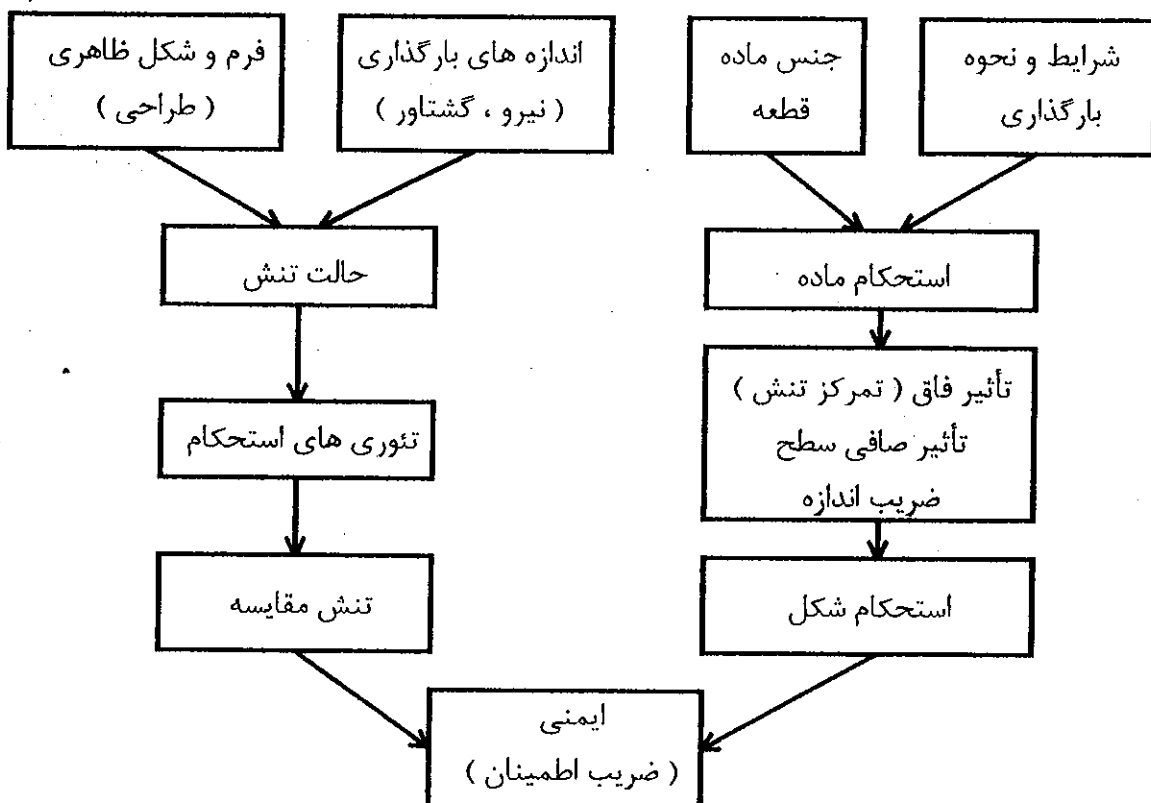


۲ محاسبه و تعیین استحکام قطعات فلزی

۱-۲ اهداف و روش کار

قطعات و اجزاء ماشین بایستی بگونه ای طراحی و محاسبه شوند که در اثر بارگذاری استحکام و توانایی لازم جهت تحمل بارهای موجود را داشته باشند، در غیر اینصورت در اثر اعمال بارها قطعه یا شکسته میشود و یا اینکه کارایی خود را از دست میدهد. از طرفی غالباً محاسبه مستقیم ابعاد هندسی قطعات در رابطه با استحکام آنها با مشکل مواجه میباشد، طوریکه در این گونه موارد جهت طراحی ابتدا یک تعیین ابعاد اولیه انجام میگردد، بدنبال آن تنش های موجود محاسبه می گردند و سپس ضریب اطمینان موجود تعیین می شود. اگر این ضریب اطمینان بدست آمده بیشتر از مقداری باشد که برای آن در نظر گرفته شده است، در آن صورت طراحی (تعیین ابعاد) انجام شده دارای استحکام لازم میباشد، در غیر این صورت بایستی در طراحی قطعه تجدید نظر نمود. این عمل آنقدر تکرار می گردد تا قطعه طراحی شده با ضریب اطمینان کافی از استحکام لازم برخوردار گردد. شکل ۱-۲ مراحل مختلف تعیین استحکام قطعات را نشان می دهد.



شکل ۱-۲

شمایی از مراحل محاسبات و تعیین استحکام قطعات و اجزاء ماشین

در نتیجه اعمال نیروها و یا گشتاورها در داخل قطعه ای که دارای شکل معینی است (خواه این بارها مستقیماً اعمال شوند و یا اینکه از طریق تأثیر انواع دیگر بارها یعنی نیروهای حاصل از حالت‌های تنش پیچیده و یا گرم شدن قطعه ایجاد شوند) یک حالت تنش داخلی پدیدار می گردد که بایستی با بارهای خارجی در تعادل باشد . جهت تأیید استحکام قطعه لازم است که مقایسه ای بین این حالت تنش داخلی و تنش های مجاز داده شده مربوط به ماده ای که انتخاب نموده ایم انجام پذیرد . در این مقایسه بایستی شرایط و نحوه بارگذاری (استاتیکی ، دینامیکی) ، رفتار مواد در برابر انواع تنش ها و همچنین تأثیر انواع پارمترهای طراحی در نظر گرفته شوند .

برای محاسبه حالت تنش ایجاد شده در قطعات بیشتر از فورمول ها و روابط بدست آمده در علم مقاومت مصالح ($\frac{F}{A}$ ، $\frac{M_b}{W_a}$ ، $\frac{M_t}{W_p}$) استفاده میشود . اختلاف و انحراف مقادیر تئوریک بدست آمده بر اساس توزیع خطی تنش ها از حالت تنش واقعی که مثلاً در نتیجه تمرکز تنش حاصل از فاق ها ایجاد میشوند را میتوان از طریق کاهش مقادیر مجاز مربوط به استحکام مواد (مجاز σ یا σ_{zul}) منظور داشت . با توجه به اینکه از یک طرف در قطعات غالباً حالت تنش چند محوری حاکم است و از طرفی مقادیر مشخصه مواد که در آزمایش بدست می آیند قاعدتاً در بارگذاری یک محوری انجام شده اند (آزمایش کشش ، آزمایش خستگی) ، کاربرد یک تئوری استحکام که مقایسه حالت تنش چند محوری موجود با مقادیر مشخصه مواد را از طریق محاسبه یک تنش معادل یک محوری یعنی تنش مقایسه ممکن می سازد لازم به نظر می رسد .

۲-۲ حالت تنش

در حالت کلی هر نقطه ای از یک قطعه مکانیکی تحت تأثیر ۶ تنش (۳ تنش نرمال و ۳ تنش برشی) قرار می گیرد که به آن حالت تنش فضایی گفته میشود . تنش های نرمال سطوحی که فاقد تنش برشی هستند ($\tau = 0$) را تنش های اصلی (σ_I ، σ_{II} ، σ_{III}) می گویند . به کمک دایره تنش مور میتوان برای هر حالت تنش داده شده ، تنش های نرمال و برشی در هر سطح مقطع برش دیگر را نیز بدست آورد . در زیر نمونه هایی از حالات تنش مورد بحث قرار می گیرند .

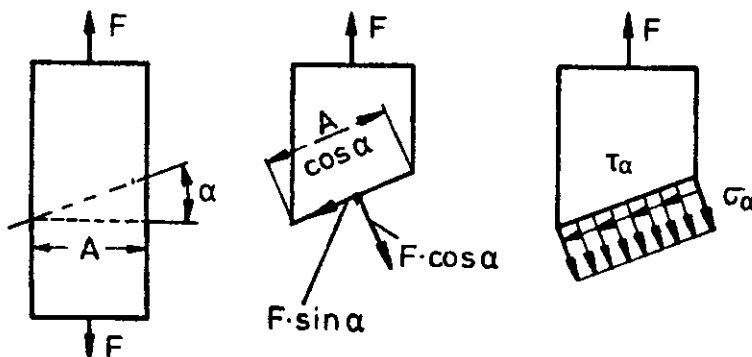
حالت تنش یک محوری (میله کششی)

حالت تنش یک محوری مثلاً در سطح مقطع یک میله ای که بطور کششی بارگذاری میشود و به اندازه کافی از محل اعمال نیرو فاصله دارد (تقریباً به اندازه عرض سطح مقطع در فلوی نیرو) ایجاد میشود . شکل ۲-۲ این حالت را نشان میدهد . در آنجا میتوان توزیع تنش در سطح مقطع را یکنواخت در نظر گرفت (اصل von de Saint-Venant) . مؤلفه عمودی نیرو در سطح مقطع تنش نرمال را بوجود می آورد .

$$\sigma_{\alpha} = \frac{F}{A} \cos^2 \alpha = \frac{F}{2A} (1 + \cos 2\alpha) \quad \text{تنش نرمال :}$$

و مؤلفه ای از نیرو که موازی صفحه سطح مقطع میباشد تولید تنش برشی می کند .

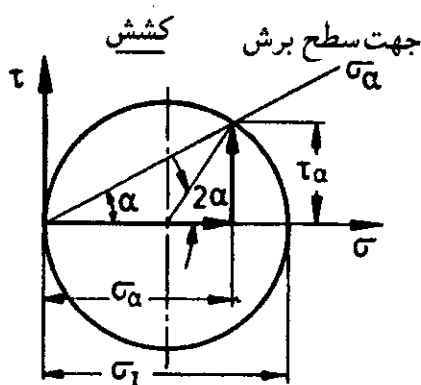
$$\tau_{\alpha} = \frac{F}{A} \sin \alpha \cdot \cos \alpha = \frac{F}{2A} \sin 2\alpha \quad \text{تنش برشی :}$$



A = سطح مقطع برش

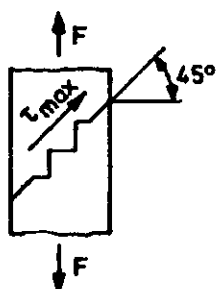
شکل ۲-۲

معادلات فوق عبارتند از شکل پارامتری معادله یک دایره (دایره مور) .



شکل ۳-۲

در سطح مقطع برشی که عمود بر محور میله قرار دارد ($\alpha = 0$) تنش برشی موجود نیست ($\tau = 0$) و تنش نرمالی که در این سطح اعمال میشود تنش اصلی σ_I میباشد (شکل ۲-۳) . در سطح مقطع برشی که زاویه آن $\alpha = 45^\circ$ می باشد ، تنش برشی به بیشترین مقدار خود ، یعنی $\tau_{\max} = \sigma_I / 2$ می رسد . به این جهت ، همانطور که در شکل ۲-۴ مشاهده میشود پدیده شکست قطعات میله ای شکل از اجسامی که چقرمه می باشند در بارگذاری یکباره و آهسته کششی اغلب تحت زاویه 45° ، و بالعکس در اجسامی که شکننده میباشند تحت زاویه 0° رخ می دهد .



چقرمه

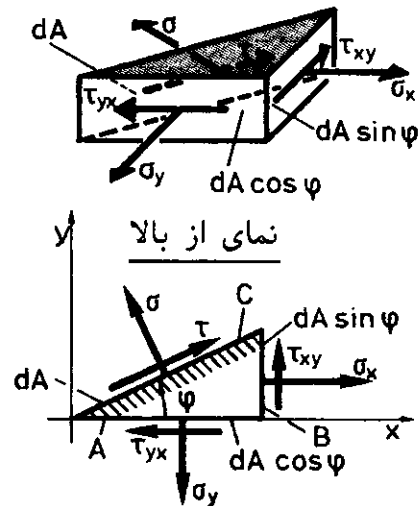


شکننده

شکل ۴-۲

حالت تنش سطحی (دو محوری)

این حالت تنش در مسائل کاربردی اهمیت ویژه ای دارد، زیرا که در خیلی از موارد بیشترین بارها در سطوح خارجی قطعات اعمال میشوند و در عین حال تنش های عمود بر سطح خارجی صفر میباشند. شکل ۵-۲ عنصر مربوط به این حالت تنش را نشان میدهد. با توجه به تعادل نیروها و همچنین اصل برابری تنش های برشی یعنی $\tau_{xy} = \tau_{yx} = \tau$ میتوان تنش ها در هر سطح مقطع دلخواهی که نسبت به دستگاه مختصات x, y به اندازه زاویه φ چرخیده است را بدست آورد. بنابراین برای تنش ها میتوان نوشت:



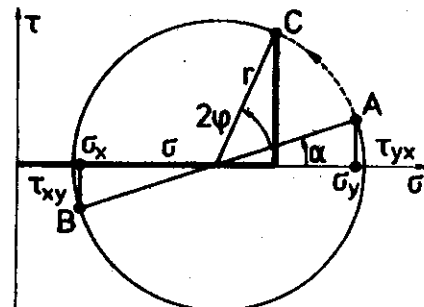
شکل ۵-۲

$$\sigma_{\varphi} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} \cos 2\varphi - \tau \sin 2\varphi$$

$$\tau_{\varphi} = \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} \sin 2\varphi + \tau \cos 2\varphi$$

در شکل ۶-۲ نمایش این حالت تنش در دایره مور مشاهده میشود.

قاعده علامت تنش ها در دایره مور: تنش نرمال موقعی مثبت است که یک تنش کششی باشد و تنش برشی موقعی مثبت است که اگر به جهت آن نگاه کنیم، عنصر برش در سمت راستش قرار بگیرد.



شکل ۶-۲

شکل ۷-۲ این حالت تنش را مجدداً در دایره مور با مشخص نمودن تنش های اصلی و همچنین ماکزیمم تنش برشی نشان میدهد. برای تنش های اصلی میتوان نوشت:

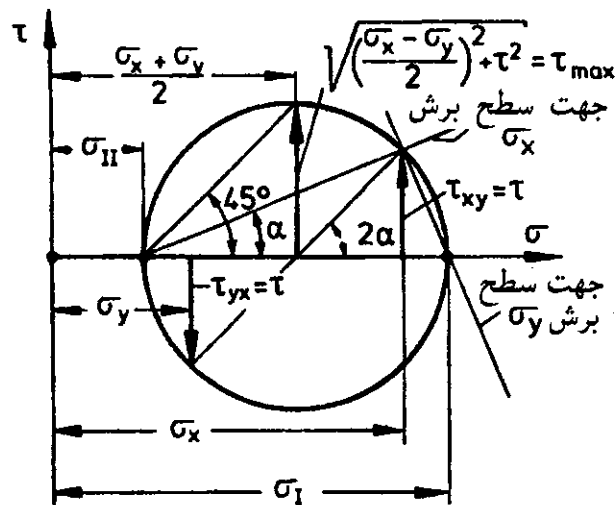
$$\sigma_{I,II} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau^2}$$

$$\tau_{\max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau^2}$$

و برای حداکثر تنش برشی نیز داریم:

زاویه دوران دستگاه مختصات x, y نسبت به سطوح اصلی (دستگاه مختصات اصلی)، یعنی زاویه

$$\tan 2\alpha = \frac{2\tau}{\sigma_x - \sigma_y} \quad \alpha \text{ از رابطه زیر بدست می آید:}$$

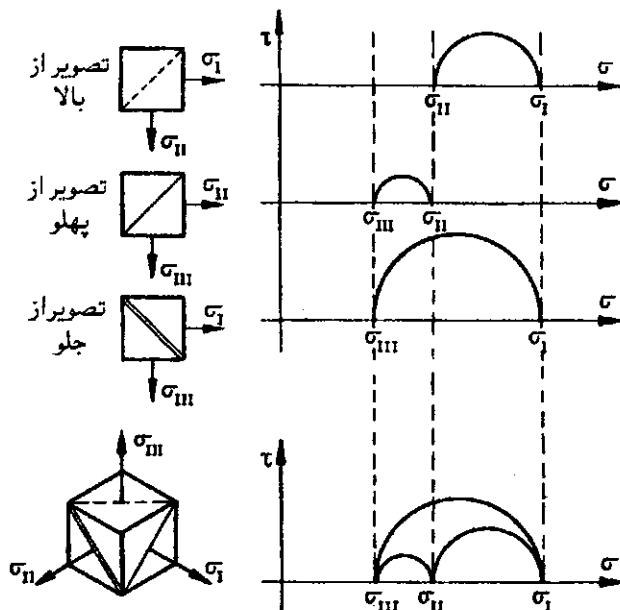


شکل ۷-۲

حداکثر تنش برشی در سطحی اعمال میشود که نسبت به سطوح اصلی به اندازه $\alpha = 45^\circ$ دوران کرده است. بالعکس اگر تنش های σ_I و σ_{II} داده شده باشند، در آن صورت میتوان تنش های موجود در هر سطح مقطع دلخواه دیگر را از روابط زیر بدست آورد.

$$\sigma_{x,y} = \frac{\sigma_I + \sigma_{II}}{2} \pm \frac{\sigma_I - \sigma_{II}}{2} \cos 2\varphi$$

$$\tau = \frac{\sigma_I - \sigma_{II}}{2} \sin 2\varphi$$



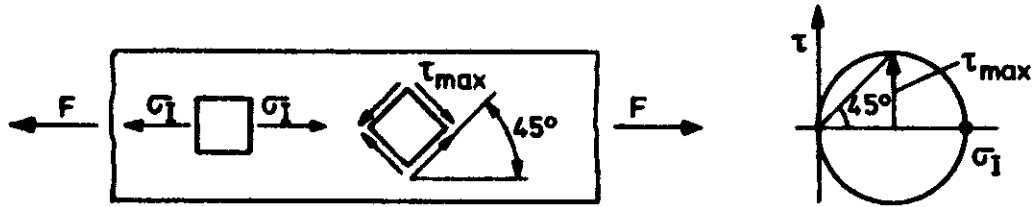
حالت تنش فضایی (سه محوری)

این حالت تنش را میتوان، در صورتیکه تنش های اصلی σ_I ، σ_{II} ، σ_{III} داده شده باشند، از طریق کاربرد سه گانه دواير تنش مور در هر یک از سطوح اصلی به نمایش گذاشت (شکل ۸-۲).

شکل ۸-۲

چند نمونه از حالت های مختلف بار

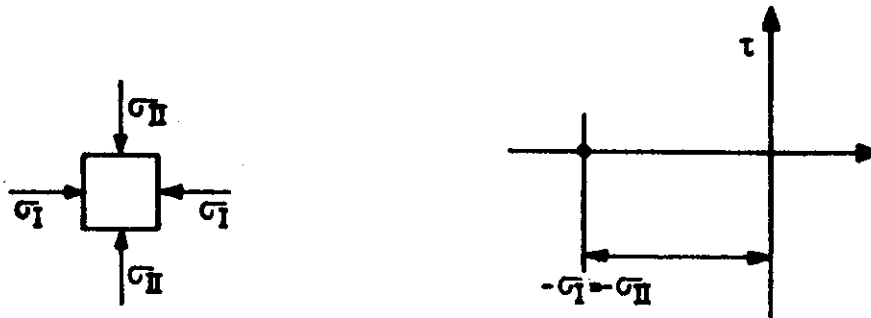
(الف) کشش (یک محوری)



شکل ۹-۲

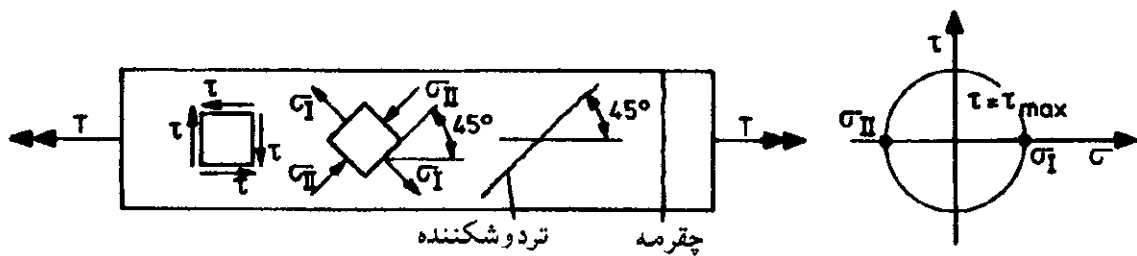
(ب) فشار دو محوری هیدرواستاتیکی

در صورتیکه $-\sigma_I = -\sigma_{II}$ باشد، دایره مور به صورت یک نقطه در می آید (شکل ۱۰-۲). در تمام سطوح مقاطع تنش های نرمال برابر $\sigma_x = \sigma_y = -\sigma_I = \sigma_\varphi$ بوده و تنش های برشی صفر میباشند ($\tau = 0$).



شکل ۱۰-۲

(ج) تنش برشی خالص : مثلاً در سطح خارجی یک شافت تحت پیچش

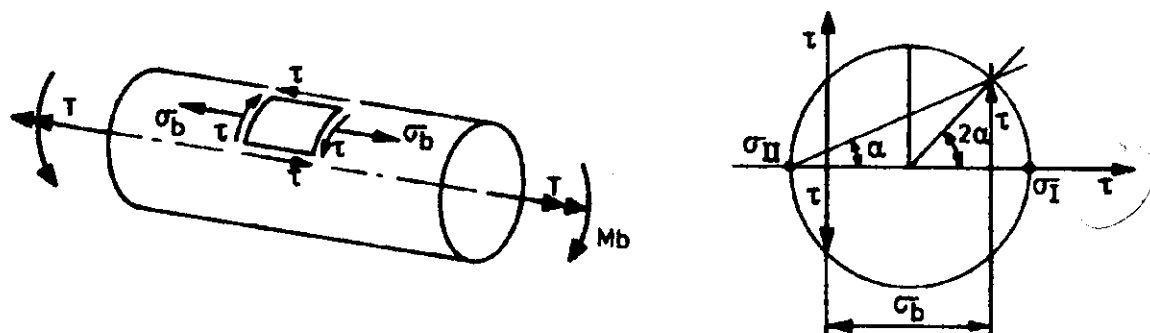


شکل ۱۱-۲

همانطوریکه برای این حالت در شکل ۱۱-۲ مشاهده میشود، در بارگذاری یکباره پدیده شکست در اجسام ترد و شکننده تحت زاویه 45° (شکست جدایشی یا ترد) و در اجسام نرم و چقرمه تحت زاویه 90° (شکست لغزشی یا برشی) رخ می دهد.

$$\sigma_{I,II} = \pm \tau = \pm \tau_{max}$$

(د) بار دو محوری: مثلاً در سطح خارجی شافتی که تحت پیچش و خمش قرار دارد



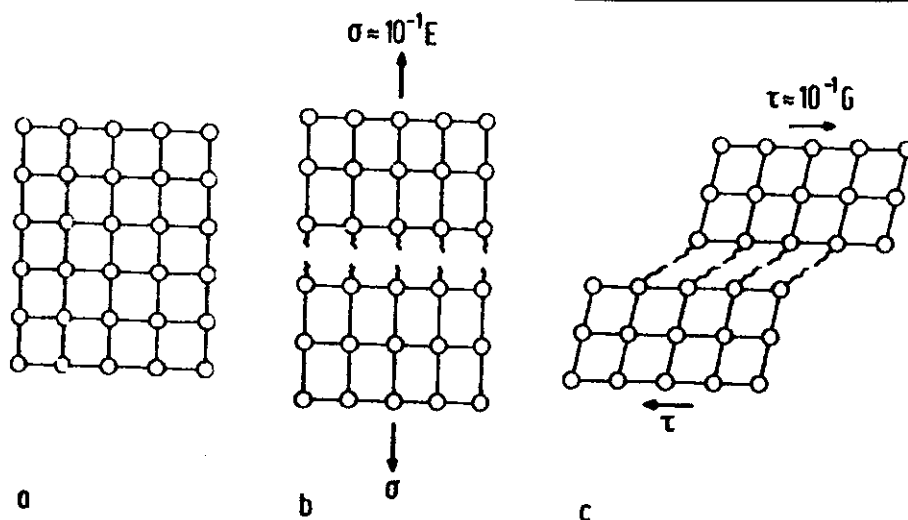
شکل ۲-۱۲

در این حالت تنش های اصلی و حداکثر تنش برشی از روابط زیر بدست می آیند.

$$\sigma_{I,II} = \frac{\sigma_b}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_b}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad \text{و} \quad \tau_{\max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_b}{2}\right)^2 + \tau^2}$$

۳-۲ پدیده شکست

شکست جدایشی و شکست لغزشی



شکل ۲-۱۳

پدیده شکست عبارت است از گسستن پیوندهای اتمی و ایجاد سطح خارجی جدید بنام سطح شکست یا سطح ترک. پدیده شکست از دو طریق امکانپذیر است، که شکل (۲-۱۳) آنرا بطور شماتیک نشان می دهد. طبق شکل (۲-۱۳) پیوندهای فلزی در جهت تنش های کششی، یا به عبارت دیگر عمود بر سطح شکست، در صورتی گسیخته میشوند که این تنش ها به مقدار استحکام جدایشی برسند. این نوع شکست شکننده را که با تغییر شکل های پلاستیکی ناچیزی همراه میباشد، شکست جدایشی می گویند. برعکس اگر مطابق شکل (۲-۱۳) پیوندهای فلزی در اثر جابجایی (برش) حاصل از

تنش های برشی که مقدارشان به استحکام لغزشی برسد گسسته شوند ، شکست لغزشی رخ می دهد . در شکست لغزشی پیوندها در سطوحی گسسته میشوند که دارای حداکثر تنش های برشی هستند . شکست لغزشی (شکست برشی یا داکتیل) با مقداری تغییر شکل های پلاستیکی همراه میباشد . این نوع شکست می تواند ، در صورتیکه سطح مقطع باقیمانده توان تحمل تنش های کششی را نداشته باشد ، به شکست جدایشی تبدیل شود . شکست جدایشی اغلب بصورت بین کریستالی بوده و سطح شکست دانه دانه ای است .

شکست مواد همچنین تابعی است از سرعت تغییر شکل . یک جسم نرم و چقرمه میتواند ، در صورتیکه سرعت تغییر شکل از حد بحرانی اش بیشتر شود (مثلاً بار ضربه ای) ، رفتاری همانند یک جسم ترد و شکننده داشته باشد .

شرایط وقوع شکست جدایشی و لغزشی نتیجه ای است از وابستگی استحکام جدایشی و لغزشی به سرعت بارگذاری و همچنین درجه حرارت . به علاوه نقش حالت تنش در این شرایط به همان اندازه بیشتر میشود که از حالت تنش یک محوری فاصله گرفته و به حالت تنش کششی هیدرواستاتیکی ، یعنی حالتی که در آن $\tau = 0$ است نزدیک شویم .

حالت تنش هیدرواستاتیکی مانع لغزش شده ، طوریکه در یک حالت تنش چند محوری امکان شکست ترد (جدایشی) پیش می آید ، حتی اگر ماده در بارگذاری یک محوری رفتاری همانند اجسام نرم و چقرمه از خود نشان دهد .

شکست دینامیکی (شکست خستگی)

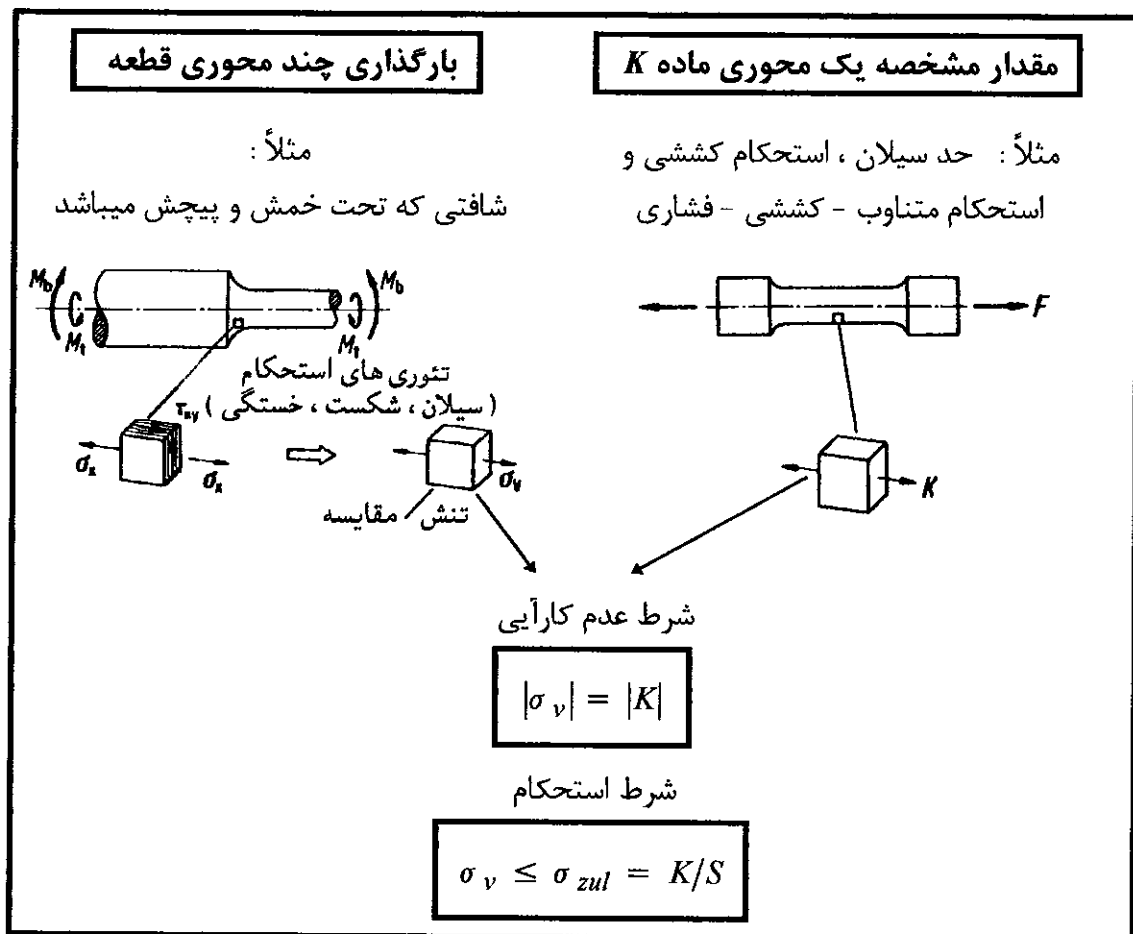
شکست دینامیکی یا شکست خستگی که در اثر بارگذاری دینامیکی رخ میدهد ، ابتدا از طریق تغییر شکل های متناوب پلاستیکی و همچنین سفت و نرم شدن نقطه ای ایجاد میشود . این پدیده بسته به مقدار بارها در تعداد نوسان باری در حدود 10^2 الی 10^3 رخ میدهد و باعث اولین ترک های مویی میشود که با افزایش تعداد نوسانات زیاد میشوند . به این ترتیب در سطح خارجی زبری سطح ایجاد میشود ، زیرا که در تغییر جهت بار جابجایی های انجام شده نه فقط به همان اندازه بازگشت داده نمی شوند ، بلکه سطح لغزش دیگری نیز جابجا میشود . این زبری سطوح ایجاد شده عملکردی همانند فاق ها داشته و میتوانند نقطه شروعی برای ترک های مویی بعدی باشند . رفته رفته پدیده هایی که در ایجاد خستگی نقش مهمی ایفا می کنند بر نوک ترک ها اثر می کنند . از طریق تأثیر شدید فاق حاصل از نوک ترک در هر سیکل بار این نوک رشدی در جهت عمود بر تنش کششی اعمال شده خواهد داشت . با رشد ترک ضریب تمرکز تنش نیز افزایش می یابد ، طوریکه سرانجام به رشد ناگهانی ترک و سپس به شکست قهری سطح مقطع منجر میشود .

۲-۴ تئوری های استحکام و تنش های مقایسه

اگر جسمی تحت حالت تنش چند محوری قرار گیرد ، ابتدا این سؤال مطرح است که اندازه حداکثر باری که می توان اعمال نمود ، طوریکه تنش ها از مقدار مجاز کمتر باشند ، چگونه بدست می آید .

اجسام بطور کلی در بارهای استاتیکی در اثر تغییر شکل زیاد و غیر مجاز (سیلان و تسلیم ماده) و یا از طریق شکست قهری و در صورت اعمال بارهای دینامیکی بصورت شکست دینامیکی (خستگی) کارایی خود را از دست می دهند. با توجه به اینکه مقادیر مشخصه مواد اغلب در بارگذاری یک محوری (آزمایش کشش، آزمایش خستگی) بدست می آیند، نمی توان با استفاده از آنها استحکام قطعاتی که تحت بار چند محوری قرار گرفته اند را مستقیماً تعیین و یا با مقادیر فوق مقایسه نمود. مقادیر مشخصه استحکام مواد را در صورتی می توان مورد استفاده قرار داد که بتوان از تک تک مؤلفه های حالت تنش اعمال شده اندازه یک تنش یک محوری معادل را طوری تعیین نمود که از نظر استحکام همان اثری را دارد که حالت تنش چند محوری موجود ایجاد می کند.

بنابراین چون برای حالت های تنش چند محوری مقادیر مشخصه مواد عموماً موجود نیستند، لازم است که از یک تنش مقایسه (معادل) یک محوری استفاده نمود. برای این منظور یک سری از تئوری های استحکام ارائه شده است که از طریق آنها می توان برای حالت تنش چند محوری یک تنش نرمال یک محوری بنام تنش مقایسه σ_v را طوری تعیین نمود که با مقادیر مربوط به استحکام مواد که در بارگذاری یک محوری بدست آمده اند قابل مقایسه باشد. شکل ۲-۱۴ شمای اصلی تعیین استحکام قطعات را نشان می دهد.



مهمترین انواع شکست و عدم کارایی در بارگذاری های مکانیکی عبارتند از :

مقدار مشخصه ماده	عدم کارایی
$R_e, R_{p0.2}$	حد تسلیم (سیلان) ، حد انبساط
R_m	شکست جدایشی
σ_D	شکست دینامیکی (دائم)

همینکه اندازه تنش مقایسه به حد استحکام ماده (K) برسد ، یعنی شرط $|\sigma_v| = |K|$ برقرار گردد ، میتوان روی عدم کارایی قطعه حساب کرد . به تساوی بالا شرط عدم کارایی نیز گفته میشود . در مقابل با شرط استحکام ($\sigma_v \leq \sigma_{zul} = K/S$) می توان با استفاده از یک ضریب اطمینان $S \geq 1$ مطمئن شد که حداکثر بارهای اعمال شده دارای یک فاصله معینی از تنش های مجاز (σ_{zul}) میباشد .

اکنون به شرح مهمترین تئوری های استحکام می پردازیم که علت عدم کارایی قطعه در نتیجه رفتار متفاوت ماده را در نظر می گیرند . این تئوری ها عبارتند از : تئوری حداکثر تنش نرمال ، تئوری حداکثر تنش برشی ، تئوری انرژی تغییر شکل و بالاخره تعمیم تئوری حداکثر تنش برشی .

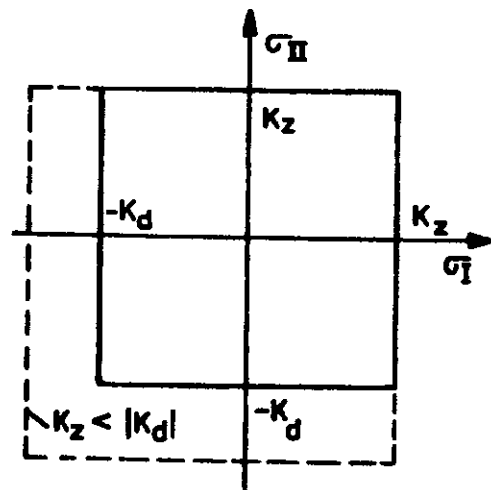
تئوری حداکثر تنش نرمال لامه (Lam'e) :

این تئوری برای مواردی مصداق دارد که در نتیجه اعمال بارهای غیر مجاز شکست جدایشی عمود بر تنش کششی اصلی ایجاد میشود ، یعنی برای مواد ترد و شکننده مانند چدن خاکستری ، فولاد های سخت شده ، گره جوش و یا همچنین موقعی که حالت تنش اعمال شده امکان تغییر شکل ماده را محدود کرده است (مثلاً کشش سه محوری در فاق ها و یا در بارگذاری ضربه ای) .

در اینجا شکست موقعی اتفاق می افتد که بزرگترین تنش اصلی یعنی مثلاً σ_I به اندازه حد استحکام K (مثلاً استحکام در برابر شکست R_m) شود .

$$\sigma_v = \sigma_I \leq K$$

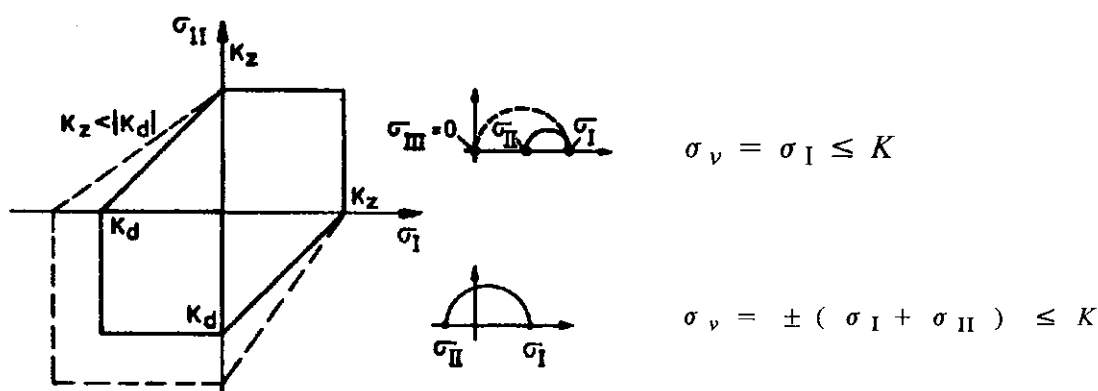
معمولاً ناحیه ای از اجزاء ماشین که بزرگترین بارها در آنجا اثر می کنند ، پوکی سطح خارجی آنها که فاقد بار میباشد قرار دارد ، طوریکه فقط بایستی حالت های تنش یک و یا دو محوری را مورد بررسی قرار داد . در مورد حالت تنش دو محوری ناحیه مطمئن به وسیله مربعی به طول $2K$ محدود میشود (شکل ۲-۱۵) ، یعنی موقعیکه حد استحکام کششی K_z و یا فشاری K_d یک اندازه باشند (برای $K_z \neq K_d$ مربع خط چین) .



شکل ۲-۱۵

$$\sigma_v = \sigma_I - \sigma_{II} = 2\tau_{\max} \leq K$$

اگر مثلاً σ_I و σ_{II} دارای علامت یکسان بوده و $\sigma_{III} = 0$ باشد، در آنصورت خطر شکست، همانطور که در شکل ۲-۱۶ هم مشاهده میشود، در سطحی قرار دارد که بوسیله $\sigma_{III} = 0$ و همچنین از نظر جبری بزرگترین تنش اصلی، مثلاً σ_I ، تعیین میشود.



شكل ٢-١٦

$$\sigma_v = \pm (\sigma_I + \sigma_{II}) \leq K$$

تئوری انرژي تغيرشکل فون ميز (von Mises) :

طبق این تئوری تنش مقایسه σ_v عبارت است از یک تنش نرمال یک محوری که کار تغییرشکل ویژه حاصل از آن در نتیجه لغزش‌هایی که در ابتدای تسلیم یا سیلان ماده رخ میدهند به همان اندازه‌ای است که حالت تنش چند محوری موردنظر ایجاد می‌کند.

این تئوری برای مواد نرمی بکار می رود که قابل تغییر شکل هستند و تغییر شکل های پلاستیکی در بارگذاری استاتیکی منجر به شکست لغزشی و در بارگذاری دینامیکی منجر به شکست خستگی (دائم) میشوند. در عمل از این تئوری برای مواد نرم در بارگذاری دینامیکی نتایج بمراتب بهتری نسبت به تئوری حداکثر تنش برشی بدست می آید.

بر اساس این تئوری تنش مقایسه برای حالت تنش فضایی برابر است با :

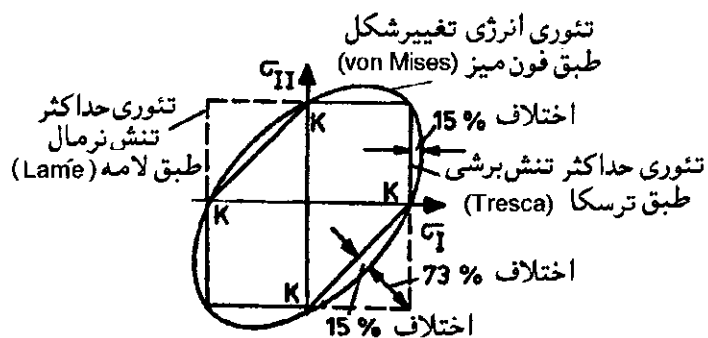
$$\sigma_v = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_I - \sigma_{II})^2 + (\sigma_{II} - \sigma_{III})^2 + (\sigma_{III} - \sigma_I)^2}$$

و برای حالت تنش سطحی ($\sigma_{III} = 0$) میتوان نوشت :

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_I^2 - \sigma_I \cdot \sigma_{II} + \sigma_{II}^2}$$

ناحیه مطمئن در تئوری انرژی تغییر شکل برای وقتی که $K_z = K_d = K$ باشد در بارگذاری دو محوری عبارت است از یک بیضی که به اندازه زاویه 45° دوران داده شده است (شکل ۱۷-۲). محورهای بزرگ و کوچک این بیضی به ترتیب برابرند با $2K\sqrt{2}$ و $2K\sqrt{2/3}$.

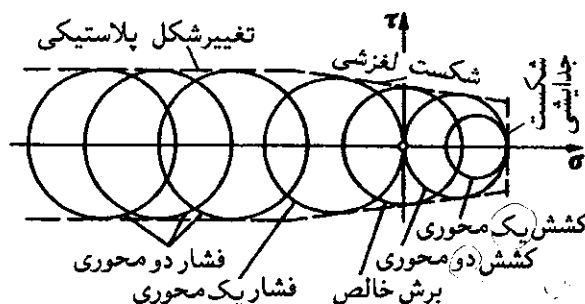
مقایسه سه تئوری فوق نشان میدهد که ناحیه مربوط به تئوری حداکثر تنش برشی نسبت به ناحیه مربوط به تئوری انرژی تغییر شکل به اندازه حداکثر ۱۵٪ کوچکتر است و بدین ترتیب مطمئن تر از آن میباشد.



شکل ۱۷-۲

تعمیم تئوری حداکثر تنش برشی :

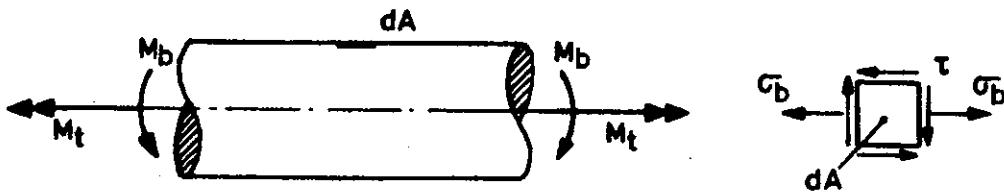
اساس این تئوری طبق مور (Mohr) بر پایه اندازه گیری حالت های مختلف مرزی تنش بوده و پوش دوایر تنش مور مربوطه منحنی استحکام مرزی ($\tau = f(\sigma)$) را نشان میدهد. با توجه به اینکه مقادیر مشخصه مواد به اندازه کافی موجود نیست (بویژه برای حالت های تنش فضایی)، طبق زیبل (Siebel) به جای پوش دوایر تنش از سه خط استفاده میشود (شکل ۱۸-۲).



شکل ۱۸-۲

مثال : کاربرد تئوری های استحکام

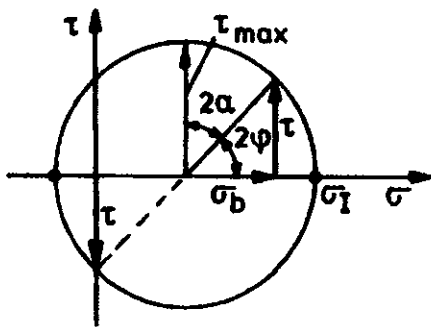
داده ها : میله ای مطابق شکل ۱۹-۲ تحت بارگذاری خمشی و پیچشی قرار دارد .



شکل ۱۹-۲

خواسته ها : مطلوب است تنش مقایسه با استفاده از تئوری های استحکام

حل : برای بارگذاری فوق میتوان حالت تنش را برای محلی که بزرگترین بارها، یعنی روی سطح میله اعمال میشوند، مطابق شکل ۲۰-۲ با استفاده از دایره تنش مور به صورت زیر تعیین نمود .



$$\sigma_{I,II} = \frac{\sigma_b}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_b}{2}\right)^2 + \tau^2}$$

$$\tau_{\max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_b}{2}\right)^2 + \tau^2}$$

شکل ۲۰-۲

بنابراین در صورت کاربرد تئوری های استحکام تنش های مقایسه زیر بدست می آیند .

تنش مقایسه σ_v	تئوری استحکام	نوع بار
$\sigma_v = \sigma_I = \frac{\sigma_b}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_b}{2}\right)^2 + \tau^2}$	حداکثر تنش نرمال لame	خمش
$\sigma_v = \sqrt{\sigma_b^2 + 4\tau^2}$	حداکثر تنش برشی ترسکا	و
$\sigma_v = \sqrt{\sigma_b^2 + 3\tau^2}$	انرژی تغییر شکل فون میز	پیچش

۵-۲ استحکام مواد

برای بدست آوردن استحکام ماده نمونه ای از آن را تا حد نهایی تحمل تحت تنش قرار می دهند . در نتیجه نمونه بسته به نوع و شرایط بارگذاری یا شکسته میشود ویا در آن تغییرشکل های پایدار ایجاد می گردد . استحکام مواد به عوامل زیر بستگی دارد :

- حالت تنش (یک محوری ، چند محوری)
- نوع بارگذاری (کششی ، خمشی ، پیچشی)
- درجه حرارت
- تغییرات بارگذاری نسبت به زمان

۱-۵-۲ تأثیر حالت تنش بر روی استحکام مواد

همانطور که در بخش های گذشته متذکر شدیم حالت تنش نقش تعیین کننده ای در استحکام ماده دارد و هر چه از حالت تنش یک محوری فاصله گرفته و به حالت تنش چند محوری نزدیک شویم ، رفتار مکانیکی ماده تغییر نموده و تأثیر آن شدیدتر می گردد . با استفاده از تئوری های استحکام میتوان بسته به نوع ماده یک تنش مقایسه را طوری تعیین نمود که با مقادیر استحکام بدست آمده برای حالت تنش یک محوری قابل مقایسه باشد .

۲-۵-۲ تأثیر نوع بارگذاری بر روی استحکام مواد

استحکام های دائم از نوع برشی کمتر از نوع کششی آن و استحکام دائم خمشی از هر دوی آن ها کمتر میباشد . بر خلاف بارگذاری کششی ، در بارگذاری خمشی مناطقی وجود دارد که در آنجا تنش های ضعیفتری اثر می کنند . این نواحی که دارای تنش های ضعیفتری میباشند ، نواحی دیگر را که تحت تأثیر تنش های قوی تری هستند پشتیبانی نموده و توان تحمل (استحکام) ماده را در بارگذاری خمشی افزایش می دهند . هر چه این نواحی به هم نزدیکتر باشند ، به همان نسبت هم اثر حمایتی بیشتر می گردد . بنابراین ضریب حمایتی χ در بارگذاری خمشی با حداکثر گرادیان تنش (تغییرات مکانی تنش در سطح مقطع نمونه) متناسب میباشد ، یعنی :

$$\chi = \frac{(d\sigma/dx)_{\max}}{\sigma_{\max}}$$

ولی این تأثیر با افزایش قطر نمونه ها کاهش می یابد ، طوریکه از قطرهای حدود ۲۰۰ الی ۴۰۰ میلیمتر اثر حمایتی در خمش ناپدید میشود .

۳-۵-۲ تأثیر درجه حرارت بر روی استحکام مواد

افزایش درجه حرارت کاهش استحکام ماده در بارگذاری استاتیکی و افزایش کرنش را به دنبال دارد. فولادهای کربنی با درصد کربن کم در درجه حرارت های حدود 250°C از این قاعده مستثنی میباشند. در این درجه حرارت استحکام کششی به بیشترین و کرنش به کمترین مقدار خود می رسد. برای اطلاعات بیشتر در این زمینه رجوع شود به منابع مربوطه.

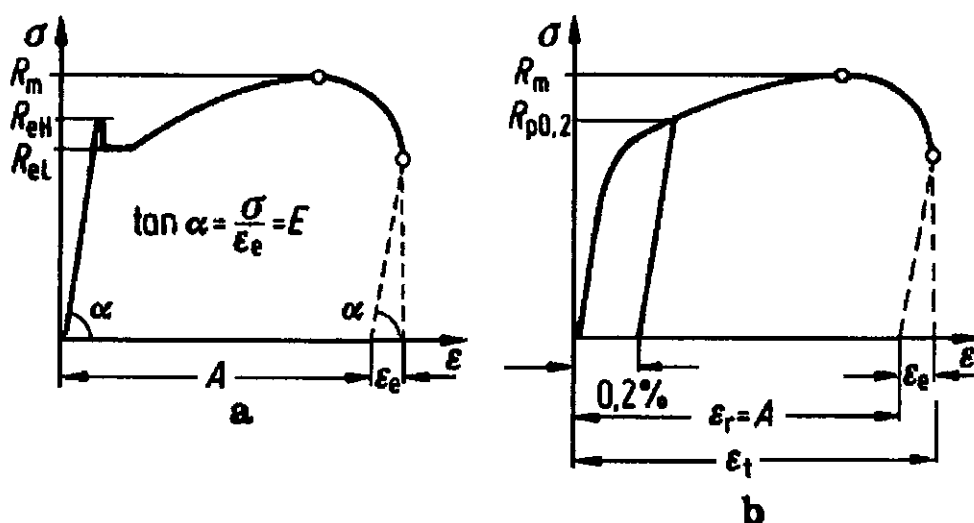
۴-۵-۲ تأثیر تغییرات بارگذاری نسبت به زمان بر روی استحکام مواد

نوع تغییرات بارگذاری نسبت به زمان را میتوان بطور کلی به سه دسته تفکیک نمود:

۱) بارگذاری استاتیکی

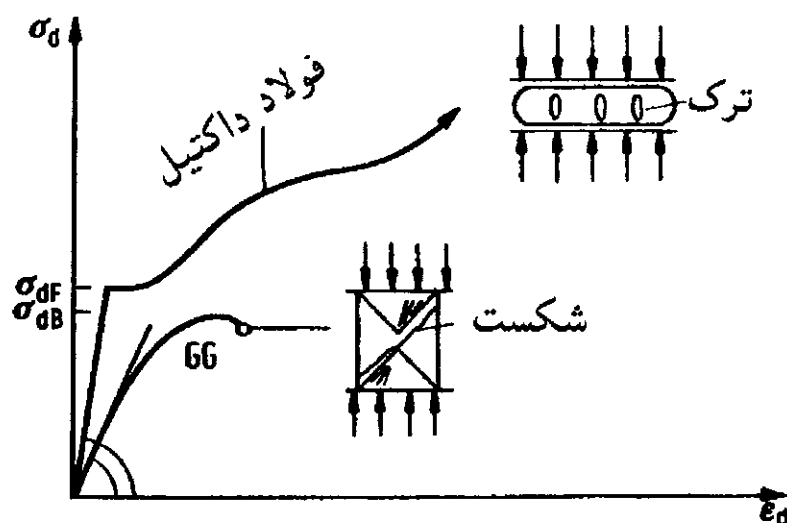
الف) بارگذاری استاتیکی یکباره (کشش، خمش، پیچش و غیره) مانند آزمایش کشش:

در آزمایش کشش خواص مکانیکی ماده برای تنش های کششی یکنواخت و یک محوری بدست می آیند. اجرای آزمایش و همچنین نحوه نامگذاری مقادیر استحکام استاندارد شده است. رابطه بین تنش σ و کرنش ϵ در آزمایش کشش، رفتار مکانیکی ماده را مشخص می کند. منحنی بدست آمده برای مواد نرم و داکتیل دارای حد تسلیم مشخص (R_e) میباشد که منحنی مواد ترد و شکننده فاقد آن هستند (شکل ۲-۲۱). از این جهت به عنوان حد تسلیم برای مواد ترد و شکننده $0,2\%$ حد انبساط $R_{p0,2}$ تعریف شده است که عبارت از تنشی که در اثر آن $0,2\%$ کرنشهای پلاستیکی به صورت پایدار باقی می ماند.



شکل ۲-۲۱

برای آزمایش فشار در نمودار تنش - کرنش نیز مشابه آزمایش کشش یک منحنی بدست می آید که آن را در شکل ۲-۲۲ بطور شماتیک برای فولاد داکتیل و چدن خاکستری مشاهده می کنید .



شکل ۲-۲۲

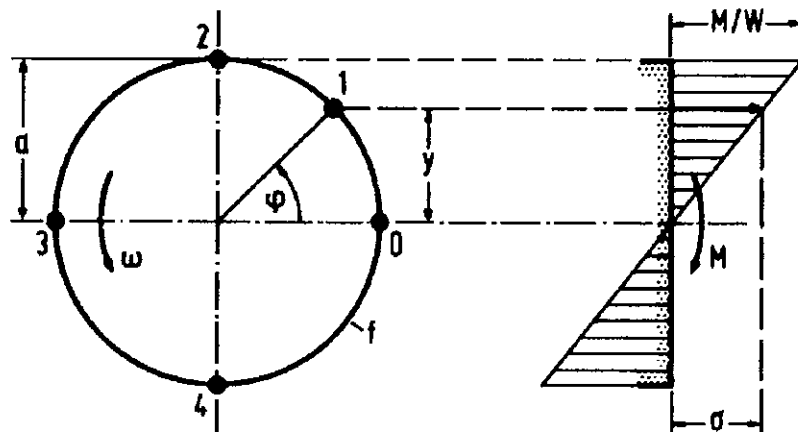
(ب) بارگذاری استاتیکی آرام

این نوع بارگذاری را میتوان حالت خاص مرزی بارگذاری استاتیکی یکباره در نظر گرفت . در این حالت یک افزایش تغییر شکل پیوسته و آرام که منجر به شکست نمونه شود ، به ویژه در درجه حرارت های بالا امکانپذیر است (آزمایش خزش) .

۲ بارگذاری دینامیکی متناوب (periodic)

بسیاری از قطعات و اجزائیکه طراحی میشوند ، تحت تأثیر بارهایی قرار می گیرند که تغییرات آنها نسبت به زمان متناوب می باشد . برای نمونه میتوان از یک شافت دوار ، تعداد بسیاری از اجزاء ماشین ، پل ها و غیره نام برد . این قطعات در نتیجه این نوع بارگذاری بر اثر مقدار تنشی شکسته میشوند که خیلی کمتر از استحکام کششی آن است ، طوریکه مثلاً استحکام دائم یک میل لنگ میتواند کمتر از $0.2R_m$ باشد . به این پدیده خستگی ماده (fatigue , RANKINE , 1843) گفته میشود و مقاومت ماده در برابر این پدیده با استحکام در برابر خستگی بیان می گردد .

با توجه به اهمیت خستگی ماده در صنعت ، پایین بودن استحکام در برابر خستگی و خطر رخ دادن ترک های دینامیکی ناخواسته در قطعات صنعتی ، مطالعه این پدیده اهمیت ویژه ای در علم مواد ، آزمایش آن و علم مقاومت مصالح دارد . جهت ارائه تنش های مجاز بایستی استحکام دینامیکی را در رابطه با عوامل بسیاری مانند ابعاد قطعه ، تعداد نوسانات بار و درجه حرارت تعیین نمود .



شکل ۲-۲۳

یک مثال ساده برای قطعه ای که تحت بارگذاری دینامیکی متناوب قرار می گیرد، شافتی است که با سرعت زاویه ای ω می چرخد و در عین حال به وسیله یک گشتاور خمشی $M_b = M$ بارگذاری میشود. همانطور که در شکل ۲-۲۳ مشاهده میشود، یک لایه خارجی f در یک دور چرخش از نقاط $0, 4, 3, 2, 0$ گذشته و در این نقاط به ترتیب تحت اثر تنش های خمشی $0, +\frac{M}{W}, 0, -\frac{M}{W}, 0$ قرار می گیرد. در اینجا $W = W_{ax}$ عبارت است از مدول مقطع محوری شافت.

بنابراین تنش خمشی مابین دو مقدار حداکثر $+\frac{M}{W}$ و حداقل $-\frac{M}{W}$ نوسان می کند. تنش خمشی در هر نقطه دلخواه I که به وسیله زاویه چرخش $\varphi = \omega t$ داده شده است را میتوان به صورت زیر نوشت:

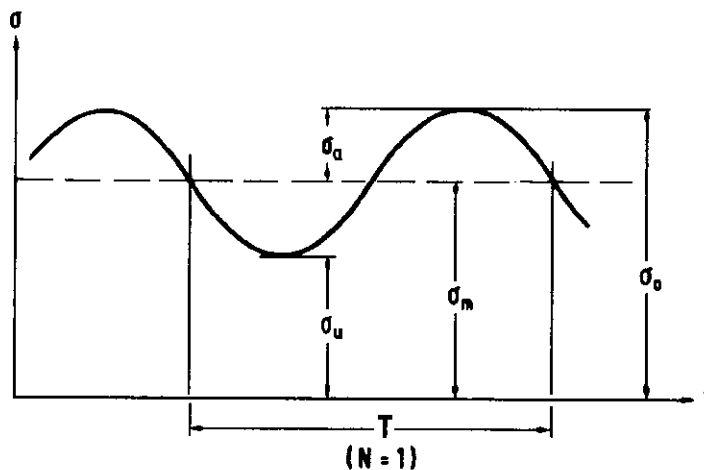
$$\sigma(t) = \frac{M}{W} \sin \omega t$$

اگر گشتاور M نسبت به زمان ثابت باشد، در آن صورت در این شافت تنشی ایجاد میشود که تابعی است سینوسی نسبت به زمان. در صورتیکه به این تنش، یعنی $\sigma_a = \frac{M}{W}$ ، یک مؤلفه استاتیکی $\sigma_m = \text{const.}$ را نیز اضافه کنیم، تابع تنش در حالت کلی بدست می آید:

$$\sigma(t) = \sigma_m + \sigma_a \sin \omega t$$

این معادله ساده ترین حالت تنش یک محوری را در بارگذاری دینامیکی بیان می دارد. حتی یک بار ضربه ای در ماده نیز باعث ایجاد نوساناتی میشود که حالت خاص و پیچیده ای است از بارگذاری دینامیکی.

از شکل ۲-۲۴ میتوان مفاهیمی را که مشخص کننده یک بارگذاری متناوب می باشند استنتاج نمود. بزرگترین تنش از نظر مقدار، تنش بالایی σ_o و کمترین آن از نظر مقدار، تنش پایینی σ_u نامیده میشوند. تنش میانگین که از جذر حسابی سالیس σ_o و σ_u بدست می آید برابر است با:



شکل ۲-۲۴

$$\sigma_m = \frac{\sigma_o + \sigma_u}{2}$$

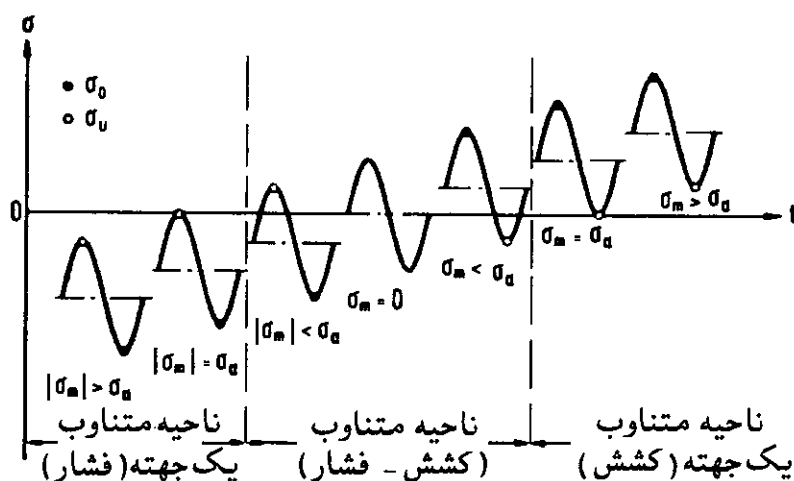
دامنه تنش که مقداری است مثبت عبارت است از:

$$\sigma_a = \frac{|\sigma_o - \sigma_u|}{2}$$

و برای عرض نوسان نتیجه میشود:

$$\Delta\sigma = 2\sigma_a = |\sigma_o - \sigma_u|$$

تجربه نشان داده است که استحکام دینامیکی برای فرکانس هایی که از یک مقدار معینی کمتر هستند ~~($N < 7$)~~ بستگی به مدت زمان اعمال بار نداشته و فقط تابعی است از تعداد نوسانات بار N . در صورت ثابت بودن سایر شرایط (محیط، درجه حرارت، فرکانس) تنش بالایی σ_o که بعد از N نوسان بار باعث شکست میشود، تابعی است از تعداد نوسانات N ، σ_m و همچنین نوع بارگذاری مانند: کشش، فشار، خمش و یا پیچش.

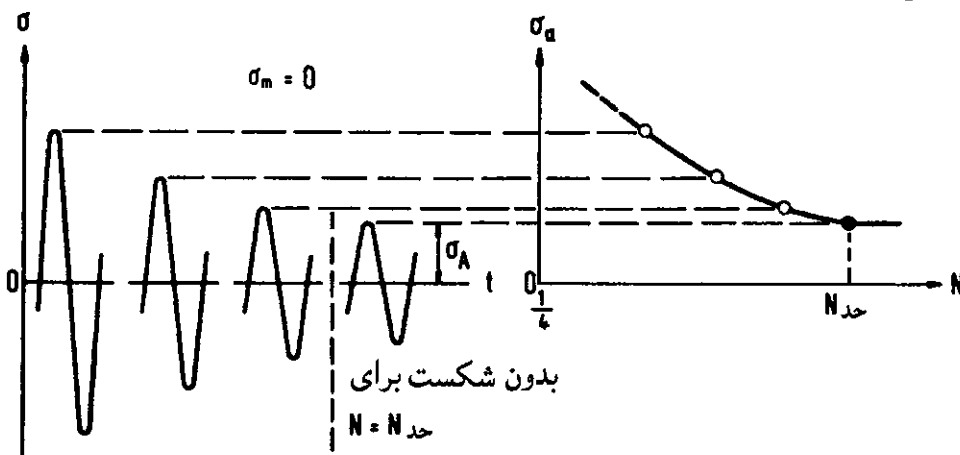


شکل ۲-۲۵

با توجه به اندازه و علامت σ_m مشاهده میشود که در اینجا سه ناحیه مختلف بارگذاری با استحکام های دینامیکی مربوطه وجود دارد. این نواحی در شکل ۲-۲۵ مشخص شده اند.

به ناحیه ای که در آن $\sigma_m \geq \sigma_a$ و $\sigma_u \geq 0$ برقرار باشند، ناحیه متناوب یک جهته کششی و بویژه برای وقتی که $\sigma_m = \sigma_a$ و $\sigma_u = 0$ باشند به آن ناحیه متناوب یک جهته کششی خالص گفته میشود. استحکام دینامیکی در این ناحیه عبارت است از استحکام متناوب یک جهته کششی σ_{zSch} . ناحیه ای که در آن $|\sigma_m| \leq \sigma_a$ است، ناحیه متناوب کششی - فشاری و در حالت خاص، یعنی موقعی که $\sigma_m = 0$ باشد، ناحیه متناوب کششی - فشاری خالص و یا به عبارت ساده تر ناحیه متناوب خالص نامیده میشود. استحکام دینامیکی مربوطه عبارت است از استحکام متناوب (کششی - فشاری) σ_W (σ_{zdw}). ناحیه متناوب یک جهته فشاری بوسیله روابط $|\sigma_m| \geq \sigma_a$ و $\sigma_u \leq 0$ مشخص شده و بارگذاری متناوب یک جهته فشاری خالص نیز مطابق است با $\sigma_m = -\sigma_a$ و $\sigma_u = 0$. استحکام دینامیکی این ناحیه، استحکام متناوب یک جهته فشاری σ_{dSch} می باشد. اگر نمونه بجای بارگذاری کششی تحت خمش و یا پیچش قرار گیرد، استحکام های مربوطه عبارتند از σ_{bSch} ، σ_{bW} و یا همچنین τ_{tSch} ، τ_{tW} .

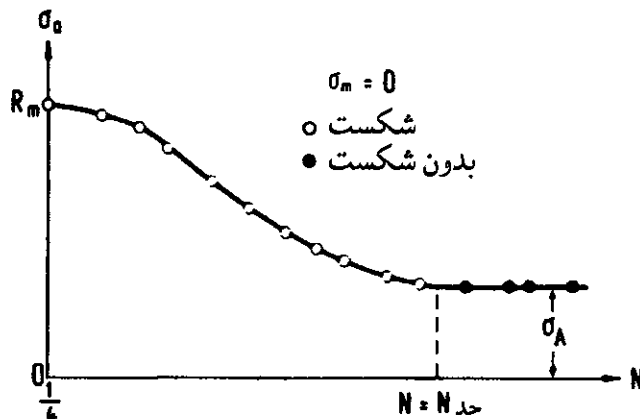
مقادیر استحکام دینامیکی را میتوان از طریق رسم نمودار ولر (August Wöhler, 1858) تعیین نمود. برای این منظور نمونه ها در $\sigma_m = 0$ و دامنه تنش های متفاوت σ_a آنقدر تحت بارگذاری متناوب قرار می گیرند تا به شکست نمونه منجر شود. سپس نتایج این آزمایشات به صورت تغییرات دامنه تنش σ_a بر حسب تعداد نوساناتی که منجر به شکست نمونه شده اند به عنوان منحنی ولر رسم می گردند. شکل ۲-۲۶ طریق بدست آوردن و رسم یک منحنی ولر را بطور شماتیک نشان میدهد.



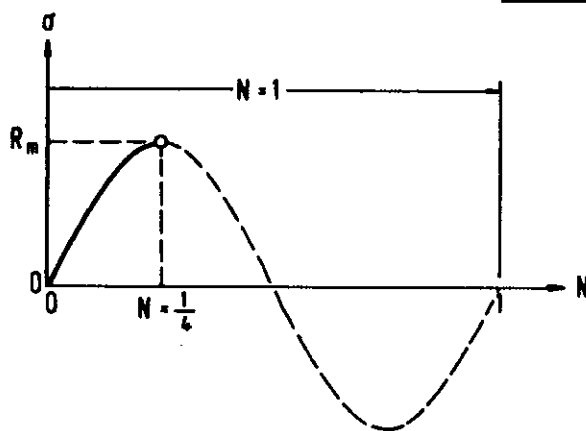
شکل ۲-۲۶

شکل ۲-۲۷ نیز بطور شماتیک یک منحنی ولر را برای فولاد غیر آستنیتی به نمایش گذاشته است. در تعداد نوسانی بیشتر از تعداد نوسان حدی ($N_{حد}$) و یک دامنه تنش $\sigma_a = \sigma_A$ ($N_{حد}$) مقدار دامنه تنش دیگر کاهش نمی یابد. تعداد نوسان $N_{حد}$ ، که برای فولادها حدود 10^7 نوسان میباشد،

نمودار ولر را به دو ناحیه، یکی استحکام زمانی برای $N \leq N_{\text{حد}}$ که در آن ناحیه نقاط شکست بر روی منحنی مشخص شده اند و دیگری ناحیه استحکام دائم برای $N \geq N_{\text{حد}}$ است که در آن ناحیه دامنه تنش σ_A حداقل در همسایگی $N_{\text{حد}}$ تعداد نوسان N را با موفقیت تحمل کرده و نمونه شکسته نمی شود. این تنش حدی σ_A و یا تنش بالایی مربوطه یعنی $\sigma_o = \sigma_m + \sigma_A$ استحکام دائم نامیده میشوند.



شکل ۲۷-۲

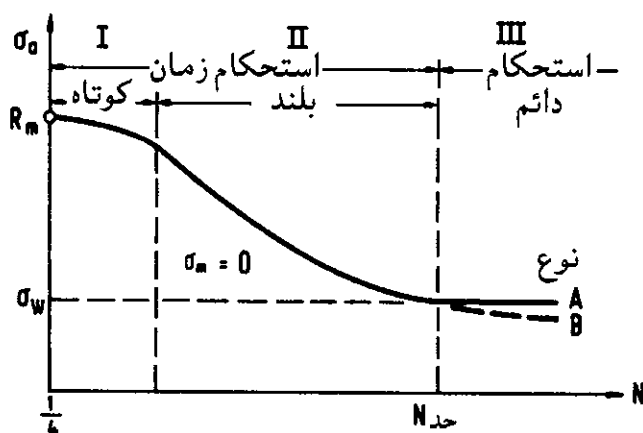


شکل ۲۸-۲

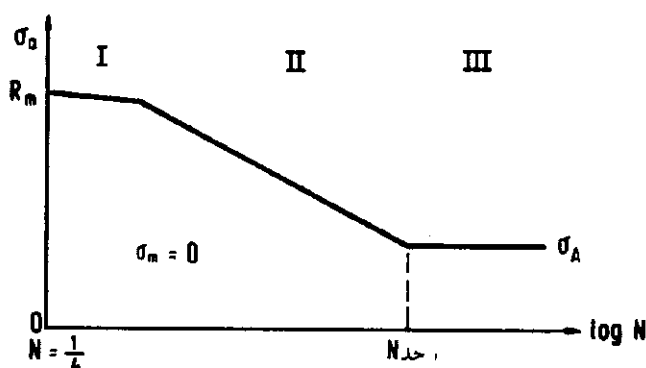
در بارگذاری متناوب خالص ($\sigma_m = 0$) حداکثر دامنه تنش σ_a مطابق است با استحکام کششی R_m . تعداد نوسان مربوطه آن که منجر به شکست نمونه می گردد، همانطور که در شکل ۲۸-۲ مشاهده میشود، برابر است با $N = 1/4$. این امر به خاطر آنست که بارگذاری در آزمایش کشش را میتوان در اولین ربع پریود نوسان تنش در نظر گرفت. بنابراین محور افقی نمودار ولر با مقدار $N = 1/4$ شروع میشود.

جهت محدود نمودن زمان آزمایش خستگی لازم است که تعداد نوسانات حدی ($N_{\text{حد}}$)، که بعضاً به جنس ماده بستگی دارد، از پیش تعیین شود. منحنی ولر برای فولادهای نرم از تعداد نوسان 10^6 تا 10^7 به بعد دارای مجانب افقی است (نوع A در شکل ۲۹-۲)، در صورتیکه برای اغلب فلزات سبک مانند آلومینیم، کاهش دامنه تنش همچنان ادامه می یابد (نوع B در شکل ۲۹-۲). به این جهت $N_{\text{حد}}$ برای فولادهای نرم 2×10^6 تا 10^7 و برای مثلاً آلیاژهای آلومینیم 10^8 تعیین شده است.

همانطور که در شکل ۲۹-۲ مشاهده میشود، ناحیه استحکام زمانی شامل دو قسمت است: استحکام زمانی کوتاه و استحکام زمانی بلند. بنابراین ناحیه استحکام دائم همراه با دو ناحیه مذکور، نمودار ولر را به سه ناحیه مجزا تقسیم می کند. اگر محور افقی نمودار ولر به صورت لگاریتمی درجه بندی شود،



شکل ۲۹-۲



شکل ۳۰-۲

این سه ناحیه بطور مشخص تری نمایان می گردند. این موضوع در شکل ۳۰-۲ بطور شماتیک به نمایش گذاشته شده است.

با توجه به اینکه مرز جدایی بین دو ناحیه استحکام زمانی و دائم کاملاً مشخص نیست، در نتیجه مقادیر مربوط به طول عمر بطور کلی برای تعداد نوسانات بیش از 10^6 به عنوان استحکام دائم در نظر گرفته میشوند. از طرفی نتایج آزمایشات یک مرحله ای (نمودار ولر)، آنچنان پراکنده هستند که در نتیجه منحنی ولر به صورت یک نوار (محدوده تفرق) در می آید.

از این جهت برای منحنی های ولر غالباً با توجه به محاسبات آماری مقادیر مربوط به احتمال بقاء و یا احتمال عدم کارایی نیز ذکر می گردند.

بنابراین با توجه به مطالب بالا میتوان گفت که استحکام دائم $(\sigma_D)(\tau_D)$ بطور کلی عبارت است از تنش بالایی، یا به عبارت دیگر حداکثر تنشی که یک میله گرد و پرداخت (پولیش) شده به قطر 10 mm میتواند برای زمانی به اندازه کافی طولانی در بارگذاری دینامیکی تحمل کند، بدون اینکه شکسته شود و یا در آن تغییرشکل های جبران ناپذیری ایجاد گردد. استحکام دائم $(\sigma_D)(\tau_D)$ تابعی است از N و σ_m .

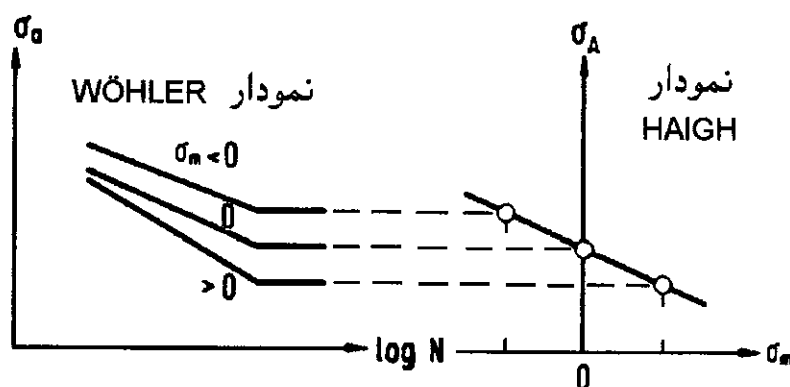
$$\sigma_D = \sigma_m \pm \sigma_A$$

مثلاً مقدار $\sigma_D(10^7) = 100 \pm 160 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ برای یک فولاد عبارت است از استحکام دائم در ناحیه متناوب کششی-فشاری برای $N = N_{\text{حد}} = 10^7$ ، زیرا که تنش بالایی $\sigma_0 = +260 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ یک تنش کششی بوده و $\sigma_u = -60 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ یک تنش فشاری است.

یکی دیگر از مفاهیم مهم استحکام دائم، استحکام دامنه $(\sigma_A)(\tau_A)$ میباشد. استحکام دامنه عبارت است حداکثر دامنه تنشی که یک میله گرد و پرداخت (پولیش) شده به قطر 10 mm میتواند برای زمانی به اندازه کافی طولانی در بارگذاری دینامیکی حول یک تنش میانگین فرضی σ_m تحمل کند، بدون اینکه شکسته شود و یا در آن تغییرشکل های جبران ناپذیری رخ دهد.

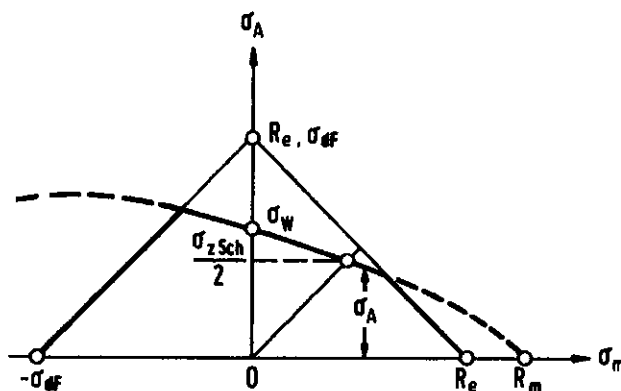
بهمین ترتیب برای استحکام زمانی میتوان نوشت: $\sigma_{D(N)} = \sigma_m \pm \sigma_a$ و یا همچنین $\tau_{D(N)} = \tau_m \pm \tau_a$. تنها استحکام متناوب و استحکام متناوب یک جهته هستند که بصورت σ_{Sch} ، σ_W و یا τ_{Sch} ، τ_W مشخص میشوند. نوع بارگذاری از طریق اندیس های z برای کشش، d برای فشار، b برای خمش و t برای پیچش تعیین می گردند.

هر منحنی ولر برای استحکام خستگی و یا دائم یک ماده مشخص در یک تنش میانگین (σ_m) معین بدست آمده است. بنابراین بایستی برای تعیین مقادیر استحکام دائم به منحنی های ولر مراجعه نمود. حال با توجه به اینکه استفاده از نمودارهای ولر مستلزم وقت و حوصله زیادی است، از یک سری نمودارهای عملی و ساده تری بنام نمودارهای استحکام دائم استفاده می گردد. در این نمودارها تنش های قابل تحمل ماده (و یا مقادیر استحکام دائم) بصورت $\sigma_D = \sigma_D(\sigma_m)$ و یا $\sigma_A = \sigma_A(\sigma_m)$ برای یک طول عمر ثابت N ترسیم شده اند. بطور مثال شکل ۲-۳۱ نمودار استحکام بدست آمده از منحنی های ولر را بنام استحکام دائم هیگ (Haigh 1929) بطور شماتیک نشان میدهد.



شکل ۲-۳۱

در نمودار هیگ دامنه تنش σ_A بر حسب تنش میانگین σ_m ترسیم شده است. به این ترتیب خط مرزی دامنه تنش، که بنام خط گودمان (Goodman 1899) مشهور است، بدست می آید (شکل ۲-۳۲). محل تقاطع خط گودمان با محور عمودی اندازه استحکام دائم σ_W و با محور افقی اندازه استحکام کششی R_m میباشد.

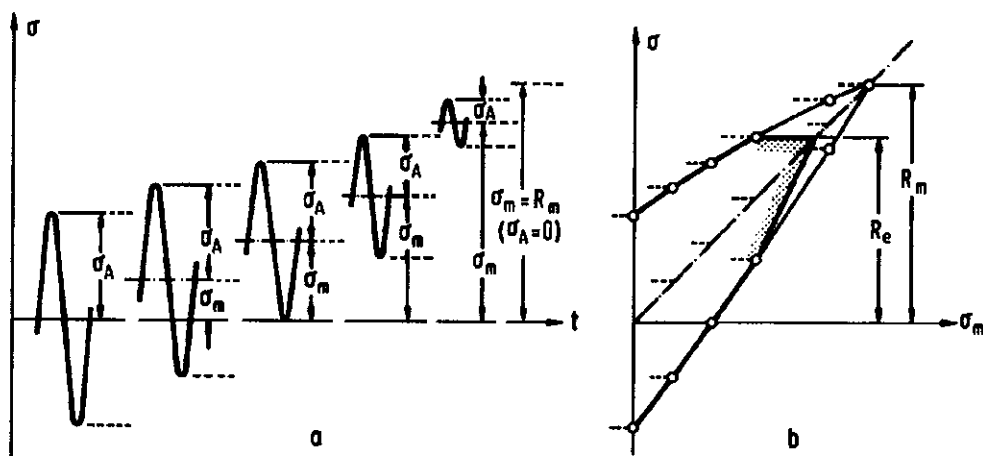


شکل ۲-۳۲

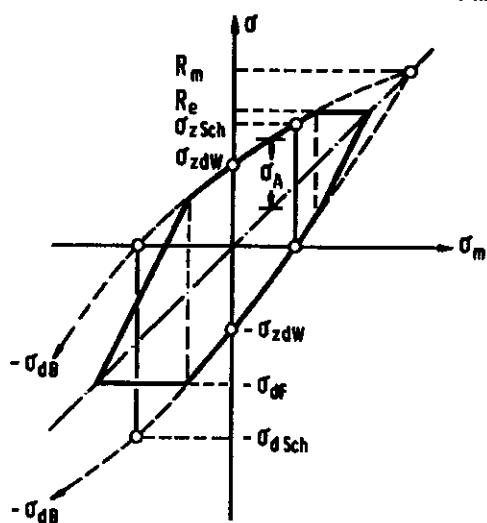
از طرفی حداکثر دامنه تنش به حد تسلیم و یا حد انبساط محدود است و این محدودیت به وسیله خطی بیان می گردد که از دو نقطه در روی محورهای افقی و عمودی که فاصله آنها از مبدا مختصات به اندازه حد تسلیم (حد انبساط) است می گذرد.

دامنه استحکام متناوب یک جهته از رابطه $\sigma_m = \sigma_{zSch}/2$ و یا به طور ترسیمی از تقاطع خط مرزی دامنه تنش با خطی که از مبدا مختصات می‌گذرد و نسبت به افق زاویه ای برابر 45° می‌سازد بدست می‌آید. بهمین ترتیب برای ناحیه فشاری ($\sigma_m \leq 0$) نیز میتوان با استفاده از حد تسلیم فشاری $\sigma_{d0,2}$ عمل نمود. شکل ۲-۳۲ نمودار هیگ را برای یک ماده ایکه دارای حد تسلیم کششی و فشاری یکسان است نشان می‌دهد. نمودار هیگ غالباً به این جهت بکار میرود، که از آن میتوان دامنه تنش را مستقیماً بدست آورد.

رایج ترین نوع نمایش استحکام دائم که بویژه برای فولادها استفاده میشود، نمودار اسمیت (Smith) میباشد، که شکل ۲-۳۳ آنرا بطور شماتیک نشان می‌دهد. در این نمودار مقادیر تنش بالایی σ_o و تنش پایینی σ_u بر حسب تنش میانگین σ_m بصورت دو خط مرزی بالایی و پایینی ترسیم شده اند. دامنه تنش σ_A برای یک تنش میانگین σ_m برابر است با نصف تفاضل تنش بالایی و پایینی. برای اجتناب از تغییر شکل های غیر مجاز ماده در کاربرد های صنعتی، حداکثر تنش بالایی اغلب به وسیله حد تسلیم R_e و یا حد انبساط $R_{p0,2}$ محدود میشود.



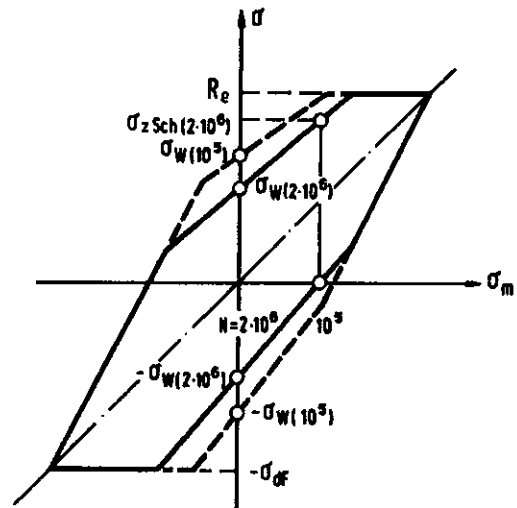
شکل ۲-۳۳



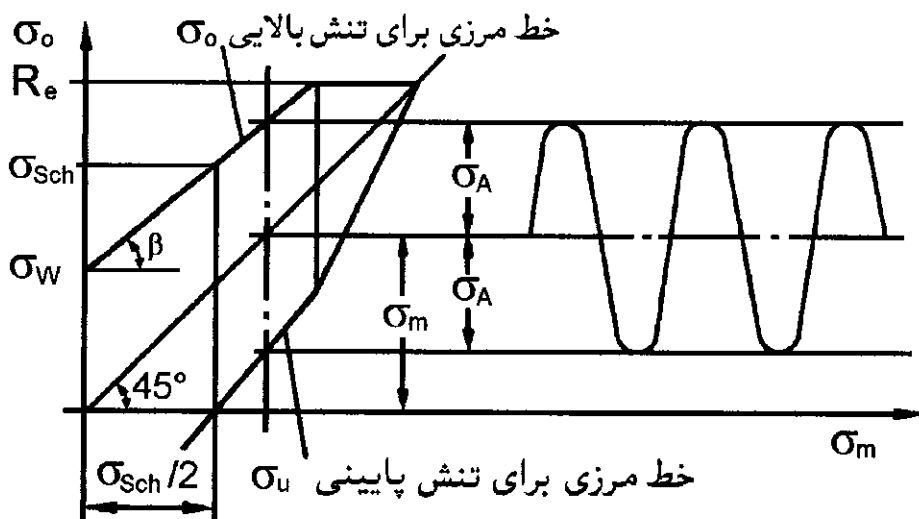
شکل ۲-۳۴

از نمودار استحکام دائم اسمیت، همانطور که شکل ۲-۳۴ نشان می‌دهد، میتوان علاوه بر استحکام دائم $\sigma_A(\sigma_m)$ مقادیر R_m ، R_e ، σ_{zdW} ، σ_{zSch} ، σ_{dSch} را نیز استخراج نمود. شکل ۲-۳۵ نیز نمودار استحکام دائم اسمیت را به رابطه $\sigma_a(\sigma_m)$ در ناحیه استحکام زمانی بطور شماتیک نشان می‌دهد.

برای رسم نمودار استحکام اسمیت کافیت که
 σ_w ، σ_{Sch} و R_e را به صورت مقادیری
 معلوم داشته باشیم. اما اگر σ_{Sch} نامعلوم باشد،
 میتوان با استفاده از σ_w و R_e ، همانطور که
 شکل ۲-۳۶ نشان می دهد، یک نمودار تقریبی
 برای استحکام دائم ترسیم نمود. برای این منظور
 بایستی برای زاویه β (زاویه ای که خط مرزی تنش
 بالایی با افق می سازد) مقدار 36° در خمش،
 40° در کشش و فشار و 42° در پیچش را در
 نظر گرفت.

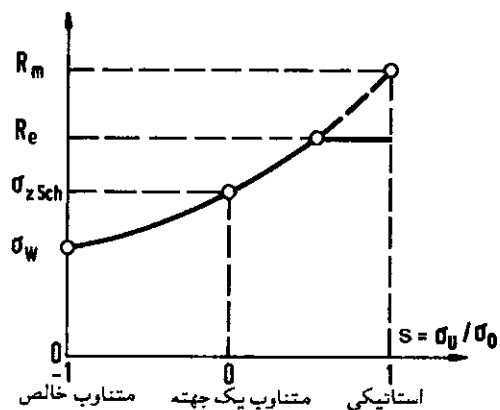


شکل ۲-۳۵



شکل ۲-۳۶

به غیر از نمودارهای استحکام دائم هیگ (Haigh)
 و اسمیت (Smith)، نمودار دیگری نیز مرسوم
 میباشد که (Moor-Kommers-Jaspers) نام دارد.
 در این نمودار تنش بالایی $\sigma_o(s)$ بر حسب نسبت
 تنش های مرزی، یعنی $s = \sigma_u / \sigma_o$ رسم
 می گردد که غالباً بجای s از علامت χ نیز
 استفاده می گردد. شکل ۲-۳۷ یک چنین
 نموداری را بطور شماتیک نشان می دهد.



شکل ۲-۳۷

۳ بارگذاری دینامیکی غیر متناوب و بی قاعده (aperiodic)

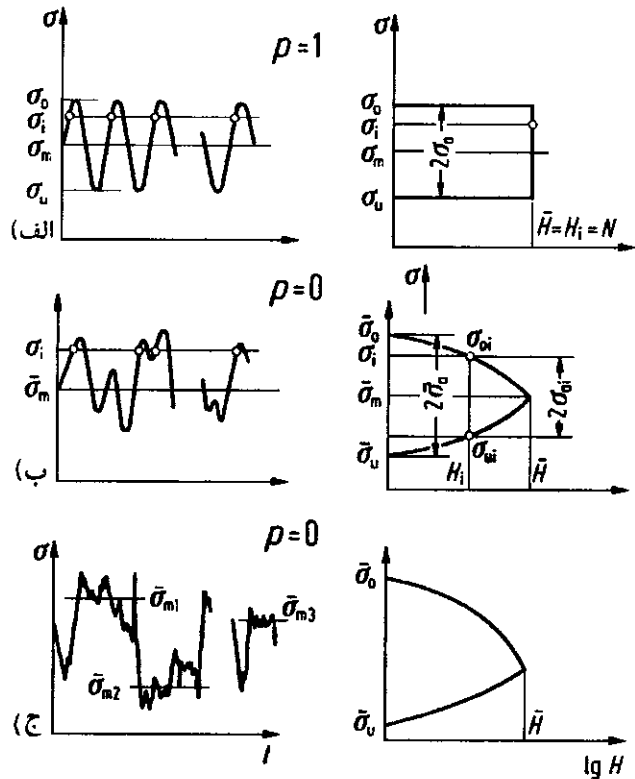
عملاً تعداد بسیاری از اجزاء و قطعات ماشین ها تحت اعمال بارهایی قرار می گیرند که دامنه نوسان آنها متغیر و بی قاعده بوده و دارای تنش میانگین (σ_m) ثابت و یا متغیر می باشند ، طوریکه مقادیر بدست آمده در آزمایشات یک مرحله ای مربوط به استحکام دائم برای آنها بطور محدود قابل استفاده هستند . دامنه تنش هایی که بطور مثال در شروع راه اندازی یک سیستم و یا در هنگام گذر از دور های بحرانی در ناحیه تشدید (رزونانس) ایجاد میشوند میتوانند بمراتب بیشتر از دامنه تنش ها در حالت کار دائم باشند . از طرفی اگر طراحی و تعیین ابعاد قطعات فقط بر اساس بزرگترین تنش موجود و همچنین استحکام دائم باشد ، نتایج قابل قبولی را بویژه از دید اقتصادی در بر نخواهد داشت . در بسیاری از موارد در ماشین سازی و سازه های فولادی و بویژه در ساخت سازه های سبک ، آن تنش هایی مجاز شناخته میشوند که دامنه تنش آنها حتی از دو برابر استحکام دائم هم بیشتر میباشد و به این ترتیب این امکان بوجود می آید که از طریق لغزش های متناوب در ناحیه استحکام زمانی ، خسارت های جزئی پدید آید .

با توجه به اینکه دامنه های تنش در بارهای دینامیکی بی قاعده از قوانین آمار و احتمالات پیروی می کنند ، بایستی برای ارزیابی کمی این خسارت های جزئی در ناحیه استحکام زمانی (تجمع خسارات) از روش هایی استفاده نمود که تابع بارگذاری بی قاعده را به وسیله یک رشته نوسانات متناوب بار ، با اندازه و امکان وقوع (تکرار) معین بیان دارد . ساده ترین روشی که اغلب بکار می رود ، روش شمارش وقوع (تکرار) نیروها و یا تنش هایی است که از یک حد معینی تجاوز کنند . برای این کار ابتدا جهت فشردن اطلاعات از منحنی تغییرات تنش (و یا بار) نسبت به زمان در حین کار استفاده میشود و از آن نمودار کولکتیو بار (Kollektive) تعیین می گردد . برای این منظور تمام محدوده تنش از تنش پایینی σ_{II} به بالا به چندین درجه (۸ تا ۲۰ درجه) تقسیم میشود و سپس برای هر یک از درجات ، تعداد دفعاتی که نیرو و یا تنش به آن حد رسیده و یا از آن فراتر می رود شمارش میشوند و نتایج بترتیب افزایش امکان وقوع به صورت نمودار کولکتیو بار رسم می گردد .

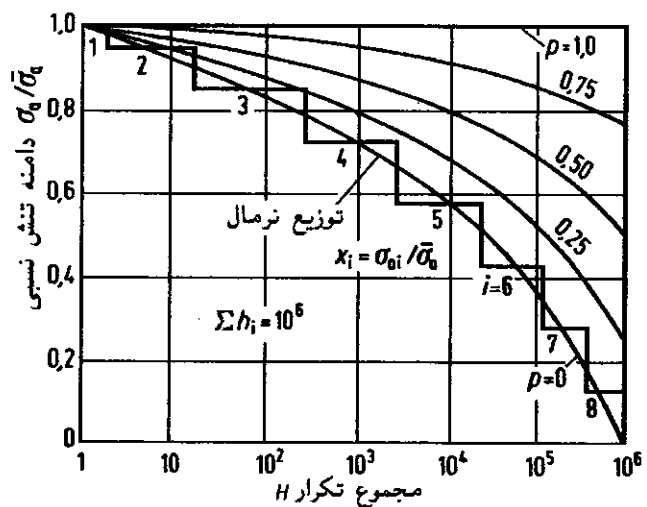
کولکتیو بار عبارت است از منحنی مجموع تکرار بارها و به وسیله آن میتوان تعداد دفعاتی که قدر مطلق بارهای هر درجه در یک محدوده زمان کار به یک حد مشخص رسیده و یا از آن بیشتر میشوند را بدست آورد . برای مشخص نمودن یک کولکتیو بار لازم است که مجموع تکرار H ، شکل کولکتیو بار طبق یک قانون توزیع آماری معین ، حداکثر مقدار تنش های بالایی $\bar{\sigma}_0$ و پایینی $\bar{\sigma}_{II}$ و یا حداکثر دامنه تنش $\bar{\sigma}_a$ و همچنین تنش میانگین مربوطه $\bar{\sigma}_m$ معلوم باشند .

در شکل ۲-۳۸ سه نوع تابع تنش نسبت به زمان و همچنین کولکتیو تنش های آنها به نمایش گذاشته شده است که از روش درجه بندی بارها بدست آمده اند . اگر دامنه تنش ها ثابت بمانند ، همانطور که در شکل ۲-۳۸ الف) نیز مشاهده میشود ، در آنصورت حداکثر مقدار تنش بالایی و پایینی نیز در هر سیکل بار اعمال میشوند . در این حال تعداد سیکل بار N با تکرار کل \bar{H} برابر است ($\bar{H} = N$) . کولکتیو بار مربوطه در این حالت یک مستطیل میباشد . برای موقعیکه تنش میانگین σ_m ثابت ولی تغییرات دامنه بار نسبت به زمان بی قاعده است (شکل ۲-۳۸ ب) ، در آنصورت منحنی بالایی

در تصویر سمت راست تعداد (تکرار)
نوسان باری را بیان می دارد که مقدارش
به اندازه یک تنش بالای معین (σ_i)
رسیده و یا از آن فراتر رفته است .
کولکتیو تنش پایینی نیز به همین نحو
بدست می آید . (شکل ۲-۳۸ ج) تابع
بار و همچنین کولکتیو مربوطه برای
موقعیکه هم تنش میسانگین و هم دامنه
تنش بی قاعده هستند را نشان می دهد .
معمولاً برای تهیه یک کولکتیو تعداد
 10^6 نوسان بار در نظر گرفته میشود و
در عمل برای تعیین استحکام وقتیکه
تغییرات تابع تنش های اعمال شده بی
قاعده باشد ، از آزمایشات چند مرحله ای
استفاده میشود . برای این منظور تابع
تنش واقعی را اندازه گیری کرده و سپس
کولکتیو بار معادل آن بدست می آید . با
استفاده از این کولکتیو بدست آمده ،
آزمایشات استحکام کار انجام میشود .
با وجود اینکه آزمایش یک مرحله ای به
ندرت با تنش های واقعی مطابقت دارد ،
ولی از جهت اینکه نتایج آن برای ارزیابی
کیفیت یک طراحی در بارگذاری
دینامیکی اطلاعات مفیدی را در اختیار
ما قرار می دهد ، از اهمیت بسیاری
برخوردار است .

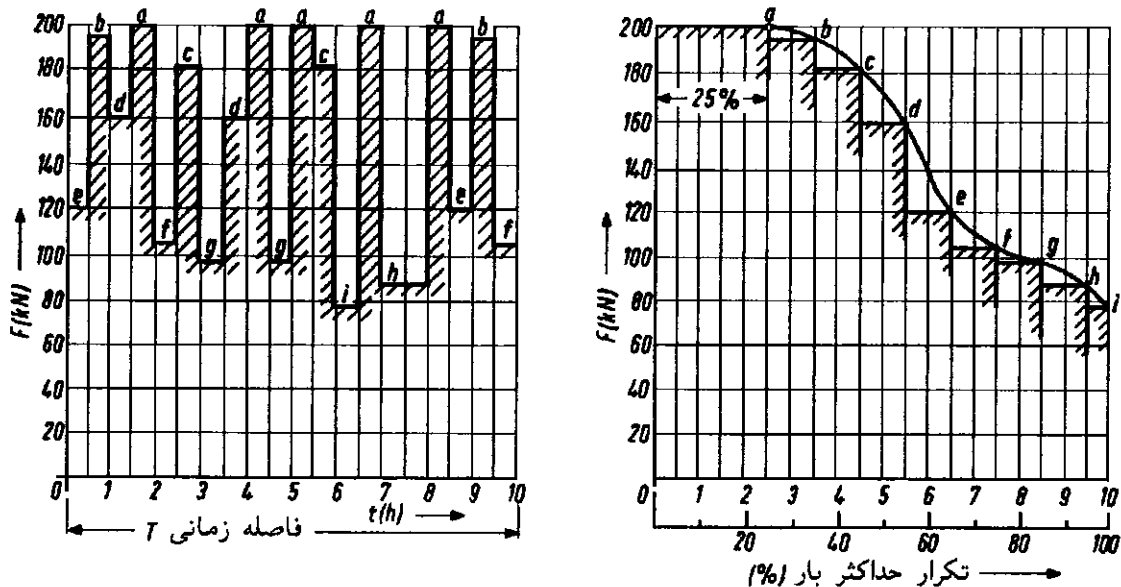


شکل ۲-۳۸



شکل ۲-۳۹

برای توابع تنش میتوان کولکتیوهای مختلط را که بالاتر از توزیع نرمال قرار دارند ، به وسیله
کولکتیوهای نرمال در یک ناحیه بار معین تقریب نمود (شکل ۲-۳۹) . ضرایب کولکتیو p در اینجا
عبارتند از نسبت حداقل و حداکثر دامنه در کولکتیو ، که مقدارش طبق شکل ۲-۳۹ بین صفر و یک
قرار دارد ($0 \leq p \leq 1$) .



شکل ۲-۴۰

در شکل ۲-۴۰ نیز بطور مثال تغییرات بار برای یک ماشین پرس برای مدت مثلاً ۱۰ ساعت ($T = 10 \text{ h}$) رسم شده است. در این مثال، همانطور که در منحنی تکرار نیز مشاهده میشود، حداکثر بار به اندازه ۲۵٪ کل مجموع نوسان بار تکرار میشود.

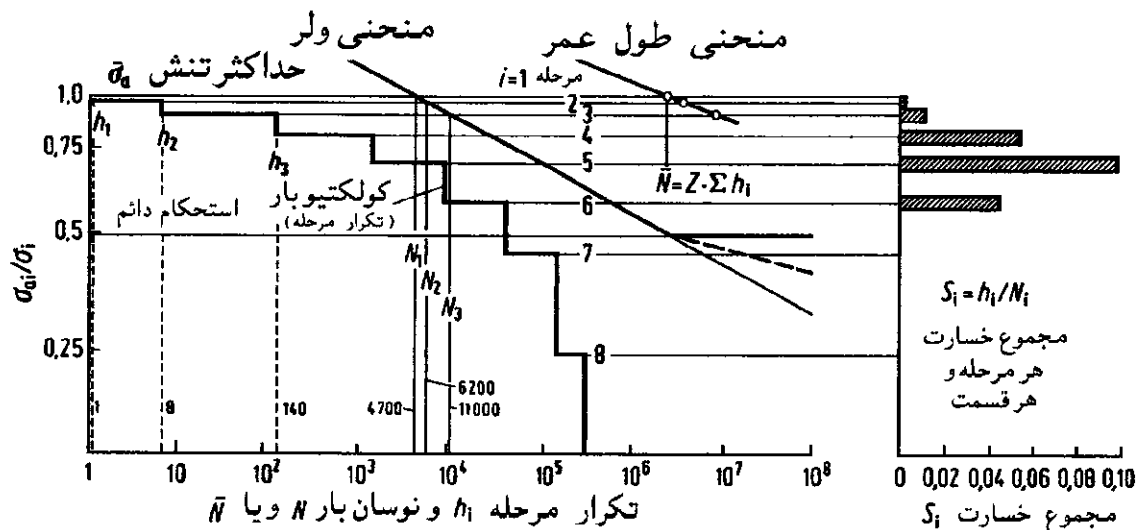
پیشگویی دقیق طول عمر قطعاتی که تحت اثر بارهای اتفاقی قرار دارند را میتوان فقط به وسیله آزمایش های دقیق انجام داد. اما متأسفانه نتایجی که از این آزمایشات بدست می آیند به اندازه کافی موجود نیستند. از طرفی میتوان طول عمر اجزاء را در صورت معلوم بودن کولکتیو بار و منحنی های مربوطه ولر در ناحیه استحکام زمانی و دائم و با استفاده از یک تئوری مناسب برای تجمع خسارات تخمین زد.

ساده ترین تئوری تجمع خسارات، قاعده Palmgren - Miner نام دارد که اساس آن بر خطی بودن خسارات استوار است. طبق این تئوری، تأثیر خسارات یک نوسان بار بر روی عدم کارایی یک قطعه (خسارت کل) به وسیله $1/N_i$ بیان میگردد، که در آن N_i عبارت است از تعداد نوسان باری که دامنه تنش آن در آزمایش یک مرحله ای تا مرز شکستن برابر σ_{ai} باشد.

حال اگر کولکتیو بار طبق شکل ۲-۴۱ به وسیله بارگذاری چند مرحله ای (در اینجا ۸ مرحله) جایگزین شود، در آنصورت سهمی که هر یک از مراحل بار با n_i سیکل بار در خسارت کل دارد برابر است با n_i/N_i . بنابراین مجموع خسارات برای m مرحله بار عبارت است:

$$S = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_m}{N_m} = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} = 1$$

شکست دینامیکی (خستگی) طبق تعریف موقعی رخ می دهد که مجموع خسارات برابر واحد گردد، یعنی $S = 1$.



شکل ۲-۴۱

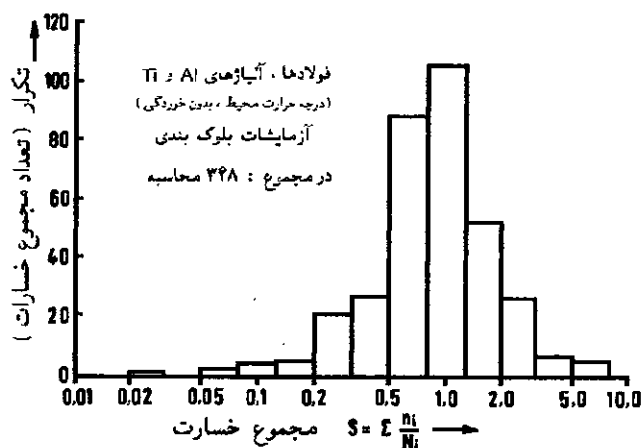
کولکتیو بار را میتوان به چندین قسمت تجزیه نمود. مجموع خسارات هر قسمت در هر مرحله برابر است با $S_i = h_i / N_i$ ، که در آن h_i تعداد نوسان (خسارت هر قسمت) در هر مرحله برای هر قسمت را بیان می دارد.

مجموع خسارات برای Z قسمت برابر است با

$$S = \sum \frac{n_i}{N_i} = Z \cdot \sum \frac{h_i}{N_i} \quad (\text{اگر } Z = 1 \text{ باشد، در نتیجه } n_i = h_i)$$

ارزیابی های بسیاری از تخمین های مربوط به طول عمر طبق قاعده Palmgren - Miner نشان می دهند که طول عمر های محاسبه شده بر اساس قاعده مینر اغلب با مقادیر بدست آمده در آزمایشات مطابقت ندارند و نتایج محاسبات انجام شده بسیار پراکنده هستند، به عبارت دیگر مقدار S میتواند بیشتر و یا کمتر از یک باشد و معمولاً مقدار آن بین 0,7 و 2,2 قرار دارد ($0,7 \leq S \leq 2,2$).

شکل ۲-۴۲ توزیع تکرار مجموع خسارات را که طبق قاعده مینر محاسبه شده اند نشان می دهد. همانطور که مشاهده میشود، فرم توزیع تکرار مجموع خسارات بر روی محوری با تقسیمات لگاریتمی به شکل ناقوسی است که ماکزیمم آن در $S = 1$ واقع است. به عبارت دیگر بیشترین امکان وقوع (تکرار) مجموع خسارات مقداری است که انتظار آن می رود.



شکل ۲-۴۲

ولیکن این نتایج در یک محدوده وسیعی پراکنده شده اند . این واقعیت که بیشترین امکان تکرار مجموع خسارات حدود یک است ، نمی تواند تأییدی بر قاعده مینر باشد . تنها عامل تعیین کننده جهت صحت یک تئوری تجمع خسارات پراکندگی و انحراف آن است . بنابراین قاعده مینر دارای نواقص زیر میباشد :

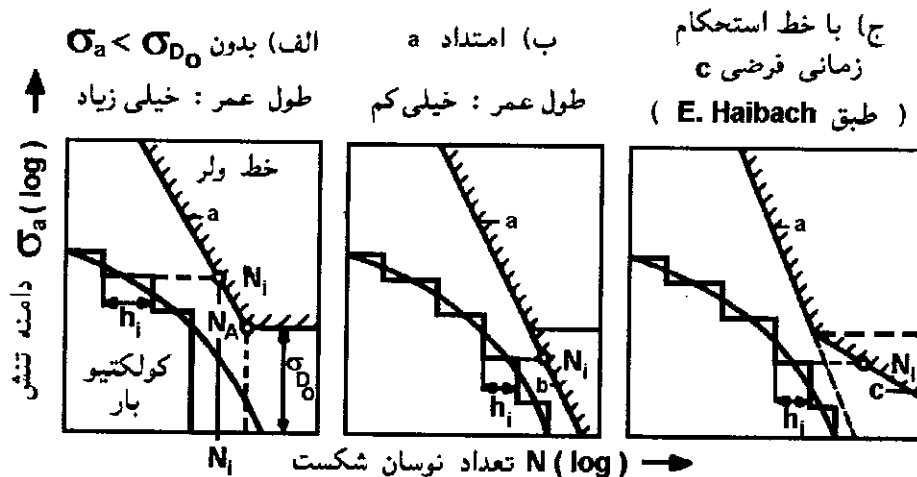
— بارهایی که مقدار آن کمتر از استحکام دائم میباشد در محاسبات دخالت داده نمی شوند و بنابراین به عنوان زیان آور به حساب نمی آیند ، چیزی که حداقل بعد از ایجاد اولین ترکها غیر واقعی است .

— ترتیب اعمال بارها در نظر گرفته نمی شوند ، یعنی اینکه محاسبات بر این پایه استوار نیست که آیا بارهای یک کولکتیو مثلاً به صورت بی قاعده بوده یا بصورت بلوک میباشدند و یا اینکه آیا بارهای سنگین در ابتدا و یا در انتهای یک کولکتیو واقع هستند .

— فرقی بین خسارت در ابتدای تشکیل ترک و یا خسارت وقتیکه ترک رشد کرده است گذاشته نمی شود ، با وجودیکه این دو پدیده از قوانین مختلفی پیروی می کنند .

— این موضوع در نظر گرفته نمی شود که تنش های کششی ندرتاً سنگین میتوانند تنش های خودی (فشاری) ایجاد کنند که آنها نیز به نوبه خود باعث کاهش خسارت نوسانات بار بعدی شده و به این ترتیب طول عمر را افزایش می دهند . از طرف دیگر این بارهای سنگین می توانند منجر به خسارات بیش از اندازه شوند . بارهای سنگین فشاری میتوانند تنش های خودی (کششی) را باعث شوند و در نتیجه طول عمر را کاهش دهند .

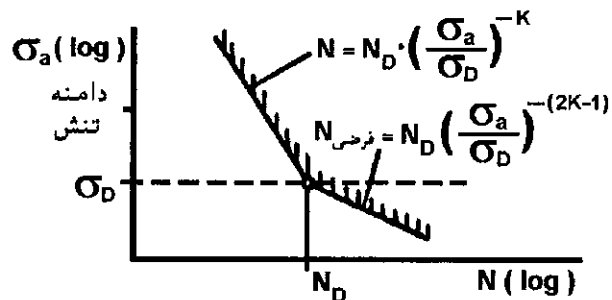
از عوامل مؤثر فوق الذکر در خسارت بیشترین تأثیر را احتمالاً تنش های خودی دارند . خسارات ناشی از تنش های متناوب کمتر از استحکام دائم را میتوان با استفاده از تعمیم یک تئوری تجمع خسارات منظور داشت . بر طبق این تئوری حد استحکام دائم به شکل مناسبی کاهش داده میشود .



شکل ۲-۴۳ (تئوری تجمع خسارات خطی)

اگر منحنی ولر را در ناحیه استحکام دائم امتداد دهیم ، همانطور که در شکل ۲-۴۳ ب) مشاهده میشود ، مقادیر طول عمرهای کوتاهتری بدست می آیند و به این ترتیب تأثیر تنش هایی که مقدارشان از استحکام دائم کمتر میباشد نیز در نظر گرفته میشوند .

طبق جدیدترین توصیه هایی که به وسیله Haibach شده ، تأثیر دامنه تنش های کوچک به کمک یک خط استحکام زمانی فرضی در نظر گرفته میشود (شکل ۲-۴۳ ج) و همچنین شکل ۲-۴۴) . برای ادامه خط استحکام زمانی فرضی معادله زیر داده شده است :



شکل ۲-۴۴

$$\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_D}\right) \leq 1 \quad \text{برای} \quad N_{\text{فرضی}} = N_D \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_D}\right)^{-(2K-1)}$$

$$\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_D}\right) \geq 1 \quad \text{برای} \quad N = N_D \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_D}\right)^{-K}$$

که در آن K توان (نما) خط ولر مربوطه در ناحیه استحکام زمانی است و

$$\begin{aligned} N_D &= \text{نقطه ای که در آنجا خط ولر تغییر زاویه می دهد ،} \\ \sigma_a &= \text{دامنه تنش و} \\ \sigma_D &= \text{استحکام دائم (} \pm \sigma_a = \text{ثابت} = \sigma_m \text{) است .} \end{aligned}$$

با توجه به اینکه $\sum n_i$ به عنوان محیط و وسعت کولکتیو و $S = \sum \frac{n_i}{N_i}$ به عنوان حد خسارت تعریف شده است ، میتوان برای محاسبات کاربردی طول عمر ، \bar{N} را به عنوان طول عمر عملی به صورت زیر نوشت :

$$\bar{N} = N_0(\sigma_a = \bar{\sigma}_a) \cdot \frac{\sum n_i}{\sum_{i=1}^j (n_i x_i^K) + \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_D}\right)^{K-1} \cdot \sum_{j+1}^m \left[n_i x_i^{(2K-1)} \right]}$$

که در آن :

$$\begin{aligned} m &= \text{تعداد مراحل بارگذاری (مجموع تعداد پله های کولکتیو) ،} \\ N_0 &= \text{تعداد سیکل باری که طبق خط استحکام زمانی برای حداکثر دامنه تنش کولکتیو یعنی } \bar{\sigma}_a \\ &\quad \text{قابل تحمل است و} \\ x_i &= \sigma_{ai} / \bar{\sigma}_a = \text{دامنه تنش نسبی است .} \end{aligned}$$

به این ترتیب تعداد سیکل بار قابل تحمل در طی طول عمر قطعه طبق قاعده کلاسیک مینر برابر خواهد بود با :

$$N_M = N_0(\sigma_a = \bar{\sigma}_a) \cdot \frac{\sum n_i}{\sum_{i=1}^m (n_i x_i^K)}$$

در عمل برای تخمین طول عمر ، اغلب از تنش های نامی ، ضریب تأثیر فاق و منحنی ولر استفاده میشود ، به این ترتیب که در محاسبات تجمع خسارات ، کولکتیو تنش نامی با منحنی ولر مربوط به نمونه فاق دار با ضریب تأثیر فاق β_k و نوع بارگذاری مشابه مقایسه میشود . در منحنی ولر بایستی بعلاوه تأثیر اندازه و زبری سطح را در نظر گرفت .

۲-۶ استحکام قطعه

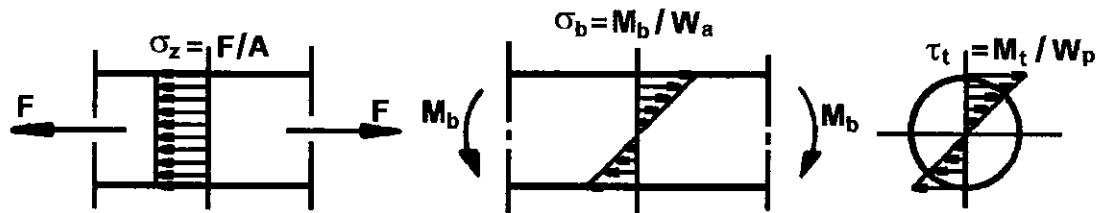
تخمین استحکام قطعات از طریق بر پایی شرط استحکام و یا شرط عدم کارآیی فقط بطور محدود امکانپذیر است . دلیلش آن است که تئوری های استحکام (عدم کارآیی) برای حالت های تنش چند محوری و یکنواخت معتبر می باشند و در آنها گرادیان تنش موجود در فاق ها در نظر گرفته نمی شوند . اهمیت این موضوع از آنجا ناشی میشود که مهمترین اجزاء ماشین ها به دلیل وجود مثلاً تغییر سطوح مقاطع ، سوراخ های عرضی ، نشست های انقباضی ، رزوه در پیچ ها ، اتصالات جوش و غیره حالت های تنش سه محوری را از خود نشان می دهند که غیر یکنواخت می باشند . به علاوه در محاسبات مربوط به استحکام ، عموماً اندازه قطعه با اندازه نمونه ای که مقدار مشخصه یک محوری ماده برای آن بدست آمده مطابقت ندارد . و بالاخره در محاسبات خستگی تضمینی وجود ندارد که خواص سطح قطعه با خواص سطح نمونه ای که مقدار مشخصه یک محوری خستگی برای آن بدست آمده است یکسان باشد . بنابراین استحکام قطعات به غیر از عواملی که در استحکام ماده مؤثرند ، تحت تأثیر عوامل زیر نیز میباشد :

- تمرکز تنش (تأثیر فاق)
- اندازه قطعه
- شرایط سطح (صافی سطح) و فرآیند تولید
- سایش ارتعاشی (خوردگی اصطکاکی)

۲-۶-۱ تمرکز تنش (تأثیر فاق)

ما در مقاومت مصالح تنش های اعمال شده در قطعات ساخته شده از مواد همگن را برای سطوح مقاطعی محاسبه می کردیم که از محل اعمال نیرو به اندازه کافی فاصله داشته و در سطح مقطع برش بطور یکنواخت و یا خطی توزیع شده اند . در این حال سطوح خارجی قطعات را کاملاً صاف در نظر می

گرفتیم. این تنش های بدست آمده، تنش های نامی $\sigma_n(\tau_n)$ نامیده میشوند. شکل ۲-۴۵ تنش های نامی را در بارگذاری کششی، خمشی و پیچشی نشان می دهد. اندازه این تنش های نامی را میتوان از روابط بدست آمده در علم مقاومت مصالح تعیین نمود.



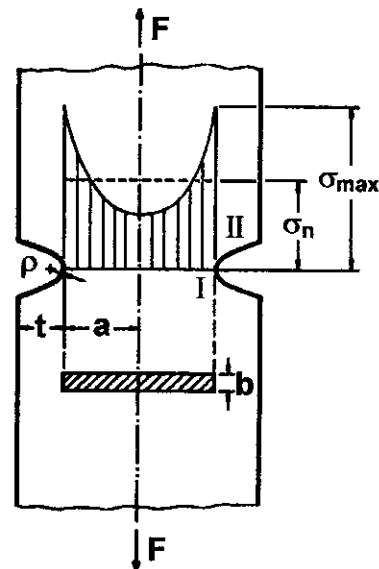
شکل ۲-۴۵

مثلاً در مثالهای شکل ۲-۴۵ اندازه تنش های نامی کششی، خمشی و پیچشی برابرند با:

$$\sigma_z = \sigma_{zn} = \frac{F}{A} \quad \text{و یا} \quad \sigma_b = \sigma_{bn} = \frac{M_b}{W_a}, \quad \tau_t = \tau_{tn} = \frac{M_t}{W_p}$$

اما اجزاء ماشین واقعی اغلب دارای شکلی پیچیده بوده و بندرت پیش می آید که سطوح خارجی آنها صاف باشند. در بیشتر موارد حتی ناپیوستگی و یا تغییرات سطوح مقاطع جزو لاینفک طراحی هستند. مثلاً بعضی از شافت ها دارای پله، سوراخ های عرضی و یا شیارهای طولی میباشند (فاق های خارجی). همچنین موادی که قطعات از آنها ساخته میشوند به هیچ وجه همگن نبوده و دارای حفره، ناخالصی و یا رگه های لایه ای شکل (گرافیت در چدن ها) میباشند (فاق های داخلی). در حالت کلی این نوع تغییرات در شکل هندسی قطعات را فاق می نامیم. تأثیر یک فاق بر توزیع تنش و یا تغییر شکل، یا به عبارت دیگر بر رفتار مکانیکی قطعات را بطور خلاصه تأثیر فاق (تمرکز تنش) می نامیم. با توجه به اینکه استحکام قطعه در نتیجه تأثیر فاق به شکل و یا طراحی آن بستگی دارد، به آن استحکام شکل نیز گفته میشود (Thum 1932).

بر اثر فاق تنش ها در اطراف فاق متمرکز شده (محل I در شکل ۲-۴۶) و در مناطق دورتر از آن، یعنی ناحیه هایی که سایه های تنش II نام دارند، کاهش می یابند. مثلاً در شکل ۲-۴۶ توزیع تنش در باریکترین سطح مقطع یک میله $(S = 2ab)$ با فاق های خارجی دو طرفه در اثر بارگذاری با یک نیروی محوری F در ناحیه الاستیک خطی به طور شماتیک به نمایش گذاشته شده است. به این ترتیب در پای فاق نه فقط یک حالت تنش چند محوری، بلکه همچنین یک افزایش تنشی (نوک تنش یا σ_{max}) بوجود می آید که میتواند چندین برابر تنش نامی $\sigma_n = F/2ab$ گردیده و به این جهت نقطه شروعی برای ترک ها و یا شکست ها باشد.



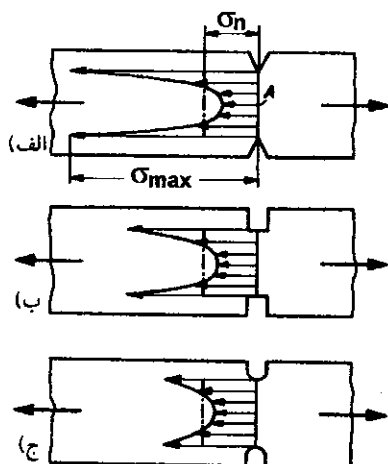
شکل ۲-۴۶

نوک تنش ها همچنین در جاهایی رخ می دهند که نیروها از آنجا وارد میشوند و یا اینکه از یک قطعه به قطعه دیگر عبور می کنند .

برای تعیین افزایش تنش در پای فاق یعنی σ_{\max} در ناحیه الاستیک خطی (ناحیه هوک) ضریب α_k تعریف میشود که به آن ضریب شکل و یا ضریب تمرکز تنش هندسی می گویند . این مقدار برابر است با :

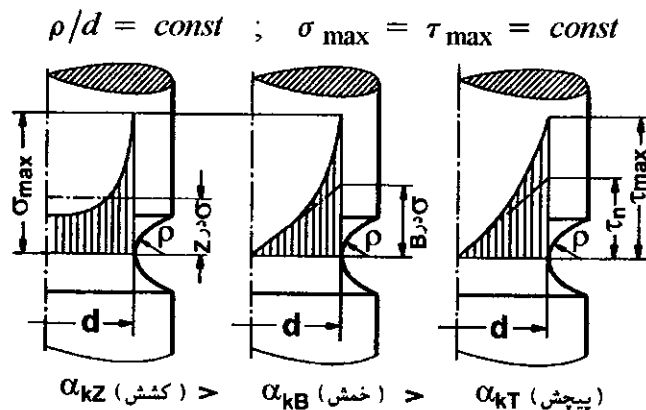
$$\alpha_k = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n} \quad \text{یا} \quad \alpha_k = \frac{\tau_{\max}}{\tau_n}$$

که در آنها σ_n و τ_n تنش نامی در سطح مقطع باقیمانده می باشند .



این ضریب یعنی نسبت نوک تنش σ_{\max} به تنش نامی σ_n میتواند به عنوان اندازه مشخصه ای برای اثر کاهش دهنده استحکام در یک فاق در نظر گرفته شود . این اثر کاهش دهنده استحکام در درجه اول به شکل فاق بستگی دارد (شکل ۲-۴۷) . هرچه فاق تیزتر باشد ، به همان نسبت هم حداکثر تنش σ_{\max} بزرگتر است . ضریب شکل α_k نه فقط به شکل فاق بلکه همچنین به نوع بارگذاری نیز بستگی دارد (شکل ۲-۴۸) .

شکل ۲-۴۷



شکل ۲-۴۸

ضریب شکل α_k از طریق بارگذاری استاتیکی به دو روش عملی و تئوری بدست می آید . از جمله روش های عملی جهت تعیین α_k میتوان از روش مدلسازی اجسام ترد و همچنین اجسام کاملاً الاستیک ، روش پوشش لاک ترد ، نوارهای کرنش سنج و فتوالاستیسیتیه نام برد . در روش های تئوریک میتوان به کمک Potential-Theorie و یا روش اجزاء محدود (FEM) ضریب α_k را تعیین نمود .

بنابراین با فرض اینکه ماده در ناحیه استحکام دائم دارای رفتار الاستیسیته خطی است ، میتوان انتظار داشت که دامنه تنش متناوب در قطعه در پای فاق به اندازه α_k برابر مقدار تنش نامی افزایش یافته و به این ترتیب استحکام نمونه های فاق دار (σ_{Dk}) نیز تا اندازه σ_D/α_k کاهش یابد . اما بسیاری از آزمایشات نشان می دهند که استحکام دائم نمونه هایی که دارای فاق هستند بیشتر از مقدار σ_D/α_k بوده و بسته به شکل فاق ، مقادیر استحکام دائم بمراتب بالاتری بدست می آید . این بدان معنی است که (در محدوده ای که قطر نمونه ها کمتر از 10 mm است) استحکام نمونه های فاق دار نه فقط به ضریب شکل α_k ، بلکه همچنین به عوامل دیگری نیز بستگی دارد .

با توجه به اینکه از یکطرف تعیین ضریب شکل α_k در بارگذاری دینامیکی (متناوب) بسیار دشوار و یا اصلاً غیرممکن است و از طرف دیگر نیز مقدار آن برای طراح مستقیماً مطرح نیست (در تعیین ابعاد بایستی طراح بارهایی که منجر به شکست قطعه میشوند ، یعنی تنش های نامی را بکار ببرد) ، بجای ضریب شکل α_k از ضریب تأثیر فاق (ضریب تمرکز تنش مؤثر) β_k استفاده میشود که در آن علاوه بر شکل فاق و نوع بارگذاری ، تأثیر ماده و همچنین تغییرات بارگذاری نسبت به زمان بر روی استحکام دائم در نظر گرفته شده است . روش مطمئن تعیین β_k روش آزمایش است . یک قطعه دارای فاق تحت باری قرار می گیرد که در مرز استحکام دائم (مثلاً یک بار متناوب خمشی) میباشد . دامنه تنش نامی سطح مقطع فاق دار بعنوان دامنه استحکام دائم نامی نمونه فاق دار σ_A (و یا همچنین فاق دار τ_A) مشخص میشود . بنابراین نسبت دامنه استحکام دائم نمونه صاف و بدون فاق (مثلاً در مثال فوق ، استحکام متناوب خمشی) به استحکام دائم نمونه فاق دار برابر است با ضریب تأثیر β_k .

برای اینکه فقط تأثیر فاق در کاهش استحکام دائم مشخص شود ، بایستی نمونه فاق دار همان شرایطی را داشته باشد که نمونه صاف و بدون فاق دارا است ، یعنی نمونه ای به قطر 10 mm که سطح آن کاملاً پولیش شده است . به این ترتیب ضریب β_k را میتوان چنین تعریف کرد :

ضریب تأثیر فاق (ضریب تمرکز تنش مؤثر) β_k عبارت است از نسبت دامنه استحکام دائم یک قطعه صاف و بدون فاق به قطر 10 mm به دامنه استحکام دائم نامی همان قطعه و همان جنس و قتیکه دارای فاق باشد . در این حال هم قطعه فاق دار و هم قطعه بدون فاق دارا سطحی پولیش شده بوده و نوع و تغییرات بارگذاری در هر دو یکسان است .

$$\beta_k = \frac{\sigma_{A\text{فاق بدون}}}{\sigma_{A\text{فاق دار}}} ; \beta_k = \frac{\tau_{A\text{فاق بدون}}}{\tau_{A\text{فاق دار}}}$$

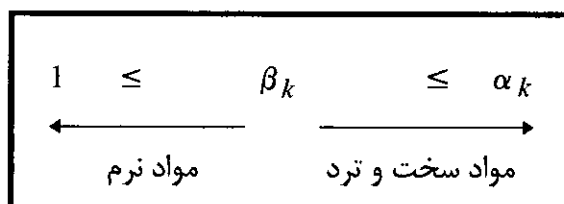
تلاش های زیادی انجام شده تا ضریب β_k را بر حسب α_k و عوامل داده شده دیگر بیان گردد که اکثراً بدون نتیجه بوده است . ساده ترین آنها ، رابطه ای است که به وسیله (Thum 1932) بصورت :

$$\beta_k = 1 + (\alpha_k - 1) \cdot \eta_k$$

بدست آمده ، که در آن η_k عبارت است از ضریب حساسیت در برابر فاق و مقدار آن میتواند بسته به جنس قطعه و شکل فاق بین صفر (برای مواد کاملاً الاستیک) و یک (برای مواد سخت و حساس در برابر فاق) باشد . اندازه این ضریب ، کاهش تأثیر فاق را بیان می دارد و تابعی است از شکل فاق ، نوع بارگذاری و اندازه قطعه .

تأثیر فاق های مشابه در قطعاتیکه از مواد سخت ، غیر الاستیک و ترد مانند شیشه و فولاد فتر درست شده اند بمراتب مخرب تر است تا در قطعاتیکه از مواد الاستیک مانند لاستیک و یا فولاد نرم درست شده اند . نوک های تنش میتوانند در مواد نرم به وسیله تغییر شکل های الاستیکی و یا بعضاً پلاستیکی تا حدودی کاهش یابند . بعلاوه نقاطی از ماده که تحت بار کمتری قرار دارند تا حدودی نقاطی را که تحت بار بیشتری قرار دارند حمایت می کنند .

بدین ترتیب مقدار β_k نیز میتواند بین 1 و α_k تغییر کند .



اندازه ضریب تأثیر فاق $\beta_k \leq \alpha_k$ بندرت از طریق رابطه بالا ، یعنی رابطه بدست آمده بوسیله Thum تعیین میشود ، زیرا که α_k و بویژه η_k اندازه های ثابتی برای یک ماده نبوده و بهم وابسته اند . یک رابطه دیگری که توسط Bollenrath - Troost ارائه شده است ، عبارت است از یک رابطه تقریبی بین α_k و β_k بصورت تابعی از استحکام کششی R_m . خطای مقادیر بدست آمده از این رابطه با مقادیر دقیق آن کمتر از 20% میباشد .

$$\frac{\beta_k}{\alpha_k} = 1 - \left[\frac{154/R_m}{1 + (R_m/1370)} + 0,1 \cdot r \right] \quad \begin{array}{l} r = \text{شعاع فاق به } mm \\ R_m = \text{استحکام کششی به } N/mm^2 \end{array}$$

در جدول های ۲-۴۹ و ۲-۵۰ معادلات داده شده با ضرایب و نماهای مربوطه برای تعیین ضرایب شکل میله های فاق دار متقارن (α_k) و همچنین میله های فاق دار نا متقارن ($\bar{\alpha}_k$) برای انواع بارگذاری کششی ، خمشی و پیچشی دیده میشود . برای محاسبه ضرایب شکل $\bar{\alpha}_k$ مربوط به میله های نا متقارن بایستی از ضرایب شکل α_k مربوط به میله های متقارن استفاده نمود (H. W. Müller) . از جدول ۲-۵۱ و همچنین منحنی های مربوط به آن میتوان تنش های نامی و ضرایب شکل انواع فاق در شافت ها و محورهایی که دارای سوراخ عرضی ، جاکار (شیار) طولی ، شیار عرضی بوده و یا دارای سطح مقطعی چهارگوش (سطح مقطع قوطی شکل) میباشند را بدست آورد (H. W. Müller) .

ضرایب شکل α_k برای میله های فاق دار متقارن و $\bar{\alpha}_k$ برای میله های فاق دار نامتقارن

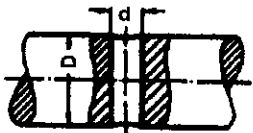

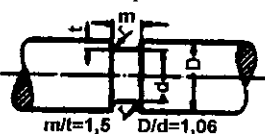

	میله تخت (تسمه) متقارن				میله گرد متقارن					
	فاق دار		پله دار		فاق دار			پله دار		
	z	b	z	b	z	b	t	z	b	t
A	0,10	0,08	0,55	0,40	0,10	0,12	0,40	0,44	0,40	0,40
B	0,7	2,2	1,1	3,8	1,6	4,0	15,0	2,0	6,0	25,0
C	0,13	0,20	0,20	0,20	0,11	0,10	0,10	0,30	0,80	0,20
k	1,00	0,66	0,80	0,66	0,55	0,45	0,35	0,60	0,40	0,45
l	2,00	2,25	2,20	2,25	2,50	2,66	2,75	2,20	2,75	2,25
m	1,25	1,33	1,33	1,33	1,50	1,20	1,50	1,60	1,50	2,00
$z = \text{کشش}$ $b = \text{خمش}$ $t = \text{پیچش}$										

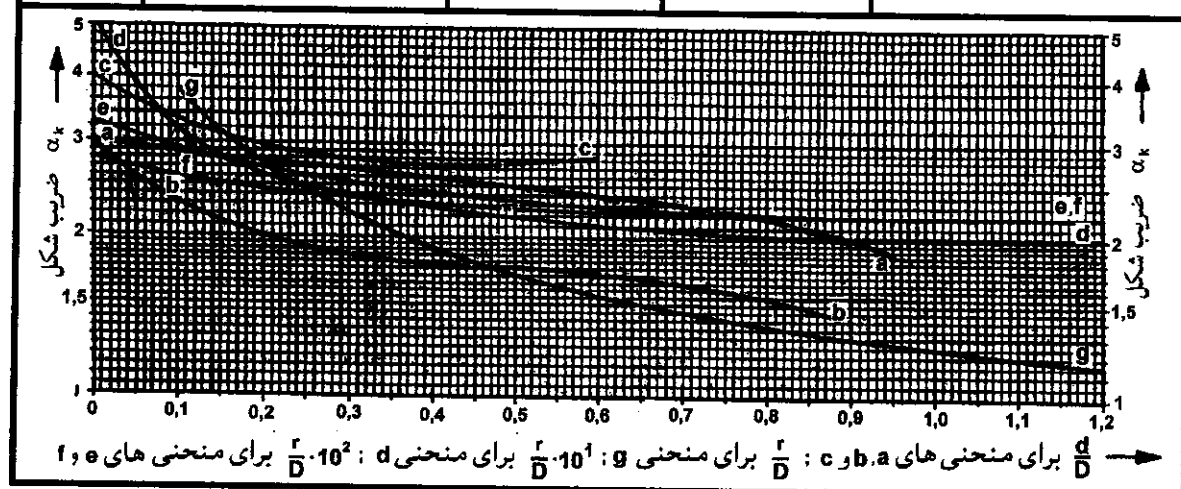
	میله تخت (نامتقارن)			
	فاق دار		پله دار	
	z	b	z	b
A	1,35	0,25	0,80	0,14
B	0,10	0,03	0,06	0,004
C	0,10	0,01	0,07	0,004
k	0,50	0,20	0,50	0,12
l	0,20	0,04	0,15	0,003
m	0,20	0,04	0,15	0,003
$z = \text{کشش}$ $b = \text{خمش}$				

شکل ۲-۴۹ ↑

شکل ۲-۵۰ ←

$$\alpha_k = 1 + \frac{1}{\sqrt{\frac{A}{\left(\frac{t}{r}\right)^k} + B \left[\frac{1 + \frac{a}{r}}{a \sqrt{\frac{a}{r}}} \right]^l + C \frac{\frac{a}{r}}{\left(\frac{a}{r} + \frac{t}{r}\right) \left(\frac{t}{r}\right)^m}}} \frac{\bar{\alpha}_k}{\alpha_k} = \frac{1}{\sqrt{1 + A \left(\frac{t}{a}\right)^k + B \left(\frac{t}{r}\right)^l + C \left(\frac{a}{r}\right)^m}}$$

منحنی	تصویر سیستم	مشخصات	بارگذاری	تنش نامی
a		شافت با سوراخ عرضی	کشش - فشار	$\sigma_n = \frac{F}{\frac{\pi \cdot D^2}{4} - D \cdot d}$
b			خمش	$\sigma_n = \frac{M}{\frac{\pi \cdot D^3}{32} - \frac{d \cdot D^2}{6}}$
c			پیچش ($\alpha_k = \frac{\tau_{\max}}{\tau_n}$)	$\tau_n = \frac{T}{\frac{\pi \cdot D^3}{16} - \frac{d \cdot D^2}{6}}$
d		شافت با شیار طولی	پیچش	$\tau_n = \frac{16 \cdot T}{\pi \cdot (\frac{7}{8} D)^3}$
e	 m/t=1,5 D/d=1,06	شیار مستطیل شکل برای واشر اطمینان طبق DIN 471	کشش	$\sigma_n = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot d^2}$
f			خمش	$\sigma_n = \frac{32 \cdot M}{\pi \cdot d^3}$
g		شافت تو خالی چهار گوش	پیچش	$\tau_n = \frac{T}{2 \cdot A_m \cdot d}$



جدول ۲-۵۱

ضرایب تأثیر فاق (تمرکز تنش مؤثر) β_k :

ضرایب β_k در خمش شافت هایی که روی آنها ^{تبری} گوی پرسی شده است

فرم	جنس شافت با $R_m (N/mm^2)$							
	400	500	600	700	800	900	1000	1100
A	2,1	2,4	2,6	2,9	3,1	3,5	3,8	4,1
B	1,8	2,1	2,3	2,5	2,7	3,0	3,3	3,6
C	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5	2,7	3,0	3,3
D	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	1,9	2,1

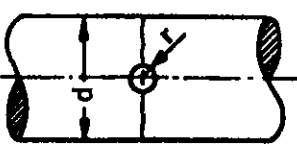
جدول ۵۲-۲

ضرایب β_k در خمش و پیچش شافت هایی که روی آنها یک جاخار (شیار) فرزکاری شده است

فرم	جنس شافت با $R_m (N/mm^2)$								
	خمش						پیچش		
	300	400	500	600	700	800	400	600	800
A	1,4	1,45	1,5	1,55	1,58	1,62	1,3	1,4	1,6
B	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	1,5	1,7	2,0

جدول ۵۳-۲

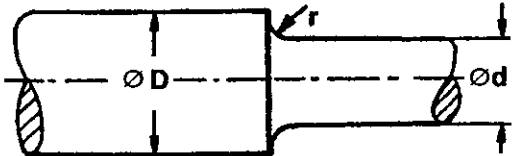
ضرایب β_k در خمش شافت هایی که دارای سوراخ های عرضی هستند

$\frac{r}{d}$	جنس شافت با R_m (N/mm^2)			
	400	500	1000	
0,05	1,4	1,5	1,55	
0,1	1,45	1,6	1,65	
0,15	1,4	1,55	1,7	
0,2	1,35	1,5	1,65	
0,3	1,25	1,35	1,45	

جدول ۵۴-۲

ضرایب β_{kt} برای پله های شافت در پیچش

برای نسبت قطر $D/d = 1,4$ مقادیر زیر معتبرند :								
r/d	0,025	0,05	0,075	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
R_m 600	1,6	1,4	1,27	1,2	1,12	1,08	1,08	1,08
1000	1,76	1,51	1,35	1,26	1,17	1,13	1,12	1,12



β_{kt} برای نسبت قطرهای دیگر D/d برابر است با :

$$\beta_{kt} = 1 + c_2 \cdot (\beta_{kt(D/d=1,4)} - 1)$$

که در آن $c_2 = f(D/d)$ از زیر بدست می آید

D/d	1,4	1,35	1,3	1,25	1,2	1,15	1,1	1,0
c_2	1,0	0,98	0,95	0,90	0,80	0,68	0,5	0,0

جدول ۵۵-۲

مقادیر تجربی ضرایب β_k برای جاخارها ، شیارهای محیطی (نیش زنی شده) و غیره

$\beta_k = 3 \cdot 5$	شافت زبانه دار (هزارخار) :
$\beta_k = 2 \cdot 2,5$	شافت دندانه دار :
$\beta_{kb} = 1,6$	شیار خار فنری (Seeger-Ring) ، $d = 20 \text{ mm}$ ، $R_m = 600 \text{ N/mm}^2$:
$\beta_{kb} = 1,9$	شیار خار فنری (Seeger-Ring) ، $d = 40 \text{ mm}$ ، $R_m = 600 \text{ N/mm}^2$:

جدول ۵۶-۲

ضرایب β_k در خمش شافت هایی دارای پله ، گاه تو خالی و شیارهای حلقه ای

فرم	$\frac{r}{d}$	جنس شافت با $R_m (N/mm^2)$				فرم A فرم B	
		400 ... 600	800	1000	1200		
A ... D	0	2,2 ... 2,7	3,4	3,5	4,5		
	0,05	1,7 ... 1,8	2,1	2,3	2,8		
	0,1	1,5	1,7	1,8	2,1		
	0,15	1,4	1,5	1,6	1,7		
	0,2	1,3	1,35	1,4	1,6		
	0,25	1,25	1,3	1,35	1,5		
E	0,1	1,36	1,64	1,68	1,72		
	0,2	1,22	1,4	1,42	1,45		
	0,3	1,18	1,32	1,34	1,36		
	0,4	1,13	1,24	1,26	1,27		
	0,6	1,1	1,16	1,17	1,18		
G و F	--	1,1	1,2	1,3	1,4		

مقادیر بالا مربوط به فرم های A ... D برای نسبت قطر $D/d = 2$ معتبر میباشند .
 برای نسبت قطرهای دیگر D/d مقادیر مربوط به فرم های A ... D برابر است با :

$$\beta_{kb} = 1 + c_1 \cdot (\beta_{kb(D/d=2)} - 1)$$

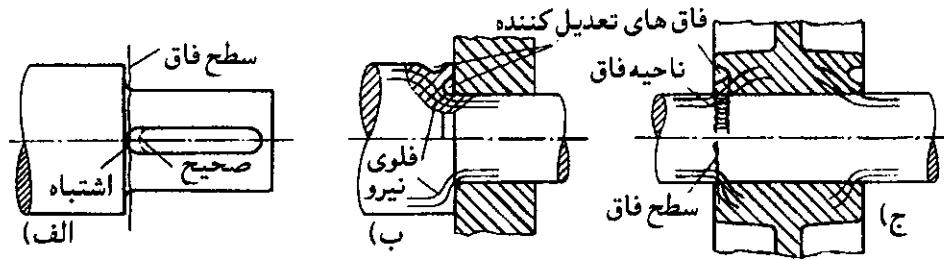
که در آن $c_1 = f(D/d)$ از زیر بدست می آید

D/d	2,0	1,8	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,0
c_1	1,0	0,95	0,85	0,78	0,7	0,58	0,44	0,0

شکل ۲-۵۷

تأثیر طراحی در تمرکز تنش (تأثیر فاق)

در صورتیکه طراحی قطعه بطور مناسبی انجام شود ، میتوان تا حد زیادی از تأثیر فاق جلوگیری نمود . اگر چندین فاق در یک سطح مقطع قرار گیرند (مثلاً پله شافت و جاخار در شکل ۲-۵۸ الف) ، در آنصورت ضریب β_k به مقدار زیادی افزایش می یابد که محاسبه آن بسیار پیچیده است . از چنین فاق هایی بایستی حتی الامکان اجتناب نمود . در مثال فوق بایستی برای جلوگیری از روی هم قرار گرفتن سطوح فاق و در نتیجه تمرکز شدید تنش مثلاً جاخار را با مقداری فاصله از پله شافت قرار داد . بر عکس بعضی از فاق ها ، که فاق های تعدیل کننده نامیده میشوند ، میتوانند تأثیر فاق های اصلی را

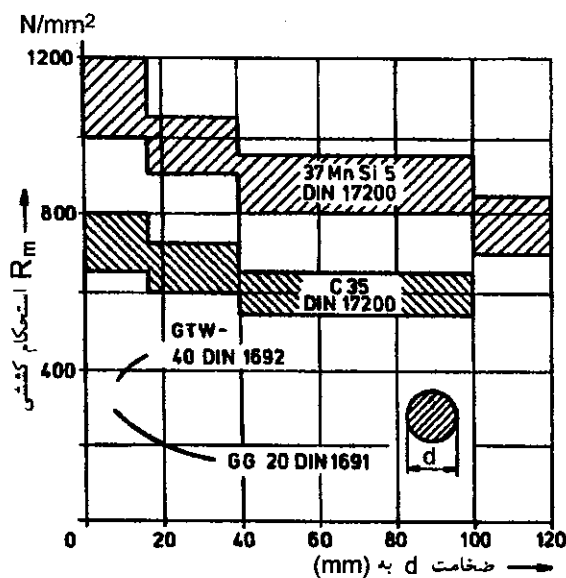


شکل ۵۸-۲

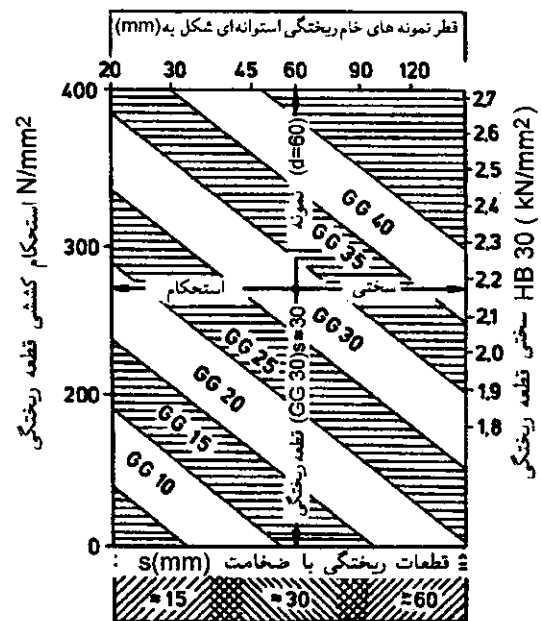
حتی کاهش دهند. وظیفه این فاق های تعدیل کننده آنست که فلوی نیرو را بصورت ملایم تری هدایت کنند (مثلاً در پله شافت شکل ۵۸-۲ ب) و یا اینکه انعطاف پذیری قطعه را طوری افزایش دهند که سطح فاق باریک به یک ناحیه عریض تر فاق تبدیل شود (مانند محل ثابت گلوله‌ای در شکل ۵۸-۲ ج). در تمام این موارد نوک ها و تمرکز تنش در اثر فاق کاهش می یابند. لازم به ذکر است که تدابیر فوق الذکر فقط جهت کاهش اثر فاق مربوط به قطعاتیکه میبایست ابعاد کوچکی داشته باشند و همچنین تحت بار سنگینی قرار گیرند سودمند است.

۲-۶-۲ تأثیر اندازه قطعه بر استحکام آن

معمولاً استحکام دائم قطعاتیکه دارای ابعاد بزرگتری نسبت به ابعاد نمونه های آزمایشگاهی هستند در نتیجه عوامل ناشی از فرآیند تولید کاهش می یابند (افزایش ناهمگنی، توزیع غیر یکنواخت ناخالصی ها، درجه بهسازی متفاوت و غیره). این کاهش استحکام دائم بویژه در بارگذاری خمشی و پیچشی فولادها مشهود است. برعکس در بارگذاری کششی و فشاری فولادها (بخاطر توزیع یکنواخت بار در سطح مقطع) کاهش استحکام کمتری مشاهده میشود. شکل ۵۹-۲ و ۶۰-۲ تأثیر اندازه قطعه را در استحکام کششی برای بعضی از فولادها و چدن ها نشان میدهد.



شکل ۵۹-۲



شکل ۶۰-۲

کاهش استحکام دائم قطعه در نتیجه تأثیر اندازه قطعه بوسیله ضریب اندازه b_1 ، که در آزمایش بدست می آید ، در نظر گرفته میشود . از جدول ۶۱-۲ میتوان ضرایب b_1 را در خمش و پیچش فولادها بدست آورد .

ضریب b_1 جهت در نظر گرفتن تأثیر اندازه قطعه در خمش و پیچش (برای فولادها) :

$d \text{ } \varnothing \text{ (mm)}$	10	15	20	30	40	60	120
b_1	1,0	0,98	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75
$d \geq 250 \text{ mm} \Rightarrow b_1 = 0,7$							

جدول ۶۱-۲

۳-۶-۲ تأثیر کیفیت سطح قطعه در استحکام آن

در مقایسه با نمونه های صیقل خورده (پولیش شده) ، سطوح خارجی قطعات در نتیجه فرآیند تولید و ماشینکاری دارای ناصافی و شیارهایی هستند که باعث تمرکز تنش (تأثیر فاق) اضافی در سطح قطعه میگرددند . این تأثیر در عمل بطور مجزا و مستقل از فاق های خارجی و داخلی دیگر مورد بررسی قرار میگردد . به این جهت تأثیر کیفیت سطح بوسیله ضریب سطح b_2 (جدول ۶۲-۲) بیان میگردد که تابعی است از جنس قطعه ، نوع بارگذاری و زبری سطح یا روش ماشینکاری .

ضریب b_2 جهت در نظر گرفتن تأثیر کیفیت سطح :

$R_m \text{ (N/mm}^2\text{)}$	300	400	500	600	700	800	1000
صیقل خورده (پولیش شده)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
بطور ظریف سنگ زده شده	1,0	0,99	0,985	0,98	0,975	0,972	0,97
سنگ زده شده و یا بطور ظریف پرداختکاری شده	0,97	0,96	0,95	0,94	0,935	0,932	0,93
پرداختکاری شده	0,93	0,92	0,91	0,90	0,89	0,885	0,88
خشن کاری شده	0,91	0,90	0,88	0,86	0,84	0,82	0,78
سطح نورد شده	0,80	0,74	0,67	0,61	0,56	0,51	0,43

جدول ۶۲-۲

۴-۶-۲ تأثیر سایر عوامل در استحکام قطعه

به غیر از تأثیر عوامل یاد شده در استحکام قطعه ، درجه حرارت های بالا و خوردگی نیز در استحکام دائم قطعه مؤثرند . اما کاهش استحکام فولادها تازه در درجه حرارتهای بالاتر از 200°C مشهود می باشد و با توجه به اینکه درجه حرارت قطعات در حالت کار بندرت به این اندازه افزایش می یابد از بررسی آن در اینجا صرف نظر میشود .

خوردگی در یک قطعه (خوردگی ترک و یا خوردگی ارتعاشی) نیز اغلب با عدم کارایی آن قطعه مترادف میباشد ، طوریکه محاسبه تأثیر آن نتیجه ای را در بر نخواهد داشت .

۵-۶-۲ نمودار استحکام شکل

بنابر آنچه تا بحال ذکر شد چنین نتیجه میشود که نمی توان از استحکام دائم ماده جهت محاسبات و تعیین استحکام در بارگذاری دینامیکی یک قطعه با طراحی و شکل دلخواه استفاده نمود ، بلکه برای این منظور بایستی استحکام دائم قطعه را که به آن استحکام شکل $\sigma_G(\tau_G)$ گفته میشود بکار برد .

استحکام شکل عبارت است از استحکام دائم یک قطعه با شکل و طراحی دلخواه که از طریق تنش های نامی مشخص میشود .
یا بعبارت دیگر : استحکام شکل همان استحکام دائم قطعه میباشد که در آن تمام عوامل مؤثر در استحکام در نظر گرفته شده اند .

تعیین (رسم) نمودار استحکام شکل

از مقادیر استحکام ماده ، یعنی مثلاً $(\sigma_w, \sigma_{Sch}, R_e)$ میتوان ابتدا نمودار استحکام دائم ماده ① که برای نمونه های آزمایشگاهی معتبرند را بدست آورد .
در صورتیکه σ_{Sch} معلوم نباشد میتوان این نمودار را بطور تقریبی نیز ترسیم نمود . برای این منظور بایستی از زوایای :

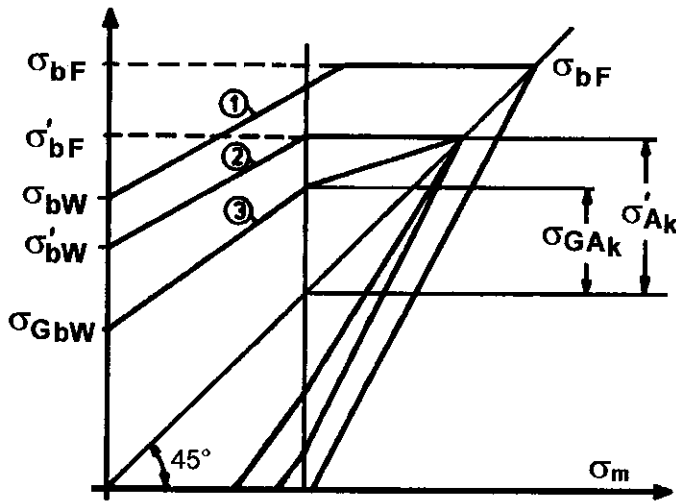
(برای خمش) $\beta = 36^{\circ}$ ، (برای کشش - فشار) $\beta = 40^{\circ}$ و (برای پیچش) $\beta = 42^{\circ}$

استفاده نمود . سپس محدوده استحکام دائم قطعه از طریق کاهش محدوده استحکام دائم ماده در دو مرحله صورت میگیرد .

اولین کاهش از طریق ضریب اندازه b_1 و دومین کاهش بوسیله ضریب سطح b_2 و همچنین ضریب تأثیر فاق β_k انجام میشود .

بایستی توجه داشت که برای تعیین b_2 و β_k از جداول مربوطه ، بیشترین مقدار R_m در جداول در نظر گرفته میشود . شکل ۶۳-۲ چگونگی تعیین (ترسیم) نمودار شکل را نشان می دهد .

استحکام
شکل



$$\sigma'_{bW} = b_1 \cdot \sigma_{bW}$$

$$\sigma'_{bF} = b_1 \cdot \sigma_{bF}$$

$$\sigma_{GbW} = \frac{b_2}{\beta_k} \cdot \sigma'_{bW}$$

$$\sigma_{GAk} = \frac{b_2}{\beta_k} \cdot \sigma'_{Ak}$$

(σ'_{Ak} از نمودار بدست می آید)

شکل ۲-۶۳

۷-۲ تنش های مجاز و ضریب اطمینان

۱-۷-۲ تنش های مجاز $(\sigma_{zul}(\tau_{zul}))$

بارهای استاتیکی :

محاسبات استحکام وقتیکه تنش های چند محوری همگن باشند ، برای سطح مقطعی که بیشترین بارها در آن اعمال میشود ، انجام می گیرد . در این حال بایستی تنش مقایسه σ_v با یک ضریب اطمینان S کمتر از مقدار مشخصه یک محوری ماده یعنی K باشد .

$$\sigma_v \leq \sigma_{zul} = K/S$$

برای قطعاتیکه تحت تنش چند محوری ولی کمی ناهمگن قرار دارند (مانند لوله های تحت فشار داخلی) میتوان از یک تنش مقایسه میانگین $\bar{\sigma}_v$ استفاده نمود ، که مقدار آن از میانگین اندازه تنش ها بدست می آید .

برای قطعاتیکه تحت تنش چند محوری ناهمگن قرار دارند (مثلاً تأثیر فاق در تغییر سطوح مقاطع) میتوان در سطح مقطعی که بیشترین بارها در آن اعمال میشوند ، در صورتیکه جنس قطعه از ماده ای نرم باشد ، تنش هایی را تا نزدیکی حد کاملاً پلاستیکی ماده اعمال نمود . مقدار مشخصه ماده K در اینجا برابر است با :

$$K = n_{pl.} \cdot R_e$$

که در آن $n_{pl.} = F_{pl.}/F_F \geq 1$ عبارت است از ضریب حمایتی ماده در بارگذاری .

بارهای دینامیکی :

اگر قطعه عملاً فاقد فاق بوده و یا تأثیر فاق قابل اغماض باشد ، در آنصورت استحکام دائم ماده بعنوان بزرگترین تنش ممکن در نظر گرفته میشود ($K = \sigma_D(\tau_D)$) یعنی :

$$\sigma_{zul}(\tau_{zul}) = \frac{\sigma_D(\tau_D)}{S}$$

در صورتیکه قطعه دارای فاقی باشد که تأثیر آن معین بوده و یا قابل محاسبه است، در آنصورت استحکام شکل $\sigma_G(\tau_G)$ بعنوان بزرگترین تنش ممکن در نظر گرفته میشود. بنابراین تنش مجاز برای قطعاتیکه تحت بار دینامیکی قرار دارند بطور کلی بصورت زیر تعریف میشود:

$$\sigma_{zul}(\tau_{zul}) = \frac{\sigma_G(\tau_G)}{S} = \frac{\sigma_D(\tau_D) \cdot b_1 \cdot b_2}{\beta_k \cdot S} \quad (\text{به } N/mm^2)$$

برای قطعاتیکه در آنها تأثیر فاق، اندازه و کیفیت سطح معلوم نباشد و یا قابل محاسبه نیست، میتوان برای تنش مجاز رابطه تقریبی زیر را نوشت:

$$\sigma_{zul}(\tau_{zul}) = \frac{\sigma_D(\tau_D)}{3 \dots 4} \quad (\text{به } N/mm^2)$$

برای تعیین ابعاد قطعات میتوان جهت محاسبه تنش های مجاز ضرایب اطمینان زیر را بکار برد.

$S \approx 2$ ، برای وقتیکه نیروهای خارجی دقیقاً قابل محاسبه نمی باشند یا تکرار حد اکثر بار 100% میباشد (مثلاً در موتورها، پمپ ها و توربین ها در کار دائم) و یا همچنین در بارهای ضربه ای.

$S \approx 1.5$ ، برای 50% تکرار حداکثر بار (مثلاً ماشینهای ابزار و نقاله، ماشینهای نیرو و یا کار با کار منقطع) و بالاخره در حالت معمولی

$S \approx 1.25$ ، با 25% تکرار حداکثر بار (مثلاً وسایل بالابر) و یا وقتیکه نیروهای خارجی در کار یکنواخت کاملاً معلوم بوده و یا در محاسبه قطعاتیکه شرایط کارشان کاملاً مشخص است.

مقادیر فوق برای ضرایب اطمینان، اندازه هایی تجربی هستند که در صورت وجود شرایط نامناسبتر میتوان آنها را افزایش داد.

۲-۷-۲ ضریب اطمینان S

بعد از اینکه ابعاد قطعه تعیین گردید و بارهای وارده بر آن مشخص شدند، بایستی قطعه از نظر ضریب اطمینان در برابر شکست دائم کنترل شود. مقدار ضریب اطمینان یا بصورت تجربی داده شده است و یا در صورت دقیق بودن شرایط اعمال بارها و سایر تأثیرات محاسبه میگردد.

مقادیر تجربی ضریب اطمینان:

مقدار ضریب اطمینان در برابر شکست برای بارهای استاتیکی بایستی معمولاً $S_B \geq 2$ باشد.

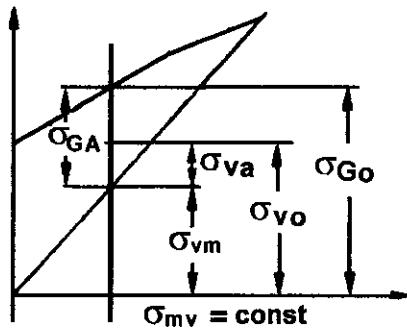
ضریب اطمینان در برابر شکست دائم وقتیکه قطعه تحت بار متناوب σ_W قرار گیرد باید 3 ... $S = 2$ باشد. در بارگذاری متناوب یک جهته میتوان برای ضریب اطمینان $S = 2$ را در نظر گرفت.

اگر محاسبات بر پایه ناپایدار شدن سیستم باشد (مانند کمانش، مچالگی)، در آنصورت برای ضریب

اطمینان $S \geq 3$ در نظر گرفته میشود. در صورتیکه بارها و ضرایب تمرکز تنش دقیقاً معلوم باشند میتوان از ضرایب اطمینان کوچکتری استفاده نمود.

تعیین ضریب اطمینان :

اگر تنش ها بصورت تنش میانگین مقایسه σ_{vm} و دامنه تنش مقایسه σ_{va} معلوم باشند، میتوان به کمک نمودار استحکام شکل ضریب اطمینان را تعیین نمود. در این حال میتوان بطور کلی سه حالت را از هم تفکیک نمود :



شکل ۶۴-۲

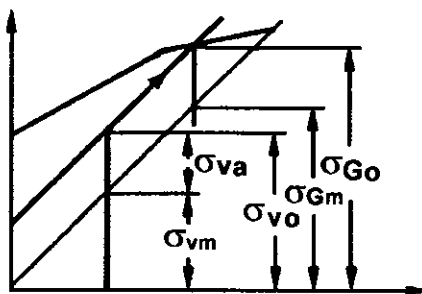
حالت (۱) :

تنش میانگین ثابت بوده و تغییرات تنش فقط در دامنه آن میباشد (شکل ۶۴-۲). در آنصورت ضریب اطمینان برابر است با :

$$S = \frac{\sigma_{GA}}{\sigma_{va}} \quad \text{یا} \quad S = \frac{\sigma_{Go}}{\sigma_{vo}}$$

حالت (۲) :

دامنه تنش σ_{va} ثابت در نظر گرفته میشود و افزایش بار فقط در نتیجه تنش میانگین میباشد (شکل ۶۵-۲). ضریب اطمینان در اینحال برابر است با :

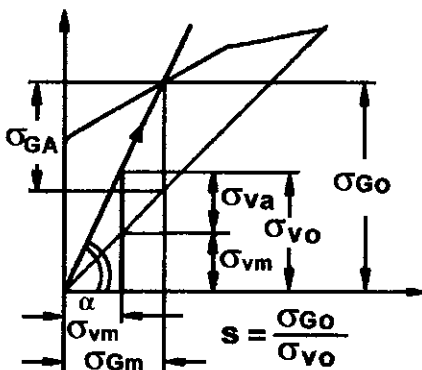


شکل ۶۵-۲

$$S = \frac{\sigma_{Gm}}{\sigma_{vm}} \quad \text{یا} \quad S = \frac{\sigma_{Go}}{\sigma_{vo}}$$

حالت (۳) :

در نتیجه افزایش بار هم دامنه تنش σ_a و هم تنش میانگین σ_m در قطعه به یک نسبت افزایش می یابند (شکل ۶۶-۲). در آنصورت ضریب اطمینان برابر است با :



شکل ۶۶-۲

$$S = \frac{\sigma_{Go}}{\sigma_{vo}} = \frac{\sigma_{GA}}{\sigma_{va}}$$

نسبت افزایش σ_a و σ_m بصورت خطی است که شیب آن برابر است با :

$$\tan \alpha = \frac{\sigma_{Go}}{\sigma_{vo}} = \frac{\sigma_{GA}}{\sigma_{va}}$$

۸-۲ تأیید استحکام دائم برای توزیع تنش های ناهمگن در اثر بارهای دینامیکی

از مقادیر استاتیکی \bar{F} , \bar{M}_t , \bar{M}_b و همچنین دینامیکی \tilde{F} , \tilde{M}_t , \tilde{M}_b میتوان بکمک روابط بدست آمده در مقاومت مصالح مقدار تنش های نامی استاتیکی $\bar{\sigma}_{z,d}$, $\bar{\tau}_t$, $\bar{\sigma}_b$ و دینامیکی $\tilde{\sigma}_{z,d}$, $\tilde{\tau}_t$, $\tilde{\sigma}_b$ را بدست آورد .

سپس با استفاده از تئوریهای استحکام انتخاب شده بایستی تنش های مقایسه را محاسبه نمود . در این حال باید توجه داشت که قسمتهای استاتیکی و دینامیکی تنش مقایسه بطور مجزا ، یعنی بصورت $\bar{\sigma}_v = \sigma_{vm}$ و $\tilde{\sigma}_v = \sigma_{va}$ تعیین گردند . مثلاً برای مقادیر تنش مقایسه مربوط به تنش های فوق با استفاده از تئوری انرژی تغییرشکل von Mises یعنی وقتیکه بارهای کششی ، خمشی و پیچشی اعمال شوند میتوان نوشت :

$$\bar{\sigma}_v = \sigma_{vm} = \sqrt{(\bar{\sigma}_b + \bar{\sigma}_z)^2 + 3\bar{\tau}_t^2} ; \quad \tilde{\sigma}_v = \sigma_{va} = \sqrt{(\tilde{\sigma}_b + \tilde{\sigma}_z)^2 + 3\tilde{\tau}_t^2}$$

روی هم گذاری جبری این تنش ها بصورت

$$\sigma_{vo,u} = \sigma_{vm} \pm \sigma_{va}$$

فقط وقتی صحیح است که

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \frac{\tau_a}{\tau_m} = const.$$

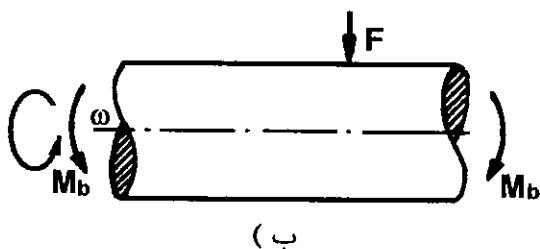
باشد . در صورتیکه شرط فوق برقرار نباشد ، آنگاه دستگاه مختصات اصلی تنش ها دوران می کند . با توجه به اینکه در باره تأثیر این دوران در رفتار استحکام مواد هنوز به اندازه کافی تحقیق نشده و از طرفی وابستگی استحکام ماده به جهت نیز در نظر گرفته نمی شود ، بطور کلی همیشه با بزرگترین اندازه تنش ها یعنی با جمع جبری آن محاسبه می گردد . برای مقایسه تنش $\sigma_{vo,u}$ با رفتار استحکام ماده و سپس تعیین ضریب اطمینان بایستی قبلاً از نمودار استحکام دائم معتبر ماده نمودار استحکام شکل را برای قطعه بدست آورد .

۹-۲ انواع مختلف بارگذاری و تنش های ناشی از آنها

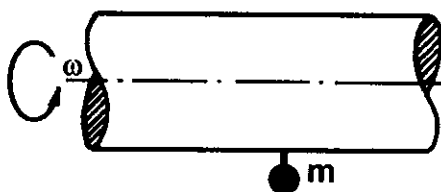
انواع بارها بصورت متفاوتی در تنش های مقایسه استاتیکی $\sigma_m(\bar{\sigma})$ و دینامیکی $\sigma_a(\tilde{\sigma})$ وارد میشوند . اکنون در اینجا عمده ترین بارگذاریها را در یک شافت دوار بررسی می کنیم .



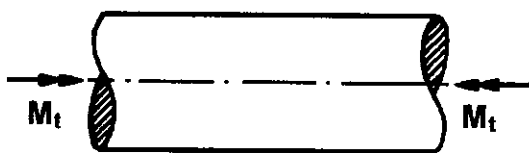
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۶۷-۲

شافت شکل مقابل (شکل ۶۷-۲ الف) تحت اعمال نیروی کششی F_z و یا فشاری F_d قرار می گیرد. به این ترتیب بارها بسته به اینکه استاتیکی و یا دینامیکی هستند در عبارات $\bar{\sigma}_{z,d}$ و یا $\tilde{\sigma}_{z,d}$ وارد میشوند.

اگر این شافت نسبت به یک نیروی عرضی F و یا گشتاور خمشی M_b دوران کند، همانطور که در شکل ۶۷-۲ ب) مشاهده میشود، در آن صورت شافت بطور دینامیکی بارگذاری میشود. حال اگر یک لایه بیرونی از این شافت را در نظر بگیریم، متوجه میشویم که چگونه این لایه یکبار بطور کششی در ناحیه بالایی و سپس بطور فشاری در ناحیه پایینی بارگذاری میشود. این بارها در تنش نرمال $\bar{\sigma}_b$ و یا همچنین در تنش برشی $\bar{\tau}_b$ (ناشی از برش عرضی) وارد میشوند.

اگر بر روی نقطه ثابتی از شافت، همانطور که در شکل ۶۷-۲ ج) مشاهده میشود، جرم m سوار شود، در نتیجه این شافت تحت بار گریز از مرکز قرار می گیرد. ولی این نیروی گریز از مرکز همراه شافت دوران می کند و به این ترتیب یک بار استاتیکی ایجاد می کند که در عبارت مربوط به تنش نرمال $\bar{\sigma}_b$ وارد میشود.

و بالاخره این شافت در صورت اعمال یک گشتاور پیچشی ثابت (شکل ۶۷-۲ د) بصورت استاتیکی بارگذاری میشود و بنابراین بار وارده در عبارت مربوط به $\bar{\tau}$ وارد میشود.

جدول ۲-۲ **مقادیر استحکام مواد معمول (بدست آمده برای نمونه هایی به قطر 10 mm)**

علامت اختصاری ماده	مقادیر استحکام به (N / mm ²)										خواص و نمونه هایی از موارد کاربرد
	R_m	σ_{bF} R_e τ_{tF}	HB	σ_{zSch}	σ_{zW}	σ_{bSch}	σ_{bW}	τ_{tSch}	τ_{tW}	مدول یانگ E	مدول برشی G
۱ - فولادهای ساختمانی عمومی طبق DIN 17100											
St 34	340 ۳۴۰ 420	300 220 130	950 ۹۵۰ 1200	220	160	280	170	130	100	210000	80000
قطعاتی کم اهمیتی که بار کمی به آنها اعمال میشود .											
St 37	370 ۳۷۰ 450	340 240 140	1050 ۱۰۵۰ 1250	240	170	320	190	140	110	210000	80000
فولادهای معمولی مخصوص ماشین سازی و سازه های فولادی ، برای بار های معمولی ، قابلیت خوب فلزکاری ، قابل جوشکاری											
St 42	420 ۴۲۰ 500	380 270 150	1200 ۱۲۰۰ 1400	270	190	380	220	150	130	210000	80000
قطعاتی با بارهای معمولی مانند : توبی ، گیره و دسته ، قابلیت خوب فلزکاری ، قابل جوشکاری											
St 50	500 ۵۰۰ 600	450 320 180	1400 ۱۴۰۰ 1700	320	220	400	250	180	150	210000	80000
محورها ، شافت ها ، اسپیندل ها و پین ها با بارهای متوسط ، قابلیت خوب ماشینکاری ، بطور مشروط قابل جوشکاری ، به سختی قابل سختکاری ، قابل استفاده در بارهای لغزشی											

ادامه جدول ۲-۲ مقادیر استحکام مواد معمول (بدست آمده برای نمونه هایی به قطر 10 mm)

علامت اختصاری ماده	مقادیر استحکام به (N/mm^2)										خواص و نمونه هایی از موارد کاربرد
	R_m	σ_{bF} R_e τ_{tF}	HB	σ_{zSch}	σ_{zW}	σ_{bSch}	σ_{bW}	τ_{tSch}	τ_{tW}	مدول یلنگ E	مدول برشی G
ادامه فولادهای ساختمانی عمومی طبق DIN 17100											
St 52	520 تا 620	450 340 190	1450 تا 1750	340	240	400	270	190	160	210000	80000
فولاد کیفی (مرغوب) در سازه های فولادی، قابلیت خوب جوشکاری											
St 60	600 تا 720	540 380 220	1700 تا 1950	380	260	530	320	220	180	210000	80000
قطعاتی که تحت بارهای زیاد و سایش کم قرار دارند . پین ها ، خارهای فنی ، گوه ها ، چرخنده ها ، پی نیون و حلزونی ، قابل سختکاری و بهسازی ، بطور مشروط قابل جوشکاری ، گران در فلزکاری											
St 70	700 تا 850	620 450 260	1950 تا 2400	450	320	620	370	260	200	210000	80000
قطعاتی که بایستی بارهای بسیار زیاد را تحمل نموده و بطور طبیعی سخت و مقاوم در برابر سایش باشند مانند: ایزارها ، قالب ها ، غلتک های نورد ، بادامک ها و اجزاء کنترل ، دارای قابلیت بسیار خوب سختکاری و بهسازی ، قابلیت بد ماشینکاری ، غیر قابل جوشکاری											

ادامه جدول ۲-۲ مقادیر استحکام مواد معمول (بدست آمده برای نمونه هایی به قطر 10 mm)

علامت اختصاری ماده	مقادیر استحکام به (N / mm ²)										خواص و نمونه هایی از موارد کاربرد
	R_m	σ_{bF} R_e τ_{tF}	HB	σ_{zSch}	σ_{zW}	σ_{bSch}	σ_{bW}	τ_{tSch}	τ_{tW}	مدول ینگ E	مدول برشی G
۲ - فولادهای قابل بهسازی (قابل عملیات حرارتی) طبق DIN 17200											
C22	500 تا 600	410 300 170	1550	280	210	350	250	160	140	210000	80000
C35 Ck35	600 تا 720	450 330 190	تا 1720	350	250	450	300	190	160	210000	80000
C45 Ck45	650 تا 800	530 390 210	تا 2060	390	290	530	350	210	170	210000	80000
C60 Ck60	750 تا 900	600 450 260	تا 2430	450	340	600	400	260	200	210000	80000

فولاد مخصوص پیچ که طبق DIN 1050 در سازه های فولادی هم بکار می رود

شافت ها ، تویی ها و ستون های محوری که تحت بارهای زیاد قرار دارند و در برابر سایش مقاوم هستند

چرخنده ها و حلزونی هایی با دندانه های سخت

نوع بارگذاری					عمومی	مفاهیم
کشش	فشار	خمشی	برش	پیچش		
σ_z	σ_d	σ_b	τ_a	τ_t	σ, τ	تنش
σ_{zul}	$\sigma_{d\ zul}$	$\sigma_{b\ zul}$	$\tau_{a\ zul}$	$\tau_{t\ zul}$	σ_{zul}, τ_{zul}	تنش مجاز
استحکام کششی	استحکام فشاری	استحکام خمشی	استحکام برشی	استحکام پیچشی	σ_B, τ_B	استحکام استاتیکی (استحکام شکست)
R_m	σ_{dB}	σ_{bB}	τ_{aB}	τ_{tB}		
حد تسلیم	حد لهدگی	حد خمشی	-	حد پیچش	σ_F, τ_F	حد سیلان
R_e	σ_{dF}	σ_{bF}	-	τ_{tF}		
$R_{p0,2}$	-	-	-	-	$R_{p0,2}$	۰,۲ حد انبساط
σ_{zD}	σ_{dD}	σ_{bD}	-	τ_{tD}	σ_D, τ_D	استحکام دائم
استحکام کششی - فشاری متناوب	استحکام متناوب خمشی		-	استحکام متناوب پیچشی	σ_W, τ_W	استحکام متناوب خالص
σ_{zdW}	σ_{bW}		-	τ_{tW}		
استحکام کششی یک جهته متناوب	استحکام فشاری یک جهته متناوب	استحکام متناوب خمشی یک جهته	-	استحکام متناوب پیچشی یک جهته	σ_{Sch}, τ_{Sch}	استحکام متناوب یک جهته
σ_{zSch}	σ_{dSch}	σ_{bSch}	-	τ_{tSch}		
σ_{nD}					σ_{nD}, τ_{nD}	استحکام دائم نامی
τ_{nD}						
σ_G					σ_G, τ_G	استحکام شکل
τ_G						

