



مطالعه عددی توزیع تنش‌های پسماند در فرایند غلتک‌زنی عمیق آلومینیوم 7075

فرج الله زارع جونقانی¹، غلامحسین مجذوبی²، احسان خادمی^{3*}

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی همدان، همدان

* همدان، صندوق پستی 579-65155، e.khademi@hut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 13 فروردین 1394

پذیرش: 16 خرداد 1394

ارائه در سایت: 30 خرداد 1394

کلید واژگان:

فرایند غلتک‌زنی

روش اجزاء محدود

تنش پسماند

الگوی مومسان شاپوش

چکیده

تنش‌های پسماند به تنش‌هایی گفته می‌شوند که پس از برداشته شدن تمام نیروهای خارجی همچنان در ماده باقی می‌مانند. بر اساس نوع بارگذاری تنش‌های پسماند می‌توانند به دو صورت کششی و فشاری در ماده باقی بمانند. تنش‌های پسماند فشاری در جسم می‌توانند استحکام ماده در برابر بارهای وارده به ویژه استحکام خستگی را بهبود بخشند. یکی از روش‌های ایجاد تنش‌های پسماند فشاری استفاده از فرایند غلتک‌زنی عمیق است که با توجه به سادگی و پایین بودن هزینه به‌طور گسترده در صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله مدل‌سازی فرایند غلتک‌زنی آلومینیوم 7075 و شبیه‌سازی آن به کمک روش اجزاء محدود مورد بررسی قرار می‌گیرد و تأثیر عوامل مهمی همچون قطر ساچمه در ابزار غلتک‌زن، گام پیشروی، عمق نفوذ و تعداد عبور بر روی توزیع تنش پسماند بررسی می‌شوند. از الگوی سخت شوندگی چرخه‌ای شاپوش در شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است. ثابت‌های این الگو از آزمایش چرخه‌ای کرنش کنترل آلومینیوم 7075 محاسبه شده‌اند. برای راستی نتایج شبیه‌سازی‌های اجزاء محدود از نتایج آزمایش و شبیه‌سازی‌های پژوهش‌های پیشین استفاده شده است. نتایج این مقاله نشان می‌دهد که عمق و میزان تنش پسماند فشاری با افزایش قطر ساچمه غلتک‌زن، میزان عمق نفوذ و تعداد عبور غلتک افزایش می‌یابد ولی با افزایش گام پیشروی میزان تنش پسماند و یکنواختی توزیع تنش پسماند کاهش می‌یابد. همچنین الگوی مومسان شاپوش می‌تواند رفتار ماده در بارگذاری‌های کم چرخه مانند فرایند غلتک‌زنی را پیش‌بینی نموده و به‌کارگیری روش اجزاء محدود در محاسبه تنش پسماند به جای روش‌های تجربی علاوه بر کاهش هزینه و زمان توزیع تنش پسماند در عمق بیشتری را نمایان می‌سازد.

Studying the distribution of residual stresses in deep rolling process of Al 7075

Farajollah Zare Jouneghani¹, Gholamhossein Majzoobi², Ehsan Khademi^{3*}

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

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

3- Department of Robotics Engineering, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran

* P.O.B. 579-65155 Hamedan, Iran, e.khademi@hut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 02 April 2015
Accepted 06 June 2015
Available Online 20 June 2015

Keywords:
Deep rolling
Numerical simulation
residual stress
Chaboche plasticity model

ABSTRACT

Residual stresses are those which remain in the material even after removing the entire external load. Residual stresses may be compressive or tensile depending on the type of the loading. Compressive residual stresses improve the mechanical properties particularly the fatigue life of material. Compressive residual stresses can be induced by different techniques. Due to its easiness and low cost, deep rolling is one of the widely used techniques in industry to create compressive residual stresses. Deep rolling process is numerically simulated in this work and the effects of some important rolling parameters such as ball diameter, feed rate, penetration depth and number of passes on the distribution of residual stress are investigated. Chaboche cyclic plasticity model is used in the simulations. The constants of the Chaboche model are calculated from the strain control cyclic tests on Al 7075. The results are validated using the experimental and numerical results reported in the literature. The results indicate that the depth and magnitude of the compressive residual stress increase with increase in the ball diameter, depth of penetration and number of passes. Also, the value of residual stress and its uniformity decrease by increasing the feed rate. In addition, Chaboche cyclic plasticity model can simulate material behavior in a low cycle loading such as deep rolling and using finite element method instead of experimental methods for measuring residual stresses reduces cost and time of solution and reveals more depth of residual stress distribution.

1- پیشگفتار

امروزه یکی از چالش‌های مهندسی مکانیک بررسی نقش تنش پسماند در چگونگی تغییر استحکام مواد است. تنش‌های پسماند به دو روش عمده عمدی و غیر عمدی می‌توانند در ماده به وجود آیند. روش‌های غیرعمدی، غالباً شامل فرایندهای تولید و ساخت مانند آهنگری و نورد می‌شوند که نهایتاً تنش‌های پسماندی را در قطعه باقی می‌گذارند. از طرف دیگر روش‌های عمدی که به منظور افزایش استحکام ماده به کار می‌روند به چند دسته کلی مکانیکی، حرارتی و روکش‌کاری تقسیم‌بندی می‌شوند که هر یک از این عملیات داری مزایا و معایبی هستند [1].

از جمله روش‌های عمدی مکانیکی ایجاد تنش‌های پسماند می‌توان به روش‌هایی مانند غلتک‌زنی و ساچمه‌پاشی اشاره نمود. عملیات غلتک‌زنی عمیق یک نوع از عملیات بهبود سطح است که در آن با استفاده از ابزار ساچمه‌ای یا غلتکی تغییر شکل مومسان در قطعه ایجاد گشته و در نتیجه تنش‌های پسماند فشاری در لایه‌های نزدیک سطح به وجود می‌آید [2].

از جمله مزایای روش غلتک‌زنی می‌توان به ایجاد سطحی صیقلی با زبری بسیار کمتر در مقایسه با سایر عملیات‌های مکانیکی نظیر ساچمه‌پاشی اشاره نمود. پژوهش‌های متعددی در زمینه استفاده از عملیات غلتک‌زنی به منظور افزایش استحکام ماده صورت پذیرفته است. برای نمونه مجذوبی و همکاران [3] اثر غلتک‌زنی و ساچمه‌پاشی بر بهبود عمر خستگی سایشی را مورد بررسی قرار دادند و پژوهشی توسط رودریگز و همکاران [4] انجام پذیرفت که در آن به بررسی اثر فرایند غلتک‌زنی بر مشخصات سطحی میله‌ای از جنس آلایز فولاد 1045 پرداخته شد.

با توجه به این که فرایند غلتک‌زنی عمیق به صورت هم‌زمان استحکام خستگی و مشخصه‌های سطحی را بهبود می‌بخشد، آگاهی از چگونگی تأثیر عوامل مهم در این فرایند بر روی ویژگی‌های مکانیکی از اهمیت بسزایی برخوردار است. اندازه‌گیری تنش پسماند و پی بردن به نحوه توزیع آن در عمق قطعه به کمک روش‌های غیرمخرب مانند استفاده از امواج فراصوتی پرهزینه و زمان‌بر است ولی اگر روش اجزاء محدود به صورت دقیق به کار گرفته شود می‌تواند راه‌حل مناسبی برای این مشکلات باشد. شبیه‌سازی فرایند غلتک‌زنی به کمک روش اجزاء محدود توسط محققانی مانند ین و همکاران [5] صورت پذیرفته است به طوری که آن‌ها توانستند مدل اجزاء محدود دوبعدی و سه‌بعدی برای شبیه‌سازی فرایند غلتک‌زنی ارائه دهند. از آنجایی که در مدل دوبعدی امکان جریان ماده در راستای محیطی وجود ندارد دقت مدل‌سازی کاهش می‌یابد. در سوی دیگر نیز آن‌ها شبیه‌سازی سه‌بعدی را با فرضیاتی از جمله نادیده گرفتن انحنای نمونه انجام دادند.

شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که در فرایند غلتک‌زنی عمیق، ماده در زیر غلتک ابتدا تحت بارگذاری فشاری قرار می‌گیرد و سپس با عبور غلتک نیروهای کششی به آن وارد می‌شود. در انجام شبیه‌سازی‌های اجزاء محدود استفاده از معادلات ساختاری پیشرفته که توانایی توصیف رفتار پیچیده ماده در شرایط بارگذاری چرخه‌ای را داشته باشد بسیار مهم و ضروری است. تاکنون بسیاری از محققان معادلات ساختاری متفاوتی برای توصیف رفتار ماده در بارگذاری‌های چرخه‌ای پیشنهاد کرده‌اند. (پراگر [6]. آرمسترانگ فردریک [7]، شابوش [8]). یکی از پرکاربردترین مدل‌های سخت‌شوندگی چرخه‌ای، الگوی خمیری شابوش است [8]. نحوه به دست آوردن ثابت‌های الگوی خمیری شابوش توسط پژوهشگران متعددی مورد مطالعه قرار گرفته است [9].

در این مقاله ابتدا مروری بر فرایند غلتک‌زنی انجام شده و سپس مدل نزدیک به واقعیت و سه‌بعدی از فرایند غلتک‌زنی به کمک روش اجزاء محدود ارائه می‌شود که در آن از الگوی سخت‌شوندگی شابوش به منظور توصیف رفتار ماده استفاده شده است. در شبیه‌سازی‌های اجزاء محدود تأثیر عوامل مهمی از جمله قطر ساچمه در ابزار غلتک‌زن، گام پیشروی، عمق نفوذ و تعداد عبور بر توزیع تنش پسماند مورد بررسی قرار خواهند گرفت. برای این منظور ثابت‌های الگوی خمیری شابوش برای آلایز آلومینیوم 7075 به دست آمده و با استفاده از زیرروال مدل ماده¹ به نرم‌افزار آباکوس معرفی خواهد شد. به منظور ارزیابی مدل ماده استفاده شده، مقایسه‌ای بین نتایج انجام خواهد شد.

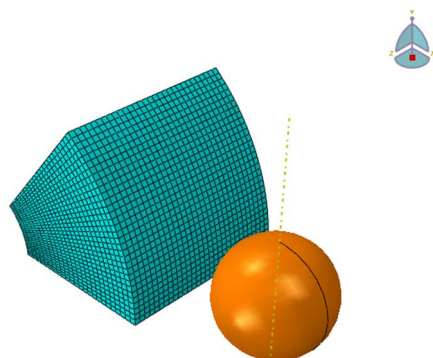
2- تعریف مسئله

فرایند غلتک‌زنی عمیق، عملیات بهبود سطح مکانیکی است که در آن از یک ابزار ساچمه‌ای برای ایجاد تغییر شکل مومسان عمیق و در نتیجه تنش پسماند در لایه‌های سطحی نمونه استفاده می‌شود که در حین فرایند یک ساچمه وظیفه عملیات غلتک‌زنی را بر عهده دارد و سایر تجهیزات وظیفه ایجاد و کنترل حرکت نسبی بین غلتک و قطعه و حرکت دورانی قطعه و همچنین کنترل عمق نفوذ غلتک را بر عهده دارند. در شکل 1 فرایند غلتک‌زنی یک میله استوانه‌ای از جنس آلومینیوم 7075 به قطر 7/1 میلی‌متر که با استفاده از دستگاه ماشین تراش صورت پذیرفته نشان داده شده است. اساس انتخاب این نوع آلایز آلومینیوم بالا بودن نسبت استحکام به وزن و استفاده صنعتی گسترده به ویژه در صنعت هواپیماسازی و مخازن تحت فشار است [10]. با انجام آزمایش کشش ساده توسط دستگاه اینسترون و با به‌کارگیری کشیدگی‌سنج² از میله مورد مطالعه، ضریب کشسانی برابر 69 گیگاپاسکال و استحکام کششی نهایی برابر با 650 مگاپاسکال به دست آمده است.

در فرایندهایی همچون غلتک‌زنی، آگاهی از مقدار و نوع تنش پسماند برای پیش‌بینی رفتار مکانیکی ماده از اهمیت بالایی برخوردار است زیرا مواردی هم چون عمر خستگی خمشی مواد با تنش‌های پسماند سطحی رابطه مستقیمی دارد. با توجه به این که عمق نفوذ تنش پسماند در این فرایند حدود چند میلی‌متر بوده و سطح از صافی مناسب برای چسباندن کرنش سنج برخوردار نیست، روش متداول سوراخ‌زنی مرکزی³ برای اندازه‌گیری تنش پسماند قابل‌استفاده نیست. در ضمن روش‌های مخرب دیگر همچون برش‌سیم⁴ و روش‌های غیرمخرب مانند پراش نوترونی⁵ یا امواج فراصوتی⁶ نه تنها به تجربه بالا و امکانات فنی نیاز دارند بلکه هزینه زیادی را در پی خواهند داشت و در ضمن بسیاری از مواقع در دسترس نیستند. استفاده از شبیه‌سازی اجزاء محدود برای تعیین تنش پسماند یکی از روش‌های غیرمخرب اندازه‌گیری تنش پسماند است که نه تنها تخریبی روی قطعه به جا نمی‌گذارد بلکه معایب ذکرشده را نیز در بر ندارد. نکته‌ای که در استفاده از این روش باید مورد توجه قرار گیرد این است که فرضیات شبیه‌سازی به واقعیت مسئله نزدیک باشد به گونه‌ای که اعتبار نتایج توسط آزمایش‌ها تأیید گردند. در ادامه به نحوه مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرایند غلتک‌زنی عمیق پرداخته می‌شود.

1- UMAT subroutine
2- Extensometer
3- Center hole drilling
4- Wire cut
5- Neutron diffraction
6- Ultrasonic

جدول 1 ابعاد هندسه مدل اجزاء محدود	
3	L (میلی متر)
50	β (درجه)
1	a (میلی متر)
3/55	b (میلی متر)



شکل 3 مدل مونتاژ شده و مش‌بندی شده نمونه و ساچمه

شده است. در شبیه‌سازی‌های پیشین نیز به منظور کاهش زمان حل از ضریب اصطکاک صفر بین نمونه و غلتک استفاده شده است [11].

بارگذاری در شبیه‌سازی عملیات غلتک‌زنی به صورت کنترل جابجایی اعمال شده است به گونه‌ای که ابتدا ساچمه سطح نمونه را به اندازه مورد نظر فشرده کرده و سپس با حرکت دورانی نمونه و جابجایی عرضی ساچمه عملیات غلتک‌زنی شبیه‌سازی شده است. به این ترتیب گرچه در عمل میله چرخیده و غلتک ثابت است ولی حرکت آن‌ها نسبت به هم با شبیه‌سازی یکسان است میزان نفوذ ساچمه و میزان جابجایی عرضی (گام پیشروی) از جمله متغیرهای فرایند غلتک‌زنی می‌باشند که در هر شبیه‌سازی تغییر می‌یابند و در بخش 2-4 بررسی خواهند شد.

یکی از موارد مهم در شبیه‌سازی اعمال شرایط مرزی است تا مدل‌سازی مسئله با واقعیت هم‌خوانی داشته باشد. همان‌طور که در شکل 4 نشان داده شده است صفحات $\theta=0$ و $\theta=\beta$ طوری مقید شده‌اند که فقط در راستای r قابلیت جابجایی داشته باشند و صفحات $Z=0$ و $Z=L$ نیز به صورت صفحات آزاد در نظر گرفته شده‌اند. همچنین، صفحه $R=a$ نیز فقط دارای حرکت دورانی حول محور Z است.

3-2-2 مدل ماده

با توجه به این‌که شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد در فرایند غلتک‌زنی عمیق به ماده یک‌چرخه بارگذاری فشاری-کششی وارد می‌شود، برای بررسی رفتار چرخه‌ای این ماده، آزمایش چرخه‌ای بر روی نمونه‌هایی که بر اساس استاندارد خستگی کم‌چرخه E606 تهیه شده‌اند صورت پذیرفته است. آزمایش‌ها با استفاده از کشیدگی سنج و به صورت کرنش کنترل با بازه کرنش 2 درصد تا رسیدن به چرخه پایدار انجام شده‌اند. با توجه به این‌که در فرایند غلتک‌زنی، ماده ابتدا تحت فشار قرار می‌گیرد در آزمایش نیز بارگذاری با اعمال نیروی فشاری آغاز گردیده است. در شکل 5 منحنی تنش-کرنش آزمایشی در بارگذاری چرخه‌ای کرنش کنترل آلومینیوم 7075 نشان داده شده است.

برای وارد نمودن مدل ماده از الگوی سخت‌شدگی شاپوش با چهار تنش بازگشتی استفاده شده است تا منحنی تنش-کرنش با دقت بالایی شبیه‌سازی



شکل 1 فرایند غلتک‌زنی عمیق آلومینیوم 7075

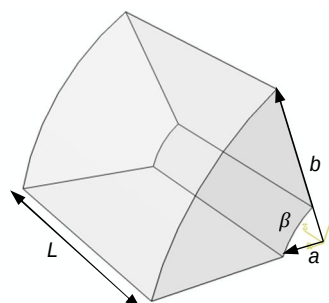
3- شبیه‌سازی اجزاء محدود

3-1- روند شبیه‌سازی

شبیه‌سازی اجزاء محدود عملیات غلتک‌زنی عمیق با استفاده از نرم افزار آباکوس 6.10 انجام شده است. در شبیه‌سازی‌ها از مدل سه‌بعدی استفاده شده است تا هندسه مسئله به واقعیت فرایند نزدیک باشد. به منظور کاهش تعداد المان‌ها و زمان حل، هندسه نمونه به صورت قطاعی از یک میله استوانه‌ای در نظر گرفته شده است. در شکل 2 مدل هندسی در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی نشان داده شده است. ابعاد در نظر گرفته شده برای مدل هندسی نیز در جدول 1 ارائه شده است. در شبیه‌سازی‌ها ساچمه به صورت صلب فرض شده و نیز از سرعت دورانی نمونه صرف‌نظر شده است. شبیه‌سازی به صورت صریح¹ با استفاده از مقیاس جرم² انجام شده است.

پس از بررسی همگرایی ابعادی المان‌ها، در نهایت از تعداد 23040 المان مکعبی از نوع C3D8R با ابعاد 100 میکرومتر برای مش‌بندی³ مدل هندسی استفاده شده است. این نوع المان دارای 8 گره با انتگرال‌گیری کاهش‌یافته است. در انتگرال‌گیری کاهش‌یافته با توجه به اینکه از یک نقطه انتگرال‌گیری گوس استفاده می‌شود زمان انجام محاسبات کاهش می‌یابد. در شکل 3 مدل مونتاژ شده و مش‌بندی شده قطاعی از میله و ساچمه نشان داده شده است.

در شبیه‌سازی‌ها تماس میان غلتک و قطعه از نوع تماس سطح به سطح در نظر گرفته شده است که به این منظور ابتدا با مطالعه اثر ضریب اصطکاک بر توزیع تنش پسماند یک جفت تماسی با ضریب اصطکاک صفر در مدل وارد



شکل 2 مدل هندسی شبیه‌سازی شده

1- Explicit
2- Mass scale
3- Meshing

$$\sigma_x = \sigma_0 + \sum_{i=1}^4 \frac{C_i}{\gamma_i} [1 - e^{-\gamma_i(\varepsilon_x^p)}] \quad (3)$$

که در رابطه فوق، σ_0 تنش تسلیم نخستین و ε_x^p مقدار کرنش مومسان در هر نقطه از نمودار تنش-کرنش است.

ثابت‌های این مدل ماده غالباً از نیم‌چرخه کششی حلقه پایدار² تعیین می‌شوند [12] ولی خادمی و همکاران [13] نشان دادند در مواردی که ماده تنها یک یا چند چرخه بارگذاری را تجربه می‌کند باید ثابت‌ها از نیم‌چرخه‌های ابتدایی منحنی پسماند³ محاسبه شوند که برای این منظور لازم است هر چرخه به دو نیم‌چرخه تقسیم و ثابت‌های الگوی خمیری شابوش برای هر نیم‌چرخه به صورت مجزا محاسبه گردد. به این ترتیب ثابت‌های الگوی شابوش برای نخستین نیم‌چرخه فشاری و نخستین نیم‌چرخه کششی به صورت جداگانه به دست آمده‌اند که این ثابت‌ها در جدول 2 نشان داده شده‌اند.

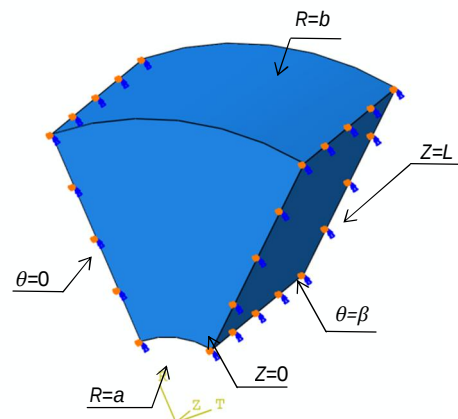
با توجه به این که قابلیت وارد نمودن ثابت‌های به دست آمده در نرم‌افزار آباکوس وجود ندارد از یک زیرروال ماده استفاده شده است به نحوی که اگر میانگین تانسور تنش مثبت باشد از ثابت‌های نیم‌چرخه کششی و در غیر این صورت از ثابت‌های نیم‌چرخه فشاری جدول 2 استفاده شود. جزئیات بیشتر در مورد ساختار زیرروال مورد استفاده در پژوهش بنرا و همکاران [14] قابل مطالعه است. در شکل 5 مقایسه‌ای از نمودار تنش-کرنش به دست آمده از الگوی سخت‌شوندگی شابوش و آزمایش نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است درحالی‌که شکل منحنی تنش-کرنش به شدت غیر-خطی است و نیز مقادیر مطلق تنش نهایی کششی و فشاری تفاوت محسوسی دارند (حدود 200 مگاپاسکال)، مدل ماده و ثابت‌های به دست آمده به خوبی منحنی تنش-کرنش را در نخستین نیم‌چرخه فشاری و کششی پیش‌بینی می‌نمایند که نشان‌دهنده توانایی الگوی سخت‌شوندگی شابوش با چهار تنش بازگشتی و صحت زیرروال ماده و روش تعیین ثابت‌ها است.

4- نتایج شبیه‌سازی عددی

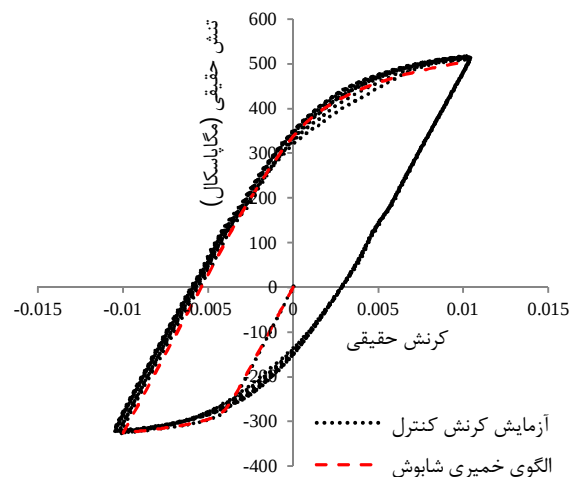
برای به دست آوردن توزیع تنش پسماند، میانگین تنش پسماند چند مسیر که از سطح تا عمق نمونه امتداد دارند در نظر گرفته شده است. در شکل 6 مسیر اندازه‌گیری برای یکی از مسیرها که در امتداد خط AB است نشان داده شده است.

جدول 2 ثابت‌های مدل شابوش

ثابت‌ها	نیم‌چرخه کششی	نیم‌چرخه فشاری
تنش تسلیم (مگاپاسکال)	238.3	234.4
C_1 (مگاپاسکال)	255122/5	383641
γ_1	3094	15304/8
C_2 (مگاپاسکال)	45050/3	19156/6
γ_2	397/6	861/2
C_3 (مگاپاسکال)	5008/4	4313
γ_3	0	0
C_4 (مگاپاسکال)	182011	145571
γ_4	3055/7	7077/1



شکل 4 شرایط مرزی اعمال شده در شبیه‌سازی اجزاء محدود



شکل 5 رفتار آلومینیوم 7075 در آزمایش بارگذاری چرخه‌ای و نتایج الگوی سخت‌شوندگی شابوش

گردد. به منظور ساده‌سازی مدل ماده از عبارت سخت‌شوندگی همسانگرد در آن صرف‌نظر شده و الگوی خمیری در نظر گرفته شده فقط مبتنی بر سختی جنبشی است. الگوی مومسان شابوش، شامل چند عبارت تنش بازگشتی به شکل رابطه آرمسترانگ-فردریک است که هر یک از این تنش‌های بازگشتی بخشی از نمودار تنش-کرنش را مدل‌سازی می‌کنند و به شکل زیر تعریف می‌گردند [8]:

$$X = \sum_{i=1}^m X_i dX_i = \frac{2}{3} C_i d\varepsilon^p - \gamma_i X_i dp \quad (1)$$

در رابطه (1)، C_i و γ_i ثابت‌های ماده می‌باشند که از آزمایش به دست می‌آیند، هم‌چنین dp کرنش تجمعی مومسان¹ است و طبق رابطه زیر بیان می‌شود:

$$dp = \frac{2}{3} (d\varepsilon^p : d\varepsilon^p)^{1/2} = d\lambda \quad (2)$$

با انتگرال‌گیری از رابطه (1) در حالت بارگذاری تک‌محوره و اضافه نمودن تنش تسلیم اولیه، تنش در هر نقطه به صورت زیر نوشته می‌شود [8]:

2- Stabilized cycle
3- Hysteresis curve

1- Cumulative plastic strain

4-1- صحت سنجی نتایج شبیه سازی عددی

برای صحت سنجی شبیه سازی های انجام شده از نتایج آزمایشی غلتک زنی که توسط روتگر و همکاران [15] انجام شده استفاده شده است. در آزمایش روتگر و همکارانش غلتک زنی عمیق بر روی میله ای فولادی با قطر 21/5 میلی متر از آلیاژ AISI 52100 انجام شده است.

بعدها ین و همکارانش [5] مدل اجزاء محدودی برای آزمایش روتگر ارائه دادند که در آن از مدل ماده ساده ای به شکل زیر استفاده نمودند:

$$\bar{\sigma} = C \bar{\epsilon}_p^n \bar{\epsilon}_p^m + \bar{\sigma}_y \quad (4)$$

که مقادیر ثابت های رابطه فوق در جدول 3 آورده شده است.

به منظور مقایسه شبیه سازی های اجزاء محدود این مقاله با نتایج تجربی و شبیه سازی های ین و همکاران [5]، از مدل ماده ارائه شده در بخش 2-3 استفاده شده است به نحوی که ثابت های الگوی سخت شوندگی شاپوش با چهار تنش بازگشتی برای فولاد ذکر شده به دست آمده اند. سایر موارد به کار گرفته شده در شبیه سازی مانند ابعاد نمونه و ساچمه در جدول 4 آورده شده است.

برای اعتبار سنجی روند شبیه سازی و مدل ماده حاضر، نتایج تنش پسماند حاصل از شبیه سازی ها با نتایج تجربی روتگر و همکاران [15] و شبیه سازی ین و همکاران [5] مقایسه شده است. شکل 7 مقایسه تنش پسماند در راستای محوری قطعه و شکل 8 مقایسه تنش پسماند در راستای محیط قطعه را نشان می دهند. همان طور که در نمودار شکل 7 مشخص است، نتایج حاصل از شبیه سازی اجزاء محدود این مقاله هم خوانی مناسبی با نتایج تجربی دارد و نسبت به شبیه سازی ارائه شده توسط ین و همکاران پیش بینی بهتری از توزیع تنش پسماند در راستای محور قطعه را ارائه می دهد. به عنوان نمونه در شبیه سازی حاضر تنش پسماند فشاری بر روی سطح قطعه بسیار به نتایج تجربی نزدیک است در حالی که شبیه سازی ین و همکاران تنش پسماند روی سطح را کششی پیش بینی می کند.

با توجه به نمودارهای شکل 8، نتایج شبیه سازی حاضر برای پیش بینی تنش پسماند در راستای محیط قطعه نیز وضعیت مشابهی دارد. گرچه کمینه تنش پسماند فشاری در عمق قطعه بیشتر از مقادیر تجربی است ولی شبیه سازی حاضر نسبت به شبیه سازی ین و همکاران تنش پسماند روی سطح و عمق تغییر علامت تنش پسماند را بهتر پیش بینی می کند. با توجه به شکل های 7 و 8 می توان نتیجه گرفت که شبیه سازی می تواند تنش پسماند در عمق بیشتری از قطعه را نمایان سازد در حالی که روش های معمول تجربی اندازه گیری تنش پسماند عمق نفوذ چندان ندارند.

یکی از دلایل بهبود نتایج شبیه سازی های اجزاء محدود استفاده از مدل سه بعدی نزدیک به واقعیت است. در شبیه سازی های دو بعدی ین و همکاران [5] امکان جریان ماده در راستای عمق وجود ندارد و در نتیجه

جدول 3 خواص مکانیکی و ثابت های رابطه 4 برای فولاد AISI 52100

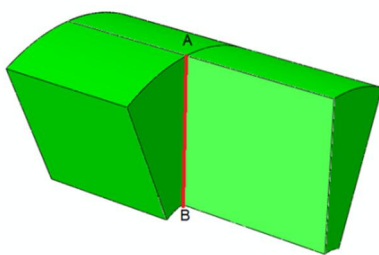
مقدار	خواص ماده
210	ضریب ارتجاعی (گیگا پاسکال)
0/3	ضریب پواسون
300	C
0/3	n
0/1	m
2500	$\bar{\sigma}_y$ (مگا پاسکال)
0/01	$\bar{\epsilon}_p$

تنش پسماند با دقت مناسبی به دست نمی آید. در شبیه سازی های سه بعدی نیز آن ها از انحنای نمونه صرف نظر نمودند که گرچه شبیه سازی ها را ساده تر می کند ولی از دقت آن ها خواهد کاست. از طرف دیگر مدل ماده انتخابی در پژوهش ارائه شده رفتار ماده در بارگذاری چرخه ای را بهتر پیش بینی می نماید که نقش بسزایی در بهبود نتایج حل عددی دارد.

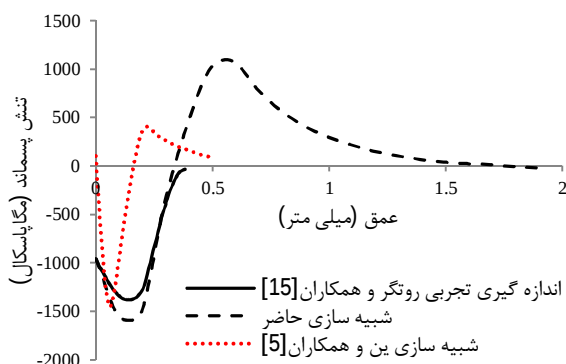
به منظور صحت سنجی بیشتر شبیه سازی ها، نیروی وارده از سطح نمونه به ساچمه با نتایج آزمایش روتگر و همکاران [15] مورد مقایسه قرار گرفته است. برای تعیین نیروی وارد بر غلتک، یک نقطه مرجع¹ بر روی غلتک ایجاد شده که در نهایت میانگین نیروی وارده شده به این نقطه مرجع به عنوان نیروی غلتک زنی در نظر گرفته شده است. همان طور که در نمودار شکل 9 مشخص است با استفاده از شبیه سازی حاضر میانگین نیرو در فرایند غلتک زنی عمیق برابر با 1131 نیوتن به دست می آید که این مقدار به نیروی 1098 نیوتنی محاسبه شده در آزمایش بسیار نزدیک است. در نهایت با توجه به مقایسه انجام شده می توان نتیجه گرفت که روند شبیه سازی و مدل ماده به کار گرفته شده از اعتبار مناسبی برای پیش بینی تنش پسماند ماده در فرایند غلتک زنی عمیق برخوردار است.

4-2- بررسی توزیع تنش پسماند

پارامترهای مورد بررسی در فرایند غلتک زنی که در این مقاله به آن ها پرداخته شده است عبارت اند از: قطر ساچمه غلتک زن، گام پیشروی، عمق نفوذ و تعداد عبور. در شبیه سازی ها متغیرهای فرایند غلتک زنی مطابق جدول 5 در نظر گرفته شده اند.



شکل 6 مسیر اندازه گیری توزیع تنش پسماند



شکل 7 مقایسه ی تنش پسماند در راستای محوری

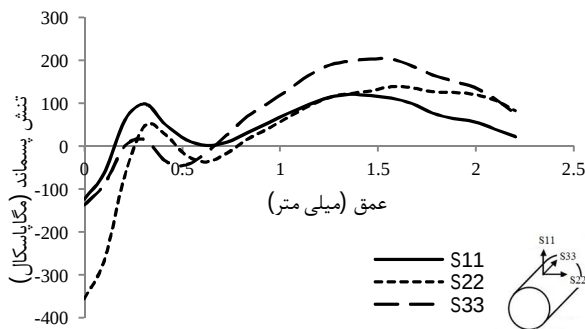
جدول 4 مقادیر پارامترهای استفاده شده در شبیه سازی

ساجمه		نمونه			
D	L	β	a	b	
(میلی متر)	(میلی متر)	(میلی متر)	(میلی متر)	(میلی متر)	
6	4	50	6/75	10/75	

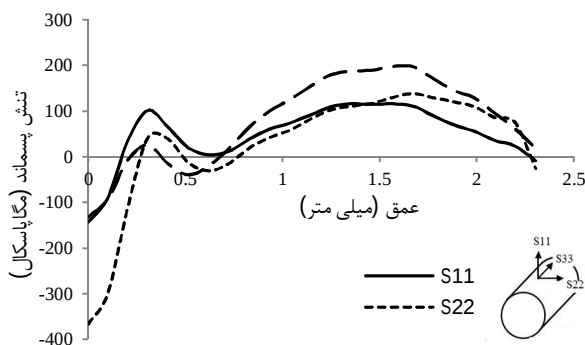
1- Reference Point

جدول 5 پارامترهای طراحی شده برای انجام شبیه‌سازی (ابعاد به میلی‌متر)

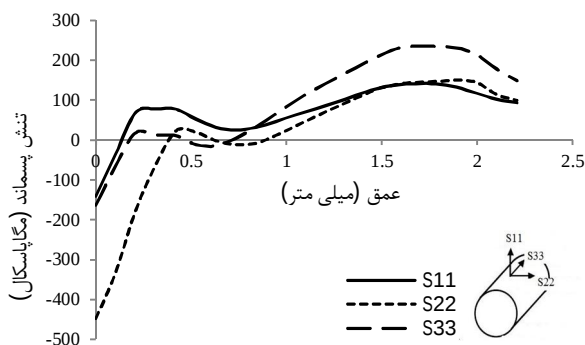
متغیر	قطر ساچمه	گام پیشروی	عمق نفوذ	تعداد عبور
قطر ساچمه	6، 8 و 11	0/08	0/05	1
گام پیشروی	6	0/08 و 0/16	0/05	1
عمق نفوذ	6	0/16	0/05 و 0/1	1
تعداد عبور	6	0/16	0/05	1 و 2



شکل 10 نمودار تنش پسماند برای قطر ساچمه 6 میلی‌متر

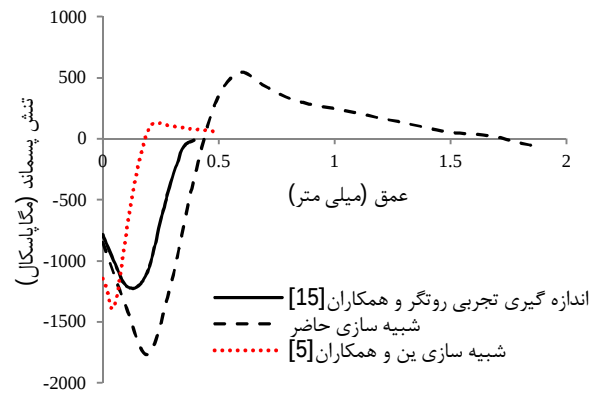


شکل 11 توزیع تنش پسماند برای قطر ساچمه 8 میلی‌متر

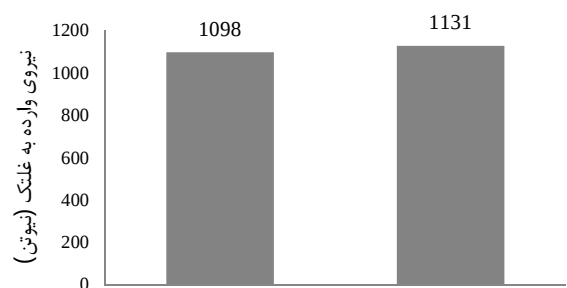


شکل 12 توزیع تنش پسماند برای قطر ساچمه 11 میلی‌متر

است. در نمودارهای شکل های 13 و 14 تنش پسماند در راستاهای مختلف برای هر حالت گام پیشروی نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودارهای شکل‌های 13 و 14 مشخص است با افزایش گام پیشروی، تنش پسماند فشاری در راستای شعاعی (S11) از مقدار 123 به مقدار 327 مگاپاسکال افزایش یافته درحالی‌که تنش پسماند در راستای مماسی (S22) از مقدار 355 مگاپاسکال در گام پیشروی 0/08 میلی‌متر به مقدار 208 مگاپاسکال در گام پیشروی 0/16 میلی‌متر کاهش یافته است. علت این امر را می‌توان روی هم افتادن نواحی کششی اطراف ساچمه بر نواحی فشاری گام قبلی دانست. تنش پسماند در راستای محوری (S33) با افزایش گام تغییر



شکل 8 مقایسه‌ی تنش پسماند در راستای محیطی



آزمایش روتگر و همکاران [15]

شکل 9 مقایسه نیروی فرایند غلتک‌زنی عمیق

4-2-2-1- تأثیر قطر ساچمه بر توزیع تنش پسماند

به منظور بررسی تأثیر قطر ساچمه بر تنش پسماند، شبیه‌سازی‌ها با در نظر گرفتن سه قطر متفاوت 6، 8 و 11 میلی‌متر برای ساچمه انجام پذیرفته است. در این حالت گام پیشروی، عمق نفوذ و تعداد عبور مطابق جدول 5 و برای تمام شبیه‌سازی‌ها یکسان در نظر گرفته شده است. در نمودارهای شکل‌های 10 تا 12 توزیع تنش پسماند در عمق قطعه در سه راستای شعاعی (S11)، محیطی (S22) و محوری (S33) نشان داده شده است.

همان‌طور که از نمودارهای شکل‌های 10 تا 12 مشخص است با افزایش قطر ساچمه تنش پسماند فشاری در دو راستای محیطی و محوری بر روی سطح اندکی افزایش می‌یابد درحالی‌که تنش پسماند کششی در عمق قطعه به میزان کمی کاهش می‌یابد. به عنوان نمونه مقدار تنش پسماند فشاری در راستای محوری بر روی سطح از حدود 120- مگاپاسکال برای قطر ساچمه 6 میلی‌متر تا 170- مگاپاسکال برای قطر ساچمه 11 میلی‌متر افزایش می‌یابد و در راستای مماسی نیز با افزایش قطر ساچمه از 6 به 11 میلی‌متر تنش پسماند فشاری از حدود 350- تا 450- مگاپاسکال افزایش می‌یابد. همچنین عمق تنش پسماند در راستای محوری برای هر حالت با ساچمه‌های 6، 8 و 11 میلی‌متر در حدود 200 میکرون و در راستای مماسی برابر با 300 میکرون است. در هر حال تنش‌های پسماند فشاری محوری و شعاعی در سطح نمونه به یکدیگر نزدیک هستند درحالی‌که تنش پسماند فشاری محیطی حدوداً سه برابر بیشتر از آن‌ها است.

4-2-2-2- تأثیر گام پیشروی بر توزیع تنش پسماند

به منظور بررسی اثر گام پیشروی در عملیات غلتک‌زنی بر روی توزیع تنش پسماند، شبیه‌سازی در دو حالت با گام‌های 0/08 و 0/16 میلی‌متر انجام شده

زیادی نداشته است.

4-2-3- تأثیر عمق نفوذ بر توزیع تنش پسماند

به منظور بررسی اثر عمق نفوذ در عملیات غلتک‌زنی بر روی توزیع تنش پسماند، شبیه‌سازی در دو حالت با عمق‌های 50 و 100 میکرون انجام شده است. در نمودارهای شکل‌های 15 و 16 تنش پسماند در راستاهای مختلف برای هر حالت عمق نفوذ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل‌ها مشخص است با افزایش عمق نفوذ تنش پسماند فشاری در راستاهای محوری و محیطی بر روی سطح نمونه افزایش یافته است که در این میان بیشترین افزایش تنش پسماند مربوط به تنش پسماند محیطی است. از طرف دیگر تنش پسماند شعاعی بر روی سطح نمونه کاهش می‌یابد.

4-2-4- تأثیر تعداد عبور بر توزیع تنش پسماند

به منظور بررسی اثر تعداد عبور در عملیات غلتک‌زنی بر روی توزیع تنش پسماند، شبیه‌سازی در دو حالت با تعداد عبور 1 و 2 انجام شده است. در نمودارهای شکل‌های 17 و 18 توزیع تنش پسماند در راستاهای مختلف برای هر حالت تعداد عبور نشان داده شده است. همان‌طور که از نمودارهای این شکل‌ها مشخص است با افزایش تعداد عبور، مقدار تنش پسماند در راستاهای محوری و محیطی بر روی سطح نمونه افزایش یافته است که بیشترین افزایش مربوط به تنش پسماند محیطی است. تنش پسماند فشاری شعاعی در سطح نمونه با افزایش تعداد عبور کاهش می‌یابد.

4-2-5- بررسی نیروی غلتک‌زنی

در جدول 6 مقدار نیروی بیشینه در هر حالت شبیه‌سازی آورده شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود در حالت‌های مربوط به قطر ساچمه 11 و 8 میلی‌متر نیز نیرو نسبت به سایر حالت‌ها افزایش یافته که این امر به دلیل افزایش سطح تماس این ساچمه‌ها نسبت به حالت با ساچمه 6 میلی‌متر است. همچنین بیشترین نیروی مورد نیاز برای عملیات غلتک‌زنی با عمق 100 میکرون حتی با قطر 6 میلی‌متر است که نشان‌دهنده تأثیر بیشتر عمق نفوذ نسبت به قطر ساچمه است.

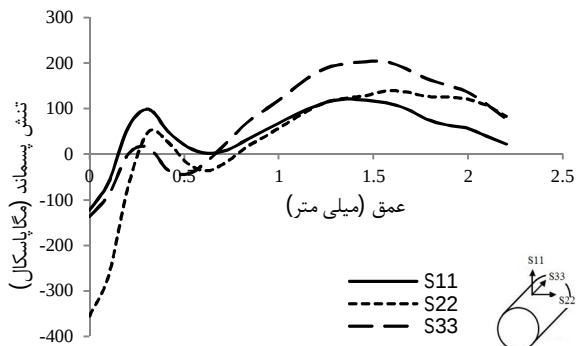
4-2-6- بررسی انرژی بر همگرایی نتایج

برای بررسی همگرایی در استفاده از نوع ساعت شنی¹ و مقدار مقیاس جرم² می‌بایست نسبت انرژی‌ها کنترل شود. معمولاً به منظور بررسی همگرایی نسبت انرژی مصنوعی به انرژی داخلی و برای کنترل مقدار مقیاس جرم نسبت انرژی جنبشی به انرژی داخلی بررسی می‌شوند. شکل‌های 19 و 20 تغییر این نسبت‌ها با زمان برای یک حالت شبیه‌سازی را نشان می‌دهند. این نسبت‌ها در تمامی شبیه‌سازی‌ها کنترل شده‌اند. همان‌طور که از نمودار شکل 19 مشخص است نسبت پایدار انرژی مصنوعی به انرژی داخلی کمتر از مقدار 5 درصد است و نیز با توجه به نمودار شکل 20 نسبت انرژی جنبشی به انرژی داخلی در حالت پایدار شده کمتر از 2 درصد است که این مقادیر در محدوده قابل قبولی قرار دارند [16].

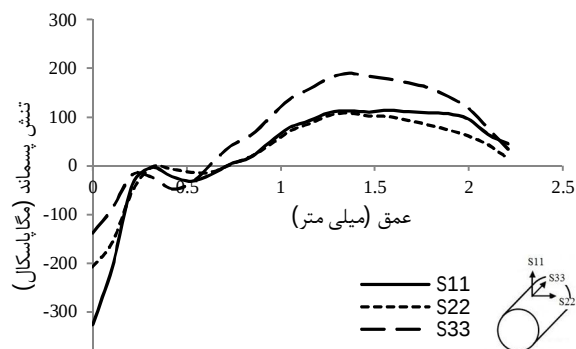
5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از شبیه‌سازی اجزاء محدود تأثیر عوامل مهمی در فرایند غلتک‌زنی عمیق همچون قطر ساچمه در ابزار غلتک‌زن، گام پیشروی،

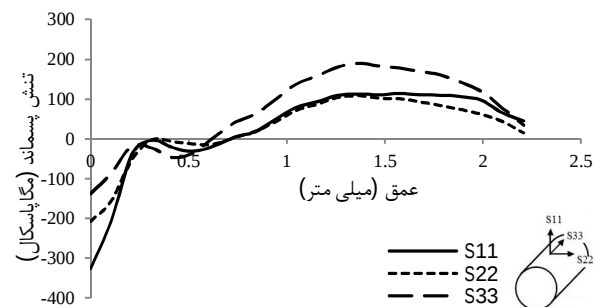
عمق نفوذ و تعداد عبور بر روی توزیع تنش پسماند آلومینیوم 7075 مورد بررسی قرار گرفتند. در شبیه‌سازی‌ها یک مدل سه‌بعدی نزدیک به واقعیت در نظر گرفته شد که در آن از مدل ماده مومسان شایوش برای پیش‌بینی رفتار سخت‌شوندگی ماده استفاده شده است. صحت‌سنجی روش عددی پیشنهادی



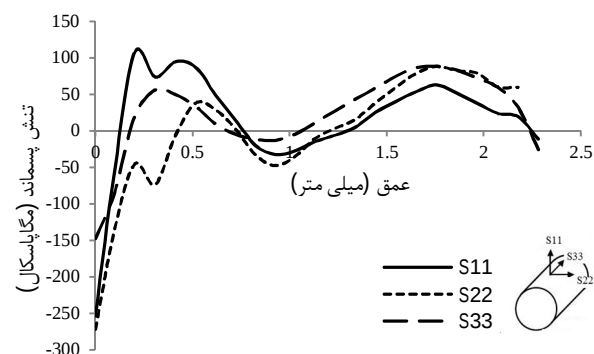
شکل 13 توزیع تنش پسماند برای گام پیشروی 0/08 میلی‌متر



شکل 14 توزیع تنش پسماند برای گام پیشروی 0/16 میلی‌متر



شکل 15 توزیع تنش پسماند برای عمق نفوذ 0/05 میلی‌متر



شکل 16 توزیع تنش پسماند برای عمق نفوذ 0/1 میلی‌متر

1- Hourglass
2- Mass scaling factor

با مقایسه نتایج آن با آزمایش و شبیه‌سازی‌های پیشین صورت پذیرفت. پس از بررسی چگونگی توزیع تنش پسماند با عوامل اشاره‌شده، نتایج زیر قابل استخراج است:

- 1- با افزایش قطر ساچمه تنش پسماند فشاری در دو راستای محیطی و محوری بر روی سطح اندکی افزایش می‌یابد ولی تنش پسماند کششی در عمق قطعه به میزان کمی کاهش می‌یابد.
- 2- با کاهش گام پیشروی هم‌پوشانی سطح و یکنواختی توزیع تنش پسماند افزایش می‌یابد و با افزایش گام پیشروی تنش پسماند فشاری کاهش می‌یابد.
- 3- با افزایش عمق نفوذ در عملیات غلتک‌زنی، تنش پسماند فشاری افزایش می‌یابد و عمق آن بیشتر می‌گردد.
- 4- با افزایش تعداد عبور ساچمه بر روی نمونه تنش پسماند فشاری روی سطح افزایش یافته و به حالت اشباع خود نزدیک‌تر می‌شود. در ضمن سطح غلتک‌زنی نیز یکنواخت‌تر می‌گردد.
- 5- الگوی مومسان شاپوش می‌تواند رفتار ماده در بارگذاری‌های کم‌چرخه مانند فرایند غلتک‌زنی را به خوبی پیش‌بینی نماید.
- 6- استفاده از شبیه‌سازی اجزاء محدود در اندازه‌گیری توزیع تنش پسماند به جای روش‌های تجربی علاوه بر هزینه پایین، زمان کم و در دسترس بودن، عمق بیشتری از تنش پسماند را نیز نمایان می‌سازد.

6- فهرست علائم

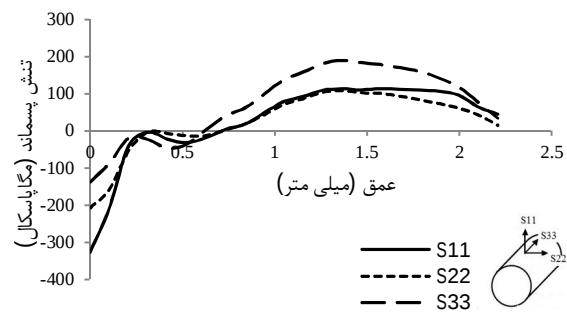
C_i	ثابت الگوی ماده شاپوش (پاسکال)
d	قطر ساچمه غلتک زن (میلی متر)
f	گام پیشروی (میلی متر)
P	عمق نفوذ (میکرو متر)
P_s	تعداد عبور
X	تنش بازگشتی (پاسکال)

علائم یونانی

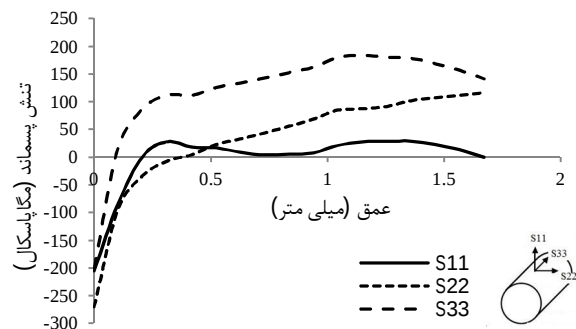
g_i	ثابت بدون بعد الگوی شاپوش
ε_x^p	کرنش مومسان
σ_0	تنش تسلیم نخستین

7- مراجع

- [1] I. Altenberger, Deep rolling-the past, the present and the future, in *Conf Proc: ICSP-9*, pp. 144-155, 2005.
- [2] P. Prabhu, S. Kulkarni, S. Sharma, K. Jagannath, C. Bhat, Deep Cold Rolling Process on AISI 4140 Steel and Optimization of Surface Roughness by Response Surface Methodology, 2012.
- [3] G. Majzoubi, K. Azadikhah, J. Nemati, The effects of deep rolling and shot peening on fretting fatigue resistance of Aluminum-7075-T6, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 516, No. 1, pp. 235-247, 2009.
- [4] A. Rodríguez, L. L. de Lacalle, A. Celaya, A. Lamikiz, J. Albizuri, Surface improvement of shafts by the deep ball-burnishing technique, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 206, No. 11, pp. 2817-2824, 2012.
- [5] Y. Yen, P. Sartkulvanich, T. Altan, Finite element modeling of roller burnishing process, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 54, No. 1, pp. 237-240, 2005.
- [6] W. Prager, Recent developments in the mathematical theory of plasticity, *Journal of Applied Physics*, Vol. 20, No. 3, pp. 235-241, 1949.
- [7] P. J. Armstrong, C. Frederick, *A mathematical representation of the multiaxial Bauschinger effect*: Central Electricity Generating Board [and] Berkeley Nuclear Laboratories, Research & Development Department, 1966.
- [8] J.-L. Chaboche, Time-independent constitutive theories for cyclic



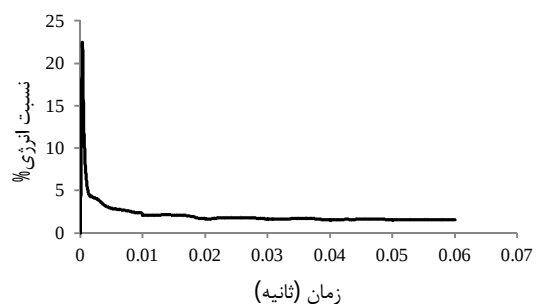
شکل 17 توزیع تنش پسماند برای یک بار عبور



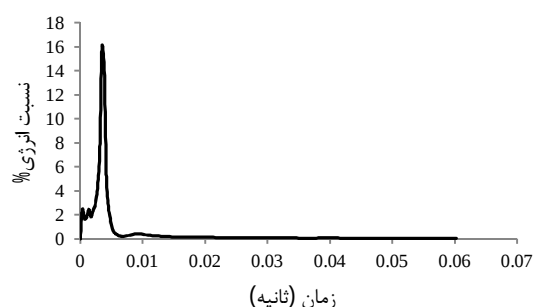
شکل 18 توزیع تنش پسماند برای دو بار عبور

جدول 6 نیروی اعمال شده در عملیات غلتک‌زنی

نیروی اعمال شده در عملیات غلتک‌زنی	متغیرهای غلتک‌زنی
423/75	$d=6, f=0/16, P=50, P_s=1$
499/8	$d=8, f=0/08, P=50, P_s=1$
587/5	$d=11, f=0/08, P=50, P_s=1$
881	$d=6, f=0/16, P=100, P_s=1$
361	$d=6, f=0/16, P=50, P_s=2$



شکل 19 نمودار نسبت انرژی داخلی به انرژی داخلی



شکل 20 نمودار نسبت انرژی جنبشی به انرژی داخلی

- hardening model and a modified hardening rule for uniaxial ratcheting prediction, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 4, No. 16, pp. 3009-3017, 2009.
- [13] E. Khademi, G. H. Majzoobi, N. Bonora, D. Gentile, Experimental modeling of Strain Dependent Cyclic Plasticity for Prediction of Hysteresis Curve, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. Accepted manuscript.
- [14] N. Bonora, G. Majzoobi, E. Khademi, Numerical implementation of a new coupled cyclic plasticity and continuum damage model, *Computational Materials Science*, Vol. 81, pp. 538-547, 2014.
- [15] K. Röttger, *Walzen hartgedrehter oberflaechen*: Shaker, 2003.
- [16] D. Systèmes, Abaqus 6.10 online documentation, *Abaqus User Subroutines Reference Manual*, 2010.
- plasticity, *International Journal of Plasticity*, Vol. 2, No. 2, pp. 149-188, 1986.
- [9] G. Majzoobi, E. Khademi, S. Pourolajal, An investigation into strain rate dependency of Chaboche plasticity model, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, 2015. (in persian)
- [10] G. Majzoobi, J. Nemati, A. Novin Rooz, G. Farrahi, Modification of fretting fatigue behavior of AL7075-T6 alloy by the application of titanium coating using IBED technique and shot peening, *Tribology International*, Vol. 42, No. 1, pp. 121-129, 2009.
- [11] M. Sayahi, S. Sghaier, H. Belhadjsalah, Finite element analysis of ball burnishing process: comparisons between numerical results and experiments, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 67, No. 5-8, pp. 1665-1673, 2013.
- [12] M. Rezaiee-Pajand, S. Sinaie, On the calibration of the Chaboche