



Optimization of Spring-back in Bending Process of Aluminum A1050-H14 Sheet Using Hybrid of Finite Element Method and Multi-Objective Genetic Algorithm

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Pashmforoush F.^{*1} PhD,
Kazemi M.² MSc

How to cite this article

Pashmforoush F, Kazemi M. Optimization of Spring-back in Bending Process of Aluminum A1050-H14 Sheet Using Hybrid of Finite Element Method and Multi-Objective Genetic Algorithm. Modares Mechanical Engineering, 2019;19(4):919-925.

¹Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, University of Maragheh, Maragheh, Iran
²Manufacturing Engineering Department, Mechanical Engineering Faculty, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Maragheh Univesity, Daneshgah Boulevard, Madar Square, Maragheh, East Azarbaijan, Iran
Phone: +98 (41) 37278001
Fax: +98 (41) 37276060
f.pashmforoush@maragheh.ac.ir

Article History

Received: April 29, 2018
Accepted: November 18, 2018
ePublished: April 06, 2019

ABSTRACT

In sheet metal forming processes, one of the most important limitations relates to the elastic recovery after punch unloading, which usually leads to spring-back phenomenon. Production of precise parts without spring-back controlling is not possible. Hence, the main aim of the present research is to minimize the amount of spring-back as well as to prevent the crack initiation during bending process of Aluminum A1050-H14 sheet. For this purpose, firstly, the sheet metal bending process was numerically simulated in ABAQUS finite element package. Then, the effect of friction coefficient and punch velocity was investigated on elastic recovery and von Mises stress in order to minimize the spring-back as well as to prevent the crack initiation. In this regard, python programming language was utilized. Then, by linking multi-objective genetic algorithm and finite element method in modeFRONTIER software, the optimum values of the process parameters were determined. It should be mentioned that for validation purposes, the simulation results of the present study were compared with the experimental data available in literature, showing a 3.14% relative error between the numerical and experimental results.

Keywords Bending; Spring-back; Multi-objective Genetic Algorithm; Finite Element Method; Crack Initiation

CITATION LINKS

[1] The investigation of springback of UFG commercially pure ... [2] Size effect affected springback in micro/meso scale bending ... [3] Simulation and experimental study of severe plastic deformation ... [4] Finite element simulation of the influence of fretting ... [5] Finite element analysis of springback in L-bending ... [6] Development of anew spring-back factor for a wiping ... [7] Experimental determination of spring back and thinning effect of aluminum ... [8] Experimental approach and RSM procedure on the examination ... [9] Prediction of springback in wipe-bending process of ... [10] Springback simulation of advanced high strength ... [11] Optimization of springback in L-bending process using ... [12] Optimization of springback for AZ31 magnesium alloy ... [13] Time dependent springback of a ... [14] Development and application of sheet-forming ... [15] A hybrid membrane/shell method for calculating springback of anisotropic ... [16] Springback analysis for sheet forming processes ... [17] Numerical and experimental investigations on the springback ... [18] Springback behavior of AA6082T6 tubes in three-point ... [19] Aluminum and aluminum ... [20] Multi-objective optimization of sheet metal ... [21] Effect of punch speed on amount of springback ... [22] Springback prediction of sheet metals using improved ... [23] Effect of punch speed on the formability behavior of austenitic ... [24] Effects of temperature, forming speed and stress relaxation on springback ... [25] Finite element analysis of sheet metal bending ... [26] FE-analysis of channel width effects on spring-back ... [27] Comparison of spring-back characteristics in symmetrical ... [28] Genetic algorithms: Concepts, design for optimization ... [29] Crossover versus mutation: A comparative analysis of the evolutionary strategy of genetic algorithms ... [30] Parameter selection in genetic ...

بهینه‌سازی بازگشت فنی در فرآیند خمکاری ورق آلومینیومی A1050-H14 با ترکیب روش المان محدود و الگوریتم ژنتیک چندهدفه

فرزاد پشم‌فروش* PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

مهدی کاظمی MSc

گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

در فرآیندهای شکل‌دهی ورق، یکی از مهم‌ترین محدودیت‌ها، برگشت کشسان ورق بعد از برداشتن نیرو است که معمولاً منجر به پدیده بازگشت فنی می‌شود. در صورت کنترل‌نشدن این پارامتر، تولید محصولات دقیق امکان‌پذیر نخواهد بود. لذا هدف اصلی این تحقیق، کمینه‌کردن میزان بازگشت فنی همراه با جلوگیری از جوانه‌زنی ترک در فرآیند خمکاری یک‌طرفه ورق آلومینیومی A1050-H14 است. بدین منظور، ابتدا فرآیند خمکاری ورق در نرم‌افزار المان محدود آباکوس شبیه‌سازی شد و تاثیر پارامترهای ضریب اصطکاک بین سنبه و ورق و سرعت پایین‌آمدن سنبه بر میزان بازگشت کشسان ورق و همچنین بر میزان تنش فون میزز ایجادشده در ورق بررسی شد تا ضمن کمینه‌کردن میزان بازگشت فنی، از جوانه‌زنی ترک هم جلوگیری شود. در این راستا، از زبان برنامه‌نویسی پایتون استفاده شد. سپس با ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک چندهدفه با روش المان محدود در نرم‌افزار مود فرانتیر، مقادیر بهینه پارامترهای ورودی محاسبه شد. شایان ذکر است که به‌منظور اعتبارسنجی نتایج، نتایج شبیه‌سازی این تحقیق با نتایج تجربی سایر محققان مورد مقایسه قرار گرفت که درصد خطای نسبی بین نتایج عددی و تجربی برابر با ۳/۱۴٪ بود.

کلیدواژه‌ها: فرآیند خمکاری، بازگشت فنی، الگوریتم ژنتیک چندهدفه، روش المان محدود، جوانه‌زنی ترک

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۲۷

*نویسنده مسئول: f.pashmforoush@maragheh.ac.ir

۱- مقدمه

در فرآیندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی، یکی از عوامل بسیار موثر بر کیفیت و دقت قطعات تولیدی، پدیده برگشت فنی است. این پدیده بیانگر تغییر شکل ورق پس از باربرداری و رهاشدن ورق از نیروی پرس است. پدیده برگشت فنی دستیابی به دقت ابعادی بالا را ناممکن می‌سازد و باعث ایجاد مشکلات زیادی در مونتاژ قطعات تولیدی می‌شود. بنابراین در فرآیندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی، پیش‌بینی میزان برگشت فنی برای تولید قطعات با دقت بالا ضروری است [1, 2].

خمکاری ورق‌های فلزی یکی از فرآیندهای اساسی و رایج در صنعت ساخت قطعات فلزی و تبدیل ورق‌های فلزی به اشکال انحنادار است. یکی از رایج‌ترین فرآیندهای خمکاری، خمکاری یک‌طرفه است که در این فرآیند، ورق بین ماتریس و ورق‌گیر بسته می‌شود. سنبه متحرک، ورق را پرس و حول شعاع ماتریس را خم می‌کند. این فرآیند با نام خمکاری L- شکل نیز شناخته می‌شود. مشخص‌ترین مزیت این فرآیند، طراحی و ساخت ماتریس آسان است و به مهارت بالایی نیاز ندارد. اگر چه، برای طراحی مناسب ماتریس به‌منظور ساخت قطعات خم دقیق، مقدار برگشت فنی باید کنترل شود.

استفاده از روش‌های آزمایشگاهی در بررسی و ارزیابی پدیده برگشت فنی بسیار پرهزینه، دشوار و زمان‌بر است. در نتیجه استفاده از روش‌های عددی برای بررسی پدیده برگشت فنی نسبت به روش‌های تحلیلی و تجربی مناسب‌تر است. با بررسی تحقیقات

انجام‌گرفته پیرامون برگشت فنی به‌خوبی می‌توان دریافت که میان روش‌های عددی، روش اجزای محدود نقش عمده‌ای در مطالعه مسایل مربوط به برگشت فنی داشته است. در دهه‌های اخیر، پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای در زمینه شبیه‌سازی اجزای محدود انواع فرآیندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی انجام شده است [3, 4]. همچنین تحقیقات متعددی روی افزایش کیفیت قطعات خم L- شکل به‌صورت تجربی یا تحلیل المان محدود صورت گرفته است. تاثیر شعاع ماتریس و همچنین مقدار لقی بین سنبه و ماتریس روی برگشت فنی در فرآیند خمکاری مواد مختلف از قبیل آلیاژهای آلومینیوم [5-7]، ورق‌های استحکام بالای کم‌آلیاژ [8-10]، فولادهای زنگ‌نزن [11] و آلیاژهای منیزیم [12, 13] مورد مطالعه قرار گرفته است. از سوی دیگر، ژو و همکاران [14] به‌منظور کاهش زمان محاسبات روشی به‌نام EBG ابداع کردند. در این روش از المان غشایی برای محاسبه مقدار برگشت فنی استفاده شده است. در ادامه فعالیت‌های فوق، پورقراط و همکاران [15] از روش هیبریدی با المان‌های غشایی و پوسته‌ای برای محاسبه برگشت فنی در فرآیندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی تحت بار متقارن محوری استفاده کردند. لی و همکاران [16] برای محاسبه برگشت فنی از مدل اجزای محدود با حل‌کننده دینامیکی استفاده کردند. همچنین آنها با استفاده از تحلیل رگرسیون، یک رابطه ریاضی بین برگشت فنی و پارامترهای طراحی (شعاع ماتریس، ضخامت ورق و لقی بین سنبه و ماتریس) ارائه دادند. مرتین و هیرت [17] دقت و قابلیت اطمینان روش المان محدود را در محاسبه برگشت فنی در فرآیند خمکاری قطعات صنعتی مورد مطالعه قرار دادند. براساس نتایج آنها، روش المان محدود با دقت بالایی قادر به پیش‌بینی هندسه قطعات خمکاری با در نظر گرفتن پدیده بازگشت فنی است. مشابه این تحقیق توسط سوف/وغل و همکاران [18] در فرآیند خمکاری سه نقطه صورت پذیرفته است. مقایسه نتایج تجربی و عددی آنها بیانگر دقت بالای روش المان محدود در محاسبه میزان برگشت فنی در فرآیند خمکاری است.

با توجه به این که تمرکز اکثر مقاله‌های اخیر روی بهینه‌سازی شعاع ماتریس به‌صورت تک‌هدفه بوده و تاثیر پارامترهای موثر دیگر مانند سرعت سنبه و ضریب اصطکاک بین سطح سنبه و ورق کمتر مورد بررسی قرار گرفته است، به همین دلیل در این پژوهش، بهینه‌سازی به‌صورت چندهدفه مورد مطالعه قرار گرفته و به‌عنوان یک روش جدید، توسط کد نویسی با زبان پایتون در نرم‌افزار آباکوس، برگشت فنی همراه با جلوگیری از جوانه‌زنی ترک مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین با ترکیب راه‌حل پارتو و الگوریتم چندهدفه ژنتیک، اقدام به بهینه‌سازی سرعت سنبه و ضریب اصطکاک بین سنبه و ورق شده است. جنس ورق مورد مطالعه در این پژوهش آلومینیوم A1050-H14 است.

۲- مدل بهینه‌سازی چندهدفه

در این تحقیق، دو تابع هدف برای بهینه‌سازی در الگوریتم ژنتیک تعریف شده است. تابع هدف اول، تابعی است که میزان برگشت فنی را نشان می‌دهد. به‌منظور این که بتوان تابعی تعریف کرد که در نرم‌افزار مود فرانتیر قابل اعمال باشد و از طرفی مقدار واقعی برگشت فنی را به‌شکل واضح نشان دهد، تابع هدف برای نشان‌دادن میزان برگشت فنی به‌شکل معادله ۱ تعریف شده است.

$$F(x) = U_{mag1} - U_{mag2} \quad (1)$$

U_{mag1} : مقدار جابه‌جایی گره مربوط به گوشه بالایی ورق در انتهای مرحله پایین‌آمدن سنبه

است. یکی از راه‌حل‌های بهینه‌سازی برای این مسایل چندهدفه، راه‌حل پارتو [20] است که در قسمت ۳-۱ تشریح می‌شود.

۳-۱- راه‌حل پارتو

در مسایل چندهدفه به جواب امکان‌پذیر (x^*) ، پارتو یا کارا می‌گویند اگر:

$$f_i(x) \leq f_i(x^*) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

و برای حداقل یک j ، رابطه زیر برقرار باشد:

$$f_j(x) < f_j(x^*) \quad 1 \leq j \leq n \quad (4)$$

به‌عنوان مثال، برای یک تابع دوهدفه که هر یک از هدف‌ها به یک محور مختصات اختصاص دارند و هدف مینیمم‌کردن هر دو تابع هدف به‌طور همزمان باشد و توابع هدف با هم متضاد باشند، راه‌حل پارتو یک راه عملی برای سازش توابع هدف است.

۳-۲- مراحل بهینه‌سازی چندهدفه ژنتیک

هدف از بهینه‌سازی چندهدفه، یافتن مجموعه جواب‌های پارتو (نامغلوب) در مساله مورد نظر است. دو اصل مهم برای بهینه‌سازی با چند تابع هدف وجود دارد. اولی، هدایت مسیر جست‌وجو در راستای رسیدن به منحنی جواب‌های بهینه پارتو و دومی، حفظ و تولید جواب‌های بهینه در طول جمعیت جواب‌ها است که بر پایه این دو اصل، الگوریتم ژنتیک مراحل زیر را انجام می‌دهد:

- گام ۱: کدگذاری اهداف یا توابع بهینه‌سازی (متغیرهای تعریف‌شده به یک سری کد باینری دودویی تبدیل می‌شود).
- گام ۲: تعریف توابع برازندگی یا معیار انتخاب
- گام ۳: تولید جمعیت اولیه (معمولاً به‌صورت تصادفی ایجاد می‌شود).

گام ۴: ارزیابی که برازش هر یک از افراد نمونه به دست آورده می‌شود. (در مرحله اول، برای همه افراد جامعه عدد برازش یک تنظیم می‌شود. مرحله دوم، ارزیابی تمامی نمونه‌ها با یکی از توابع هدف و پیدا کردن نمونه‌هایی است که تابع هدف را بهینه می‌کنند. مرحله سوم، تغییر عدد برازش این داده‌ها تا سه مرحله و نهایتاً به‌دست آوردن ضریب پارتو هر نمونه است).

- گام ۵: دسته‌بندی افراد متناسب با ضریب برازش آنها
- گام ۶: ادغام و جهش (در هر یک از دسته‌های موجود، عملیات ادغام و جهش صورت می‌گیرد و فرزند تولیدشده جایگزین والد(ها) می‌شود).
- گام ۷: افراد جدید در یک دسته جمع می‌شوند.
- گام ۸: ارزیابی مجدد

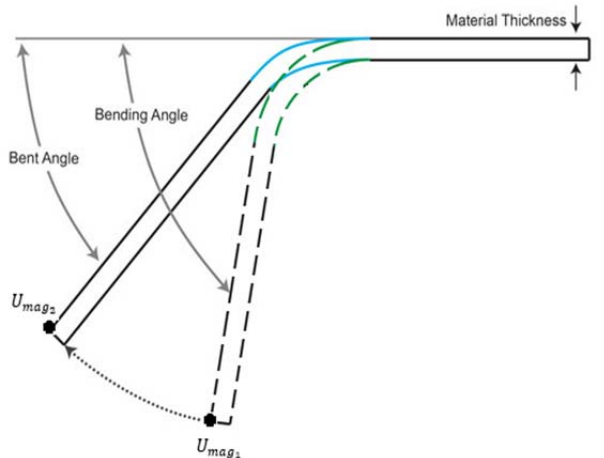
گام ۹: انتخاب نیمی از افراد که تناسب بالایی دارند.

گام ۱۰: توقف الگوریتم: در صورتی که شرایط توقف تعریف‌شده برای الگوریتم برقرار باشد، الگوریتم خاتمه می‌یابد، در غیر این صورت به گام ۴ باز می‌گردد [20].

با توجه به این که استفاده از نرم‌افزار مود فرانتیر، سرعت عملیات مربوط به تعویض پارامترهای ورودی در نرم‌افزار آباکوس (براساس مقادیر به‌دست‌آمده از الگوریتم ژنتیک برای این پارامترها) و اجرای دوباره تحلیل المان محدود را به‌طور قابل ملاحظه‌ای تسریع می‌بخشد، بنابراین استراتژی بهینه‌سازی بدین صورت است که روی تمامی افراد در تمامی نسل‌های تولیدشده توسط الگوریتم ژنتیک، تحلیل المان محدود با لینک شدن نرم‌افزارهای مود فرانتیر و آباکوس به‌صورت مستقیم و بدون دخالت اپراتور در تنظیم پارامترها انجام می‌گیرد. در این پژوهش، پارامترهای ورودی، سرعت سنبه و ضریب اصطکاک بین سنبه و ورق هستند که بازه تغییر سرعت سنبه بین ۰/۱ تا ۵ متر بر ثانیه و بازه تغییر ضریب

U_{mag2} : مقدار جابه‌جایی گره مربوط به گوشه بالایی ورق در انتهای مرحله بالارفتن سنبه.

مطابق با شکل ۱ می‌توان میزان تغییر در مقدار جابه‌جایی گره گوشه سمت راست را معرف میزان برگشت فنری در نظر گرفت. در این شکل خط‌چین‌ها، وضعیت ورق را قبل از برگشت فنری نشان می‌دهد. شایان ذکر است که برگشت فنری را معمولاً با زاویه نشان می‌دهند که تابع هدف ارایه‌شده در این مقاله (تفاضل جابه‌جایی گره انتهایی) متناسب با سینوس زاویه برگشت فنری است. در صورت نیاز می‌توان با تقسیم مقدار تابع هدف به طول قسمت خم ورق و اعمال تابع $Arcsin$ ، مقدار زاویه برگشت را محاسبه کرد.



شکل ۱) مشخصات برگشت فنری

تابع هدف دوم، مربوط به آستانه جوانه‌زنی ترک است. معمولاً برای بررسی جوانه‌زنی ترک برای مواد ترد، از معیار رانکین استفاده می‌شود که طبق این معیار وقتی تنش اصلی اول با استحکام کششی ماده برابر شود، به منزله شروع جوانه‌زنی ترک است. در حالی که برای مواد داکتیل، به جای تنش اصلی اول از تنش فونمیزز یا ترسکا استفاده می‌شود که در این تحقیق از تنش فونمیزز استفاده شده، به‌طوری که وقتی مقدار تنش فونمیزز برابر استحکام کششی باشد، به منزله شروع جوانه‌زنی ترک است. شایان ذکر بوده که مراحل پایانی شکست که شامل رشد ترک (براساس انرژی ویژه شکست و چقرمگی شکست) بوده، در این مطالعه مورد بررسی قرار نگرفته است.

با توجه به این که تنش مربوط به آستانه جوانه‌زنی ترک در آلومینیوم A1050-H14 برابر با ۲۰۰ مگاپاسکال [19] است، بنابراین تابع هدف دوم باید به‌گونه‌ای تعریف شود که میزان ماکزیمم تنش به‌وجودآمده در کل ورق آلومینیومی را نشان دهد. البته باید اشاره نمود که مقادیر تنش‌ها در محل خم‌شدن زیاد بوده، ولی به‌منظور بررسی دقیق‌تر، مقادیر تنش‌ها در کل ورق بررسی شده است. پس تابع هدف دوم به‌صورت معادله ۲ تعریف می‌شود:

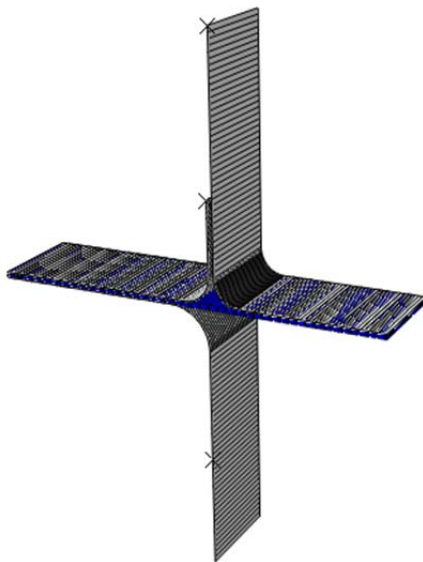
$$G(X) = \text{Max} \{S_i\} \quad (2)$$

که در این رابطه، S تنش فونمیزز و i شماره گره‌ها است.

۳- الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه

به‌طور کلی در علم مکانیک، مسایل متعددی به‌صورت چندهدفه هستند و در صورتی که هر کدام از توابع هدف با یکدیگر ناسازگاری داشته باشند، مینیمم یا ماکزیمم‌کردن تابع هدف کلی، مشکل

تصحیح می‌کند تا کیفیت المان‌ها (هم از لحاظ عوض شدن زوایا و هم نسبت اضلاع المان) حفظ شود. در این تحقیق، با انجام چند شبیه‌سازی اولیه، فرکانس اعمال مش‌بندی تطبیقی برابر با ۵ انتخاب شد. یعنی نرم‌افزار از هر ۵ نمو اقدام به مش‌بندی تطبیقی می‌کند. در مورد شرایط مرزی نیز باید اشاره نمود که تمام درجات آزادی ورق‌گیر و ماتریس (که در شکل ۳ نشان داده شده‌اند)، به‌طور کامل صلب شده است (هم برای حرکت خطی و حرکت دورانی). لذا ورق‌گیر و ماتریس کاملاً مقید شده‌اند. درجات آزادی سنبه نیز در تمامی جهات به‌جز در راستای محور عمودی که راستای حرکتش بوده، صلب شده است. ورق نیز از قسمتی که با ورق‌گیر در تماس بوده، صلب شده، ولی قسمتی که در فرآیند خمکاری دچار تغییر شکل می‌شود، آزاد است. تماس بین ورق و ورق‌گیر، ورق و ماتریس و ورق با سنبه نیز از نوع سطح به سطح بوده که با استفاده از روش پنالتی و ضریب اصطکاک اولیه ۰/۱ تعریف شده است. البته ضریب اصطکاک بین ورق و سنبه به‌صورت متغیر در نظر گرفته شده که بازه تغییرات آن بین ۰/۱ تا ۰/۵ است.



شکل ۳) قالب مونتاژ شده

جدول ۱) شرایط شبیه‌سازی المان محدود

نوع المان	المان مستطیلی: ۳۵۰۰ المان
مشخصات جنس ورق آلومینیومی H14 A1050 - [6]	مدول الاستیسیته (E): ۶۹۰۰۰ مگا پاسکال نسبت پواسون: ۰/۳۳
معادله منحنی سیلان ماده [6]	$\sigma = 144.18 \epsilon^{0.095} + 89.38$
هندسه ورق اولیه	طول (L): ۸۰ میلی‌متر عرض (W): ۳۰ میلی‌متر ضخامت (t): ۱ میلی‌متر
هندسه قالب	شعاع ماتریس: ۸ میلی‌متر شعاع سنبه: ۵ میلی‌متر
زاویه خم	۹۰ درجه

۵- مدل بهینه‌سازی در نرم‌افزار مود فرانتیر

نرم‌افزار مود فرانتیر یک نرم‌افزار بهینه‌ساز است که توانایی لینک‌کردن نرم‌افزارهای مختلف مهندسی (آباکوس، سالیدورکز، متلب و غیره) را دارد. این نرم‌افزار، روش‌های متعدد بهینه‌سازی برای حل مسایل گوناگون را پشتیبانی می‌کند که در پژوهش حاضر از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ژنتیک استفاده شده است. هر الگوریتم بهینه‌سازی شامل تعدادی ورودی، توابع هدف و تعدادی

اصطکاک بین ۰/۱ تا ۰/۵ است. هر دو متغیر به حالت پیوسته در بازه مربوطه تغییر می‌کنند.

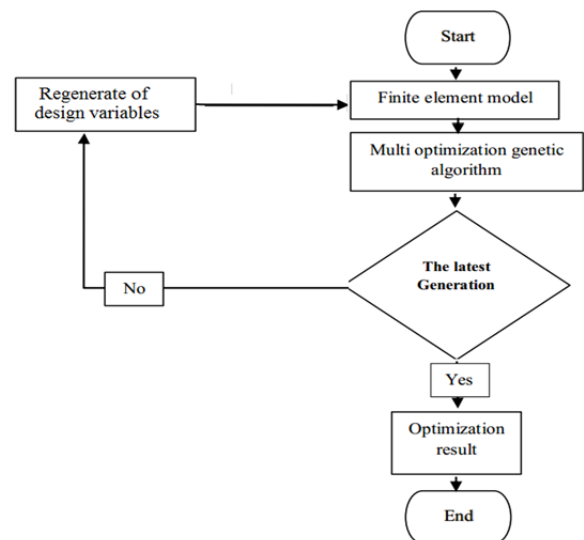
مقادیر (بازه تغییرات) ضریب اصطکاک و سرعت سنبه با مطالعه مقالات مرتبط [6, 21-24] و همچنین انجام چند شبیه‌سازی اولیه در نرم‌افزار آباکوس تعیین شده است.

روند کلی این پژوهش در شکل ۲ نشان داده شده که شامل مراحل زیر است:

مرحله ۱: مدل‌سازی اولیه المان محدود در نرم‌افزار آباکوس

مرحله ۲: مشخص کردن پارامترهای ورودی با کدنویسی به زبان پایتون در نرم‌افزار آباکوس

مرحله ۳: بهینه‌سازی به روش الگوریتم چندهدفه ژنتیک، بدین منظور که مقادیر تنش فون میزز ماکزیمم و میزان برگشت فنی حداقل شود.



شکل ۲) مسیر کلی تحقیق

۴- شبیه‌سازی المان محدود

در این پژوهش برای تحلیل المان محدود از نرم‌افزار تجاری آباکوس استفاده شده است. در جدول ۱، مشخصات ورق مورد استفاده در این تحلیل آورده شده است [6]. برای شبیه‌سازی فرآیند خمکاری، ورق به‌صورت شکل‌پذیر و بقیه اعضا به‌صورت اجسام صلب تعریف شده است. رفتار مکانیکی ماده ورق به‌صورت الاستو-پلاستیک تعریف شده که منحنی سیلان آن در جدول ۱ نوشته شده است. از آنجایی که فرآیند شکل‌دهی در دمای محیط شبیه‌سازی شده، از تاثیرات نرخ کرنش صرف نظر شده، چرا که براساس نتایج سایر محققان، تاثیرات نرخ کرنش بیشتر در دماهای بالا مشهود است [5, 25-27].

در شکل ۳، قالب مونتاژی (سنبه و ماتریس) مشاهده می‌شود. مشخصات مش مورد استفاده برای ورق نیز در جدول ۱ نوشته شده است. به‌منظور جلوگیری از واگرایی محاسبات در اثر کرنش بیش از حد المان‌ها، از تکنیک مش‌بندی تطبیقی استفاده شده است. از تکنیک مش‌بندی تطبیقی معمولاً در تحلیل‌های غیرخطی برای بهبود کیفیت المان‌ها استفاده می‌شود. به‌طور مثال حین انجام فرآیند شکل‌دهی در اثر کرنش‌های زیاد، المان‌ها دچار تغییر شکل بیش از حد می‌شوند که منجر به واگرایی جواب‌ها و گاهی بروز خطا در انجام تحلیل می‌شود. برای رفع این مشکل، مش‌بندی تطبیقی، المان‌ها را حین تحلیل به‌طور پیوسته (البته در بازه‌های منظمی)



شکل ۴) نتایج شبیه‌سازی المان محدود در نرم‌افزار آباکوس

در نمودار ۱ نیز نتایج حاصل از ترکیب همزمان الگوریتم ژنتیک چندهدفه و روش المان محدود به صورت یک نمودار حبابی نشان داده شده است. نمودار حبابی شبیه نمودار پراکندگی است که برای تشریح رابطه بین سه متغیر (داده‌های سه مولفه‌ای) مورد استفاده قرار می‌گیرد و مختصات هر حباب، مقدار مولفه‌های اول و دوم را نشان می‌دهد و اندازه حباب نیز مولفه سوم را مشخص می‌کند. همان طور که اشاره شد، نمودار ۱ نتایج حاصل از ترکیب الگوریتم ژنتیک و روش المان محدود را نشان می‌دهد. بدین صورت که الگوریتم ژنتیک، آزمایش‌ها را با مقادیر مختلف پارامترها برای نسل اول اجرا می‌کند و نتایج آزمایش‌ها را از نرم‌افزار المان محدود می‌گیرد و براساس آنها، نسل دوم را ایجاد می‌کند و دوباره آزمایش‌ها را به نرم‌افزار ارسال می‌کند و نتایج را می‌گیرد و همین روند را تکرار می‌کند. نمودار ۱ نشان می‌دهد با توجه به این که تراکم آزمایش‌ها در محدوده سیاه‌شده بیشتر است، به این نتیجه می‌رسیم که وقتی سرعت سنبه برابر با ۲/۸۴ میلی‌متر بر ثانیه، ضریب اصطکاک ۰/۱۵۷ و زاویه نهایی خم ۸۹ درجه باشد، جواب بهینه برای توابع هدف خواهیم داشت. پس به طور خلاصه می‌توان گفت آزمایش شماره ۹۱۹ که توسط نرم‌افزار مود فرانتیر در آباکوس اجرا شده است، کمترین میزان برگشت فنری را دارد. در این آزمایش مقدار ضریب اصطکاک برابر با ۰/۱۵۷ و سرعت پایین آمدن سنبه ۲/۸۴ میلی‌متر بر ثانیه است که این مقادیر، شرایط بهینه فرآیند خمکاری هستند و منجر به کمترین مقدار برگشت فنری (برابر با ۰/۵۵ درجه) شده‌اند. شایان ذکر است که در نمودار ۱، فقط نتایج آزمایش‌هایی که منجر به تنش فونمیز کمتر از ۲۰۰ مگاپاسکال (آستانه جوانه‌زنی ترک) شده‌اند، نشان داده شده است.

در مورد مقدار بهینه ضریب اصطکاک باید گفت که مقدار ضریب اصطکاک به شرایط روغن‌کاری و جنس ورق و سنبه بستگی دارد که با اعمال روغن‌کاری مناسب و انتخاب جنس مناسب برای سنبه می‌توان به عدد بهینه مورد نظر (۰/۱۵۷) یا نزدیک به آن (۰/۱۵) رسید.

در نمودار ۲، مقدار حداکثر تنش فونمیز بر حسب سرعت سنبه نشان داده شده است. همان طور که در نمودار مشاهده می‌شود، الگوریتم ژنتیک بعد از تعدادی آزمایش، تشخیص داده است که

خروجی و قیدها است که متناسب با شرایط مساله انتخاب و تنظیم می‌شوند. نرم‌افزار مود فرانتیر نیز شامل یک سری گره‌ها برای انتخاب تمامی پارامترها است که در محیط کاربری آن، توسط کاربر، طراحی و نهایتاً خروجی‌های مد نظر کاربر استخراج می‌شود.

متغیرهای ورودی در این تحقیق، ضریب اصطکاک بین سنبه و ورق و سرعت پایین آمدن سنبه است. حداقل کردن برگشت فنری و تنش فونمیز ایجاد شده نیز به عنوان توابع هدف تعریف می‌شود که قیدها روی توابع هدف اعمال می‌شوند. در جدول ۲ سایر پارامترهای الگوریتم ژنتیک و تنظیمات نرم‌افزار آورده شده است. شایان ذکر است که مقادیر پارامترهای تنظیمی الگوریتم ژنتیک با مطالعه مقالاتی که به بررسی تاثیر این پارامترها پرداخته‌اند [28-30] و همچنین روش سعی و خطا و انجام چند تست اولیه توسط نویسندگان مقاله انتخاب شده است.

جدول ۲) پارامترهای ورودی الگوریتم ژنتیک

تعداد نسل	احتمال تقاطع	احتمال انتخاب	احتمال جهش	جمعیت اولیه
۴۰	۰/۵	۰/۰۵	۰/۱	۲۵

۶- نتایج

به منظور بررسی صحت مدل المان محدود تحقیق حاضر، ابتدا اعتبارسنجی‌های لازم صورت پذیرفت. بدین منظور، نتایج حاصل از پژوهش حاضر با نتایج پژوهش فانتونگ و دیپراکماس [6] مقایسه شد که در سال ۲۰۱۶ روی کنترل مقدار برگشت فنری ورق در فرآیند خمکاری یک طرفه صورت گرفته بود. آنها شعاع ماتریس را به عنوان متغیر ورودی در نظر گرفته و تاثیر آن را روی میزان برگشت فنری ورق بررسی کردند. در پژوهش آنها، شعاع بهینه ماتریس ۸ میلی‌متر بوده است که با این شعاع ایجاد شده، مقدار زاویه خم تولید شده برابر با ۹۲/۲۳ درجه بود (مقدار برگشت فنری: ۲/۲۳). آنها در تحقیق خود، مقدار ضریب اصطکاک بین سنبه و ورق را برابر با ۰/۱ در نظر گرفتند. در تحقیق حاضر، در راستای تکمیل کار فانتونگ و دیپراکماس [6]، مقدار ضریب اصطکاک و سرعت سنبه نیز بهینه‌سازی شده است. نتایج حاصل از بهینه‌سازی تحقیق حاضر و مقایسه آن با نتایج فانتونگ و دیپراکماس [6] در جدول ۳ خلاصه شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود، درصد خطای نسبی بین نتایج به دست آمده برابر با ۳/۱۴٪ است.

در شکل ۴، نتایج شبیه‌سازی فرآیند خمکاری در نرم‌افزار آباکوس در حالت بهینه نشان داده شده است. در این شکل، وضعیت نهایی ورق بعد از بازگشت سنبه و وقوع پدیده برگشت فنری به تصویر کشیده شده است. همان طور که قبلاً نیز اشاره شد، زاویه خمکاری در این تحقیق برابر با ۹۰ درجه بوده، ولی در شکل ۴ (که نتیجه یکی از تحلیل‌های المان محدود را نشان می‌دهد)، زاویه نهایی ورق بیشتر از ۹۰ درجه شده، یعنی ورق به طور اسمی ۹۰ درجه خم شد، ولی به دلیل وقوع برگشت فنری و خاصیت کشسان ورق، زاویه نهایی خم بزرگ‌تر از ۹۰ درجه است که اختلاف این زاویه با ۹۰، میزان برگشت فنری را نشان می‌دهد و این مقدار برای حالت بهینه در جدول ۳ نوشته شده است.

جدول ۳) مقادیر بهینه برگشت فنری

منبع	روش المان محدود	ترکیب المان محدود و الگوریتم ژنتیک چندهدفه
مرجع [6]	۲/۲۳ درجه	بررسی نشده
تحقیق حاضر	۲/۱۶ درجه	۰/۵۵ درجه
درصد خطای نسبی	۳/۱۴٪	-

جدول ۴) آزمایش‌های با کمترین مقدار برگشت فنری

شماره آزمایش	ضریب اصطکاک	سرعت سنبه (میلی‌متر بر ثانیه)	تنش فون میزز حداکثر (پاسکال)	برگشت فنری (درجه)
۹۱۹	۰/۱۵۷	۲/۸۴	۱۷۰/۵۲	۰/۵۵
۴۸۶	۰/۲۱۸	۲/۶۸	۱۶۸/۵۳	۰/۵۹
۳۸۴	۰/۱۲۴	۲/۷۰	۱۳۳/۵۳	۰/۶۴
۶۵۹	۰/۱۳۹	۲/۶۱	۱۵۳/۷۵	۰/۶۸
۳۶۳	۰/۱۳۹	۲/۶۶	۱۳۱/۴۰	۰/۷۱
۹۱۱	۰/۱۲۱	۲/۶۴	۱۳۰/۴۸	۰/۷۲
۳۶۶	۰/۲۴۵	۲/۶۶	۱۴۵/۵۶	۰/۷۴
۸۲۴	۰/۱۸۱	۲/۶۸	۱۴۳/۴۷	۰/۷۶
۵۴۹	۰/۲۵۱	۲/۶۹	۱۶۴/۲۲	۰/۷۹
۲۹۱	۰/۱۷۷	۲/۵۹	۱۶۱/۵۷	۰/۸۱

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تلاش شد به کمک الگوریتم چندهدفه ژنتیک، ضریب اصطکاک بین ورق و سنبه و همچنین سرعت پایین آمدن سنبه در فرآیند خمکاری، ورق آلومینیومی A1050-H14 بهینه‌سازی شود. ابتدا مدل المان محدود فرآیند خمکاری ورق در نرم‌افزار آباکوس، شبیه‌سازی و سپس تاثیر دو پارامتر مذکور روی مقدار برگشت فنری و تنش آستانه جوانه‌زنی ترک بررسی شد. در نهایت، این دو پارامتر به منظور حداقل کردن مقدار برگشت فنری و اجتناب از رسیدن تنش فون میزز به آستانه جوانه‌زنی ترک، در نرم‌افزار مود فرانتیر بهینه شد. اعتبارسنجی این پژوهش نیز با نتایج پژوهش فانتیوانگ و دیپیرکاماس^[6] صورت گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش به شکل زیر خلاصه می‌شود:

- ۱- به ازای ضریب اصطکاک ۰/۱۵۷ بین سنبه و ورق، میزان برگشت فنری حداقل خواهد بود.
- ۲- زمانی که سرعت پایین آمدن سنبه ۲/۸۴ میلی‌متر بر ثانیه باشد، برگشت فنری حداقل می‌شود.
- ۳- در شرایط موجود در نقطه بهینه کلی ($f_s=0.157$ & $V=2.84$) میزان برگشت فنری ۰/۵۵ درجه بوده و حداکثر تنش فون میزز ایجاد شده در ورق برابر با ۱۷۰/۵۲ مگاپاسکال بوده که از آستانه جوانه‌زنی ترک دور است.

تشکر و قدردانی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری (به طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده است. همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است. ضمناً محتویات علمی مقاله حاصل فعالیت علمی نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج بر عهده نویسندگان است.

تاییدیه اخلاقی: مقاله حاضر هیچ گونه تعارض منافی با سازمان‌ها و اشخاص دیگر ندارد.

تعارض منافع: مقاله حاضر هیچ گونه تعارض منافی با سازمان‌ها و اشخاص دیگر ندارد.

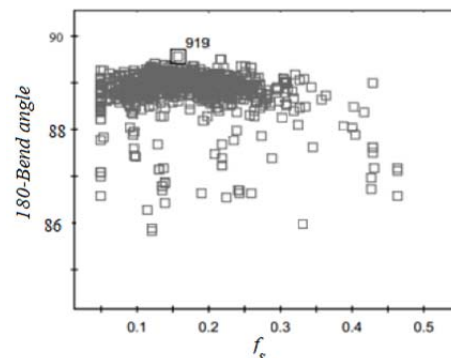
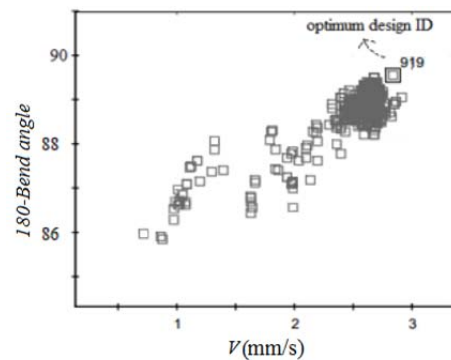
سهم نویسندگان: فرزاد پشم‌فروش (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ مهدی کاظمی (نویسنده دوم)، روش شناس/تحلیلگر آماری (۵۰٪)

منابع مالی: توسط نویسندگان مقاله تأمین شده است.

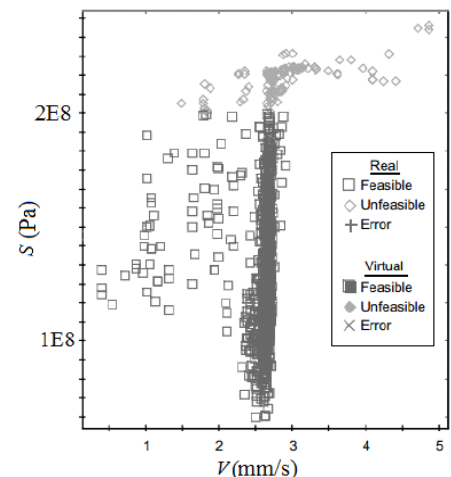
منابع

1- Nasaeri R, Kadkhodayan M, Shariati M. The investigation of springback of UFG commercially pure titanium in three-point bending test. Modares Mechanical Engineering. 2017;16(11):266-276. [Persian]

با افزایش سرعت سنبه تا ۲/۹ میلی‌متر بر ثانیه، مقدار برگشت فنری کم می‌شود. زیرا تراکم آزمایش‌ها به سمت این مقدار رفته است، ولی با افزایش سرعت سنبه از ۲/۹ میلی‌متر بر ثانیه به بعد آزمایش‌ها نشدنی شده‌اند. به عبارتی، آزمایش‌هایی که سرعت بیشتر از ۲/۹ میلی‌متر بر ثانیه دارند، در بالای خط ۲۰۰ مگاپاسکال قرار گرفته‌اند و از آستانه جوانه‌زنی ترک عبور کرده‌اند که این آزمایش‌ها نشدنی هستند. لذا الگوریتم ژنتیک بیشتر آزمایش‌ها را در بازه سرعت ۲/۶ تا ۲/۹ میلی‌متر بر ثانیه و با ضرایب اصطکاک متفاوت طراحی و اجرا کرده است. از بین آزمایش‌هایی که به آستانه جوانه‌زنی ترک نرسیده‌اند، ۱۰ آزمایشی که کمترین میزان برگشت فنری را داشته و از آستانه جوانه‌زنی ترک تجاوز نکرده‌اند، در جدول ۴ نشان داده شده است. همان طور که قبلاً نیز اشاره شد، حداقل میزان برگشت فنری برابر با ۰/۵۵ درجه بوده که به ازای ضریب اصطکاک ۰/۱۵۷ و سرعت پایین آمدن سنبه ۲/۸۴ میلی‌متر بر ثانیه به دست آمده است.



نمودار ۱) نتایج حاصل از ترکیب الگوریتم ژنتیک چندهدفه و روش المان محدود



نمودار ۲) تنش فون میزز ایجاد شده بر حسب سرعت سنبه

- forming processes by explicit finite element method in conjunction with the orthogonal regression analysis. *International Journal of Solids and Structures*. 1999;36(30):4653-4668.
- 17- Mertin Ch, Hirt G. Numerical and experimental investigations on the springback behaviour of stamping and bending parts. *Procedia Engineering*. 2017;207:1635-1640.
- 18- Sofuoğlu MA, Gürgen S, Çakır FH, Orak S. Springback behavior of AA6082T6 tubes in three-point bending operation. *Procedia Engineering*. 2017;182:658-664.
- 19- Davis JR. Aluminum and aluminum alloys. 2nd Edition. Ohio: Metals Park; 1994. pp. 575-587.
- 20- Wei L, Yuying Y. Multi-objective optimization of sheet metal forming process using Pareto-based genetic algorithm. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008;208(1-3):499-506.
- 21- Choi MK, Huh H. Effect of punch speed on amount of springback in U-bending process of auto-body steel sheets. *Procedia Engineering*. 2014;81:963-968.
- 22- Hou Y, Min J, Lin J, Liu Z, Carsley JE, Stoughton TB. Springback prediction of sheet metals using improved material models. *Procedia Engineering*. 2017;207:173-178.
- 23- Fathi H, Emadoddin E, Mohammadian Semnani HR, Mohammad Sadeghi B. Effect of punch speed on the formability behavior of austenitic stainless steel type 304L. *Metals and Materials International*. 2016;22(3):397-406.
- 24- Saito N, Fukahori M, Hisano D, Hamasaki H, Yoshida F. Effects of temperature, forming speed and stress relaxation on springback in warm forming of high strength steel sheet. *Procedia Engineering*. 2017;207:2394-2398.
- 25- Panthi SK, Ramakrishnan N, Ahmed M, Singh SS, Goel MD. Finite element analysis of sheet metal bending process to predict the springback. *Materials and Design*. 2010;31(2):657-662.
- 26- Phanitwong W, Thipprakmas S. FE-analysis of channel width effects on spring-back characteristics in the U-bending process. *Procedia Engineering*. 2017;183:17-22.
- 27- Thipprakmas S, Boochakul U. Comparison of spring-back characteristics in symmetrical and asymmetrical U-bending processes. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2015;16(7):1441-1446.
- 28- Malhotra R, Singh N, Singh Y. Genetic algorithms: Concepts, design for optimization of process controllers. *Computer and Information Science*. 2011;4(2):39-54.
- 29- Osaba E, Carballedo R, Diaz F, Onieva E, De La Iglesia I, Perallos A. Crossover versus mutation: A comparative analysis of the evolutionary strategy of genetic algorithms applied to combinatorial optimization problems. *The Scientific World Journal*. 2014;2014:154676.
- 30- Boyabatli O, Sabuncuoglu I. Parameter selection in genetic algorithms. *Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics*. 2004;4(2):78-83.
- 2- Xu Z, Peng L, Bao E. Size effect affected springback in micro/meso scale bending process: Experiments and numerical modeling. *Journal of Materials Processing Technology*. 2018;252:407-420.
- 3- Binesh B, Aghaie-Khafri M, Daneshi M. Simulation and experimental study of severe plastic deformation of 7075 Al alloy processed by repetitive upsetting-extrusion. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;17(8):323-332. [Persian]
- 4- Zhang YB, Lu LT, Zou L, Zeng DF, Zhang JW. Finite element simulation of the influence of fretting wear on fretting crack initiation in press-fitted shaft under rotating bending. *Wear*. 2018;400-401:177-183.
- 5- Ling YE, Lee HP, Cheok BT. Finite element analysis of springback in L-bending of sheet metal. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005;168(2):296-302.
- 6- Phanitwong W, Thipprakmas S. Development of a new spring-back factor for a wiping die bending process. *Materials and Design*. 2016;89:749-758.
- 7- Kumar KD, Appukuttan KK, Neelakantha VL, Naik PS. Experimental determination of spring back and thinning effect of aluminum sheet metal during L-bending operation. *Materials and Design (1980-2015)*. 2014;56:613-619.
- 8- Mkaddem A, Saidane D. Experimental approach and RSM procedure on the examination of springback in wiping-die bending processes. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007;189(1-3):325-333.
- 9- Kazan R, Firat M, Tiryaki AE. Prediction of springback in wipe-bending process of sheet metal using neural network. *Materials and Design*. 2009;30(2):418-423.
- 10- Ghaei A, Green DE, Aryanpour A. Springback simulation of advanced high strength steels considering nonlinear elastic unloading-reloading behavior. *Materials and Design*. 2015;88:461-470.
- 11- Gassara F, Hambli R, Bouraoui T, El Halouani F, Soulat D. Optimization of springback in L-bending process using a coupled Abaqus/Python algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2009;44(1-2):61-67.
- 12- Kuo CC, Lin BT. Optimization of springback for AZ31 magnesium alloy sheets in the L-bending process based on the Taguchi method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012;58(1-4):161-173.
- 13- Li B, McClelland Z, Horstemeyer SJ, Aslam I, Wang PT, Horstemeyer MF. Time dependent springback of a magnesium alloy. *Materials and Design*. 2015;66(Part B):575-580.
- 14- Zhou D, Wagoner RH. Development and application of sheet-forming simulation. *Journal of Materials Processing Technology*. 1995;50(1-4):1-16.
- 15- Pourboghra F, Karabin ME, Becker RC, Chung K. A hybrid membrane/shell method for calculating springback of anisotropic sheet metals undergoing axisymmetric loading. *International Journal of Plasticity*. 2000;16(6):677-700.
- 16- Li GY, Tan MJ, Liew KM. Springback analysis for sheet