

SID



سرویس های ویژه



سرویس ترجمه تخصصی



کارگاه های آموزشی



بلاگ مرکز اطلاعات علمی



سامانه ویراستاری STES



فیلم های آموزشی

کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی

کارگاه آنلاین
بررسی مقابله ای متون (مقدماتی)

کارگاه آنلاین
پروپوزال نویسی و پایان نامه نویسی

کارگاه آنلاین آشنایی با پایگاه های اطلاعات علمی بین المللی و ترند های جستجو

بررسی حالت کوپل ترمومکانیکی نورد حلقه و پارامترهای تاثیرگذار در آن

جهت تولید اسپول عقب موتور در نرم افزار آباکوس

علی نگهبان برون^۱، عبدالعلی مراثی^۲، احسان براتی^۲، داود اسدی^۴

۱-۲-۳ دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۴- مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

چکیده

یکنواختی باعث می شود تا قطعه تولید شده بسیار مناسب شکل یافته و کیفیت سطح خوبی داشته باشد و عیوب موجود در آن با نوردهای پی در پی به خوبی رفع گردد در نتیجه جهت تولید قطعات حساس که در شرایط سخت کار می کنند و به صورت حلقه می باشند از این روش جهت تولید استفاده می شود.

آشنایی با فرایند نورد حلقه

از دیدگاه های متفاوتی می توان ماشین های نورد حلقه را تقسیم بندی نمود. از دیدگاه هندسی، عملکرد این ماشین ها به دو نوع عمودی و افقی تقسیم می شود و اختلاف اساسی آن ها در موقعیت قطعه کار می باشد. در ماشین های افقی، حلقه در صفحه افقی می چرخد و در نوع عمودی، صفحه چرخش حلقه عمودی است. از لحاظ دمای کاری به نورد داغ، گرم و سرد تقسیم بندی می شوند. اما مهمترین تقسیم بندی ماشین نورد حلقه، با توجه به وجود یا عدم وجود غلتک های مخروطی می باشد. در این صورت دستگاه های نورد حلقه به دستگاه نورد شعاعی-محوری و شعاعی تقسیم بندی می شوند. در ماشین های شعاعی-محوری یک جفت غلتک مخروطی ارتفاع حلقه را نیز کنترل می نمایند اما این دستگاه ها به دلیل غلتک های مخروطی از لحاظ کنترلی نسبت به ماشین های شعاعی از پیچیدگی بیشتری برخوردار هستند. نمونه ای از دستگاه نورد حلقه شعاعی-محوری در شکل-۱ نشان داده شده است.

بسیاری از تحلیل های تئوری که برای پیش بینی و شبیه سازی نیروها و گشتاورهای نورد مورد نیاز در فرایند نورد حلقه استفاده می شوند از روابطی که در فرایندهای ساده تر نظیر نورد داغ ورق حاصل گشته است مشتق می گردند، ولی این روابط به تنهایی جوابگوی مسائل مطرح در نورد حلقه نیستند. به طور خلاصه فاکتورهایی که وضعیت را در طی فرایند نورد حلقه پیچیده می نمایند عبارتند از:

- عدم تقارن نورد به خاطر تفاوت در شعاع های غلتک ها (در راستای شعاعی)
- غلتک های غیر استوانه ای و تغییر در قطر غلتک ها (در راستای محوری)
- وجود تنها یک غلتک محرک (در راستای شعاعی)
- تغییر قطر حلقه نسبت به زمان و تغییر در سطح تماس حلقه و غلتک ها
- کاهش پیوسته ضخامت و ارتفاع
- تغییر شکل های سه بعدی در جهت نورد و پهن شدن جانبی

آسیب ناشی از خستگی ترمومکانیکی

غلتک ها در دستگاه های نورد به طور هم زمان تحت تاثیر تنش های مکانیکی و حرارتی قرار دارند. تنش حرارتی ناشی از انتشار دمای غیر همگن در سطح غلتک می باشد که به سبب تماس با قطعه کار داغ و ماده خنک کننده است. تنش مکانیکی ناشی از فشار نورد و تماس با غلتک های حمایت کننده

نورد حلقه یکی از فرایندهای شکل دهی فلزات است که برای نورد قطعات حلقوی شکل بدون شیار، که ابعاد آن به طرز دقیقی شکل یافته اند به کار می رود. در این پژوهش در ابتدا فرایند کلی نورد حلقه و تفاوت های آن با نورد صفحه عنوان گردیده و به بررسی کارهای صورت گرفته در زمینه تحلیل های کوپل ترمومکانیکی در نورد پرداخته شده و دلایل لازم جهت بررسی حل کوپل در آن عنوان گردیده است. در ادامه به شرایط شبیه سازی در نرم افزار آباکوس و روند حل در آن اشاره گردیده و نمونه ساده شده حلقه نهایی در نرم افزار با توجه به شرایط مرزی و خصوصیات آلیاژ مورد نظر بر طبق مقالات موجود شبیه سازی گردیده است، سپس به فرضیات معمول در فرایند نورد حلقه اشاره شده و در انتها جهت بررسی شرایط مستقل نمودن معادلات اثر پارامترهای مهم که باعث کوپل شدن معادلات می گردند، نظیر گرمای ناشی از اصطکاک و تغییر شکل، در مدل به طور مجزا بررسی شده است. با بررسی پارامترهای ذکر شده مشخص گردید که به دلیل شرایط خاص نورد حلقه و تغییر شکل های کوچک در هر لحظه، با دقت قابل قبولی می توان معادلات را به دلیل اندرکنش کم از یکدیگر مجزا نمود.

واژه های کلیدی: نورد حلقه- کرنش صفحه ای- کوپل تنش و حرارت- جداسازی معادلات- نرم افزار آباکوس

مقدمه

نورد حلقه فرایندی است که در آن حلقه های بدون درز تولید می شود. رینگ های چرخ قطار در حدود یک قرن با این روش تولید می شود. این گونه حلقه ها در صنایع مختلف از جمله هوافضا (قطعات متحرک و ثابت توربین ها) و هسته ای (قلب راکتور) کاربرد خاص و فراوانی دارد. از مزایای این روش نسبت به دیگر روش ها می توان به کاهش قابل ملاحظه زمان تولید و مواد اشاره نمود [۱]. علاوه بر مزایای عدم وجود مواد اضافی و زوایای ناخواسته که بعد فرایند باید با ماشین کاری برداشته شود مهمترین مزیت این روش جریان ماده یکنواخت در جسم پس از انجام فرایند می باشد. با پیشرفت دستگاه های نورد حلقه امکان تولید حلقه هایی با نسبت ضخامت دیواره به ارتفاع ۱-۱۶ و ۱-۱۶ با یک دستگاه امکان پذیر شده است و در صورت گرمایش مجدد در طی فرایند این نسبت تا ۱-۲۸ قابل افزایش می باشد [۲]. هنگامی که حلقه در حال شکل گرفتن می باشد جریان ماده از انحنای حلقه تبعیت می کند و ساختاری تشکیل می دهد که در برابر ترک های سطحی مقاومت می کند. در مقایسه با آهنگری، نورد حلقه از کیفیت بهتری برخوردار است زیرا علاوه بر جریان یکنواخت ماده در سطح مقطع این یکنواختی در محیط پیرامونی نیز وجود دارد. این

۱- دانشجوی دکتری هوافضا-سازه های هوایی

۲-استادیار

۳-استادیار

۴-فارغ التحصیل دکتری- davoodasadi@aut.ac.ir

جهت تعیین تنش ترمودینامیکی در غلتک‌ها در حین کار ارائه دادند و گرمای تولید شده ناشی از تغییر شکل و اصطکاک را در نظر گرفتند و پارامترهای مختلف از قبیل دمای قطعه، میزان کاهش سطح مقطع و سرعت غلتک را بر تنش ترمومکانیکی و نحوه انتشار آن بررسی کردند. با مرور کلی تحقیقاتی که تاکنون صورت گرفته است، در آنها اکثراً به فرایندهای مربوط به نورد صفحه پرداخته شده و فرضیات و موارد مختلفی را در آن در نظر گرفته‌اند که جهت نورد حلقه صحیح نبوده و با ماهیت فیزیکی آن در تناقض است. همچنین فعالیت‌هایی که در رابطه با نورد حلقه تاکنون صورت گرفته، بیشتر به شبیه‌سازی و شکل‌دهی حلقه و تخمین نیرو معطوف بوده و کمتر محقق به بررسی پروفیل‌های حرارتی و تنش-حرارتی در غلتک‌ها و حلقه و همچنین عوامل موثر بر آنها پرداخته است. در ضمن به دلیل پیچیدگی موجود در فرایند، بررسی تمام شرایط در مدل‌های سه‌بعدی هزینه محاسباتی را افزایش می‌دهد. لذا لازم است تا پارامترهای موجود در تحلیل‌ها به درستی برای هر فرایند شکل‌دهی مشخص گردد تا با توجه به اثر آن و امکانات موجود از قبیل هزینه و زمان به آن پرداخته و تاثیر آن را در حالت کوپل ترمومکانیکی بررسی شود.

شرایط تماس در آباکوس

به جز در مواردی که ضربات دینامیکی شبیه‌سازی می‌شوند، همیشه باید سعی کرد تا تماس بین دو جز را به میزان قابل قبولی ملایم تعریف کرد و از تغییرات سریع در فشار تماسی جلوگیری نمود. این مسئله منجر به تعریف مراحل اضافی می‌شود. تا قبل از بارگذاری نهایی، اجزای مدل باید در تماس با یکدیگر قرار گیرند. این روش مشکلات همگرایی را کاهش داده و حل را بسیار کارآمدتر می‌کند. دو مشکل عمده در تحلیل مسائل تماسی در آباکوس استاندارد ضمنی (Implicit) وجود دارد: یکی حرکت جسم صلب مربوط به اجزا قبل از اعمال شرایط تماسی و دیگری تغییرات ناگهانی در شرایط تماس که منجر به ناپیوستگی‌های شدید می‌گردد. جلوگیری از حرکت جسم صلب اجزا چندان مشکل نیست. با تعریف قیدهای کافی به آسانی می‌توان از حرکت جسم صلب همه اجزا جلوگیری کرد. در ابتدا می‌توان با تعریف شرایط جابجایی- به جای اعمال نیرو-اجزای مدل را در تماس با یکدیگر قرار داد. در مقابل آباکوس صریح (Explicit) می‌تواند در تحلیل مسائل با شرایط تماسی پیچیده بکار رود به صورتی که تعداد مراحل و شرایط مرزی تعریف شده بسیار کمتر از حالت ضمنی است. اما باید توجه داشت در صورت استفاده از روش صریح برای تحلیل شبه استاتیک لازم است تا از نرخ بارگذاری مناسب استفاده شود که بهتر است از نرخ بالا بارگذاری شروع شده و کاهش یابد و در نهایت مقدار بهینه تعیین شود.

حالت شبه استاتیک

در یک تحلیل شکل‌دهی فلزات، بیشترین انرژی داخلی ناشی از تغییر شکل پلاستیک است. یک حل شبه استاتیک زمانی قابل قبول است که انرژی جنبشی کل بیش از چند درصد انرژی داخلی آن نباشد. هر چه مقدار انرژی جنبشی کمتر باشد، دقت حل بالاتر است. روش مقایسه بین انرژی‌ها، روشی بسیار مفید است زیرا می‌توان از آن در همه فرایندهای شکل‌دهی استفاده کرد. البته باید توجه داشت که نسبت انرژی جنبشی به انرژی داخلی به تنهایی برای تایید حل مسئله کافی نیست. علاوه بر آن باید دو انرژی به صورت مستقل ارزیابی شود که آیا مقدار آنها معقول است؟ به عنوان نمونه در صورتی که بارگذاری به صورت ملایم اعمال شود اما انرژی خروجی نوسانی باشد، نتایج حاصل از چنین تحلیلی چندان قابل قبول نیست. به دلیل سرعت بسیار کم ماده درون مدل، نیروهای اینرسی بسیار

می‌باشد. تنش‌های حرارتی در غلتک‌ها باعث کرنش‌های الاستیک و پلاستیک می‌شود که منجر به فرسایش، خستگی حرارتی و به اصطلاح خردشدگی (Spalling) آن‌ها و خرابی‌های غیر قابل انتظار می‌شود. فرسایش و خردشدگی کم‌کم باعث تغییر در سطح و شکل پروفایل غلتک می‌شود که در نتیجه باعث تعویض غلتک می‌شود. هزینه‌های توقف کار، کارهای مربوط به تعویض غلتک، تراش غلتک، عملیات حرارتی و همچنین هزینه خود غلتک مهمترین هزینه‌ها در دستگاه‌های نورد می‌باشند. ۵ تا ۱۵ درصد هزینه کل نورد مربوط به مصرف غلتک می‌باشد [۳]. استیون و همکارانش [۴] نشان دادند که عمر غلتک وابسته به تست‌های حرارتی سیکلی است و با اینکه مدل استفاده شده جهت تنش حرارتی سیکلی بر پایه ساده‌سازی‌های زیادی بود نشان داد که بهبود ۵۰٪ ناشی از خنک کاری در عمر غلتک حاصل می‌شود. خنک کاری کم یا نامناسب باعث گردآیدان دمایی زیادی در سطح غلتک شده که سبب خستگی حرارتی و در نهایت خردشدگی غلتک می‌شود به علاوه دمای بالا غلتک سبب کاهش مقاومت فلز در برابر سایش می‌شود. طبیعی است که فرض کنیم ترک‌های موجود در سطح ناشی از تنش‌های کششی دوره‌ای مماس بر سطح غلتک می‌باشند که در منطقه خنک روی می‌دهد، مخصوصاً اگر دمای سطح خنک‌تر از دمای داخل غلتک باشد و تنها نیروی فشاری در منطقه تغییر شکل نوار فلزی است. در ضمن حل‌های تحلیلی به ندرت وجود داشته و روش‌های حل تحلیلی ارائه شده باید با احتیاط استفاده شود زیرا در اینگونه تحلیل‌ها گردآیدان دمایی به درستی در نظر گرفته نمی‌شود و بهتر است از روش‌های عددی یا نرم افزارهای المان محدود استفاده شود [۵].

فعالیت‌های صورت گرفته جهت شبیه‌سازی فرایند نورد

پارک و باکر [۶] یک مدل دو بعدی تفاوت محدود ارائه کردند تا رفتار حرارتی گذرا غلتک را مطالعه کنند. میگنون و ویلموت [۷] غلتک را دارای تقارن محوری در نظر گرفتند و تغییرات دما را در بدست آوردند. زینکوویچ و همکارانش [۸] و بینون و همکارانش [۹] و کومار و همکارانش [۱۰] آنالیزهای کوپل جریان فلز در شرایط ثابت و انتقال حرارت در نوار را بوسیله حل هم-زمان معادلات المان محدود برای سرعت و دما انجام دادند. لی و همکارانش [۱۱] روش المان محدود ۳ بعدی را در شرایط ناپایدار نورد به کار بردند تا تاریخچه دمایی غلتک را در زمان کارکرد پیش‌بینی کنند. سنگ (song) و همکارانش [۱۲] از یک نرم افزار المان محدود و توسعه یک مدل کوپل ترمومکانیکی جهت شکل‌دهی IN-718 به صورت حلقه استفاده کردند. توسط مدل دمای سطح غلتک‌ها، دمای حلقه و بارهای لازم جهت نورد را محاسبه کردند. هوانگ و همکارانش [۱۳] یک فرایند یکپارچه اولبری FEM برای آنالیز دقیق رفتار ترمومکانیکی گذرا و پایدار غلتک و قطعه کار ارائه دادند که شامل چهار آنالیز FEM بود زیر برنامه‌ها شامل بررسی رفتار حرارتی گذرا-پایدار قطعه، رفتار مکانیکی قطعه، بررسی رفتار ترمومکانیکی غلتک و یکی هم برای بررسی رفتار حرارتی غلتک استفاده کردند. لی و همکارانش [۱۴] بر اساس معادلات رسانایی حرارتی میدان دمای سه بعدی غلتک توسط المان محدود با کمک نرم افزار ANSYS و کد نوشته شده استفاده کردند ولی گرمایش تغییر شکل پلاستیک را بر روی غلتک در نظر نگرفتند. بناسکیوتی و همکارانش [۱۵] یک تقریب عددی بر پایه المان محدود جهت اندازه‌گیری تنش‌های حرارتی غلتک در دستگاه نورد داغ ارائه دادند. به منظور کاهش پیچیدگی و هزینه محاسباتی از یک مدل دو بعدی در المان محدود استفاده کردند که قطعه کار در سطح تماس به صورت سیکلی توسط رسانش گرم شده و سپس توسط آب خنک می‌شد. سنبلی و سراج‌زاده مدلی [۱۶] تحلیلی-عددی

C^{Nj} ماتریس قطری ظرفیت، P^j بردار منابع اعمالی به گره‌ها و F^j بردار شار حرارت داخلی است.

جواب‌های حل معادلات مکانیکی توسط انتگرال‌گیری تفاضل مرکزی با ماتریس‌های قطری صورت می‌گیرد. اپراتور تفاضل مرکزی معادلات تعادل دینامیکی را در شروع گام t ارضا می‌کند. شتاب محاسبه شده در زمان t برای حل سرعت در زمان $t + \frac{\Delta t}{2}$ و جابجایی در زمان $t + \Delta t$ استفاده می‌شود.

آنالیز دینامیکی صریح با استفاده از ماتریس جرم قطری شده و اپراتور صریح پایه‌ریزی شده است. معادله حرکت با استفاده از اپراتور تفاضل مرکزی به صورت زیر است:

$$\ddot{u}_{(i+\frac{1}{2})}^N = \ddot{u}_{(i-\frac{1}{2})}^N + \frac{\Delta t}{2} (\dot{u}_{(i+1)}^N + \dot{u}_{(i)}^N) \quad (5)$$

$$u_{(i+1)}^N = u_{(i)}^N + \Delta t \dot{u}_{(i+\frac{1}{2})}^N \quad (6)$$

به صورتی که u^N درجه آزادی (جابجایی یا چرخش) و اندیس i نشان دهنده شماره گام در دینامیک صریح می‌باشد و مقادیر $\ddot{u}_{(i-\frac{1}{2})}^N$ و $\dot{u}_{(i-\frac{1}{2})}^N$ از مرحله قبل مشخص می‌باشند. با استفاده از ماتریس قطری جرم مقدار شتاب از رابطه زیر حاصل می‌گردد:

$$\ddot{u}_i^N = (M^{Nj})^{-1} (P_i^j - I_i^j) P^j \quad (7)$$

که M^{Nj} ماتریس جرم، P^j بردار بارگذاری اعمالی و I^j بردار نیروهای داخلی می‌باشد.

از آنجایی که تفاضل مرکزی و جلویی صریح می‌باشد لذا حل انتقال حرارت و بارهای مکانیکی بوسیله روش کوپل صریح حاصل می‌شود. از سوی دیگر انتگرال‌گیری صریح در رابطه با تماس از لحاظ محاسباتی سریع‌تر و راحت‌تر می‌باشد [۱۷].

پایداری آنالیز مکانیکی-حرارتی

انتگرال‌گیری به روش صریح در زمان توسط گام‌های زمانی خیلی کوچکی صورت می‌گیرد و اپراتورهای تفاضل مرکزی و جلویی به صورت شرطی پایدار می‌باشند. حد پایداری در دو اپراتور بدون هیچگونه ضریب استهلاکی توسط رابطه زیر حاصل می‌گردد:

$$\Delta t \leq \left(\frac{2}{\omega_{\max}}, \frac{2}{\lambda_{\max}} \right) \quad (8)$$

که ω_{\max} بیشترین فرکانس سیستم در معادلات حل مکانیکی و λ_{\max} بزرگترین مقدار مشخصه در سیستم معادلات حل حرارتی می‌باشند. مقدار تقریبی حد پایداری در اپراتور تفاضل جلویی در معادلات حرارتی توسط رابطه (۹) ارائه می‌گردد.

$$\Delta t \approx \frac{L_{\min}^2}{2\alpha \rho c} \quad (9)$$

که در آن L کوچکترین طول المان در مدل و α ضریب نفوذ ($\frac{k}{\rho c}$) می‌باشد. برای حل مکانیکی هر گام زمانی مقدار پایه Δt را بر حسب طول مشخصه المان (L^e) بدست آمده از گام قبلی و همچنین سرعت فعلی موج (C^d) درون ماده به فرم زیر محاسبه کرد:

$$\Delta t_{stable} = \frac{L^e}{C^d} \quad (10)$$

با این وجود در بیشتر مسائل جواب‌های مکانیکی حد پایداری را تعیین می‌نمایند [۱۷].

کوچک و قابل صرف‌نظر کردن هستند. به همین دلیل انرژی جنبشی ماده تغییر شکل پذیر نیز بسیار کوچک خواهد بود لذا طبق یک قانون عمومی، انرژی جنبشی ماده تغییر شکل‌پذیر نباید از بخش کوچکی (معمولاً ۵ تا ۱۰٪) از انرژی داخلی آن در حین فرآیند تجاوز کند [۱۷].

آنالیز کاملاً کوپل تنش-حرارت

آنالیز کاملاً کوپل تنش حرارت وقتی اجرا می‌شود که حل‌های تنش و حرارت بر روی یکدیگر شدت تاثیر داشته و یا درجات آزادی حرارت و جابجایی در مدل موجود باشد. لذا لازم است تا حل‌ها با یکدیگر هم‌زمان بررسی شوند.

در آباکوس ضمنی حل کاملاً کوپل برای حالات پایدار و گذرا قابلیت مدل شدن دارد ولی اثرات اینرسی چشم‌پوشی می‌شود در حالی که آباکوس صریح اثرات اینرسی را نیز شامل می‌شود.

در آباکوس استاندارد دما توسط روش تفاضل عقبی (Backward difference) انتگرال‌گیری و معادلات کوپل غیر خطی با استفاده از روش نیوتن حل می‌شود.

حل دقیق معادلات نیوتن شامل حل ماتریس جاکوبین نامتقارن می‌باشد و منجر به حل کوپل معادلات می‌گردد این ماتریس به صورت زیر است:

$$\begin{bmatrix} K_{uu} & K_{u\theta} \\ K_{\theta u} & K_{\theta\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_u \\ R_\theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

که در آن Δu و $\Delta \theta$ اصلاحات مربوط به تغییرات جابجایی و دما در گام‌های زمانی و K_{ij} ها زیر ماتریس‌ها از ماتریس کوپل جاکوبین و R_u و R_θ هم بردارهای نیرو و حرارت می‌باشند. حل این معادلات به دلیل کوپل بودن نیاز به زمان و حجم محاسباتی زیادی دارد لذا جهت کاهش حجم محاسباتی زیر ماتریس‌های غیر قطری $K_{u\theta}$ و $K_{\theta u}$ به علت کوچکتر بودن نسبت به قطر اصلی (زیر ماتریس‌های K_{uu} و $K_{\theta\theta}$) صفر در نظر گرفته می‌شود بنابراین این معادلات به صورت زیر می‌شود:

$$\begin{bmatrix} K_{uu} & 0 \\ 0 & K_{\theta\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_u \\ R_\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

با این فرض معادلات تنش و حرارت به صورت مستقل و با تعداد معادلات کمتر در هر مرحله حل می‌شوند و زمان حل را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهند. روش تغییر یافته نیوتن تاثیری چندانی بر دقت حل نداشته زیرا تاثیر معادلات کاملاً کوپل در ماتریس‌های R_i در هر گام زمانی در نظر گرفته می‌شوند. به هر حال نرخ همگرایی در این روش کاهش یافته و بستگی به میزان کوپل بودن معادلات در واقعیت دارد، لذا تکرارهای بیشتری جهت رسیدن به حالت تعادل نسبت به حل دقیق معادلات نیوتن نیاز می‌باشد. در صورتی که معادلات به یکدیگر خیلی مرتبط باشند همگرایی به شدت کاهش یافته و ممکن است به حل منجر نشود و لذا لازم است تا حل دقیق بر طبق رابطه (۱) صورت گیرد.

در آباکوس صریح معادلات انتقال حرارت توسط انتگرال زمانی تفاضل جلویی (Forward difference) طبق رابطه زیر انجام می‌گیرد:

$$\theta_{i+1}^N = \theta_i^N + \Delta t_{(i+1)} \ddot{\theta}_i \quad (3)$$

θ^N دما در گره N ام و اندیس i نشان دهنده گام می‌باشد. از آنجایی که ماتریس‌های قطری شده‌اند (lump) انتگرال‌گیری به صورت تفاضل جلویی صریح می‌باشد. دمای کنونی توسط مقادیر معلوم $\ddot{\theta}_i$ در گام قبلی بدست می‌آید.

$$\ddot{\theta}_i = (C^{Nj})^{-1} (P_i^j - F_i^j) \quad (41)$$

شبیه‌سازی حلقه در آباکوس

هدف از انجام این تحقیق بررسی پارامترهای مختلف تاثیرگذار بر رفتار کوپل حرارتی-مکانیکی نورد اسپول موتور می‌باشد. لذا در ابتدا مدل کامل به صورت کاملاً کوپل در نرم‌افزار شبیه‌سازی گردید. اما با حجم بالای متغیرها و شرایط ناپایدار حلقه، گام‌های زمانی بسیار کوچک شده (10^{-11} - 10^{-9}) و در نهایت حل متوقف می‌گردد. بنابراین جهت بررسی پارامترهای درگیر در کوپل مکانیکی-حرارتی با توجه به پیچیدگی و برآورد ارزش محاسباتی، شبیه‌سازی به صورت دوبعدی و در حالت کرنش صفحه-ای انجام گردید. با اینکه این فرض در اکثر فعالیت‌های مربوط به نورد صادق است و جواب‌های قابل قبولی ارائه می‌دهد ولی در مورد نورد حلقه به دلیل ماهیت سه بعدی صادق نیست و مقادیر ارائه شده توسط آن باید با مقایسه با شرایط واقعی و ضرایب مورد نیاز تصحیح شود. بنابراین با توجه به شرایط عنوان شده و کاهش هزینه محاسباتی، مدل به صورت دوبعدی آماده شد (شکل-۲) و با یک نمونه حل شده سه بعدی با جنس خاص مقایسه گردید. شرایط شبیه‌سازی در جدول-۱ نشان داده شده است و مطابق با مرجع [۱۸] می‌باشد. پروفیل دمایی در نقاط ارائه شده با مدل دو بعدی مقایسه گردید.

جدول ۲- شرایط شبیه‌سازی در مدل دوبعدی اسپول موتور

۲۰۰	شعاع غلتک اصلی (mm)
۶۰	شعاع مندرل (mm)
۱۲۰	شعاع خارجی حلقه اولیه (mm)
۸۰	شعاع داخلی حلقه اولیه (mm)
۶/۲۸	سرعت دورانی غلتک اصلی (rad.s^{-1})
۰/۳۳	میزان تغذیه مندرل (mm.s^{-1})
۰/۵	ضریب اصطکاک
Ti6Al4V	جنس حلقه
۵۰۰	دمای اولیه حلقه ($^{\circ}\text{C}$)
۵۰۰	دمای اولیه غلتک اصلی ($^{\circ}\text{C}$)
۳۰	دمای محیط ($^{\circ}\text{C}$)
۵۰	ضریب انتقال حرارت همرفتی ($\text{W}/(\text{m}^2.\text{C}^{-1})$)
۱۰۰۰۰	ضریب رسانش تماسی ($\text{W.m}^2.\text{C}^{-1}$)

مقایسه نیرو و گشتاور با فرض غلتک‌های صلب و شکل‌پذیر

یکی از رایج‌ترین فرضیات در مسائل نورد فرض غلتک صلب می‌باشد که تحلیل و آماده‌سازی مدل را ساده می‌نماید. در مسئله حاضر به دلیل اینکه باید پروفیل دمایی و تنش در عمق‌های مختلف غلتک بررسی شود نیاز است تا غلتک‌ها به صورت تغییر شکل‌پذیر در نظر گرفته شوند. به دلیل پیچیدگی مدل سه بعدی این فرض مسئله را مشکل‌تر می‌نماید لذا لازم است تا با بررسی تغییر نیرو و گشتاور در دو حالت در صورت تفاوت ناچیز در مدل سه بعدی جهت تخمین نیرو و گشتاور وارده به غلتک‌ها از حالت صلب بهره برده و از غلتک‌های تغییر شکل‌پذیر در بررسی پروفیل دمایی استفاده شود لذا شبیه‌سازی با شرایط یکسان و غلتک‌های متفاوت انجام داده شد.

با توجه به شکل-۴ مشخص می‌شود مقدار تفاوت نیروها در دو حالت ناچیز است. غلتک صلب نسبت به غلتک تغییر شکل‌پذیر در حدود ۶ درصد نیرو را کمتر پیش‌بینی می‌نماید. بنابراین جهت تخمین نیرو و گشتاور برای جداسازی معادلات می‌توان از غلتک صلب با در نظر گرفتن ضرایب مناسب بهره برد.

برای استفاده از روش شبه‌استاتیکی و بررسی صحت مدل‌سازی انجام شده، از مقایسه انرژی‌ها استفاده شد. نتیجه مقایسه بین دو انرژی در شکل-۵ نشان داده شده است. با توجه به شکل مقدار انرژی جنبشی کمتر از ۲ درصد انرژی داخلی می‌باشد لذا استفاده از حالت شبه استاتیکی در نمونه حاضر اشکالی در فرایند حل ایجاد نمی‌کند.

تغییر دمای غلتک ناشی از اصطکاک بین غلتک و حلقه

همان‌طور که در بخش آنالیز کوپل جابجایی-دما عنوان گردید، دقت حل و الگوریتم مورد استفاده وابستگی زیادی به درگیری میدان‌های تنش و حرارت به یکدیگر دارد. از سوی دیگر با توجه به شرایط نورد حلقه و تغییر شرایط مرزی در هر لحظه و همچنین پیچیدگی‌های ناشی از تحلیل سه بعدی، جهت سهولت در تحلیل لازم است تا تاثیر هر کدام از عوامل در کوپل نمودن شرایط بررسی گردد تا در صورت ناچیز بودن تاثیرشان در فرایند حل، آنها به صورت مستقل بررسی گردند. این کار همان‌طور که قبلاً اشاره شد در صورت درگیری کم معادلات دما و جابجایی بر صحت نتایج حاصل اثر کمی خواهد داشت.

اصطکاک یکی از عوامل مهم در فرایندهای نورد می‌باشد و کار ناشی از آن به صورت گرما دفع می‌گردد لذا تاثیر آن در مدل دوبعدی و مقدار حرارت

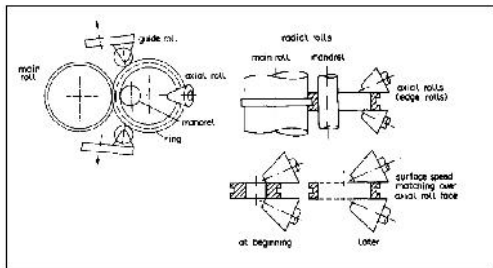
جدول ۱- شرایط شبیه‌سازی در مدل دوبعدی

۲۷۰	شعاع غلتک اصلی (mm)
۴۰	شعاع مندرل (mm)
۴۰	شعاع غلتک راهنما (mm)
۱۶۰	شعاع خارجی حلقه اولیه (mm)
۴۰	ضخامت حلقه اولیه (mm)
۶/۲۸	سرعت دورانی غلتک اصلی (rad.s^{-1})
۰/۶	میزان تغذیه مندرل (mm.s^{-1})
۰/۵	ضریب اصطکاک
IN718	جنس حلقه
۱۰۵۰	دمای اولیه حلقه ($^{\circ}\text{C}$)
۴۰	دمای اولیه غلتک اصلی ($^{\circ}\text{C}$)
۸۰	دمای اولیه غلتک راهنما و مندرل ($^{\circ}\text{C}$)
۵۰	ضریب انتقال حرارت همرفتی ($\text{W}/(\text{m}^2.\text{C}^{-1})$)
۱۰۰۰۰	ضریب رسانش تماسی ($\text{W.m}^2.\text{C}^{-1}$)

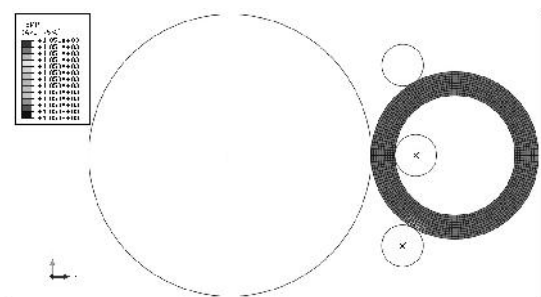
با مقایسه بین دو روش حل مشخص شد مدل دوبعدی در این نمونه با داده‌های تجربی توافق قابل قبولی داشته ولی نسبت به حل عددی سه بعدی صورت گرفته، مقدار دما را بیشتر پیش‌بینی می‌کند که دلیل آن ناشی از فرض کرنش صفحه‌ای و عدم خنک‌کاری در سطوح آزاد می‌باشد (شکل-۳). در ضمن دمای پیش‌بینی شده در سطح خارجی غلتک از مقدار اندازه‌گیری شده کمتر است که دلیل آن را می‌توان در نظر نگرفتن گرمای تولید شده ناشی از اصطکاک و تغییر شکل را عنوان کرد. با اعمال این شرایط و در نظر گرفتن گرمای تولیدی از آنها در مدل مقدار دمای پیش-بینی شده در ابتدا همخوانی خوبی با مقادیر واقعی داشته ولی در اواخر فرایند مقادیر بیشتری را برای دمای سطح خارجی ارائه می‌دهد.

بعد از بررسی صحت شبیه‌سازی در ادامه با ابعاد اولیه اسپول موتور مدل مورد نظر در نرم‌افزار آماده شد. جنس اسپول موتور آلیاژ Ti6Al4V [۱۹] و جنس غلتک‌های تغییر شکل‌پذیر آلیاژ H-13 در نظر گرفته شد. شرایط و هندسه اولیه مدل اسپول موتور طبق جدول-۲ می‌باشد.

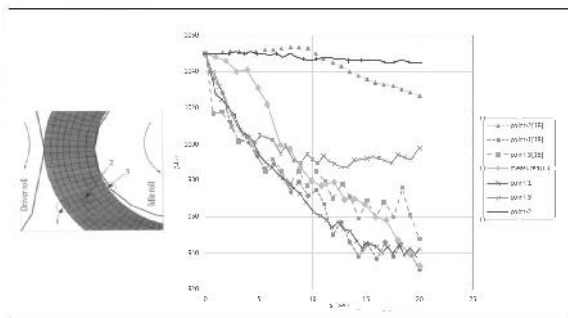
مقداری دما را در حلقه بیشتر پیش‌بینی می‌کند. با بررسی‌های صورت گرفته در مدل مورد مطالعه مشخص گردید که در نورد داغ تاثیر گرمای تولید شده از اصطکاک و تغییر شکل ناچیز بوده و می‌توان با دقت بالایی از حل کوپل معادلات پرهیز کرد و با این کار زمان تحلیل را کاهش داده و از سوی دیگر در مورد صحت داده‌ها اطمینان داشت.



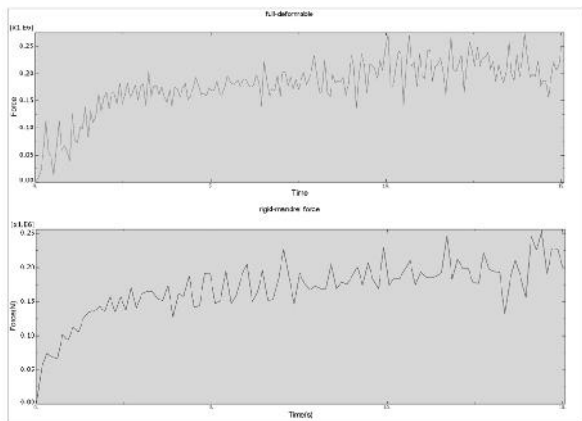
شکل ۱- ماشین نورد حلقه شعاعی-محوری



شکل ۲- مدل اولیه دوبعدی آماده شده در نرم‌افزار آباکوس



شکل ۳- مقایسه پیش‌بینی دما در حلقه در مدل دوبعدی و سه بعدی



شکل ۴- مقایسه مقدار نیرو در حالت تغییر شکل‌پذیر و صلب

تولید شده در آن بررسی گردید. در این حالت فرض گردید نیمی از حرارت وارد حلقه و نیم دیگر آن وارد غلتک می‌شود. از این رو مدل در حالت هم-دما و بدون گرمای ناشی از تغییر شکل آماده گردید تا بتوان تاثیر آن را به تنهایی و بدون حضور هیچگونه عامل دیگری بررسی کرد. هیچ‌گونه خنک-کاری در مدل صورت نگرفت. نتایج حاصل نشان می‌دهد که گرما حاصل از اصطکاک در مدل هم‌دما اندک است. نتایج در شکل ۶- نشان داده شده است. این افزایش دما و انتقال آن به غلتک‌ها با توجه به نورد داغ حلقه قابل چشم‌پوشی است.

تاثیر دما ناشی از تغییر شکل

دما فلز به علت کار مکانیکی انجام شده بر روی آن افزایش می‌یابد که به صورت منبع حرارتی در معادله انتقال حرارت ظاهر خواهد شد. انرژی مکانیکی ناشی از تغییر شکل بر واحد حجم، برابر سطح زیر نمودار تنش کرنش می‌باشد:

$$w = \int_0^{\bar{\epsilon}} \sigma d\bar{\epsilon} \quad (11)$$

تنها مقدار کمی از این انرژی در داخل جسم ذخیره می‌شود (اصولاً ناشی از نابجایی‌ها و حفرات) این انرژی در حدود ۱-۵ درصد می‌باشد. بقیه این انرژی به صورت حرارت آزاد می‌شود. اگر تغییر شکل را آدیاباتیک فرض کنیم تغییر دما از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\Delta T = \frac{\alpha \int \sigma d\bar{\epsilon}}{\rho C} = \frac{\alpha \bar{\sigma} \bar{\epsilon}}{\rho C} \quad (12)$$

که در آن $\bar{\epsilon}$ برابر تنش متوسط از ۰ تا $\bar{\sigma}$ و چگالی، ρ ظرفیت حرارتی جرمی و α برابر ضریب انرژی تبدیل شده به گرما می‌باشد. جهت سهولت در امر محاسبه نرخ گرما تغییر شکل راحت‌تر است تا از رابطه ۱۳- استفاده شود. [۲۰]

$$q = \alpha \bar{\sigma} \dot{\bar{\epsilon}} \quad (13)$$

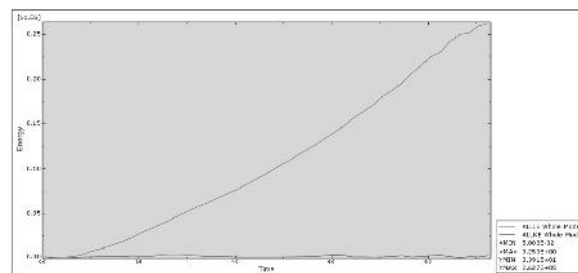
که در آن $\bar{\sigma}$ و $\dot{\bar{\epsilon}}$ برابر تنش و نرخ کرنش موثر می‌باشند. در آباکوس نیز از این رابطه جهت محاسبه گرمای تولید شده استفاده می‌گردد. مقدار پیش-فرض α برابر ۰/۹ می‌باشد که جهت بررسی تغییر دمای حلقه و گرمای انتقال یافته به غلتک‌ها این مقدار استفاده گردید.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شکل ۷- نشان داده شده است. همانطور که مشخص است افزایش دما ناشی از تغییر شکل پلاستیک زیاد نیست و علت آن نیز تغییر شکل‌های کوچک در هر مرحله می‌باشد. در ضمن به ترتیب بیشترین دما مشاهده شده در سطح خارجی، سطح داخلی و نقطه میانی حلقه می‌باشد که با توجه به ماهیت تغییر شکل‌های انجام شده در نورد حلقه قابل پیش‌بینی بود.

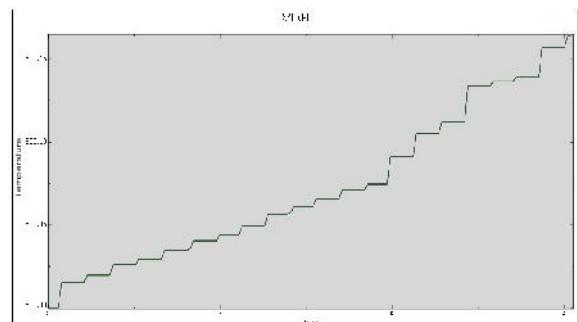
نتیجه‌گیری

شاید ظاهر فرآیند نورد حلقه بیشتر به نورد تخت ورق شباهت داشته باشد اما تفاوت‌های مهم بین این دو فرآیند باعث می‌شود تحلیل مورد استفاده در نورد ورق نتیجه مطلوبی در نورد حلقه نداشته باشد. کارهای تحلیلی در این حوزه به دلیل ساده‌سازی‌های زیاد در آن از دقت کافی برخوردار نبوده است. بنابراین لازم است تا جهت تخمین نیرو و پروفیل دمایی غلتک‌ها در دستگاه نورد حلقه به ماهیت سه بعدی فرایند، وضعیت ناپایدار و گذرا حلقه، تغییر نیروهای شکل‌دهی در حین فرایند، تغییرات دما ناشی از اصطکاک و تغییر شکل بر فرایند شبیه‌سازی بررسی شود. جهت بررسی این عوامل از حالت کرنش صفحه‌ای استفاده شد و مشخص گردید این فرضیه در این مسئله از دقت خوبی برخوردار است و

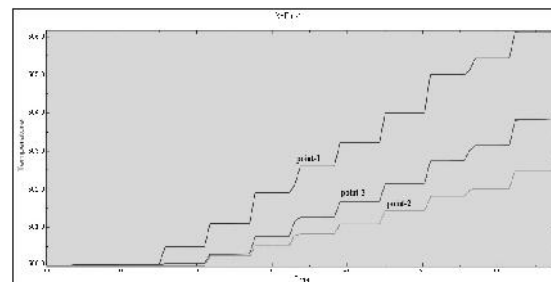
9. J.H. Beynon, P.R. Brown, S.I. Mizban, R.S. Ponter, C.M. Sellars, NUMIFORM 86, Gothenburg, Sweden, pp. 213-18, (1986).
10. A. Kumar, I.V. Samarasekera, E.B. Hawbolt, J. Mater. Processing Technol., vol. 30, pp. 91-114, (1992).
11. J.D. Lee, M.T. Manzari, Y. Shen, W. Zeng, *A finite element approach to transient thermal analysis of work rolls in rolling process*, Trans ASME J. Manuf. Sci. Eng., pp. 706-716, (2000).
12. J.L. Song, A.L. Dowson, M.H. Jacobs, J. Brooks, I. Beden, *Coupled thermo-mechanical finite-element modeling of hot ring rolling process*, Journal of Materials Processing Technology, pp. 332-340, (2002).
13. S.M. Hwang, C.G. Sun, S.R. Ryoo, W.J. Kwak, *An integrated FE process model for precision analysis of thermo-mechanical behaviors of rolls and strip in hot strip rolling*, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg, pp. 4015-4033, (2002).
14. C.S. Li, H.L. Yu, G. Deng, X. Liu, G. Wang, *Numerical Simulation of Temperature Field and Thermal Stress Field of Work Roll during Hot Strip Rolling*, Journal of Iron and Steel Research, pp. 18-21, (2007).
15. D. Benasciutti, E. Brusa, G. Bazzaro, *Finite elements prediction of thermal stresses in work roll of hot rolling mills*, Procedia Engineering, pp. 707-716, (2010).
16. A. Sonboli, S. Serajzadeh, *A model for evaluating thermo-mechanical stresses within work-rolls in hot-strip rolling*, J Eng Math, pp. 73-85, (2012).
17. ABAQUS, *Abaqus Analysis User's Guide*, version 6.13, Abaqus Inc(2013).
18. WANG M, YANG H, SUN Zhi, *Dynamic explicit FE modeling of hot ring rolling process*, Trans. Nonferrous Met. SOC. China 16(2006) 1274-1280
19. Wei Sha, Savko Malinov, *Titanium alloys: modelling of microstructure, properties and applications*, Woodhead Publishing Limited. (2009).
20. W.F. Hosford, R.M. Caddell, *Metal Forming Mechanics and Metallurgy*, Cambridge University Press, (2007).



شکل ۵- مقایسه انرژی داخلی و جنبشی در مدل



شکل ۶- افزایش دمای حلقه ناشی از اصطکاک



شکل ۷- افزایش دمای حلقه در نقاط مختلف ناشی از تغییر شکل پلاستیک

مراجع

1. W. Johnson and A. G. Mamalls, *Experiments on ring rolling*, Int. Metals Rev. 24, pp.137-148, (1979).
2. R. C. Keeton, *ASM Metals Handbook, Vol. 14: Forming and Forging*, 9th Ed, pp. 108-127. ASM International Metals Park, Ohio, U.S.A. (1988).
3. S. Spuzica, K.N. Strafforda, C. Subramaniana, G. Savageb, *Wear of hot rolling mill rolls: an overview*, Wear, (1994).
4. P.G. Stevens, K.P. Ivens, P. Harper, *Increasing work roll life by improved roll cooling practice*, J. Iron Steel Inst, pp.1-11, (1971).
5. F.D. Fischer, W.E. Schreiner, E.A. Werner, C.G. Sund, *The temperature and stress fields developing in rolls during hot rolling*, Journal of Materials Processing Technology, pp. 263-269, (2004).
6. D.M. Parke, J.L.L. Baker, *Temperature Effects of Cooling Work Rolls*, Iron and Steel Engr, pp. 83-88, (1972).
7. S.Wilmotte, J.Mignon, *Thermal Variations of the Camber of the Working Rolls during Hot Rolling*, Metall. Rep. CRM, pp. 17-34, (1973).
8. O.C. Zienkiewicz, E. Onate, J.C. Heinrich, *A general formulation for coupled thermal flow of metal using finite elements method*, Int. J. Num. Meth Eng., vol. 11, pp. 1497-1514, (1981),

SID



سرویس های ویژه



سرویس ترجمه تخصصی



کارگاه های آموزشی



بلاگ مرکز اطلاعات علمی



سامانه ویراستاری STES



فیلم های آموزشی

کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی

توجه: بررسی مقاله ای متون (مقدماتی)

کارگاه آنلاین
بررسی مقابله ای متون (مقدماتی)

PROPOSAL
پروپوزال

توجه: پروپوزال نویسی و پایان نامه نویسی

کارگاه آنلاین
پروپوزال نویسی و پایان نامه نویسی

ISI
Scopus

توجه: آشنایی با پایگاه های اطلاعات علمی بین المللی و ترند های جستجو

کارگاه آنلاین آشنایی با پایگاه های اطلاعات علمی بین المللی و ترند های جستجو