



بررسی عددی و آزمایشگاهی بازگشت فنری در پیچش مقاطع مستطیلی جدار نازک و استخراج رابطه تجربی- عددی جهت پیش‌بینی زاویه فنری با فرض رفتار کرنش سخت

محمد کشفی¹، داوود بختیاری²، عطاالله قوامیان³، محسن کشفی⁴، پرویز کحال^{5*}

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران

3- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه سوانزی، سوانزی، انگلستان

4- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ورامین-پیشوا، ورامین

5- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی، بروجرد

* بروجرد، صندوق پستی 6919969411، parvizkahhal@abru.ac.ir

چکیده

کلیدواژگان

پیچش مقاطع غیر گرد جدار نازک، کاربرد وسیعی در صنایع مختلف به‌ویژه صنایع هوافضا و راداری دارد. وظیفه انتقال امواج در رادارها به عهده موج‌برها است که در ساخت آن‌ها نیاز به عملیات شکل‌دهی مانند خمش و پیچش‌های مکرر می‌باشد. در پژوهش حاضر رفتار پیچشی و همچنین پدیده بازگشت فنری در مقطع جدار نازک مستطیلی که یکی از کاربردهای آن در ساخت موج‌برها است، به‌صورت عددی و تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. به‌منظور بررسی رفتار بازگشت فنری، شبیه‌سازی عددی بر پایه روش اجزا محدود و همچنین با در نظر گرفتن رفتار ماده به‌صورت کرنش سخت و بدون در نظر گرفتن فرضیه‌های ساده‌کننده دیگر، انجام پذیرفته است. نتایج عددی به‌دست‌آمده با آزمایش‌های تجربی بر روی یک نمونه، اعتبار سنجی شده و نمودارهای مربوط به پیچش در زوایای مختلف به‌وسیله مدل اعتبار سنجی شده، ارائه شده است. در نهایت رابطه‌ای تجربی- عددی بر پایه مدل اجزاء محدود جهت محاسبه زاویه بازگشت فنری در مقطع مذکور ارائه شده است. رابطه مذکور با دقت مناسبی می‌تواند رفتار بازگشت فنری مقطع را پیش‌بینی نماید.

پیچش
مقاطع جدار نازک
تحلیل اجزاء محدود
بازگشت فنری

A numerical-experimental investigation on spring back in rectangular section thin wall hollows and extracting a relation to estimate twisted angle by considering strain harden behavior

Mohammad Kashfi¹, Davood Bakhtiyari², Ataollah Ghavamian³, Mohsen Kashfi⁴ and Parviz Kahal^{5*}

1- Department of Mechanical Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

3- Department of Computational Mechanics, Swansea University, Swansea, United Kingdom

4- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University- Varamin-Pishva branch, Varamin, Iran

5- Mechanical Engineering Department, Ayatollah Arozma Boroujerdi, Boroujerd, Iran

* P.O.B. 6919969411, Boroujerd, Iran, parvizkahhal@abru.ac.ir

Keywords

Spring Back
Thin Wall Structure
Rectangular Section
Finite Element Method

Abstract

Spring back is the geometric change made to a part at the end of the forming process when the part has been released from the forces of the forming tool. Upon completion of sheet metal forming, deep-drawn, twisting and stretch-drawn parts spring back and thereby affect the dimensional accuracy of a finished part. In wave guides bending and twisting elements are used to transmit waves. In the present work, the spring back of rectangular section thin wall hollows is investigated. In order to study the torsional behavior of the specimens, a finite element model is constructed by considering a material model with strain hardening behavior. After validating numerical simulation by experiment, twisted angle versus applied torque is presented according to FE model. In conclusion, a relation based on numerical and empirical results is proposed to estimate twisted angle before and after loading and unloading. In the other words, by using the present model, applied twisted angle to achieve the desired value could be obtainable.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Mohammad Kashfi, Davood Bakhtiyari, Ataollah Ghavamian, Mohsen Kashfi, Parviz Kahal, A numerical-experimental investigation on spring back in rectangular section thin wall hollows and extracting a relation to estimate twisted angle by considering strain harden behavior, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 4, No. 1, pp. 38-43, 2017 (in Persian)

1- مقدمه

بازگشت فنری همواره در علم شکل‌دهی فلزات حائز اهمیت بوده است. این پدیده به دلیل وجود باربرداری الاستیک در قطعاتی که دچار تغییر شکل بزرگ شده‌اند، رخ می‌دهد که باعث برهم خوردن دقت ساخت می‌گردد. اولین پژوهش در مورد پیچش مقاطع و بررسی بازگشت فنری در آن‌ها توسط ویودی و همکاران [1] صورت پذیرفته است. آن‌ها، در پژوهش خود با استفاده از روابط تئوری بر روی قطعات با مقطع مستطیلی و تحت بار پیچشی، نمودارهایی برای زاویه بازگشت فنری ارائه کردند. ریدلی و همکاران [2] با استفاده از نتایج آزمایشگاهی پیچش مقاطع جدار نازک را بررسی نموده و نمودارهای زاویه پیچش برحسب گشتاور اعمالی را استخراج کردند. بورا و همکاران [3] پدیده بازگشت فنری را در ورق‌هایی با دو انحنا مورد بررسی قرار دادند و با استفاده از روش عددی نمودارهای زاویه بازگشت فنری برحسب گشتاور اعمالی را ارائه نمودند. ونگ و همکاران [4] در پژوهش خود تأثیر زاویه پیچش مقاطع I شکل بر روی کماتش پیچشی آن‌ها را با استفاده از روش آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار دادند.

در این پژوهش، بر اساس مطالعات تجربی و عددی بر پایه روش اجزا محدود رفتار مقاطع جدار نازک مستطیلی تحت بارگذاری پیچشی مورد بررسی قرار گرفته است. در گام بعد، نمودارهای بازگشت فنری به کمک روش عددی با در نظر گرفتن رفتار مکانیکی کرنش سخت، به دست آمده است سپس رابطه‌ای به جهت پیش‌بینی زاویه بازگشت فنری ارائه می‌شود.

2- تئوری پیچش مقاطع

فرضیات لازم در روابط ارائه شده در این قسمت عبارت‌اند از: (1) استفاده از میله‌هایی با مقطع گرد و مستقیم که همگن و همسانگرد هستند، (2) گشتاورهای وارد شده برابر و در خلاف جهت به دو سر میله وارد می‌شود، (3) بارگذاری به شکلی باشد که تغییر شکل در محدوده الاستیک قرار گیرد. رابطه پیچش برای مقطع دایره‌ای عبارت است از:

$$\theta = \frac{Tl}{JG}, \tau = \frac{T\rho}{J}, \tau_{max} = \frac{Tr}{J} \quad (1)$$

در معادله (1)، T گشتاور پیچشی، l طول میله، r شعاع خارجی میله، J ممان اینرسی قطبی مقطع، ρ شعاع دلخواه مقطع، τ تنش برشی، θ زاویه پیچش و G ضریب برشی میله است. در میله‌های غیر دایره‌ای رابطه زاویه پیچش برحسب متغیرها برای مقاطع غیر دایره‌ای به صورت معادله (2) بیان شده است [5].

$$\theta = \frac{Tl}{KG} \quad (2)$$

در رابطه (2)، K مشابه J برای سطح مقطع دایره‌ای است. نکته جالب توجه اینکه برای تمام مقاطع به جز دایره‌ای K همواره از J کوچک‌تر است. حال برای مقطع نمونه مورد مطالعه از روابط بالا میزان زاویه پیچش به صورت رابطه (3) حاصل می‌شود [5]:

$$\theta = \frac{Tl}{KG}, K = \frac{2t(a-t)^2(b-t)^2}{(a+b-2t)^2}, G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

$$K = 8.0613 \times 10^{-7}, G = 2.59 \times 10^{10}$$

$$\theta = (47.8955 \times 10^{-6})T \quad (3)$$

بنا بر تئوری غشایی برای مقاطع جدار نازک مستطیلی و پس از محاسبات لازم، زاویه پیچش به صورت رابطه (3) محاسبه شده است. نکته مهم اینکه روابط بالا تنها برای ناحیه الاستیک معتبر هستند.

3- نتایج آزمایشگاهی

برای انجام آزمایش‌ها از یک مقطع جدار نازک مستطیلی از جنس آلومینیوم 6061 استفاده شده است. ماده مورد نظر به سبب خواص مکانیکی و فیزیکی مطلوب، بیشترین کاربرد را در صنایع راداری دارد. ابعاد نمونه مورد آزمایش در شکل 1 نشان داده شده است. شکل 2 نمایی از اجزای دستگاه مورد استفاده برای انجام آزمایش‌های پژوهش حاضر را نشان می‌دهد. دستگاه مورد نظر برای اعمال پیچش به مقاطع با هندسه‌های گوناگون طراحی و ساخته شده است که با تعویض فک‌های متحرک و ثابت دستگاه، امکان آن فراهم می‌شود. نیروی محرکه این دستگاه از یک موتور با توان 1/5 کیلووات تأمین می‌شود که در ابتدا با استفاده از یک جعبه‌دنده کاهنده و سپس با استفاده از سیستم چرخ زنجیر در دو مرحله، سرعت آن تا حد شبه استاتیکی کاهش می‌یابد.

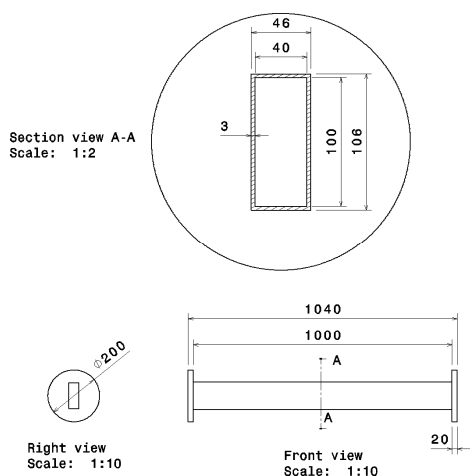


Fig. 1 The dimension of specimen used in experiment

شکل 1 هندسه و ابعاد نمونه مورد استفاده در آزمایش پیچش

گره‌ها 2879 انتخاب شده است. شرایط مرزی شبیه‌سازی کاملاً مطابق با شرایط مرزی آزمایشگاهی به نمونه اعمال شد. همچنین خواص مکانیکی مدل ماده مورد استفاده در شبیه‌سازی بر اساس آزمایش کشش بر مبنای استاندارد ASTM E8 محاسبه شدند. با توجه به رفتار ماده و همچنین مقادیر تنش تسلیم و نهایی، مدل ماده دوخطی برای رفتار آلومینیوم در نظر گرفته شده است. خواص مکانیکی مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها در جدول 2 آمده است.

جدول 2 مشخصات مکانیکی آلومینیوم 6061 آنیل شده

چگالی	2700 kg/m ³
نسبت پواسان	0/33
ضریب الاستیسیته	68/9 GPa
تنش تسلیم و نهایی	52/2 و 124 MPa
ازدیاد طول	%29

شکل 3 روند تغییرات زاویه نهایی مقطع برحسب حداکثر گشتاور اعمالی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که شکل نشان می‌دهد، با افزایش گشتاور اعمالی میزان زاویه نهایی نیز افزایش می‌یابد. نکته جالب توجه در نمودار نشان داده آن است که افزایش به‌صورت غیرخطی و تغییرات آن افزایشی می‌باشد.

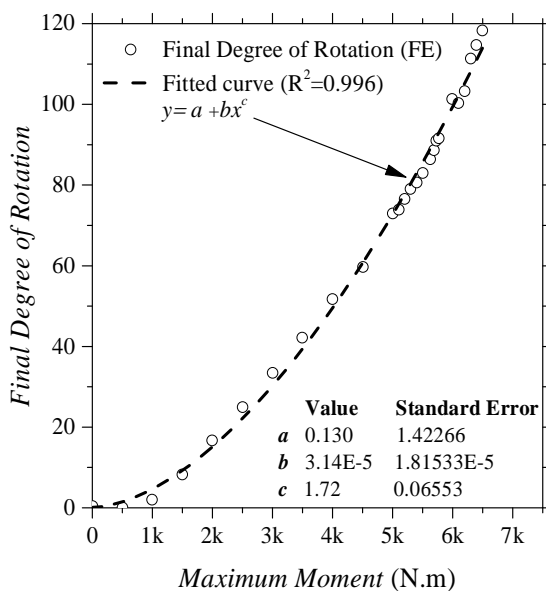


Fig. 3 FEM prediction of cross sectional final rotation degree versus maximum applied moment

شکل 3 زاویه نهایی مقطع برحسب گشتاور اعمالی مستخرج از شبیه‌سازی بر پایه روش اجزا محدود

بر این اساس نمودار از نوع توانی به نتایج برازش شده است.



Fig. 2 The experimental apparatus

شکل 2 نمایی از دستگاه پیچش مورد استفاده جهت انجام آزمایش‌ها

در این آزمایش سعی بر این بوده که زاویه نهایی نمونه 90 درجه شود. برای اندازه‌گیری میزان دوران از یک زاویه‌سنج در فک متحرک استفاده شده است. لازم به ذکر است که جهت بررسی تکرارپذیری نتایج تجربی، سه آزمایش با شرایط یکسان تکرار شد و میانگین آن‌ها به‌عنوان داده‌های آزمایشگاهی در این پژوهش گزارش شده است.

نتایج مستخرج از آزمایش پیچش در جدول 1 آمده است. بر اساس نتایج تجربی برای رسیدن به زاویه نهایی 90 درجه باید مقطع تا 105 درجه چرخانده شود که بعد از رهاسازی میزان زاویه نهایی 90 درجه شود؛ به‌عبارت دیگر نمونه 15 درجه بازگشت فنری از خود نشان داده است.

4- بحث و بررسی نتایج عددی

در ابتدا نمونه مورد نظر در نرم‌افزار CATIA بر اساس ابعاد نمونه آزمایشگاهی، مدل‌سازی شد. سپس مدل طراحی‌شده در نرم‌افزار ANSYS با استفاده از المان مکعبی هشت گره‌ای شبکه‌بندی و به روش اجزاء محدود رفتار آن مورد ارزیابی قرار گرفت.

جدول 1 نتایج آزمایش پیچش 90 درجه نمونه

زاویه نهایی پیچش (بعد از باربرداری)، درجه	90
زاویه حداکثر (انتهای بارگذاری)، درجه	105
حداکثر گشتاور موردنیاز، نیوتن متر	6036/7
زاویه بازگشت فنری، درجه	15

تعداد المان‌های مدل بعد از فرایند بهینه‌سازی، 1433 و تعداد

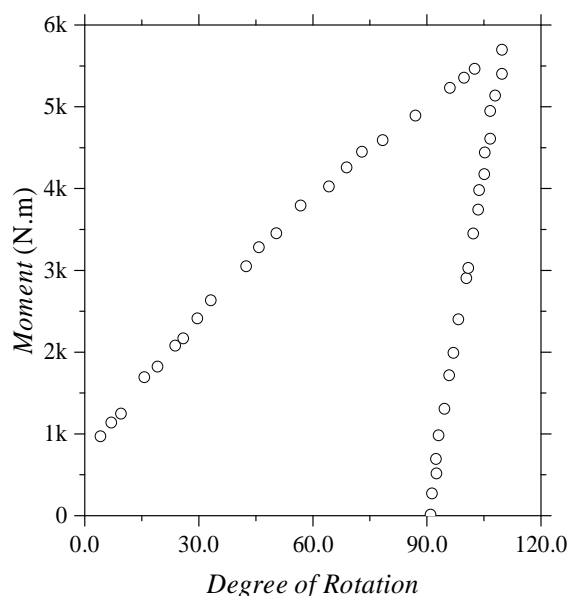


Fig. 5 Torsional behavior of specimen during twisting obtained from FEM

شکل 5 زاویه پیچش مقطع برحسب گشتاور اعمالی مستخرج از شبیه‌سازی بر پایه روش اجزا محدود

شکل 6 نمودار زاویه پیچش حداکثر در بیشترین گشتاور و بعد از باربرداری را نشان می‌دهد؛ بنابراین شکل بیانگر این مطلب است که هرچه گشتاور اعمالی بیشتر باشد تفاضل زوایای حداکثر و نهایی (زاویه بازگشت فنری) بیشتر می‌شود. این موضوع به دلیل رفتار کرنش سخت آلومینیوم می‌باشد. در این پژوهش بر اساس شبیه‌سازی انجام‌شده میزان زاویه بازگشت فنری بر اساس گشتاور اعمالی را می‌توان با رابطه (4) تخمین زد.

$$\theta_{sb} = a[1 - \exp(bt)] \quad , \quad a = -4.7 \quad , \quad b = 0.000287 \quad (4)$$

در رابطه (4)، θ_{sb} زاویه بازگشت فنری و T گشتاور اعمالی به مقطع است. به‌منظور تعمیم رابطه فوق به هر مقطع می‌توان تنها (a) و (b) را تعیین کرد که توابعی از خواص مکانیکی و هندسی مقطع مورد استفاده هستند.

در قسمت اول شکل 7 توزیع کرنش پلاستیک در نمونه را تحت بارگذاری نشان داده‌شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود بیشترین کرنش پلاستیک در جداره میانی طول مستطیل مقطع حاصل شده است. این موضوع باعث تشدید تغییر شکل‌ها در این ناحیه خواهد شد. در قسمت دوم برش‌هایی در فواصل طولی مختلف از نمونه آمده است تا اعوجاج پدیدار شده در نمونه را طی بارگذاری نشان دهد. همان‌گونه که در شکل قابل مشاهده است، بیشترین اعوجاج‌ها در میانه نمونه رخ داده است در صورتی که در ابتدا و انتهای آن، اعوجاج قابل صرف‌نظر کردن است.

معادله مورد استفاده جهت برازش به همراه ثوابت آن در شکل نشان داده شده است. به جهت نشان دادن صحت عملکرد برازش، برای هر کدام از ثوابت رابطه ارائه شده، انحراف استاندارد نیز ارائه شده است.

به‌منظور اعمال گشتاور لازم چندین بار شبیه‌سازی صورت پذیرفت و نتایج میان‌یابی شد تا زاویه نهایی پیچش موردنظر دقیقاً 90 درجه گردد. شکل 4 نمودار زاویه بازگشت فنری به وجود آمده در مقطع برحسب حداکثر گشتاور اعمالی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش گشتاور اعمالی به نمونه میزان زاویه بازگشت فنری به‌صورت غیرخطی افزایش می‌یابد. توابعی از نوع نمایی با دقت بالا به نتایج موجود در شکل برازش شده است تا رفتار آن را بتوان در هر نقطه مشخص نمود. شکل 5 نمودار زاویه مقطع را برحسب گشتاور اعمالی نشان می‌دهد. همان‌گونه که شکل نشان می‌دهد نمودار تا قبل از نقطه بیشینه به‌صورت خطی افزایش می‌یابد که در نتیجه رفتار کرنش سخت داده‌شده به‌عنوان مدل ماده است. در گام بعدی حل، گشتاور به‌صورت تدریجی از نمونه برداشت شده تا مقدار آن به صفر برسد. اختلاف بین زاویه در گشتاور بیشینه و گشتاور صفر، مقدار بازگشت فنری را در نمونه نشان می‌دهد. همچنین شکل نشان می‌دهد که در طی بارگذاری بنابر انتظار، شیب منحنی نزدیک به شیب ناحیه پلاستیک و در باربرداری شیب منحنی بر اساس ضریب الاستیسیته ماده است.

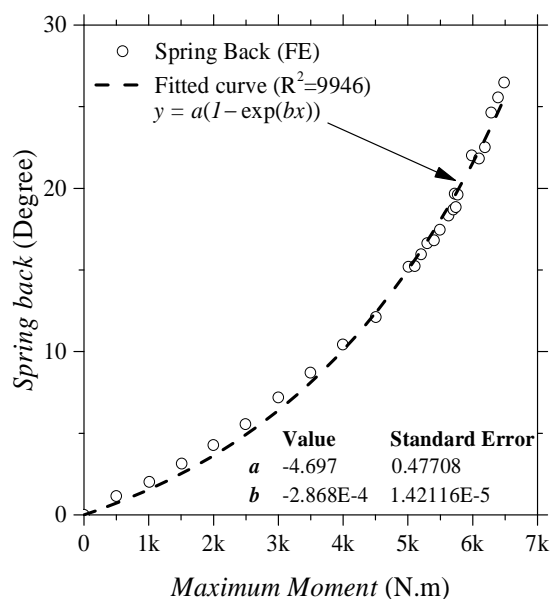


Fig. 4 FEM prediction of spring back degree vs. maximum applied moment

شکل 4 زاویه بازگشت فنری به وجود آمده در مقطع برحسب حداکثر گشتاور اعمالی مستخرج از شبیه‌سازی بر پایه روش اجزا محدود

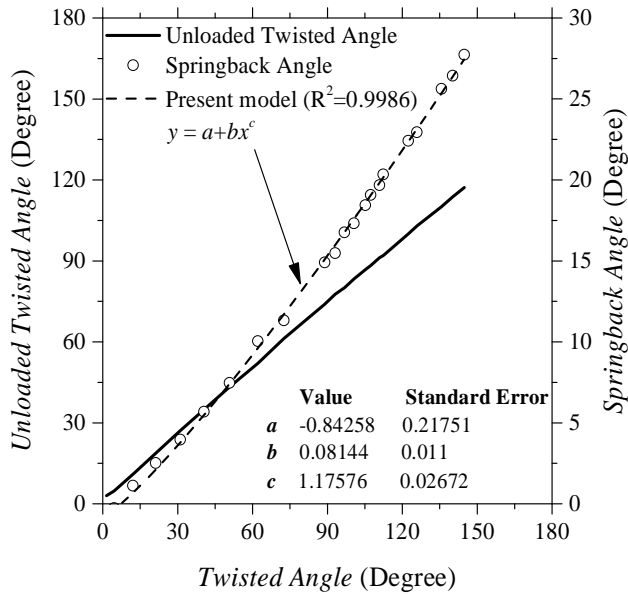


Fig. 8 FEM predicted spring back angle compared to twisted angle and present model

شکل 8 مقایسه زاویه بازگشت فنری و زاویه پیچش مستخرج از شبیه‌سازی بر پایه روش اجزا محدود و مدل ارائه شده

رابطه ارائه شده در این پژوهش رابطه (5) می‌باشد:

$$\theta_{sb} = a + b(\theta_{TA})^n \quad (5)$$

$a = -0.84$, $b = 0.08144$, $n = 1.1758$

که در آن θ_{sb} و θ_{TA} به ترتیب زاویه بازگشت فنری و زاویه پیچش می‌باشند.

5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش پدیده بازگشت فنری در مقطع جدار نازک مستطیلی به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. حداکثر خطا در زاویه بازگشت فنری حدود 26% و در حداکثر گشتاور در حدود 6% می‌باشد که نشان‌دهنده تطابق مناسب نتایج عددی و آزمایشگاهی است. با افزایش گشتاور اعمالی نمونه، زاویه با نمو بیشتری افزایش پیدا خواهد کرد. همچنین زاویه بازگشت فنری با افزایش گشتاور اعمالی افزایش پیدا می‌کند درحالی‌که نمو زاویه بازگشت فنری نیز در حال افزایش است. بیشترین تغییر شکل در مقطع نیز، وسط نمونه رخ داده است. همین‌طور در وسط اضلاع بزرگ‌تر و کوچک‌تر، لولاهای خمیری به ترتیب به سمت داخل و خارج تشکیل شده‌اند. در انتها نیز رابطه‌ای تجربی-عددی بر اساس شبیه‌سازی‌های عددی جهت محاسبه بازگشت فنری ارائه شد که با توجه به نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی را از خود نشان می‌دهد.

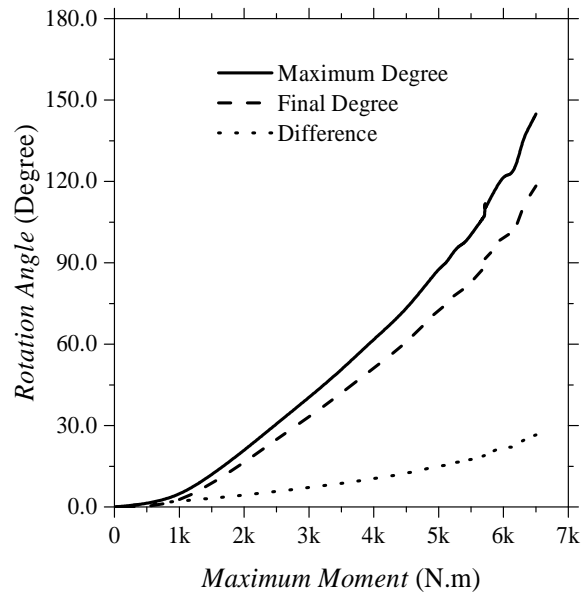


Fig. 6 Maximum and final degree of rotation angle vs. applied moment obtained from FEM

شکل 6 زاویه پیچش در حین بارگذاری و بعد از باربرداری برحسب گشتاور اعمالی مستخرج از شبیه‌سازی بر پایه روش اجزا محدود

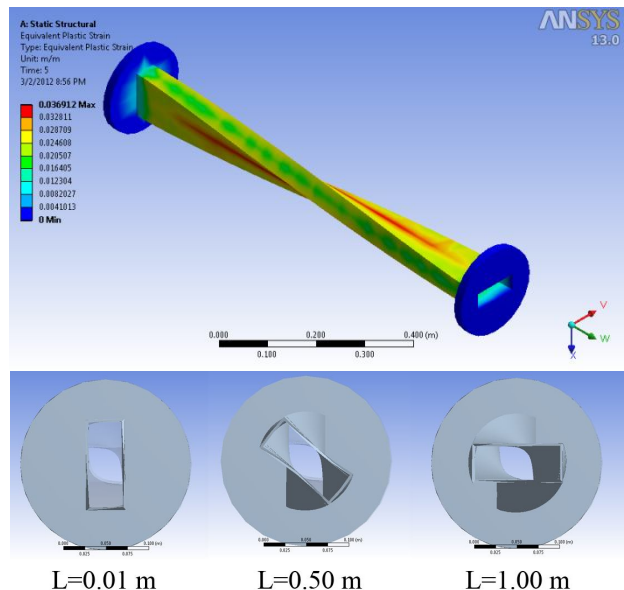


Fig. 7 Equivalent plastic strain contour during twisting

شکل 7 توزیع کرنش پلاستیک در اثر گشتاور پیچشی اعمالی

در شکل 8 زاویه بازگشت فنری و زاویه پیچش مقایسه شده است. در نمودار موجود در شکل تابعی به صورت توانی ارائه شده است که بنابر نیاز سازنده می‌تواند میزان بازگشت فنری ایجاد شده در نمونه را تخمین بزند؛ به عبارت دیگر مقدار زاویه نهایی که طی آزمایش باید به نمونه اعمال شود که بعد از باربرداری زاویه مطلوب حاصل گردد قابل محاسبه خواهد بود. با توجه به شکل توزیع نیمه خطی است اما تابعی دقیق بر روی آن برازش شده است تا رفتار به صورت دقیق محاسبه گردد.

6- مراجع

- curvature forming of plates: Experimental evaluation and process modeling. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 50, No. 4, pp. 704-718, 2008.
- [4] Wang, Y.Q., et al., Experimental study and finite element analysis on the local buckling behavior of aluminium alloy beams under concentrated loads. *Thin-Walled Structures*, Vol. 105, No. C, pp. 44-56, 2016.
- [5] Timoshenko, S., *Strength of materials Part 1*, D. Van Nostrand Co., 1940.
- [1] Dwivedi, J.P., et al., Springback analysis in torsion of rectangular strips. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 28, No. 8, pp. 505-515, 1986.
- [2] Ridley-Ellis, D.J., J.S. Owen, and G. Davies, Torsional behaviour of rectangular hollow sections. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 59, No. 5, pp. 641-663, 2003.
- [3] Borah, U., et al., Estimation of springback in double-