مجله مهندسی مکانیک مدرس، مرداد 1395، دوره 16، شماره 5، ص‌ص 210-220

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی شکل پذیری هرم ناقص آلومینیومی در فرآیند شکل دهی تدریجی تک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای

امیرحسین نیک دوز[1]، محمد جواد میرنیا[2*]، حمید باصری[3]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل
2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل
3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل
* بابل، صندوق پستی 484، mirnia@nit.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 23 بهمن 1394
پذیرش: 25 فروردین 1395
ارائه در سایت: 03 خرداد 1395

کلید واژگان:
شکل دهی تدریجی تک نقطه ای[3]
استراتژی تغییر شکل دو مرحله ای
هرم ناقص
روش اجزای محدود
نمودار حد شکل دهی شکست

چکیده

شکل دهی تدریجی[1] برتری‌های متمایزی را نسبت به فرآیندهای متداول شکل‌دهی ورق فلزی، مانند هزینه پایین ابزار و سادگی فرآیند ارائه نموده است. با این حال این روش هنوز دارای محدودیت‌هایی می‌باشد. از جمله این محدودیت‌ها، نازک شدگی شدید می باشد که تاثیر بسزایی درکارکرد محصول نهایی دارد. همچنین برخی از قطعات بدلیل دارا بودن زاویه دیواره زیاد نمی‌توانند توسط شکل دهی تدریجی تک مرحله‌ای تولید شوند. در این میان می‌توان از استراتژی‌های تغییر شکل چندمرحله‌ای استفاده کرد تا به زاویه دلخواه و در عین حال به توزیع ضخامت بهتر و حداکثر ضخامت کمینه رسید. در این تحقیق شکل دهی تدریجی دو مرحله‌ای یک هرم ناقص مربع القاعده با زاویه دیواره $70°$ از جنس آلومینیوم با هدف بهبود ضخامت کمینه بصورت تجربی و شبیه سازی اجزای محدود مورد مطالعه قرار گرفت. با ارائه استراتژی‌های تغییر شکل دو مرحله‌ای و بدست آوردن پارامترهای تعریف کننده آن توسط روش اجزای محدود، درصد نازک شدگی نسبت به شکل‌دهی تک مرحله‌ای مورد مقایسه قرار گرفت. در این تحقیق از آزمون تجربی برای اعتبار سنجی نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود استفاده شد. نتایج نشان داد که با استفاده از استراتژی تغییر شکل دو مرحله‌ای ارائه شده می‌توان ضخامت کمینه را به میزان دو برابر نسبت به حالت تک مرحله‌ای بهبود بخشید. با مقایسه توزیع ضخامت، توافق خوبی بین مدل سازی اجزای محدود و آزمون تجربی مشاهده شد. در انتها تاثیر استراتژی های تغییر شکل بر مسیر کرنش بدست آمده از مدل سازی عددی توسط نمودار حد شکل دهی شکست[2] بررسی شده است.

Study of formability of aluminum truncated pyramid in single-stage and two-stage incremental sheet forming

Amir Hossein Nikdooz, Mohammad Javad Mirnia*, Hamid Baseri

Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
* P.O.B. 484, Babol, Iran, mirnia@nit.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 12 February 2016
Accepted 13 April 2016
Available Online 23 May 2016

Keywords:
Single point incremental forming
two-stage forming
truncated pyramid
finite element method
fracture forming limit diagram

ABSTRACT

Incremental sheet forming has already provided distinct advantages such as inexpensive tools and the simplicity of the process over conventional sheet forming processes. However, the method still has some limitations. Among these limitations, severe thinning has significant effects on the performance of the final product. Also, some parts with high wall angles cannot be formed by single stage incremental forming. To overcome these restrictions, multistage incremental forming can be implemented to achieve the desired wall angle, better thickness distribution, and lower thinning. In this study, a two-stage incremental forming of an aluminum truncated pyramid with a wall angle of 70° was studied experimentally and numerically in order to improve the achievable minimum thickness. By introducing two-stage forming strategies and achieving their defining parameters using finite element simulation, the sheet thinning was compared to the one in the single-stage forming. Experiments were used to validate the finite element analysis. The results revealed that using the two-stage forming strategy, the minimum thickness can be improved twice than the one in the single-stage forming. A good agreement was observed between the thickness distribution obtained by experiments and predicted by the finite element modeling. Finally, the effect of forming strategies on the strain paths was investigated through the finite element simulation and the experimental fracture forming limit diagram.

[1] Incremental forming
[2] Fracture Forming Limit Diagram (FFLD)
[3] Single point incremental forming

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

A. H. Nikdooz, M. J. Mirnia, H. Baseri, Study of formability of aluminum truncated pyramid in single-stage and two-stage incremental sheet forming, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 5, pp. 210-220, 2016 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.33.4]

1- مقدمه

فرآیندهای شکل دهی تدریجی عبارتند از فرآیندهایی که در آن یک ابزار معمولا سر کروی بوسیله مسیری که از قبل برای آن مشخص گردیده، ورق را به طور موضعی دچار تغییر شکل می‌نماید تا به شکل نهایی محصول برساند. فرآیندهای شکل‌دهی تدریجی شامل روش های مختلفی از جمله تک نقطه-ای[1] و دو نقطه‌ای[2] می‌باشد که در این میان شکل دهی تدریجی تک نقطه‌ای بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. شکل 1 نمای کلی از شکل دهی تدریجی تک نقطه ای یک ورق فلزی به ضخامت t_0، با پیشروی عمودی ΔZ، شعاع ابزار r_t و زاویه دیواره ظرف β را نشان می دهد. در این شکل مسیر ابزار معروف به ارتفاع ثابت[3] و همچنین مولفه‌های نیرو اعمالی به ابزار نشان داده شده است. این فرآیندها برای تولید با تیراژ پایین و یا نمونه سازی سریع می‌توانند استفاده شوند. از مزیت های این روش این است که نیاز به قالب و ابزار های پیچیده و پر هزینه نداشته و با یک طراحی ساده و با یک دستگاه فرز CNC قابلیت اجرا دارد. در این فرآیند، به منظور کاهش نیروهای شکل دهی و افزایش محدوده‌ی شکل پذیری ورق، از ابزاری با ابعاد کوچک استفاده می‌شود. این امر سبب تمرکز عملیات تغییر شکل پلاستیک در ناحیه‌ی کوچکی از ورق می‌گردد. بنابراین، می‌توان بسیاری از آسیب های احتمالی در محصول نهایی را حذف نمود. با توجه به اینکه ورق به صورت موضعی شکل دهی می‌شود و نیروها متمرکز بر منطقه تماس ابزار با ورق می‌باشند، نشان داده شده است که شکل پذیری ورق در این فرآیند افزایش می‌یابد و خود این پدیده دامنه انعطاف فرآیند را زیاد می‌کند. از محدودیت های جدی موجود در این روش می‌توان به نازک شدگی ورق اشاره کرد که تاثیر منفی بر استحکام محصول در کارکرد آتی آن دارد که در این تحقیق بیشتر به آن پرداخته می‌شود. همچنین برای هر جنس ورق یک زاویه بحرانی وجود دارد که نمی توان قطعات با زاویه بیشتر از آن را در یک مرحله تغییر شکل به شکل نهایی رساند.

شیم و پارک [1] اولین مطالعات را بر روی تعیین منحنی‌های حد شکل پذیری در فرآیند شکل دهی تدریجی انجام و با تعیین منحنی حد شکل

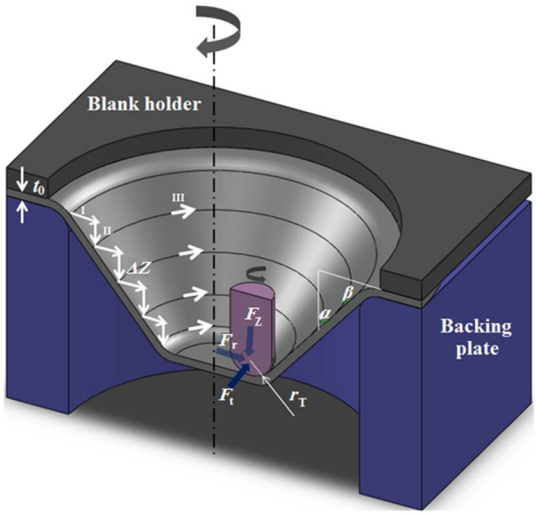

Fig.1 Typical presentation of single point incremental forming a truncated cone

شکل 1 نمای کلی از شکل دهی تدریجی تک نقطه ای یک مخروط ناقص

پذیری برای آلومینیوم نشان دادند که میزان شکل پذیری در فرآیند شکل دهی تدریجی بالاتر از سایر فرآیندهای سنتی است. از این رو منحنی حد شکل پذیری مورد استفاده در فرآیندهای سنتی با منحنی به دست آمده از این فرآیند متفاوت بوده و قابل تعمیم نیست. کیم و پارک [2] به بررسی تاثیر پارامترهای فرآیند بر شکل پذیری یک ورق آلومینیوم 1050 به ضخامت 0.3mm پرداختند و نشان دادند که با کاهش سرعت پیشروی و اصطکاک بین ابزار و قطعه‌کار، شکل‌پذیری ورق افزایش پیدا خواهد کرد. با استفاده از شبیه سازی اجزای محدود شکل دهی تدریجی یک هرم ناقص و منحنی‌های حد شکل‌دهی بر پایه تنش، سئونگ و همکاران [3] نشان دادند که به دلیل وجود اختلاف در حالت تنش در راستای ضخامت، پدیده گلویی شدن در حین فرآیند شکل دهی حذف می گردد. حذف گلویی به عنوان مهمترین عامل افزایش شکل پذیری معرفی گردید. در کار مشابهی هاکو و وان یون [4] با بیان اینکه مسیر کرنش در شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای کاملا غیر خطی می‌باشد، از یک معیار جدید بر پایه حالت تنش‌های صفحه‌ای به منظور پیش‌بینی گلویی و شکست در شکل دهی یک هرم و مخروط ناقص از جنس آلومینیوم AA 6022-T43 استفاده نمودند و توافق خوبی را با نتایج تجربی گزارش کردند.

مانکو و آمبروگیو [5] اثر قطر ابزار، گام عمودی، ضخامت ورق و زاویه دیواره را بر روی ضخامت کمینه در شکل‌دهی تدریجی یک مخروط از جنس آلومینیوم بررسی کردند. بر اساس رابطه ارائه شده منتج از تحلیل نتایج تجربی، قطر ابزار تاثیر چشمگیری بر ضخامت کمینه ندارد ولی با افزایش گام عمودی ضخامت کمینه افزایش می‌یابد. مانکو و همکاران [6] با بکار بردن مسیرهای مختلف حرکت ابزار، توزیع ضخامت را در یک مخروط ناقص از جنس آلومینیوم AA1050 بررسی کردند و استراتژی مناسب را از بین این مسیرها جهت بهینه سازی نازک شدگی انتخاب کردند که در بهترین حالت نازک شدگی از 75% در شکل دهی تک مرحله ای به 65% در شکل دهی سه مرحله‌ای کاهش یافت. چاو و همکاران [7]، شکل دهی تدریجی دو نقطه‌ای یک هرم ناقص را با استفاده از نرم افزار آباکوس شبیه سازی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که افزایش شعاع ابزار سبب بهبود توزیع ضخامت و نازک شدگی می‌شود در حالیکه گام عمودی تاثیر قابل توجهی بر ضخامت کمینه ندارد. وربرت و همکاران [8] با استفاده از نتایج تجربی به بررسی روش چند مرحله‌ای در شکل دهی تدریجی مخروط ناقص به منظور افزایش حد شکل پذیری آن پرداختند. نتایج تجربی نشان داد که ضخامت کمینه از 0.35mm در حالت تک مرحله ای به 0.55mm در سه مرحله ای افزایش یافته است. اثر شکل‌دهی چند مرحله‌ای بر بهبود دقت ابعادی در شکل دهی تدریجی تک نقطه‌ای یک هرم ناقص از ورق فولادی DC04 بصورت تجربی توسط بمبخ و همکاران [9] مورد بررسی قرار گرفت. به دلیل وجود تنش‌های پسماند و برگشت فنری در قطعه شکل داده شده، نشان داده شد که ترکیبی از شکل-دهی چند مرحله‌ای و عملیات تنش زدایی می تواند منجر به بهبود دقت ابعادی نسبت به حالت تک مرحله ای گردد. فلیکه و همکاران [10] با بکار بردن یک مدل تحلیلی و استفاده از معادله بهینه سازی مناسب برای یک مخروط ناقص به بررسی روش دو مرحله ای پرداختند. نتایج بدست آمده نشان داد، بیشترین عمق مخروط با استفاده از بیشترین عمق مخروط اولیه و بیشترین زاویه دیواره مخروط با استفاده از کمترین نمو زاویه ای ممکن، بدست می آید. میرنیا و همکاران [11]، با استفاده از آزمایشات تجربی و آنالیز حد متوالی توانستند با ارائه استراتژی تغییر شکل سه مرحله ای بهبود یافته یک مخروط ناقص با زاویه دیواره 70درجه، میزان نازک شدگی را از 74% در

[1] Single Point Incremental Forming (SPIF)
[2] Two Point Incremental Forming (TPIF)
[3] Z-constant

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.33.4]

تک مرحله‌ای به 53% در سه‌مرحله ای بهبود بخشند. میرنیا و همکاران [12] به بررسی روش دو مرحله‌ای در شکل دهی تدریجی یک مخروط ناقص با زاویه دیواره °70 پرداختند. آنها با استفاده از الگوریتم آنالیز حد متوالی SLA و بکار بردن استراتژی تغییر شکل مناسب توانستند مقدار نازک شدگی را از مقدار 74% در حالت تک‌مرحله ای به 60% در حالت دو مرحله‌ای کاهش دهند. شی و همکاران [13]، با استفاده از آزمون تجربی به بررسی تاثیر شکل دهی تدریجی چند مرحله ای مخروط ناقص آلومینیومی بر قابلیت شکل پذیری ورق پرداختند و به این نتیجه رسیدند که شکل دهی چند مرحله ای می‌تواند حداکثر زاویه دیواره را به عنوان یک معیار از قابلیت شکل پذیری ورق، افزایش دهد. آنها در ادامه با اندازه گیری کرنش های صفحه‌ای حاصل از آزمون تجربی نشان دادند که تغییر مسیر شکل دهی و استراتژی های تغییر شکل چند مرحله ای بر روی نمودار حد شکل دهی شکست تاثیرگذار است. کریستینو و همکاران [14] به بررسی تجربی فلنج زنی مربعی با استفاده از شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای چند مرحله‌ای پرداختند. با استفاده از نمودارهای حد شکست در فضای کرنش‌های اصلی و تحلیل شبکه دایره‌ای[1]، تاثیر ابعاد حفره مربعی اولیه بر شکل پذیری و مسیر کرنش مورد بحث و تحلیل قرارگرفت. استراتژی شکل‌دهی چند مرحله ای بر اساس افزایش تدریجی زاویه ظرف تنها مورد بررسی قرار گرفت.

با توجه به مطالب مطرح شده در بالا، تحقیقات مختلفی بر روی کاهش نازک‌شدگی در شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای مخروط ناقص صورت گرفته است. از آنجا که مطالعات محدودی بر روی شکل دهی تدریجی چند مرحله‌ای هرم ناقص با هدف بهبود نازک شدگی انجام شده است، در این تحقیق با ارائه استراتژی هایی، امکان بهبود حد شکل‌دهی و درصد نازک شدگی یک هرم ناقص با زاویه دیواره 70 درجه از جنس آلومینیوم AA1050 مطالعه می‌گردد.

2-آزمون تجربی

در این پژوهش، شکل دهی تدریجی تک نقطه ای یک هرم ناقص مربع القاعده به ضلع 129 mm، ارتفاع 30 mm و زاویه دیواره 70 درجه مورد نظر می باشد. ورق مورد آزمایش از جنس آلومینیوم AA1050 می باشد که خواص مکانیکی آن با استفاده از آزمایش کشش در سه جهت °0، °45 و°90 نسبت به جهت نورد و بر اساس استاندارد ASTM E8M-04 بدست آمد. با انطباق رابطه کرنش سختی ووچه[2]، طبق رابطه 1 با نمودار تنش – کرنش حقیقی در جهت نورد، ضرائب کار سختی مطابق جدول 1 بدست آمد. جدول 2 خواص مکانیکی در جهات نورد و ضرائب ناهمسانگردی در جهات °0، °45 و °90 نسبت به جهت نورد را بیان می‌کند.

$$\sigma = \sigma_0\left(1 - Ae^{-\beta\varepsilon}\right) \quad \text{(MPa)} \qquad (1)$$

شکل 2 نمودار تنش کرنش مهندسی برای دو حالت آنیل نشده و آنیل شده در دمای 345 درجه سانتی گراد به مدت 2 ساعت را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می شود، انعطاف پذیری بطور قابل ملاحظه ای برای حالت آنیل شده بهبود می یابد. در این پژوهش ورق آلومینومی مورد بررسی بصورت آنیل نشده استفاده می گردد.

[1]Circle grid analysis
[2]voce

جدول 1 پارامترهای معادله کارسختی

Table1 The parameters of the hardening law

σ_0 (MPa)	β	A	R^2
478.5	165.8	0.87	0.99

جدول 2 خواص مکانیکی ورق AA1050

Table2 The mechanical properties of AA1050

چگالی (kg/ m³)	2700
ضریب پواسان	0.34
مدول الاستیسیته (GPa)	70
تنش تسلیم (MPa)	52
ضرائب ناهمسانگردی لنکفورد[3]	
r_0	0.44
r_{45}	0.45
r_{90}	0.76

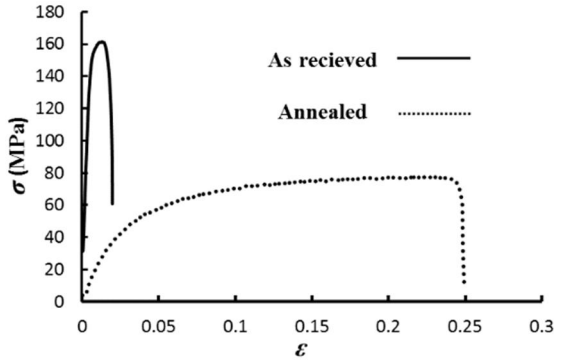

Fig.2 The engineering stress-strain curves for as-received and annealed sheet metal in the rolling direction

شکل 2 نمودار تنش کرنش مهندسی در جهت نورد برای ورق آنیل شده و آنیل نشده

به منظور جام شکل دهی تدریجی، ابتدا پولک های اولیه با ابعاد 250mm×250mm از ورق با ضخامت 1 mm جدا می‌شود، سپس بر روی صفحه پشتیبان[4] که دارای حفره مربعی شکل با ابعاد 131 mm × 131 mm است قرار می‌گیرد و در نهایت با ورق گیر بطور فشرده و محکم بسته می‌شوند بصورتی که دیگر اجازه هیچ حرکتی بر روی قالب نخواهند داشت. شکل 3 نمای کلی از مجموعه قالب را نشان می‌دهد. ابزار سر کروی با قطر 10 mm که از جنس فولاد SPK می‌باشد جهت انجام تغییر شکل در ورق مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین از روغن هیدرولیک جهت کاهش اصطکاک بین ورق و ابزار استفاده می‌شود. شکل 4 تصویر ابزار سر کروی استفاده شده در این فرآیند را نشان می‌دهد.

مجموعه قالب بر روی دستگاه فرز CNC سه محوره بسته می‌شود و مسیر حرکت ابزار با استفاده از یک برنامه ماکرو[5] مشخص می‌شود. این مسیر بصورت ارتفاع ثابت تعریف شده است؛ به این صورت که ابزار بعد از اعمال هر گام عمودی یک مسیر مربعی را طی می‌کند و مجددا با اعمال هر گام افقی این مسیر تکرار می‌شود. نرخ پیشروی ابزار 1200 mm/min می‌باشد. شکل 5 نحوه قرارگیری مجموعه قالب بر روی دستگاه فرز CNC را نشان می‌دهد.

[3]Lankford
[4]Backing plate
[5]Macro

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.33.4]

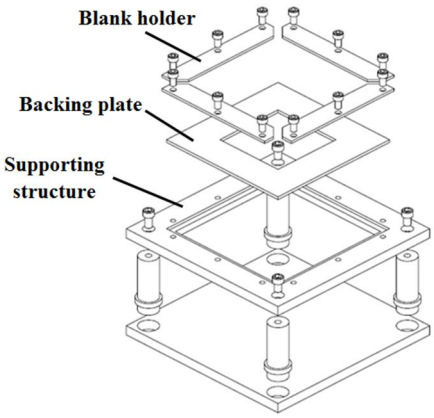

Fig.3 The single point incremental forming die set for forming a truncated pyramid

شکل 3 مجموعه قالب شکل دهی تدریجی تک نقطه ای یک هرم ناقص

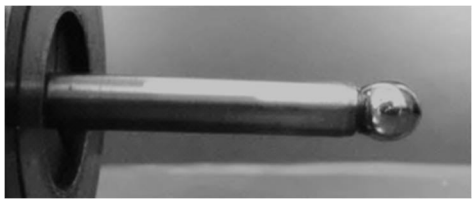

Fig.4 The hemispherical head tool with the 10 mm diameter

شکل4 ابزار سرکروی با قطر 10 میلی متر

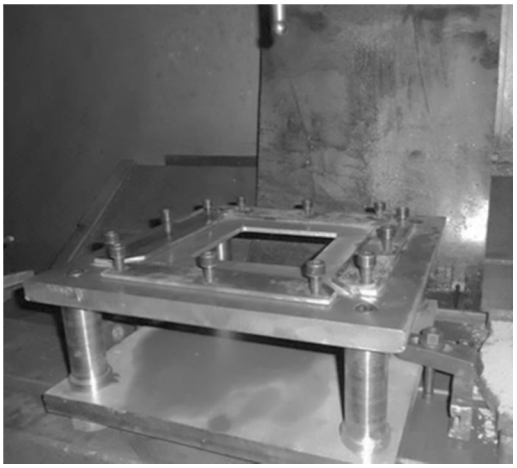

Fig.5 The experimental SPIF platform on the three axis CNC machine

شکل 5 مجموعه قالب شکل دهی تدریجی تک نقطه ای نصب شده بر روی دستگاه فرز CNC

ابزار در هر حرکت مربعی ابتدا به اندازه یک گام افقی به سمت داخل هرم و سپس یک گام عمودی به سمت پایین طی می‌کند. مقدار گام عمودی در این پژوهش برابر با 1 mm است ولی گام افقی با توجه به زاویه دیواره هرم تعیین می‌شود.

بعد از انجام آزمایش‌های تجربی، هرم در مسیر های مشخص برش داده شد تا برای اندازه گیری ضخامت آماده شود. برش ورق توسط دستگاه برش سیمی[1] انجام گرفت. برای اندازه گیری ضخامت مقطع برش خورده از دستگاه اندازه گیری ضخامت سنج مکانیکی با دقت 0.01 mm استفاده شد.

برای اندازه گیری کرنش های اصلی صفحه ای بر روی ورق، توسط دستگاه حکاکی الکتروشیمیایی دایره‌هایی با قطر 2.5 mm ایجاد گردید. بعد از آزمون تجربی این دایره ها تبدیل به بیضی هایی با قطر های متفاوت می‌شوند که با اندازه گیری قطر بزرگ و قطر کوچک این بیضی ها توسط یک خط کش نواری مایلار[2] می‌توان کرنش را طبق رابطه 2 و 3 در دو راستای اصلی بر روی صفحه بدست آورد. شکل 6 و 7 به ترتیب نحوه اندازه گیری قطرهای بیضی و راستاهای اصلی را بر روی ورق تغییر شکل یافته نشان می‌دهد.

$$\varepsilon_1 = \ln\frac{d_1}{d_0} \quad (2)$$

$$\varepsilon_2 = \ln\frac{d_2}{d_0} \quad (3)$$

که در آن d_1 قطر کوچک، d_2 قطر بزرگ بیضی و d_0 قطر اولیه دایره های حکاکی شده می‌باشد. با درنظر گرفتن ثابت بودن حجم می‌توان از طریق رابطه 4 ضخامت نهایی ورق را نیز بدست آورد.

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = -\varepsilon_3$$
$$t = t_0 e^{\varepsilon_3} \quad (4)$$

که در آن t ، ضخامت نهایی ورق و t_0 ضخامت اولیه ورق است که برابر با 1mm می‌باشد .

3-شبیه سازی اجزای محدود

برای مدلسازی فرآیند از کد تجاری اجزای محدود آباکوس6.13 با حلگر صریح استفاده شده است. برای مدلسازی ابزار بدلیل عدم دخالت دنباله ابزار، تنها قسمت کروی آن لحاظ گردید. شکل 8 نمای کلی مدل مربوطه را نشان می‌دهد.

ورق آلومنیومی توسط 10000 المان پوسته‌ای مربعی S4R شبکه بندی شد. ابزار سرکروی و صفحه پشتیبان به ترتیب بصورت صلب تحلیلی[3] و صلب گسسته[4] تعریف گردیدند. از مدلسازی ورق گیر صرف نظر شد و به جای آن شرط مرزی مناسب به لبه‌های ورق برای محدود کردن حرکت آن اعمال

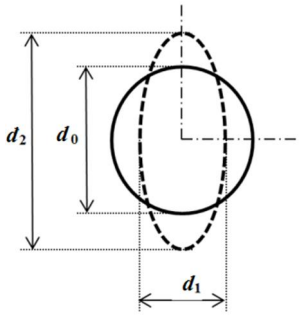

Fig.6 The initial circle and the deformed ellipse for measuring the in-plane strains

شکل 6 دایره اولیه و بیضی تغییر شکل یافته جهت اندازه گیری کرنش های صفحه ای

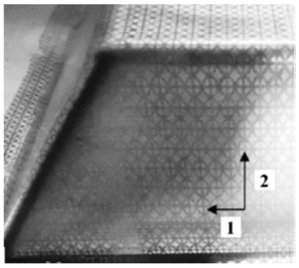

Fig.7 The deformed circle grids on a truncated pyramid

شکل 7 شبکه دایره ای حکاکی شده بعد از تغییر شکل بر روی هرم ناقص

[1] Wire cut

[2] Mylar strip ruler
[3] Analytical rigid
[4] Discretized rigid

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.33.4]

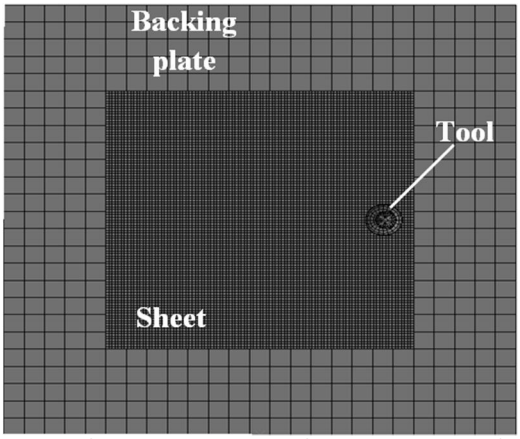

Fig.8 The finite element model of SPIF in Abaqus software

شکل8 مدل المان محدود شکل دهی تدریجی تک نقطه ای در نرم افزار آباکوس

گردید. خواص مکانیکی ورق مطابق جداول 1 و 2 به نرم افـزار داده شـد. در این پژوهش، ورق بصورت ناهمسانگرد طبـق معیـار تسـلیم Hill48 در نظـر گرفته شد. مقادیر ناهمسانگردی برای نرم افزار آباکوس از طریق روابط 5 تا 7 بر اساس ضرایب لنکفورد بدست آمد [15].

$$R_{22} = \sqrt[2]{\frac{R90\,(R0+1)}{R0(R90+1)}} \quad (5)$$

$$R_{12} = \sqrt[2]{\frac{3R90\,(R0+1)}{(2R45+1)(R90+R0)}} \quad (6)$$

$$R_{33} = \sqrt[2]{\frac{R90\,(R0+1)}{(R90+R0)}} \quad (7)$$

مقادیر R_{11}، R_{13} و R_{23} نیز برابر با 1 می باشد. برای تعریف شرایط تماس بین ابـزار و ورق، اصـطکاک از نـوع پنـالتی و بـین ورق و قالـب از نـوع بی‌اصطکاک لحاظ گردید. همچنین مقدار ضریب اصطکاک با توجه به کارهای پیشین [1] و با استفاده از روانکار مناسب برابر با 0.05 انتخاب گردید. مسیر حرکت ابزار توسط زیر برنامه VDISP در محیط برنامه نویسی فرترن مطـابق با آزمون تجربی نوشته شد و در نرم افزار آباکوس تعریف گردید. این زیر برنامه از توابع تعریف شده در نرم افزار آباکوس می باشد و به عنوان شرط مرزی جابه‌جایی در سه جهت اصلی به ابزار اعمال می گردد. برای کاهش زمان شبیه سازی از مقیاس زمانی به نحوی استفاده شد که همواره نسبت انرژی جنبشی در برابر انرژی درونی بسیار ناچیز می باشد.

4- نتایج و بحث

4-1- اعتبار سنجی

برای نشان دادن صحت نتایج شبیه سـازی از نتـایج آزمـون تجربـی اسـتفاده می‌شود. جهت انجام اعتبار سنجی توزیع ضخامت از مسیر شـماره 1 مطـابق شکل 9 برای آزمون تجربی و شبیه سازی استفاده گردید. برای این کـار از دو هندسـه هـرم مطـابق جـدول 3 اسـتفاده شـد. همچنـین شـکل 10 مسـیر شماره 2 که در ادامه از آن استفاده خواهد شد را نشان می‌دهد.

مسیر 1 از مرکز هرم شروع شده و تا لبه دیواره هرم امتداد دارد و نتـایج مربوط به دیواره هرم را نشان می‌دهد. مسیر 2 نیز از لبه گوشه هرم شـروع و در مرکز هرم پایان می یابد و نتایج در گوشه های هرم را بـه خـوبی نمـایش می دهد.

جدول 3 هندسه های هرم استفاده شده جهت اعتبار سنجی

Table 3 The geometric parameters of the truncated cone used for validation

	زاویه دیواره	قطر ابزار (mm)	ابعاد قاعده هرم (mm)	عمق نهایی(mm)
1#	60^0	10	129×129	50
2#	70^0	10	129×129	12

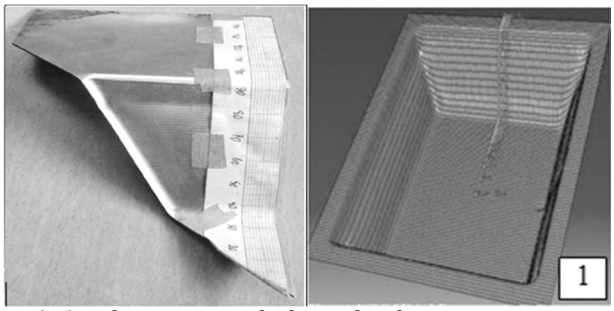

Fig.9 Path1 to measure thickness distribution

شکل 9 مسیر شماره 1 برای بررسی توزیع ضخامت

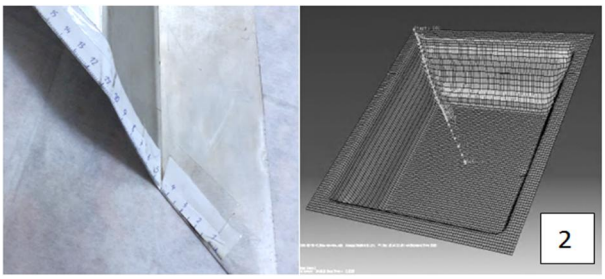

Fig.10 Path2 to measure thickness distribution

شکل 10 مسیر شماره 2 برای بررسی توزیع ضخامت

در شکل های 11 و 12 توزیع ضخامت بدست آمده از آزمون تجربی و شبیه-سازی برای هندسه‌های بیان شده در جدول 3 نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد روند تغییرات ضخامت پـیش بینـی شـده توسـط مـدل اجزای محدود در مسیر شماره 1 برای هر دو هندسه انتخابی مطابقت خـوبی با نتایج تجربی دارد. در شکل های 11 و 12، منظور از Sth-exp ، ضـخامت بدست آمده از دستگاه ضخامت سنج، Sth-cae، ضخامت بدست آمده از نرم-افزار آباکوس و Sth-pe ، ضخامت بدسـت آمـده از طریـق مقـادیر کـرنش و معادلات 2 تا 4 می‌باشد. با توجه به شکل 11 مشاهده می‌شـود در حالـت 1، اختلاف در بیشترین حالت کمتر از 5% است که بـین روش Sth-cae و Sth-pe می‌باشد و می‌تواند قابل قبول باشد.

همچنین بیشترین نازک شدگی در دیواره هرم وجود دارد و در کف ظـرف تقریبا هیچ تغییر ضخامتی رخ نمی‌دهد. با توجه به شکل 12، در حالت 2 که هرم با زاویه دیواره 70 درجه شکل دهی شـد، نتـایج توزیـع ضـخامت بـه دو روش شبیه سازی و استفاده از مقادیر کرنش با هم مقایسه گردید و اخـتلاف آنها کمتر از 3% بود که تطابق خوبی را بین نتایج شبیه سازی و تجربی نشان می‌دهد. محل نازک شدگی در هر صورت در دیواره ظرف اتفاق می افتـد کـه این قضیه کاملا با نتایج آزمون تجربی مطابقت دارد.

4-2-استراتژی های تغییر شکل

در ایـن پـژوهش بـرای بهبـود نـازک شـدگی ورق، دو نـوع اسـتراتژی دو مرحله ای برای تغییر شکل ورق بصورت زیر پیشنهاد می‌گردد. در هـر دو نوع استراتژی بکار رفته، هدف وارد کردن منطقه بیشتری از ورق در شکل

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.33.4]

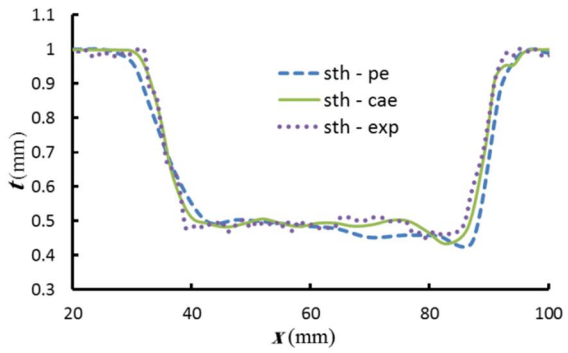

Fig.11 The comparison of thickness distribution for case 1 in path 1

شکل 11 مقایسه توزیع ضخامت برای حالت 1 در مسیر1

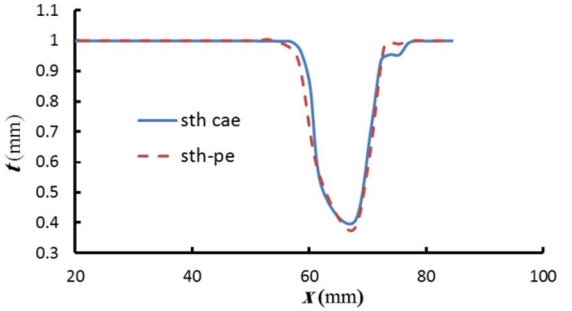

Fig.12 The comparison of thickness distribution for case 2 in path 1

شکل 12 مقایسه توزیع ضخامت برای حالت 2 در مسیر1

دهی می باشد تا از این طریق از نازک شدگی موضعی شدید جلوگیری شود.

4-2-1- استراتژی اول: افزایش تدریجی زاویه

این استراتژی مطابق با شکل 13 به گونه‌ای تعریف شده که در مرحله اول هرم با زاویه دیواره کمتر از هرم نهایی و با قطر ابزار بزرگتر از ابزار نهایی شکل دهی می‌شود و در مرحله دوم هرم نهایی مورد نظر شکل می‌گیرد. ابزار به کار رفته در مرحله اول برابر با 18 mm است. شعاع گوشه‌های هرم با این ابزار افزایش می یابد و باعث می‌شود ورق به یکباره دچار تغییر شکل شدید نگردد. در مرحله دوم با ابزار قطر 10 mm می‌توان آنرا تصحیح کرد.

برای این استراتژی از پنج زاویه متفاوت برای مرحله اول استفاده گردید که مطابق جدول 4 می‌باشد. بعد از انجام شبیه سازی اجزای محدود مقادیر توزیع ضخامت مطابق با شکل 14 نشان داده شده است. همانطور که در شکل 14 مشاهده می‌گردد، هرچه زاویه دیواره در مرحله اول کمتر باشد، ماده بیشتری دچار تغییر شکل می‌شود و این موجب کاهش نازک شدگی در ورق

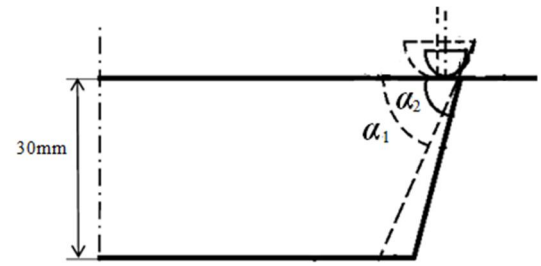

Fig.13 Schematic of the first strategy

شکل 13 نمای شماتیک از استراتژی اول دو مرحله ای

می‌گردد اما این روند تا زاویه 55° صدق می‌کند و از این نقطه به بعد هرچه زاویه را کاهش دهیم بدلیل اختلاف شیب زیاد بین هرم اول و دوم، ورق به یکباره دچار کرنش زیاد گردیده و این خود موجب نازک شدگی شدید و پارگی در ورق می‌گردد. شایان ذکر است که نتیجه گیری فوق تنها برای زوایای مورد بررسی در جدول 4 صادق می باشد. نکته بعدی که در این نمودار وجود دارد این است که باید زاویه دیواره در مرحله اول به شکل مناسب طراحی شود. انتخاب زاویه دیواره 70° موجب گردیده که حتی نازک شدگی از حالت تک مرحله ای نیز بیشتر گردد. مقادیر ضخامت کمینه برای زوایای بکار رفته در این استراتژی مطابق با شکل 15 می‌باشد. همانطور که از نتایج بر می‌آید، با بکار بردن این استراتژی نازک شدگی در ورق نسبت به روش تک مرحله‌ای کاهش پیدا کرده است.

یکی از محدودیت های شکل دهی چند مرحله‌ای، برآمدگی کف ظرف می باشد که توسط محققان مختلفی بیان شده است [12]. مقدار برآمدگی کف ظرف در این استراتژی قابل قبول است و با توجه به شکل 16، در حالتی که زاویه دیواره هرم مرحله اول برابر با 55° بود، حدود 3 mm برآمدگی مشاهده گردید.

نتایج توزیع ضخامت شبیه سازی اجزای محدود برای استراتژی اول بدست آمده در شکل 17 نشان می‌دهد، نازک شدگی از دیواره هرم در مرحله اول به گوشه هرم در مرحله دوم منتقل شده است.

جدول 4 زوایای بکار رفته برای هرم اولیه در استراتژی اول

Table 4 Various wall angles used for the initial pyramid in first strategy

حالت	1	2	3	4	5
زاویه دیواره هرم اولیه (درجه)	50	55	60	65	70

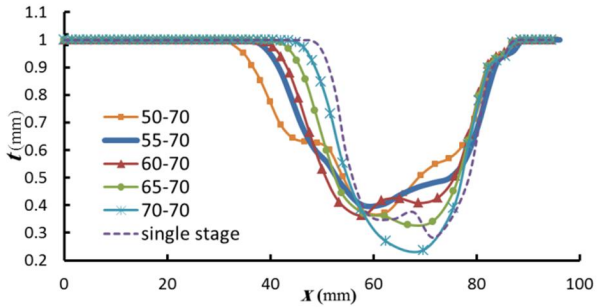

Fig.14 The predicted thickness distributions along path 1 based on Table 4

شکل 14 توزیع ضخامت شبیه سازی برای حالت های بکار رفته مطابق با جدول 4 در مسیر 1

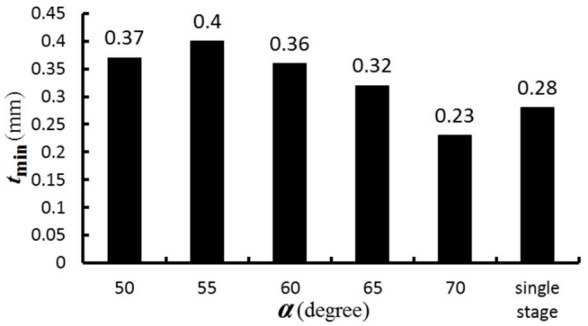

Fig.15 The minimum thickness along Path 1 based on Table 4

شکل 15 مقادیر ضخامت کمینه برای حالت‌های مختلف مطابق با جدول 4 در مسیر 1

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.33.4]

4-2-2-استراتژی دوم : افزایش تدریجی شعاع گوشه

در استراتژی دوم مطابق با شکل 18 جهت افزایش شعاع گوشه در مرحله اول همان قطر ابزار 10 mm استفاده می شود، با این تفاوت که برای مرحله اول مسیر حرکت ابزار به گونه ای تعریف می‌شود که هرم اولیه با شعاع گوشه‌ای غیر از شعاع گوشه هرم نهایی شکل می‌گیرد. برای این کار از نرم افزار پاورمیل استفاده شد، به طوری که هندسه شکل مورد نظر به نرم افزار داده می‌شود و مختصات مکان نقاط بر روی مسیر حرکت ابزار از نرم افزار استخراج می‌گردد. مختصات این نقاط به نرم افزار آباکوس داده می‌شود و تحلیل مساله انجام می‌گردد. برای این استراتژی، پنج مقدار برای پارامتر شعاع گوشه بررسی گردید که مطابق جدول 5 می‌باشد.

در مرحله اول زاویه دیواره هرم برابر با °60 و گام عمودی 1 mm می‌باشد. شبیه سازی اجزای محدود برای این استراتژی انجام گرفت و نتایج توزیع ضخامت در مسیر شماره (1) بررسی گردید که مطابق با شکل 19 می‌باشد.

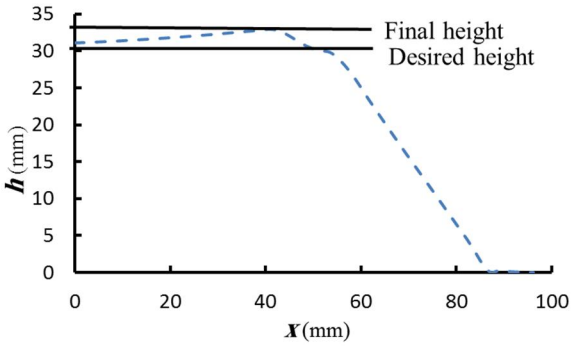

Fig.16 The predicted profile of the truncated pyramid with the 70 wall angle for Case 2 of the first strategy

شکل 16 هندسه هرم ناقص °70 برای حالت (2) از روش استراتژی اول

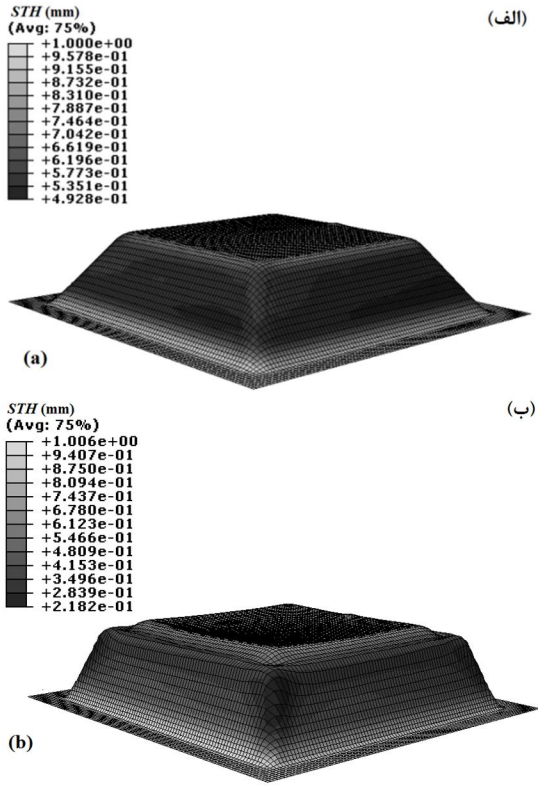

Fig.17 The predicted thickness distribution of the first strategy: a) the first stage b) the second stage

شکل 17 توزیع ضخامت شبیه سازی استراتژی اول الف) مرحله اول ب) مرحله دوم

جدول5 مقادیر شعاع گوشه هرم اولیه بکار رفته در استراتژی دوم

Table 5 Different radii for the corners of a truncated pyramid in the second strategy

حالت	1	2	3	4	5
اندازه شعاع گوشه هرم اولیه(mm)	6	7.5	10	12	15

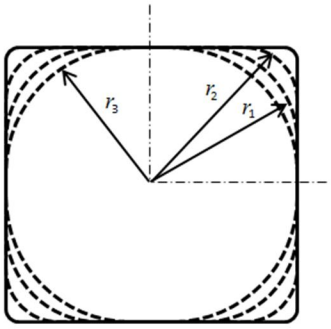

Fig.18 Schematic of second strategy

شکل 18 نمای شماتیک از استراتژی دوم دو مرحله‌ای

نتایج توزیع ضخامت برای استراتژی دوم نشان می‌دهد، با افزایش شعاع گوشه می‌توان توزیع ضخامت یکنواخت‌تری را در ورق شاهد بود، چون با افزایش شعاع گوشه از میزان تنش‌های دو محوره وارده به گوشه‌های هرم کاسته می‌شود. از طرفی با افزایش شعاع گوشه در مرحله اول، نقاطی از ورق کمتر دچار تغییر شکل شده که تاثیر منفی در نازک شدگی ورق خواهد داشت. با توجه به نتایج بدست آمده از شبیه سازی اجزای محدود، مقدار مناسب برای شعاع گوشه، 7.5 mm می‌باشد. مقادیر ضخامت کمینه برای حالت های بکاررفته در استراتژی دوم بصورت شکل 20 می‌باشد.

همانطور که شکل 20 نشان می‌دهد، ضخامت کمینه با این استراتژی نسبت به روش تک مرحله‌ای بهبود یافته است، که در این بین حالت (2) از استراتژی دوم دارای بیشترین ضخامت کمینه می باشد. مقدار برآمدگی انتهای ظرف در این استراتژی بسیار ناچیز است. در شکل 21 که از نتایج مربوط به حالت (2) از استراتژی دوم و در مسیر (2) بدست آمده، نشان می‌دهد مقدار برآمدگی در هرم نهایی برابر با 0.6 mm می‌باشد. نتایج توزیع ضخامت شبیه سازی اجزای محدود برای استراتژی دوم بدست آمده در شکل 22 نشان می‌دهد، نازک شدگی از دیواره هرم در مرحله اول به گوشه هرم در مرحله دوم منتقل شده است. جهت ادامه بررسی استراتژی‌ها، هر کدام از مدل های منتخب مطابق با جدول 6 نامگذاری شد.

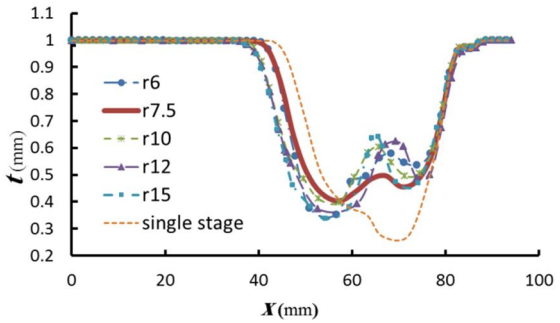

Fig.19 The predicted thickness distributions along path 1 for the second strategy

شکل 19 توزیع ضخامت شبیه سازی در مسیر 1 برای هرم ناقص 70^0 به روش استراتژی دوم

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.33.4]

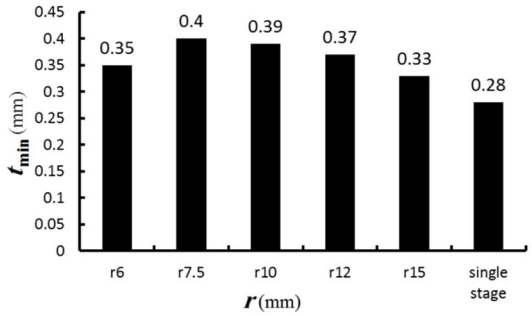

Fig.20 The minimum thicknesses along path 1 for various radii in the second strategy

شکل 20 مقادیر ضخامت کمینه برای حالت‌های مختلف استراتژی دوم دو مرحله‌ای در مسیر 1

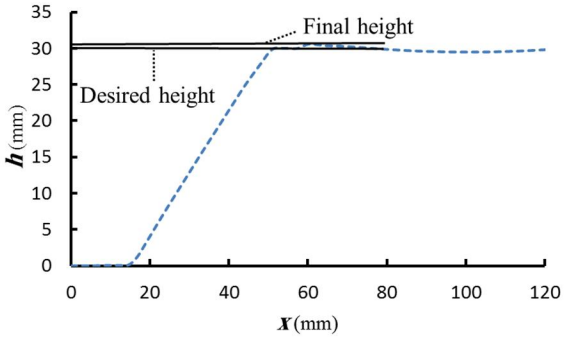

Fig.21 The predicted profile of the truncated pyramid with the 70 wall angle for Case 2 of the second strategy

شکل 21 هندسه هرم ناقص °70 برای حالت (2) از روش استراتژی دوم

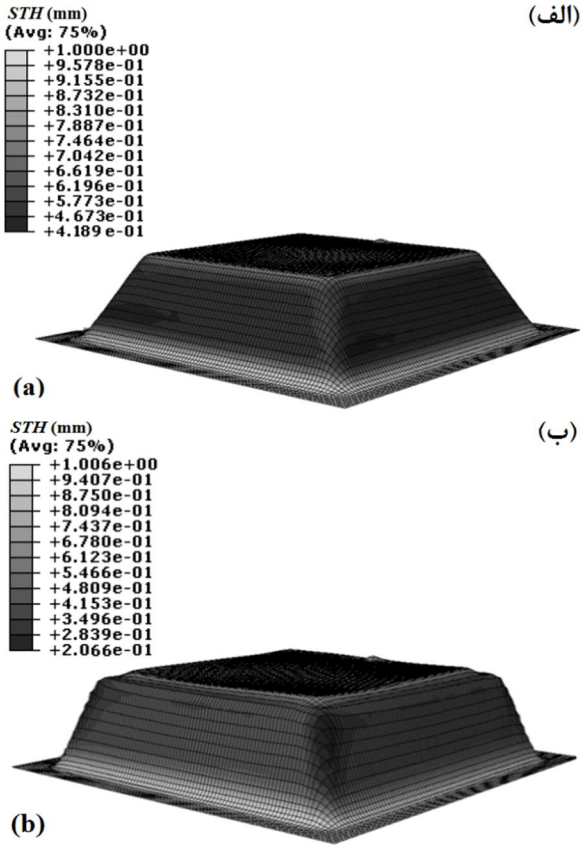

Fig.22 The predicted thickness distribution of the second strategy: a) the first stage b) the second stage

شکل 22 توزیع ضخامت شبیه سازی استراتژی دوم الف) مرحله اول ب) مرحله دوم

جدول 6 مدل های منتخب در استراتژی های بکار رفته

Table 6 The selected cases among the first and second strategies

نوع استراتژی	اول	دوم
نام مدل منتخب	A	B
پارامترهای بکار رفته در هرم اولیه	قطر ابزار 18 mm گام عمودی 1 mm زاویه دیواره °55 شعاع گوشه هرم 5 mm	قطر ابزار 10 mm گام عمودی 1 mm زاویه دیواره °60 شعاع گوشه هرم 7.5 mm

شایان ذکر است که مسیر توزیع ضخامت بررسی شده تا کنون، مسیر 1 بوده است. برای بررسی بیشتر، ضخامت کمینه در مسیر 2 نیز بدست آمد که در شکل 23 نمایش داده می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود با استراتژی های A و B مقدار ضخامت کمینه در مسیر 1 که همان دیواره هرم می‌باشد نسبت به حالت تک مرحله‌ای بهبود می‌یابد ولی در مسیر 2 که گوشه هرم می‌باشد تغییر چشمگیری پیدا نمی‌کند.

یکی از معیارهای شکل پذیری در شکل دهی تدریجی، میزان حداکثر عمق شکل‌دهی در یک زاویه ثابت می‌باشد. شکل 24 نتایج تجربی حداکثر عمق شکل‌دهی در زوایای مختلف را برای قطرهای ابزار 10 mm و 18 mm با گام عمودی 1 mm در شکل دهی تدریجی تک مرحله‌ای هرم ناقص را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین عمق شکل‌دهی برای هرم با زاویه °70 برابر با 13 mm است.

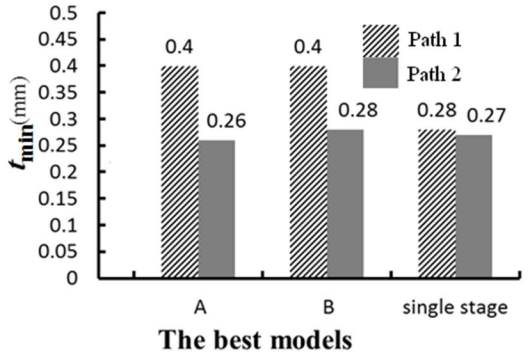

Fig.23 The comparison of the minimum thickness in single and two-stage strategies along Path 1 and 2

شکل 23 مقایسه ضخامت کمینه برای روش‌های دو مرحله‌ای و تک مرحله‌ای در مسیرهای 1 و 2

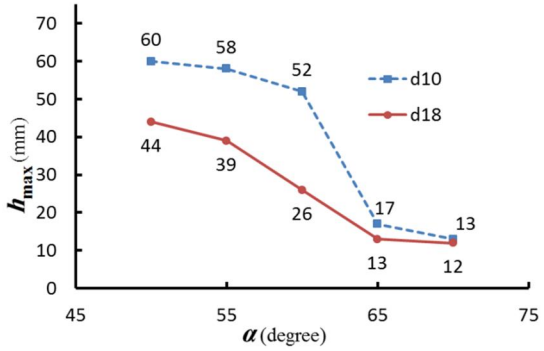

Fig.24 The maximum forming depth in SPIF of the truncated cone measured from experiments

شکل 24 حداکثر عمق شکل‌دهی هرم در آزمون تجربی شکل‌دهی تدریجی تک مرحله‌ای

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.33.4]

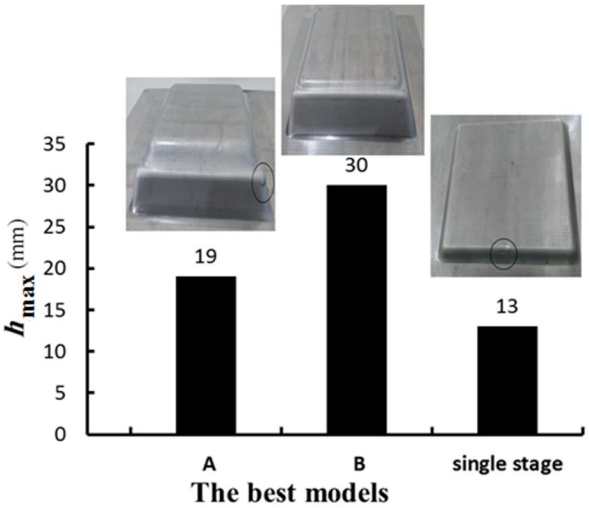

Fig.25 The comparison of the maximum forming depth in the single and two-stage strategies based on the experiments

شکل 25 مقایسه حداکثر عمق شکل دهی در استراتژی های تک مرحله ای و دو مرحله ای بر اساس آزمون تجربی

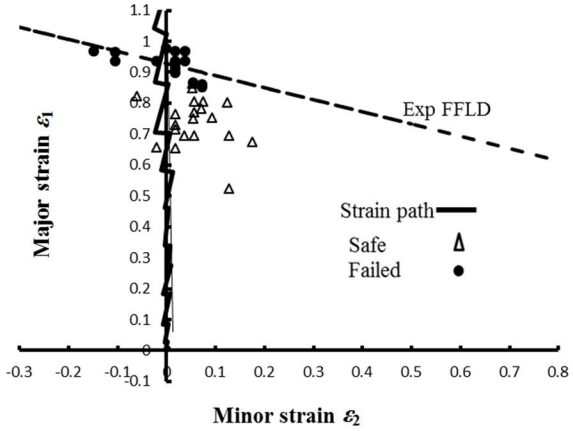

Fig.26 The experimental FFLD and the predicted strain path for a truncated pyramid with the 70 wall angle in the single-stage strategy

شکل 26 منحنی حد شکل دهی شکست تجربی و مسیر کرنش پیش بینی شده از شبیه سازی هرم ناقص °70 به روش تک مرحله ای

در شکل 25 بیشترین عمق شکل دهی با استفاده از استراتژی های A و B بیان شده در جدول 6 با حالت تک مرحله‌ای مقایسه می‌شود. همانطور که از مقادیر تجربی نیز مشاهده می‌گردد و از نتایج شبیه سازی نیز پیش بینی می‌شود، محل پارگی از روی دیواره هرم در حالت تک مرحله‌ای به قسمت گوشه در حالت دو مرحله‌ای A منتقل شده است.

با توجه به شکل های 23 و 25 مشاهده می‌شود مقادیر ضخامت کمینه برای استراتژی های اول و دوم تقریبا یکسان است ولی حداکثر عمق شکل دهی در استراتژی دوم بیشتر از استراتژی اول می‌باشد. برای بررسی بیشتر پیرامون علل این پدیده نمودار های حد شکل دهی شکست برای مدل های A و B و روش تک مرحله ای مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

4-3- نمودار حد شکست

یکی از مواردی که در آزمایش‌های شبیه سازی و تجربی جهت پیش بینی حد شکل پذیری ورق صورت می‌گیرد، مطالعه رفتار کرنش ورق در ناحیه پارگی می‌باشد. اندازه‌گیری قطرهای کوچک و بزرگ بیضی، حول نقطه‌ی پارگی در نمونه‌های تجربی که قبل از شکل دهی روی آنها حکاکی صورت گرفته بود، انجام گرفت (شکل7). به این منظور تعداد ده عدد از بیضی های حول محل پارگی مورد اندازه‌گیری قرار گرفت و بعد از اندازه‌گیری کرنش در پیرامون نقطه پارگی نمونه‌های تجربی مربوط به هرم ناقص به روش تک مرحله‌ای و استراتژی‌های دو مرحله‌ای، مقادیر آن روی نمودار آورده شد. آن سمت از ورق که هم در نمونه تجربی و هم در شبیه سازی اجزای محدود، با ابزار درگیری ندارد مورد ارزیابی قرار گرفت. در نمودارهای مربوط به حد شکست، دایره های توپر مربوط به نقاطی است که مجاور نقطه پارگی بوده و دایره های توخالی نقاطی را نشان می‌دهد که در فاصله دورتری از نقطه پارگی قرار دارند. بطور ساده و اولیه می توان نمودار حد شکست را به صورت یک خط با شیب منفی در مختصات کرنش های اصلی صفحه‌ای بیان کرد [16]. از طریق نرم افزار اکسل[1]، خطی حول مختصات نقاطی که دچار شکست شدند عبور داده و با نام خط FFLD نامگذاری شد. شکل 26 نمودار FFLD مربوطه را نشان می‌دهد.

مسیر کرنش نقطه ای از ورق که دارای بیشترین کرنش معادل می‌باشد و احتمال پارگی در آن زیاد است، توسط مدلسازی المان محدود استخراج گردید و بر روی شکل 26 در حالت تک مرحله‌ای نمایش داده شده است. نقطه مذکور برای حالت تک مرحله ای بر روی دیواره هرم است. همانطور که مشاهده می‌شود، در روش تک مرحله ای مقدار کرنش بیشینه بسیار بیشتر از کرنش کمینه می‌باشد و نشان می‌دهد کشش ورق در جهت اصلی بسیار بیشتر است و نزدیک به حالت کرنش صفحه ای می‌باشد. به کمک استراتژی های مختلف می‌توان مسیر کرنش را تغییر داده و در نتیجه پارگی دیرتر اتفاق افتاد. شکل 27 مسیر کرنش و خط FFLD را برای مدل A نشان می‌دهد. مقادیر بدست آمده از اندازه گیری کرنش های بیشینه[2] و کمینه[3] بر روی نمونه تجربی و شبیه سازی و در منطقه پارگی بدست آمده است. منطقه مورد بررسی در نمونه شبیه سازی، محل ایجاد کرنش معادل بیشینه است که این منطقه بر روی گوشه های هرم می‌باشد.

با توجه به شکل 27 مشاهده می‌شود، با ارائه استراتژی دو مرحله‌ای A مقادیر کرنش اصلی کمینه نسبت به حالت تک مرحله‌ای افزایش پیدا کرد و موجب کاهش شیب مسیر کرنش می‌گردد. شکل 28 نتایج مربوط به مدل B از استراتژی دو مرحله‌ای را نشان می‌دهد.

همانطور که انتظار می‌رفت، مسیر کرنش مدل B که در آزمون تجربی نیز بیشترین عمق شکل دهی را داشت، دارای شیب کمتری نسبت به مسیر کرنش مدل A و حالت تک مرحله‌ای است. لذا با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان به این نتیجه رسید که با استفاده از استراتژی دو مرحله‌ای مسیر کرنش به نحوی تغییر می‌یابد که می‌تواند پدیده شکست را به تاخیر بیاندازد.

همانطور که از نمودار FFLD تجربی بر می‌آید (شکل 26)، ضخامت ورق در لحظه پارگی برای حالت های مختلف کرنش (مسیرهای کرنش متفاوت) ثابت نمی‌باشد؛ بطوریکه هر چه شیب مسیر کرنش از حالت کرنش صفحه‌ای به سمت راست جا به جا شود (از حالت تک مرحله‌ای به حالت مدل A و به حالت مدل B) ضخامت کمینه در زمان پارگی کاهش می‌یابد. به همین دلیل بر اساس آزمایش‌های تجربی و شبیه سازی اجزای محدود (شکل 23 و 25)، با وجود یکسان بودن ضخامت کمینه در گوشه های هرم

[1] Excel
[2] Major
[3] Minor

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.33.4]

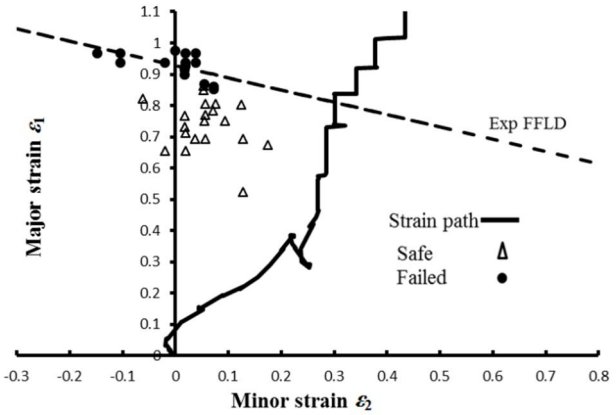

Fig.27 The experimental FFLD and the predicted strain path for a truncated pyramid with the 70 wall angle in the case A of the two-stage strategy

شکل 27 منحنی حد شکل دهی شکست تجربی و مسیر کرنش پیش بینی شده از شبیه سازی هرم ناقص °70 برای مدل A

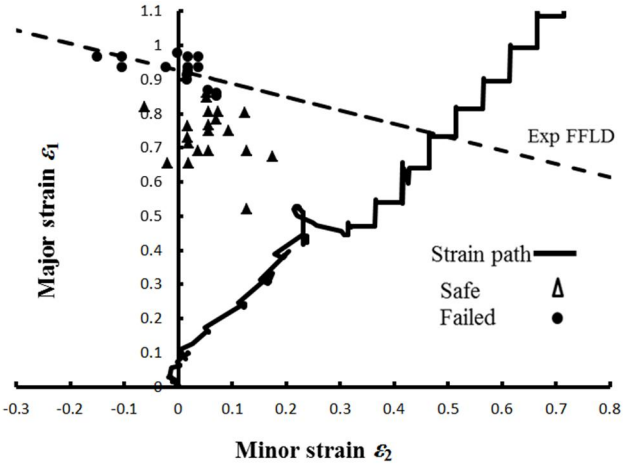

Fig.28 The experimental FFLD and the predicted strain path for a truncated pyramid with the 70 wall angle in the case B of the two-stage strategy

شکل 28 منحنی حد شکل دهی شکست تجربی و مسیر کرنش پیش بینی شده از شبیه سازی هرم ناقص °70 برای مدل B

برای استراتژی های A و B، پارگی در حالت B رخ نمی‌دهد ولی در حالت A رخ می‌دهد. برای مطالعه دقیق تر بحث پارگی باید مدل‌های شکست نرم مناسب به کار گرفته شوند که خارج از اهداف پژوهش حاضر می‌باشد.

5- نتیجه گیری

بر اساس مطالعه انجام شده در تحقیق حاضر بر روی شکل دهی‌های تدریجی تک نقطه‌ای دو مرحله‌ای متفاوت، یکی از راه های جلوگیری از نازک شدگی زیاد در شکل دهی یک هرم، گسترش منطقه تغییر شکل به کف ظرف و جابجایی مواد از کف ظرف به دیواره ظرف توسط شکل دهی دومرحله‌ای می‌باشد. تبدیل یکباره ورق فلزی به شکل نهایی سبب افزایش تغییر شکل‌ها و کشش در ورق می‌شود که می‌تواند منجر به نازک شدگی شدید شده و قابلیت شکل پذیری ورق را کاهش دهد. به همین جهت تغییر شکل دو مرحله‌ای ورق به شکل نهایی سبب کاهش کشش در ورق و در نهایت کاهش نازک شدگی می‌شود. میزان گسترش منطقه تغییر شکل به کف ظرف و کاهش کشش در ورق توسط مسیر تغییر شکل (استراتژی شکل دهی) تعیین می‌شود. بر همین اساس در این پژوهش، با ارائه استراتژی تغییر شکل دو مرحله‌ای برای شکل دهی تدریجی یک هرم ناقص با زاویه

دیواره 70 درجه، با توجه به نتایج بدست آمده از شبیه سازی اجزای محدود، مقدار ضخامت کمینه در مسیر 1(دیواره هرم) از مقدار 0.28 mm در حالت تک مرحله‌ای به 0.4 mm در حالت دو مرحله‌ای افزایش یافت. همچنین نتایج شبیه سازی و تجربی نشان داد که با استفاده از استراتژی دو-مرحله‌ای می‌توان حد شکل پذیری ورق را که در این پژوهش با معیار حداکثر عمق شکل‌دهی معرفی شد، افزایش داد. در این زمینه حداکثر عمق شکل دهی از 13 mm در حالت تک مرحله‌ای به 30 mm در حالت دومرحله‌ای به روش استراتژی دوم، افزایش پیدا نمود. با بررسی مسیر کرنش استراتژی های دو مرحله‌ای منتخب نشان داده شد که مسیر کرنش از حالت کرنش صفحه‌ای در شکل دهی تک مرحله‌ای به سمت ناحیه کشش دو محوری سوق پیدا می‌کند که می‌تواند دلیلی برای افزایش شکل پذیری توسط استراتژی دو مرحله‌ای باشد.

6- مراجع

[1] M. S. Shim, J. J. Park, The formability of aluminum sheet in incremental forming, *Journal of Material Processing and Technology*, Vol. 113, No. 1, pp. 654–658, 2001.

[2] Y. H. Kim, J. J. Park, Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 115, No. 2, pp. 42–46, 2002.

[3] D. Y. Seong, M. Z. Haque, J. B. Kim, T. B. Stoughton, J. W. Yoon, Suppression of necking in incremental sheet forming, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 51, No. 15, pp. 2840–2849, 2014.

[4] M. Z. Haque, J. Whan Yoon, Stress based prediction of formability and failure in incremental sheet forming, *International Journal of Material Forming*, DOI: 10.1007/s12289-015-1237-8, 2015.

[5] G. L. Manco, G. Ambrogio, Influennce of thickness On formabilityin 6082-T6, *International Journal of Material Forming*, Vol. 3, No. 1, pp. 983-987, 2010.

[6] L. Manco, L. Filice, G. Ambrogio, Analysis of the thickness distribution varying tool trajectory in single-point incremental forming, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 225, No. 3, pp. 348-356, 2011.

[7] L. Jun-chao, Z. Chong, Tong-gui, Thickness distribution and mechanical property of sheet metal incremental forming based on numerical simulation, *Transactions of nonferrous metal society of china*, Vol. 22, No. 1, pp. s54-s60, 2012.

[8] J. Verbert, B. Belkassem, C. Henrard , A. M. Habraken , J. Gu , H. Sol, B. Lauwers, J. R. Duflou, Multi-Step toolpath approach to overcome forming limitations in single point incremental forming, *International journal of material forming*, Vol. 1, No. 1, pp. 1203-1206, 2008.

[9] M. Bambach, B. Taleb Araghi, G. Hirt, Strategies to improve the geometric accuracy in asymmetric single point incremental forming, *Production Engineering-Research and Development*, Vol. 3, No. 2, pp. 145-156, 2009.

[10] L. Filice, G. Ambrogio, M. Gaudioso, Optimised tool-path design to reduce thinning in incremental sheet forming process, *International journal of material forming*, Vol. 6, No. 1, pp. 173-178, 2011.

[11] M. J. Mirnia, B. Mollaei Dariani, H. Vanhove, J. R. Duflou, An investigation into thickness distribution in single point incremental forming using sequential limit analysis, *International Journal of Material Forming*, Vol. 7, No. 4, pp. 469-477, 2013.

[12] M. J. Mirnia, B. Mollaei Dariani, An investigation on multistage incremental forming to control thinning in a truncated cone of an aluminum alloy sheet, *Journal of Modares Mechanic Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 262-270, 2014. (in Persian فارسی)

[13] X. shi, G. Hussain, G. Zha, M. Wu, F. kong, Study on formability of vertical parts formed by multi-stage incremental forming, *International Journal Advance Manufacturing Technology*, Vol. 75, No. 5, pp. 1049-1053, 2014.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.33.4]

[14] V. A. M. Cristino, L. Montanari, M. B. Silva, P. A. F. Martins, Towards square hole-flanging produced by single point incremental forming, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, Vol. 229, No. 5, pp. 380-388, 2015.

[15] *Abaqus analysis user's manual*, version 6.13, 2013.

[16] M. B. Silva, P. S. Nielsen, N. Bay, P. A. F. Martins, Failure mechanisms in single-point incremental forming of metals, *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 56, No. 9, pp. 893-901, 2011.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.33.4]