

## تحلیل اجزای محدود تاثیر پارامترهای فرایند نورد سرد ورقهای سه لایه آلومینیوم/ فولاد/ آلومینیوم و مس/ آلومینیوم/ مس

محمد صدیقی<sup>۱</sup>، ادوین گلستانیان<sup>۲</sup> و محمد هنرپیشه<sup>۳</sup>  
Sedighi@iust.ac.ir

### چکیده

در این مقاله بررسی نیروی نورد و سهم کاهش ضخامت لایه‌ها از کاهش ضخامت اعمالی در نورد سرد ورقهای چندلایه در دستور کار قرار گرفته است. برای این منظور دو ترکیب متفاوت ورقها انتخاب شده است. در ابتدا و بمنظور اعتبارسنجی نتایج شبیه سازی اجزای محدود، شرایط تست تجربی شبیه‌سازی اجزای محدود شده و با نتایج تجربی مقایسه شده تا صحت عملیات مشخص شود. سپس ترکیبهای مورد نظر از لایه‌ها بمنظور بررسی پارامترهای فوق در برنامه اجزای محدود قرار گرفته است. در پایان نیروی نورد، سهم کاهش ضخامت لایه‌ها از کاهش ضخامت اعمالی و تاثیر فاکتور اصطکاک بین ورق و غلتک بر نیروی نورد و کاهش ضخامت هر لایه بدست آمده است. نتایج نشان می‌دهند که علاوه بر نرمی و سفتی لایه‌ها، نسبت ضخامت پوشش به هسته نیز در کاهش ضخامت هر لایه موثر می‌باشد. همچنین با افزایش فاکتور اصطکاک بین ورق و غلتک، میزان کاهش ضخامت لایه پوشش کاهش و میزان کاهش ضخامت لایه هسته افزایش و نیروی نورد به صورت کلی افزایش می‌یابد.

### کلیدواژه:

ورق های چندلایه- شبیه‌سازی اجزای محدود- پارامترهای نورد

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، edvin361@yahoo.com

۳- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران honarpisheh@iust.ac.ir

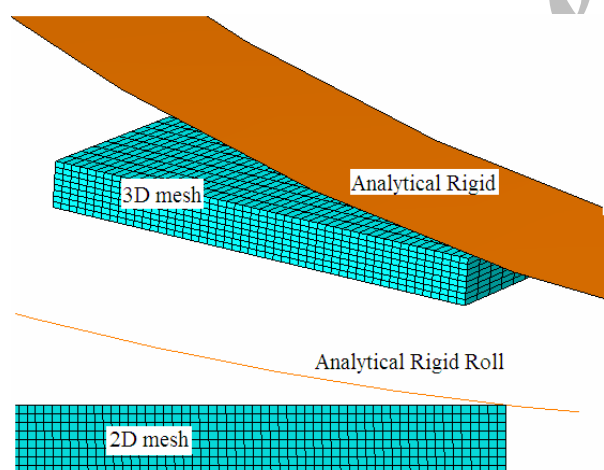
## ۱- مقدمه

ورقهای چندلایه متشکل از دو یا چند ماده متفاوت بصورت گسترده‌ای در صنعت بدلیل خواصی چون هدایت الکتریکی بالا، مقاومت خوردگی بالا و استحکام زیاد کاربرد فراوان داشته و از حدود سال ۱۹۶۰ که برای تولید سکه استفاده می‌شده، توسعه یافته است. تولید ورقهای چند لایه با نورد سرد مؤثرتر و اقتصادی‌تر از سایر روشهای تولید این ورقهاست (مانند شکل دهی انفجاری). این روش به دلیل مواد مختلف مورد استفاده در نورد و طبیعتاً استحکامهای تسلیم مختلف دارای درصد تغییر شکل متفاوت در هر فلز می‌باشد و این مهمترین مشکل در نورد ساندویچی بوده و بنابراین مکانیزم تغییر شکل این فرآیند نسبت به نوع تک فلزی آن دارای پیچیدگیهای زیادی است [۱]. مطالعات تئوری و تجربی زیادی در زمینه نورد سرد ورقهای چندلایه صورت گرفته است. غدیر و همکارانش [۲] به بررسی چقرمگی اتصال در اتصال دو ورق آلومینیومی با نورد سرد پرداخته‌اند. مداح حسینی و کوبکی [۳] به مطالعه شرایط اتصال نوردی ورقهای آلومینیومی پرداخته‌اند. ایزدجو و همکارانش [۴] تاثیر دمای نورد و میزان کاهش ضخامت جهت ایجاد اتصال بین ورقهای آلومینیومی را بررسی کردند. برخی محققین [۵-۷] نیروی نورد، توان تغییر شکل و کاهش ضخامت هر لایه را در نورد سرد ورق سه‌لایه بصورت تجربی و با تئوری حد فوقانی بررسی کرده‌اند. دانش‌منش و کریمی طاهری [۸] در مطالعه دیگری به بررسی نورد ورق دولایه و استحکام اتصال پرداخته‌اند. بررسی نورد ورق ساندویچی با تحلیل قاچی و با در نظرگیری اصطکاک کلمب از مواردی است که در زمینه ورقهای چندلایه به انجام رسیده است [۹]. البته مورد فوق با در نظر گرفتن اصطکاک برشی ثابت نیز به انجام رسیده است [۱۰، ۱۱]. مطالعاتی نیز در زمینه تاثیر دما و زمان آنیل بر خواص مکانیکی ورقهای سه‌لایه انجام شده است [۱۲، ۱۳]. در زمینه شبیه‌سازی المان محدود نورد ورقهای چندلایه مطالعات کمتری صورت گرفته که بعضاً لایه‌ها را بصورت متصل شده قبل از نورد [۱۴] و بعضاً بصورت لایه‌های جدا و با در نظرگیری اصطکاک کلمب مدل سازی کرده اند [۱۵]. همچنین در مطالعه‌ای صدیقی و همکارانش [۱۶] اثرات دماهای مختلف آنیل را بر روی استحکام باند جوش ورق دولایه مس-آلومینیوم بررسی کرده‌اند. آنها در مطالعه‌ای دیگر [۱۷] به بررسی تجربی و عددی اثرات کاهش ضخامت بر توزیع تنشهای پسماند در ورق سه لایه آلومینیوم-استیل ۳۰۴-آلومینیوم پرداخته‌اند. در این مقاله بررسی نرمی و سفتی لایه‌ها، نسبت ضخامت پوشش به هسته و تاثیر فاکتور اصطکاک بین ورق و غلتک بر نیروی نورد و سهم کاهش ضخامت هر لایه در نورد سرد ورقهای چندلایه در

دستور کار قرار گرفته است. برای این منظور از ورقهای چندلایه آلومینیوم-فولاد (سیستم آگزوز ماشین) و آلومینیوم-مس (وسایل آشپزخانه، مبدلهای حرارتی) که کاربرد وسیعی در صنایع مختلف دارند استفاده شده است.

## ۲- شبیه‌سازی عددی فرآیند

جهت مشخص شدن صحت عملیات شبیه‌سازی در ابتدا نسبتی از لایه‌های آلومینیوم و فولاد [۱] شبیه‌سازی و با نتایج تجربی مقایسه شده است. در این وضعیت لایه آلومینیوم به ضخامت ۱/۴mm به عنوان پوشش و لایه فولاد به ضخامت ۱mm به عنوان هسته می‌باشد. قطر غلتکهای نورد مورد استفاده ۱۰۰mm می‌باشد. همچنین سرعت خطی غلتکهای نورد برابر ۵m/min می‌باشد. شبیه‌سازی فرآیند نورد سرد ورقهای سه‌لایه در نرم‌افزار تجاری آباکوس (ABAQUS) و با کد صریح (explicit) به انجام رسیده است. شبیه‌سازی‌ها بصورت ۲ بعدی کرنش صفحه‌ای و ۳ بعدی انجام شده و به منظور کاهش زمان شبیه‌سازی‌ها تنها یک ربع از هر غلتک ترسیم شده است. غلتک بصورت صلب بوده و نوع المانهای استفاده شده برای ورق CPE4R در شبیه‌سازی دو بعدی و C3D8R در شبیه‌سازی سه بعدی می‌باشد. (شکل ۱)



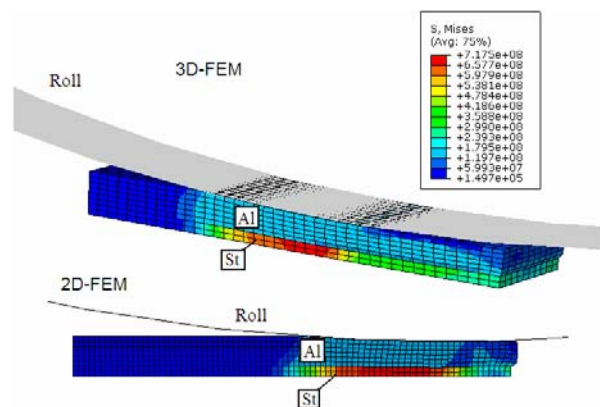
شکل (۱): نمایش المان بندی ورق در شبیه‌سازی دو بعدی و سه بعدی

در ابتدا جهت مشخص شدن صحت عملیات شبیه‌سازی، شرایط تست تجربی [۱] که در آن لایه آلومینیوم به ضخامت ۱/۴mm به عنوان پوشش و لایه فولاد به ضخامت ۱mm به عنوان هسته شبیه‌سازی شده و نتایج حاصله با نتایج تجربی [۱] مقایسه شده است. در ادامه نورد ورق‌های چند لایه آلومینیوم- فولاد-آلومینیوم با ضخامت پوشش ۰/۵mm و هسته ۳mm و مس-آلومینیوم-مس با ضخامت پوشش ۱mm و هسته ۱۳mm در برنامه المان محدود قرار

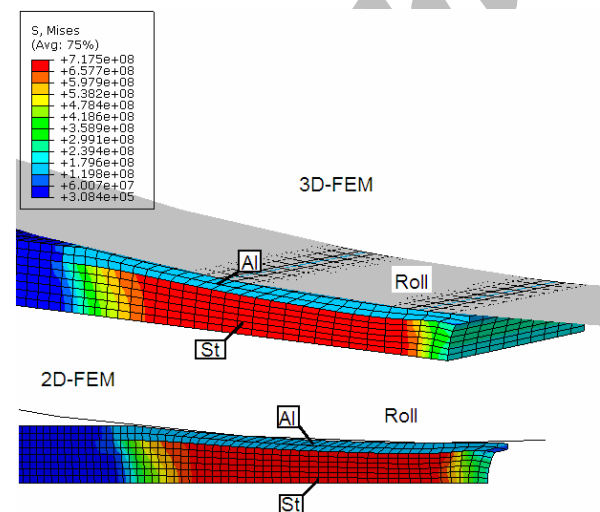
ضخامت پوشش ۱mm و هسته ۱۳mm در برنامه‌المان محدود قرار گرفته است.

### ۳- نتایج و بحث

در شکل (۳) تنش فون میزز در دولایه فولاد ۱mm و آلومینیوم ۱/۴mm در ۱۳٪ کاهش ضخامت و در شکل ۴ تنش فون میزز در دولایه فولاد ۳mm و آلومینیوم ۰/۵mm در ۳۰٪ کاهش ضخامت و در شکل ۵ تنش فون میزز در دولایه آلومینیوم ۱۳mm و مس ۱mm در ۲۰٪ کاهش ضخامت قابل مشاهده می‌باشند.



شکل (۳): نمایش تغییرات تنش در دو لایه فولاد ۱mm و آلومینیوم ۱/۴mm در کاهش ضخامت ۱۳٪



شکل (۴): نمایش تغییرات تنش در دو لایه فولاد ۳mm و آلومینیوم ۰/۵mm در کاهش ضخامت ۳۰٪

گرفته است. مقدار فاکتور اصطکاک بین ورق و غلتک در کلیه شبیه‌سازها برابر ۰/۸، که طبق رابطه (۱) که برای تبدیل فاکتور اصطکاک به ضریب اصطکاک می‌باشد، معادل ضریب اصطکاک ۰/۲۱ خواهد بود، و بین لایه‌ها فاکتور اصطکاک برابر ۱ می‌باشد (صطکاک چسبنده).

$$\mu = \frac{m}{1 + 0.5\pi + \cos^{-1}(m) + \sqrt{1 - m^2}} \quad (1)$$

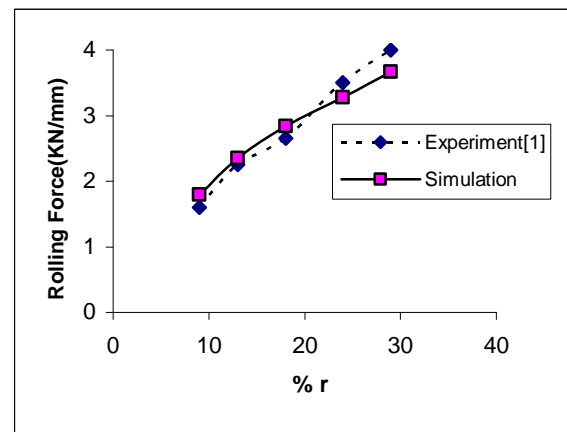
رابطه تنش-کرنش برای اعمال به نرم افزار برای سه جنس آلومینیوم، فولاد و مس به قرار زیر است:

$$\text{فولاد} \quad \bar{\sigma} = 944.8 \bar{\epsilon}^{0.14} \text{ MPa} \quad (2)$$

$$\text{آلومینیوم} \quad \bar{\sigma} = 183.2 \bar{\epsilon}^{0.045} \text{ MPa} \quad (3)$$

$$\text{مس} \quad \bar{\sigma} = 829.3 \bar{\epsilon}^{0.357} \text{ MPa} \quad (4)$$

در شکل (۲) نتایج حاصل از نیروی نورد برای نورد آلومینیوم-فولاد-آلومینیوم نشان داده شده و با نتایج تجربی مقایسه شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی بیانگر نزدیکی نتایج تجربی و شبیه‌سازی می‌باشد.

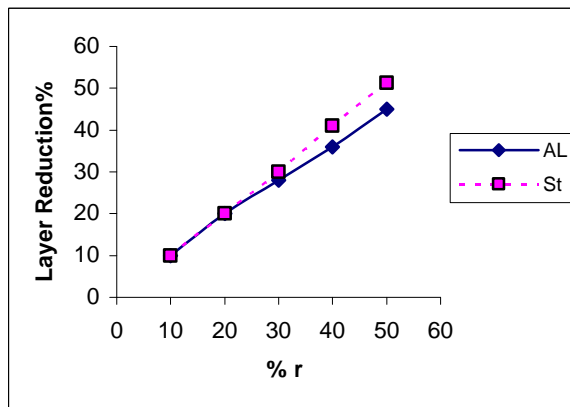


شکل (۲): مقایسه نیروی نورد بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی

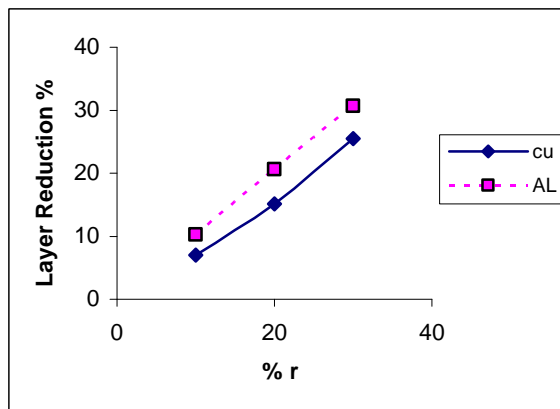
در این نمودار خطای میانگین ۷٪ برای نتایج تجربی و شبیه‌سازی بدست می‌آید که بیانگر صحت نتایج شبیه‌سازی شده می‌باشد. دلیل اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی ثابت گرفتن مقدار ضریب اصطکاک در شبیه‌سازی می‌باشد.

در ادامه نورد ورق‌های چند لایه آلومینیوم-فولاد-آلومینیوم با ضخامت پوشش ۰/۵mm و هسته ۳mm و مس-آلومینیوم-مس با

در شکل‌های (۷ و ۸) نسبت کاهش ضخامت لایه‌ها به کاهش ضخامت کلی ورق برای دو ورق آلومینیوم/ فولاد/ آلومینیوم (ضخامت پوشش ۰/۵ mm و ضخامت هسته ۳mm) و مس/ فولاد/ مس نشان داده شده است.



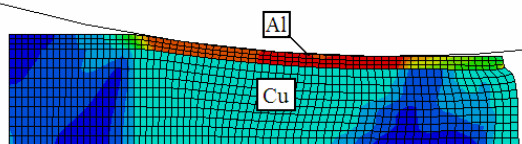
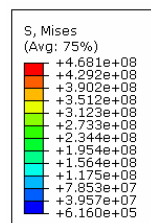
شکل(۷): نسبت کاهش ضخامت لایه‌ها به کاهش ضخامت کلی ورق برای آلومینیوم/ فولاد/ آلومینیوم(فولاد ۳mm، آلومینیوم ۰/۵mm)



شکل(۸): نسبت کاهش ضخامت لایه‌ها به کاهش ضخامت کلی ورق برای مس/ آلومینیوم/ مس

در شکل‌های (۹ و ۱۰) تاثیر فاکتور اصطکاک بین ورق و غلتک بر کاهش ضخامت هر لایه در نورد ورق‌های چندلایه نشان داده شده است.

در شکل(۱۱) تاثیر فاکتور اصطکاک بین ورق و غلتک بر نیروی نورد در هر دو ورق چندلایه نشان داده شده است.



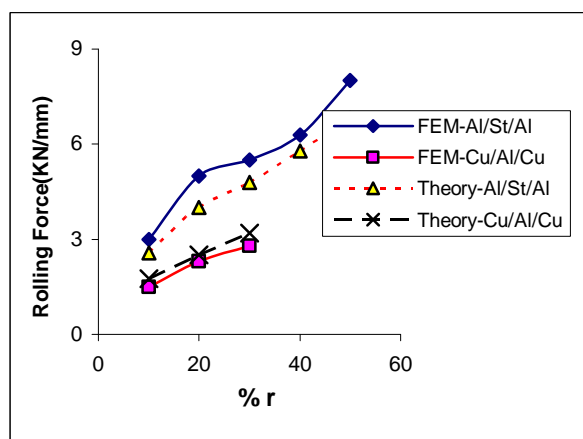
شکل(۵): نمایش تغییرات تنش در دو لایه آلومینیوم و مس در کاهش ضخامت ۲۰٪

در شکل(۶) نیروی نورد بر حسب کاهش ضخامت برای دو ورق آلومینیوم/ فولاد/ آلومینیوم (ضخامت پوشش ۰/۵mm و ضخامت هسته ۳mm)، و مس/ آلومینیوم/ مس نشان داده شده و با رابطه تئوری (۵) مقایسه شده است [۱۸].

$$F = b\bar{Y}\sqrt{R'\Delta h}\left(1 + \frac{1.6\mu\sqrt{R'\Delta h} - 1.2\Delta h}{h_1 + h_2}\right) \quad (5)$$

در این رابطه  $b$  پهنای ورق بوده که از میانگین پهنا در ورودی و خروجی بدست می‌آید،  $R'$  شعاع تخت شده غلتک،  $\Delta h$  کاهش ضخامت،  $\mu$  ضریب اصطکاک،  $h_1$  ضخامت ورق در ورودی و  $h_2$  ضخامت ورق در خروجی می‌باشند. همچنین  $\bar{Y}$  تنش تسلیم مؤثر می‌باشد که از رابطه (۶) بدست می‌آید.

$$\bar{Y} = \frac{Y_a h_a + Y_b h_b + Y_c h_c}{h_a + h_b + h_c} \quad (6)$$



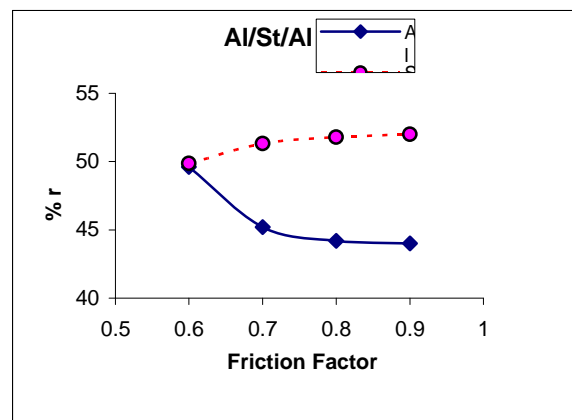
شکل(۶): نیروی نورد بر حسب کاهش ضخامت برای آلومینیوم/ فولاد/ آلومینیوم (فولاد ۳mm، آلومینیوم ۰/۵ mm) و مس/ آلومینیوم/ مس

اصطکاک در نورد با افزایش کاهش ضخامت و افزایش نیروی نورد، افزایش می‌یابد، بنابراین جهت بدست آوردن نتایج معتبرتر در شبیه‌سازی، این پارامترها باید لحاظ گردد. در شکل (۶) مقدار متوسط خطای بدست آمده بین نتایج شبیه‌سازی المان محدود و رابطه تئوری برای دو ورق سه لایه آلومینیوم/ فولاد/ آلومینیوم و مس/ آلومینیوم/ مس به ترتیب ۱۳/۹۷٪ و ۱۲/۹۳٪ می‌باشند.

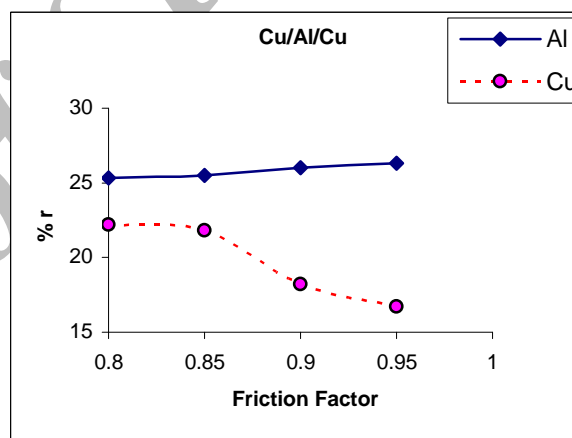
در ورقهای چندلایه به دلیل تنش تسلیم متفاوت لایه‌ها، میزان کاهش ضخامت هر لایه متفاوت می‌باشد و انتظار بر این است که لایه نرمتر کاهش ضخامت بیشتری نسبت به لایه سفتتر داشته باشد [۵] در حالی که در شکل (۷) با توجه به اینکه آلومینیوم نرمتر از فولاد می‌باشد، ولی کاهش ضخامت آلومینیوم کمتر از فولاد بدست آمده است. علت آن ضخامت کم آلومینیوم نسبت به فولاد می‌باشد (نسبت ضخامت ۶) ولی در شکل (۸) با توجه به اینکه هم آلومینیوم نرمتر از مس بوده و هم ضخامت لایه مس نسبت به آلومینیوم کم می‌باشد (نسبت ضخامت ۱۳) در نتیجه کاهش ضخامت آلومینیوم بیشتر از مس می‌باشد. بنابراین علاوه بر بحث نرمتر و سفت‌تر بودن لایه‌ها، پارامتر نسبت ضخامت پوشش به هسته نیز در میزان کاهش ضخامت لایه‌ها موثر می‌باشد. از دیگر پارامترهای مؤثر در فرایند نورد، فاکتور اصطکاک می‌باشد. مقدار فاکتور اصطکاک در بین لایه‌ها در نورد ورقهای چندلایه برابر ۱ و به معنای عدم لغزش لایه‌ها نسبت به یکدیگر می‌باشد. در شکل‌های (۹ و ۱۰) با افزایش مقدار فاکتور اصطکاک بین ورق و غلتک میزان کاهش ضخامت لایه پوشش کاهش و میزان کاهش ضخامت لایه هسته افزایش یافته است. در شکل (۱۱) با افزایش میزان فاکتور اصطکاک بین ورق و غلتک در حالت کلی نیروی نورد افزایش یافته است که در نورد آلومینیوم/ فولاد/ آلومینیوم افزایش شدیدتر از نورد مس/ آلومینیوم/ مس بوده است که می‌تواند به دلیل آرایش لایه‌های پوشش و هسته در این دو ورق چندلایه باشد.

#### ۴- جمع‌بندی

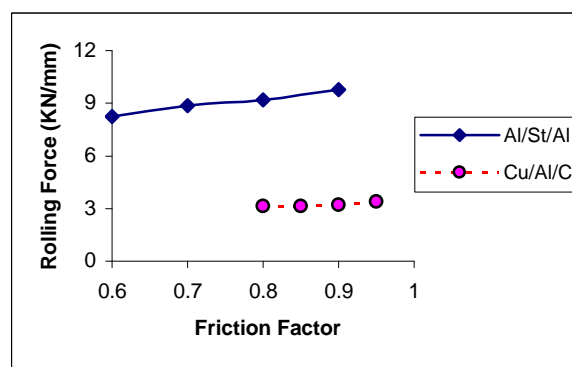
استفاده از ورقهای چندلایه در صنایع مختلف بدلیل بهره‌مندی از خواص مختلف ماده همچون وزن سازه، استحکام، مسایل مربوط به خوردگی و ..... ایجاب می‌کند تا روش مناسب برای ساخت ورقهای چندلایه مورد ارزیابی گیرد. بطور کلی انتخاب تکنولوژی ساخت مناسب و کم‌هزینه امتیاز مثبتی جهت ساخت و تولید فرآیند مورد نظر می‌باشد. یکی از این روشها، نورد سرد ورقهای چندلایه می‌باشد. بنابراین باید تحلیل پارامترهای این فرآیند به سادگی و با ابزاری مناسب به انجام رسد. با توجه به این مقاله، مشاهده شد که استفاده از شبیه‌سازی در نرم‌افزار المان محدود نتایج قابل قبولی در



شکل (۹): تاثیر فاکتور اصطکاک بر کاهش ضخامت هر لایه در نورد آلومینیوم/ فولاد/ آلومینیوم (فولاد ۳mm، آلومینیوم ۰/۵mm)



شکل (۱۰): تاثیر فاکتور اصطکاک بر کاهش ضخامت هر لایه در نورد مس/ آلومینیوم/ مس



شکل (۱۱): تاثیر فاکتور اصطکاک بر نیروی نورد در نورد سرد ورقهای چندلایه

در شکل (۲) خطای میانگین ۷٪ برای نتایج تجربی و عددی بدست می‌آید که دلیل اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی، ثابت گرفتن مقدار ضریب اصطکاک در شبیه‌سازی می‌باشد. مقدار ضریب

- [9] Tzou, G. Y., "Theoretical Study on the Cold Sandwich Sheet Rolling Considering Coulomb Friction", *Journal of Materials Processing Technology* 114, 2001, pp. 41-50.
- [10] Tzou, G. Y., Tieu, A. K., Huang, M. N., Lin, C. Y., and Wu, E. Y., "Analytical Approach to the Cold-and-Hot Bond Rolling of Sandwich Sheet with Outer Hard and Inner Soft Layers", *Journal of Materials Processing Technology* 125-126, 2002, pp. 664-669.
- [11] Huang, M. N., Tzou, G. Y., and Syu, S. W., "Investigation on Comparisons Between two Analytical Models of Sandwich Sheet Rolling Bonded Before Rolling", *Journal of Materials Processing Technology* 140, 2003, pp. 598-603.
- [12] Danesh Manesh, H., and Karimi Taheri, A., "The Effect of Annealing Treatment on Mechanical Properties of Aluminum Clad Steel Sheet", *Journal of Materials and Design* 24, 2003, pp. 617-622.
- [13] Lee, J. E., Bae, D. H., Chung, W. S., Kim, K. H., Lee, J. H., and Cho, Y. R., "Effects of Annealing on the Mechanical and Interface Properties of Stainless Steel/Aluminum/Copper Clad-Metal Sheets", *Journal of Materials Processing Technology* 187-188, 2007, pp. 546-549.
- [14] Frank Nowicke, Jr., Zavaliangos, A., and Rogers, H. C., "The Effect of Roll and Clad Sheet Geometry on the Necking Instability During Rolling of Clad Sheet Metals", *International Journal of Mechanical Sciences* 48, 2006, pp. 868-877.
- [15] Kang, H. G., Kim, J. K., Huh, M. Y., and Engler, O., "A Combined Texture and FEM Study of Strain States During Roll-Cladding of Five-Ply Stainless Steel/Aluminum Composites", *Journal of Materials Science and Engineering A* 452-453, 2007, pp. 347-358.
- [16] Elahi, P., Sedighi, M., Honarpisheh, M., and Molla aghaei, M., "The Effect of Annealing Temperature on the Strength of Interface Bond in Cold Weld Rolled Multilayer", *International conference on welding technologies*, Ankara, Turkey, 11-13 June 2009, pp. 300-305.
- [17] Molla'aghaei, M., Sedighi, M., Honarpisheh, M., and Elahi, P., "Numerical and Experimental Investigation of Reduction Effects on Residual Stress in Multilayer Strip in Cold Rolling", *Proceedings of the Third International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization Sharjah*, U.A.E January 20-22, 2009.
- [18] Mamalis, A. G., Vaxevanidis, N. M., and Szalay, A., "Cold Rolling of Multi-Layer Explosively Clad Strips", *Int. J. Math. Tools Manufact.* Vol. 36. No. 9., 1996, pp. 1033-1044.
- مورد نورد ورقهای چندلایه می‌دهد. بنابراین پیشگویی نیروی نورد و سهم کاهش ضخامت ایجاد شده در هر ورق با استفاده از شبیه‌سازی با خطای ناچیز بخوبی قابل انجام می‌باشد. از سوی دیگر پارامتر نسبت ضخامت لایه‌ها علاوه بر سفتی و نرمی لایه‌ها(مدول الاستیسیته)، پارامتری مؤثر در کاهش ضخامت لایه‌ها می‌باشد. همچنین مقدار فاکتور اصطکاک بین ورق و غلتک نیز از دیگر پارامترهای مؤثر در مقدار نیروی نورد و کاهش ضخامت هر لایه در نورد ورقهای چندلایه می‌باشد.

## ۵- مراجع

- [1] Hwang, Y. M., Hsu, H. H., and Lee, H. J., "Analysis of Sandwich Sheet Rolling by Stream Function Method", *International Journal of Mechanical Sciences* 37 (3), 1995, pp. 297-315.
- [2] Quadir, M. Z., Wolz, A., Hoffman, M., and Ferry, M., "Influence of Processing Parameters on the Bond Toughness of Roll-bonded Aluminium Strip", *Journal of Scripta Materialia* 58, 2008, pp. 959-962.
- [3] Madaah-Hosseini, H. R., and Kokabi, A. H., "Cold Roll Bonding of 5754-Aluminum Strips", *Journal of Materials Science and Engineering A335*, 2002, pp. 186-190.
- [4] Eizadjou, M., Danesh Manesh, H., and Janghorban, K., "Investigation of Roll Bonding Between Aluminum Alloy Strips", *Journal of Materials and Design* 29, 2008, pp. 909-913.
- [5] Danesh Manesh, H., and Karimi Taheri, A., "Theoretical and Experimental Investigation of Cold Rolling of Tri-Layer Strip", *Journal of Materials Processing Technology* 166, 2005, pp. 163-172.
- [6] Jiang Yong, Peng Dashu, Lu Dong, and Li Luoxing, "Analysis of Clad Sheet Bonding by Cold Rolling", *Journal of Materials Processing Technology* 105, 2000, pp. 32-37.
- [7] Hwang, Y. M., Hsu, H. H., and Hwang, Y. L., "Analytical and Experimental Study on Bonding Behavior at the Roll Gap During Complex Rolling of Sandwich Sheets", *International Journal of Mechanical Sciences* 42, 2000, pp. 2417-2437.
- [8] Danesh Manesh, H., and Karimi Taheri, A., "An Investigation of Deformation Behavior and Bonding Strength of Bimetal Strip During Rolling", *Journal of Mechanics of Materials* 37, 2005, pp. 531-542.