

بررسی عددی و تجربی متغیرهای تاثیرگذار بر پدیده برگشت فنری و میزان تنش در فرایند شکل دهی به کمک ابزار انعطاف پذیر بر روی قطعات دارای شعاع انحنا

آرمین مهشیدی فر^۱، عباس وفائی صفت^۲

چکیده

تولید و تهیهی بسیاری از قسمت‌های بدنه هواپیما از جمله بال‌ها که دارای طولی بلند و فرمی هموار با شعاع انحنا بزرگی می‌باشند از مهم‌ترین مسائل چالش‌انگیز در این صنعت می‌باشد. در این مقاله عوامل موثر در روش شکل‌دهی با کمک بالشتک لاستیکی بر روی قطعات دارای شعاع انحنا و عوامل موثر بر آن به کمک روش المان محدود مورد بررسی قرار گرفته است. اثر متغیرهایی نظیر شعاع انحنا، میزان ضخامت ورق، ضخامت لاستیک، میزان سختی لاستیک، شرایط روانکاری و اصطکاک بر پدیده برگشت فنری و بیش‌ترین میزان تنش مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در ابتدا به منظور اعتبار سنجی نتایج شبیه‌سازی اجزا محدود، نتایج تجربی با نتایج شبیه‌سازی مقایسه شده است تا صحت عملیات مشخص شود. پس از آن به بررسی کامل سایر متغیرهای ذکر شده پرداخته می‌شود. نتایج نشان‌دهنده نزدیکی نتایج عددی و تجربی و نیز موثر بودن پارمترهای ذکر شده می‌باشد.

کلمات کلیدی: شعاع انحنا، بالشتک لاستیکی، روش المان محدود، انرژی کرنشی.

۱- مقدمه

ابعادی بالاتر باید از تکنیک‌های متفاوتی استفاده شود [۱]. یکی از فرایندهایی که به تازگی در صنایع هوافضا مورد استفاده قرار گرفته است روش شکل‌دهی با کمک بالشتک لاستیکی می‌باشد. ابزار انعطاف‌پذیر معمولاً شامل لاستیک طبیعی و یا مصنوعی می‌باشد که به عنوان نیمه قالب در نظر گرفته می‌شود. این امر می‌تواند باعث کاهش چشم‌گیری در هزینه‌های تولیدی شود. یکی از این مطالعات آزمایشگاهی، توسط browne و battikha [۲] صورت گرفته است. آن‌ها میزان پیشروی لاستیک، به عنوان یکی از پارامترهای مورد استفاده در فرایند در هنگامی که تحت بارهای ناگهانی قرار می‌گیرد را مورد مطالعه قرار داده‌اند.

تهیه و تولید قطعات دارای شعاع انحنا همراه با مشکلات ابعادی و به وجود آمدن پدیده‌هایی نظیر برگشت فنری می‌باشد. امروزه این نوع از قطعات را به وسیله فرایندهایی نظیر شکل‌دهی کششی تولید می‌نمایند، اما به دلیل وجود مشکلات در حین انجام فرایند، تولید چنین قطعاتی محدودیت‌هایی به همراه دارد به طوری که از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به عدم شکل‌گیری کامل برخی از قسمت‌ها و یا عدم تولید فک‌های نگهدارنده در ابعاد بزرگ اشاره نمود. به همین دلیل برای تقلیل و یا از بین بردن کامل این محدودیت‌ها و دستیابی به دقت

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک و هوا فضا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران، mahshidifar@gmail.com

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه امام حسین (ع)

همچنین آن‌ها با استفاده از انواع روان‌کننده‌ها در ورق و سطوح برخوردی بین لاستیک و قالب را مورد بررسی قرار داده‌اند. همچنین در راستای تحقیقاتشان میزان نیروی مورد نیاز ورق گیر برای جلوگیری از ایجاد چروکیدگی و همچنین اشاعه ترک بر روی ورق را مورد بررسی قرار دادند [۳و۲].

Dirikolu و **Akdemir** [۴] با کمک روش المان محدود فرایند شکل‌دهی با کمک بالشتک لاستیکی را به صورت سه بعدی مورد بررسی قرار داده‌اند در راستای این تحقیق، اثر سختی لاستیک و نوع ورق بر روی توزیع تنش در نمونه فرم یافته مورد بررسی قرار گرفته شده است. هم‌چنین **Ramezani** و همکارانش [۵] مدلی را برای نقش اصطکاک در انجام فرایند در تماس بین فلز - فلز و لاستیک - فلز ارائه داده‌اند و در آخر **Peng** و همکارانش [۶] به کمک کار تجربی و شبیه‌سازی عددی نقش دانه‌بندی نمونه فلزی را در روند فرایند مورد بررسی قرار داده‌اند. لازم به ذکر می‌باشد که در هیچ‌کدام از این مطالعات اثر استفاده از لاستیک‌ها برای فرم‌دهی قطعات دارای شعاع انحنا مورد بررسی قرار نگرفته است. این ضعف دیدگاه جدیدی را ایجاد می‌کند تا اثر پارامترهای مختلف بر روی فرایند، در نظر گرفته شود. در این مقاله، مطالعات تجربی و عددی به روش المان محدود بر روی نمونه‌ی آلومینیومی دارای شعاع انحنا انجام شده است و به نقش و تاثیر پارامترهایی کلیدی شامل میزان ضخامت و سختی لاستیک، اصطکاک، میزان شعاع انحنا و ضخامت ورق بر روند فرایند پرداخته شده است.

۲- مدل‌سازی به روش المان محدود و انجام کار تجربی

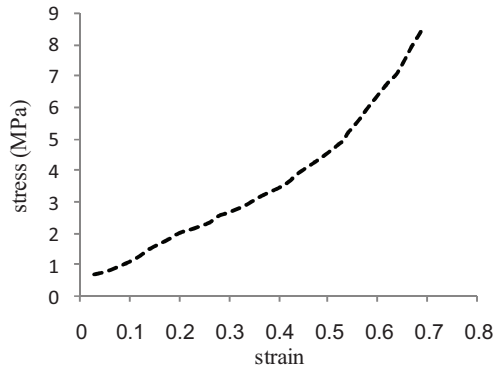
در شکل ۱ شماتیکی از هندسه و اندازه فرایند شکل‌دهی با کمک بالشتک لاستیکی بر روی قطعه دارای شعاع انحنا در بخش تجربی نشان داده شده است. شکل ۲ نشان‌دهنده ابزار و نمونه‌های ساخته شده در قسمت تجربی می‌باشد. نمونه‌های فرم یافته دارای شعاع انحنا به میزان ۳۵ و ۵۰ میلی‌متر می‌باشند. جنس قالب و نگه‌دارنده از فولاد نرم و لاستیک مورد استفاده دارای سختی به میزان **shore ۶۱** و قطری به میزان ۶۲ میلی‌متر می‌باشد. از این لاستیک برای فرم‌دهی ورق‌هایی که دارای طولی برابر ۹۰ میلی‌متر و ضخامت‌هایی برابر ۰/۵ و ۱ میلی‌متر می‌باشند، استفاده می‌شود. اولین قسمت فرایند با قرار

دادن قالب بر روی کوبه ماشین پرس هیدرولیکی و قرارگیری پانچ انعطاف‌پذیر بر بستر پرس آغاز می‌شود. پس از آن ورق آلومینیومی ما بین فرم‌دهنده و لاستیک قرار می‌گیرد. پس از انطباق با حرکت فرم‌دهنده به سمت ورق فرایند شکل‌دهی آغاز می‌شود. برای شبیه‌سازی نیز یک مدل اجزا محدود همانند هندسه و ابعاد مورد استفاده در بخش تجربی ایجاد می‌گردد.

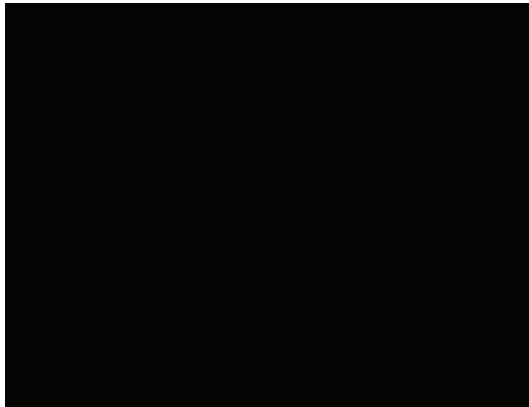
در این شبیه‌سازی دیدگاه غیرخطی بودن فرایند در نظر گرفته می‌شود چرا که شکل‌پذیری ورق (ناحیه پلاستیک) و همچنین خاصیت هاپیر الاستیک بودن لاستیک در حین مدل‌سازی کاملاً مشهود می‌باشد. با توجه به انجام فرایند در حالت کرنش صفحه‌ای، شبیه‌سازی فرم‌دهنده و لاستیک و ورق به صورت دو بعدی مدل می‌شود. ضریب اصطکاک مابین فرم‌دهنده و ورق و مابین لاستیک و ورق به ترتیب به میزان (۰.۱) تا (۰.۳) در نظر گرفته شده است. مقادیر در نظر گرفته شده حاصل نتایج به دست آمده از مرجع [۵] می‌باشد. شکل ۳ نشان‌دهنده‌ی نمونه‌های مورد آزمایش در تست کشش می‌باشد. خواص مربوط به ورق آلومینیومی مورد استفاده در بخش تجربی با استفاده از تست کشش و بر اساس استاندارد **ASTM E8M** به دست می‌آید. نتایج حاصل از این آزمایش در جدول (۱) نشان داده شده است.

برای تعیین خصوصیات مواد لاستیک طبیعی تست‌هایی بر اساس استاندارد **ASTMD575** مورد استفاده قرار گرفته شده است. نتایج حاصل از این آزمایش در شکل (۴) نشان داده شده است. در آزمایش فشار نمونه‌هایی به شکل صفحه یا ورق مسطح با عرض **w** و ضخامت **h** بین دو صفحه باریک با عرض **b** تحت فشار قرار می‌گیرد. نتایج این مهم در شکل (۴) و (۵) نشان داده شده است. با اعمال فشار بر نمونه در امتداد عرض **w**، سیلانی ایجاد نمی‌گردد. چرا که ماده مجاور آن‌که فشاری بر آن وارد نشده و تغییرشکل نیافته است، از سیلان فلز در این امتداد جلوگیری می‌کند. بنابراین کرنش در امتداد عرض برابر صفر می‌باشد [۷].

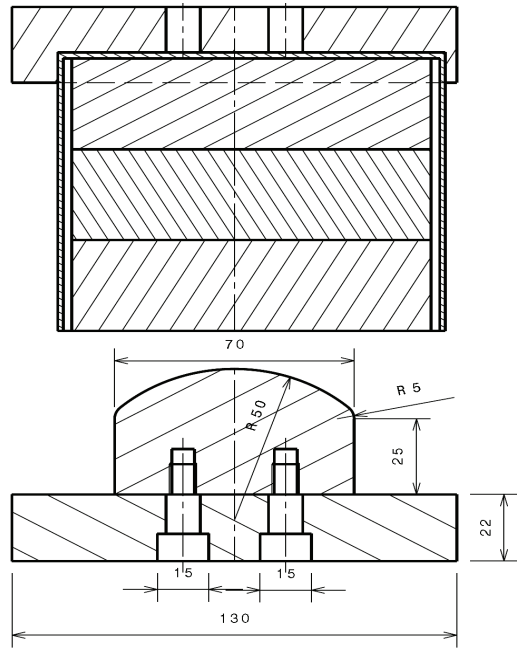
شکل ۶ نشان‌دهنده نحوه شبکه‌بندی و طراحی ابزار مورد استفاده در فرایند می‌باشد. لازم به ذکر می‌باشد که هندسه و نوع مواد انتخاب شده مطابق با بخش تجربی می‌باشد.



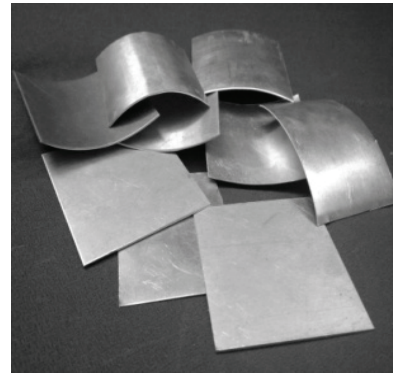
شکل (۴): نمودار تنش - کرنش لاستیک مورد استفاده



شکل (۵): نمودار نیرو و فشردگی لاستیک مورد استفاده



شکل (۱): شماتیکی از فرایند شکل دهی با کمک بالشتک لاستیک



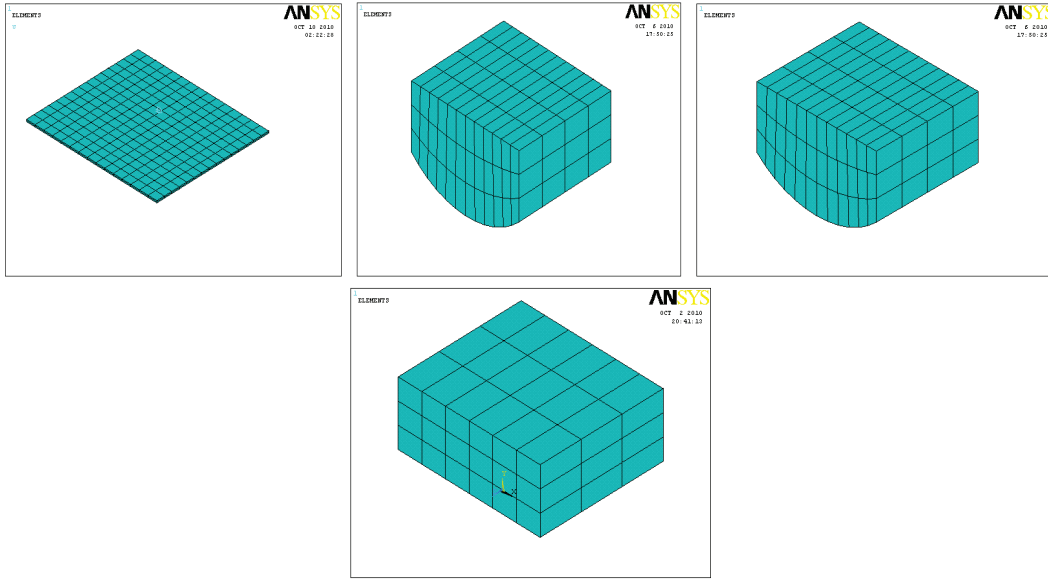
شکل (۲): ابزار و نمونه‌های ساخته شده در قسمت تجربی



شکل (۳): هندسه و نمونه مورد آزمایش در تست کشش

۲-۱ شبیه‌سازی مواد انعطاف‌پذیر

مواد انعطاف‌پذیر دارای مشخصه‌های تنش - کرنش به صورت غیرخطی می‌باشند. مدل کردن چنین مواد هایدرواستاتیکی از طریق روش المان محدود مستلزم در نظر گرفتن یک قانون ترکیبی بر اساس دانسیته انرژی کلی کرنشی می‌باشد. در این راستا دیدگاه‌های متفاوتی ارائه شده است. اساس یکی از این دیدگاه‌ها بر ایجاد انرژی کلی کرنشی^۳ به صورت چندجمله‌ای می‌باشد [۸،۹]. شاید بتوان این مدل را معروف‌ترین مدل ساختاری مواد انعطاف‌پذیر دانست. فرم حاصل از ضرایب این دیدگاه به صورت دو پارامتری (C_{10} , C_{01}) انتخاب می‌شود. برای به دست آوردن این دو پارامتر در بخش شبیه‌سازی می‌توان از معادلات به دست آورده شده در همین راستا استفاده نمود، با استفاده از نتایج نمودار تنش کرنش (شکل ۴) و با استفاده از معادلات زیر می‌توان به میزان این پارامترها دست یابیم [۴]. نتایج حاصل از خصوصیات مکانیکی لاستیک در جدول ۲ بیان شده است.



شکل (۶): شماتیکی از نحوه شبکه‌بندی صورت گرفته شده

در جداول ۱ و ۲، E معرف مدول الاستیسته، σ_y معرف تنش تسلیم، UTS معرف تنش نهایی، C01 و C10 ثوابت لاستیک و shore معرف میزان سختی و v معرف ضریب پواسون می‌باشد.

۳- نتایج و تحلیل‌ها

۳-۱ صحت‌سنجی روش المان محدود

برای این‌که نتایج شبیه‌سازی با استفاده از روش اجزا محدود مورد ارزیابی قرار بگیرد، تجزیه و تحلیل روش اجزا محدود با هندسه، مواد و شرایط بارگذاری مشابه با شرایط آزمایشگاهی انجام شده است. شکل ۷ و ۸ نشان‌دهنده نموداری مقایسه‌ای، مابین نتایج حاصل از کار آزمایشگاهی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی در مورد پیش‌بینی میزان نیروی اعمالی با شعاع انحنا به ترتیب ۳۵ و ۵۰ میلی‌متر می‌باشد. با استفاده از این مهم می‌توان دریافت که بیش‌ترین میزان خطا در پیش‌بینی میزان نیروی اعمالی در حدود ۶/۴۸ درصد می‌باشد.

$$\begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n \beta_1^2(\epsilon_j) & \sum_{j=1}^n \beta_1(\epsilon_j)\beta_2(\epsilon_j) \\ \sum_{j=1}^n \beta_1(\epsilon_j)\beta_2(\epsilon_j) & \sum_{j=1}^n \beta_2^2(\epsilon_j) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} C_{01} \\ C_{10} \end{Bmatrix} = A \quad (1)$$

$$A = \begin{Bmatrix} \sum_{j=1}^n \beta_1(\epsilon_j)\sigma_j \\ \sum_{j=1}^n \beta_2(\epsilon_j)\sigma_j \end{Bmatrix} \times 10^9 [Pa]$$

در معادله (۱) معرف میزان تنش و ϵ معرف میزان کرنش و n نیز تعداد نقاط حاصل از نمودار تنش کرنش می‌باشد. میزان $\beta_1(\epsilon_j)$ و $\beta_2(\epsilon_j)$ را می‌توان با استفاده از معادلات (۲) و (۳) به‌دست آورد.

$$\beta_1(\epsilon_j) = 2 \left(\epsilon_j^2 - \frac{1}{\epsilon_j^2} \right) \quad (2)$$

$$\beta_2(\epsilon_j) = 2 \left(\epsilon_j^4 - \frac{1}{\epsilon_j^4} \right) \quad (3)$$

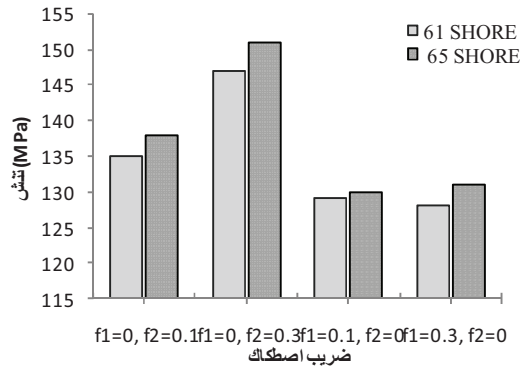
جدول (۱): خصوصیات مکانیکی به‌دست آورده شده ورق

density	E (GPa)	σ_y (MPa)	UTS(MPa)	v
۲۷۰۰	۶۷/۱۲	۱۲۴	۱۷۸	۰/۳۳

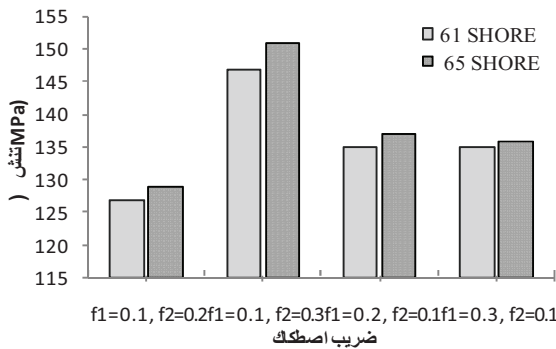
جدول (۲)- مشخصات مکانیکی به‌دست آورده شده برای لاستیک

Shore	C10 (MPa)	C01 (MPa)	E (MPa)	v
۶۱	۰/۴۸۲	۰/۱۱۷	۴/۴۶۷	۰/۴۴

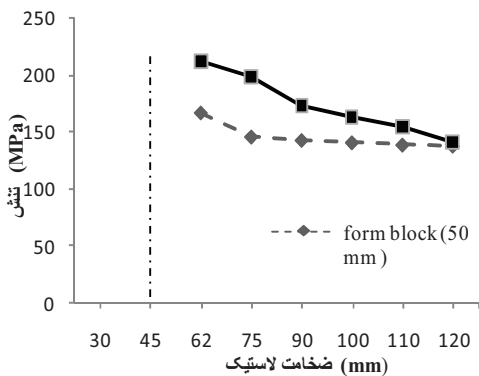
تنش ایجاد شده خواهیم بود اما ضریب اصطکاک f_2 نقشی بالعکس نسبت به f_1 دارا می‌باشد. با افزایش یافتن f_2 شاهد افزایش میزان تنش ایجاد شده در شبیه‌سازی خواهیم بود دلیل این مهم می‌تواند عدم و یا سختی در سیلان ورق فلزی به سمت فرم‌دهنده باشد.



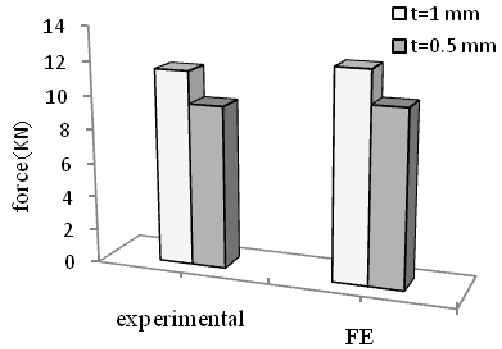
شکل (۹): نمودار مقادیر بیش‌ترین تنش ون مایز در انتهای کورس



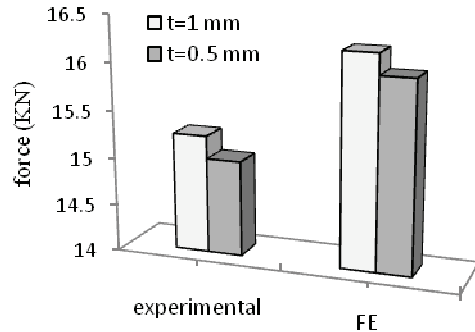
شکل (۱۰): نمودار مقادیر بیش‌ترین تنش ون مایز در انتهای کورس



شکل (۱۱): نمودار تاثیر ضخامت لاستیک بر بیش‌ترین میزان تنش ون مایز



شکل (۷): نیروی لازم جهت شکل‌دهی ورق با ضخامت‌های متغیر، شعاع انحنا ۳۵ میلی‌متر



شکل (۸): نیروی لازم جهت شکل‌دهی ورق با ضخامت‌های متغیر، شعاع انحنا ۵۰ میلی‌متر

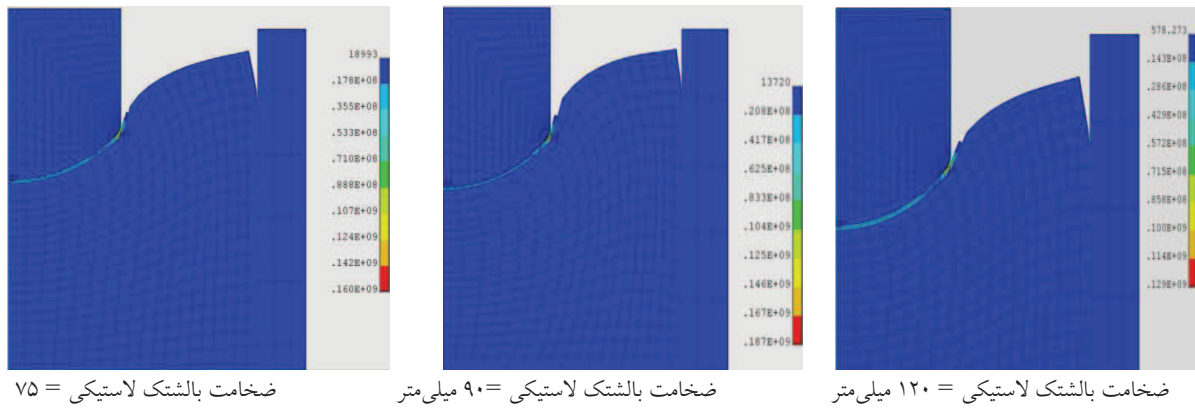
۲-۳ اثر ضریب اصطکاک

شرایط مربوط به اصطکاک جزء پارامترهایی می‌باشد که بر روی قابلیت شکل‌پذیری و کیفیت نمونه‌های تولیدی اثرگذار می‌باشد. تغییرات ناشی از اصطکاک منجر به تغییر یافتن توزیع تنش کرنش می‌شود. به‌طور کلی دو اثر اصطکاک حائز اهمیت می‌باشد [۵].

ضریب اصطکاک مابین فرم‌دهنده و ورق فلزی: f_1

ضریب اصطکاک مابین لاستیک ورق فلزی: f_2

با توجه به تحقیقات صورت گرفته [۵]، مقادیر در بازه ۰ تا ۰/۳ انتخاب شده است. شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان‌دهنده اثر متغیرهای ضریب اصطکاک بر بیش‌ترین میزان تنش ون مایز در شبیه‌سازی می‌باشد. نتایج نشان‌دهنده این مهم می‌باشند که با افزایش یافتن میزان f_1 شاهد کاهش میزان



ضخامت بالشتک لاستیکی = ۷۵

ضخامت بالشتک لاستیکی = ۹۰ میلی متر

ضخامت بالشتک لاستیکی = ۱۲۰ میلی متر

میلی متر

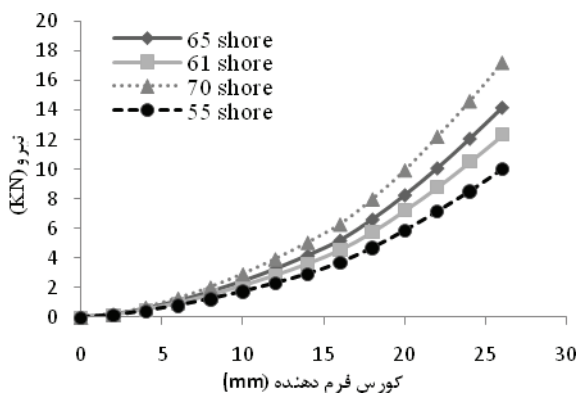
شکل (۱۲): تغییرات میزان تنش با به کارگیری لاستیک‌هایی با ضخامت‌های متغیر

پرس پایین باشد می‌توان از لاستیک‌هایی، با سختی کم‌تر به‌عنوان پانچ انعطاف‌پذیر استفاده کرد و در زمانی که سیکل تولیدات بالا باشد و نمونه‌هایی با شعاع انحنا کم‌تر ایجاد شود، لاستیک‌های دارای سختی بالاتر گزینه‌ی مناسبی برای پانچ انعطاف‌پذیر معرفی می‌گردند.

جدول (۳): مشخصات مکانیکی مورد استفاده برای لاستیک در

شبیه‌سازی [۱۰ و ۴]

shore	C10 (MPa)	C01 (MPa)	E (MPa)
۴۰	۰/۱۸۹	۰/۰۴۵	۰/۳۸۱
۴۵	۰/۲۳۲	۰/۰۵۸	۱/۸۰۰
۵۰	۰/۳۰۲	۰/۰۷۶	۲/۳۹۷
۵۵	۰/۳۸۲	۰/۰۹۶	۳/۲۰۷
۶۰	۰/۴۷۴	۰/۱۱۸	۴/۲۶۸
۶۵	۰/۵۸۶	۰/۱۴۷	۵/۶۱۶
۷۰	۰/۷۳۶	۰/۱۸۴	۷/۲۸۹



شکل (۱۳): نمودار بارگذاری - کورس با استفاده از لاستیک‌هایی با

سختی متفاوت، شعاع انحنا ۲۵ میلی متر

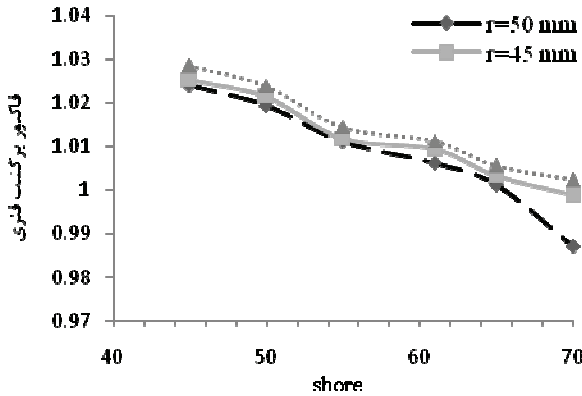
۳-۴ اثر ضخامت لاستیک

برای بررسی این مهم از ۸ نوع لاستیک با ضخامت‌های متفاوت استفاده شده است که مقدار این ضخامت‌ها به میزان (۳۰ - ۴۵ - ۶۲ - ۷۵ - ۹۰ - ۱۰۰ - ۱۱۰ - ۱۲۰) میلی‌متر، می‌باشند نتایج حاصل از این مهم در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با استفاده از شکل زیر می‌توان نتیجه‌گیری کرد در هنگامی که ضخامت لاستیک از مقدار پایینی برخوردار باشد. شاهد عدم شکل‌گیری کامل نمونه خواهیم بود بنابراین لازم است که میزان ضخامت لاستیک حداقل ۲ تا ۲/۵ برابر بیشتر از میزان کورس لازم در فرایند باشد.

۳-۳ تاثیر سختی لاستیک بر منحنی بار-کورس

شکل ۱۳ نشان‌دهنده نمودار مربوط به میزان بار اعمال شده پانچ انعطاف‌پذیر در برابر کورس فرم‌دهنده (میلی‌متر) می‌باشد. داده‌های مورد استفاده (ثابت مواد انعطاف‌پذیر) برای شبیه‌سازی عددی در جدول ۳ نشان داده شده است [۱۰ و ۴]. نتایج نشان‌دهنده این مهم می‌باشد در هنگامی که میزان کورس فرم‌دهنده به ۲۶ میلی‌متر می‌رسد. بیش‌ترین میزان بار اعمالی برابر ۱۷/۱۸۷ کیلونیوتن می‌باشد اما این میزان در هنگام استفاده از لاستیک با سختی کمتر به میزان ۹/۹۷۲ کیلونیوتن تقلیل می‌یابد. استفاده از لاستیک‌هایی با سختی کم‌تر منجر به عدم شکل‌گیری نمونه‌های تولیدی می‌شود بنابراین هنگامی که سیکل تولیدات و میزان ظرفیت

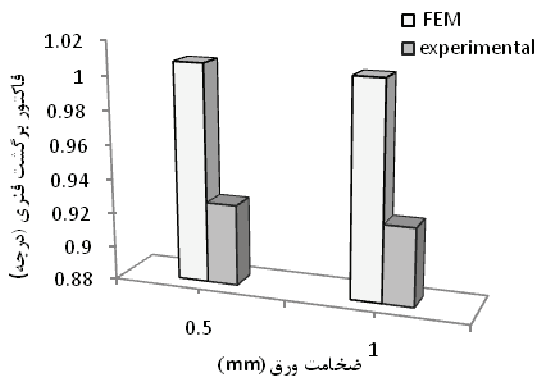
نظر گرفته شده است نتایج نشان دهنده این مهم می باشد که با افزایش میزان سختی لاستیک میزان برگشت فنری کاهش می یابد. بنابراین سختی لاستیک نیز می تواند یکی از پارامترهای تاثیرگذار بر روی میزان برگشت فنری باشد.



شکل (۱۵): تاثیر سختی لاستیک بر میزان برگشت فنری

۳-۵-۱۲ اثر ضخامت ورق و لاستیک بر برگشت فنری

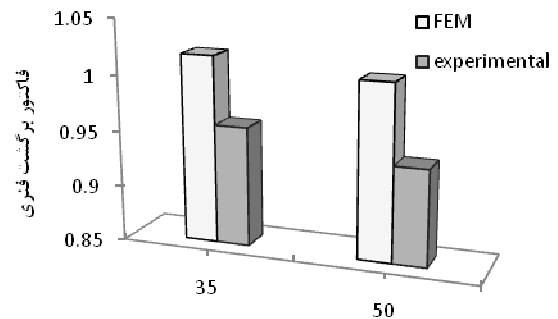
برای بررسی اثر ضخامت ورق، ۱۰ قطعه فرم یافته با ضخامت های ۰/۵ و ۱ میلی متر انتخاب و مورد بررسی قرار گرفته شده اند. همچنین برای بررسی اثر ضخامت لاستیک نیز از لاستیک هایی با ضخامت های (۳۰ تا ۱۲۰ میلی متر) استفاده شده است. نتایج حاصل از بررسی متغیرهای (ضخامت لاستیک و ضخامت ورق) به ترتیب در شکل های (۱۶) و (۱۷) نشان داده شده است.



شکل (۱۶): نمودار تاثیر تغییرات میزان ضخامت ورق بر میزان برگشت فنری

۳-۵ برگشت فنری

برگشت فنری یک پدیده‌ی رایج در شکل دهی ورق های فلزی می باشد که توسط توزیع مجدد تنش های الاستیک داخلی در ضمن باربرداری ایجاد می گردد [۱۱]. برگشت فنری به وسیله کمی به نام فاکتور برگشت فنری k_B که از نسبت زاویه خم نهایی به زاویه خم اولیه شناخته می شود. در این قسمت مقایسه مابین نتایج کار تجربی و نتایج شبیه سازی صورت گرفته است. برای بررسی این مهم ۱۰ جفت قطعه با ضخامت یکسان به اندازه ۱ میلی متر و شعاع انحنا متغیر ۵۰ و ۳۵ میلی متر مورد بررسی قرار می گیرند برای اندازه گیری این مهم زاویه اولیه در واقع همان زاویه‌ی راس فرم دهنده و زاویه‌ی نهایی به وسیله‌ی اندازه گیری زاویه‌ی سطح خارجی در نظر گرفته شده است. نتایج این مهم در شکل ۱۴ نشان داده شده است. میزان اختلاف به دست آورده شده به میزان ۸/۲ درصد می باشد.



شعاع انحنا فرم دهنده (mm)

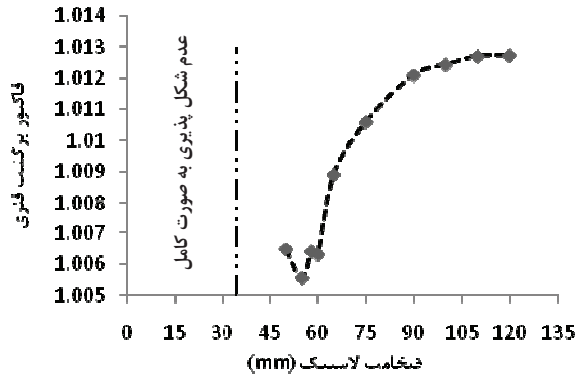
شکل (۱۴): مقایسه بین نتایج حاصل از کار تجربی با نتایج شبیه سازی عددی

۳-۵-۱۱ اثر سختی لاستیک بر میزان پدیده‌ی برگشت فنری

شکل ۱۵ نشان دهنده‌ی نمودار مربوط به تغییرات میزان برگشت فنری می باشد که به واسطه‌ی استفاده از لاستیک هایی با سختی های متفاوت به دست آمده است. داده های مورد استفاده (ثوابت مواد انعطاف پذیر) برای شبیه سازی عددی در جدول ۳ نشان داده شده است [۱۰ و ۴]. در این بررسی میزان شعاع انحنا (r) نیز متغیر در

۳-۶ تحلیل تنش - کرنش

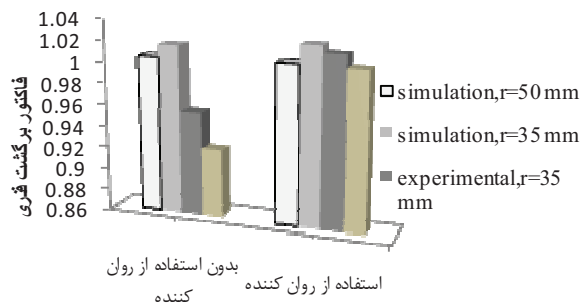
شکل ۱۹ نشان دهنده مراحل مربوط به بارگذاری ایجاد شده به روش اجزا محدود می باشد. پروسه شکل دهی در ۳ مرحله مجزا تقسیم بندی شده است. در اولین مرحله لاستیک تغییر فرم پیدا می کند. در دومین مرحله بر اثر تغییر فرمی که لاستیک پیدا می کند، ورق نیز بر اثر اعمال نیرو از طریق لاستیک شکل فرم دهنده را به خود می گیرد. این تغییر شکل تا جایی ادامه می یابد که برای جلوگیری و یا کاستن میزان برگشت فنی، ورق به صورت کامل شکل بگیرد. در آخرین مرحله ورق شکل لبه های کناری (فیلت) فرم دهنده را به خود می گیرد. به علت این که بیشترین تمرکز تنش در ورق در آخرین مرحله به وجود می آید به نظر می رسد که بیشترین میزان پیدایش عیوب اصلی در این مرحله باشد. شکل (۱۹ و ۲۰) نشان دهنده تغییرات ناشی از تنش ون مایز و همچنین تنش شعاعی در گره ای می باشد که تحت بیشترین تغییرات قرار می گیرد. در ابتدا تنش شعاعی ثابت می باشد اما پس از ۸ ثانیه در شبیه سازی شاهد رشد آن خواهیم بود و به سرعت در این ناحیه رشد می یابد. اصطکاک ناشی از سطح مابین ورق و بالشتک لاستیکی باعث متراکم ساختن تنش شعاعی شده و با فشار وارد به مواد کمک می کند که آنها به سمت فرم دهنده کشیده شوند. در ثانیه دهم نیز به دلیل تراکم ناپذیر بودن لاستیک، ورق با فرم دهنده در تماس کامل می باشد. تجزیه و تحلیل تنش کرنش باعث می شود که درک صحیحی نسبت به چگونگی تغییر شکل در فرآیند داشته باشیم.



شکل (۱۷): نمودار تاثیر تغییرات ضخامت لاستیک بر میزان برگشت فنی

۳-۵ اثر روان کننده بر میزان پدیده برگشت فنی

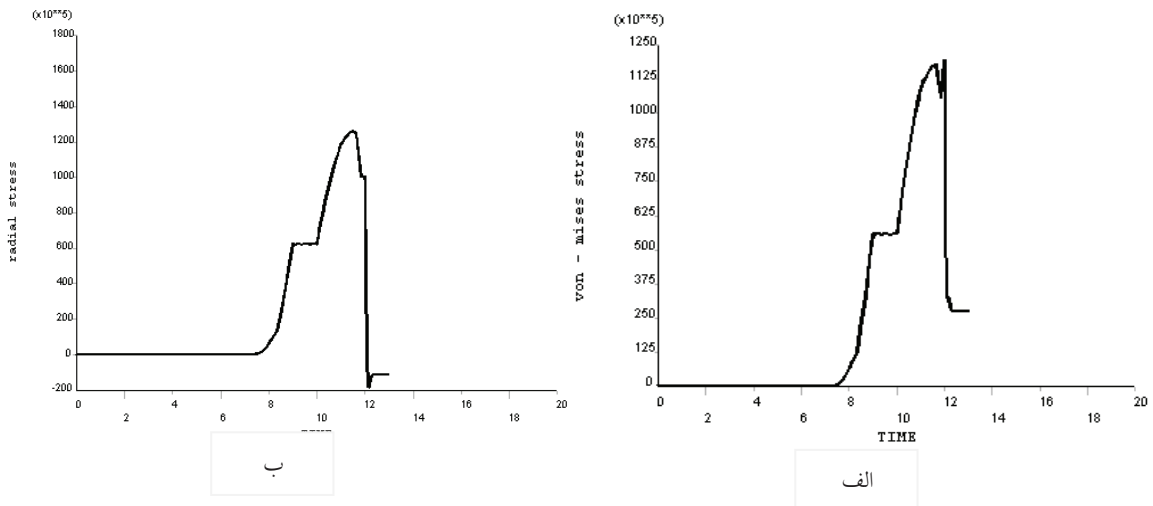
این بررسی نیز، هم به صورت کار تجربی و هم به صورت حل عددی مورد بررسی قرار گرفته شده است. نتایج حاصل از این بررسی در شکل ۱۸ نشان داده شده است. استفاده از روان کننده ها در حین فرایند شکل دهی با بالشتک لاستیکی باعث افزایش یافتن میزان برگشت فنی خواهد شد. دلیل این مهم را می توان به کاهش یافتن میزان اصطکاک ایجاد شده، بیان کرد بنابراین کاهش یافتن ضریب اصطکاک عاملی است که از تنش کششی وارد شده بر مقطع خم کاسته و بنابراین عرض باند پلاستیک کاهش می یابد.



شکل (۱۸): اثر استفاده و عدم استفاده از روان کننده بر روی میزان برگشت فنی - شعاع انحنا ۳۵ و ۵۰ میلی متر



شکل (۱۹): مراحل مربوط به بارگذاری ایجاد شده به روش اجزا محدود، ۱- تغییر فرم یافتن لاستیک ۲- شکل‌یابی ورق در اثر اعمال نیرو ۳- فرم‌یابی لبه‌های کناری ورق



شکل (۲۰): الف - توزیع تنش ون مایز ب - تنش شعاعی در حین فرم‌دهی با کمک بالشتک لاستیکی

۴- جمع‌بندی

مقایسه خطای به‌دست آمده حاصل از نتایج نتیجه می‌شود که می‌توان با تقریب خوبی از روش المان محدود برای مدل‌سازی این فرایند بر روی نمونه دارای شعاع انحنا استفاده نمود. میزان درصد خطا جهت پیش‌بینی میزان نیروی اعمال شده برابر ۶/۴ درصد به‌دست آمده است. (۲) ضریب اصطکاک یکی از پارامترهای تاثیرگذار در بهبود روند فرایند معرفی می‌گردد. در زمانی که اصطکاک مابین فرم‌دهنده و ورق افزایش می‌یابد به خمیدگی ورق کمک خواهد کرد. بنابراین با ایجاد شرایط صحیح

در این مقاله به بررسی نقش پارامترهای کلیدی در فرایند شکل‌دهی به کمک بالشتک لاستیک بر روی قطعات دارای شعاع انحنا به صورت کار تجربی و تحلیل عددی پرداخته شد نتایج نشان‌دهنده موارد زیر می‌باشد:

(۱) با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود می‌توان درک بهتری و صحیح‌تری از فرایند فرم‌دهی به‌دست آورد و با استفاده از آن می‌توان راه تاثیرگذار و ارزانی را فراهم آورد تا بتوان پارامترهای مهم فرایند را تعیین و تحلیل کرد. با

۳) با استفاده از شبیه‌سازی صورت گرفته مشخص می‌شود که برای ورق‌هایی با ضخامت کم (۰/۵ میلی‌متر) بهترین انتخاب برای در نظر گرفتن سختی لاستیک در محدوده (shore) ۵۵ تا ۷۰ قرار می‌گیرد، زیرا در این محدوده از سختی لاستیک شاهد کاهش یافتن میزان تنش ایجاد شده در نمونه فلزی خواهیم بود.

اصطکاک ما بین سطوح لاستیک - ورق و همچنین ورق و فرم‌دهنده می‌توان کیفیت نمونه تولید شده را بالا برد. ضخامت لاستیک نیز به‌عنوان یکی از پارامترهای تاثیرگذار بر روند فرایند معرفی می‌گردد. افزایش در میزان ضخامت لاستیک باعث کاهش یافتن میزان برگشت فنری و کاهش ضخامت می‌شود.

مراجع

- 1- Myuang . j , Stretch forming analysis for skin of aircraft, Aerospace,Korean, 2001.
- 2- Browne, D. J. and Battikha, E. Optimisation of aluminium sheet forming using a flexible die. J. Mater. Process
- 3- Thiruvarduchelvan. s , J. Mater. Process. Technol. 122, pp. 293– 300, 2002
- 4- Dirikolu, M. H. and Akdemir, E. Computer-aided modelling of flexible forming process. J. Mater. Process Technol.148, pp . 376–381, 2004
- 5 -Ramezani, M., Ripin, Z. M., and Ahmad, R. Computer aided modelling of friction in rubber-pad forming process .J. Mater. Process Technol.209, 2009.
- 6- Peng, L., Hu, P., Lai, X., Mei, D., and Ni, J. Investigation of micro/meso sheet soft punch stamping process—simulation and experiments. Mater, vol -30, pp. 783–790,2009
- 7- Metals handbook , ASM ,volume 14, ninth edition 1989.
- 8- Mooney, M. A theory for large elastic deformation.J. Appl. Phys,11,pp.582–597, 1940.
- 9- Theory Manual for Release 5.6, 11th Edition, ANSYS Inc , November 1999.
- 10- www.engineeringpolymers.com
- 11- Wei , G. and Wagner , R.h. Die design method for sheet springback, 1- international journal of mechanical sciences , vol- 46, pp. 1097-1113, 2004.