مطالعه تاثیر حرارت و ضخامت ورق در پدیده برگشت فنری درحین فرم‌دهی کشش عمیق رویه‌های تیتانیومی

نوید ژیانی[1*]، محمدرضا باقری[2]، احمد رهبر رنجی[3]

۱- کارشناس ارشد مهندسی دریا (گرایش سازه های دریایی)، دانشگاه صنعتی مالک اشتر
۲- دانشجوی دکتری مکانیک دریا، دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شریف
۳- استادیار، دانشکده مهندسی دریا دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

پدیده برگشت فنری در ضمن فرم‌دهی، تمایل برگشت‌جزئی فلزات و آلیاژها به شکل اولیه به علت خاصیت الاستیک، بعد از حذف نیروی شکل‌دهی می‌باشد. به منظور افزایش دقت ابعادی در قطعات تولیدی، حذف یا کاهش این پدیده ضروری است. هدف از این مقاله مطالعه میزان برگشت فنری ایجاد شده در حین فرم‌دهی کشش عمیق رویه‌های تیتانیومی و بررسی تاثیر حرارت و ضخامت ورق بر برگشت فنری می‌باشد. برای این منظور فرآیند شکل‌دهی در نرم‌افزار LS/DYNA شبیه‌سازی شده است. برای ابزار (سنبه، ورق‌گیر و ماتریس) پیش‌گرمایش۲۰۰ درجه سانتیگراد و برای ورق دماهای ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ درجه سانتیگراد به ترتیب درمراحل اول تا سوم شکل‌دهی استفاده شده است. نتایج بدست آمده از این تحقیق با نتایج موجود در کارهای گذشته برای خمکاری V شکل مقایسه شده است. این مقایسه نشان می‌دهد که تغییرات برگشت الاستیک به طور مستقیم به نوع ماده و هندسه ابزار وابسته بوده و با افزایش درجه حرارت شکل‌پذیری آلیاژهای تیتانیوم افزایش یافته و برگشت الاستیک کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: برگشت فنری، روش عددی، خمکاری V شکل، کشش عمیق.

STUDY ON INFLUENCE OF THE TEMPERATURE AND THICKNESS OF PLATE ON SPRINGBACK PHENOMENA IN DEEP DRAWING FORMING OF TITANIUM BLANKS

N. Zhani[1], M. R Bagheri[2] , A. Rahbar Ranji[3]

1- Department of Marine Engineering, Malek Ashtar University
2- Department of Mechanical Engineering,Sharif university of Technology
3- Department of Naval Architecture, Amirkabir university of Technology

Abstract

Springback in metal forming process is tendency to partially return to its original shape because of the elastic recovery of the material upon release of the forming force. In order to increase accuracy of dimension in products, it is desirable to eliminate or reduce this phenomenon. It is the main objective of present work to study the amount of springback generated during deep drawing forming of titanium sheets and influence of plate thickness and heat on springback. For this purpose, LS/DYNA computer code is used to simulate forming process. For tools (mandrel, clamped, matrix) preheating of 200 degree centigrade and for plating 200, 300 and 400 degree centigrade are used for first, second and third stage of forming respectively. Results are compared with available results in literature for V-shape forming. This comparison shows that springback changes directly with material and geometry of tools and

* نویسنده مسوول مقاله navid2003zh@yahoo.com

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.4.4]

with increasing temperature, formability of Titanium alloys has increased and springback are decreased.
Keywords: Springback, Numerical method, V-shape Bending, Deep drawing

۱- مقدمه

کشش عمیق فرآیندی است که در طی آن با اعمال نیروی سنبه به ورق، فلز در بین سطوح ماتریس جریان پیدا می‌کند. این ورق فلزی می‌تواند به داخل ماتریس های مستطیلی، استوانه‌ای، مخروطی و غیره کشیده شده و شکل بگیرد. با استفاده از این فرآیند می‌توان قطعه نهایی را با کمترین فرآیند مونتاژ تولید نمود. یکی از دلایلی که باعث توسعه این روش شکل‌دهی در صنعت گردیده است سیکل‌های زمانی پرس سریع آن است. هندسه‌های پیچیده متقارن و غیرمتقارن می‌توانند با تعداد فرآیندهای کم و نیز دانش نسبتاً پایین متصدی انجام شود. قطعات تولید شده در طی این فرآیند با استحکام‌کششی بالا و نیز وزن‌های نسبتاً پایین تولید می‌شوند [۱].

در تمامی صنایع که با شکل‌دهی فلزات و ورق‌ها در ارتباط هستند تشخیص پدیدهٔ برگشت فنری بسیار مهم است. در دو دههٔ گذشته روش المان محدود به عنوان یک ابزار بسیار سودمند و کارا در تحلیل فرآیندهای شکل‌دهی به کار گرفته شده است. با توجه به پیچیدگی‌های موجود در شبیه‌سازی برگشت فنری، انتخاب صحیح ماده و هندسه برای رسیدن به نتایج ضروری است. تعاملی که بین ابزار و قطعه‌کار وجود دارد باید به نحو دقیقی شبیه‌سازی شود. روش‌های بسیاری برای بررسی و شبیه‌سازی این پدیده در گذشته مورد استفاده قرار می‌گرفت. پیشرفت‌های موجود در شبیه‌سازی این پدیده به منظور کاهش زمان و افزایش بازده بسیار چشمگیر است. این روش‌ها شامل به کارگیری مدل‌های مختلف ماده، کدهای مختلف المان محدود، المان‌های مختلف، قوانین سختی و اصطکاک متفاوت می‌باشد. در هنگام شبیه‌سازی عوامل بسیار زیادی وجود دارد که باید مورد بررسی قرار گیرند. از جمله این عوامل می‌توان به تغییرشکل‌های بزرگ که شامل رفتار هندسی و حالات غیرخطی مواد است، شرایط مرزی تماس و روش‌های همگرایی اشاره کرد [۲].

برگشت فنری به دلیل برگشت الاستیک در ناحیه خم‌خوردهٔ کششی ظاهر می‌شود که این ناحیه نسبت به کل قطعه نسبتاً کوچک است. اگر نیرو به طور مستقیم به این ناحیه اعمال گردد، با تغییر توزیع کرنش‌ها در این ناحیه، برگشت فنری تغییر کرده یا ممکن است کاملاً حذف گردد. این پدیده در واقع همان برگشت الاستیک می‌باشد که به اختلاف بین بارگذاری و باربرداری کامل مربوط است. در بررسی رفتار برگشت فنری باید منحنی‌های تنش-کرنش ماده مورد بررسی قرار گیرند. هنگام شکل‌دهی باید تنش‌های بزرگتر از تنش تسلیم به منظور حفظ تغییرشکل دائمی ایجاد شود. زمانی که بار برداشته می‌شود، تنش در مسیری به موازات قسمت الاستیک به صفر رسیده و در نتیجه تغییرشکل نهایی کمتر از مقدار مورد نظر در طراحی خواهد بود [۳].

ال‌مورسی و همکاران در سال ۲۰۰۲ [۴]، به شبیه‌سازی شکل‌دهی کشش عمیق گرم برای آلیاژهای منیزیم پرداختند. در این تحقیق با در نظر گرفتن انتقال حرارت، قابلیت کشش در این آلیاژ مورد بررسی قرار گرفت. ووک و تاکیم در سال ۲۰۰۷ [۵]، در گزارش خود به بررسی علل و چگونگی ایجاد برگشت فنری در ناحیهٔ فلنجی ورق در کشش عمیق پرداختند. فین و گالباریس در سال ۲۰۰۱ [۶]، در تحقیق خود با ادغام یک کد صریح LS/DYNA و یک کد ضمنی LTike سه بعدی، فرآیند شناسایی و کاهش برگشت فنری در شکل‌دهی کشش عمیق را بهبود بخشیدند. جانگ در سال ۲۰۰۲ [۷]، سعی کرد تا با استفاده از روش استاتیکی-ضمنی الگوریتمی در جهت کاهش اثرات برگشت فنری در کشش عمیق کروی ارائه کند.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.4.4]

در این مقاله مطالعه عددی برگشت فنری در شکل‌دهی تیتانیوم مورد بررسی قرار گرفته و نتایج زیر بدست آمده است.

۱- تغییرات برگشت فنری بطور مستقیم وابسته به نوع ماده و هندسه ابزار می‌باشد. افزایش ضخامت ماده باعث کاهش برگشت فنری می‌شود.

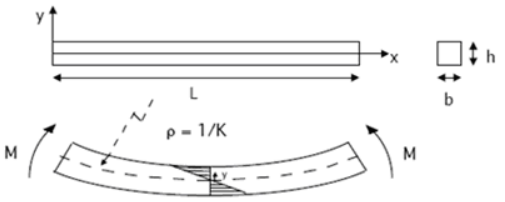
۲- با بهینه کردن شعاع پانچ می‌توان مقدار برگشت فنری را حداقل نمود.

۳- با افزایش دما، شکل‌پذیری آلیاژهای تیتانیوم افزایش یافته و اثرات برگشت فنری کاهش می‌یابند.

در ادامه به تحلیل تئوری حل مسئله شامل بررسی معادلات مربوط به برگشت فنری در ورق تحت شکل‌دهی و نیز نوع شبیه‌سازی مدل درنرم‌افزار، شبکه‌بندی مدل،شرایط مرزی و اولیه و درنهایت فرآیند کلی حل مسئله، مقایسه و نتیجه‌گیری پرداخته شده است.

۲- تحلیل تئوری مسئله

ابتدا خمش خالص یک تیر منشوری با مقطع مربع- مستطیل بررسی می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱- تیر منشوری در خمش خالص

با فرض مسطح باقی ماندن مقاطع عرضی، کرنش طولی برابر است با:

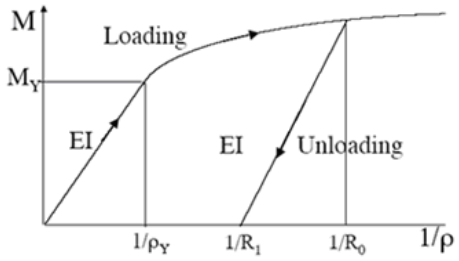
(۱)

$$\varepsilon_y = -\frac{y}{\rho}$$

هرگاه منحنی گشتاور خمشی به صورت شکل ۲ در نظر گرفته شود و فرض شود که تیر تا ناحیه پلاستیک بارگذاری شده است، مقدار برگشت فنری تیر برابر خواهد بود با [۸]:

(۲)

$$Springback = \frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_f}$$



شکل ۲- منحنی گشتاور خمشی- انحناء

مقدار گشتاور خمشی در منطقهٔ الاستیک برابر است با [۸]:

(۳)

$$M = \int_A \sigma.y.dA = -E\int \frac{y^2}{\rho} dA = -\frac{IE}{\rho}$$

در ابتدای منطقه پلاستیک می‌توان نوشت:

(۴)

$$\sigma = -\frac{y}{\rho E} = -\frac{h}{2\rho E} = -Y$$

یا

(۵)

$$1/\rho = 2Y/hE = 1/\rho_Y$$

با جایگذاری رابطه ۵ در معادلهٔ ۳ می‌توان مقدار گشتاور خمشی را در شرایط ابتدای ناحیه پلاستیک به صورت زیر به دست آورد:

(۶)

$$M_Y = -EI/\rho_Y = EI2Y/hE = 2IY/h$$

در ناحیه الاستیک- پلاستیک می‌توان نوشت:

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.4.4]

(۷)

$$M = \int \sigma y.b.dy = 2\int_{yY}^{h/2} Y.b.y.dy + 2\int_{0}^{yY} \frac{y}{y_Y} Y.b.y.dy =$$
$$\Rightarrow M = \frac{bh^2}{4} Y[1 - \frac{1}{3}(\frac{y_Y}{h/2})^2]$$

با توجه به این رابطه می‌توان نتیجه گرفت که:

(۸)

$$y_Y = h/2 \rightarrow M = M_Y$$
$$y_Y = 0 \rightarrow M = \frac{3}{2} M_Y$$

با استفاده از رابطه ۱، شعاع انحناء در لحظه تسلیم برابر است با:

(۹)

$$\frac{1}{\rho_Y} = \frac{\varepsilon_Y}{h/2}$$

در این رابطه ε_Y مقدار کرنش در ابتدای ناحیه پلاستیک می‌باشد. با توجه به اینکه ε_Y مقدار کرنش در نقطه y_Y است، پس می‌توان نوشت [۸]:

(۱۰)

$$\frac{1}{\rho_Y} = \frac{\varepsilon_Y}{y_Y}$$

با ترکیب معادلات ۹ و ۱۰ می‌توان نوشت:

(۱۱)

$$\frac{y_Y}{h/2} = \frac{(1/\rho)_Y}{1/\rho}$$

با جایگذاری این معادله در رابطهٔ ۷، رابطه زیر به دست می‌آید:

(۱۲)

$$M = \frac{3}{2} M_Y [1 - \frac{1}{3}\{\frac{(1/\rho)_Y}{1/\rho}\}^2]$$

مقدار گشتاور خمشی با توجه به منحنی باربرداری الاستیک به صورت زیر خواهد بود:

(۱۳)

$$M = \frac{M_Y}{(1/\rho)_Y}[\frac{1}{\rho} - \frac{1}{R_1}]$$

حال با قطع دادن معادلات ۱۱ و ۱۲ در رابطه ۱۳، در نقطه $1/\rho = 1/R_0$ می‌توان نوشت [۸]:

(۱۴)

$$\frac{M_Y}{(1/\rho)_Y}[\frac{1}{\rho} - \frac{1}{R_1}] = \frac{3}{2} M_Y [1 - \frac{1}{3}\{\frac{(1/\rho)_Y}{1/R_0}\}^2]$$

با بازنویسی رابطهٔ بالا و جایگذاری مقدار $1/\rho = 2Y/hE$ رابطه زیر بدست می‌آید:

(۱۵)

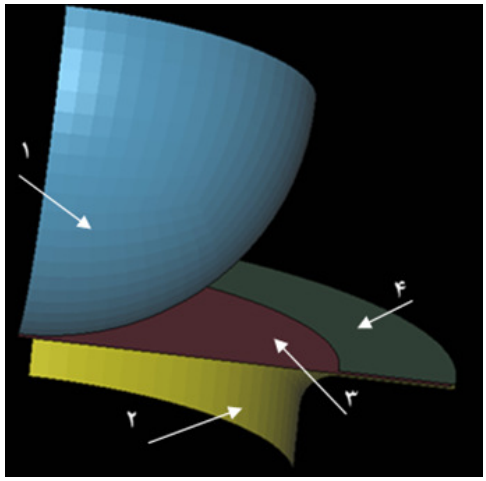
$$[\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_1}] = 3\frac{Y}{hE} - 4R_0^2(\frac{Y}{hE})^3$$

در این رابطه، $R_i(R_0)$ شعاع خم قبل از باربرداری، $R_f(R_1)$ شعاع خم بعد از باربرداری، $h(t)$ ضخامت ورق اولیه، Y تنش تسلیم ورق و E مدول الاستیسیته ورق می‌باشد. رابطهٔ بالا به سادگی مشخص می‌کند که برگشت فنری به دو عامل یعنی خصوصیات ماده و هندسهٔ ابزار وابسته است و برای کنترل این پدیده هر دو عامل فوق باید بررسی شوند.

۳- شبیه‌سازی مدل هندسی در نرم‌افزار

هندسهٔ دقیق ابزار با توجه به ابعاد سنبه، ورق، ورق‌گیر و ماتریس در نرم‌افزار مدل‌ساز Solid طراحی شده است (شکل ۳). مدل از ۴ قسمت اصلی تشکیل شده که به دلیل تقارن کامل، برای کاهش حجم محاسبات تنها یک چهارم آن مدل شده است. لازم به ذکر است که تمامی ابزار به غیر از ورق به صورت کاملاً صلب در نظر گرفته شده‌اند.

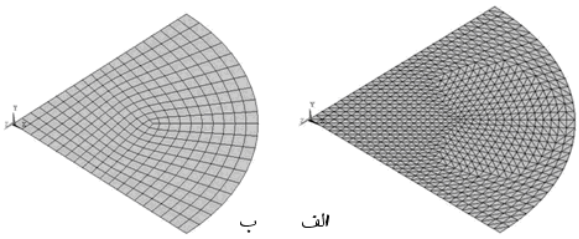
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.4.4]



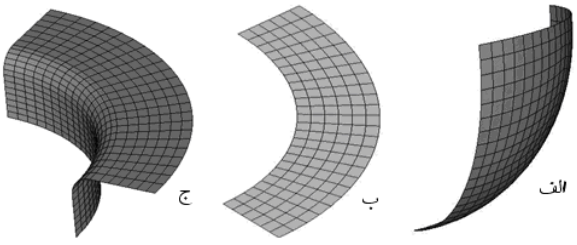
شکل ۳- نمایی از یک چهارم مدل اصلی که شماره ۱ سنبه، شماره۲ ماتریس، شماره ۳ ورق و شماره ٤ نشانگر ورق‌گیر است

۳-۱- شبکه‌بندی مدل

شبکه به کار رفته برای ورق از نوع با سازمان مثلثی و برای دیگر قسمت‌های ابزار از نوع با سازمان مربعی می‌باشد که در شکل ۴ و ۵ آورده شده است.



شکل ٤- شبکه بکار رفته در ورق
الف) شبکه‌بندی ورق با مش با سازمان مثلثی،
ب) شبکه بندی ورق با مش با سازمان مربعی



شکل ٥- شبکه بکارفته در اجزای مدل
الف) شبکه‌بندی سنبه، ب) شبکه‌بندی ورق‌گیر
ج) شبکه بندی ماتریس

۳-۲- مدل ماده

در این مدل از دو نوع ماده استفاده شده است.

۱- ماده صلب،برای سنبه، ماتریس و ورق‌گیر ماده صلب انتخاب شده که مشخصات آن در جدول ۱ آورده شده است. این ماده در کتابخانهٔ نرم افزار با شماره۲۰ ارائه شده است:

جدول ۱- ماده به کار رفته در ابزار شکل‌دهی

نوع ماده در ابزار	آلیاژ سرب- روی
مدول الاستیسیته	۲۰۱ گیگا پاسکال
ضریب پواسون	۰/۳۱
تنش تسلیم	۴۴۴ مگا پاسکال

برای ورق، تیتانیوم ۶۴ با ضخامت mm ۶ و قطر اولیه mm ۶۳۵ در نظر گرفته شده است.

۲- ماده الاستیک- پلاستیک ناهمسانگرد برای گستردهٔ اولیه با مشخصات زیر در نظرگرفته شده است [۹].

جدول ۲- ماده به کار رفته در ورق تحت شکل‌دهی

نوع ماده	تیتانیوم ۶۴
مدول الاستیسیته	۱۱۳ گیگا پاسکال
ضریب پواسون	۰/۲۸
تنش تسلیم	۹۲۴ مگا پاسکال
(n) پارامتر کار سختی	۰/۱۹
(k) ضریب استحکام	۵۷۶مگاپاسکال

۳-۳- نوع تماس

الگوریتم تماسی که در شبیه‌سازی شکل‌دهی در نظر گرفته شده است از نوع سطح به سطح می‌باشد که برای تعریف اصطکاک بین سنبه- ورق، ورق- ماتریس و ورق- ورق‌گیر به‌کار می‌رود. این الگوریتم، نفوذ بین ورق (قسمت جانبی) و قسمت‌های ابزار (قسمت‌های اصلی) و بلعکس را شبیه‌سازی می‌کند [۹].

۳-۴- اصطکاک

کشیده شدن ورق به داخل ماتریس توسط سطوح سنبه، باعث ایجاد نیروی اصطکاک لغزشی می‌شود. برای اصطکاک قانون کلمب بین سطوح ورق و ابزار استفاده شده است. ضریب اصطکاک استاتیکی-

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.4.4]

دینامیکی بین سطوح سنبه و ورق ۰/۰۶ (با توجه به وجود روانکار (پودر شیشه) و برای سطوح بین ورق- ورق‌گیر و ورق- ماتریس از ضریب اصطکاک ۰/۱۵ استفاده شده است [۹].

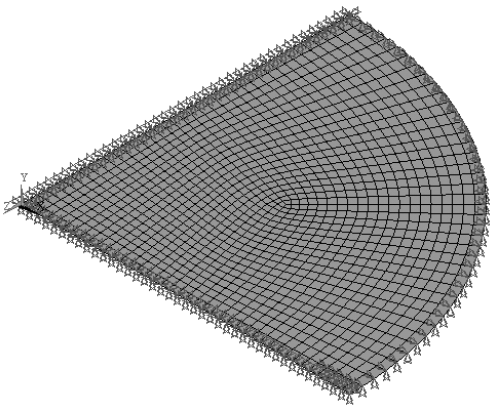
۴- فرآیند کلی حل مسئله

در طی فرآیند شبیه‌سازی شکل‌دهی، مراحل زیر انجام می‌شود:

۱- سنبه در موقعیت مکانی نزدیک به ورق قرار می‌گیرد.
۲- بارگذاری با لقی بر روی ورق‌گیر اعمال می‌شود.
۳- طبق یک منحنی خاص به سنبه نیرو یا سرعت داده می‌شود (در اینجا اعمال نیرو).
۴- بعد از اعمال نیرو، سنبه بر اساس یک منحنی سینوسی شروع به حرکت کرده و شکل‌دهی انجام می‌شود.

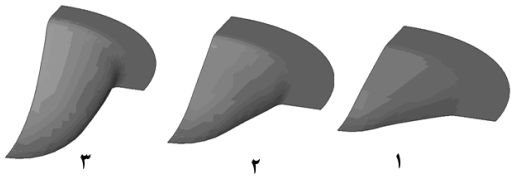
۴-۱- شرایط مرزی و شرط اولیه

شرایط مرزی برای ورق تحت شکل‌دهی به این صورت در نظر گرفته شده است که گره‌های هر المان از لحاظ چرخش، دوران و انتقال در جهت X ,Z کاملاً مقید گردیده و ورق تنها در جهت عمودی (Y) حرکت انتقالی خواهد داشت که درشکل ۶ نشان داده شده است. شرط اولیه برای شکل‌دهی نیز به صورت اعمال نیرو با یک مقدار مشخص می‌باشد.



شکل ٦- شرایط مرزی در ورق تحت شکل دهی

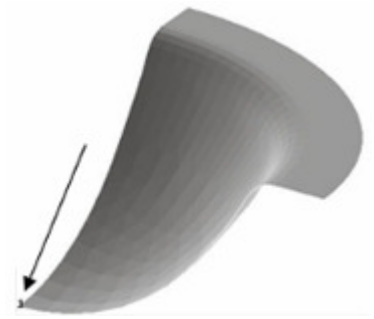
کل فرآیند شکل‌دهی در سه مرحله با زمان نهایی sec ۶ تکمیل شده است:



شکل ۷- مراحل اول تا سوم شکل‌دهی (s) t=0-6

۴-۲- بازبینی شکل نهایی

در انتهای شکل‌دهی باید کیفیت محصول نهایی کنترل شود تا شکل حاصل، پروفیل یک چهارم کره باشد. برای بررسی این موضوع گره‌ایی‌که در انتهای لبهٔ ماتریس قرار دارد (گره ای که با شماره ۱ مشخص شده است)، مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۸).



شکل ۸- مرحله نهایی شکل‌دهی

با بررسی مختصات و یا تغییر مکان این گره، کروی بودن شکل کنترل می‌شود. با توجه به شکل زیر این مقدار برابر mm ۱۹۸/۱۹ است که اختلاف با مقدار واقعی شعاع mm ۲۰۰ برابر $\Delta Y_3 = 1.81(mm)$ خواهد بود.

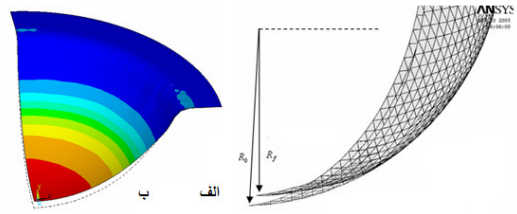
این اختلاف ناشی از اثرات برگشت فنری بعد از باربرداری بوده و کاملاً بدیهی است.

۵- بررسی اثر ضخامت ورق در برگشت فنری

برای محاسبهٔ فاکتور برگشت فنری، به طور مشابه با در نظر گرفتن شماره یک گرهٔ خاص و مقایسهٔ آن با زمان قبل از باربرداری می‌توان میزان برگشت را تعیین نمود. در شکل ۱۰ حالت نهایی قطعه بعد از شکل‌دهی نشان داده شده است. نتایج فاکتور برگشت‌فنری نیز

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.4.4]

بعد از باربرداری با توجه به تغییرات ضخامت ورق، تغییرات دمای شکل‌دهی و تنش تسلیم ماده محاسبه گردیده است. در شکل زیر که آخرین مرحله از شکل دهی می‌باشد، برگشت فنری بعد از باربرداری نشان داده شده است.



شکل ۱۰- حالت نهایی قطعه بعد از شکل‌دهی
الف) ایجاد برگشت فنری بعد از باربرداری در مرحله سوم
ب) کانتور برگشت فنری

در جدول ۳ نتایج شبیه‌سازی اثرات برگشت‌فنری با توجه به تغییرات ضخامت ورق آورده شده است. چنانکه از جدول فوق مشاهده می‌گردد با افزایش ضخامت، مقدار برگشت فنری افزایش می‌یابد. این افزایش برای ورق تیتانیومی حدود ۲ برابر ورق فولادی است. همچنین مشاهده می‌شود که تاثیر افزایش ضخامت در ورق ضخیم بیشتر است.

جدول ۳- نتایج شبیه‌سازی فاکتور برگشت فنری با تغییرات ضخامت ورق

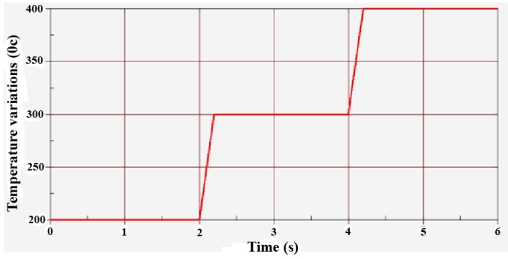
نسبت رشد K_s در ورق تیتانیومی به فولادی	K_s برای ورق تیتانیومی	K_s برای ورق فولادی	ضخامت ورق (mm)
۱/۰۰۲۰۳	۱/۰۰۴۶۸	۱/۰۰۲۶۴	t=2
۱/۰۰۴۱۸	۱/۰۰۸۹	۱/۰۰۴۷	t=6
۱/۰۱۳۳۵	۱/۰۲۴	۱/۰۱۰۵	t=8

۶- اثرات درجه حرارت در برگشت فنری

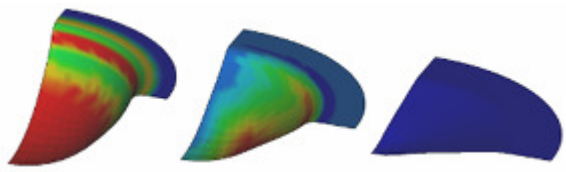
شکل‌دهی آلیاژهای تیتانیوم در دماهای سرد به دلیل برگشت فنری بالا و نیز حساسیت زیاد به رشد ترک بسیار مشکل است. در شکل‌دهی گرم، برگشت‌فنری به میزان قابل توجهی کاهش یافته و شکل‌پذیری افزایش می‌یابد. شرایط آنیل نیز حداقل می‌شود. زمانی که قطعه خام تیتانیومی تحت گرما شکل‌دهی می‌شود، تغییرشکل واقعی در دمایی حدود ۳۱۲۰۴ درجه - سانتیگراد برای تیتانیوم خالص اتفاق می‌افتد، حال آنکه این مقدار برای آلیاژ تیتانیوم ۶۴ به۲۸۷ تا ۷۰۴ درجه سانتیگراد خواهد رسید [۱۰]. برای شکل‌پذیری بالا درجه حرارت‌های۲۸۵-۳۱۵ درجه سانتیگراد مورد نیاز است. بهترین حالت در دمای ۴۵۰ درجه سانتیگراد اتفاق می‌افتد. تجربه و آزمایش نشان می‌دهد که شکل‌دهی داغ آلیاژهای تیتانیوم به خصوص آلیاژ تیتانیوم ۶۴، باعث کاهش چشمگیر اثرات برگشت‌فنری در قطعه نهایی می‌شود.

برای بررسی این موضوع طبق شکل زیر، از دمای پیش گرم۲۰۰ درجه سانتیگراد برای ابزار (سنبه، ورق‌گیر و ماتریس) و از دماهای۳۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ درجه سانتیگراد برای ورق به ترتیب در مراحل اول تا سوم شکل‌دهی استفاده شده است. در شکل۱۱ افزایش پله‌ای درجه حرارت در هر گام از شکل‌دهی نشان داده شده است [۱۰].

در جدول ۴ نتایج کاهش اثرات برگشت فنری با توجه به اعمال اثرات درجه حرارت آورده شده است.

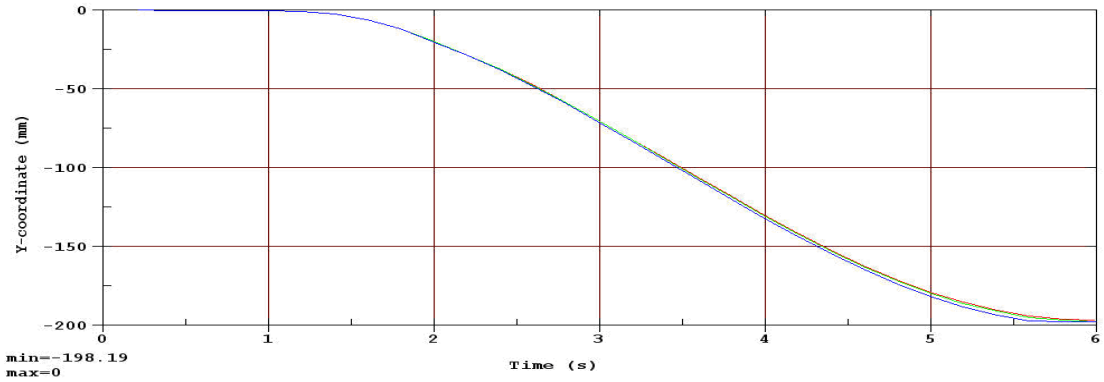


شکل ۱۱- تغییرات درجه حرارت با گذشت زمان



شکل ۱۲- تغییرات کانتور توزیع دما در حین شکل‌دهی کشش‌عمیق

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.4.4]



شکل ۹- تغییر مکان گره شماره یک

جدول ٤- کاهش فاکتور برگشت فنری با افزایش حرارت در ورق تیتانیومی

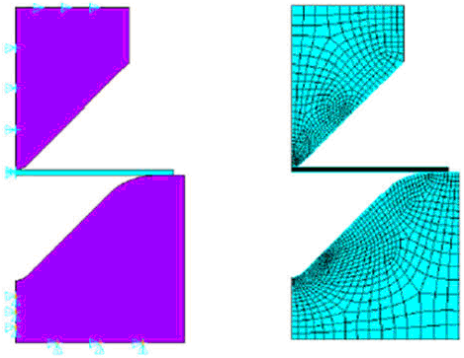
فاکتور برگشت فنری		ضخامت ورق (mm)
دمای بالا	دمای معمولی	
۱/۰۰۱۸۳	۱/۰۰۴۶۸	t =۲
۱/۰۰۲۳۷	۱/۰۰۸۹	t =۶
۱/۰۰۷۶۴	۱/۰۲۴	t =۸

با توجه به نتایج به دست آمده نتیجه می‌شود که افزایش دما اثر بسیار زیادی در کاهش اثرات برگشت فنری خواهد داشت. به طوری که با کاهش فاکتور برگشت فنری، مقدار شعاع کره در پایان شکل‌دهی از ۱۹۸/۱۹میلیمتربه ۱۹۹/۲۵میلیمتر می‌رسد. به عبارت دیگر در حدود۱/۳۳میلیمتر نسبت به حالت اولیه بهبود در شکل حاصل شده است. ΔY به دست آمده برای گرهٔ مورد نظر از شکل ۹ از۱/۸۱ میلیمتربه ۰/۴۸ میلیمتر تغییر کرده است.

۷- مقایسه و اعتبار سنجی نتایج

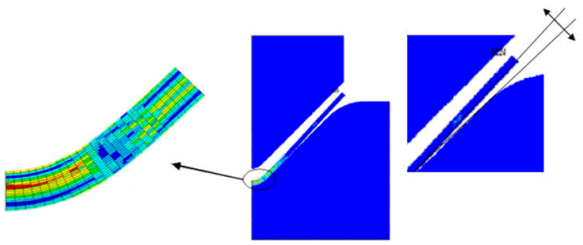
برای کنترل صحت روش، نتایج ارائه شده در گزارش Satorres.A [۱۱] که فرآیند خمکاری V شکل در آن بررسی شده، با نتایج این کار مقایسه شده است. مدل مورد بررسی در گزارش فوق یک ورق می‌باشد که تحت خمکاری V شکل قرار گرفته است.

در اینجا نیز همان هندسه در نرم‌افزار LS/DYNA مدل شده است (شکل ۱۳). شعاع خم‌کاری در سه حالت mm ۳، mm ۵ و mm ۹٫۵ در نظرگرفته شده است.



شکل ۱۳- نوع مش به کار رفته و شرایط مرزی اعمالی

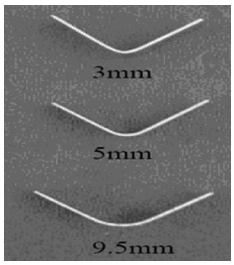
در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نتایج اثرات برگشت فنری نشان داده شده است.



شکل ١٤- شبیه‌سازی برگشت فنری با شعاع قالب ۳ میلی متر

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.4.4]

اثرات شبیه سازی با شعاع قالب‌های mm ۵ و mm ۹/۵ نیز بررسی شده است که نتایج در جدول ۵ آورده شده است. در شکل زیر نتایج آزمایشگاهی از مدل مذکور دیده می‌شود.



شکل ۱۵- مدل آزمایشگاهی مورد نظر

جدول ۵ نشان دهندهٔ نتایج آزمایش‌های انجام شده به منظور اندازه‌گیری زاویهٔ برگشت فنری در قطعه در مرجع [۱۱] و نتایج شبیه سازی برای تعیین زاویهٔ برگشت فنری در ورق فولادی با مشخصات زیر می‌باشد، که در آن مدول الاستیسیته ۶۹ گیگاپاسکال، ضخامت ورق ۰/۸۴ میلیمتر و تنش تسلیم ۱۷۰مگاپاسکال می‌باشد.

جدول ۵- مقایسه مقادیر زاویه برگشت فنری بعد از باربرداری

شعاع قالب (mm)	مقدار بر اساس مقاله [۱۱] (mm/mm)	نتایج شبیه سازی (mm/mm)	خطای شبیه سازی
R=3	-۳/۵	-۳/۶۹۲	٪۵/۴
R=5	-۰/۵	-۰/۴۵۳	٪۹/۴
R=9/5	+۴/۵	+۵/۰۱۲۵	٪۱۱/۴

چنانکه از جدول فوق مشاهده می‌شود حداکثر اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی در این مطالعه و مقاله [۱۱] مربوط به شعاع mm ۹/۵ بوده که حدود ۱۱٪ است. این میزان اختلاف نشان می‌دهد که نتایج شبیه‌سازی قابل قبول است.

۸- نتیجه گیری

از این مطالعه نتایج کلی زیر را بدست می‌آید.

۱- تغییرات برگشت فنری بطور مستقیم وابسته به نوع ماده و هندسه ابزار می‌باشد. با افزایش تنش تسلیم برگشت فنری کاهش می‌یابد. برای مثال در یک ورق از جنس تیتانیوم برگشت فنری کمتر از ورق مشابه از جنس فولاد می‌باشد.

۲- مدت زمان بارگذاری و ثابت نگاه داشتن مقدار نیروی پانچ اثر مستقیمی در برگشت فنری دارد.

۳- افزایش ضخامت ماده باعث کاهش برگشت فنری می‌شود.

۴- افزایش شعاع خم و سرعت پانچ باعث افزایش مقدار برگشت فنری می‌شود.

۵- با افزایش ناحیه تغییر شکل پلاستیک، برگشت فنری کاهش می یابد.

۶- با بهینه کردن شعاع پانچ می‌توان مقدار برگشت فنری را حداقل نمود.

۷- با افزایش دما، همواره شکل پذیری آلیاژهای تیتانیوم افزایش یافته و اثرات برگشت فنری نیز کاهش خواهد یافت.

۹- برای بررسی پدیده برگشت فنری باید پارامترهای دیگری از جمله شرایط ایزوتروپیک، فاصله بین سنبه و ماتریس، شرایط روغن‌کاری و غیره نیز مورد بررسی قرار بگیرند.

۹- فهرست علائم

E_t	مدول مماسی ماده
R	ناهمسانگردی نرمال
θ	زاویهٔ خم

۱۰- مراجع

1-Boljanoric,V,(2004), Sheet metal forming and Die design.

2-Hematiam,J,(2000),Finite element modeling of wrinkling during deep drawing of pressure vessel end closures (PVECs),Queen's university.

3-Hisford,W.F,(1983), Metal forming mechanics and metallurgy,university of Michigan.

4-El–Morsy,A, Manabe,K,(2002),Kang D.B., Hwang J.K., ”FE Analysis on Temperature and Deformation of

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.4.4]

Magnesium Alloy Sheet in Warm Deep–Drawing Process", Proceedings of the 5th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Forming Processes, Vol.1, pp.171–176.
5-Wook,L, and Kim,T,(2007), A study on the springback in the sheet metal flange drawing Department of Mechanical Engineering, Soonchunhyang University, Asan, Chungnam 336-745, South Korea Kyungshin Industrial Co. Ltd., 994-13 Dongchun2,Yeonsu,Incheon 406-130, South Korea.
6-Finn,M.J, Galbraith,P.C,(2001), Use of a coupled explicit-implicit solver for calculating spring-back in automotive body panels , a Kingston Research and Development Centre, Alcan International Ltd.
7-Jung,D.W,(2002), Static-explicit finite element method and its application to drawbead process with springback , department of mechanical Engineering , Cheju National University , Jeju –Do 690-756 South Korea.
8-Malvern,L.E,(1969),Introduction to the Mechanics of a Continuous Media, Prentice-Hall.
9-Ls-dyna keyword user's manual volume1,2,3,March2001,version960, Technology Corporation .
10-Simo, J .C ,Hughes ,T. J., (1998), Computational Inelasticity, Springer, New York.
11-Satorres.A,(2005), Bending simulation of high strength steel by finite element ,University of Oulu , Department of Mechanical Engineering.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.4.4]