فصلنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک جامدات

www.jsme.ir

فصلنامه علمی پژوهشی
مهندسی مکانیک جامدات

شبیه‌سازی فرآیند کلینچینگ ورق‌های فولادی به روش اجزای محدود و بررسی تأثیر ناهمسانگردی بر رفتار مکانیکی اتّصال

محمدرضا درّی[۱]، محسن لوح‌موسوی[۲*]، سعید صابری[۳]

* ایمیل نویسنده مسئول: loh-mousavi@iaukhsh.ac.ir

چکیده

این مقاله، به مطالعه‌ی عددی فرآیند کلینچینگ نوع تاکس روی نوعی ورق فولادی می‌پردازد و تأثیر ناهمسانگردی ماده را بر رفتار هندسی و مکانیکی اتّصال با ارزیابی پارامترهای اتّصال همچون آندرکات، ضخامت ناحیه‌ی گردن و منحنی نیروی سنبه نسبت به جابجایی آن بررسی می‌کند. روش اجزای محدود به‌کمک نرم‌افزار آباکوس به‌منظور شبیه‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی فرآیند کلینچینگ در راستای اهداف نامبرده به کار گرفته خواهد شد. این مقاله به طور اساسی به بیان مقایسه مابین نتایج آزمایشگاهی و نتایج بدست‌آمده از شبیه‌سازی پرداخته که موجب اعتباربخشی به نتایج شبیه‌سازی می‌شود. به‌منظور مطالعه‌ی تأثیر ناهمسانگردی، شبیه‌سازی سه‌بعدی فرآیند کلینچینگ به کار گرفته شده است. نتایج حاکی از افزایش نیروی سنبه - جابجایی برای اتّصال ورق ناهمسانگرد نسبت به ورق همسانگرد است. علاوه بر این، نتایج تحقیق نشان دهنده آن است که ضخامت ناحیه گردن در فرآیند کلینچینگ در اثر ناهمسانگردی ورق افزایش و به‌عکس، پارامتر هندسی آندرکات کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی

کلینچینگ، تاکس، ناهمسانگردی، اتّصال مکانیکی ورق‌های نازک، روش اجزای محدود.

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر

۲- استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر

۳- استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد

۱- مقدمه

اتّصال، دارای نقشی کلیدی در توسعه و تولید محصولات صنعتی و سازه‌های ساختمانی می‌باشد. به‌منظور دستیابی به انتخاب بهینه، استفاده‌کننده می‌بایست با توجّه به مشخّصات مورد نیاز جهت اتّصال مطابق با پارامترهایی همچون ترکیبات مواد نمونه (فولاد، آلومینیوم، آلیاژها، ارگانیک، پوشیده یا غیرپوشیده)، طرح (ضخامت، و ابعاد) و کارایی (استحکام، دوام مورد انتظار و ...) از میان روش‌های مختلف اتّصال، روش مناسب را انتخاب نماید [۱].

روش‌های سنتی ایجاد اتصال شامل پیچ، پرچ و یا عملیات جوشکاری می‌باشد. پیچ و پرچ نیازمند سوراخ‌کاری و یا سنبه زدن اولیّه‌ی ورق می‌باشد که مشکلاتی را جهت کنترل اتّصال پدید می‌آورد. همچنین جوشکاری منجر به ایجاد حرارت متمرکز بر روی ناحیه‌ای از ماده شده که ممکن است موجب تغییراتی در خواص مکانیکی ماده شود. یک روش جایگزین به منظور ایجاد اتّصال ورق‌ها تحت عنوان کلینچینگ[1] خوانده می‌شود. فناوری کلینچینگ به خودی خود یک ابداع جدید نیست. بیش از ۱۰۰ سال قبل، این تکنیک اتّصال مکانیکی به منظور اتّصال فلزات متجانس و غیرمتجانس اختراع شد. اگرچه نخستین بار، این فناوری به سال ۱۸۹۷ میلادی در کشور آلمان به ثبت رسید، ولی تا سال ۱۹۸۰ میلادی در مقیاس صنعتی مورد استفاده قرار نگرفت.

درگذشته، این فناوری جهت سازه‌های بدون حمل بار (نیرو) استفاده می‌شد ولی به دلیل انعطاف‌پذیری و ارزان بودن این فناوری، به‌تدریج اتّصال مکانیکی به کمک پرس با ایجاد تغییرشکل در ناحیه‌ای از ماده به صورت سرد، کاربرد وسیعی یافت و بدین ترتیب پتانسیل بالایی جهت استفاده در صنایع مختلف مانند مونتاژ ورق‌های فلزی در سازه‌های سبک، تجهیزات الکترونیک و لوازم خانگی یافت. در سال‌های بعد، اتّصال مکانیکی پرس خیلی سریع به سمت یک شاخه‌ی جدید از فرآیند اتّصال گسترش یافت و تحقیقات فراوانی در این حوزه انجام شد. از میان روش‌های مختلف اتّصال مکانیکی به کمک پرس، فناوری کلینچینگ به طور ویژه‌ای ترویج یافته است [۱]. فرآیند اتّصال مرحله‌ی مهمی در پروسه‌ی تولید به منظور مونتاژ دایمی بخش‌های مختلفی از ورق‌ها می‌باشد تا بتوان طرح موردنظر را ایجاد نمود. در مونتاژ، استفاده از تکنیک‌های متداول اتّصال مانند نقطه‌جوش و پرچ بسیار سخت، گران و یا غیرممکن است. لذا امروزه در صنایع مختلفی نظیر تجهیزات الکترونیکی، خودروسازی و دیگر صنایع مرتبط، فناوری کلینچینگ جایگزین حداقل ۲۰ درصد از اتّصالات به صورت نقطه‌جوش شده است و به نظر می‌رسد در آینده استفاده از این فناوری رو به گسترش باشد.

میزانور [۱]، در دانشنامه‌ی پایانی خود، به مطالعه‌ی عددی و آزمایشگاهی فرآیند کلینچینگ برای ورق‌های نازک فولادی با تمرکز بر بررسی تأثیرات پوشش‌های مختلف سطحی بر پارامترهای اصلی اتّصال کلینچ مبادرت ورزیده است. روش اجزای محدود با کمک نرم‌افزار آباکوس برای شبیه‌سازی فرآیند کلینچینگ به‌کار گرفته شده است. این پژوهش بیشتر به بیان مقایسه‌های میان نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی بدست‌آمده براساس پارامترهای اتّصال پرداخته است که موجب اعتباربخشی نتایج شبیه‌سازی می‌شود. نیروی سنبه نسبت به جابجایی آن برای شرایط مختلف سطح ورق بعنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای مشخّصه‌ی فرآیند درنظر گرفته شده است. همچنین دیگر پارامترهای اتّصال کلینچ مانند آندرکات، ضخامت ناحیه‌ی گردن و ضخامت پایه‌ی اتّصال که بیانگر کیفیّت اتّصال هستند، نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

صابری وهمکارانش [۲]، به بررسی و تحلیل جامع فرآیند

1- Clinching

کلینچینگ از نوع تاکس[1] به‌کمک تحلیل عددی و آزمایشگاهی مبادرت ورزیده‌اند. همچنین در این پژوهش تأثیر پوشش‌های مختلف سطحی فلز (الکتروگالوانیزه شده و محافظ‌های مختلف در برابر خوردگی)، بر هندسه‌ی اتّصال و همچنین استحکام مکانیکی اتّصال بررسی شده است. در این پژوهش، روش اجزای محدود به‌کمک نرم‌افزار آباکوس برای شبیه‌سازی فرآیند کلینچینگ و همچنین ارزیابی نیروی برشی و نیروی کشش عمودی جداکننده‌ی اتّصال به‌کار گرفته شده است.

اکبرزاده پایدار [۳] در دانشنامه‌ی پایانی خود، بر مبنای تحقیقات میزانور و همکارانش، به مطالعه‌ی عددی و آزمایشگاهی رفتار شکست اتّصالات کلینچ ورق‌های فلزی با روکش‌های مختلف پرداخته است. وی پدیده شکست اتّصالات کلینچ نوع تاکس با اعمال هر دو نیروی برشی و نیروی کشش عمودی جداکننده‌ی اتّصال را بررسی نموده است. در این پژوهش، روش اجزای محدود به‌کمک نرم‌افزار آباکوس به‌منظور شبیه‌سازی فرآیند کلینچینگ و آزمون‌های تعیین استحکام اتّصال به‌کار گرفته شده است. همچنین نتایج آزمایشگاهی بدست آمده با نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی عددی مقایسه و تحلیل شده است. وی همچنین به تشریح روشی جهت تعیین تنش‌های پسماند و استحکام باقیمانده‌ی اتّصال پس از انجام فرآیند پرداخته است.

وریس و لپیستو [۴] در پژوهش خود به بیان روشی ساده بر مبنای آزمایش و محاسبات ریاضی به‌منظور تبیین پارامترهای اتّصال کلینچ و دستیابی به بهترین مجموعه‌ی ابزار (سنبه و قالب) به‌گونه‌ای که بیشترین نیروی برشی در آزمون مربوطه برای جدایی اتّصال بدست آید، پرداخته‌اند. ایشان تمرکز خود را بر فرآیند کلینچینگ یک مرحله‌ای بدون برش معطوف داشته‌اند. محاسبات ایشان بیشتر بر ضخامت پایه‌ی اتّصال (ضخامت تحتانی) و همچنین ارتفاع ناحیه‌ی خمش‌یافته تحت تأثیر شکل‌گیری اتّصال برای هر مجموعه‌ی ابزار متمرکز شده است. همچنین جهت اعتبارسنجی روش به‌کار گرفته شده از روش اجزای محدود کمک گرفته شده است. به‌کمک روش به‌کارگرفته شده و روش اجزای محدود می‌توان به بهینه‌سازی پارامترهای اتّصال کلینچ مبادرت ورزید.

این مقاله، به مطالعه‌ی عددی فرآیند کلینچینگ نوع تاکس ورق فولادی می‌پردازد و بویژه تأثیر ناهمسانگردی ماده را بر رفتار هندسی و مکانیکی اتّصال با ارزیابی پارامترهای اتّصال همچون آندرکات، ضخامت ناحیه‌ی گردن و منحنی نیروی سنبه نسبت به جابجایی آن بررسی می‌کند که از این حیث نسبت به پژوهش‌های گذشته متمایز است. روش اجزای محدود به‌کمک نرم‌افزار آباکوس به‌منظور شبیه‌سازی دو-بعدی و سه‌بعدی فرآیند کلینچینگ در راستای اهداف نامبرده به کار گرفته شده است.

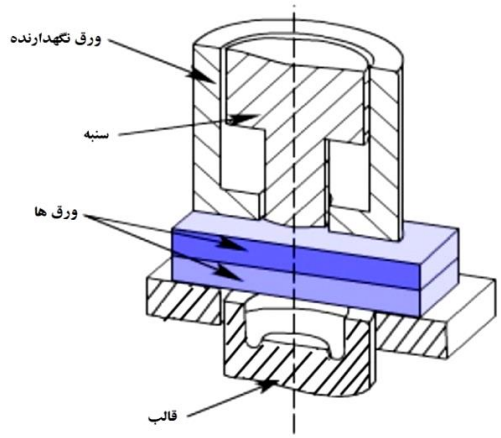
۲- فرآیند کلینچینگ

فناوری کلینچینگ، یک تکنیک اتّصال مکانیکی است که در آن در ناحیه‌ای از ورق‌های فلزی تغییرشکل روی می‌دهد که بدون نیاز به هیچ وسیله‌ی اضافه‌ی دیگری میتوان یک اتّصال متقارن محوری ایجاد نمود [۱]، [۲] و [۴]. درواقع این فرآیند، ترکیبی از فرآیندهای کشش و تغییر فرم است که موجب قفل‌شدن لایه‌های ورق فلزی درهم می‌شود. اگرچه فرآیند کلینچینگ اغلب برای اتّصال دو لایه ورق مورد استفاده قرار می‌گیرد، ولی برای اتّصال چند لایه ورق نیز قابل استفاده می‌باشد.

فرآیند کلینچینگ از نگاه هندسی شامل دو ورق با تغییر شکل موضعی به صورت سرد، با استفاده از یک سنبه، یک قالب ثابت و یک ورق نگهدارنده می‌باشد. این نوع از اتّصال مطابق شکل (۱)، با استفاده از یک سنبه‌ی کروی یا مربّعی-شکل بدست می‌آید که با حرکت عمودی سنبه به‌سمت

1- Tox

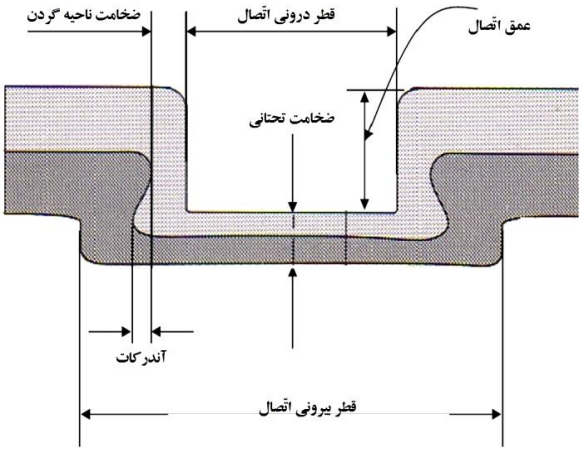
ورق‌ها به داخل قالب و همزمان لغزش صفحه‌ها در امتداد هم، تغییرشکل ناحیه‌ای از ورق‌ها به صورت یک فرورفتگی حاصل می‌شود [۱]. طرح‌واره‌ی مُدل در شکل (۱) نمایش داده شده است.



شکل (۱) هندسه‌ی مُدل تاکس در فرآیند کلینچینگ [۱]

۲-۱- پارامترهای اتّصال کلینچ

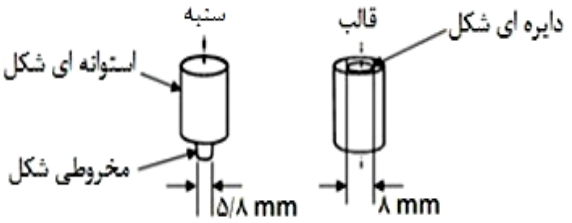
شکل (۲)، برخی از پارامترهای اساسی اتّصال کلینچ‌شده را نشان می‌دهد.



شکل (۲) پارامترهای اتّصال کلینچ [۱] و [۲]

۳- هندسه‌ی ابزار

آزمایش‌های تجربی فرآیند کلینچینگ از نوع تاکس و همچنین کلیّه‌ی آزمون‌های لازم به‌منظور تعیین خواص مکانیکی ورق فولادی H180Y توسط مؤسسه‌ی وُستالپاین لینز اتریش[1]، انجام شده است [۱]. سنبه با مقطع دایره‌ای و قطر ۵/۸ میلی‌متر، همچنین، قالب دایره‌ای شکل به قطر ۸ میلی‌متر در کارهای آزمایشگاهی مربوطه مورداستفاده قرار گرفته است. طرح‌واره‌ی هندسه‌ی ابزار به‌کارگرفته شده در شکل (۳) نمایش داده شده است.



شکل (۳) طرح‌واره‌ی هندسه‌ی ابزار در آزمایش کلینچینگ نوع تاکس

۴- مشخّصات ماده

ورق‌های استفاده‌شده برای انجام آزمایش، از نوعی فولاد تجاری موسوم به H180Y ، انتخاب شده است. خواص مکانیکی اندازه-گیری شده در آزمون کشش برای H180Y ، در راستاهای مختلف، متفاوت است. به‌عنوان مثال، استحکام تسلیم، برای این ورق در محدوده‌ی ۱۹۶ تا ۲۰۵ مگاپاسکال متغیّر است. این مسأله بیانگر غیریکنواختی در ساختار ماده می‌باشد. خواص ماده‌ی درنظرگرفته شده برای ورق‌های فولادی موردنظر در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول (۱) خواص مکانیکی ورق H180Y [۱]

ضخامت ورق (mm)	۰/۸۴۲
چگالی (kg/m^3)	۷۸۰۰
استحکام تسلیم (MPa)	۱۹۶-۲۰۵
استحکام نهایی (MPa)	۳۴۲
مدول یانگ (GPa)	۱۸۳-۱۹۷
ازدیاد طول در شکست (٪)	۳۸-۴۱
ضریب پواسون	۰/۳۳
ناهمسانگردی در راستای نورد	۲/۲
ناهمسانگردی در راستای قطری	۱/۶
ناهمسانگردی در راستای عرضی	۱/۵۴

همه‌ی فلزات کم یا بیش هنگامی که در دمای اتاق تغییرشکل می‌دهند، از خود ناهمسانگردی نشان می‌دهند، یعنی خواص مکانیکی آن‌ها در جهات مختلف متغیّر است و نوع و مقدار این ناهمسانگردی به فرآیند تولید و عملیّات حرارتی قبلی

1- Voestalpine, Linz, Austria

بستگی دارد [۶]. ورق های فولادی به علّت داشتن ریزساختارهای کریستالی و همچنین مشخّصه‌های ویژه‌ی فرآیند نورد که معمولاً برای تولید این ورق‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، خواص مکانیکی متفاوتی را در جهات مختلف از خود نشان می‌دهند [۷].

تغییرات رفتار پلاستیک ورق‌های فولادی نسبت به راستای آن‌ها توسط کمیتی به نام پارامتر لانکفورد[1] و یا ضریب ناهمسانگردی تعریف می‌گردد. میانگین ناهمسانگردی‌های پلاستیک بدست‌آمده در راستاهای مختلف در صفحه‌ی ورق، ضریب ناهمسانگردی عمودی[2] r_n نامیده می‌شود. با محاسبه‌ی r در نمونه‌های تهیّه شده در سه راستای مختلف، در صفحه‌ی ورق (۰، ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به راستای نورد) می‌توان ضریب عمودی ناهمسانگردی ورق را مطابق با رابطه‌ی (۱) بدست آورد [۷]:

$$r_n = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \qquad (۱)$$

تغییرات ضریب ناهمسانگردی عمودی نسبت به زاویه از راستای نورد مطابق رابطه‌ی (۲) محاسبه می‌شود. کمیّت تغییرات ضریب ناهمسانگردی عمودی، Δr ، در معادله‌ی زیر به عنوان ناهمسانگردی صفحه‌ای[3] نیز شناخته می‌شود [۷].

$$\Delta r = \frac{r_0 + r_{90} - 2r_{45}}{2} \qquad (۲)$$

مقادیر ضرایب ناهمسانگردی در جدول (۱) نمایش داده شده است.

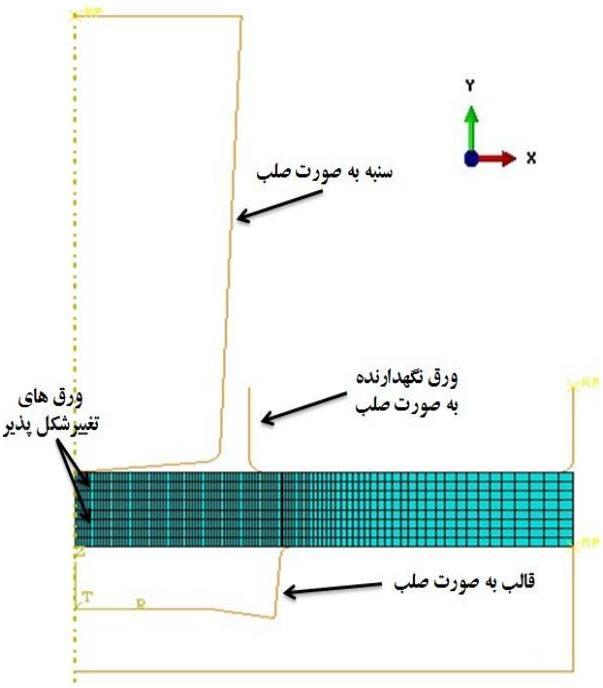
۵- شبیه‌سازی عددی

شبیه‌سازی فرآیند کلینچینگ نوع تاکس به روش اجزای محدود به‌کمک نرم‌افزار آباکوس ۶,۱۰ انجام شده است. به علّت تقارن محوری مُدل اعم از هندسه و بارگذاری، مُدل شبیه‌سازی به صورت متقارن محوری (دوبعدی)، منظور شده است. این مدل مشتمل بر دو ورق تغییرشکل‌پذیر[4] با مشخّصه‌ی پوسته‌صفحه‌ای[5] با ضخامت ۸۴۲/۰ میلی‌متر، یک سنبه به صورت صلب[6]، یک قالب به صورت صلب و یک ورق نگهدارنده به صورت صلب، مطابق شکل (۴) می‌باشد. سنبه به صورت عمودی به میزان ۷/۲ میلیمتر به صورت خطی نسبت به زمان، به سمت پایین حرکت می‌کند، به‌گونه‌ای که ضخامت تحتانی اتّصال[7] به ۳۸۴/۰ میلی‌متر می‌رسد. این درحالیست که قالب و ورق نگهدارنده بدون حرکت در جای خود باقی می‌مانند. همچنین شبکه‌بندی ورق‌ها مطابق شکل (۴)، با تعداد ۴۲۰ المان از نوع CAX4R برای هر ورق انجام شده است. این المان، از انواع المان‌های چهارگوش متقارن محوری چهارگرهی از نوع انتگرال‌گیری کاهش‌یافته می‌باشد. با توجه به ماهیّت فرایند کلینچینگ، (شبه‌استاتیک و غیرخطی بودن مسئله)، حل دینامیکی به‌روش صریح[8] انتخاب شده است. همچنین زمان حل مسئله[9] برابر با ۰/۰۱ ثانیه منظور شده است.

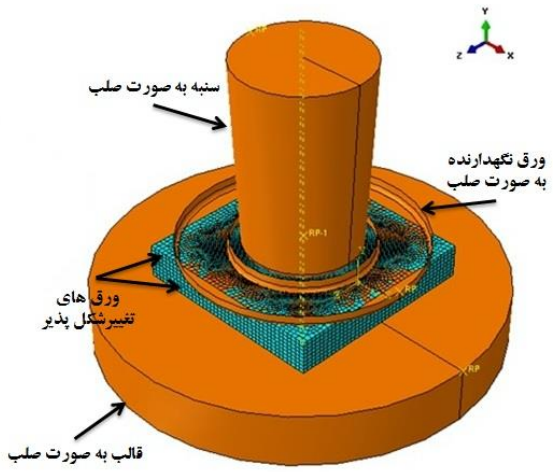
به‌منظور بررسی و تحلیل واقعی‌تر فرآیند کلینچینگ و همچنین بررسی اثر ناهمسانگردی، یک مُدل سه‌بعدی درنظر گرفته شده است. شکل (۵)، مُدل شبیه‌سازی سه‌بعدی مربوطه را نمایش می‌دهد. مشابه مُدل متقارن محوری، مدل سه‌بعدی شامل یک سنبه به‌صورت صلب، یک قالب به‌صورت صلب، یک ورق نگهدارنده به‌صورت صلب و دو ورق به‌صورت تغییرشکل‌پذیر می‌باشد. همچنین شبکه‌بندی ورق‌ها با تعداد ۲۹۱۶۴ المان از نوع C3D8R برای هر ورق انجام شده است. این المان، از انواع المان‌های آجری خطی هشت‌گره‌ای از نوع انتگرال‌گیری کاهش‌یافته می‌باشد. شکل (۶)، چگونگی شبکه‌بندی ورق‌ها درمُدل سه‌بعدی را نشان می‌دهد.

1- Lankford
2- Normal anisotropy
3- Planar anisotropy

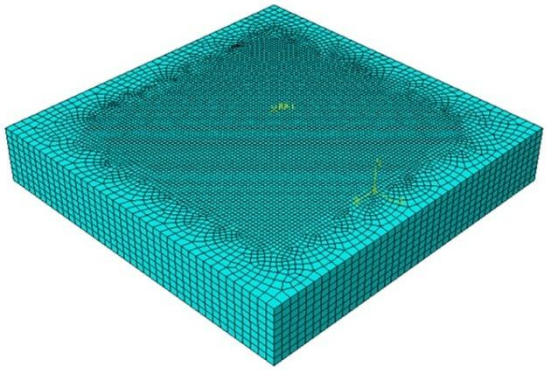
4 -Deformable
5- Shell
6 -Analytical rigid
7- Base thickness
8- Explicit
9- Step time



شکل (۴) مُدل شبیه‌سازی متقارن محوری(دوبعدی)

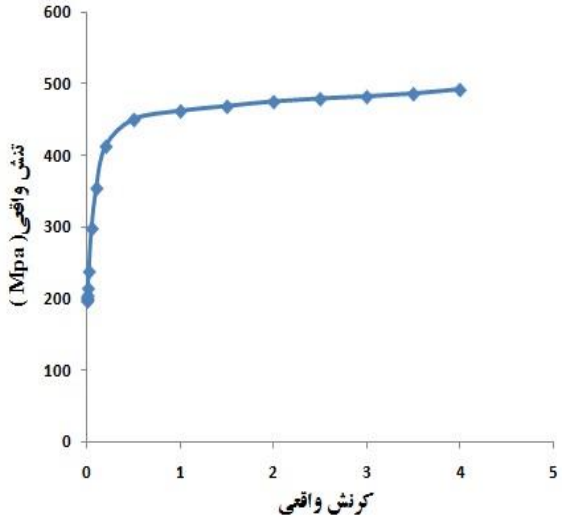


شکل (۵) مُدل شبیه‌سازی سه‌بعدی فرآیند کلینچینگ



شکل (۶) شبکه‌بندی ورق‌ها در مُدل سه‌بعدی

در شبیه‌سازی فرآیندهای همراه با تغییرشکل‌های پلاستیک وسیع همانند فرآیند کلینچینگ، لازم است منحنی تنش-کرنش واقعی ماده به‌منظور شبیه‌سازی در نرم‌افزار درون یابی و برون‌یابی شود [۲]. روش‌های زیادی مانند هولومن[1]، لودویک[2]، سوییفت[3]، وُس[4] و موارد دیگر جهت تقریب‌زنی منحنی جریان وجود دارند که از میان آن‌ها، روش لودویک نتایج بهتری در محدوده‌ی کرنش‌های بزرگ بدست می‌دهد [۱]. منحنی جریان ماده استفاده شده در نرم‌افزار، در شکل (۷) نشان داده شده است.

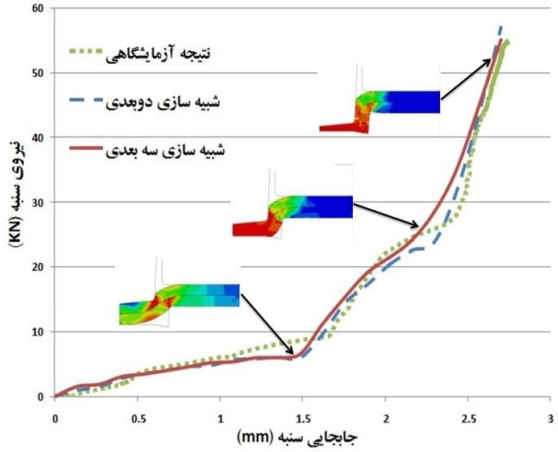


شکل (۷) منحنی جریان برای فولاد H180Y جهت استفاده در نرم‌افزار

۶- نتایج

یکی از پارامترهای مهم جهت اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی، نیروی سنبه در حین حرکت آن می‌باشد. شکل (۸)، منحنی نیروی سنبه بدست‌آمده از شبیه‌سازی و نتیجه‌ی آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

1- Hollomon
2- Ludwik
3- Swift
4- Voce



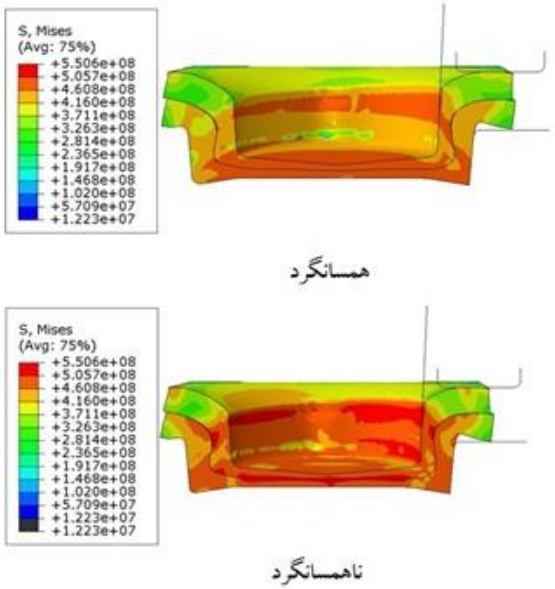
شکل (۸) منحنی نیروی سنبه برحسب جابجایی آن متناظر با نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی

این نمودار بیانگر سازگاری قابل قبول میان حل عددی وآزمایشگاهی می‌باشد. ماکزیمم نیروی سنبه‌ی بدست‌آمده جهت انجام فرآیند در نمونه‌ی آزمایشگاهی برابر با ۵۴/۸ کیلونیوتن می‌باشد، این درحالیست که ماکزیمم نیروی سنبه درشبیه‌سازی صورت‌گرفته برابر با ۵۶/۹ کیلونیوتن بدست آمده است. این اختلاف، ناشی از تغییرشکل ماده تحت فشار در انتهای فرآیند می‌باشد، بدین منظور استفاده از آزمون فشار به جای آزمون کشش، نتایج بهتری را بدست می‌دهد.

۶-۱ تأثیر ناهمسانگردی ورق

تابع پتانسیل در نرم افزار آباکوس حالت ساده و بسط یافته‌ی معیار وُن-میزس می‌باشد که به معیار هیل[1] شهرت دارد. این تابع به صورت ترکیبی از اجزای تانسور تنش و ضرایبی که نشان‌دهنده‌ی تأثیر ناهمسانگردی هستند، تعریف می‌گردد که در راستاهای مختلف برای ماده‌ی مورد نظر به‌دست می‌آیند [۸].

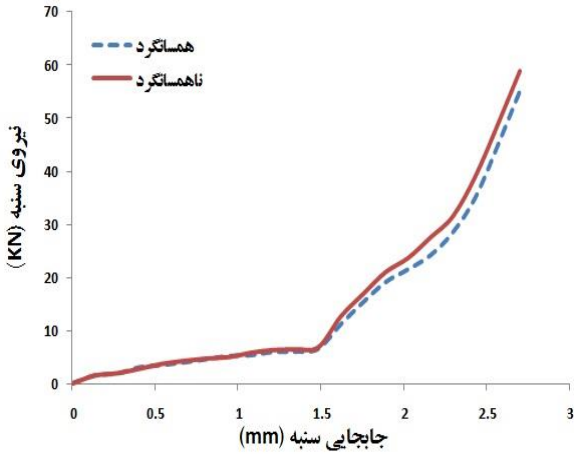
در شبیه‌سازی، تأثیر ناهمسانگردی صفحه‌ای و نرمال مورد بررسی قرار گرفته است، اگرچه به‌نظر می‌رسد ناهمسانگردی صفحه‌ای تأثیر غالب‌تری بر نتایج شبیه‌سازی داشته است. چنانچه تمام مقادیر r تعریف‌شده برای نرم‌افزار برابر یک درنظرگرفته شوند، آنگاه نتایج بدست‌آمده برابر با نتایج مُدل همسانگرد خواهد بود. شکل (۹)، کانتور تنش وُن-میزس را برای حالت همسانگرد و ناهمسانگرد جهت مقایسه‌ی چگونگی تغییر توزیع تنش نشان می‌دهد. همچنین جهت مقایسه‌ی نیروی سنبه در حالت همسانگرد و ناهمسانگرد در تحلیل سه‌بعدی ، منحنی نیروی سنبه در این دو حالت در شکل (۱۰) نمایش داده شده است. مطابق شکل (۱۰)، مقدار تنش مؤثر در اتّصال ورق ناهمسانگرد بیشتر است. ملاحظه می شود که منحنی نیروی سنبه برای حالت ناهمسانگرد پس از ۱/۵ میلی‌متر جابجایی اولیّه‌ی سنبه به سمت پایین، قدری بالاتر از منحنی نیروی سنبه در حالت همسانگرد می‌باشد.



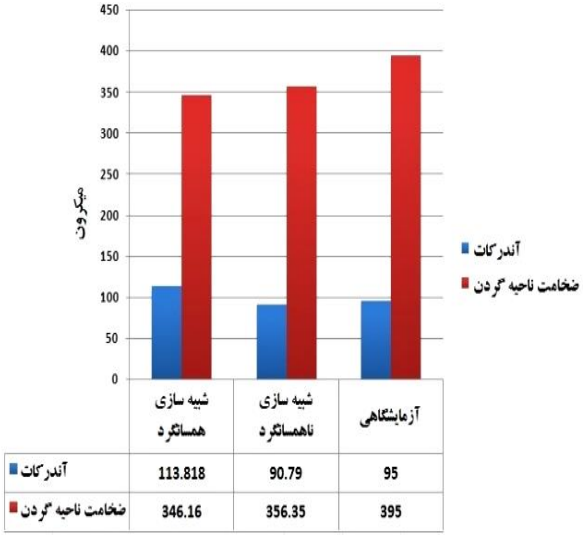
شکل (۹) مقایسه‌ی توزیع تنش وُن-میزس در حالت همسانگرد و ناهمسانگرد

همچنین شکل (۱۱)، مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی پارامترهای آندرکات و ضخامت ناحیه‌ی گردن را در حالت همسانگرد، ناهمسانگرد و نتیجه‌ی آزمایشگاهی نشان می‌دهد. مطابق شکل (۱۱)، مقادیر این پارامترها در حالت ناهمسانگرد به مقادیر به‌دست‌آمده از نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر بوده و تنها خطایی در حدود ۵ درصد دارد.

1 -Hill's Potential Function



شکل (۱۰) منحنی نیروی سنبه - جابجایی در حالت همسانگرد و ناهمسانگرد



شکل (۱۱) تأثیر ناهمسانگردی بر پارامترهای اتّصال

همچنین از شکل (۱۱) می‌توان نتیجه گرفت که ضخامت ناحیه‌ی گردن در اثر ناهمسانگردی ورق افزایش یافته، درحالیکه پارامتر هندسی آندرکات کاهش یافته است که این پدیده می‌تواند در اثر مقاومت بیشتر ماده در جهت ضخامت و کاهش مقاومت عرضی ورق ناهمسانگرد باشد.

۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، اتّصال دو ورق فولادی نوع H180Y به ضخامت ۰/۸۴۲ میلی‌متر، با استفاده از تکنیک کلینچینگ نوع تاکس به روش آزمایشگاهی و عددی مورد مطالعه قرار گرفت. به‌کمک شبیه‌سازی سه‌بعدی به‌روش اجزای محدود فرآیند کلینچینگ، تأثیر ناهمسانگردی ورق بر رفتار هندسی و مکانیکی اتّصال ازجمله تغییرات نیروی سنبه و پارامترهای اتّصال بررسی گردید. نتایج حاکی از افزایش نیروی سنبه - جابجایی برای اتّصال ورق ناهمسانگرد نسبت به ورق همسانگرد و تطابق بهتر نتیجه‌ی بدست‌آمده با نتیجه‌ی آزمایشگاهی بوده است. همچنین میزان آندرکات و ضخامت ناحیه‌ی گردن در سه حالت آزمایشگاهی، شبیه‌سازی همسانگرد و شبیه‌سازی ناهمسانگرد با یکدیگر مقایسه شده و تطابق بهتر شبیه‌سازی ناهمسانگرد با نتیجه‌ی بدست‌آمده از کار آزمایشگاهی مشاهده شد. همچنین میزان آندرکات و ضخامت ناحیه‌ی گردن در سه حالت آزمایشگاهی، شبیه‌سازی همسانگرد و شبیه‌سازی ناهمسانگرد با یکدیگر مقایسه شده و تطابق بهتر نتایج تحلیل عددی ورق ناهمسانگرد با نتیجه‌ی بدست‌آمده از کار آزمایشگاهی نشان داده شد. مشاهده می‌شود که مقدار تنش مؤثر در اتّصال ورق ناهمسانگرد بیشتر است. علاوه بر این نتایج تحقیق نشان‌دهنده‌ی این مطلب است که ضخامت ناحیه‌ی گردن در فرآیند کلینچینگ در اثر ناهمسانگردی ورق افزایش و به‌عکس، پارامتر هندسی آندرکات کاهش می‌یابد.

فهرست علائم

r	ضریب ناهمسانگردی
r_0	ضریب ناهمسانگردی در راستای نورد
r_{45}	ضریب ناهمسانگردی در راستای قطری
r_{90}	ضریب ناهمسانگردی در راستای عرضی
r_n	ضریب عمودی ناهمسانگردی
Δr	تغییرات ضریب ناهمسانگردی عمودی (ناهمسانگردی صفحه‌ای)

مراجع

[1] Mizanur R., Experiment and Numerical Simulation of TOX Clinching Process for galvanized thin steel sheets using ABAQUS Program, Institute of Materials Science, Welding and Forming, Graz University of Technology, Graz, Austria, 2007

[2] Saberi S., Enzinger N., Vallant R., Cerjak, H., Hinterdorfer,J., Rauch R., Influence of plastic anisotropy on the mechanical behavior of clinched joint of different coated thin steel sheets, *International journal of material forming*, volume1, supplement1, 2008, pp. 273–276

[3]Akbarzadeh-paydar O., Analyse der Verbindungsfestigkeit von Clinchpunkten für beschichtete Stahlfeinbleche unter quasistatischer Belastung mittels experimentellen Untersuchungen und FE-Simulation, Institute of Materials Science, Welding and Forming, Graz University of Technology, Graz, Austria, 2007

[4] Varis J., Lepisto J., A simple testing-based procedure and simulation of the clinching process using finite element analysis for establishing clinching parameters, *Thin-Walled Structures*, Vol. 41, 2003, pp. 691–709

[5] Carboni M., Beratta S., Monno M., Fatigue behavior of tensile-shear loaded clinched joints, Engineering Fracture Mechanics, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 73, 2006, pp. 178–190

[۶] جانسون، و.، ملور، پ.، ترجمه ابری‌نیا، ک.، پلاستیسیته مهندسی، انتشارات یامهدی (عج)، تهران، گروه صنایع یامهدی (عج)، ۱۲۲،۱۳۷۸-۱۲۰

[7] Banabic D., Plastic behavior of sheet metal, *sheet metal forming process*, Springer, 2010, pp. 27-140

[8] ABAQUS Inc. (2009). ABAQUS User's Manual, Version 6.9.