مجله مهندسی مکانیک مدرس، دی 1396، دوره 17، شماره 10، ص‌ص 123-128

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی تغییرات دما در فرایند نورد سرد منیزیم با استفاده از روش اویلری-لاگرانژی کوپل

رضا عبدی بهنق[1*]، هادی عبداللهی[2]

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه

* ارومیه، صندوق پستی 57155-419 ، r.abdibehnagh@mee.uut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 26 تیر 1396

پذیرش: 13 شهریور 1396

ارائه در سایت: 13 مهر 1396

کلید واژگان:

منیزیم

تغییر شکل پلاستیک

نورد سرد

شبیه‌سازی المان محدود

اویلری-لاگرانژی کوپل

چکیده

قابلیت شکل‌دهی ضعیف منیزیم منجر به وقوع ترک و شکست در قطعه‌کار در حین فرایند نورد شده و کاربردهای آن را در صنایع مختلف محدود می‌کند. مدلسازی عددی فرایند می‌تواند این تضمین را بدهد که با کمترین هزینه تولید خصوصیات مورد نظر محصول به دست آید. مدلسازی عددی فرایند نورد مستلزم ترکیب مدل‌های مختلفی است که شامل پدیده‌های مختلف فیزیکی از قبیل تغییر شکل قطعه‌کار به همراه تغییرات حرارتی-متالورژیکی آن و همچنین ایجاد میدان حرارتی بر روی غلتک‌ها به همراه تغییر شکل‌های احتمالی آنها می‌باشد. از طرفی در شبیه‌سازی المان محدود فرایند نورد اغلب اعوجاج زیادی بر روی مش‌های قطعه‌کار اتفاق می‌افتد. این اعوجاج شدید، دقت و قابلیت اطمینان نتایج شبیه‌سازی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. با مرور تاریخچه شبیه‌سازی فرایند نورد مشاهده می‌شود که بر اساس رفتار ویسکوالاستیسیته ماده قطعه‌کار از روش‌های متعددی برای مدلسازی نورد استفاده شده است که هر یک مزایا و معایب خود را دارد. در مقاله حاضر روش اویلری-لاگرانژی کوپل برای شبیه‌سازی جریان مواد در فرایند نورد منیزیم خالص معرفی شده است که در آن ماده قطعه‌کار به سه ناحیه بدون تغییر شکل، در حال تغییرشکل و تغییرشکل یافته تقسیم می‌شود. مقایسه نتایج شبیه‌سازی فرمول‌بندی پیشنهاد شده با تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که میدان‌های حرارتی و کرنش به درستی شبیه‌سازی شده‌اند. این شبیه‌سازی‌ها در نرم افزار آباکوس و به صورت دو بعدی انجام شده است.

Investigation on temperature changes of Mg cold rolling process with the Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) method

Reza Abdi Behnagh*, Hadi Abdollahi

Faculty of Mechanical Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran.
* P.O.B. 57155-419, Urmia, Iran, r.abdibehnagh@mee.uut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 17 July 2017
Accepted 04 September 2017
Available Online 05 October 2017

Keywords:
Mg
Plastic deformation
Cold rolling
Finite element simulation
Coupled Eulerian-Lagrangian

ABSTRACT

The poor formability of Mg results in crack and failure in workpiece material during rolling process and limits its applications in different industries. Numerical modeling of the process can guarantee that the required product properties are met with a minimum production cost. The numerical modeling of the rolling processes requires the coupling of several models including different physical phenomena such as the deformation of the workpiece with its thermo-metallurgical evolution and the thermal evolution of the rolls with its mechanical deformation. On the other hand, in finite element modeling of the rolling process, the meshes of the workpiece are often highly distorted. The high distortion in meshes decreases the confidence in the predicted results. Many formulations based on the viscoelasticity behavior of workpiece material are encountered in the literature to model the rolling process, each with their pros and cons. This present work introduces the Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) formulation, in which the workpiece is divided into three regions (unrolled, in rolling deformation, rolled) to simulate material flow during the process. Comparison of the results with the literature shows that the temperature and strain fields are well predicted by the proposed model. All of the simulations have been done in the two-dimensional mode with ABAQUS/Explicit software.

1- مقدمه

آلیاژهای منیزیم به دلیل داشتن چگالی کم و استحکام و سفتی بالا به صورت قطعات ریختگی، اکسترودی و ورقی در صنایع هوافضا، خودروسازی و حمل و نقل استفاده زیادی دارند [2,1]. این دسته از آلیاژها سبک‌ترین فلزات سازه‌ای را تشکیل می‌دهند. میزان استفاده از قطعات ورقی منیزیم در مقایسه با قطعات ریختگی و اکسترودی بسیار محدودتر است. یکی از مهم‌ترین دلایل این محدودیت، ایجاد ترک و شکست ورق در حین فرایند نورد، به ویژه نورد سرد می‌باشد [3]. با کنترل دقیق فرایند نورد می‌توان تا میزان زیادی از ایجاد این عیوب جلوگیری کرده و دامنه استفاده از محصولات نورد منیزیم را گسترش داد. قطعات ورقی منیزیم اغلب با استفاده از فرایندهای ریخته‌گری رول دوقلو و نورد گرم تولید می‌شوند [5,4]. فرایند نورد سرد بیشتر برای تولید محصولاتی با خواص مکانیکی، تلرانس‌های ابعادی و صافی سطح بالاتر به کار می‌رود. در صنایع مدرن فلزی امروز، تلرانس‌ها در ابعاد و خصوصیات مکانیکی-متالورژیکی محصولات نورد شده، به طور پیوسته در حال دقیق‌تر

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

R. Abdi Behnagh, H. Abdollahi, Investigation on temperature changes of Mg cold rolling process with the Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 10, pp. 123-128, 2017 (in Persian)

شدن هستند. بنابراین، کنترل فرایند نورد بایستی به نحوی باشد که با کمترین میزان دورریز به ویژگی‌های محصول مورد نظر رسیده شود. شرط اول برای رسیدن به یک کنترل دقیق از فرایند، داشتن یک دانش عمیق از زوایای تکنیکی آن فرایند است. امروزه مدل‌های محاسباتی ابزاری قدرتمند و قابل اطمینان برای شبیه‌سازی فرایندهای حرارتی-مکانیکی و یا حتی فرایندهای متالورژیکی-حرارتی-مکانیکی محسوب می‌شوند. با توسعه تکنیک‌های محاسباتی و بهبود درک مکانیکی مرتبط با فرایندهای نورد تخت، روش‌های المان محدود (FEM) اغلب برای تحلیل و شبیه‌سازی نورد سرد یا گرم استفاده شده است [6-8]. در مقایسه با دیگر روش‌های تجربی و تحلیلی، روش المان محدود این مزیت را دارد که قادر است خصوصیات ماده قطعه‌کار را به صورت تابعی از کرنش، نرخ کرنش و دما در آورده و با استفاده از یک مدل پیچیده اصطکاکی در فصل مشترک غلتک-قطعه‌کار توزیعی دقیق از تنش، کرنش، نرخ کرنش و دما در قطعه‌کار و غلتک را ارائه نماید.

فرایند نورد را می‌توان با استفاده از روش‌های مختلف المان محدود مدلسازی کرد. این روش‌ها از جنبه‌های مختلفی همچون روش فرمول‌بندی، روش حل، نوع تحلیل (حرارتی، مکانیکی و یا حرارتی-مکانیکی) و مدل رفتار ماده با یکدیگر متفاوت هستند. به عنوان مثال، یاریتا و همکاران به تحلیل فرایند نورد صفحه‌ای با استفاده از مدل المان محدود الاستیک-پلاستیک پرداخته و موفق شدند با استفاده از یک کد لاگرانژی توسعه یافته به پیش‌بینی توزیع تنش و کرنش در منطقه تغییرشکل دست یابند [9]. هو و لنارد از یک فرمول‌بندی المان محدود در فرایند نورد تخت به منظور ارزیابی تأثیرات تغییر شکل قطعه‌کار-غلتک و شرایط اصطکاک مختلف بر روی میدان کرنش استفاده کردند [10]. هوانگ و همکاران در ارزیابی فرایند نورد گرم به بررسی میدان کرنش و توزیع دما در قطعه‌کار و غلتک پرداختند [11]. لیو و همکاران شبیه‌سازی فرایند نورد آلیاژ منیزیم AZ31 را در دو حالت دو بعدی و سه بعدی با استفاده از نرم‌افزار دفرم[1] انجام داده و گزارش کردند که نتایج شبیه‌سازی در هر دو حالت با نتایج آزمایش‌های تجربی همخوانی دارد [12]. تریپاتی و مدهاوی فرایند نورد گرم آلومینیم 2024 را به صورت الاستوپلاستیک با استفاده از نرم‌افزار آباکوس[2] شبیه‌سازی کردند. مدل توسعه یافته توسط آنها به مطالعه رفتار ماده در اثر تغییرات ضریب اصطکاک، قطر غلتک و ضخامت اولیه قطعه‌کار کمک می‌کند [13].

دما یک پارامتر بسیار مهم در مدلسازی رفتار ماده می‌باشد. از آنجایی که این پارامتر تأثیر بسیار زیادی بر روی ریزساختار ماده به جای می‌گذارد، لذا آنالیز حرارتی در طول فرایند نورد از اهمیت بالایی برخوردار است. تا به امروز، تحقیقات بسیاری بر روی بررسی میدان حرارتی در طول فرایند نورد انجام شده است. به عنوان مثال، هولاندر از یک مدل FDM یک بعدی و فرضیه تغییر شکل همگن برای محاسبه توزیع حرارت در فرایند نورد استفاده کرده است [14]. دیواداس و ساماراسکارا به شبیه‌سازی توزیع حرارت در قطعه‌کار و غلتک پرداخته و تأثیر پارامترهای فرایند بر روی میدان حرارتی ایجاد شده را بررسی کردند [15]. چن و همکاران نیز میدان‌های حرارتی و کرنش را با استفاده از یک مدل کوپل FEM و FDM محاسبه کردند [16]. یو و همکاران نیز با استفاده از یک مدل المان محدود حرارتی-مکانیکی به بررسی تغییرات حرارت در طول فرایند نورد سرد منیزیم با استفاده از غلتک‌های گرم شده پرداخته و تأثیر دمای غلتک، سرعت غلتک و میزان کاهش ضخامت در توزیع حرارت را بررسی نمودند [3].

در تحقیق حاضر از روش مدلسازی المان محدود اویلری-لاگرانژی کوپل در شبیه‌سازی فرایند نورد تخت استفاده شده است. این روش مدلسازی، همان طور که از نام آن پیداست، ترکیبی از فرمول‌بندی اویلری و فرمول‌بندی لاگرانژی بوده و عمدتاً در مکانیک سیالات مورد استفاده قرار گرفته است. با این وجود، استفاده از این تکنیک در حل مسائل مکانیک جامدات به دلیل مزایای بی‌شمار آن روز به روز در حال افزایش است [18,17]. بنسون و رکزی از اولین محققانی هستند که تلاش کرده‌اند از روش CEL در شبیه‌سازی فرایند ماشینکاری استفاده کنند، اما شبیه‌سازی‌های انجام شده توسط آنها حرارتی-مکانیکی نبوده است. این در شرایطی است که حرارت ایجاد شده در اثر تغییر شکل پلاستیکی یک عامل بسیار تأثیرگذار بر روی خواص ماده است. به عنوان نمونه، در ماشینکاری با سرعت بالا، دمای بیشینه می‌تواند به 1000° C برسد که می‌تواند تنش سیلان ماده را تحت تأثیر قرار داده و نتایج شبیه‌سازی را غیر قابل اطمینان سازد [20،19]. بررسی استفاده از روش CEL در شکل دهی فلزات نشان می‌دهد که اسکرات از این روش در شبیه‌سازی فرایند اکستروژن غیرمستقیم قطعات متقارن و غیرمتقارن استفاده نموده است. مسئله‌ای که در آن شبیه‌سازی با روش لاگرانژی امکان‌پذیر نبوده یا با محدودیت‌های زیادی همراه بوده است [21]. اخیراً روش مدلسازی CEL توسط داکوبو و همکاران در شبیه‌سازی المان محدود فرایند تراش متعامد نیز با موفقیت به کار گرفته شده است. در این تحقیق، مقایسه نتایج شبیه‌سازی CEL و ALE با نتایج تجربی نشان داده است که هر یک از روش‌های شبیه‌سازی با دقت قابل قبولی قادر به پیش‌بینی نتایج بوده‌اند، در حالی که زمان شبیه‌سازی در حالت CEL بسیار کوتاه‌تر بوده است [22].

با مرور تاریخچه شبیه‌سازی فرایند نورد می‌توان مشاهده کرد که هنوز قابلیت‌های روش اویلری-لاگرانژی کوپل در شبیه‌سازی این فرایند مورد بررسی قرار نگرفته است. هدف از انجام این تحقیق، شبیه‌سازی المان محدود فرایند نورد با استفاده از روش CEL می‌باشد. همچنین در این مقاله تأثیر سرعت نورد و میزان کاهش سطح مقطع بر روی میدان حرارتی تولید شده بررسی خواهد شد. در نهایت نتایج روش به کار رفته در این تحقیق با نتایج تحقیقات انجام شده بر روی فرایند نورد مقایسه شده و صحت و قابلیت اطمینان روش معرفی شده بررسی می‌شود.

2- شبیه‌سازی المان محدود

در شکل 1 نمای شماتیکی از فرایند نورد تخت نشان داده شده است. شعاع غلتک 100 mm بوده و به صورت الاستیک در نظر گرفته شده است. ضخامت قطعه‌کار 30 mm می‌باشد که با سرعت اولیه 10 mm/s به سمت غلتک‌ها حرکت می‌کند. همچنین با توجه به وجود دو غلتک بالایی و پایینی و تقارن به وجود آمده در فرایند، در ادامه و در بخش مدلسازی تنها نیمی از فرایند (بخش بالایی) مدل شده است. بنابراین، ضخامت قطعه‌کار در مدل نصف ضخامت قطعه‌کار و کاهش ضخامت نیز نصف خواهد شد. شبیه‌سازی با روش CEL انجام شده است. این شبیه‌سازی به صورت حرارتی-مکانیکی و با استفاده از نرم‌افزار آباکوس و به صورت صریح انجام شده است. در این تحلیل از المان‌های چهاروجهی[3] چهارگرهی با نقاط انتگرال کاهش یافته استفاده شده است. این المان‌ها از خانواده کوپل حرارتی-جابجایی بوده و با استفاده از امکان مش‌بندی غیر یکنواخت تعداد و اندازه آنها در نزدیکی فصل مشترک غلتک-قطعه‌کار بیشتر است. تعداد المان‌ها در قطعه‌کار و غلتک به ترتیب 1270 و 1210 است. مقیاس جرمی نیز مقدار 10 اعمال شده است. معیار

[1] Deform
[2] ABAQUS/Explicit
[3] Quadrilateral

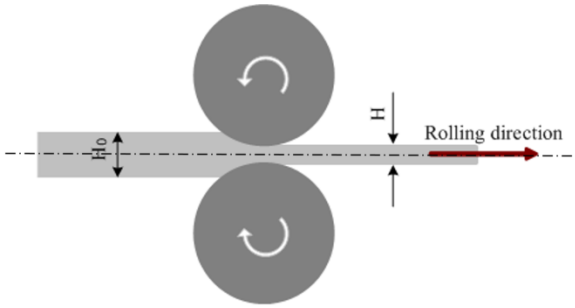

Fig. 1 Schematic view of flat rolling process

شکل 1 نمای شماتیک فرایند نورد تخت

شکست ماده به صورت پیش‌فرض فون میسز بوده و همچنین با توجه به ابعاد قطعه‌کار، شرایط کرنش صفحه‌ای در نظر گرفته شده است.

2-1- مدلسازی ساختار ماده قطعه‌کار

قطعه‌کار مدل شده در این فرایند منیزیم خالص و جنس غلتک‌ها کاربایدی می‌باشد. پارامترهای اصلی مواد برای قطعه‌کار و غلتک‌ها در جدول 1 آمده است.

همچنین مدل ساختاری جانسون-کوک[1] برای مدلسازی رفتار منیزیم خالص استفاده شده است. این مدل توسط رابطه 1 نشان داده شده است.

$$\sigma_{JC} = [A + B\varepsilon^n]\left[1 + C\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right]\left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)^{m_{JC}}\right] \quad (1)$$

در این رابطه ε کرنش پلاستیکی معادل، $\dot{\varepsilon}$ نرخ کرنش پلاستیکی معادل، T دمای لحظه‌ای فرایند و A، B، n، m_{JC}، $\dot{\varepsilon}_0$ و C پارامترهای ماده هستند که در زیر دمای ذوب (T_m) تعیین شده‌اند. پارامتر T_r نیز مربوط به دمای مرجع می‌باشد. مقادیر پارامترهای فوق در جدول 2 آمده است.

2-2- مدلسازی CEL

توصیف لاگرانژی و توصیف اویلری دو توصیف کلاسیک حرکت در شبیه‌سازی عددی مسائل چندبعدی در مکانیک جامدات به شمار می‌روند. روش‌های لاگرانژی-اویلری تطبیقی و اویلری-لاگرانژی کوپل از روش‌های جدیدی محسوب می‌شوند که امروزه برای مدلسازی سیستم‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش مدلسازی لاگرانژی-اویلری تطبیقی، همان طور که از نام آن پیداست، ترکیبی از فرمول‌بندی لاگرانژی و اویلری می‌باشد. در این روش، به منظور بهینه کردن شکل المان‌ها، مش‌های درون دامنه به طور دلخواه حرکت می‌کنند. این در شرایطی است که مش‌های روی مرزها و فصول مشترک دامنه در جهت جریان ماده حرکت می‌کنند. به عبارت دیگر در این حالت جریان ماده در ذیل حرکت مش‌ها آزاد می‌باشد. این ویژگی روش

جدول 1 خواص فیزیکی منیزیم و کارباید [23]

Table 1 Physical properties of pure Mg and carbide [23]

پارامتر	واحد	منیزیم خالص	کارباید
چگالی	kg/m^3	1741	14500
مدول الاستیک	GPA	44	696
ضریب پواسون	-	0.35	0.25
ضریب انبساط حرارتی	K^{-1}	25.2	0.52
هدایت حرارتی	W/m˚C	418	28.4
گرمای ویژه	kJ/kg˚C	1009	260

[1] Johnson-Cook

جدول 2 پارامترهای مدل جانسون-کوک برای منیزیم خالص [24]

Table 2 Johnson-Cook parameters for pure Mg [24]

A(MPa)	B(MPa)	n	C	m_{JC}	T_r (°C)	$\dot{\varepsilon}_0$ (1/s)
153	291.8	0.1026	0.013	1.5	20	1

ALE را با روش‌های سنتی مش‌زنی مجدد[2] متفاوت ساخته و استفاده از آن را برای بسیاری از مسائل شبیه‌سازی که با جریان ماده همراه هستند مناسب می‌سازد. فرمول‌بندی ALE با تثبیت مش‌ها در فضا می‌تواند به فرمول‌بندی لاگرانژی، و با معادل‌سازی حرکت مش‌ها با حرکت ماده به فرمول‌بندی اویلری تبدیل شود [25].

شکل 2 نمای شماتیکی از ساختار مدلسازی مراحل مختلف فرایند نورد تخت تک پاسه با شرایط مرزی حرارتی-مکانیکی را با استفاده از روش ALE نشان می‌دهد. در گام نخست، قطعه‌کار با سرعت اولیه مشخص به سمت بخش زیرین غلتک حرکت می‌کند. مرحله دوم نشان داده شده در این شکل حالت پایدار فرایند نورد است. در نهایت قطعه‌کار نهایی با ضخامت کاهش یافته پس از عبور از زیر غلتک دیده می‌شود.

در این مقاله از روش CEL برای شبیه‌سازی فرایند نورد استفاده شده است. این فرمول‌بندی بسیار شبیه به فرمول‌بندی ALE است. در این روش جابجایی گره‌ها و فرایند نگاشت جواب پس از محاسبات لاگرانژی انجام می‌گیرد. در واقع این روش به نوعی شبیه‌سازی المان محدود اویلری با یک مرحله لاگرانژی می‌باشد [27]. مهم‌ترین ویژگی فرمول‌بندی CEL در تعریف سطوح آزاد است که در آن مرزهای ماده بر مرزهای المان‌ها منطبق نیست. در روش CEL المان‌ها می‌توانند خالی بوده، تا اندازه‌ای اشغال شده و یا کاملاً از ماده پر شوند. در این حالت حجم ماده درون المان‌ها با کسر حجمی اندازه‌گیری می‌شود که از نسبت حجم ماده درون المان به حجم المان به دست می‌آید. المانی که کاملاً با ماده پر شده باشد دارای کسر حجمی یک و المانی که خالی باشد دارای کسر حجمی صفر خواهد شد. المان می‌تواند همزمان با بیش از یک نوع ماده اشغال شده باشد. مجموع کسرهای حجمی مواد درون المان همواره یک می‌باشد. شکل 3 دیسکی را نشان می‌دهد که با استفاده از عدد کسر حجمی نمایش داده شده است. از آنجایی که سطح آزاد ماده اویلری به هیچ یک از مرزهای المان‌ها مرتبط نیست، سطح آزاد با استفاده از کسر حجمی المان‌ها در طول هر افزایش زمان محاسبه می‌شود.

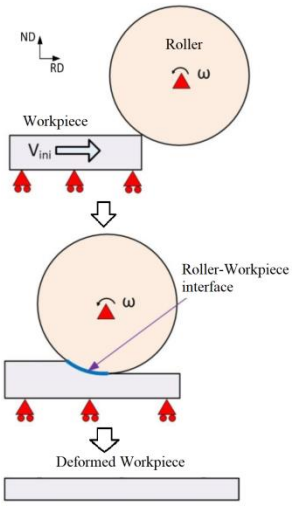

Fig. 2 Schematic view of single pass cold rolling process [26]

شکل 2 نمای شماتیک فرایند نورد سرد تک پاسه [26]

[2] Remeshing

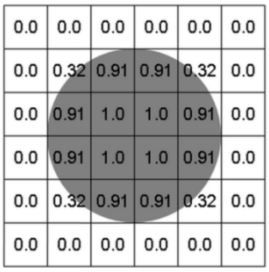

Fig. 3 Eulerian material represented by volume fraction in a Eulerian mesh [28]

شکل 3 ماده اویلری نمایش داده شده با کسر حجمی در یک شبکه مش اویلری [28]

مواد اویلری نه تنها می‌تواند با مواد اویلری تعامل داشته باشد بلکه همچنین می‌تواند با قسمت‌های لاگرانژی نیز در ارتباط باشد. بنابراین، شبیه‌سازی‌های شامل این نوع از برهم‌کنش‌ها به شبیه‌سازی اویلری-لاگرانژی کوپل موسوم هستند.

مزایای روش CEL مشخص است. فایده مهم داشتن مش ثابت در فضا این است که اعوجاج المان به طور کامل حذف می‌شود. مهم‌تر از آن اینکه در این روش نیازی به تولید مش انطباقی وجود ندارد، در واقع شبکه منظمی از مش‌ها همواره دقیق‌ترین نتایج را تولید می‌کنند [28].

شکل 4 ساختار و شرایط مرزی مدل CEL را برای نورد تخت صفحه‌ای نشان می‌دهد. به منظور شبیه‌سازی جریان ماده در حین فرایند نورد، دامنه لاگرانژی-اویلری برای نواحی مختلف (1 الی 3) در شکل اعمال شده است. این نواحی با استفاده از قابلیت پارتیشن[1] در محیط نرم‌افزار از یکدیگر جدا شده‌اند. در شکل 4 نحوه جریان مواد در ساختار CEL با استفاده از فلش‌هایی نشان داده شده است. در طول فرایند شبیه‌سازی، ماده از سمت چپ از ناحیه 1 جریان یافته، در ناحیه 2 از زیر غلتک عبور کرده و از طریق خروجی سمت راست (ناحیه 3) از دامنه شبیه‌سازی خارج می‌شود.

در این روش، با توجه به نحوه مش‌بندی، وضعیت گره‌های موجود در نواحی مختلف مشخص شده و قیود آنها تعریف شده است. دسته‌بندی گره‌ها و قیود تعریف شده به ترتیب در شکل 5 و جدول 3 ارائه شده است.

در تعریف شرایط مرزی اولیه برای غلتک، دما در دیواره داخلی آن ثابت در نظر گرفته شده است. دمای اولیه برای غلتک و قطعه‌کار C °25 اعمال شده است. در اینجا غلتک به صورت یک رینگ در نظر گرفته شده و با المان‌های چهارضلعی مش‌بندی شده است. صفحه داخلی این رینگ نیز با تعریف یک نقطه مرجع و استفاده از قیود موجود در نرم‌افزار تثبیت شده است. برای بررسی تأثیر تغییر سرعت دورانی و مقدار کاهش سطح مقطع در یک پاس، سرعت دورانی دو مقدار 10 و 20 rpm در نظر گرفته شده و میزان

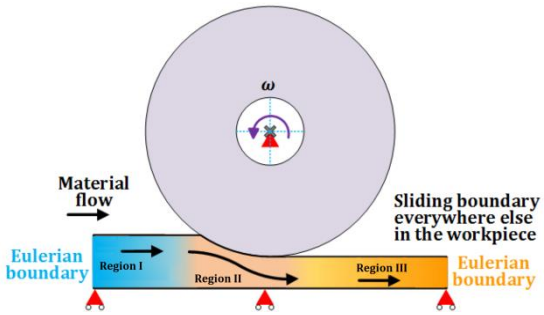

Fig. 4 Different regions in CEL modeling of flat rolling process

شکل 4 نواحی مختلف در مدلسازی CEL فرایند نورد تخت

[1] Partition

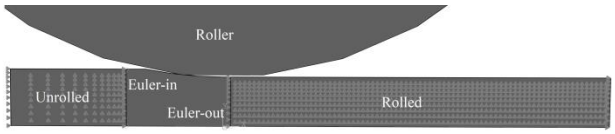

Fig. 5 Viewport of mesh sets defined on the workpiece

شکل 5 دسته‌بندی گره‌های تعریف شده بر روی قطعه‌کار

جدول 3 قیود اعمال شده به مش‌ها در شکل 5

Table 3 Mesh constraints defined on Fig. 5

مجموعه	جهت و اندازه
چپ	$V1=0$
نورد نشده	$V2=0$
اویلر-ورودی	$V1=0$
اویلر-خروجی	$V1=0$
نورد شده	$V2=0$
راست	$V1=0$

کاهش سطح مقطع نیز 14% و 40% انتخاب شده است. در لحظه آغاز شبیه‌سازی، غلتک با سرعت انتخاب شده شروع به چرخش نموده و قطعه‌کار با سرعت پیش‌بینی شده به زیر غلتک کشیده می‌شود. ضریب اصطکاک ثابت و مقدار آن 0.5 در نظر گرفته شده است.

3- نتایج و بحث

بررسی تغییرات حرارتی قطعه‌کار در فرایندهای تغییر شکل پلاستیکی یکی از مهم‌ترین راه‌های درک خواص ریزساختاری و متالورژیکی قطعات تولید شده می‌باشد. در این مقاله نتایج شبیه‌سازی به دو صورت منحنی‌های درجه حرارت-مکان و تصاویر میدان‌های حرارتی ارائه شده است. در حین فرایند نورد، حرارت از دو منبع ایجاد می‌شود: اصطکاک و کار پلاستیک. حرارت اصطکاکی از تماس مستقیم غلتک و ورق تولید می‌شود. حرارت ناشی از کار پلاستیک نیز در اثر تغییر شکل ورق و کاهش ضخامت به وجود می‌آید که در تمامی سطح ورق گسترش می‌یابد. برای بررسی تغییرات دمای قطعه‌کار در حین فرایند نورد از دو دسته گره با فاصله‌های متفاوت از فصل مشترک غلتک-قطعه‌کار استفاده شده است. گره‌های موجود در دسته اول که با نام مسیر 1[2]در شکل 6 دیده می‌شود، طوری انتخاب شده‌اند که نزدیک به فصل مشترک باشند. اما دسته دوم که با نام مسیر 2[3] در شکل مشخص است در فاصله‌ای در حدود نصف ضخامت قطعه‌کار از فصل مشترک در نظر گرفته شده‌اند. با استفاده از این دو دسته گره انتخاب شده می‌توان میزان تغییرات دما در ضخامت و طول قطعه‌کار را مورد بررسی قرار داد.

در شکل 7 تغییرات درجه حرارت در فرایند نورد در دو مسیر 1 و 2 برای چهار ترکیب سرعت دورانی و درصد کاهش سطح مقطع دیده می‌شود. به طور کلی این نمودارها را می‌توان به سه بخش تقسیم کرد: قبل از آغاز نورد،

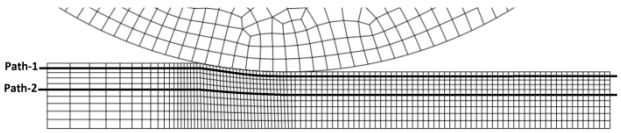

Fig. 6 Selected paths on the workpiece for investigation of temperature variations

شکل 6 مسیرهای انتخاب شده بر روی قطعه‌کار برای بررسی تغییرات دما

[2] Path-1
[3] Path-2

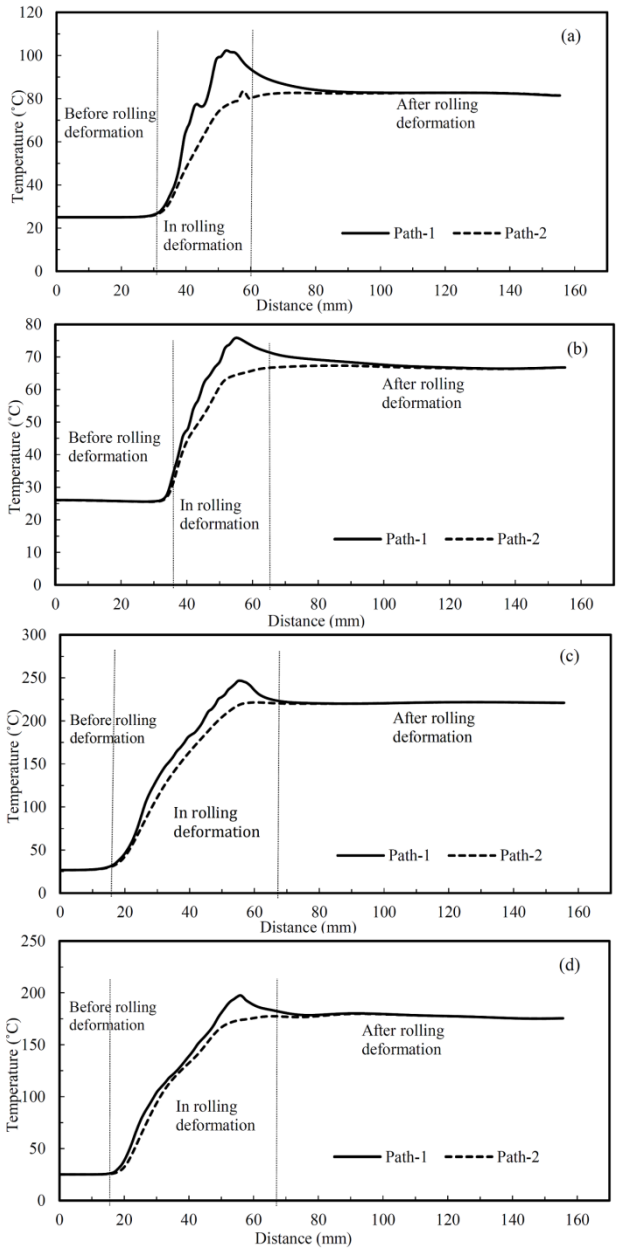

Fig. 7 Temperature history during rolling process: a) reduction rate %14, rotational speed 10 rpm; b) reduction rate %14, rotational speed 20 rpm; c) reduction rate %40, rotational speed 10 rpm; d) reduction rate %40, rotational speed 20 rpm

شکل 7 منحنی تغییرات دما در فرایند نورد: الف) کاهش سطح مقطع 14%، سرعت دورانی 10 rpm، ب) کاهش سطح مقطع 14%، سرعت دورانی 20 rpm، ج) کاهش سطح مقطع 40%، سرعت دورانی 10 rpm، د) کاهش سطح مقطع 40%، سرعت دورانی 20 rpm

عبور قطعه‌کار از زیر غلتک و بعد از تغییر شکل توسط غلتک. در بخش اول قسمتی از قطعه‌کار قرار دارد که هنوز به زیر غلتک کشیده نشده است و شرایط اولیه فرایند به قوت خود باقیست. همان طور که در منحنی‌های شکل 7 نیز پیداست، در این بخش دمای قطعه‌کار 25° C درجه می‌باشد که همان دمای اولیه تعریف شده است. بخش بعدی مربوط به عبور قطعه‌کار از زیر غلتک می‌باشد. منحنی‌های شکل 7 نشان می‌دهند که در این قسمت به دلیل شروع تغییرشکل پلاستیکی دمای قطعه‌کار به سرعت افزایش پیدا می‌کند تا به یک نقطه بیشینه برسد. همچنین ملاحظه می‌شود که بلافاصله پس از عبور قطعه‌کار از زیر غلتک درجه حرارت کاهش یافته و به یک میزان پایدار می‌رسد. بخش سوم نشان داده شده در شکل 7 توزیع پایدار حرارت در قطعه‌کار نهایی قبل از هرگونه فرایند خنک‌کاری را نشان می‌دهد. همچنین با دقت در منحنی های شکل 7 مشاهده می‌شود که در همه نمودارها، در هنگام عبور قطعه‌کار از زیر غلتک، دمای قطعه‌کار در مسیر 1 در نزدیکی سطح بیرونی قطعه‌کار بالاتر است. این پدیده با کارهای تجربی انجام شده و دیگر فرایندهای شکل‌دهی که در آنها دما در مرزهای خارجی قطعه‌کار به دلیل کرنش بالاتر بیشتر است، مطابقت دارد.

نتایج شبیه‌سازی کرنش پلاستیکی معادل برای یکی از نمونه‌ها در شکل 8، صحت یافته‌های بالا را تأیید می‌کند. همان طور که در شکل 8 پیداست، توزیع کرنش در طول ورق همگن بوده و کرنش پلاستیکی معادل در مرز بیرونی ورق بیشتر از قسمت‌های داخلی است. بیشینه کرنش نیز در سطح ورق و در جایی زیر غلتک قرار گرفته که ورق به ضخامت نهایی رسیده است.

شکل 9 میدان‌های حرارتی ایجاد شده در حین فرایند نورد را نشان می‌دهد. این تصاویر در کنار منحنی‌های موجود در شکل 7 به درک عمیق‌تر فرایند نورد کمک می‌کند. نتایج شبیه‌سازی در این بخش حاکی از آنست که بیشینه درجه حرارت در همه نمونه‌ها در فصل مشترک غلتک-قطعه‌کار و در منطقه‌ای دیده می‌شود که قطعه‌کار به ضخامت نهایی رسیده است. از طرفی در میان چهار نمونه شبیه‌سازی شده، بیشترین درجه حرارت با مقدار 250 $^{\circ}$C، در نمونه‌ای دیده می‌شود که در آن سرعت دورانی غلتک و میزان کاهش ضخامت به ترتیب مقادیر 10 rpm و 40% را داراست. در این نمونه سرعت دورانی مقدار کمتر و میزان کاهش ضخامت مقدار بیشتر را دارد. همچنین کمترین درجه حرارت مربوط به نمونه دوم با سرعت دورانی 20 rpm و درصد کاهش سطح مقطع 14% دیده می‌شود. با مقایسه نمونه‌ها در شکل 9 ملاحظه می‌شود که با ثابت نگه داشتن میزان کاهش سطح مقطع در نمونه‌ها، با افزایش سرعت نورد، میزان حرارت تولید شده کمتر می‌شود. یافته‌های تحقیقات پیشین نشان داده است که اگرچه تغییرات سرعت دورانی اثری بر روی کرنش مؤثر در فرایند نمی‌گذارد، لیکن افزایش سرعت دورانی غلتک منجر به کاهش ضریب اصطکاک متوسط بین سطح غلتک و قطعه‌کار شده و از میزان حرارت ناشی از اصطکاک می‌کاهد [29]. همچنین مشاهدات نشان می‌دهد که در یک سرعت دورانی ثابت با افزایش میزان کاهش ضخامت درجه حرارت نیز افزایش می‌یابد. افزایش میزان کاهش ضخامت در یک سرعت ثابت دو اثر مهم در فرایند به همراه دارد: از طرفی به معنی افزایش تغییر شکل پلاستیکی و کرنش در قطعه‌کار بوده و باعث تولید بیشتر حرارت ناشی از تغییرشکل پلاستیکی می‌شود و از سویی دیگر باعث افزایش ضریب اصطکاک متوسط بین غلتک و قطعه‌کار شده و حرارت ناشی از اصطکاک را بالا می‌برد [30]. این نتایج با یافته‌های تحقیقات لیو و همکاران بر روی نورد آلیاژ منیزیم AZ31 نیز مطابقت دارد [4].

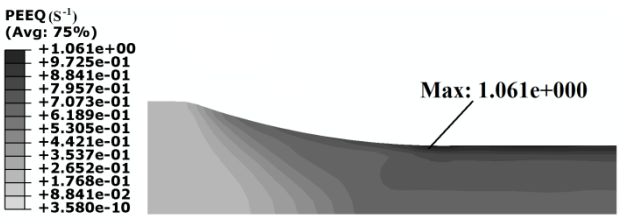

Fig. 8 Simulated equivalent plastic strain, reduction rate %40, rotational speed 20 rpm

شکل 8 کرنش پلاستیکی معادل شبیه‌سازی شده، کاهش سطح مقطع 40%، سرعت دورانی 20 rpm

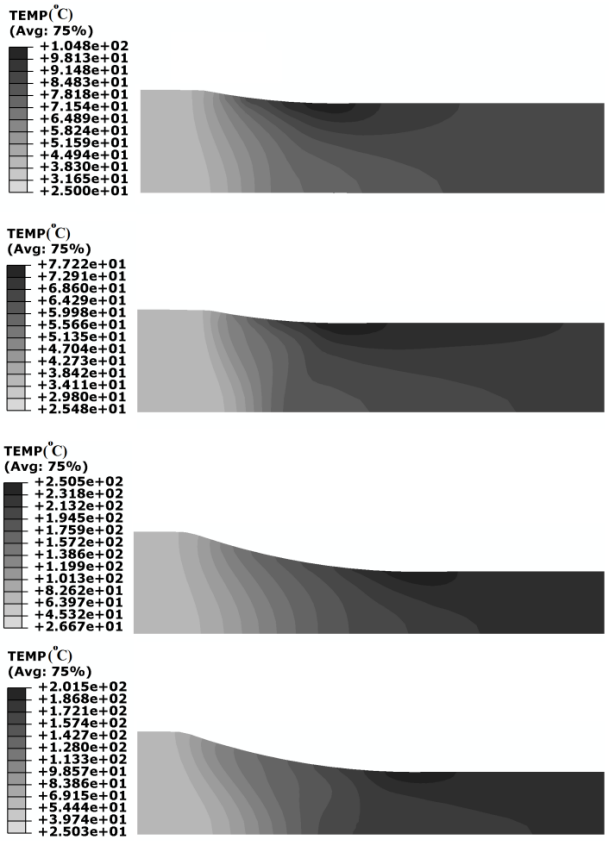

Fig. 9 Simulated temperature field: a) reduction rate %14, rotational speed 10 rpm, b) reduction rate %14, rotational speed 20 rpm, c) reduction rate %40, rotational speed 10 rpm, d) reduction rate %40, rotational speed 20 rpm

شکل 9 میدان‌های حرارتی شبیه‌سازی شده: الف) کاهش سطح مقطع 14%، سرعت دورانی 10 rpm، ب) کاهش سطح مقطع 14%، سرعت دورانی 20 rpm، ج) کاهش سطح مقطع 40%، سرعت دورانی 10 rpm، د) کاهش سطح مقطع 40%، سرعت دورانی 20 rpm

4- نتیجه‌گیری

در این مقاله برای اولین بار از روش مدلسازی اویلری-لاگرانژی کوپل برای شبیه‌سازی المان محدود حرارتی-مکانیکی فرایند نورد سرد تک پاسه برای بررسی توزیع حرارت در طول فرایند استفاده شده و نتایج به دست آمده با مطالعات پیشین انجام شده بر روی این فرایند مطابقت دارد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که این مدل قادر به بررسی تأثیر پارامترهای مهم فرایند از قبیل سرعت چرخش غلتک‌ها و نیز میزان کاهش ضخامت در هر پاس بر روی حرارت تولید شده می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی انجام شده حاکی از آن است که توزیع حرارت و کرنش در عمق قطعه‌کار یکنواخت نبوده و در همه نمونه‌ها در مناطقی نزدیک فصل مشترک غلتک-قطعه‌کار مقادیر بیشتری را دارند. همچنین بررسی‌ها نشان داد که هر دو پارامتر سرعت دورانی و میزان کاهش ضخامت بر روی حرارت تولیدی تأثیرگذار بوده و افزایش سرعت دورانی غلتک منجر به کاهش حرارت تولیدی و افزایش میزان کاهش ضخامت در هر پاس منجر به افزایش حرارت تولیدی می‌گردد.

5- مراجع

[1] M. A. Ansari, E. S. Naeini, M. K. Besharti, G. Faraji, Theoretical and experimental investigation of the effective parameters on the microstructure of magnesium wire produced by friction stir extrusion, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 6, pp. 346-352, 2015. (in Persian فارسی)

[2] J. Iwaszko, K. Kudła, K. Fila, M. Strzelecka, The effect of friction stir processing (FSP) on the microstructure and properties of AM60 magnesium alloy, *Archives of Metallurgy and Materials*, Vol. 61, No. 3, pp. 1555-1560, 2016.

[3] H. Yu, Q. Yu, J. Kang, X. Liu, Investigation on temperature change of cold magnesium alloy strips rolling process with heated roll, *Materials Engineering and Performance*, Vol. 21, No. 9, pp. 1841-1848, 2012.

[4] W. Xia, Z. Chen, D. Chen, S. Zhu, Microstructure and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy sheets produced by differential speed rolling, *Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 1, pp. 26-31, 2009.

[5] S. Das, N. S. Lim, J. B. Seol, H. W. Kim, C. G. Park, Effect of the rolling speed on microstructural and mechanical properties of aluminum-magnesium alloys prepared by twin roll casting, *Materials and Design*, Vol. 31, No. 3, pp. 1633-1638, 2010.

[6] H. Sheikh, Thermal analysis of hot strip rolling using finite element and upper bound methods, *Applied Mathematical Moldelling*, Vol. 33, No. 5, pp. 2187-2195, 2009.

[7] A. R. Shahani, S. Setayeshi, S. A. Nodamaie, M. A. Asadi, S. Rezaie, Prediction of influence parameters on the hot rolling process using finite element method and neural network, *Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 4, pp. 1920-1935, 2009.

[8] H. Hallberg, Influence of process parameters on grain refinement in AA1050 aluminum during cold rolling, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 66C, pp. 260-272, 2013.

[9] I. Yarita, R. L. Mallett, E. H. Lee, Stress and deformation analysis of plane-strain rolling process, *Steel Research International*, Vol. 56, No. 5, pp. 231–255, 1985.

[10] Y. J. Hwu, J. G. Lenard, A finite element study of flat rolling, *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 110, No. 22, pp. 255-259,1988.

[11] S. M. Hwang, M. S. Joun, Analysis of hot-strip rolling by a penalty rigid-viscoplastic finite element method, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 34, No. 12, pp. 971984, 1992.

[12] D. Liu, Z. Liu, L. Wang, Simulation of rolling process of AZ31 magnesium alloy sheet, *Procedia Engineering*, Vol. 81, pp. 173-178, 2014.

[13] A. Tripathi, A. Medhavi, Finite element simulation of hot rolling for an aluminium 2024 plate, *International Journal of Scientific and Research Publications*, Vol. 4, No. 12, pp. 361-365, 2014.

[14] F. A Hollander, A model to calculate the complete temperature distribution in steel during hot rolling, *Iron and Steel Institute*, Vol. 208, pp. 46-74, 1970.

[15]C. Devadas, I. V. Samarasekara, Heat transfer during hot rolling of steel strip, *Ironmaking and Steelmaking*, Vol. 13, pp. 311-321, 1986.

[16] W. C. Chen, I. V. Samarasekara, A. Kumar, E. B. Hawbolt, Mathematical modelling of heat flow and deformation during rough rolling, *Ironmaking and Steelmak*ing, Vol. 20, pp. 113-125, 1993.

[17] G. Qiu, S. Henke, J. Grabe, Application of a coupled eulerian–lagrangian approach on geomechanical problems involving large deformations, *Computers and Geotechnics*, Vol. 38, No. 1, pp. 30-39, 2011.

[18] A. Skrzat, Application of coupled Eulerian-Lagrangian approach in metal forming simulations, *Scientific Letters of Rzeszow University of Technology-Mechanics*, Vol. 84, No. 4/2012, pp. 25-35, 2012.

[19] A. Raczy, M. Elmadagli, W. J. Altenhof, A. T. Alpas, An eulerian finite-element model for determination of deformation state of copper subjected to orthogonal cutting, *Metallurgical And Materials Transactions A*, Vol. 35, No. 8, pp. 2393-2399, 2004.

[20] D. J. Benson, S. Okazawa, Contact in a multi-material eulerian finite element formulation, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 193, No. 39-41, pp. 4277-4298, 2004.

[21] A. Skrzat, Application of coupled eulerian-lagrangian approach in metal forming simulations, *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej Mechanika*, Vol. 84, No. 4, pp. 25–35, 2012.

[22] F. Ducobu, E. Rivi`ere-Lorph`evre, E. Filippi, Application of the Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) method to the modeling of orthogonal cutting, *European Journal of Mechanics A/Solids*, Vol. 59, pp. 58-66, 2016.

[23] S. C. Erickson, *ASM Handbook, Vol. 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, Tenth Edition, pp. 1099-1201, Ohio: ASM International, 1990.

[24] R. A. Behnagh, N. Shen, M. A. Ansari, M. Narvan, M. K. Besharati Givi, H. Ding, Experimental analysis and microstructure modeling of friction stir extrusion of magnesium chips, *Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 138, No. 4, pp. 41008, 2016.

[25] O. Pantalé, J. L. Bacaria, O. Dalverny, R. Rakotomalala, S. Caperaa, 2D and 3D numerical models of metal cutting with damage effects, *Compuer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 193, No. 39-41, pp. 4383-4399, 2004.

[26] H. Ding, N. Shen, Y. C. Shin, Experimental evaluation and modeling analysis of micromilling of hardened H13 tool steels, *Trans. ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 133, No. 4, pp. 41007, 2011.

[27] A. Raczy, M. Elmadagli, W. J. Altenhof, A. T. Alpas, An eulerian finite-element model for determination of deformation state of a copper subjected to orthogonal cutting, *Metallurgical and Materials Transactions*, Vol. 35, No. 8, pp. 2393-2400, 2004.

[28] *ABAQUS*, ABAQUS Documentation V6. 12. 2012.

[29] L. Lai-Seng, J. G. Lenard, Study of friction in cold strip rolling, *Engineering Material Technology*, Vol. 106, No. 2, pp. 139-146, 1984.

[30] B. Hum, H. W. Colquhoun, J. G. Lenard, Measurements of friction during hot rolling of aluminum strips, *Materials Processing Technology*, Vol. 60, No. 2, pp. 331-338, 1996.