

## بررسی پارامترهای موثر در فرایند نورد ساندویچی و معمولی ورق نازک فولادی به کمک روش اجزاء محدود

ولی علی میرزالو<sup>۱\*</sup>

### چکیده

در این پژوهش فرایند نورد ساندویچی و معمولی نوعی ورق نازک فولادی با لایه‌های آلومینیومی، بررسی و مقایسه شده است. ورق از جنس فولاد ضدزنگ SUS304 و لایه‌های آلومینیومی از جنس آلومینیوم 1050 است. هر دو روش نورد به روش المان محدود با رفتار مکانیکی کرنش سخت تحلیل و سپس با استفاده از نتایج تجربی، صحت سنجی شده است. همچنین دو روش نورد از لحاظ توزیع کرنش، فشار، نیرو و گشتاور لازم مقایسه و اثر درصد تغییر شکل، نیروهای کششی، فاکتور اصطکاک و شعاع غلتک‌ها در نورد ساندویچی بررسی گردیده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که نتایج تحلیل المان محدود تطابق خوبی با نتایج تجربی دارد. نورد ساندویچی در مقایسه با نورد معمولی، در لایه فولادی توزیع کرنش‌ها یکنواخت‌تر است و نیز فشار و نیروی وارده بر غلتک‌ها کاهش قابل توجهی دارد؛ اما گشتاور نورد مقداری افزایش می‌یابد. همچنین در نورد ساندویچی با افزایش درصد کار سرد، ضخامت لایه‌های خروجی به صورت خطی کاهش می‌یابد. با اعمال تنش کششی، نیروی نورد کاهش یافته و تاثیر نیروی کشش از عقب در کاهش نیرو، بیش‌تر می‌شود. با افزایش مقدار فاکتور اصطکاک، نقطه ماکزیمم فشار (نقطه خنثی) به سمت ورودی نورد جابجا شده و توزیع کرنش‌ها غیریکنواخت‌تر می‌شود. همچنین با افزایش شعاع غلتک‌ها، فشار نورد افزایش یافته و نقطه خنثی به سمت ورودی نورد جابجا می‌شود و ضخامت لایه‌ها تغییر قابل توجهی نمی‌کند.

واژه‌های کلیدی: نورد ساندویچی، اجزای محدود، ورق نازک، DEFORM2D، تغییر شکل پلاستیک.

<sup>۱</sup> - استادیار گروه مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه، ارومیه  
\* - نویسنده مسئول مقاله: v.alimirzaloo@urmia.ac.ir

## پیشگفتار

یکی از مشکلات قابل توجه در فرایند نورد ورق‌های نازک فولادی، پهن شدن و خمش الاستیک غلتک‌ها، در نتیجه عدم حصول ضخامت مطلوب و معیوب شدن ورق خروجی می‌باشد. جهت جلوگیری از این پدیده روش‌هایی مانند غلتک‌های با قطر کوچک‌تر همراه با غلتک‌های پشتیبان، اعمال پیش کشش و پس کشش استفاده می‌شود [۱]. نورد ساندویچی یکی دیگر از تکنیک‌هایی است که می‌تواند برای کاهش نیروی وارده و در نتیجه کاهش خمش و پهن شدن غلتک‌ها به کار گرفته شود. یکی از موارد بهره‌مندی روش نورد ساندویچی، در نورد ورق‌های با استحکام و قیمت بالا است در صورتی که مقدار تولید کم مدنظر باشد؛ زیرا استفاده از تجهیزات مخصوص و گرانبها مانند غلتک چندگانه سندزیمیر<sup>۲</sup> مقرون به صرفه نخواهد بود. هم‌چنین از این روش جهت تولید ورق‌های ساندویچی استفاده می‌شود. تولید ورق ساندویچی توسط فرایند نورد نسبت به سایر فرایندها اقتصادی‌تر می‌باشد. به همین دلیل، مطالعه بر روی این فرایند دارای اهمیت بالایی است. از مطالعات اولیه در این زمینه می‌توان به کار آفونجا و سانسوم [۲] اشاره کرد که نورد ساندویچی را به صورت تحلیلی بررسی کرده‌اند. و با استفاده از معادلات تعادل و تنش تسلیم میانگین، رابطه تحلیلی برای فشار و گشتاور نورد بدست آورده‌اند. تحقیقات دیگری در این زمینه با عنوان نورد ورق‌های ساندویچی ارائه شده است که تعدادی به صورت تجربی بوده [۳-۶] و مابقی به صورت تحلیلی و یا عددی می‌باشد. از میان بررسی‌های تحلیلی انجام گرفته در این زمینه، می‌توان به مطالعات تزو و همکارانش [۷-۸] اشاره کرد که با استفاده از روش قاچی (slab method) و مدل صلب-پلاستیک کامل، معادلاتی را جهت پیش بینی نیروی نورد و سایر پارامترها در مدل‌های اصطکاکی گوناگون بدست

آورده‌اند. هوانگ و همکارانش [۹] با استفاده از روش تابع جریان (stream function) فرایند نورد ورق‌های ساندویچی را تحلیل کرده‌اند و پارامترهای نیروی نورد و ضخامت لایه‌های خروجی را مورد بررسی قرار داده و با نتایج تجربی مقایسه کرده‌اند. عربی و همکارانش [۱۰] با استفاده از تئوری حد بالا، نورد کامپوزیت‌های ساندویچی را مدل‌سازی کرده و ناحیه بین لایه‌ها را بررسی کرده‌اند. در زمینه تحلیل عددی فرایند نورد ورق‌های ساندویچی می‌توان به مطالعه لین و هوانگ [۱۱] اشاره کرد که فرایند نورد داغ ورق ساندویچی آلومینیم-مس را به روش المان محدود تحلیل کرده‌اند. کیم و همکارانش [۱۲] نورد ساندویچی ورق‌های BMG (bulk metallic glass) پایه روی را در لایه‌های مسی با روش‌های تجربی و المان محدود بررسی کرده‌اند. در نورد ورق‌های ساندویچی در صورت استفاده از مدل کرنش سخت به دلیل اختلاف خواص دو ورق و تغییر شکل پلاستیک ورق‌ها، بکارگیری روش‌های تحلیلی نسبتاً پیچیده است. به همین دلیل، در بررسی‌های انجام شده با این روش‌ها از فرض‌های ساده کننده‌ای، مانند فرض مدل صلب-پلاستیک برای ماده و ساده سازی‌های هندسی مانند فرض نسبت بزرگ شعاع غلتک به ضخامت ورق استفاده شده است. این فرض‌ها ممکن است نتایج حاصل را از نتایج واقعی دور کند در صورتی که در روش‌های عددی مانند المان محدود به دلیل امکان اعمال فرضیات نزدیک به واقعیت، نتایج بهتری انتظار می‌رود. تاکنون در زمینه نورد ساندویچی ورق‌های نازک فولادی، مطالعات به صورت تحلیلی و فرضیات ساده کننده‌ای انجام شده است. در این پژوهش، فرایند نورد یک نوع ورق فولاد ضد زنگ با ضخامت کم و رفتار مکانیکی کرنش سخت با دو روش ساندویچی در لایه‌های آلومینیومی و نورد معمولی به روش المان محدود بررسی و مقایسه شده است و سپس اثر پارامترهایی مانند شعاع غلتک‌ها، نیروهای کششی و درصد کارسرد بر فشار،

<sup>2</sup>-Sendzimir

واحد لحاظ شده است. برای درصد کار سرد ۳۰٪ با انجام تحلیل، تغییر شکل المان‌ها در ناحیه تغییر شکل در شکل ۲ نشان داده شده است. درصد کار سرد در واقع میزان تغییر شکل در فرایند شکل دهی در دمای محیط است که در فرایند نورد به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$r = \frac{\Delta h}{h_0} \times 100 \quad (1)$$

$h_0$  ضخامت اولیه ورق و  $\Delta h$  اختلاف ضخامت ورق در ورودی و خروجی غلتک‌ها است. نتایج تحلیل نشان می‌دهد که با این درصد کار سرد، ضخامت لایه فولادی از ۰/۵mm به ۰/۳۵mm کاهش می‌یابد.

#### فرایند نورد معمولی

در نورد به روش ساندویچی، ورق فولادی با ضخامت ۰/۵mm با استفاده از لایه‌های خارجی آلومینیومی به ورقی به ضخامت ۰/۳۵mm تغییر شکل داده شد. در این قسمت برای تبدیل ضخامت ورق فولادی از ۰/۵mm به ۰/۳۵mm فرایند نورد معمولی مورد استفاده قرار گرفت. به این منظور، نصف فرایند با قید تقارن محوری شبیه سازی شد. ابعاد هندسی و سرعت زاویه‌ای غلتک و شرایط اصطکاکی مانند نورد ساندویچی لحاظ شد با این تفاوت که در این حالت لایه خارجی آلومینیومی حذف گردید. جهت شبکه بندی ورق از المان مستطیلی با ۴ گره استفاده شده است و غلتک‌ها به صورت صلب در نظر گرفته شدند. برای درصد کار سرد ۳۰٪ (تبدیل ضخامت از ۰/۵mm به ۰/۳۵mm) با انجام شبیه سازی، تغییر شکل المان‌ها در ناحیه گپ نورد در شکل ۳ نشان داده شده است.

نیرو و گشتاور وارده بر غلتک‌ها و ضخامت ورق خروجی در نورد ساندویچی مورد بررسی قرار گرفته است.

#### تحلیل عددی

##### فرایند نورد ساندویچی

فرایند نورد ورق فولادی به روش ساندویچی با لایه‌های آلومینیومی به روش المان محدود مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور با فرض کرنش صفحه‌ای بودن تغییر شکل‌ها (ناچیز بودن کرنش در جهت عرض ورق) از کد المان محدود دو بعدی دفرم<sup>۳</sup> استفاده شد. با توجه به تقارن فرایند نسبت به صفحه میانی ورق، نصف فرایند با قید تقارن محوری شبیه سازی شد. مقادیر پارامترهای هندسی ورق‌ها و غلتک‌ها مطابق شکل ۱ به صورت جدول ۱ در نظر گرفته شد.

در شکل ۱ اندیس‌های  $0$  به ترتیب برای ورودی و خروجی غلتک‌ها و اندیس‌های  $m$  و  $C$  به ترتیب برای لایه داخلی و خارجی می‌باشد. رفتار مکانیکی مواد با توجه به رابطه کرنش سختی برای هر یک از لایه‌ها به این صورت اعمال شده است [۸]:

لایه فولادی: فولاد ضدزنگ SUS304

$$\bar{\sigma} = 569.3 \bar{\epsilon}^{0.078} \text{ MPa}$$

لایه آلومینیومی: آلومینیوم A1050

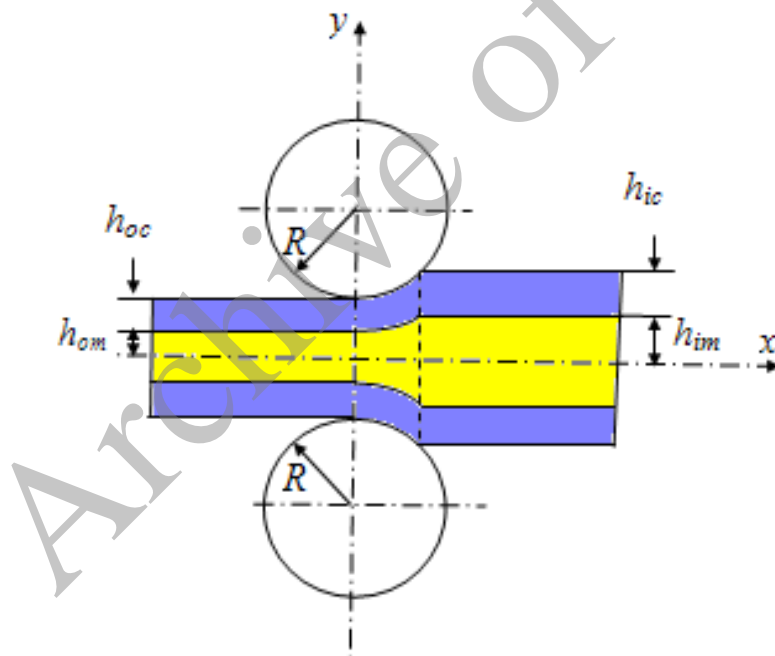
$$\bar{\sigma} = 183.2 \bar{\epsilon}^{0.045} \text{ MPa}$$

جهت شبکه بندی ورق از المان مستطیلی با ۴ گره استفاده شد و غلتک‌ها به صورت صلب در نظر گرفته شدند. مدل اصطکاک بین ورق و غلتک‌ها از نوع برشی با فاکتور اصطکاک  $m=0.8$  لحاظ شده است [۸]. با توجه به فرض کرنش صفحه‌ای برای فرایند، عرض ورق‌ها به اندازه

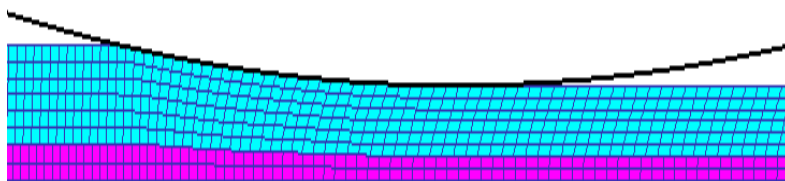
<sup>3</sup>-DEFORM 2D

جدول ۱- مقادیر پارامترهای هندسی ورق‌ها و غلتک‌ها

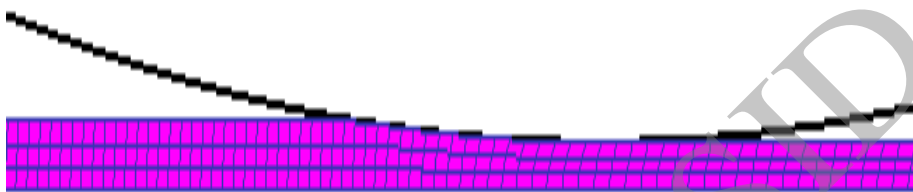
| پارامتر   | مقدار      |
|---|------------|
| ضخامت یک لایه خارجی (آلومینیومی) قبل از نورد ( $h_{ic}$ ) | ۱/۴ mm     |
| نصف ضخامت لایه داخلی (فولادی) قبل از نورد ( $h_{im}$ )    | ۰/۵ mm     |
| شعاع غلتکها (R)   | ۱۰۰ mm     |
| سرعت زاویه ای غلتک‌ها                                     | ۰/۸۳ Rad/s |



شکل ۱- پارامترهای هندسی فرایند نورد ساندویچی



شکل ۲- تغییر شکل المان‌ها در ناحیه تغییر شکل در نورد ساندویچی

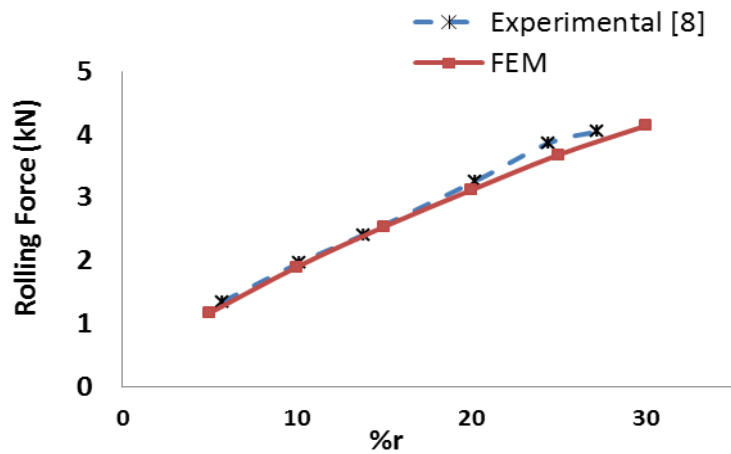


شکل ۳- تغییر شکل المان‌ها در گپ نورد معمولی

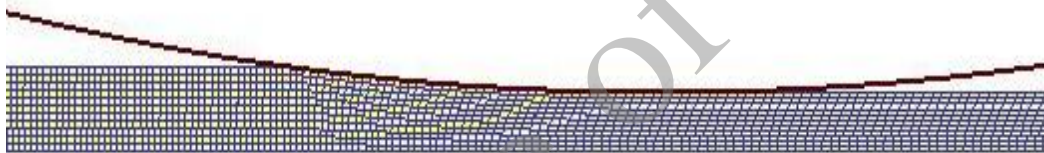
تجربی بسیار به هم نزدیک هستند. هم‌چنین برای بررسی همگرایی نتایج روش اجزا محدود و اطمینان از تعداد المان‌ها، با ریز کردن المان‌ها به تعداد ۱۴۸۳۵ المان برای حالت درصد تغییر شکل ۳۰٪، مطابق شکل ۵ تحلیل انجام شد. مقدار نیرو برای دو حالت، مطابق شکل ۶ خیلی به هم نزدیک است. بنابراین می‌توان ادعا کرد که تحلیل عددی انجام شده قابل اطمینان است.

### صحت سنجی شبیه سازی با نتایج تجربی

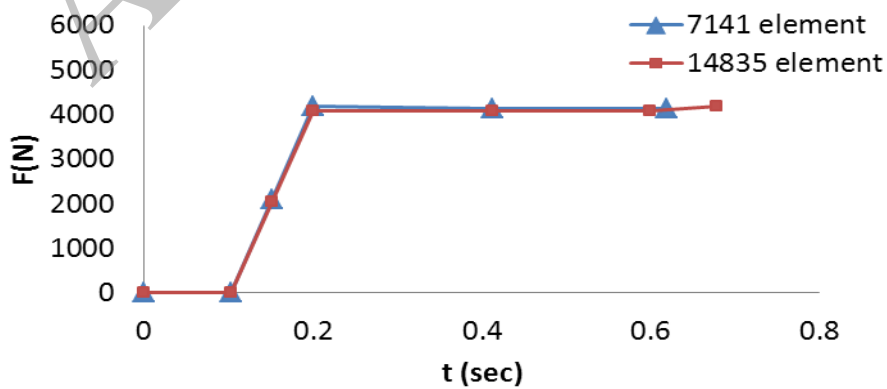
مدل تحلیل المان محدود نورد ساندویچی، با استفاده از نتایج تجربی موجود در مرجع [۹] صحت سنجی شد. به این منظور، مطابق شکل ۴ نیروی نورد حاصل از تحلیل المان محدود با ۷۱۴۱ المان در درصد کارسردهای گوناگون با نیروی حاصل از آزمایشات تجربی مقایسه گردید. مشاهده می‌شود که نتایج تحلیل المان محدود و



شکل ۴- نیروی نورد حاصل از تحلیل المان محدود و آزمایشات تجربی در درصد کارسردهای گوناگون



شکل ۵- شبکه بندی با المان های ریزتر



شکل ۶- نیروی نورد برای دو حالت شبکه بندی

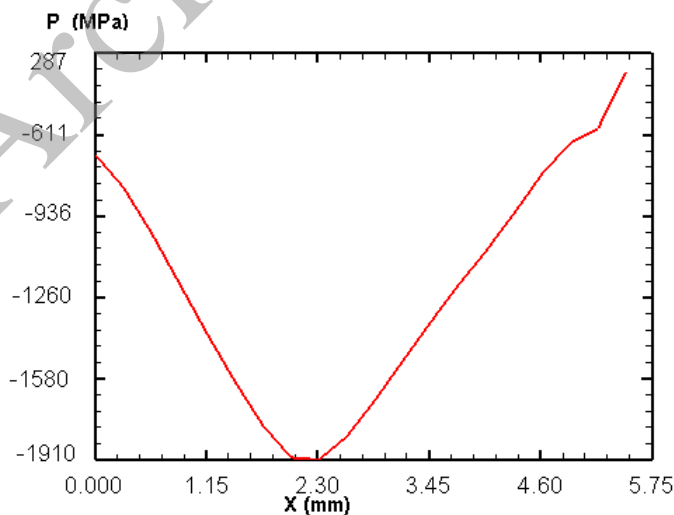
## نتایج و بحث

خروجی در محدوده  $0/42-0/57$  است. در شکل ۸ توزیع فشار وارده بر غلتک گزارش شده است. این شکل نشان می‌دهد که حداکثر فشار  $1910\text{MPa}$  است و در فاصله حدود  $2/2\text{mm}$  از مبدا اتفاق می‌افتد که مشخص کننده موقعیت نقطه خنثی می‌باشد. در نقطه خنثی، سرعت جریان مواد با سرعت خطی غلتک یکسان است و قبل از آن سرعت خطی غلتک بیش از سرعت جریان مواد بوده و بعد از نقطه خنثی برعکس می‌شود.

فرایند نورد ورق فولادی با دو روش معمولی و روش ساندویچی با استفاده از مدل رفتار مکانیکی کرنش سخت به روش المان محدود تحلیل شد. در نورد معمولی برای درصد کار سرد  $30\%$  توزیع کرنش مؤثر در شکل ۷ نشان داده شده است و از شکل مشاهده می‌شود که حداکثر کرنش مؤثر حدود  $0/57$  و میزان کرنش در قسمت



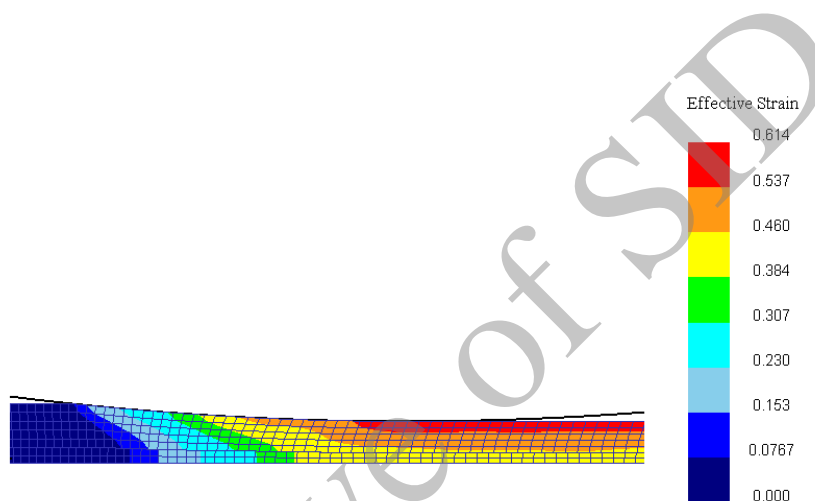
شکل ۷- توزیع کرنش مؤثر در نورد معمولی



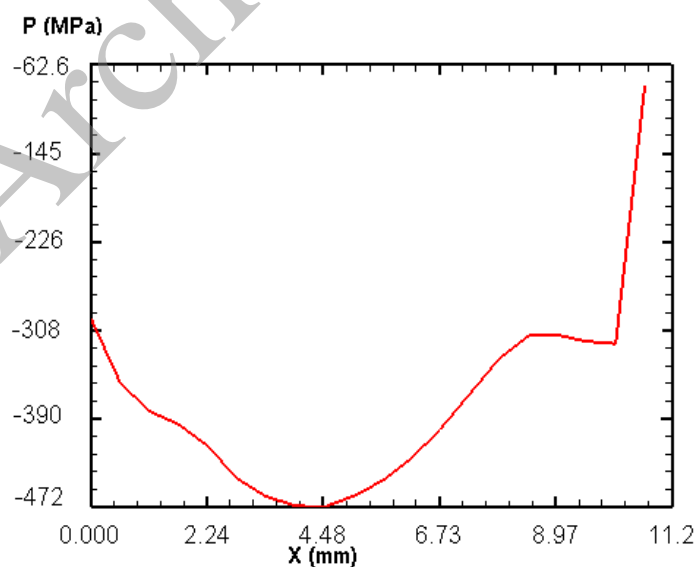
شکل ۸- توزیع فشار در گپ نورد معمولی

حداکثر فشار  $472\text{MPa}$  بوده و در فاصله حدود  $4/4\text{mm}$  از مبدا اتفاق می افتد و نیز مشخص کننده موقعیت نقطه خنثی می باشد. مقایسه این نمودار با نمودار مربوطه در نورد معمولی (شکل ۸) نشان می دهد که در نورد ساندویچی، فشار به مقدار زیادی کاهش می یابد و همچنین توزیع فشار وارده به غلتکها نسبت به نورد معمولی یکنواخت تر و فاصله نقطه خنثی تا مبدا (خروجی نورد) دو برابر حالت نورد معمولی شده است.

در نورد ساندویچی برای درصد کار سرد  $30\%$ ، توزیع کرنش مؤثر در شکل ۹ نشان داده شده است نتایج گزارش می دهد که حداکثر کرنش در لایه فولادی حدود  $0/46$  است و نسبت به نورد معمولی  $0/11$  کم تر است. همچنین محدوده کرنش در قسمت خروجی  $0/38-0/46$  بوده و بیانگر این است که در مقایسه با نورد معمولی در این حالت توزیع کرنش در لایه فولادی یکنواخت تر می باشد. در شکل ۱۰ توزیع فشار نشان داده شده است. که در آن



شکل ۹- توزیع کرنش مؤثر در نورد ساندویچی



شکل ۱۰- توزیع فشار در گپ نورد ساندویچی

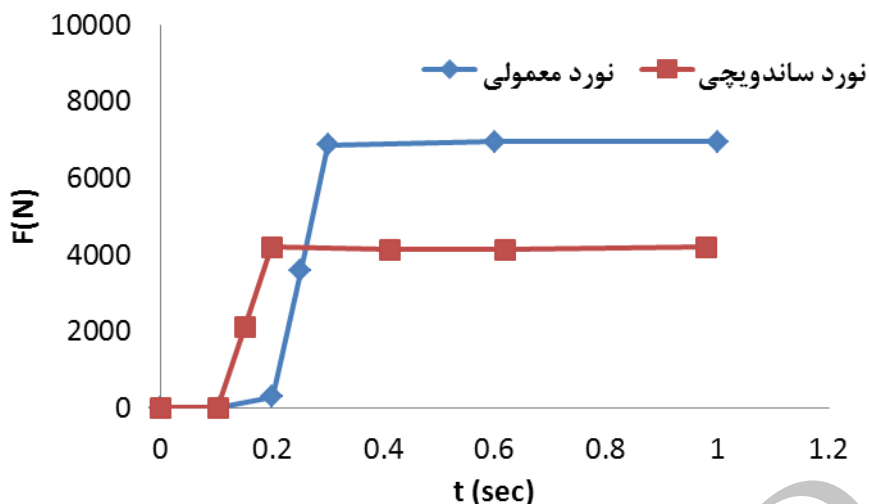


نمودار نیروی نورد برای هر دو حالت نورد معمولی و ساندویچی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نیروی نورد در نورد معمولی  $6956\text{N}$  بوده؛ اما در نورد ساندویچی  $4190\text{N}$  می‌شود. مقایسه دو حالت نشان می‌دهد که جهت کاهش ضخامت یکسان در لایه فولادی، نیروی وارده به غلتک‌ها در نورد ساندویچی نسبت به نورد معمولی حدود  $40\%$  کاهش می‌یابد. در رابطه با دلیل کاهش نیروی لازم می‌توان گفت: طبق روابط مربوطه حاصل از تحلیل قاچی<sup>۴</sup> [۱۲]، در فرایند نورد معمولی، فشار لازم با ضخامت میانگین ورق نسبت عکس دارد:

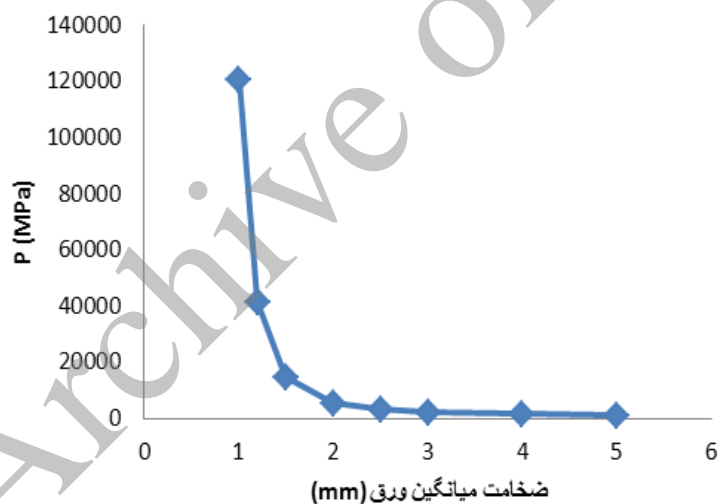
$$P_a = \frac{h}{\mu L} \left( \exp \frac{\mu L}{h} - 1 \right) (\sigma_0) \quad (2)$$

در این رابطه  $\mu$  ضریب اصطکاک،  $h$  ضخامت میانگین ورق،  $L$  طول تماس و  $\sigma_0$  تنش سیلان ماده می‌باشد. به عنوان مثال با فرض ضریب اصطکاک  $0/15$  و تنش سیلان  $50\text{MPa}$  و طول تماس  $50\text{mm}$ ، تغییرات فشار بر حسب ضخامت میانگین ورق، به صورت شکل ۱۲ نشان داده می‌شود. از شکل مشاهده می‌شود که با کاهش ضخامت میانگین ورق، فشار لازم به شدت افزایش می‌یابد. در نورد ساندویچی با استفاده از دو لایه ماده نرم، ضخامت میانگین کل افزایش یافته در نتیجه فشار و نیروی لازم کاهش می‌یابد.

<sup>4</sup>slab method



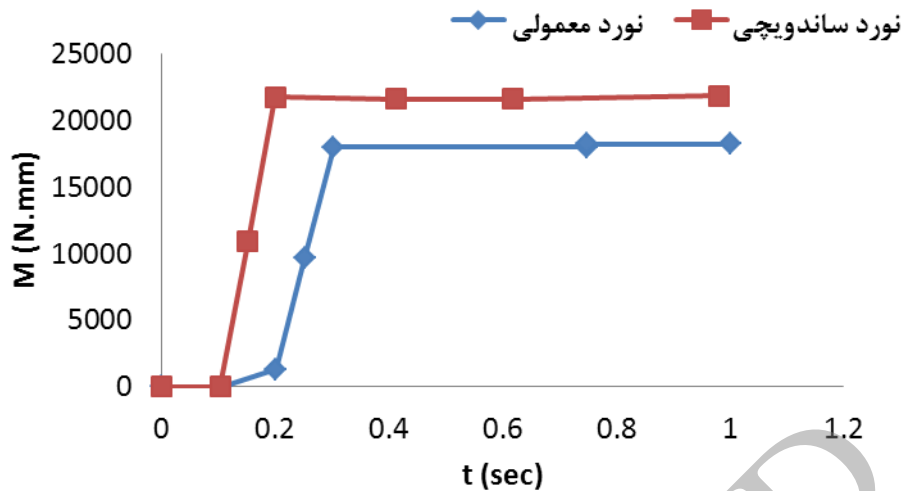
شکل ۱۱- نمودار نیروی لازم در نورد معمولی و ساندویچی



شکل ۱۲- نمودار تغییرات فشار نورد بر حسب ضخامت میانگین ورق

حدود ۲۰٪ نیز افزایش پیدا کرده است و دلیل آن افزایش طول ناحیه تماس در نورد ساندویچی، نسبت به نورد معمولی می‌باشد. در نورد معمولی طول ناحیه تماس ورق با غلتک (فاصله  $L$ ) ۵/۴۷mm است در حالی که در نورد ساندویچی طول ناحیه تماس ۱۰/۶۸mm می‌باشد.

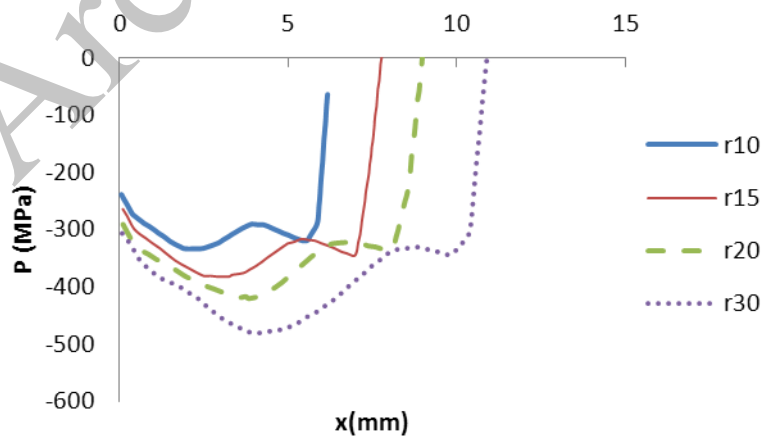
نمودار گشتاور نورد برای هر دو حالت نورد معمولی و ساندویچی در شکل ۱۳ نشان داده شده است که مشاهده می‌شود، گشتاور نورد معمولی ۱۸۲۵۰ N.mm و نورد ساندویچی ۲۱۹۰۰ N.mm است. بنابراین، گشتاور لازم برای نورد در حالت ساندویچی نه تنها کاهش نیافته بلکه



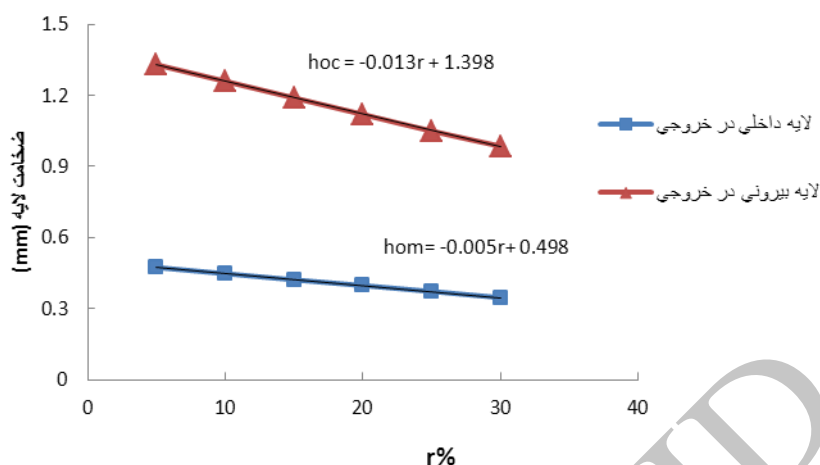
شکل ۱۳- نمودار گشتاور لازم در نورد معمولی و ساندویچی

شکل ۱۵ تاثیر درصد کار سرد بر ضخامت لایه‌های خارجی و داخلی را نشان می‌دهد و از شکل مشاهده می‌شود که با افزایش درصد کار سرد ضخامت هر دو لایه به صورت خطی کاهش می‌یابد. با استفاده از روابط به دست آمده در نمودارها می‌توان برای ضخامت خروجی مورد نظر، درصد کار سرد و در نتیجه مقدار گپ نورد را به دست آورد.

در شکل ۱۴ تاثیر درصد کار سرد بر توزیع فشار در گپ نورد ساندویچی نشان داده شده است. نتایج بیان می‌کند که با افزایش درصد کار سرد، فشار نورد افزایش یافته و نقطه خنثی به سمت عقب (ورودی نورد) جابجا می‌شود.



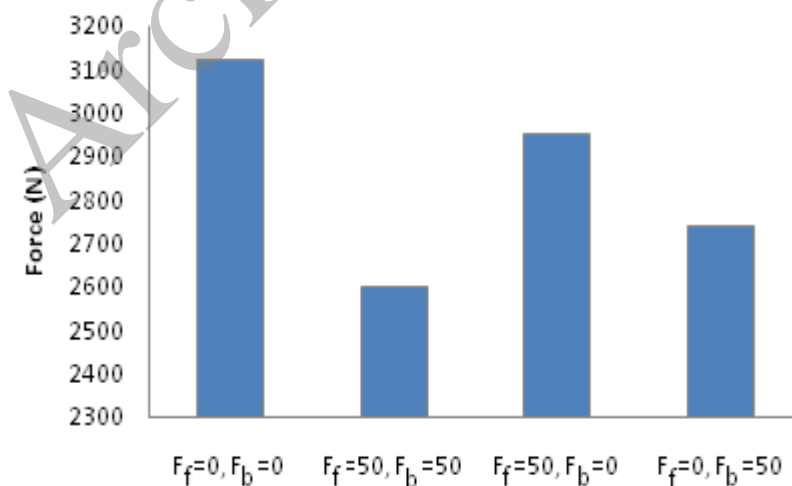
شکل ۱۴- تاثیر درصد کار سرد بر توزیع فشار در گپ نورد ساندویچی



شکل ۱۵- تاثیر درصد کار سرد بر ضخامت لایه های خارجی و داخلی

شکل ۱۷ اثر فاکتور اصطکاک بر توزیع فشار نورد در نورد ساندویچی با کار سرد ۲۰٪ ارائه داده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش مقدار فاکتور اصطکاک، فشار نورد افزایش یافته و غیر یکنواخت‌تر می‌شود و همچنین نقطه ماکزیمم فشار (نقطه خنثی) به سمت ورودی نورد جابجا می‌شود. در شکل ۱۸ اثر فاکتور اصطکاک بر توزیع کرنش‌ها نشان داده شده است.

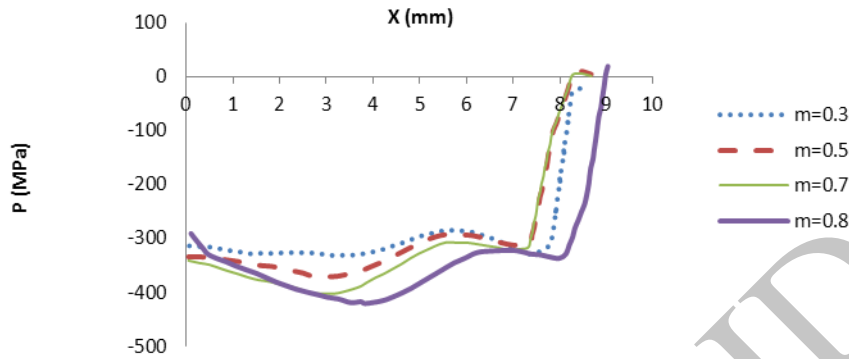
در شکل ۱۶ تاثیر نیروهای کششی از جلو و عقب فرایند بر نیروی نورد ساندویچی با کار سرد ۲۰٪ نشان داده شده است. نتایج بیان می‌کند که نیروی لازم جهت فرایند نورد ساندویچی با اعمال نیروهای کششی کاهش می‌یابد و تاثیر نیروی کششی از عقب بیش‌تر است. در صورتی که از هر دو طرف نیروی کششی اعمال شود، نیروی لازم حدود ۲۰٪ کاهش می‌یابد.



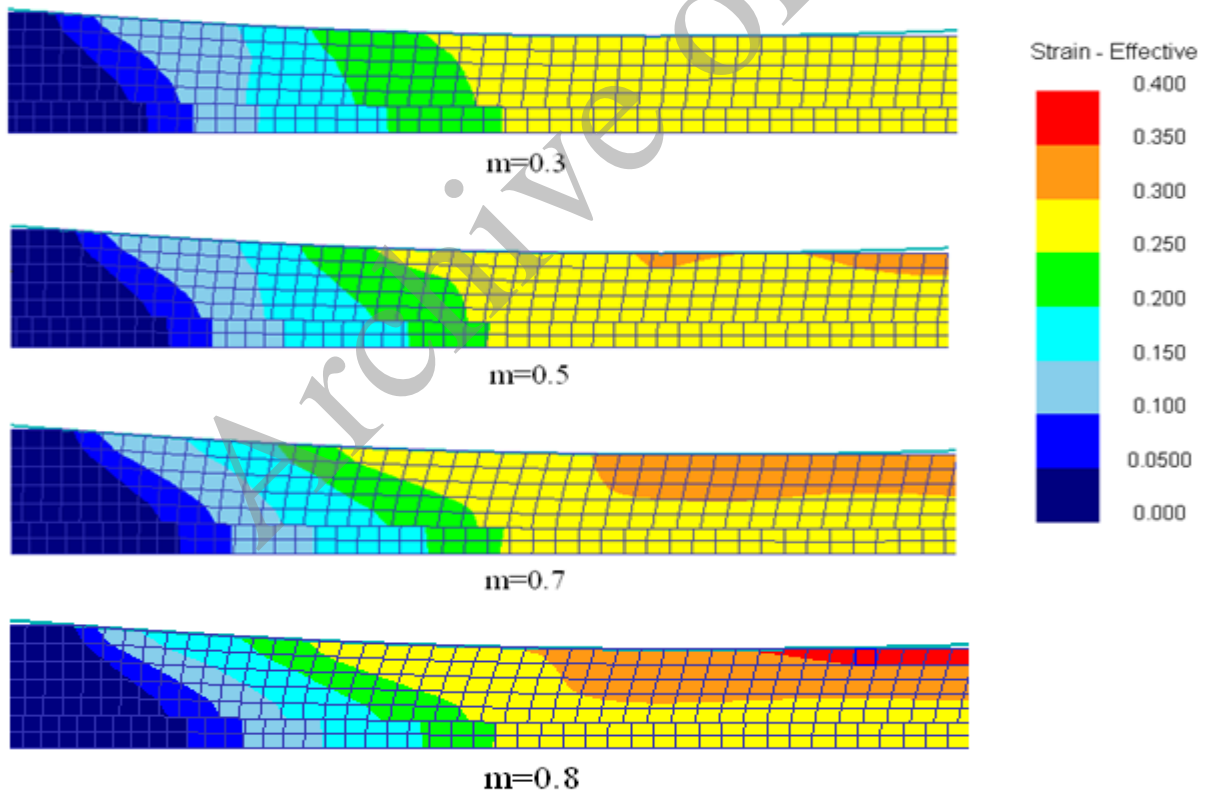
شکل ۱۶- تاثیر تنش‌های کششی از جلو ( $F_f$ ) و عقب ( $F_b$ ) بر حسب MPa بر نیروی نورد ساندویچی

تغییر می‌کند؛ اما در فاکتور اصطکاک ۰/۸، در خروجی گپ نورد، مقدار کرنش موثر بین ۰/۲۵ تا ۰/۴۰ تغییر می‌کند. بنابراین با افزایش اصطکاک بین غلتک‌ها و ورق، توزیع کرنش‌ها غیریکنواخت‌تر می‌شود.

در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود که با افزایش فاکتور اصطکاک از ۰/۳ تا ۰/۷ توزیع کرنش‌ها غیر یکنواخت‌تر می‌شود. به گونه‌ای که در فاکتور اصطکاک ۰/۳، در خروجی گپ نورد، مقدار کرنش موثر بین ۰/۲۵ تا ۰/۳۰



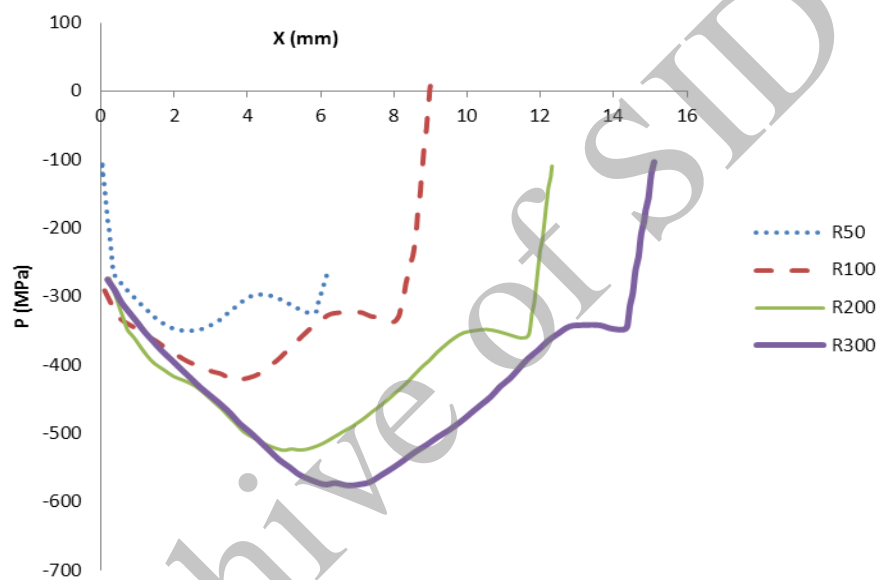
شکل ۱۷- اثر فاکتور اصطکاک بر توزیع فشار نورد



شکل ۱۸- اثر فاکتور اصطکاک بر توزیع کرنش‌ها

کمترین کرنش از ۰/۱ به ۰/۱۵ افزایش می‌یابد؛ اما با افزایش بیش‌تر شعاع غلتک‌ها، غیریکنواختی کرنش‌ها تغییر قابل توجهی نمی‌کند. تاثیر شعاع غلتک‌ها بر ضخامت لایه‌ها در خروجی نورد مطابق شکل ۲۱ بررسی شد. که مشاهده می‌شود، افزایش شعاع غلتک‌ها بر ضخامت لایه‌ها تاثیر قابل توجهی ندارد.

تاثیر شعاع غلتک‌ها بر توزیع فشار نورد در نورد ساندویچی با کار سرد ۲۰٪ مطابق شکل ۱۹ بررسی شده است. شکل ۱۹ نشان می‌دهد که با افزایش شعاع غلتک‌ها، فشار نورد افزایش یافته و نقطه خنثی به سمت ورودی نورد جابجا می‌شود. همچنین تاثیر شعاع غلتک‌ها بر توزیع کرنش‌ها در شکل ۲۰ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش شعاع غلتک از ۵۰mm به ۱۰۰mm توزیع کرنش موثر در خروجی گپ نورد مقداری غیریکنواخت می‌شود، یعنی اختلاف بیش‌ترین کرنش با



شکل ۱۹- تاثیر شعاع غلتک‌ها بر توزیع فشار نورد

## نتیجه گیری

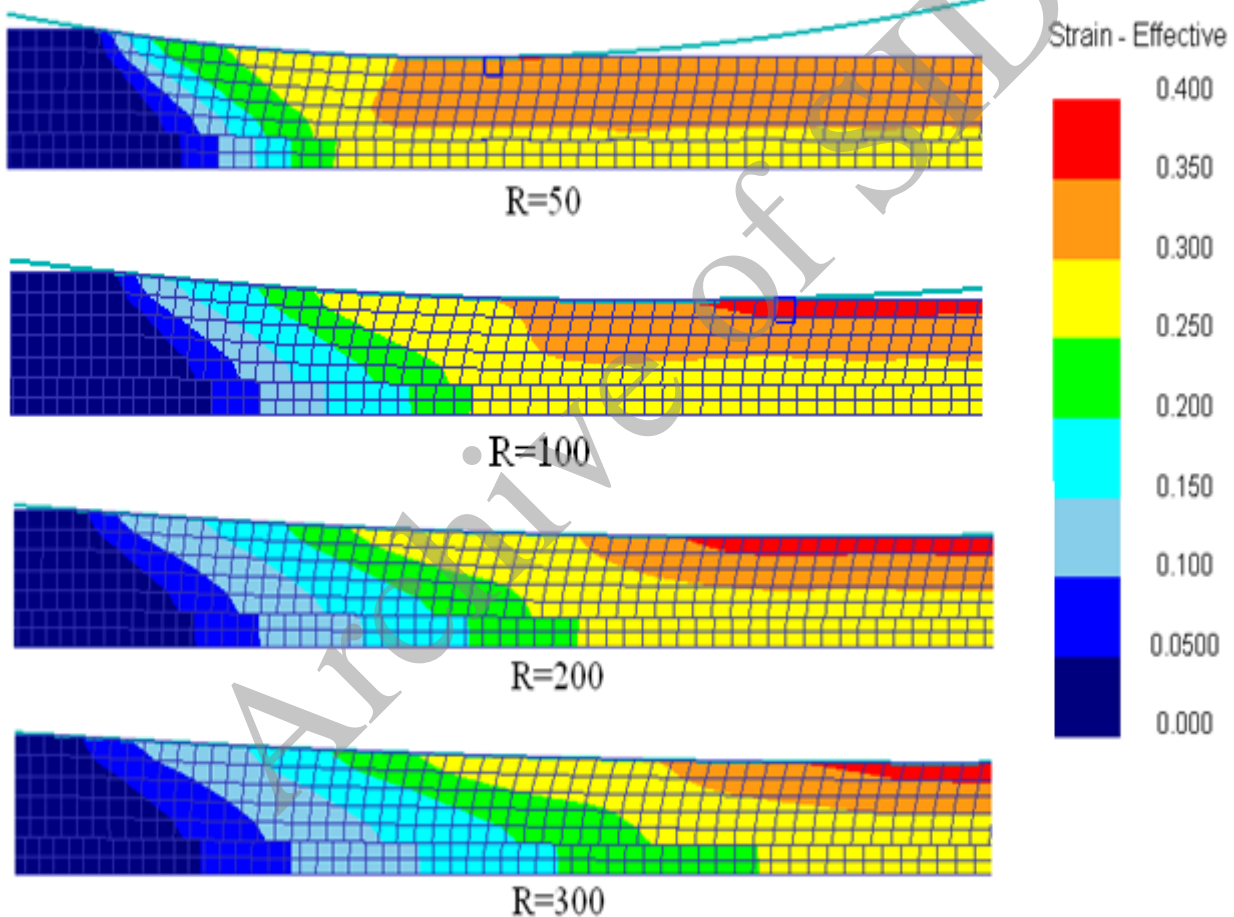
کاهش نیافته بلکه حدود ۲۰٪ افزایش می‌یابد که دلیل آن افزایش طول ناحیه تماس در نورد ساندویچی نسبت به نورد معمولی می‌باشد. در نورد ساندویچی توزیع کرنش‌ها یکنواخت‌تر از نورد معمولی است.

در نورد ساندویچی با افزایش درصد کار سرد، فشار نورد افزایش یافته و نقطه خنثی به سمت جلو (خروجی

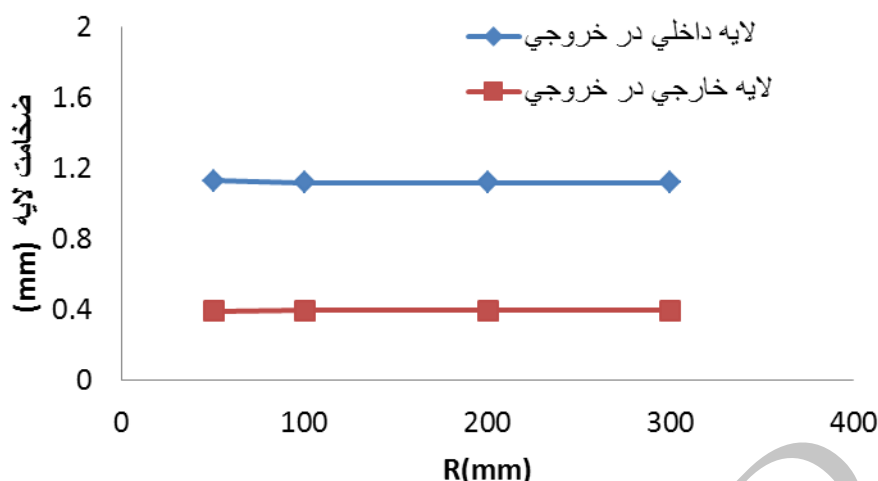
در این مقاله فرایند نورد یک نوع ورق نازک فولادی ضد زنگ به دو روش معمولی و ساندویچی مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه دو روش نشان می‌دهد که برای کاهش ضخامت یکسان، نیروی وارده به غلتک‌ها در نورد ساندویچی نسبت به نورد معمولی به میزان ۴۰٪ کاهش می‌یابد؛ اما گشتاور لازم برای نورد در حالت ساندویچی

می‌شود و توزیع کرنش‌ها غیریکنواخت‌تر می‌شود. با افزایش شعاع غلتک‌ها، فشار نورد افزایش یافته و نقطه خنثی به سمت ورودی نورد جابجا می‌شود. با افزایش شعاع غلتک‌ها، توزیع کرنش‌ها مقدار کمی غیریکنواخت می‌شود و افزایش شعاع غلتک‌ها بر تغییر ضخامت لایه‌ها تاثیر قابل توجهی ندارد.

نورد) جابجا می‌شود و افزایش گشتاور نورد با درصد کارسرد به صورت خطی می‌باشد. هم‌چنین با افزایش درصد کار سرد، ضخامت هر دو لایه در خروجی به صورت خطی کاهش می‌یابد. با اعمال تنش کششی، نیروی نورد کاهش یافته و تاثیر نیروی کشش از عقب در کاهش نیرو، بیش‌تر می‌شود. با افزایش مقدار فاکتور اصطکاک، نقطه ماکزیمم فشار (نقطه خنثی) به سمت ورودی نورد جا به جا



شکل ۲۰- تاثیر شعاع غلتک‌ها بر توزیع کرنش‌ها



شکل ۲۱- تاثیر شعاع غلتکها بر ضخامت لایهها

### References:

- 1- A.A.Afonja and D.H.Sansome, "A theoretical analysis of the sandwich rolling process", Int.J.Mech.Sci. 15 1-14, (1973).
- 2- Yasunori Harada and Masanobu Ohmori, "Sandwich rolling of sintered compacts of pure chromium", J.Mat.Proc. Tech. 137 117-122, (2003).
- 3- Zong-Ching Lin and Tang-Guo Huang, "Hot rolling of an aluminum-copper sandwich strip with the three-dimensional finite element method", J.Mat.Proc. Tech. 99 154-168, (2000).
- 4- Yeong-Maw Hwang, Hung-Hsiou Hsu and Yuh-Lin Hwang, "Analytical and experimental study on bonding behavior at the roll gap during complex rolling of sandwich sheets", Int.J.Mech.Sci. 42 2417-2437, (2000).
- 5- H. DaneshManesh and A. KarimiTaheri, "Theoretical and experimental investigation of cold rolling of tri-layer strip", J.Mat.Proc. Tech. (2004).
- 6- G.Y.Tzou, "Theoretical study on the cold sandwich sheet rolling considering Coulomb friction", J.Mat.P.Tech. (114) 41-50, (2001).
- 7- M.N. Huang, G.Y. Tzou and S.W. Syu, "Investigation on comparisons between two analytical models of sandwich sheet rolling bonded before rolling", J.Mat.Proc. Tech. 140 598-603, (2003).
- 8- Y.M Hwang, H.H.Hsu, H.J.lee, "Analysis of sandwich sheet rolling by stream function method", Int.J.Mech.Sci.37(3) 297-315, (1995).



9-H. Arabi, S.H. Seyedein, A. Mehryab, and B. Tolaminejad, Mathematical modeling and simulation of the interface region of a tri-layer composite material, brass-steel-brass, produced by cold rolling, International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 16(2), 189-196, 2009.

10-Zone-Ching Lin, Tang-Guo Huang, Hot rolling of an aluminum-copper sandwich at strip with the three-dimensional finite element method, Journal of Materials

Processing Technology, 99 154-168, (2000).

11-H.J.Kim,J.C.Bae, E.S.Park,M.Y.Huh,D.H.Kim, Production of Zr-based bulk metallic glass thin strips by means of sandwich rolling in the supercooled liquid region,J.Alloys and compounds,504S S271-S274, (2010).

12-W.F.Hasford,M.Caddell, Metalforming(Mechanics and Metalurgy), second edition, Prentice Hall, 1993.

Archive of SID