

## جلسه هشتم

## فصل چهارم: موازنه کار

در این فصل با موازنه کار یا انرژی آشنا می شویم که روشی بسیار ساده برای تخمین زدن نیروها و انرژی در بعضی از عملیات شکل دادن فلزات است، اما نمی توان با استفاده از این روش خواص حاصل را پیش بینی کرد.

انرژی لازم برای تکمیل عملیات شکل دادن را می توان به کار ایده آل  $w_i$ ، که برای انجام تغییر شکل در غیاب اصطکاک و شارش ناهمگن لازم بود، کار لازم برای غلبه بر نیروی اصطکاک  $w_f$  و کار اضافی  $w_r$ ، تقسیم کرد.

## کار ایده آل

برای محاسبه کار ایده آل باید فرایند ایده آل را در نظر گرفت (چه این فرایند عملی باشد و چه نباشد) که شکل مطلوب را ایجاد کند.

مثلاً تغییر شکل با تقارن محوری در روزن رانی (*Extrusion*)، یا کشش سیم از مفتول را می توان با آزمون کشش شبیه سازی کرد.

در اینجا می توان باریک شدگی در آزمون کشش را نادیده گرفت.

کار ایده آل عبارت است از:

$$w_i = \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon$$

که در آن  $\epsilon = \ln(A_0 / A_f)$  است و بر اساس قانون توانی کار سختی داریم:

$$w_i = K\epsilon^{n+1} / (n+1)$$

در صورت مناسب بودن سایر عبارت های کار سختی می توان آنها را در کنار معادله کار ایده آل به کار گرفت.

## مثال

رفتار کرنش سختی فلزی با رابطه  $\bar{\sigma} = 140\bar{\epsilon}^{0.25} MPa$  تقریب زده می شود. مطلوب است تعیین کار لازم در واحد حجم، هرگاه بخواهیم میله‌ای از این ماده به قطر  $12.7mm$  را بکشیم تا قطر آن به  $11.5mm$  برسد

## حل

با در نظر گرفتن این فرآیند به عنوان فرآیندی ایده آل داریم:

$$\bar{\epsilon} = 2\ln(12.7 / 11.5) = 0.99$$

$$w_i = \left( (140 \cdot 10^6)(0.99)^{1.25} \right) / 1.25 = 14.7 \cdot 10^6 J / m^3 = 14.7 MJ / m^3$$

آزمون فشار بدون اصطکاک را میتوان فرآیند آهنگری ایده‌آل دانست.

نورد کاری ورق را می‌توان با فشردن بدون اصطکاک با حالت کرنش صفحه‌ای شبیه سازی کرد.

اگر تنش شارش میانگین  $Y_m$  معلوم باشد می‌توان کار ایده آل  $w_i$  را چنین در نظر گرفت:

$$w_i = Y_m \bar{\epsilon}$$

## روزن رانی و کشش

در شکل زیر فرایند روزن رانی مستقیم یا روبه پیش نشان داده شده است.

شمشی به قطر  $D_0$  با استفاده از قالبی به قطر روزن رانی می‌شود. این عملیات از نوع حالت پایا است.

حجم فلز خروجی از قالب  $A_1 \Delta l_1$  باید با ماده ورودی به قالب  $A_0 \Delta l_0$  برابر باشد و در نتیجه کل کار انجام شده  $W_a$  برابر است با

$$W_a = F_e \Delta l$$

که در آن  $F_e$  نیروی روزن رانی است و با قرار دادن کار در واحد حجم به صورت زیر:

$$w_a = W_a / (A_0 \Delta l)$$

داریم:

$$w_a = \frac{F_e \Delta l}{A_0 \Delta l} = \frac{F_e}{A_0}$$

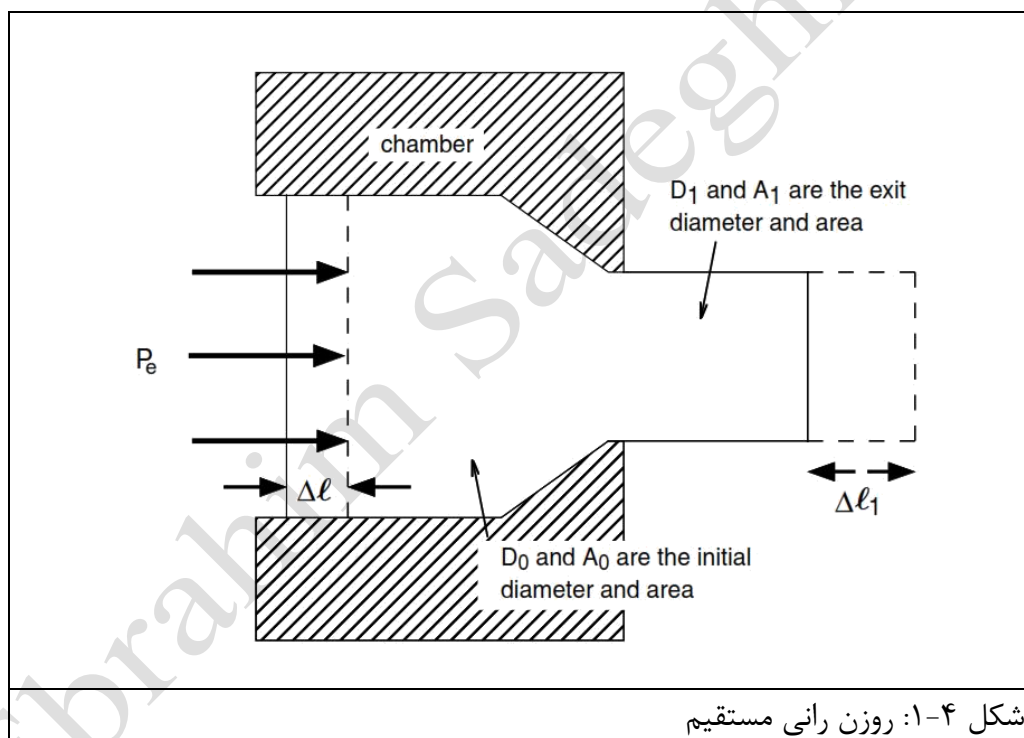
فشار روزن رانی  $P_e$  باید برابر  $w_a$  باشد بنابراین

$$w_a = P_e$$

اگرچه در فرایند ایده آل  $w_a = w_i$ ، برای فرایند واقعی داریم  $w_a > w_i$  بنابراین

$$P_e > \int \sigma d\varepsilon$$

بنابراین معادله  $w_a = P_e$  کار روزن رانی را کمتر از مقدار واقعی تخمین می زند و کران پایینی مقدار واقعی است.

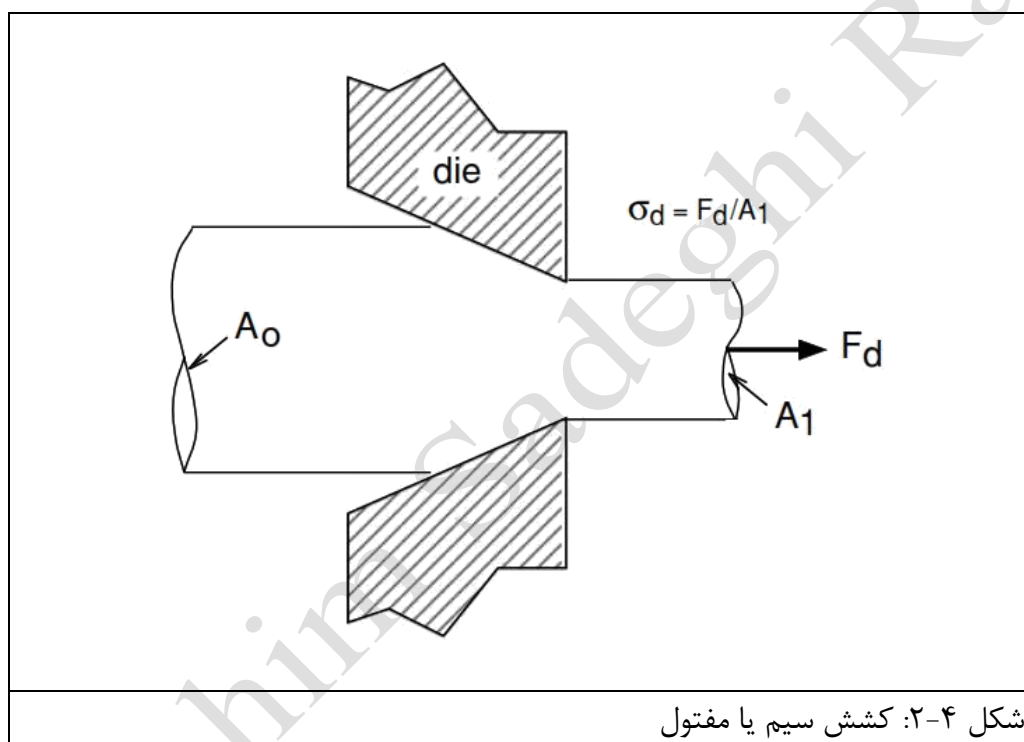


کشش سیم و مفتول را نیز می توان به روش مشابهی تحلیل کرد. نیروی کشش  $F_d$  فلز را از داخل حدیده می کشد کار واقعی  $W_a$  در کشش طول  $\Delta l$  برابر است با  $W_a = F_d \Delta l$  پس کار در واحد حجم برابر است با

$$W_a = F_d / A_1 = \sigma_d$$

که در آن  $\sigma_d$  تنش کشش است باز هم داریم  $W_a > W_i$  در نتیجه

$$\sigma_d > \int \sigma d\varepsilon$$



مثال

میله مثال قبل را از درون حدیده ای می کشیم تا قطر آن از  $12.7\text{mm}$  به  $11.5\text{mm}$  برسد تنش کششی لازم را با فرض ایده آل بودن فرایند تعیین نمایید.

حل

برای فرایند ایده آل داریم:

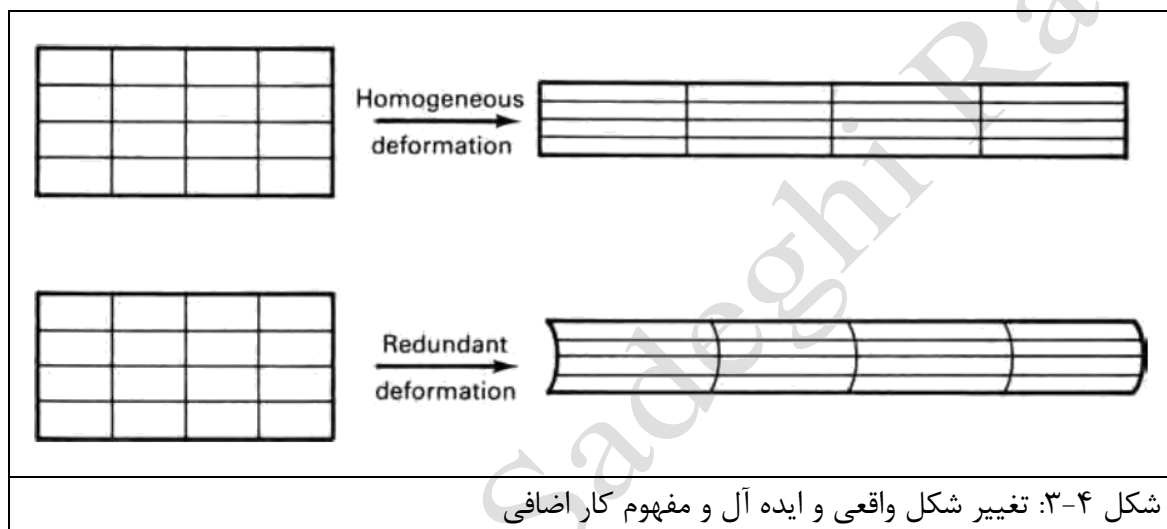
$$\sigma_d = w_i = 14.7\text{MPa}$$

## بازده تغییر شکل

علاوه بر کار ایده آل کار لازم برای مقابله با اصطکاک بین قطعه کار و ابزارها  $W_f$  و کار لازم برای انجام تغییر شکل اضافی یا ناخواسته  $W_r$  نیز مطرح می گردد.

این جمله های کار را می توان بر حسب کار در واحد حجم بیان کرد و عبارتند از:  $W_r, W_f$ .

شکل زیر کار اضافی را در کشش یا رولن رانی نشان می دهد اگر تغییر شکل ایده آل باشد مقاطع صفحه ای به صورت صفحه ای باقی می ماند



در فرایندهای واقعی لایه های سطحی نسبت به لایه های میانی دچار برش می شود در این حالت ماده بیش از مقدار لازم برای کاهش قطر کرنش می یابد و در نتیجه کرنش سخت تر می شود و شکل پذیری آن کاهش می یابد.

کار واقعی برابر است با مجموعه کارهای ایده آل، اصطکاکی و اضافی و داریم

$$W_a = W_i + W_f + W_r$$

غالباً در عمل به دشواری می توان  $W_r$  و  $W_f$  را به صراحت تعیین کرد اما می توان با یک شکل کردن جمله های غیر موثر و تعریف بازده تغییر شکل  $\eta$  این مشکل را دور زد و داریم:

$$\eta = W_i / W_a$$

تجربه به ما امکان می دهد که  $\eta$  را به طور معقول تخمین بزنیم.

بازده تغییر شکل برای کشش سیم و مفتول بسته به روانکاری، درصد کاهش و زاویه حدیده بین 50 – 65% است.

با استفاده از بازده فشار روزن رانی یا تنش کشش را می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$P_{ext} = \frac{1}{\eta} \int \bar{\sigma} d\bar{\epsilon}$$

اگر کرنش سختی اندک باشد داریم:

$$P_{ext} = \frac{1}{\eta} \int \bar{\sigma} d\bar{\epsilon} = \frac{Y_m \epsilon}{\eta}$$

مثال

اگر قطر میله مثال اول را از طریق روزن رانی از 12.7mm به 11.5mm برسانیم و بازده تغییر شکل 70% باشد فشار روز رانی را محاسبه کنید.

حل

$$P_{ext} = \frac{1}{\eta} \int \bar{\sigma} d\bar{\epsilon} = w_i / \eta = 14.7 / 0.7 = 21MPa$$

بیشترین کاهش سطح مقطع در عملیات کشش

برای عملیات کشش به ازای هر بار عبور از حدیده، درصد کاهش سطح مقطع ماکسیموم وجود دارد، زیرا تنش کششی نباید از استحکام سیم یا مفتول فراتر رود. هنگامی که کشش آغاز می شود فرآیندی حالت پایا است.

ماکسیموم کاهش سطح متناظر است با:  $\sigma_d = \bar{\sigma}$

اگر از اثر سختی ناشی از کرنش اضافی چشم پوشی کنیم می توانیم با برابر قرار دادن عبارت های مربوط به  $\sigma_d$ ،  $\bar{\sigma}$  کرنش حدی  $\epsilon^*$  را بیابیم.

با فرض حاکم بودن قانون توانی کار سختی داریم:  $\sigma_d = K \epsilon^{*n+1} / (n+1)$ ,  $\bar{\sigma} = K \epsilon^{*n}$

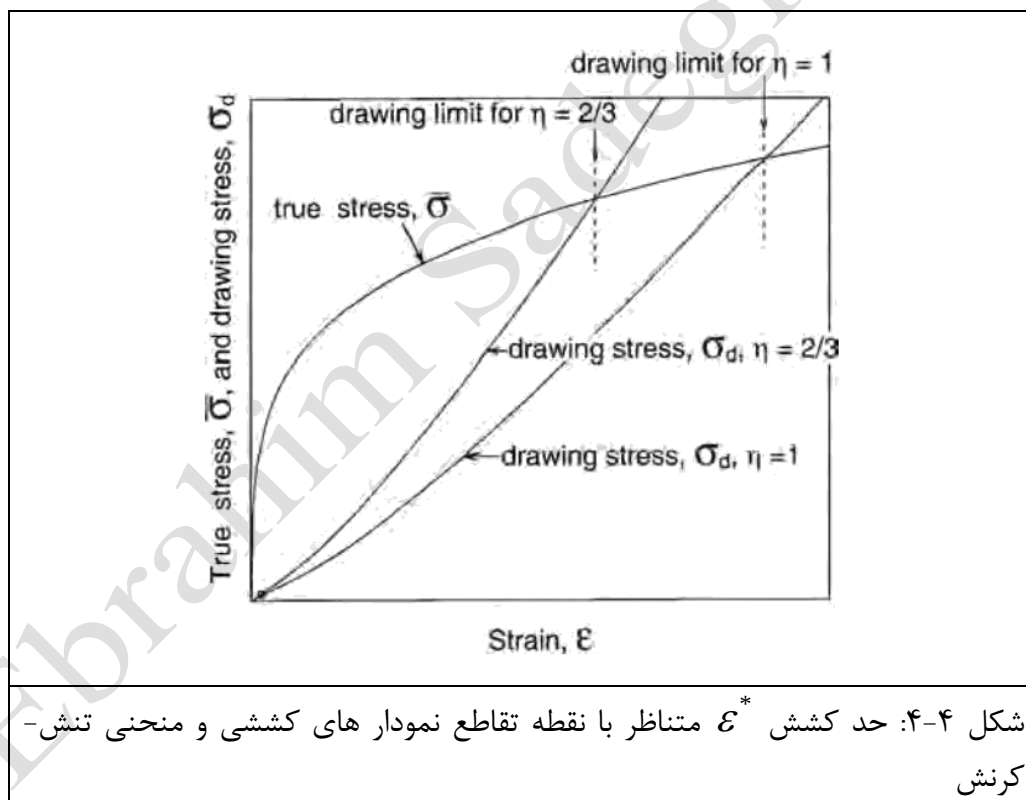
بنابراین

$$\varepsilon^* = \eta(n+1)$$

برای فلز مومسان ایده آل ( $n = 0$ ) و بازده کامل ( $\eta = 1$ ) کرنش ماکسیموم برابر خواهد بود با  $\varepsilon^* = 1$  که متناظر است با کاهش  $r^*$  به اندازه 63% اگر مقدار معقول تر  $\eta = 0.65$  را در نظر بگیریم نتیجه می شود  $\varepsilon^* = 0.65$  و  $r^* = 48\%$ .

در عمل از چند عبور استفاده می شود و پس از اولین یا دومین عبور می توان کرنش سختی اضافی را نادیده گرفت یعنی ( $n \rightarrow 0$ )

با توجه به همه شرایط (قوانین کرنش سختی و بازده ها) تنش کششی ماکسیموم متناظر است با  $\sigma_d = \bar{\sigma} / \eta$  که در شکل نشان داده شده است



در آغاز عملیات وضعیت متفاوت است. ابتدا باید ماده کشیده نشده را وارد حدیده کرد اگر این ماده تابکاری شده باشد نیروی کشش ماکسیمم با استحکام کششی متناظر خواهد بود یا داریم:

$$\sigma_d)_{\max} = Kn^n$$

و کرنش ماکسیم آن برابر است با:

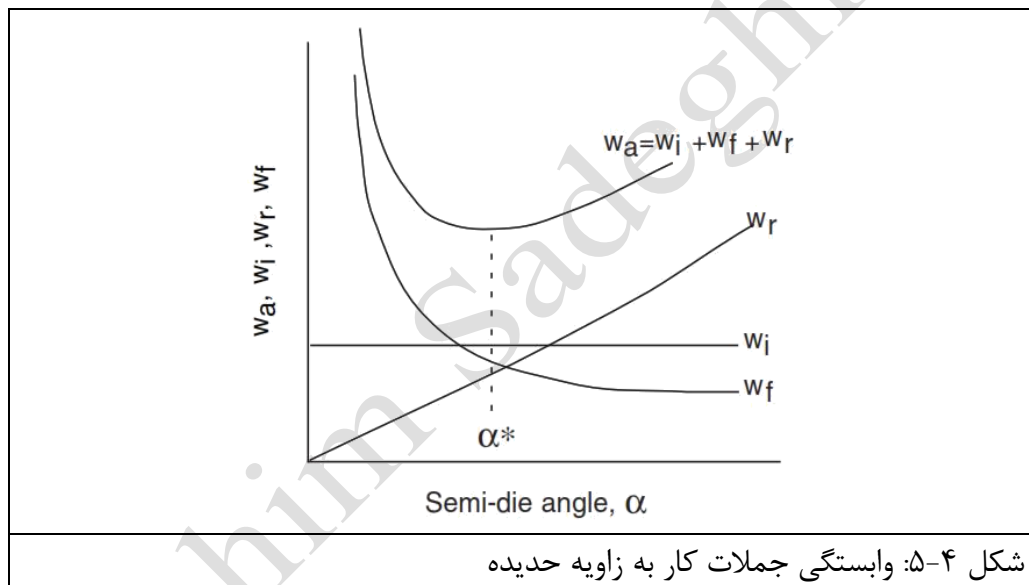
$$\varepsilon^* = [\eta(n+1)n^n]^{1/(1+n)}$$

اما به احتمال زیاد مقطع سر سیم را از طریق قرار کاری که در ادامه توضیح خواهیم داد کاهش می‌دهند تا وارده دیده شود.

در این صورت دستکم به همان اندازه ای کرنش سخت خواهد شد که در صورت کشیدن می‌شد.

### آثار زاویه حدیده و کاهش مقطع

در شکل زیر وابستگی جمله های کار اصطکاکی و کار اضافی به زاویه حدیده به صورت شماتیک نشان داده شده است.



به ازای درصد کاهش مفروض با افزایش زاویه حدیده سطح تماس بین حدیده و فلز کاهش می‌یابد.

فشاری که حدیده در شکاف حدیده بر فلز وارد می‌کند از زاویه حدیده مستقل است بنابراین با بزرگ‌تر شدن سطح تماس نیروی بین حدیده و قطعه کار افزایش می‌یابد.

وقتی ضریب اصطکاک ثابت باشد، با کاهش  $\alpha$  مقدار  $w_f$  افزایش می‌یابد با افزایش زاویه حدیده جمله کار اضافه  $w_r$  افزایش می‌یابد.

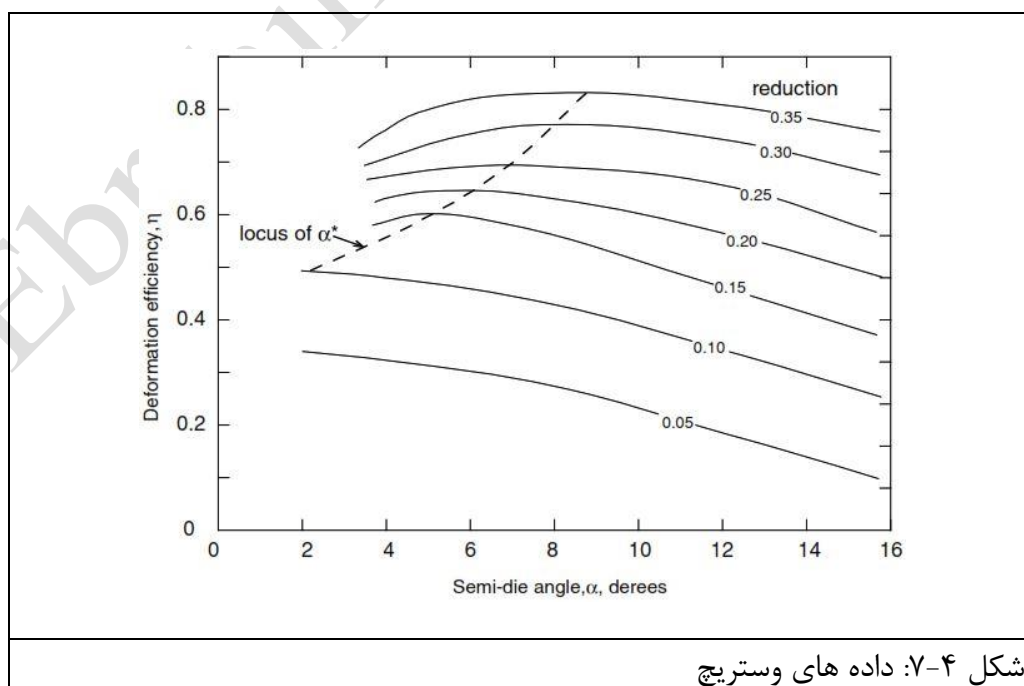
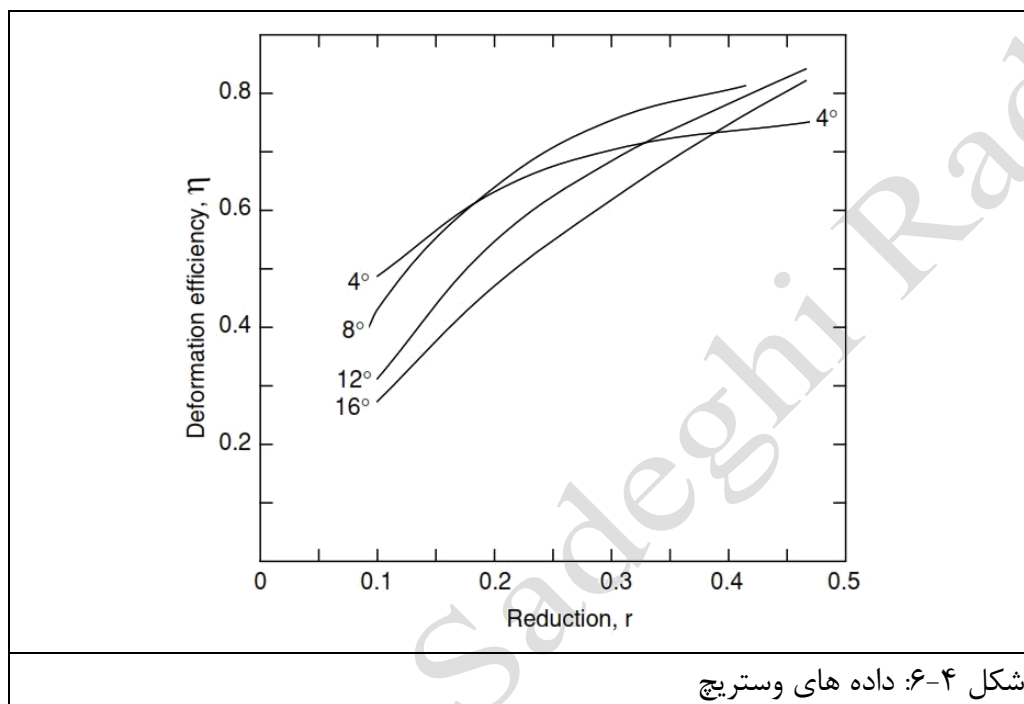
جمله کار ایده‌آل  $w_i$  به زاویه حدیده وابسته نیست.



به ازای هر میزان کاهش، یک زاویه بهینه حدیده  $\alpha^*$  وجود دارد که به ازای آن کار مینیموم می شود.

بازده و زاویه بهینه حدید هر دو تابع میزان کاهش اند. به طور کلی با افزایش میزان کاهش، بازده افزایش می یابد. شکل های زیر بر اساس اندازه گیری های ویستریچ (Wistreich) ترسیم شده اند.

زاویه بهینه حدیده با افزایش میزان کاهش، افزایش می یابد.



در روز نرانی زاویه قالب و میزان کاهش همان آثار کلی را بر بازده دارند اما هیچ حد نظری برای میزان کاهش وجود ندارد هر چند ممکن است نیروهای لازم برای روزن رانی اضافی از ظرفیت دستگاه روزن رانی فراتر روند.

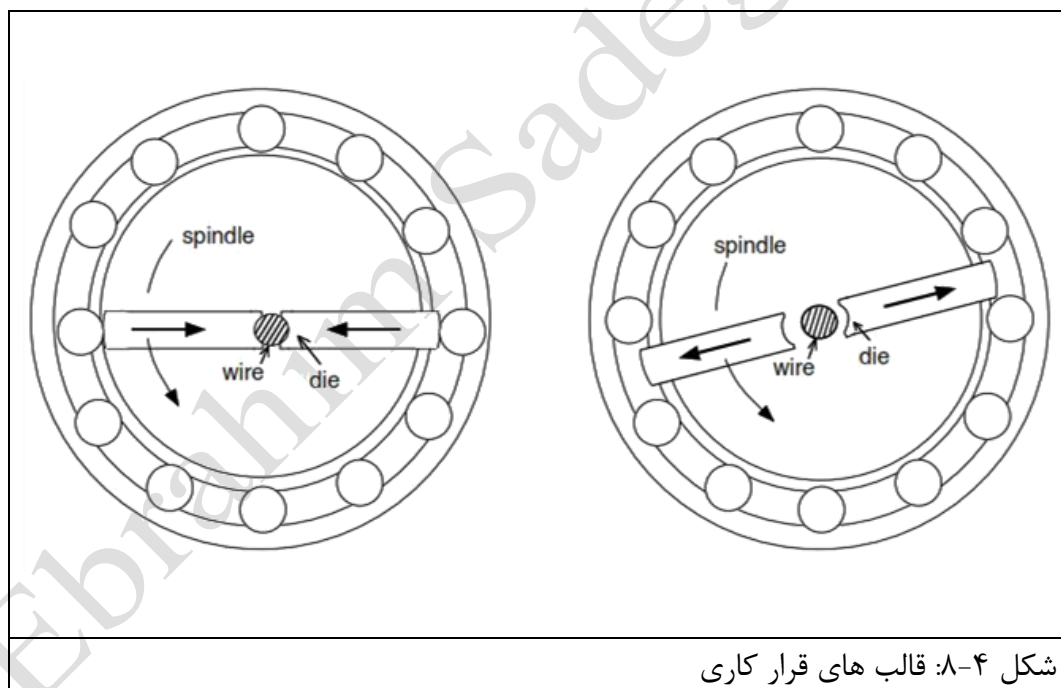
بنابراین برای روزن رانی در مقایسه با کشش می توان از درصد کاهش و زاویه قالب بسیار بالاتری استفاده کرد. نسبت های کاهش سطح مقطع  $1:8$  ( $r = 0.875$ ) اصلاً غیر عادی نیستند

### قرار کاری

با استفاده از فرایند قرار کاری گردان نیز می توان قطر سیم ها و لوله ها را کاهش داد. قالب های شکل دار را دور سیم یا لوله می چرخانند و قالب ها در حین چرخش قطعه کار را چکش کاری می کند. در نتیجه این عملیات، ریزساختاری پیچ و تاب دار ایجاد می شود.

در کارگاه کشش سیم، از قرار کاری برای کاهش مقطع سر سیم استفاده می شود تا در آغاز عملیات بتوان آن را وارد حديد کرد.

در شکل زیر تصویری شماتیک از قالب های مورد استفاده در قرار کاری مشاهده می شود.



شکل ۴-۸: قالب های قرار کاری