

مقایسه‌ی مدل آسیب نرم و مدل آسیب FLD در پیش‌بینی رشد آسیب در فرآیند نورد سرد پیوسته

نوشین ترابیان‌دهکردی دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان
مهرداد پورسینا استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان
محمد خطایی کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیده

مکانیک آسیب ابزاری قدرتمند جهت پیش‌بینی و بررسی عیوب مکانیکی محصولات فرآیندهای متنوع شکل‌دهی فلزات بشمار می‌آید. بطور کلی مدل‌های گوناگونی جهت پیش‌بینی نحوه‌ی رشد و توزیع آسیب در فرآیندهای مکانیکی مختلف ارائه شده است. در این پژوهش از دو مدل آسیب نرم و FLD، به عنوان دو معیار آسیب شناخته شده، به منظور پیش‌بینی چگونگی رشد آسیب و پدیده‌ی پارگی ورق در فرآیند نورد سرد پیوسته استفاده می‌شود. پارگی ورق در حین فرآیند نورد، یکی از مشکلات حائز اهمیت در نورد پیوسته‌ی ورق می‌باشد که تأثیر بسزایی در بالا رفتن هزینه و کاهش نرخ تولید دارد. از این رو، ارائه‌ی یک مدل توانمند به منظور پیش‌بینی و بررسی پارگی ورق و عوامل حاکم بر آن از اهمیت خاصی برخوردار است. تحقیق حاضر، ضمن تعیین پارامترهای مادی آسیب برای ورق فولاد مورد نظر از طریق انجام آزمایش، به ارائه‌ی یک مدل عددی مناسب و کارآمد جهت پیش‌بینی رشد آسیب در طول فرآیند نورد سرد پیوسته می‌پردازد. بدین منظور، خط نورد سرد پیوسته‌ی یک واحد نورد صنعتی به کمک کد اجزای محدود ABAQUS/Explicit و با اعمال معیار آسیب نرم و FLD شبیه‌سازی گردیده، صحت نتایج شبیه‌سازی با استفاده از اطلاعات به دست آمده از واحد نورد صنعتی تأیید می‌شود. با مقایسه‌ی نتایج عددی با مشاهدات تجربی، بهترین مدل آسیب جهت بکارگیری در فرآیند نورد سرد پیوسته انتخاب و معرفی می‌شود تا بتوان با استفاده از آن، چگونگی رشد آسیب و عوامل مؤثر بر پارگی ورق را بررسی نمود. در پایان، به عنوان نمونه‌ای از کاربرد مدل ارائه شده در بررسی علل مؤثر بر پدیده‌ی پارگی، اثر تغییرات سرعت زاویه‌ای غلتک‌ها بر رشد آسیب در ورق بررسی می‌گردد. کلمات کلیدی: نورد سرد پیوسته، مدل آسیب نرم، مدل آسیب FLD، پارگی ورق.

Comparison of the Ductile and FLD Damage Criteria in Prediction of Damage Evolution in Tandem Cold Rolling

N. Torabian Dehkordi Mechanical Engineering Department, Industrial University
of Isfahan
M. Poursina Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan
M. Khataei Mechanical Engineering Department, Industrial University
of Isfahan

Abstract

Continuum damage mechanics is a powerful tool for predicting mechanical defects in the final products of metal forming processes, including tandem cold rolling. Generally speaking, there are various criteria to predict damage evolution in different processes. In the present study, the ductile damage model and the FLD criterion, as two widely used damage models, are employed and compared in order to predict strip tearing in tandem cold rolling process. Strip tearing is one of the manufacturing issues which can considerably raise the production costs. Therefore, it is necessary to develop an effective numerical model to predict strip tearing and analyze the effective factors which are related to this phenomenon. In this work, an industrial five-stand cold rolling mill is simulated using ABAQUS/Explicit finite element code. The ductile and FLD damage criteria are implemented and utilized to predict damage evolution through the strip. The damage parameters of material are determined from experiments. By comparison of numerical results with experimental observations, the more accurate and efficient damage model is selected and introduced. Finally the effect of the variations of angular velocity of the work rolls on damage evolution is investigated by applying the introduced damage model.

Keywords: Tandem cold rolling, ductile damage model, FLD damage model, strip tearing

۱- مقدمه

فرآیند نورد یکی از مهم‌ترین روش‌های تولید فرآورده‌های فلزی بویژه فولادهاست که به دلیل نرخ و راندمان بالای تولید و همچنین دقت بالای محصولات، از جایگاه ویژه‌ای در میان فرآیندهای شکل‌دهی فلزات برخوردار می‌باشد. اگرچه نورد ورق هم به صورت تک قفسه و هم به صورت پیوسته امکان‌پذیر است، امروزه به دلیل تقاضای روزافزون برای محصولات نورد و با توجه به سرعت بالای تولید در نورد پیوسته، کانون توجه به سمت نورد پیوسته سوق پیدا کرده است.

همانند سایر فرآیندهای شکل‌دهی فلزات، محصولات نورد نیز ممکن است با برخی عیوب مکانیکی همراه باشند. جانسون و ماملیس [۱] عیوب گوناگون مشاهده شده در فرآیندهای مختلف شکل‌دهی صنعتی از جمله فرآیند نورد سرد ورق را جمع‌آوری و معرفی نمودند. بر اساس گزارش‌های صنعتی برخی از عیوب متداول مشاهده شده در محصولات نورد سرد ورق فلزات عبارتند از: اعوجاج ورق، شکاف مرکزی^۱، شکاف انتهایی^۲ و ترک خوردگی لبه‌ای^۳.

علاوه بر عیوب ذکر شده، نورد پیوسته با مشکل پارگی ورق^۴ نیز روبه‌رو می‌باشد که نه تنها موجب کاهش راندمان و نرخ تولید می‌شود، بلکه منجر به آسیب دیدگی تجهیزات خط نورد نیز می‌گردد. از این‌رو دستیابی به یک مدل عددی کارآمد جهت پیش‌بینی پارگی ورق، که محور اصلی تحقیق حاضر می‌باشد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

یکی از راهکارهای بررسی عیوب محصولات فرآیندهای شکل‌دهی فلزات استفاده از روش‌های مبتنی بر محاسبات تنش- کرنش و نیز روش مکانیک شکست می‌باشد. اگرچه بررسی منابع نشان می‌دهد که در تحقیقات گوناگون از این روش‌ها به طور گسترده‌ای استفاده شده است، اما ملاحظه می‌شود که در اغلب موارد روش‌های مذکور با محدودیت‌هایی در پیش‌بینی آغاز شکست و گسیختگی ماده در فرآیندهای مختلف روبرو بوده‌اند [۲-۴].

راهکار دیگر، بکارگیری روش‌های مبتنی بر مکانیک آسیب پیوسته^۵ می‌باشد که در طول دو دهه‌ی اخیر استفاده از آنها به طور چشمگیری گسترش یافته است. مکانیک آسیب ابزاری قدرتمند جهت پیش‌بینی شکست یا گسیختگی ماده بشمار می‌آید. آسیب عبارتست از رشد و جوانه‌زنی ریزترک‌ها و

ریزحفره‌ها در ماده‌ی تحت بارگذاری که در نهایت منجر به ایجاد ترک در ماده می‌شود. مکانیک آسیب با بکارگیری متغیرهای مکانیکی، به بررسی این پروسه‌ی تخریب می‌پردازد [۵].

علی‌رغم کاربرد وسیع مکانیک آسیب در فرآیندهای گوناگون شکل‌دهی فلزات، بررسی منابع نشان می‌دهد که تلاش محدودی جهت بکارگیری این روش در فرآیند نورد به منظور پیش‌بینی عیوب مکانیکی ایجاد شده در محصولات صورت گرفته است. گش و همکارانش [۶] از مدل آسیب کاکرافت-لاتام^۶ و مدل آسیب گرسون^۷ در قالب شبیه‌سازی اجزای محدود سه بعدی، جهت پیش‌بینی پدیده‌ی ترک خوردگی لبه‌ای در نورد تک قفسه‌ی ورق آلیاژ آلومینیوم، استفاده کردند. آنها نشان دادند که هر دو مدل آسیب تمرکز آسیب را در نزدیکی لبه‌های ورق پیش‌بینی می‌کنند که این با مشاهدات تجربی در نورد صنعتی آلیاژ آلومینیوم سازگار می‌باشد.

راجاک و ردی [۷] از مدل آسیب توسعه یافته‌ی لمتر به منظور پیش‌بینی پدیده‌ی شکاف مرکزی و شکاف انتهایی در ورق تحت نورد تک قفسه‌ای با شرایط کرنش صفحه‌ای، استفاده نمودند و با انجام یک مطالعه‌ی پارامتری، اثر متغیرهای فرآیند بر وقوع شکاف میانی و شکاف انتهایی در ورق را بررسی کردند.

علاوه بر این، مشاهده می‌شود که اگرچه تا کنون فرآیند نورد از جهات متفاوتی مورد بررسی قرار گرفته است، اما بررسی پارگی ورق در حین عملیات نورد تنها به دو پژوهش محدود می‌شود. در مورد اول فنچ و آتکین [۸] تأثیر ناهمسانگردی^۸ رفتار ماده بر پارگی ورق را بررسی کردند. در تحقیق دوم پیمنف و همکارانش [۹] با بررسی تأثیر توقف و آغاز به کار مجدد خط نورد در طول یک دوره‌ی کاری بر پارگی ورق، به ارائه‌ی راهکارهایی جهت اصلاح سیستم‌های مکانیکی خط نورد به منظور کاهش احتمال پارگی ورق در حین فرآیند پرداخته‌اند. اما در تحقیق حاضر، پارگی ورق در حین فرآیند نورد سرد پیوسته، با بهره‌گیری از مکانیک آسیب، پیش‌بینی و بررسی می‌گردد. بدین منظور خط نورد سرد پیوسته‌ی مجتمع فولاد مبارکه‌ی اصفهان با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS/Explicit شبیه‌سازی می‌شود تا با بهره‌گیری از قابلیت‌های ویژه‌ی این نرم‌افزار در شبیه‌سازی رشد آسیب، چگونگی توزیع آسیب در ورق تحت نورد پیش‌بینی شود. صحت نتایج شبیه‌سازی با استفاده از اطلاعات به دست آمده از واحد

⁶ Cockroft-Latham

⁷ Gurson

⁸ anisotropy

¹ central burst

² split-end

³ edge cracking

⁴ strip tearing

⁵ continuum damage mechanics

نورد مشاهده می‌شود. اما پدیده‌ی پارگی ورق که اغلب در قفسه‌ی چهارم و پنجم اتفاق می‌افتد سهم عمده‌ای در کاهش راندمان و نرخ تولید دارد. از این‌رو پارگی ورق در طول فرآیند از اهمیت زیادی برخوردار بوده و ارائه‌ی یک مدل عددی جهت پیش‌بینی نحوه‌ی رشد آسیب و وقوع پارگی ورق گام مؤثری در جهت بررسی عوامل مؤثر بر این پدیده به شمار می‌آید.

۳- مدل آسیب

در طول فرآیند نورد، قطعه کار به طور هم‌زمان تحت کارسختی و فرآیند آسیب قرار دارد. تقابل این دو ساز و کار، امکان‌پذیر بودن یا نبودن و همچنین عیوب محصول نهایی را تعیین می‌کند. بررسی مراجع نشان می‌دهد که مدل‌های مختلفی جهت پیش‌بینی رشد آسیب در فرآیندهای شکل‌دهی قابل بکارگیری می‌باشند. در این بخش مبانی مدل آسیب نرم و مدل آسیب FLD، به عنوان دو مورد از پرکاربردترین معیارهای آسیب، به طور مختصر تشریح می‌گردد.

۳-۱- مدل آسیب نرم

معیار آسیب نرم، معیاری جهت پیش‌بینی آسیب ناشی از جوانه‌زنی، رشد و تجمع حفره‌ها در فلزات نرم می‌باشد. در این مدل کرنش پلاستیک معادل در هنگام شکست، $\bar{\epsilon}_f$ ، طبق رابطه‌ی (۱) تابعی از نسبت تنش سه محوره، η ، فرض می‌شود [۱۱]:

$$\bar{\epsilon}_f = d_1 \exp(-c\eta) + d_2 \exp(c\eta) \quad (1)$$

که در این رابطه d_1 ، d_2 و c پارامترهای آسیب مربوط به ماده هستند که از طریق انجام آزمایش به دست می‌آیند. شایان ذکر است که نسبت تنش سه محوره از تقسیم تنش هیدروستاتیک، $\sigma_H = \frac{\sigma_{kk}}{3}$ ، بر تنش معادل میز، $\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma_{ij}^D \sigma_{ij}^D}$ ، به دست می‌آید.

طبق این مدل، رشد آسیب زمانی آغاز می‌شود که رابطه‌ی $D = \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{d\epsilon_{eq}}{\bar{\epsilon}_f(\eta)} = 1$ برقرار باشد [۱۱]. در این رابطه، D متغیر آسیب می‌باشد که در هر گام در طول حل، طبق رابطه‌ی زیر با کرنش پلاستیک معادل (ϵ_{eq}) به طور یکنواخت افزایش می‌یابد [۱۱]:

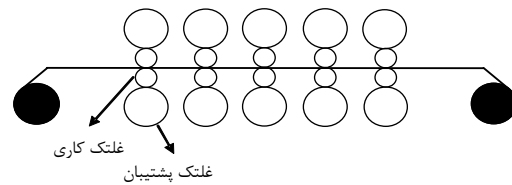
$$\Delta D = \frac{\Delta \epsilon_{eq}}{\bar{\epsilon}_f(\eta)} \geq 0 \quad (2)$$

بدین ترتیب بکارگیری معیار آسیب نرم مستلزم تعیین

نورد صنعتی تأیید می‌گردد. شایان ذکر است که در این تحقیق به منظور شبیه‌سازی رشد آسیب در طول فرآیند از دو مدل آسیب نرم و مدل آسیب FLD استفاده می‌شود تا با مقایسه‌ی چگونگی پیش‌بینی هر یک از این مدل‌ها، بهترین مدل جهت شبیه‌سازی رشد آسیب و پیش‌بینی پارگی ورق در فرآیند نورد سرد پیوسته انتخاب و معرفی گردد.

۲- خط نورد سرد پیوسته‌ی صنعتی

طرحواره خط نورد صنعتی مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است هر قفسه‌ی نورد از یک جفت غلتک کاری و یک جفت غلتک پشتیبان تشکیل شده است. فاصله (گپ) میان غلتک‌های بالایی و پایینی در هر قفسه قابل تنظیم می‌باشد. فاصله‌ی بین هر دو قفسه‌ی مجاور برابر با ۴ m است.



شکل ۱- طرحواره خط نورد صنعتی

مشخصات مکانیکی خط نورد نیز در جدول ۱ ارائه گردیده است.

جدول ۱- مشخصات مکانیکی خط نورد صنعتی [۱۰]

۵۱۰-۵۸۵	قطر غلتک‌های کاری (mm)
۳۰۰۰	بیشینه نیروی نورد (ton)
۱.۵-۳.۵	ضخامت اولیه‌ی ورق (mm)
۰.۱۸-۳	ضخامت نهایی ورق (mm)

بعلاوه، تعداد موتورها و توان اسمی مورد نیاز آنها و همچنین سرعت زاویه‌ای غلتک‌ها در هر یک از قفسه‌های نورد در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- توان و سرعت زاویه‌ای غلتک‌های هر قفسه [۱۰]

شماره‌ی قفسه	توان (kW)	سرعت زاویه‌ای (rpm)
۱	۲ × ۱۹۵۰	۲۶۰-۷۱۵
۲	۲ × ۲۴۰۰	۲۵۵-۶۵۰
۳	۲ × ۲۴۰۰	۲۵۵-۶۵۰
۴	۲ × ۲۴۰۰	۲۵۵-۶۵۰
۵	۳ × ۱۹۵۰	۲۶۰-۷۱۵

بر اساس گزارش‌های صنعتی، عیوبی نظیر ترک خوردگی لبه‌ای، شکاف انتهایی و عیوب سطحی در محصول نهایی خط

۴-۱- تعیین پارامترهای مادی آسیب نرم

در این پژوهش برای تعیین پارامترهای آسیب نرم فولاد St14، مطابق با روش بکار گرفته شده در مرجع [۱۴] از آزمایش کشش بر روی نمونه‌های شیاردار^۳ استفاده می‌شود. به منظور تعیین اثر تنش سه محوره بر کرنش شکست ماده، شیارهایی با شعاع متفاوت در مقطع میانی نمونه‌ها ایجاد می‌گردد. این شیارها باعث ایجاد تمرکز تنش در قسمت مرکزی نمونه شده و شعاع متفاوت این شیارها در نمونه‌های مختلف باعث ایجاد تنش‌های سه محوره‌ی متفاوت در لحظه‌ی شکست نمونه‌ها می‌شود [۱۴]. شیارهای میانی در نمونه‌ها به گونه‌ای ایجاد می‌شود که ضخامت قسمت مرکزی در تمامی نمونه‌ها یکسان و فقط شعاع شیار در آن‌ها متفاوت باشد. برای تعیین دقیق پارامترهای آسیب، سه نمونه با سه شعاع شیار ۶، ۴ و ۱۲ میلی‌متر طراحی گردیده و به منظور کاهش اثر خطاهای ممکن، برای هر شعاع دو نمونه ساخته و آزمایش می‌شود. شکل ۲ نمونه‌ی طراحی شده با شعاع شیار ۱۲ میلی‌متر را نشان می‌دهد. برای محاسبه‌ی تنش سه محوره در مرکز نمونه‌ها از رابطه‌ی اصلاح شده‌ی بریجمن^۴ که توسط بای و همکارانش [۱۴] ارائه شد استفاده می‌گردد:

$$\eta = \frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}} = \frac{\sqrt{3}}{3} \left[1 + 2 \ln \left(1 + \frac{t}{4R} \right) \right] \quad (4)$$

در این رابطه t ضخامت اولیه‌ی نمونه‌ی آزمایش شده و R شعاع شیار ایجاد شده در نمونه می‌باشد. همانگونه که از رابطه‌ی (۴) مشخص است تنش سه محوره در مرکز نمونه با تغییر شعاع شیار تغییر می‌کند. کرنش ایجاد شده در مرکز نمونه در لحظه‌ی شکست از رابطه‌ی (۵) قابل دستیابی است [۱۴]:

$$\bar{\epsilon}_f = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left(\frac{t}{t_f} \right) \quad (5)$$

که در این رابطه t_f ضخامت نهایی نمونه در لحظه‌ی شکست می‌باشد. بنابراین با انجام آزمایش کشش بر روی چند نمونه با شعاع شیار متفاوت تابعیت کرنش شکست از تنش سه محوره برای ماده‌ی مورد نظر بدست می‌آید.

نمونه‌ها توسط دستگاه کشش و با سرعت ثابت ۵ میلی‌متر بر دقیقه و تا لحظه‌ی شکست تحت کشش قرار می‌گیرند. پس از شکست نمونه‌ها، ضخامت آن‌ها اندازه‌گیری شده و پارامترهای آسیب فولاد St14 مشخص می‌گردند. جدول ۴ نتایج آزمایش‌های انجام شده را نشان می‌دهد.

پارامترهای مادی d_1, d_2 و c می‌باشد. در این تحقیق پارامترهای مذکور از طریق انجام آزمایش تعیین می‌گردد.

۳-۲- مدل آسیب FLD

نمودار حد شکل دهی^۱، که به اختصار FLD گفته می‌شود، توسط کیلر (۱۹۶۴) و گودوین (۱۹۶۸) به منظور تعیین میزان تغییر شکلی که یک ماده می‌تواند تا قبل از شروع ناپایداری گلوبی شدن^۲ تحمل کند، معرفی شد. بیشینه کرنشی که ورق ماده می‌تواند قبل از آغاز پدیده‌ی گلوبی شدن تحمل کند، کرنش حد شکل دهی گفته می‌شود. در واقع FLD، ترسیمه‌ای از کرنش‌های حد شکل دهی در فضای کرنش‌های اصلی لگاریتمی در صفحه‌ی می‌باشد. به مقادیر کمینه و بیشینه کرنش‌های حد شکل‌دهی اصلی در صفحه به ترتیب کرنش حدی فرعی، ϵ_{minor} و کرنش حدی اصلی، ϵ_{major} گفته می‌شود.

بکارگیری معیار آسیب FLD در نرم‌افزار ABAQUS مستلزم تعریف نمودار حد شکل‌دهی ماده برای نرم‌افزار می‌باشد و این کار از طریق ارائه‌ی کرنش حدی اصلی جاری (ϵ_{major}) در آغاز آسیب به صورت تابع جدولی از کرنش فرعی (ϵ_{minor})، یعنی (ϵ_{minor}^{FLD}) انجام می‌شود.

طبق معیار آسیب FLD، رشد آسیب زمانی اتفاق می‌افتد که پارامتر آسیب ω_{FLD} ، برابر با یک باشد ($\omega_{FLD} = 1$) [۱۲]. متغیر ω_{FLD} تابع وضعیت جاری تغییر شکل بوده و به صورت نسبت کرنش اصلی (ϵ_{major}) به کرنش حدی اصلی محاسبه شده از منحنی حد شکل‌دهی بازای ϵ_{minor} جاری تعریف می‌شود [۱۲]، یعنی:

$$\omega_{FLD} = \frac{\epsilon_{major}}{\epsilon_{major}^{FLD}(\epsilon_{minor})} \quad (3)$$

در این تحقیق نمودار حد شکل‌دهی برای ماده‌ی مورد نظر از طریق انجام آزمایش تعیین می‌گردد.

۴- مشخصات ماده

ورق تحت نورد از جنس فولاد St14 (DIN 1623) می‌باشد که مشخصات مکانیکی آن از مرجع [۱۳] استخراج و در جدول ۳ ارائه گردیده است. در ادامه، روند تعیین پارامترهای آسیب ماده از طریق انجام آزمایش ارائه می‌گردد.

جدول ۳- مشخصات مکانیکی فولاد St14 [۱۳]

۱۸۰	مدول یانگ، E (GPa)
۱۵۹	تنش تسلیم اولیه، σ_{y0} (MPa)
۲۸۳	تنش نهایی، σ_u (MPa)
$\sigma = 630 \cdot \epsilon^{0.36}$	معادله‌ی ساختاری، (MPa)

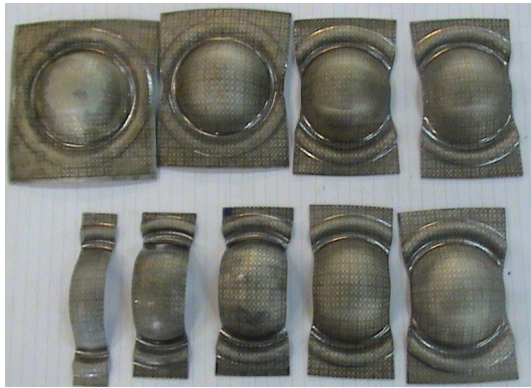
³ notched tensile specimens

⁴ Bridgman

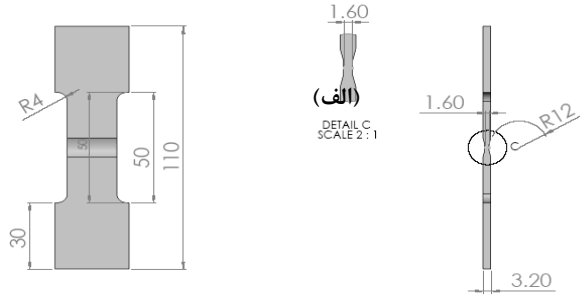
¹ Forming Limit Diagram

² necking instability

حد شکل‌دهی می‌باشد. با توجه به اینکه هدف، تعیین نمودار حد شکل‌دهی ورق فولاد St14 قبل از نورد سرد تاندم می‌باشد، نمونه‌گیری از ورق‌های آماده شده بعد از نورد گرم و اسیدشویی انجام می‌گیرد. آزمایش اریکسن به کمک دستگاه تست اریکسن و طبق استاندارد DIN 50101 انجام می‌شود. شکل ۳ برخی از نمونه‌های آزمایش شده را نشان می‌دهد.



شکل ۳- نمونه‌های آزمایش شده



(ب)

شکل ۲- نمونه‌ی طراحی شده با شعاع شیار ۱۲ میلی‌متر:
(الف) هندسه‌ی نمونه (ابعاد بر حسب mm) (ب) قطعه‌ی ساخته شده

جدول ۴- نتایج حاصل از آزمایش کشش نمونه‌های شیاردار

شعاع شیار (mm)	ضخامت اولیه (mm)	ضخامت نهایی (mm)	تنش سه محوره	کرنش شکست
۴	۱.۶	۰.۹۵	۰.۶۸۷۴	۰.۶۱
	۱.۶	۰.۹۱	۰.۶۸۷۴	۰.۶۵
۶	۱.۶	۰.۷۲	۰.۶۵۱۸	۰.۹۱
	۱.۶	۰.۶۸	۰.۶۵۱۸	۰.۹۸
۱۲	۱.۶	۰.۵۳	۰.۶۱۵۲	۱.۲۷
	۱.۶	۰.۵۲	۰.۶۱۵۲	۱.۲۹

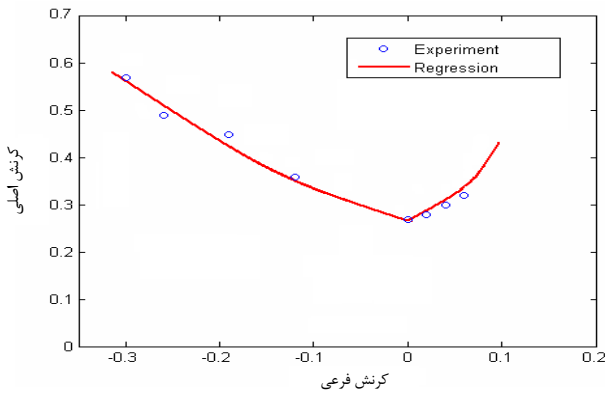
بدین ترتیب با مشخص شدن سه مقدار کرنش شکست برای تنش‌های سه محوره‌ی متفاوت، ضرایب ثابت معادله‌ی (۱) به دست می‌آیند. جدول ۵ مقادیر ضرایب محاسبه شده برای فولاد St14 را نشان می‌دهد.

جدول ۵- پارامترهای مادی آسیب نرم برای فولاد St14

پارامتر آسیب d_1	پارامتر آسیب d_2	پارامتر آسیب c
۱۳.۳	-۶.۹۸۱	۰.۳۷۹۷

۴-۲- تعیین دیاگرام حد شکل‌دهی

روش بکار گرفته شده در تحقیق حاضر به منظور تعیین نمودار حد شکل‌دهی برای فولاد St14، شامل تهیه‌ی نمونه‌های مناسب از ورق مورد نظر در ابعاد گوناگون و شبکه‌بندی سطح نمونه‌ها و سپس انجام آزمایش کشش اریکسن و اندازه‌گیری کرنش‌های اصلی و فرعی ایجاد شده و در نهایت ترسیم نمودار



شکل ۴- نمودار حد شکل‌دهی برای ورق فولاد St14

با مشخص شدن کرنش‌های اصلی و فرعی برای هر یک از نمونه‌های آزمایش، دیاگرام حد شکل‌دهی برای ورق فولاد St14 مطابق با شکل ۴ به دست می‌آید.

۵- شبیه‌سازی اجزای محدود خط نورد سرد پیوسته‌ی پنج قفسه‌ای

۵-۱- مدل اجزای محدود

به منظور بررسی فرآیند نورد سرد پیوسته، خط نورد پنج قفسه‌ای صنعتی با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS/Explicit به صورت سه بعدی شبیه‌سازی می‌گردد. به دلیل تقارن، تنها یک چهارم از مدل شبیه‌سازی می‌شود. از تغییر شکل غلتک‌های کاری صرف نظر شده و در نتیجه غلتک‌ها

آسیب نرم می‌باشد. اعتبارسنجی مدل اجزای محدود ارائه شده به همراه معیار آسیب نرم، از طریق شبیه‌سازی برنامه‌های نورد صنعتی مختلف و مقایسه‌ی نتایج عددی با مشاهدات تجربی صورت می‌گیرد. بدین منظور چهار برنامه‌ی نورد صنعتی مختلف انتخاب گردیده و با استفاده از مدل اجزای محدود ارائه شده شبیه‌سازی می‌شوند. طبق گزارش‌های صنعتی، تحت برنامه‌ی نورد اول و برنامه‌ی نورد دوم پارگی ورق در طول فرآیند اتفاق نمی‌افتد در حالی که برنامه‌های نورد سوم و چهارم با وقوع پارگی ورق در قفسه‌ی پنجم همراه هستند [۱۰]. نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود بازای این چهار برنامه‌ی نورد به همراه مشخصات فنی هر یک از این برنامه‌ها در جدول ۶ ارائه شده است.

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، ایجاد ترک و گسیختگی ماده طبق پیش‌بینی معیار آسیب نرم زمانی اتفاق می‌افتد که پارامتر آسیب برابر با یک باشد ($D = 1$). بنابراین از جدول ۶ مشخص است که طبق پیش‌بینی‌های عددی، برای برنامه‌ی نورد اول و دوم، همان‌طور که انتظار می‌رفت، پارامتر آسیب بیشینه کم‌تر از حد بحرانی بوده ($D < 1$) و در نتیجه در این دو برنامه‌ی نورد پارگی ورق اتفاق نمی‌افتد. در برنامه‌ی نورد سوم و چهارم پارامتر آسیب بیشینه در قفسه‌ی پنجم به مقدار بحرانی رسیده ($D = 1$) و در نتیجه پارگی اتفاق افتاده است. به بیان دیگر، پیش‌بینی‌های عددی با مشاهدات تجربی سازگار هستند، چرا که شبیه‌سازی‌های عددی وقوع پارگی را در مواردی پیش‌بینی می‌کنند که در عمل با پدیده‌ی پارگی همراه هستند.

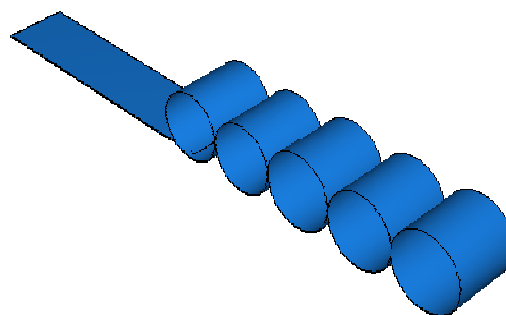
جدول ۶- مشخصات فنی برنامه‌های نورد صنعتی منتخب

برنامه‌ی نورد منتخب	درصد کاهش ضخامت کل (%)	ضخامت اولیه‌ی ورق (mm)	بیشینه پارامتر آسیب
برنامه‌ی اول	۷۶	۲٫۵	۰٫۷
برنامه‌ی دوم	۵۰	۴	۰٫۶
برنامه‌ی سوم	۷۷	۲	۱
برنامه‌ی چهارم	۸۲	۲	۱

به عنوان نمونه، نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود برنامه‌های نورد اول و چهارم به ترتیب در شکل ۶ و ۷ ارائه شده است. به دلیل وجود تقارن تنها نیمی از مدل در این شکل‌ها نشان داده شده است.

به صورت صلب شبیه‌سازی می‌گردند. ورق به صورت ماده‌ی الاستیک-پلاستیک همراه با کارسختی و با استفاده از خواص الاستیک-پلاستیک-آسیب توصیف شده در بخش قبل مدل می‌شود. طول ورق به گونه‌ای در نظر گرفته می‌شود که پس از عبور از غلتک قفسه‌ی آخر، ورق در بازه‌ای از زمان زیر غلتک‌های پنج قفسه قرار داشته باشد و عرض ورق برابر با ۱ m منظور می‌گردد. شکل ۵ نمایی از هندسه‌ی مدل ایجاد شده را نشان می‌دهد. به منظور تحلیل مسأله از المان‌های سه بعدی هشت‌گه‌ای با انتگرال کاهش یافته (C3D8R) استفاده می‌شود. پس از بررسی عدم وابستگی نتایج به مش‌بندی، تعداد المان‌ها برابر با ۳۰۰۰۰ منظور گردیده و در تمامی شبیه‌سازی‌ها ثابت باقی می‌ماند.

برای مدل‌سازی شرایط تماس از ترکیب قانون کولمب^۱ و تنش برشی حدی ثابت^۲ استفاده می‌گردد. مقادیر ضریب اصطکاک در هر یک از قفسه‌های نورد از گزارش‌های صنعتی موجود استخراج می‌شود. طبق این گزارش‌ها غلتک‌های کاری قفسه‌ی پنجم به منظور انجام اتونزی^۳، از سایر غلتک‌ها زبرتر بوده، ضریب اصطکاک در این قفسه بیشترین مقدار را در مقایسه با ضرایب اصطکاک سایر قفسه‌ها دارا می‌باشد [۱۰].



شکل ۵- نمایی از هندسه‌ی مدل اجزای محدود

همان‌طور که قبلاً بیان شد، به منظور پیش‌بینی نحوه‌ی رشد آسیب در ورق در طول فرآیند، معیار آسیب نرم و معیار آسیب FLD در شبیه‌سازی اجزای محدود اعمال می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی عددی به همراه اعتبارسنجی نتایج در ادامه ارائه می‌شود.

۵-۲- شبیه‌سازی آسیب در ورق با بکارگیری مدل آسیب نرم

نخستین مدل آسیب که در تحقیق حاضر جهت پیش‌بینی رشد آسیب در طول فرآیند نورد بکار گرفته می‌شود، معیار

¹ Coulomb's law

² constant-limit shear stress

³ ironing



شکل ۶- توزیع آسیب در ورق تحت طبق پیش‌بینی معیار آسیب نرم برای برنامه‌ی نورد اول (نما از زیر)



شکل ۷- توزیع آسیب در ورق تحت طبق پیش‌بینی معیار آسیب نرم برای برنامه‌ی نورد چهارم (نما از زیر)

مشاهدات تجربی که بیانگر این مطلب است که پارگی ورق عمدتاً در قفسه‌ی چهارم و پنجم اتفاق می‌افتد، سازگار می‌باشد. بعلاوه، همان‌طور که مشاهده می‌شود ناحیه‌ی تمرکز آسیب، یعنی محل بالقوه‌ی آغاز رشد ترک، دربر گیرنده‌ی لبه‌های ورق نیز بوده و مسیر رشد آسیب به صورت نواری در امتداد عرض ورق پیش‌بینی می‌شود که این با مشاهدات تجربی مبنی بر پدیده‌ی ترک‌خوردگی لبه‌ای و وقوع پارگی در امتداد عرض ورق (عمود بر جهت نورد) تطابق دارد. بنابراین با توجه به الگوی رشد آسیب مشاهده می‌شود مدل آسیب نرم جهت پیش‌بینی نحوه‌ی رشد و توزیع آسیب و وقوع پارگی ورق در فرآیند نورد سرد پیوسته کارآمد می‌باشد.

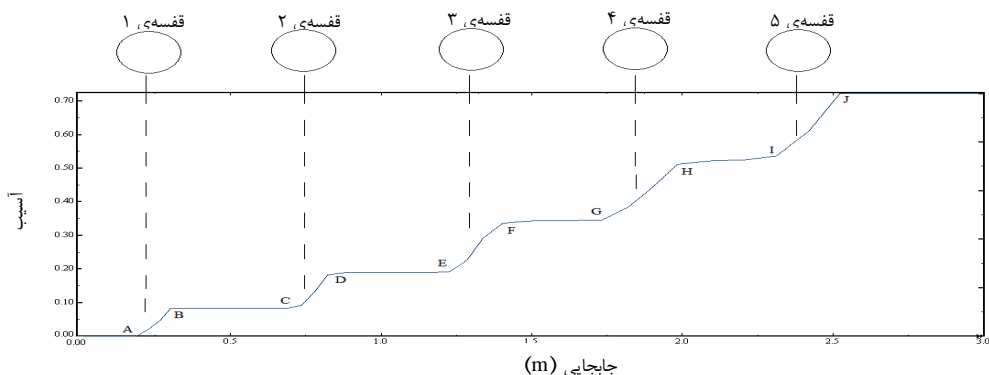
به منظور بررسی بیشتر فرآیند آسیب، الگوی رشد آسیب در طول فرآیند نورد برای برنامه‌ی نورد اول در شکل ۸ نشان داده شده است.

مشخصات کامل برنامه‌ی نورد اول، شامل درصد کاهش ضخامت، ضریب اصطکاک و سرعت زاویه‌ای غلتک‌ها در هر کدام از قفسه‌های نورد به‌مراه نتایج شبیه‌سازی عددی در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۷- مشخصات برنامه‌ی نورد اول

شماره‌ی قفسه	۱	۲	۳	۴	۵
درصد کاهش ضخامت (%)	۲۷	۲۸	۳۳	۲۴	۱۰
سرعت زاویه‌ای (rad/sec)	۱۵	۲۱	۲۹	۳۹	۴۲
ضریب اصطکاک	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۸
بیشینه پارامتر آسیب	۰/۰۸	۰/۱۸	۰/۳۶	۰/۵۶	۰/۷۰

همان‌طور که از شکل ۶ و ۷ مشخص است پارامتر آسیب با عبور ورق از قفسه‌های نورد به تدریج افزایش می‌یابد تا اینکه در قفسه‌ی پنجم به بیشترین مقدار خود می‌رسد و این با



شکل ۸- الگوی رشد آسیب در طول فرآیند نورد پیوسته

شبه‌سازی اجزای محدود از المان‌های پوسته‌ی پیوسته^۲ استفاده می‌شود. سایر مراحل شبه‌سازی و اعتبارسنجی نتایج دقیقاً مشابه با قبل (بخش ۵-۱) می‌باشد. شکل ۹ چگونگی توزیع آسیب در ورق در برنامه‌ی نورد اول (با مشخصات مذکور در جدول ۷) طبق پیش‌بینی مدل آسیب FLD را نشان می‌دهد.

همان‌طور که از این شکل مشخص است، رشد آسیب در طول فرآیند عمدتاً در زیر غلتک‌های کاری هر قفسه اتفاق می‌افتد و آسیب بین قفسه‌های نورد تقریباً ثابت باقی می‌ماند. بنابراین نتیجه‌ی مهمی که در این بخش استخراج می‌شود اینست که عامل اصلی رشد آسیب در فرآیند نورد پیوسته، کرنش‌های پلاستیک می‌باشند و کشش بین قفسه‌های تأثیر محسوسی بر رشد آسیب در طول فرآیند ندارد. در ادامه‌ی فرآیند اعتبارسنجی نتایج شبه‌سازی اجزای محدود، مقادیر عددی و تجربی نیروی نورد تحت برنامه‌ی نورد اول در جدول ۸ با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

در این شکل، نقاط A, C, E, G و I به ترتیب نمایانگر ورودی قفسه‌های اول، دوم، سوم، چهارم و پنجم هستند و نقاط B, D, F, H و J به ترتیب خروجی قفسه‌های مذکور را نشان می‌دهند.

همان‌طور که از این نمودار مشخص است، رشد آسیب در طول فرآیند عمدتاً در زیر غلتک‌های کاری هر قفسه اتفاق می‌افتد و آسیب بین قفسه‌های نورد تقریباً ثابت باقی می‌ماند. بنابراین نتیجه‌ی مهمی که در این بخش استخراج می‌شود اینست که عامل اصلی رشد آسیب در فرآیند نورد پیوسته، کرنش‌های پلاستیک می‌باشند و کشش بین قفسه‌های تأثیر محسوسی بر رشد آسیب در طول فرآیند ندارد.

در ادامه‌ی فرآیند اعتبارسنجی نتایج شبه‌سازی اجزای محدود، مقادیر عددی و تجربی نیروی نورد تحت برنامه‌ی نورد اول در جدول ۸ با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

جدول ۸- مقایسه‌ی مقادیر تجربی و عددی نیروی نورد

شماره‌ی قفسه	۱	۲	۳	۴	۵
نیروی عددی (kN)	۷۸۰۰	۱۰۴۹۰	۶۰۰۰	۶۴۶۴	۶۵۰۰
نیروی تجربی (kN)	۸۳۲۶	۹۹۸۷	۵۶۶۰	۶۲۰۰	۷۳۵۷
درصد خطا (%)	۶٫۳	۵٫۰	۶٫۰	۴٫۲	۱۱٫۶

البته بررسی بیشتر معیار حد شکل‌دهی و ویژگی‌های نمودار حد شکل‌دهی مبتنی بر کرنش^۳، که در تحقیق حاضر بکار گرفته شد، نشان می‌دهد که ارائه‌ی چنین پیش‌بینی از رشد آسیب در طول فرآیند نورد توسط این مدل آسیب چندان دور از انتظار نمی‌باشد. چون اگرچه نمودار حد شکل‌دهی کرنشی جزء خواص ماده بشمار می‌آید، این نمودار بشدت وابسته به مسیر کرنش^۴ بوده [۱۵] و این نقص باعث می‌شود که استفاده از معیار حد شکل‌دهی مبتنی بر کرنش در فرآیندهای شکل‌دهی پیچیده یا فرآیندهای شکل‌دهی چند مرحله‌ای^۵، که در آنها مسیر کرنش از مرحله‌ای به مرحله‌ی دیگر متفاوت می‌باشد، منجر به پیش‌بینی نادرستی از قابلیت شکل‌پذیری ورق فلز گردد [۱۵]. علاوه بر این، نمودار حد شکل‌دهی و به طور کلی قابلیت شکل‌پذیری ورق فلز به طور قابل ملاحظه‌ای به کارسختی و ضخامت ورق وابسته است [۱۶ و ۱۷]. در فرآیند نورد سرد پیوسته، بر خلاف فرآیندهایی نظیر کشش عمیق که از مدل FLD در آنها به طور گسترده استفاده شده است، کارسختی ورق طی چند مرحله و به اندازه‌ی قابل توجهی افزایش می‌یابد، بعلاوه ضخامت ورق نیز در طول فرآیند متغیر است.

همان‌طور که مشخص است در قفسه‌ی اول تا چهارم تطابق قابل قبولی میان نتایج عددی و مقادیر تجربی نیروی نورد وجود دارد و حداکثر خطا مربوط به قفسه‌ی پنجم و برابر با ۱۱٫۶٪ می‌باشد. از آنجایی که قفسه‌ی پنجم علاوه بر کاهش ضخامت، عمل اتوزنی را نیز بر عهده دارد، مقدار نیروی تجربی ثبت شده در خط نورد صنعتی در واقع نشان دهنده‌ی مجموع نیروی نورد و نیروی اتوزنی بوده و به همین دلیل بزرگتر از نیروی نورد خالص پیش‌بینی شده می‌باشد.

۵-۳- شبه‌سازی آسیب در ورق تحت نورد با بکارگیری معیار آسیب FLD

پس از معیار آسیب نرم، مدل آسیب FLD دومین معیار آسیب می‌باشد که در این تحقیق جهت پیش‌بینی نحوه‌ی پارگی ورق بکار گرفته می‌شود. همان‌طور که قبلاً بیان شد بکارگیری این مدل آسیب مستلزم تعیین نمودار حد شکل‌دهی برای ماده‌ی مورد نظر می‌باشد که در این تحقیق نمودار حد شکل‌دهی برای ورق فولاد St14 از طریق انجام آزمایش تعیین گردید. نکته‌ی حائز اهمیت در این بخش این است که معیار آسیب FLD در نرم افزار ABAQUS برای المان‌های حجمی^۱ قابل استفاده نمی‌باشد [۱۲]. بنابراین به منظور بکارگیری این مدل آسیب، در

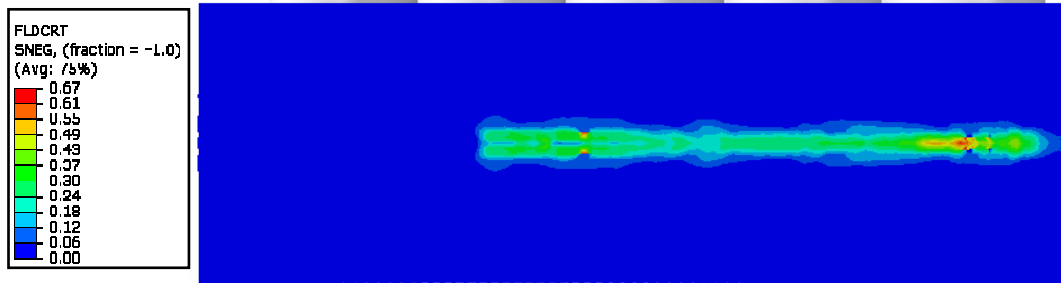
^۲ continuum shell

^۳ strain-based forming limit diagram

^۴ strain path

^۵ multi-stage forming processes

^۱ solid



شکل ۹- توزیع آسیب در ورق طبق پیش‌بینی معیار آسیب FLD

تغییرات سرعت زاویه‌ای غلتک‌ها بر رشد آسیب در ورق، بررسی می‌گردد. بدین منظور شبیه‌سازی اجزای محدود با توجه به اطلاعات بدست آمده از واحد نورد صنعتی بازای تغییرات سرعت زاویه‌ای غلتک‌ها با شیب ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ انجام می‌گیرد [۱۰]. در صورت مشخص بودن سرعت زاویه‌ای غلتک اول سرعت زاویه‌ای سایر غلتک‌ها، با توجه به قانون ثابت بودن حجم جابجا شده‌ی ورق در واحد زمان، از رابطه‌ی (۶) قابل محاسبه می‌باشد [۱۸]. در این رابطه، ω سرعت زاویه‌ای، R شعاع غلتک و h ضخامت ورق را نشان می‌دهد. زیرنویس i و o به ترتیب مربوط به ورودی و خروجی هر قفسه می‌باشند.

$$h_i \omega_i R_i = h_o \omega_o R_o \quad (6)$$

نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود در شکل ۱۰ ارائه شده است. این شکل روند تغییرات پارامتر آسیب در هر قفسه با افزایش درصد تغییرات سرعت را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این نمودار مشخص است، تغییرات سرعت زاویه‌ای اثر محسوسی بر رشد آسیب در ورق ندارد و با افزایش درصد تغییرات سرعت، پارامتر آسیب در هر قفسه تقریباً ثابت باقی می‌ماند. بنابراین نتیجه می‌شود که تغییرات سرعت زاویه‌ای غلتک‌ها در طول فرآیند نورد اثری بر رشد آسیب در ورق ندارد و بروز پارگی در ورق در هنگام ایجاد تغییر در سرعت، می‌تواند ناشی از وجود اشکال در سیستم‌های کنترلی خط نورد باشد.

از نقطه نظر مکانیکی، تغییر در سرعت زاویه‌ای غلتک‌ها منجر به تغییر در کشش بین قفسه‌ای می‌شود، به نحوی که در خط نورد صنعتی به منظور تنظیم نیروی کشش بین قفسه‌ای و تغییر آن از ایجاد تغییر در سرعت زاویه‌ای غلتک‌های قفسه‌های مجاور استفاده می‌شود [۱۰]. بنابراین نتیجه‌ی حاصل در این بخش نیز مؤید عدم تاثیرگذاری کشش بین قفسه‌ای بر رشد آسیب در طول فرآیند می‌باشد.

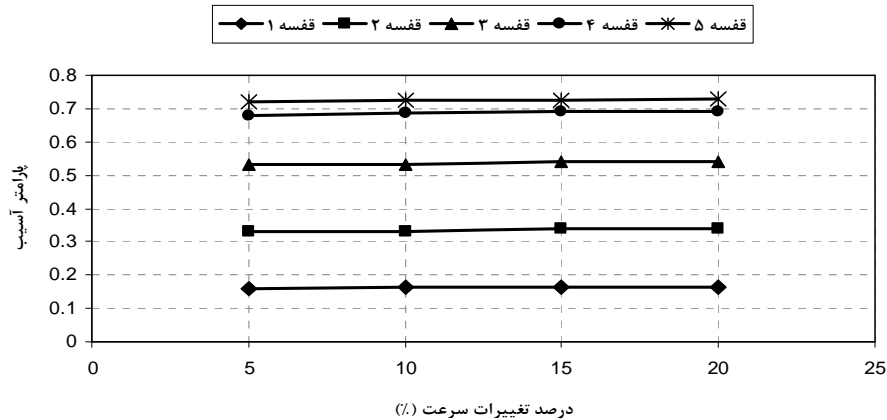
بنابراین قابلیت شکل‌پذیری ورق در طول فرآیند مرتباً در حال تغییر بوده، در هر مرحله‌ی از نورد پیوسته با مرحله‌ی دیگر متفاوت است. لذا سنجش قابلیت شکل‌پذیری ورق که اساس مدل آسیب FLD می‌باشد، با استفاده از یک نمودار حد شکل-دهی واحد، که برای ورق قبل از ورود به فرآیند نورد تعیین می‌گردد، منطقی به نظر نمی‌رسد

لذا نتایج شبیه‌سازی عددی انجام گرفته نیز مؤید این امر بوده و نشان می‌دهد بکارگیری معیار حد شکل‌دهی کرنشی جهت پیش‌بینی پارگی ورق در نورد سرد پیوسته، به عنوان یک فرآیند چند مرحله‌ای با ماهیت غیر خطی امکان‌پذیر نبوده و لازم است از معیار حد شکل‌دهی مبتنی بر تنش که به اختصار معیار FLSD گفته می‌شود استفاده گردد. زیرا نمودار حد شکل-دهی مبتنی بر تنش مستقل از مسیر کرنش می‌باشد و سنجش قابلیت شکل‌پذیری ورق در هر مرحله از فرآیند تنها با استفاده از یک نمودار FLSD واحد امکان‌پذیر است.

۶- مثالی از کاربرد مدل عددی ارائه شده در بررسی عوامل موثر بر پارگی ورق

با حصول اطمینان از توانایی مدل اجزای محدود ارائه شده همراه با معیار آسیب نرم در پیش‌بینی رشد آسیب در ورق تحت فرآیند نورد سرد پیوسته، در این بخش نمونه‌ای از کاربرد این مدل در بررسی عوامل موثر بر پارگی ورق در خط نورد صنعتی ارائه می‌گردد.

طبق گزارش‌های صنعتی در طول فرآیند نورد، سرعت زاویه‌ای غلتک‌ها ممکن است به علت تغییر در برنامه‌ی نورد متغیر باشد و در واحد نورد صنعتی تغییرات ناگهانی سرعت زاویه‌ای غلتک‌ها به عنوان یکی از علل احتمالی پارگی ورق مطرح می‌شود [۱۰]. به منظور بررسی صحت این فرضیه، در این بخش اثر



شکل ۱۰- میزان رشد پارامتر آسیب در ورق بر حسب درصد تغییرات سرعت زاویه‌ای

۷- نتیجه‌گیری

گوناگون از جمله پارامترهای حاکم بر فرآیند نظیر ضریب اصطکاک و الگوی کاهش ضخامت و همچنین تأثیر عیوب موجود در کویل ورق ورودی و یا مشکلات سیستم‌های کنترلی خط نورد را بر رشد آسیب و وقوع پارگی ورق بررسی نمود. در این تحقیق، به عنوان نمونه، اثر تغییرات سرعت زاویه‌ای غلتک‌ها بر رشد آسیب در ورق بررسی گردید و مشخص شد که این عامل تأثیر محسوسی بر رشد آسیب و پارگی ورق ندارد. بررسی سایر عوامل موثر بر پارگی ورق و همچنین بکارگیری معیار حد شکل‌دهی مبتنی بر تنش (FLSD) جهت پیش‌بینی نحوه‌ی رشد آسیب در مسأله‌ی حاضر، محور تحقیقات آینده می‌باشد.

مراجع

- [1] Johnson W., Mamalis A.G., "A survey of some physical defects arising in metal forming processes", Proceeding of the 17th International MTDR Conference, Macmillan, 1977, p. 607.
- [2] Zheng M., Zhou G., "Regularization of the damage mechanics for predicting crack initiation", Metals and Materials International, vol. 7, no. 6, 2001, pp. 539-545.
- [3] Tavares L.M., King R.P., "Modeling of particle fracture by repeated impact using continuum damage mechanics", powder Technology, vol. 123, 2002, pp. 138-146.
- [4] Teixeira P., Santos A.D., Andrade Pires F.M., César de Sá J.M.A., "Finite element prediction of ductile fracture in sheet metal forming processes", Journal of Material Processing Technology, vol. 177, 2006, pp. 278-281.
- [5] Lemaitre J., "A Course on Damage Mechanics", Springer-Verlag, Germany, 1992.
- [6] Ghosh S., Li M., Gardiner D., "A computational and experimental study of cold rolling of aluminum alloys with edge cracking", Journal of

هدف از این پژوهش، ارائه‌ی یک مدل عددی مناسب جهت پیش‌بینی رشد آسیب و وقوع پارگی در ورق فولاد تحت نورد سرد پیوسته بود. یک خط نورد سرد صنعتی پنج قفسه‌ای با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS/Explicit شبیه‌سازی گردید. به منظور پیش‌بینی نحوه‌ی رشد آسیب در طول ورق، مدل آسیب نرم و مدل آسیب FLD در شبیه‌سازی اجزای محدود اعمال گردید. پارامترهای مادی آسیب نرم و همچنین نمودار حد شکل‌دهی برای ورق فولاد St14 از طریق انجام آزمایش تعیین شد. مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی‌های عددی با مشاهدات تجربی نشان داد که مدل آسیب نرم پیش‌بینی صحیحی از الگوی رشد آسیب در طول ورق در حین فرآیند ارائه می‌دهد. بعلاوه، مقایسه‌ی پیش‌بینی این مدل از وقوع پارگی در ورق با اطلاعات بدست آمده از واحد نورد صنعتی حاکی از این است که این مدل جهت پیش‌بینی محل وقوع پارگی ورق نیز کارآمد می‌باشد. یکی از نتایج حائز اهمیت به دست آمده در این پژوهش این است که رشد آسیب در طول فرآیند عمدتاً در زیر غلتک‌های کاری اتفاق می‌افتد و پارامتر آسیب در بین قفسه‌های نورد ثابت باقی می‌ماند، و در نتیجه عامل اصلی رشد آسیب در طول فرآیند، کرنش‌های پلاستیک می‌باشند و کشش بین قفسه‌ای تأثیر قابل توجهی بر رشد آسیب ندارد. از طرف دیگر، ملاحظه گردید که مدل آسیب FLD پیش‌بینی صحیحی از الگوی رشد آسیب در ورق ارائه نمی‌کند و این امر مؤید عدم کارایی نمودار حد شکل‌دهی مبتنی بر کرنش در فرآیندهای شکل‌دهی چند مرحله‌ای و با مسیرهای کرنش غیر خطی می‌باشد. بدین ترتیب با دستیابی به یک مدل عددی کارآمد و مناسب جهت پیش‌بینی رشد آسیب در ورق در طول فرآیند نورد سرد پیوسته، ضمن پیش‌بینی احتمال وقوع پارگی ورق تحت شرایط گوناگون و برنامه‌های نورد مختلف، می‌توان تأثیر عوامل

- Manufacturing Science and Engineering, vol. 126, 2004, pp. 74-82.
- [7] Abdul Rajak S., Venkata Reddy N., "Prediction of internal defects in plane strain rolling", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 159, 2005, pp. 409-417.
- [8] Muscat-Fenech C.M., Atkins A.G., "The effect of anisotropy on fracture toughness and yield strength in the tearing of ductile sheet materials", *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 36, no.12, 1994, pp. 1109-1119.
- [9] Pimenov A.F., Abramov A.N., Traino A.L., Efremov N.I., "Reduction in strip tearing during stopping and starting of a continuous cold rolling mill", *Journal of Metallurgist*, no. 4, 1987, pp. 31-32.
- [10] Isfahan Mobarakeh Steel Company internal reports- no. 48246991-1, 2009.
- [11] Hooputra H., Gese H., Dell H., Werner H., "A comprehensive failure model for crashworthiness simulation of aluminum extrusions", *International Journal of Crashworthiness*, vol. 9, no. 5, 2004, pp. 449-464.
- [12] ABAQUS User's Manual, Version 6.7.
- [13] Mashayekhi M., Torabian N., Poursina M., "Continuum damage mechanics analysis of strip tearing
- [14] Bai Y., Teng X., Wierzbicki T., "On the Application of Stress Triaxiality Formula for Plane Strain Fracture Testing", *Journal of Engineering Materials and Technology*, vol. 131, 2009, pp. 557-566.
- [15] Thomas B. Stoughton, Xinhai Zhu, "Review of theoretical models of the strain-based FLD and the relevance to the stress-based FLD", *International Journal of Plasticity*, vol. 20, 2004, pp. 1463-1484.
- [16] Slota J., Spisak, E., "Comparison of the forming-limit diagram (FLD) models for drawing quality (DQ) steel sheets", *METABK*, vol. 44, no. 4, 2005, pp. 249-253.
- [17] Banabic D., Bunge H.J., Pohlandt K., Tekkaya A.E., "Formability of Metallic Materials", Springer-Verlag, Germany, 2000.
- [18] Roberts W.L., "Cold Rolling of Steels", Marcel Dekker, New York, 1978.