

مطالعه تحلیلی و تجربی نیروی شکل دهی در فرآیند شکل دهی افزایشی ورق

مهدی محمودی^۱، حامد دیلمی عضدی^۲ و*، عباس پاک^۳^۱ کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک^۲ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک^۳ استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا

*مسئول مکاتبات: hdazodi@arakut.ac.ir

چکیده

واژگان کلیدی

شکل دهی ورق های فلزی
فرآیند شکل دهی افزایشی
مدل تحلیلی
نیروی شکل دهی
مطالعه تجربی

فرآیند شکل دهی افزایشی یکی از روش های نوین شکل دهی ورق های فلزی است که به دلیل عدم نیاز به ابزار و قالب خاص و گران قیمت برای تولیدات با تعداد کم و تنوع زیاد بسیار مناسب است و از همین رو در سال های اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته است. در این مقاله مدلی تحلیلی جهت پیش بینی نیروی عمودی وارد بر ابزار در فرآیند شکل دهی افزایشی ورق فلزی با در نظر گرفتن اثرات کشش و خمش ارائه شده است. با انجام فرآیند شکل دهی افزایشی به صورت تجربی، نتایج به دست آمده از روابط تحلیلی با نتایج تجربی مقایسه شده است که دقت مناسب روابط تحلیلی را نشان می دهد. همچنین با استفاده از طراحی آزمایش بر اساس روش سطح پاسخ اثر پارامترهای فرآیند قبیل قطر ابزار، اندازه گام و زاویه کشش بر نیروی شکل دهی بررسی شده است. بر اساس نتایج به دست آمده با افزایش قطر ابزار، اندازه گام و زاویه کشش نیروی شکل دهی افزایش می یابد.

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۵/۰۸

تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۰۴/۲۷

۱ مقدمه

اول شکل دهی برقرار است و از اثرات نیروی خمکاری و اصطکاک صرف نظر شده است. ملایی داریانی و میرنیا [۷] نیز با تحلیل کران بالای تغییر شکل در فرآیند شکل دهی افزایشی مخروط، به بررسی نیروی مماسی و کرنشهای ایجاد شده در هر مرحله پرداختند.

در سالهای اخیر با افزایش تنوع در محصولات و زیاد شدن تولیدات سفارشی با حجم تولید کم، توجه به فرآیندهایی که بدون نیاز به تجهیزات خاص، توانایی تولید محصول با تنوع زیاد را دارند افزایش یافته است. فرآیند شکل دهی افزایشی یکی از این روشها است که در آن ابزاری انگشتی با سر کروی با حرکت کنترل شده در جهات مختلف بر روی ورق به صورت تدریجی باعث ایجاد شکلهای پیچیده میشود.

لی^۷ و همکاران [۸] با در نظر گرفتن مکانیزم شکل دهی در فرآیند شکل دهی افزایشی شامل برش، کشش و خمش، مدلی جهت پیش بینی نیروی شکل دهی با استفاده از تحلیل اجزای محدود برای قطعه مخروطی ارائه نمودند. آنها همچنین از مدل ارائه شده برای پیش بینی نیرو در شکل دهی قطعات پیچیده استفاده نمودند. سنتنو^۸ و همکارانش [۹] به بررسی کرنشهای حدی و نیروی شکل دهی در فرآیند شکل دهی افزایشی بصورت تجربی پرداختند. باگودانچ^۹ و همکاران [۱۰] نیروی شکل دهی افزایشی ورقهای از جنس پلیمر را مطالعه نموده، اثر عوامل مختلف بر نیرو را بررسی کردند. الغمدی^{۱۰} و حسین [۱۱] با مطالعه نیروی شکل دهی، به ارتباط آن با پارامترهای فرآیند از قبیل ضخامت ورق، قطر ابزار، زاویه دیواره قطعه، اندازه گام و استحکام تسلیم ورق به روش سطح پاسخ پرداختند.

مطالعه نیروی شکل دهی در فرآیند شکل دهی افزایشی تاکنون عموماً به صورت تجربی و عددی انجام شده است؛ از جمله پژوهشهای پتک^۱ و همکارانش [۱]، مینوتولو^۲ و همکارانش [۲] و دوفلو^۳ و همکارانش [۳] که به مطالعه تجربی نیروی شکل دهی و مقایسه آن با نتایج شبیه سازی پرداخته اند. همچنین آرفا^۴ و همکاران [۴] که با استفاده از نتایج تجربی و شبیه سازی عددی تأثیر پارامترهای فرآیند بر نیروی شکل دهی در ورق آلومینیوم را بررسی نموده اند. آرنس^۵ و همکارانش [۵] نیز در مطالعه ای دیگر با استفاده از نتایج تجربی و شبیه سازی عددی، روابطی را برای پیش بینی نیروی شکل دهی شامل مولفه های محوری، شعاعی و مماسی نیرو بر اساس پارامترهای فرآیند برای چند ماده مختلف به دست آورده اند. آنها همچنین مدلی کلی جهت تخمین مولفه عمودی نیروی بر اساس استحکام کششی ورق پیشنهاد کردند. ایسکی^۶ [۶] بر اساس هندسه فرآیند روابطی تحلیلی برای تغییر شکل در فرآیند شکل دهی افزایشی ارائه داده است. روابط ایسکی تنها برای مرحله

آنها در نهایت مدلی ارائه نمودند که ضمن تخمین نیروی شکل دهی، قادر است مناسبترین پارامترهای فرآیند برای دستیابی به حداقل نیروی شکل دهی را پیشنهاد نماید. پاک و همکاران [۱۲] و دیلمی عضدی و همکاران [۱۳] نیز با بررسی تحلیلی و تجربی اثر اعمال نوسانات فراصوتی بر نیروی شکل دهی در فرآیند شکل دهی افزایشی، تاثیر عوامل مختلف فرآیند را بر این اثر مطالعه نمودند. قیصریان و هنریشه [۱۴] با مطالعه تجربی فرآیند شکل دهی افزایشی

¹Petek ²Minutolo ³Duflo ⁴Arfa ⁵Aerens ⁶Iseki ⁷Li ⁸Centeno ⁹Bagudanch ¹⁰Al-Ghamdi

بوده که مطابق زیر محاسبه می‌گردند.

$$h_{x_i} = L + (i-1) \Delta x \quad (3)$$

$$h_{z_i} = R_t - i \Delta z \text{ for } (R_t - i \Delta z) > 0 \quad (4)$$

Δz اندازه‌گام در هر مرحله از شکل‌دهی و L نصف طول دهانه قالب است. مقادیر l_1 و l_2 در هر مرحله از روابط زیر تعیین می‌شوند.

$$l_{1i} = \rho_t \theta_i \quad (5)$$

$$l_{2i} = h_{x_i} \cos \theta_i - h_{z_i} \sin \theta_i \text{ for } (R_t - i \Delta z) > 0 \quad (6)$$

روابط ارائه شده برای کرنش از مرحله دوم تا زمانی که $R_t - i \Delta z > 0$ برقرار است (i شماره مرحله است). زمانی که $R_t - i \Delta z \leq 0$ ، برای محاسبه کرنش روابط جدیدی مطابق زیر تعیین می‌گردد.

$$h_{z_i} = i \Delta z - R_t \text{ for } (R_t - i \Delta z) > 0 \quad (7)$$

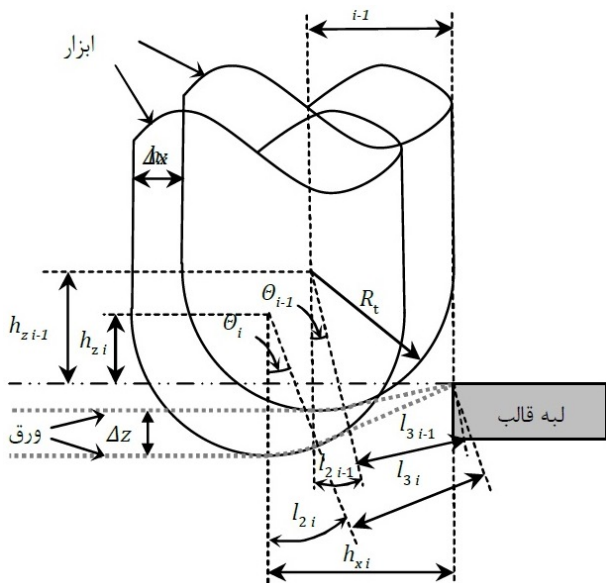
$$l_{1i} = \sqrt{h_{x_i}^2 + h_{z_i}^2} \text{ for } (R_t - i \Delta z) > 0 \quad (8)$$

$$l_{2i} = \sqrt{l_{1i}^2 - \rho_t^2} \text{ for } (R_t - i \Delta z) > 0 \quad (9)$$

l_{1i} طول بردار بین مرکز ابزار و لبه قالب در مرحله i ام است. l_{2i} و h_{x_i} در این حالت همانند حالت قبل محاسبه می‌شود.

با تعیین مقادیر h_z ، l_1 و l_2 برای هر مرحله زاویه تماس بین ابزار و ورق از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$\theta_i = \sin^{-1} \left(\frac{\rho_t}{l_{1i}} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{h_{z_i}}{h_{x_i}} \right) \text{ for } (R_t - i \Delta z) > 0 \quad (10)$$



شکل ۱: هندسه فرآیند شکل‌دهی افزایشی در مرحله i ام شکل‌دهی نسبت به مرحله $i-1$ ام

با فرض رفتار سخت‌شوندگی ورق به صورت رابطه نمایی ($\sigma = K \varepsilon^n$) و در نظر گرفتن ضخامت ورق تغییر شکل یافته (t) به صورت قانون سینوسی

¹Kumar

ورق‌های دولایه از جنس آلومینیوم و مس، اثر چیدمان لایه‌ها و سایر عوامل فرآیند را بر نیروی شکل‌دهی، توزیع ضخامت، شکل‌پذیری و صافی سطح قطعه نهایی مطالعه نمودند. آن‌ها نشان دادند نیروی شکل‌دهی در حالت فرارگیری لایه آلومینیومی در تماس با ابزار بیشتر بوده است.

کومار^۱ و گولاتی [۱۵] در تحقیقی به بهینه‌سازی نیروی شکل‌دهی افزایشی قطعه مخروطی با مسیر ابزار مارپیچ پرداختند. در این مقاله مدلی تحلیلی جهت تخمین نیروی شکل‌دهی در گامهای مختلف فرآیند شکل‌دهی افزایشی با در نظر گرفتن اثرات کشش و خمکاری ارائه می‌گردد. این مدل ضمن سادگی قادر خواهد بود بصورت تحلیل در تمامی گامهای فرآیند به تخمین مولفه نیروی شکل‌دهی در راستای محور ابزار بپردازد. جهت ارزیابی مدل تحلیلی، با انجام فرآیند شکل‌دهی افزایشی به صورت تجربی، نتایج تحلیلی با نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها مقایسه می‌شود. همچنین با استفاده از طراحی آزمایش تاثیر همزمان قطر ابزار شکل‌دهی، اندازه گام و زاویه کشش بر نیروی شکل‌دهی بررسی می‌شود. نتایج می‌تواند به یافتن شرایط بهینه فرآیند جهت دستیابی به نیروی کمینه کمک نماید.

۲ تحلیل تئوری

با توجه به هندسه فرآیند (شکل ۱) می‌توان تغییر شکل ورق در شکل‌دهی افزایشی را به صورت کشیدگی و خم کاری در نظر گرفت [۱۶، ۱۷]. این شکل تغییرات ایجاد شده در ورق را در یک پاس شکل‌دهی (i) نسبت به پاس قبلی ($i-1$) نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود زاویه کشش در مراحل مختلف فرآیند تغییر کرده، در نتیجه نیروی تغییر شکل و نیروی وارد بر ابزار نیز دچار تغییر می‌شود. کرنش ایجاد شده در ورق در مرحله اول شکل‌دهی بر اساس روابط ارائه شده در مرجع شماره [۶] قابل محاسبه بوده، لیکن برای مراحل بعدی شکل‌دهی روابط جدید کرنش استخراج می‌شود. با توجه به هندسه نشان داده شده در شکل ۱ به صورت کلی برای مراحل دوم و بالاتر شکل‌دهی می‌توان کرنش ایجاد شده در ورق را به صورت زیر تعیین کرد.

$$\varepsilon_{x_i} = \ln \left(\frac{l_{2i}}{l_{3i-1} + l_{2i-1} + \Delta x - l_{3i}} \right) \quad (1)$$

Δx میزان پیشروی ابزار در جهت جانبی در هر مرحله از شکل‌دهی بوده، l_{2i} ، l_{3i-1} ، l_{2i-1} و l_{3i} به ترتیب طول قوس تماس ابزار و ورق در مرحله قبل ($i-1$)، طول قوس تماس ابزار و ورق در این مرحله (i)، طول ورق تغییر شکل نیافته بین ابزار و قالب در مرحله قبل و طول ورق تغییر شکل نیافته بین ابزار و قالب در مرحله جاری است. در صورتیکه $(R_t - i \Delta z) > 0$ باشد، در هر مرحله با توجه به شکل ۱ و روابط ارائه شده در مرجع [۶] از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\theta_i = \sin^{-1} \left[\frac{R_t + \frac{1}{2} t_0}{(h_{x_i}^2 + h_{z_i}^2)^{1/2}} \right] - \tan^{-1} \left(\frac{h_{z_i}}{h_{x_i}} \right) \quad (2)$$

for $(R_t - i \Delta z) > 0$

در رابطه فوق R_t شعاع ابزار می‌باشد. h_{x_i} فاصله مرکز قوس ابزار تا لبه عمودی قالب و h_{z_i} فاصله مرکز قوس ابزار تا لبه افقی قالب در هر مرحله

اثر قطر ابزار، اندازه گام و زاویه کشش (زاویه دیواره مخروطی قطعه نهایی با راستای افق) به عنوان پارامترهای ورودی مورد بررسی قرار گرفته و نیروی شکل دهی نیز به عنوان خروجی در نظر گرفته شده است. مقادیر متغیرهای ورودی در آزمایش های مختلف در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۲: تجهیزات آزمون تجربی

۴ نتایج و بحث

۱.۴ مقایسه نتایج تحلیلی و تجربی

الف: نیروی شکل دهی

نیروی شکل دهی اندازه گیری شده توسط نیروسنج در حالت شعاع ابزار ۵ میلیمتر، اندازه گام ۱ میلیمتر و زاویه کشش ۴۵ درجه با نیروی محاسبه شده از روابط تحلیلی در شکل ۳ مقایسه شده است. همچنین در جدول ۱ نتایج تجربی و تحلیلی برای آزمایش های مختلف آورده شده است. نزدیکی نتایج تحلیلی و تجربی نشان دهنده صحت و دقت مناسب مدل تحلیلی ارائه شده می باشد. صرف نظر از نیروی اصطکاک در روابط تحلیلی می تواند منشا اختلاف اندک موجود بین نتایج تجربی و تحلیلی باشد. نیروی شکل دهی در فرآیند شکل دهی افزایشی متأثر از دو مکانیزم خمش و کشش است. افزایش اولیه در نیروی شکل دهی می تواند مرتبط با مکانیزم خمکاری باشد [۱۶] و در ادامه، مکانیزم کشش باعث افزایش نیرو در طی گام ها می شود [۱۷]. ثابت شدن نیرو بعد از چند مرحله می تواند ناشی از برهم نهی اثر نازک شدگی ورق و کار سختی ایجاد شده در آن باشد [۱۶]. چنانچه اثر نازک شدگی بیشتر باشد نیرو کاهش می یابد، اما اگر اثر کار سختی غالب باشد افزایش نیرو روی خواهد داد. برای بررسی اثر پارامترهای فرآیند بر نیروی شکل دهی و مقایسه آن با نتایج تحلیلی، مقادیر نیرو در حالت پایدار و ثابت مد نظر قرار گرفته است. در شکل ۴ نحوه تغییرات نیروی شکل دهی در یک مرحله از فرآیند نشان داده شده است. افزایش های ناگهانی و نوسانی نیروی وارد بر ابزار در آزمونهای تجربی مربوط به گوشه های قطعه است که جهت حرکت ابزار تغییر کرده، نیروی کشش در دو جهت به ابزار وارد میشود و نیز نقطه آغاز به علت حرکت گام در جهت z و فرو رفتن ابزار در ورق می باشد.

ب: ضخامت ورق

در شکل ۵ ضخامت پیش بینی شده با ضخامت اندازه گیری شده ورق تغییر شکل یافته در آزمایش های تجربی برای برخی از نمونه ها مقایسه شده است؛

بر حسب ضخامت اولیه ورق [۱۸]، نیروی کشش ایجاد شده در ورق (F_T) مطابق زیر به دست می آید.

$$F_T = K[\Delta z (2R_t - \Delta z)]^{1/2} \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^{n+1} t_0 \cos \theta \varepsilon_x^n \quad (11)$$

با توجه به اینکه نیروی کشش به دست آمده در امتداد صفحه ورق تغییر شکل یافته می باشد، لذا با تصویر نمودن آن در امتداد قائم، با توجه به زاویه کشش، نیروی ایجاد شده در راستای محور ابزار شکل دهی (F_{zT}) به دست خواهد آمد.

نیروی خمکاری وارد بر ابزار در فرآیند شکل دهی افزایشی را می توان به صورت زیر در نظر گرفت.

$$F_b = \frac{\left(\frac{2}{2+n}\right) \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^{n+1} \frac{K\theta}{\rho_t^{n-1}} \left(\frac{t}{2}\right)^{n+2}}{\tan \theta (R_t \cos \gamma + \Delta z)} \quad (12)$$

که γ زاویه تماس ابزار و ورق از نمای جانبی می باشد.

$$\gamma = \cos^{-1} \left(1 - \frac{\Delta z}{R_t}\right) \quad (13)$$

زاویه نیروی خمکاری با راستای قائم برابر γ می باشد؛ لذا با تصویر نمودن آن در امتداد قائم، نیروی ایجاد شده در اثر خمش در راستای محور ابزار شکل دهی (F_{zb}) به دست خواهد آمد. در نهایت، نیروی کلی ایجاد شده در راستای محور ابزار شکل دهی را می توان مطابق زیر نوشت:

$$F_z = F_{zT} + F_{zb} \quad (14)$$

$$= \frac{K}{\sqrt{3}} [\Delta z (2R_t - \Delta z)]^{1/2} \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^{n+1} t_0 \sin(\theta) \varepsilon_x^n + \frac{K\theta}{\rho_t^{n-1}} \left(\frac{2}{2+n}\right) \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^{n+1} \left(\frac{t}{2}\right)^{n+2} \frac{\cotan \theta \cos \gamma}{(R_t \cos \gamma + \Delta z)}$$

۳ مطالعه تجربی

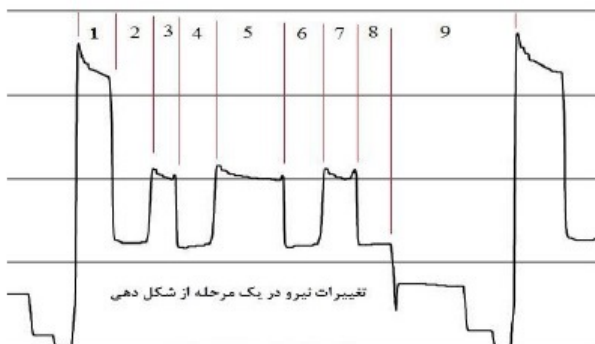
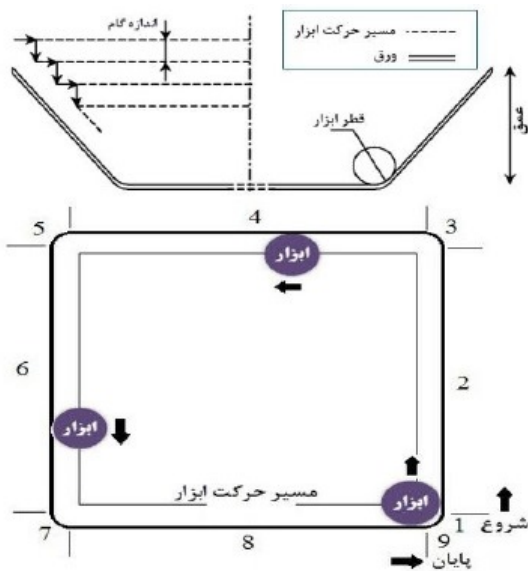
جهت انجام آزمایش ها مجموعه ای شامل ابزار، فیکسچر نگهدارنده ورق، دستگاه فرز و تجهیزات اندازه گیری نیرو به کار گرفته شد. ابزارهای مورد استفاده از جنس فولاد تندبر (HSS) و به شکل سرکروی ساخته شد. فیکسچر شکل دهی دارای دهانه مربعی به ضلع ۱۰۰ میلیمتر بوده است. مجموعه فیکسچر، ابزار و نیروسنج نصب شده بر روی دستگاه فرز در شکل ۲ نشان داده شده است. ورق استفاده شده از جنس آلومینیوم ۱۱۰۰ با ضخامت ۰/۳۳ میلیمتر با مدول الاستیک ۷۰ GPa، استحکام تسلیم ۶۵ MPa و رفتار سخت شونده گی به صورت $\sigma = 184 \varepsilon^{1/4}$ MPa بوده است. در مطالعه تجربی هرمی با قاعده مربعی به ضلع ۱۰۰ میلیمتر در ورق خام مربعی شکل به ضلع ۱۳۰ میلیمتر ایجاد شد. سرعت پیشروی ابزار ۶۳۰ میلیمتر بر دقیقه بوده، در طی فرآیند ابزار حرکت دورانی حول محور خود نداشته است.

طراحی آزمایش ها، جهت بررسی اثر عوامل فرآیند موثر بر فرآیند بر اساس روش سطح پاسخ و به کمک نرم افزار Minitab 16 انجام شده است. از آنجاییکه در مطالعه تجربی فقط قطرهای خاصی از ابزار در دسترس بود، در طراحی آزمایش ها به روش سطح پاسخ از طرح باکس-بنکن استفاده گردید.

جدول ۱: مقادیر متغیرهای ورودی در آزمایش‌های مختلف و نیروی شکل‌دهی تجربی و تحلیلی برای آزمایش‌های طراحی شده

شماره آزمایش	قطر ابزار (mm)	اندازه گام (mm)	زاویه کشش (Deg)	نیروی شکل‌دهی تجربی (N)	نیروی شکل‌دهی تحلیلی (N)
۱	۱۲	۱	۵۱/۳۴	۱۵۰	۱۳۷/۵
۲	۱۲	۰/۸	۴۵	۱۳۱	۱۲۲
۳	۱۲	۱/۲	۴۵	۱۴۵	۱۳۴/۵
۴	۱۰	۰/۸	۳۸/۶۶	۱۲۱	۱۱۰/۵
۵	۱۰	۱/۲	۳۸/۶۶	۱۴۰	۱۲۰/۷
۶	۸	۱/۲	۴۵	۱۲۳	۱۱۹
۷	۱۰	۰/۸	۵۱/۳۴	۱۲۰	۱۲۰
۸	۸	۱	۳۸/۶۶	۱۱۰	۱۱۰/۶
۹	۱۰	۱/۲	۵۱/۳۴	۱۴۵	۱۲۹
۱۰	۱۲	۱	۳۸/۶۶	۱۴۰	۱۲۲
۱۱	۱۰	۱	۴۵	۱۳۸	۱۲۲
۱۲	۸	۱	۵۱/۳۴	۱۲۰	۱۱۸/۲

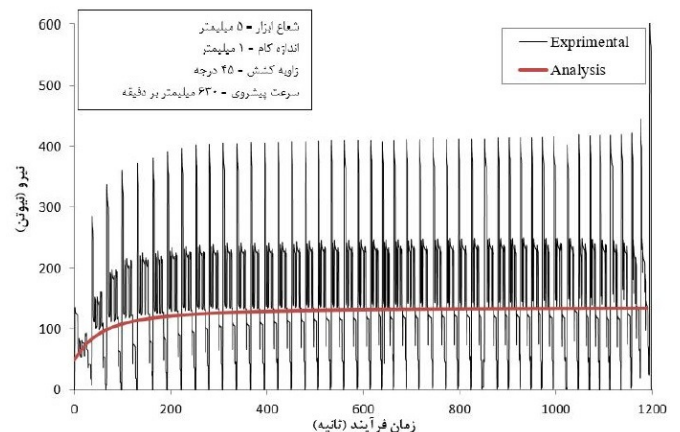
در ورق، افزایش نیروی خمکاری و افزایش نیروی اصطکاک دانست.



شکل ۴: نحوه تغییرات نیرو در یک مرحله از شکل‌دهی شامل حرکت گام و پیشروی ابزار

قطر ابزار از دیگر پارامترهای تأثیرگذار بر نیرو در فرآیند شکل‌دهی افزایشی است. در مدل تحلیلی، شعاع ابزار در نیروی کشش و نیروی خمش موثر است. اندازه قوس تماس ابزار و ورق نیز تحت تأثیر این پارامتر می‌باشد. در شکل ۷ اثر برهم‌کنش قطر ابزار و اندازه گام نشان داده شده است. مطابق نتایج نیروی شکل‌دهی با افزایش شعاع ابزار افزایش می‌یابد.

که نشان از پیش‌بینی نزدیک قانون سینوس از توزیع ضخامت ورق شکل‌داده شده دارد. همچنین برای حالات نشان داده شده مقطع هندسه شکل داده شده ورق تا ایجاد پارگی نیز نشان داده شده است که می‌توان با استفاده از آن توزیع ضخامت در مناطق مختلف شکل را مشاهده نمود. اندازه‌گیری ضخامت ورق و بررسی پروفیل قطعه شکل داده شده با برش نمونه‌ها و با کمک دستگاه اندازه‌گیری تصویری انجام شده است.

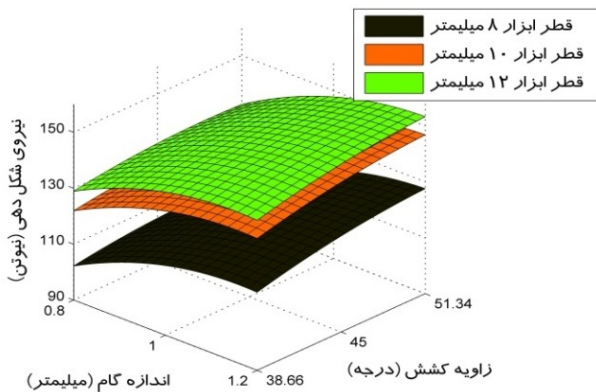


شکل ۳: تغییرات نیروی شکل‌دهی به صورت تجربی و تحلیلی برای ابزار با شعاع ۵ میلیمتر، اندازه گام ۱ میلیمتر و زاویه کشش ۴۵ درجه

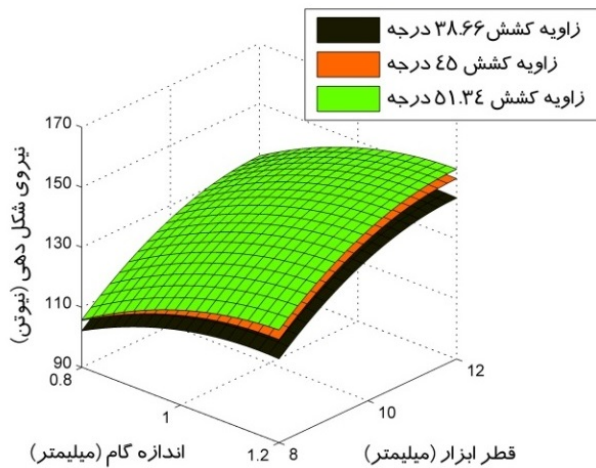
۲.۴ بررسی اثر پارامترهای فرآیند بر نیروی شکل‌دهی

در شکل ۶ اثر برهم‌کنش زاویه کشش و اندازه گام بر نیروی شکل‌دهی نشان داده شده است. مطابق نتایج نیروی عمودی وارد بر ابزار با افزایش زاویه کشش افزایش می‌یابد. این مسئله را می‌توان ناشی از کشیده شدن بیشتر ورق، افزایش تماس ابزار و ورق و در نتیجه افزایش نیروی اصطکاک، کاهش زاویه راستای نیروی وارد بر ابزار با راستای قائم و در نتیجه افزایش مؤلفه عمودی نیروی شکل‌دهی دانست. بر اساس روابط تحلیلی، اندازه گام با اثر بر روی قوس تماس ابزار و زوایای ابزار و ورق باعث تغییر نیروی شکل‌دهی می‌شود. در شکل ۶ مشاهده می‌شود که با افزایش اندازه گام نیروی شکل‌دهی افزایش می‌یابد. علت این افزایش را می‌توان افزایش نیروی کشش ایجاد شده

افزایش کشش ایجاد شده در ورق، افزایش ناحیه تغییر شکل و افزایش نیروی اصطکاک می‌تواند باعث افزایش نیروی شکل‌دهی با افزایش قطر ابزار باشد.



شکل ۶: اثر بر هم کنش زاویه کشش و اندازه‌گام بر نیروی شکل‌دهی اندازه‌گیری شده در آزمون‌های تجربی

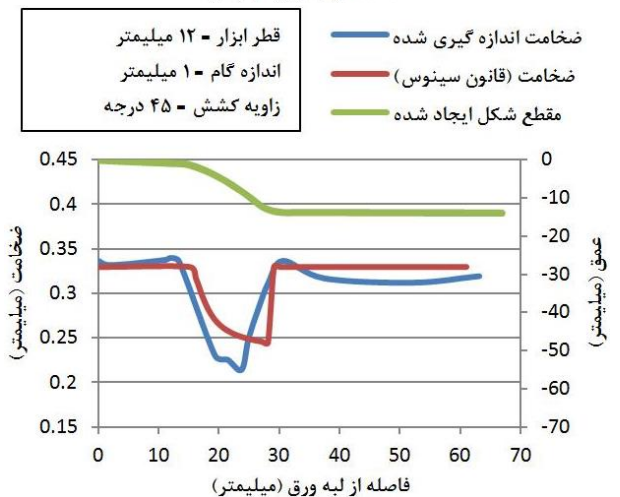
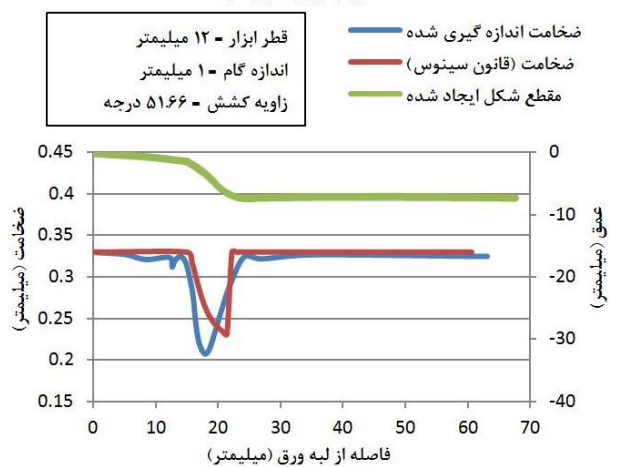
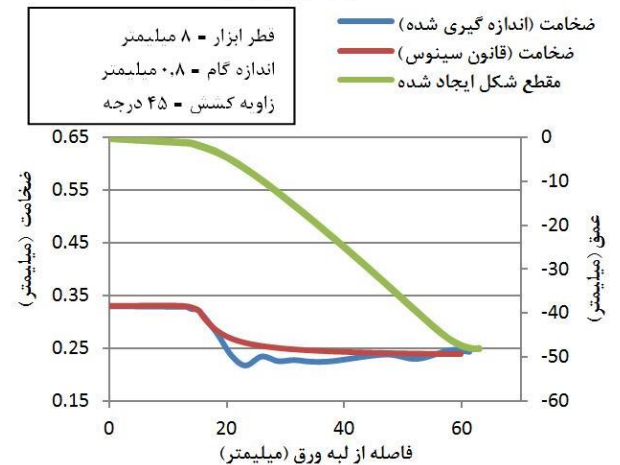
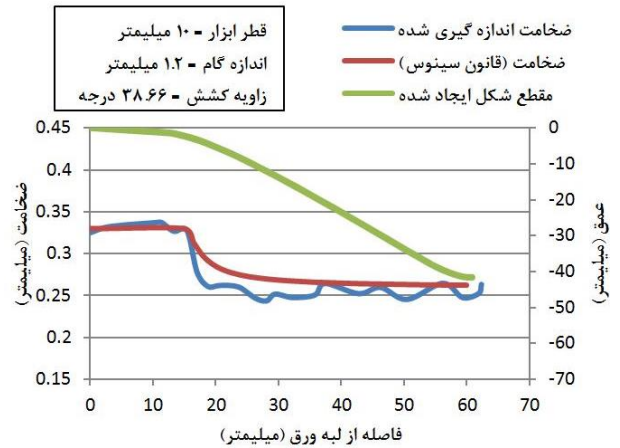


شکل ۷: اثر بر هم کنش قطر ابزار و اندازه‌گام بر نیروی شکل‌دهی اندازه‌گیری شده در آزمون‌های تجربی

۵ نتیجه‌گیری

در این مقاله با در نظر گرفتن اثرات کشش و خمش در تغییر شکل ورق در فرآیند شکل‌دهی افزایشی، روابط تحلیلی جهت تعیین نیروی شکل‌دهی استخراج گردید. با انجام فرآیند شکل‌دهی افزایشی به صورت تجربی، درستی مدل تحلیلی ارائه شده با مقایسه نتایج تحلیلی با نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های تجربی ارزیابی شد. همچنین با استفاده از طراحی آزمایش تاثیر عوامل مختلف موثر بر فرآیند مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر به‌دست آمد:

- با در نظر گرفتن تغییر شکل ایجاد شده در فرآیند شکل‌دهی افزایشی تحت تاثیر دو مکانیزم کشش و خمش و لحاظ نمودن نیروی دو مکانیزم می‌توان تخمین خوبی از نیروی عمودی وارد بر ابزار به‌دست آورد. انطباق مناسب نیروی شکل‌دهی اندازه‌گیری شده در آزمایش‌های تجربی و نتایج تحلیلی موید این مسئله می‌باشد.



شکل ۵: توزیع ضخامت قطعه و مقطع آن برای شرایط مختلف آزمایش

- [11] Al-Ghamdi, Khalid A and Hussain, G. Forming forces in incremental forming of a geometry with corner feature: investigation into the effect of forming parameters using response surface approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76(9-12):2185–2197, 2015.
- [12] Pak, Abbas, Deilami Azodi, Hamed, and Mahmoudi, Mehdi. Investigation of ultrasonic assisted incremental sheet metal forming process. *Modares Mechanical Engineering*, 14(11), 2015 (in Persian).
- [13] Deilami Azodi, Hamed, Pak, Abbas, and Mahmoudi, Mehdi. Effects of process parameters in ultrasonic vibration assisted incremental sheet metal forming. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, 2(3), 2015 (in Persian).
- [14] Honarpisheh, Mohammad and Gheysarian, Ahmad. An experimental study on the process parameters of incremental forming of explosively-welded al/cu bimetal. *Journal of Computational & Applied Research in Mechanical Engineering (JCARME)*, 7(1):73–83, 2017.
- [15] Kumar, Ajay and Gulati, Vishal. Experimental investigations and optimization of forming force in incremental sheet forming. *Sādhanā*, 43(10):159, 2018.
- [16] Ambrogio, G, Filice, L, and Micari, F. A force measuring based strategy for failure prevention in incremental forming. *Journal of materials processing technology*, 177(1-3):413–416, 2006.
- [17] Petek, Aleš. *The definition of stable technological window by incremental sheet metal forming*. Ph.D. thesis, University of Ljubljana, Ljubljana, 2009.
- [18] Young, D and Jeswiet, J. Wall thickness variations in single-point incremental forming. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 218(11):1453–1459, 2004.
- نتایج به دست آمده نشان می‌دهد با افزایش زاویه کشش نیروی شکل‌دهی افزایش می‌یابد.
- افزایش اندازه گام باعث افزایش نیروی شکل‌دهی وارد بر ابزار می‌شود.
- نیروی عمودی وارد بر ابزار با افزایش قطر ابزار افزایش می‌یابد.
- مراجع**
- [1] Petek, Aleš, Kuzman, Karl, and Kopač, Janez. Deformations and forces analysis of single point incremental sheet metal forming. *Archives of Materials science and Engineering*, 35(2):107–116, 2009.
- [2] Minutolo, F Capece, Durante, M, Formisano, A, and Langella, A. Forces analysis in sheet incremental forming and comparison of experimental and simulation results. in *Intelligent production machines and systems*, pp. 229–234. Elsevier, 2006.
- [3] Duflo, Joost, Tunckol, Yasemin, Szekeres, Alex, and Vanherck, Paul. Experimental study on force measurements for single point incremental forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 189(1-3):65–72, 2007.
- [4] Arfa, H, Bahloul, R, and BelHadjiSalah, H. Finite element modelling and experimental investigation of single point incremental forming process of aluminum sheets: influence of process parameters on punch force monitoring and on mechanical and geometrical quality of parts. *International journal of material forming*, 6(4):483–510, 2013.
- [5] Aereens, Richard, Eyckens, Philip, Van Bael, Albert, and Duflo, JR. Force prediction for single point incremental forming deduced from experimental and fem observations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 46(9-12):969–982, 2010.
- [6] Iseki, Hideo. An approximate deformation analysis and fem analysis for the incremental bulging of sheet metal using a spherical roller. *Journal of Materials Processing Technology*, 111(1-3):150–154, 2001.
- [7] Mirnia, Mohammad J and Dariani, Bijan M. Analysis of incremental sheet metal forming using the upper-bound approach. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 226(8):1309–1320, 2012.
- [8] Li, Yanle, Daniel, William JT, Liu, Zhaobing, Lu, Haibo, and Meehan, Paul A. Deformation mechanics and efficient force prediction in single point incremental forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 221:100–111, 2015.
- [9] Centeno, Gabriel, Bagudanch, Isabel, Martínez-Donaire, Andrés Jesús, Garcia-Romeu, Maria Luisa, and Vallellano, Carpóforo. Critical analysis of necking and fracture limit strains and forming forces in single-point incremental forming. *Materials & Design*, 63:20–29, 2014.
- [10] Bagudanch, I, Garcia-Romeu, ML, Centeno, G, Elías-Zúñiga, A, and Ciurana, J. Forming force and temperature effects on single point incremental forming of polyvinylchloride. *Journal of materials processing technology*, 219:221–229, 2015.