda a)I_1(\lambda a) = -J_1(\lambda a)I_0(\lambda a) \quad (18)$$

پاسخ‌های λ_n از این معادله عبارت‌اند از

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-24]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.11.29.5]

$$\lambda_n = n\frac{\pi}{a} \quad , n = 0,1,2,\dots,\infty$$
$$\alpha_2 = \frac{-\mathrm{J}_0(\lambda_n a)}{\mathrm{I}_0(\lambda_n a)}\alpha_1 \tag{19}$$

بنابراین مدهای تغییر شکل با رابطه‌ی (20) بیان می‌شود.

$$R_n(r) = \mathrm{J}_0(\lambda_n r) - \frac{\mathrm{J}_0(\lambda_n a)}{\mathrm{I}_0(\lambda_n a)}\mathrm{I}_0(\lambda_n r) \tag{20}$$

که برای α_1 مقدار دلخواه واحد در نظر گرفته‌شده است. معادله دیفرانسیل کامل برای حرکت ورق دایروی عبارت است از

$$\Delta^4 w = \frac{2P_m \cdot e^{-\frac{t}{\theta}}}{D} - \frac{\rho_0 C_0}{D}\frac{\partial w}{\partial t} - \frac{\rho_p h}{D}\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \tag{21}$$

2-4-حل ناهمگن ورق دایروی

به منظور حل معادله‌ی ناهمگن ورق دایروی تحت بار انفجاری که در رابطه‌ی (21) بیان شده است با استفاده از روش جداسازی متغیرها حلی به صورت رابطه (22) در نظر می‌شود.

$$w(r,t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n(t)\cdot R_n(r) \tag{22}$$

که در معادله‌ی (22)، $R_n(r)$ توابع یا مدهای تغییرشکل است که از حل معادله‌ی همگن به‌دست می‌آید و تابع $A_n(t)$ باید با جایگزین نمودن معادله (22) در معادله حاکم بر حرکت ورق ارائه شده در معادله (9) تعیین شود.

$$\sum_{n=0}^{\infty} A_n(t)\cdot\Delta^4 R_n(r) + \frac{\rho_0 C_0}{D'}\sum_{n=0}^{\infty}\dot{A}_n(t)\cdot R_n(r) + \frac{\rho_p h}{D}\times \sum_{n=0}^{\infty}\ddot{A}_n(t)\cdot R_n(r) = \frac{2P_m\cdot e^{-\frac{t}{\theta}}}{D} \tag{23}$$

که در معادله‌ی (23)

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}A_n(t) = \dot{A}_n(t)$$
$$\frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}t^2}A_n(t) = \ddot{A}_n(t) \tag{24}$$

با جایگذاری $\Delta^4 R = \lambda^4 R$ در معادله‌ی (23)، معادله (25) برای استخراج $A_n(t)$ حاصل می‌شود.

$$\sum_{n=0}^{\infty} A_n(t)\lambda_n{}^4 R_n + \sum_{n=0}^{\infty}\frac{\rho_0 C_0}{D}\dot{A}_n(t)R_n + \sum_{n=0}^{\infty}\frac{\rho_p h}{D}\ddot{A}_n(t)R_n = \frac{2P_m\cdot e^{-\frac{t}{\theta}}}{D} \tag{25}$$

می‌توان ثابت نمود که:

$$\int_0^a r\cdot R_n\cdot R_k \mathrm{d}r = 0 \qquad , n\neq k = a^2\mathrm{J}_0{}^2(\lambda_n a)$$
$$\int_0^a r\cdot R_n \mathrm{d}r = \frac{2a}{\lambda_n}\mathrm{J}_1(\lambda_n a) \qquad , n = k \tag{26}$$

هرگاه طرفین معادله دیفرانسیل را در $r\cdot R_k$ ضرب و در بازه $[0,a]$ انتگرال-گیری شود، نتیجه (27) حاصل می‌شود.

$$M_n\ddot{A}_n(t) + \frac{\rho_0 C_0}{\rho_p h}M_n\dot{A}_n(t) + \frac{D\lambda_n{}^4}{\rho_p h}M_n A_n(t) = Q_n(t) \tag{27}$$

که

$$Q_n(t) = \int_0^a 2P_m e^{-\frac{t}{\theta}}\cdot r\cdot R_n \mathrm{d}r = Q_{on}e^{-\frac{t}{\theta}} \tag{28}$$

$$Q_{on} = \frac{4aP_m}{\lambda_n}\cdot\mathrm{J}_1(\lambda_n a) \tag{29}$$

و

$$M_n = \int_0^a \rho_p h\cdot r\cdot R_n{}^2 \mathrm{d}r = \rho_p h a^2\cdot\mathrm{J}_0{}^2(\lambda_n a) \tag{30}$$

اگر جایگزینی زیر صورت گیرد.

$$\frac{\rho_0 C_0}{\rho_p h} = 2\xi_n\omega_n \tag{31}$$
$$\omega_n{}^2 = \frac{D\lambda_n{}^4}{\rho_p . h} \tag{32}$$
$$\xi_n = \frac{\rho_0 C_0}{2\rho_p h\omega_n} \tag{33}$$

در این صورت رابطه‌ی (30) برای معادله دیفرانسیل استخراج می‌شود.

$$\ddot{A}_n + 2\xi_n\omega_n\dot{A}_n + \omega_n{}^2 A_n = \frac{Q_n(t)}{M_n} \tag{34}$$

پاسخ معادله دیفرانسیل (34) که یک معادله دیفرانسیل خطی از مرتبه دوم است به شیوه‌های استاندارد قابل‌استخراج است.

$$A_n(t) = C_n e^{-\frac{t}{\theta}} + e^{-\xi_n\omega_n t}[a_n\cosh\Omega_n t + b_n\sinh\Omega_n t] \tag{35}$$

که در رابطه‌ی (35) Ω_n و C_n به صورت روابط (36) و (37) بیان می‌شود.

$$\Omega_n = \omega_n\sqrt{\xi_n{}^2 - 1} \tag{36}$$
$$C_n = \frac{Q_{on}\theta^2}{M_n[1 - 2\xi_n\omega_n\theta + \omega_n{}^2\theta^2]} \tag{37}$$

با اعمال شرایط اولیه برای ورق که در زمان $t = 0$ در حال سکون است به فرم رابطه‌ی (38):

$$t = 0, \qquad A_n(t) = 0$$
$$t = 0, \qquad \dot{A}_n(t) = 0 \tag{38}$$

روابط (39) و (40) برای محاسبه ضرایب مجهول حاصل می‌شود. از شرط اول رابطه‌ی (39) و از شرط دوم روابط (40) به دست می‌آید.

$$0 = C_n + a_n$$
$$A_n = C_n\left[e^{-\frac{t}{\theta}} - e^{-\xi_n\omega_n t}\cosh\Omega_n t\right] + b_n e^{-\xi_n\omega_n t}\sinh\Omega_n t$$
$$\dot{A}_n = C_n\left[\xi_n\omega_n e^{-\xi_n\omega_n t}\cosh\Omega_n t - \Omega_n e^{-\xi_n\omega_n t}\sinh\Omega_n t\right] - C_n\frac{e^{-\frac{t}{\theta}}}{\theta} + b_n[\Omega_n e^{-\xi_n\omega_n t}\cosh\Omega_n t - \xi_n\omega_n e^{-\xi_n\omega_n t}\sinh\Omega_n t] \tag{39}$$

$$0 = C_n[-1/\theta + \xi_n\omega_n] + b_n\Omega_n$$
$$b_n = \frac{C_n}{\Omega_n}[1/\theta - \xi_n\omega_n] \tag{40}$$

با جایگزین نمودن برای C_n نتیجه می‌شود.

$$A_n(t) = \left[\frac{4a\theta^2 P_m\cdot\mathrm{J}_1(\lambda_n a)}{\lambda_n M_n\{1 - 2\xi_n\omega_n\theta + \omega_n{}^2\theta^2\}}\right]\times[e^{-\frac{t}{\theta}} - e^{-\xi_n\omega_n t}\cosh\Omega_n t] + \frac{e^{-\xi_n\omega_n t}}{\theta\Omega_n}(1 - \xi_n\omega_n\theta)\sinh\Omega_n t \tag{41}$$

با جایگذاری نمودن $M_n = \rho_p h a^2\mathrm{J}_0{}^2(\lambda_n a)$، پاسخ $w(r,t)$ به‌فرم معادله-ی (42) بیان می‌شود.

$$w(r,t) = \sum_{n=0}^{\infty}\left(\frac{4\theta^2 P_m\mathrm{J}_1(\lambda_n a)\left[e^{-\frac{t}{\theta}} - e^{-\xi_n\omega_n t}\cosh\Omega_n t\right]}{\lambda_n\rho_p h a\mathrm{J}_0{}^2(\lambda_n a)\{1 - 2\xi_n\omega_n\theta + \omega_n{}^2\theta^2\}}\right.$$

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-24]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.11.29.5]

$$+\frac{\left(\frac{e^{-\xi_n\omega_n t}}{\theta\Omega_n}\right)(1-\xi_n\omega_n\theta)\sinh\Omega_n t}{\lambda_n\rho_p h a J_0{}^2(\lambda_n a)\{1-2\xi_n\omega_n\theta+\omega_n{}^2\theta^2\}})$$
$$\times\left[J_0(\lambda_n r)-\frac{J_0(\lambda_n a)}{I_0(\lambda_n a)}I_0(\lambda_n r)\right]$$
(42)

همچنین سرعت ورق نیز با اعمال مشتق زمانی نسبت به جابجایی حاصل می‌شود.

$$\dot{w}(r,t)=\sum_{n=0}^{\infty}\frac{4\theta^2P_m\cdot J_1(\lambda_n a)\left[J_0(\lambda_n r)-\frac{J_0(\lambda_n a)}{I_0(\lambda_n a)}I_0(\lambda_n r)\right]}{\lambda_n\rho_p h a J_0{}^2(\lambda_n a)[1-2\xi_n\omega_n\theta+\omega_n{}^2\theta^2]}$$
$$\times[-e^{-\xi_n\omega_n t}\sinh\Omega_n t\left\{\Omega_n+\frac{\xi_n\omega_n(1-\xi_n\omega_n\theta)}{\theta\Omega_n}\right\}$$
$$+e^{-\xi_n\omega_n t}\cosh\Omega_n t\left\{\xi_n\omega_n+\frac{1}{\theta}(1-\xi_n\omega_n\theta)\right\}-\frac{1}{\theta}e^{-\frac{t}{\theta}}]$$
(43)

هرگاه کاویتاسیون در ورق رخ دهد فشار کل وارد بر ورق صفر شده و معادله حاکم بر ورق به صورت زیر تقلیل می‌یابد.

$$D\Delta^4 w(r,t)+\rho_p h\frac{\partial^2 w(r,t)}{\partial t^2}=0 \quad (44)$$

این معادله دارای جوابی به صورت (45) می‌باشد.

$$w(r,t)=\sum_{n=0}^{\infty}(X_n\sin(\lambda_n t)+Y_n\cos(\lambda_n t))$$
$$\times\left[J_0(\lambda_n r)-\frac{J_0(\lambda_n a)}{I_0(\lambda_n a)}I_0(\lambda_n r)\right]$$
(45)

که در رابطه‌ی (45) ثوابت با توجه به مقدار جابجایی و سرعت درزمان کاویتاسیون, T_C، محاسبه می‌شوند. همچنین با توجه به اینکه در محدوده پدیده کاویتاسیون بر روی ورق دایروی مستقر در زیرآب تحت بار انفجاری در محدوده الاستیک یا پلاستیک رخ دهد، با زمان کاویتاسیون در این دو محدوده به صورت T_{CE} و T_{CP} جایگزین می‌شود.میدان سرعت با اعمال مشتق زمانی نسبت به میدان جابجایی بیان شده در رابطه (45) به صورت (46) استخراج می‌شود.

$$w(r,t)=\sum_{n=0}^{\infty}(X_n\lambda_n\cos(\lambda_n t)-Y_n\lambda_n\sin(\lambda_n t))$$
$$\times\left[J_0(\lambda_n r)-\frac{J_0(\lambda_n a)}{I_0(\lambda_n a)}I_0(\lambda_n r)\right]$$
(46)

بنابراین می‌توان به طور خلاصه گام‌های حل انجام شده برای استخراج روابط جابجایی، سرعت، میدان تنش و زمان‌های کاویتاسیون و تسلیم برای یک ورق دایروی مستقر در زیر آب را به صورت گام به گام بیان نمود.

1- حل معادله همگن ورق $(D\Delta^4 w+\rho_0 C_0\frac{\partial w}{\partial t}+\rho_p h\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}=0)$
- 1-1- روش جداسازی متغیرها $w(r,t)=T(t)R(r)$
- 1-2- اعمال $w(r,t)$ در معادله همگن ورق
- 1-3- جداسازی معادلات متغیرهای $R(r)$ و $T(t)$
- 1-4- حل معادله دیفرانسیل حاکم بر اساس $R(r)$
- 1-5- استخراج توابع شکل و فرکانس‌های ورق در حالت ارتعاش آزاد

2- حل معادله ناهمگن ورق
$$(D\Delta^4 w=2P_m\cdot e^{-\frac{t}{\theta}}-\rho_0 C_0\frac{\partial w}{\partial t}-\rho_p h\frac{\partial^2 w}{\partial t^2})$$

- 2-1- استفاده از روش جداسازی متغیرها با در نظرگرفتن جوابی به صورت $w(r,t)=\sum_{n=0}^{\infty}A_n(t)\cdot R_n(r)$
- 2-2- اعمال $w(r,t)$ در معادله ارتعاش اجباری ورق
- 2-3- جداسازی بر اساس متغیرهای زمان و جابجایی
- 2-4- استخراج پاسخ زمانی $A_n(t)$
- 2-5- استفاده از تعامد مودها و ضرب طرفین رابطه بر اساس متغیر جابجایی در $r\cdot R_k$
- 2-6- انتگرال‌گیری در بازه مکانی [0,a]
- 2-7- استفاده از پارامترهای استاندارد به‌منظور بازنویسی راحت‌تر روابط استخراج شده
- 2-8- جایگزینی روابط استخراج شده در میدان جابجایی $w(r,t)$
- 2-9- اعمال مشتق زمانی برای محاسبه میدان سرعت ورق

3- حل گام‌به‌گام $P(t)=2P_f\cdot e^{-\frac{t}{\theta}}-\rho_0 C_0\frac{du}{dt}=0$ برای استخراج زمان کاویتاسیون

4- محاسبه میدان تنش بر اساس قانون هوک و مقایسه گام‌به‌گام با سطح تسلیم وون میزز برای استخراج زمان تسلیم

5- تحلیل نتایج

ماده‌ی منفجره مورداستفاده در این بررسی پنتولیت بوده که مشخصات انفجاری آن شامل پارامترهای β,α,B,A در جدول 1 آورده شده است [15]. یکی از موارد بسیار مهم در بررسی رفتار تغییرشکل ورق تحت بار انفجاری چگونگی تغییرات رفتار فشار ناشی از پارامترهای خرج انفجاری شامل وزن و محل استقرار مورد استفاده است. جدول 2 ویژگی‌های مکانیکی ورق دایروی به ابعاد 0.3m × 0.003m از جنس‌های فولاد، مس و آلومینیم را نشان می‌دهد. هرگاه ورق مستقر در زیرآب تحت بارگذاری انفجاری قرار گیرد یکی از پدیده‌های بسیار مهم، ایجاد پدیده کاویتاسیون است. در زمان بروز کاویتاسیون فشار کل وارد بر ورق صفر شده و معادلات حاکم بر آن در زمان قبل و بعد کاویتاسیون متفاوت می‌باشد.

به منظور صحه‌گذاری بر روش تحلیلی ارائه شده در این مقاله ابتدا میدان سرعت ایجاد شده توسط بار انفجاری در مرجع [6] با مشخصات زیر بر روی ورق صورت گرفته است.

جدول 1 پارامترهای معادلات موج انفجاری پنتولیت

ماده منفجره	A	B	α	β
پنتولیت	$2/25\times10^{-4}$	6×10^{-5}	1/13	-0/18

جدول 2 خواص مکانیکی ورق دایروی

جنس ورق	فولاد	مس	آلومینیم
مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)	210	130	70
ضریب پواسون	0/3	0/34	0/32
چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	7850	8960	2700
تنش تسلیم (مگاپاسکال)	300	220	105

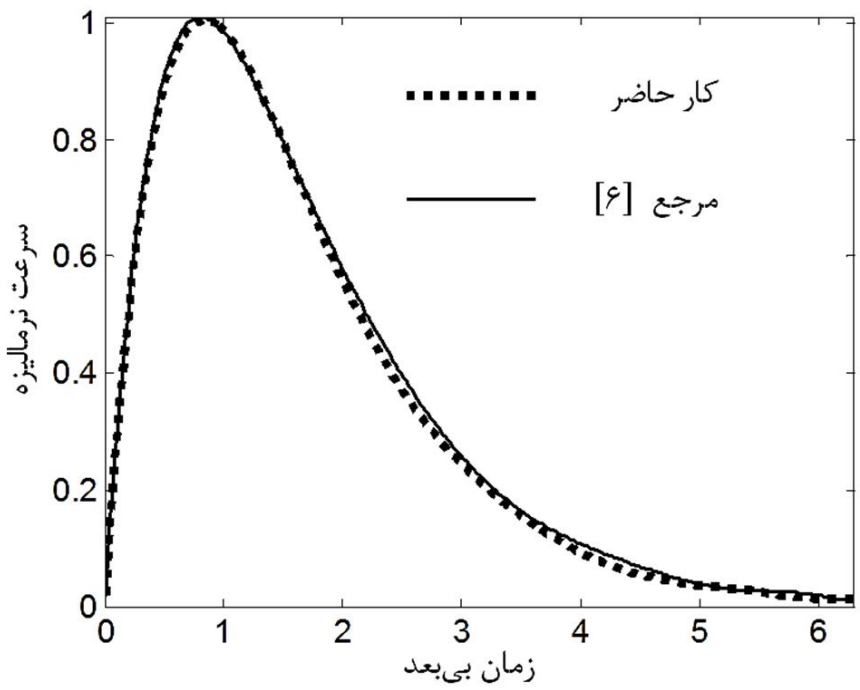
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-24]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.11.29.5]

$$P_{\mathrm{m}} = 52.16\left(\frac{W^{1/3}}{S}\right)^{1.13} \tag{47}$$

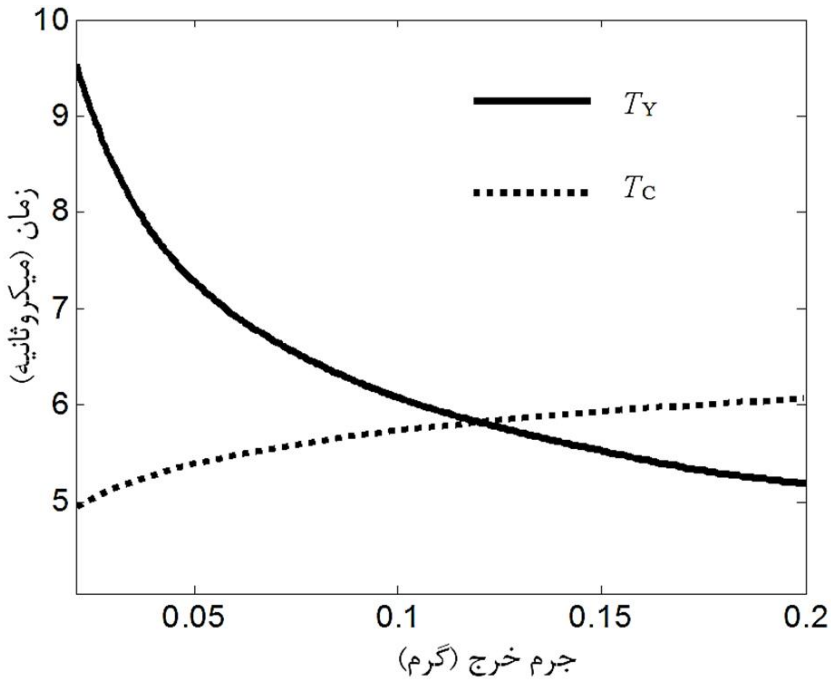
$$\theta = 96.5W^{1/3}\left(\frac{W^{1/3}}{S}\right)^{-0.22} \tag{48}$$

در روابط (47) و (48) W و S به ترتیب مقدار جرم خرج انفجاری و فاصله خرج انفجاری تا ورق می‌باشد [6]. شکل 1 مقایسه بین نتایج مرجع [6] و کار تحلیلی حاضر را نشان می‌دهد. به‌منظور مقایسه تغییرات سرعت نرمالیزه شده را برحسب زمان بی‌بعد در شکل 1 نشان داده شده است. برای نرمالیزه کردن از پارامترهای مرجع [6] استفاده شده است. نمودارهای شکل 1 نشان می‌دهند که نتایج کار تحلیلی حاضر با مرجع [6] تطابق خوبی را دارد. در این مقایسه جرم خرج انفجاری 100 گرم و محل استقرار 100 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. بعداز اعتبارسنجی روش تحلیلی استفاده شده در این مقاله با مرجع [6] نتایج جدید ارائه شده است.

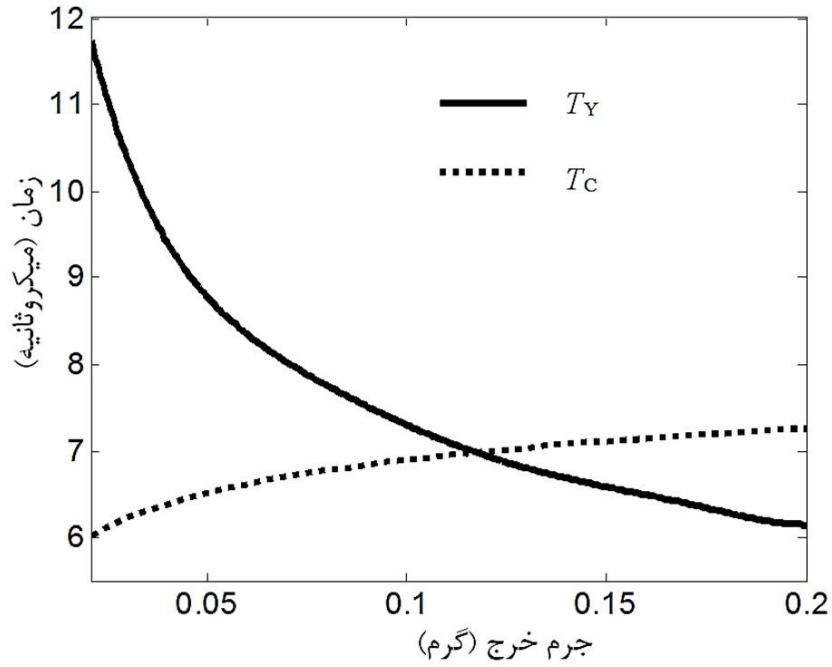
کاویتاسیون ممکن است در بارگذاری انفجاری بر روی ورق مستقر در زیر آب رخ می‌دهد. زمان کاویتاسیون زمانی است که در آن فشار کل وارد به سازه صفر می‌شود. و بعد از این زمان فشار منفی می‌شود. بنابراین فشار منفی بعداز کاویتاسیون رخ داده و با توجه به مقدار کم آن می‌توان از آن صرفنظر نمود [6]. بنابراین در این مقاله نیز فرض شده است که بعد از ایجاد کاویتاسیون تا پایان دوره بارگذاری فشار وارد بر سازه صفر است. زمان تسلیم نیز زمانی است که در آن ورق از سطح تسلیم عبور کرده و رفتار آن وارد محدوده پلاستیک می‌شود. در فرایند بارگذاری انفجاری بر روی ورق مستقر در زیر آب دو حالت کلی در مورد زمان کاویتاسیون رخ می‌دهد. این دو حالت مربوط به بروز این پدیده در محدوده الاستیک یا در محدوده پلاستیک می باشند. در حالت اول میدان جابجایی و سرعت در مدت زمان بارگذاری به سه قسمت تقسیم می‌شوند. این سه قسمت شامل زمان شروع بارگذاری تا زمان کاویتاسیون الاستیک، $0 \le t \le T_{\mathrm{CE}}$، زمان کاویتاسیون الاستیک تا زمان تسلیم $T_{\mathrm{CE}} \le t \le T_{\mathrm{Y}}$ و زمان تسلیم تا پایان دوره بارگذاری، $T_{\mathrm{CE}} \le t \le T$، می‌باشد. در حالتی که زمان کاویتاسیون در محدوده پلاستیک رخ دهد این سه قسمت شامل زمان شروع بارگذاری تا زمان تسلیم ، $0 \le t \le T_{\mathrm{Y}}$، زمان کاویتاسیون تسلیم تا زمان کاویتاسیون پلاستیک $T_{\mathrm{Y}} \le t \le T_{\mathrm{CP}}$ و زمان کاویتاسیون پلاستیک تا پایان دوره بارگذاری، $T_{\mathrm{CP}} \le t \le T$، می‌باشند.



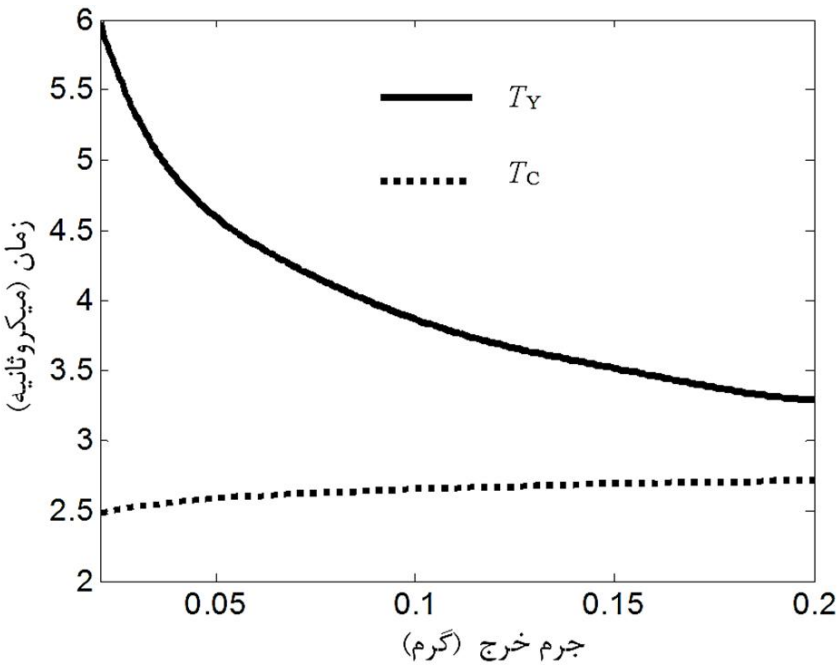
شکل 1 تغییرات سرعت نرمالیزه برحسب زمان بی بعد



شکل 2 زمان کاویتاسیون و تسلیم برحسب خرج انفجاری برای ورق فولادی



شکل 3زمان کاویتاسیون و تسلیم برحسب خرج انفجاری برای ورق مسی

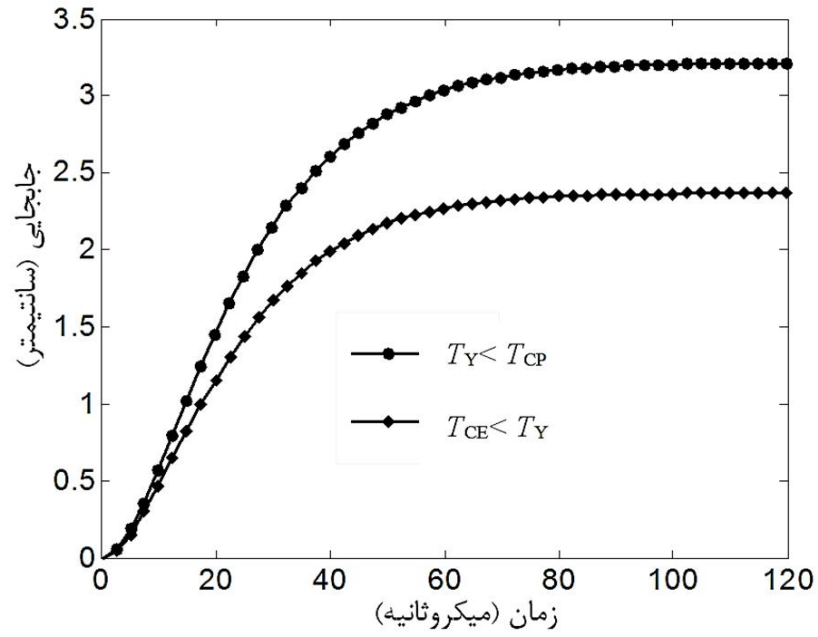


شکل 4 زمان کاویتاسیون و تسلیم برحسب خرج انفجاری برای ورق آلومینیمی

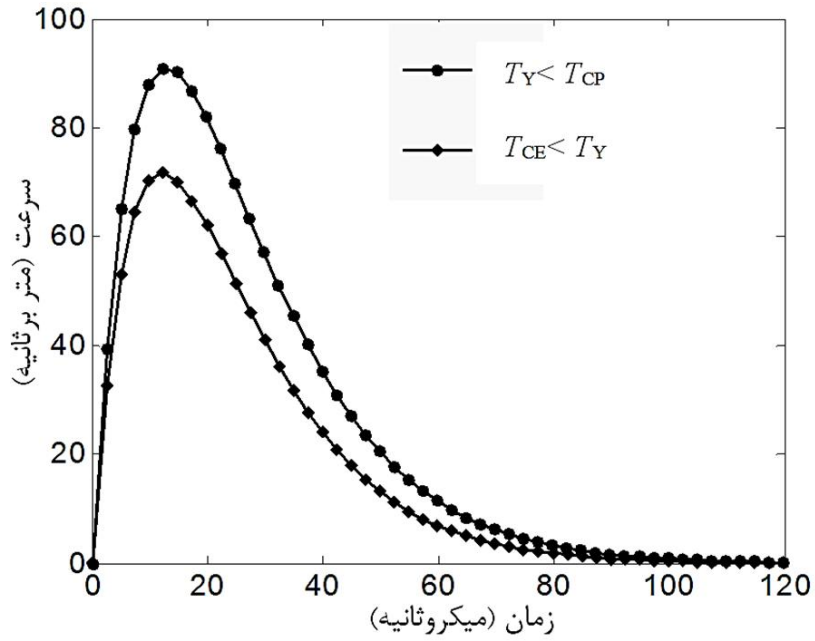
شکل‌های 5 و 6 تاریخچه زمانی جابجایی و سرعت مرکز ورق را برای دو حالت مختلف زمان بروز کاویتاسیون در دو رژیم الاستیک و پلاستیک نشان می‌دهند. به‌عبارت‌دیگر در حالت اول با انتخاب 100 گرم برای خرج انفجاری با محل استقرار 100 میلی‌متر زمان کاویتاسیون قبل از زمان تسلیم و در حالت دوم با انتخاب 160 گرم برای خرج انفجاری با محل استقرار 100 میلی‌متر زمان کاویتاسیون بعد از زمان تسلیم و در محدوده پلاستیک رخ می‌دهد. مطابق منحنی‌های ارائه شده در شکل 5 میدان جابجایی مرکز ورق برای حالتی که زمان کاویتاسیون در رژیم پلاستیک رخ

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-24]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.11.29.5]

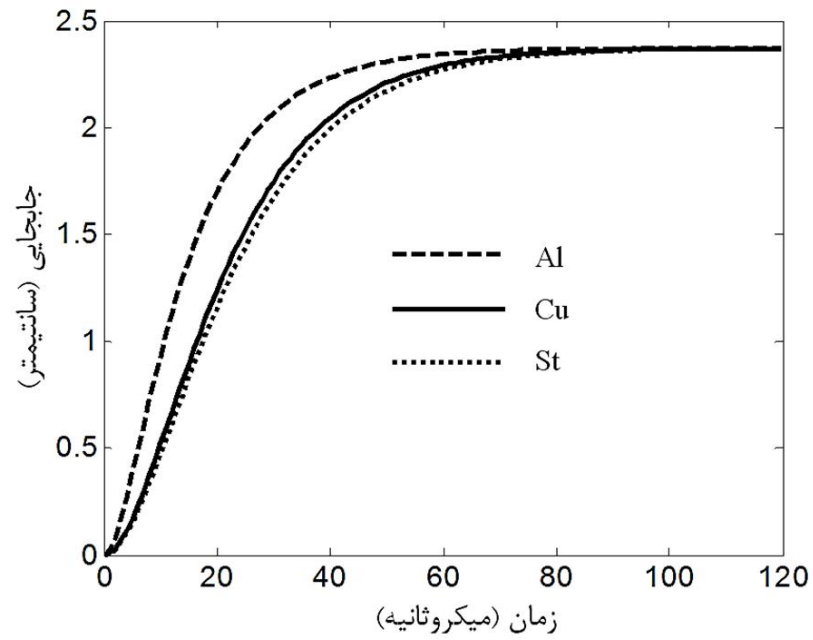
می‌دهد سطح بالاتری را نسبت به حالت الاستیک پیش‌بینی می‌کند. همچنین تا زمان 50 میکروثانیه مرکز ورق با شیب زیادی تغییرشکل یافته و سپس با گذشت زمان تغییرشکل تقریبا با گذشت زمان روندی ثابت را خواهد داشت. از روی شکل 5 می‌توان مشاهده نمود که میدان سرعت نیز برای زمان کاویتاسیون در رژیم پلاستیک بالاتر از میدان سرعت برای زمان کاویتاسیون در رژیم الاستیک می‌باشد. همچنین سرعت مرکز ورق در زمانی حدود 12 میکروثانیه بیشترین مقدار خود را تجربه کرده و با گذشت زمان به سمت صفر میل می‌کند. شکل‌های 7 و 8 اثر تغییر جنس ورق بر تاریخچه میدان جابجایی و سرعت مرکز ورق نشان می‌دهند مقدار خرج انفجاری 100 گرم و محل استقرار 100 میلی‌متر انتخاب شده است.



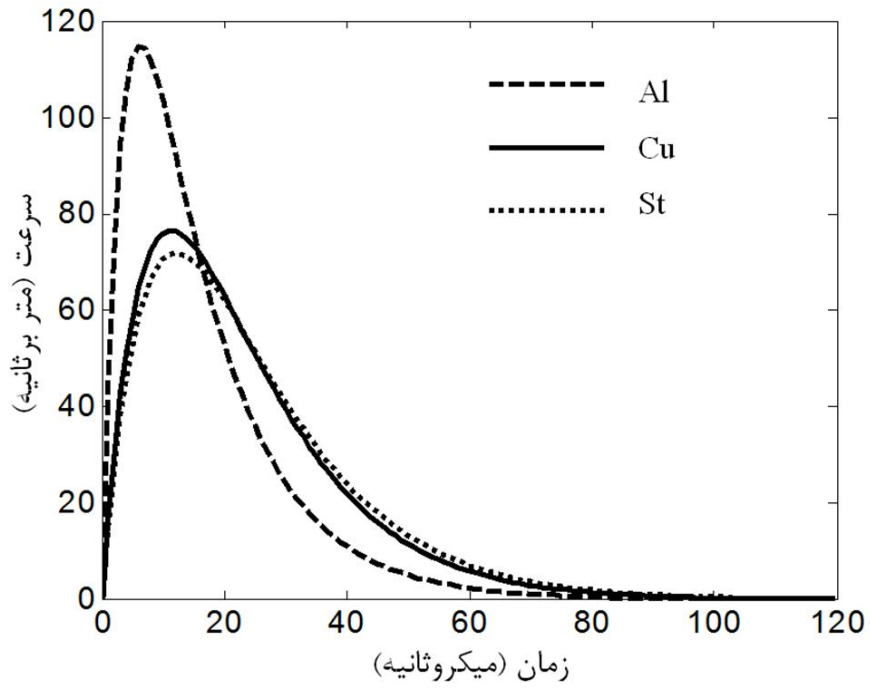
شکل 5 جابجایی مرکز ورق برحسب زمان برای ورق فولادی



شکل 6 سرعت مرکز ورق برحسب زمان برای ورق فولادی

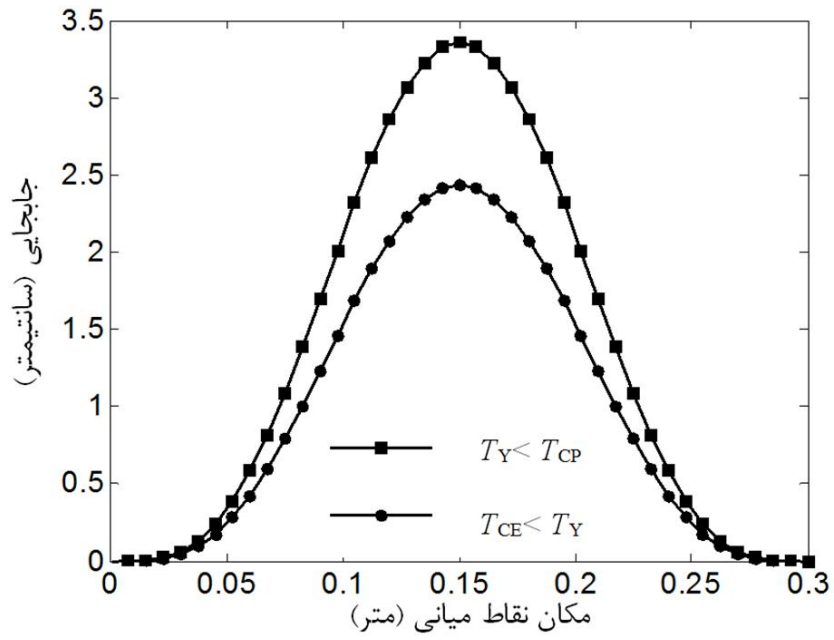


شکل 7 اثر جنس ورق بر جابجایی مرکز ورق برحسب زمان

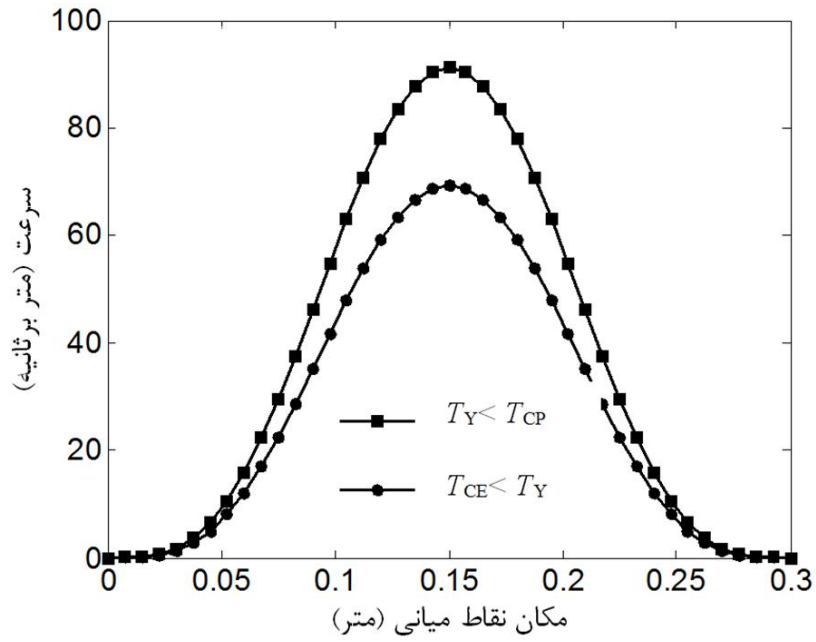


شکل 8 اثر جنس ورق بر سرعت مرکز ورق برحسب زمان

شکل 9 و 10بیشینه جابجایی و بیشینه سرعت نقاط قطری ورق دایروی فولادی را برای دو حالت وقوع زمان کاویتاسیون در محدوده‌ی الاستیک و پلاستیک را نشان می‌دهند. برای وقوع زمان کاویتاسیون در محدوده‌ی الاستیک و زیر زمان تسلیم، $T_{CE} \le T$ ،میدان جابجایی و سرعت برای همه نقاط روی قطر پایین‌تر از مقدار آن برای وقوع زمان کاویتاسیون در محدوده‌ی پلاستیک و بالای زمان تسلیم ، $T \le T_{CP}$ ، می‌باشد. برای وقوع زمان کاویتاسیون در محدوده الاستیک مقدار خرج انفجاری 100 گرم و محل استقرار خرج انفجاری 100 میلی‌متر و برای حال پلاستیک مقدار خرج انفجاری 160 گرم و فاصله استقرار آن 100 میلی‌متر است.



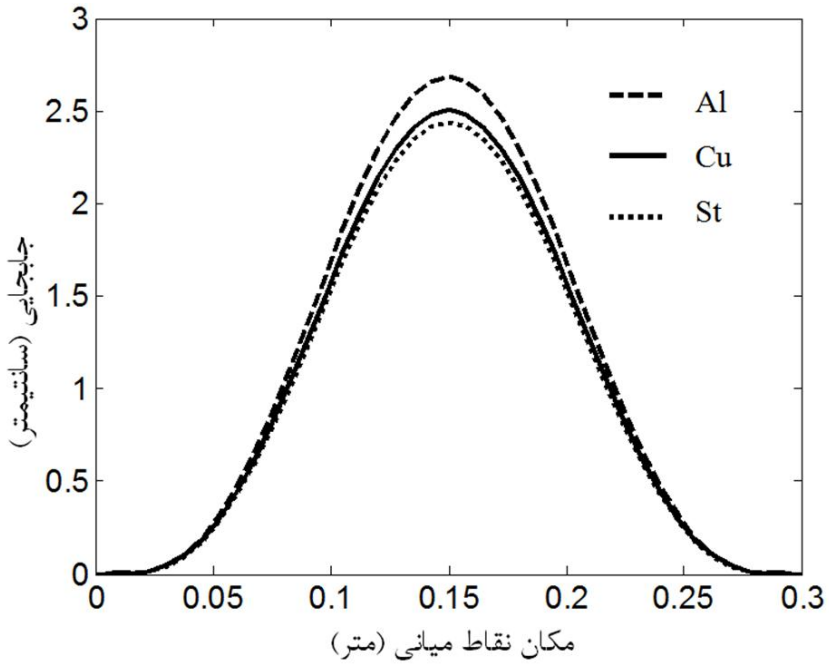
شکل 9 بیشینه جابجایی نقاط میانی برای ورق فولادی



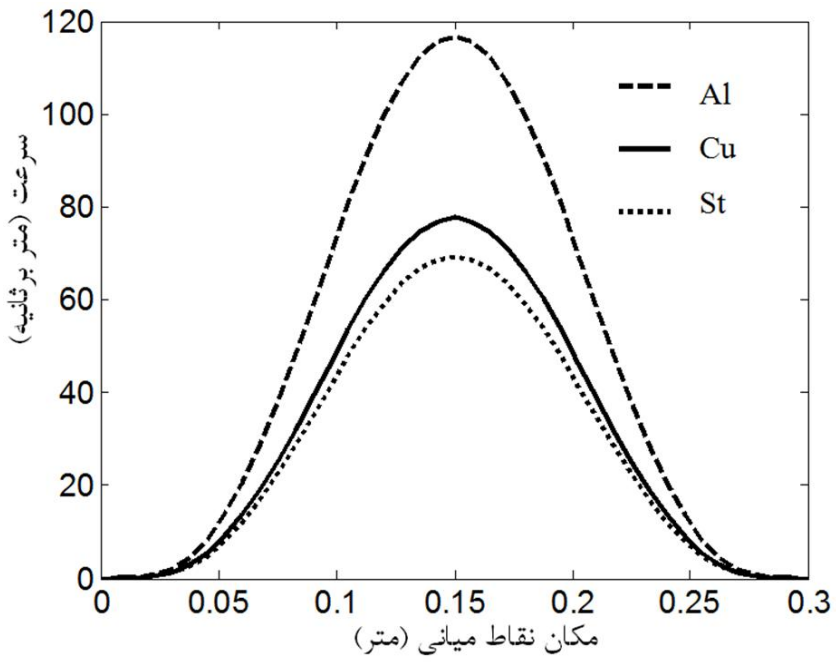
شکل 10 بیشینه سرعت نقاط میانی برای ورق فولادی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-24]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.11.29.5]

تأثیر جنس ورق بر بیشینه مقدار جابجایی و سرعت نقاط قطری ورق شکل-های 11 و 12 مشاهده می‌شود. مطابق این نمودارها ورق از جنس آلومینیم در شرایط یکسان بارگذاری بیشترین مقدار جابجایی و سرعت را دارا بوده و ورق فولادی کمترین مقدار را نسبت به ورق آلومینیمی و مسی پیش‌بینی می‌کند. برای وقوع کاویتاسیون درمحدوده الاستیک مقدار خرج انفجاری 100 گرم و محل استقرار خرج انفجاری تا ورق دایروی مستقر در زیر آب 100 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. به‌عبارت‌دیگر با توجه به ویژگی‌های مکانیکی ورق از جنس فولاد، مس و آلومینیم می‌توان از روی این نمودارها نتیجه گرفت که در شرایط یکسان بارگذاری انفجاری برای ورق دایروی مستقر در زیر آب ورق فولادی بیشترین مقاومت را در برابر تغییرشکل از خود نشان داده و ورق از جنس مس و آلومینیم به ترتیب مقاومت کمتری را در برابر تغییرشکل از خود نشان می‌دهند. همچنین منحنی‌های سرعت برای ورق از جنس فولاد، مس و آلومینیم که در شکل 12 نشان داده شده است بیان می‌کنند که با توجه به مقاومت کمتر ورق آلومینیمی در برابر تغییرشکل ناشی از انفجار نقاط قرار گرفته در روی قطر اصلی میدان سرعت بیشتری را نسبت به ورق از جنس فولاد و مس دارا هستند. مطابق نمودارهای شکل‌های 11 و 12 می‌توان فهمید که جنس ورق تأثیر زیادی بر زمان کاویتاسیون دارد. بطوریکه برای ورق فولادی و مسی در بازه‌ای از خرج انفجاری کاویتاسیون در محدوده الاستیک و برای خرج انفجاری بیشتر در محدوده پلاستیک رخ می‌دهد ولی برای ورق آلومینیمی همواره در بازه مورد بررسی از خرج انفجاری این پدیده در محدوده الاستیک رخ می‌دهد.



شکل 11 اثر جنس بر بیشینه جابجایی نقاط میانی ورق



شکل 12 اثر جنس بر بیشینه سرعت نقاط میانی ورق

6- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که برای تحلیل رفتار ورق مستقر در زیر آب تحت بار انفجاری باید پدیده کاویتاسیون مورد بررسی قرار گیرد، زیرا در زمان وقوع آن فشار کل ناشی از بار انفجاری صفر شده و از روی جسم حذف می‌شود بنابراین معادلات حاکم بر ورق در بازه‌های زمانی قبل و بعد از کاویتاسیون متفاوت است. دو عامل اصلی مورد بررسی در این تحقیق شامل تأثیر مقدار خرج انفجاری و جنس ورق بر تشکیل کاویتاسیون نشان می‌دهد که با افزایش خرج انفجاری زمان وقوع کاویتاسیون به تأخیر افتاده و زمان تسلیم کاهش می‌یابد. به‌عبارت‌دیگر با افزایش خرج انفجاری سطح بارگذاری فشاری افزایش یافته که این باعث ایجاد کاویتاسیون در زمان بیشتری از شروع فرایند تغییرشکل می‌شود. همچنین مقدار با افزایش خرج انفجاری وقوع کاویتاسیون از محدوده الاستیک خارج شده و این پدیده در محدوده پلاستیک رخ می‌دهد. جنس ورق نیز بر ایجاد پدیده کاویتاسیون مؤثر بوده بطوریکه نتایج نشان می‌دهند برای ورق فولادی و مسی برای بازه‌ای از خرج انفجاری کاویتاسیون در محدوده الاستیک و برای خرج انفجاری بیشتر در محدوده پلاستیک رخ می‌دهد ولی برای ورق آلومینیمی همواره در بازه مورد بررسی از خرج انفجاری این پدیده در محدوده الاستیک رخ می‌دهد. میدان جابجایی و سرعت ایجاد شده برای ورق در حالتی که کاویتاسیون در محدوده پلاستیک رخ دهد نسبت به حالت الاستیک آن بالاتر می‌باشد. بنابراین می-توان دستاوردهای مقاله را به صورت زیر بیان نمود.

1- ارائه مدلی تحلیلی از رفتار دینامیکی ورق دایروی تحت بارانفجاری زیر آب به منظور استخراج زمان کاویتاسیون و زمان تسلیم.

2- محاسبه زمان تسلیم و مقایسه آن با زمان کاویتاسیون برای تشخیص وقوع کاویتاسیون در محدوده الاستیک یا پلاستیک

3-تحلیل میدان جابجایی و سرعت ورق برای زمان‌های مختلف کاویتاسیون در رژیم الاستیک و پلاستیک

4-بررسی تغییر جنس ورق بر زمان کاویتاسیون و تسلیم و تاریخچه زمانی جابجایی و سرعت ورق

5- محاسبه پروفیل جابجایی نقاط میانی ورق برای زمان‌های مختلف کاویتاسیون در رژیم الاستیک و پلاستیک

7- مراجع

[1] E. Hudson, A theory of the dynamic plastic deformation of a thin diaphragm, *Journal of Applied Physics,* Vol. 22, No. 1, pp. 1-11, 1951.
[2] N. Jones, T. Uran, S.A. Tekin, The dynamic plastic behavior of fully clamped rectangular plates, *International Journal of Solids Structure,* Vol. 6, No. 12, pp. 1499-1512, 1970.
[3] T. Wierzbicki, A.L. Florence, A theoretical and experimental investigation of impulsively loaded clamped circular viscoplastic plates, *International Journal of Solids Structure,* Vol. 6, No. 5, pp. 550-580, 1970.
[4] R.C. Batra, R.N. Dubey, Impulsively loaded circular plates, *International Journal of Solids Structure,* Vol. 7, No. 8, pp. 965-978, 1971.
[5] G. N. Nurick, J. B. Martin, Deformation of thin plates subjected to impulsive loading a review part I, *International Journal of Impact Engineering,* Vol. 8, No. 2, pp. 159-170, 1989.
[6] R. Rajendran, Numerical simulation of response of plane plates subjected to uniform primary shock loading of non-contact underwater explosion,*Materials and Design,*Vol. 30, No. 4, pp. 1000–1007, 2009.
[7] H. Gharababaei, A. Darvizeh, N. Nariman-zadeh, Investigation into the response of steel, copper and aluminum plates subjected to shock loading, *Journal of Engineering Manufacture,* Vol. 39, No. 4, pp.507-526, 2010.
[8] H.Gharababaei, A. Darvizeh, Analytical study of plastic deformation of clamped circular plates subjected to impulsive loading, *International Journal of Mechanics of Materials and Structures,* Vol. 7, No. 4, pp. 309-322, 2012.
[9] N. Jones, Dynamic inelastic response of strain rate sensitive ductile plate due to large impact, dynamic pressure and explosive loading, *International Journal of Impact Engineering,*Vol. 74, pp. 3-15, 2014.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-24]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.11.29.5]

[10] N. Jones, Pseudo-shakedown phenomenon for the mass impact loading of plating, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 65, pp. 33-39, 2014.
[11]H. Ramezannezhad, M. Darvizeh, A. Darvizeh, R. Ansari, Derivation of cavitation time of underwater rectangular plate subjected to impulsive dynamic loading, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 15, No. 2, pp. 253-260, 2015. (In Persian)
[12] M. Goudarzi, J. Zamani, Experimental and numerical investigation of the maximum deflection of circular aluminum plate subjected to free air explosion, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 15, No. 1, pp. 219-226, 2015. (In Persian)
[13] W. Leissa, *Vibration of plates,* pp. 9-30, Ohaio State university Colombos: Ohaio, 1969.
[14] N. Jones, *Structural impact,* pp. 432-445, Cambridge university press: United Kingdom, 1989.
[15] J. S. Smaill, *pressure instrumentation in explosive forming: the non-linear transient displacement of a circular plate,* PhD Thesis, University of Canterbury, New Zealand, 1984.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-24]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.11.29.5]