مجله رویکردهای نوین در تحقیقات علوم پایه، فنی و مهندسی
سال دوم، شماره ۷، زمستان ۱۳۹۸
ISSN: ۲٦٤٥-٥٤٣٩
www.jonarbset.ir

شبیه‌سازی و تحلیل نوردگرم یک شمش ریخته‌گری توسط نرم‌افزار آباکوس

فاطمه فرهت نیا [۱]، محمدرضا مقومی [۲] *

[۱] استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر.
[۲] دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاداسلامی خمینی شهر

چکیده

یکی از روش‌های متداول در صنایع فلزی که همواره در تولید انبوه صنایع مادر استفاده می‌شود، نوردکاری می‌باشد. هرچند این فرایند تولید قدمت زیادی دارد، اما امروزه هم در ساخت و تولید و هم از نظر شکل‌دهی فلزات جایگاه بسیار خوبی را به‌خود اختصاص داده است. مهم‌ترین موضوع نورد (گرم و سرد)، تنش‌ها و کرنش‌های اعمالی و عملیات سخت‌کاری روی قطعات تولیدی می باشد. در تحلیل تنش و کرنش ساختار داخلی قطعات پیش و پس از عملیات نورد از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. بنابراین امروزه برای تحلیل بهتر از ابزارهای شبیه‌سازی استفاده خوبی می‌شود. در این مقاله؛ ضمن بررسی روابط مهندسی نورد، با شبیه‌سازی نورد گرم یک شمش فولادی، به تحلیل کرنش و تنش اعمالی پرداخته می‌شود. نتایج به‌دست آمده از مانیتورینگ فرایند تولید نورد گرم مطابقت خوبی با محاسبات مهندسی نورد دارد.

واژه‌های کلیدی: نوردگرم، شبیه سازی، کرنش، تنش.

۱- مقدمه

کازوکی موری و یاماناکا (۲۰۱۷) در پژوهشی با عنوان " تجزیه و تحلیل چند مقیاس مبتنی بر ریزساختار نوردگرم از فولاد ضدزنگ دوبلکس با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی متنوع" بااستفاده از ریزساختارهای به‌دست آمده توسط شبیه‌سازی صورت گرفته، خواص پلاستیک تنش‌های اعمالی در این فرایند را بررسی و تحلیل نمودند. [۱]

کایوی‌لی و همکاران در تحقیقی با عنوان "توسعه سیستم شبیه سازی برای نوردگرم مقاطع H بااستفاده از نرم‌افزار آباکوس" یک تغییرشکل حرارتی الاستوپلاستیک را شبیه‌سازی نمودند که نتایج به‌دست آمده با مشخصات اندازه‌گیری شده تجربی ۶ درصد خطا داشت. [۲]

مهدی باقری پور و حسین بیسادی در تپژوهشی تحت عنوان " تأثیر پارامترهای نورد بر توزیع دما در نوردگرم نوارهای آلومینیومی" یک مدل را براساس تحلیل حرارتی و مکانیکی با بهره‌گیری از روش اجزای محدود تحلیل و بررسی نمودند و پارامترهای مختلفی مانند سرعت چرخش غلتک‌ها، میزان ضخامت ورق‌ها، و ضریب انتقال حرارت را مورد ارزیابی قرار دادند. [۳]

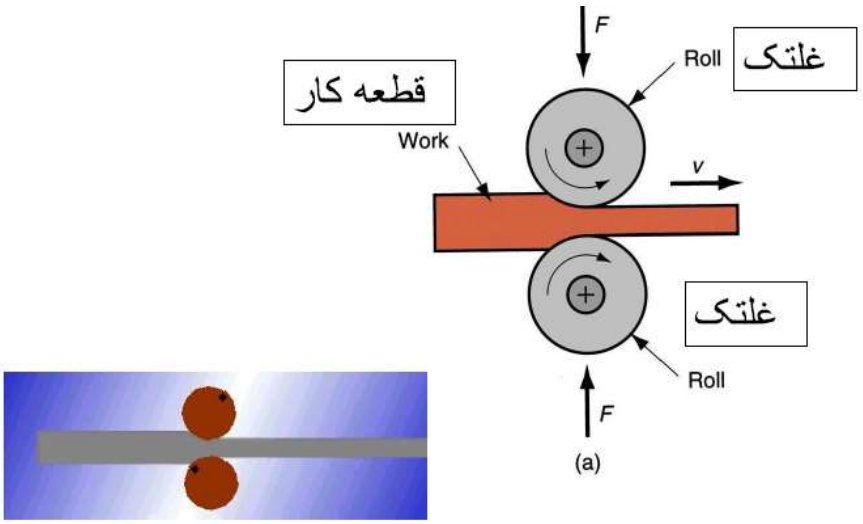
انجامی و بسطی تأثیر ابعاد غلتک های فرم دهی در نورد حلقوی گرم را بر روی کیفیت قطعه نهایی از جمله میزان عیب دم ماهی مورد مطالعه قرار دادند. [۴]

نورد یکی از روش‌های شکل‌دهی مواد است که قابلیت موم‌سانی دارد. در دماهای پایین و نزدیک دمای اتاق، تنها فلزات و برخی پلیمرها قابلیت موم‌سانی مناسب از خود نشان می‌دهند. برای افزایش این قابلیت و هم‌چنین شکل‌دهی موادی که در دماهای پایین نورد آنها امکان پذیر نیست، از نورد گرم استفاده می‌شود. نورد از حیث دمای عملیات به دو گروه نورد سرد و نورد گرم تقسیم می‌گردد. در نورد گرم قابلیت تغییر شکل خیلی بالاست. از آن‌جا که در اثر تبلور مجدد، استحکام تسلیم به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می یابد، لذا نیروی لازم برای فرایند نورد قطعات بزرگ در فرایند نورد گرم افت محسوسی دارد. در نورد سرد یک سطح تمام شده مطلوب حاصل می‌شود. این عملیات عمدتا برای فرایند تغییر شکل نهایی استفاده می‌گردد. از دستگاه‌های نورد به‌طور بسیار گسترده‌ای برای گرم‌کاری و سردکاری بسیاری از فلزات و آلیاژها در اندازه‌های بسیار متنوع استفاده می‌شود. برخی از شمش‌هایی که به تولید ورق فولادی اختصاص داده شده‌اند ممکن است ۲۰ تن وزن و ضخامت حداقل ۰,۳m داشته باشند . یک کارخانه نورد ممکن است به تنهایی در هرهفته ۵۰۰۰۰ تن تختال فولادی با پهنای تا حدود ۱,۸m تولید کند. [۵]

در نورد گرم، شمش پس از رسیدن به درجه حرارت مورد نظر (معمولا بالاتر از ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) در کوره‌های نورد از بین چند مجموعه غلتک درحال چرخش عبور نموده و با کاهش متوالی مقطع نهایتا به فرم مورد نظر تبدیل می‌شود. برای بسیاری از فراورده‌ها، روش‌های نورد جای‌گزین دیگر روش‌های شکل‌دادن فلزها، همانند آهنگری و ریخته‌گری شدند. در این راستا آشنایی با اصول طراحی مراحل نورد بسیار حائز اهمیت است.[۶]

نورد یکی از فرایندهای شکل‌دهی حجمی است که عموما برای کاهش سطح مقطع قطعه اولیه جسم و ایجاد اشکال با سطح مقطع مورد نظر می‌باشد. در فرایند نورد، قطعه با عبور پیوسته از بین حداقل دو غلتک درحال چرخش تغییر شکل می‌یابد. این غلتک‌ها، استوانه‌ای شکل بوده و محور آنها موازی یک‌دیگر می‌باشد. با نزدیک شدن قطعه به غلتک‌ها، غلتک‌ها در جهت

مخالف یک‌دیگر به چرخش در می‌آیند. در همین حال فاصله‌ی بین دو غلتک، متناسب با ضخامت قطعه در حال نورد، به گونه‌ای تنظیم می‌شود که به محض تماس غلتک‌ها با ابتدای قطعه، قطعه به‌داخل چنگ زده شده و از بین دهانه‌ی دو غلتک به طور مستقیم عبور کند. فاصله‌ی این دو غلتک، در حین یک مرحله‌ی عبور برای یک تغییر شکل معین، ثابت نگه داشته می‌شود. با عبور پیوسته ی قطعه از دهانه ی بین دو غلتک در حین نورد در هر واحد زمان حجم یا بخش کوچکی از قطعه با فشار وارد از طرف غلتک‌ها بر آن تغییر شکل می‌یابد. هر حجم کوچکی از قطعه را که در لحظاتی بین غلتک‌ها تحت تاثیر نیروی فشار وارد بر آن تغییر شکل می‌یابد، منطقه‌ی تغییر شکل می‌نامند. شکل (۱) نشان‌دهنده فرایند نورد می‌باشد.

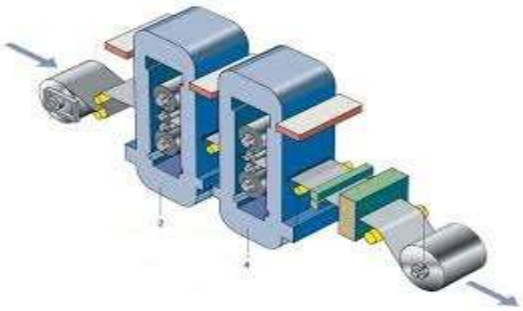


شکل (۱) - فرایند نورد بین دو صفحه‌ی فشار حاصل از دو غلتک در حال چرخش

فرایند نورد یکی از فرایندهای تغییر شکل فلزات (Bulk Deformation) است که در اثر نیروهای فشاری که توسط دو غلتک اعمال می‌شود، از ضخامت قطعه کار کاسته می‌شود . در این فرایند قطعه کار می تواند به صورت گرم و یا سرد باشد . محصولات حاصل از نورد به صورت میله ، تسمه ، ورق ، تیرآهن و ... می باشند . ورق های حاصل از فرایند نورد گرم توسط نورد سرد مسطح شده تا قابل ارائه به مشتری باشند .

۲- دستگاه‌های نورد

به‌طور کلی هر کارگاه نورد شامل بخش های مختلفی است که عمدتا به وسعت میزان کار آن، از لحاظ شکل و ابعاد شمش های اولیه ی دریافتی ، محصول نهایی و تجهیزات و سیستم های به کار گرفته شده در آن بستگی دارد . دستگاه های نورد از مهمترین تجهیزات هر کارگاه نورد است . هر دستگاه نورد عمدتا شامل جایگاه یا قفسه ی نورد ، غلتک ها ، تکیه گاه ها یا یاتاقان های غلتک ها ، تجهیزات مربوط به نیروی محرکه موتوری برای به چرخش درآوردن غلتک ها ، تجهیزات الکتریکی و مکانیکی برای کنترل و تنظیم نیرو و سرعت حرکت دورانی غلتک ها و تنظیم فاصله دهانه بین غلتک ها ، لوله های مربوط به جریان آب یا مایع خنک کننده غلتک ها و روانکار و وسایل اندازه‌گیری می‌باشد. شکل (۲) یک قفسه نورد را نشان می‌دهد.



شکل ۲- نمایش یک قفسه نورد

نام گذاری دستگاه‌های نورد بیشتر برحسب نوع تولید انجام می‌شود :

۱. دستگاه نورد شمش: برای نورد شمش خام حاصل از ریخته گری در قالب‌های تکی و تبدیل آن به شمش اولیه.
۲. دستگاه نورد تختال: برای نورد شمش با مقطع مربع و تبدیل آن به شمش عریض با مقطع مستطیلی شکل.
۳. دستگاه نورد شمشال: برای نورد شمش با مقطع مربع به شمش باریک با مقطع مربعی شکل.
۴. دستگاه نورد میلگرد و مفتول: برای نورد شمشال و تبدیل آن به میلگرد و مفتول.
۵. دستگاه نورد نوار یا تسمه و ورق: برای نورد تختال و تبدیل آن به ورق و تسمه یا نوار. [۷]

۳- نورد گرم

نورد گرم یکی از روش‌های عمده نورد با قابلیت زیاد کاهش سطح مقطع است که کاربرد وسیعی برای تولیدات نیمه تمام و تمام (مانند شمش‌های اولیه، شمشال ها، تخته‌ها، انواع پروفیل‌ها، تیرآهن‌ها، ریل‌های راه آهن، ورقها، تسمه‌ها، میله‌ها و مفتول ها) دارد. در این روش ساختار حاصل از ریخته گری که معمولا ساختار ناهمگنی است، درهم ریخته و از بین می‌رود و ساختار همگن‌تر با اندازه دانه‌های ریزتری به‌دست می‌آید که منجر به بهبود خواص فلز ریخته‌گری شده از جمله استحکام و تافنس آن خواهد شد. در نورد گرم فعل و انفعالات متالورژیکی که در منطقه تغییر شکل رخ می‌دهد به دما، کرنش و آهنگ کرنش بستگی داشته و تاثیر عمده‌ای بر خواص مکانیکی محصول نهایی دارد. در نورد گرم به‌دلیل بالا بودن دما و در نتیجه پایین بودن تنش سیلان می‌توان شمش‌ها یا تختال‌های سنگین را با عبورهای پیوسته و متوالی از داخل دهانه‌ی بین غلتک‌های نورد با استفاده از دستگاه‌های نورد با ظرفیت متوسط، تغییر شکل زیادی داد. شکل (۳) عملیات نورد گرم را نشان می‌دهد.

شکل ۳- عملیات نورد گرم

۴- فاکتورهای موثر بر کیفیت نورد گرم پایانی

برای ایجاد کیفیت مناسب فراورده، پارامترهای مختلف مکانیکی، سطحی، دمایی و متالورژیکی باید تحت کنترل دقیق باشند. کنترل این پدیده‌ها برای فولادهای مختلف متفاوت بوده و برای هر کدام برنامه کنترل جداگانه‌ای باید در نظر گرفته شود. برای نمونه، چند نمونه از پارامترهایی که باید کنترل شوند عبارتند از: کنترل کیفی و متالورژیکی شمش اولیه، کنترل سرعت نورد و توزیع مناسب مقدار تغییر شکل در قفسه‌ها، شمار مرتبه‌های پوسته زدایی و پاشش پرفشار آب در قفسه پیش نورد و قفسه‌های گرم پایانی، کنترل تنش‌های کششی پشت و جلو در بین قفسه‌های نورد، کنترل پهنا و ضخامت ورق، صاف و یک‌دست بودن لبه‌های ورق، کنترل چروکیدگی سطح ورق، تمیز و پاک بودن سطح ورق، کنترل عیوب سطحی، کنترل دمای پایانی نورد برای رسیدن به رفتار مکانیکی و ساختار میکروسکوپی دلخواه، کنترل زمان نگه‌داری ورق روی میز خنک کننده پیش از کلاف کردن ورق، کنترل سرعت خنک کردن ورق، کنترل دمای کلاف کردن ورق، نمونه‌گیری، بازرسی و کنترل کیفی فراورده‌ها، در کیفیت فراورده‌های پایانی کارآمد می‌باشند. [۸]

۵- دمای نورد گرم

در نورد گرم همانند دیگر فرآیندهای کار گرم کنترل دقیق دما برای موفقیت فرآیند بسیار مهم است بهتر است قبل از شروع نورد، دمای فلز به‌طور یکنواخت تا مقدار مطلوب بالا برده شود این عمل مستلزم گرم نگه داشتن قطعه در حرارت مطلوب برای زمان طولانی است اگر دمای قطعه یکنواخت نباشد، تغییر شکل ایجاد شده نیز غیر یک نواخت است مثلاً اگر قطعه به‌اندازه‌ی کافی و به‌نحو همگن گرم نشود، سطوح گرم‌تر بیرونی نسبت به سطوح داخای که سردتر و محکم ترند زودتر نورد می‌شوند و اگر پس از گرم کردن قطعه و یا در فاصله‌ی دو نورد فلز سرد شود، سطوح سرد شده در مقابل تغییر شکل مقاومت می‌کنند. در این صورت هنگام تغییر شکل قسمت داخلی که داغ‌تر و ضعیف‌تر است، ممکن است ترک‌ها یا گسیختگی‌های سطحی در قطعه ایجاد شود. استفاده از محصولات ریخته‌گری پیوسته به‌عنوان ماده‌ی اولیه در کارخانه‌های با تولید زیاد امری عادی است. فرآیند سردشدن به گونه‌ای کنترل می شود تا بتوان ماده را بدون نیاز به گرم کردن اضافی یا جابه‌جا کردن بیشتر، مستقیماً وارد دستگاه نورد گرم کرد. به جهت گرم کردن برای تولیدات کمتر یا عملیات ثانویه معمولاً دمای ماده‌ی اولیه (شمش، شمشال یا لوحه) دمای اتاق است. برای گرم کردن این قطعات تا دمای مناسب می‌توان آن ها را در کوره‌های نفت سوز یا گازسوز گرم کرد. برای فولادهای کربنی ساده و فولادهای کم آلیاژ، دمای کردن معمولاً در حدود ۱۲۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد (۲۲۰۰ درجه- ی فارنهایت) است برای میله‌های کم قطر می‌توان از کوره‌های القایی برای گرم کردن استفاده کرد. نورد گرم معمولاً در حدود ۵۰ تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد (۱۰۰ تا ۲۰۰ درجه‌ی فارنهایت) بالای دمای تبلور مجدد متوقف می‌شود. پایان دادن عمل نورد در این دمای پایانی از سخت شدن کرنشی ماده جلوگیری می‌کند و موجب ایجاد دانه‌های ریز و یکنواخت می‌شود. پیش از انجام تغییر شکل اضافی، لازم است قطعه دوباره گرم شود تا به شرایط مناسب برای نورد برسد. [۹]

۶- روش ریاضی

در فرایند نوردگرم، چند پارامتر مهم باید از روش ریاضی مورد بررسی و تحلیل قرارگیرد. به‌همین منظور، برای محاسبه درصد کاهش ضخامت ورق در هر قفسه ابتدا از رابطه (۱)، r درصد کاهش ضخامت را یافته آنگاه از معادله (۲) میانگین تنش تسلیم کششی $2\bar{k}$، استخراج می‌شود.

$$r = \frac{(hin-h1)}{hin} * ۱۰۰ \quad (۱)$$

$$\bar{Y} = \frac{K[\varepsilon_t^{1+n} - \varepsilon_0^{1+n}]}{(1+n)(\varepsilon_t - \varepsilon_0)} \quad (۲)$$

در روابط ذکر شده، r درصد کاهش ضخامت ورق در هر قفسه، $\bar{Y}$ تنش تسلیم کششی میانگین، hin ضخامت ورودی و $h1$ ضخامت خروجی ورق در هر قفسه می‌باشند. معمولا" برای محاسبه نیرو و یا انرژی تغییر شکل در فرایندهای شکل‌دادن فلزات، به جای تنش تسلیم متغیر فلز از یک تنش تسلیم میانگین استفاده می‌شود. k و n به ترتیب ضرایب مقاومت و کار سختی فولاد براساس معادله لودویک می‌باشند که از نمودارهای تنش – کرنش رفتار فولادها قابل دست‌یابی هستند. ε_0کرنش اولیه و اندیس t در ε_t برای کرنش صفحه‌ای تعداد مراحل نورد می‌باشد.

برای محاسبه تنش تسلیم میانگین از رابطه۳ استفاده می‌شود. در این رابطه $2\bar{k}$ ، تنش تسلیم میانگین بوده که در شرایط کرنش صفحه‌ای نسبت آن با $\bar{Y}$ تنش کششی میانگین همانند رابطه ۳ می‌باشد. هم‌چنین θ دمای عملیات نورد گرم است.

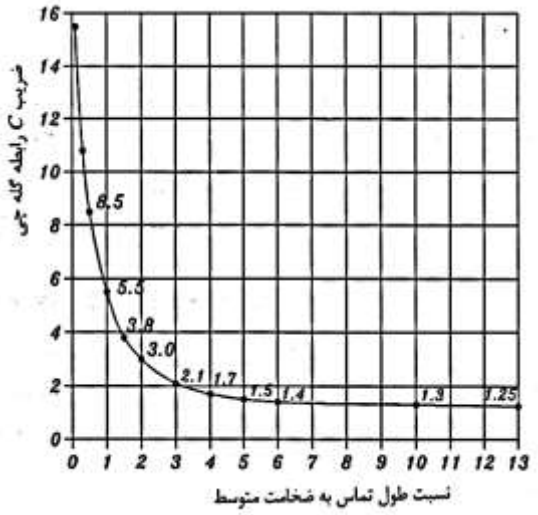
$$2\bar{k} = \frac{2}{\sqrt{3}}\bar{Y} = 0.015(1400 - \theta) \quad (۳)$$

فشار میانگین Pm غلتک‌ها را براساس رابطه (۴) می‌توان محاسبه نمود. در این رابطه hm میانگین ضخامت ورودی و خروجی هر قفسه و μ ضریب اصطکاک ورق تحت نورد و غلتک، Ld طول ناحیه‌ی مومسان و σm میانگین تنش می‌باشند.

$$p_m = 2\bar{k}(1 + \mu C \frac{l_d}{h_m} v_r^{0.25}) \quad (۴)$$

$$\mu = a_r k_r (1.05 - 0.0005\theta) \quad (۵)$$

در رابطه‌ی (۴)، ضریب C از یک منحنی و با توجه به نسبت طول تماس به ضخامت میانگین($\frac{l_d}{h_m}$) به‌دست می‌آید. در شکل(۴) تغییرات ضریب C نسبت به $\frac{l_d}{h_m}$ مشاهده می‌گردد.



شکل ۴- منحنی تغییرات ضریب C نسبت به $\frac{l_d}{h_m}$

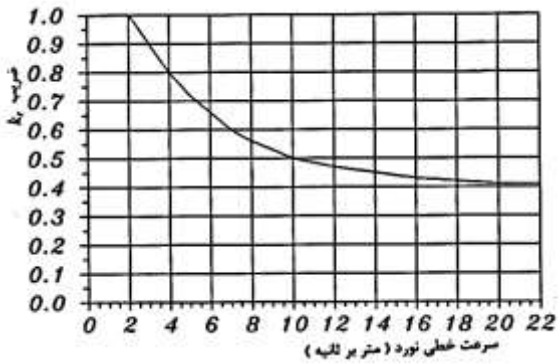
در رابطه ۴ و ۵ ، v_r سرعت خطی غلتک، μ ضریب اصطکاک غلتک، a_r ثابتی است که اندازه‌ی آن به نوع غلتک بستگی دارد، یعنی:

برای غلتک‌های فولادی زبر و یا چدنی: $a_r = 1$

برای غلتک‌های فولادی صاف: $a_r = 0.8$

برای غلتک های فولادی شفاف: $a_r = 0.55$

و k_r ثابتی است که اندازه‌ی آن به‌سرعت خطی غلتک‌های کاری بستگی دارد. شکل (۵) منحنی تغییرات k_r را نسبت به سرعت خطی غلتک نشان می‌دهد.



شکل ۵- منحنی تغییرات ضریب k_r نسبت به سرعت خطی غلتک

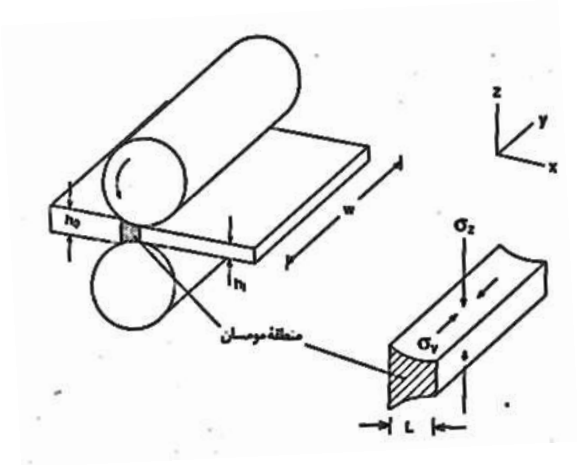
همان‌گونه که دیده می‌شود با افزایش سرعت نورد، ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. هم‌چنین با توجه به رابطه اصطکاک در محدوده‌ی دمای کارگرم فولاد، با افزایش دما ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. با استفاده از معادله لودویک تنش ایجاد شده که معرف رفتار ورق می‌باشد را می‌توان به‌دست آورد. در این رابطه ε کرنش صفحه‌ای و ضرایب K و n نیز از نمودار تنش – کرنش حقیقی آزمایش تنش استخراج می‌شوند [۱۰].

$$\sigma = K\varepsilon^n \qquad (۶)$$

در صورتی که فرایند نوردگرم، دارای تنش‌های پیش‌کشش و پس‌کشش باشد برای محاسبه‌ی σm تنش میانگین از رابطه‌ی (۷) استفاده خواهد شد.

$$\sigma m = \frac{\sigma_{ft} + \sigma_{bt}}{2} \qquad (۷)$$

در این رابطه، σ_{ft} تنش پیش‌کشش و σ_{bt} تنش پس‌کشش می‌باشند. شکل (۶) ناحیه مومسان نوردکاری تخت را نشان می‌دهد.



شکل ۷- طرح شماتیک منطقه تغییر شکل در نوردکاری تخت

جهت محاسبه نیروی غلتک‌ها می‌توان حاصل‌ضرب فشار میانگین در سطح تماس غلتک و ورق تحت نورد را از رابطه (۸) به‌دست آورد:

$$F = Pm \cdot W \cdot \sqrt{R' \cdot \Delta h} \qquad (۸)$$

در رابطه فوق R' شعاع غلتک پس از تغییر شکل، Δh اختلاف ضخامت ورود و خروج ورق تحت نورد W عرض ورق و Pm فشار میانگین می‌باشند. معمولا" در صنایع فولادسازی، محاسبه نیرو براساس پهنای ورق می‌باشد، به همین جهت رابطه‌ی (۸) به شکل رابطه (۹) قابل استفاده است.

$$\frac{F}{W} = Pm \cdot \sqrt{R' \cdot \Delta h} \qquad (۹)$$

در رابطه (۸)، R' شعاع غلتک پس از استهلاک و Δh اختلاف ضخامت ورودی و خروجی ورق بین غلتک‌ها می‌باشد که برای محاسبه R' از رابطه (۱۰) می‌توان استفاده کرد[۱۱].

$$R' = R \cdot \left(1 + \frac{C}{\Delta h} \cdot \frac{F}{W}\right) \qquad (۱۰)$$

با توجه به این که تحلیل انجام شده جهت فرایند نورد گرم می باشد، بنابر این باید توجه داشت که پهنای ورق در ورود و خروج از قفسه تغییر محسوسی خواهد داشت. به‌همین جهت برای محاسبه پهنای میانگین از رابطه (۱۱) استفاده می شود.

$$w_m = \frac{w_{out} + w_{in}}{2} \qquad (۱۱)$$

در رابطه (۱۱) w_m پهنای میانگین، w_{in} و w_{out} به ترتیب عرض (پهنای) ورق در ورود به قفسه و خروج از آن می‌باشند. برای محاسبه‌ی گشتاور غلتک می‌توان از نیروی غلتک استفاده کرد که از رابطه‌ی (۱۲) گشتاور غلتک را می‌توان محاسبه کرد.

$$T = 2Fa \qquad (۱۲)$$

در رابطه‌ی (۱۲)، a بازوی گشتاور می‌باشد که از رابطه‌ی (۱۳) محاسبه می‌شود.

$$a = c.l_d \qquad (۱۳)$$

در رابطه‌ی (۱۳)، c یک ضریب است و از رابطه‌ی (۱۴) محاسبه می‌شود.

$$c = \frac{w_1}{w_m} \cdot \frac{h_1}{2\Delta h} ln \frac{h_0}{h_1} \qquad (۱۴)$$

در رابطه‌ی (۱۴)، w_1 پهنای خروجی قطعه‌کار می‌باشد.

برای محاسبه توان غلتک‌های نورد گرم از رابطه (۱۵) استفاده می‌کنیم. در این رابطه T گشتاور و ω سرعت زاویه‌ای برحسب دوردر دقیقه می‌باشد.

$$\dot{W} = T\frac{d\varphi}{dt} = T\omega \qquad (۱۵)$$

۷- شبیه‌سازی و تحلیل

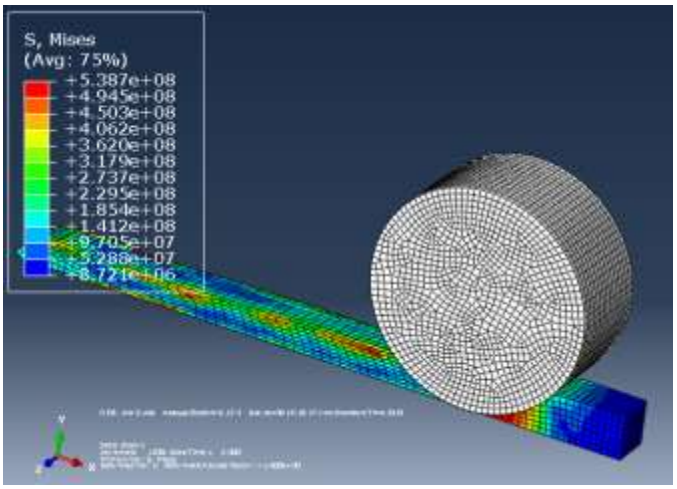
در این پژوهش با شبیه سازی نورد گرم یک ورق فولادی توسط نرم افزار آباکوس، به تحلیل نتایج حاصله پرداخته می‌شود. پارامترهایی نظیر کرنش و تنش و زمان بار وارده بر شمش، در کانتورهای استخراج شده بسیار مهم بوده و در نمودارهای شکل-های (۸) به بعد مشاهده و تحلیل می‌شوند. برای شبیه سازی یک شمش فولادی با سطح مقطع مربعی شکل در ابعاد ۲۰*۲۰ با طول ۲۰۰ سانتی متر در نظر می‌گیریم. این شمش تحت نورد گرم در دمای ۱۱۰۰ درجه ی سانتی گراد قرار می‌گیرد. شعاع غلتک ۵۰ سانتی متر می باشد. حرکت انتقالی شمش ۷۰ و دوران آن ۵ رادیان بر ثانیه است. خصوصیت‌های شمش به‌صورت جدول (۱) است.

جدول ۱- رابطه پلاستیک فولاد

کرنش (Plastic Strain)	تنش (Yield Stress)
۰	۳۸۰E۰۶
۰,۰۴	۴۲۰E۰۶
۰,۱۲	۴۷۰E۰۶
۰,۱۹	۵۰۰E۰۶
۰,۲۵	۵۳۰E۰۶

لازم به ذکر است چگالی، ضریب پواسون و مدول یانگ قطعه مورد نظر به ترتیب برابر با ۷۸۵۰، ۰,۳ و ۲۰۰E۰۹ می‌باشد.

نتیجه‌ی حاصل از کاهش ضخامت شمش توسط غلتک به‌صورت شکل (۸) می‌باشد.

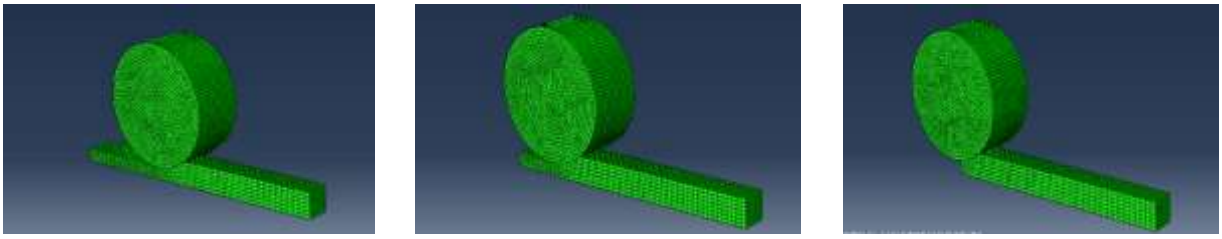


شکل ۸- تصویر حاصل از تغییر شکل پلاستیک شمش توسط غلتک

در شکل (۸) تنش‌های وارده به شمش در نقاط مختلف با استفاده از المان‌های رنگی مشاهده می‌شود. که به‌ترتیب رنگ‌های قرمز، نارنجی و زرد بیشترین تنش‌های وارده به جسم است. در محل تماس که ناحیه مومسان می‌باشد، ماکزیمم تنش فون میزز وارده به شمش در اثر کاهش ضخامت از ۲۰ به ۱۸ میلیمتر در حدود ۵,۳۸۷e۸ می‌باشد که با رنگ قرمز نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود، شمش فولادی در اثر تنش های وارده از سوی غلتک نورد دچار نابجایی های ساختاری شده و از نظر دیاگرام هوک، در منطقه پلاستیک و مومسانی قابل تحلیل است. اما پس از نورد و در منطقه پشت غلتک مجددا" منطقه الاستیک شکل می‌گیرد.

لازم به ذکر است که تختال‌ها یا شمش هایی که تحت نوردگرم قرار می‌گیرند، پیش‌تر پس از ذوب‌ریزی به مدت حدود ۷۲ ساعت در دمای محیط تحت خنک‌کاری قرار گرفته تا ساختار مناسب خود را پیدا نمایند و عملیات نوردگرم و سپس نورد سرد در واقع فرایند سخت‌کاری روی ورق‌های فلزی محسوب می‌شود. هم‌چنین، نوردگرم همراه با خنک‌کاری با پاشش سریع آب بوده تا قطعات بتوانند سریعا" پس از نورد، ساختار فلزی خود را به‌دست آورده و تبلور مجدد پیدا نمایند.

شکل (۹) مراحل نورد شمش پس از تحلیل با نرم افزار آباکوس را نشان می‌دهد.

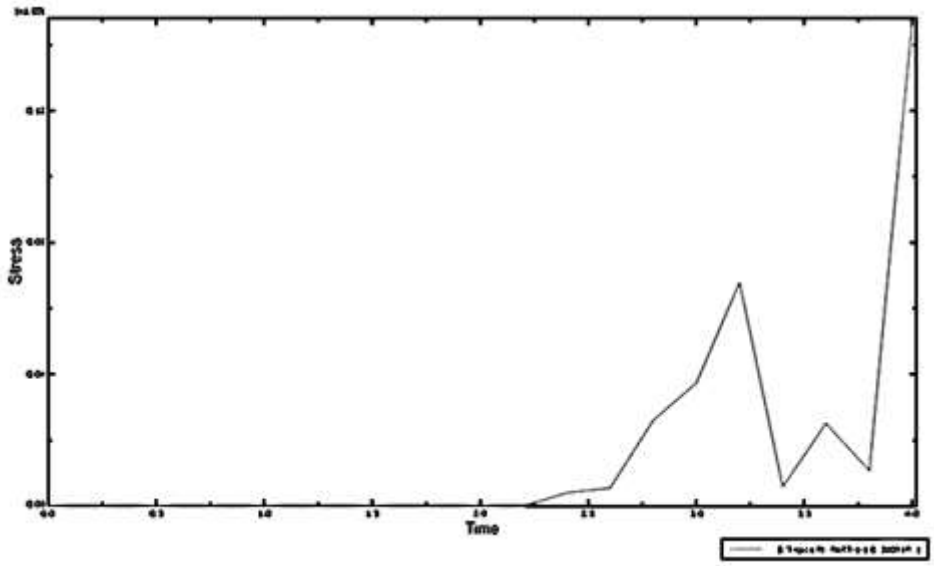


a b c

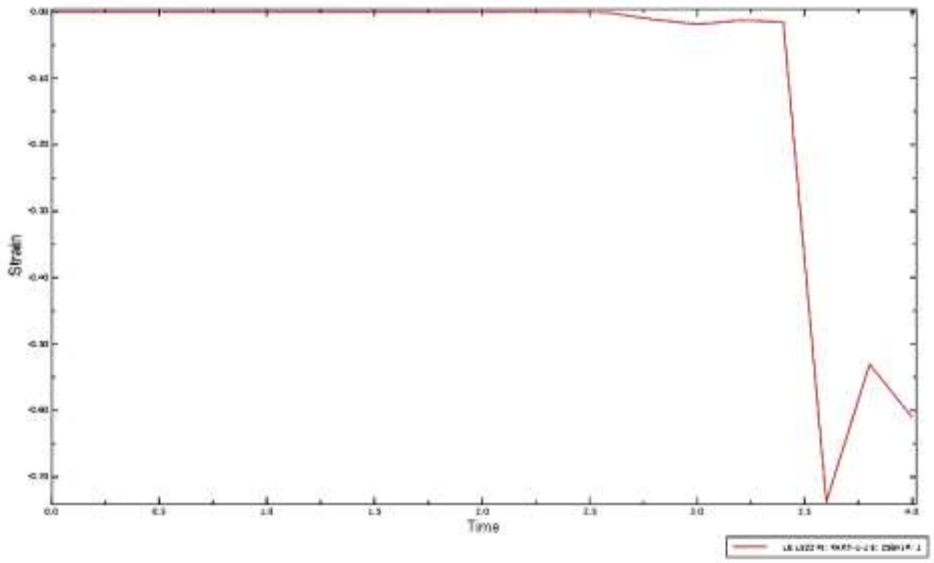
شکل (۹) مراحل نورد شمش پس از تحلیل با نرم افزار آباکوس: a) پیش از نوردکاری، b) شروع نوردکاری، c) درحین نوردکاری

نمودار های (۱۰) تا (۱۳) که در زیر آورده شده است، نمودارهای تنش و کرنش المان انتخاب شده قبل از نورد و پس از نورد گرم را نشان می‌دهند .

براساس نمودار (۱۰)، تنش برحسب زمان یک المان شمش قبل از تغییر شکل پلاستیک را نشان می دهد. در این وضعیت که نشان دهنده ناحیه الاستیک است، تنش اعمالی ماکزیمم به عددی حدود ۰,۱۵e۹ می رسد این وضعیت در زمانی حدود ۵ s اتفاق می‌افتد. هم‌چنین نمودار شکل (۱۱)، کرنش برحسب زمان یک المان شمش بعد از تماس با غلتک در ۴ ثانیه‌ی تحلیل مدل را نشان می‌دهد.



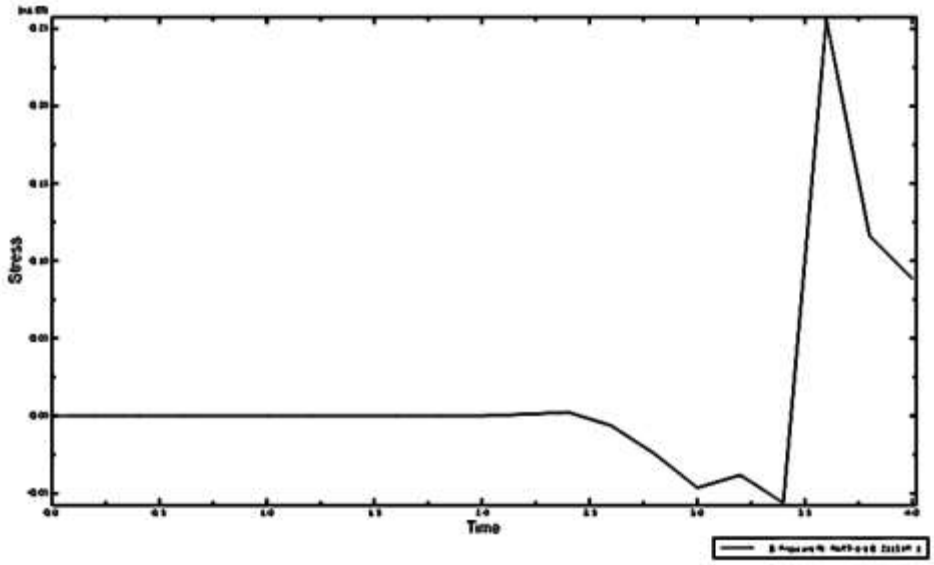
شکل ۱۰- نمودار کرنش بر حسب زمان المان شمش قبل از نورد



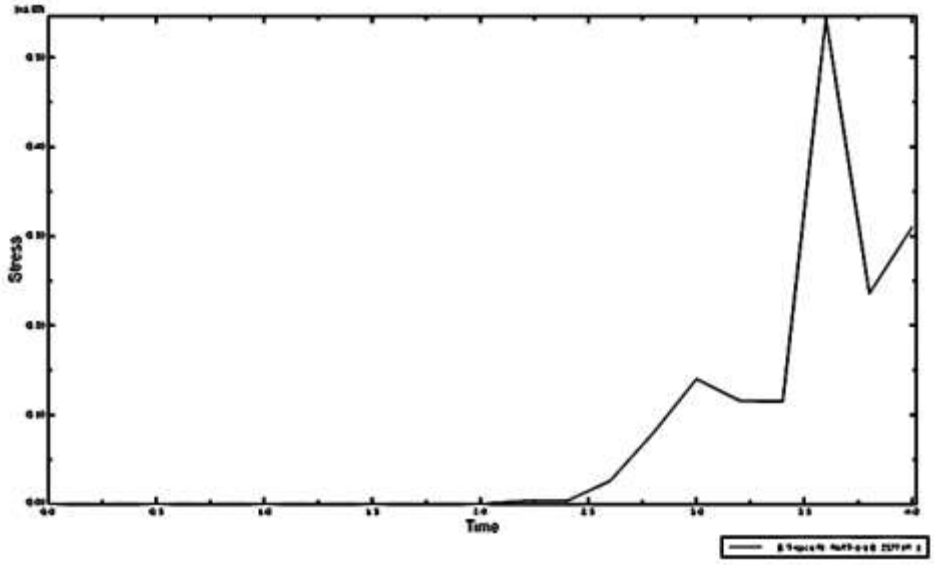
شکل ۱۱- نمودار کرنش بر حسب زمان المان شمش پس از نورد

براساس نمودار شکل (۱۱)، در زمان نوردکاری بیشترین کرنش وارده به شمش فولادی حدود ۰٫۷۵*e۹ بوده که در زمان ۳٫٦ s به‌دست آمده است.

شکل (۱۲) نمودار تنش برحسب زمان اِلمان شمش پس از نوردکاری و شکل (۱۳) نمودار تنش ترسکا برحسب زمان اِلمان شمش را نشان می‌دهند.



شکل ۱۲- نمودارتنش فشاری برحسب زمان در ۴ ثانیه‌ی تحلیل



شکل ۱۳- نمودار تنش بر حسب زمان طبق معیار ترسکا

با توجه به نمودارهای (۱۲) و (۱۳) می‌توان نتیجه گرفت که رابطه‌ی بین تنش‌ها و کرنش‌های المان شمش برحسب زمان به‌صورت خطی است و در دو نمودار افزایش تدریجی تنش و زمان در یک محدوده مساوی صورت گرفته است. همچنین هم براساس معیار ترسکا و هم نمودار تنش زمان (۱۲) این موضوع قابل تایید است و نشان دهنده صحت نتایج شبیه‌سازی می باشد.

۸- نتیجه گیری

در این مقاله پژوهشی؛ ابتدا به بررسی فرایندهای مرتبط با نوردکاری پرداخته و سپس روابط حاکم بر مهندسی نورد مورد بررسی قرار گرفت. از مهم ترین پارامترهای محاسبات نوردکاری می توان به درصدکاهش ضخامت، میانگین تنش تسلیم، میانگین فشار وارده از سوی غلتک ها، شعاع تخت شدگی و توان غلتک ها اشاره کرد که در روابط ریاضی مورد بررسی قرار گرفت. هم چنین برای شبیه سازی از نرم افزار آباکوس استفاده گردید که برای نمونه سازی یک شمش فولادی، با ابعاد مورد نظر توسط دو غلتک تحت عملیات نورد قرار گرفت. در کانتورهای تنش – زمان و کرنش – زمان به‌دست آمده، میزان تنش و کرنش با فرایندهای آزمایشگاهی رابطه قابیل قبولی داشته و می‌توان از این روش شبیه‌سازی برای تحلیل مواد گوناگون استفاده کرد.

۹- منابع

[۱] Mototeru ObaKazuki, MoriAkinori Yamanaka, *Microstructure-Based Multiscale Analysis of Hot Rolling of Duplex Stainless Steel Using Various Simulation Software*, March ۲۰۱۷, Volume ٦, Issue ۱, pp ٦۹–۸۲

[۲] Kaiyue Li, Peiqi Wang, Guowei Liu, Pengju Yuan, Qinhe Zhang, *Development of simulation system for large H-beam hot rolling based on ABAQUS*, July ۲۰۱٦, Volume ۸٥, Issue ٥–۸, pp ١٦٤۹–١٦٦٣.

[۳] Mahdi Bagheripoor, HoseinBisadi, *Effects of rolling parameters on temperature distribution in the hot rolling of aluminum strips, Applied Thermal Engineering*, Volume ۳۱, Issue ۱۰, July ۲۰۱۱, Pages ١٥٥٦-١٥٦٥

[٤] Anjami N., Basti A., *Investigation of rolls size effects on hot ring rolling process by coupled thermo-mechanical ۳D-FEA*, Journal of Materials Processing Technology, ۲۰۱۰, pp. ١٣٦٤-١٣٧٧.

[٥] *دپارتمان پژوهشی شرکت پاکمن، نورد، ۲۰۱۹.*

[۶] https://fa.wikipedia.org/wiki/

[۷] www.۳ds.ir.

[۸] مشکسار محمدحسن، اصول مهندسی نورد، انتشارات دانشگاه شیراز، فصل اول، ۱۳۸۴.

[۹] حسین تویسرکانی، شکل دادن فلزات، ویرایش سوم، دانشگاه صنعتی اصفهان، مرکز نشر، ویرایش دوم، چاپ پنجم ۱۳۹۴.

[۱۰] آقاداودی ف ،گلستانیان ح ، نگهبانی ن ، بهینه سازی نورد سرد پیوسته با تغییرات توأم کشش بین قفسه‌ای و تنظیمات ضخامت به کمک الگوریتم ژنتیک، فصلنامه مکانیک جامدات دانشگاه آزاد خمینی شهر، زمستان ۱۳۸۹ ، صفحات ۵۷ – ۶۷.

[۱۱] مشکسار محمدحسن، چاپ سوم ۱۳۹۱ ، اصول مهندسی نورد ، انتشارات دانشگاه شیراز ، صفحه ۲۵۱ تا ۲۵۲.