



مطالعه‌ی تجربی و عددی فرایند شکل‌دهی پینی تنش‌ی ورق‌های فلزی آلیاژ آلومینیوم

ناصر دبیری¹، سید هادی قادری^{2*}، مهدی گردویی²¹- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شاهرود، شاهرود²- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شاهرود، شاهرود

* شاهرود، صندوق پستی 3619995161، s.h.ghaderi@shahroodut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 20 تیر 1394

پذیرش: 28 شهریور 1394

ارائه در سایت: 28 مهر 1394

کلید واژگان:

شکل‌دهی ورق‌های فلزی

تنش پسماند

ساجمه‌زنی

شکل‌دهی پینی

شکل‌دهی پینی تنش‌ی

چکیده

شکل‌دهی پینی به‌عنوان یک روش شکل‌دهی مؤثر در صنایع هوایی، از فرایند ساجمه‌زنی مشتق شده است. کاربرد عمده‌ی آن جهت تولید قطعات نازک بزرگ با انحناهای ملایم از جمله پیل‌ها و پوسته‌ی بال هواپیماها می‌باشد. این فرایند به دو دسته‌ی شکل‌دهی پینی بدون پیش کرنش کشسان (شکل‌دهی پینی رایج) و با پیش‌کرنش کشسان (شکل‌دهی پینی تنش‌ی) قابل تقسیم است. در این پژوهش، مطالعه‌ی عددی و تجربی فرایندهای ساجمه‌زنی و شکل‌دهی پینی با و بدون پیش‌کرنش کشسان ورق‌های آلیاژ آلومینیوم Al6061-T6 استفاده شد. برای اعمال پیش‌کرنش کشسان، قیدهایی با چهار شعاع پیش‌خمش 500، 375، 250 و 0/4 mm و نوارهایی از آلیاژ آلومینیوم Al6061-T6 استفاده شد. برای اعمال پیش‌کرنش مشابه با آزمایش‌ها، ابتدا با استفاده از یک مدل سه‌بعدی با توزیع تصادفی ساجمه، فرایند ساجمه‌زنی شبیه‌سازی شده، تنش‌های اعمالی و پسماند ایجاد شده در ورق به‌دست آمد. در ادامه با استفاده از این مدل و طی روندی سه مرحله‌ای، فرایندهای شکل‌دهی پینی و شکل‌دهی پینی تنش‌ی شبیه‌سازی شدند. نتایج نشان داد که اعمال پیش‌کرنش کشسان در توزیع پروفیل تنش درون ورق و در نتیجه، در تغییر شکل نهایی آن تأثیر قابل توجهی دارد. با افزایش ممان پیش‌خمش (کاهش شعاع پیش‌خمش)، انحنا ایجاد شده در جهت اعمال پیش‌خمش، افزایش می‌یابد. مطابق نتایج تجربی و عددی به دست آمده، انحنا به‌دست آمده از شکل‌دهی پینی تنش‌ی به ازای شعاع پیش‌خمش 250 mm، در مقایسه با شکل‌دهی پینی رایج، بیش از 100% افزایش داشت.

Experimental and numerical study on stress peen forming of aluminum alloy metal sheets

Nasser Dabiri, Seyed Hadi Ghaderi *, Mahdi Gerdooi

Department of Mechanical Engineering, Shahrood University, Shahrood, Iran

* P.O.B. 3619995161 Shahrood, Iran, s.h.ghaderi@shahroodut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 11 July 2015
Accepted 19 September 2015
Available Online 20 October 2015

Keywords:

Sheet metal forming
Residual stress
Shot peening
Peen forming
Stress peen forming

ABSTRACT

As an effective forming method in aeronautical industries, peen forming is derived from shot peening process. Major application of this process is for producing large thin components with gentle curvature such as aircraft panels and wing skins. This process can be divided into two categories; peen forming without elastic pre-strain (conventional peen forming) and with elastic pre-strain (stress peen forming). In this research, numerical and experimental study of shot peening, peen forming and stress peen forming of aluminum alloy sheets were conducted. In order to perform experimental tests, steel shots with 0.4 and 0.6 mm diameter and aluminum alloys Al6061-T6 strips were used. For applying elastic pre-strain, fixtures with four pre-bending radii ∞ , 500 mm, 375 mm and 250 mm were designed and manufactured. In numerical section, using the same parameters as applied in experiments, first by using a 3D model with random distribution of shots, shot peening process was simulated and induced and residual stresses in sheet, were obtained. Next, using this model and in a three-step procedure, peen forming and stress peen forming processes were simulated. The results showed that applying pre-strain has a considerable effect on distribution of stress inside the sheet metal and thus on the final deformation of it. Along with increasing pre-bending moment (decreasing pre-bending radius), the resulting curvature in the sheet in the direction of the applied pre-bending, increases. According to the experimental and numerical results, in comparison with conventional peen forming, stress peen forming using 250 mm prebending radius increases the curvatures over 100%.

1- مقدمه

خودروسازی و نیروگاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد. امروزه در صنایع هوایی، از این فرایند به عنوان یک روش شکل‌دهی بسیار انعطاف‌پذیر، برای تولید برخی قطعات بزرگ و نازک آلومینیومی چون پوسته‌ی بال و بدنه‌ی هواپیما یا

فرایند ساجمه‌زنی¹ سال‌هاست که به‌طور گسترده در صنایع هوافضا،

1- Shot peening

Please cite this article using:

N. Dabiri, S. H. Ghaderi, M. Gerdooi, Experimental and numerical study on stress peen forming of aluminum alloy metal sheets, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 11, pp. 169-180, 2015 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

موشک استفاده می‌شود. در واقع، تحت ضربه قرار دادن سطح قطعات فلزی به وسیله‌ی جریانی از ساچمه‌های سخت، یک عملیات سطحی رایج جهت بهبود استحکام خستگی یا خوردگی تنش‌ی¹ آن قطعات می‌باشد. این کار منجر به ایجاد تغییر شکل مومسان و برجستگی‌ها و فرورفتگی‌هایی روی سطح قطعه می‌شود. در لایه‌های زیرین سطح، ماده سعی می‌کند این تغییر شکل را به حالت اولیه بازگرداند که این باعث ایجاد تنش پسماند فشاری در سطح و جلوگیری از شروع ترک در قطعه می‌گردد. بر اساس همان اصول، اما با استفاده از ساچمه‌های با اندازه‌ی بزرگ‌تر و سنگین‌تر، می‌توان از پروفیل تنش پسماند ایجاد شده، برای تغییر شکل قطعه استفاده کرد. به این فرایند شکل‌دهی کارسرد، شکل‌دهی پینی² می‌گویند. شکل‌دهی پینی متداول، باعث توزیع تنش پسماند همسانگرد در قطعه شده و بنابراین انحنای یکسان در همه‌ی جهات ایجاد می‌کند. در نتیجه قطعه تقریباً شکل کروی به‌خود می‌گیرد. برای قطعاتی مانند پوسته‌ی بال که انحنا در یک جهت بیشتر از جهت دیگر است از تکنیکی به‌نام شکل‌دهی پینی تنش‌ی³ استفاده می‌شود. در این فرایند قطعه ابتدا به‌وسیله‌ی خمش یا کشش تحت پیش‌کرنش کشسان قرار گرفته و سپس ناحیه‌ی مورد نظر، ساچمه‌زنی می‌شود. پس از فرایند، انحنا در جهتی که تحت پیش‌کرنش کشسان قرار دارد بیشتر از جهت دیگر خواهد بود [1]. نیاز به ایجاد خمیدگی‌های ملایم و به‌طور معمول در دو جهت، باعث روی آوردن به این فناوری در صنایع هوایی شده است. به‌دلیل عدم نیاز به قالب و پرس و همچنین انجام آن در دمای اتاق، این فرایند هزینه‌های ساخت و تولید پایین‌تری دارد. به علاوه، به‌دلیل امکان تغییر ساده پارامترهای فرایند، این روش تکرارپذیری و انعطاف‌پذیری خوبی داراست [2].

در این فرایند، تنش‌های اعمالی⁴ σ^{ind} نامتعادل، باعث اتساع و خمش قطعه تا رسیدن به توزیع تنش پسماند σ^{res} متعادل می‌شود. تنش اعمالی σ^{ind} آن است که در اثر ساچمه‌زنی در قطعه‌ی کاملاً مقید که مجاز به اتساع و خمش نیست ایجاد می‌شود. تنش پسماند σ^{res} آن است که پس از برداشتن قیدها در قطعه باقی می‌ماند. بین این تنش‌ها رابطه‌ی (1) برقرار است [3]:

$$\sigma^{res} = \sigma^{ind} + \sigma^s + \sigma^b \quad (1)$$

در رابطه‌ی (1)، σ^s و σ^b تنش‌های ناشی از نیروهای تکیه‌گاهی برای جلوگیری از اتساع و خمش قطعه می‌باشند. تنش پسماندی σ^{res} که در یک قطعه‌ی ضخیم ایجاد می‌شود تقریباً با تنش اعمالی σ^{ind} برابر است زیرا ضخامت زیاد، عملاً اجازه خمش یا اتساع به قطعه نمی‌دهد. متغیرهای فرایندی زیادی، مانند ابعاد، سرعت و سختی ساچمه، پوشاندگی سطح⁵، زاویه‌ی برخورد و جنس ساچمه‌ها و ورق، می‌تواند روی توزیع تنش اعمالی σ^{ind} و در نتیجه انحنای تولید شده به‌وسیله‌ی شکل‌دهی پینی تأثیر بگذارند. به‌همین دلیل کنترل پارامترهای شکل‌دهی برای رسیدن به خمیدگی مطلوب، چالش‌برانگیز است. همچنین به‌دلیل برخورد ساچمه‌های پر شمار روی سطح قطعه، این فرایند ماهیت تصادفی دارد. بنابراین، برای مدت زمان طولانی، شکل‌دهی پینی یک فرایند همراه با سعی و خطا بود و تجربه‌ی اپراتورها نقش خیلی مهمی در موفقیت آن بازی می‌کرد. اما با توسعه‌ی رایانه و روش‌های محاسباتی، استفاده از شبیه‌سازی اجزا محدود برای پیش‌بینی تغییر شکل قطعات، طراحی فرایند ساچمه‌زنی و کاهش زمان آزمایش‌ها

امکان‌پذیر شده است.

ابزارهای عددی برای مطالعه‌ی ساچمه‌زنی و شکل‌دهی پینی توسط محققان مختلف به‌کار گرفته شده است. در تحلیل عددی فرایند ساچمه‌زنی، اثر برخورد یک [4]، دو و یا تعداد بیشتری ساچمه که توزیع منظم [5] یا تصادفی [6] داشتند مورد بررسی قرار گرفت. این شبیه‌سازی‌ها سعی در مطالعه‌ی اثرات پارامترهای مربوط به ساچمه، قطعه‌کار و فرایند داشتند. در تحلیل شکل‌دهی، به‌جای شبیه‌سازی میلیون‌ها ضربه، از روش‌های بارگذاری معادل برای تعیین تغییرشکل‌ها استفاده شد. به‌طور کلی این بارگذاری‌ها را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد [7]. در دسته‌ی اول از بارگذاری فشاری معادل استفاده شد. گراستی و اندرو [8]، برای ایجاد کرنش‌های مومسان نزدیک سطح قطعه، یک مدل بارگذاری فشاری معادل روی المان‌های پیوسته پیشنهاد کردند. آنها با مقایسه‌ی انحنای ایجاد شده در نمونه‌ی آزمایشگاهی با انحنای بدست آمده از شبیه‌سازی در فشارهای مختلف، فشار معادل مناسب را بدست آوردند. علیرغم سازگاری خوب نتایج شبیه‌سازی و تجربی، آنها بیان کردند زیاد شدن تعداد المان‌ها به علت استفاده از المان‌های پیوسته، منجر به افزایش زمان محاسبات خواهد شد. بنابراین این روش به استفاده از نمونه‌های کوچک محدود می‌شود. خانواده‌ی دوم از بارگذاری دمایی معادل استفاده کردند. لیورس و پریور [9] از دما و ضریب انبساط گرمایی برای ایجاد پروفیل تنش نامتوازن در المان‌های پوسته⁶ استفاده کردند. با اعمال دماهای متفاوت به نقاط انتگرال‌گیری مقطع⁷ المان‌های پوسته، توزیعی از کرنش‌های دمایی متناظر با پروفیل تنش اعمالی اندازه‌گیری شده از آزمایش‌ها، به‌دست می‌آید. کرنش‌های دمایی، توزیع متفاوتی از تنش در سراسر ضخامت پوسته ایجاد کرده و باعث تغییر شکل آن می‌شود. آزمایش تجربی آنها روی یک نوار آلومینیومی مورد استفاده در صنایع هوایی، انجام گرفت. ابعاد نوار 50 mm × 150 mm و ضخامت آن 4 mm بود که با استفاده از ساچمه‌ای با قطر 0/5 mm و پوشاندگی 100%، تحت فرایند ساچمه‌زنی قرار گرفت. تغییر شکل ایجاد شده، شعاع انحنایی در حدود 1/4 m را ایجاد کرد. وانگ و همکاران [10] از بارگذاری دمایی المان‌های پوسته‌ی به‌طور کامل مقید شده با توزیع دمایی غیریکنواخت، برای ایجاد کرنش‌های مومسان موضعی در نزدیکی سطح استفاده کردند. سیکل بارگذاری معادل آنها به‌ترتیب شامل: مقید کردن همه‌ی درجات آزادی المان پوسته، اعمال یک توزیع دمایی برای اتساع دائم سطح ساچمه‌زنی شده، یکسان‌سازی دما و برداشتن شرایط مرزی بود. این کار باعث ایجاد تغییر شکلی معادل با تغییر شکل ایجاد شده به‌وسیله‌ی شکل‌دهی پینی می‌شود. جهت آزمایش‌های تجربی از نمونه‌های آلومینیومی 5251-H22 با ابعاد 76 mm × 19 mm × 3 mm و از ساچمه‌های فولادی S660 استفاده کردند. مقایسه‌ی شبیه‌سازی‌ها و آزمایش‌ها نشان داد مدل آنها پیش‌بینی خوبی از تغییرشکل ناشی از شکل‌دهی پینی ارائه می‌دهد. یامادا و همکاران [11]، از بارگذاری دمایی برای ایجاد کرنش‌های مومسان موضعی، معادل با کرنش‌های ایجاد شده با ساچمه‌زنی استفاده کردند. آنها با انجام مطالعات عددی و تجربی نتیجه گرفتند که شعاع انحنای ورق ایجاد شده توسط شکل‌دهی پینی، می‌تواند بر حسب ضخامت ورق و شدت ساچمه‌زنی بیان شود. همچنین بیان کردند بوسیله‌ی ساچمه‌زنی دو طرف ورق با شدت ساچمه‌زنی یکسان، می‌توان به فرم‌های زینی‌شکل و تابدار و ازدیاد طول در ورق دست یافت. لازم بذکر است که در روش دمایی، دما و ضریب انبساط گرمایی تنها ابزارهای عددی برای شبیه‌سازی شکل‌دهی

6- Shell element
7- Section points

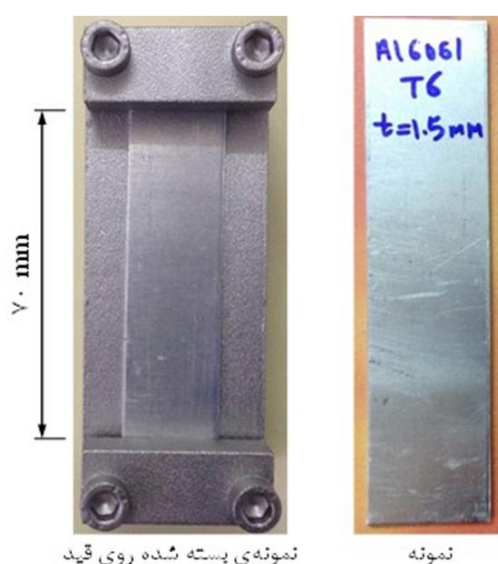
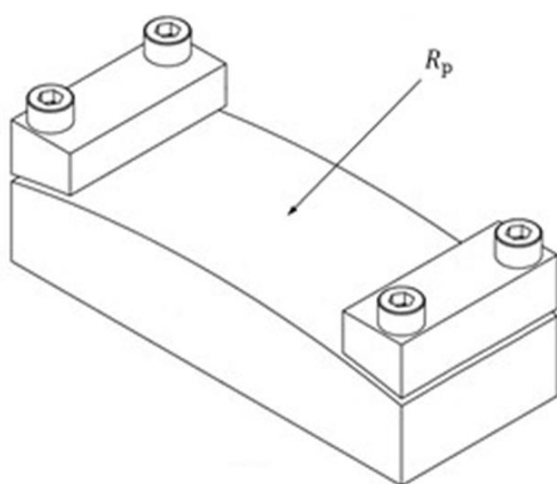
1- Stress corrosion cracking
2- Peen forming
3- Stress peen forming
4- Induced stress
5- Surface coverage

0/4 mm استفاده شد. سختی متوسط این ساچمه‌ها به روش میکرو سختی ویکرز، حدود 443 HV اندازه‌گیری شد. برای ثابت نگه‌داشتن نمونه‌ها حین فرایند نیاز به طراحی قیدهایی برای این کار است. همچنین وظیفه‌ی دیگر این قیدها، ایجاد پیش‌خمش کشسان در قطعه می‌باشد. برای این منظور، قیدهایی با چهار شعاع پیش‌خمش (R_p) متفاوت ∞ ، 500 mm، 375 mm و 250 mm مطابق شکل 2، برای مطالعه‌ی فرایندهای شکل‌دهی پینی و شکل‌دهی پینی تنش طراحی و ساخته شد. بنابراین می‌توان با انجام آزمایش‌ها، نتایج به‌دست آمده در دو حالت با و بدون پیش‌خمش را مقایسه کرد. به علاوه، اثر شعاع‌های پیش‌خمش مختلف در انحنای نهایی نمونه‌ها قابل بررسی است.

در ماشین‌های ساچمه‌زنی، معمولاً از نیروی باد یا نیروی گریز از مرکز جهت پرتاب ساچمه استفاده می‌شود. در نوع اول، ساچمه‌ها به کمک نیروی باد از درون نازل یا نازل‌هایی به سمت قطعه پرتاب می‌شوند. در نوع دوم، ساچمه‌ها به کمک یک چرخ دوار و با استفاده از نیروی گریز از مرکز به سمت قطعه پرتاب می‌شود. نوع اول معمولاً برای تعداد قطعات کم و تیرانس‌های



شکل 1 ساچمه‌های فولادی به کار رفته در آزمایش، الف) قطر $d = 0/6$ mm، ب) قطر $d = 0/4$ mm



شکل 2 قیدهای پیش‌خمش طراحی شده برای مطالعه‌ی شکل‌دهی پینی و نمونه‌ی بسته شده روی قید

هستند و مربوط به فرایند واقعی نمی‌شوند. روش سوم، متکی بر تنش‌های اعمالی بود. میائو و همکاران [12] یک شبیه‌سازی تحلیلی-عددی ترکیبی سه مرحله‌ای برای شکل‌دهی پینی تنش پیشنهاد کردند. پروفیل‌های تنش محاسبه شده با شبیه‌سازی‌های ضربه‌ای برای محاسبه‌ی ممان‌های خمشی معادل و نیروهای اتساع، استفاده شد. سپس این ممان‌ها و نیروها برای تعیین تغییر شکل، به مرزهای المان پوسته اعمال شدند. آنها از مدل خود برای برقرار کردن رابطه‌ی بین پیش‌خمش، انحنای ایجاد شده و پروفیل‌های تنش پسماند استفاده کردند. همچنین نتیجه گرفتند، شکل‌دهی پینی تنش باعث ایجاد پروفیل تنش پسماند بزرگتر و انحنای بیشتر در ورق می‌گردد. گاریپی و همکارانش [7] روشی را پیشنهاد کردند که به‌صورت عددی تنش‌های اعمال شده به نقاط انتگرال‌گیری مقطع المان‌های پوسته را به‌طور مستقیم محاسبه می‌کرد. آنها مدل دینامیکی تصادفی موجود را با بهینه کردن ابعاد، بهبود دادند. مدل ضربه‌ی دینامیکی و قانون ساختاری ماده‌ی به کار رفته توسط آنها، پیش‌بینی خوبی از تنش‌های اعمالی فرایند شکل‌دهی پینی برای نوار ضخیم آلومینیومی و در دو سرعت ساچمه‌ی 34/6 m/s و 66/2 m/s، ایجاد کرد. روش پیشنهادی آنها نتایج قابل قبولی در مورد تنش‌های اعمالی در سرعت‌های پائین ساچمه ارائه داد اما اختلاف بین نتایج عددی و تجربی برای سرعت‌های بالا، بیشتر بود.

در این پژوهش، در بخش تجربی آزمایش‌ها با طراحی و ساخت قیدهایی با چهار شعاع پیش‌خمش مختلف و با استفاده از ساچمه‌های فولادی و نوارهای آلومینیومی انجام گرفت. در بخش عددی، ابتدا با بررسی مدل برخورد یگانه¹ ساچمه، پارامترهای مناسب مورد نیاز از جمله: ابعاد مدل، اندازه‌ی المان‌ها، شرایط مرزی و غیره به‌دست می‌آید. از آنجا که شکل‌دهی یک ورق با ابعاد بزرگ، شامل برخورد میلیون‌ها ساچمه است، تحلیل عددی این تعداد برخورد غیراقتصادی می‌باشد. اما می‌توان فرض کرد در حین شکل‌دهی، ورق کاملاً مقید است، و در اثر ساچمه‌زنی یکنواخت، درون آن تنش ایجاد می‌شود. سپس با برداشته شدن قیدها، ورق شکل منحنی به‌خود می‌گیرد. بر این اساس با استفاده از یک مدل سه‌بعدی، برخورد تصادفی تعداد 90 ساچمه روی ناحیه‌ای کوچک شبیه‌سازی و توزیع تنش اعمالی در راستای ضخامت ورق به‌دست آمد. در ادامه با استفاده از این مدل و طی سه مرحله، فرایندهای شکل‌دهی پینی و شکل‌دهی پینی تنش شبیه‌سازی شد. در مرحله‌ی اول، در یک تحلیل اجزا محدود ضمنی در نرم افزار آباکوس، ممان پیش‌خمش جهت ایجاد پیش‌کرنش کشسان، به بلوک آلومینیومی اعمال شد. سپس در تحلیلی صریح، ضربات ساچمه‌ها روی بلوک آلومینیومی دارای پیش‌کرنش کشسان، شبیه‌سازی و توزیع تنش‌ها درون بلوک به‌دست آمد. سرانجام در تحلیل ضمنی دیگر، با اعمال نیروهای کششی و ممان‌های خمشی عکس‌العمل به دست آمده از مرحله‌ی قبل به یک المان پوسته، شکل‌دهی ورق آلومینیومی شبیه‌سازی شد.

2- مواد و آزمایش‌های تجربی

ورق فلزی استفاده شده در آزمایش‌ها از جنس آلایژ آلومینیوم Al 6061-T6 و با ضخامت 1/5 mm می‌باشد. خصوصیات دیگر این ورق مطابق [13] عبارتند از: چگالی $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$ ، مدول یانگ $E = 69/6 \text{ GPa}$ ، تنش تسلیم

$$\sigma_Y = 278 \text{ MPa} \text{ و استحکام کششی نهایی } \sigma_{UTS} = 310 \text{ MPa}$$

مطابق شکل 1، از ساچمه‌های فولادی کروی با قطرهای d 0/6 mm و

1- Single impact

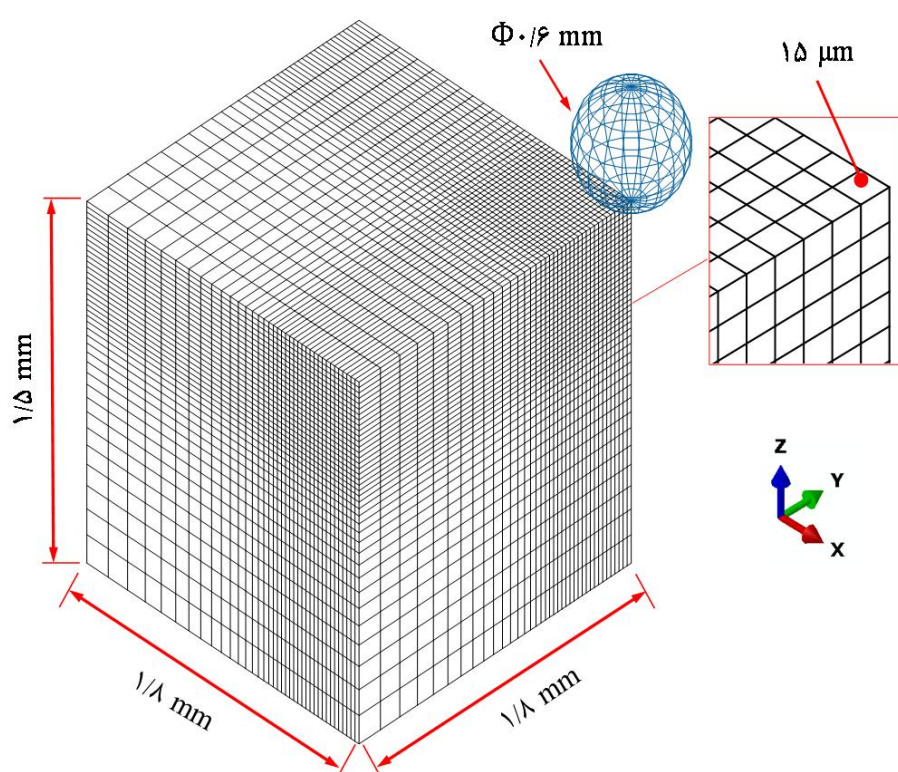
$$\omega_0 = \frac{\pi}{2h} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3)$$

در رابطه‌ی (3)، E ، ρ و h ، به‌ترتیب مدول یانگ، چگالی و ضخامت ورق می‌باشد. بر اساس روابط فوق، در شبیه‌سازی‌ها برای آلیاژ Al 6061-T6، $\alpha = 5 \times 10^6$ در نظر گرفته شد. علاوه بر در نظر گرفتن شرایط مرزی تقارن حول صفحه‌های YZ و ZX ، گره‌های سطح روبروی ناحیه‌ی برخورد (گره‌های کف ورق) نیز مقید می‌شود. مدل برهم‌کنش بین ساچمه و ورق به‌صورت رفتار مماسی طبق قانون کولمب با ضریب اصطکاک $\mu = 0/47$ در نظر گرفته شده است [16]. تحلیل برخورد در حل گر صریح نرم‌افزار آباکوس انجام گرفت.

3-2- مدل برخورد چندگانه¹

پس از مطالعه‌ی برخورد یک ساچمه، به برخورد تعداد بیشتری ساچمه پرداخته می‌شود. از آنجایی که این فرایند ماهیت تصادفی دارد، نیاز است که موقعیت ساچمه‌ها به‌گونه‌ای در نظر گرفته شود که به واقعیت نزدیک باشد. برای این منظور، مکان ساچمه‌ها در فضا با استفاده از یک برنامه رایانه‌ای در نرم‌افزار متلب، به‌صورت تصادفی تعیین می‌شود. در تعیین تصادفی مکان ساچمه‌ها، همواره برنامه کنترل می‌کند که ساچمه‌ها در هم فرو رفتگی نداشته باشند. همچنین فاصله‌ی عمودی مرکز ساچمه‌ها از هم به‌صورتی تعیین می‌شود که بین دو برخورد متوالی تأخیر زمانی مشخصی وجود داشته باشد. خروجی این برنامه یک فایل متنی شامل مدل ساچمه‌ها است.

شکل 4، توزیع تصادفی ساچمه‌ها را در حالت برخورد چندگانه نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی، تعداد $n = 90$ ساچمه با سرعت اولیه‌ی عمودی یکسان $V = 75 \text{ m/s}$ مورد استفاده قرار گرفته است. در صورت استفاده از ساچمه‌ی با قطر $d = 0/6 \text{ mm}$ ، ابعاد مدل ورق $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ با ناحیه‌ی برخورد مرکزی $1/2 \text{ mm} \times 1/2 \text{ mm}$ و در صورت استفاده از ساچمه‌ی با قطر $d = 0/4 \text{ mm}$ ، ابعاد مدل ورق $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ با ناحیه‌ی برخورد مرکزی $0/8 \text{ mm} \times 0/8 \text{ mm}$ در نظر گرفته می‌شود. به عنوان مثال شکل 5، هندسه‌ی مدل را در حالت برخورد چندگانه برای قطر ساچمه $d = 0/4 \text{ mm}$ نشان می‌دهد.



شکل 3 هندسه‌ی مدل ورق در برخورد یگانه برای قطر ساچمه‌ی $d = 0/6 \text{ mm}$

دقیق‌تر به‌خصوص در صنایع هوایی استفاده می‌شوند. نوع دوم برای تعداد قطعات خیلی زیاد خصوصاً صنایع اتومبیل رایج هستند [14]. جهت انجام آزمایش‌ها از دستگاه‌های ساچمه‌زنی موجود در شرکت فنر لول ایران استفاده شد. این دستگاه‌ها از نوع اول هستند. نوارهای آلومینیوم پس از بسته شدن روی قیدهای پیش‌خمش، درون محفظه‌ی دستگاه قرار می‌گیرند.

این آزمایش نسبت به حالت واقعی در مقیاس کوچک انجام می‌گیرد. بنابراین نمونه‌های آزمایش به‌صورت نوارهایی با طول 100 mm در جهت نورد و عرض 20 mm آماده شدند. به‌علت استفاده از ساچمه‌هایی با دو قطر متفاوت و همچنین 4 قید موجود، تعداد 8 نمونه آماده شد. همچنین با توجه به گیره‌بندی دو انتهای نوارها، تنها 70 mm از طول نوار تحت ساچمه‌زنی قرار می‌گیرد. نمونه‌ها به‌مدت 4 دقیقه، تحت ساچمه‌زنی قرار گرفتند.

3-روش مدل‌سازی

3-1- مدل برخورد یگانه

برای مدل کردن برخورد تعداد زیادی ساچمه، بهتر است ابتدا برخورد یک ساچمه مورد بررسی قرار داده شود. با این کار، پارامترهای مناسب مورد نیاز شبیه‌سازی از جمله: ابعاد مدل، اندازه‌ی المان‌ها، شرایط مرزی و غیره مشخص خواهد شد. به‌منظور امکان مقایسه‌ی نتایج، در شبیه‌سازی عددی از پارامترهای مشابه با آزمایش‌های تجربی استفاده می‌شود.

بنابراین جهت شبیه‌سازی عددی از ساچمه‌های کروی فولادی با قطرهای $0/4 \text{ mm}$ و $0/6 \text{ mm}$ و با سرعت اولیه‌ی عمودی $V = 75 \text{ m/s}$ و ورق آلومینیومی استفاده شده است. در شبیه‌سازی عددی ساچمه‌ها صلب فرض شده‌اند. این صلبیت به علت بیشتر بودن تنش تسلیم و سختی ساچمه‌ها فولادی نسبت به ورق آلومینیومی در نظر گرفته شده است [15]. مدل هندسی ورق فقط ناحیه‌ی نزدیک به ضربه را در نظر می‌گیرد که این ناحیه، منطقه‌ای است که تنش‌های اعمالی در آن ایجاد می‌شود. به‌دلیل تقارن، یک چهارم ورق مدل شده و از یک‌چهارم وزن ساچمه استفاده می‌شود. المان استفاده شده برای ورق آلومینیومی از نوع پیوسته سه‌بعدی آجری‌شکل انتگرال‌گیری کاهش یافته (C3D8R) می‌باشد. برای به‌دست آوردن نتایج دقیق‌تر، اندازه‌ی المان‌ها نزدیک ناحیه‌ی برخورد، کوچک در نظر گرفته شده اند. برای همگرا شدن تنش اعمالی در این ناحیه، اندازه‌ی المان L طبق پیشنهاد ارائه شده در [16]، $L \leq 0/025d$ در نظر گرفته شد. برای کاستن از حجم محاسبات، اندازه‌ی المان‌ها به سمت خارج ناحیه‌ی برخورد، افزایش داده شده است. شکل 3، هندسه‌ی مدل را در برخورد یگانه برای قطر ساچمه‌ی $d = 0/6 \text{ mm}$ نشان می‌دهد.

ورق آلومینیومی دارای خواص کشسانی و مومسانی با سخت‌شوندگی همسان‌گرد و مستقل از نرخ کرنش در نظر گرفته شده است. خصوصیات ورق آلومینیومی مورد استفاده، در بخش قبل آورده شد. برخورد ساچمه با ورق باعث انتشار موج تنش در ماده می‌شود. به‌علت اتلاف داخلی، شدت موج تنش با گذشت زمان کاهش می‌یابد. برای اعمال این میرایی و رسیدن به شرایط پایدار در کمینه‌ی زمان لازم برای انجام محاسبات، مطابق رابطه‌ی (2)، برای ماده، میرایی متناسب با جرم در نظر گرفته شده است [16].

$$C = \alpha M \quad (2)$$

در رابطه‌ی (2)، C ماتریس میرایی، M ماتریس جرم و α فاکتور میرایی متناسب با جرم است و $\alpha = 2\xi\omega_0$ ، ξ نسبت میرایی است و معمولاً $\xi = 0/5$ در نظر گرفته می‌شود. همچنین، ω_0 اولین فرکانس طبیعی سیستم است که از رابطه‌ی (3) قابل محاسبه می‌باشد [16].

تحلیل ضمنی ورق تحت پیش‌خمش کشسان قرار می‌گیرد. در مرحله‌ی دوم، ورق دارای پیش‌خمش، وارد حل‌گر صریح شده و تحت ضربات ساچمه قرار می‌گیرد. در انتها نیز با استفاده از تنش‌های اعمالی ایجاد شده و به کمک المان پوسته در تحلیل ضمنی دیگری، شبیه‌سازی شکل‌دهی صورت می‌گیرد. همچنین فرض شده ورق فاقد تنش‌های پسماند اولیه ناشی از فرایند تولید ورق است. برای شبیه‌سازی شکل‌دهی پینی، در مرحله‌ی اول پیش‌خمش اعمال نمی‌شود زیرا ورق باید در حالت تخت قرار داشته باشد. ولی در مورد شکل‌دهی پینی تنش‌ی با توجه به استفاده از قیدهایی با شعاع‌های پیش‌خمش 500 mm، 375 mm و 250 mm در آزمایش‌های تجربی، ممان پیش‌خمش مربوط به هر کدام از این شعاع‌ها به بلوک آلومینیومی اعمال می‌شود. ابعاد ورق، مشابه با ابعاد بیان شده در مدل برخورد چندگانه و خصوصیات ماده نیز طبق توضیحات بیان‌شده در مدل برخورد یگانه در نظر گرفته می‌شود. به‌عنوان شرایط مرزی، برای صفحه‌ی میانی بلوک آلومینیومی که در راستای y تعریف شده، تقارن نسبت به محور x در نظر گرفته شده و جهت اعمال پیش‌خمش، شیب متناسب با شعاع‌های پیش‌خمش، به بلوک اعمال می‌شود. این شیب با توجه به روابط مربوط به خیز و شیب تیرها و ارتباط بین شعاع خمش و شیب تیر، از رابطه‌ی (4) قابل محاسبه است.

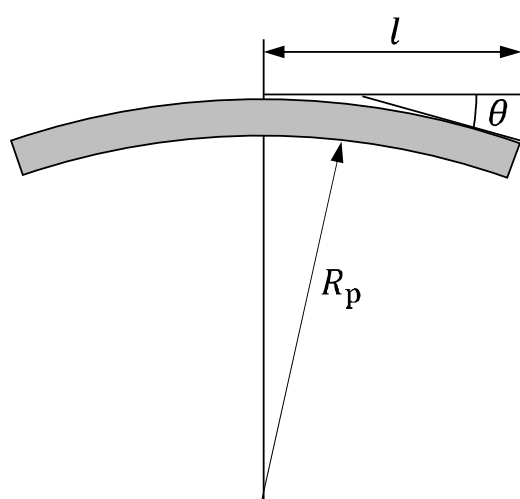
$$\theta = \frac{l}{R_p} \quad (4)$$

در رابطه‌ی (4)، θ ، l و R_p به‌ترتیب شیب تیر، طول تیر و شعاع پیش‌خمش می‌باشد که به‌صورت شماتیک در شکل 6، نمایش داده شده است. جدول 1، شیب‌های محاسبه شده از رابطه‌ی (4) را برای مدل‌های مورد نظر نشان می‌دهد. همچنین با استفاده از روابط مربوط به خمش خالص، می‌توان تنش اولیه و ممان خمشی ناشی از پیش‌خمش را به کمک رابطه‌های (5) و (6) به دست آورد.

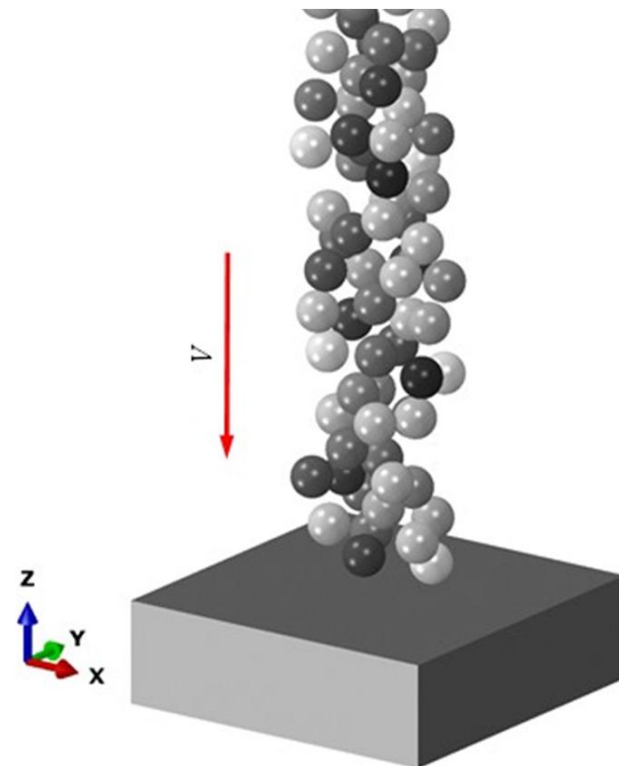
$$\sigma_x^i = \sigma_x^{iMax} = \frac{Eh}{2R_p} \quad (5)$$

$$M_x^{pre} = \frac{EI}{R_p} = \frac{Eh^3}{12R_p} \quad (6)$$

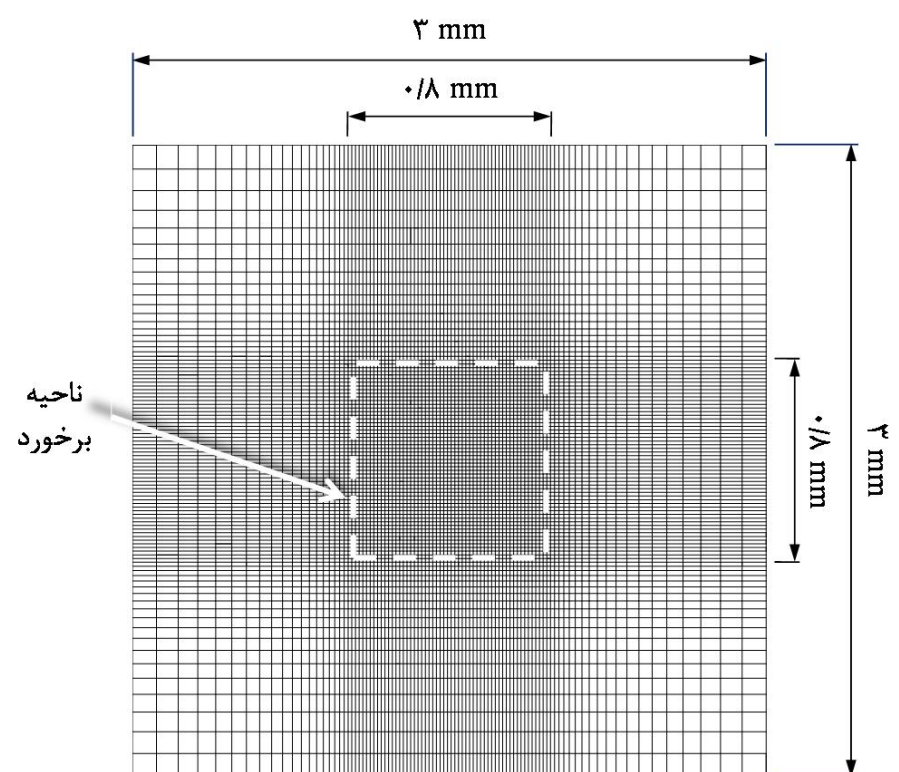
در روابط (5) و (6)، E ، h ، l و R_p به‌ترتیب ممان خمشی ناشی از پیش‌خمش در جهت x بر واحد طول (ممان پیش‌خمش)، تنش اولیه‌ی ناشی از پیش‌خمش، مدول یانگ ورق، ضخامت ورق، ممان اینرسی ورق و شعاع پیش‌خمش می‌باشند. از آنجایی که ورق فقط در جهت x خم شده و در جهت y آزاد است، بنابراین $\sigma_y^i = 0$ در نظر گرفته می‌شود. جدول 2، ممان پیش‌خمش و تنش‌های ناشی از خم کردن با شعاع‌های پیش‌خمش مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به کمتر بودن این تنش‌ها از تنش تسلیم ورق آلومینیومی، مشخص است که پیش‌خمش اعمالی حالت کشسان دارد.



شکل 6 نمایش هندسی متغیرهای رابطه‌ی (4)



شکل 4 نمایی از توزیع تصادفی ساچمه‌ها در حالت برخورد چندگانه



شکل 5 هندسه‌ی مدل ورق در برخورد چندگانه برای قطر ساچمه‌ی $d = 0.4 \text{ mm}$

با توجه به نتایج تحلیل برخورد یگانه و همچنین حجم محاسبات، ابعاد در نظر گرفته شده برای ورق مناسب می‌باشد. ناحیه‌ی مرکزی در نظر گرفته شده در حقیقت حجم نماینده‌ی ورق در ابعاد واقعی می‌باشد که ماده، اطراف آن را مهار نموده است. با فرض آنکه فرایند ساچمه‌زنی به‌صورت یکنواخت انجام می‌شود، می‌توان از توزیع تنش اعمالی در این ناحیه‌ی نماینده برای یافتن تغییر شکل کل ورق استفاده کرد. سایر مشخصات مدل از جمله نوع المان، شرایط مرزی و تماسی و جنس ورق مشابه مدل برخورد یگانه می‌باشد. به علت حجیم بودن محاسبات از یک رایانه‌ی 12 هسته‌ای برای پردازش استفاده شد.

3-3- شبیه‌سازی شکل‌دهی پینی و شکل‌دهی پینی تنش‌ی

در شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی پینی، ورق در حالت تخت نگه داشته شده سپس فرایند ساچمه‌زنی انجام می‌گیرد. در حالیکه در فرایند شکل‌دهی پینی تنش‌ی، ابتدا ورق با اعمال پیش‌خمش تحت پیش‌کرنش کشسان قرار گرفته و سپس عملیات ساچمه‌زنی انجام می‌شود. بنابراین، با توجه به توضیحات فوق، می‌توان روند شبیه‌سازی را در سه مرحله بیان کرد. در مرحله‌ی اول، طی یک

مختصات در مرکز نوار در نظر گرفته شده و جابه‌جایی در جهت‌های x ، y و z و دوران حول محور z برای این نقطه گرفته شده است. همچنین جهت جلوگیری از حرکت جسم صلب و داشتن شکلی متقارن، برای این مدل دو صفحه‌ی تقارن عرضی و طولی تعریف شده که صفحه‌ی تقارن طولی نسبت به محور y و صفحه‌ی تقارن عرضی نسبت به محور x تقارن دارد. شکل 7، هندسه‌ی نوار آلومینیومی را در شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی نشان می‌دهد. در انتها، جهت محاسبه‌ی تغییر شکل نوار آلومینیومی، ممان‌های خمشی و نیروهای کششی بر واحد طول در جهت x و y (M_x ، M_y و F_x ، F_y) که از مرحله‌ی قبل به‌دست خواهد آمد، به لبه‌های مدل پوسته اعمال می‌شود.

4- نتایج و بحث

4-1- نتایج شبیه‌سازی عددی

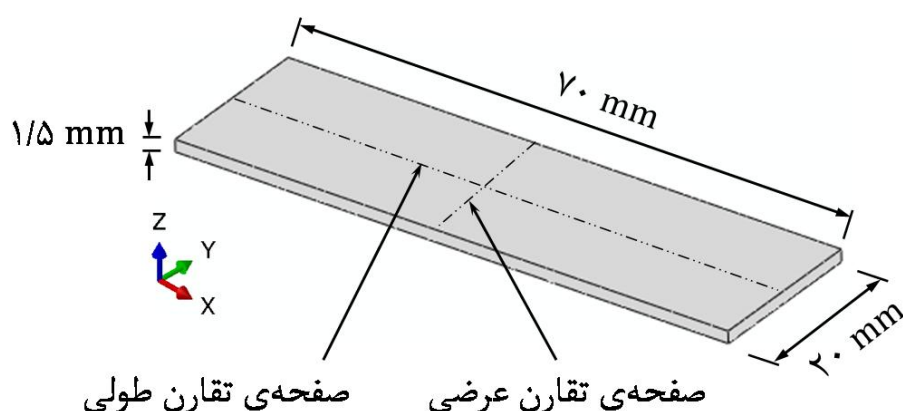
4-1-1- برخورد یگانه

شکل 8، پروفیل تنش اعمالی ورق را در سرعت برخورد $V = 75 \text{ m/s}$ به عنوان نمونه به‌ازای ساچمه‌ی با قطر $d = 0.6 \text{ mm}$ نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، مدل به‌کار رفته ناحیه‌ی متأثر از برخورد را در بر گرفته است، به‌گونه‌ای که می‌توان توزیع تنش و همچنین تغییر شکل ایجاد شده را در این ناحیه به‌دست آورد.

شکل‌های 9 و 10، به‌ترتیب نمودارهای تنش اعمالی در فاصله‌های مختلف از سطح برخورد و گودی ایجاد شده در سطح نمونه را به‌ازای ساچمه‌ها با دو قطر مختلف و سرعت برخورد $V = 75 \text{ m/s}$ نشان می‌دهد. از نمودارها مشاهده می‌شود که افزایش قطر ساچمه، باعث افزایش عمق تنش t_1 ، فاصله‌ی محل بیشترین تنش فشاری $\sigma_{\max}$ از سطح، و عمق گودی ایجاد شده در ماده شده، اما در تنش سطحی و تنش فشاری و کششی بیشینه، تغییری ایجاد نکرده است. هانگ و همکارانش [4] نیز در شبیه‌سازی برخورد یک ساچمه به نتیجه‌ی مشابهی دست یافتند. آنها تأثیر ساچمه‌های فولادی با چهار قطر 3 mm و 2 ، 1 و 0.5 mm و با سرعت برخورد $V = 75 \text{ m/s}$ را در شبیه‌سازی‌های عددی مورد بررسی قرار داده بودند.

جدول 2 ممان‌های پیش‌خمش و تنش‌های اولیه‌ی ایجاد شده ناشی از پیش‌خمش

تنش	شعاع پیش	تنش پیش	ممان پیش‌خمش بر واحد
تسلیم σ_y (MPa)	خمش R_p (mm)	خمش σ_x^i (MPa)	طول M_x^{pre} (N·mm/mm)
	∞	0	0
278	500	104/4	39/15
	375	139/2	52/2
	250	208/8	78/3



شکل 7 شماتیک هندسه‌ی مدل در شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی نوار آلومینیومی

جدول 1 شیب‌های مورد نیاز جهت اعمال پیش‌خمش مورد نظر

ابعاد مدل (mm ²)	شعاع پیش‌خمش R_p (mm)	شیب θ جهت اعمال پیش‌خمش
	∞	0
4×4	500	0/004
	375	0/0053
	250	0/008
	∞	0
3×3	500	0/003
	375	0/004
	250	0/006

در مرحله‌ی دوم، مدل ورق به‌همراه تنش‌های ایجاد شده از مرحله‌ی اول وارد حل‌گر صریح شده، تحت ضربات ساچمه قرار می‌گیرد. ساچمه‌زنی بلوک دارای پیش‌خمش، روندی مشابه با مدل برخورد چندگانه دارد. با این تفاوت که در این قسمت فایل ورودی به نرم‌افزار آباکوس از داده‌های مدل دارای پیش‌خمش استفاده می‌کند. مدل ورق در این تحلیل، حجم نماینده‌ای است که در ورق از اطراف توسط ماده مهار شده است. به این دلیل، جابه‌جایی‌های گره‌های سطح پائینی و سطوح جانبی مدل، مقید شده است. با انجام فرایند ساچمه‌زنی در مرحله‌ی دوم، تنش‌های مرکبی به‌صورت مجموعی از تنش‌های اولیه ناشی از پیش‌خمش و تنش‌های اعمالی ناشی از ساچمه‌زنی در قطعه ایجاد می‌شود [12]. روابط (7) و (8)، بیان‌کننده‌ی این تنش‌ها می‌باشد.

$$\sigma_x^c = \sigma_x^i + \sigma_x^{\text{ind}} \quad (7)$$

$$\sigma_y^c = \sigma_y^i + \sigma_y^{\text{ind}} \quad (8)$$

در روابط (7) و (8)، σ^c ، σ^i و σ^{ind} به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی تنش‌های مرکب، تنش‌های اولیه ناشی از پیش‌خمش و تنش‌های اعمالی ناشی از ساچمه‌زنی است. بنابراین تنش‌های اعمالی ناشی از ساچمه‌زنی از روابط (9) و (10) قابل محاسبه است.

$$\sigma_x^{\text{ind}} = \sigma_x^c - \sigma_x^i \quad (9)$$

$$\sigma_y^{\text{ind}} = \sigma_y^c \quad (10)$$

تنش‌های اعمالی منجر به ایجاد نیروهای کششی و ممان‌های خمشی عکس‌العمل در قطعه می‌شود. این نیروها و ممان‌ها بر واحد طول از روابط (11) تا (14) قابل محاسبه است [3].

$$F_x = \int_0^h \sigma_x^{\text{ind}} dz \quad (11)$$

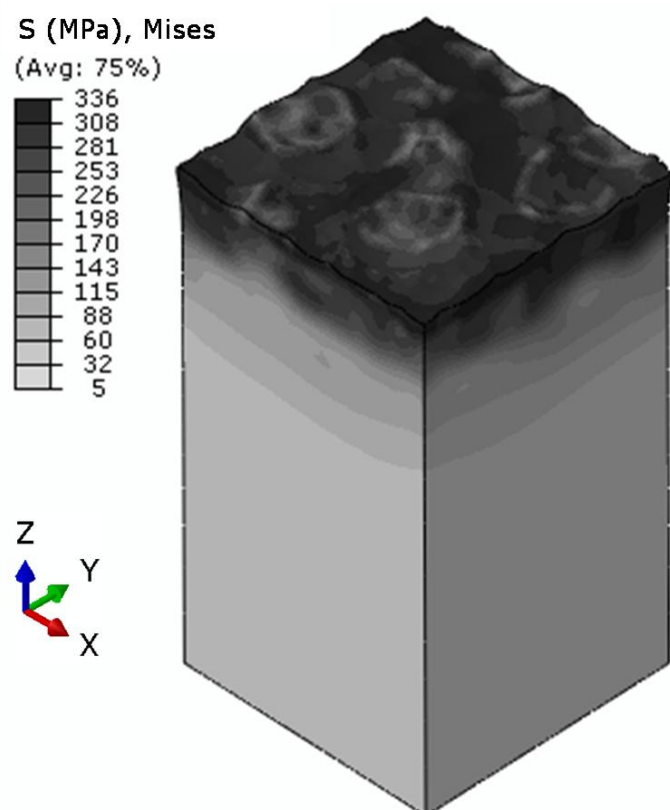
$$F_y = \int_0^h \sigma_y^{\text{ind}} dz \quad (12)$$

$$M_x = \int_0^h \sigma_x^{\text{ind}} \left(\frac{h}{2} - z\right) dz \quad (13)$$

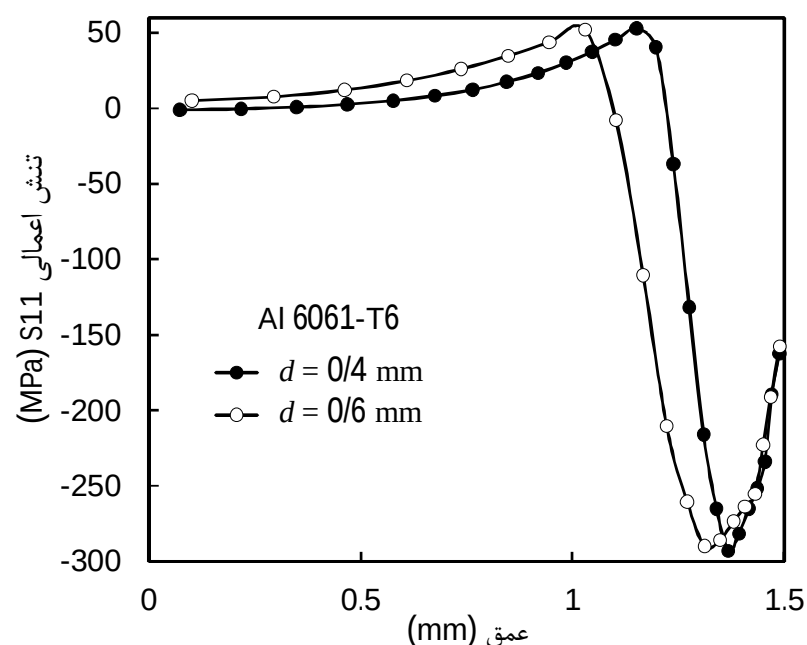
$$M_y = \int_0^h \sigma_y^{\text{ind}} \left(\frac{h}{2} - z\right) dz \quad (14)$$

در مرحله‌ی سوم، با استفاده از نتایج به‌دست آمده از مراحل قبل، فرایند شکل‌دهی ورق شبیه‌سازی می‌شود. برای این منظور نواری آلومینیومی با خواصی که پیش‌تر ذکر شد و ابعاد $70 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ مشابه با آزمایش‌ها، در نظر گرفته شد. البته لازم به‌ذکر است، طولی از ورق که تحت ساچمه‌زنی قرار گرفته، مدل‌سازی شده است. برای این منظور از المان پوسته با 11 نقطه‌ی انتگرال‌گیری، در حل‌گر استاندارد نرم‌افزار آباکوس استفاده شد. نوع المان به کار رفته، از نوع پوسته‌ی 4 گره انتگرال‌گیری کاهش‌یافته S4R است. ابعاد المان‌ها نیز $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ در نظر گرفته شده است. در این اینجا، مبدأ

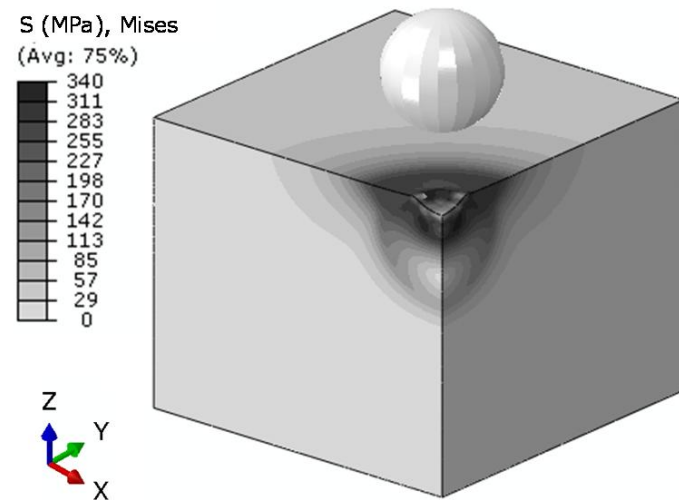
و به‌کارگیری آن انجام شد. شکل 12، نمودارهای تنش اعمالی را در راستای ضخامت به‌ازای ساچمه‌های با دو قطر مختلف و در سرعت برخورد 75 m/s و $V =$ و تعداد $n = 90$ ساچمه نشان می‌دهد. در این حالت نیز مشاهده می‌شود همانند برخورد یگانه، با افزایش قطر ساچمه، عمق تنش‌ها در ماده افزایش یافته ولی در مقدار تنش سطحی و تنش فشاری و کششی بیشینه، تغییر قابل توجهی دیده نمی‌شود. هانگ و همکاران [4] و نیز مگید و همکاران [15] نیز به این نتیجه رسیدند که افزایش قطر ساچمه در مقدار تنش‌ها تأثیر زیادی نمی‌گذارد، بلکه باعث افزایش عمق تنش‌ها می‌شود. توضیحی از چرایی این پدیده در کار آنها به چشم نمی‌خورد. اما شاید بتوان این موضوع را به شدت ساچمه‌زنی¹ مربوط کرد. شدت ساچمه‌زنی مقدار انرژی جنبشی منتقل شده از جریان ساچمه‌ها به قطعه‌کار در حین ساچمه‌زنی تعریف می‌شود. در آزمایش آلمن، این پارامتر را با استفاده از منحنی اشباع که در واقع منحنی ارتفاع کمان نمونه‌های استاندارد بر حسب زمان‌های مختلف ساچمه‌زنی است، اندازه می‌گیرند. با فراتر رفتن زمان ساچمه‌زنی از یک مقدار مشخص، تغییری



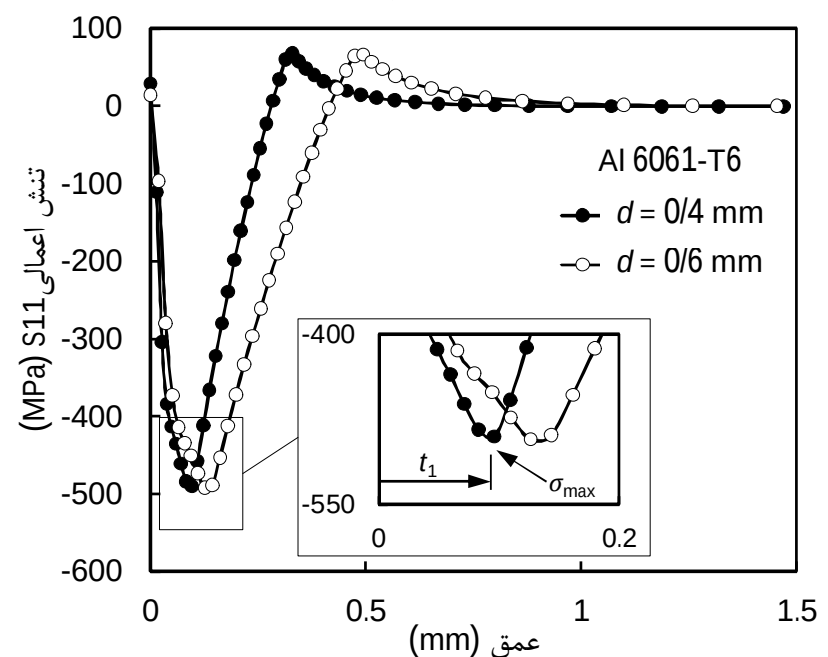
شکل 11 پروفیل توزیع تنش فون میسز اعمالی در برخورد چندگانه به‌ازای تعداد $n = 90$ ساچمه، سرعت برخورد $V = 75 \text{ m/s}$ و قطر ساچمه $d = 0/4 \text{ mm}$



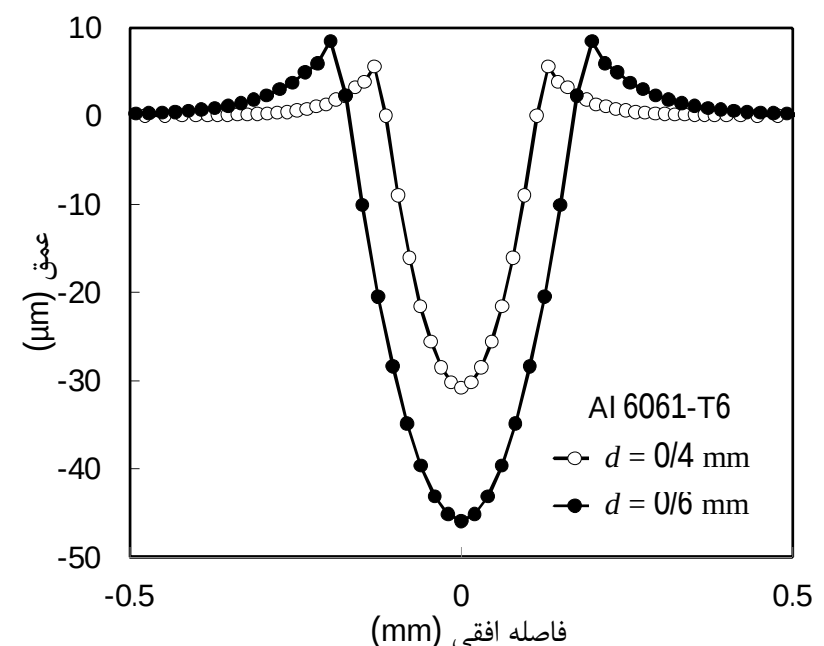
شکل 12 نمودارهای تنش اعمالی در برخورد چندگانه به‌ازای تعداد $n = 90$ ساچمه و سرعت برخورد $V = 75 \text{ m/s}$



شکل 8 پروفیل توزیع تنش فون میسز اعمالی در برخورد یگانه به‌ازای سرعت برخورد $V = 75 \text{ m/s}$ و قطر ساچمه $d = 0/6 \text{ mm}$



شکل 9 نمودار تنش اعمالی در برخورد یگانه به‌ازای $V = 75 \text{ m/s}$



شکل 10 گودی ایجاد شده روی سطح در برخورد یگانه به‌ازای $V = 75 \text{ m/s}$

4-1-2- برخورد چندگانه

شکل 11، توزیع تنش اعمالی را در ناحیه‌ی مرکزی مدل ورق آلومینیومی، پس از برخورد تعداد $n = 90$ ساچمه با سرعت اولیه‌ی $V = 75 \text{ m/s}$ به عنوان مثال برای قطر ساچمه $d = 0/4 \text{ mm}$ نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشخص است که توزیع تنش در ناحیه‌ی برخورد، یکنواخت نیست. بنابراین، برای به‌دست آوردن مقدار متوسط تنش اعمالی در فاصله‌های مختلف از سطح نمونه در ناحیه‌ی مرکزی، باید از همه‌ی المان‌های با عمق یکسان، تنش میانگین محاسبه شود. با توجه به ابعاد مدل و تعداد لایه‌ها و تعداد المان‌ها در هر لایه در راستای ضخامت، این کار با نوشتن یک برنامه‌ی متلب

جدول 3، ممان‌های خمشی بر واحد طول و نیروهای کششی بر واحد طول محاسبه شده از تنش‌های اعمالی را نشان می‌دهد. همان‌طور که بیان شد این ممان‌ها و نیروها (M_x, M_y و F_x, F_y) در مرحله‌ی شبیه‌سازی فرایند شکل دهی، برای محاسبه‌ی تغییر شکل نوار آلومینیومی به لبه‌های مدل پوسته اعمال می‌شوند. با توجه به داده‌های جدول، با کاهش شعاع پیش‌خمش، ممان خمشی ایجاد شده در جهت x (M_x) افزایش و در جهت y (M_y) کاهش می‌یابد. این موضوع در تغییر شکل نهایی نوار آلومینیومی در جهات گفته شده تأثیرگذار خواهد بود. همچنین ساچمه‌ی بزرگتر، ممان‌ها و نیروهای بزرگتری تولید کرده است.

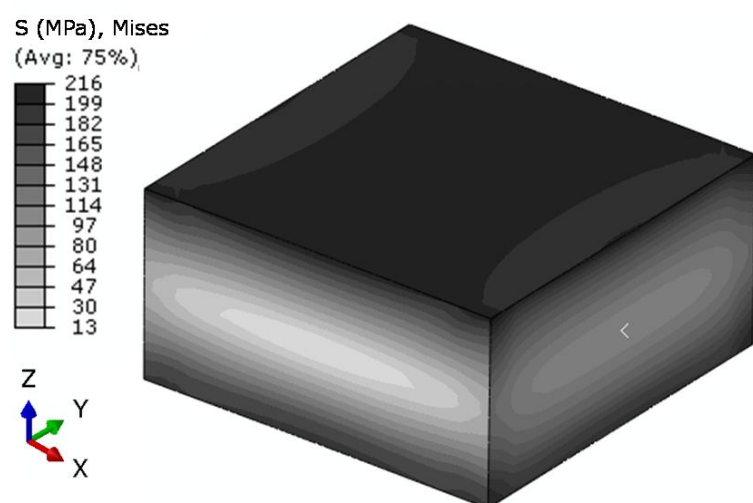
3-1-4- شکل‌دهی پینی رایج و تنش

شکل 14، پروفیل توزیع تنش ناشی از پیش‌خمش و شکل 15، نمودار تنش خمشی ایجاد شده به‌ازای شعاع پیش‌خمش $R_p = 250$ mm را به‌عنوان نمونه برای قطر ساچمه $d = 0/4$ mm نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل 15 مشخص است تنش در نیمه‌ی بالایی بلوک آلومینیومی کششی و در نیمه‌ی پایینی آن فشاری است.

شکل 16، نوارهای آلومینیومی تغییر شکل یافته را به‌ازای پروفیل‌های تنش به‌دست آمده از برخورد $n = 90$ ساچمه با قطر $d = 0/4$ mm و سرعت $V = 75$ m/s، نشان می‌دهد. برای وضوح بیشتر تغییر شکل‌ها با بزرگ‌نمایی 4 برابر نشان داده شده است. با توجه به شکل می‌توان دید که پین‌فرمینگ رایج (قسمت الف) انحناهای همسانگردی در جهت‌های x و y ایجاد کرده درحالی‌که پین‌فرمینگ تنش انحناهای متفاوتی در این جهات ایجاد کرده است.

جدول 3 ممان‌ها و نیروهای عکس‌العمل به‌دست آمده از تنش‌های اعمالی

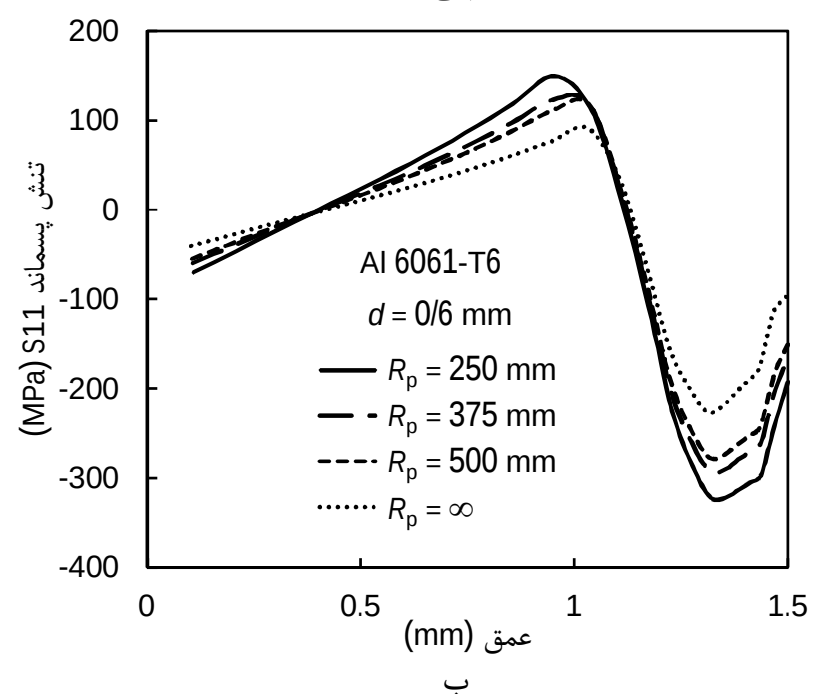
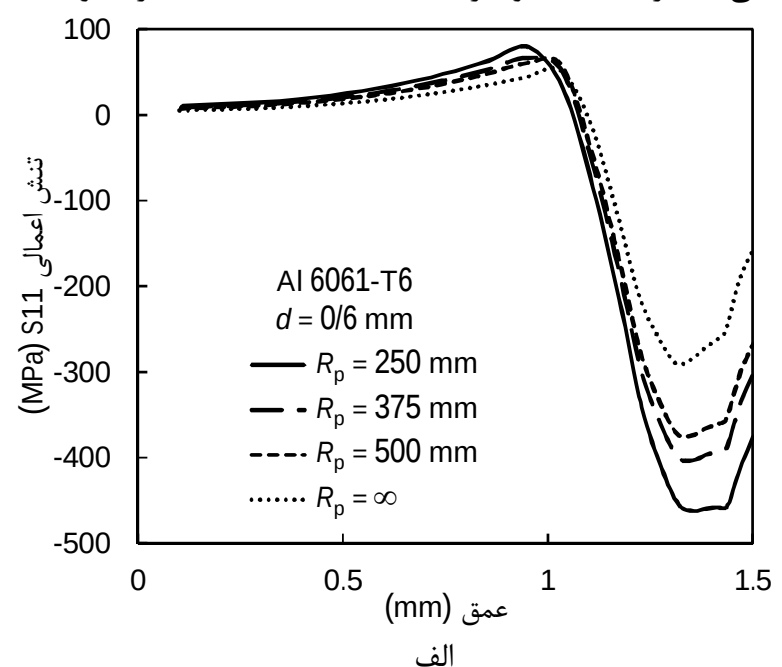
قطر ساچمه d (mm)	شعاع پیش خمش R_p (mm)	ممان خمشی بر واحد طول در جهت x و y (N·mm/mm)		نیروی کششی بر واحد طول در جهت x و y (N/mm)	
		M_x	M_y	F_x	F_y
0/6	∞	47/60	48/33	60/45	61/28
	500	66/21	45/59	84/72	63/05
	375	72/45	44/75	93/16	63/58
	250	85/87	42/84	111/09	64/03
0/4	∞	31/49	32/24	40/10	41/24
	500	46/13	29/59	58/66	41/92
	375	51/36	28/67	65/45	42/02
	250	62/22	26/67	79/73	41/60



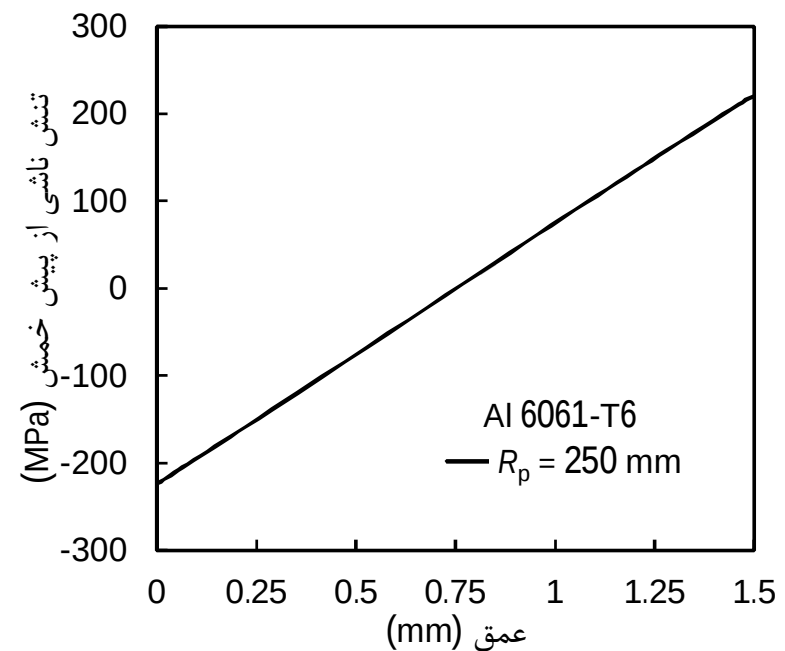
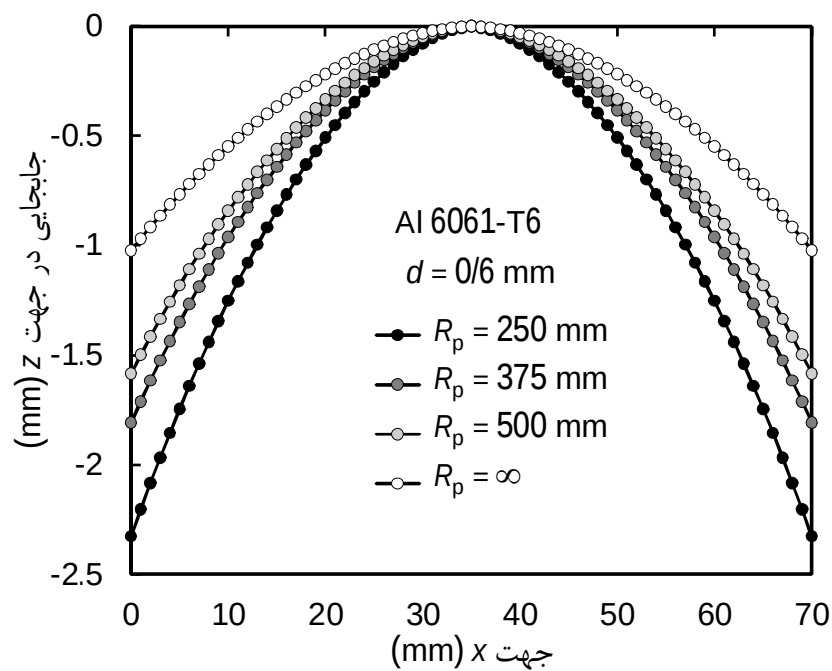
شکل 14 پروفیل توزیع تنش ناشی از پیش‌خمش برای مدل با ابعاد $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 3، به‌ازای ساچمه‌ی با قطر $d = 0/4$ mm، و شعاع پیش‌خمش $R_p = 250$ mm

در ارتفاع کمان ایجاد نشده، اشباع رخ می‌دهد. ارتفاع کمان به تنش‌های اعمالی مربوط است، بنابراین در حالت اشباع، سطح تنش‌ها به مقدار مشخصی می‌رسد. از آنجایی که در سرعت ثابت، با افزایش قطر ساچمه شدت ساچمه‌زنی افزایش می‌یابد، به دلیل اشباع شدگی تغییری در مقادیر تنش‌ها دیده نمی‌شود اما به دلیل افزایش تغییر شکل مومسان سطح، عمق این تنش‌ها افزایش خواهد یافت.

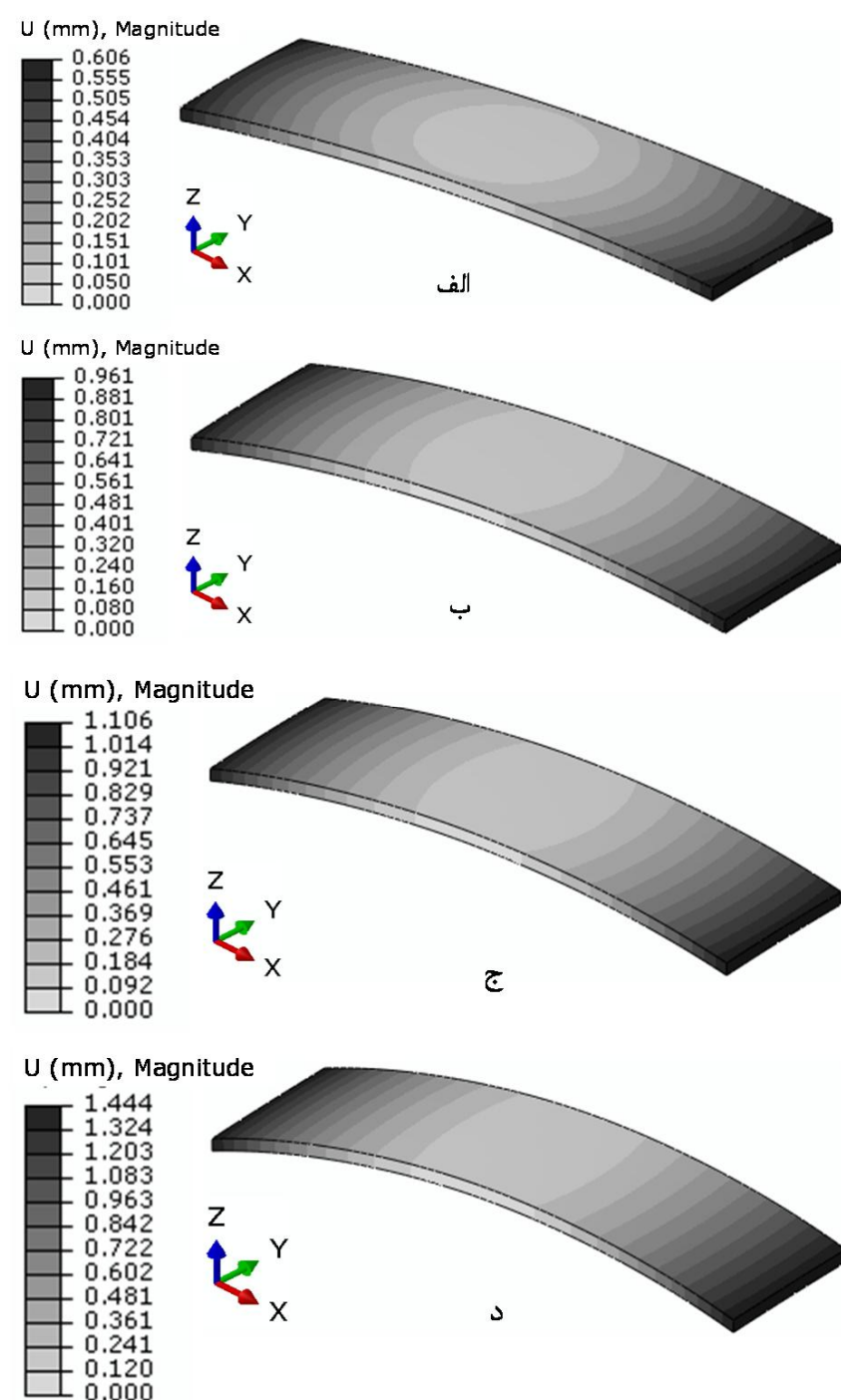
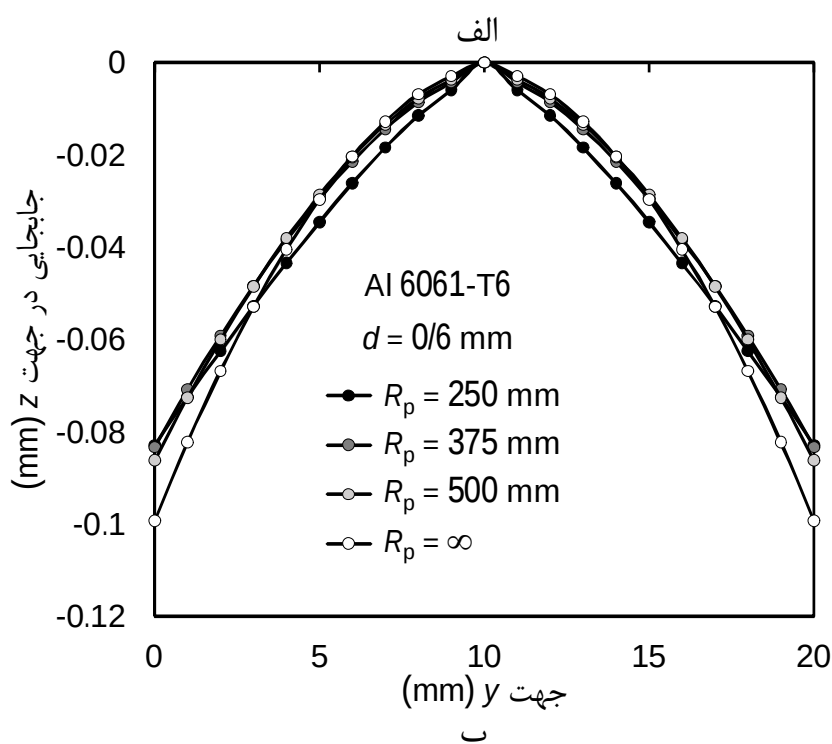
شکل 13، الف) تنش اعمالی و ب) تنش پسماند ایجاد شده در مدل به ازای شعاع‌های پیش‌خمش مختلف و تعداد برخورد $n = 90$ ساچمه، به‌عنوان نمونه برای قطر ساچمه $d = 0/6$ mm را نشان می‌دهد. از شکل 13 می‌توان دریافت، پیش‌خمش تأثیر به‌سزایی در توزیع تنش‌های ایجاد شده در قطعه داشته و همچنین، با کاهش شعاع پیش‌خمش یا به عبارت دیگر با افزایش ممان پیش‌خمش در جهت x ، تنش پسماند فشاری سطحی و تنش اعمالی فشاری سطحی و همچنین تنش پسماند فشاری بیشینه و تنش اعمالی فشاری بیشینه، در جهت x افزایش پیدا می‌کنند. در ضمن، مقادیر تنش‌های ایجاد شده در جهت x (تنش اعمالی و تنش پسماند) که از فرایند شکل‌دهی پینی تنشی به‌دست آمده، از مقادیری که از فرایند شکل‌دهی پینی رایج ($R_p = \infty$) به‌دست آمده، بزرگ‌تر است. می‌توان و همکارانش [12] نیز در مطالعه‌ای روی شکل‌دهی پینی تنشی، به نمودارهای مشابهی دست یافتند. آنها در کار خود از ورق آلومینیومی Al 2024-T3 و تعداد 48 ساچمه‌ی سرامیکی با قطر $0/5$ mm و سرعت $66/22$ m/s استفاده کرده بودند.



شکل 13 الف) تنش اعمالی و ب) تنش پسماند ایجاد شده در مدل به‌ازای شعاع‌های پیش‌خمش مختلف و تعداد $n = 90$ ساچمه برای قطر ساچمه‌ی $d = 0/6$ mm



شکل 15 نمودار تنش خمشی ایجاد شده در ورق با ابعاد $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ از شبیه‌سازی، به‌ازای شعاع پیش‌خمش $R_p = 250 \text{ mm}$



شکل 17 نمودار جابجایی در راستای z نوار آلومینیومی برای ساچمه با قطر $d = 0/6 \text{ mm}$ (الف) در جهت x ، (ب) در جهت y

می‌توان دریافت به‌ازای پارامترهای ساچمه‌زنی یکسان، شکل‌دهی پینی تنش‌ی در مقایسه با شکل‌دهی پینی رایج انحنای بزرگتری در جهت اعمال پیش‌خمش (جهت x) ایجاد کرده درحالی‌که در جهت عمود بر آن (جهت y)، ممان پیش‌خمش تأثیر کمتری روی انحنای ایجاد شده داشته است.

در جدول 4، مقادیر عددی ارتفاع کمان و شعاع انحنای نوارهای آلومینیومی در جهات x و y به‌ازای چهار شعاع پیش‌خمش مورد بحث، آورده شده است. با توجه به این مقادیر می‌توان ارتباط بین ممان پیش‌خمش با ارتفاع کمان و شعاع انحنا را به‌صورت نمودارهایی در قالب شکل 18 نشان داد. این نمودارها نشان می‌دهند که با افزایش ممان پیش‌خمش (کاهش شعاع پیش‌خمش)، ارتفاع کمان در جهت اعمال پیش‌خمش (f_x) افزایش و در جهت عمود بر آن (f_y) کاهش می‌یابد؛ و در مقابل شعاع انحنا در جهت اعمال پیش‌خمش (R_x) کاهش و در جهت عمود بر آن (R_y) افزایش می‌یابد.

از لحاظ فیزیکی این موضوع را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که با توجه به نمودارهای شکل 13، مشاهده شد که اعمال پیش‌خمش باعث بزرگ‌تر شدن پروفیل تنش‌های ایجاد شده در ورق می‌شود و هر چه مقدار پیش‌خمش افزایش می‌یابد (افزایش ممان پیش‌خمش)، پروفیل تنش‌ها نیز بزرگ‌تر می‌شوند. در نهایت تنش‌های بزرگ‌تر منجر به ایجاد انحنای بزرگ‌تر در جهت اعمال پیش‌خمش شده ولی در جهت عمود بر آن که پیش‌خمش اعمال نشده، کاهش اندکی را در انحنا مشاهده می‌شود.

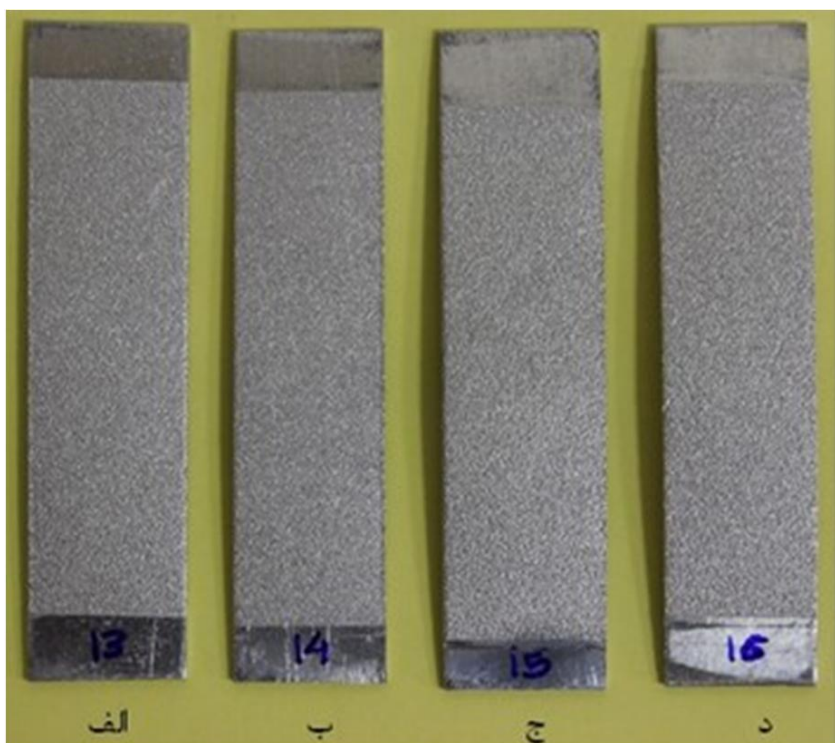
شکل 16 تغییر شکل ایجاد شده در نوارهای آلومینیومی به‌ازای پروفیل‌های تنش به دست آمده از برخورد $n = 90$ ساچمه با قطر $d = 0/4 \text{ mm}$ و سرعت $V = 75 \text{ m/s}$ ، (الف) $R_p = \infty$ (ب) $R_p = 500 \text{ mm}$ (ج) $R_p = 375 \text{ mm}$ (د) $R_p = 250 \text{ mm}$

شکل 17، نمودارهای جابجایی در راستای z را برای نوار آلومینیومی، در شعاع‌های پیش‌خمش مختلف در جهت‌های x و y ، به‌طور نمونه برای ساچمه با قطر $d = 0/6 \text{ mm}$ نشان می‌دهد. شکل‌های 16 و 17 به‌خوبی تأثیر اعمال پیش‌خمش را در انحنای نهایی نوارها نشان می‌دهد. با توجه به این شکل‌ها

عددی را نشان می‌دهد. با توجه به ناچیز بودن ارتفاع کمان نوارهای آلومینیومی در جهت y و در دسترس نبودن وسیله‌ی اندازه‌گیری با دقت بالا، نتایج مربوط به ارتفاع کمان و شعاع انحنا در جهت y بیان نشده است. توضیحات بیان شده در مورد جدول 4، در اینجا نیز صادق است. لی [17] در بررسی تجربی فرایند پین‌فرمینگ تنشی به ارتباط مشابهی بین شعاع انحنای ایجاد شده و مقادیر پیش‌خمش دست یافت. او نتیجه گرفت با افزایش مقادیر پیش‌خمش، شعاع انحنا در جهت اعمال پیش‌خمش کاهش و در جهت عمود بر جهت اعمال پیش‌خمش افزایش می‌یابد. میائو و همکارانش [1] نیز در یک مطالعه‌ی تجربی روی ساچمه‌زنی و شکل‌دهی پینی تنشی، نتیجه گرفتند با افزایش ممان پیش‌خمش، ارتفاع کمان در جهت طولی افزایش و در جهت عرضی کاهش می‌یابد. به‌علاوه، شکل‌دهی پینی تنشی نسبت به شکل‌دهی پینی رایج، ارتفاع کمان بزرگتری ایجاد می‌کند.

در شکل 20، ارتفاع کمان و شعاع انحنای نوار آلومینیومی در دو حالت عددی و تجربی به عنوان مثال به‌ازای برخورد ساچمه با قطر $d = 0/6$ mm با هم مقایسه شده است. با توجه به جدول 5 و شکل 20 می‌توان گفت، ارتباط یکسانی بین ممان پیش‌خمش با ارتفاع کمان و شعاع انحنا در نتایج تجربی و عددی مشاهده می‌شود. اختلاف بین مقادیر نتایج تجربی و عددی می‌تواند

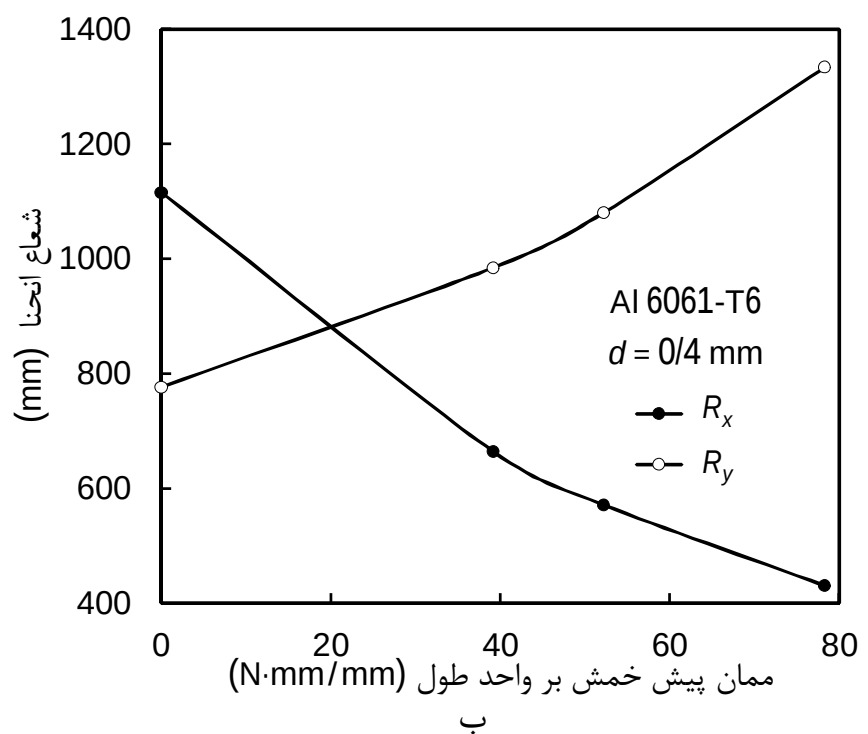
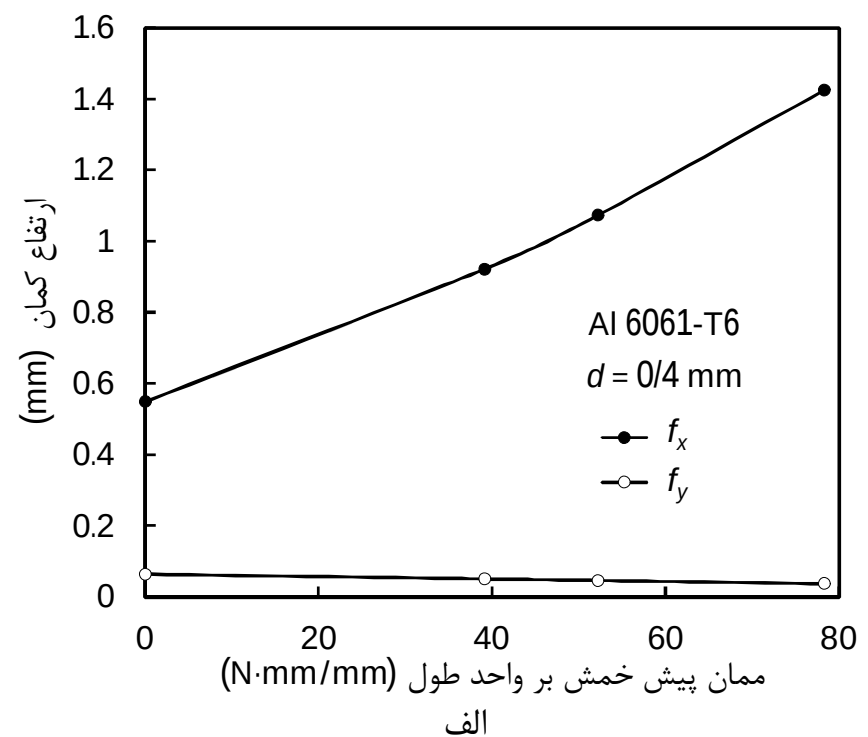
شعاع انحنا در جهت x , R_x (mm)		ارتفاع کمان در جهت x , f_x (mm)		شعاع پیش‌خمش R_p (mm)	قطر ساچمه d (mm)
تجربی	عددی	تجربی	عددی		
522/752	599/24	1/173	1/023	∞	0/6
387/72	387/23	1/583	1/585	500	
330/72	339/49	1/857	1/809	375	
239/7	264/38	2/569	2/327	250	
511/02	1115/94	1/2	0/549	∞	0/4
389/68	664/78	1/575	0/922	500	
246/74	571/37	2/495	1/073	375	
203/53	430/54	3/032	1/425	250	



شکل 19 نوارهای آلومینیومی پس از ساچمه‌زنی با ساچمه با قطر $d = 0/4$ mm و زمان ساچمه‌زنی 4 دقیقه، الف) $R_p = \infty$ (ب) $R_p = 500$ mm (ج) $R_p = 375$ mm (د) $R_p = 250$ mm

جدول 4 ارتفاع کمان و شعاع انحنای به‌دست آمده از شبیه‌سازی عددی

قطر ساچمه d (mm)	شعاع پیش‌خمش R_p (mm)	ارتفاع کمان در جهت x و y (mm)	شعاع انحنا در جهت x و y (mm)
		f_x و f_y	R_x و R_y
0/6	∞	1/023	599/24
	500	1/585	387/23
	375	1/809	339/49
	250	2/327	264/38
0/4	∞	0/549	1115/94
	500	0/922	664/78
	375	1/073	571/37
	250	1/425	430/54



شکل 18 رابطه‌ی بین ممان پیش‌خمش بر واحد طول با الف) ارتفاع کمان و ب) شعاع انحنا، برای قطر ساچمه $d = 0/4$ mm

2-4- نتایج آزمایش‌های تجربی

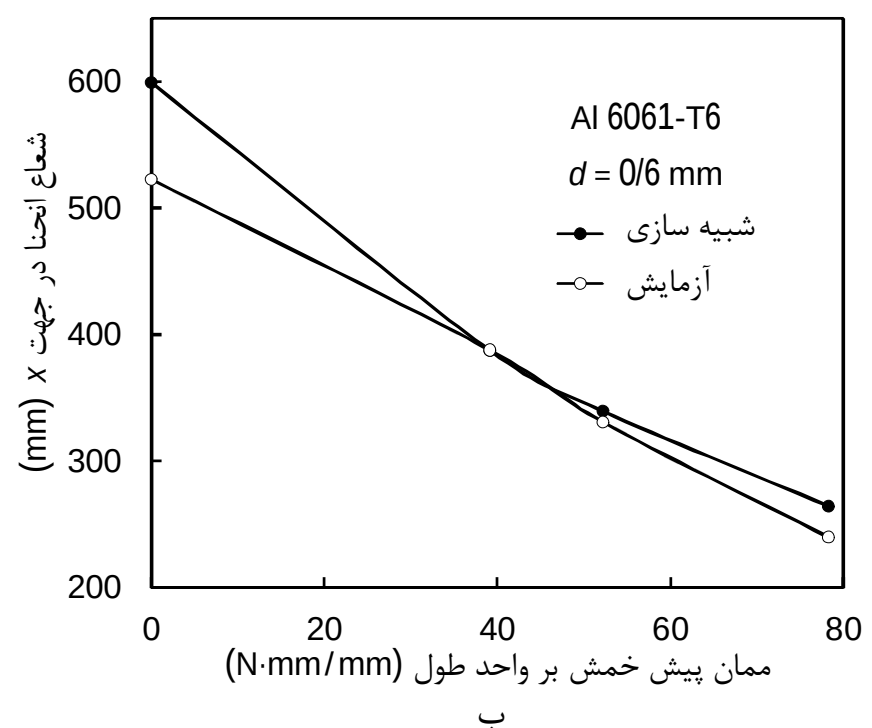
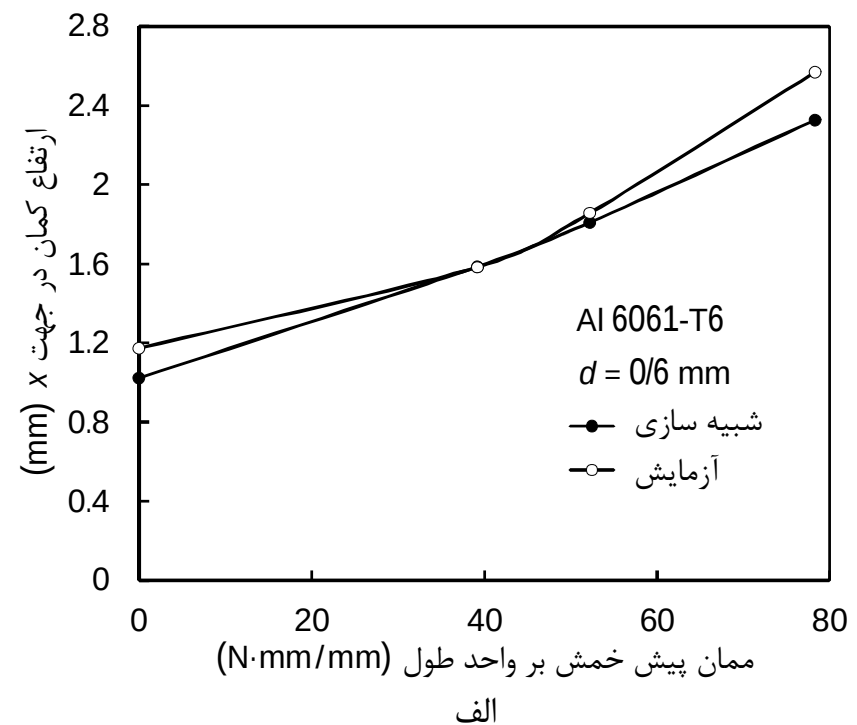
شکل 19، نوارهای تغییر شکل یافته از جنس Al 6061-T6 را پس از ساچمه‌زنی با ساچمه با قطر $d = 0/4$ mm و زمان ساچمه‌زنی 4 دقیقه نشان می‌دهد. جدول 5، مقادیر ارتفاع کمان و شعاع انحنای نوارهای آلومینیومی به‌دست آمده از آزمایش‌های تجربی و مقایسه‌ی آنها با مقادیر

تعداد 90 ساچمه روی یک نمونه با ابعاد کوچک شبیه‌سازی شد. سپس پروفیل‌های تنش اعمالی و تنش پسماند در راستای ضخامت ورق به دست آمد. در ادامه بر اساس این مدل، طی روندی سه‌مرحله‌ای به شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی پینی با و بدون پیش‌کرنش کشسان پرداخته شد. در بخش تجربی از ساچمه‌های فولادی کرووی با قطرهای 0/4 mm و 0/6 mm و نوارهایی از جنس آلایژ آلومینیوم Al6061-T6 و با ضخامت 1/5 mm استفاده شد. همچنین برای اعمال پیش‌کرنش کشسان، قیدهایی با چهار شعاع پیش‌خمش متفاوت ∞ ، 500 mm، 375 mm و 250 mm طراحی و ساخته شد. از نتایج به‌دست آمده این پژوهش، به‌صورت خلاصه می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد:

- فرایند شکل‌دهی پینی نه تنها در سطح بالایی بلکه در سطح پایینی قطعه نیز تنش پسماند فشاری ایجاد می‌کند.
- اعمال پیش‌خمش تأثیر به‌سزایی در توزیع تنش‌های ایجاد شده در قطعه دارد.
- در مقایسه با شکل‌دهی پینی رایج، شکل‌دهی پینی تنش‌ی، تنش پسماند سطحی (سطح بالایی و پایینی نوار آلومینیومی) و تنش پسماند فشاری و کششی بیشینه‌ی بزرگتری درون قطعه ایجاد می‌کند.
- با افزایش ممان پیش‌خمش، ارتفاع کمان در جهت x (f_x) افزایش و ارتفاع کمان در جهت y (f_y) کاهش می‌یابد.
- با افزایش ممان پیش‌خمش، شعاع انحنا در جهت x (R_x) کاهش و شعاع انحنا در جهت y (R_y) افزایش می‌یابد.
- در مورد شکل‌دهی پینی تنش‌ی، شعاع انحنا در جهت x (R_x) کوچک‌تر از شعاع انحنا در جهت y (R_y) است.
- شکل‌دهی پینی تنش‌ی در مقایسه با شکل‌دهی پینی رایج ($M_x^{pre}=0$)، ارتفاع کمان در جهت x (f_x) بزرگ‌تر و ارتفاع کمان در جهت y (f_y) کوچک‌تری ایجاد می‌کند.

6- مراجع

- [1] H. Y. Miao, D. Demers, S. Larose, C. Perron, M. Lévesque, Experimental study of shot peening and stress peen forming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, No. 15, pp. 2089-2102, 2010.
- [2] R. Kopp, J. Schulz, Flexible Sheet Forming Technology by Double-sided Simultaneous Shot Peen Forming, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 51, No. 1, pp. 195-198, 2002.
- [3] S. Al-Hassani, Mechanical aspects of residual stress development in shot peening, in *Proceedings of the 1th International Conference on Shot Peening*, Paris, France, pp. 583-602, 1981.
- [4] T. Hong, J. Y. Ooi, B. A. Shaw, A numerical study of the residual stress pattern from single shot impacting on a metallic component, *Advances in Engineering Software*, Vol. 39, No. 9, pp. 743-756, 2008.
- [5] G. Majzoobi, R. Azizi, A. Alavi Nia, A three-dimensional simulation of shot peening process using multiple shot impacts, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 164, pp. 1226-1234, 2005.
- [6] T. Wang, J. Platts, A. Levers, Finite element impact modelling for shot peen forming, in *Proceedings of the 8th international conference on shot peening*, Garmisch-Partenkirchen, Germany, 2002.
- [7] A. Gariépy, S. Larose, C. Perron, M. Lévesque, Shot peening and peen forming finite element modelling – Towards a quantitative method, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 48, No. 20, pp. 2859-2877, 2011.
- [8] L. Grasty, C. Andrew, Shot peen forming sheet metal: finite element prediction of deformed shape, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 210, No. 4, pp. 361-366, 1996.
- [9] A. Levers, A. Prior, Finite element analysis of shot peening, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 80, pp. 304-308, 1998.
- [10] T. Wang, M. J. Platts, A. Levers, A process model for shot peen forming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 172, No. 2, pp. 159-162, 2006.
- [11] T. Yamada, M. Ikeda, T. Takahashi, S. Sugimoto, T. Ohta, Development of shot peening for wing integral skin for continental business jets, *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, Vol. 39, No. 2, pp. 57-61,



شکل 20 مقایسه‌ی الف) ارتفاع کمان و ب) شعاع انحنای نوار آلومینیومی در دو حالت شبیه‌سازی و تجربی به‌ازای قطر ساچمه $d = 0/6$ mm

دلایل مختلفی داشته باشد. از جمله اینکه دستگاه ساچمه‌زنی استفاده شده، مختص فرایند شکل‌دهی پینی نبوده و بنابراین نمی‌توان کنترل زیادی روی پارامترهای فرایند از جمله زاویه‌ی برخورد ساچمه‌ها، فاصله‌ی نازل دستگاه تا قطعه کار و غیره داشت. همچنین ورق آلومینیومی به کار رفته نیز می‌تواند تأثیر گذار باشد و داشتن اطلاعات دقیق‌تری راجع به خواص ورق، به دقیق‌تر شدن شبیه‌سازی عددی کمک کند. به عنوان مثال می‌توان اثر حساسیت به نرخ کرنش و ناهمسانگردی ورق را نیز بخش عددی مورد توجه قرار داد. بنابراین برای انطباق بیشتر نتایج شبیه‌سازی و تجربی، از یک سو باید جزئیات بیشتری از فرایند را در شبیه‌سازی عددی مد نظر قرار داده و از سوی دیگر بایستی با بهبود آزمایش‌های تجربی، شرایط مناسب و کنترل شده‌تری برای انجام فرایند ایجاد کرد.

5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به مطالعه‌ی فرایندهای ساچمه‌زنی، شکل‌دهی پینی رایج و شکل‌دهی پینی تنش‌ی از طریق شبیه‌سازی‌های عددی و تجربی پرداخته شد. در شبیه‌سازی عددی، جهت شبیه‌سازی فرایند ساچمه‌زنی یک مدل اجزا محدود سه‌بعدی ایجاد شد. به این صورت که، ابتدا با استفاده از نتایج مدل برخورد یگانه‌ی یک ساچمه‌ی فولادی به ورق آلومینیومی، برخورد چندگانه

- [15] S. Meguid, G. Shagal, J. Stranart, J. Daly, Three-dimensional dynamic finite element analysis of shot-peening induced residual stresses, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 31, No. 3, pp. 179-191, 1999.
- [16] T. Kim, H. Lee, H. C. Hyun, S. Jung, A simple but effective FE model with plastic shot for evaluation of peening residual stress and its experimental validation, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, No. 18, pp. 5945-5954, 2011.
- [17] L. Kuohsiang, Using stress peen-forming process for integrally stiffened wing panels, in Proceedings of the 1st international conference on shot peening, Paris, France, pp. 555-563. 1981.
- 2002.
- [12] H. Y. Miao, S. Larose, C. Perron, M. Lévesque, Numerical simulation of the stress peen forming process and experimental validation, *Advances in Engineering Software*, Vol. 42, No. 11, pp. 963-975, 2011.
- [13] K. Viveros, R. Ambriz, A. Amrouche, A. Talha, C. García, D. Jaramillo, Cold hole expansion effect on the fatigue crack growth in welds of a 6061-T6 aluminum alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 214, No. 11, pp. 2606-2616, 2014.
- [14] J. Champaigne, The little book on shot peening, Electronics Incorporated, pp. 1-6. 2001; [http:// http://www.shotpeener.com/learning/tlb.pdf](http://www.shotpeener.com/learning/tlb.pdf).