

نورد کاهش‌دهنده پیشرفته و کالیبراسیون غلتک‌های آنها



شرکت لوله گستر اسفراین – واحد تحقیق و توسعه

تهیه و نگارش : کیارش ناویا

ویرایش و بازنگری : مسعود نامی

تابستان ۱۴۰۴

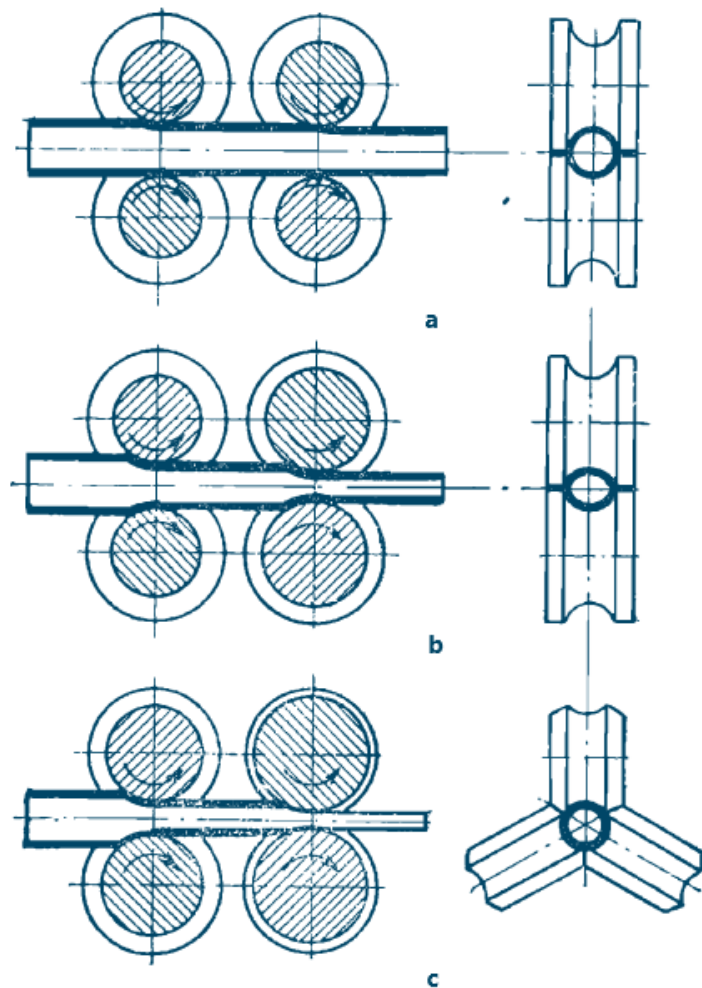
در اواخر قرن گذشته، کارهایی برای ساخت قفسه نوردی آغاز شد که امکان کاهش قطر لوله را در حالت گرم، هنگام عبور پیوسته آن از میان غلتک‌ها فراهم می‌کرد. اولین اختراع ثبت‌شده برای چنین قفسه‌ای در سال ۱۸۸۹ صادر شد. با این حال، در آن زمان فرآیند نورد تنها با استفاده از میله‌ی داخلی بلند (آپراوکا) در نظر گرفته شده بود، که اجازه می‌داد هم‌زمان با کاهش قطر لوله، ضخامت دیواره آن نیز کاهش یابد.

تنها در سال ۱۹۲۰ بود که نخستین قفسه نورد پیوسته ساخته شد که در آن لوله بدون استفاده از آپراوکا (میله داخلی) نورد می‌شد و تغییر ضخامت دیواره به‌صورت آزاد و در نتیجه‌ی کاهش قطر خارجی لوله صورت می‌گرفت. محدود کردن تغییر شکل آزاد، به‌ویژه تغییر ضخامت دیواره، دشواری‌های زیادی به همراه دارد. با این حال، در حال حاضر می‌توان گفت که قوانین حاکم بر تغییر ضخامت دیواره لوله در فرآیند کاهش قطر (ردیوسینگ) شناخته شده‌اند. از این رو، امکان پیش‌بینی تغییرات ضخامت دیواره از پیش وجود دارد و می‌توان آن را در محدوده‌های مشخصی تنظیم و کنترل کرد.

در روند توسعه‌ی طراحی قفسه‌های کاهش‌دهنده، سه نوع از این قفسه‌ها ایجاد شد: قفسه کالیبراسیون، قفسه کاهش‌دهنده، و قفسه کاهش‌دهنده با کشش (شکل ۱).

وظیفه قفسه کالیبراسیون، تولید لوله‌ای با ابعاد دقیق و بدون کاهش قابل توجه قطر خارجی قطعه کار اولیه است. در قفسه کاهش‌دهنده، کاهش قابل توجه قطر خارجی لوله همراه با تغییر ناچیز ضخامت دیواره حاصل می‌شود. هدف اصلی قفسه کاهش‌دهنده با کشش، کاهش قابل توجه ضخامت دیواره لوله همراه با کاهش قطر خارجی آن است.

در فرآیند کاهش قطر همراه با کشش (شکل ۱، قسمت ج)، مزایای فنی قابل توجهی از این روش برای تغییر شکل لوله در قالبی که توسط سه غلتک تشکیل شده، آشکار شد. ساخت دستگاه نورد سه غلتکه مشکلات ساختاری خاصی داشت که باعث شد گسترش استفاده از این نوع دستگاه برای مدت طولانی به تعویق بیفتد.



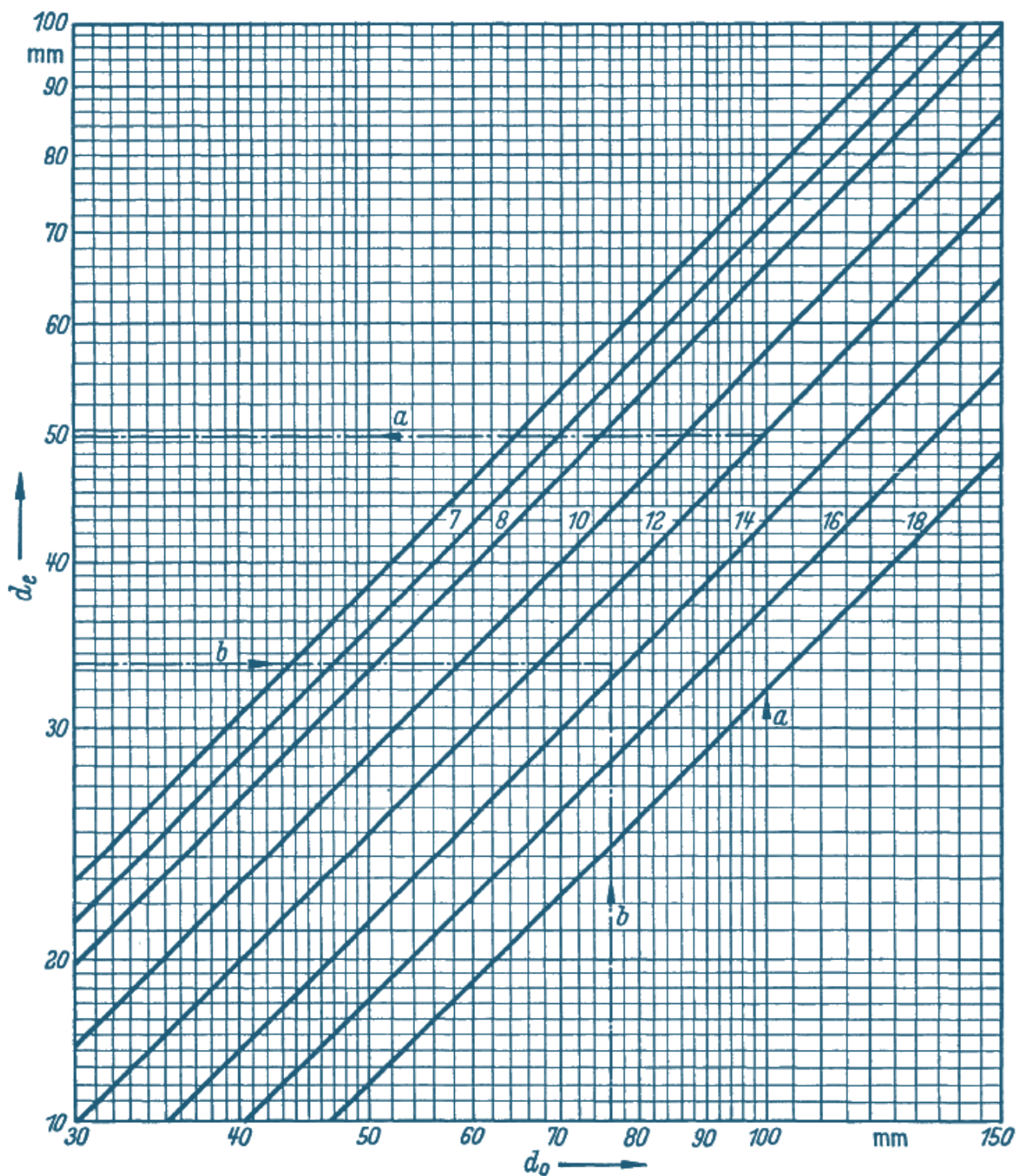
شکل ۱ -

قفسه‌های کالیبراسیون معمولاً شامل دو تا پنج قفسه دوغلته‌کی هستند. با این حال، اخیراً قفسه‌هایی با تعداد تا ۱۲ قفسه نیز به وجود آمده‌اند. فشردگی قطر لوله در قفسه‌های کالیبراسیون معمولاً بین ۳ تا ۸ درصد است؛ در اینجا ضخامت دیواره کمی کاهش می‌یابد، اگرچه می‌توان آن را ثابت نگه داشت.

در حال حاضر قفسه‌های کالیبراسیون برای لوله‌هایی با دامنه وسیعی از قطرها، هم بزرگ و هم کوچک، به کار می‌روند.

قفسه‌های کاهش‌دهنده با طراحی‌های جدید تا ۱۸ قفسه دارند و امکان کاهش قطر خارجی لوله را تا نزدیک به ۷۰٪ فراهم می‌کنند.

رابطه بین فشردگی کلی لوله از نظر قطر و تعداد قفسه‌های مورد نیاز برای این فشردگی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲ -

تغییر ضخامت دیواره لوله در قفسه کاهش‌دهنده به کالیبراسیون و تعداد دورهای غلتک‌ها بستگی دارد.

اگر قبلاً برای هر قفسه کاهش‌دهنده و برای هر مقدار فشردگی و ضخامت دیواره مورد نیاز لوله‌ی نهایی، ضخامت دیواره قطعه‌کار به‌صورت کاملاً تجربی تعیین می‌شد، امروزه با توجه به شرایط مشخص، امکان انجام این کار به‌صورت محاسباتی و بر اساس داده‌های تحقیقات انجام شده وجود دارد. بنابراین، با دانستن ضخامت دیواره مورد نیاز، می‌توانیم با اقدامات مناسب بر تغییر ضخامت در فرآیند نورد تأثیر بگذاریم.

معمولاً هنگام عبور لوله از قفسه نورد، نباید تحت نیروهای کششی قرار گیرد. اما در عمل، برای اطمینان از عبور مطمئن لوله از قفسه کاهش‌دهنده، گاهی اعمال نیروی کششی لازم است.

با استفاده از کشش در قفسه‌های کاهش‌دهنده مدرن، امکان کاهش ضخامت دیواره لوله با توجه به کاهش قطر آن به شکلی مشخص وجود دارد. معمولاً نسبت بین این دو برابر ۱ به ۵ است؛ یعنی هنگام کاهش قطر لوله به‌طور مثال ۵۰٪، ضخامت دیواره تقریباً ۱۰٪ کاهش می‌یابد.

شایان ذکر است که تنها با استفاده از قفسه‌های کاهش‌دهنده است که می‌توان لوله‌های کوچک‌قطر را به روش نورد گرم تولید کرد. برای مثال، از قطعه‌کاری به قطر ۲ اینچ که به روش اکستروژن تولید شده است، می‌توان لوله گازی با قطر ۴/۳ اینچ به دست آورد.

یکی از مزایای مهم نصب قفسه‌های کاهش‌دهنده، علاوه بر این، امکان نورد غلافی بزرگ در دستگاه نورد اصلی است که در تولید لوله‌های نهایی با همه اندازه‌ها یکسان باقی می‌ماند. این امکان منجر به افزایش قابل توجه بهره‌وری دستگاه می‌شود. همچنین امکان تعویض سریع قفسه‌ها در قفسه کاهش‌دهنده، به جای جابه‌جایی غلتک‌ها در دستگاه نورد اصلی، باعث افزایش بهره‌وری می‌گردد.

قفسه‌های کاهش‌دهنده مدرن با کشش، با ۱۸ قفسه، امکان کاهش قطر لوله تا ۷۵٪ را فراهم می‌کنند، در حالی که ضخامت دیواره به طور همزمان تا ۳۸٪ کاهش می‌یابد.

رابطه اصلی بین فشردگی کلی قطر لوله و تعداد قفسه‌های مورد نیاز در این قفسه‌ها همانند قفسه‌های کاهش‌دهنده معمولی حفظ می‌شود. با این حال، در این حالت باید رابطه اضافی بین کاهش مشخص قطر لوله و حداکثر کاهش ضخامت دیواره که در نتیجه آن به دست می‌آید، مدنظر قرار گیرد. روابط مربوطه در ادامه آورده شده‌اند.

قابل توجه است که با داشتن تنها ۱۰ تا ۱۲ قفسه، امکان کاهش ضخامت دیواره تقریباً تا ۷۰٪ از میزان کاهش قطر لوله وجود دارد؛ یعنی با این تعداد قفسه، برای هر ۳۰٪ کاهش قطر، می‌توان ضخامت دیواره لوله را حدود ۱۰٪ کاهش داد. این نوع قفسه‌های کاهش‌دهنده نیاز به موتوری دارند که امکان تنظیم مستقل سرعت گردش غلتک‌ها در هر قفسه را فراهم کند.

در فرآیند کاهش قطر همراه با کشش، انتهای لوله‌ها ضخیم‌تر می‌شوند، زیرا سر و ته غلاف هنگام عبور از قفسه، تحت تأثیر کامل نیروی کشش قرار نمی‌گیرند. وجود انتهای ضخیم‌شده باعث هدررفت اضافی فلز می‌شود. بنابراین، نصب قفسه کاهش‌دهنده با کشش بلافاصله پس از دستگاه جوش لوله که امکان تولید لوله‌ای با طول قابل توجه (تا ۷۰ متر) را بدون مشکل فراهم می‌کند، مزایای زیادی دارد.

همزمان، چنین ترکیبی از قفسه‌ها اجازه می‌دهد در دستگاه جوش لوله، لوله‌ای با قطر بزرگ و ضخامت دیواره زیاد با سرعت بالا جوش داده شود و سپس با عبور لوله از قفسه کاهش‌دهنده با کشش، لوله‌های نهایی با اندازه‌های کوچک‌تر تولید گردند.

گرم کردن لوله‌ها قبل از فرآیند کاهش قطر، در این حالت به عنوان یک عملیات بازپخت نرمالیزه‌کننده نیز عمل می‌کند.

دستگاه‌های جوش الکتریکی لوله که شامل قفسه‌های کاهش‌دهنده با کشش هستند، به بهره‌وری بالایی دست می‌یابند (۲۰ تن در ساعت در تولید لوله‌های گازی با قطر از ۱/۲ تا ۳ اینچ) و به‌خوبی با دستگاه‌های جوش کوره‌ای رقابت می‌کنند.

واضح است که با پیشرفت بیشتر دستگاه‌های جوش الکتریکی لوله، قفسه‌های کاهش‌دهنده با کشش به گونه‌ای نصب خواهند شد که لوله بتواند به‌صورت کامل و پیوسته همزمان از میان دستگاه جوش و قفسه‌های کاهش‌دهنده عبور کند. در این صورت، ضایعات فلز ناشی از ضخیم شدن انتهای لوله تنها هنگام تغییر اندازه لوله از یک سایز به سایز دیگر رخ می‌دهد. بدون شک، وضعیت فعلی فناوری کنترل دستگاه‌های نورد امکان همزمانی لازم بین دستگاه جوش و قفسه‌های کاهش‌دهنده را فراهم خواهد کرد.

در تولید لوله‌های بدون درز، استفاده از قفسه‌های کاهش‌دهنده با کشش حتی در حالتی که طول لوله‌های ورودی برای کاهش قطر زیاد باشد نیز از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه است. این امر در دستگاه‌های نورد پیوسته قابل اجراست، که بهره‌وری آن‌ها به‌مراتب بالاتر از سایر دستگاه‌های مورد استفاده در تولید لوله‌های بدون درز است.

در تولید لوله‌های بدون درز با استفاده از قفسه‌های کاهش‌دهنده، می‌توان به سرعت‌های نوردی دست یافت که تاکنون تنها در تجهیزات جوش پیوسته‌ی کوره‌ای قابل دستیابی بوده‌اند.

ضایعات ناشی از برش انتهای لوله‌هایی که با کشش کاهش قطر یافته‌اند، در این حالت حدود ۱/۵ تا ۲٪ است، که کاملاً قابل مقایسه با مصرف فلز در تجهیزات جوش الکتریکی لوله می‌باشد.

بدین ترتیب، استفاده از قفسه کاهش‌دهنده با کشش برای تولید لوله‌های بدون درز، فرآیند کاهش قطر را به روشی رقابتی در برابر تولید لوله به روش جوشکاری تبدیل می‌کند.

از ملاحظات کلی ذکرشده در بالا چنین برمی‌آید که استفاده از قفسه‌های کاهش‌دهنده با کشش منجر به افزایش صرفه‌جویی اقتصادی در فرآیند کاهش قطر و همچنین افزایش بهره‌وری واحدهای تولیدی، چه در تولید لوله‌های جوشی و چه در تولید لوله‌های بدون درز، می‌شود.

پژوهش‌هایی درباره فرآیند جریان فلز در هنگام کاهش قطر لوله‌ها توسط جی. اس. بلییر [8] و و. بوتشر [9] انجام شده است. برای بررسی مسائل مربوط به جریان فلز در فرآیند کاهش قطر، نویسندگان این کتاب همچنین از کارهای نظری زیبل و وبر [10]، [۱۱] که به مباحث کشش لوله‌ها مربوط می‌شوند، استفاده کرده و آن‌ها را توسعه داده است.

معادلات به‌دست‌آمده در این تحقیقات، قوانین جریان فلز در فرآیند کاهش قطر تحت تأثیر نیروی کشش را بیان می‌کنند و مبنایی برای محاسبات مربوط به کالیراسیون غلتک‌ها قرار گرفته‌اند. محاسبات انجام‌شده بر اساس این روش، به‌خوبی با نتایج عملی مطابقت دارند.

در استخراج فرمول‌ها از نمادهای زیر استفاده شده است:

S – ضخامت دیواره لوله؛

d_m – قطر متوسط لوله؛

p – قطر خارجی لوله؛

$\nu = \frac{S}{d}$ – ضریب ضخامت دیواره؛

σ_r – تنش شعاعی؛

σ_l – تنش محوری؛

σ_t – تنش مماسی (یا تنش محیطی)؛

$\varphi_r = \ln \frac{s_{i+1}}{s_i}$ – تغییر شکل شعاعی-لگاریتمی؛

$\varphi_l = \ln \frac{l_{i+1}}{l_i} = \ln \frac{F_{i-1}}{F_i}$ – تغییر شکل لگاریتمی محوری؛

$\varphi_t = \ln \frac{d_{m_{i+1}}}{d_{m_i}}$ – تغییر شکل لگاریتمی مماسی (یا محیطی)؛

σ_m – تنش متوسط؛

k_f – مقاومت در برابر تغییر شکل؛

$Z = \frac{\sigma_l}{k_f}$ – ضریب کشش.

با پذیرش این اصل اساسی که تغییر شکل لگاریتمی در یک جهت مشخص نمونه، متناسب با اختلاف بین تنش‌های نرمال مربوطه و تنش متوسط است، معادله اصلی جریان فلز به صورت زیر به دست می‌آید (شکل ۳):

$$(\sigma_r - \sigma_m) : (\sigma_l - \sigma_m) : (\sigma_t - \sigma_m) = \varphi_r : \varphi_l : \varphi_t \quad (۱)$$

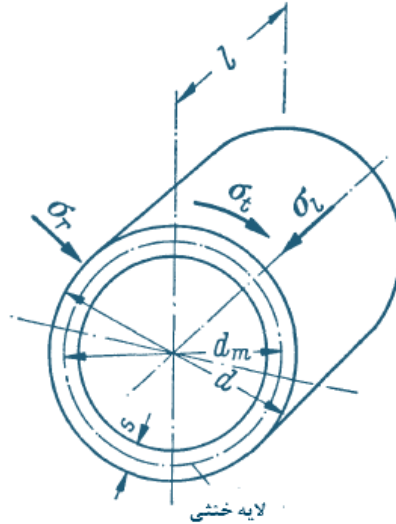
همچنین از معادلات تنش متوسط استفاده می‌کنیم.

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_r + \sigma_l + \sigma_t) \quad (2)$$

و از شرایط پلاستیسیته نیز استفاده می‌کنیم.

$$\sigma_l - \sigma_t = k_f \quad (3)$$

اگر فرض کنیم که تنش شعاعی نسبتاً کوچک بوده و برابر با $\sigma_T = 0$ باشد، آنگاه با حل همزمان معادلات ارائه‌شده در بالا، به رابطه زیر دست می‌یابیم:



شکل ۳ -

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(2\sigma_l - k_f) \quad (4)$$

مقادیر σ_l و σ_m در معادله (۱) وارد می‌شوند و بنابراین پس از تقسیم بر مقدار k_f خواهیم داشت:

$$(1 - 2z) : (z + 1) : (z - 2) = \varphi_r : \varphi_l : \varphi_t \quad (5)$$

با تحلیل فرمول به‌دست‌آمده، به راحتی می‌توان تأثیر ضریب کشش z را مشاهده کرد.

اگر مقادیر معمول برای قفسه کاهش‌دهنده یعنی $z = 0$ و φ_0 را در آن جایگذاری کنیم، نتیجه به صورت زیر خواهد بود:

$$1 : 1 : -2 = \varphi_r : \varphi_l : \varphi_t$$

این بدان معناست که جریان فلز در جهت‌های طول و ضخامت دیواره لوله به یک اندازه صورت می‌گیرد، که منجر به افزایش طول و ضخامت متناسب می‌شود. برای $\sigma_1 = 0.5k_f$ و به‌طور متناظر $z = 0.5$ به صورت مشابه خواهیم داشت:

در این حالت، ضخامت دیواره تغییر نمی‌کند و جریان فلز صرفاً در جهت افزایش طول قطعه کار اتفاق می‌افتد. و در نهایت، برای $\sigma_l = k_f$ که متناظر با بیشینه ضریب کشش نظری $z = 1$ است، خواهیم داشت:

$$-1 : 2 : -1 = \varphi_r : \varphi_l : \varphi_t$$

در اینجا، جریان فلز به‌طور مساوی در کاهش قطر و کاهش ضخامت دیواره صورت می‌گیرد، و این تنها به منظور ایجاد افزایش طول انجام می‌شود.

تصویر کلی ارائه‌شده از جریان فلز تا حدی به دلیل تأثیر ضخامت نهایی دیواره تغییر می‌کند، زیرا نمی‌توان تنش‌های شعاعی را به‌طور کامل نادیده گرفت.

تنش شعاعی متوسط از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$\sigma_{rm} = \sigma_t \frac{s}{d} = \sigma_t \nu \quad (6)$$

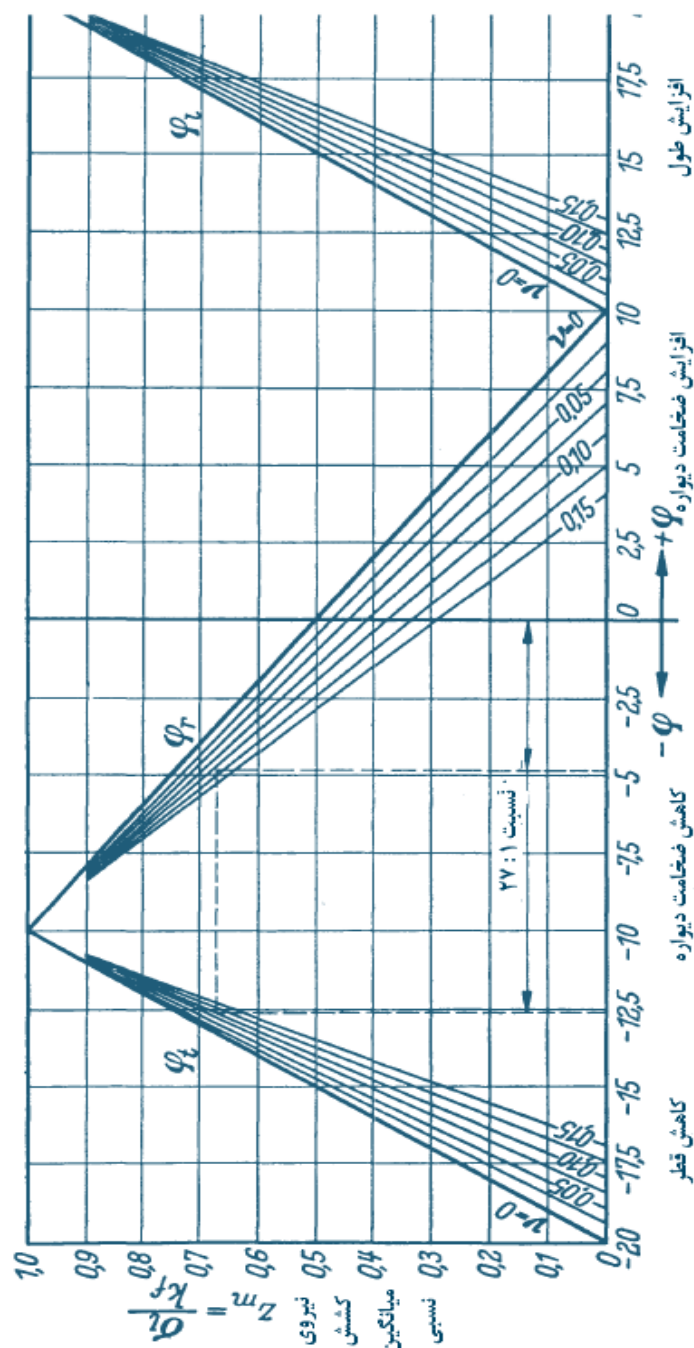
فرمول (۵) در این حالت به شکل زیر درمی آید:

$$2z(v-1) + (1-2v) : z(1-v) + (1+v) : z(1-v) - (2-v) = \varphi_r : \varphi_l : \varphi_t \quad (۷)$$

به این ترتیب، می توان معادلات اصلی تغییر شکل برای قفسه های کاهش دهنده را یافته شده تلقی کرد.

نتایج به دست آمده به صورت نموداری در شکل ۶۲ ارائه شده اند، با در نظر گرفتن قانون شناخته شده ی پایداری حجم.

$$\varphi_r + \varphi_l + \varphi_t = 0 \quad (۸)$$



شکل ۴ - وابستگی متقابل بین ضرایب تغییر شکل در فرآیند کاهش (نورد کاهش دهنده)

در شکل ۴، وابستگی ضریبی تغییر شکل φ_r ، φ_l و φ_t به عنوان تابعی از ضریب کشش متوسط Z_m برای مقادیر مختلف ضریب ضخامت دیواره v نشان داده شده.

از نمودار، برای تعیین مقادیر Z_m و v ، نسبت های ضرایب لگاریتمی تغییر شکل را می توان مستقیماً به دست آورد و بدین ترتیب، در صورت مشخص بودن کاهش قطر، می توان تغییر ضخامت دیواره را به عنوان تابعی از ضریب کشش متوسط تعیین کرد.

ضریب کشش متوسط Z_m مقدار میانگین حسابی ضرایب کشش پیش از قفسه نورد و پس از آن است. این مقدار نمای کلی مناسبی از کشش واقعی لوله در قفسه مورد نظر ارائه می‌دهد. کشش نسبی واقعی کل Z_{Σ} در حالت تغییر شکل در چندین قفسه را می‌توان به‌صورت میانگین حسابی ضرایب Z_m برای قفسه‌های جداگانه تعیین کرد.

روش صحیح‌تر برای محاسبه ضریب کشش متوسط، استفاده از میانگین وزنی است که در آن میزان کاهش قطر در هر قفسه لحاظ می‌شود. در محاسبات دقیق‌تر، باید تغییر ضریب ν مربوط به ضخامت دیواره نیز مدنظر قرار گیرد.

ضریب کشش متوسط کل Z_{Σ} پیش از هر چیز به تعداد قفسه‌هایی بستگی دارد که کاهش ابعاد بین آن‌ها توزیع شده است، و همچنین به این موضوع که ضرایب کشش در قفسه‌های آغازین و پایانی نورد تا چه اندازه به‌سرعت افزایش یا کاهش می‌یابند.

در قفسه‌های کاهش‌دهنده با کشش، که امکان تنظیم جداگانه سرعت دوران هر قفسه وجود دارد، می‌توان تطابق کامل کشش را هم با قطرهای مختلف لوله و هم با نسبت‌های لازم سرعت ایجاد کرد. در این حالت، برای ایجاد کشش مورد نیاز در محدوده‌ای از صفر تا تقریباً مقدار حداکثری آن، و همچنین برای کاهش تدریجی کشش در ادامه، تنها به ۳ تا ۴ قفسه نیاز است. این بدان معناست که در صورت وجود ۶ تا ۸ قفسه در کل، ضریب کشش کل می‌تواند به مقدار ۰/۵ برسد، مشروط بر اینکه امکان کاهش مناسب قطر نیز وجود داشته باشد. در چنین مقدار ضریب کششی کل Z_{Σ} ، کاهش ضخامت دیواره لوله نیز آغاز می‌شود، همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است.

به‌عنوان مثال، در شکل ۴ نشان داده شده است که در صورت کاهش قطر به میزان ۶۵٪ و با مقدار متوسط ضریب ضخامت دیواره $\nu = 0.1$ ، در حالتی که از ۱۴ قفسه با تنظیم جداگانه تعداد دور استفاده شود، ضریب کشش به مقدار ۰/۶۷ می‌رسد. این ضریب کشش متناظر با نسبت تغییر شکل‌های لگاریتمی برابر با ۲/۷ است، که امکان کاهش ضخامت دیواره را تقریباً به میزان ۲۴٪ فراهم می‌سازد.

تغییر ضخامت دیواره‌ای که می‌توان آن را عملاً بدون پارگی لوله و در بیشترین مقادیر ضریب کشش انجام داد، همچنین به میزان اصطکاک بین لوله و غلتک بستگی دارد.

در شکل ۵ نیروهای مؤثر در فرآیند نورد نشان داده شده‌اند. در این رابطه، نمادهای زیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند:

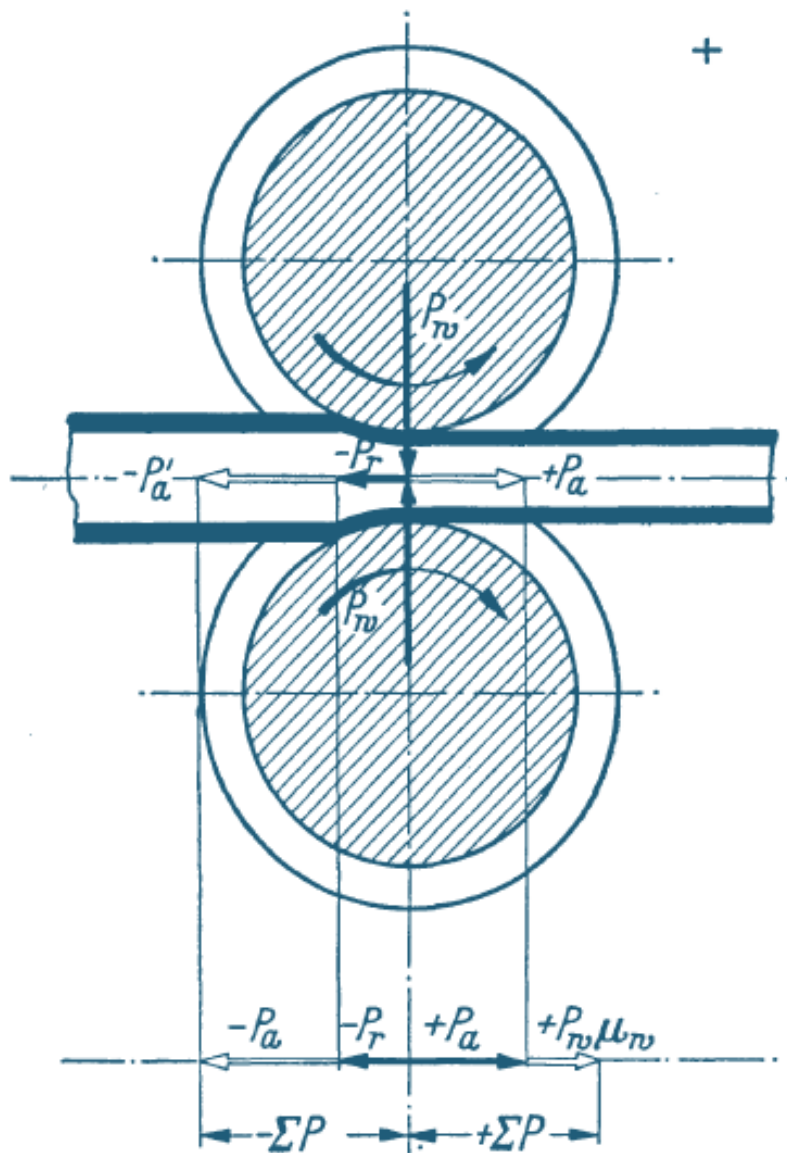
P_{nw} – مؤلفه عمودی فشار نورد؛

P_r – مؤلفه محوری فشار نورد؛

P_a, P'_a – به‌ترتیب، نیروهای کشش پیش و پس از قفسه نورد، که به‌صورت حاصل‌ضرب نیروی کشش σ_l در سطح مقطع عرضی F لوله به‌دست می‌آیند؛

μ_w – ضریب اصطکاک ظاهری (یا قراردادی).

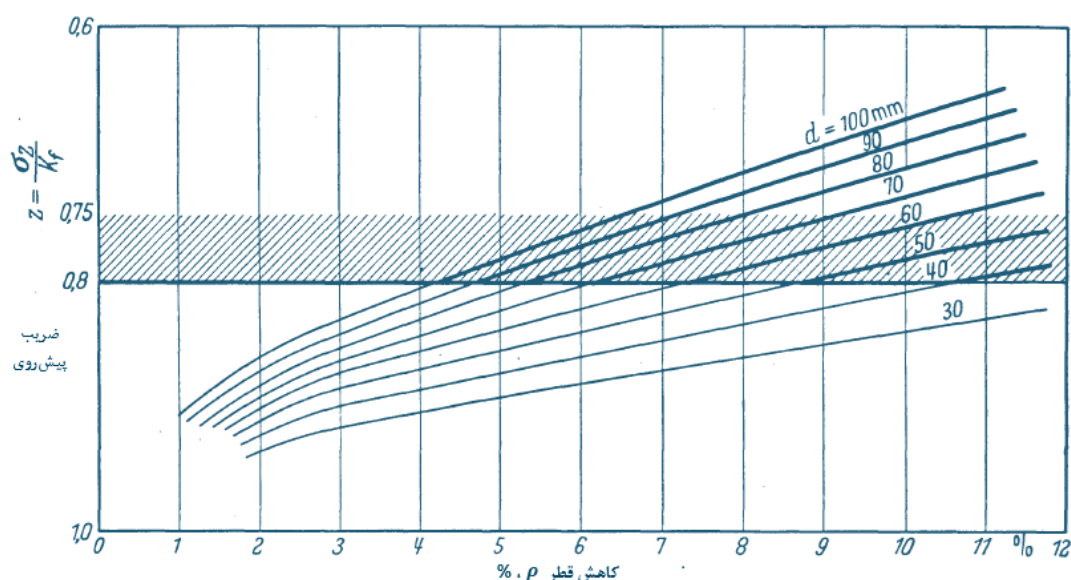
مؤلفه‌های عمودی فشار یکدیگر را خنثی می‌کنند. در جهت محوری، نیرویی وجود دارد که برابر است با تفاوت بین مؤلفه افقی فشار فلز بر روی غلتک‌ها و برآیند نیروهای کششی برابر از قفسه‌های مجاور. مقدار این نیرو نباید از حاصل‌ضرب مؤلفه عمودی P_{nw} فشار فلز بر روی غلتک‌ها در بیشینه مقدار ضریب اصطکاک ظاهری μ تجاوز کند.



شکل ۵ - تعادل نیروها در کالیبر (نیروهای واردشونده هنگام کاهش مقطع با اعمال تنش کششی)

برای تمام قفسه‌های میانی در یک قفسه نورد کاهش‌دهنده، در صورتی که تنش کششی در هر دو سمت قفسه برابر باشد σ_l ، یعنی ضریب کشش در هر دو سمت قفسه برابر با Z باشد، نیروی کشش توسط بیشینه مقدار ضریب اصطکاک ظاهری μ_w همراه با مؤلفه عمودی فشار P_w فلز بر روی غلتک‌ها محدود می‌شود. از آنجا که در این حالت (با کشش یکسان)، نیروهای محوری P_a و P'_a قبل و بعد از قفسه به سطح مقطع لوله بستگی دارند، اختلاف بین این دو نیرو هرچه کاهش قطر بیشتر باشد، یعنی هرچه اختلاف سطح مقطع لوله قبل و بعد از قفسه بیشتر باشد، بزرگ‌تر خواهد بود. از آنجا که این اختلاف در نیروهای محوری باید برابر باشد با حاصل ضرب مؤلفه عمودی فشار فلز بر غلتک‌ها P_w در ضریب اصطکاک ظاهری μ_w ، نتیجه گرفته می‌شود که میزان مجاز کاهش قطر بستگی به ضریب کشش دارد.

در شکل ۶، وابستگی حداکثر میزان کاهش قطر ρ به بیشینه ضریب اصطکاک ظاهری μ ، قطر لوله d و ضرایب کشش Z پیش و پس از قفسه نورد نشان داده شده است.



شکل ۶۴ - این نمودار برای آرایش سه غلتکه و قطر اسمی غلتک برابر با ۲۷۰ میلی‌متر اعتبار دارد.

را نشان می‌دهد که برای جلوگیری از ترک خوردن لوله در نظر گرفته شده است zzz ناحیه هاشور خورده، محدوده مجاز حداکثری ضریب کشش

μ/μ_{μ} ضریب اصطکاک (Steck-Koeffizient) zmz_mzm توضیحی درباره محدودسازی کاهش قطر در هر قفسه نورد توسط ضریب فروبری -

این وابستگی، که تنها برای قطر مشخصی از غلتک معتبر است، مبنایی برای محاسبه تعداد مورد نیاز قفسه‌ها در یک کاهش کلی مشخص محسوب می‌شود. به دلیل محدودیت میزان کاهش قطر در هر قفسه، لوله‌های با قطر بزرگ معمولاً به تعداد بیشتری قفسه نیاز دارند نسبت به لوله‌های با قطر کوچک، حتی در شرایطی که میزان تغییر شکل نسبی در هر دو حالت تقریباً برابر باشد.

به طور معمول، برای دستیابی به کاهش ابعادی مورد نظر در عمل، تلاش می‌شود تعداد قفسه‌ها تا حد ممکن کم باشد. برای این منظور، ترجیح داده می‌شود از نیروی کششی هر قفسه تا حد ممکن (تا نزدیک بیشینه مقدار آن) و با سرعت چرخش مناسب غلتک‌ها استفاده شود. با این حال، در صورتی که تعادل بین نیروی کششی غلتک‌ها و نیروهای خارجی وارد شده به هم بخورد، فرآیند نورد به طور طبیعی دچار اختلال می‌شود. بنابراین، در عمل نیروی کشش همیشه باید اندکی کمتر از نیروی کششی واقعی قابل اعمال توسط غلتک‌ها باشد.

از قوانین اصلی فرآیند کاهش با کشش که در بالا بررسی شد، نتیجه‌گیری می‌شود که برای دستیابی به کاهش مشخصی در ضخامت دیواره و ایجاد کشش متناسب در لوله، به تعداد مشخص و حداکثری از قفسه‌ها نیاز است. در این حالت، تنظیم جداگانه سرعت دوران غلتک‌ها در هر قفسه الزامی است، تا در صورت بروز تغییراتی در ضریب اصطکاک فلز، امکان تنظیم دقیق فرآیند در هر قفسه به طور مستقل فراهم باشد.

وابستگی‌های ارائه‌شده در بالا مربوط به قفسه‌های میانی هستند، یعنی جایی که فرآیند کاهش با کشش به طور کامل تثبیت شده است. اما برای قفسه‌های ابتدایی و انتهایی، که در آن‌ها ضریب کشش در حال تغییر است، وابستگی‌ها و رفتارهای متفاوتی وجود دارد.

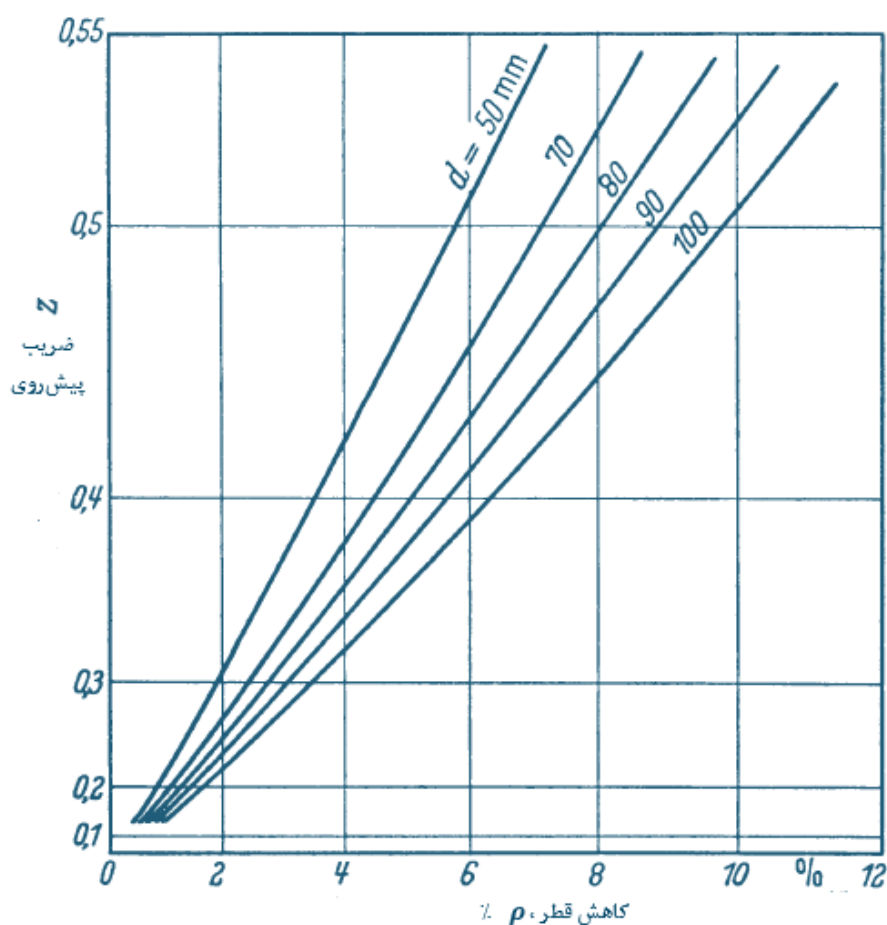
در شکل‌های ۶۵ و ۶۶ نمودارهایی ارائه شده‌اند که برای تعیین ضرایب کشش ابتدایی و انتهایی به کار می‌روند. این نمودارها متناظر با نمودار شکل ۶۴ هستند که برای قفسه‌های میانی مورد استفاده قرار می‌گرفت.

در مورد شکل ۶۶ باید افزود که قفسه‌ی پایانی در این حالت به صورت قفسه‌ی کالیبراسیون عمل می‌کند، یعنی بدون کاهش قابل توجه در قطر لوله، و به همین دلیل، در این قفسه ایجاد هیچ گونه نیروی کششی امکان‌پذیر نیست.

بر اساس ملاحظات و نمودارهای ارائه‌شده، می‌توان جهت‌گیری‌های اصلی در طراحی کالیبراسیون را به صورت زیر تعیین کرد:

برای ایجاد سریع کشش در فرآیند، باید کاهش قطر در قفسه‌ی اول به صورت جزئی (حدود ۳ تا ۵ درصد) در نظر گرفته شود تا در همان قفسه‌ی اول، دیواره‌ی لوله تحت کشش متوسطی قرار گیرد که مقدار آن برابر است با $2 : Z_m = (Z_{i-1} + Z_i)$. اما از آنجا که در ابتدای ورود لوله به قفسه، مقدار اولیه ضریب کشش $Z_0 = 0$ است، افزایش ضریب کشش در قفسه‌ی اول فقط تا نصف مقدار ضریب کشش متوسط Z_m ممکن است، و این افزایش به واسطه‌ی کاهش قابل توجه قطر به دست می‌آید. از شکل ۶۲ نیز برمی‌آید که حتی در صورت کوچک بودن ضریب کشش متوسط، افزایش ضخامت دیواره همچنان قابل توجه است. بنابراین، اتخاذ کاهش قطر اندک در قفسه‌ی اول برای محدود کردن افزایش ضخامت دیواره امری منطقی است.

علاوه بر این، باید توجه داشت که هنگام ورود لوله به قفسه‌ی اول، به دلیل عملکرد مکانیزم‌های کمکی تغذیه، ممکن است اختلافی بین نیروی محوری وارد بر فلز و نیروی محوری ایجاد شده توسط غلتک‌ها وجود داشته باشد. در نتیجه، به جای شتاب‌گیری، ممکن است لوله دچار کندی حرکت شود.

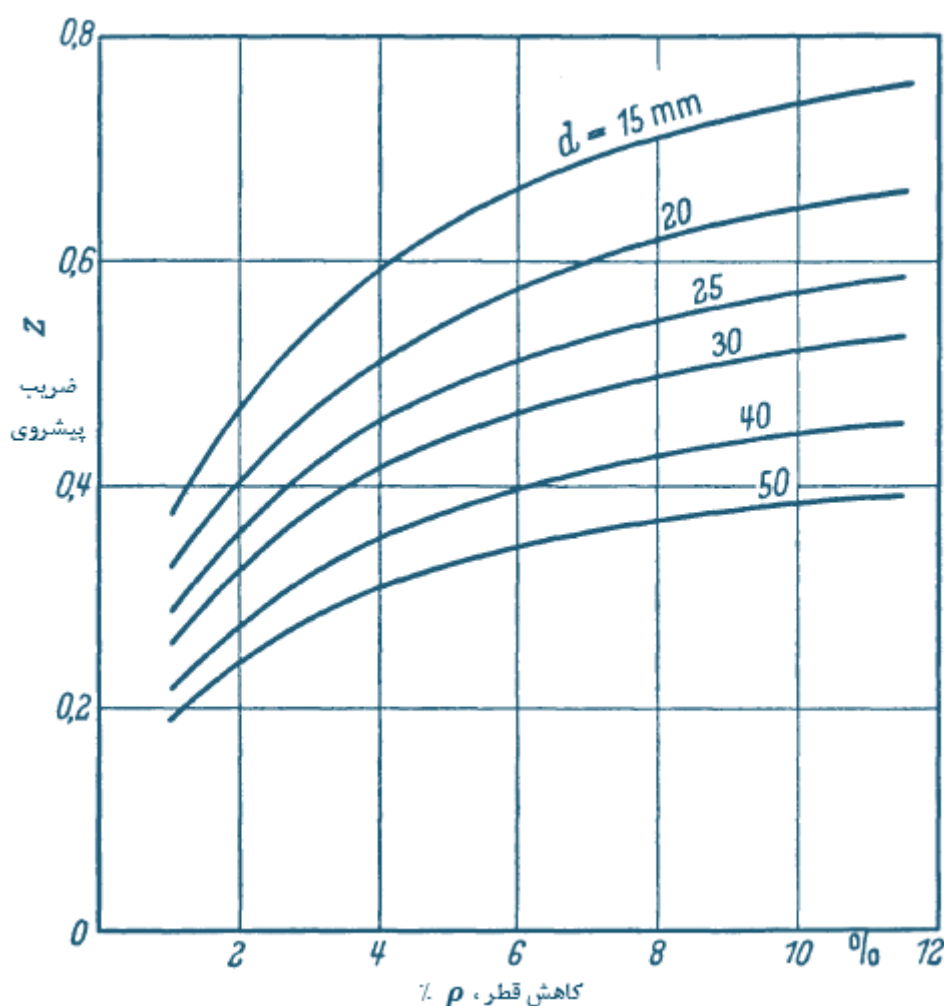


شکل ۶۵ - وابستگی حداکثر ضریب کشش قابل دستیابی Z پس از اولین قفسه نورد به کاهش قطر e در شرایط حداکثر ضریب اصطکاک. این نمودار برای آرایش سه غلتکه و قطر اسمی غلتک حدود 270 میلی‌متر اعتبار دارد.

در قفسه دوم، کاهش قابل توجهی در قطر خارجی لوله اعمال می‌شود (حدود ۸ تا ۱۲٪)، با هدف کاهش سریع قطر خارجی، چراکه طبق شکل ۶۴، در قفسه‌های میانی تنها در صورت وجود کشش زیاد می‌توان کاهش قطر بیشتری اعمال کرد.

علاوه بر این، در عمل، ضریب اصطکاک ظاهری در قفسه دوم محدودیتی برای کاهش قطر ایجاد نمی‌کند، زیرا معمولاً قفسه اول به نوعی لوله را به داخل قفسه دوم «هل می‌دهد» و قفسه سوم نیروی کششی لازم برای خروج فلز از قفسه دوم را فراهم می‌کند.

اگر ضریب اصطکاک ظاهری در قفسه اول (شکل ۶۳) منفی باشد، از قفسه سوم یا حداکثر از قفسه چهارم به بعد، این ضریب مثبت می‌شود. مقدار ضریب اصطکاک ظاهری در قفسه دوم یا سوم تقریباً برابر صفر است، زیرا اختلاف نیروهای محوری در شرایط کاهش زیاد قطر و نیروی کشش قابل توجه، بسیار کوچک است. با این حال، این موضوع نیازمند توضیحات بیشتری است.



شکل ۶۶ - وابستگی بیشینه ضریب کشش مجاز ZZZ در جلوی آخرین قفسه نورد به میزان کاهش قطر، در شرایط بیشینه ضریب اصطکاک، برای یک قفسه نورد سه مرحله‌ای با قطر اسمی غلتک‌ها برابر با ۲۷۰ میلی‌متر.

ضریب اصطکاک ظاهری در شرایط خاص می‌تواند به صورت تابعی از دو کمیت زیر بیان شود:

$$\mu_w = f(d, \rho) - g(z_i F_i - z_{i-1} F_{i-1}) \quad (9)$$

بخش اول این عبارت مربوط به مقدار معمول مؤلفه افقی P_r فشار نورد (شکل ۶۳) است. بخش دوم به اختلاف مطلق نیروهای محوری ناشی از تفاوت در اندازه‌های مقاطع عرضی لوله بستگی دارد، که این اختلاف در نیروها در ضرب با تنش محوری متناظر σ_l قرار می‌گیرد.

بخش اول عبارت همیشه مثبت است و در قفسه‌های میانی معمولاً حدود $1/3$ مقدار بخش دوم را تشکیل می‌دهد.

اگر در بخش دوم عبارت، جمله‌ی اول درون پرانتز کوچک‌تر از جمله‌ی دوم باشد (که این وضعیت با جریان نرمال فرایند در قفسه‌های میانی مطابقت دارد)، در این صورت کل این بخش مثبت خواهد بود.

اما اگر در اینجا جمله‌ی اول بزرگ‌تر از جمله‌ی دوم باشد — که این وضعیت ممکن است در قفسه‌ی اول و همچنین در قفسه‌ی دوم (تنها در صورتی که ضریب کشش به‌طور قابل توجهی زیاد باشد) رخ دهد — در این صورت جمله‌ی دوم درون پرانتز منفی خواهد شد. بنابراین، ضریب اصطکاک واقعی کاهش یافته و حتی ممکن است به صفر برسد.

در حداکثر مقدار مجاز کشش، که متناظر با مقدار Z_2 (ضریب کشش پس از قفسه دوم) است، ضریب Z_m به‌طور قابل توجهی بزرگ‌تر از ضریب Z_1 پس از قفسه اول خواهد بود. این وضعیت کاملاً امکان کاهش ضخامت دیواره را حتی در قفسه دوم فراهم می‌سازد.

کالیبراسیون غلتک‌های قفسه سوم باید مطابق با نمودار شکل ۶۴ طراحی شود، به‌گونه‌ای که پس از عبور از این قفسه بتوان به حد بالای مجاز کشش دست یافت.

برای محاسبه کالیبراسیون قفسه‌های انتهایی از شکل ۶۶ استفاده می‌شود.

همان‌طور که می‌دانیم، در فرآیند کاهش قطر با کشش، به دلیل این که انتهای لوله‌ها کشش وارده را به‌طور کامل تحمل نمی‌کنند و از میان قفسه‌های دستگاه عبور می‌کنند، ضخامت انتهای لوله‌ها افزایش می‌یابد. مقدار این افزایش ضخامت را می‌توان با مراجعه به شکل ۶۲ تعیین کرد، به شرطی که ضریب کشش را برابر صفر در نظر بگیریم.

برای تعیین اقتصادی بودن فرآیند کاهش قطر با کشش، تعیین طول کلی انتهای ضخیم‌شده اهمیت زیادی دارد. طول بخش‌های ضخیم‌شده به‌وضوح به میزان فشردگی در قفسه اول، که در آن کشش وجود ندارد، و همچنین به فاصله بین قفسه اول و دوم بستگی دارد، زیرا زمانی که لوله در این دو قفسه قرار دارد، شرایط لازم برای کاهش ضخامت دیواره فراهم شده است.

بدون شک، با عبور متوالی لوله از میان دستگاه کاهش قطر، طول بخش‌های ضخیم‌شده به صورت تلسکوپی افزایش می‌یابد، در حالی که وزن آن‌ها ثابت باقی می‌ماند. طول نظری انتهای ضخیم‌شده را می‌توان از رابطه زیر به‌دست آورد:

$$L_{V_n} = a \left[V'_n + V_n \sum_{i=2}^n \frac{V'_i - 1}{V_1 V_2 V_3 \dots V_{i-1}} \right] \quad (10)$$

L_{V_n} — طول سرهای ضخیم‌شده پس از خروج از قفسه شماره n .

a — فاصله بین قفسه‌ها

n — تعداد قفسه‌ها

V_i — افزایش طول در قفسه i ام.

$$-V_n = \frac{F_0}{F_n} = e^{\ln \varphi} \quad \text{افزایش طول کل برای قفسه } i = n$$

$$V'_n - \text{افزایش طول کل برای قفسه } n \text{ در حالت } \sigma_l = 0$$

$$V'_i - \text{افزایش طول در قفسه } i \text{ در شرایط } \sigma_l$$

با تحلیل این فرمول، به‌راحتی می‌توان تأثیر فاصله بین قفسه‌ها و تعداد قفسه‌ها را مشاهده کرد. از آنجایی که فاصله بین قفسه‌ها عملاً قابل تغییر نیست و حداقل مقدار آن نیز وابسته به الزامات ساختاری نصب غلتک‌هاست، کاهش طول انتهای ضخیم‌شده تنها با کاهش تعداد قفسه‌های مورد استفاده امکان‌پذیر است.

نیاز به کاهش تعداد قفسه‌ها برای رسیدن به میزان فشردگی دلخواه، منجر به این نتیجه می‌شود که افزایش طول کشیدگی V_i در هر قفسه هنگام وجود کشش باید تا حد امکان بزرگ‌تر از افزایش طول بدون کشش V'_i باشد. با این حال، موفقیت این اقدام از نظر تئوری بسیار ناچیز است، زیرا همان‌طور که قبلاً اشاره شد، وزن انتهای ضخیم‌شده ثابت باقی می‌ماند. عملاً ضخامت دیواره دارای تفرانس‌های مشخصی است و تفاوت قابل توجه بین V_i و V'_i به این منجر می‌شود که هنگام عبور لوله از دستگاه، بخشی از آن ضخامت دیواره‌ای بیشتر از حد بالای تفرانس مجاز پیدا کند.

عبارت تعیین طول انتهایی ضخیم شده باید با مقداری تکمیل شود که بخش لوله با ضخامت دیواره کمی بیشتر، واقع در فاصله بین قفسه دوم و سوم را نیز در نظر بگیرد. با این حال، این مقدار ناچیز است و می توان آن را نادیده گرفت.

روابط اصلی ارائه شده برای فرآیند کاهش قطر لوله ها به تمام دستگاه های کاهش قطر (ردکسیون) مربوط می شود. بررسی ویژگی های خاص این فرآیند نشان می دهد که انجام وظایف دستگاه های کالیبراسیون کاهش قطر بدون کشش، با استفاده از انواع موجود این دستگاه ها که طی چند دهه گذشته توسعه یافته اند، کاملاً ممکن است. با این حال، دستگاه های کاهش قطر با کشش نیازمند طراحی خاصی هستند که بتواند حداکثر میزان فشردگی قطر لوله را در هر قفسه تضمین کند. در این زمینه، قفسه های سه غلتکی بیشترین تطابق را با شرایط متغیر مختلف مؤثر بر فرآیند نورد دارند و امکان تنظیم بهتر فرآیند را فراهم می کنند.

از بررسی نظری فرآیند کاهش قطر با کشش همچنین نتیجه می شود که برای بهره برداری کامل از مزایای این روش، استفاده از محرک (درایو) دستگاه کاهش قطر ضروری است که امکان تنظیم مستقل سرعت چرخش هر قفسه را در محدوده های مشخص، حتی در شرایط بارهای بالا و سرعت های زیاد، فراهم کند.

دستگاه های کاهش قطر با قابلیت انتخاب آزادانه تعداد دور غلتک ها

بیاید روش محاسبه کالیبراسیون غلتک ها و تعیین تعداد دور غلتک های هر قفسه را برای دستگاه های کاهش قطر معمولی و دستگاه های کاهش قطر با کشش بررسی کنیم، روشی که برای همه انواع دستگاه های کاهش قطر قابل استفاده باشد. وظیفه اصلی این محاسبه، انتخاب تعداد دور لازم هر قفسه برای نورد لوله از بیل (قطعه اولیه) مشخصی با اندازه دقیق مورد نظر و بر اساس مقادیر فشردگی (کاهش قطر) تعیین شده است.

معادلات اصلی کرنش ها (۷) و قانون حفظ حجم (۸) که در بالا آورده شده اند، در مجموع سه معادله برای تعیین پنج متغیر ناشناخته φ_t ، φ_l ، φ_r ، Z و V فراهم می کنند. بنابراین، برای محاسبه کالیبراسیون غلتک ها باید دو مقدار مشخص شوند که اصولاً می توان آن ها را به صورت دلخواه انتخاب کرد.

در روش های محاسباتی پیشین، توصیه می شد که برای هر قفسه مقادیر ρ و φ_l مشخص شود. در این حالت، میزان فشردگی قطر لوله به جای مقدار نامعلوم φ_t در معادله قرار داده می شد. اما از آنجا که قطر متوسط لوله d شامل ضخامت نامعلوم دیواره S نیز می شود، در این روش امکان تعیین دقیق میزان فشردگی لازم وجود نداشت.

با تعیین مقدار φ_l ، سپس میزان افزایش طول از یک قفسه به قفسه بعدی مشخص می شد. تجربه نشان داده است که می توان با توجه به داده های عملی مشخص و شناخته شده، مقادیر افزایش طول φ_l و مقدار متناظر فشردگی قطر ρ را که تا حدی به یکدیگر وابسته اند، با استفاده از رابطه زیر تعیین کرد:

$$\varphi_l = \ln \frac{F_i - 1}{F_l}$$

برای تعیین این مقادیر نیاز به تجربه مشخصی در زمینه کالیبراسیون و داده های تجربی شناخته شده است. علاوه بر این، انجام محاسبات نظری مقدماتی نیز ضروری می باشد.

یکی از مزایای مهم روش محاسبه ای که در ادامه توضیح داده می شود، این است که با داشتن مقادیر داده شده φ_l و ρ می توان مستقیماً تعداد دور غلتک ها را تعیین کرد. کالیبراسیون کننده می تواند بر اساس روابط تجربی از پیش انتخاب شده یا روابط نظری به دست آمده بین این دو کمیت که برای تمامی قفسه ها پذیرفته شده اند، مقادیر افزایش طول φ_l و سری ای از قطرهای متوالی غلتک ها را تعیین کند و سپس مقادیر دقیق تعداد دور غلتک ها را به دست آورد.

در صورت لزوم، برای هر قفسه می توان با استفاده از معادلات زیر، شرایط تعادل نیروها و همچنین روابط مربوط به ضخامت دیواره و ضرایب کشش را نیز بررسی کرد.

در کالیبراسیون غلتک‌ها معمولاً قطرهای خارجی d_0 یا d_e و همچنین ضخامت دیواره‌های s_0 یا s_e برای بیلت اولیه و لوله آماده مشخص می‌شوند. بر اساس این مقادیر، سطح مقطع‌های عرضی F_0 بیلت اولیه و F_e لوله آماده محاسبه می‌شوند. سپس قطرهای متوسط d_{m_0} و d_{m_e} ، ضرایب ضخامت دیواره v_0 ، ضریب کشش v_e و ضرایب نسبی کشش v_Σ برای هر قفسه تعیین می‌گردند. محاسبات بر اساس فرمول‌های زیر انجام می‌شوند:

$$F_0 = (d_0 s_0 - s_0^2) \pi \quad (11)$$

$$F_e = (d_e s_e - s_e^2) \pi \quad (12)$$

$$V_\Sigma = \frac{F_0}{F_e} = e^{\varphi_{l_\Sigma}} \quad (13)$$

$$\varphi_{l_\Sigma} = \ln V_\Sigma = \ln \frac{F_0}{F_e} \quad (14)$$

در برخی موارد، به‌جای استفاده از مجموع ضریب کشش، از **فشردگی نسبی کل سطح مقطع عرضی** استفاده می‌شود. این فشردگی با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$R_\Sigma = (F_0 - F_e) / F_e \quad (15)$$

محاسبه کالیبراسیون با تعیین تعداد مورد نیاز قفسه‌ها آغاز می‌شود. با این حال، برای این منظور قاعده‌ی عمومی وجود ندارد، چرا که تعداد قفسه‌ها تا حد زیادی به میزان فشردگی مجاز قطر خارجی در هر قفسه و روابط ارائه‌شده در شکل‌های ۶۴، ۶۵ و ۶۶ بستگی دارد. علاوه بر این، این تعداد به مقدار مطلق قطرهای لوله و غلتک نیز وابسته است.

با فرض تعداد قفسه‌ها و آگاهی از مقدار فشردگی کلی در قطر، با استفاده از داده‌های ارائه‌شده در شکل‌های مذکور (شکل‌های ۶۴، ۶۵ و ۶۶)، یک **توزیع اولیه (تقریبی یا ابتدایی)** از میزان فشردگی لوله در هر قفسه انجام می‌شود.

همان‌طور که مشخص است، **فشردگی نسبی در قطر** به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\rho_i = \frac{d_{i-1} - d_i}{d_{i-1} - 1} \quad (16)$$

که در آن

d_{i-1} - قطر لوله ورودی به قفسه مورد نظر

d_i - قطر لوله خروجی از قفسه مورد نظر

i - شماره ترتیب قفسه مورد نظر

با تبدیل رابطه (۱۶)، می‌توان **مقدار قطر لوله خروجی از هر قفسه** را به‌دست آورد. نتیجه این تبدیل به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$d_i = d_{i-1} (1 - \rho) \quad mm \quad (17)$$

در ادامه، ضریب لگاریتمی کل تغییر شکل بین تعداد قفسه‌ها توزیع می‌شود. برای این توزیع قاعده‌ی کلی و مشخصی وجود ندارد، زیرا مقادیر ضریب لگاریتمی تغییر شکل و فشردگی نسبی در قطر از نظر عددی با یکدیگر مطابقت ندارند. به همین دلیل، معمولاً لازم است از روش **آزمون و خطا** یا **انتخاب‌های مکرر عددی** برای دستیابی به یک توزیع مناسب استفاده شود.

مزیت استفاده از **ضریب لگاریتمی تغییر شکل** نسبت به استفاده از **ضرایب کشش** (نسبت افزایش طول یا سطح مقطع) در این است که مقادیر جداگانه ضریب لگاریتمی را می‌توان به‌صورت **جمع‌ی** ترکیب کرد، در حالی که ضرایب کشش به‌صورت **ضرب زنجیره‌ای** ترکیب می‌شوند.

مجموع تمام مقادیر جزئی ضریب لگاریتمی تغییر شکل باید برابر با ضریب کلی تغییر شکل باشد.

$$\varphi_{l_{\Sigma}} = \sum_{i=1}^n \varphi_{l_i} \quad (18)$$

که در آن

n - تعداد کل قفسه‌ها

با دانستن مقادیر d_l (قطر لوله در قفسه i) و φ_{l_i} (نسبت سرعت یا ضریب کشش در همان قفسه)، می‌توان مستقیماً تعداد دور چرخش غلتک‌ها را محاسبه کرد.

$$v_i = e^{\sum_{i=1}^i \varphi_{l_i}} \quad (19)$$

که در آن

v_i - مقدار نسبی‌ای که متناظر با سرعت خروج لوله از قفسه i است، در صورتی محاسبه می‌شود که سرعت ورود شل (شمش لوله‌ای) به قفسه اول، یعنی v_0 ، برابر با یک در نظر گرفته شود.

بدیهی است که سرعت نسبی v_i برابر است با ضریب کشش کلی V_i تا قفسه i ، مطابق با قانون حفظ حجم ثابت (یعنی حجم ورودی برابر حجم خروجی باقی می‌ماند). به‌طور مشابه، مقدار v_i همچنین متناظر با سرعت محیطی تئوریک غلتک‌ها در قفسه i است، در صورتی که فرض شود سرعت محیطی غلتک‌ها در قفسه اول $v_0 = 1$ در نظر گرفته شده باشد. این رابطه پایه‌ای برای تنظیم تعداد دور غلتک‌ها و هماهنگی سرعت‌های قفسه‌های مختلف در فرآیند نورد به‌شمار می‌رود.

در محاسبه تعداد دور تئوریک غلتک‌ها باید در نظر داشت که در حالی که قطر ویژه غلتک‌ها d_w ثابت باقی می‌ماند، قطر غلتشی غلتک‌ها به‌دلیل تغییر قطر لوله در حال نورد تغییر می‌کند. اگر فرض شود که قطر غلتشی همان قطر در قله (نوک) کالیبر است، در این صورت تعداد دور نسبی تئوریک قفسه به‌صورت زیر تعیین می‌شود:

$$n_i = v_i \frac{d_w - d_0}{d_w - d_i} \quad (20)$$

در عمل، در قفسه‌های ابتدایی، تعداد دور غلتک‌ها به‌طور مشخصی کمتر از مقدار محاسبه‌شده تئوریک در نظر گرفته می‌شود. در حالی که در قفسه‌های انتهایی، عکس این اتفاق رخ می‌دهد و تعداد دور غلتک‌ها بیشتر از مقدار محاسباتی تنظیم می‌گردد.

لزوم کاهش تعداد دور غلتک‌ها نسبت به مقدار محاسبه‌شده در قفسه‌های ابتدایی بستگی به این دارد که چه مقدار کشش و در چه بازه زمانی باید ایجاد شود. در صورتی که لازم باشد کشش به‌سرعت برقرار شود، تغییر تعداد دور در قفسه اول به‌عنوان راهکاری برای تنظیم تدریجی و کنترل‌شده کشش در فرآیند نورد به‌کار می‌رود. به عبارت دیگر، کاهش سرعت چرخش غلتک‌های قفسه اول باعث می‌شود که گشتاور لازم برای کشیدن لوله در قفسه‌های بعدی سریع‌تر ایجاد شود، بدون آنکه فشار بیش‌ازحد یا نوسان ناخواسته در تنش رخ دهد.

$$\Delta n_{1 \max} \approx \left(1 - \frac{d_w - d_1}{d_w - 0.5d_1} \right) 100\% \quad (21)$$

به‌صورت مشابه، تعداد دور غلتک‌ها در قفسه‌های دوم و سوم افزایش داده می‌شود. از قفسه چهارم به بعد، تعداد دور غلتک‌ها تا قفسه $n-1$ برابر با مقدار تئوریک محاسبه‌شده در نظر گرفته می‌شود. از قفسه $n-1$ به بعد، افزایش تعداد دور غلتک‌ها معمولاً به میزان ۱٪ انجام می‌شود. قفسه‌ی آخر معمولاً دارای تعداد دوری معادل n_n است که حدود ۰٫۷ تا ۱٪ بیشتر از قفسه‌ی ماقبل آخر است. هر دو قفسه به‌عنوان قفسه‌های کالیبراسیون عمل می‌کنند، یعنی وظیفه دارند:

- شکل نهایی لوله را تثبیت کنند،
- دقت ابعادی و کیفیت سطح را تضمین نمایند،

- و تفرانس‌های لازم را رعایت کنند.

$$n_{n \max} = 1.01 n_{n-1} \quad (22)$$

سلسله اعداد دور تئوریک به‌دست‌آمده به این روش، امکان محاسبه تعداد دور غلتک‌های مورد نیاز را فراهم می‌کند، به شرط آنکه ابتدا تعداد دور غلتک‌ها برای حالت ورود شمش به قفسه اول مشخص شده باشد.

برای مثال، اگر مقدار n_i برابر با ۱۷۸۹ باشد و تعداد دور اولیه در دقیقه برای قفسه اول $n_{wi} = 200$ در نظر گرفته شود، آنگاه برای قفسه دوم با توجه به $n_{i-2} = 1.432$ خواهیم داشت:

$$n_{wi} = n_{wi} \frac{n_{i-2}}{n_i} = 200 \frac{1.432}{1.789} = 159.2 \quad \text{دور} / \text{دقیقه} \quad (23)$$

در مراحل بعدی محاسبات، بر اساس قطر خارجی مشخص شده لوله، فشردگی قطر، ضریب φ_l تغییر شکل لگاریتمی و ضخامت دیواره برای هر قفسه محاسبه می‌شود. سپس قطر متوسط d_m و ضریب مربوط به ضخامت دیواره v_i تعیین می‌گردد. با استفاده از این مقادیر، می‌توان فشردگی قطر φ_{t_i} و مقدار ضریب کشش Z_i را محاسبه کرد. در ادامه، بررسی می‌شود که آیا در این محاسبات مقدار ضریب اصطکاک مجاز رعایت شده است یا خیر.

برای انجام محاسبات از فرمول‌های زیر استفاده می‌شود:

$$S_i = \frac{d_i}{4} A + \frac{d_i}{16} A^2 + \frac{d_i}{32} A^3 \quad (24)$$

که در آن

$$A = 4S_0 \frac{d_{m_0}}{d_i^2 e^{\sum_1^i \varphi_{l_i}}}$$

$$d_{m_i} = d_i - s_i \quad (25)$$

$$v_i = \frac{s_i}{d_i} \quad (26)$$

$$v_{m_i} = \frac{1}{2} (v_{i-1} + v_i) \quad (27)$$

$$\varphi_{t_i} = -\ln \frac{d_{m_{i-1}}}{d_{m_i}} \quad (28)$$

بر اساس این داده‌ها، ضریب کشش Z_m تعیین می‌شود:

$$Z_{m_i} = \frac{\varphi_{l_i}(2-v_{m_i}) + \varphi_{t_i}(1+v_{m_i})}{\varphi_{l_i}(1-v_{m_i}) - \varphi_{t_i}(1-v_{m_i})} \quad (29)$$

از آنجایی که ضریب کشش Z_m با تنش کششی σ_l در لوله و ضریب مقاومت در برابر تغییر شکل k_z مرتبط است، طبیعی است که مقدار Z_i نباید بیشتر از یک باشد. مقادیر معمول مجاز این ضریب، که وابسته به جنس ماده لوله است، بین ۰/۷ تا ۰/۸۵ قرار دارند (شکل ۶۴).

برای بررسی حفظ شرط تعادل نیروها در هنگام نورد (شکل ۶۳) و تعیین ضریب اصطکاک شرطی واقعی از معادلات زیر استفاده می‌شود:

$$Z_i = 2Z_{m_i} - Z_{i-1} \quad (30)$$

$$1.6 \frac{d_i \sqrt{d_{i-1} - d_i}}{d_{i-1} + d_i} - \frac{(Z_i s_i d_{m_i}) - (Z_{i-1} s_{i-1} d_{m_{i-1}})}{v_{m_i}(1 - Z_{m_i})(d_{i-1} + d_i) \sqrt{d_{i-1} - d_i}} \geq 7.6 \quad (31)$$

معادلات ارائه شده برای دستگاه های نورد کاهشی سه غلتکی با کشش مناسب هستند که قطر ایده آل غلتک ها در آن ها ۲۷۰ میلی متر و دمای لوله در حال نورد بین ۷۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد است (جنس غلتک ها چدن سخت می باشد).

برای دستگاه های نورد کاهشی از نوع های دیگر، مقادیر عددی این معادلات متفاوت خواهند بود.

شایان ذکر است که عبارات فوق تقریبی هستند، زیرا برای به دست آوردن مقدار واقعی ضریب متوسط Z_{m_i} نباید از مقدار میانگین حسابی استفاده کرد، همان طور که در این فرمول ها معمول است، بلکه باید مقدار کل نیروهای وارد بر سیستم، از جمله نیروهای کشش، را به صورت انتگرال محاسبه نمود.

دستگاه های نورد کاهشی با تعداد دور ثابت

برای دستگاه های نورد کاهشی با تعداد دور ثابت، روش محاسبه کالیبراسیون غلتک ها به ازای هر قفسه مشابه روش دستگاه های دارای تعداد دور قابل تنظیم است، با این تفاوت که در این حالت به جای محاسبه سری اعداد نسبی دور غلتک ها، سری ضرایب قطر غلتک ها بر اساس فشردگی های به دست آمده برای لوله محاسبه می شود. سپس تمامی محاسبات لازم برای بررسی و تعیین ضخامت نهایی دیواره لوله مطابق با ضخامت دیواره بیلت اولیه انجام می گیرد.

مقادیر اولیه در اینجا عبارتند از قطر خارجی d_e و ضخامت دیواره s_e لوله نهایی و قطر خارجی d_0 بیلت اولیه. در ابتدا، ضخامت دیواره مناسب s_0 برای بیلت انتخاب می شود و سپس مقادیر زیر محاسبه می گردد:

$$d_{m_0} = d_0 - s_0 \quad (32)$$

$$d_{m_e} = d_e - s_e \quad (33)$$

$$v_0 = -\ln \frac{d_{m_0}}{d_{m_e}} \quad (34)$$

$$v_0 = \frac{s_0}{d_0} \quad (35)$$

$$v_e = \frac{s_e}{d_e} \quad (36)$$

$$v_{m_\Sigma} = \frac{1}{2}(v_0 + v_e) \quad (37)$$

با استفاده از مقادیر v_{m_Σ} و φ_{t_Σ} ، و همچنین با مراجعه به شکل ۶۲ و در نظر گرفتن مقدار Z_m بین ۰٫۲ تا ۰٫۲۵ (که متناظر با عملکرد نرمال دستگاه نورد کاهشی بدون کشش است)، مقدار φ عین می شود. سپس، تغییر ضخامت دیواره بررسی می گردد تا اطمینان حاصل شود که این تغییر با نسبت $\frac{\varphi_{t_\Sigma}}{\varphi_{r_\Sigma}}$ به ضخامت اولیه انتخاب شده مطابقت دارد.

شایان ذکر است که این روش نیز تقریبی بوده و دارای دقت محدود است.

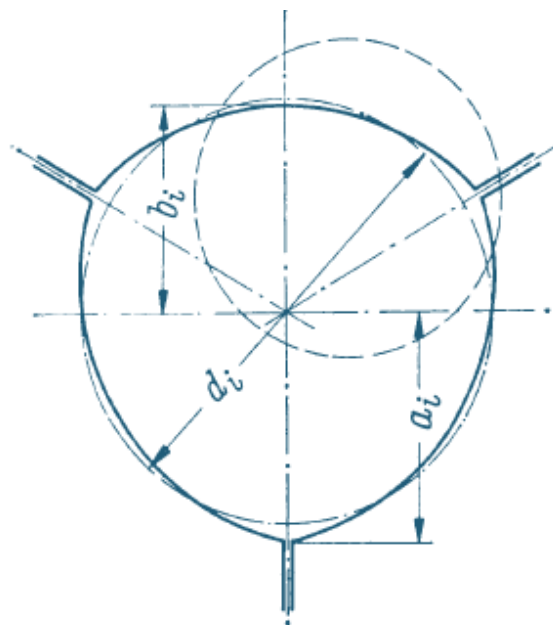
پس از تعیین فشردگی کلی در قطر و تعداد مورد نیاز قفسه های کاری، در مرحله بعد، فشردگی و قطر لوله برای هر قفسه به صورت جداگانه محاسبه می شود.

اگر مطابق با روش معمول، فرض شود که قطر غلتک ها به منظور اطمینان از عملکرد قابل اعتماد دستگاه نورد، به تدریج حدود ۱٪ افزایش می یابد (که متناظر با مقدار متوسط ضریب کشش $Z_m = 0.20 \dots 0.25$ است)، در این صورت برای تعیین ضخامت دیواره می توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$S_i = \frac{d_i}{4} \left[\frac{4s_0 d_{m_0} n_{w_1} (d_w - 0.9d_1)}{d_i^2 n_{w_i} (d_w - 0.9d_i) 1.01^{-(i-100\rho_1)}} \right] + \frac{d_i}{16} [\dots]^2 + \frac{d_i}{32} [\dots]^3 \quad (38)$$

با استفاده از این معادله، درستی ضخامت اولیه انتخاب شده برای دیواره بیلت مورد بررسی قرار می گیرد. در صورتی که در محاسبات با این فرمول، ضخامت نهایی دیواره به دست آمده انحراف قابل توجهی از مقدار مورد نیاز داشته باشد، در این صورت باید ضخامت اولیه اصلاح شده ای انتخاب شود و محاسبات از نو انجام گیرد.

ضخامت دیواره لوله نهایی، حتی در صورتی که ضخامت دیواره بیلت اولیه یکسان باشد، ممکن است تا **حدودی دچار نوسان شود**. این نوسان به نحوه توزیع فشردگی کلی در میان قفسه ها بستگی دارد.



شکل ۶۷ - طرح ساخت کالیبر سه غلتکه

همان طور که معلوم است، هنگام فشردگی لوله از نظر قطر در کالیبرهای گرد، نیاز به وجود اصطلاحاً **"خروجی کالیبر"** (یا «وپوسک» کالیبر) وجود دارد تا از ورود فلز به فاصله بین غلتک ها جلوگیری شود و در نتیجه، **عیوب سطحی روی سطح خارجی لوله ایجاد نشود**.

این خروجی کالیبر معمولاً به یکی از دو صورت زیر اجرا می شود:

- به شکل خط مستقیم مماسی (تانژانسی)

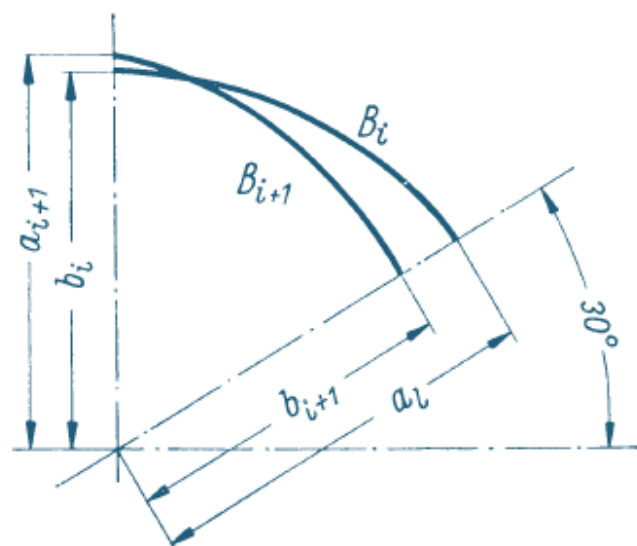
- یا به صورت قوس مناسب از یک دایره (مطابق با منحنی طراحی شده)

این طراحی هندسی برای هدایت مناسب فلز و تضمین کیفیت سطح نهایی لوله ضروری است.

در ادامه، برخی از روش های عملی و متداول برای ایجاد خروجی های مورد نیاز کالیبر را بررسی می کنیم.

در قفسه های سه غلتکی (مطابق شکل ۶۷)، خروجی کالیبر (وپوسک) با استفاده از قوس یک بیضی طراحی می شود. این بیضی به گونه ای انتخاب می شود که محیط آن برابر با محیط محاسبه شده بیرونی لوله (نشان داده شده با $(d_i\pi)$) باشد. این روش طراحی باعث می شود تا شکل تماس بین لوله و غلتک ها به گونه ای تنظیم شود که از ورود ناخواسته فلز به فاصله بین غلتک ها جلوگیری شده و سطح خارجی لوله بدون نقص باقی بماند.

از شکل های ۶۷ و ۶۸ مشخص می شود که نیم محور کوچک b_i هر کالیبر در فرآیند نورد، در ناحیه ای قرار می گیرد که متناظر با نیم محور بزرگ a_{i+1} کالیبر بعدی است. این تطابق هندسی بین نیم محور کوچک کالیبر فعلی و نیم محور بزرگ کالیبر بعدی، همان چیزی است که فشردگی مورد نیاز در قطر لوله را فراهم می کند. به عبارت دیگر، این طراحی تضمین می کند که هر مرحله از نورد به صورت پیوسته و کنترل شده باعث کاهش تدریجی قطر لوله شود، بدون ایجاد ناپیوستگی یا آسیب به سطح آن.



شکل ۶۸ - طرح ساخت کالیبر سه‌غلته که (بخش یا قسمت بریده‌شده از شکل ۷۰)

از روابط هندسی، رابطه‌های زیر به دست می‌آید:

$$a = \frac{a_i}{b_i} = \frac{a_{i+1}}{b_{i+1}} \quad (۳۹)$$

$$\xi = \frac{b_i}{b_{i+1}} \quad (۴۰)$$

$$d_i = a_i + b_i \quad (۴۱)$$

با استفاده از معادله طول قوس،

$$B_{i+1} = B_i(1 - \rho_{i+1}) \quad (۴۲)$$

داریم

$$\alpha = \frac{2}{\xi_i(1-\rho_i)} \quad (۴۳)$$

به طور دقیق‌تر، عبارات فوق برای قفسه‌های بعدی تنها در صورتی کاربرد دارند که فشردگی‌های قطر لوله در تمامی قفسه‌ها برابر باشند. با این حال، با انجام اصلاحات جزئی، این فرمول‌ها می‌توانند حتی در مواردی که فشردگی‌های قفسه‌های متوالی متفاوت است نیز مورد استفاده قرار گیرند.

مقادیر ρ_i و ξ_i به صورت زیر به یکدیگر مرتبط هستند:

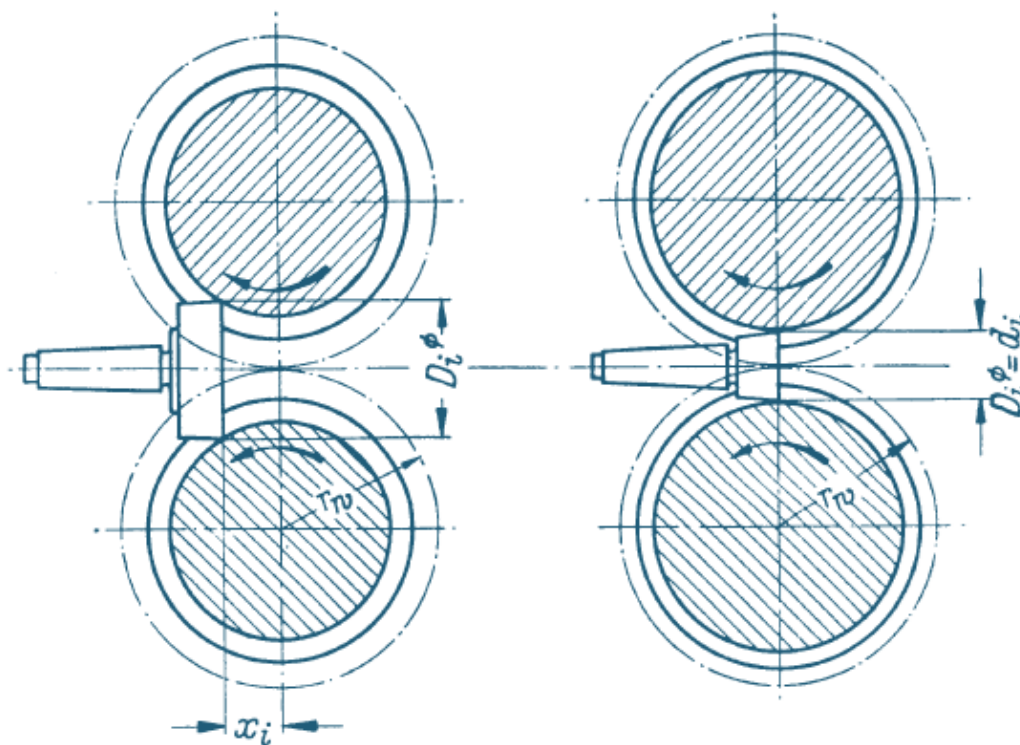
$\rho_i =$	$\xi_i =$
۰٫۰۳	۰٫۹۹۰
۰٫۰۵	۰٫۹۸۸
۰٫۰۸	۰٫۹۸۵
۰٫۱۰	۰٫۹۸۰
۰٫۱۲	۰٫۹۷۵

برای محاسبه نیم‌محورها از روابط شناخته‌شده زیر استفاده می‌شود:

$$a_i = \frac{d_i}{1 + \frac{1}{\alpha}} \quad (44)$$

$$b_i = \frac{d_i}{1 + \alpha} \quad (45)$$

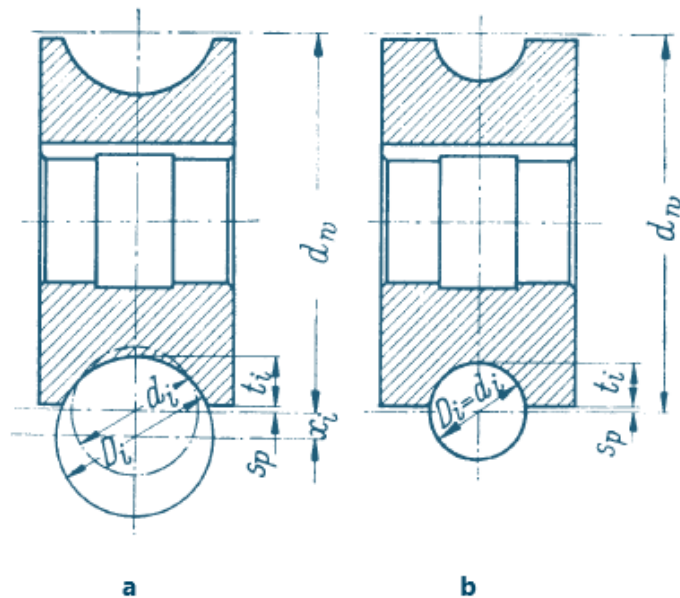
فرزکاری کالیبرهای غلتک با استفاده از فرز گردی انجام می‌شود که در صفحه محوری ثابت شده است. غلتک‌ها در حالی که در قفسه کاری نصب شده‌اند، پردازش می‌شوند و سپس همراه با قفسه بر روی دیواره‌های مخصوص نصب می‌گردند.



شکل ۶۹ - موقعیت ابزار هنگام فرزکاری نهایی کالیبر در دستگاه نورد کاهش‌دهنده سه‌غلتکه

نقشه‌های فرزکاری کالیبر و نصب ابزارکاری در شکل‌های ۶۹ و ۷۰ نشان داده شده‌اند. در شکل ۶۹ همچنین مشخص شده است که فرزکاری آخرین کالیبرهای کالیبراسیون با ابزاری انجام می‌شود که قطر آن برابر با قطر کالیبر است. قطر فرز D_i را می‌توان بر اساس مقادیر a_i و b_i نیم‌محورهای کالیبر، با استفاده از معادله زیر محاسبه کرد:

$$D_i = \left(b_i - \frac{b_i^2}{a_w} - \frac{a_i}{2} + \frac{a_i^2}{a_w} \right) + 0.75 \frac{a_i^2}{\left(b_i - \frac{b_i^2}{a_w} - \frac{a_i}{2} + \frac{a_i^2}{a_w} \right)} \quad (mm) \quad (46)$$

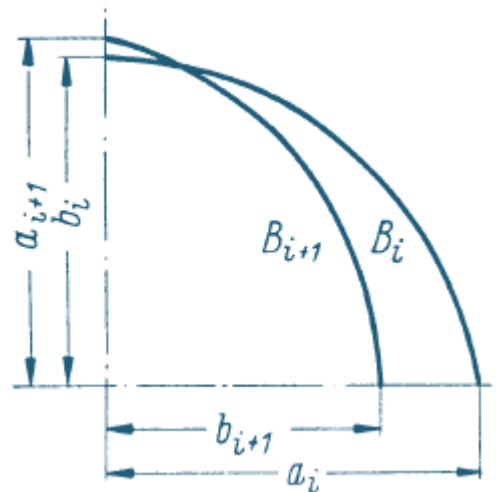


شکل ۷۰ - شکل نصب فرز هنگام تراشکاری کالیبر (نمای از انتها): الف - در قفسه کاری؛ ب - در قفسه کالیبراسیون.

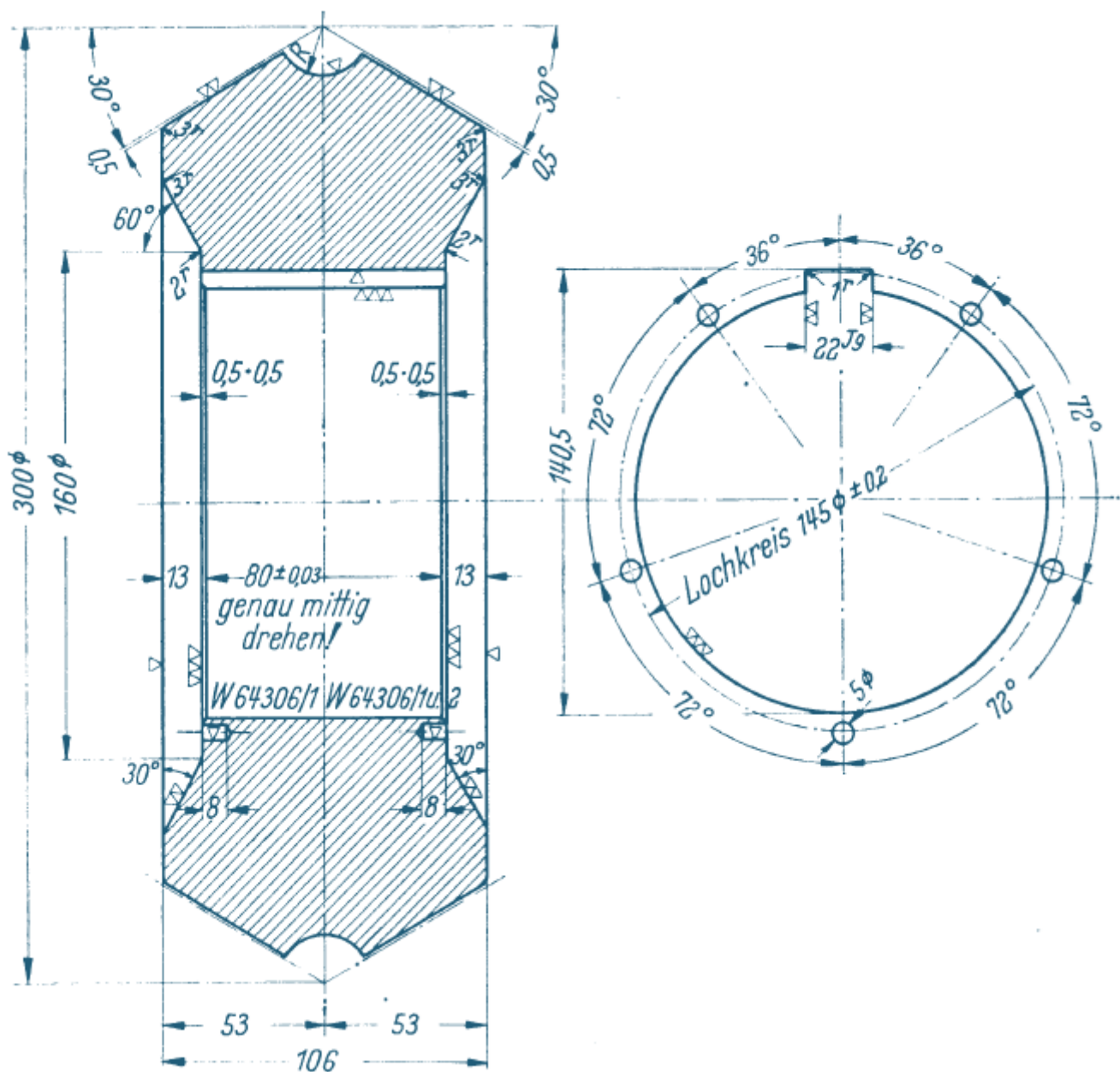
فاصله از لبه برشی فرز تا محور غلتک‌ها به صورت زیر تعریف می‌شود: این فاصله معمولاً برای تنظیم دقیق موقعیت ابزار نسبت به پروفیل کالیبر اهمیت دارد و به تعیین شعاع فرز، موقعیت مرکز آن و شکل بیضوی کالیبر بستگی دارد.

$$x_i = \sqrt{(r_w - b_i)^2 - (r_w - \frac{D_i}{2})^2} \quad (47)$$

طراحی کالیبر در دستگاه‌های نورد دوغلتکی (مطابق شکل‌های ۷۱ و ۷۲) مشابه همان فرآیندی است که در دستگاه‌های سه‌غلتکی انجام می‌شود. فرمول‌های اصلی مورد استفاده برای محاسبه کالیبرها نیز همان روابط شماره (۴۳)، (۴۴) و (۴۵) هستند.



شکل ۷۱ - شکل ورود لوله از یک کالیبر به کالیبر دیگر در دستگاه نورد دوغلتکه



شکل ۷۲ - طراحی شکل کالیبر غلتکی یک دستگاه دو غلتکه (غلتک دستگاه نورد دو غلتکه)

مقدار ضریب ξ_i همانند آنچه در کالیبرهای دستگاه‌های سه غلتکی مشاهده می‌شود، به میزان فشردگی قطر لوله بستگی دارد:

$\rho_i =$	$\xi_i =$
۰٫۰۲	۰٫۹۹۰
۰٫۰۴	۰٫۹۸۵
۰٫۰۶	۰٫۹۷۵
۰٫۰۷	۰٫۹۶۸

ماشین کاری کالیبرهای دستگاه های نورد دوغلتهکی به صورت جداگانه برای هر غلتک و با استفاده از دستگاه های مخصوص انجام می شود.

مقادیر مورد نیاز برای ساخت ابزار کاری (ابزار برش) را می توان با استفاده از فرمول های زیر محاسبه کرد:

$$t_i = b_i - s_p \quad (48)$$

$$D_i = \frac{b_i}{\sin^2 \beta_i} \quad (49)$$

$$\tan \beta_i = \frac{b_i}{a_i} = \frac{1}{a} \quad (50)$$

$$x_i = \frac{D_i}{2} - b_i \quad (51)$$

در پایان، یک نمونه محاسبه کالیبراسیون غلتک ها را برای یک دستگاه نورد کاهشی دوغلتهکی با کشش که شامل شش قفسه کاری است، بررسی می کنیم.

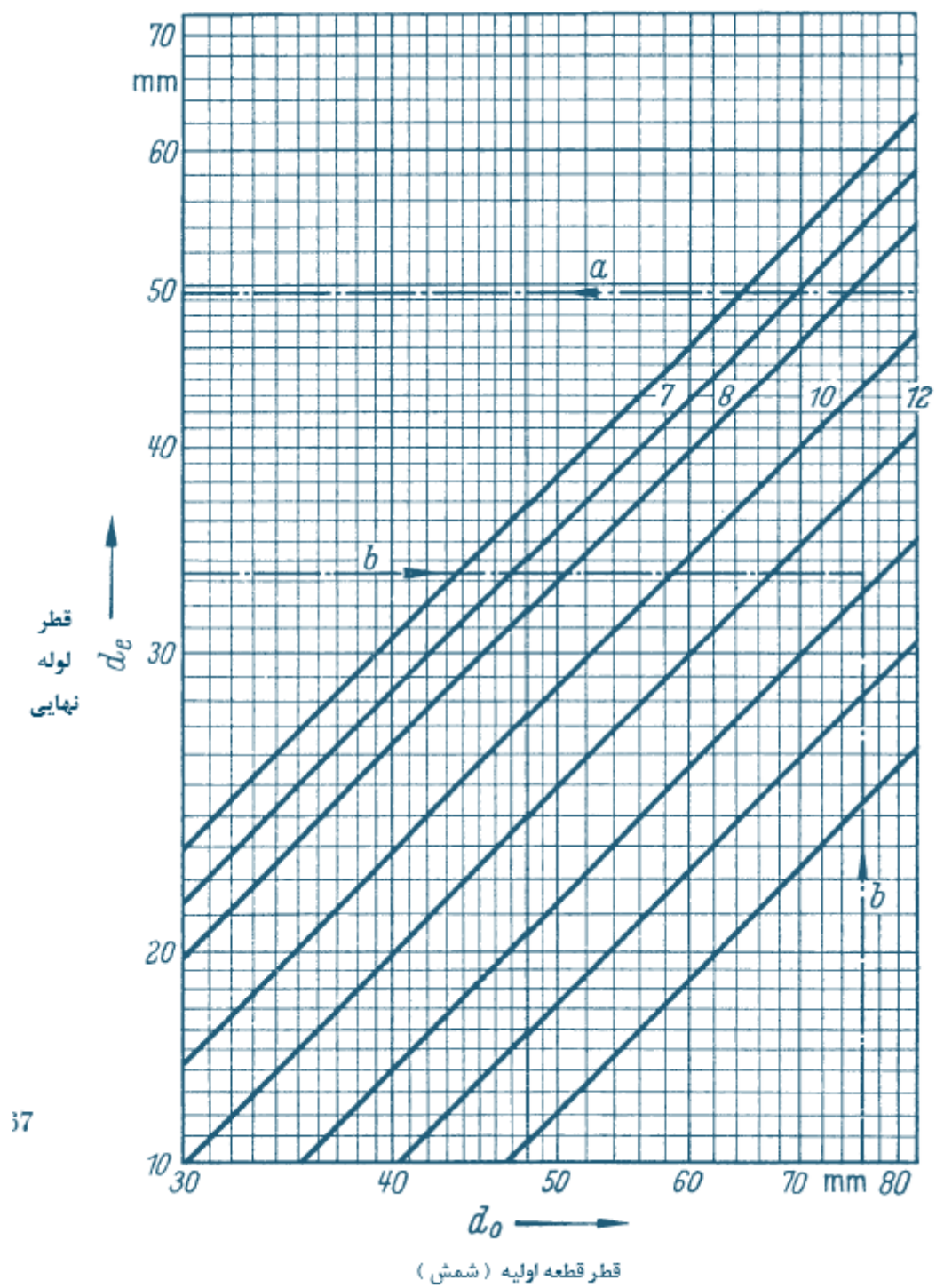
قطر غلتک ها ۳۰۰ میلی متر است. سرعت خروج لوله برابر با ۶۰ متر بر دقیقه در نظر گرفته شده است.

ابعاد "داغ" را به صورت زیر در نظر می گیریم:

- شمش اولیه : 80.8×3.5 میلی متر (قطر بیرونی $\times$ ضخامت دیواره)

- لوله نهایی : 70.7×3.0 میلی متر

در ادامه، محاسبات لازم برای تعیین فشردگی ها، ضرایب تغییر شکل، سرعت ها و کالیبراسیون برای هر یک از شش قفسه انجام خواهد شد. نتایج محاسبات در جدول ۱۲ ارائه شده اند، و ابعاد به دست آمده برای کالیبرها در جدول ۱۱ درج شده اند. تعداد قفسه ها (۶ عدد) بر اساس نمودار ارائه شده در شکل ۷۳ تعیین شده است.



شکل ۷۳ - نمودار تعیین تعداد لازم قفسه‌های دستگاه نورد کاهش دهنده دوغلتکه

شماره قفسه		0	1	2	3	4	5	6
قطر لوله d ، mm		80.80	80.80	77.60	75.25	72.95	70.70	70.70
	بر اساس قطر Δd							
	مقدار نسبی ρ							
ضخامت دیواره لوله s ، mm								
تغییر ضخامت دیواره لوله Δs								
قطر متوسط لوله d_m								
سطح مقطع عرضی لوله F								
ضریب کشش								
میزان کاهش سطح مقطع								
	مماسی							
	شعاعی							
	محوری							
قطر غلتک در رأس (نوک) کالیبر								
	نظری							
	تصحیح							
	عملی							
ضریب ضخامت دیواره								
ضخامت دیواره محاسبه شده								
خطا در تعیین ضخامت دیواره								

شماره قفسه	ξ_i	α	a_i	b_i
۱	0.991	1.018	40.35	39.65
۲	0.988	1.044	39.65	37.95
۳	0.988	1.045	38.45	36.80
۴	0.988	1.045	37.30	35.36
۵	0.988	1.045	36.15	34.55
۶	-	-	35.35	35.35

جدول ۲ - محاسبه کالیبراسیون غلتک‌های نورد دو غلتکه کاهش‌دهنده

Advanced Reducing Rolling and Calibration of Their Rolls

