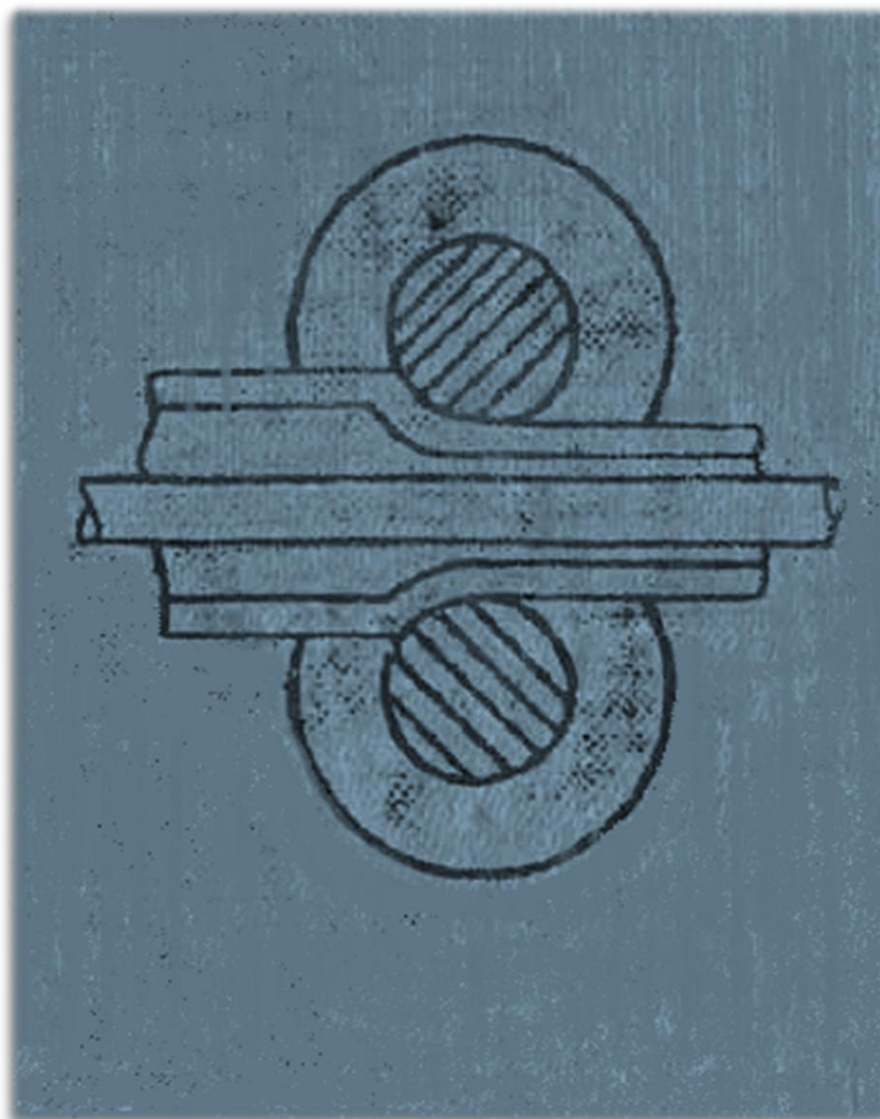


کالیبراسیون غلتک‌های دستگاه نورد پیلگر



پیشرفت‌های بزرگ در ساخت لوله‌های بدون درز در سال‌های اخیر، و همچنین امکان رسیدن به دقت‌های بسیار بالا در شکل‌های مقطع و ضخامت دیواره‌ها در فرایند تولید، منجر به توسعه‌ی دستگاه‌های پیچیده‌ای شده است که امروزه جایگاه ویژه‌ای در صنعت فولادسازی دارند؛ اما دانش مربوط به این دستگاه‌ها به دلیل کمبود منابع موجود، هنوز برای بسیاری از مهندسان تغییر شکل به میزان مطلوب در دسترس قرار نگرفته است.

پروژه این خلا، نخستین هدف این نوشته است. طراحی کالیبراسیون برای ابزارهای دستگاه‌هایی که برای تولید لوله به کار می‌روند، مستلزم شناخت فرآیندهای تغییر شکل است که در نورد یا کشش لوله‌ها رخ می‌دهد و بسته به نوع فرایند تولید متفاوت است.

امیدوارم این نوشته برای بسیاری از علاقه‌مندان مطالب مفیدی ارائه کند .

شرکت لوله گستر اسفراین – واحد تحقیق و توسعه

بهار ۱۴۰۴

کیارش ناویا

اهداف کالیبراسیون غلتک‌ها

۱. کنترل یکنواخت کاهش ضخامت دیواره لوله
۲. تضمین دقت در قطر خارجی و داخلی
۳. ایجاد انتقال تدریجی تغییر شکل در طول غلتک
۴. کاهش تنش‌های پسماند و افزایش کیفیت سطحی لوله

پس از آنکه تلاش‌های اولیه برای تولید لوله‌های دیواره نازک با استفاده از دستگاه‌های نورد مورب با شکست مواجه شد، در سال ۱۸۸۵ روش نورد پیلگر (Pilgring) پیشنهاد و توسعه یافت. همان‌طور که مشخص است، به عقیده برخی پژوهشگران، نورد پیلگر شامل عناصری از آهن‌گری نیز می‌باشد. این روش به عنوان فرآیندی از نورد پیوسته از میان تعداد زیادی کالیبر (قالب) متوالی در نظر گرفته می‌شود.

در طراحی پروفیل غلتک، در گذشته این اصل در نظر گرفته می‌شد که در آغاز فرآیند، امکان اعمال کاهش ضخامت‌های زیاد وجود دارد؛ چراکه فلز در این مرحله دمای بالاتری داشته و از پلاستیسیته بالایی برخوردار است، در حالی که در پایان نورد (در طول یک دور چرخش غلتک)، به دلیل سرد شدن فلز و کاهش پلاستیسیته آن، کاهش ضخامت‌ها باید کمتر باشد. بر اساس این مفروضات، منحنی پروفیل کالیبر در ابتدای ناحیه نورد به صورت شیب‌دار به سمت بالا امتداد می‌یافت و در پایان این ناحیه، به صورت تدریجی به یک بخش دایره‌ای با شعاع ثابت که به ناحیه پرداخت منتهی می‌شد، تبدیل می‌گردید.

گسترش ناحیه کاری غلتک به کل محیط آن ممکن نبود، زیرا پس از هر دور چرخش غلتک، لازم بود که شل (پوسته یا غلاف فلزی) نوردشونده به عقب بازگردانده شده و به اندازه ۹۰ درجه دوران داده شود. به همین دلیل، نیاز به در نظر گرفتن بخشی غیرکاری (حالت بیکار) روی غلتک وجود داشت که طول آن بستگی به سرعت انجام عملیات مذکور دارد.

کالیبر غلتک‌ها در مقطع عرضی به صورت یک دایره با برآمدگی‌های مماسی در جهت شکاف بین غلتک‌ها طراحی می‌شد تا از آسیب دیدن فلز جلوگیری شود. برای جلوگیری از کاهش قطر داخلی شل، یک میله بلند به نام ماندزل (Mandrel) به داخل آن وارد می‌کردند.

در این روش نورد، غلتک‌ها می‌بایست حداقل از دو ناحیه تشکیل می‌شدند: ناحیه کاری و ناحیه بیکار. در غلتک‌هایی از این نوع (اوایل توسعه)، نواحی انتقالی پیش‌بینی نشده بود و امکان نورد لوله‌های صاف با ضخامت یکنواخت دیواره وجود نداشت. علاوه بر این، تغذیه فلز به غلتک‌ها به صورت دستی انجام می‌گرفت، که این موضوع همیشه امکان نورد یکنواخت شل را فراهم نمی‌کرد.

به همین دلیل، پس از ناحیه کاری غلتک، بخشی به نام ناحیه پرداخت (پولیش کاری) در نظر گرفته شد که نسبت به محور غلتک به صورت هم‌مرکز بوده و دارای شعاع کالیبر ثابتی است. وجود این ناحیه پرداخت باعث شد که سطح خارجی لوله صاف و بدون برجستگی‌های اضافی حاصل شود.

جدا شدن آزادانه و بدون اصطکاک ماده نوردشونده از غلتک‌ها، هنگام گذار از ناحیه پرداخت به ناحیه بیکار، با استفاده از یک ناحیه اضافی دیگر (ناحیه خروجی) امکان‌پذیر شد؛ این ناحیه به صورت تدریجی و نرم به ناحیه بیکار متصل می‌گردید. چنین غلتکی (شکل ۱) که دارای چهار ناحیه بود، الزامات مورد نظر را برآورده می‌کرد و برای نورد شل و تبدیل به لوله مناسب شناخته شد. این نوع غلتک توسط ماکس مانسمان در تاریخ ۲۴ فوریه ۱۸۹۱ ثبت اختراع شد.

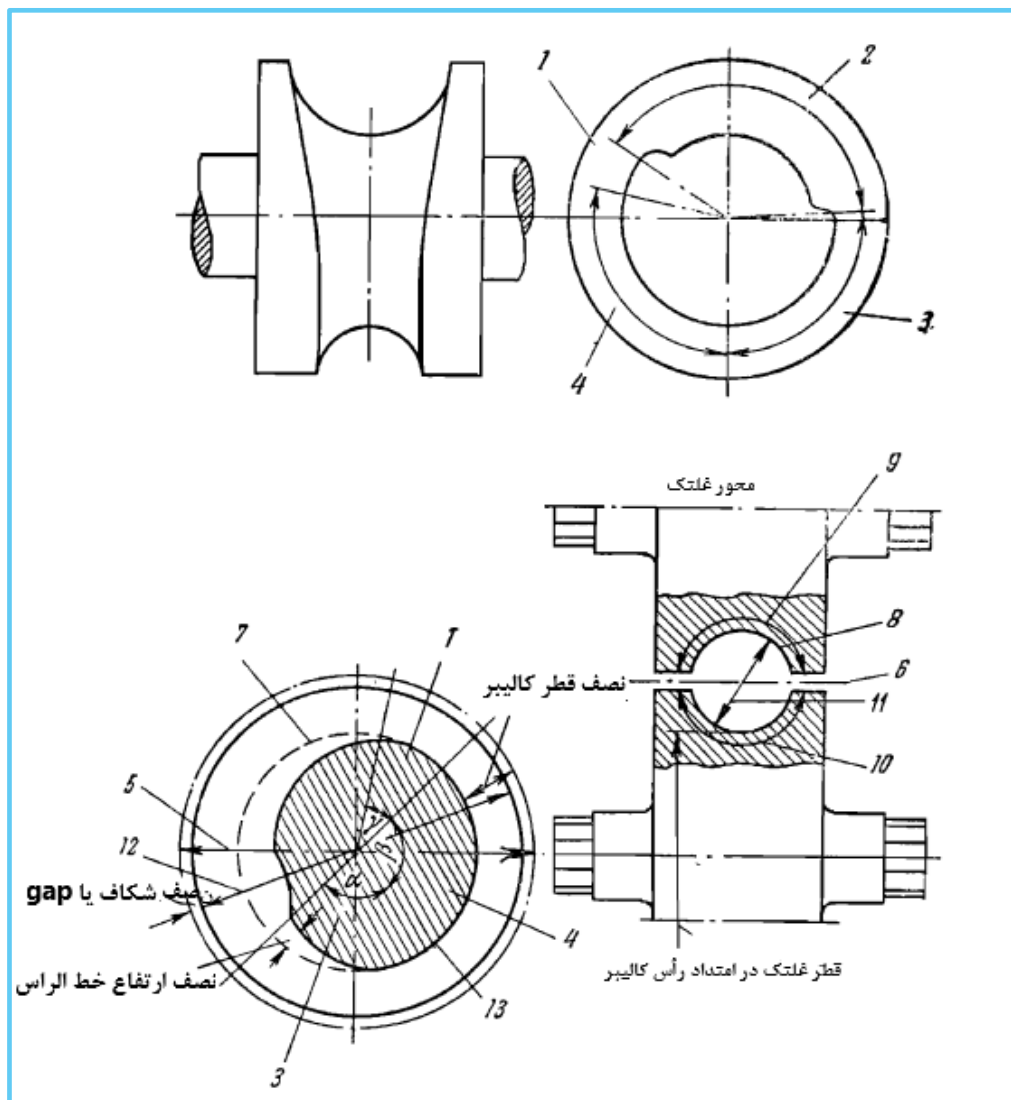
نکته قابل توجه در این طراحی آن است که چرخش غلتک‌ها در خلاف جهت تغذیه فلز به داخل آن‌ها صورت می‌گیرد.

توسعه‌ی بعدی فرآیند نورد پیلگر در دو جهت ادامه یافت:

نخست — مکانیزه کردن کارهای سنگین جانبی در طی فرآیند نورد؛

دوم — بهبود کالیبراسیون غلتک‌های پیلگر (Pilgring).

جهت اول موضوع این بحث نیست و بنابراین مورد بررسی قرار نمی‌گیرد.



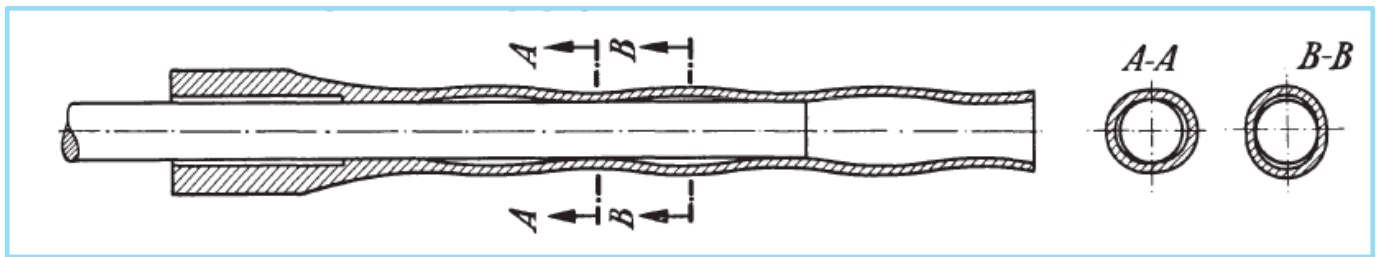
شکل ۱: غلتک نورد پیلگر:

- ۱- خروجی (ناحیه خروجی)؛ ۲- ناحیه بیکار؛ ۳- ناحیه کاری؛ ۴- ناحیه پرداخت (پولیش کاری)؛ ۵- قطر ایده آل؛ ۶- شکاف / فاصله (Gap)؛ ۷- دایره اصلی کالیبر؛ ۸- برآمدگی (خروجی جانبی یا برجستگی مماسی کالیبر)؛ ۹- منطقه کاری a؛ ۱۰- منطقه کاری b؛ ۱۱- قطر کالیبر؛ ۱۲- قطر استوانه مرکزی (قطر بشکهای غلتک)؛ ۱۳- منحنی لبه (منحنی تاج کالیبر)

در ابتدا لازم است به توسعه روش کالیبراسیون ناحیه کاری توجه شود. برای دستیابی به نتایج رضایت بخش در فرآیند تغییر شکل، رعایت فقط اصول اساسی ذکر شده پیشین، یعنی اینکه منحنی ناحیه کاری باید در ابتدا شیب بیشتری داشته و سپس هنگام گذار به ناحیه پرداخت شیب آن کاهش یابد، کافی نیست. برای اجرای تغییر شکل رضایت بخش، باید قوانین و روابط دیگری نیز یافت شود.

برای این منظور، لازم است شکل مناسبی برای منحنی تاج غلتک پیلگر انتخاب گردد. G. DeGrahle، که زمانی مسئول تولید شرکت لوله سازی مانسمان بود، برای اولین بار روش طراحی چنین منحنی ای را توسعه داد که امکان تولید لوله های با دیواره نازک تر را فراهم ساخت. در این روش، نویسنده بر پایه قانون حفظ کاهش نسبی ثابت سطح مقطع عرضی شل استوار بود. وی دریافت که برای حفظ یکپارچگی فلز، شل باید نسبت به ماندنرل با سرعتی ثابت حرکت کند.

در سال ۱۸۹۴، ماکس مانسمان کالیبری را توسعه داد که امکان لغزش خوب فلز نسبت به ماندنرل را فراهم می کرد. در این نوع کالیبر، ناحیه پرداخت غلتک به جای اینکه به شکل دایره با برآمدگی باشد، به صورت بیضی شکل طراحی شده بود. لوله ای که با غلتک هایی با این کالیبر نورد می شدند (شکل ۲)، از بخش های جداگانه بیضی شکل تشکیل شده بود، به طوری که محور بیضی هر بخش متوالی، عمود بر محور بیضی بخش قبلی بود. فاصله ایجاد شده بین لوله و ماندنرل از گیر کردن ماندنرل هنگام سرد شدن لوله جلوگیری می کرد.

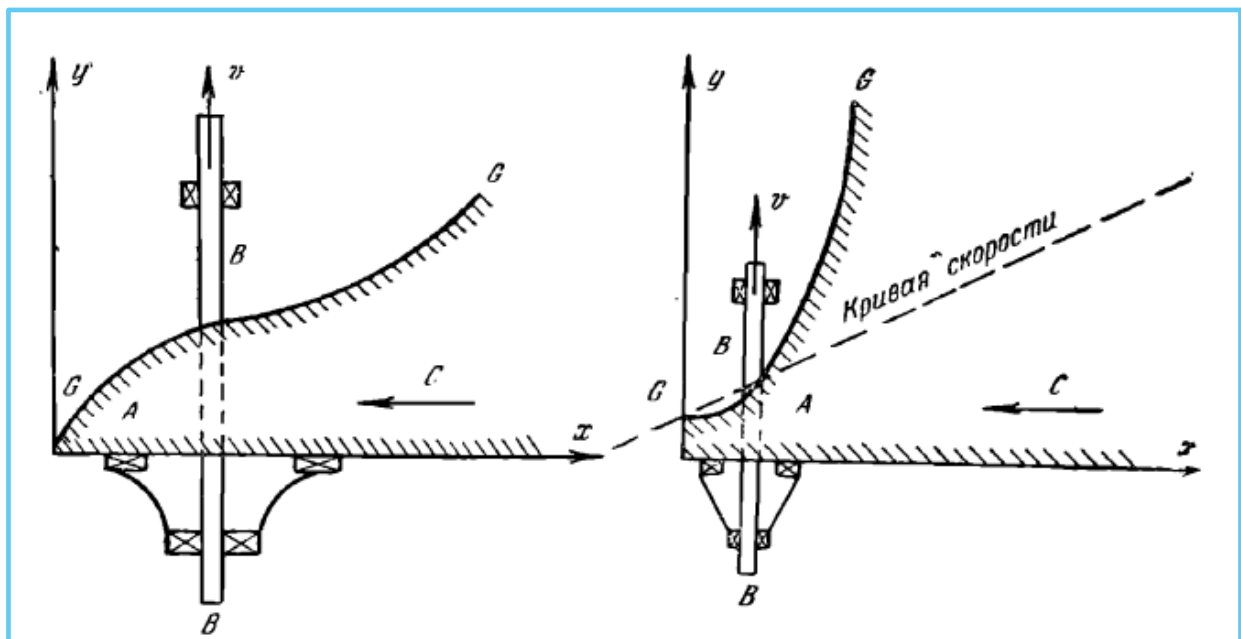


شکل ۲. لوله‌ای که به روش قدیمی در دستگاه نورد پیلگر تولید شده است

روش طراحی منحنی تاج غلتک پیلگر که توسط G. DeGrahl توسعه داده شده، به شرح زیر است:

اگر جسمی به نام **A** با سرعت C حرکت کند (مطابق شکل ۳)، این حرکت می‌تواند به میله‌ای به نام **B** با نسبت مشخصی منتقل شود؛ در این حالت، میله **B** با سرعت v حرکت خواهد کرد که این سرعت به منحنی راهنما $G-G$ بستگی دارد. رابطه بین سرعت‌های C و v برای یک منحنی مشخص را می‌توان در یک دستگاه مختصات مناسب تعیین کرد.

فرض کنیم میله **B** در مدت زمان بسیار کوچکی dt ، مسیری به طول dy را طی می‌کند. آنگاه $v = \frac{dx}{dy}$ و نسبت $\frac{dy}{dx}$ متناظر با نسبت $\frac{v}{C}$ است. اگر منحنی $G-G$ یک سهمی باشد که با معادله‌ای به شکل $x^2 = 2py$ توصیف شود، آنگاه $\frac{v}{C} = \frac{x}{p}$ برقرار است. در این صورت، قانون نسبت سرعت‌ها به صورت یک خط مستقیم بیان می‌شود.



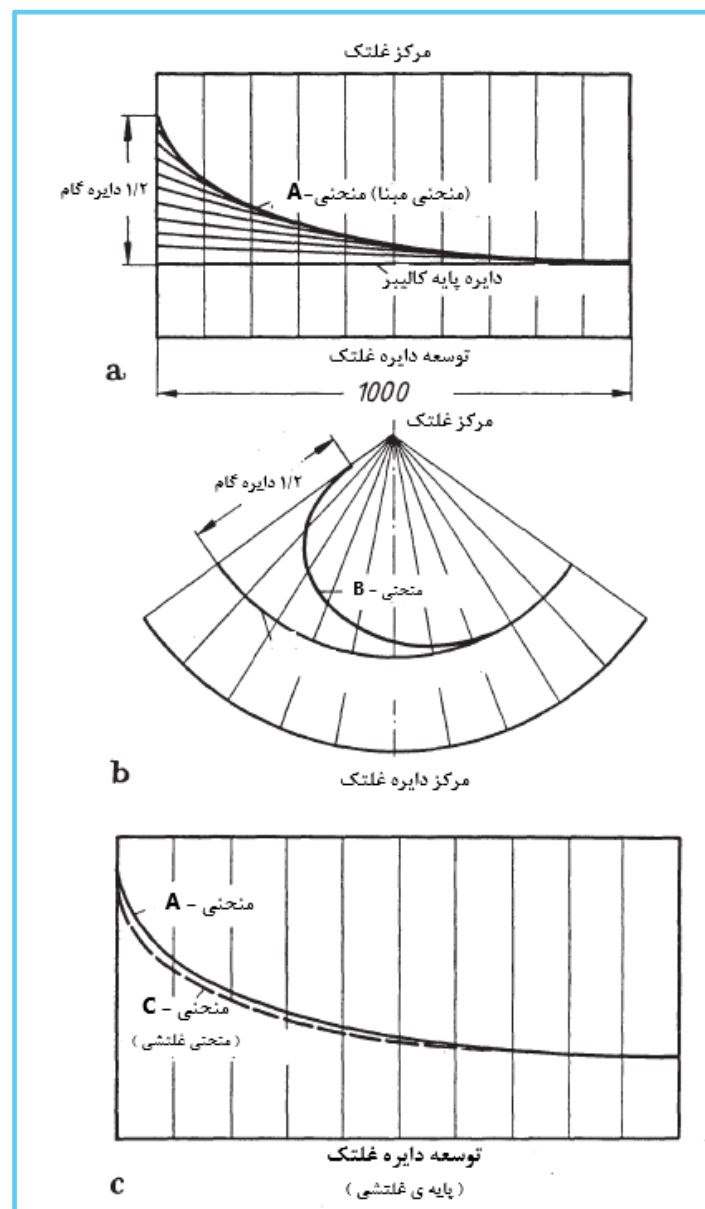
شکل ۳ - حرکت نسبی سوزن ثبت‌کننده بر روی منحنی راهنما

به همین شیوه، راه‌حل برای غلتک پیلگر نیز به دست آمده است. اگر فرض کنیم که غلتک در جای جسم **A** قرار دارد و شمش تحت نورد در جای پین **B** قرار گرفته است، آنگاه شکل پروفیل تاج غلتک باید یک سهمی باشد، همان‌طور که از استدلال‌های ارائه شده در بالا نتیجه‌گیری می‌شود.

هنگام طراحی پروفیل غلتک، ابتدا گسترده‌ای از محیط استوانه‌ای غلتک را روی محور افقی (محور X) ترسیم می‌کنند (شکل ۴-۱). بر روی محور عمودی (محور Y)، نصف ارتفاع تاج غلتک پیلگر (یعنی نصف اختلاف بین قطر شل و قطر لوله) را مشخص می‌کنند. سپس یک منحنی سهمی رسم می‌شود، به طوری که طول تاج برابر با ۱۰۰ درجه (بر حسب اندازه‌های زاویه‌ای) در نظر گرفته می‌شود. این منحنی اولیه (A) اکنون باید روی غلتک منتقل شود (شکل ۴-۲).

برای این منظور، محیط غلتک را به همان تعداد بخش تقسیم می‌کنند که در گسترده‌ی آن انجام شده بود (شکل ۴-۱). سپس از مرکز دایره‌ی غلتک، در امتداد خطوط شعاعی، پاره‌خط‌هایی به اندازه فاصله‌ی بین محور غلتک تا محل تقاطع خطوط عمودی با منحنی سهمی رسم می‌شود. به این ترتیب، منحنی تاج غلتک (B) به دست می‌آید.

با این حال، منحنی واقعی که پس از نوردکاری توسط غلتک‌هایی با چنین پروفیلی به دست می‌آید (منحنی C در شکل ۴-۲)، با منحنی اولیه A منطبق نیست و تفاوت قابل توجهی با منحنی سهمی دارد. با این وجود، روش توصیف‌شده برای سال‌ها در آلمان استفاده می‌شد و تنها در سال‌های اخیر تلاش‌هایی برای بهبود کالیبرها صورت گرفته، اگرچه شکل سهمی به عنوان مبنای اصلی همچنان حفظ شده است.



شکل ۴ - روش های قدیمی برای طراحی منحنی فضای منحنی شیار

به منظور تولید لوله‌های دیواره نازک با روش نورد پیلگر، *L. KLEIN* نوعی کالیبر چند منطقه‌ای (چند ناحیه‌ای) را طراحی کرد. در این روش کالیبراسیون، کاهش نسبی سطح مقطع در بخش‌های ابتدایی بیش‌تر از بخش‌های بعدی است. با استفاده از این روش، سرانجام کاهش مقطع تا ۴۰ درصد حاصل شد. بر پایه این موفقیت‌ها، آزمایش‌های نورد ادامه یافت و سرانجام این امکان فراهم شد که عملکرد پروفیل نورد مخروطی به‌طور دقیق‌تری مورد بررسی قرار گیرد. مشخص شد که فلزی که پس از چرخش ۹۰ درجه‌ای، در فرورفتگی‌های کالیبر تجمع یافته بود، در مرحله بعدی نورد، در نوک (قله) کالیبر باز شده و تغییر شکل می‌دهد.

در نتیجه، بیشترین تغییر شکل در نوک کالیبر اتفاق می‌افتد و در همان نقطه، بالاترین فشار ایجاد می‌شود. با این حال، همین قسمت نوک کالیبر، ضعیف‌ترین بخش غلتک به‌شمار می‌رود.

F. KOKS نوع دیگری از کالیبر را پیشنهاد داد که کالیبر بیضوی نام دارد. در این نوع کالیبر، با استفاده از شکل بیضی، توزیع فشار به‌صورت مطلوب و هدفمند انجام می‌شود. در این روش، زاویه بازشدگی (زاویه خروج) در بخش‌های مختلف به‌صورت زیر تعیین شده است: در ناحیه کاری (شکل‌دهی) برابر با ۲۲ درجه، و در ناحیه پرداخت (پولیش) برابر با ۱۰ درجه در نظر گرفته شده است.

در سال ۱۹۳۰، نوع دیگری از کالیبر چند ناحیه‌ای (بخش) پیشنهاد شد که در آن، در نواحی مختلف مقطع عرضی کالیبر، بخش‌های کاری و غیرکاری به‌صورت متناوب در پیرامون کالیبر قرار می‌گرفتند. هدف از این طراحی، یکنواخت‌سازی کشش در حین نورد بود.

بخش‌های غیرکاری شامل شیارها یا فرورفتگی‌هایی بودند که به‌صورت محیطی (دور تا دور) روی کالیبر ایجاد می‌شدند. در این روش، فشاری که در کالیبرهای معمولی به‌طور متمرکز در نوک کالیبر به‌وجود می‌آمد، در اینجا به‌طور یکنواخت‌تری در مناطق مختلف تغییر شکل، در عرض کالیبر توزیع می‌شد.

معمولاً از کالیبرهای چهارمنطقه‌ای استفاده می‌شد، اما در برخی موارد نیز کالیبرهای شش منطقه‌ای و هشت منطقه‌ای به‌کار گرفته شده‌اند. در این نوع کالیبرها، زاویه چرخش دیگر برابر با ۹۰ درجه نبود، بلکه به‌گونه‌ای انتخاب می‌شد که فلزی که در نورد اول در نواحی غیرکاری قرار داشت، در نورد دوم دقیقاً در مرکز نواحی کاری قرار گیرد.

این نوع کالیبر بسیار موفقیت‌آمیز بود و از آن پس، امکان تولید لوله‌های با دیواره نازک دیگر به شکل کالیبر وابسته نبود، بلکه به ویژگی‌های فلز تحت نورد در دماهای بالا بستگی پیدا کرد. در ادامه توسعه این روش، این ایده مطرح شد که برای هر بخش از کالیبر، یک منحنی تاج جداگانه طراحی شود؛ به این معنا که طول منحنی تاج با مقاومت به تغییر شکل فلز نورد شونده نسبت مشخص و دقیقی داشته باشد.

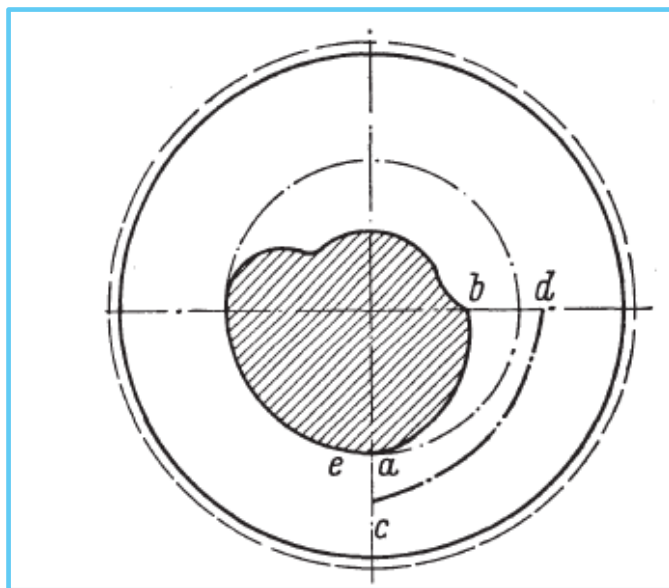
اگر فرض کنیم در هر ناحیه از غلتک چند منطقه‌ای حجم مساوی از فلز نورد شود، طول منحنی تاج در بخش‌هایی که به سمت خروجی قرار دارند بیشتر خواهد بود و بنابراین زمان تغییر شکل نیز بیشتر از بخش‌هایی خواهد بود که به نوک کالیبر نزدیک‌ترند. در نوک کالیبر ضریب تمرکز تنش بیشتر از سایر بخش‌ها خواهد بود. تنش‌های فلز در نواحی مختلف نیز متفاوت خواهد بود.

با توجه به وضعیت کنونی مطالعه کالیبر، فرض می‌شود که هنگام ساخت بخش‌های کاری (شکل ۵)، ممکن است مواردی از ضرایب تمرکز تنش زیر مشاهده شوند:

بیشینه ضریب تنش ها	طول
$ab > cd$ ضریب تنش	$ab < cd$ منحنی شیار
$eb = cd$ ضریب تنش	$eb = cd$ مسیر

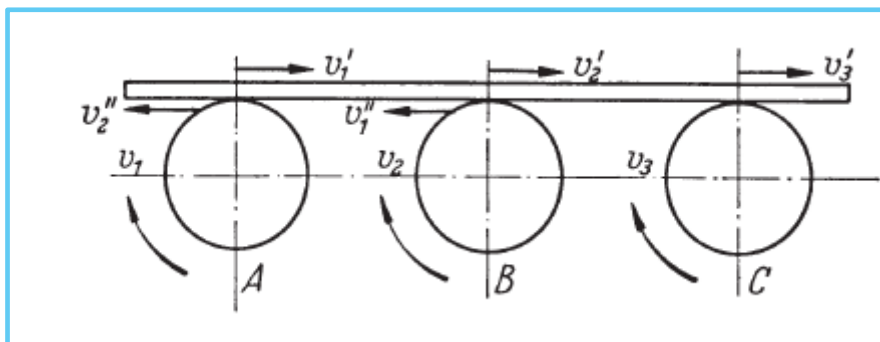
منحنی تاج بخش‌های کاری جداگانه طوری ترسیم می‌شود که تغییر شکل بزرگ‌تر در بخش‌های با طول بیشتر انجام شود. در این حالت برای مواد مختلف قابل نورد، یک مقدار حدی مشخص برای ضریب تمرکز تنش در نظر گرفته می‌شود.

می‌توان از آنچه گفته شد نتیجه گرفت که بهترین کالیبر چند منطقه‌ای، کالیبری است که در آن ضریب تنش به صورت یکنواخت و ثابت در تمام محیط کالیبر برقرار باشد.



شکل ۵ - طرح تعیین ضریب تنش در ناحیه های مختلف غلتک

در هنگام نورد بین دو غلتک پیلگر، ماندزل و شلی که نورد می‌شود حرکتی رفت و برگشتی انجام می‌دهند که مقدار آن با دوران غلتک رابطه مشخصی دارد. این فرآیند را می‌توان به صورت حرکت یک ورق (شکل ۶) تحت تأثیر سه غلتک A، B و C تصور کرد که با سرعت‌های متفاوتی می‌چرخند. در این حالت صفحه با سرعتی حرکت می‌کند که کمتر از بیشینه سرعت محیطی غلتک و بیشتر از کمینه سرعت محیطی آن است.



شکل ۶ - حرکت حاصل از یک صفحه که روی چندین غلتک قرار دارد و هر غلتک با سرعت محیطی متفاوت می‌چرخد

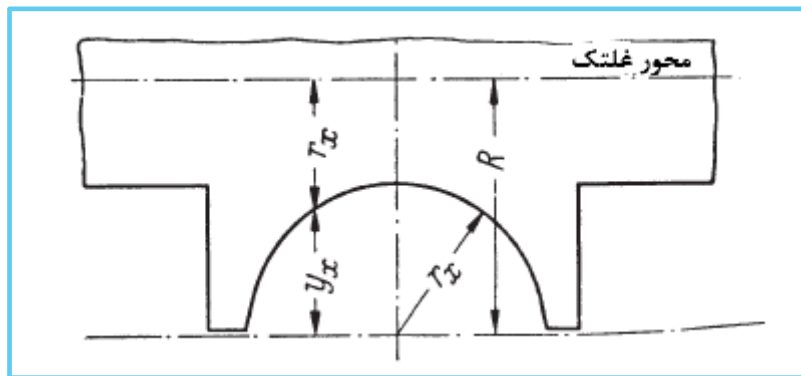
اگر فرض کنیم حرکت ورق تنها توسط غلتک‌های A و B انجام شود و یکی از غلتک‌ها (مثلاً B) سریع‌تر از دیگری بچرخد، این موضوع باعث حرکت سریع‌تر ورق و افزایش سرعت چرخش غلتک A خواهد شد که سرعت کمتری دارد. در نتیجه، روی غلتک کندتر A گشتاوری ایجاد می‌شود که تلاش می‌کند جلوی چرخش سریع‌تر را بگیرد. همزمان، روی غلتک سریع‌تر B نیز گشتاوری با علامت مخالف ایجاد خواهد شد.

اگر اکنون سه یا تعداد بیشتری غلتک را در نظر بگیریم که بین آن‌ها گشتاورها و گشتاورهای مخالف ایجاد می‌شود، واضح است که برای حرکت یکنواخت ورق، جمع کل گشتاورهای وارد بر غلتک‌های مربوطه باید برابر صفر باشد. در این حالت، ورق با سرعت متوسطی حرکت خواهد کرد. می‌توان گفت در این وضعیت، حرکت غلتک دوم را می‌توان به عنوان منبع حرکت ورق در نظر گرفت که با سرعت متوسط حرکت ورق مطابقت دارد.

بنابراین، اگر بر جسمی که در حال حرکت است هم‌زمان چند سرعت مختلف تأثیر بگذارند، آن جسم با سرعت متوسطی حرکت خواهد کرد که به اندازه و جهت هر یک از سرعت‌های مؤثر بستگی دارد.

اگر به بررسی حرکت ماندل و شل در نورد پیلگر بازگردیم، می‌توان نتیجه گرفت که این حرکت توسط نقاط منفردی از سطح تماس بین دیواره‌های کالیبر و فلز در حال نورد تعیین می‌شود. اما به دلیل فاصله‌های متفاوت این نقاط از محور غلتک، سرعت‌های مختلفی دارند. بنابراین، همان‌طور که از مطالب گفته شده برمی‌آید، ماندل و شل با سرعت متوسطی حرکت خواهند کرد.

به دلیل اختلاف سرعت نقاط سطح تماس، تنش‌های اضافی در فلز به وجود می‌آید که می‌تواند باعث ایجاد ترک‌های عرضی در دیواره نازک و تا حد زیادی سرد شده‌ی لوله شود. برای جلوگیری از تشکیل این ترک‌ها و انجام نورد بدون مشکل، لازم است بخش‌های کاری‌ای تعیین شوند که سرعت آن‌ها با سرعت ماندل برابر باشد. از شکل کالیبر می‌توان دید که برخی از بخش‌های سطح که به دلیل تقارن خود فاصله یکسانی از وسط غلتک‌ها دارند، با این شرط مطابقت دارند. موقعیت چنین بخش‌هایی روی سطح کالیبر که متناسب با شعاع مربوطه هستند، می‌تواند به عنوان میانگین مجموع شعاع‌ها تعیین شود.



شکل ۷ - طرح کالیبر

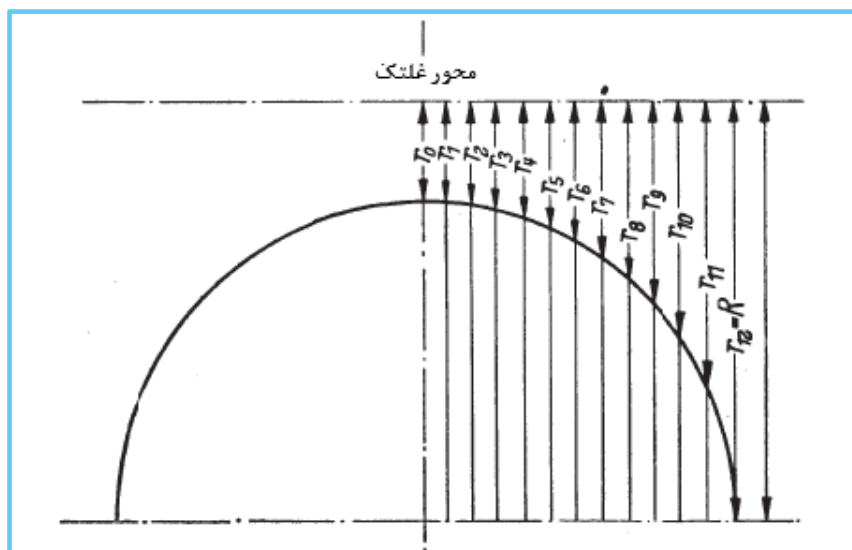
از شکل ۸ چنین برمی‌آید که شعاع در هر نقطه از کالیبر:

$$r_x = R - y_x$$

که در آن

R - شعاع استوانه (بخش استوانه‌ای) غلتک است؛

y_x - ارتفاع کالیبر در نقطه مورد نظر می‌باشد.



شکل ۸ - طرح تعیین شعاع متوسط غلتک

اگر مقطع عرضی کالیبر (شکل ۸) را به تعداد قسمت‌های مساوی تقسیم کنیم (در اینجا ۱۲ قسمت)، و شیب خروجی‌ها را نادیده بگیریم، داریم مجموع شعاع‌ها به صورت زیر:

$$R + r_1 + r_2 + \dots + r_{12} = R + (R - y_1) + \dots + (R - y_{12}) = 13R - (y_1 + y_2 + \dots + y_{12})$$

شعاع متوسط

$$r_m = R - \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_{12}}{13} = R - y_m$$

که در آن

y_m - میانگین ارتفاع کالیبر است.

از آنجایی که کالیبر در مقطع شعاعی خود یک دایره است، می‌توان با جایگذاری مقادیر مناسب x در معادله دایره، مقدار y را به دست آورد:

$$y^2 = r^2 - x^2$$

بیا باید آنچه گفته شد را با یک مثال روشن کنیم.

فرض کنیم قطر ایده‌آل غلتک‌ها $D=1000D$ میلی‌متر و قطر کالیبر $d=240$ میلی‌متر باشد.

برای مقادیر x که هر ۱۰ میلی‌متر گرفته شده‌اند، با استفاده از معادله $y^2 = r^2 - x^2$ مقادیر y به دست می‌آیند که در ادامه آمده است.

x	0	10	20	30	40	50	60
y	120	119,6	118,3	116,2	113,1	109,1	103,9
x	70	80	90	100	110	120	—
y	97,5	89,4	79,4	66,3	48,0	0	—

$$y_{\square} = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_{12}}{13} = \frac{1180.3}{13} \approx 90.8$$

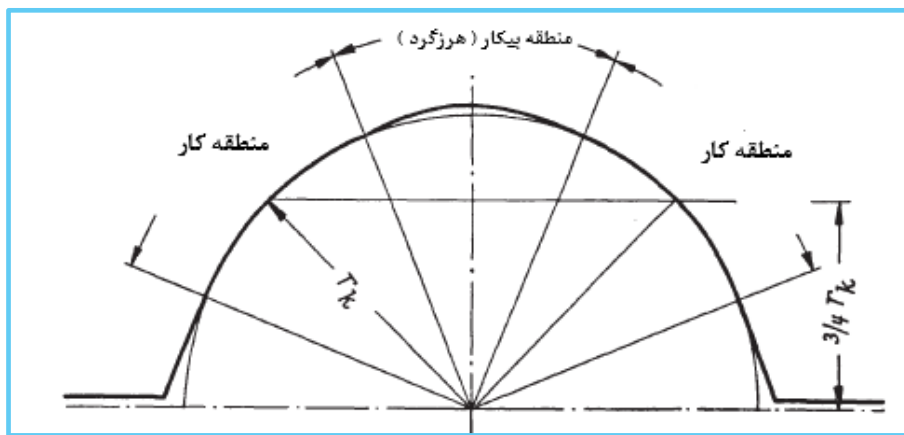
$$r_m = 500 - 90.8 = 409.2 \text{ mm}$$

بنابراین، در این حالت، بخش‌های کاری باید در نقطه‌ای از کالیبر قرار بگیرند که در فاصله 409.2 میلی‌متری از محور غلتک واقع شده باشد.

برای یافتن موقعیت دقیق نواحی کاری در سراسر لبه غلتک پیلگر، لازم است مقادیر متناظر قطر متوسط برای نقاط دیگر نیز مشخص شود. در مثال ما، مقدار $\frac{y_m}{r}$ تقریباً برابر با نسبت ۳ به ۴ است. این مقدار کمی بیشتر از 0.75 است. این نتیجه به دلیل چشم‌پوشی از وجود قسمت‌های اضافی (بیرون‌زدگی‌ها) به دست آمده است. اگر اما بیرون‌زدگی‌ها را در نظر بگیریم، نسبت $\frac{y_m}{r}$ دقیقاً برابر با ۳ به ۴ خواهد شد.

بنابراین، با استفاده از مقدار ضریب به دست آمده، می‌توان موقعیت نواحی کاری را در هر کالیبر به اندازه‌ی $\frac{3}{4}r$ تعیین کرد که این امکان را می‌دهد تا نواحی کاری و غیرکاری (هرزگرد یا بیکار) غلتک‌ها همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده، قرار گیرند. در این حالت، نیاز به چرخش شل به اندازه ۴۵ یا ۱۲۰ درجه است.

تا کنون، برای انتخاب منحنی تاج غلتک پیلگر معمولاً از شکل اولیه‌ی سهمی استفاده می‌شد. با این حال، هنگام انتقال این منحنی در فرآیند نورد از غلتک پیلگر به شل، تطابق کامل آن با داده‌های محاسباتی به دست نمی‌آمد. انحراف منحنی به‌ویژه در قسمت‌های پرخمیدگی تاج بسیار زیاد بود، هرچند در بخش‌های کم‌شیب تطابق نسبتاً خوبی مشاهده می‌شد.



شکل ۹ - چیدمان بخش های بیکار (هرز گرد) و کاری در کالیبر

وقتی منحنی اولیه شیب کمتری داشته باشد، اختلاف منحنی تاج در بخش های تندترین کالیبر نیز کمتر خواهد بود.

با چنین پروفیل تاج غلتک پیلگر، شرط گفته شده قبلی مبنی بر نیاز به تغییر شکل بیشتر ماده در حالت پلاستیک تر، برآورده نمی شود.

فشرده گی یکنواخت فلز در زوایای مرکزی مساوی باعث می شود که مقدار بالقوه تغییر شکل در ابتدای نورد پیلگر به طور کامل استفاده نشود و در انتهای فرآیند به دلیل کاهش دمای قابل توجه فلز، انجام آن دشوار شود. بنابراین، با این روش نمی توان به شکل مناسبی از منحنی تاج غلتک پیلگر دست یافت.

تلاش ها برای ساخت منحنی تاج غلتک پیلگر بر اساس ثابت بودن زاویه گیرش (درگیری یا تماس) نیز ناموفق بوده اند. فرآیندهای نورد پیلگر تحت تأثیر زاویه اصطکاک نیستند، همان طور که در غلتک های استوانه ای صاف رخ می دهد، بلکه به میزان تغییر شکل وابسته اند. نیروهای وارد شده در این فرآیند به دلیل چرخش غلتکی با مقطع متغیر، تغییر می کنند. در این حالت، نیروی حاصل از فشار تقریباً عمود بر مماس در جهت چرخش قرار دارد، بنابراین تنها در آغاز فرآیند می توان شرایط گیرش فلز توسط غلتک ها را مورد بررسی قرار داد.

در فرآیند نورد پیش رونده، زاویه گیرش ممکن است بزرگ تر از زاویه اصطکاک مربوطه باشد، اما در عمل لغزش فلز روی غلتک ها رخ نمی دهد.

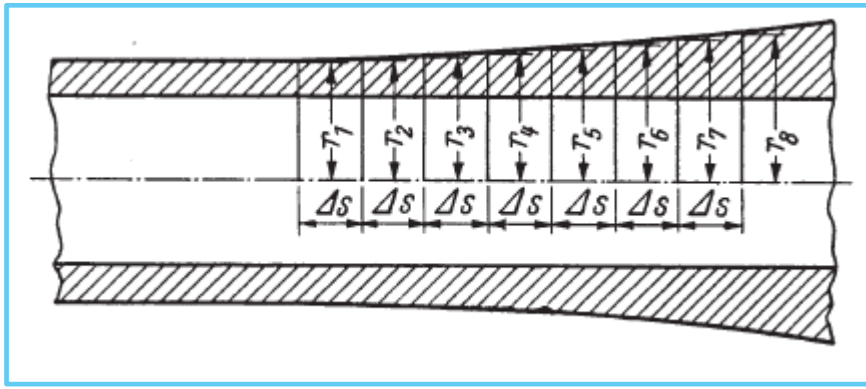
با چرخش ادامه دار غلتک، بخش کاری آن به دلیل افزایش پیوسته قطر، در فلز فرو رفته و به این ترتیب نورد انجام می شود.

در کالیبراسیون غلتک های دستگاه پیلگر، شکل سهمی واری که پیش تر برای تاج غلتک به کار می رفت، به عنوان نوع اصلی منحنی آن پذیرفته شده بود، اما این شکل مورد تحقیقات و بهینه سازی های بیشتری قرار گرفت تا کاهش نسبی ثابت در سطح مقطع فراهم شود. با این حال، تحقق چنین شرطی به تضادها و ناسازگاری های مشخصی منجر می شد.

بر اساس این شرط، باید برای سر کلگی نورد شده ی پیلگر، کالیبری یافت شود که در آن طی فرآیند تغییر شکل، کاهش سطح مقطع مورد بررسی به صورت ثابت باقی بماند و نسبت مساحت های مقاطع، که در فواصل مساوی Δs از یکدیگر قرار دارند، نیز دارای مقادیر یکسانی باشند.

از آنجا که میزان فشرده گی (کاهش سطح مقطع) با شعاع ها متناسب است، طبق شکل ۱۰ باید داشته باشیم:

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{r_2}{r_3} = \frac{r_3}{r_4} = \frac{r_n - 1}{r_n} = \text{Const}$$



شکل ۱۰ - طرح تشکیل پروفیل سر پیلگر

اگر بپذیریم که معادله‌ی منحنی سر پیلگر به صورت $y=f(x)$ باشد، آنگاه مقدار $x=s$ متناظر با مقدار مشخصی از y خواهد بود. اگر بر روی محور افقی فاصله‌ای به اندازه Δs مشخص کنیم، به نقطه‌ای می‌رسیم که منحنی تاج در آن مقدار y_2 را خواهد داشت. اگر مقادیر y نمایانگر شعاع بودند، یعنی با میزان فشردگی متناسب می‌بودند، در آن صورت:

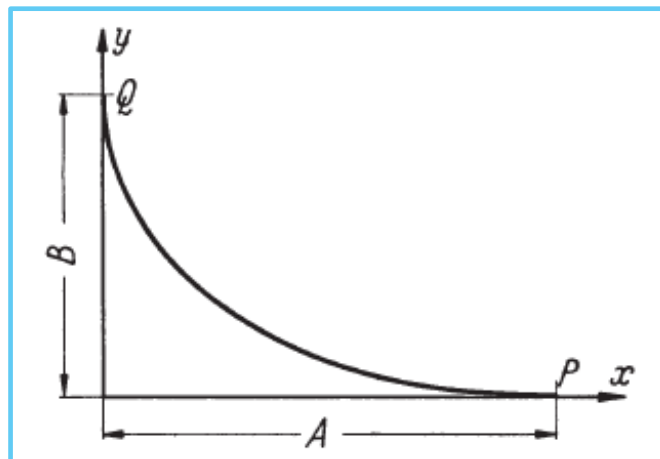
$$\frac{y_1}{y_2} = \frac{f(s)}{f(s + \Delta s)}$$

برای بخش بعدی که در فاصله Δs قرار دارد،

$$\frac{y_1}{y_2} = \frac{f(s + \Delta s)}{f(s + 2\Delta s)}$$

باید مقدار جدیدی از تابع $y=f(x)$ به دست آید، به گونه‌ای که کاهش سطح مقطع همچنان به صورت یکنواخت باقی بماند.

فرض کنیم که فاصله‌ی Δs در هر نقطه‌ای از منحنی سر پیلگر در نظر گرفته شده است. در این صورت، نسبت $\frac{y_1}{y_2} = \frac{f(s)}{f(s+\Delta s)}$ فرآیند تغییر شکل را توصیف می‌کند. طبق نظر DE GRAHL، این نسبت خطی خواهد بود که در دستگاه مختصات دکارتی موازی با محور افقی (محور x) است. اگر فرض کنیم که مقادیر y با شعاع‌ها و در نتیجه با میزان فشردگی متناسب هستند، آنگاه برای این نقطه جدید نیز باید نسبت سطح مقطع آن به سطح مقطع نقطه قبلی (که در فاصله Δs قرار داشت) برابر با نسبت ثابت تعریف شده باشد. این رویکرد پایه‌ای است برای طراحی منحنی تاج غلتک پیلگر به منظور دستیابی به تغییر شکل یکنواخت در طول مسیر نورد. این بدان معناست که اگر کاهش سطح مقطع در فواصل مساوی از مسیر نورد ثابت باشد، نمودار آن به صورت یک خط مستقیم افقی ظاهر خواهد شد — نشان‌دهنده‌ی یکنواختی فرآیند تغییر شکل در طول تاج کله‌گی.



شکل ۱۱ - ساخت یک سهمی

می‌توان با این حال فرض کرد که منحنی سر کلگی پیلگر یک سهمی است (شکل ۱۱)، که دارای دو نقطه تماس می‌باشد:

نقطه P با محور افقی x در فاصله A از مبدأ و نقطه Q با محور عمودی y در فاصله B از مبدأ.

در این صورت، معادله چنین سهمی‌ای — به‌عنوان یک منحنی مقطع مخروطی — به‌صورت زیر خواهد بود:

$$ax^2 + by^2 + 2cxy + 2dx + 2ey + 1 = 0$$

در نقطه P داریم

$$y = 0, (x - A)^2 = 0$$

بنابراین

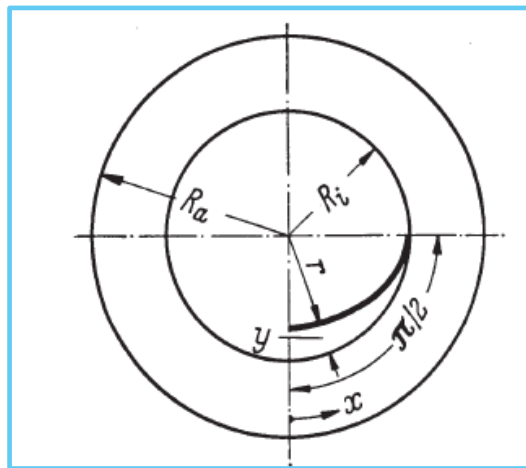
$$ax^2 + 2dx + 1 = 0$$

$$(x - A)^2 = x^2 - 2Ax + A^2 = 0$$

از این معادله‌ها

$$a = \frac{1}{A^2}$$

$$d = -\frac{1}{A}$$



شکل ۱۲ - ترسیم سهمی و پروفیل غلتک

وقتی $x=0$ در نقطه Q داریم

$$(y - B)^2 = 0 \text{ و } y^2 - 2By + B^2 = 0$$

$$by^2 + 2ey + 1 = 0$$

از آنجا که

$$b = \frac{1}{B^2}, e = -\frac{1}{B}$$

علاوه بر این

$$ab - c^2 = 0 \text{ یا } c^2 = \frac{1}{A^2 - B^2} \text{ و } c = -\frac{1}{AB}$$

در نهایت معادله‌ی سهمی را به‌دست می‌آوریم

$$\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{B^2} - \frac{2xy}{AB} - \frac{2x}{A} - \frac{2y}{B} + 1 = 0$$

برای انتقال منحنی طبق عبارت به‌دست آمده به غلتک پیلگر، این معادله باید تبدیل شود. به جای متغیرهای x و y مقادیر زیر را معرفی می‌کنیم:

$$x = R_a \frac{\alpha}{180} \quad , \quad y = R_i - r$$

در این حالت (شکل ۱۲)، معادله منحنی برجستگی غلتک پیلگر به صورت زیر درمی‌آید:

$$R_i - r = B \left(1 + \frac{R_a \alpha}{180A} \right) - 2B \sqrt{\frac{R_a \alpha}{180A}}$$

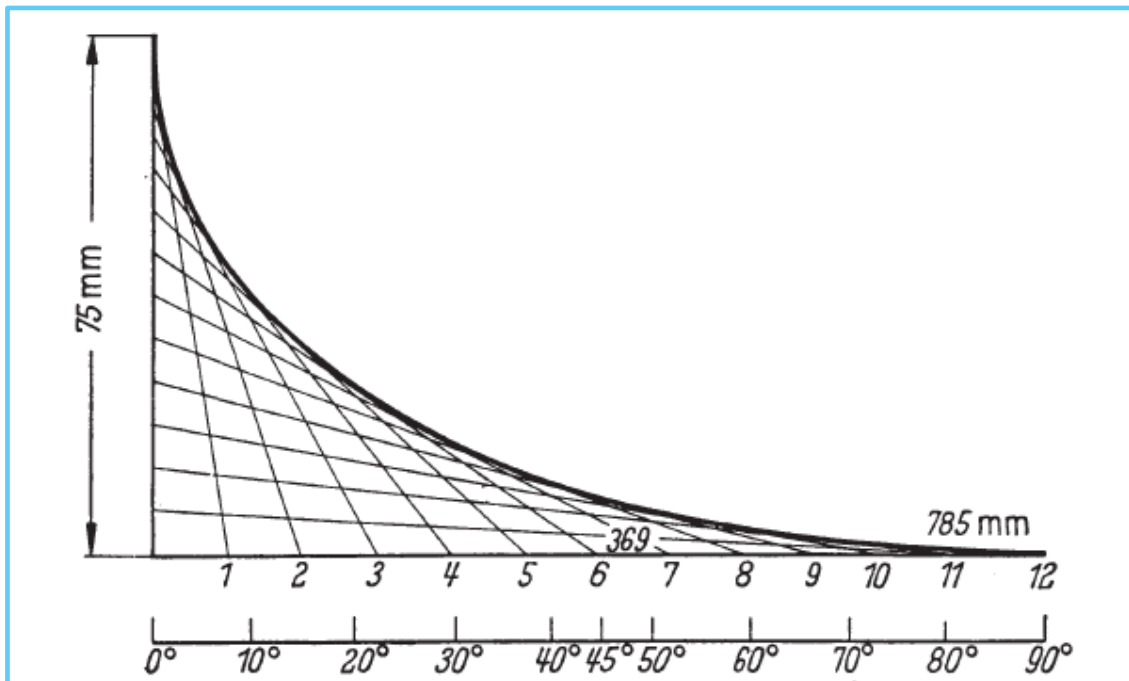
با توجه به داده‌های موجود کالیبراسیون، امکان تعیین مقادیر A و B وجود دارد. فرض کنیم داریم، بر حسب میلی‌متر:

قطر ایده‌آل غلتک‌ها ۱۰۰۰

فاصله (Gap) بین غلتک‌ها ۴۰

قطر غلتک در ناحیه‌ی استوانه یل بشکه غلتک (بخش میانی برجسته) ۹۶۰

قطر غلتک در رأس کالیبر ۱۰۰۰ - ۴۰۰ = ۶۰۰



شکل ۱۳ - ساختار سهمی

اگر شل در طول عملیات نورد از قطر ۵۵۰ میلی‌متر به قطر ۴۰۰ میلی‌متر کاهش یابد، ارتفاع برجستگی سر پیلگر $t=75$ میلی‌متر خواهد بود. زاویه برجستگی را ۹۰ درجه در نظر می‌گیریم. در این حالت، زاویه بخش صیقل‌دهی برابر با ۱۰۰ درجه و زاویه بخش خروجی برابر با ۳۰ درجه

$$f(a) = \frac{75(1 + 0.01\alpha) - 150\sqrt{0.01\alpha} + \frac{d}{2}}{75[1 + 0.01(\alpha + \Delta\alpha)] - 150\sqrt{0.01(\alpha + \Delta\alpha)} + \frac{d}{2}}$$

فرمول بالا مشخصه‌ی یک هذلولی مرتبه بالاتر است. DE GRAHL این منحنی مشخص را به صورت یک خط مستقیم در نظر گرفت. در واقع، این حالت مربوط به زمانی است که $d_\alpha = 0$ ، که البته در عمل امکان پذیر نیست (شکل ۱۴). هنگام بررسی وابستگی میزان کاهش ضخامت دیواره δ (که برابر است با فاصله بین منحنی برجستگی و ماندل)، باید مقدار δ را به جای $\frac{d}{2}$ در معادله قرار داد. در این حالت نیز، معادله به شکل یک هذلولی در می آید که با فرمول ارائه شده سازگار است.

از ساختار فرمول ارائه شده به راحتی می توان دید که شکل هذلولی در صورت تغییر ضخامت دیواره متفاوت خواهد بود. از این نکته نتیجه گیری عملی می شود که در محاسبات کالیبراسیون، نه تنها باید ابعاد شل (پوسته فلزی) را در نظر گرفت، بلکه لازم است ضخامت دیواره لوله نهایی نیز به طور دقیق تعیین شود. بنابراین، کاهش نسبی ضخامت دیواره شل نه تنها به شکل منحنی بستگی دارد، بلکه به ضخامت دیواره لوله نیز وابسته است.

شرایط بهینه نورد در صورتی حاصل می شود که فشار مجاز نورد به طور کامل مورد استفاده قرار گیرد. با این حال، کاهش های نسبی (در ابعاد) مستقیماً با فشار نورد مرتبط نیستند. از این رو، می توان نتیجه گرفت که شکل منحنی برجستگی غلتک پیلگر را می توان بر اساس ثابت بودن فشار نورد طراحی کرد.

رسم پروفیل برجستگی غلتک پیلگر بر اساس فرمول ارائه شده برای $f(a)$ دشوار است، زیرا در آن وابستگی میان d_α و y مشخص نشده است. بنابراین، لازم است برخی ملاحظات کلی بیان شود. فرض کنیم که به فواصل برابر، کاهش های (تغییر شکل های) برابر نیز مربوط هستند، یعنی:

$$\frac{y_1}{y_2} = \frac{f(x)}{f(x + \Delta x)} = \frac{f(x + \Delta x)}{f(x + 2\Delta x)} = \text{Const}$$

توابعی که در این عبارت وارد می شوند را می توان نمایی در نظر گرفت:

$$f(x) = ae^{-bx}$$

$$f(x + \Delta x) = ae^{-b(x+\Delta x)} = ae^{-bx}e^{-b\Delta x}$$

$$f(x + 2\Delta x) = ae^{-b(x+2\Delta x)} = ae^{-b(x+\Delta x)}e^{-b\Delta x}$$

بنابراین

$$\frac{f(x)}{f(x + \Delta x)} = \frac{ae^{-bx}}{ae^{-bx}e^{-b\Delta x}} = e^{b\Delta x}$$

$$\frac{f(x + \Delta x)}{f(x + 2\Delta x)} = \frac{ae^{-b(x+\Delta x)}}{ae^{-b(x+\Delta x)}e^{-b\Delta x}} = e^{b\Delta x}$$

نتیجه می شود که

$$\frac{y_1}{y_2} = \frac{f(x)}{f(x + \Delta x)} = \frac{f(x + \Delta x)}{f(x + 2\Delta x)} = e^{b\Delta x}$$

برای کالیبراسیون برجستگی غلتک پیلگر، فرمول به دست آمده می تواند به شکل زیر نوشته شود

$$y = y_0 e^{-bx} \quad \text{یا} \quad y = \frac{y_0}{e^{bx}}$$

ثابت b را می‌توان از معادلات زیر تعیین کرد:

$$y_n = y_0 e^{-bx_n} \quad \text{یا} \quad \frac{y_n}{y_0} = e^{-bx_n}$$

$$\ln \frac{y_n}{y_0} = -bx_n, \quad \ln \frac{y_0}{y_n} = bx_n, \quad b = \frac{\ln \frac{y_0}{y_n}}{x_n}$$

که در آن:

y_0 - ضخامت دیواره شل در لحظه‌ای که توسط غلتک‌ها در ابتدای نورد گرفته می‌شود؛

y_n - ضخامت دیواره لوله نورد شده در پایان فرآیند نورد؛

x_n - طول ناحیه کاری برجستگی غلتک پیلگر در امتداد رأس کالیبر (در مثال بررسی‌شده فوق، این مقدار متناظر با زاویه ۹۰ درجه است).

فرض کنیم قطر غلتک در امتداد رأس کالیبر برابر با ۶۰۰ میلی‌متر، زاویه برجستگی ۹۰ درجه، ضخامت دیواره شل ۹۰ میلی‌متر و ضخامت نهایی لوله ۵ میلی‌متر باشد. در این صورت:

$$x_n = \frac{600 \pi}{2} = 471.24 \text{ mm}$$

$$b = \frac{\ln \frac{90}{5}}{471.24} = 0.006104$$

مقادیر متناظر y بر حسب مقدار x در جدول ۱ ارائه شده‌اند. جدول زیر محیط باز شده دایره مبنای کالیبر را با مقادیر میانی مختلفی از x نشان می‌دهد، که برای آن‌ها مقادیر متناظر y باید تعیین شوند.

$x \text{ mm}$	0	25	50	100	200	300	400	471,24
$b x =$								
$0,006104 x$	0	0,1526	0,3052	0,6104	1,221	1,831	2,442	2,8746
$e^{0,006104 x}$	1	1,165	1,357	1,848	3,400	6,250	11,500	17,600
$y(5) \text{ mm}$	90	77,0	66,6	49,0	26,5	14,4	7,8	5,0

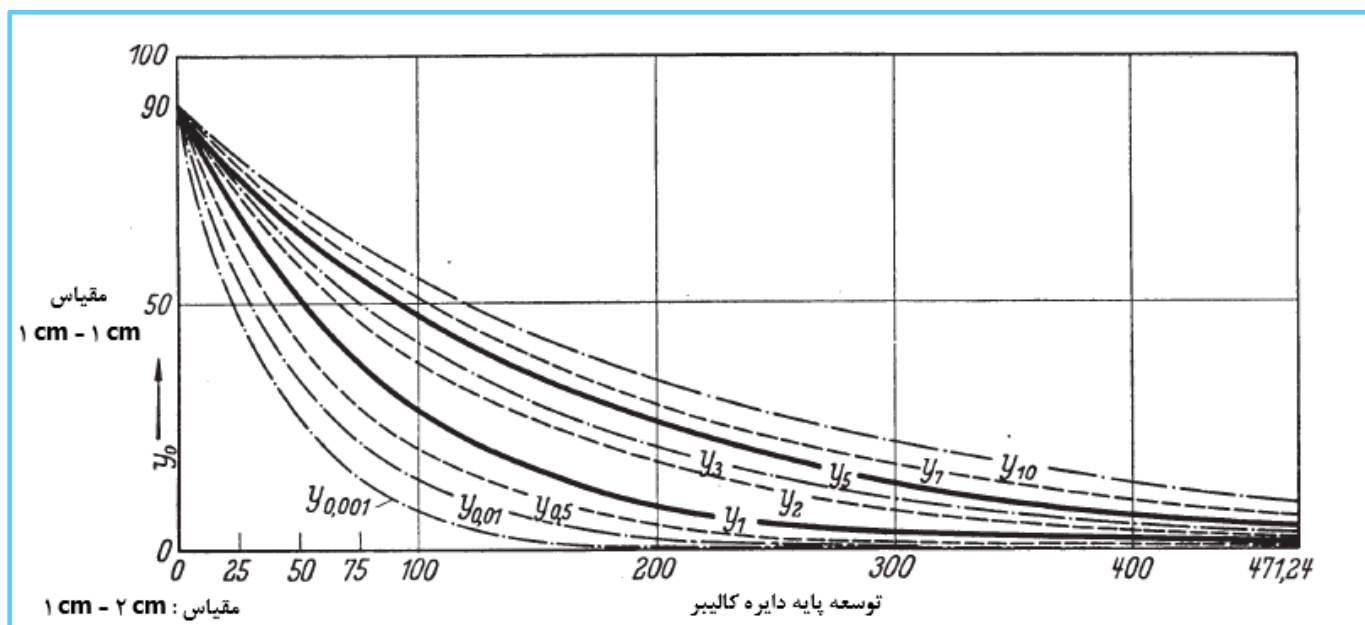
جدول ۱ - مقادیر پارامترهای مختلف برای تعیین منحنی تاج غلتک با توجه به فاصله x

برای درک بهتر تأثیر ضخامت دیواره بر شکل منحنی برجستگی غلتک پیلگر، با فرض ثابت بودن سایر شرایط، برای مثال قبلی محاسباتی با ضخامت‌های دیواره ۲، ۳، ۷ و ۱۰ میلی‌متر انجام شده است. برای هر یک از این مقادیر، ثابت b و سایر مقادیر مرتبط محاسبه شده‌اند (جدول ۲).

x mm	0	25	50	100	200	300	400	471,24
$b_2 \cdot x = 0,00803 \cdot x$	0	0,20075	0,4015	0,803	1,606	2,409	3,212	3,800
$e + b_2 \cdot x = e^{0,00803 \cdot x}$	1	1,231	1,495	2,230	4,990	11,20	24,60	45,00
$y_{(2)} =$	90	73,1	60,2	40,9	18,05	8,04	3,66	2
$b_3 \cdot x = 0,0072 \cdot x$	0	0,18	0,36	0,72	1,44	2,16	2,88	3,40
$e + b_3 \cdot x = e^{0,0072 \cdot x}$	1	1,1975	1,435	2,06	4,22	8,90	17,80	30,00
$y_{(3)} =$	90	75,10	62,8	43,7	21,4	10,35	5,05	3,00
$b_7 \cdot x = 0,0054 \cdot x$	0	0,135	0,27	0,54	1,08	1,62	2,16	2,55
$e + b_7 \cdot x = e^{0,0054 \cdot x}$	1	1,145	1,310	1,715	2,950	5,010	8,900	12,85
$y_{(7)} =$	90	78,70	68,70	52,50	30,50	18,00	10,35	7,00
$b_{10} \cdot x = 0,00465 \cdot x$	0	0,11625	0,2325	0,465	0,930	1,395	1,860	2,200
$e + b_{10} \cdot x = e^{0,00465 \cdot x}$	1	1,1235	1,263	1,5925	2,540	4,040	6,420	9,05
$y_{(10)} =$	90	80,10	71,20	56,50	35,40	22,30	14,02	10,000

جدول ۲ - مقادیر پارامترهای مختلف برای تعیین منحنی تاج غلتک با توجه به فاصله x

منحنی های به دست آمده برای پنج ضخامت دیواره مختلف، به صورت پنج منحنی متفاوت، در شکل ۱۵ نمایش داده شده اند.



شکل ۱۵ - ترسیم منحنی تاج غلتک پیلگر در هنگام نورد لوله هایی با ضخامت دیواره نهایی متفاوت

برای یافتن مقدار بحرانی منحنی برجستگی غلتک پیلگر، برای همان مثال، محاسبات پارامترهای منحنی با در نظر گرفتن ضخامت های دیواره ۰/۵، ۰/۱، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ میلی متر انجام شده است (جدول ۳).

چهار منحنی اضافی به دست آمده در بخش پایین شکل ۱۵ ترسیم شده‌اند. تغییرات شاخص منحنی برجستگی تنها در یک سوم ابتدایی گسترش قوس در امتداد رأس کالیبر رخ می‌دهد. دو سوم پایانی منحنی به صورت مجانبی به محور افقی (خط محور x) نزدیک می‌شوند. اگر قطر ماندلر در نظر گرفته شود، می‌توان از منحنی‌های مربوطه تغییرات ضخامت دیواره لوله را تعیین کرد.

x mm	0	25	50	100	200	300	400	471,24
$b_{0,5} \cdot x = 0,01102 \cdot x$	0	0,2755	0,551	1,102	2,204	3,306	4,408	5,1929
$e^{b_{0,5} \cdot x} = e^{0,01102 \cdot x}$	1	1,316	1,740	3,01	9,10	27,50	82,80	182,00
$y_{0,5} =$	90	68,5	52,2	30,00	9,90	3,28	1,09	0,50
$b_{0,1} \cdot x = 0,0144 \cdot x$	0	0,36	0,72	1,44	2,88	4,32	5,76	6,80
$e^{b_{0,1} \cdot x} = e^{0,0144 \cdot x}$	1	1,434	2,05	4,22	15,28	76	320	900
$y_{0,1} =$	90	63,0	44,0	21,3	5,9	1,18	0,281	0,10
$b_{0,01} \cdot x = 0,0193 \cdot x$	0	0,481	0,962	1,93	3,86	5,79	7,72	9,10
$e^{b_{0,01} \cdot x} = e^{0,0193 \cdot x}$	1	1,62	2,6	6,9	47,5	325	2250	9000
$y_{0,01} =$	90	56,0	34,5	14,6	1,9	0,276	0,0405	0,01
$b_{0,001} \cdot x = 0,0242 \cdot x$	0	0,605	1,21	2,42	4,84	7,26	9,68	11,404
$e^{b_{0,001} \cdot x} = e^{0,0242 \cdot x}$	1	1,83	3,35	11,25	125	1420	15800	89000
$y_{0,001} =$	90	49,2	26,9	8,00	0,72	0,063	0,0054	0,001

جدول ۳ - مقادیر پارامترهای مختلف برای محاسبه منحنی تاج (دندانه) غلتک بر حسب فاصله x

از تحلیل منحنی‌های به دست آمده چنین برمی‌آید که با کاهش ضخامت دیواره، تغییر شکل (کاهش سطح مقطع) شل عمدتاً در بخش جلویی برجستگی انجام می‌شود؛ بنابراین این امکان وجود دارد که زاویه برجستگی کاهش یابد و در نتیجه زاویه بخش صیقل‌دهنده غلتک افزایش پیدا کند. در عمل، نتایج خوب زمانی به دست می‌آید که زاویه برجستگی غلتک از ۹۰ درجه به ۶۵ درجه کاهش یابد و طول بخش صیقل‌دهنده به صورت متناسب افزایش داده شود. نورد با غلتک‌های پیلگر از این نوع امکان دستیابی به تolerانس‌های دقیق و باریک در ابعاد لوله را فراهم می‌کند. ادامه کارهای عملی باعث بهبود قابل توجه کالیبراسیون غلتک‌های پیلگر و کاهش بیشتر میزان تolerانس‌ها خواهد شد.

Calibration of Pilger Mill Rolls

