

## شبیه سازی ارتعاشات ناپایدار ورق در فرایند نورد سرد به کمک روش اجزاء محدود

رضا مهربانی<sup>i\*</sup>؛ سعید ضیائی‌راد<sup>ii</sup>؛ محمود سلیمی<sup>iii</sup>

### چکیده

چتر، یک مورد خاص از ارتعاشات خود تحریک می‌باشد که در نتیجه عکس‌العمل بین سازه دینامیکی قفسه نورد و دینامیک فرایند نورد بوجود می‌آید. مدلی که در این مقاله مطرح شده است شامل دو زیر مدل یکی برای سازه قفسه و دیگری برای فرایند نورد (تغییر شکل ورق) می‌باشد. در سازه قفسه از جرمهای متمرکز برای تحلیل غلتکها و المانهای فنر و دمپر به منظور شبیه سازی تماس غلتکها با یکدیگر و اتصال آنها به ساختمان دستگاه استفاده شده است.

در این مقاله برای تحلیل ارتعاشات چتر مربوط به مدل دینامیکی نورد سرد روش اجزاء محدود استفاده شده است. تاثیر برخی پارامترهای نورد مانند سرعت نورد، میزان کاهش سطح مقطع و ضریب اصطکاک بر روی ارتعاشات چتر مورد بررسی قرار گرفت و مشخص گردید که با افزایش سرعت نورد و کاهش ضریب اصطکاک احتمال وقوع چتر افزایش می‌یابد. نتایج این تحقیق با نتایج مطالعات گذشته که بیشتر تحلیلی و آزمایشی بوده مقایسه شد و برابری خوب نتایج، بیانگر توانایی مدل اجزاء محدود ارائه شده در تحلیل این پدیده است.

**کلمات کلیدی:** چتر، خود تحریکی، قفسه نورد، جرم متمرکز، اجزاء محدود.

## *Simulation of Chatter in Cold Rolling Strip using Finite Element Method*

R. Mehrabi; S. Ziaei-Rad; M. Salimi

### ABSTRACT

Chatter is a particular case of self-excited vibrations, which arise in rolling operations because of the interaction between the structural dynamics of the mill stand and dynamics of the rolling process. The model presented here has two sub models one for structure of the mill and the other for the rolling process. The structure of a mill stand modeled as a system of linear spring and lumped masses in order to simulation the interaction between the rolls.

In this paper, to analyze the chatter vibration a dynamic model of cold rolling process using finite element method (FEM) is considered. The influence of rolling parameters such as rolling speed, reduction and friction coefficient on chatter vibration is investigated and it was showed that the possibility of chatter onset increased by raising the rolling velocity and decrease friction coefficient. Predicted values of the model are in good agreement with that of the experiments as well as the values obtained by other researchers.

**KEYWORDS** Chatter, Self-excited, Mill, Lumped Masses, Finite Element.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۷/۴/۳۰

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۸۸/۵/۱۰

<sup>i\*</sup> نویسنده مسئول و دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی اصفهان: Email: mehrabi\_r@me.iut.ac.ir

<sup>ii</sup> دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی اصفهان: Email: szrad@cc.iut.ac.ir

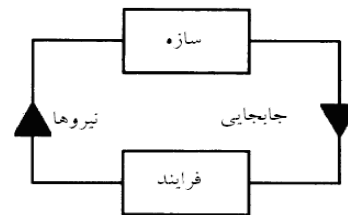
<sup>iii</sup> استاد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی اصفهان: Email: salimi@cc.iut.ac.ir

## ۱- مقدمه

نورد محصولات آلومینیومی و فولادی مسطح در معرض رویدادهایی چون نوسانات یا ارتعاشات مکانیکی قرار دارند. حالت شدیدی از چتر ممکن است باعث شکستن ورق در حال نورد، یا آسیب دیدگی دستگاه نورد شود [۱].

اثر چتر که به صورت نوارهای سایه و روشن ناشی از تغییرات صافی سطح خود را نشان می دهد، باعث بروز مشکلات جدی در عملیات بعدی ورق نظیر آبکاری، رنگ آمیزی و ... می شود. به گونه ای که کارخانجات خودروسازی و لوازم-خانگی ورق های دارای اثر چتر را در قسمت هایی که در معرض دید قرار دارند، به کار نمی برند. این موارد خود گواه بر اهمیت پدیده چتر در نورد ورق و تلاش برای برطرف یا کاهش این اثر می باشد.

چتر در عملیات تولید به عنوان نتیجه ای از برهم کنش بین خصوصیات دینامیکی سازه ماشین و دینامیک عملیات تولید حاصل می شود. این برهم کنش می تواند بطور طرحواره به وسیله دیاگرام حلقه بسته، شکل (۱) نشان داده شود. نیروهای دینامیکی که در فرایند نورد تولید شده اند، باعث تغییراتی در فاصله ی غلتکی، سرعت غلتک و ... می شوند. این عوامل به نوبت، تغییرات بیشتری را در نیروهای نورد نتیجه می دهند. تحت شرایط مطمئن، بر هم کنش بین ساختار و فرایند ممکن است به گونه ای باشد که انرژی (نیروی محرکه ماشین)، بوسیله فرایند در اختیار گرفته شده و به انرژی ارتعاشی قفسه تبدیل گردد.



شکل (۱): نمایش چتر به صورت یک حلقه بسته

برای غلبه بر چتر در فرایند نورد، در ابتدا لازم است که ماهیت پدیده چتر یا مدهای ارتعاشی را درک نمود. بطور اساسی سه نوع ارتعاش برای غلتکها وجود دارد، که با توجه به فرکانس تشدید قابل تشخیص می باشند [۲]:

۱- چتر پیچشی، ارتعاشات دورانی غلتکها است که با دوران عادی آن جمع می شود. محدوده فرکانسی یاد شده در منابع مختلف اندکی متفاوت است لیکن به بطور کلی محدوده فرکانسی این ارتعاشات قدری پایین می باشد. مرجع [۳] محدوده ۱ تا ۱۵ هرتز و مرجع [۴] محدوده ۵ تا ۲۰ هرتز را

برای این نوع ارتعاشات یاد می کنند. به نظر می رسد برای قفسه های نورد متعارف ورق، محدوده ۵ تا ۲۰ هرتز قابل استفاده باشد.

۲- چتر اکتاو سوم یک پدیده ارتعاشات خودتحریک و خطرناک ترین پدیده ارتعاشی برای قفسه های نورد می باشد. این نوع ارتعاشات به طور ناگهانی شروع شده و در کمتر از چند ثانیه به بیشترین میزان خود که بسیار شدید و مخرب است می رسد. تشخیص این نوع چتر بسیار مشکل است زیرا وقوع آن اتفاقی و غیرقابل پیش بینی است و حذف آن نیز بسیار پر-هزینه خواهد بود. این نوع ارتعاشات بیشتر موجب وقوع چتر پیچشی نیز می شود و به طور ناگهانی نیز ناپدید می شود، به خصوص اگر سرعت نورد کم باشد.

این نوع چتر در محدوده فرکانسی نزدیک به اکتاو سوم موسیقی یعنی ۱۲۸ تا ۲۵۶ هرتز اتفاق می افتد و لذا چتر اکتاو سوم نام گرفته است. یون [۲] محدوده ۱۲۵ تا ۲۴۰ هرتز و میسونو [۵] محدوده ۱۳۰ تا ۳۲۰ هرتز را برای این ارتعاش بیان کرده اند. در هر حال مقدار دقیق فرکانس چتر اکتاو سوم بر اساس ویژگیهای هر دستگاه نورد و پارامترهای تنظیمی نورد، قابل تعیین می باشد.

۳- چتر اکتاو پنجم که به دلیل قرار گرفتن فرکانس وقوع آن در محدوده اکتاو پنجم موسیقی (۵۱۲ تا ۱۰۲۴ هرتز) به این نام معروف است. به دلیل نوع ارتعاشی که دارد به چتر غلتک و به دلیل تاثیر آن بر روی ورق نورد شده به چتر سایه روشن نیز معروف است. این چتر بیشتر تحت تاثیر عوامل تحریک بوجود می آید. لیکن تحت شرایط خاصی رفتار خودتحریک نیز می تواند داشته باشد.

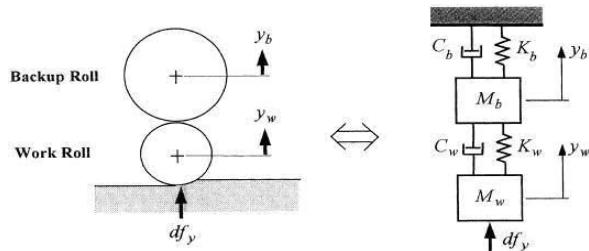
چتر اکتاو پنجم یکی از مسائل جدی در قفسه های نورد سرد چهارغلتکی با سرعت بالا می باشد. ویژگی خاص این نوع چتر رشد تدریجی آن است و در نورد چهار غلتکی بیشتر با صدای آزار دهنده ای همراه است. منابع مختلف، فرکانس این نوع چتر را در باندهای مختلفی نظیر ۶۰۰ تا ۹۰۰ [۶] و ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ [۷] هرتز گزارش کرده اند.

بیشتر خرابی سطح غلتکهای پشتیبان نتیجه چتر اکتاو پنجم است. ایجاد چتر اکتاو پنجم نیازمند وجود ارتعاشات اجباری ناشی از نیروی تحریک است که به مرور باعث ایجاد اثرات سایشی روی سطح غلتک می شود. چنانچه فرکانس نیروی تحریک در محدوده فرکانس طبیعی مود اکتاو پنجم قفسه قرار گیرد، این فرایند شدت بسیار بیشتری می گیرد. این موضوع به گونه ای است که در اصل وجود چتر اکتاو پنجم به وسیله توسعه اثر چتر بر روی غلتکها، به ویژه غلتکهای پشتیبان

## ۲- روش اجزاء محدود در تحلیل پدیده چتر

تحلیل‌های دینامیکی به دو روش ضمنی<sup>۱</sup> و صریح<sup>۲</sup> دسته بندی می‌شوند. با توجه به فرایند چتر و حساسیت ارتعاشات مربوط به این فرایند، از خاصیت ضمنی نرم افزار اباکوس<sup>۳</sup> با توجه به برتری‌هایی که دارد برای شبیه‌سازی پدیده چتر استفاده شده است. برای شبیه‌سازی زیرمدل قفسه نورد از مدل‌های جرم و فنر استفاده شده و زیرمدل فرایند با در نظر گرفتن ورق به صورت دو بعدی و کرنش صفحه‌ای شبیه‌سازی می‌شود. با توجه به افزایش احتمال وقوع چتر در قفسه آخر، تنها این قفسه مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

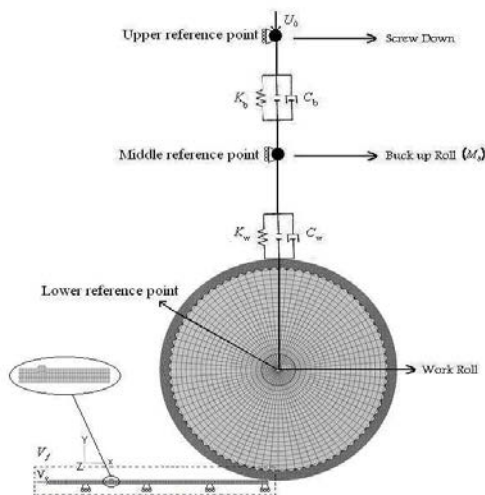
به طور کلی قفسه نورد شامل دو غلتک (کاری و پشتیبان) می‌باشد. ارتباط غلتک‌های کاری و پشتیبان و همچنین غلتک پشتیبان با بدنه قفسه<sup>۴</sup> بصورت سیستم فنر و دمپر مدل شده که ضرایب مربوط به فنر و دمپر و خواص لازم برای شبیه‌سازی رفتار ورق از مرجع [۱۲] استفاده شده است (شکل ۲).



شکل (۲): مدل ارتعاشی و چگونگی اتصال غلتکها

### ۲-۱- خواص هندسی، شرایط اولیه و شرایط مرزی

با فرض تقارن قفسه نورد نسبت به صفحه تقارن ورق می‌توان قفسه نورد را با یک سیستم جرم و فنر و دمپر با دو درجه آزادی مانند شکل (۳) مدل کرد.



شکل (۳): مدل اجزاء محدود برای تحلیل پدیده چتر

شناخته می‌شود.

تحقیقات مربوط به پدیده چتر در اواسط دهه ۷۰ آغاز شد، که بیشتر تجربی و غیرعلمی بود و هیچ دلیل قانع‌کننده‌ای برای ناپایداری‌های موجود در نورد ارائه نمی‌کرد [۲]. تحقیقاتی که توسط تامیا انجام شد [۸] نشان داد که اثر کشش داخلی قفسه روی نیروی نورد موجب خودتحریکی مجموعه نورد می‌شود. چفنونکس ساختمان قفسه را به صورت جرم‌های متمرکز و فنر مدل کرد که نسبت به ورق به صورت متقارن فرض می‌شود [۹]. پس تعداد درجات آزادی را به دو کاهش داد. اگر هدف تحلیل پدیده چتر باشد، این مدل‌ها نتایج خوبی را در پیشگویی کمی فرکانسهای مربوط به مدل‌های اندک اولیه ارائه می‌دهند اما قادر به تفسیر فیزیکی همه پدیده‌های دیده شده نیستند.

جانسون و کیوآی فرکانسهای طبیعی مربوط به سیستم دو درجه آزادی و چهار درجه آزادی را مطالعه و تلاش کردند مدل‌های تحلیلی را بنا کنند که شامل اثرات غیرخطی همراه با در نظر گرفتن تغییر شکل‌های ایجاد شده روی غلتک‌های پشتیبان و کار باشد [۱۰]. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که این اثرات غیرخطی می‌توانند مدهای فرکانسی بالاتری را تحریک نمایند و از شرایط اولیه با دامنه کوچک امکان ظهور حرکت‌هایی با دامنه بزرگ را فراهم سازند.

یون رابطه بین ایجاد چتر و پارامترهای نورد را به صورت آزمایشی به وسیله دستگاه نورد مورد بررسی قرار داد [۲]. بر پایه این آزمایشات، یون و اتمان اثر تغییر شکل پلاستیک مواد همگن و غیرهمگن را بر پاسخ غیرخطی دینامیکی و پدیده چتر ارزیابی نمودند.

تحلیل پدیده چتر با بکار بردن روش اجزاء محدود سابقه کوتاهی دارد. تنها ژو با بکار بردن المانهای فنر، بیم و المانهای دو بعدی صفحه‌ای به تحلیل دستگاه نورد و استخراج فرکانس‌های طبیعی آن پرداخت [۱۱]. بعدها ژو مدل سه بعدی کاملی را بنا نهاد که جزئیات کامل‌تری از دستگاه نورد در آن لحاظ شده بود، ولی در هیچکدام از این مدل‌ها، دینامیک فرایند لحاظ نشده است.

در این مقاله ابتدا پدیده چترینگ معرفی شد و آثار مخرب آن بر صنعت نورد مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه اصول تحلیل دینامیکی به روش اجزاء محدود مورد بررسی قرار گرفته و ویژگی‌های مدل اجزاء محدود تهیه شده به کمک نرم افزار ABAQUS معرفی می‌شود. همچنین نتایج بدست آمده از این مدل، با نتایج بدست آمده از مدل‌های ریاضی و پژوهشهای صورت گرفته توسط محققین قبلی مقایسه و نتیجه‌گیری می‌شود.

همانگونه که در شکل (۳) مشخص است این مدل شامل سه نقطه مرجع<sup>۵</sup> می‌باشد که برای اتصال این سه نقطه از دو اتصال‌دهنده استفاده شده است.

اتصال‌دهنده نقطه مرجع بالایی که شبیه‌سازی بدنه قفسه است، به نقطه مرجع وسط که شبیه‌سازی غلتک پشتیبان<sup>۶</sup> است از نوع محوری می‌باشد. این نوع اتصال‌دهنده اجازه می‌دهد که این دو نقطه مرجع نسبت به هم تنها در جهت محور جابجا شوند و خواص مورد نیاز آن ضریب سختی  $K_1$  و ضریب استهلاک  $C_1$  است.

$K_1$  ( $K_b$ ) بیانگر سختی فنری است که تماس میان غلتک پشتیبان و ساختمان قفسه نورد به همراه خواص الاستیک قفسه را مدل می‌کند و  $C_1$  ( $C_b$ ) بیانگر استهلاک این تماس می‌باشد. در این مدل، جرم غلتک پشتیبان به صورت جرم متمرکز ( $m_1$ ) به نقطه مرجع وسط نسبت داده می‌شود.

اتصال‌دهنده نقطه مرجع وسط به نقطه مرجع پائین که شبیه سازی غلتک کار<sup>۷</sup> است از نوع "محوری + چرخشی" است. این نوع اتصال‌دهنده به دو نقطه مرجع وسط و پائین اجازه می‌دهد که علاوه بر جابجایی محوری نسبت به یکدیگر، نقطه مرجع پائین بتواند به همراه غلتک الاستیک متصل به آن حول محور Z (در صفحه XY) نیز بچرخد. خواص مورد نیاز آن ضریب سختی  $K_2$  و ضریب استهلاک  $C_2$  می‌باشد.

$K_2$  ( $K_w$ ) بیانگر سختی فنری است که تماس میان غلتک پشتیبان و غلتک کاری را مدل می‌کند. برای بدست آوردن ثابت فنر بین غلتک پشتیبان و کاری از تغییر شکل الاستیک بین دو غلتک استفاده می‌شود.

$C_2$  ( $C_w$ ) ضریب استهلاک تماس بین دو غلتک کاری و پشتیبان است. با توجه به این که روغنکاری در سیستم نورد پوسته‌ای بین غلتک کار و ورق بسیار کم می‌باشد می‌توان از اثر دمپینگ ایجاد شده توسط آن چشم‌پوشی نمود، همچنین می‌توان از اثرات روغنکاری در محل یاطاقان‌ها و اثر دمپینگ سیستم انتقال قدرت چشم‌پوشی کرد.

همانگونه که در شکل (۳) مشخص است، غلتک کاری به صورت الاستیک با قطر واقعی به نقطه مرجع پائینی متصل شده است که عملیات نورد ورق با چرخش این غلتک صورت می‌گیرد. فرض الاستیک غلتک کاری، تاخیر زمانی را وارد مدل کرده و احتمال استهلاک منفی را افزایش می‌دهد.

مقادیر عددی ضرایب مطرح شده در جداول (۱) و (۲) به طور کامل آمده است.

با توجه به اینکه در این مقاله تلاش شده تا فرایند نورد به صورت واقعی مدل شود، ابتدا سطح بالائی ورق را بطور دقیق

مماس با سطح بیرونی و پائین غلتک کار قرار داده، سپس جابجایی مشخصی با توجه به میزان کاهش ضخامت<sup>۸</sup> مورد نیاز، به نقطه مرجع بالائی در جهت Y به سمت پایین داده می‌شود ( $U_o$ ). این حرکت مشابه حرکت تکیه گاه غلتک پشتیبان توسط سیستم تنظیم ارتفاع<sup>۹</sup> برای تنظیم فاصله غلتکهای کاری (Gap) می‌باشد. این جابجایی با میزان سرعت زیاد صورت می‌گیرد تا در هزینه محاسبات (زمان) صرفه‌جویی شده و دقت نتایج نیز بالا رود. با توجه به میزان کاهش ضخامت دلخواه و محاسبه ضرایب الاستیک  $K_1$ ،  $K_2$  و تعیین خواص ورق می‌توان نیروی نورد را بدست آورد و سپس از رابطه  $F = KU_o$  میزان جابجایی مورد نیاز برای نقطه مرجع بالایی بدست می‌آید.

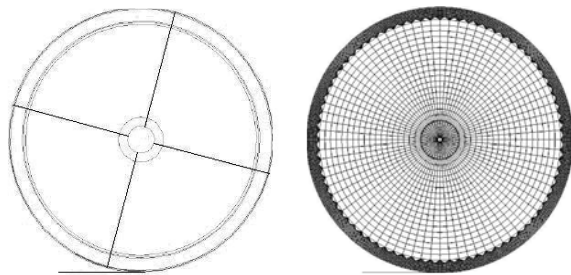
نقطه مرجع میانی و پائینی نیز در جهت X محدود شده و تنها در جهت Y اجازه حرکت دارند تا جابجایی اعمال شده توسط نقطه مرجع بالایی را به ورق انتقال دهند.

با یادآوری دوباره تقارن نورد نسبت به صفحه افقی میانی ورق، فرض شده قسمت پائین ورق روی تکیه گاههای غلتشی قرار دارد. (شکل ۳)

برای شروع عملیات نورد و درگیری ورق با غلتک کاری از امکان میدان سرعت در باکوس استفاده شده، در این حالت تمامی المانهای موجود در ورق در مرحله اولیه برابر با میدان سرعت افقی (به عنوان سرعت اولیه ورق) می‌باشند. میدان سرعت این خاصیت را دارد که در مرحله بعد و با آغاز عملیات نورد، سرعت المانها توسط نرم‌افزار به صورت خودکار محاسبه می‌شود. در شکل (۳) میدان سرعت تعریف شده به صورت  $V_f$  نشان داده شده است.

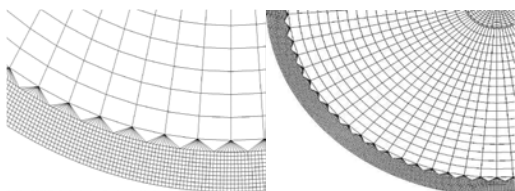
در عملیات نورد سرد ورق، سرعت خروجی ورق از قفسه قبلی ثابت می‌باشد، بر همین اساس در مدل المان محدود فرض شده تا انتهای ورق با سرعت ثابت حرکت کند. سرعت اولیه انتهایی ورق برابر با فیلد سرعت می‌باشد ( $V_0 = V_f$ ). مقدار سرعت اولیه ورق  $V_0 = V_f$  از سرعت محیطی غلتک ( $R\omega$ ) کمی کمتر در نظر گرفته شده تا کشش بین قفسه‌ای در ورودی مثبت باشد، که این خود باعث ادامه عملیات نورد می‌گردد.

با توجه به اهمیت پایداری در این مسئله تلاش شده است که ابتدا فرایند نورد به حالت پایدار رسیده و سپس تحریک به غلتک وارد شده و پایداری یا ناپایداری (چتر) سیستم بررسی شود. چون تغییر ضخامت با میزان جابجایی که به نقطه مرجع بالایی داده می‌شود تنظیم می‌شود، مدت زمانی طول می‌کشد تا ورق به ضخامت مورد نظر برسد که از این زمان به عنوان مدت زمان لازم برای پایداری عملیات نورد یاد می‌شود.



۱- قسمت بندی

۲- شبکه بندی



۳- مراحل گذار

شکل (۵): مراحل شبکه بندی غلتک کاری

## ۲-۴- انتخاب الگوریتم مناسب تماس

برای مدل سازی تماس میان غلتک الاستیک که در جهت X مقید شده و در جهت Y نیز به یک اتصال دهنده متصل است با ورقه که در حال نورد است از الگوریتم پناستی استفاده می شود. استفاده از گزینه تماس سخت<sup>۱۱</sup> در این الگوریتم نیز باعث کمترین تاثیر در پایداری گام زمانی می گردد.

## ۳- بررسی نتایج

عوامل زیادی چون سرعت بالای نورد، کاهش ضخامت های خیلی بزرگ یا خیلی کوچک، ضریب اصطکاک کم، ضخامت کم ورق برای افزایش احتمال وقوع چتر مطرح شده است. در این مقاله به فاکتورهای قابل کنترل یعنی سرعت، کاهش ضخامت و ضریب اصطکاک پرداخته شده و نتایج با کارهای تحلیلی، مقایسه شده است.

برای اثبات درستی زیرمدل فرایند، یکی از پارامترهایی را که می توان بررسی کرد نیروی نورد می باشد. با مشخص بودن نسبت شعاع به ضخامت ورق و میزان کاهش ضخامت و عرض ورق می توان نیروی نورد را به صورت رابطه زیر بدست آورد [۱۳]:

$$F = \bar{Y}_w \sqrt{R \Delta h Q} = \quad (1)$$

$$(414 \times 10^6) \times (1) \times ((0.305) \times (0.0313 \times 10^6))$$

$$= 2.82 \text{ MN}$$

نیروی حاصل از مدل المان محدود که در شکل (۶) نشان داده شده است با نیروی حاصل از فرمولهای تحلیلی، خطایی در حد

ایجاد تحریک به غلتک در این مدل برابر با آنچه در واقعیت رخ می دهد مدل سازی شده است، به این صورت که بعد از پایداری عملیات نورد یک تغییر ضخامت ناگهانی (ضربه) بر روی ورق ایجاد می شود. این تغییر ضخامت در واقع شبیه سازی خط جوش روی ورق و یا می تواند شبیه سازی ورق آسیب دیده از قفسه قبلی باشد.

## ۲-۲- خواص مکانیکی ماده ورق

خواص مکانیکی مورد نیاز برای تحلیل الاستیک-پلاستیک عبارتند از: خواص عمومی مانند چگالی، خواص الاستیک شامل ضریب پواسون و مدول یانگ و خواص پلاستیک شامل تنش اسمی بر حسب کرنش اسمی می باشد. پارامترهای لازم در جداول (۲) و (۳) بیان شده است.

## ۲-۳- المان بندی و شبکه مناسب برای تحلیل ورق و

### غلتک کاری

#### الف- شبکه بندی ورق

در روش اجزاء محدود، ورق به صورت دو بعدی و کرنش-صفحه ای مورد تحلیل قرار می گیرد. تحلیل کرنش صفحه ای برای ورق به دلیل میزان عرض زیاد ورق (یک متر) تحلیل مناسبی می باشد.

ورق دارای ضخامت به میزان کم (در حد میلیمتر) در مقابل طول زیاد (در حد متر) می باشد به همین دلیل انتخاب تعداد المان در عرض (ضخامت) ورق مسئله مهمی می باشد. حداقل سه المان در نصف ضخامت ورق لازم است تا بتوان تغییر ضخامت ورق را هنگام حل به خوبی بررسی کرد لذا شبکه بندی مناسب ورق در شکل (۴) نشان داده شده است.



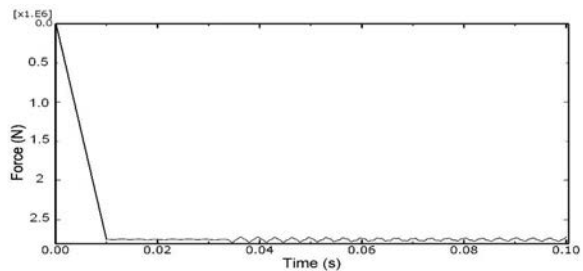
شکل (۴): شبکه بندی مناسب ورق

#### ب- شبکه بندی غلتک کاری

غلتک کاری نیز به صورت دو بعدی و کرنش صفحه ای مورد تحلیل قرار می گیرد. با توجه به شعاع زیاد غلتک کاری (۰/۳۰۵ متر) نسبت به نصف ضخامت ورق ورودی (۰/۵ میلیمتر)، برای حل دقیق باید توجه کافی به شبکه بندی غلتک داشت. به خصوص در محل تماس غلتک کاری با ورق، چون شبکه بندی ورق ریز می باشد، باید المانهای غلتک کار نیز ریز شوند. ریز کردن المانهای غلتک باعث بالا رفتن زمان حل مسئله می شود، برای رهایی از این مشکل پیشنهاد می شود که از چند مرحله گذر برای ریز کردن المانها استفاده شود. مراحل شبکه بندی غلتک کاری به طور دقیق در شکل (۵) نشان داده شده

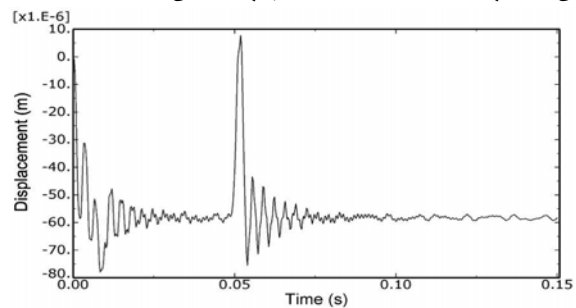


۲/۵٪ =  $(2/75 - 2/82) / (2/75) \times 100$  دارد، بنابراین مدل المان محدود حاضر، مدل مناسبی برای شبیه‌سازی نورد می‌باشد.



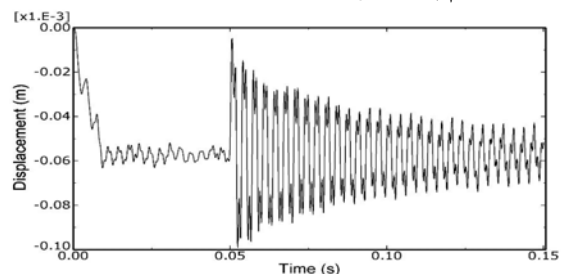
شکل (۶): نیروی نورد محاسبه شده توسط نرم‌افزار

شکل (۷) نشان دهنده اولین حالت مسئله است. در این حالت سرعت ورودی ورق ۶ متر بر ثانیه و تحریک ایجاد شده روی ورق توسط تابع ضربه با دامنه‌ای در حدود ده درصد ضخامت ورق (۰/۰۵ mm) در فاصله ۰/۴ متر از سر ورق ایجاد گردیده است. همان گونه که در شکل نشان داده شده، سیستم در این سرعت از پایداری بسیار خوبی برخوردار است. ابتدا فرایند پایدار شده و سپس توسط تابع ضربه ایجاد شده روی ورق تحریک می‌شود و بطور آئی تحریک اولیه ایجاد شده نیز میرا می‌شود، پس کل فرایند بدین ترتیب پایدار می‌گردد.



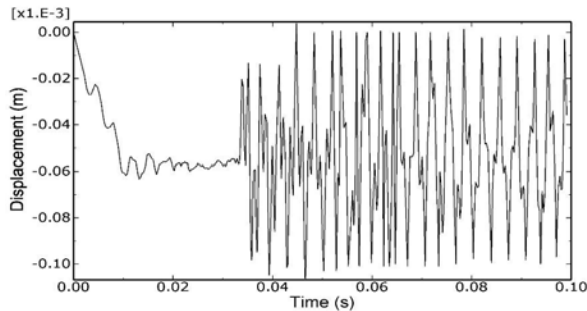
شکل (۷): نمودار جابجایی غلتک کاری بر حسب زمان (سرعت ورق ۶ متر بر ثانیه)

با افزایش سرعت ورودی ورق و به دنبال آن افزایش سرعت محیطی غلتک تا ۱۲ متر بر ثانیه، شیب همگرایی نمودار جابجایی غلتک کار کم می‌شود. با اینکه در این حالت سیستم مدت زمان بیشتری نوسان می‌کند ولی باز هم نوسانات میرا شده و سیستم پایدار می‌گردد (شکل ۸).



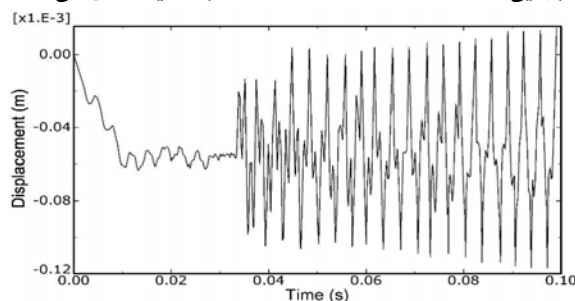
شکل (۸): نمودار جابجایی غلتک کار بر حسب زمان (سرعت ورق ۱۲ متر بر ثانیه)

اگر باز هم سرعت ورودی ورق افزایش یابد، سرعت همگرایی نمودار مربوط به جابجایی غلتک کار کاهش یافته تا در سرعت ۱۷ متر بر ثانیه، نمودار مربوط به جابجایی غلتک کار دیگر همگرا نمی‌شود، و بعد از تحریک اولیه توسط تابع ضربه موجود روی ورق، دامنه ارتعاشات سیستم به طور ثابت ادامه پیدا می‌کند که این حالت به مرز پایداری معروف می‌باشد (شکل ۹).



شکل (۹): نمودار جابجایی غلتک کار بر حسب زمان (سرعت ورق ۱۷ متر بر ثانیه)

در ادامه اگر به سرعت ورودی ورق باز هم افزوده شود دامنه ارتعاشات سیستم بعد از تحریک اولیه افزایش می‌یابد و به طور کلی سیستم ناپایدار می‌گردد. شکل (۱۰) نمودار جابجایی غلتک کار را در سرعت ۲۲ متر بر ثانیه نشان می‌دهد.



شکل (۱۰): نمودار جابجایی غلتک کار بر حسب زمان (سرعت ورق ۲۲ متر بر ثانیه)

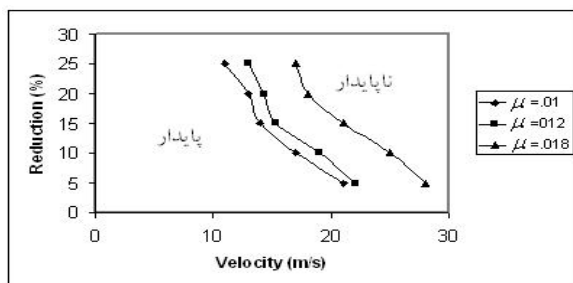
همانگونه که در شکل مشخص است تابع ضربه بعد از ۰/۳۵ ثانیه و پس از پایداری سیستم به غلتک کاری اعمال می‌شود. در این سرعت بعد از تحریک اولیه، نوسانات با شیب ملایم تشدید شده و نمودار جابجایی واگرا می‌گردد. دامنه نوسانات بعد از زمان ۰/۱ ثانیه به اندازه‌ای زیاد می‌شود که باعث پاره شدن ورق می‌گردد. تمام نمودارهای بالا با کاهش ضخامت ۱۰ درصد و ضریب اصطکاک ۰/۱۸ بدست آمده‌اند. در ادامه با تغییر ضریب اصطکاک، سرعت بحرانی برای هر ضریب اصطکاک بدست می‌آید. در نمودار شکل (۱۱) سرعت بحرانی در ضریب اصطکاکهای مختلف با علامت \* مشخص

شده است.

ضخامت، سرعت بحرانی که باعث ناپایداری در سیستم می شود کاهش می یابد.

### ۳-۲- بررسی اثر تغییر ضریب اصطکاک میان غلتک و ورق

ضریب اصطکاک از مهمترین پارامترهایی است که سبب بوجود آمدن چتر می شود. به این دلیل انتخاب بازه ای که نشان دهنده محدوده متعارف و منطقی از تغییرات این ضریب باشد دارای اهمیت بسیار زیادی است. به منظور بررسی اثر ضریب اصطکاک بر پایداری سیستم، ۳ ضریب اصطکاک ۰/۰۱، ۰/۰۱۲، ۰/۰۱۸ و ۰/۰۱۸ انتخاب شده اند. به منظور بررسی این ۳ ضریب اصطکاک ورق با ضخامت ثابت را در نسبت کاهشهای مختلف مورد بررسی قرار داده و در هر حالت سرعت بحرانی را بدست آورده و نتایج به دست آمده در نمودار شکل (۱۴) ترسیم شده است.



شکل (۱۴): بررسی اثر تغییر ضریب اصطکاک بر وقوع چتر در سرعت ها و نسبت کاهش ضخامت های مختلف

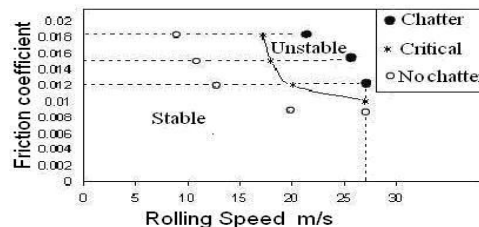
همان گونه که در نمودار (۱۴) مشخص است با افزایش ضریب اصطکاک سرعت بحرانی که باعث ناپایداری در سیستم می شود افزایش می یابد و همچنین سیستم پایدارتر می شود.

### ۴- نتیجه گیری

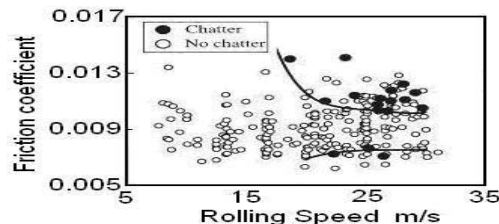
با توجه به بررسی پارامترهای مطرح شده می توان پیشنهادات زیر را برای کاهش عیب ارتعاش در نورد سرد ارائه کرد:

هر چه میزان کاهش ضخامت ورق افزایش یابد احتمال وقوع چتر افزایش می یابد. بنابراین در کاهش ضخامت بالا باید سرعت نورد را کاهش داد.

هر اندازه ضریب اصطکاک کاهش پیدا کند، احتمال وقوع چتر افزایش پیدا می کند و این به معنای آن است که به هنگام کاهش ضریب اصطکاک (همچون هنگام پایان یک شیفت کاری، هنگام تعویض غلتک های کاری به دلیل کاهش زبری سطح غلتک) بایستی سرعت نورد را کاهش داد.



شکل (۱۱): رابطه میان سرعت بحرانی نورد و ضریب اصطکاک

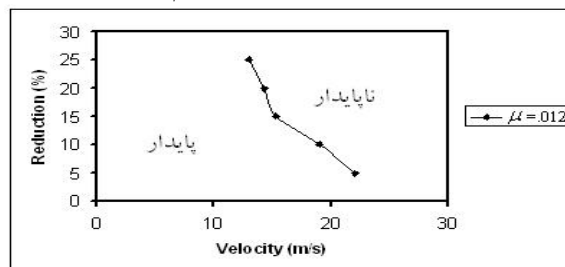


شکل (۱۲): رابطه میان سرعت نورد و ضریب اصطکاک ارائه شده توسط کیمورا [۱۴]

در شکل (۱۲) به نمودار ارائه شده توسط کیمورا اشاره شده است. با مقایسه این دو نمودار مشخص می شود که با توجه به فرضیات در نظر گرفته شده توسط مدل اجزاء محدود پیشنهادی، این مدل تنها قسمت بالائی نمودار کیمورا را شبیه سازی می کند. میزان برابری خوب نمودار حاصل از نتایج اجزاء محدود با نمودار موجود در مقاله [۱۴] درستی مدل اجزاء محدود برای بررسی ارتعاشات ناپایدار را به اثبات می رساند. همچنین از مقایسه سرعت بحرانی حاصل از شبیه سازی با سرعت های بحرانی که در مجتمع فولاد به صورت تجربی بدست آمده است نتایج شبیه سازی به اثبات می رسد. (جدول ۴)

### ۳-۱- بررسی اثر نسبت کاهش ضخامت

در این حالت مدل با ضریب اصطکاک ثابت و ورق با ضخامت ثابت در نظر گرفته شده و در چند نسبت کاهش ضخامت مختلف، سرعتی که باعث ناپایداری در سیستم (چتر) می گردد محاسبه و نمودار شکل (۱۳) ترسیم می گردد.



شکل (۱۳): بررسی اثر نسبت کاهش ضخامت ورق بر وقوع چتر در سرعت های مختلف

نمودار (۱۳) مشخص می کند که با افزایش نسبت کاهش

|                      |                              |
|----------------------|------------------------------|
| ۲/۷۶×۱۰ <sup>۸</sup> | ثابت فنریت، $K_b (N/m)$      |
| ۰/۳۰۵                | شعاع غلتک کاری، $R_w (m)$    |
| ۰/۷۶                 | شعاع غلتک پشتیبان، $R_b (m)$ |
| ۰/۰۰۱                | ضخامت ورق ورودی، $h_1 (m)$   |
| ۰/۰۰۰۹               | فاصله گپ، $h_c (m)$          |

جدول (۲): خواص ماده

|                   |                          |
|-------------------|--------------------------|
| ۲/۰۷ <sup>۸</sup> | تنش تسلیم برشی، $k (Pa)$ |
| ۲/۱ <sup>۱۱</sup> | مدول یانگ، $E (Pa)$      |
| ۱                 | عرض ورق، $w (m)$         |
| ۰/۰۱۸             | ضریب اصطکاک، $\mu$       |

جدول (۳): مقادیر تنش - کرنش

| Strain (%) | Stress (Mpa) |
|------------|--------------|
| ۰          | ۴۱۴          |
| ۱          | ۴۴۰          |
| ۲/۵        | ۵۰۰          |
| ۱۰         | ۸۰۰          |

جدول (۴): مقایسه سرعتهای بحرانی حاصل از نتایج المان محدود

با سرعتهای بحرانی تجربی

| میزان کاهش سطح مقطع (%) | سرعت بحرانی محاسبه شده (m/s) | سرعت بحرانی اندازه گیری شده تجربی (m/s) |
|-------------------------|------------------------------|---|
| ۵                       | ۲۳                           | ۲۱                                      |
| ۱۰                      | ۱۹                           | ۱۷                                      |
| ۱۵                      | ۱۶                           | ۱۵                                      |
| ۲۰                      | ۱۴                           | ۱۲                                      |
| ۲۵                      | ۱۳                           | ۱۰                                      |

با وجود تمامی شبیه سازی های یاد شده و نتایج حاصل از تحقیقات محققین پیشین، از میان راه حل های ارائه شده برای کاهش چتر، نظیر افزایش اثر استهلاکی در سیستم اعمال نیروی نورد، بهینه کردن عملیات روانکاری و ... برترین راه حل عملی، موفق و مقرون به صرفه که تا کنون برای پرهیز از پدیده چتر ارائه شده است، کاهش موقت سرعت خط می باشد. علت این مسئله این است که نصب مستهلک کننده بر روی یک قفسه نورد، تغییر نسبت قطر غلتکها نسبت به یکدیگر مسئله ای هزینه بر، مشکل و گاهی غیرممکن است و در بسیاری از موارد تغییر در پارامترهای فرایند موثر در چتر نظیر روانکاری و ... با توجه به محدودیتهایی که دارند، تاثیر کافی برای اجتناب از چتر نخواهند داشت. بنابراین تنها پارامتری که به راحتی قابل تغییر و تاثیر زیادی بر روی چتر دارد سرعت خط می باشد.

## ۵- تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله وظیفه خود می دانند از کارشناسان مجتمع فولاد مبارکه اصفهان به خاطر همکاریهایی که در انجام این تحقیق داشته اند تشکر نمایند.

## ۶- ضمائم

جدول (۱): مقادیر مربوط به قفسه نورد

|                      |                              |
|----------------------|------------------------------|
| ۶۸۱                  | جرم غلتک کار، $M_w (kg)$     |
| ۴۲۳۰                 | جرم غلتک پشتیبان، $M_b (kg)$ |
| ۰                    | ضریب دمپینگ، $C_w (Ns/m)$    |
| ۱۱۳۸۰۰۰              | ضریب دمپینگ، $C_b (Ns/m)$    |
| ۳/۱۷×۱۰ <sup>۸</sup> | ثابت فنریت، $K_w (N/m)$      |

## ۷- مراجع

- Yun, I.; "Chatter in Cold Rolling", Ph.D. thesis, Northwestern University, Evanston, Illinois, 1995. [۷]
- Tamiya, T.; Furui, K.; Iida, H.; "Analysis of chattering phenomenon in cold rolling", Proceedings of International Conference on Steel Rolling, ISIJ, Tokyo, p.p. 1191-1202, 1980. [۸]
- Chefneux, L.; Fischbach, J. P.; Gouzou, J.; "Study and Control of Chatter in Cold Rolling", Iron and Steel Engineer, p.p. 17-26, 1982. [۹]
- Johnson, R. E.; Qi, Q.; "Chatter dynamics in sheet rolling". Int. J. Mech. Sci, p.p. 617-630, 1994. [۱۰]
- Guo, R. M.; Urso, A.C.; "Analysis of chatter vibration phenomena of rolling mills using finite element method", Iron and Steel Engineer, p.p. 29-39, 2001. [۱۱]
- Hu, P. H.; Ehmman K.F.; "Five octave mode chatter in rolling", Proc. Inst. Mech. Engrs., vol. 215, 2000. [۱۲]
- Roberts, W. L.; "Cold Rolling of steel", Marcel Dekker, New York, 1978. [۱]
- Yun, I.; Wilson, W. R. D.; Ehmman, K.F.; "Review of Chatter studies in cold rolling", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 38, p.p. 1499-1530, 1998. [۲]
- Gallenstein, J.H.; "Torsional chatter on a 4-h cold mill", AISE Year Book, p.p. 60-65, 1981. [۳]
- Nieb, J.; Nicolas, V.; "Automated monitoring and control of vibration and chatter in rolling processes", Iron and Steel Engineer, p.p. 33-42, 1991. [۴]
- Misonoh, K.; "Analysis of chattering in cold rolling of steel strip", Journal of the JSTP, vol. 21, p.p. 1006-1010, 1980. [۵]
- Nessler, G.L.; Cory, J.F.; "Cause and solution of fifth octave backup roll chatter on 4-h cold mills and temper mills", Iron and Steel Engineer, p.p. 482-486, 1989. [۶]



Kimura, Y.; Sodani, Y.; "Analysis of Chatter in Tandem Cold Rolling Mills, ISIJ International", vol. 33, p.p.77-84, 2003.

[۱۴]

[۱۳] تویسرکانی، ح؛ شکل دادن فلزات، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ۱۳۸۲.

## ۸- زیر نویس ها

---

- <sup>1</sup> Implicit
- <sup>2</sup> Explicit
- <sup>3</sup> ABAQUS
- <sup>4</sup> Screw down
- <sup>5</sup> Reference Point
- <sup>6</sup> Backup Roll
- <sup>7</sup> Work roll
- <sup>8</sup> Reduction
- <sup>9</sup> Screw Down
- <sup>10</sup> Hard

