

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،  
ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع  
این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه شهرکرد است.



پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

بررسی عیوب موج در فرآیند نورد سرد با استفاده از شبیه سازی اجزای محدود

استاد راهنما:

دکتر مهدی سلمانی تهرانی

استاد مشاور:

دکتر شهرام هادیان

پژوهشگر:

محمد تاجی

بهمن ماه ۱۳۹۰



پایان‌نامه‌ی آقای محمد تاجی جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی با عنوان «بررسی عیوب موج در فرآیند نورد سرد با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود» در تاریخ ۱۳۹۰/۱۲/۹ با حضور هیأت داوران زیر بررسی و با نمره ۱۷.۴ مورد تصویب نهایی قرار گرفت.

- امضا ۱. استاد راهنمای پایان‌نامه دکتر مهدی سلمانی تهرانی با مرتبه‌ی علمی استادیار
- امضا ۲. استاد مشاور پایان‌نامه دکتر شهرام هادیان جزی با مرتبه‌ی علمی استادیار
- امضا ۳. استاد داور داخلی گروه دکتر یعقوب طادی بنی با مرتبه‌ی علمی استادیار
- امضا ۴. استاد داور داخلی گروه دکترهادی همایی با مرتبه‌ی علمی استادیار

دکتر بهزاد قاسمی  
مدیر تحصیلات تکمیلی دانشکده فنی و مهندسی

**تقدیم به:**

**تمام پویندگان طریقت علم و معرفت  
و تقدیم به مادر عزیزم**

## تشکر و قدردانی

تقدیر و تشکر شایسته از استاد فرهیخته آقای دکتر مهدی سلمانی تهرانی که همکاری صمیمانه را در این تحقیق نمودند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

همچنین از استاد مشاور خود، جناب آقای دکتر شهرام هادیان که زحمت مشاوره‌ی این پایان نامه را به عهده داشتند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

بدین ترتیب از همکاری عزیزان در دفتر فنی تولید نورد دو قفسه ای مجتمع فولاد مبارکه که کمال همکاری را در این تحقیق نمودند تشکر و قدردانی می‌گردد.

محمد تاجی

بهمن‌ماه ۱۳۹۰

## فهرست مطالب

|    |   |
|----|---|
| ۱  | فهرست مطالب   |
| ۴  | فهرست شکل‌ها  |
| ۶  | فهرست جدول‌ها   |
| ۶  | فهرست علائم   |
|    | <b>فصل اول: مقدمه</b>   |
| ۷  | ۱-۱ تاریخچه   |
| ۸  | ۲-۱ معرفی فرآیند شکل دهی  |
| ۹  | ۳-۱ نورد  |
| ۹  | ۱-۳-۱ دستگاه نورد   |
| ۱۱ | ۲-۳-۱ نورد گرم  |
| ۱۲ | ۳-۳-۱ نورد میله و پروفیل  |
| ۱۲ | ۴-۳-۱ مکانیزم نیش   |
| ۱۳ | ۴-۳-۱ نورد سرد  |
| ۱۵ | ۴-۱ تعریف عیوب موج در ورق   |
| ۱۶ | ۵-۱ آشنایی با تجهیز استروسومتر                                      |
| ۱۷ | ۱-۵-۱ نگاهی کلی بر استروسومتر                                       |
| ۱۷ | ۲-۵-۱ سیستم استروسومتر جهت کنترل تختی                               |
| ۱۸ | ۶-۱ انواع عیوب موج در ورق   |
| ۲۱ | ۷-۱ اهمیت کیفیت صافی سطح ورق در نورد سرد                            |
| ۲۱ | ۸-۱ مروری بر پژوهش‌های پیشین  |
| ۲۳ | ۹-۱ اهداف و ساختار پایان‌نامه                                       |
|    | <b>فصل دوم: مدل‌سازی فرایند به کمک نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS</b> |
| ۲۴ | ۱-۲ مقدمه   |
| ۲۵ | ۲-۲ صورت مسأله  |

|    |  |
|----|--|
| ۲۵ | ۳-۲ شبیه سازی و مشاهده موج ناشی از تحذب نامناسب غلتک                           |
| ۲۶ | ۱-۳-۲ مدل سازی در نرم افزار ABAQUS و مشاهده موج ناشی از نامناسب بودن تحذب غلتک |
| ۲۷ | ۲-۳-۲ غلتکها   |
| ۲۷ | ۳-۳-۲ نوار ورق   |
| ۲۸ | ۴-۳-۲ هندسه و خواص مادی  |
| ۲۹ | ۵-۳-۲ المان مورد استفاده   |
| ۲۹ | ۶-۳-۲ شبکه بندی  |
| ۳۰ | ۷-۳-۲ آرایش اولیه  |
| ۳۰ | ۸-۳-۲ تماسها و مدل اصطکاکی   |
| ۳۱ | ۹-۳-۲ گامهای حل  |
| ۳۳ | ۱۰-۳-۲ شرایط مرزی و بارگذاری   |
| ۳۴ | ۴-۲ شبیه سازی فرایند و مشاهده موج ناشی از نامناسب بودن نیروهای نورد            |
| ۳۴ | ۱-۴-۲ هندسه و خواص مادی  |
| ۳۶ | ۲-۴-۲ شرایط مرزی و بارگذاری  |

### فصل سوم: نتایج مدل سازی فرایند به کمک نرم افزار ABAQUS

|    |   |
|----|---|
| ۳۷ | ۱-۳ مقدمه   |
| ۳۷ | ۲-۳ نتایج شبیه سازی فرایند و مشاهده نتایج حالت ایده آل                    |
| ۴۰ | ۳-۳ نتایج شبیه سازی فرایند و مشاهده موج ناشی از تحذب نامناسب غلتک         |
| ۴۰ | ۱-۳-۳ نتایج شبیه سازی فرایند و مشاهده موج ناشی از تقعر غلتک کاری          |
| ۴۲ | ۲-۳-۳ نتایج شبیه سازی فرایند و مشاهده موج ناشی از تحذب غلتک کاری          |
| ۴۵ | ۴-۳ نتایج شبیه سازی فرایند و مشاهده موج ناشی از نامناسب بودن نیروهای نورد |
| ۴۷ | ۵-۳ روش های مقابله با عیوب ورق  |
| ۴۸ | ۱-۵-۳ سیستم ضخامت سنج قبل از قفسه نورد                                    |
| ۴۸ | ۲-۵-۳ سیستم ضخامت سنج بین دو قفسه نورد                                    |
| ۴۸ | ۳-۵-۳ سیستم ضخامت سنج بین دو قفسه نورد                                    |
| ۴۹ | ۷-۳ راه کارهای بر طرف کردن عیوب موج در نورد                               |
| ۴۹ | ۱-۷-۳ نیروی خمش   |
| ۴۹ | ۲-۷-۳ اصلاح عیوب سطحی غلتک های کاری نورد سرد                              |



فصل چهارم: جمع بندی و پیشنهادات

۱-۴ جمع بندی نتایج

۲-۴ پیشنهادات

منابع و مراجع

چکیده انگلیسی

۵۱

۵۳

۵۴

۵۶

## فهرست شکل ها

- شکل (۱-۱): هندسه قطعه کار هنگام نورد ۹
- شکل (۲-۱): شکل شماتیک قفسه چهار غلتکه ۱۰
- شکل (۳-۱): شکل شماتیک فرآیند نورد سرد ۱۴
- شکل (۴-۱): معرفی پارامترهای بیانگر ناهمواری موجی شکل در ورق ۱۶
- شکل (۵-۱): رول استروسومتر ۱۷
- شکل شماره ۱-۶ (انواع عیوب موج در ورق) ۱۹
- شکل شماره ۱-۷ (موج میانی) ۲۰
- شکل شماره ۱-۸ (موج کناری) ۲۰
- شکل (۱-۲): هندسه‌ی مقطع پروفیل ورق متقارن و غلتک‌ها ۲۶
- شکل (۲-۲): جزئیات شبکه‌بندی مدل اجزای محدود ۲۹
- شکل (۳-۲): آرایش اولیه‌ی مدل اجزای محدود در نرم‌افزار ABAQUS ۳۱
- شکل (۴-۲): هزینه‌ی محاسباتی در برابر اندازه‌ی مدل با استفاده از روش‌های صریح و ضمنی ۳۲
- شکل (۵-۲): نمایش شماتیک الگوی دامنه‌ی هموار در اعمال تغییر مکان ۳۴
- شکل (۱-۳): نمایش توزیع تنش معادل میزز در ورق خروجی ۳۸
- شکل (۲-۳): نمایش سه بعدی تغییر مکان عمود بر روی ورق ۳۹
- شکل (۳-۳): نمودار تغییر مکان عمود بر ورق نقاط کناری ورق ۳۹
- شکل (۴-۳): نمایش توزیع تنش معادل میزز در ورق خروجی ۴۰
- شکل (۵-۳): نمایش سه بعدی تغییر مکان عمود بر روی ورق ۴۱
- شکل (۶-۳): نمودار تغییر مکان عمود بر ورق نقاط کناری ورق ۴۱
- شکل (۷-۳): نمودار توزیع تنش معادل میزز در نقاط کناری ورق خروجی ۴۲
- شکل (۸-۳): نمایش توزیع تنش معادل میزز در ورق خروجی ۴۳
- شکل (۹-۳): نمایش سه بعدی تغییر مکان عمود بر روی ورق ۴۳
- شکل (۱۰-۳): نمودار تغییر مکان عمود بر ورق نقاط میانی ورق ۴۴
- شکل (۱۱-۳): نمودار توزیع تنش معادل میزز در نقاط میانی ورق خروجی ۴۴
- شکل (۱۲-۳): نمایش توزیع تنش معادل میزز در ورق خروجی ۴۵

- شکل (۳-۱۳): نمایش سه بعدی تغییر مکان عمود بر روی ورق  
شکل (۳-۱۴): نمودار تغییر مکان عمود بر ورق نقاط کناری ورق  
شکل (۳-۱۵): نمودار توزیع تنش معادل میز در نقاط کناری ورق خروجی

## فهرست جدول ها

|    |  |
|----|--|
| ۲۷ | جدول (۱-۲): تعریف کمیت‌های هندسی شکل (۱-۲) |
| ۲۸ | جدول (۲-۲): مشخصات غلتک                    |
| ۲۸ | جدول (۳-۲): مشخصات هندسی و مادی ورق        |
| ۲۹ | جدول (۴-۲): مشخصات مادی ورق                |
| ۳۵ | جدول (۲-۲): مشخصات غلتک                    |
| ۳۵ | جدول (۳-۲): مشخصات هندسی و مادی ورق        |
| ۳۶ | جدول (۴-۲): مشخصات مادی ورق                |

## فهرست علائم

|           |                               |
|-----------|-------------------------------|
| $\lambda$ | طول موج                       |
| $f$       | ارتفاع موج                    |
| $w$       | میزان موجی بودن               |
| $d$       | قطر پایه غلتک کاری            |
| $D_w$     | قطر غلتک کاری                 |
| $L_w$     | طول غلتک کاری                 |
| $L_{wb}$  | طول بین یاتاقان های غلتک کاری |
| $C_w$     | تحدب غلتک کاری                |
| $h_i$     | ضخامت ورق ورودی               |
| $h_o$     | ضخامت ورق خروجی               |
| $W$       | عرض ورق                       |
| $P$       | نیروی جدا کننده               |
| $F$       | نیروی نورد                    |

## فصل دوم

### مدلسازی فرایند به کمک نرم افزار ABAQUS

#### ۲-۱ مقدمه

در این فصل جزییات مدلسازی فرایند با استفاده از نرم افزار ABAQUS توضیح داده می شود. دو هدف اصلی در این فصل دنبال می شوند که عبارتند از:

۱- بیان دقیق صورت مسأله.

۲- ارائه جزییات مدلسازی.

ابتدا صورت فیزیکی مسأله که قرار است مدلسازی و تحلیل شود، شرح داده می شود. به دنبال آن جزییات مدلسازی با استفاده از نرم افزار ABAQUS ارائه می شود. در حقیقت در مسیر مدلسازی هر مسأله فیزیکی به کمک یک نرم افزار، کاربر در هر مرحله ممکن است با انتخابهای مختلفی روبرو شود. دستیابی به پاسخهای صحیح با صرف هزینه کمتر، مستلزم آگاهی از قابلیت های نرم افزار و نیز تجربه است. در این فصل سعی شده است نکات مهمی را که در مسیر مدلسازی و تحلیل این فرایند، از راهنماهای نرم افزار یا تجربیات

کسب شده به دست آمده، بیان شوند. فصل حاضر پیش‌درآمد لازم برای فصل بعد است که به ارزیابی پاسخ‌های ABAQUS می‌پردازد. به علاوه مطالب این فصل می‌تواند به پژوهشگران بعدی کمک کند تا برای تکرار شبیه‌سازی‌های مشابه، مسیر کوتاه‌تری پیش رو داشته باشند.

## ۲-۲ صورت مسئله

علت اصلی به وجود آمدن پدیده موج در فرآیند نورد سرد نامناسب بودن نیروهای نورد (نا بالانسی نیروهای نورد) و نامناسب بودن تحذب کنترل شده غلتک کاری و همچنین نامناسب و تنظیم نبودن نیروهای بندینگ می‌باشد برای اینکه بتوانیم موج (اعم از موج کناری، موج میانی و ...) را با استفاده از نرم افزار ABAQUS مشاهده کنیم ابتدا لازم است که صورت مسئله را تعریف کنیم که به منظور رسیدن به این هدف دو شبیه‌سازی با شرایط مختلف در نرم افزار انجام شد که به شرح ذیل می‌باشد:

- ۱- شبیه‌سازی و مشاهده موج ناشی از تحذب نامناسب غلتک
- ۲- شبیه‌سازی فرایند و مشاهده موج ناشی از نامناسب بودن نیروهای نورد

## ۲-۳ شبیه‌سازی و مشاهده موج ناشی از تحذب نامناسب غلتک

شبیه‌سازی در در این بخش، بدین صورت می‌باشد که با در نظر گرفتن یک غلتک کاری و نصف ضخامت ورق و دادن شرایط تقارن و در نظر گرفتن تحذب منفی و مثبت برای غلتک (مقعر و محدب بودن غلتک) انجام شده است. تقعر هنگامی به وجود می‌آید که تحذب کنترل شده به غلتک مناسب نباشد و یا اینکه تحذب کنترل شده وجود نداشته باشد و در نهایت غلتک کاری به علت نیروی گسترده‌ای که ناشی از عکس‌العمل ورق می‌باشد دچار تقعر و تغییر شکل الاستیک در حین فرآیند نورد سرد می‌شود همچنین اگر تحذب کنترل شده در ورق بیش از حد باشد غلتک در حین فرآیند نورد سرد محدب می‌شود و در نهایت نامناسب بودن تحذب غلتک باعث ایجاد موج در ورق می‌شود. در زیر جزئیات شبیه‌سازی به طور کامل شرح داده شده است.

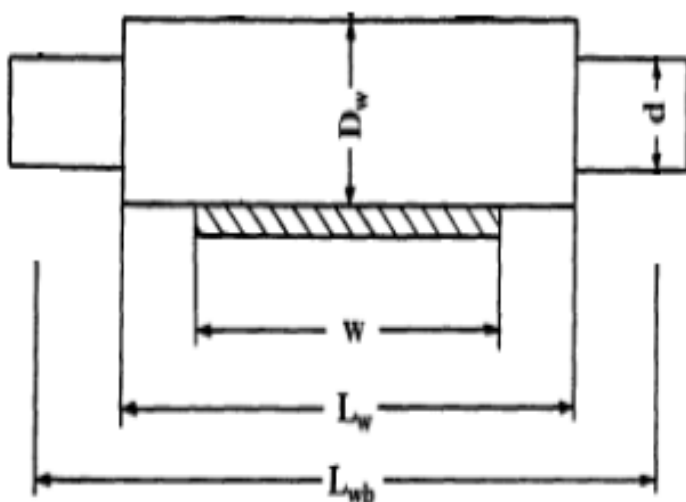
شایان ذکر است اکثر ابعاد و خصوصیات در نظر گرفته شده مطابق شرایط واقعی در نورد دو قفسه ای فولاد مبارکه می‌باشد.

۱-۳-۲ مدل‌سازی در نرم‌افزار ABAQUS و مشاهده موج ناشی از نامناسب بودن تحدب

غلنک

در این پایان‌نامه از نسخه‌ی ۶/۱۰ نرم‌افزار ABAQUS استفاده شده است. در شکل (۱-۲) مقطع ورق

متقارن با غلنک‌کاری بالایی نشان داده شده است.



شکل (۱-۲): هندسه‌ی مقطع پروفیل ورق متقارن و غلنک‌ها

جدول (۲-۱): تعریف کمیت‌های هندسی شکل (۲-۱)

|          |                               |
|----------|-------------------------------|
| $d$      | قطر پایه غلتک کاری            |
| $D_w$    | قطر غلتک کاری                 |
| $L_w$    | طول غلتک کاری                 |
| $L_{wb}$ | طول بین یاتاقان های غلتک کاری |
| $C_w$    | تحدب غلتک کاری                |
| $h_i$    | ضخامت ورق ورودی               |
| $h_o$    | ضخامت ورق خروجی               |
| $W$      | عرض ورق                       |
| $P$      | نیروی جدا کننده               |
| $F$      | نیروی نورد                    |

### ۲-۳-۲ غلتک‌ها

غلتک‌ها در مدل‌سازی به صورت صلب در نظر گرفته شده اند. در ABAQUS جسم صلب را می‌توان به دو صورت تعریف کرد؛ جسم صلب تحلیلی<sup>۱</sup> و جسم صلب گسسته<sup>۲</sup>. به دلیل کارایی محاسباتی، ارجحیت با مدل جسم صلب تحلیلی است. اما محدودیت اصلی استفاده از جسم صلب تحلیلی در شکل هندسی آن است. در حقیقت مدل جسم صلب تحلیلی برای اجسام با شکل هندسی ساده‌تر قابل استفاده است. برای شکل‌های پیچیده‌تر باید از مدل جسم صلب گسسته استفاده شود. تفاوت دیگر این دو مدل در شبکه‌بندی آن‌ها است. جسم صلب تحلیلی نیازی به شبکه‌بندی ندارد. اما جسم صلب گسسته باید با استفاده از یکی از المان‌های صلب مناسب، شبکه‌بندی شود. همچنین جسم صلب تحلیلی هم از نظر محاسباتی اندکی به صرفه‌تر از مدل جسم صلب گسسته است و هم دارای سطح هموارتری است. به همین دلایل در این پایان‌نامه از مدل جسم صلب تحلیلی برای غلتک‌ها استفاده شده است.

### ۲-۳-۲ نوار ورق

برای توصیف نحوه‌ی مدل‌سازی ورق هندسه‌ی آن، خواص مادی، المان مورد استفاده و چگونگی شبکه‌بندی توسط المان‌ها دارای اهمیت است که در ذیل توضیح داده شده اند.

<sup>1</sup> Analytical Rigid Body

<sup>2</sup> Discrete Rigid Body



## ۴-۳-۲ هندسه و خواص مادی

با توجه به اینکه فرآیند نورد سرد از دسته مسائل شکل‌دهی ورق فلزی<sup>۱</sup> است، مدل SOLID به خوبی توصیف‌کننده‌ی رفتار ورق در این فرایند است. نوار ورق پیش از شروع فرایند تخت در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه هندسه‌ی اولیه‌ی نوار ورق به‌وسیله‌ی یک صفحه‌ی مستطیلی نمایش داده می‌شود. با توجه به تقارن مسأله، عرض مستطیل مدل برابر نصف عرض ورق است. مشخصات هندسی ورق براساس واقعیات در نورد دو قفسه‌ای فولاد مبارکه در نظر گرفته شده‌اند.

جدول (۲-۲): مشخصات غلتک

|                              |                         |
|------------------------------|-------------------------|
| $R_{Top} = 225 \text{ (mm)}$ | شعاع پایه‌ی غلتک بالایی |
|------------------------------|-------------------------|

جدول (۳-۲): مشخصات هندسی و مادی ورق

|                          |                 |
|--------------------------|-----------------|
| $l = 2000 \text{ (mm)}$  | طول ورق         |
| $w = 1000 \text{ (mm)}$  | عرض ورق         |
| $h_i = 1 \text{ (mm)}$   | ضخامت ورودی ورق |
| $h_o = 0.8 \text{ (mm)}$ | ضخامت خروجی ورق |
| $E = 200 \text{ (GPa)}$  | مدول یانگ       |
| $\nu = 0.3$              | ضریب پواسون     |
| $C_w = -0.12, +0.12, 0$  | تحدب غلتک کاری  |

تنش تسلیم با توجه به اینکه کار سختی در نورد ورق‌های فولادی داریم به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

<sup>1</sup> Sheet Metal Forming

جدول (۲-۴): مشخصات مادی ورق

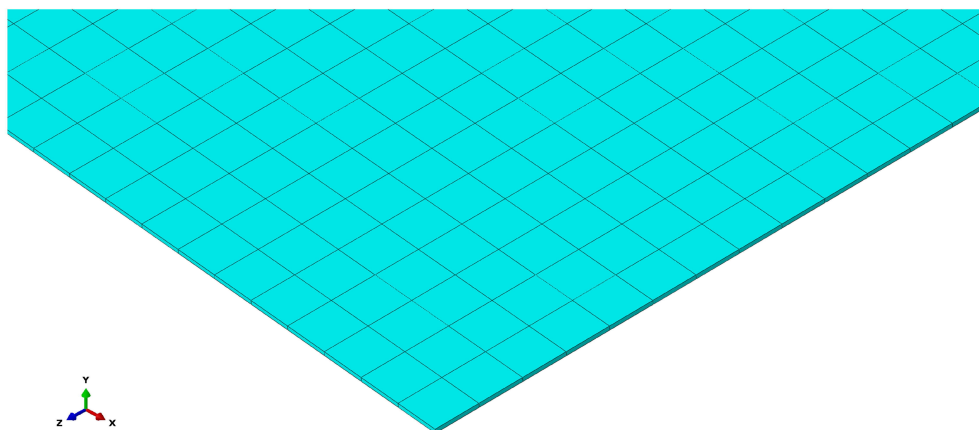
| Yield stress (mpa) | Plastic strain |
|--------------------|----------------|
| 300                | 0              |
| 301                | 0.001          |
| 302                | 0.002          |
| 305                | 0.005          |
| 310                | 0.01           |
| 320                | 0.02           |
| 350                | 0.05           |
| 400                | 0.1            |
| 500                | 0.2            |
| 800                | 0.5            |
| 1300               | 1              |

### ۲-۳-۵ المان مورد استفاده

برای شبکه‌بندی ورق از المان آجری C3D8R با اندازه‌ی متوسط (mm) ۱۰ در یک شبکه‌ی ساختاریافته (Structured) استفاده شده است.

### ۲-۳-۶ شبکه‌بندی

در فرایند شکل‌دهی نورد سرد، همه‌ی مقاطع عرضی نوار ورق شرایط تغییر شکل مشابهی را در جهت طولی تجربه می‌کنند. بنابراین شبکه‌بندی در جهت طولی باید یکنواخت باشد. در شکل‌دهی نورد سرد ورق در راستای طولی هر (mm) ۱۰ و در راستای عرضی در هر (mm) ۱۰ و در جهت ارتفاع هر (mm) ۱ یک مش وجود دارد. در شکل ۲-۲ جزئیات شبکه‌بندی اجزای محدود را مشاهده می‌کنیم.



شکل (۲-۲): جزئیات شبکه‌بندی مدل اجزای محدود

## ۷-۳-۲ آرایش اولیه

در آرایش اولیه‌ی ورق و غلتک‌ها، سر نوار ورق در ایستگاه اول قرار دارد. غلتک‌های کاری بالایی ایستگاه صفر مقعر می‌باشد و با سطح بالایی ورق در تماس می‌باشد. غلتک بالایی ایستگاه اول نیز مماس بر سطح بالایی نوار ورق مستقر می‌شود. با توجه به اینکه در تحلیل‌ها از فرمول‌بندی دینامیک صریح استفاده شده است، تماس هنگامی برقرار می‌شود که جسم به سطحی فرضی، به فاصله‌ی نصف ضخامت ورق از سطح مرجع برسد؛ یعنی ضخامت المان در آرایش اولیه و نیز حین شبیه‌سازی منظور می‌شود. شکل (۳-۲) آرایش اولیه‌ی مدل اجزای محدود را در حالت‌های غلتک بالایی مقعر شکل در نرم‌افزار ABAQUS نشان می‌دهد.

## ۸-۳-۲ تماس‌ها و مدل اصطکاکی

برای حل‌گر دینامیک صریح، دو الگوریتم برای مدل‌سازی تماس وجود دارد. این دو الگوریتم به نام‌های الگوریتم تماس عمومی<sup>۱</sup> و الگوریتم زوج تماسی<sup>۲</sup> نامیده شده‌اند. در الگوریتم تماس عمومی این امکان وجود دارد که بین همه یا تعداد زیادی از سطوحی که در مدل وجود دارند، تماس تعریف شود. اما در الگوریتم زوج تماسی، تماس بین دو سطح مشخص تعریف می‌شود. این دو سطح می‌توانند هر دو تغییرشکل‌پذیر یا یکی صلب و دیگری تغییرشکل‌پذیر باشد. همچنین می‌توان با استفاده از این الگوریتم تماس بین یک سطح با خودش<sup>۳</sup> را تعریف کرد.

الگوریتم تماس عمومی از الگوریتم زوج تماسی قوی‌تر و تعریف تماس در آن ساده‌تر است. با این حال در موارد خاصی باید از الگوریتم زوج تماسی استفاده شود. از جمله این موارد هنگامی است که یکی از سطوح تماس، سطح صلب تحلیلی است. با توجه به این‌که در شبیه‌سازی‌ها غلتک‌ها با استفاده از مدل صلب تحلیلی مدل شده‌اند، برای تعریف تماس غلتک با ورق از الگوریتم زوج تماسی استفاده شد. برای تعریف زوج سطح تماس در محیط ABAQUS/CAE، در واحد Interaction باید گزینه‌ی سطح-به-سطح<sup>۴</sup> انتخاب شود.

پس از انتخاب الگوریتم تماس و مشخص کردن سطوح تماس، لازم است مدل اصطکاکی تعریف شود. برای تماس ورق با غلتک‌های ایستگاه صفر، رفتار بدون اصطکاک در نظر گرفته شده است.

شکل (۳-۲) آرایش اولیه‌ی مدل اجزای محدود را نشان می‌دهد.

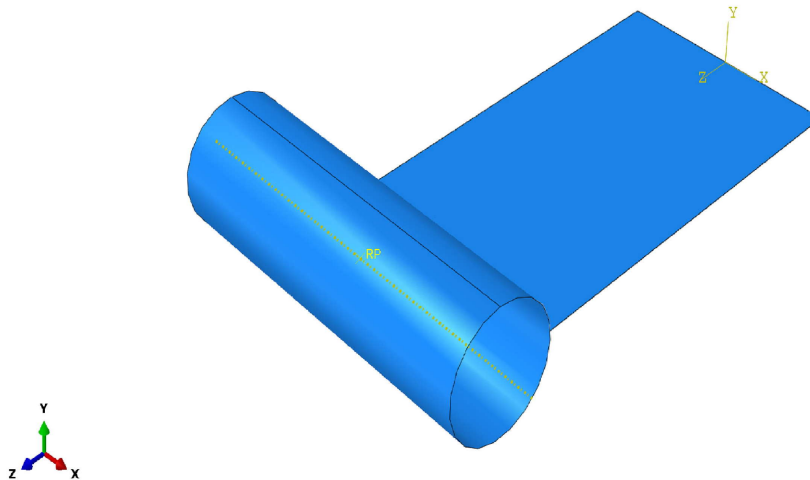
---

<sup>1</sup> General Contact Algorithm

<sup>2</sup> Contact Pair Algorithm

<sup>3</sup> Self Contact

<sup>4</sup> Surface to Surface



شکل (۳-۲): آرایش اولیه‌ی مدل اجزای محدود در نرم‌افزار ABAQUS

غلطک‌های ایستگاه صفر کاملاً در جای خود ثابت هستند و فقط وظیفه‌ی مهار ورق را دارند. اما برای غلتک‌های ایستگاه اول، رفتار اصطکاکی با مدل کولمب<sup>۱</sup> و ضریب اصطکاک همگن<sup>۲</sup> و ثابت  $\mu = 0.2$  منظور شده است.

### ۹-۳-۲ گام‌های حل

شبیه‌سازی فرایند با در نظر گرفتن دو ایستگاه در دو گام<sup>۳</sup> انجام می‌شود که توضیحات آن در ذیل آورده شده است.

قدم اول: بسته شدن غلتک‌های ایستگاه اول

قدم دوم: دوران غلتک‌های ایستگاه اول

<sup>۱</sup> Coulomb  
<sup>۲</sup> Isotropic  
<sup>۳</sup> Step