اثر کرنشهای خمشی و غشایی کوپل شده بر تغییر شکل بزرگ پلاستیک ورقهای مستطیلی تحت بارگذاری ضربهای

علی گلباف	دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران
على محمودى	دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران
مجيد علىطاولى*	دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران
هاشم بابایی	استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران
توحيد ميرزاباباي مستوفي	دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

چکیدہ

در این مقاله، اثر کرنشهای خمشی و غشایی کوپل شده بر تغییر شکل بزرگ پلاستیک ورقهای مستطیلی تحت بارگذاری ضربهای به دو صورت تحلیلی و تجربی موردمطالعه قرارگرفته است. بهمنظور پیشبینی بیشترین خیز دائمی ورقهای مستطیلی، از روش انرژی بر مبنای تئوری حد بالا استفادهشده است. با فرض یک گستره برای تابع تغییر شکل ورق، دو تحلیل انرژی پی درپی انجامشده است. در اولین مرحله، نشان داده میشود که جابهجاییهای طولی و عرضی تأثیری بر مقدار کار پلاستیک و همچنین بیشترین خیز دائمی ورق ندارد؛ بنابراین، در ادامه روابط تحلیلی با صرفنظر کردن از جابهجاییهای طولی و عرضی روند تحلیل استخراج میشوند. سپس در اولین تحلیل انرژی، یک مدل تحلیلی برای حالتی که در آن اثر انرژیهای کرنشی خمشی و غشایی همزمان وارد معادلات میشوند، ارائهشده است. سپس، با شرکت دادن فعلوانفعال کوپل شده بین کرنشهای خمشی و غشایی، مدلی تحلیلی برای پیشایی نسبت خیز مرکزی ورق مستطیلی به ضخامت آن ارائه میشود. درنهایت، نتایج تحلیلی به دستآمده با نتایج تجربی مقایسه شده است و نشان می دهد که تطابق و برنی و برا نتایج تجربی برای سرعتهای ضربهای، ضخامت و نشان میشود. درنهایت، نتایج تحلیلی به دستآمده با نتایج تجربی مقایسه شده است و نشان می دوله مستطیلی با می فردان می و نشای خوبی با مرکزی ورق مستطیلی مونمان آن ارائه میشود. درنهایت، نتایج تحلیلی بول می انتایج تجربی مقایسه شده است و نشان می دهد که تطابق خوبی با

واژههای کلیدی: بارگذاری هیدرودینامیکی، تغییر شکل پلاستیک، روش انرژی، ورق مستطیلی.

Effect of Coupled Bending and Membrane Strains on the Large Plastic Deformations of Rectangular Plates due to Impact Loading

A. Golbaf	Department of Mechanical Engineering , University of Guilan, Rasht, Iran
A. Mahmoudi	Department of Mechanical Engineering , University of Guilan, Rasht, Iran
M. Alitavoli	Department of Mechanical Engineering , University of Guilan, Rasht, Iran
H. Babaei	Department of Mechanical Engineering , University of Guilan, Rasht, Iran
T. Mirzababaie Mostofi	Department of Mechanical Engineering , University of Guilan, Rasht, Iran

Abstract

In this paper, the effect of coupled bending and membrane strains on the large plastic deformation of rectangular plates due to impact loading is investigated both analytically and experimentally. The energy approach based on upper bound solution has been used in order to predict the maximum permanent deflection of rectangular plates. By assuming a deformation shape function, two consecutive energy based analyses have been presented. In the first step, it has been shown that the longitudinal and transverse displacements do not affect the amount of plastic work as well as maximum permanent deflection. Hence, the analytical expressions are derived by excluding the longitudinal and transverse displacements from the analysis. Next, in the first analysis, the analytical models have been extracted for the case when membrane strain energy and bending one are considered. Thereafter, an analytical model has been presented for predicting midpoint deflection-thickness ratio of rectangular plates by incorporating the coupled interaction between membrane and bending strains. Eventually, the obtained analytical results have been compared with the experimental results and illustrate good agreement with experiments for different impact velocities, plate materials and plate thicknesses.

Keywords : Hydrodynamic loading, Plastic deformation, Energy approach, Rectangular plate.

معمولاً از ورق های آلومینیومی و فولادی ساخته شده است. استفاده از ورق های فولادی به دلیل مقاومت زیاد، شکل پذیری بالا و کم هزینه بودن تولید در مقایسه با سایر ورق ها و همچنین استفاده از ورق های آلومینیومی به دلیل نسبت مقاومت به وزن بالا موردتوجه قرار گرفته

۱– مقدمه

در ســالهـای اخیــر حفاظــت از ســازههـای مهندســی در برابـر بارگذاریهای ضربهای موردتوجه زیادی قرار گرفته اسـت. ایــن سـازههـا

> [®] نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: tavoli@guilan.ac.ir تاریخ دریافت. ۱۲/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۹۰/۱۱/۹۶

اثر کرنش های خمشی و غشایی کوپل شده بر تغییر شکا

است [۱].

فرآیندهای شکل دهی با توجه به مدت زمان انجام فرآیند، به دودستهی کلی شکل دهی با سرعت بالا و شکل دهی با سرعت پایین تقسیم بندی می شوند. از روش های معمول شکل دهی با سرعت بالا می توان به شکل دهی انفجاری [۲-۱۰]، الکتروهیدرولیکی [۱۱،۱۲] و زمینه شکل دهی انفجاری مربوط به اون و همکارانش است. آن ها با آزمایش هایی که روی ورق های مستطیلی تحت بارگذاری انفجاری انجام دادند با به کارگیری چندین حسگر فشار و بررسی دقیق ناحیه ی فشار منفی که در مدت زمان انجام فرآیند به وجود می آید توانستند شیه سازی عددی دقیقی را ارائه کنند که با نتایج به دست آمده ا آزمایش تجربی همخوانی قابل قبولی دارد [۱۵]

نمونهای دیگر از آزمایش های انجام شده با روش شکل دهی با سرعت بالا، مربوط به تحقیقات کوزینگ و اسکیوز است که در آن از دستگاه لوله ضربهای محتوی آب استفاده شده است. انرژی پتانسیل موجود در هوای متراکم، به پیستون منتقل شده و حرکت سریع پیستون، موجی فشاری در سیال به وجود می آورد. این موج باعث تغییر شکل ورق دایروی موجود در انتهای سیلندر می شود. با اندازه گیری دقیق فشار سیال توسط سه فشار سنجی که در طول سیلندر قرار دارد مشخص می شود که مقدار انرژی فشاری در سیال برابر باانرژی لازم برای تغییر شکل ورق است [۱۶،۲۷].

یکی از تحقیقات انجام شده در زمینه شکل دهی ورق با استفاده از سامانه چکش پرتابهای، مربوط به قسمتی از کار کیراک و همکارانش است که در آن به بررسی تغییر شکل پلاستیک ورق مسی با استفاده از موج فشار ایجادشده در یک لوله آلومینیومی به طول ۱/۳ متری با قطر داخلی ۳۲ میلیمتر توسط پیستون رهاشده با سرعت اولیه ۲۲/۹۴ متر بر ثانیه و میانگین جرم بر واحد سطح ۷۴/۱ کیلوگرم بر مترمربع پرداختهشده است [۱۸].

از جدیدترین تحقیقات انجامشده در زمینه شکلدهی با سرعت پایین مربوط به آزمایش بابایی و همکارانش است که در آن برای انجام آزمایش از سامانه ی چکش پرتابه ای استفاده شده است [۱۹–۲۲]. امنیت بیشتر و قابل کنترل بودن عوامل تأثیرگذار در مدتزمان انجام فرآیند، از مزایای استفاده از روشهای شکل دهی با سرعت پایین نسبت به سرعت بالا است. آنها تغییر شکل پلاستیک ورقهای مستطیلی را به دو صورت تجربی و تحلیلی موردبررسی قرار دادند. در بخش تحلیلی با استفاده از دو روش انرژی و لولای پلاستیک مدلهایی برای پیش بینی خیز مرکز ورق مستطیلی تحت بار هیدرودینامیکی ارائه کردند. مقایسه نتایج مدلهای ارائه شده و نتایج تجربی نشان دهنده دقت بالای روش واردکردن نرخ کرنش به معادلات، نتایج تحلیلی به نتایج تجربی نزدیکتر شد [۲۱].

همچنین آنها در تحقیق دیگری به بررسی پاسخ غیر الاستیک ورقهای دایرهای تحت بار هیدرودینامیکی پرداختند. در این تحقیق علاوه بر مدلسازی تحلیلی، آنها با تعریف عبارات بیبعد و بهرهگیری از روش تجزیه مقادیر منفرد، معادلهای بر مبنای نتایج تجربی خود ارائه کردندکه با دقت بسیار قابل قبولی نتایج آزمایش های تجربی را پیشبینی میکند [۲۲،۲۳].

در ادامه تحقیقات زیادی که درزمینه ی فرآیندهای هیدرو استاتیکی و هیدرودینامیکی انجام شده است میتوان به تحقیق زمپالونی و همکارانش اشاره کرد. در این آزمایش با قرار دادن محفظه محتوی آب، پشت ورق تحت بارگذاری، به بررسی تجربی و شبیه سازی عددی اثر استمپ در فرآیند هیدرودینامیکی پرداخته شده است. افزایش مدت زمان مقاومت قطعه در برابر شروع پارگی و کاهش چروکیدگی قطعه طی فرآیند تغییر شکل از جمله مزایای استفاده از این روش است [۲۴].

در زمینه مدلسازی تحلیلی فرآیند شکلدهی، میتوان به کار جدید انجامشده توسط کولوت و نوریک اشاره کرد که در سال ۲۰۱۴ انجامگرفته است. آنها با ارائه سه مدل انرژی به صحت سنجی این فرضیه که میتوان از اثر جابجاییهای شعاعی و کرنشهای خمشی در تحلیل تغییر شکلهای بزرگ ورقهای دایروی تحت بار دفعی صرفنظر کرد، پرداختند. در تحلیل اول، با افزودن جابجاییهای شعاعی به جابجاییهای عرضی، تنها کرنشهای خمشی در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که افزودن جابجاییهای شعاعی توزیع کرنش غیر الاستیک را تغییر میدهد اما تأثیری بر مقدار خیز نهایی ندارد. نتایج بهدستآمده یک توجیه دقیق برای فرضیه حذف جابجاییهای شعاعی است. این در صورتی است که جابجاییهای شعاعی برای به دست آوردن توزیع كرنش غير الاستيك قابل حذف نيستند و حتماً بايد به معادلات اضافه شوند. در مرحله بعدی، یک مدل تحلیلی که اثر متقابل کرنشهای خمشی و غشایی را در نظر می گیرد ارائه شد. نتایج بهدست آمده در این مرحله نتایج نشان داد که در تغییر شکلهای بزرگ میتوان از کرنشهای خمشی صرفنظر کرد. این بدین دلیل است که اثر کرنشهای غشایی بر کرنشهای خمشی غلبه میکند. در فاز سوم از این تحلیل، تاریخچه کرنش به صورت غیر خطی در نظر گرفته شد و نتایج بهدستآمده تأثیر کم آن را در تحلیل تغییر شکل بزرگ پلاستيک ورق تأييد کرد [٢۵].

با توجه به اینکه بیشترین تحقیقات انجامشده درزمینه شکل دهی ضربهای، به دلیل تقارن محوری مربوط به شکل دهی ورقهای دایروی است، تحقیقات انجامشده در مورد ورقهای مستطیلی بسیار محدود بوده که در ادامه به خلاصه ای از تحقیقات انجامشده روی تغییر شکل و رفتار ورقهای مستطیلی تحت بارگذاری ضربهای اشاره می شود.

در همین راستا آزمایش هایی بر روی ورقهای مستطیلی کاملاً گیردار شده توسط جونز و همکارانش انجام شد. در این آزمایشها از یک پاندول بالستیک برای ایجاد و اندازهگیری ایمپالس بهصورت مستقیم استفاده شد. آنها همچنین تحقیقاتی در مورد تغییر شکل غیر روابط ریاضی که توسط خودش مطرحشده بود، توانست مدلی که در آن روابط ریاضی که توسط خودش مطرحشده بود، توانست مدلی که در آن نکات قابل توجه در مدل جونز عدم وجود ایمپالس در محاسبات مربوط نکات قابل توجه در مدل جونز عدم وجود ایمپالس در محاسبات مربوط داد. در مدل او با تقسیم انتگرال فشار-زمان بر جرم واحد سطح سرعت به دست میآید؛ که فشار نیز از روابط تئوری محاسبات میود. سپس به محاسبه پارامتر بدون بعد انرژی جنبشی برای بارگذاری سپس به محاسبه پارامتر بدون بعد انرژی جنبشی برای بارگذاری ضربهای توسط ضربه زننده پرداخت [۲۷،۲۶]. على گلباف،

على محمودى، مجيد علىطلولى، هاشم بابايى و توحيد ميرزاباباى مستوفى

در سالهای بعد، نوریک و همکارانش با فرض متغیر بودن شکل مد درروش تقریبی و تأثیر همزمان جابجایی های قائم و افقی، مدلی تحلیلی برای ورقهای مستطیلی ارائه کردند که در این مدل شکل مد در هرلحظه قابل محاسبه است. با این محاسبه توزیع کرنش های محیطی که تا پیش از آن امکان پذیر نبود، ممکن شد، مدلهای قبلی که بهمنظور پیش بینی توزیع این کرنش ها به کار می فت نشان از وقوع کرنش های بزرگ در نواحی بیرونی و کرنش های کوچک در نواحی مرکزی داشت که کاملاً برعکس نتایج تجربی که نوریک برای پیش بینی های این مدل به خوبی با نتایج تجربی که نوریک برای ورقهای مستطیلی و مربعی با پیرامون گیردار تا نسبتهای خیز به ضخامت ۱۲ به دست آورده است. قابل مقایسهاند [۲۸–۳۳].

مدل سازی تحلیلی دیگری که در این زمینه انجامشده است مربوط به میرزابابای مستوفی و همکارانش است [۳۱]. آنها با ارائه یک حل تحلیلی تقریبی به بررسی رفتار غیر الاستیک ورقهای نازک چهارگوش تحت دو نوع بارگذاری مختلف دفعی پرداختهاند. حل ارائهشده بر اساس کار پلاستیک و انرژی جنبشی و با فرض رفتار صلب پلاستیک ورق توسعه دادهشده است. در تحلیل صلب پلاستیک از سطح تسلیمی استفاده کردند که در آن تنها نیروهای غشایی به عنوان کار پلاستیک در نظر گرفته و از معادله کوپر-سیموندز برای بررسی اثر نرخ کرنش استفاده شد. در این تحقیق بار وارده با فرض میدان سرعت اولیه و بر استفاده شد. در این تحقیق بار وارده با فرض میدان سرعت اولیه و بر مدل های ارائهشده خیز نهایی ورقهای چهارگوش تحت بارگذاری دفعی یکنواخت و محلی را پیشبینی کرده و انطباق قابل قبولی با نتایچ تجربی دارد.

با توجه به ادبیات تحقیق و جستجوی نویسندگان، تاکنون تحقیقی که در آن کرنشهای خمشی و غشایی در یک عبارت با یکدیگر کوپل شوند و اثر آن بر پاسخ غیر الاستیک ورق،های مستطیلی تحت بار دینامیکی بررسی شود، ارائه نشده است. لذا در این تحقیق به بررسی تحلیلی و تجربی اثر کرنشهای خمشی و غشایی کوپل شده بر تغییر شکل بزرگ پلاستیک ورقهای مستطیلی تحت بارگذاری ضربهای پرداخته می شود. روند مدل سازی تحلیلی فرآیند بدین گونه است که با فرض یک گستره دلخواه برای تابع تغییر شکل، انرژیهای کرنشی خمشی و غشایی با استفاده از روش انرژی و تئوری حد بالا به دست میآیند. سپس با بهرهگیری از معادله کوپر-سیموندز، اثر حساسیت ماده به نرخ کرنش وارد معادلات تحلیلی می گردد. در قسمت بعدی، با در نظر گرفتن کرنشهای خمشی و غشایی کوپل شده، اثر مکان هندسی تار خنثی و همچنین کششی یا فشاری بودن کرنش مربوطه بر میزان تغییر شکل نهایی ورق بررسی می شود. در قسمت نهایی، برای صحت سنجی نتایج تحلیلی بهدستآمده، از نتایج تجربی مربوط به شکلدهی ورقهای مستطیلی تحت بار ضربهای با سامانه چکش پرتابه-ای استفادہ می شود.

۲- مدل سازی تحلیلی

۲-۱- روش انرژی با در نظر گرفتن کرنشهای غشایی و خمشی

در این بخش با استفاده از روش انرژی میزان کار پلاستیک ناشی

از تغییر شکل بزرگ ورقهای مستطیلی تحت بار دینامیکی ضمن در نظر گرفتن کرنشهای غشایی و خمشی، محاسبه میشود. لازم به توضیح است که در تغییر شکلهای بزرگ پلاستیک ناشی از بارگذاری ضربهای، تابع موردنظر به صورت گنبدی شکل بوده و شرایط مرزی ورق کاملاً گیردار است. با بررسیهای انجامشده بر روی آزمایشها، معادلات (۱) تا (۳)، پاسخ مناسبی برای گستره تغییر شکل ورق در راستای عمود بر صفحه را ارائه می دهند [۳۲].

$$u = c\left(\frac{x}{a}\right) \left(1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2\right) \left(1 - \left(\frac{y}{b}\right)^2\right)$$
(1)

$$v = c \left(\frac{y}{b}\right) \left(1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2\right) \left(1 - \left(\frac{y}{b}\right)^2\right)$$
(Y)

$$w = W_0 \left(1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 \right) \left(1 - \left(\frac{y}{b}\right)^2 \right)$$
(*)

در این روابط u، v و w توابع جابجایی مربوط به ورق مستطیلی، aو d به ترتیب نصف طول و عرض ورق، W_0 مقدار جابجایی مرکز ورق و C ضریب مجهولی است که در ادامه با استفاده از روش کمینه کردن انرژی پتانسیل [۳۲] به دست میآید. شکل ۱ نمودار جابجایی عمودی نصف ورق را در راستای طول آن با چند تابع موجود در سایر مراجع [۲۶،۲۷] مقایسه میکند.

در شکل (۱، توابع (x_{0}^{*} به $w(x,y) = W_{0} \cos\left(\frac{\pi x}{2a}\right) \cos\left(\frac{\pi y}{2b}\right)$ و تر تیب $\left(\frac{\pi y}{2b}\right) \cos\left(\frac{\pi x}{2a}\right) \cos\left(\frac{\pi y}{2b}\right)$ هستند. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (۱، با توجه به قسمت دوم شکل که شامل مقایسه با نتیجه تجربی ورق بعد از تغییر شکل است، این گستره مطابق قابل قبولی با نتایج تجربی دارد و مشخص است که گستره مفروض پیشنهادی در معادله (۳) رفتار یکنواخت تری دارد. این بدین معنا است که گستره تغییر شکل پیشنهادی نسبت به سایر توابع تغییر شکل موجود گنبدی تر است و با نتایج تجربی تطابق بیشتری دارد.

روابط عمومی کرنش-تغییر مکان صفحه میانی ناشی از خمش و کشیدگی ورق یا بهعبارتدیگر کرنشهای خمشی و غشایی طبق معادلات (۴) تا (۹) به دست میآیند.

$$\varepsilon_x^m = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \tag{f}$$

$$\varepsilon_y^m = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \tag{\Delta}$$

$$\gamma_{XY}^{m} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \left(\frac{\partial w}{\partial y}\right) \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right) \tag{9}$$

$$\varepsilon_x^b = -Z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \tag{Y}$$

$$\varepsilon_x^b = -Z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \tag{A}$$

$$y_{xy}^b = 2Z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \tag{9}$$

در روابط (۴) و (۵)، عبارت اول نشاندهنده تأثیر جابهجاییهای طولی و عرضی بر کرنش غشایی است. شایانذکر است که عبارت بعدی

اثر کرنش های خمشی و غشایی کوپل شده بر تغییر شک

بیانگر تأثیر جابه جایی عمود بر صفحه است. اکنون با کمینه کردن انرژی پتانسیل مقدار c از رابطه (۱۰) مشخص می شود. $U_m = \frac{Eh}{2(1-v^2)} \iint \left(\frac{\left(\varepsilon_x^m \right)^2 + \left(\varepsilon_y^m \right)^2 + 2v \varepsilon_x^m \varepsilon_y^m + \right)}{\frac{1-v}{2} \left(y_{xy}^m \right)^2} \right) dx dy$ $\frac{\partial U_m}{\partial c} = 0$ (۱۰)

$$c = \frac{-4W_0^2 \left[6\left(a^3 + b^3\right) + ab(a+b)(-3v+1) \right]}{ab \left[(5v-47)\left(a^2 + b^2\right) - 7ab(1+v) \right]}$$

در رابطه (۱۰)، ۲ ضریب پواسون و H ضخامت ورق است. همان طور که ملاحظه می شود برای c ، عبارتی بر حسب ابعاد، نسبت پواسون و مقدار جابجایی مرکز ورق به دست می آید.



شکل ۱-مقایسه گسترههای تغییر شکل متفاوت و مقایسه با نتایج تجربی

لازم به توضیح است که با توجه به تقارن ورق های شکل گرفته پس از آزمایش (۳۲،۲۱]، تنها یک چهارم از ورق مستطیلی برای بررسی روابط و کوتاهی معادلات به دست آمده می شود، همینطور با توجه به جواب های بدست آمده از تحلیل، مشخص می شود که نتایج تحلیلی تطابق قابل قبولی با نتایج حاصل از قسمت تجربی دارند. در ادامه شکل ۲ محدوده در نظر گرفته شده برای تحلیل و مکان گیری محور های مختصات روی ورق را نمایش می دهد. این مکان گیری به این صورت است که مبدا در مرکز ورق مستطیلی قرار دارد. در شکلهای ارائه شده، نظ ممتد نشان دهنده کرنش غشایی ضمن حضور جابه جاییهای طولی و عرضی است و خطچین بیان گر کرنش غشایی در غیاب این جابه-جاییها می باشد. لازم به توضیح است که نمودار کرنش های غشایی

طولی و عرضی برحسب جابهجایی مربوطه بر روی خطوط محور تقارن مرکزی رسم شدهاند.



شکل ۲- مکان گیری محور های مختصات در ورق مستطیلی

برای بررسی اثر جابجاییهای طولی u و عرضی v بر رفتار کرنشهای غشایی بهدستآمده، ابتدا مطابق شکلهای ۳ و ۴، نمودار مربوط به کرنش غشایی برحسب جابجایی در دو راستای طولی و عرضی ورق رسم شدهاند.



با بررسی عمیق شکلهای ۳ و ۴ این نتیجه حاصل می شود که با حرکت از مرکز ورق به سمت مرز گیردار، مقدار کرنش رفته رفته افزایشیافته و به تبع آن افزایش کرنش، باعث پارگی در مرزهای گیردار

ورق می شود.یکی از نکات قابل بررسی در تحلیل تغییر شکل بزرگ پلاستیک ورق مستطیلی تحت بار دینامیکی، اضافه کردن اثر جابه-جاییهای طولی و عرضی است که موجب بالا رفتن حجم محاسبات و پیچیدگی روابط تحلیلی با فرض ثابت بودن ضخامت حین تغییر شکل می شود. لازم به توضیح است که میزان اختلاف سطح به وجود آمده از نمودارهای ۲ و ۳ نشان دهنده اثر مستقیم این جابه جاییها بر مقدار کار پلاستیک ورق است. این مقدار با انتگرال گیری از سطح زیر نمودار کرنش غشایی بر حسب جابه جایی برای دو حالت طولی و عرضی به دست می آید که می توان این مقدار را به عنوان یک پارامتر مهم برای مقایسه اثر حذف جابه جاییهای طولی و عرضی از معادلات کرنش غشایی در نظر گرفت.

با توجه به توضیحات ارائهشده، روابط (۱۱) تا (۱۴) بیانگر میزان سطح ایجادشده است.

$$S_{e_x^m} = \int_{0}^{a} \int_{0}^{b} e_x^m dy dx = \frac{16}{45} \frac{bW_0^2}{a}$$
(11)

$$S_{\varepsilon_{x}}^{'} = \iint_{0}^{a} \int_{0}^{b} \left(\varepsilon_{x}^{m}\right)^{'} dy dx = \frac{16}{45} \frac{bW_{0}^{2}}{a}$$
(17)

$$S_{\varepsilon_y^m} = \iint_{0}^{ab} \varepsilon_y^m dy dx = \frac{16}{45} \frac{aW_0^2}{b}$$
(17)

$$S_{\varepsilon_{y}^{m}}^{'} = \int_{0}^{a} \int_{0}^{b} \left(\varepsilon_{y}^{m}\right)' dy dx = \frac{16}{45} \frac{aW_{0}^{2}}{b}$$
(14)

در این روابط، $x = m^m 2$ و $x = m^m 2$ بیانگر کرنشهای غشایی طولی و عرضی با حضور جابجاییهای مربوطه است. همچنین '(x = 2) و '(x = 2)نشاندهنده کرنش غشایی طولی و عرضی در غیاب این جابجاییها است. لازم به توضیح است که S نشاندهنده مقدار مساحت با توجه به کرنش مربوطه برای حالتهای مختلف است. با مشاهده نتایج حاصل از انتگرال گیری کاملاً واضح است که در نظر گرفتن جابهجاییهای طولی و عرضی در روابط کرنش غشایی باعث تغییر مقدار مساحت نشدهاند و می توان از اثر آنها در کرنشهای غشایی طولی و عرضی صرفنظر کرد. برای بررسی اثر جابهجاییهای موردبحث در کرنش غشایی برشی داریم:

$$S_{\gamma_{XY}}^{m} = \int_{0}^{a} \int_{0}^{b} \gamma_{Xy}^{m} dy dx = \frac{1}{4} W_{0}^{2} - \frac{1}{4} c \left(a + b \right)$$
(1)

$$S'_{\gamma_{XY}} = \iint_{0}^{ab} \gamma_{XY}^{m} dy dx = \frac{1}{4} W_{0}^{2}$$
(19)

با توجه به نتایج حاصل از روابط (۱۵) و (۱۶)، میزان اختلاف سطح برای زمانی که اثر جابهجاییهای طولی و عرضی در روابط کرنش غشایی هستند یا از آنها صرفنظر شده، برابر است با(4 + b). ا توجه به اینکه مقادیر ابعاد در واحد میلیمتر یا سانتیمتر هستند مقدار بهدستآمده بسیار کوچک بوده و قابل صرفنظر است. لذا از نتایچ بهدستآمده میتوان استنتاج کرد که جابهجاییهای طولی و عرضی تأثیری بر مقدار کار پلاستیک حاصل از تغییر شکل ورق تحت بار

دینامیکی ندارند و میتوان در ادامه تحلیل برای پایین آمدن حجم محاسبات از آنها صرفنظر کرد.

با توجه رابطه کار پلاستیک انجامشده در حین تغییر شکل برای ورق مستطیلی که در رابطه (۱۷) ارائهشده است، مقدار انرژیهای کرنشی خمشی و غشایی از روابط (۱۸) و (۱۹) قابل محاسبه هستند [۳۲.۳۱].

$$W_{p} = 4\sigma_{D}H \int_{0}^{b} \int_{0}^{a} \left(\varepsilon_{x} + \varepsilon_{y} + \frac{2}{\sqrt{3}}\gamma_{xy}\right) dxdy \tag{1Y}$$

$$U_b = \frac{4}{\sqrt{3}} \sigma_D W_0 H^2 = \beta \sigma_D W_0 H^2 \tag{11}$$

$$U_m = \sigma_D H W_0^2 \left(\frac{2}{\sqrt{3}} + \frac{64}{45} \left(\frac{a}{b} + \frac{b}{a}\right)\right) = \alpha \sigma_D H W_0^2 \tag{19}$$

همانطور که در قسمتهای پیشین به آن اشاره شد پارامترهای aو b به ترتیب نصف طول و عرض ورق مستطیلی هستند: بنابراین ضریب 4 بیانکننده کار پلاستیک برای کل ورق مستطیلی است. با توجه به اینکه فرآیند شکلدهی به صورت دینامیکی انجام می شود. استفاده از تنش تسلیم دینامیکی σ در رابطه مربوط به کار پلاستیک استفاده شده است. همینطور مشخص است که در روابط بالا مقادیر α

و
$$\beta$$
 به ترتیب برابر با $\left(\frac{2}{\sqrt{3}} + \frac{64}{45}\left(\frac{a}{b} + \frac{b}{a}\right)\right)$ است.

با توجه به روابط (۱۸) و (۱۹)، مقدار انرژی کرنشی کل برابر است با حاصل جمع انرژیهای کرنشی خمشی و غشایی که در رابطه (۲۰) ارائهشده است.

$$U_t = \sigma_D W_0 H^2 \left(\alpha \left(\frac{W_0}{H} \right) + \beta \right) \tag{(Y \cdot)}$$

در این پژوهش تنش تسلیم دینامیکی از رابطه کوپر-سیموندز استخراج میشود که رابطه آن به فرم زیر است [۳۳-۳۵].

$$\sigma_D = \sigma_y \left(1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{D}\right)^{\frac{1}{q}} \right) \tag{(1)}$$

در رابطه (۲۱)، σ_a تنش تسلیم دینامیکی با در نظر گرفتن نرخ کرنش متوسط پلاستیک، σ_y تنش تسلیم استاتیکی و \dot{s} نرخ کرنش پلاستیک است. همچنین در این رابطه p پارامتر سختشوندگی کرنشی و D پارامتر ویسکوزیته هستند که مقادیر آن در مراجع [۳۳–۳۵] برای مواد با جنسهای مختلف موجود است.

نرخ کرنش پلاستیک برای ورقهای مستطیلی با استفاده از تحقیقات شن بهصورت رابطه (۲۲) حاصل شده است [۳۶].

$$\dot{\varepsilon} = \frac{W_0 V_0}{3\sqrt{2}abD} \tag{(YY)}$$

که در این رابطه₀/0 سرعت ضربه زننده است. با جایگذاری معادله (۲۲) در (۲۱)، معادله (۲۲) حاصل می شود.

$$\sigma_D = \sigma_y \left(1 + \left(\frac{W_0 V_0}{3\sqrt{2}abD} \right)^{\frac{1}{q}} \right)$$
(YY)

با تعریف پارامتر کم در رابطه (۲۴)، رابطه (۲۳) بهصورت معادله (۲۵) خلاصه میشود.

$$\xi = \left(\frac{HV_0}{3\sqrt{2}abD}\right)^{\frac{1}{q}} \tag{(Yf)}$$

$$\sigma_D = \sigma_y \left(1 + \zeta \left(\frac{W_0}{H} \right)^{\frac{1}{q}} \right) \tag{Y}\Delta$$

انرژی صرف شده بهوسیله کار پلاستیک در مرحله تغییر شکل برابر باانرژی پتانسیل تغییر شکل ورق هنگام جابجایی است که این انرژی از طریق چکش پرتابهای که با وزن مشخص از ارتفاع معین رهاشده تأمین میشود. بنابراین با مساوی قرار دادن رابطه (۲۰) باانرژی پتانسیل، استفاده از رابطه (۲۵) و صرفنظر کردن از عبارت 1 ور توان، معادله (۲۶) حاصل می شود.

$$Mgh = \sigma_{y} \left(1 + \xi \right) H^{3} \left(\alpha \left(\frac{W_{0}}{H} \right)^{2} + \beta \left(\frac{W_{0}}{H} \right) \right)$$
(Y9)

اکنون نسبت خیز مرکزی ورق به ضخامت آن برای ورقهای مستطیلی تحت بار هیدرودینامیکی از رابطه (۲۷) به دست میآید.

$$\frac{W_0}{H} = \frac{-\beta}{2\alpha} + \sqrt{\left(\frac{\beta}{2\alpha}\right)^2 - \frac{Mgh}{\sigma_y (1+\xi)\alpha H^3}}$$
(YV)

در صورت صرفنظر کردن از اثر کرنشهای خمشی، رابطه موردنظر بهصورت معادله (۲۸) تغییر میکند.

$$\frac{W_0}{H} = \left(\frac{Mgh}{\sigma_y \left(1 + \zeta\right) \alpha H^3}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{1}$$

۲-۲- اثر کرنشهای خمشی و غشایی کوپل شده

در روابط تحلیلی استخراج شده قسمت قبل، اثر کششی یا فشاری بودن تنش در نواحی مختلف بر میزان تغییر شکل نهایی ورق بررسی نشده است. در این بخش، در مرحلهی اول، مرزهای بین نواحی کششی و فشاری ورق که لزوماً مرتبط با مکان هندسی تار خنثی هستند به دست میآیند که در آنها تغییر شکلهای خمشی و غشایی با یکدیگر کوپل شدهاند اهمیت بررسی این موضوع بدان جهت است که در حین تغییر شکل پلاستیک، علامت تنش در تمام نواحی ورق یکسان نیست و بهتبع آن میزان کار پلاستیک تغییر میکند که در محاسبه میزان خیز نهایی ورق تأثیرگذار است.

با توجه به توضیحات ارائهشده و در نظر گرفتن اثر همزمان تغییر شکلهای بزرگ پلاستیک خمشی و غشایی، روابط کرنش تغییر مکان بهصورت معادلات (۲۹) تا (۳۱) به دست میآیند.

$$\varepsilon_x = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 - Z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \tag{19}$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 - Z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \tag{(7.)}$$

$$\gamma_{XY} = \left(\frac{\partial w}{\partial y}\right) \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right) + 2Z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \tag{(1)}$$

در روابط ارائهشده، عبارت اول بیانگر کرنش غشایی و عبارت دوم نشاندهنده کرنش خمشی است. همچنین، Z فاصله از صفحه میانی ورق است. معادلات یاد شده، همان معادلات کرنش های غشایی و

خمشی به صورت مجزا هستند، که به منظور در نظر گرفتن اثر همزمان آنها به صورت کلی در قالب کرنش کلی در راستای طول و عرض ورق مستطیلی و کرنش زاویه ارائه شده اند[۳۱].

با جایگذاری معادله (۳) در روابط (۲۹) تا (۳۱)، روابط (۳۲) تا (۳۲) (۳۲) (۳۲) (۳۲) (۳۲)

$$\varepsilon_x = \frac{2W_0^2 x^2 \left(1 - \left(\frac{y}{b}\right)^2\right)^2}{a^4} + \frac{2ZW_0 \left(1 - \left(\frac{y}{b}\right)^2\right)}{a^2} \tag{(77)}$$

$$\varepsilon_{y} = \frac{2W_{0}^{2}y^{2} \left(1 - \left(\frac{x}{a}\right)^{2}\right)^{2}}{b^{4}} + \frac{2ZW_{0} \left(1 - \left(\frac{x}{a}\right)^{2}\right)}{b^{2}}$$
(77)

$$\gamma_{xy} = \frac{4W_0^2 xy \left(1 - \left(\frac{y}{b}\right)^2\right) \left(1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2\right)}{(ab)^2} + \frac{8ZW_0 xy}{(ab)^2}$$
(**)

با دقت در رابطههای بالا ملاحظه میشود که مقادیر کرنشهای غشایی و خمشی در هر نقطه از ورق مستطیلی در مختصات دکارتی قابل محاسبه هستند. همان طور که مشخص است، مجموع کرنشهای غشایی و خمشی در دو راستای طولی و عرضی در نواحی بالای صفحه میانی ورق دارای علامت مثبت و در نواحی پایین صفحه میانی ورق علامتی مخالف یکدیگر دارند. برای درک بهتر این موضوع، رابطه مربوط به x_3 را در نظر بگیرید. در این رابطه، عبارت اول مربوط به کرنش غشایی طولی بوده و همواره مثبت است اما عبارت دوم مربوط به کرنش خمشی طولی است که در نواحی پایین صفحه میانی ورق مقداری کمتر از صفر دارد.

مرز بین نواحی فشاری و کششی لزوماً به مکان هندسی تار خنئی مربوط می شود که با یافتن نقاطی که در آنها مقدار کرنش صفر است، به دست می آید. به عبارت دیگر، مکان هندسی تار خنثی (\overline{Z}_{x} و \overline{Z}_{y}) از برابر صفر قرار دادن مقادیر کرنشهای طولی x^{3} و عرضی y^{3} مطابق روابط (۳۵) و (۳۶) به دست می آید.

$$\bar{Z}_{x} = -W_{0} \left(\frac{x}{a}\right)^{2} \left(1 - \left(\frac{y}{b}\right)^{2}\right) \tag{7}$$
$$\bar{Z}_{y} = -W_{0} \left(\frac{y}{b}\right)^{2} \left(1 - \left(\frac{x}{a}\right)^{2}\right) \tag{7}$$

علامت منفی در روابط (۳۵) و (۳۶) نشاندهنده قرار گرفتن تار خنثی بر روی صفحه میانی یا زیر آن است. این موضوع در شکل ۵ بهخوبی نشان دادهشده است.

فاصلههای طولی و عرضی تار خنثی \overline{X} و \overline{Y} ، مکانهایی هستند که تار خنثی مرتبط با کرنشهای طولی و عرضی، از صفحه پایینی ورق می گذرد. مقادیر مذکور، با برابر قرار دادن پارامترهای \overline{Z}_x و \overline{X} با $\frac{H}{2}$ - به دست می آیند که در روابط (۳۷) و (۳۸) ارائهشده است.

$$\overline{X}_{1,2} = \frac{a}{\sqrt{2}} \sqrt{1 \pm \sqrt{-2\frac{H}{W_0} + 1}}$$
(٣Y)

$$\overline{Y}_{1,2} = \frac{b}{\sqrt{2}} \sqrt{1 \pm \sqrt{-2\frac{H}{W_0} + 1}} \tag{(\%A)}$$

همان طور که از روابط (۳۷) و (۳۸) مشخص است، تار خنثی در

دو فاصله طولی و عرضی مجزا صفحه پایینی ورق را قطع می کند. با توجه به توضیحات مقدماتی در بخش حاضر، نتایج به دست آمده تعیین کننده کران های انتگرال محاسبه کار پلاستیک درروش انرژی هستند که نشان دهنده وابستگی کامل مقدار کار پلاستیک به مکان هندسی تار خنثی است. لازم به توضیح است که روابط به دست آمده تنها برای زمانی صادق است که نسبت خیز مرکزی ورق به ضخامت آن بیشتر از دو باشد و برای سایر مقادیر با توجه به اینکه تار خنثی صفحه میانی ورق را قطع نمی کند، مقادیر \overline{X} و \overline{Y} برابر صفر هستند.



با توجه به نتایج بهدستآمده در این بخش، رابطه (۱۷) بهصورت زیر اصلاح میشود.

$$\begin{split} W_{p} &= 4 \int_{0}^{\overline{X}_{1}} \int_{0}^{\overline{Y}_{1}} \overline{Z}_{x}^{\overline{Z}} (-\sigma_{D}) \varepsilon_{x} dz dy dx + 4 \int_{0}^{\overline{X}_{1}} \int_{0}^{\overline{Y}_{1}} \int_{\overline{Z}_{x}}^{H} (\sigma_{D}) \varepsilon_{x} dz dy dx + \\ &4 \int_{\overline{X}_{1}}^{\overline{X}_{2}} \int_{\overline{Y}_{1}}^{\overline{Z}_{2}} \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} (\sigma_{D}) \varepsilon_{x} dz dy dx + 4 \int_{\overline{X}_{2}}^{a} \int_{\overline{Y}_{2}}^{b} \int_{-\frac{H}{2}}^{\overline{Z}_{x}} (-\sigma_{D}) \varepsilon_{x} dz dy dx + \\ &4 \int_{\overline{X}_{2}}^{a} \int_{\overline{Y}_{2}}^{b} \int_{\overline{Z}_{x}}^{\frac{H}{2}} (\sigma_{D}) \varepsilon_{x} dz dy dx + 4 \int_{0}^{\overline{X}_{1}} \int_{0}^{\overline{Y}_{1}} \int_{-\frac{H}{2}}^{\overline{Z}_{y}} (-\sigma_{D}) \varepsilon_{y} dz dy dx + \\ &4 \int_{\overline{X}_{2}}^{\overline{X}_{2}} \int_{\overline{Y}_{2}}^{\overline{Y}_{2}} \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} (\sigma_{D}) \varepsilon_{y} dz dy dx + 4 \int_{0}^{\overline{X}_{1}} \int_{0}^{\overline{Y}_{1}} \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} (\sigma_{D}) \varepsilon_{y} dz dy dx + \\ &4 \int_{0}^{a} \int_{0}^{\overline{Z}_{y}} \int_{\overline{Z}_{y}}^{\overline{Z}_{y}} (-\sigma_{D}) \varepsilon_{y} dz dy dx + 4 \int_{\overline{X}_{1}}^{\overline{Y}_{1}} \int_{\overline{Y}_{1}}^{\frac{H}{2}} (\sigma_{D}) \varepsilon_{y} dz dy dx + \\ &4 \int_{\overline{X}_{2}}^{a} \int_{\overline{Y}_{2}}^{b} \int_{-\frac{H}{2}}^{\overline{Z}_{y}} (-\sigma_{D}) \varepsilon_{y} dz dy dx + 4 \int_{\overline{X}_{2}}^{a} \int_{\overline{Y}_{2}}^{b} \int_{\overline{Z}_{y}}^{\frac{H}{2}} (\sigma_{D}) \varepsilon_{y} dz dy dx + \\ &8 \int_{0}^{b} \int_{0}^{\frac{H}{2}} (\sigma_{D} \frac{2}{\sqrt{3}} \gamma_{xy}) dz dy dx \\ &8 \int_{0}^{b} \int_{0}^{\frac{H}{2}} (\sigma_{D} \frac{2}{\sqrt{3}} \gamma_{xy}) dz dy dx \\ &y to the extense \ \lambda_{timb} to the extense \ \lambda_{tim} tot to the extense \ \lambda_{tim} to the exte$$

نواحی زیر تار خنثی است. نواحی زیر تار خنثی است.

با محاسبه کار پلاستیک از رابطه (۳۹) رابطه نهایی آن در معادله (۴۰) به دست میآید.

$$W_p = \sigma_D H^3 \left[\left(\frac{a}{b} + \frac{b}{a} \right) (W_{P1} + W_{P2} + W_{P3}) + W_{P4} \right] \tag{(f.)}$$

$$W_{p1} = \frac{4}{1575} \left(576 \left(\frac{W_0}{H}\right)^3 + 200 \left(\frac{W_0}{H}\right)^2 + 585 \left(\frac{W_0}{H}\right) + 390 \right)$$
(f1)

$$W_{p2} = \frac{\sqrt{2} \left(\frac{W_0}{H}\right)}{1050} \sqrt{1 + \sqrt{1 - \frac{2H}{W_0}}} * \left[-3 \left(268 \left(\frac{W_0}{H}\right)^2 - 118 \left(\frac{W_0}{H}\right) + 525\right) + \sqrt{1 - \frac{2H}{W_0}} \left(36 \left(\frac{W_0}{H}\right)^2 - 30 \left(\frac{W_0}{H}\right) + 175\right)\right]$$
(F7)

$$W_{p3} = -\frac{2\sqrt{2\left(\frac{W_0}{H}\right)}}{45} \left(30\left(\frac{W_0}{H}\right) - 17\right)$$
(Fr)

$$W_{p3} = \frac{2\left(\frac{W_0}{H}\right)}{\sqrt{3}} \left(\left(\frac{W_0}{H}\right) + 2 \right) \tag{(ff)}$$

با برابر قرار دادن معادله (۴۰) با مقدار انرژی پتانسیل وارد بر ورق، نسبت خیز مرکزی ورق به ضخامت آن محاسبه میشود.

۳- صحتسنجی نتایج مدل تحلیلی و بحث

در این بخش بهمنظور صحتسنجی نتایج مدلهای تحلیلی ارائهشده از نتایج تجربی مربوط به شکلدهی ورقهای مستطیلی تحت بارگذاری ضربهای با استفاده از سامانه چکش پرتابهای استفادهشده است. در این سامانه، وزنهها با جرم موردنظر در ارتفاع مشخص قرار دادهشده و پس از رهاسازی، انرژی پتانسیل ذخیرهشده در وزنهها به انرژی جنبشی تبدیل میشود و در ادامه با برخورد وزنهها با پیستونی که بر سطح آب قرارگرفته است، انرژی جنبشی به فشار میدودینامیکی در آب تبدیلشده و ورق انتهای حوضچه را شکل میدهد. نتایج تجربی بهدستآمده از این تحقیق به همراه نتایج تجربی حاصل از آزمون کشش به ترتیب در جدولهای ۱ و ۲ ارائهشده است. برای اطلاعات بیشتر در مورد روند کار تجربی میتوان به مراجع

برای ارزیابی دقت مدلهای تحلیلی ارائهشده با استفاده از روش انرژی برای ورقهای مستطیلی تحت بارگذاری ضربهای، در شکلهای ۶ و ۷، مقادیر تحلیلی و تجربی نسبت خیز مرکز ورق به ضخامت برای تمامی آزمایشهای ارائهشده در جدول ۱ که شامل ورق های فولادی و آلومینیومی مستطیلی بوده مقایسه شده است. لازم به ذکر است که در این اشکال مقادیر تحلیلی از به ترتیب از معادلات (۲۷) و (۲۸) استخراجشده است.

در شکلهای ارائهشده در این بخش، خط x = x یا خط ۴۵ درجه مکان هندسی نقاطی است که مقادیر تحلیلی با تجربی برابر هستند و خطوطی که با تلورانس t± مشخصشدهاند، حالت کاملاً سختگیرانه و محدود است.

با مقایسه نتایج ارائهشده در این اشکال میتوان به این نکته دست-یافت که اضافه کردن اثر انرژی خمشی در روند مدلسازی تحلیلی

تأثیر چندانی بر میزان خیز مرکزی ورق نداشته و این بدان علت است که در تغییر شکل پلاستیک، نیروهای غشایی بر نیروهای خمشی غلبه میکنند. بهطورکلی در تحلیل ورقهای آلومینیومی و فولادی مستطیلی تحت بارگذاری ضربهای با روش انرژی (معادلات (۲۷) و (۸۲)) ۸۰٪ از دادههای تجربی در محدوده ۱± (خط اراکهشده در معادلات (۲۷) و (۲۸) برای پیش بینی خیز مرکز ورقهای مستطیلی تحت بارگذاری ضربهای است.

بهمنظور بررسی اثر کرنشهای خمشی و غشایی کوپل شده بر تغییر شکل بزرگ پلاستیک ورقهای مستطیلی تحت بارگذاری ضربهای، در شکل ۸، نتایج تحلیلی بهدستآمده از این حالت برای نسبت خیز مرکزی ورق به ضخامت آن برحسب نتایج تجربی نشان شده است.

	G			
خيز مركزى	ارتفاع	ضخامت		~
ورق	وزنه	ورق	جنس ورق	شماره ازمایش
(mm)	(cm)	(mm)		
۲۲/۰۵	78.	٣	فولاد	١
۲۰/۲۷	۲۵۰	٣	فولاد	٢
۲۳/۹۸	۲۵۰	٢	فولاد	٣
19/47	222	٣	فولاد	۵
۲۳/۶۸	222	٢	فولاد	۵
١٨/١٣	7	٣	فولاد	۶
22/61	۲۰۰	٢	فولاد	٧
۳۱/۰۶	۲۰۰	١	فولاد	٨
۱۵/۰۶	۱۲۰	٣	فولاد	٩
۱۸/۲۰	۱۲۰	٢	فولاد	١٠
۲۸/۹۷	۱۲۰	١	فولاد	11
۱۸/۱۰	۱۵۰	٢	فولاد	١٢
۲۶/۸۱	۱۵۰	١	فولاد	١٣
۲۶/۰۱	4.	١	آلومينيوم	14
14/10	4.	٢	آلومينيوم	۱۵
۱۷/۰۱	۵۰	٢	آلومينيوم	18
26/61	۳۵	١	آلومينيوم	١٧
77/77	٧٠	٢	آلومينيوم	١٨
۱۸/۶۸	۶۰	٢	آلومينيوم	١٩
14/17	۱۵	١	آلومينيوم	۲۰
14/49	۲۰	١	آلومينيوم	71

1.25	~.l;;	-1	10.12
تجزيعي	سيج	-16	جدور

جدول ۲- خواص مکانیکی مواد

چگالی (kg/m ³)	میانگین تنش تسلیم استاتیکی (MPa)	میانگین تنش نهایی (MPa)	مادہ
۷۸۵۰	۲۸۹	478	فولاد
77	175	۱۵۳	آلومينيوم

نتایج بهدستآمده و همچنین میزان مجموع مربعات خطای برازش (RMSE) نشاندهنده آن است که در نظر گرفتن کرنشهای خمشی و غشایی کوپل شده موجب نزدیک شدن نتایج تحلیلی به تجربی می-شود. این موضوع بدان علت است که در این حالت مکان هندسی تار خنثی بهدستآمده و کرانهای انتگرال محاسبه کار پلاستیک قابلیت ارزیابی کششی یا فشاری بودن کرنش و بهتبع آن تنش را در ناحیه مربوطه دارند.



شكل ۶- مقادير تحليلي و تجربي نسبت خيز مركز ورق به ضخامت



شكل ٧- مقادير تحليلي و تجربي نسبت خيز مركز ورق به ضخامت



شکل ۸- مقادیر تحلیلی و تجربی نسبت خیز مرکز ورق به ضخامت

۴- نتیجهگیری

در این مقاله اثر کرنشهای خمشی و غشایی کوپل شده بر تغییر

شکل بزرگ پلاستیک ورق های مستطیلی تحت بارگذاری ضربهای به صورت تحلیلی و تجربی بررسی شد. در نظر گرفتن کرنشهای خمشی و غشایی کوپل شده در مدلسازی تحلیلی از نوآوریهای تحقیق حاضر محسوب می شود که تاکنون تنها برای ورق های دایروی انجام گرفته بود. نتایج تحلیلی بهدست آمده در بخش دوم نشان داد که می توان از اثر جابجاییهای طولی و عرضی در تحلیل تغییر شکلهای بزرگ ورقهای مستطیلی تحت بار دینامیکی صرفنظر کرد. لازم به توضيح است كه با توجه به نتايج بهدست آمده، افزودن جابجايي هاي طولی و عرضی تنها توزیع کرنش پلاستیک را تغییر میدهد و تأثیری بر مقدار كار پلاستيك و بهتبع آن ميزان خيز نهايي ورق ندارد. نتايج بهدستآمده یک توجیه دقیق برای فرضیه حذف جابجاییهای طولی و عرضی از روند مدلسازی تحلیلی است. این در صورتی است که جابجاییهای طولی و عرضی برای به دست آوردن توزیع کرنش پلاستیک قابل حذف نیستند و حتماً باید به معادلات اضافه شوند. در مرحله بعدی، یک مدل تحلیلی که اثر متقابل کرنشهای خمشی و غشایی را در نظر می گیرد ارائه شد که نتایج بهدست آمده در این مرحله نتایج نشان داد که در تغییر شکلهای بزرگ میتوان از کرنشهای خمشی صرفنظر کرد. این بدین دلیل است که اثر کرنشهای غشایی بر کرنشهای خمشی غلبه میکند. در فاز سوم از این تحلیل، اثر کرنشهای خمشی و غشایی کوپل شده بر تغییر شکل بزرگ پلاستیک ورقهای مستطیلی بررسی شد. در این قسمت با به دست آمدن مکان هندسی تار خنثی و همچنین در نظر گرفتن فشاری یا کششی بودن تنش و کرنش در ناحیه مربوطه، کرانهای انتگرال محاسبه کار یلاستیک به قسمتهای بیشتری شکسته شد. اضافه کردن اثر مربوطه بیان گر نزدیک شدن نتایج تحلیلی به مقادیر تجربی متناظر آن شد.

۵–نمادها

- a طول ورق
- b عرض ورق
 - c ضریب c
- D ثابت ماده
- E مدول الاستيسيته (kgm²s⁻²)
- g شتاب گرانش زمین (ms⁻²)
 - *h* ارتفاع چکش (m)
 - *H* ضخامت ورق (m)
 - M جرم چکش (kg)
 - q ثابت ماده
 - S سطح زیر نمودار
- *u* تابع جابجایی در جهت *x*
 - (kgm²s⁻²) انرژی (
- v تابع جابجایی در جهت *y*
 - / سرعت (ms⁻¹)
- w تابع جابجایی در راستای عمود بر صفحه
 - W خيز مركز ورق (m)
 - Z فاصله از صفحه میانی
 - α ضريب

ضريب	β
كرنش	З
تنش (kgm ⁻¹ s ⁻²)	σ
كرنش	Ϋ́
پارامتر تعریفشده برای نرخ کرنش	ξ
ضريب پواسون	υ
	بالانويسها
نرخ	
تار خنثی	-
غشایی	m
خمشى	b
	زيرنويسها
دینامیک	D
غشایی	m
پلاستیک	Р
تسليم	У
در جهت <i>x</i>	х
در جهت <i>Y</i>	У
برشى	xy
خمشى	b
مرکز	0
نهایی	t

- [1] Aune V., Fagerholt E., Hauge K.O., Langseth M., Børvik T., Experimental study on the response of thin aluminium and steel plates subjected to airblast loading. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 90, pp. 106-121, 2016.
- [2] Babaei H., MirzababaieMostofi T., Armoudli E., On dimensionless numbers for the dynamic plastic response of quadrangular mild steel plates subjected to localized and uniform impulsive loading. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, Vol. 231, No. 5, pp. 939-950, 2017.
- [3] Babaei H., MirzababaieMostofi T., New dimensionless numbers for deformation of circular mild steel plates with large strains as a result of localized and uniform impulsive loading. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials Design and Applications*, 2016.
- [4] Babaei H., MirzababaieMostofi T., Alitavoli M., Darvizeh A., Empirical modelling for prediction of large deformation of clamped circular plates in gas detonation forming process. *Experimental Techniques*, Vol. 40, No. 6, pp. 1485–1494, 2016.
- [5] Babaei H., Mostofi T.M., and Sadraei S.H., Effect of gas detonation on response of circular plate-experimental and theoretical, *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 56, No. 4, pp.535-548, 2015.
- [6] Micallef K., Fallah A.S., Curtis P.T., Louca L.A., On the dynamic plastic response of steel membranes subjected to localised blast loading. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 89, pp. 25-37, 2016.
- [7] Micallef K., Fallah A.S., Pope D.J., Louca L.A., Dynamic performance of simply supported rigid plastic circular thick steel plates subjected to localized blast loading. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 140, No. 1, pp. 159-171, 2013.

۷

- [23] Babaei H., Mirzababaie Mostofi T., Alitavoli M., Study on the response of circular thin plate under low velocity impact. *Geomechanics and Engineering*, Vol. 9, No. 2, pp. 207-218, 2015.
- [24] Zampaloni M., Abedrabbo N., Pourboghrat F., Experimental and numerical study of stamp hydroforming of sheet metals. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 45, pp. 1815–1848, 2003.
- [25] Cloete T.J., Nurick G.N., on the influence of radial displacements and bending strains on the large deflections of impulsively loaded circular plates. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 82, pp. 140-148, 2014.
- [26] Jones N., Uran T. O., Tekin S .A., The dynamic plastic behavior of fully clamped rectangular plates. *International Journal of Solids and Structures*, vol. 6, no. 12, pp. 1499-1512, 1970.
- [27] Jones N., Baeder R. A., An experimental study of the dynamic plastic behavior of rectangular plates. 1972.
- [28] Nurick G. N., Pearce H. T., Martin J. B., Predictions of transverse deflections and in-plane strains in impulsively loaded thin plates. *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 29, no. 6, pp. 435-442, 1987.
- [29] Nurick G., Martin J., Deformation of thin plates ubjected to impulsive loading—a review: Part i: theoretical considerations. *International Journal of Impact Engineering*, vol. 8, no. 2, pp. 159-170, 1989.
- [30] Nurick G., Martin J., Deformation of thin plates subjected to impulsive loading—a review part II: experimental studies. *International Journal of Impact Engineering*, vol. 8, no. 2, pp. 171-186, 1989.
- [31] Mirzababaie Mostofi T., Babaei H., Alitavoli M., Theoretical analysis on the effect of uniform and localized impulsive loading on the dynamic plastic behaviour of fully clamped thin quadrangular plates. *Thin–Walled Structures*, Vol. 109, pp. 367–376, 2016.
- [32] Babaei H., Mirzababaie Mostofi T., Alitavoli M., Experimental and theoretical study of large deformation of rectangular plates subjected to water hammer shock loading. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, Vol. 231, No. 3, pp. 490-496, 2017.
- [33] Jones N., Dynamic inelastic response of strain rate sensitive ductile plates due to large impact, dynamic pressure and explosive loadings. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 74, pp. 3-15, 2014.
- [34] Jones N., Structural impact, Second Edition, New York, Cambridge University Press, 2012.
- [35] Jones N., Jones C., Inelastic failure of fully clamped beams and circular plates under impact loading. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 216, No. 2, pp.133-149, 2002.
- [36] Shen W., Dynamic response of rectangular plates under drop mass impact. *International journal of impact engineering*, Vol. 19, No. 3, pp. 207-229, 1997.

- [8] Micallef K., Fallah A.S., Pope D.J., Louca L.A., The dynamic performance of simply-supported rigid-plastic circular steel plates subjected to localised blast loading. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 65, No. 1, pp. 177-191, 2012.
- [9] Li Q., Jones N., on dimensionless numbers for dynamic plastic response of structural members. Archive of Applied Mechanics, Vol. 70, No. 4, pp. 245-254, 2000.
- [10] Babaei H., Darvizeh A., Analytical study of plastic deformation of clamped circular plates subjected to impulsive loading. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, Vol. 7, No. 4, pp. 309-322, 2012.
- [11] Hassannejadasl A., Green D.E., Golovashchenko S.F., Samei J., Maris C., Numerical modelling of electrohydraulic free-forming and die-forming of DP590 steel. *Journal of Manufacturing Processes*. Vol. 16, pp. 391-404, 2014.
- [12] Mamutov A.V., Golovashchenko S.F., Mamutov V.S., Bonnen J.J.F., Modeling of electrohydraulic forming of sheet metal parts. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 219, pp. 84-100, 2015.
- [13] Cui X.H., Mo J.H., Li J.J., Zhao J., Zhu Y., Huang L., Li Z.W., Zhong K., Electromagnetic incremental forming (EMIF): A novel aluminum alloy sheet and tube forming technology. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 214, pp. 409-427, 2014.
- [14] Park H., Kim D., Lee J., Kim S., Lee Y., Moon Y., Effect of an aluminum driver sheet on the electromagnetic forming of DP780 steel sheet. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 235, pp. 158-170, 2016.
- [15] Aune V., Valsamos G., Casadei F., Larcher M., Langseth M., Børvik T., Numerical study on the structural response of blast-loaded thin aluminium and steel plates. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 99, pp. 131-144, 2016.
- [16] Kosing O. E., Skews B. W., An investigation of high-speed forming of circular plates in a liquid shock tube, *International Journal of Impact Engineering*. Vol. 21, No. 9, pp. 801-816, 1998.
- [17] Skews B.W., Kosing O.E., Hattingh R.J., use of a liquid shock tube as a device for the study of material deformation under impulsive loading conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 218, No. 1, pp. 39-51, 2044.
- [18] Cirak F., Deiterding R., Mauch P., Large-scale fluidstructure interaction simulation of viscoplastic and fracturing thin-shells subjected to shocks and detonations. *Computers & Structures*, Vol. 85, No. 11, pp. 1049-1065, 2007.
- [19] Alitavoli M., Babaei H., Mahmoudi A., Golbaf A., Mirzababaie Mostofi T., Experimental and analytical study of effective factors on compaction process of aluminium powder under the impact load by low speed. *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 7, pp. 22-30, 2015. (in Persian فارسي)
- [20] Babaei H., Mirzababaie Mostofi T., Alitavoli M., Namdari M., Experimental investigation and model presentation for predicting the behavior of metal and alumina powder compaction under impact loading. *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 5, pp. 357-366, 2015. (In Persian فارسی)
- [21] Babaei H., Mirzababaie Mostofi T., Alitavoli M., Experimental study and analytical modeling for inelastic response of rectangular plates under hydrodynamic loads. *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 361-368, 2015. (In Persian نفارسی)
- [22] Babaei H., Darvizeh A., Alitavoli M., Mirzababaie Mostofi T., Experimental and analytical investigation into plastic deformation of circular plates subjected to hydrodynamic loading. *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 305-312, 2015 (In Persian فارسی)