





دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مکانیک

# بررسی فرایند نورد سرد ورق تحت رژیم روانکاری مخلوط با امولسیون آب و روغن

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک  
طراحی کاربردی

بهنام حاج شیر محمدی

استاد راهنما  
دکتر محمد مشایخی

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،  
ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع  
این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی  
اصفهان است.



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک (گرایش طراحی کاربردی) آقای بهنام

حاج شیر محمدی

تحت عنوان

**بررسی فرایند نورد سرد ورق تحت رژیم روانکاری مخلوط با امولسیون آب و روغن**

در تاریخ ۹۲/۲/۱۹ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

دکتر محمد مشایخی

۱- استاد راهنمای پایان نامه

دکتر محمد رضا فروزان

۲- استاد مشاور پایان نامه

دکتر محسن اصفهانیان

۳- استاد داور

دکتر صالح اکبرزاده

۴- استاد داور

دکتر محمد رضا سلیم پور

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده

بر خود لازم می‌دانم که از توجه، راهنمایی و تشویق دکتر محمد مشایخی،  
دکتر محمدرضا فروزان و آقای علی حیدری صمیمانه تشکر و تقدیر  
نمایم.

تقدیم بہ:

پدر و مادر و برادر عزیزم

## چکیده

نیاز روزافزون صنعت به ورق‌های فلزی با ابعاد دقیق و کیفیت بالا محققان را بر آن داشته تا با مطالعه‌ی دقیق‌تر فرایند نورد سرد ورق پاسخگوی نیازهای علمی در این زمینه باشند. از این میان می‌توان به تحقیقات در زمینه‌ی روانکاری نورد اشاره نمود. امولسیون آب و روغن از جمله‌ی روانسازهایی است که به شکل گسترده در صنایع نورد به کار گرفته می‌شود و لازم است رفتار آن در روانکاری نورد دقیق‌تر بررسی شود. در این تحقیق با تکیه بر روانکاری مخلوط و استفاده از معادله‌ی چنگ و مارتال در این زمینه و ترکیب آن با معادله‌ی رینولدز توسعه یافته‌ی ین و کرودا، مدلی برای نورد سرد با امولسیون آب و روغن ارائه شده است و به منظور نزدیک‌تر شدن فرضیات به شرایط واقعی نورد، کشش‌های جلو و عقب بر ورق به مدل اضافه شده است. مسئله در دو ناحیه‌ی ورودی و کاری بررسی می‌شود که شامل حل دو معادله‌ی دیفرانسیل غیر خطی مرتبه اول برای یافتن فشار کل و نسبت تماس به همراه معادله‌ی مرتبه دوم رینولدز برای یافتن فشار فیلم روانکار است. حل مسئله، در یک چرخه شامل پنج حلقه‌ی سعی و خطا برای ارضاء شرایط مرزی و دستیابی به مجهولات مسئله صورت می‌پذیرد. در انتهای حل، تغییرات غلظت، توزیع فشار، نیرو و گشتاور نورد و ضخامت فیلم روانکار به همراه سایر مجهولات بدست آمده ضمن اینکه تغییر شعاع الاستیک غلتک‌ها به کمک رابطه‌ی معروف هیچکاک محاسبه می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که اثر غلظت اولیه‌ی امولسیون بر متغییرهای نورد در سرعت بالا خیلی چشمگیرتر از سرعت‌های پایین است و افزایش غلظت سبب افزایش ضخامت فیلم، کاهش نیروی نورد و جابجایی نقطه‌ی خنثی می‌شود. با افزودن حل عددی نشان می‌دهد که در کشش‌های پایین ورق، استفاده از امولسیون به جای روغن خالص سبب نزدیک شدن نقطه‌ی خنثی به و رودی، و در کشش‌های بالا سبب نزدیک شدن آن به خروجی می‌گردد.

کلمات کلیدی: ۱- نورد سرد ورق ۲- روانکاری مخلوط ۳- امولسیون آب و روغن ۴- روانکاری با امولسیون آب و روغن ۵- معادله‌ی

توسعه یافته‌ی رینولدز

## فهرست مطالب

| <u>صفحه</u>                                   | <u>عنوان</u>                                         |
|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| هشت                                           | فهرست مطالب.....                                     |
| ده                                            | فهرست نمادها.....                                    |
| ۱                                             | چکیده.....                                           |
| <b>فصل اول: کلیات</b>                         |                                                      |
| ۲                                             | ۱-۱ مقدمه.....                                       |
| ۳                                             | ۲-۱ تاریخچه‌ی نورد سرد.....                          |
| ۳                                             | ۳-۱ نورد سرد.....                                    |
| ۴                                             | ۴-۱ هندسه‌ی نورد سرد.....                            |
| ۵                                             | ۵-۱ روانکاری نورد سرد.....                           |
| ۶                                             | ۶-۱ روش‌های پاشش روانکار.....                        |
| ۸                                             | ۷-۱ انواع رژی‌های روانکاری.....                      |
| ۹                                             | ۸-۱ مروری بر پژوهشهای انجام شده.....                 |
| ۱۰                                            | ۱-۸-۱ مدل اصطکاکی به کار گرفته شده در نورد سرد.....  |
| ۱۱                                            | ۲-۸-۱ روانکاری با امولسیون.....                      |
| ۱۳                                            | ۹-۱ معادله‌ی رینولدز.....                            |
| ۱۵                                            | ۱۰-۱ نوآوری تحقیق حاضر.....                          |
| ۱۵                                            | ۱۱-۱ پایان‌نامه در یک نگاه.....                      |
| <b>فصل دوم: تئوری و معادلات حاکم بر مسئله</b> |                                                      |
| ۱۶                                            | ۱-۲ مقدمه.....                                       |
| ۱۶                                            | ۲-۲ روانکاری مخلوط و معادله‌ی می‌انگین ری‌نولدز..... |
| ۱۸                                            | ۳-۲ معادله‌ی چنگک مارسالت ویلسون.....                |
| ۱۹                                            | ۴-۲ معادلات تعادل المان ورق.....                     |
| ۲۰                                            | ۵-۲ معیار تسلیم و من‌ز در حالت کرنش صفحه‌ای.....     |
| ۲۱                                            | ۶-۲ تغییری در شکل الاستیک غلتکها.....                |
| ۲۱                                            | ۷-۲ رابطه‌ی گرانروی- فشار.....                       |
| ۲۳                                            | ۸-۲ لهدگی زبری‌ها.....                               |
| ۲۴                                            | ۹-۲ روانکاری با امولسیون.....                        |
| ۲۶                                            | ۱۰-۲ تئوری‌های روانکاری با امولسیون.....             |
| ۲۶                                            | ۱-۱۰-۲ نظریه‌ی چسبندگی ذرات روغن.....                |
| ۲۷                                            | ۲-۱۰-۲ نظریه‌ی غلظت متغیر.....                       |
| ۲۹                                            | ۳-۱۰-۲ نظریه‌ی فقر روغن.....                         |



|         |     |                                                                              |
|---------|-----|------------------------------------------------------------------------------|
| ۳۱..... | ۱-۲ | معادله‌ی رینولد برای امولسیون [۳۷].....                                      |
| ۳۵..... | ۲-۲ | معادله‌ی توسعه‌ی یافته‌ی ری‌نولدز با فرض لایه‌ی چسبنده بر روی سطوح [۲۶]..... |
| ۳۸..... | ۳-۲ | بحثی بر ضرایب گرانیروی [۳۶].....                                             |
| ۴۳..... | ۴-۲ | جمع‌بندی.....                                                                |

#### فصل سوم: روش تحلیل

|         |     |                                                          |
|---------|-----|----------------------------------------------------------|
| ۴۴..... | ۱-۳ | مقدمه.....                                               |
| ۴۴..... | ۲-۳ | یافتن مدلی برای فرایند نورد سرد با روانکار امولسیون..... |
| ۴۶..... | ۳-۳ | ناحیه‌ی کاری $0 < X < X_1$ .....                         |
| ۴۹..... | ۴-۳ | روش حل معادله‌ی رینولدز.....                             |
| ۵۱..... | ۵-۳ | ناحیه‌ی ورودی $X_1 < X$ .....                            |
| ۵۲..... | ۶-۳ | غلظت امولسیون در حین نورد.....                           |
| ۵۳..... | ۷-۳ | شرایط مرزی.....                                          |
| ۵۴..... | ۸-۳ | الگوریتم حل.....                                         |

#### فصل چهارم: نتایج و بحث

|         |       |                                                               |
|---------|-------|---------------------------------------------------------------|
| ۵۸..... | ۱-۴   | مقدمه.....                                                    |
| ۵۸..... | ۲-۴   | مقایسه‌ی نتایج مدل و داده‌های عملی.....                       |
| ۶۱..... | ۳-۴   | اثرات غلظت امولسیون بر پارامترهای نورد در سرعت‌های مختلف..... |
| ۶۱..... | ۱-۳-۴ | اثر غلظت بر روی فشار روانکار و فشار کل.....                   |
| ۶۲..... | ۲-۳-۴ | اثر غلظت امولسیون بر فشار در ناحیه‌ی ورودی.....               |
| ۶۴..... | ۳-۳-۴ | اثرات غلظت بر نسبت تماس و ضخامت فیلم.....                     |
| ۶۶..... | ۴-۳-۴ | اثر غلظت بر تنش برشی وارد بر سطح ورق.....                     |
| ۶۷..... | ۵-۳-۴ | تغییرات غلظت در ناحیه‌ی کاری.....                             |
| ۶۸..... | ۴-۴   | تغییرات غلظت در ناحیه‌ی ورودی.....                            |
| ۷۰..... | ۵-۴   | بررسی اثرات غلظت بر گشتاور و نیروی نورد.....                  |
| ۷۱..... | ۶-۴   | بررسی اثرات امولسیون در نورد ورق با کشش از عقب و جلو.....     |

#### فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

|         |     |                      |
|---------|-----|----------------------|
| ۷۵..... | ۱-۵ | نتیجه‌گیری.....      |
| ۷۶..... | ۲-۵ | بحث و پیشنهادها..... |

فهرست نمادها

|                                    |                                                                         |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| $\phi_d$                           | درصد حجمی فاز پراکنده شونده (روغن)                                      |
| $\phi_c$                           | درصد حجمی فاز پیوسته (آب)                                               |
| $\eta_d$                           | گرانروی پراکنده شونده (روغن) در حالت خالص                               |
| $\eta_c$                           | گرانروی فاز پیوسته (آب) در حالت خالص                                    |
| $\mu_d, \mu_c, \mu_{dc}, \mu_{cd}$ | ضرایب گرانروی در حالت امولسیون                                          |
| $\mu$                              | گرانروی موثر امولسیون $\mu = \mu_d + \mu_c + \mu_{dc} + \mu_{cd}$       |
| $\xi$                              | گرانروی معادل امولسیون                                                  |
| $\theta_a$                         | شیب دندانهای زبریهای دندان اره‌ای                                       |
| $L$                                | نصف طول گام زبریها                                                      |
| $a$                                | طول تماس نوک زبریها                                                     |
| $A$                                | نسبت تماس زبریها $A = a/L$                                              |
| $s$                                | سرعت بی بعد نورد $s = r\mu_0(u_{w1} + u_r)/\sigma_{y0}R_q x_1$          |
| $U$                                | سرعت بی بعد نورد $U = 6r\eta_0\alpha u_r/R_q^2$                         |
| $E$                                | نرخ کرنش بی بعد ورق                                                     |
| $\varepsilon$                      | کرنش معادل ورق $\varepsilon = (2/\sqrt{3})\ln(y_0/y)$                   |
| $\dot{\varepsilon}$                | نرخ کرنش معادل ورق $\dot{\varepsilon} = (4/\sqrt{3})\ln(u_{w2}y_2/y^2)$ |
| $p, P$                             | فشار کل $P = \frac{p}{\sigma_{y0}}$                                     |
| $p_f, P_f$                         | فشار روانکار $P_f = \frac{p_f}{\sigma_{y0}}$                            |
| $S_1, s_1$                         | کشش ورق در ورودی<br>$S_1 = \frac{s_1}{\sigma_{y0}y_1}$                  |
| $S_2, s_2$                         | کشش ورق در خروجی<br>$S_2 = \frac{s_2}{\sigma_{y0}y_1}$                  |
| $S_f$                              | نسبت لغزش از جلو $S_f = \frac{u_{w2} - u_r}{u_r}$                       |
| $\delta_w$                         | زبری RMS سطح ورق                                                        |
| $\delta_r$                         | زبری RMS سطح غلتک                                                       |
| $R_q$                              | زبری RMS میانگین $R_q = \sqrt{\delta_r^2 + \delta_w^2}$                 |
| $y_0$                              | ضخامت اولیه‌ی ورق                                                       |
| $y_1$                              | ضخامت ورق در ورودی                                                      |
| $y_2$                              | ضخامت ورق در خروجی                                                      |

|                       |                                                                           |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| $y$                   | ضخامت نورد در حین نورد                                                    |
| $x_1$                 | طول ناحیه ی کاری                                                          |
| $x, X$                | مولفه ی طول در راستای نورد $X = \frac{x}{x_1}$                            |
| $x_a, X_a$            | مولفه ی مکان انتهای ناحیه ی ورودی $X_a = \frac{x_a}{x_1}$                 |
| $x_b, X_b$            | مولفه ی مکان نقطه ی شروع تماس زبری های ورق و غلتک $X_b = \frac{x_b}{x_1}$ |
| $r$                   | شعاع غلتک                                                                 |
| $R$                   | درصد کاهش سطح مقطع ورق $R = \frac{y_1 - y_2}{y_1}$                        |
| $u_r$                 | سرعت محیطی غلتک                                                           |
| $u_w$                 | سرعت ورق حین نورد                                                         |
| $u_{w1}$              | سرعت ورق در ورودی                                                         |
| $u_{w2}$              | سرعت ورق در خروجی                                                         |
| $\sigma_y$            | تنش تسلیم ورق                                                             |
| $\sigma_{y0}$         | تنش تسلیم ورق قبل از نورد                                                 |
| $\sigma_k$            | تنش تسلیم کرنش صفحه ای $\sigma_k = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_y$           |
| $C_i, i = 2, 3, 4, 5$ | ضرایب رابطه ی الکساندر                                                    |
| $c$                   | ضریب چسبندگی                                                              |
| $h_t, H_t$            | ضخامت متوسط فیلم روانکار $H_t = \frac{h_t}{R_q}$                          |
| $\phi_x$              | ضریب جریان رابطه ی چنگک مارسالت                                           |
| $\delta$              | ضخامت لایه ی چسبنده به سطح                                                |
| $\delta_0$            | ضخامت لایه ی چسبنده به سطح در ورودی                                       |
| $p_r$                 | فشار مرجع در رابطه رولندز                                                 |
| $\eta_R$              | گرانروی مرجع در رابطه ی رولندز                                            |
| $\eta_b$              | گرانروی روغن                                                              |
| $u_1$                 | سرعت لایه ی روغن چسبنده بر روی سطح پایینی                                 |
| $u_d$                 | سرعت ذرات روغن معلق در امولسیون                                           |
| $u_c$                 | سرعت ذرات آب موجود در امولسیون                                            |
| $u_2$                 | سرعت لایه ی روغن چسبنده بر روی سطح بالایی                                 |
| $u_a$                 | سرعت سطح بالایی                                                           |
| $u_b$                 | سرعت سطح پایینی                                                           |

$\bar{u}$

$\gamma_1$

$\gamma_2$

$q_x$

$q_a$

$q_f$

متوسط سرعت سطح بالایی و پایینی

چگالی فاز زوغن

چگالی فاز آب

دبی روانکار در راستای نورد

تنش برشی اصطکاکی

تنش برشی ویسکوز

## فصل اول کلیات

### ۱-۱ مقدمه

ورق‌های خروجی از نورد گرم سطحی نسبتاً خشن دارند. تلرانس‌ها نیز با دقت لازم در این محصولات رعایت نمی‌شود. ورق‌های بدست آمده از نورد گرم برای دستیابی به ابعاد دقیق و ویژگی‌های مکانیکی بهینه و کاهش ضخامت بیشتر به شکل سرد نورد می‌شوند. در فرایند نورد سرد می‌توان به ۲۵ تا ۹۰ درصد کاهش ضخامت دست یافت. کلاف‌های ورق در ابتدای خط نورد بوسیله‌ی دستگاه کلاف باز کن، باز می‌شوند و پس از نورد شدن بوسیله‌ی قفسه‌های پشت سر هم دوباره به شکل کلاف به هم پیچیده می‌شوند. کاهش ضخامت ورق در قفسه‌ی اول بیشتر است و قفسه‌ی پایانی کمترین تغییر شکل را ایجاد می‌کند. در نورد سرد ورق نیز مانند نورد گرم لازم است پارامترهای نورد از جمله کاهش ضخامت در هر مرحله، کاهش ضخامت کلی، یکنواخت بودن ضخامت در عرض آن، خنک‌کاری، تنش‌های کششی پشت و جلو و گشتاور و نیروی غلتک‌ها در هر قفسه به دقت کنترل شود. گسترش روزافزون استفاده از محصولات فلزی و نیاز به تطبیق این محصولات با درخواست‌های نوین از نظر دقت و کیفیت، محققان را بر آن داشته که به طور دقیق‌تر به مطالعه فرایندهای تولید این مصنوعات بپردازند. فرایند نورد سرد نیز همچون سایر روش‌های شکل‌دهی فلزات مورد توجه محققین بوده است. یکی از جنبه‌های بررسی نورد سرد، فرایند روانکاری آن است. با وجود تحقیقات گسترده در روانکاری با روغن خالص، به دلیل عدم شناخت رفتار

امولسیون به شکل جامع، این جنبه از فرایند روانکاری نورد خصوصاً در کشورمان کمتر مورد توجه بوده است. در این بخش مختصری از کلیات و هندسه‌ی نورد ارائه شده است.

## ۲-۱ تاریخچه‌ی نورد سرد

استفاده از نورد سرد به عنوان روشی برای خشک کردن یا صاف کردن مواد به سال‌های دور باز می‌گردد ولی ایده‌ی استفاده از نورد برای کاهش ضخامت ورق به حدود دو قرن پیش از انقلاب صنعتی در اروپا می‌رسد. اولین بار نورد سرد برای تغییر شکل فلزات، در جایی در بلژیک امروزی استفاده شد. صنعتگران در آن زمان به تجربه دریافته بودند که استفاده از غلتک‌های کوچک‌تر نورد را آسان می‌کند. آنها با ایجاد شیارهایی بر روی غلتک‌ها به تولید مقاطع تیر و میله می‌پرداختند. در آن زمان وجود مشکل تولید توان، عاملی بود که مانع گسترش این صنعت به حساب می‌آمد، مشکلی که در سال‌های بعد با اختراع ماشین بخار برطرف شد و کم‌کم راه فلزات سخت‌تر از جمله فولاد نیز به این صنعت باز شد.

نورد مدرن را می‌توان نتیجه‌ی تلاش‌های هنری کرت<sup>۱</sup> انگلیسی دانست که توانست با استفاده از شیوه‌های جدید در کارگاه خود سرعت تولیدش را پانزده برابر کند. با وجود اینکه هنری کرت اولین کسی نبود که از غلتک برای نورد استفاده کرد، استفاده از فرایندهای متنوع آهنگری و نورد سبب شده که او را پدر نورد مدرن بنامند. جان برکین‌شاو<sup>۲</sup> یک مهندس راه آهن بود که در سال ۱۸۲۰ برای نخستین بار دستگاه نورد ریل آهن را ساخت و توانست ریل‌های آهنی بزرگ با وزن بالا تولید کند.

## ۳-۱ نورد سرد

قطر غلتک نورد سرد باید نسبت به کاهش ضخامت کوچک باشد، در غیر این صورت نیروی زیاد غلتک‌ها باعث تخت شدن غلتک‌ها شده و امکان کاهش ضخامت بیشتر از میان می‌رود. همچنین باعث می‌شود تغییر شکل الاستیک غلتک‌ها زیاد باشد و کنترل ضخامت ورق در خروجی مشکل شود. قفسه‌های نورد ممکن است دو غلتکه‌ی یک سویه باشند که در این صورت قطعه کار همواره از یک سو به فضای بین دو غلتک کشیده می‌شود و پس از کاهش ضخامت، از سوی دیگر خارج می‌شود. قفسه‌های دو غلتکه ممکن است دو سویه باشند. در این صورت با

<sup>۱</sup> Henry Cort

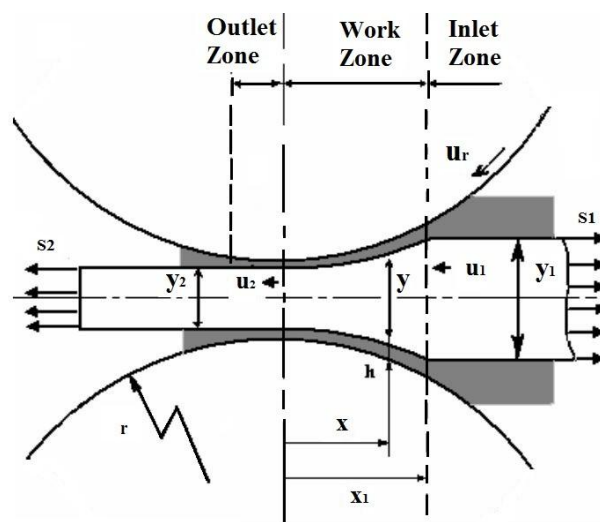
<sup>۲</sup> John birkenshaw

تغییر جریان برق در موتور، راستای چرخش غلتک‌ها و در نتیجه راستای حرکت قطعه کار عوض می‌شود. قفسه‌های سه غلتک از سه غلتک تشکیل می‌شوند و نیروی محرکه‌ی موتور به غلتک‌های بالا و پایین فرستاده می‌شود و غلتک میانی در اثر اصطکاک به چرخش در می‌آید. با پیشرفت فن‌آوری، انواع فراورده‌های فلزی، به ویژه فراورده‌های فولادی در فرایند نورد سرد، همراه با عملیات حرارتی و بازپخت مناسب فولاد این امکان را به تولید کنندگان می‌دهند که بتوان فراورده‌های خود را با ضریب سختی متفاوت به صورت استاندارد تولید کنند.

همان‌گونه که اشاره شد هدف فرایند نورد سرد افزون بر بدست آوردن ویژگی‌های مکانیکی متناسب، دستیابی به ضخامت‌های بسیار کم است که در فرایند نورد گرم امکان‌پذیر نیست. امروزه بیشتر خطوط نورد سرد بصورت پیوسته یا پشت سر هم طراحی می‌شوند و معمولاً از ۴ تا ۶ قفسه نورد چهار غلتک تشکیل می‌شوند.

#### ۴-۱ هندسه‌ی نورد سرد

در شکل ۱-۱ نمایی از نورد سرد ورق نشان داده شده است. ورق تحت کشش  $S_1$  از عقب و کشش  $S_2$  از جلو قرار دارد و قطعه کار با یک زاویه ورودی به فضای بین دو غلتک کشیده می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود سه ناحیه‌ی ورودی<sup>۱</sup> کاری<sup>۲</sup> و خروجی<sup>۳</sup> شکل می‌گیرد.



شکل ۱-۱-نمای شماتیک فرایند نورد سرد [۱]

<sup>۱</sup> Inlet zone

<sup>۲</sup> Work zone

<sup>۳</sup> Outlet zone

روانکاری هیدرودینامیک از ابتدای ناحیه‌ی ورودی شکل گرفته و فشار روانکار به دلیل خاصیت گوه‌ای افزایش می‌یابد ولی در ناحیه‌ی ورودی فشار به اندازه‌ای نیست که موجب تغییر شکل ورق شود. در انتهای ناحیه‌ی ورودی ناحیه‌ی کاری قرار دارد. در ابتدای این ناحیه فشار روانکار و فشار ناشی از تماس زبری‌های دو سطح در گیر به حدی می‌رسد که تغییر فرم پلاستیک ورق شروع می‌شود. علاوه بر تغییر شکل پلاستیک ورق در این ناحیه، تغییر شکل الاستیک غلتک‌ها نیز اتفاق می‌افتد. در طول ناحیه‌ی کاری فشار روانکار افزایش می‌یابد تا به یک مقدار بیشینه برسد و پس از آن روند کاهشی به خود گرفته که تا انتهای ناحیه‌ی کاری ادامه می‌یابد. میزان فشار کل در انتهای ناحیه‌ی کاری به حدی می‌رسد که دیگر توان تغییر شکل پلاستیک را ندارد.

### ۵-۱ روانکاری نورد سرد

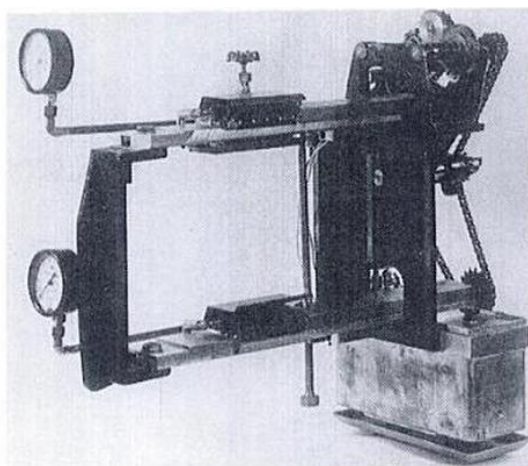
وجود اصطکاک برای تغییر شکل ورق هنگام فرایند نورد ضروری است به طوری که عمده‌ی انرژی لازم برای نورد به وسیله‌ی تنش برشی از غلتک‌ها به ورق انتقال می‌یابد. اگر اصطکاک بین ورق‌ها و غلتک‌ها از حدی کمتر باشد عمل ربایش ورق توسط غلتک صورت نمی‌گیرد و غلتک‌ها به روی ورق می‌لغزند. اصطکاک بیش از نیز اندازه سبب پایین آمدن کیفیت سطح کار می‌شود. در اصطکاک زیاد ممکن است ورق در نقاطی به طور کامل به غلتک بچسبد و اصطلاحاً جوش موضعی پدید آید که باعث پایین آمدن کیفیت محصول می‌شود. از سوی دیگر اصطکاک بیش از اندازه تولید حرارت را افزایش داده و این حرارت باعث بالا رفتن دمای ورق می‌شود و به این سبب انواع عیوب در ساختار ورق ظاهر می‌شود. تجربه و آزمایش همچنین تحلیل تنش در ناحیه‌ی تغییر شکل فضای بین دو غلتک نشان داده است که افزایش اصطکاک بین غلتک و قطعه کار، فشار غلتک را افزایش می‌دهد که این افزایش فشار خود عامل افزایش تغییر شکل غلتک‌ها می‌شود. همین عامل امکان ایجاد ورق‌هایی با ضخامت پایین را از میان می‌برد. از طرف دیگر اصطکاک زیاد باعث بالا رفتن مصرف انرژی در تولید شده و با توجه به حجم تولید در این صنعت عاملی نامطلوب به حساب می‌آید. کلیه‌ی این عوامل لزوم بهره گرفتن از روانکاری مناسب را نشان می‌دهد.



## ۶-۱ روش‌های پاشش روانکار

به طور کلی روغنهای نورد به دو گونه مورد استعمال قرار می‌گیرند: ۱- سیستم پاشش مستقیم<sup>۱</sup> ۲- سیستم پاشش مدار بسته<sup>۲</sup>. در روش اول امولسیون با غلظت بالا مستقیماً به روی ورق پاشیده می‌شود. روغن به میزان حداقلی که برای روغنکاری لازم است مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش روغن ممکن است با استفاده از وسایل خاصی اتمیزه<sup>۳</sup> یا بخار گردد. یک نوع از این دستگاه‌ها که به گرم‌ر اویلر<sup>۴</sup> مشهور است در شکل ۱-۲ نمایش داده شده است

در نورد ورق نازک و ورق گالوانیزه با وجود مصرف نسبتاً زیاد روغن بر واحد تن ورق، به خاطر چربی نسبتاً زیاد ایجاد شده و همچنین لزوم تثبیت کیفیت سطح، از این روش استفاده می‌گردد. در این روش آب خنک کننده از طریق خط جداگانه‌ای بر روی غلتکها پاشیده می‌شود. روغن بعد از جدا شدن از آب بیشتر به قفسه‌های اولیه نورد تاندم فرستاده می‌شود. از طرف دیگر در روش دوم (سیستم پاشش مدار بسته) امولسیونی با غلظت پایین بر روی غلتکها و همچنین ناحیه تماس پاشیده می‌شود که این امولسیون هم وظیفه روغنکاری و هم وظیفه خنک کاری غلتکها را بر عهده دارد [۱]. روش پاشش روانکار به صورت شماتیک از دو نما در شکل ۱-۳ نشان داده شده است.



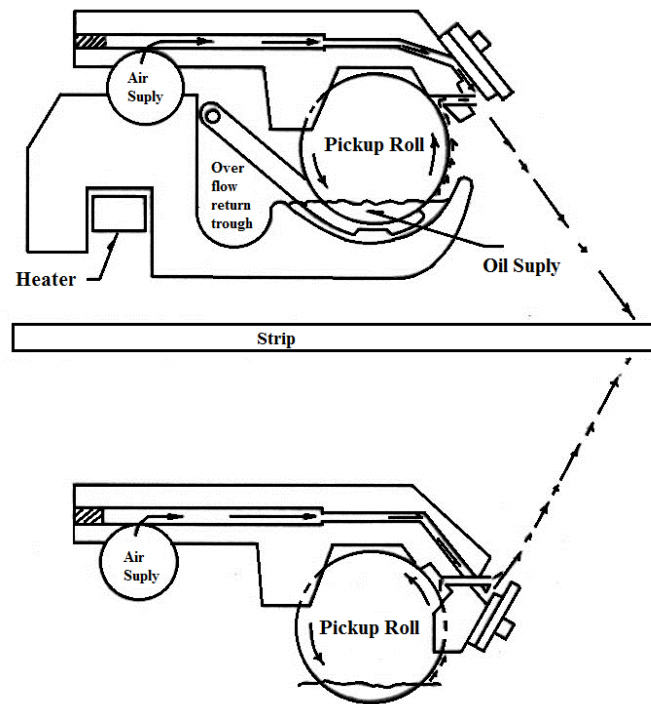
شکل ۱-۲- دستگاه پاشش روانکار [۱]

<sup>۱</sup> Direct Spraying

<sup>۲</sup> Recirculatory Spraying

<sup>۳</sup> Atomized

<sup>۴</sup> Grammer Oiler



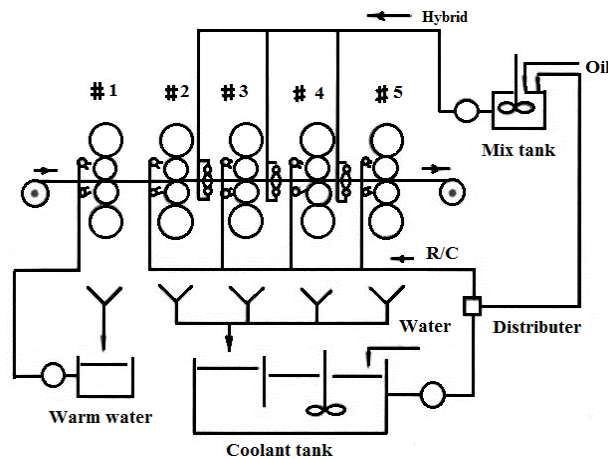
شکل ۱-۳-نمای شماتیک پاشش روانکار [۱]

در این روش از روغنهای معدنی، حیوانی<sup>۱</sup> و استرهای ترکیبی<sup>۲</sup> استفاده می شود. مسأله ای که در این روش باید مورد توجه قرار گیرد این است که برای امولسیوننی که به مدت زیادی مورد استفاده قرار می گیرد، نباید با ثابت نگه داشتن غلظت و امولسیون سازی در مخزن، امولسیون را به اصطلاح پیر ساخت. با این حال روش سومی وجود دارد که به نظر می رسد با ترکیب کردن نقاط مثبت روش مستقیم و روش مدار بسته دارای چشم اندازی خوب برای ایجاد روانسازی مناسب، خنک کاری بالا و مصرف کم باشد. این روش، روش ترکیبی<sup>۳</sup> نامیده می شود و همانطور که از شکل ۱-۴ مشاهده می شود این سیستم از یک خط هیبرید (یک مخزن مخلوط کننده کوچک و یک خط مدار بسته که مخزن بزرگی می باشد) تشکیل شده است. لازم به ذکر است که در مخزن مخلوط کننده، مقدار کمی روغن خالص افزوده شده تا امولسیون غلیظ تر گردد و این امولسیون به روی ورق یا ناحیه نورد پاشیده می شود تا روغنکاری خوبی صورت پذیرد. در حالیکه به مخزن بزرگ آب افزوده می شود تا یک امولسیون خنک و رقیق برای خنک کاری غلتکها حاصل گردد. تأثیر روش هیبرید هنگام استفاده از روغن پیه با استفاده از تغییرات نیروی نورد در شکل ۱-۵ نشان داده شده است [۲].

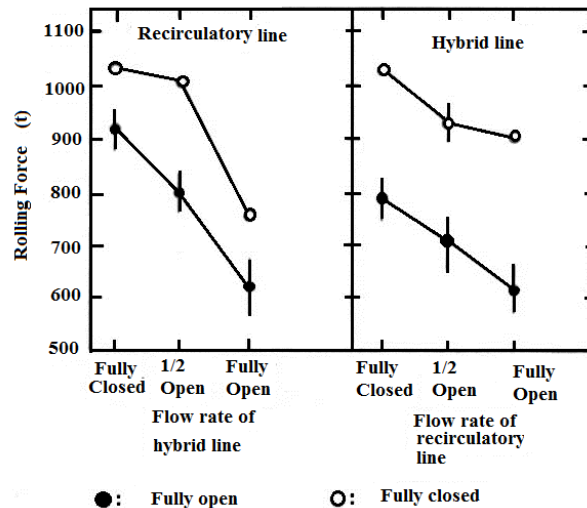
<sup>۱</sup> Tallow

<sup>۲</sup> Synthetic Esters

<sup>۳</sup> Hybrid



شکل ۴-۱ - دیاگرام روش روغنکاری هیبرید [۲]



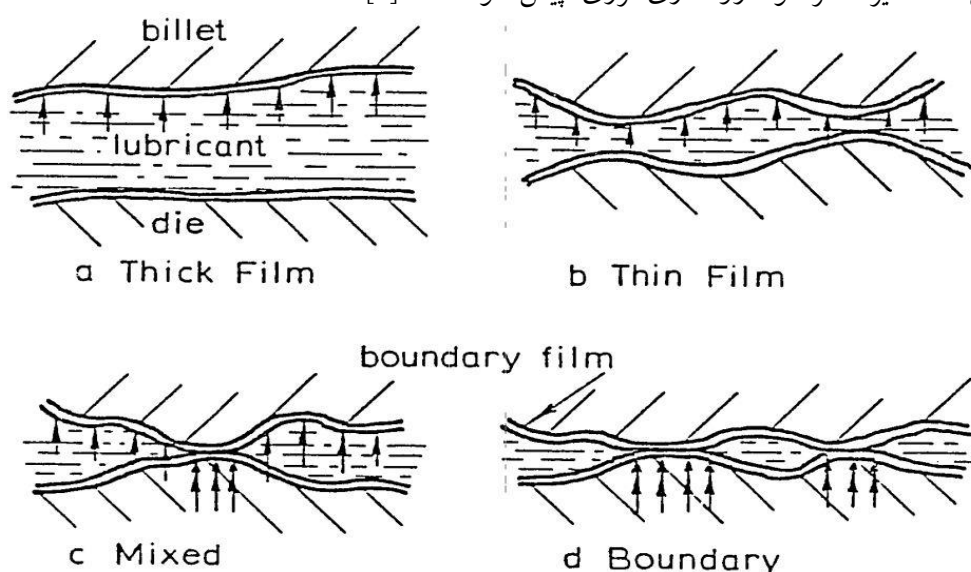
شکل ۵-۱ - مقایسه عملکرد دو خط هیبرید و مدار بسته در سیستم روغنکاری هیبرید با استفاده از روغن حیوانی [۲]

### ۷-۱ انواع رژی‌های روانکاری

روانکاری در نورد ضروری است و این کار توسط پاشیدن روانکار بر روی ورق و غلتک‌ها صورت می‌گیرد. به دلیل سرعت غلتک‌ها روانکار به درون ناحیه‌ی کاری کشیده می‌شود و عملیات روانکاری صورت می‌پذیرد. اگر سرعت و گرانش روانکار به اندازه‌ای کافی بزرگ باشد، یک لایه‌ی ضخیم روانکار بین سطوح قرار می‌گیرد و دو سطح به طور کامل از هم جدا می‌شوند. به این مکانیزم روانکاری، روانکاری هیدرودینامیک<sup>۱</sup> گفته می‌شود. در تحلیل این رژیم روانکاری می‌توان از حضور زبری‌های سطوح و تاثیر آنها بر جریان سیال روانکار صرف

<sup>۱</sup> Hydrodynamic lubrication

نظر کرد و دو سطح را صاف در نظر گرفت. در این نوع روانکاری تمامی فشار و تنش برشی لازم برای تغییر شکل ورق توسط روانکار تحمل می‌شود. همانگونه که در شکل ۶-۱ مشاهده می‌شود، اگر گرانیروی و سرعت روانکار به اندازه‌ای کافی زیاد نباشد مقدار کمتری از سیال به داخل فاصله‌ی بین سطوح کشیده شده و لایه‌ی ضخیم روانکار دیگر شکل نمی‌گیرد. در این حالت سطوح فلز در نقاطی از سر برجستگی‌ها با هم در تماس قرار می‌گیرند و قسمتی از بار وارد بر سطوح توسط نقاط مستقیم تماس تحمل می‌شود. به این نوع روانکاری، روانکاری مخلوط<sup>۱</sup> گفته می‌شود. در این رژیم، هنوز روانکار سهم عمده‌ای از نیروی تماسی بین سطوح را تحمل می‌کند ولی اگر ضخامت فیلم از این حالت نیز کمتر شود، روانکاری مرزی<sup>۲</sup> پیش خواهد آمد [۳].



شکل ۶-۱- انواع رژیم‌های روانکاری. a- روانکاری هیدرودینامیک. b- روانکاری الاستوهیدرودینامیک. c- روانکاری مخلوط  
d- روانکاری لایه مرزی [۳]

## ۸-۱ مروری بر پژوهش‌های انجام شده

در این قسمت به بررسی پژوهش‌های انجام شده در زمینه‌ی روانکاری نورد سرد پرداخته شده است. در ابتدا مدل‌های اصطکاکی مختلفی که از ابتدای قرن بیستم جهت تحلیل نورد سرد به کار گرفته شده است، بیان شده و در ادامه تحقیقات برجسته‌ای که در زمینه‌ی روانکاری رژیم مخلوط انجام شده، شرح داده شده است. در پایان روانکاری نورد با امولسیون آب و روغن و کارهایی که در این بخش صورت گرفته گردآوری شده است.

<sup>۱</sup> Mixed film lubrication

<sup>۲</sup> Boundary lubrication