



شبیه‌سازی عددی توزیع تنش پسماند در فرآیند نورد سرد ورق آلیاژ آلومینیوم

سینا داوری - دانشجوی کارشناسی ارشد طراحی کاربردی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان

E-mail: sinadavoodi69@gmail.com

چکیده: شناسایی تنش های پسماند در صنعت از اهمیت زیادی برخوردار است چرا که وقتی جسم تحت تنش خارجی قرار می گیرد، این تنش خارجی به تنش پسماند افزوده می شود همانطور که می دانید قطعات صنعتی همواره تحت بارگذاری های مختلف سیکی و شکست های ناشی از خستگی قرار دارند . بزرگی و توزیع تنش های پسماند از عوامل موثر در این زمینه می باشند. فرآیند نورد یکی از متداول ترین فرآیندهای ساخت قطعات و پروفیلها است. عملیات نورد سرد با ایجاد تنش پسماند فشاری در سطح قطعه، تاثیر به سزایی در حد دوام خستگی ماده دارد. در این پژوهش فرآیند نورد سرد بر روی نمونه ورقی از جنس آلیاژ آلومینیوم 7050T74 با رفتار الاستیک-پلاستیک و مستقل از دما، در نرم افزار اجزاء محدود شبیه سازی شده است و نحوه توزیع تنشهای پسماند ایجاد شده در نمونه مذکور بررسی می گردد.

واژه های کلیدی: تنش پسماند، نورد سرد، شبیه سازی به روش اجزا محدود ، آلیاژ آلومینیوم، الاستیک- پلاستیک.

Numerical Simulation of Residual Stress Distribution in Al Alloy Plate After a Cold Rolling Process

S. Davari, MSc. Student, Dept. of Applied Design, The Faculty of Mech. Eng., TIAU.

Abstract: Many efforts have been done in the recent years to decrease emission and fuel consumption in compression ignition engines. Alternative fuels are one of the best methods to meet this aim. Dimethyl ether is the one of the fuels that due to its properties such as high cetane number, low auto ignition temperature, lowest emissions due to the presence of oxygen in its molecule is one of the best alternative fuels. In this paper, combustion and emission characteristics of a CIDI engines by use of DME as an alternative fuel has been investigated via numerical simulation and CFD procedure. NO_x and Soot are the major emissions in the CIDI engines. Due to the high presence of oxygen in DME molecule Soot emission is negligible in the exhaust gas. In this paper we investigated the ways of NO_x emission reduction in a DME compression ignition engine. The results show good agreement with the literature.

Keywords: DME, IC engines, NO_x emission reduction, Combustion , fuel consumption reduction.

۱- مقدمه

فرایند نورد، یکی از متداولترین فرایندها برای تولید فراورده های فلزی به ویژه فولادها با شکلها و ابعاد مختلف است. به طوری که بیش از 80% از فراورده های فلزی در جهان با این روش تولید می شود. از میان انواع مختلف فرایندهای نورد، نورد تخت از پرکاربردترین فرایندها است به طوری که در کشورهای صنعتی 40 تا 60 درصد محصولات حاصل از فرایندهای مختلف نورد، به وسیله نورد تخت ایجاد میشود. هدف اصلی از انجام این فرآیند کاهش ضخامت یا سطح مقطع قطعه نمونه می باشد. فرآیند نورد به صورت های مختلفی از قبیل طولی، عرضی، پیچشی، مقاطع و ... انجام می گیرد. عمده تغییر شکل در فرآیند نورد صفحه، ورق و تسمه در راستای کاهش ضخامت بوده و در راستای پهنا ثابت است.

فرایند نورد به فرایندی گفته میشود که به کمک حرکت خلاف جهت دو غلتک و فشار حاصل از غلتکها تغییر ضخامت برای قطعه کار مورد نظر حاصل میشود. در این فرایند ماده خام ورودی به کمک نیروهای وارد شده از طرف غلتکها به شکلها و ابعاد دلخواه تغییر میابد. این فرایند حداقل با دو غلتک انجام میشود که این غلتکها نسبت به قطعه کار بسیار بزرگتر و سنگینتر هستند و برای به چرخش درآوردن آنها نیاز به توان زیادی است از این رو در بعضی مواقع از غلتکهای کوچک که به وسیله غلتکهای بزرگتر پشتیبانی میشوند استفاده میگردد. فضای موجود بین دو غلتک از قطعه کار ورودی کوچکتر بوده بنابراین برای ورود قطعه کار به بین دو غلتک نیاز به نیروی اصطکاک است. با ورود قطعه کار به فضای بین دو غلتک قطعه کار فشرده شده و به همراه کاهش ضخامت افزایش طول نیز مییابد. امروزه یکی از پر کاربردترین مواد در بخشهای صنعتی تمامی کشورها، آلومینیم است. آلومینیم خالص، نرم و ضعیف است، اما می توان آلیاژی را با مقادیر کمی از مس، منیزیوم و ... بوجود آورد که این آلیاژها ویژگی های مفیدگوناگونی دارند. این آلیاژها اجزای مهم هواپیماها را می سازند. با توجه به کاربرد آن، مطالعه روی این فلز برای استفاده مفیدتر و جلوگیری از عواقب بعدی بسیار مهم است.

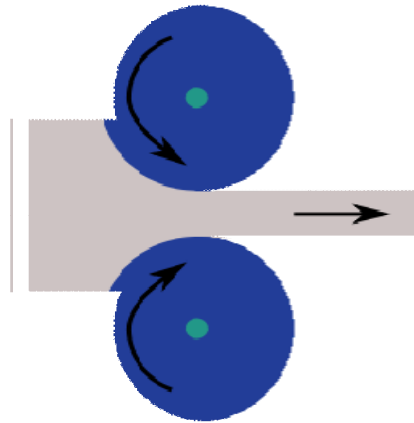
توجه به پیشرفت صنعت و افزایش کاربرد قطعات صنعتی در زندگی بشر، بررسی رفتار خستگی قطعات از اهمیت والایی برخوردار شده است. همواره قطعات مختلف بعد از گذشت مدت زمانی از عمر کاریشان، با توجه به شرایط کاری دچار خستگی شده و می شکنند. این موضوع از اهمیت ویژه ای برخوردار است چون میتواند منجر به ضررهای جانی یا مالی جبران ناپذیری شود. جلوگیری از بروز این شکست و یا به تاخیر انداختن آن از موضوعات مهم و مورد توجه محققان می باشد. بررسی توزیع تنش در سطح قطعات از اهمیت بسیاری برخوردار است تنشهای پسماند تنشهایی هستند که بعد از تغییر شکل دادن و برداشتن بار خارجی به طور کامل از روی قطعه، هنوز در قطعه وجود دارند. طبیعت تنش پسماند به گونه ای است که در مقابل هر تنش کششی تنش فشاری نیز باید وجود داشته باشد، به طوریکه در حالت تعادل باقی بماند که به این حالت خود تعادلی می گویند.

۲- مشخصات مکانیکی ماده

جنس قطعه ی مورد بررسی در این مطالعه آلیاژ آلومینیوم 7050T74 است که ترکیب شیمیایی آن در جدول (۱) قرار داده شده.

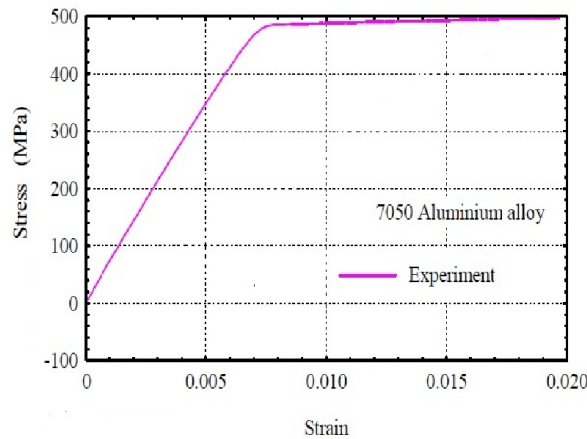
جدول ۱: ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم 7050T74

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zr	Zn	Ti
0.12	0.15	2.6	0.1	2.6	0.04	0.15	6.7	0.06



شکل ۱: نمای شماتیک فرآیند نورد سرد ورق

برای بدست آوردن مشخصات آلیاژ مذکور، با انجام تست کشش روی یک نمونه در آزمایشگاه مکانیک، نمودار تنش- کرنش آلیاژ به صورتی که در نمودار (۱) نشان داده شده است بدست آمد



نمودار ۱: تنش-کرنش آلیاژ آلومینیوم 7050T74

در این پژوهش از مدل مواد الاستیک-پلاستیک با سخت شونده‌گی خطی از نوع ایزوتروپیک استفاده شده است. برای مدل سازی در نرم افزار المان محدود نیاز به مشخصات رفتار الاستیک-پلاستیک ورق خواهیم داشت که این پارامترهای مورد نیاز از جداول استاندارد ASM برای آلیاژ آلومینیوم مورد نظر در دمای محیط استخراج گردیده و در جدول شماره (۲) آمده است.

جدول ۲: مشخصات مکانیکی

Mechanical Properties			
Young Modulus	Poisson Ratio	Yield stresses	Density
71 GPa	0.33	483 MPa	2830 Kg/m ³

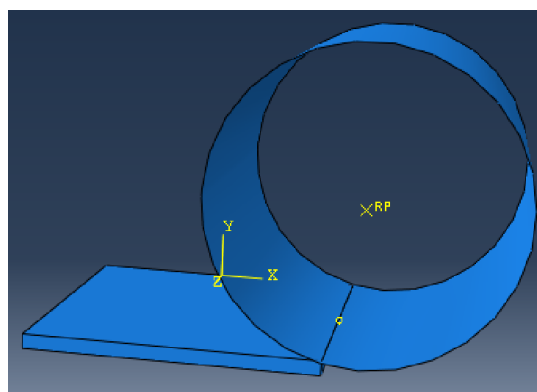
۳- شبیه سازی اجزا محدود

در این تحقیق مدل سازی به صورت سه بعدی انجام شد. جهت مدل سازی این فرآیند از نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS 6.14 استفاده شده که با در اختیار داشتن متدولوژی حلی چون Dynamic Explicit توانایی خوبی در مدل سازی مربوط به فرآیند های شکل دهی فلزات دارد. روش حل دینامیک صریح معمولا برای حل دو گروه از فرآیند های مکانیکی مورد استفاده قرار می گیرد این دو گروه عبارتند از محاسبات پاسخ گذاری دینامیکی و شبیه سازی های شبه استاتیکی که شامل اثرات پیچیده غیر خطی مثل شرایط پیچیده تماس باشند. با توجه به شکل (۱) فرآیند شکل دهی نورد دارای تقارن هندسی بوده ولذا نصف ضخامت ورق و یکی از غلتک ها در نظر گرفته میشود. در جدول (۳) پارامترهای مورد استفاده برای شبیه سازی در این پژوهش مشاهده می شود. البته برای اطمینان از صحت کار با تغییر این پارامترها تحلیل نتایج مشابهی حاصل شده است.

جدول ۳: ابعاد

شعاع غلتک	ضخامت ثانویه ورق	ضخامت اولیه ورق	عرض ورق	طول ورق
40 mm	56 mm	76 mm	760 mm	760 mm

در این مدل سازی نیازی به تحلیل تنشهای ایجاد شده در غلتک نمیباشد. به همین دلیل غلتک به صورت پوسته و Discrete Rigid در نظر گرفته شده است تا به صورت کاملا صلب و بدون تغییر شکل باشد. این کار باعث کمتر شدن زمان تحلیل می شود. پس از انجام مدلسازی هندسی تک تک اجزاء و اعمال خواص مکانیکی به آن ها نوبت به مونتاژ آن ها می رسد. در قسمت مونتاژ قطعات به صورت Dependent فراخوانی و در محل مناسب نسبت به هم مستقر میشوند. برای رسیدن به ضخامت مورد نظر مقدار درگیری غلتک با ورق را 0.01m در نظر گرفته شد. شکل (۲) مدل مونتاژ شده و آماده تحلیل را نشان میدهد

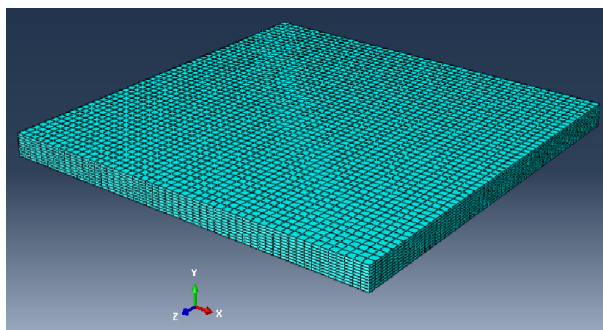


شکل ۲: نحوه مونتاژ شدن سیستم

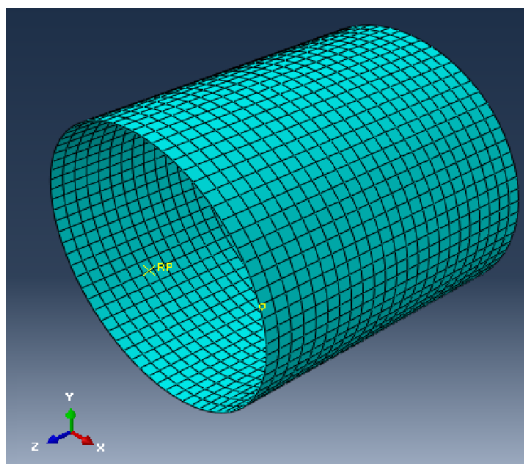
برای مسائل شبه استاتیکی که ماده تغییر شکل پایر داری رفتاری مستقل از نرخ کرنش می باشد، مقدار واقعی زمان وقوع فرآیند معمولا مهم نیست به همین دلیل برای دستیابی به یک حل اقتصادی معمولا میتوان به طریقی زمان لازم برای حل مساله را کاهش داد بهدین منظور از روش مقیاس دهی به جرم استفاده میشود.

در این روش به طور مجازی جرم کل مدل یا قسمتی از آن افزایش یافت و به این ترتیب گام زمانی پایدار نیز افزایش می‌یابد. در صورتی که مقیاس دهی به جرم به درستی انجام شود می‌تواند علاوه بر اینکه زمان حل را کاهش دهد دقت حل را نیز در حد قابل قبولی حفظ کند. شایان ذکر است روش مقیاس دهی جرم مورد استفاده در مسائل شبه استاتیک می‌تواند کاملاً برای مسائل دینامیک گذرا متفاوت باشد. مقیاس دهی به جرم به چندین طرق مختلف انجام میشود که در اینجا مقیاس دهی به جرم تمام المانهای مورد نظر با اعمال ضریب $mass\ scaling$ انجام شد. تماس بین ورق و غلتک از نوع سطح روی سطح تعریف شده است. اصطکاک مورد استفاده در این مقاله از نوع اصطکاک کلمب در نظر گرفته شده است. مقدار عددی ضریب اصطکاک در فرآیند نورد سرد برای ورقی از جنس آلومینیوم از جدول استاندارد استخراج شده و مقدار عددی آن برابر 0.3 میباشد و از نوع پنالتی در نظر گرفته میشود

شکل ورق مستطیل شکل است، بنابراین مناسب ترین المان برای تحلیل نورد ورق از میان مجموعه المانها، المان پیوسته مربعی چهارگره ای میباشد. ورق آلومینیومی و غلتک با استفاده از مش بندی با المان از نوع Quad مدل شد و تعداد المان ها برای ورق آلیاژ آلومینیوم.... و برای غلتک نیز.... تعریف شده است. این المان ها از نوع المان چهار وجهی با خاصیت کرنش صفحه ای و از نوع انتگرالگیری کاهش یافته میباشد. قطعه کار مش بندی شده در شکل (۳) نشان داده شده است مشاهده می شود که برای افزایش دقت حل، تعداد المان ها در راستای ضخامت بیشتر در نظر گرفته شد. همچنین برای مش بندی غلتک نیز به روش مش بندی ورق عمل شد و بخاطر تسریع در انجام حل و نیاز نداشتن به محاسبه تنش در غلتک اندازه مش ها نسبت به ورق کمی بزرگتر در نظر گرفته شد. نمای مش بندی شده غلتک صلب در شکل (۴) نشان داده شده است.



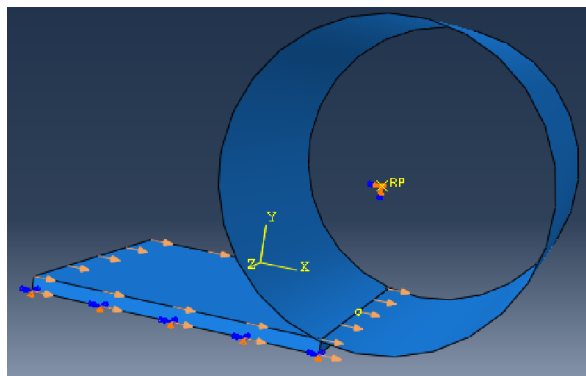
شکل ۳: مش بندی ورق آلومینیوم



شکل ۴: مش بندی غلتک

۴- اعمال شرایط مرزی

برای اعمال شرایط مرزی به ترتیب زیر عمل می شود برای این که غلتک غلتش محض و بدون لغزش بر روی ورق داشته باشد باید سرعت خطی ورق و سرعت دورانی غلتک توجه به رابطه $V = r \cdot \omega$ با هم متناسب باشد از این رو سرعت زاویه ای غلتک $\pi/2$ $\omega = \text{rad/s}$ حول محور Z در جهت پاد ساعت گردو سرعت خطی ورق $V = 0.6283 \text{ m/s}$ در جهت مثبت محور X در نظر گرفته شد.



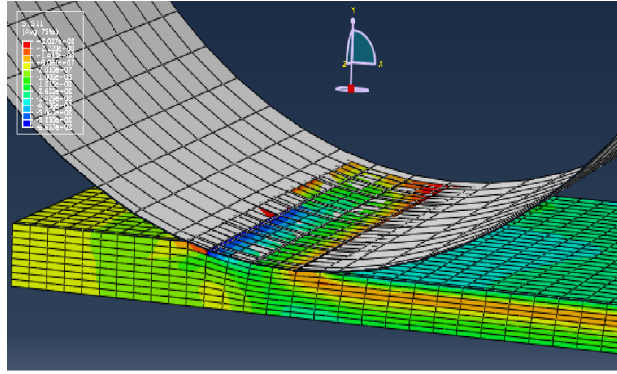
شکل ۵: شرایط مرزی سیستم

همانطور که قبلاً ذکر شد فرآیند مورد نظر نسبت به صفحه XY دستگاه مختصات شرایط تقارنی دارد و از این رو برای کوتاه تر شدن محاسبات و زمان حل کفایت نیمی از سیستم را مدل سازی کنیم. برای این منظور نیاز است از قید تقارن حول محور صفحه Y استفاده شود. در واقع قید $Y_{\text{symm}}(U_2=UR_1=UR_3=0)$ جابجایی در راستای محور Y و دوران در راستای X و Z را مقید میکند با اعمال این شرایط تقارن مورد نظر ایجاد میشود.

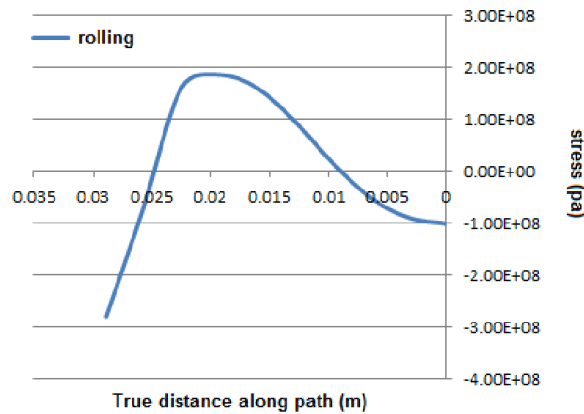
۵- تحلیل و نتایج

پس از اجرای مساله و اتمام مرحله تحلیل آن توسط نرم افزار اجزا محدود می توان کانتور تنش مایز و تنش های پسماند سیستم را مشاهده کرد. ضخامت مورد نظر بعد از اتمام فرآیند 56 mm بوده و ضخامت خروجی نر افزار 56.2 mm است که نشان دهنده درصد خطای پایین شبیه سازی می باشد. برای مشاهده تنش های ابتدا برشی در صفحه میانی ورق در راستای محور Y ایجاد میکنیم سپس به بررسی تنشهای طولی در راستای $S11$ و تنش های عرضی در راستای $S33$ خواهیم پرداخت. به منظور تحلیل تغییرات مقادیر تنش پسماند نسبت به ضخامت باید یک $Path$ در راستای ضخامت و در صفحه میانی ایجاد شود که در این مقاله مسیر انتخابی از وسط ورق شروع و در سطح نورد شده خاتمه میابد.

شکل (۶) نحوه تغییرات تنش پسماند در ورق آلایز آلومینومی در حال نورد را نشان میدهد. پس از اتمام فرآیند نورد و خارج شدن کامل ورق از زیر غلتک با ایجاد یک مسیر مقایر تغییرات تنش پسماند طولی نسبت به ضخامت به دست آمد و در نمودار (۲) گردآوری شد. همانطور که مشاهده میشود تنشهای پسماند در روی سطح ورق 280.67 Mpa فشاری است اما رفته رفته مقدار آن به سمت مثبت میرو تا جایی که در ضخامت 0.019 m مقدار آن به ماکزیم حد خود یعنی 186.21 Mpa و کششی میرسد نهایتاً در صفحه میانی ورق مقدار آن به -101.27 Mpa میرسد.

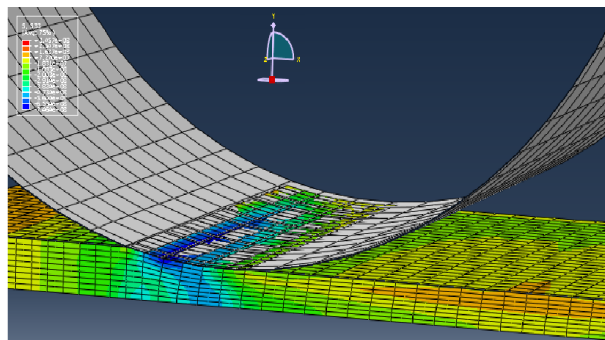


شکل ۶: کانتور تنش پسماند در راستای S11

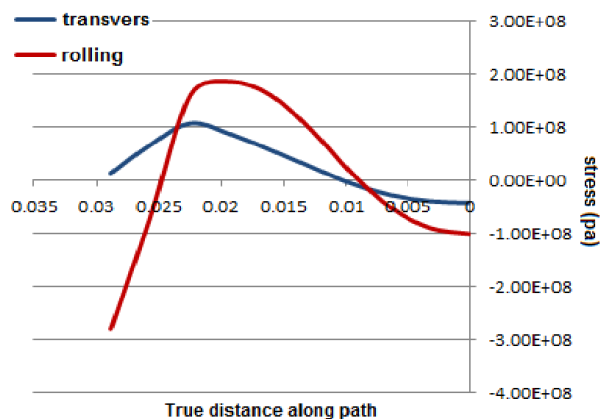
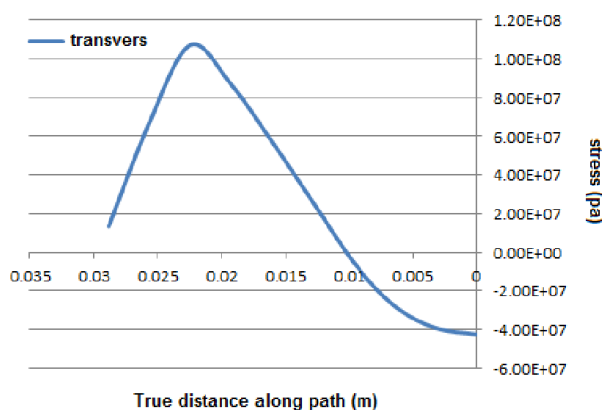


شکل (۷): تغییرات تنش پسماند طولی

در شکل (۷) تغییرات تنش پسماند عرضی نشان داده شده. در این قسمت نیز بعد از اتمام کامل فرآیند در مسیر ایجاد شده قبلی مقایسه تنش پسماند عرضی نسبت به تغییرات ضخامت اندازه گیری شد و در قالب نمودار (۳) ارائه گردید. در این حالت مقدار تنش پسماند در روی سطح ورق کششی و برابر با 13.33Mpa است. در عمق 0.022m به 107.12Mpa میرسد که بیشینه مقدار خود است سپس با روندکاهشی به -42.49Mpa در صفحه میانی ورق رسید.



شکل ۷: کانتور تنش پسماند در راستای S33

شکل (۹): تغییرات S_{33} و S_{11} 

شکل (۸): تغییرات تنش پسماند عرضی

برای مقایسه این دو تنش پسماند هر دو در یک نمودار به صورت زیر قرار گرفت. همانطور که مشاهده میکنید میزان تغییرات تنش پسماند عرضی نسبت به تنش پسماند طولی کمتر است.

در این مقاله شبیه سازی سه بعدی فرآیند نورد سرد روی نمونه ورق آلومینیومی در نرم افزار اجزاء محدود آباکوس جهت پیش بینی مقدار تنش های پسماند فشاری و کششی و عمق اثر آن انجام شد. جهت اعتبار سنجی، نتایج بدست آمده از مدل سازی اجزاء محدود، با نتایج تست های تجربی و مقادیر تنش پسماند بدست آمده از مقالات مقایسه شد و همخوانی خوبی بین نتایج مشاهده گردید.

۶- مراجع

- [1] Henry S. Valberg; "Applied Metal Forming", 1st Edition, Cambridge University Press, 2010
- [2] ASM Metals Handbook Volume 02, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials
- [3] Prime M B, Hill M R. Residual stress, stress relief, and inhomogeneity in aluminum plate, scripta materialia, 2002, 77-82
- [4] Wang Qiu-cheng, K eying-lin, Xing hong-yan, Evaluation of residual stress relief of aluminum alloy 7050 by using crack compliance method, Trans.Nonferrous Met, 2003, 1190-1193
- [5] U.S.Dixit, P.M.Dixit; "A Study on Residual Stresses in Rolling", Int. J. Mach. Tools Manufact, Vol. 37, pp. 837-853, 1997
- [6] William F. Hosford, Robert M. Caddell; Metal Forming Mechanics and Metallurgy,
- [7] Taylan Altan; Metal Forming Handbook, 1st Edition, Springer, 1998