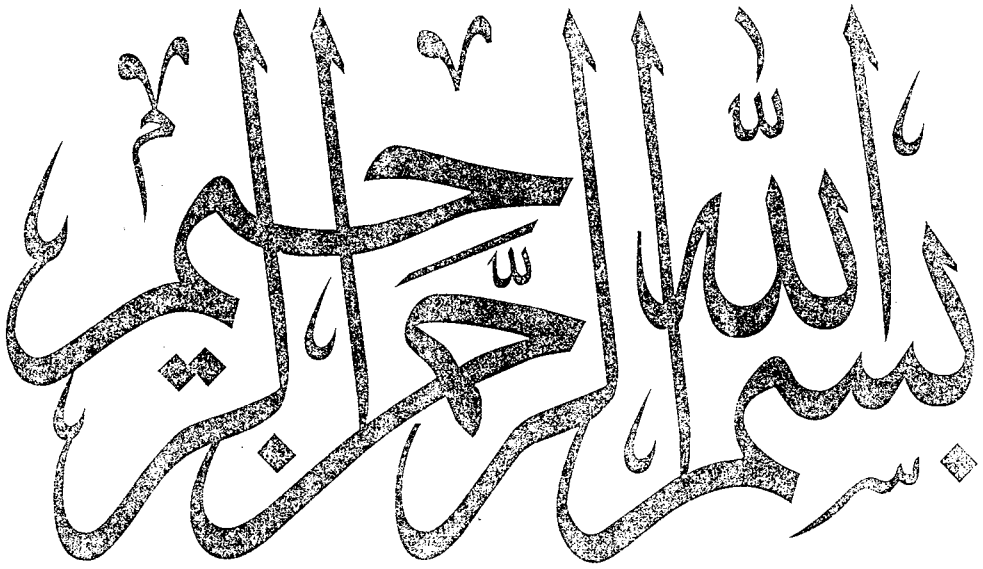

بسم الله الرحمن الرحيم

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

دانشکده مکانیک

گزارش نهایی طرح پژوهشی

عنوان طرح:

تهیه نرم‌افزاری برای طراحی فنرهای مارپیچ

مجری:

محمود شریعتی

همکار:

کاوه اشکفتی

دانشگاه صنعتی شاهرود و

شرکت تولیدی و صنعتی فنرلول ایران

آذرماه ۱۳۸۳

این طرح با استفاده از اعتبارات پژوهشی دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شده است و تاریخ‌های تصویب و خاتمه آن به ترتیب ۸۲/۹/۱۶ و ۸۳/۱۰/۲۷ می‌باشد.

تهیه نرم‌افزاری برای طراحی فنرهای مارپیچ

چکیده

این گزارش شامل مطالب زیر می‌باشد:

ابتدا به معرفی انواع مواد مخصوص فنر ، کاربرد و ویژگی‌های هر یک پرداخته شده است . سپس انواع فنرهای مارپیچ و چگونگی طراحی آنها معرفی شده است. انواع فنرهایی که نحوه طراحی آنها در این گزارش آورده شده است، عبارتند از:

۱- فنرهای فشاری مارپیچ

۲- فنرهای کششی مارپیچ و

۳- فنرهای پیچشی مارپیچ

در انتها نرم‌افزار تهیه شده و نحوه عملکرد آن معرفی شده و همچنین طراحی چند فنر واقعی و جواب‌های خروجی آن آورده شده است.

جواب‌های خروجی نرم‌افزار با نتایج حاصل از آزمایش‌های عملی و همچنین نرم‌افزارهای مشابه قابل دسترس، مقایسه شده است و نتایج آن کاملا صحیح و قابل قبول می‌باشد.

تقدیر و تشکر

بدینوسیله از دانشگاه صنعتی شاهرود و شرکت تولیدی و صنعتی فنرلول ایران که مساعدت‌های لازم در خصوص انجام این پروژه را به عمل آوردند، صمیمانه تقدیر و تشکر می‌کنیم. به ویژه از جناب آقای دکتر قاسمی، معاون پژوهش و فناوری، جناب‌آقای دکتر کرمی، مدیر کل محترم امور پژوهشی و ارتباط با صنعت و سرکار خانم آزادخواه، کارشناس محترمه امور پژوهشی دانشگاه و همچنین جناب آقای مهندس نجفی‌منش، مدیرعامل محترم کارخانه فنرلول و جناب آقای مهندس زرگری، مدیر محترم بخش مهندسی و تحقیق و توسعه کارخانه، و کلیه کسانی که به هر طریق ما را در ادامه این کار یاری کردند، صمیمانه تشکر می‌کنیم.

فهرست مطالب

فصل اول : مقدمه ۱

فصل دوم : مواد مخصوص فنر ۳

۱- عناصر شیمیایی فولادهای فنر ۳

۲- فولادهای فنری پرکربن ۶

۲-۱ فولادهای فنری سیم موزیک ۷

۲-۲ فولادهای فنر کشیده شده به صورت سخت ۹

۲-۳ فولادهای فنری تمپر شده با روغن ۱۲

۲-۴ فولادهای فنر سوپاپ ۱۴

۲-۵ فولاد فنری پرکربن مخصوص سوپاپ ۱۴

۳- فولادهای فنر آلیاژی ۱۶

۳-۱ فولادهای فنری کروم- وانادیوم مخصوص سوپاپ ۱۸

۳-۲ مفتول فولادی فنر آلیاژی کروم - سیلیسیوم ۲۰

۴- مفتول فولاد زنگ نزن ۲۲

۵- متالورژی آلیاژهای پایه مس ۲۵

۵-۱ مفتول و ورق فنر برنجی ۲۷

۵-۲ مفتول و ورق فسفر-برنز ۲۹

۵-۳ مفتول و ورق بریلیوم-مس ۳۰

۶- مونل ۴۰۰ : مفتول فنر ۳۵

۷- مونل ۵۰۰- k : مفتول فنر ۳۷

۸- مفتول و ورق اینکونل ۶۰۰ ..... ۳۹

۹- مفتول فنر اینکونل X-۷۵۰ ..... ۴۱

۱۰- آلیاژهای مدول ثابت ۴۴

۱۱- مواد دیگر ۴۶

فصل سوم : طراحی فنرهای مارپیچ ۴۹

۱- طراحی فنرهای مارپیچ فشاری ۴۹

۱-۱ مقدمه ۴۹

۱-۲ فهرست علایم ۵۰

۱-۳ اندیس فنر ۵۰

۱-۴ انواع انتهای فنر ۵۱

۱-۵ جهت حلقه‌پیچی ۵۴

۱-۵ جهت حلقه‌پیچی ۵۴
۱-۶ تعداد حلقه‌ها ۵۴
۱-۷ طول بسته ۵۵
۱-۸ محاسبات سفتی فنر ۵۶
۱-۹ نمودار نیرو-جابجایی ۵۷
۱-۱۰ محدوده پسماند ۵۹
۱-۱۱ تنش‌های مجاز ۶۰
۱-۱۲ محاسبات تنش ۶۰
۱-۱۳ زاویه مارپیچ ۶۳
۱-۱۴ روش طراحی ۶۴
۱-۱۵ کمانش فنرهای فشاری مارپیچ ۶۴
۲- طراحی فنرهای کششی مارپیچ ۴۹
۲-۱ مقدمه ۶۸
۲-۲ رفتار بار-جابجایی ۶۹
۲-۳ فنرهای کششی استاندارد ۷۱
۲-۴ روابط طراحی ۷۱
۲-۵ محاسبه تنش ۷۳
۲-۶ جزئیات طراحی ۷۳
۲-۷ تنش‌های کاری مجاز حداکثر ۷۶
۲-۸ خستگی فنرهای کششی ۷۸
۲-۹ ملاحظات متفرقه طراحی ۷۹
۲-۱۰ خلاصه‌ای از عوامل طراحی ۸۰
۳- طراحی فنرهای پیچشی مارپیچ ۸۱
۳-۱ مقدمه ۸۱
۳-۲ شکل‌های مختلف شاخک فنر ۸۱
۳-۳ روش عملکرد ۸۳
۳-۴ تغییرات ابعادی ۸۴
۳-۵ وضعیت شاخک‌ها نسبت به یکدیگر ۸۵
۳-۶ محاسبه گشتاور پیچشی ۸۶
۳-۷ محاسبه جابجایی ۸۷
۳-۸ محاسبه سفتی ۸۸
۳-۱۰ محاسبه طول بدنه ۹۰
۳-۱۱ محدوده پسماند ۹۰
۳-۱۲ تعیین حلقه‌ها ۹۰
۳-۱۳ تنش‌های مجاز ۹۲

٤- آزمایش‌های خستگی فنرها ۹۴
۴-۱ تعاریف ۹۵
۴-۲ تنش‌های طراحی ۹۶
۴-۳ کارسبک ۹۹
۴-۴ کارمتوسط ۱۰۰
۴-۵ کاردشوار ۱۰۰

فصل اول

مقدمه

با توجه به روند صنعتی شدن کشور و رشد روزافزون صنایع، به نرم‌افزارهای طراحی جهت کاهش زمان و هزینه طراحی، به شدت احساس نیاز می‌شود. فنرها از جمله قطعات مکانیکی هستند که دارای کاربردهای بسیار متنوع به ویژه در خودروها، ماشین آلات صنعتی و قالب‌ها می‌باشند. این جزء مکانیکی در ابعاد بسیار کوچک (مثل فنر یک خودکار فشاری و حتی کوچکتر) تا ابعاد بسیار بزرگ (مثل فنر واگن قطار) طراحی و تولید می‌شوند. فنرها در عمل ممکن است تحت تاثیر نیروهای استاتیکی، دینامیکی ، دماهای بسیار پایین تا دماهای بسیار بالا یا شرایط خوردگی و زنگ زدگی شدید قرار گیرند. هر یک از عوامل فوق، وضعیت کاری فنر را دشوار کرده و احتمال شکست و زوال آنرا بالا می‌برد. به ویژه فنرهایی که تحت تاثیر بارهای تکراری قرار دارند، دچار پدیده خستگی شده و عمر آنها به شدت کاهش می‌یابد.هر طراح فنر، باید در هنگام طراحی ، اثر هر یک از عوامل فوف را به دقت درنظر گرفته و در محاسبات خود بگنجاند.

فنرهای مکانیکی به چندین دسته تقسیم می‌شوند که عبارتند از: فنرهای کششی، فشاری، مارپیچی، تخت، بشقابی، برگی و فنرهای خاص. هریک از فنرهای فوق دارای کاربرد و روش طراحی مخصوص به خود می‌باشند. فنرها به دلیل تنوع کاری زیادی که دارند، از تنوع هندسی و شرایط کاری فراوانی نیز برخوردارند(هم اکنون در کارخانه فنرلول ایران صدها نوع فنر تولید می‌شود). لذا طراحی فنرهای با هندسه-های متفاوت به صورت دستی، کاری مشکل، وقت‌گیر و پرهزینه می‌باشد و به افراد متخصص و کارشناس نیاز دارد.

لذا در این طرح درنظر است تا نرم‌افزاری برای طراحی انواع فنرهای مکانیکی تهیه شود، تا به کمک آن بتوان در زمانی کوتاه و با هزینه‌ای اندک و حتی توسط یک اوپراتور غیرمتخصص ولی آموزش دیده، انواع فنرها را به آسانی طراحی کرد. این نرم افزاز در محیط Windows فعال بوده و از قابلیت‌های گرافیکی، سرعت و دقت بالایی برخوردار خواهد بود به طوری که پس از طراحی، نقشه اجرایی و ساخت فنر در خود محیط آماده و ترسیم شده و می‌توان مستقیما آنرا برای تولید به اوپراتور فنرپیچی تحویل داد.

فصل دوم

مواد مخصوص فنر

۱- عناصر شیمیایی فولادهای فنر و تاثیر آنها بر روی خواص فنر

آهن عنصر غالب در شیمی فولاد است اما در آنالیز آن ذکر نمی‌شود. بدیهی است که بعد از همه عناصر آلیاژی که در ترکیب شیمیایی نشان داده شده، مقدار درصد باقیمانده تا ۱۰۰ درصد، از آن آهن می‌باشد - عناصر آلیاژی به فولادهای فنر در حین فرآیند ذوب اضافه می‌شوند. این عناصر بطور متناوب با درصد مشخصی از آهن ترکیب شده تا آلیاژهای آهنی بدست آید و سپس همگی بطور کامل با مذاب ترکیب می‌شوند. این عناصر آلیاژی استحکام کششی، سختی و چقرمگی فولاد را افزایش می‌دهند.

فولادهای فنر غالبا مشابه با فولادهای معمولی بوده، جز اینکه دقت و تعداد عملیات بیشتری برای تولید آنها لازم است و مقادیر کربن بیشتری در آنها استفاده می‌شود. به عنوان مقایسه، محدوده کربن استفاده شده در فولاد ماشینی SAE 1020 که معمولا برای محورها بکار گرفته می‌شود، همچنین انواع پیچها و فولادهای ساختمانی برابر ۰/۱۵ تا ۰/۲۵ درصد است، حال آنکه محدوده کربن در مفتول موزیک برابر ۰/۸ تا ۰/۹۵ درصد می‌باشد (یعنی حدود چهار تا پنج برابر). تاثیر عناصر شیمیایی بر فولادهای فنرپرکربن در ادامه بطور خلاصه ذکر شده است.

- **کربن**

عنصر کربن در فولاد، استحکام کششی، حدالاستیک و سختی را افزایش داده ولی چکش خواری، چقرمگی و مقاومت در مقابل شوک حرارتی و ضربه را کاهش می‌دهد. فولادهای محتوی کمتر از ۰/۴۰ کربن، در عملیات حرارتی به منظور دستیابی به یک سختی یکنواخت، همیشه پاسخ مناسبی نمی دهند. در فولادهای پر کربن، ترکیب یوتکتیک، تقریبا حاوی ۰/۸۵ در صد کربن می باشد. فولادهای فنر به ندرت حاوی بیشتر از ۱/۰۵ درصد کربن می‌باشند، زیرا برای مقادیر بالاتر باعث شکست ناشی از تردی زیاد می شود، بدون آنکه سختی افزایش یابد. تیغ‌های ریش تراشی و ابزار حکاکی و سنگ حاوی حدود ۱/۳۰ درصد کربن و چدن دارای ۲/۵ تا ۴/۰ درصد کربن می‌باشند.

- **منگنز**

افزودن منگنز به مذاب باعث می‌شود تا فولاد بدست آمده آسانت نورد، فورج و کشیده شود وجود آن به همان اندازه کربن ضروری است، زیرا باعث می‌شود که فولاد سریع و عمیق سخت شود. بدلیل خاصیت سخت‌شوندگی عمیق فولادهای فنر باید آب با روغن کوئیچ شوند تا از ترک برداری پرهیز شود. بدون منگنز، فولادفقط در فاصله کمی از سطح خارجی سخت می‌شود و بخش‌های مرکزی (هسته فولاد) نرم باقی می ماند. اغلب فولادهای فنر حاوی حدود ۰/۶۰ تا ۱/۲۰ درصد منگنز هستند ، حداقل مقداری است که باید وجود داشته باشد مفتول موزیک دارای ۰/۲ تا ۰/۶ درصد منگنز می باشد .

- **سیلیسیوم**

اغلب فولادهای فنر حاوی ۰/۱ تا ۰/۳ درصد سیلیسیوم می باشند ، ولی اضافه کردن سیلیسیوم به فولادهای پرکربن معمولی در محدوده ۱/۸ تا ۲/۲۰ درصد ،استحکام کششی را افزایش داده بدون آنکه نرمی یا چقرمگی از دست برود. همچنین سیلیسیوم، کارگرم بر روی فولاد را آسان می‌کند. به عنوان یک آلیاژ، سیلیسیوم هرگز به تنهایی یا با کربن استفاده نمی‌شود. یک عنصر سخت کننده عمقی، معمولا منگنز در حدود ۰/۶ تا ۰/۹ درصد به آن افزوده می‌شود و آلیاژ حاصله، سیلیکون ـ منگنز نامیده می‌شود که یک فولاد فنر آلیاژی مهم می‌باشد.

- **فسفر و گوگرد**

فسفر و گوگرد ناخالصی بوده و هز دو از نامناسب‌ترین عناصر موجود در فولاد فنر می‌باشند. آنها استحکام کششی، نرمی و مقاومت در مقابل شوک و ضربه را کاهش داده و تردی را افزایش می‌دهند. به همین دلیل،

تـا جایی که امکان دارد، باید مقدار آنها محدود نگهداشته شود. حداکثر مقدار مجاز هر کدام در هر فولاد فنر برابـر ۰/۰۵۵ درصـد مـی‌باشـد کـه البـته مقادیـر کمـتر ترجیح داده می‌شود مقدار واقعی هر کدام در اغلب ترکیـب‌هـا کمتر از نصف ۰/۰۵۵ درصد است. در فولاد ماشینی، گاهی اوقات این عناصر عمدا اضافه می‌گردد تـا راحـت‌تـر ماشینکاری شوند ولی چنین فولادهایی به لحاظ کیفیت برابر با فولادهای فنر نیستند و همانند فولادهای فنر نیز عملیات حرارتی نمی‌شوند.

عـلاوه بـر عناصر فوق‌الذکر که اغلب در فولادها وجود دارند، عناصر آلیاژی دیگری نیز برای افزایش استحکام کششـی، سختی، مقاومت در مقابل درجه حرارت‌های بالا و شوک و ضربه استفاده می‌شوند. این عناصر که با هدف خاصی به فولاد اضافه می‌شوند، در ادامه توضیح داده شده‌اند.

- **کروم**

اضافه کردن مقدار کمی، معمولا در حد ۰/۸۰ تا ۱/۲۰ درصد، استحکام کششی، سختی و چقرمگی را افزایش داده ضرورت استفاده از مقدار کربن زیاد را کاهش داده، مقاومت فولاد در مقابل تخریب‌های اسیدی و قلیایی را افـزایش داده و فـولاد را قـادر مـی‌سـازد تـا در مقابل دماهای بالا مقاومت کند.کروم همانند منگنز، باعث مـی‌شود تا سختی در عمق بیشتری از سطح نفوذ کند ولی بر خلاف منگنز، دمای لازم برای سخت شوندگی را افـزایش مـی‌دهـد. فولادهای زنگ‌نزن مقاومت در مقابل خوردگی خود را از طریق افزودن کروم در مقادیر متفاوتی از ۱۲ تا ۲۰ درصد، کسب می‌کنند.

- **کبالت**

کبالت یکی دیگر از عناصر آلیاژی است که در تعداد زیادی از فولادهای مخصوص، به ویژه در فولادهای ابزار تندبر، سوپاپ‌ها، مته‌ها و دیگر محصولات یافت می‌شود. تاثیر اصلی آن افزایش سختی قرمز است، چیزی که ابزارهای برشی در سرعت‌های عملکردی بالا به آن نیاز دارند.

- **مولیبدن**

مولیـبدن، مانـند کـروم، مقـدار نفوذ سختی را افزایش داده و فولاد را به سوی سخت کردن با روغن متمایل می‌کند. همچنین مولیبدن چقرمگی فولاد و توان تحمل در مقابل درجه حرارت‌های عملکردی بالا را افزایش داده و مکـررا به جای تنگستن استفاده می‌شود. همانند تنگستن از آن به عنوان فیلامنت در تیوب‌های خلاء استفاده می‌شود.

- **نیکل**

نـیکل دمـای سخت کردن را پایین آورده و فولاد را آماده سخت کردن با روغن می‌کند. گرچه تاثیر کمی بر روی سـختی‌پذیری فولاد دارد، ولی چقرمگی و مقاومت به سایش آن را افزایش می‌دهد. اگر به مقدار زیادی یعنـی حـدود ۷ تـا ۸ درصد به همراه ۱۸ درصد کروم به فولاد افزوده شود، باعث می‌شود فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی تشکیل شوند و سختی آن از طریق گرم کردن و کوئنچ کردن تاثیری نمی‌پذیرد.

- **تنگستن**

تنگسـتن کـه گاهی هم ولفرامیت نامیده می‌شود، بعد از جدایش از سنگ معدنی که از آن بدست می‌آید، به مقـدار ۴ درصـد به فولادهای کربنی افزوده می‌شود تا فولادهای ابزار بسیار سختی را بوجود آورد. هنگامیکه ۱۲ تـا ۲۰ درصـد تنگسـتن بـه همراه کروم به فولاد افزوده شود فولاد ابزاری با سختی قرمز حاصل می‌شود. فولادهـای ابـزار ۱ـ۴ـ۱۸ که حاوی ۱۸ درصد تنگستن، ۴ درصد کروم و ۱ درصد وانادیوم هستند، فولادهای ابزار تندبر مهمی بوده و می‌توان از آن برای فنرهایی که در درجه حرارت‌های بالا کاربرد دارند، استفاده کرد.

- **وانادیوم**

افـزودن مقـدار کمـی وانـادیوم در حـدود ۰/۱۵ تـا ۰/۲۵ درصد، استحکام کششی، حدالاستیک، چقرمگی و همچنین مقاومت در مقابل شوک و ضربه را افزایش می‌دهد. اگر با کروم بکار گرفته شود، عمر خستگی و حد تحمـل فولادهـا را نـیز بـالا مـی‌برد. وانادیوم اندازه دانه را در حد دلخواه کوچک نگه می‌دارد و رشد دانه که ممکن است در اثر افزایش دماهای ناگهانی ایجاد شود را کاهش می‌دهد.

۲- فولادهای فنری پرکربن

مرسـوم‌تریـن نـوع مواد فنر، فولادهای فنری پرکربن هستند که از طریق کشش سخت ـ تولید می‌شوند. این مواد در ابعاد و اندازه‌های مختلف قابل دسترسی هستند. از لحاظ اقتصادی، استفاده از فولادهای نری پرکربن، اگر امکان داشته باشد، ارجحیت دارد.

۲-۱ فولاد فنری سیم موزیک

- **توصیف**

سیم موزیک با کیفیت‌ترین و معمول‌ترین فولاد فنری پرکربن سرد کشیده شده‌ای است که مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فولاد فنر دارای استحکام کششی و حد الاستیک بالا بوده و میتواند در بارهای تکراری ، تنش های زیادی را تحمل کند. این فولاد فنر تحت نام تجاری ASTM A228 شناخته می شود.

- **کاربردها**

سیم موزیک بهترین و چقرمه ترین فولاد فنر بوده ودر حد وسیعی برای ساخت فنرهای کوچک استفاده میشود این فولاد فنر در قطرهای حدود ۰/۱ تا 5mm و حتی بیشتر تولید می‌شود. گرچه این فولاد چقرمه و با دوام است ولی فنر ساخته شده از آن نباید در معرض دماهای بالاتر از (۱۲۰°C) ۲۵۰°F قرار گیرد، زیرا در دماهای بالا به سرعت تحمل بار آن کاهش می‌یابد. این فولاد فقط برای فنرهایی که به صورت سرد حلقه می‌شوند مورد استفاده قرار می‌گیرد.

- **ترکیب شیمیایی**

ترکیب شیمیایی فولاد سیم موزیک ASTM A 228 در جدول ۱ آورده شده است.

- **استحکام کششی**

سیم موزیک استحکام و سختی خودش را از طریق فرآیند کششی سرد می‌گیرد. استحکام کششی این سیم با توجه به اندازه قطر متفاوت است. مفتول‌هایی که از طریق کشش سرد تولید شده‌اند، استحکام کششی آنها از (۲۴۸۰MPa) ۳۶۰/۰۰۰psi تا (۲۶۲۰ MPa) ۳۸۰/۰۰۰psi متغیر می‌باشد.

جدول ۱ـ ترکیب شیمیایی سیم موزیک (درصد)

عنصر	ASTM A 228
کربن	۰/۷۰ـ۱/۰۰
منگنز	۰/۲ـ۰/۶۰
سیلیسیوم	۰/۱۰ـ۰/۳۰
فسفر	حداکثر ۰/۰۲۵
گوگرد	حداکثر ۰/۰۳۰

- **خواص مکانیکی سیم موزیک**

حدالاستیک: درصدی از استحکام کششی؛ در کشش ۶۵ تا ۷۵ درصد و در پیچش ۴۵ تا ۵۰ درصد.

سختی (راکول): ۴۲ تا ۴۶ راکول C.

هدایت الکتریکی : در مقایسه با مس ۸ تا ۱۲ درصد.

خـواص خمشـی: در همـه قطـرها باید قادر باشد تا حول یک میله با قطری برابر قطر مفتول خود، خمیده شود، بدون آنکه بشکند ویا سطح آن ترک بردارد. همچنین یک فنر کششی با حلقه‌های بسته به طول (۵in) ۱۲۷mm که بر روی میله‌ای به قطر ۳ تا ۳/۵ برابر قطر مفتول پیچیده شده باشد قادر باشد تا طول (۱۵in) ۳۸۰mm کشیده شود، در حالیکه دارای گام یکنواختی بوده و هیچگونه شکاف یا شکستگی در آن رخ ندهد.

وزن مخصوص: ۷/۸۵ گرم بر هر سانتی‌متر مکعب.

- **عملیات حرارتی سیم موزیک**

همسان‌سازی تنش: فنرهای ساخته شده از این ماده را می‌توان به منظور حذف تنش‌های پسماند حاصل از حلقه پیچی و یکنواخت‌سازی تنشها تحت عملیات حرارتی تنش زدائی قرار داد و :

برای کاربردهای عادی: (۴۲۰^0F تا ۴۰۰) ۲۱۵^0C تا ۲۰۰

برای کاربردهای سخت: (۵۰۰^0F تا ۴۵۰) ۲۶۰^0C تا ۲۳۰

برای کاربردهای در دمای بالا: (۵۵۰^0F تا ۲۵۲) ۲۹۰^0C تا ۲۷۵

بعضی دیگر از خواص سیم موزیک در جداول ۲ تا ۴ آورده شده است.

جدول ۲ـ مدول الاستیسیته

قطر مفتول		E کشش		G پیچش	
(mm)	(in)	(Mpa)	(psi)	(Mpa)	(psi)
تا ۰/۸۰	تا ۰/۰۳۲	۲۰۳۴۰۰	۲۹/۵۰۰/۰۰۰	۸۲۷۰۰	۱۲/۰۰۰/۰۰۰
۰/۸۱_۱/۶	۰/۰۳۳_۰/۰۶۳	۲۰۰۰۰۰	۲۹/۰۰۰۰۰۰	۸۱۷۰۰	۱۱/۸۵۰۰۰۰
۱/۶۱_۳/۲	۰/۰۶۴_۰/۱۲۵	۱۹۶۵۰۰	۲۸/۵۰۰/۰۰۰	۸۱/۰۰۰	۱۱/۷۵۰/۰۰۰
۳/۲	بالاتر از ۰/۱۲۵	۱۹۳۰۰۰	۲۸/۰۰۰/۰۰۰	۸۰/۰۰۰	۱۱/۶۰۰/۰۰۰

جدول ۳ـ تلرانس‌های مربوط به قطرهای سیم موزیک

تلرانس		قطر	
(mm)	(in)	(mm)	(in)
۰/۰۰۵	۰/۰۰۰۲	تا ۰/۲۵	تا ۰/۰۱۰
۰/۰۰۸	۰/۰۰۰۳	۰/۲۶_۰/۷۱	۰/۰۱۱_۰/۰۲۸
۰/۰۱۰	۰/۰۰۰۴	۰/۷۲_۱/۶۰	۰/۰۲۹_۰/۰۶۳
۰/۰۱۳	۰/۰۰۰۵	۱/۶۰-۲/۰۳	۰/۰۶۴_۰/۰۸۰
۰/۰۳۰	۰/۰۰۱۰	بالاتر از ۲/۰۳	بالاتر از ۰/۰۸۰

جدول ۴ـ زمان تمپر کردن (دقیقه)

کاربرد در دمای بالا	کاربردهای سخت	کاربردهای عادی	قطر مفتول	
			(mm)	(in)
۲۰_۳۰	۱۵_۲۰	۱۰_۱۵	تا ۰/۳۸	تا ۰/۰۱۵
۲۰_۴۵	۲۰_۳۰	۱۵_۲۰	۰/۳۹_۱/۲۷	۰/۰۱۶_۰/۰۵
۴۵_۶۰	۳۰_۴۰	۲۰_۲۵	۱/۲۸_۳/۰	۰/۰۵۱_۰/۱۲
۶۰_۸۰	۴۰_۵۰	۲۵_۳۰	بالاتر از ۳/۰	بالاتر از ۰/۱۲

× ـ **بکار گرفتن این مفتول فنر در درجه حرارت‌های بالاتر از ($۱۲۰^0C(۲۵۰^0F$ مرسوم نمی‌باشد.**

۲-۲ فولادهای فنر کشیده شده به صورت سخت

ایـن فولادهـا نسـبت به سیم موزیک یا مفتول تمپر شده با روغن از کیفیت پایین‌تری برخوردار هستند. این فولاد ارزان‌ترین نوع ماده فنر است. ان مفتول در چندین رده قابل دسترسی بوده و فقط برای فنرهایی که به صـورت سـرد پیچـیده شده‌اند بکار گرفته می‌شود. این فولاد تحت عناوین تجاری زیر شناخته می‌شود: برای رده ASTM A227 MB برای رده ASTM A679 , HB و برای رده‌های مبلمانی , ASTM A4/7 ASTM A407 ,

- **کاربردها**

رده **MB** , **ASTM A227 کـلاس II** : هنگامـیکه عمـر طولانی و دقت در بارها و جابجایی‌ها زیاد مهم نباشد.

فولاد MB , **ASTM A229** : در بسیاری از کاربردهایی که فولادهای گران با رتبه بالا نیازی نباشد، مثل قطعات مکانیکی، تجهیزات اتومبیل، سخت‌افزارها و اسباب‌بازی‌ها.

پایـه ASTM A679 , HB : ایـن فـولاد بـرای کاربردهایی که در آنها تنش‌های بالایی مورد نیاز بوده و قیمت کم موردنظر است، مناسب می‌باشد.

رده مبلمانـی، ASTM A407 : ایـن مفتول از خواص خمش و نرمی عالی برخوردار بوده و به ویژه برای فنرهایـی کـه در محصولات مبلمانی کاربرد دارند، مناسب است. از این ماده نباید برای فنرهای با کاربردهای مهم مثل ابزار ماشین یا در خستگی استفاده کرد.

رده مبلمانی ASTM A417 : این فنر مناسب برای مبلمان و صندلی‌های اتومبیل است. از آن نباید برای فنرهای مکانیکی استفاده کرد.

- **ترکیب شیمیایی**

ترکیب شیمیایی این مفتول فنر در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵ـ ترکیب شیمیایی ـ مفتول فولادهای سخت کشیده شده (درصد)

عنصر	رده MB	رده HB
	ASTM A227	ASTM A679
کربن	۰/۴۵ـ۰/۸۵	۰/۶۵ـ۱/۰
منگنز	۰/۶۰ـ۱/۳۰	۰/۲۰ـ۱/۳۰
سیلیکون	۰/۱۰ـ۰/۳۰	۰/۱۰ـ۰/۴۰
فسفر	حداکثر ۰/۰۴۰	حداکثر ۰/۰۴۰
گوگرد	حداکثر ۰/۰۵۰	حداکثر ۰/۰۵۰

- **خواص مکانیکی مفتول سرد کشیده شده HB , MB**

حدالاستیک: درصدی از استحکام کششی؛ درکشش ۶۰ تا ۷۰ درصد؛ در پیچش ۴۵ تا ۵۵ درصد.

سختی راکول: از ۳۸ تا ۴۶ راکول C متغیر است.

هدایت الکتریکی: در مقایسه با مس ۸ تا ۱۲ درصد.

مدول الاستیسیته: جدول ۶ را ببینید.

آزمایش‌های پیچشی: جدول ۷ را ببینید.

تلرانس‌ها: جدول ۸ را ببینید.

جدول ۶ـ مدول الاستیسیته

قطر مفتول		E مدول کشش		G مدول پیچش	
(in)	(mm)	(Psi)	(MPa)	(Psi)	(Mpa)
تا ۰/۰۳۲	تا ۰/۸۰	۲۸۸۰۰۰۰۰	۱۹۸۶۰۰	۱۱۷۰۰۰۰۰	۸۰۶۷۰
۰/۰۳۳_۰/۰۶۳	۰/۸۱_۱/۶	۲۸۷۰۰۰۰۰	۱۹۷۹۰۰	۱۱۶۰۰۰۰۰	۸۰۰۰۰
۰/۰۶۴_۰/۱۲۵	۱/۶۱_۳/۲	۱۸۶۰۰۰۰۰	۱۹۷۲۰۰	۱۱۵۰۰۰۰۰	۷۹۲۹۰
بالاتر از ۰/۱۲۵	بالاتر از ۳/۲	۲۸۵۰۰۰۰۰	۱۹۶۵۰۰	۱۱۴۰۰۰۰۰	۷۸۶۰۰

جدول ۷ـ آزمایش پیچش

Wire diameter[a]		Arbor diameter ASTM A 227		
(in.)	(mm)	Class I	Class II	ASTM A 679
Up to 0.162	Up to 4.11	Same as wire diam.	2 X wire diam.	2 X wire diam.
0.163-0.312	4.12-7.92	2 X wire diam.	4 X wire diam.	4 X wire diam.

[a]Wire should be bent around an arbor without cracking.

• عملیات حرارتی :

همسان سازی تنش : فنرهای ساخته شده از فولادهای سخت کشیده شده را باید به منظور حذف تنش های پسماند حاصل از فنر پیچی و رسیدن به شرایط زیر تمپر کرد:

برای کاربردهای عادی: ۲۱۵_۲۳۰^{0}C (۴۲۰_۴۵۰^{0}F)

برای کاربردهای سخت: ۲۳۰_۲۶۰^{0}C (۴۵۰_۵۰۰^{0}F)

برای کاربردهای با دمای بالا: ۲۷۵_۲۹۰^{0}C (۵۲۵_۵۵۰^{0}F)

جدول ۸ـ تلرانس‌های قطری مفتول

تلرانس مفتول		قطر مفتول	
(mm)	(in)	(mm)	(in)
۰/۰۲	۰/۰۰۰۸	تا ۰/۷۱	تا ۰/۰۲۸
۰/۰۳	۰/۰۰۱	۰/۷۲_۱/۹۰	۰/۰۲۹_۰/۰۷۵
۰/۰۴	۰/۰۰۲	۱/۹۱_۹/۵۳	۰/۰۷۶_۰/۳۷۵
۰/۰۸	۰/۰۰۳	بالاتر از ۹/۵۳	بالاتر از ۰/۳۷۵

جدول ۱۰ـ ترکیب شیمیایی (درصد)

عنصر	رده MB ASTM A229	SAE 1065	رده SAE HB 1080
کربن	۰/۵۵_۰/۸۵	۰/۶۰_۰/۷۰	۰/۷۵_۰/۸۸
منگنز	۰/۶۰_۱/۲۰	۰/۶۰_۰/۹۰	۰/۶۰_۰/۹۰
سیلیکون	۰/۱۰_۰/۳۵	۰/۱۵_۰/۳۰	۰/۱۵_۰/۳۰
فسفر	حداکثر ۰/۰۴۰	حداکثر ۰/۰۴۰	حداکثر ۰/۰۴۰
سولفور	حداکثر ۰/۰۵۰	حداکثر ۰/۰۵۰	حداکثر ۰/۰۵۰

حـد الاسـتیک: درصدی از استحکام کششی، در کششی تا (۰/۲۵ in) ۶/۳۵ mm، برابر است با ۸۵ تا ۹۰ درصـد، بالاتـر از (۰/۲۵ in) ۶/۳۵ mm برابـر است با ۸۰ تا ۸۵ درصد، در پیچش تا (۰/۲۵ in) ۶/۳۵ mm برابر است با ۴۵تا۵۰ درصد،بالاتراز (۰/۲۵ in) ۶/۳۵ mm برابر است با ۴۰ تا ۴۵ درصد.

سختی راکول: تا (۰/۲۵ in) ۳/۱۸ mm برابر است با ۴۵ تا ۵۰HRC، از (۰/۲۵ in تا۰/۱۲۶ in) ۶/۳۵ mm تا ۳/۱۹mm برابر است با ۴۲ تا ۴۸ راکول C و بالاتر (۰/۲۵ in) ۶/۳۵ mm برابر است با ۴۰تا۴۵ راکولC.

هدایت الکتریکی: در مقایسه با مس، ۸ تا ۱۲ درصد.

آزمایش پیچش: مفتول تا قطر (۰/۱۶۲ in) ۴ mm باید قادر باشد حول خودش به عنوان یک میله پیچیده شود، اندازه‌های بزرگتر تا (۰/۳۱۲ in) ۸ mm باید قادر باشد حول میله‌ای با دو برابر قطر مفتول پیچده شود بدون آنکه شکاف بر دارد و یا بشکند.

وزن مخصوص: ۷/۸۵g بر هر سانتی‌متر مکعب.

تلرانس‌ها: جدول ۱۱ را ببینید.

زمان تمپر کردن : جدول ۱۲ را ببینید.

جدول ۱۱ـ تلرانس‌های قطری مفتول

کاربرد با دمای بالا	کاربرد سخت	کاربرد معمولی	قطر مفتول (mm)	قطر مفتول (in)
۳۰_۴۵	۲۰_۳۰	۱۵_۲۰	تا ۱/۲۵	تا ۰/۵۰
۴۵_۶۰	۳۰_۴۰	۲۰_۲۵	۱/۲۵_۳/۰۰	۰/۰۵۱_۰/۱۲۰
۶۰_۸۰	۴۰_۵۰	۲۵_۳۰	۳/۰۱_۹/۵۰	۰/۱۲۱_۰/۳۷۵
۶۰_۹۰	۵۰_۶۰	۳۰_۴۵	بالاتر از ۹/۵۰	بالاتر از ۰/۳۷۵

جدول ۱۲ـ زمان تمپر کردن (دقیقه)

Wire diameter (in.)	Wire diameter (mm)	General service	Severe service	High-temperature service
Up to .050	Up to 1.25	15-20	20-30	30-45
0.051-0.120	1.25-3.00	20-25	30-40	45-60
0.121-0.375	3.01-9.50	25-30	40-50	60-80
Over 0.375	Over 9.50	30-45	50-60	60-90

۲-٤ فولادهای فنر سوپاپ

- **کلیات**

موتورهـای اسـتفاده شده در اتومبیل‌ها، هواپیماها، موتورسیکلت‌ها، قایق‌ها و کشتی‌ها، دستگاه‌ها و تجهیزات کشاورزی و کمپرسورها و غیره به منظور ادامه کارکرد، به فنرهای با کیفیت خوب نیاز دارند. فنرهای سوپاپ بـاید دارای سـطحی صـاف و صـیقلی بـوده و هـیچگونه زبـری و ناصافی نداشته باشند، بطوریکه پوسته‌های کوچـک، سـیلندر یـا نشیمنگاه سوپاپ را نخراشد. بعلاوه چنین فنرهایی تحت تاثیر دماهای عملکردی نسبتا بـالا، ارتعـاش و جـریان شـدید هـوای گرم و سرد قرار دارند. فقط ترکیب خاصی از مفتول فولادی که دارای خـواص یکنواخـت، پرداخت صیقلی و خستگی بالا در مقابل بارهای اعمالی ناگهانی باشند، باید برای فنرهای سـوپاپ مـورد استفاده قرار گیرند. اغلب فنرهای سوپاپ با گام عملی کاهش یافته یا متغیر، بر روی دو یا سه حلقه اول فعال، در یک انتهای فنر پیچیده می‌شوند، تا اثر جریان شدید هوای سرد و گرم کاهش یابد. گرچه در ایـن بخـش فقـط دو ترکیـب از فولادهـای سـوپاپ تشـریح شـده‌اند، ولی فولادهای با کیفیت بالاتر مثل فولادهای آلیاژی کروم ـ سیلیسیوم و کروم ـ وانادیوم نیز در دسترس می‌باشند. ولی قیمت این نوع فولادهای آلیاژی بالاتر است.

۲-۵ فولاد فنری پر کربن مخصوص سوپاپ

- **توصیف**

ایـن نـوع فولاد با کیفیت‌ترین فولاد کربنی قابل دسترسی که برای ساختن فنر سوپاپ استفاده می‌شود. این فولاد به لحاظ کیفیت و تمپر شدن، یکنواخت است ولی از لحاظ اندازه قطری محدود بوده و از ۱/۵۷ تا ۶/۲۵ میلـی‌متر (۰/۰۶۲ تا ۰/۲۵ اینچ) در دسترسی می‌باشد. گرچه سطح آن عاری از خراشیدگی و ناصافی بوده و

بـه مـنظور حفاظت از زنگ زدگی پوشش نیز داده می‌شود، ولی در حین عملیات حرارتی و یا ساچمه‌زنی ان اثـرات از بیـن مـی‌رود. ان مـاده فقـط برای فنرهایی که به صورت سرد پیچیده می‌شوند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فولاد تحت اسم تجاری ASTM A230 یافت می‌شود.

ترکیب شیمیایی: جدول ۱۳ را ببینید.

- **تلرانس‌های قطر مفتول :** جدول ۱۴ را ببینید.

زمان تمپر کردن : جدول ۱۵ را ببینید.

جدول ۱۳ - ترکیب شیمیایی مفتول فنر ASTM 230

Element	Percent
Carbon	0.60-0.75
Manganese	0.60-0.90
Silicon	0.15-0.35
Phosphorus	0.025 max.
Sulfur	0.030 max.

جدول ۱۴ ـ تلرانس‌های قطری مفتول

Diameter (in.)	Diameter (mm)	Tolerance (±) (in.)	Tolerance (±) (mm)
Up to 0.092	Up to 2.34	0.0008	0.02
0.093-0.148	2.35-3.75	0.001	0.03
0.149-0.177	3.76-4.50	0.0015	0.04
Over 0.177	Over 4.50	0.002	0.05

جدول ۱۵ - زمان تمپر کردن (دقیقه)

Wire diameter (in.)	Wire diameter (mm)	General service	Severe service	High-temperature service
Up to 0.128	Up to 3.25	20-25	30-40	45-60
Over 0.128	Over 3.25	25-30	40-50	60-80

◦ کاربردها

ایـن مفـتول فولادی غالبا برای سوپاپ موتورهای و دیگر کاربردهایی که نیاز به خواص خستگی بالایی دارند مـورد اسـتفاده قرار می‌گیرند. استفاده از این فولاد، در دماهای بالاتر از (۳۵ ^{0}F) ۱۷۵ ^{0}C توصیه نمی‌شود و غالبا به شکل مقطع گرد بکار برده می‌شود.

◦ خواص مکانیکی مفتول فنر پر کربن مخصوص سوپاپ ASTM A230

مدول الاستیسیته: مقدار E در کشش (برای فنرهای پیچشی)=(۲۹/۵۰۰/۰۰۰psi
۲۰۳/۴۰۰MPa، مقدار G در پیچش (برای فنرهای فشاری)=۱۱/۲۰۰/۰۰۰psi ۷۷/۲۰۰MPa

حدالاستیک: درصدی از استحکام کششی است، در کشش برابر ۸۵ تا ۹۵ درصد، در پیچش برابر ۵۰ تا ۶۰ درصد.

سختی: ۴۴ تا ۴۸

هدایت الکتریکی: در مقایسه با مس، ۸ تا ۱۲ درصد.

آزمایش پیچش: مفتول تا قطر (۰/۱۶۲ in) ۴ mm باید قادر باشد روی میله‌ای به اندازه قطر خودش بپیچد، اندازه‌های بزرگتر باید روی میله‌ای به قطر دو برابر قطر مفتول پیچیده شود، بدون اینکه شکاف و یا ترکی در آن بوجود آید.

وزن مخصوص: ۷/۸۵g بر سانتی‌متر مکعب.

- **عملیات حرارتی**

سخت کردن: فنرهای با مفتول آنیل شده را می‌توان به منظور سخت کردن در دماهای ^0C ۸۳۰ تا ۸۰۰ (^0F ۱۴۷۵ـ۱۵۲۵) قرار داد و سپس به مدت ۴ تا ۸ دقیقه در روغن فرو برده و کوئنچ کرد.

تمپر کردن: چنین فنرهایی معمولا در دمای (^0F ۷۰۰ تا ۵۵۰) ^0C ۳۷۰ تا ۲۹۰ به مدت ۳۰ تا ۶۰ دقیقه، بسته به مقدار سختی موردنظر، تمپر می‌شوند.

همسان‌سازی تنش: فنرهای ساخته شده از فولادهای سوپاپ پرکربن تمپر شده در روغن را باید به منظور حذف تنش‌های پسماند حاصل از فنر پیچی و رسیدن به شرایط زیر تمپر کرد:

برای کاربردهای عادی: (^0F ۴۲۰ـ۴۵۰) ^0C ۲۱۵ـ۲۳۰

برای کاربردهای سخت: (^0F ۴۲۰ـ۵۵۰) ^0C ۲۶۰ـ۲۹۰

برای کاربردهای با دمای بالا: (^0F ۶۰۰ـ۶۵۰) ^0C ۳۱۵ـ۳۴۵

۳- فولادهای فنر آلیاژی

- **کاربردها**

مفتول کروم ـ وانادیوم، یک فولاد فنر آلیاژی عمومی برای کاربردهایی است که تنشهای بالاتری را نسبت به فولادهای فنر پرکربن تحمل می‌کنند و همچنین تحت شرایط شوک و ضربه قرار دارند، مثل چکش‌های بادی. این مواد همچنین برای کاربردهای بادرجه حرارت متوسط تا حدود (^0F ۴۲۵) ^0C ۲۲۰ استفاده می‌شوند.

• ترکیب شیمیایی

ترکیب شیمیایی این نوع مواد فنری در جدول ۱۶ نشان داده شده است.

جدول ۱۶ـ ترکیب شیمیایی کروم ـ وانادیوم (درصد)

عنصر	ASTM A231 SAE 6150
کربن	۰/۴۸ـ۰/۵۳
منگنز	۰/۷۰ـ۰/۹۰
کروم	۰/۸۰ـ۱/۱۰
وانادیوم	حداقل ۰/۱۵
سیلیسیوم	۰/۲۰ـ۰/۳۵
فسفر	حداکثر ۰/۰۴۰
گوگرد	حداکثر ۰/۰۴۰

ایـن آلـیاژ وقتـی در کوره‌های الکتریکی ساخته می‌شود، مقدار فسفر و گوگرد آن تا حداکثر ۰/۰۲۵ کاهش می‌یابد.

تلرانس قطر مفتول : جدول ۱۷ را ببینید.

جدول ۱۷- تلرانس‌های قطر مفتول

Diameter		Tolerance (±)	
(in.)	(mm)	(in.)	(mm)
Up to 0.028	Up to 0.70	0.0008	0.02
0.029-0.072	0.71-1.80	0.001	0.03
0.073-0.375	1.81-9.50	0.002	0.05
Over 0.375	Over 9.50	0.003	0.08

زمان تمپر کردن : جدول ۱۸ را ببینید.

جدول ۱۸ـ زمان تمپر کردن (دقیقه)

کاربرد در دمای بالا	کاربرد سخت	کاربرد معمولی	قطر مفتول	
			(mm)	(in)
۳۰-۴۵	۲۰-۳۰	۱۵-۲۰	تا ۱/۲۵	تا ۰/۰۵۰
۴۵-۶۰	۳۰-۴۰	۲۰-۲۵	۱/۲۶-۳/۰۰	۰/۰۵۱-۰/۱۲۰
۶۰-۸۰	۴۰-۵۰	۲۵-۳۰	۳/۰۱-۹/۵۰	۰/۱۲۱-۰/۳۷۵
۶۰-۹۰	۵۰-۶۰	۳۰-۴۵	بالاتر از ۹/۵۰	بالاتر از ۰/۳۷۵

- **خواص مکانیکی مفتول کروم ـ وانادیوم، ASTM A231**

مدول الاستیسیته: مقدار E در کشش (برای فنرهای فشاری پیچشی)= ۲۰۳/۴۰۰Mpa (۲۹/۵۰۰/۰۰۰psi)، مقدار G در پیچش (برای فنرهای فشاری و کششی)=(۱۱/۲۰۰/۰۰۰psi) ۷۷/۲۰۰Mpa

حد الاستیک: بر حسب درصدی از استحکام کششی است، در کشش=۸۸ تا ۹۳ درصد؛ در پیچش=۶۵ تا ۷۵ درصد.

سختی: ۴۵ تا ۵۰

هدایت الکتریکی: در مقایسه با مس ۸ تا ۱۲ درصد

آزمایش پیچش: مفتول تا قطر (۰/۱۶۲in)۴mm باید قادر باشد روی میله‌ای به اندازه قطر خودش پیچیده شود، برای اندازه‌های بزرگتر تا (۰/۳۱۲in)۸mm باید بتواند روی میله‌ای با قطر دو برابر قطر مفتول بدون شکاف برداری یا ترک

۳-۱ فولاد فنری کروم ـ وانادیوم مخصوص سوپاپ

- **توصیف**

فولاد فنر کروم ـ وانادیوم مخصوص سوپاپ، یکی از با کیفیت‌ترین فولادهای آلیاژی است که در اندازه‌های مختلف قابل دستیابی می‌باشد.این ماده فقط برای فنرهایی که در حالت سرد پیچیده می‌شوند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فولاد اغلب تحت عنوان «کروم ـ وانادیوم» شناخته می‌شود و نام تجاری آن ASTM A232 می‌باشد.

- **کاربردها**

این فولاد آلیاژی خاص برای فنرهای سوپاپی که خواص خستگی بالایی نیاز داشته و به ویژه در دمای متوسطی تا حدود ۲۲۰^{0}C(۴۲۵^{0}F) کار می‌کنند، مورد استفاده قرار می‌گیرند، جایی که بکارگیری فولادهای فنر پرکربن مخصوص سوپاپ معمولی، رضایت‌بخش نباشند. این ماده برای فنرهای سوپاپ مخصوص موتورهای هواپیما، ماشین‌های مسابقه و قایق‌های سرعت بکار برده می‌شود. این ماده همچنین دارای قابلیت سختی‌پذیری بالاتر و مقاومت به بارگذاری ناگهانی بالاتری نسبت به فولادهای کربنی معمولی است.

- **خواص مکانیکی مفتول فنر کروم ـ وانادیوم مخصوص سوپاپ ASTM A232**

مدول الاستیسیته: مقدارE درکشش (برای فنرهای پیچشی)=۲۰۳/۴۰۰Mpa (۲۹/۵۰۰/۰۰۰psi)

مقدار G در پیچش (برای فنرهای فشاری)=۷۷/۲۰۰Mpa(۱۱/۲۰۰/۰۰۰psi)

حدالاستیک: درصدی از استحکام کششی است، در کشش = ۸۸ تا ۹۳ درصد، در پیچش=۶۵ تا ۷۵ درصد.

سختی راکول: ۴۶ تا ۵۱ راکول C

هدایت الکتریکی: در مقایسه با مس ۸ تا ۱۲ درصد.

آزمایش پیچش: مفتول فقط تا ۴mm(۰/۱۶۲in) باید قادر باشد دور میله‌ای به اندازه قطر خودش پیچانده شود. برای اندازه‌های بزرگتر، تا ۸mm(۰/۳۱۲in) مفتول باید بتواند دور میله‌ای با دو برابر قطر خود بدون ایجاد شکاف و یا ترک برداری پیچانده شود.

وزن مخصوص: ۷/۸۵g در هر سانتی‌متر مکعب.

ترکیب شیمیایی : جدول ۱۹ را ببینید.

تلرانس‌ها: جدول ۲۰ را ببینید.

جدول ۱۹ـ ترکیب شیمیایی آلیاژی کروم ـ وانادیوم ـ ASTM A232

عنصر	درصد
کربن	۰/۴۸_۰/۵۳
منگنز	۰/۷۰_۰/۹۰
سیلیسیوم	۰/۱۲_۰/۳۰
کروم	۰/۸۰_۱/۱۰
وانادیوم	حداقل ۰/۱۵
فسفر	حداکثر ۰/۰۲۰
گوگرد	حداکثر ۰/۰۳۵

جدول ۲۰ـ تلرانس‌های قطری مفتول

تلرانس		قطر	
(mm)	(in)	(mm)	(in)
۰/۰۲	۰/۰۰۰۸	تا ۱/۹	تا ۰/۰۷۵
۰/۰۳	۰/۰۰۱	۱/۹۱-۳/۷۵	۰/۰۷۶-۰/۱۴۸
۰/۰۴	۰/۰۰۱۵	۳/۷۶-۹/۵	۰/۱۴۹-۰/۳۷۵
۰/۰۵	۰/۰۰۲	بالاتر از ۹/۵	بالاتر از ۰/۳۷۵

- **عملیات حرارتی مفتول کروم ـ وانادیوم، ASTM A232**

سخت شدن: فنرهای ساخته شده از مفتول آنیل را می‌توان به منظور سخت شدن در دماهای (۱۶۵۰ ^0F تا ۱۶۰۰) ۹۰۰ ^0C تا ۸۷۰ به مدت ۱۵ دقیقه حرارت داده و سپس در روغن فرو برده و کوئنچ کرد.

تمپر کردن: چنین فنرهایی معمولا در دماهای (۹۰۰ ^0F تا ۷۵۰) ۴۸۰ ^0C تا ۴۰۰ به مدت ۴۵ دقیقه تا یک ساعت بسته به مقدار سختی مورد نظر، تمپر می‌شوند.

همسان‌سازی تنش: فنرهای ساخته شده از مفتول تمپر شده از روغن باید به منظور حذف تنش‌های پسماند حاصل از فنرپیچی و رسیدن به شرایط زیر تمپر شوند.

برای کاربردهای عادی: (۵۰۰ ^0F تا ۴۵۰) ۲۶۰ ^0C تا ۲۳۰

برای کاربردهای سخت: (۶۰۰ ^0F تا ۵۵۰) ۳۱۵ ^0C تا ۲۹۰

برای کاربردهای با دمای بالا: (۷۰۰ ^0F تا ۶۵۰) ۳۷۰ ^0C تا ۳۴۵

زمان تمپر کردن: جدول ۲۱ را ببینید.

جدول ۲۱ـ زمان تمپر کردن (دقیقه)

کاربرد در دمای بالا	کاربرد سخت	کاربرد معمولی	قطر مفتول	
			(mm)	(in)
۴۵ تا ۳۰	۳۰ تا ۲۰	۲۰ تا ۱۵	۱/۲۷ تا	۰/۰۵۰ تا
۶۰ تا ۴۵	۴۰ تا ۳۰	۲۵ تا ۲۰	۳/۰ تا ۱/۲۸	۰/۱۲۰ تا ۰/۰۵۱
۸۰ تا ۶۰	۳۰ تا ۲۵	۳۰ تا ۲۵	۳/۰ بالای	۰/۱۲۰ بالای

۳-۲ مفتول فولادی فنر آلیاژی کروم ـ سیلیسیوم

- **توصیف**

فولاد فنر آلیاژی کروم ـ سیلیسیوم، یکی از انواع نسبتا جدید فولادهای فنر آلیاژی است. این‌آلیاژ دارای ترکیب شیمیایی مشابه با فولاد فنر سیلیکون ـ منگنز SAE 9262 است، جز اینکه مقدار سیلیکون آن کمتر و مقدار کروم آن بیشتر است در عین حال، این اختلاف کوچک تاثیر مهمی داشته و باعث ایجاد سختی عمیق‌تر و یکنواخت‌تر و خواص مکانیکی بالاتری می‌گردد. این فولاد تحت عنوان تجاری ASTM A401 شناخته می‌شود.

- **کاربردها**

کروم ـ سیلیکون یک فولاد فنر آلیاژی خاص بوده که برای فنرهایی که تحت تاثیر تنش‌های بالا و بارگذاری‌های ناگهانی یا ضربه‌ای و دماهای متوسطی حدود (۲۴۵^0C (۴۷۵^0F) قرار دارند، مناسب می‌باشد. این ماده برای فنرهایی که به صورت سرد حلقه‌پیچی می‌شوند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. مفتول این آلیاژ در شرایط تمپر شده با روغن و داشتن سطح صاف را می‌توان به عنوان فنرهای سوپاپ استفاده کرد.

- **ترکیب شیمیایی**

ترکیب شیمیایی این آلیاژ در جدول ۲۲ آورده شده است.

جدول ۲۲ـ ترکیب شیمیایی کروم ـ سیلیسیوم، ASTM A401

عنصر	درصد
کربن	۰/۵۱ـ۰/۵۹
منگنز	۰/۶۰ـ۰/۸۰
کروم	۰/۶۰ـ۰/۸۰
سیلیکون	۱/۲۰ـ۱/۶۰
فسفر	حداکثر ۰/۰۳۵
گوگرد	حداکثر ۰/۰۴۰

- **خواص مکانیکی مفتول فولاد آلیاژی کروم ـ سیلیسیوم تمپر شده، ASTM A401**

مدول الاستیسیته: مقدار E درکشش(برای فنرهای پیچشی) ۲۰۳/۴۰۰MPa(۲۹/۵۰۰/۰۰۰psi)، مقدار G در پیچش (برای فنرهای فشاری و کششی) = (۱۱/۲۰۰/۰۰۰psi) ۷۷/۲۰۰ MPa

حد الاستیک: درصدی از استحکام کششی است، در کشش = ۸۸ تا ۹۳ درصد، در پیچش = ۶۵ تا ۷۵ درصد.

سختی (راکول C) : ۵۰ تا ۵۳ (تمپر شده در روغن)

هدایت الکتریکی: در مقایسه با مس = ۸ تا ۱۲ درصد.

آزمایش پیچش: همه انواع این مفتول فولادی آلیاژی، تا قطر (۰/۱۶۲ in) ۴mm باید قادر باشند حول میله‌ای برابر مفتول، پیچیده شوند. اندازه‌های بزرگتر باید بتوانند حول میله‌ای به قطر دو برابر قطر مفتول، بدون ایجاد شکاف یا ترک پیچیده شوند.

وزن مخصوص: ۷/۸۵ g بر هر سانتی‌متر مکعب.

تلرانس‌ها: جدول ۲۳ را ببینید.

جدول ۲۳ـ تلرانس‌های قطر مفتول

Diameter		Tolerance (±)	
(in.)	(mm)	(in.)	(mm)
Up to 0.072	Up to 1.8	0.001	0.030
Over 0.072	Over 1.8	0.002	0.050

[a]Hard-drawn wires are available at one half these tolerances.

زمان تمپر کردن: جدول ۲۴ را ببینید.

جدول ۲۴ـ زمان تمپر کردن (دقیقه)

قطر مفتول		کاربرد معمولی	کاربرد سخت	کاربرد در دمای بالا
(in)	(mm)			
تا ۰/۰۵۰	تا ۱/۲۷	۱۵ـ۲۰	۲۰ـ۳۰	۳۰ـ۴۵
۰/۰۵۱ـ۰/۱۲۰	۱/۲۸ـ۳/۰	۲۰ـ۲۵	۳۰ـ۴۰	۴۵ـ۶۰
۰/۱۲۱ـ۰/۳۷۵	۳/۱ـ۹/۵	۲۵ـ۳۰	۴۰ـ۵۰	۶۰ـ۸۰
بالاتر از ۰/۳۷۵	بالاتر از ۹/۵	۳۰ـ۴۵	۵۰ـ۶۰	۶۰ـ۹۰

٤- مفتول فولاد زنگ‌نزن

• کلیات

فـولاد زنگ نزن، آلیاژی است مشابه با فولادهای دیگر جز اینکه حاوی ۱۲ تا ۲۰ درصد کروم می‌باشد. علاوه بـر کروم، نیکل نیز ممکن است به مقدار ۱۰ درصد به منظور بهبود مقاومت در مقابل خوردگی به آن افزوده شود. فقط ۷ نوع از فولادهای زنگ‌نزن به منظور ساخت فنر بکار برده می‌شوند.

• مقاومت به خوردگی

فـولاد زنـگ‌نـزن یکـی از فلزاتـی اسـت که قادر است در مقابل خوردگی اتمسفری بطور کامل مقاومت کند. فولادهای زنگ‌نزن در مقابل الکل، حلال‌های قلیایی، آمونیاک، اتمسفر، روغن، آب میوه‌ها و سبزیجات، بنزین، جـیوه، آب معدنـی عرق بدن، آب دریا، بخار، حلال‌های صابونی و شکری و بسیاری از جامدات معدنی و مواد شیمیایی ارگانیکی مقاوم هستند.

- **طبقه‌بندی**

انجمن آهن و فولاد آمریکا همه ترکیبات شیمیایی فولاد زنگ‌نزن را نامگذاری کرده است. سری‌های ۳۰۰ مثل ۳۰۲، ۳۱۶ و غیره به ترکیب شیمیایی کروم ـ نیکل معروف هستند و عموما تحت عنوان «۸ـ۱۸» که نشان‌دهنده ۱۸ درصد کروم و ۸ درصد نیکل است، شناخته می‌شوند. سری‌های ۴۰۰ مثل ۴۱۴ و ۴۲۰ به رده‌های عملیات حرارتی‌پذیر کرومی معروف هستند.

٤-١ سری‌های ۳۰۰ آستنیتی

فولادهای زنگ‌نزن سری ۳۰۰ شامل انواع ۸ـ۱۸، دربرگیرنده سری‌های ۳۰۰ آستنیتی می‌باشد. آنها دارای ترکیب شیمیایی کروم ـ نیکل بوده و فقط سه نوع از آنها (۳۰۲، ۳۰۴ و ۳۱۶) و به ندرت چند نوع دیگر (مثل ۳۰۱) برای کاربردهای فنری استفاده می‌شود. این نمونه‌های نمی‌توانند از طریق عملیات حرارتی سخت شوند. بلکه سختی و استحکام کششی خود را از طریق فرآیند کار سرد به دست می‌آورند.

در این گروه از فولادهای آستنیتی، ممکن است خوردگی بین دانه‌ای اتفاق افتد. هنگامی که این فولادها در یک کوره حرارت داده شوند یا در محدوده درجه حرارت بین (1400^0F تا ۸۰۰) 760^0C تا ۴۲۵، جوشکاری یا لحیم‌کاری شوند، کربن تمایل پیدا می‌کند تا در مرز دانه‌ها رسوب کند. این مسئله باعث خوردگی در بین دانه‌ها می‌گردد. اضافه کردن کلومبیوم یا تیتانیوم به این ترکیب، خطر را به حداقل می‌رساند. کوئنچ کردن در آب از درجه حرارت‌های فوق‌الذکر نیز رسوب کربن را کاهش می‌دهد.

- **کاربردها**

ASTM A ۳۱۳، نوع ۳۰۲: این فولاد معمول‌ترین نوع ترکیب ۸-۱۸ می‌باشد، زیرا به سادگی قابل دستیابی بوده و دارای استحکام کششی بالایی است. فنر ساخته شده از این ماده برای دماهای زیر صفر و دماهای بالا تا (550^0F) 290^0C مناسب می‌باشد. نوع ۳۰۲ به ویژه برای فنرهای فشاری که تحت تنش‌های بالایی قرار دارند، مفید است.

ASTM A ۳۱۳، نوع ۳۰۴: این ماده کاملا شبیه نوع ۳۰۲ است جز اینکه استحکام کششی آن حدود ۵ درصد و سختی آن کمی پایین‌تر است به همین دلیل راحت‌تر خمیده می‌شود مقدار کربن در این ماده کمتر از نوع ۳۰۲ است. در بسیاری از مواقع می‌توان از آن به جای ۳۰۲ استفاده کرد.

ASTM A ۳۱۳، نوع ۳۱۶: این ترکیب تحت عنوان ۲-۱۲-۱۸ نامیده می‌شود، که در آن ۱۸ درصد کروم، ۱۲ درصد نیکل و ۲ درصد مولیبدن است. این ترکیب نسبت به انواع ۳۰۲ و ۳۰۴ در مقابل خوردگی نسبت

بـه کلـریدها، فسـفات‌هـا، سولفات‌ها و دیگر نمک‌ها و همچنین نسبت به اسیدها مثل اسیدهای سولفوریک، سولفوروس، استیک و فسفریک مقاومتر است.

٤-٢ سری‌های ٤٠٠ مارتنزیتی

سـری‌هـای ۴۰۰ مارتنزیتی از نوع کروم‌دار عملیات حرارتی‌پذیر هستند که معمولا در حالت آنیل شکل داده شـده و سـپس همانـند فولادهـای کربنی سخت و تمپر می‌شوند. چنین آلیاژهایی یا نیکل نداشته و یا مقدار کمـی دارند و به لحاظ مغناطیس همانند فولادهای کربنی هستند. تردی و عدم توانایی این آلیاژها در مقابل شـوک و بـارگذاری ضـربه‌ای در درجـه حـرارت‌هـای پاییـن، استفاده از آنها را در دماهای زیر صفر نامناسب می‌سازد.

- **کاربردها**

نـوع ۴۱۴: استحکام کششی این فولاد، ۱۵ درصد کمتر از نوع ۳۰۲ است. استحکام کششی آن س از سخت کـردن و تمـپر کـردن در محـدوده (۲۲۵،۰۰۰psi تـا ۱۷۵،۰۰۰) ۱۵۵۰Mpa- تـا ۱۲۰۰ قـرار مـی‌گـیرد. کاربردهای مختلفی برای این نوع فولاد زنگ‌نزن مغناطیسی وجود دارد.

نـوع ۴۲۰: ایـن فولاد در حالت آنیل شکل داده می‌شود و سپس سخت و تمپر می‌گردد. این فولاد تا سخت نشود خاصیت زنگ‌نزن پیدا نمی‌کند.

نـوع ۴۳۱: بـه کمـک روش‌هـای جدید، ان نوع فولاد به یکی از بهترین فولادها برای فنرهایی که تنش‌های بالایـی را تحمـل مـی‌کنند تبدیل شده است. مفتول ابتدا سخت و تمپر شده و سپس به صورت سرد کشیده مـی‌شـود. ایـن فرآیـند باعث شده تا مفتول تولید شده تمیز و براق باشد و استحکام کششی نزدیک به سیم موزیـک داشـته باشد، ولی مقاومت در مقابل خوردگی آن کاملا برابر با نوع ۳۰۲ نیست. این مفتول برای بند ساعت‌های انعطاف‌پذیر بکار گرفته می‌شود.

- **ترکیب شیمیایی**

ترکیب شیمیایی این فولادها در جدول ۲۵ نشان داده شده است.

٤-٣ گروه رسوب سختی شده PH 17-7:

ایـن گـروه حـاوی ۱۷ درصـد کـروم، ۷ در صد نیکل و علامت PH نشانگر رسوب سختی می‌باشد. این مواد خواص فنری خوبی داشته و مقاومت عالی در مقابل دما و خوردگی دارند.

۵- متالورژی آلیاژهای پایه ـ مس

مـس خـالص، نـرم چکش خوار بوده و لذا به منظور دستیابی به استحکام بیشتر و خاصیت فنری و ارتجاعی، باید عناصر دیگری به آن افزوده شود.

جدول ۲۵ ـ ترکیب شمیایی فولاد زنگ نزن (درصد)، ASTM A313

کروم، مارتنزیتی، سختی‌پذیر			نیکل، کروم، آستنیتی				عنصر
نوع ۴۳۱	نوع ۴۲۰	نوع ۴۱۴	نوع ۱۷-۷PH	نوع ۱۸-۱۲-۲	نوع ۱۸-۸	نوع ۱۸-۸	
حداکثر ۰/۲۰	۰/۳۰_۰/۴۰	۰/۰۸_۰/۱۵	حداکثر ۰/۰۹	حداکثر ۰/۰۸	حداکثر ۰/۰۸	۰/۰۸_۰/۱۵	کربن
۱۵/۰۰_۱۷/۰۰	۱۲/۰۰_۱۴/۰۰	۱۱/۵۰_۱۳/۵۰	۱۶/۰۰-۱۸/۰۰	۱۶/۰۰-۱۸/۰۰	۱۸/۰۰-۲۰/۰۰	۱۷/۰۰-۱۹/۰۰	کروم
۱/۲۵_۲/۵۰	-------	۱/۲۵_۲/۵۰	۶/۵۰-۷/۷۵	۱۰/۰۰-۱۴/۰۰	۸/۰۰-۱۲/۰۰	۸/۰۰-۱۰/۰۰	نیکل
حداکثر ۱/۰۰	حداکثر ۱/۰۰	حداکثر ۱/۰۰	حداکثر ۱/۰۰	حداکثر ۲/۰۰	حداکثر ۲/۰۰	حداکثر ۲/۰۰	منگنز
حداکثر ۱/۰۰	حداکثر ۱/۰۰	حداکثر ۱/۰۰	حداکثر ۱/۰۰	حداکثر ۱/۰۰	حداکثر ۱/۰۰	حداکثر ۱/۰۰	سیلسیوم
حداکثر ۰/۰۴۰	حداکثر ۰/۰۴۰	حداکثر ۰/۰۴۰	حداکثر ۰/۰۴۰	حداکثر ۰/۰۴۵	حداکثر ۰/۰۴۵	حداکثر ۰/۰۴۵	فسفر
حداکثر ۰/۰۳۰	حداکثر ۰/۰۳۰	حداکثر ۰/۰۳۰	حداکثر ۰/۰۳۰	حداکثر ۰/۰۳۰	حداکثر ۰/۰۳۰	حداکثر ۰/۰۳۰	گوگرد
-------	-------	-------	Alum	Moly	-------	-------	غیره
-------	-------	-------	۰/۷۵-۱/۵۰	۲/۰۰-۳/۰۰	-------	-------	-------

◦ تأثیرات عناصر آلیاژی:

روی : روی بـه مقـدار ۴۲ درصـد بـه مـس افزوده می شود تا برنج را بوجود آورد. بدین ترتیب هم استحکام کششی و هم مقاومت در مقابل خوردگی افزایش می‌یابد. فنر برنجی حاوی حدود ۳۰ درصدی روی است.

قلـع: قلـع بـه مقـدار ۱۱ درصد به مس افزوده می‌شود تا برنز را بوجود آورد. بدین ترتیب آلیاژی مستحکم، چکش خوار و بویژه مقاوم در مقابل آب دریا بوجود می‌آورد.

سـرب: سرب به مقدار یک درصد به مس و به مقدار ۴ درصد به برنج افزوده می‌شود، بطوری که پس از آن قابلیـت ماشـینکاری در حـد زیـادی بهـبود یـابدو در عیـن حـال چکـش خـواری، کشش عمیق و کار سرد آسیب‌پذیر می‌شود.

آلومینیوم: آلومینیوم به مقدار ۲ درصد برنج افزوده می‌شود تا خواص مکانیکی آن را افزایش دهد. همچنین به مقدار ۵ تا ۱۰ درصد به مس افزوده می شود تا سری‌ها برنز آلومینیوم را بوجود آورد.

سیلیسیوم: سیلیس به مقدار ۳ درصد به مس افزوده می‌شود تا آلیاژ برنز سیلیسیوم را که برای سخت افزارهای زی دریا مفید است را بوجود آورد. همچنین استحکام و چقرمگی آن افزایش می‌یابد.

آهن: آهن در مقادیر کم تا حدود ۰/۳۵ درصد بهمراه قلع به مس افزوده می‌شود تا آلیاژهای با استحکام کششی بلای فسفر ـ برنز را بوجود آورد.

- **نیکل:** نیکل به منظور ایجاد آلیاژهای مس ـ نیکل به مس افزوده می‌شود. اگر نیکل به برنج افزوده شود، رنگ آلیاژ، نقره‌ای شده و باعث استحکام آن می گردد. این آلیاژها به نیکل ـ نقره معروف هستند و اگر حاوی ۱۸ درصد نیکل باشند، خواص فنری بسیار خوبی خواهند داشت.

بعضی عناصر دیگر مثل بریلیوم، منگنز، کروم و غیره نیز به منظورهای مختلف به مس افزوده می‌شوند که از ذکر آنها خودداری می‌شود.

- **سختی و تمپر:**

مفتول‌های ساخته شده از فنر برنجی، فسفر ـ برنز و بسیاری دیگر از مواد غیر آهنی، اگر از طریق کار سرد تولید شوند، استحکام کششی و سختی بالایی پیدا می‌کنند. مقدار سختی حاصل از کارسردگاهی اوقات عدد «تمپر» یا سختی نامیده می‌شود. مفتول برنج فنرداری سختی ۸۹ تا ۹۵ برینل، مفتول فسفر ـ برنز ۹۰ تا ۹۷ برینل می‌باشند.

- **تلرانس‌ها:**

ـ برای تلرانس‌های مفتول به ASTM B250 و برای ورق به ASTM B248 مراجعه کنید.

- **مقاومت به خوردگی:**

آلیاژهای پایه ـ مس از گذشته به لحاظ مقاومت عالی در مقابل خوردگی اتمسفری آب و آب دریا معروف بوده‌اند. آلیاژهای فنر برنجی، فسفر ـ برنز و بریلیوم ـ مس از این احاظ دارای ویژگیهای مشابهی می‌باشند. ضمن آنکه در مقابل بعضی از حلال‌ها مقاومت به خوردگی‌شان مقداری متفاوت است. برای اهداف علمی، مقاومت به خوردگی فسفر- برنز و بریلیوم ـ مس ممکن است مشابه با مس خالص باشد. برای اهداف علمی، مقاومت به خوردگی‌شان مقداری متفاوت است. برای اهداف علمی، مقاومت به خوردگی فسفر ـ برنز و بریلیوم ـ مس ممکن است مشابه با مس خالص باشد. این مواد را می‌توان در الکل، اسید استیک، مواد با خواص آبجو، آب نمک، هیدروکلریک رقیق سرد و اسیدهای سولفوریک، در مدت زمان کوتاه، بنزین و هیدروکربن‌ها، نمک‌ها و اسیدهای ارگانیکی، اسید فسفریک، آب دریا و فنول بکار برد.

درجه حرارت‌های بالا، غلظت، ناخالص‌های تأثیرات شیمیایی هوا تأثیرات جدی بر روی مقاومت به خوردگی این آلیاژها دارد.

آلیاژهای پایه ـ مس در تماس با معرف‌های زیر پیشنهاد نمی‌شوند: آمونیاک، هیدروکسید آمونیوم، سیانید، نمک‌ها با ترکیب آهنی یا جیوه‌ای، اسیدهای اکسیدزدایی شده، گاز گوگردی یا کلریدی. فنر برنجی به ندرت در مجاورت مستقیم مواد شیمیایی فعال با موفقیت عمل می‌کند.

- **ترک‌برداری حاصل از تنش ـ خوردگی**

ترک‌برداری حاصل از تنش ـ خوردگی، یکی از انواع غیر معمول واماندگی است که بعضی مواقع در آلیاژهای پایه ـ مس مشاهده می‌شود. آلیاژهای فسفر ـ برنز و بریلیوم ـ مس در عمل در مقابل واماندگی حاصل از تنش ـ خوردگی مصون هستند. این نوع واماندگی بیشتر در میان آلیاژهایی از برنج متداول است که حاوی مس کم و روی بالایی می‌باشند. در هر یک از شرایط زیر ممکن است این پدیده اتفاق افتد:

۱ـ تنش‌های داخلی بالایی که حاصل از کشش سرد یا نورد سرد می‌باشند، به همراه تنش‌های حاصل از عملیات شکلدهی و تنش‌های حاصل از بار خارجی.

۲ـ وجود مقادیر کمی آمونیاک در هوا. آمونیاک برای برنج زرد بسیار زیانبخش می‌باشد. حتی مقدار کمی آمونیاک در هوا ممکن است باعث ایجاد ترک در این فلز شود.

۳ـ ترکیب شیمیایی که مستعد برای چنین واماندگی باشد.

۴ـ زمان طولانی در معرض یکی یا همه موارد فوق قرار داشتن.

با استفاده از روش‌های زیر می‌توان تا حدودی از واماندگی حاصل از تنش ـ خوردگی اجتناب ورزید:

۱ـ اجتناب از انبار کردن مواد در جاهای مرطوب و یا روباز.

۲ـ اجتناب از محیط‌هایی که ممکن است در آنها آمونیاک وجود داشته باشد.

۳ـ اجتناب از بکارگیری ترکیبات آلیاژی مستعد برای این نوع واماندگی (ترکیبات پر روی).

۴ـ آنیل کردن محصول در دمای پایین به منظور تنش‌زدایی پس از شکلدهی (^{0}C ۱۹۰ تا ۱۶۵ ^{0}F ۳۷۵ تا ۳۲۵ به مدت ۳۰ الی ۶۰ دقیقه).

۵-۱ مفتول و ورق فنر برنجی (به ترتیب ASTM B 36, ASTM B134)، آلیاژ ۲۶۰

برنج فنر معمولا در صنایع فنرسازی استفاده می‌شود و یک آلیاژ پایه ـ مس غیر آهنی، مقاوم در مقابل خوردگی و غیرمغناطیسی بوده که تقریبا حاوی ۷۰ درصد مس و ۳۰ روی می‌باشد.

- **کاربردها:**

این آلیاژ هنگامی که عدد سختی فنر بالایی نیاز باشد، استفاده می‌گردد. این ماده نسبت به دیگر آلیاژهای فنری غیر آهنی از کیفیت فنری پایین‌تری برخوردار است. و فنرهای برنجی برای استفاده در دماهای بالاتر از

(۲۰۰ ^{0}F تا ۱۵۰) ۹۰ ^{0}C تا ۶۶ پیشنهاد نمی‌شود، ولی برای کاربردهای با دمای زیر صفر مناسب می‌باشند.

ترکیب شیمیایی: جدول ۲۶ را ببینید.

جدول ۲۶ ـ ترکیب شیمیایی مفتول و فنر برنج فنر

عنصر	درصد
مس	۶۸/۵ـ۱۷/۵
آهن	حداکثر ۰/۰۵
سرب	حداکثر ۰/۰۷
روی	باقیمانده (تقریبا ۳۰ درصد)

- **خواص مکانیکی مفتول و ورق برنج فنر:**

مدول الاستیسیته، مفتول و ورق: مقدار E در کشش (برای فنرهای پیچشی و تخت) = (۱۵ MPa(۱۰۳/۴۰۰ psi)، مقدار G در پیچش (برای فنرهای فشاری و کششی) (۵/۰۰۰/۰۰۰ psi) MPa/۵۰۰ ۳۴

حداالاستیک: درصدی از استحکام کششی است، در کشش = ۷۵ تا ۸۰ درصد، در پیچش = ۴۵ تا ۵۰ درصد

هدایت الکتریکی: در مقایسه با مس = ۲۸ درصد.

وزن مخصوص: ۸/۵g بر هر سانتی‌متر مکعب.

استحکام کششی (مفتول): جدول ۲۷ را ببینید.

جدول ۲۷ ـ کششی مفتول برنج فنر، قطر از ۰/۵۰ تا ۶/۳۵ میلی‌متر

نوع کششی و تمپر	عدد سختی	کاهش سطح مقطع از طریق کشش (٪)	حداقل استحکام کششی (psi)	(MPa)
سخت	۴	۶۰/۵	۱۰۲/۰۰۰	۷۰۰
سخت	۶	۷۵/۰	۱۱۵/۰۰۰	۷۹۰
فنری	۸	۸۴/۴		۸۳۰

۲-۵ مفتول و ورق فسفر ـ برنز (بترتیب ASTM B103, ASTM B156):

آلیاژ فسفر ـ برنز نیز برای فنر استفاده می‌شود و یک آلیاژ پایه ـ مس غیر آهنی، مقاوم به خوردگی و غیرمغناطیسی می‌باشد. این آلیژ دارای درصد زیادی مس (۹۰ تا ۹۶ درصد) است که به حدود ۴ تا ۱۰ درصد قلع و مقدار کمی فسفر افزوده می‌شود.

- **کاربردها:**

این فنر نیز برای فنرهای با عدد بالا استفاده می‌شود. این آلیاژ بطور وسیعی در سویچها هنگامیکه لازم باشد تا جریان برق برقرار شود استفاده می‌شود و بدلیل مقاومتش تأثیرات قوس الکتریکی (جرقه زدن) در قطع‌کننده‌های جریان الکتریکی کنترل‌کننده‌ها و ابزار سیگنال‌سازی استفاده می‌شود. خواص فنری این آلیاژ عالی می‌باشد.

- **ترکیب شیمیایی:**

جدول ۲۸ را ببینید.

- **خواص مکانیکی مفتول فسفر ـ برنز:**

مدول الاستیسیته: مقدار E در کشش = (۱۵،۰۰۰،۰۰۰psi) ۱۰۳،۴۰۰ MPa مقدار G در پیچش = (psi ۶۰۰۰۰۰۰) ۴۱۳۷۰ MPa

حدالاستیک: درصدی از استحکام کششی است، در کشش = ۷۵ تا ۸۰ درصد، در پیچش = ۴۵ تا ۵۰ درصد

هدایت الکتریکی: در مقایسه با مس = ۱۷ درصد.

جدول ۲۸ ـ شیمیایی فسفر ـ برنز (درصد)

عنصر	مفتول ASTM B519، آلیاژ شماره 510
قلع	۴/۲ـ ۵/۸
فسفر	۰/۰۳ـ ۰/۳۵
آهن (حداکثر)	۰/۱۰
سرب (حداکثر)	۰/۰۵
روی (حداکثر)	۰/۳۰
(مس + قلع + فسفر،حداقل)	۹۹/۵

استحکام کششی: بسته به قطر مفتول از ۷۲۰ تا ۱۰۰۰ مگا پاسکال (۱۰۵/۰۰۰ تا ۱۴۵/۰۰۰psi) متغیر است. برای قطرهای بالاتر از ۹/۵ میلی‌متر، مگا پاسکال می‌باشد.

۵-۳ مفتول و ورق بریلیوم ـ مس (به ترتیب ASTM B196, ASTM B196):

وقتی مقدار کمی بریلیوم به مس افزوده شود، تأثیر آن همانند آنست که مقدار کمی کربن به فولاد افزوده شود. یعنی آلیاژ مس را قادر می‌سازد تا عملیات حرارتی شده و سختی و استحکام کششی آن افزایش یابد. بدین ترتیب آلیاژ بریلیوم ـ مس تنها ماده فنری پایه ـ مس است که می‌تواند عملیات حرارتی گردد.
آلیاژ بریلیوم ـ مس ممکن است در شرایط سخت شده مختلف قابل دستیابی است. به منظر شکلدهی می‌توان آن را آنیل کرده و سپس از طریق رسوب سختی، سختی آن را افزایش داد. در شرایط نرم به ندرت برای فنر بار برده می‌شود.

همچنین بریلیوم ـ مس ممکن است در شرایط سخت و عملیات حرارتی شده قابل دسترسی باشد. در چنین حالتی، برای عملیات با مقدار شکلدهی کم و برای فنرهای پیچشی با اندیس فنری D/d بالاتر از ۶، بکار گرفته می‌شود. در چنین حدود (۳۵۰ ^{0}F تا ۳۰۰) ۱۷۵ ^{0}C تا ۱۵۰ به مدت ۱۵ الی ۳۰ دقیقه برای حذف تنش‌های پسماند حاصل از حلقه پیچی مفید می‌باشد. بریلیوم ـ مس در شرایط دیگر قابل دستیابی می‌باشد.

- **کاربردها:**

- مفتل فنر بریلیوم ـ مس بطور وسیعی در سوئیچ‌های الکتریکی، رله‌ها، قطع وصل کننده‌های مدار، فیوزها و غیره بکار گرفته می‌شوند. این ماده به ویژه برای انتقال جریان الکتریسیته مناسب است، ولی دامنه کاربرد آن به دستگاههای الکتریکی محدود نمی‌شوند. خاصیت هیسترزیس کم آن بویژه برای فنرهایی که ابزار اندازه‌گیری استفاده می‌شوند، همچنین برای دیافراگم‌ها و دمنده‌ها مناسب است.

بریلیوم ـ مس را مانند اغلب آلیاژهای پایه ـ مس می‌توان در درجه حرارت‌های زیر صفر بکار گرفت. همچنین نسبت به دیگر آلیاژهای پایه بکارگیری آن در دماهای بالاتر تا (۳۰۰ ^{0}F) ۱۵۰ ^{0}C مفید بوده و خواص فنری خوب آن، همچنان حفظ می‌شود.

- **ترکیب شیمیایی:**

ترکیب شیمیایی آن در جدول ۲۹ نشان داده شده است.

• خواص مکانیکی مفتول و ورق بریلیوم ـمس:

مـدول الاستیسیته: مقدار E به شرایط عملیات حرارتی و کار سردی که روی آن انجام شده است از ۲۰۰/۱۱۷ تـا ۱۲۴/۰۰۰ مگـا پاسـکال = (۱۷/۰۰۰،۰۰۰ تا psi ۱۸/۰۰۰،۰۰۰) متغیر است، همچنین مقدار G از ۴۵/۰۰۰ تا ۴۸/۰۰۰ مگا پاسکال (۶/۵۰۰/۰۰۰ تا psi۷/۰۰۰،۰۰۰) متغیر است.

حدالاستیک (درصدی از استحکام کششی): حدالاتـیک نیز به شرایط سخت آلیاژ متغیر است، بطوریکه بین ۶۵ تا ۷۵ درصد در شش و ۴۵ تا ۵۵ درصد استحکام کششی در پیچش متغیر است.

هدایت الکتریکی (در مقایسه با مس): بین ۱۵ تا ۴۸ درصد متغیر است.

اسـتحکام کششی مفتول به شماره آلیاژ ۱۷۵: اسـتحکام کششی با توجه به شرایط مختلف بین ۹۰۰ تا ۱۳۰۰ مگـا پاسـکال (۱۳۰/۰۰۰ تـا psi ۱۹۰/۰۰۰) تغیـیر می‌کند. قابل توجه اینکه مقدار هر یک از خاص مکانیکی فوق، باید با توجه به شرایط مربوطه بدست آید و در طراحی بکار گرفته شود.

وزن مخصوص: ۸/۷۵g بر هر سانتی‌متر مکعب.

جدول ۲۹ ـ ترکیب شیمیایی بریلیو ـ مس (درصد)

عنصر	مفتول ASTM B197 (آلیاژ)172
بریلیوم	۲/۰۰۰ تا ۱/۸۰
عناصر اضافی:	-------
نیکل یا کبالت یا هر دو	حداقل ۰/۲۰
نیکل یا کبالت بعلاوه آهن	حداکثر ۰/۶۰
مس بعلاوه بریلیوم بعلاوه	-------
عناصر اضافی دیگر	حداقل ۹۹/۵۰

• عملیات حرارتی:

بریلـیوم ـ مـس را مـی‌توان در دو مرحله عملیات حرارتی کرد. مرحله اول که عملیات فوق اشباع یا عملیات حـل کـردن نامـیده می‌شود و قبل از انجام کار سرد صورت می گیرد. مرحله دوم که سخت کردن و رسوبی نامیده می‌شود و بعد از حلقه پیچی یا شکلدهی فنر انجام می‌شود.

◦ متالورژی آلیاژهای پایه ـ نیکل:

نیکل تجاری شامل ۹۹/۴ درصد نیکل خالص به همراه ناخالصی‌های معدنی دیگری مثل مس، آهن، منگنز و کربن می‌باشد. وقتی نیکل به فولادی کربنی اضافه می‌شود. همانند یک مستحکم‌کننده فریتی عمل می‌کند.

در چقرمگی تأثیر مثبت گذاشته و از طریق پایین آوردن سرعت بحرانی سرد کردن به عملیات حرارتی کمک می‌کند و لذا عمق سخت شوندگی را افزایش می‌دهد.

ناخالصی‌هایی که در نیکل جامد قابل هستند، معمولا استحکام و سختی را افزایش داده و انبساط حرارتی و هدایت الکتریکی را کاهش می‌دهد. تأثیرات هر کدام از ناخالصی‌ها به شرح زیر می باشد:

- **کربن:** سختی و استحکام را افزایش می‌دهد، انجام کارگرم را ساده می‌کند، ولی انجام کار سرد را مشکل می‌سازد.

کبالت: دمای انتقال مغناطیسی و مقاومت الکتریکی را افزایش می‌دهد، ولی تأثیر قابل توجه دیگری بر روی نیکل ندارد.

مس: در هر دو حالت مایع و جامد با نیکل در همه بخش‌ها قابل امتزاج می‌باشد. مقدار معمول آن در نیکل کمتر از ۰/۱۰ بوده و در این حد هیچگونه تأثیری بر روی خواص فلز ندارد.

آهن: همیشه به مقدار کمی (معمولا در حد کمتر از ۱ درصد) در نیکل تجاری وجود دراد و تأثیر قابل توجهی بر آن نمی‌گذارد.

منگنز: به مقدار کمی افزوده می‌شود و به همراه گوگرد که معمولا وجود دراد، چکش خواری و کیفیت سطح را بهبود می‌بخشد.

اکسیژن: نقطه ذوب نیکل را پایین می‌آورد، به عنوان مثال، افزودن مقدار ۰/۲۲ اکسژن، نقطه ذوب یوتکتیک ذوب را ۲۰ درجه سانتیگراد از نقطه نیکل پایین‌تر می‌آید.

- **گوگرد:** گوگرد نیز نقطه ذوب نیکل را پایین می‌آورد. ذرات گوگرد در داخل دانه ها، چکش خواری، نرمی و دیگر خواص مکانیکی را کاهش می‌دهد.

مقدار کمی آلومینیوم، تیتانیوم، کلمبیوم و تانتالیوم به آلیاژ نیکل افزوده می‌شود تا باعث پیر سختی آن شود.

◎ سختی و تمپر

بعضی از انواع آلیاژهای نیکل مثل مونل ۴۰۰ و اینکونل ۶۰۰ فقط بوسیله کشش یا نورد سرد به استحکام کششی بالایی دست پیدا می‌کنند و نمی‌توان از طریق عملیات رارتی آنها را سخت کرد. انواع دیگر مثل مونل ۵۰۰ ـ k و اینکونل ۷۵۰ ـ X اغلب در شرایط پیچی یا شکل داده می‌شود و سپس از طریق یک عملیات پیر سختی طولانی سخت می‌شوند. سختی و تمپر با توجه به خواص مکانیکی برای هر آلیاژ توصیف می شود.

- **مقاومت به خوردگی**

همـه آلـیاژهای پایه ـ نیکل به دلیل مقاومت بالایشان در برابر همه انواع مواد خورنده و همچنین توانائی‌شان در تحمـل دماهـای زیـر صـفر و زیـاد، معـروف هستند. همچنین، ویژگی غیر مغناطیسی بودن بعضی از این آلیاژها برای استفاده در ژیروسکوپ‌ها و ابزار نشان‌دهنده مهم می‌باشد.

در حالـت کلی این آلیاژخا در مقابل آب و اتمسفر مصون بوده جز در شرایط گوگردی که باعث تغییر رنگ از خرمائی به سیز تیره می‌شود، بدون آنکه آلیاژ را از بین ببرد.

جدول ۳۰ ـ خلاصه‌ای از اطلاعات کاربردی مربوط به آلیاژهای پایه ـ مس

ماده	مشخصات	کلیات
فنر برنجی	ارزانتریـن آلـیاژ فـنری پایـه ـ مـس. بهتریـن هـادی الکتریسـیته در جایی که باز وبسته کردن تکراری نیازی نباشـد، دارای خـواص عالی خمشی، کششی و شکلدهی. هماهـنگ و سازگار با رنگ مناسب برای درجه حرارتهای تـا (۱۷۵ ^{0}F) ۸۰ ^{0}C سختی پذیری از طریق عملیات حرارتـی. در تنش‌های بالا یا جایی که عمر طولانی مورد نظر است استفاده نشود.	ایـن سـه آلـیاژ پایـه مـس بـرای فنرهایـی کـه در دسـتگاههای الکتریکـی کاربرد دارند و برای برقراری جـریان بـرق کـاملا مناسـب هسـتند. همگی آنها در مقـابل خوردگـی مقـاوم بـوده و بـرای کاربردهای با دمـای زیـر صـفر مفـید می‌باشند. به سادگی خمیده شـده و شکل‌پذیر می‌باشند. غیرمغناطیسی بوده و به راحتـی جوشـکاری، لحـیمکاری و پوشـش‌دهـی الکتریکـی مـی‌شـوند. بطـور وسیعی به شکل ورق و مفـتول کـار بـرده مـی‌شـوند. از قطـر ۰/۱۳ تـا ۱۳ میلی‌متر دستیابی هستند.
فسفر ـ برنز	پرکارتریـن آلیاژ فنری پایه مس. هدایت الکتریکی خوب و مقـاوم در مقـابل تأثیرات حاصل از قطع و وصل کردن تکراری، خواص خمشی وشکل پذیری خوب. مناسب برای درجه حرارت‌های تا (۱۲۵ ^{0}F) ۱۰۵ ^{0}C. سـختی پذیـری از طریق عنلیات حرارتی. قابل دسترسی در اندازه‌های کاملا متنوع.	

بریلیوم ـ مس	هدایت الکتریکی بالا به همراه قابلیت تحمل در برابر تنش‌های زیاد و مناسب برابر کاربردهایی با عمر طولانی. خواص شکل‌پذیری عالی. هیسترزیس کم. به ویژه مفید برای ابزار اندازه‌گیری، سویچ‌ها و تنظیم کننده‌ها. خواص خود را بطور مستقیم از نورد سرد بدست نمی‌آورند. معمولا به صورت آنیل تولید شده و سپس از طریق رسوب سختی، سخت می‌شوند. در دماهای تا (۳۰۰ ^{0}F) ۱۵۰ ^{0}C قابل استفاده می‌باشند. گرانترین نوع آلیاژهای پایه مس هستند.	
مس ـ منگنز نیکل ـ نقره کوپرونیکل	دارای رنگ نقره‌ای و هماهنگ و سازگار بامحیط. بطور وسیعی در اتصالات سویچ استفاده می‌شود.	این مواد جزء آلیاژهای مخصوص هستند که اساسا جایگزین‌های مناسبی برای اغلب آلیاژهای عمومی پایه ـ مس می‌باشند و همگی دارای خواص شکل‌پذیری خوب با خواص مقاوم به خوردگی عالی هستند.
سیلیسیوم ـ برنز آلومینیوم ـبرنز مس ـ سلیسیوم منگنز ـ برنز قلع ـ برنج	دارای هدایت الکتریکی بالایی می‌باشند.	

آلیاژهای پایه ـ نیکل به ویژخ در مقابل قلیاها مقاوم هستند. اینکونل در مقابل بخار هوا و دی‌اکسیدکربن مقاوم است، ولی کلروین مرطوب، برومین و دی‌اکسیدگوگرد، نیکل‌ها، مونل‌ها و اینکونل‌ها را مورد حمله قرار می‌دهند.

همه آلیاژهای پایه ـ نیکل را در برابر نمک‌های خنثی یا قلیائی مقاوم هستند، ولی از طریق نمک‌های اسیدی اکسیده شده، کلریدهای آهنی، مسی و جیوه‌ای مورد حمله قرار می‌گیرند. آلیاژهای نیکل و مونل از طریق اسیدهای اکسیده شده مثل اسیدنیتریک مورد حمله قرار می‌گیرند، ولی اینکونل در دماهای متوسط مقاوم می‌باشد. همچنین حلال‌های اسیدی، گوگردی به ویژه هنگامی که داغ هستند به این آلیاژها حمله می‌کنند. آلیاژهای نیکل از طریق ترکیبات آلی قلیائی و خنثی تاثیری نمی‌پذیرند، ولی اسیدهای آلی خوردگی متوسط در آنها ایجاد می‌کنند. آلیاژهای مونل مقاومت خوبی در مقابل اسیدهای آلی (ارگانیکی)، ترکیبات آلی قلیائی و خنثی، مثل اسیدهای میوه و دیگر مواد غذایی از خود نشان می‌دهند. آلیاژهای نیکل و

مونل در مقابل اسیدسولفوریک آزاد در هوا مقاومت می‌کند و اینکونل دارای مقاومت کمی نسبت به اسیدهای سولفوریک و هیدرولیک در دمای اتاق از خود نشان می‌دهد، اما برای اسیدهیدروکلریک داغ یا غلیظ نباید استفاده شود.

٦- مونل ٤٠٠ مفتول فنر

- **توصیف**

مونل ۴۰۰ یک حلال جامد تقریبا غیرمغناطیس است که حدود دو سوم آن نیکل و یک سوم آن مس می‌باشد. این آلیاژ ترکیب مناسبی از استحکام کششی بالا و مقاومت به خوردگی خوب را در بر دارد. این ماده را فقط می‌توان برای فنرهایی که به صورت سرد شکل داده می‌شوند، استفاده کرد و نمی‌توان آن را از طریق عملیات حرارتی سخت کرد. مفتول این آلیاژ به وسیله شناسه AMS 4730C شناسائی می‌شود.

- **کاربردها:**

گرچه مونل زیاد گران نبوده و دارای پایین‌ترین استحکام کششی در بین آلیاژهای پایه ـ نیکل می‌باشد، ولی به دلیل خواص مقاوم به خوردگی در مقابل آب دریا و تقریبا غیرمغناطیس بودن آن مفید می‌باشد. این آلیاژ را می‌توان به مقدار کمی بالاتر از فسفر ـ برنزو تقریبا برابر با بریلیوم ـ مس تحت تنش قرار دارد. مونل را می‌توان در محدوده دمای بین ۷۳ ـ تا 20^0C 2 (۱۰۰ ـ تا 425^0F) در تنش‌های متوسط طراحی بکار ـ گرفت.

ترکیب شیمیایی : جدول ۳۱ را ببینید.

جدول ۳۱ ـ ترکیب شیمیایی مونل (درصد)

عنصر	درصد
نیکل	۶۳_۷۰
مس	باقیمانده
آهن (حداکثر)	۲/۵۰
سیلیسیوم (حداکثر)	۰/۵۰
منگنز (حداکثر)	۲/۰۰
آلومینیم (حداکثر)	-
کربن (حداکثر)	۰/۳۰
گوگرد (حداکثر)	۰/۰۲۴

- **خواص مکانیکی مونل ۴۰۰، کیفیت مفتول فنر:**

مدول الاستیسیته: مقدار E در کشش (برای فنرهای پیچشی) = ۱۷۹۲۶۵MPa (۲۶۰۰۰۰۰۰psi) مقدار G در پیچش (برای فنرهای فشاری و کششی) = ۶۵۵۰۰MPa (۹۵۰۰۰۰۰psi)

استحکام کششی: جدول ۳۲ را ببینید.

حد الاستیک: درصدی از استحکام کششی در کشش = ۶۵ تا ۷۰ درصد (برای فنرهای پیچشی)، در پیچش = ۳۸ تا ۴۲ درصد (برای فنرهای فشاری و کششی)

هدایت الکتریکی: در مقایسه با مس = ۳/۶ درصد

وزن مخصوص: ۸/۸۳ g بر هر سانتی‌مترمکعب

جدول ۳۲ـ استحکام کششی (متوسط): سختی مفتول فنر ۹۷ برینل

قطر (mm)	استحکام کششی	
	psi	Mpa
تا ۰/۷۱	۱۶۵/۰۰۰	۱۱۴۰
از ۰/۷۱ تا ۱/۴۵	۱۶۰/۰۰۰	۱۱۰۰
از ۱/۴۵ تا ۲/۹۰	۱۵۰/۰۰۰	۱۰۳۵
از ۲/۹۰ تا ۵/۸۰	۱۴۵/۰۰۰	۱۰۰۰
از ۵/۸۰ تا ۸/۰۰	۱۴۰/۰۰۰	۹۶۵
از ۸/۰۰ تا ۹/۵۰	۱۳۵/۰۰۰	۹۳۰
از ۹/۵۰ به بالا	۱۳۰/۰۰۰	۸۹۵

- **عملیات حرارتی:**

مونـل نمی‌تواند از طریق عملیات حرارتی سخت شود ولی باید بعد از حلقه پیچی به منظور حذف تنش های پسماند به شرح زیر تنش‌زدایی شود:

برای عملیات متوسط: (^{0}F ۵۰۰ تا ۴۵۰) ^{0}C ۲۶۰ تا ۲۳۲

برای عملیات سخت: (^{0}F ۶۰۰ تا ۵۵۰) ^{0}C ۳۱۶ تا ۲۸۸

برای کاربردهای با دمای بالا: (^{0}F ۷۰۰ تا ۶۵۰) ^{0}C ۳۷۰ تا ۳۴۳

برای زمان عملیات حرارتی به جدول ۳۳ مراجعه کنید.

جدول ۳۳ـ زمان عملیات حرارتی (دقیقه)

اندازه (mm)	عملکرد		
	متوسط	سخت	دمای بالا
تا ۰/۶۵	۳۰ـ۴۵	۵۰ـ۶۰	۱ـ۲ ساعت
از ۰/۶۵ به بالا	۴۵ـ۶۰	۶۰ـ۸۰	۲ـ۳ ساعت

۷- مونل ۵۰۰ – k : مفتول فنر

مونـل ۵۰۰ ـ k کاملا شبیه با مونل ۴۰۰ بوده و حدود دو سوم آن نیکل و یک سوم آن مس است، جز اینکه افزودن مقدار کمی آلومینیوم و تیتانیوم به آن، آن را در گروه آلیاژهای رسوب سختی قرار می‌دهد. این آلیاژ در مقایسـه با Monel ۴۰۰ در اندازه‌های بزرگتری بکار گرفته می‌شود، زیرا در حالت نرم شکل داده شده و پـس عملـیات حرارتـی می‌گردد. این ماده غیرمغناطیس است. این‌آلیاژ با شناسه MIL-W-4471 شناخته می‌شود.

- **کاربردها**

ایـن‌آلـیاژ در مقـابل خوردگی مقاوم بوده و غیرمغناطیس است و در اندازه‌های مختلف تا حدود ۱۳ میلی‌متر بـرای فنرهای پیچیده شده به صورت سرد و قطرهای بزرگتر برای فنرهای پیچیده شده به صورت گرم، قابل دستیابی می‌باشد. این ماده در شرایط نرم به سادگی شکل داده می‌شود و خم‌های تیز را عمل می‌کند پس از شکلدهی از طریق عملیات حرارتی پیر سختی طولانی، استحکام تسلیم و سختی‌اش از مونل ۴۰۰ بالاتر رفته و حتی در ردیف فولاد زنگ‌نزن قرار می‌گیرد. این آلیاژ را می‌توان در محدوده دمایی ۲۳۲^{0}C تا ۷۳ (۴۵۰^{0}F تا ۱۰۰) و در تنش‌های متوسط طراحی حدود ۳۴۵MPa (۵۰۰۰۰psi) مورد استفاده قرار داد.

- **ترکیب شیمیایی**

جدول ۳۴ را ببینید.

- **خواص مکانیکی مفتول فنر ۵۰۰ ـ Monelk (بعد از رسوب سختی)**

مـــدول الاستیسیته: مقـــدار E در کششـی (برای فنرهای پیچشی) =MPa ۱۷۹/۲۵۶ (psi ۲۶/۰۰۰،۰۰۰)، مقدار Gدرپیچش (برای فنرهای فشاری و پیچشMPa ۶۵/۵۰۰ (psi ۹/۰۰۰،۵۰۰)

استحکام کششی و حدالاستیک: استحکام کششی و حدالاستیک با توجه به مقدار سختی متغیر است که مقادیر آنها در جدول ۳۵ آورده شده است.

جدول ۳۴ ـ ترکیب شیمیایی ۵۰۰ ـ monel k (درصد)

عنصر	مفتول MLL-W-4471
نیکل	۶۳ـ۷۰
مس	باقیمانده
آهن (حداکثر)	۲/۰
سیلیکون (حداکثر)	۰/۱
منگنز (حداکثر)	۱/۵
آلومینیوم	۲/۰ ـ ۴/۰
کربن (حداکثر)	۰/۲۵
گوگرد (حداکثر)	۰/۱۰
تیتانیوم	a

a- ممکن است حاوی تیتانیوم از ۰/۲۵ تا ۱/۰ باشد که در این صورت مقدار گوگرد به ۰/۰۱ درصد کاهش می‌یابد.

جدول ۳۵ ـ استحکام کششی و حدالاستیک (حداقل)

سختی RHC	استحکام کششی		حدالاستیک	
	(psi)	MPa	(psi)	MPa
نیم سخت، ۳۶	۱۶۵/۰۰۰	۱۱۴۰	۱۱۰/۰۰۰	۷۶۰
تمام سخت،۳۸	۱۷۲/ ۰۰۰	۱۱۸۵	۱۱۵/۰۰۰	۷۹۵
فنر سخت، ۴۰	۱۸۰/۰۰۰	۱۲۴۰	۱۲۰/۰۰۰	۸۲۵
			۷۲/۰۰۰	۴۹۵

حد الاستیک: درصدی از استحکام کششی، در کشش = ۶۵ تا ۷۰ درصد (برای فنرهای پیچشی)، در پیچش = ۳۸ تا ۴۲ درصد (برای فشاری و کششی)

هدایت الکتریکی: در مقایسه با مس = ۲/۸ درصد.

وزن مخصوص: ۸/۴۷g بر هر سانتی متر مکعب.

- **عملیات حرارتی:**

در $538^0C(1000^0F)$ به مدت ۸ ساعت روسب سختی شده و سپس دما به کندی به مدت یک ساعت تا ($480^0C(900^0F$ افت پیدا می کند، سپس از کوره خارج شده و در هوا خنک می گردد. توجه شود که این عملیات ممکن است کمی بیشتر از یک روز کاری به طول انجامد.

۸- مفتول و ورق Inconel 600

- **توصیف**

اینکونل ۶۰۰ یک آلیاژ نیکل ـ کروم ـ آهن غیر مغناطیسی است. استحکام و سختی‌اش را از طریق کشش سرد می‌یابد و قابل عملیات حرارتی نمی‌باشد. مفتول این آلیاژ با شناسه AMS 5687 شناخته می شود.

- **کاربردها:**

این آلیاژ از فولاد زنگ‌نزن گران‌تر است و به ویژه برای استفاده در دماهای بالا حدود (۶۵/۰۰۰ psi) MPa ۴۵۰، عمر خستگی طولانی خواهد داشت. این آلیاژ درمقابل خوردگی نیز مقاوم می باشد. فنرهای فشاری ساخته شده از این ماده اغلب در سوپاپ‌های بخار، سوپاپ‌های تنظیم کننده بویلرها، کمپرسها، توربین‌های جت استفاده می‌شود.

- **ترکیب شیمیایی:**

ترکیب شیمیایی این آلیاژ در جدول ۳۶ نشان داده شده است.

جدول ۳۶ ـ ترکیب شیمیایی اینکونل ۶۰۰

عنصر	درصد
نیکل	۷۲ حداقل
کروم	۱۴ـ۲۷
آهن	۶ـ۱۰
منگنز	۱ حداکثر
مس	۰/۵۰ حداکثر
سیلیکون	۰/۵۰ حداکثر
کربن	۰/۱۵ حداکثر
گوگرد	۰/۱۵۰ حداکثر

- **خواص مکانیکی مفتول Inconel 600**

مدول الاستیسیته: این ماده اغلب در دماهای بالا استفاده می‌شود لذا باید مدول الاستیسیته نسبت به دما مشخص بوده و در طراحی ها به حساب آورده شود (این تغییرات در جدول ۳۷ آورده شده است).

جدول ۳۷ـ تغیرات مدول الاستیسیته ۶۰۰ نسبت به درجه حرارت.

درجه حرارت		E		G	
(^oF)	(^oC)	(psi)	MPa	(psi)	MPa
۷۰	۲۱	۳۱،۰۰۰،۰۰۰	۲۱۳/۷۴۰	۱۱،۰۰۰،۰۰۰	۷۵۸۰
۴۰۰	۲۰۰	۲۹،۵۰۰،۰۰۰	۲۰۳/۴۰۰	۱۰۴۰۰۰۰۰	۷۱۷۰۰
۵۰۰	۲۶۰	۲۹،۲۰۰،۰۰۰	۲۰۱/۳۲۰	۱۰۲۰۰۰۰۰	۷۰۳۲۵
۶۰۰	۳۱۵	۲۸،۴۰۰،۰۰۰	۱۹۷/۸۸۰	۹۹۰۰۰۰۰	۶۸۲۶۰
۶۵۰	۳۴۵	۲۸،۴۰۰،۰۰۰	۱۹۵/۸۱۰	۹۷۵۰۰۰۰	۶۷۲۳۵
۷۰۰	۳۷۰	۲۸،۲۰۰،۰۰۰	۱۹۴/۴۳۰	۹۶۵۰۰۰۰	۶۶۵۳۵

استحکام کششی: استحکام کششی با توجه به قطر مفتول از MPa ۱۱۰۰ (برای مفتول با قطر بیشتر از ۶/۳۵ میلی متر) تا ۱۲۷۵ مگا پاسکال (برای مفتول ۰/۲۵ میلی متر) متغیر است (۱۶۰/۰۰۰ تا psi ۱۸۵/۰۰۰).

حد الاستیک: درصدی از استحکام کششی، در کشش = ۶۵ تا ۷۰ درصد (برای فنرهای پیشی)، در پیچش = ۴۰ تا ۴۵ درصد (برای فنرهای فشاری و کششی).

هدایت الکتریکی: خیلی کم، به عنوان کنداتور نباید استفاده شود.

ـ **وزن مخصوص:** ۸/۴۱۵g بر هر سانتی متر مکعب.

- **عملیات حرارتی:**

اینکونل ۶۰۰ نمی‌تواند از طریق حرارتی سخت شود، ولی بعد از حلقه پیچی به منظور حذف تنش‌های پسماند باید تنش‌ها به شرح زیر یکنواخت شوند.

برای کاربردهای متوسط: (۷۵۰ تا ۷۰۰) ۴۰۰ تا ۳۷۰

برای کاربردهای سخت: (۸۵۰ تا ۸۰۰) ۴۵۰ تا ۴۲۵

برای کاربردهای با دمای بالا: (۹۰۰ تا ۸۵۰) ۴۸۰ تا ۴۵۵

زمان حرارت دهی در جدول ۳۸ آورده شده است.

جدول ۳۸ـ زمان حرارت دهی (دقیقه)

اندازه		شرایط کاری		
(in)	(mm)	متوسط	سخت	دمای بالا
تا ۰/۰۲۵	تا ۰/۶۵	۳۰_ ۴۵	۵۰_ ۶۰	۶۰ _ ۱۲۰
بالاتر از ۰/۰۲۵	بالاتر از ۰/۶۵	۴۵_ ۶۰	۶۰ _ ۸۰	۱۲۰_۱۸۰

۹- مفتول فنر Inconel - X ۷۵۰

- **توصیف**

اینکونل ۷۵۰ـ X یک آلیاژ نیکل ـ کروم ـ آهن بوده که کاملا مشابه اینکونل بوده جز آنکه افزودن مقدار کمی آلومینیوم، کلومبیوم و تیتانیوم آن را در ردیف آلیاژهای قابل رسوب سختی قرار می‌دهد. این آلیاژ دماهای بالا تحمل کرده و غیر مغناطیسی است.

مفتول این ماده با شناسه MLL-S-21997,AMS 56997 شناخته می‌شود.

- **کاربردها:**

ـ این آلیاژ مقاوم در مقابل خوردگی، غیر مغناطیسی بوده و قدر است دمای (۸۵۰ F) ۴۵۵C را تحمل کند. این ماده می‌تواند به صورت سرد یا گرم پیچی شده و شکل داده شود و سپس از طریق رسوب سختی به استحکامهای کششی بالاتر از اینکونل دست یابد. حتی از آن در دماهای زیر صفر و در پره‌های روتور توربین گاز، سوپاپ‌های بخار و کاربردهای مشابه با دمای بالا می‌توان استفاده کرد. سختی، استحکام کششی، حد الاستیک و تنش‌های توصیه شده طرای بسیار به شرایط تمپر کردن. عملیات حرارتی و دمای محیطی وابسته می‌باشد.

- **ترکیب شیمیایی:**

جدول ۳۹ را ببینید.

جدول ۳۹ ـ ترکیب شیمیایی اینکونل ۷۵۰ـ X

عنصر	درصد
نیکل (بعلاوه کبالت)	حداقل ۷۰
کروم	۱۴/۰_۱۷/۰
آهن	۵/۰_۹/۰
تیتانیوم	۲/۲۵_۲/۷۵
آلومینیوم	۰/۴۰_۱/۰
کلومبیوم (به همراه تانتالیوم)	۰/۷۰_۱/۲۰
منگنز	حداکثر ۱/۰
سیلیسیوم	حداکثر ۰/۵
گوگرد	حداکثر ۰/۰۱۰
مس	حداکثر ۰/۵۰
کربن	حداکثر ۰/۰۸
کبالت	حداکثر ۱/۰

• خواص مکانیکی مفتول اینکول ۷۵۰ـ X (بعد از رسوب سختی)

مدول الاستیسیته: مدول الاستیسیته در این آلیژ نیز دما وابسته است که تغییرات آن در جدول ۴۰ آورده شده است.

جدول ۴۰ـ مدول الاستیسیته بر حسب درجه حرارت

درجه حرارت		E		G	
(^{0}F)	(^{o}C)	(psi)	MPa	(psi)	MPa
۷۰	۲۱	۳۱،۰۰۰،۰۰۰	۲۱۳۷۴۰	۱۱۲۰۰۰۰۰	۷۷۲۲۰
۵۰۰	۲۶۰	۲۹۱۰۰۰۰۰	۲۰۰۶۴۰	۱۰۲۰۰۰۰۰	۷۰۳۳۰
۷۰۰	۳۷۰	۲۷۷۰۰۰۰۰	۱۹۰۹۸۰	۱۰۰۰۰۰۰۰	۶۸۹۵۰
۸۰۰	۴۲۵	۲۷۲۰۰۰۰۰	۱۸۷۵۴۰	۹۸۰۰۰۰۰	۶۷۵۷۰
۹۰۰	۴۸۰	۲۶۷۰۰۰۰۰	۱۸۴۰۹۰	۹۴۰۰۰۰۰	۶۲۷۴۰
۱۰۰۰	۵۴۰	۲۶۱۰۰۰۰۰	۱۷۹۵۵۰	۹۱۰۰۰۰۰	۶۲۷۴۰
۱۱۰۰	۵۹۵	۲۵۵۰۰۰۰۰	۱۷۵۸۱۰	۸۸۰۰۰۰۰	۶۰۶۷۰
۱۲۰۰	۶۵۰			۸۱۰۰۰۰۰	۵۵۸۵۰

استحکام کششی: جدول ۴۱ را ببینید.

جدول ۴۱ـ استحکام کششی Inconel X-۷۵۰، ابتدا تمپر شده، سپس به مدت ۴ ساعت در دمای 650^0C نگهداشته شده است.

استحکام کششی		استحکام کششی	
(psi)	MPa	(psi)	MPa
تا ۰/۲۵	تا ۶/۵	۲۲۰/۰۰۰	۱۵۱۷
بالاتر از ۰/۲۵ تا ۰/۵	بالاتر از ۶/۵ تا ۱۳/۰	۲۰۰/۰۰۰	۱۳۷۹
بالاتر از ۰/۵	بالاتر از ۱۳/۰	۱۹۰/۰۰۰	۱۳۱۰

حد الاستیک: درصدی از استحکام کششی است، در کشش = ۶۵ تا ۷۰ درصد (برای فنرهای پیچشی)، در پیچش = ۴۰ تا ۴۵ درصد (برای فنرهای فشاری و کششی).

هدایت الکتریکی: خیلی کم، به عنوان کنداکتور نباید استفاده شود.

وزن مخصوص: ۸/۲۵g بر هر سانتی متر مکعب.

- **عملیات حرارتی:**

چندین عملیات مختلف رسوب سختی، به مقدار سختی قبل از حرارت دهی دمای بکارگیری ماده و استحکام مورد نیاز، برای اینکونل ۷۵۰ ـ X وجود دارد. بعضی از آنها در جدول ۴۲ آورده شده است.

جدول ۴۲ـ عملیات حرارتی اینکونل ۷۵۰ـ X

کاربرد عمومی	کاربردهای سخت تا	کاربردهای با دمای بالا تا
تا 345^0C (650^0F)	425^0C (800^0F)	(a) 540^0C (1000^0F)
650^0C (1200^0F)	700^0C (1300^0F)	730^0C (1350^0F)
به مدت ۴ تا ۶ ساعت	به مدت ۶ تا ۸ ساعت	به مدت ۱۴ تا ۱۶ ساعت

توجه: فنرها باید در خود کوره یا در هوا سرد شوند.

A در دماهای حدود (850^0f) 455^0c، تنش‌ها از (۵۵،۰۰۰ psi) ۳۸۰ MPa بالاتر نروند، در این حالت حدود ۵ درصد افت بار در ۲۴ ساعت مشاهده می‌گردد.

۱۰- آلیاژهای مدول ثابت

برای فنرهایی که در عمل تحت شرایط دمایی مختلفی قرار دارند، به ویژه جایی که فنرها که فنرها باید مشخصه بار ـ جابجایی ثابتی داشته باشند، آلیاژهای مخصوص نیکل دارای مدول الاستیسیته ثابتی در محدوده وسیعی از درجه حرارت باشند، بسیار مورد نظر است. این مواد دارای ضریب ترموالاستیک پایین و یا صفر بوده، لذا تغییر سختی حاصل تغییر مقدار مدول الاستیسیته که از تفاوت در مقدار ناشی می گردد، در آنها حذف می گردد. این آلیاژهای مقاوم به خوردگی دارای مشخصه‌های الاستیک یکنواخت و تقریبا ثابتی بوده و مقادیر هیسترزیس و خزش کم، آنها را برای ترازوهای توزین مواد غذایی، ابزار دقیق، ژیرسکوپ‌ها، ابزار اندازه گیری، ابزار ثبت مقادیر و کمیت‌ها و موارد دیگر که در آنها تغییر دما در محدوده ۴۶ ـ ت ^{0}C ۶۶ (۵۰ تا ۱۵۰ ^{0}) باشد، مستعد می‌سازد. این موادکاملا گران بوده و در ابعاد و اندازه‌های مختلف یافت نمی‌شوند و باید حتی‌الامکان با مشاوره با تولیدکنندگان آنها و گرفتن اطلاعات دقیق طراحی مورد استفاده قرار گیرد. این آلیاژها در اندازه قطره هایی کوچک بکار گرفته می‌شوند.

- **الینوار:**

الینوار یک آلیاژ نیکل ـ آهن ـ کروم بوده و اولین ماده مدول ـ ثابت استفاده شده در فنر رقاصک ساعت می‌باشد. این ماده یک آلیاژ آستنیتی بوده که فقط توسط کشش سرد و نورد سرد سخت می گردد. با اضافه کردن تیتانیوم، تنگستن، مولیبدن و دیگر عناصر آلیاژی به آن، ویژگیهای آن بهبود یافته و آنرا مستعد رسوب سختی کرده است.

- **ایزوالاستیک:**

ایزوالاستیک یک آلیاژ عمومی نیکل ـ آهن ـ کروم ـ کبالت می‌باشد. این ماده بطور وسیعی در دینامومترها ابزار محاسب، ابزار و ترازوهای توزین مواد غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

بعضی از خواص فنرهای پیچشی: E =۱۷۹۲۶۰ MPa (۲۶۰۰۰۰۰۰ psi)

برای فنرهای فشاری و کششی: G =۶۳۴۰ MPa (۹۲۰۰۰۰۰ psi)

استحکام کششی = ۱۱۷۰ MPa (۱۷۰۰۰۰ psi)

تنش های طراحی پیشنهادی، برای کاربردهای متوسط عبارتست از:

برای فنرهای فشاری = ۴۵۰ MPa (۶۵۰۰۰ psi)

برای فنرهای کششی = ۴۱۵ MPa (۶۰/۰۰۰psi)

برای فنرهای پیچشی = ۶۹۰ MPa (۱۰۰/۰۰۰ psi)

سختی راکول C = ۳۲ تا ۳۶

- **الگیلوی:**

الگـیلوی یـک آلیاژ کبالت ـ کروم ـ نیکل ـ آهن است. این ماده غیر مغناطیس بوده و مناسب برای دماهـای زیر صفر و دماهای بالا تا (۷۵۰ ^{0}F) ۴۰۰ ^{0}C می‌باشد. در این شرایط تنش‌های پیچشی در آن نباید از (۷۵/۰۰۰ psi) ۵۱۵ MPa تجاوز کند.

مفـتول آن از طـریق کشـش سرد با ۴۵ درصد کاهش سطح مقطع تولید شده و سپس در دمـای (۹۸۰ ^{0}F) ۵۲۵ ^{0}C به مدت ۵ ساعت بعد از حلقه گرما داده می‌شود. از این آلیاژ برای فنر اصلی ساعت، ابزار نشان‌دهنده قطب نماها و موتورهای پله‌ای استفاده می‌شود.

- **آلیاژ Ni-Span C شماره ۹۰۲**

آلیاژ Ni-Span-C شماره ۹۰۲ یک آلیاژ نیکل ـ آهن ـ کروم ـ تیتانیوم است که یکی از معمول‌ترین آلیاژهای مدول ثابت می‌باشد. این ماده در شرایط کار سرد با کاهش مقطع ۵۰ درصد شکل داده شده و سپس در دمای (۹۰۰ ^{0}F) ۴۸۰ ^{0}C به مدت ۸ ساعت رسوب سختی می‌گردد. البته دیگر عملیات حرارتی برای آن وجود دارد. خواص آن بعد از عملیات حرارتی به شرح زیر می‌باشد.

برای فنرهای پیچشی (۲۷۵۰۰۰۰۰ psi) E =۱۸۹۶۰۰ MPa

برای فنرهای فشاری و کششی (۱۰۰۰۰۰۰۰ psi) G =۶۸۹۵۰ MPa

استحکام کششی، مفتول و ورق = (۲۰۰۰۰۰ psi) ۱۳۸۰ MPa

حدالاسـتیک = درصدی از استحکام کششی، در کشش = ۶۵ تا ۷۰ درصد (برای فنرهای پیچشی)، در پیچش = ۳۸ تا ۴۲ درصد (برای فنرهای فشاری و کششی).

تنش‌های طراحی پیشنهادی: برای کاربردهای متوسط عبارتست از:

(۶۰۰۰۰ تا ۷۰۰۰۰ psi) ۴۸۰ MPa تا ۴۱۵ = برای فنرهای فشاری

(۵۰۰۰۰ تا ۵۵۰۰۰ psi) ۳۸۰ MPa تا ۳۴۵ = برای فنرهای کششی

(۱۲۰۰۰۰ تا ۱۳۰۰۰۰ psi) ۸۹۵ MPa تا ۸۲۵ = برای فنرهای پیچشی

سختی مفتول، راکول C = ۵۱ تا ۵۵

- **Elvinor Extra**

یک آلیاژ نیکل ـ کروم ـ تیتانیوم ـ آهن با مقادیر کمی کبالت، آلومینیم می‌باشد. این ماده یک آلیاژ رسوب ـ سخت شده است که اگر با ۵۰ درصد کاهش مقطع بصورت سرد کشیده شده و در دمای (۱۲۵۰ ^{0}F) ۶۷۵ ^{0}C به مدت دو ساعت نگهداشته شود، استحکام کششی برابر (۲۰۰۰۰۰ psi) ۱۳۸۰ MPa و مدول الاستیسیته (۲۸۰۰۰۰۰۰ psi) ۱۹۳۰۰۰ MPa و سختی ۴۲ راکول C پیدا می‌کند. از این ماده برای فنر اصلی ساعت و در ابزار اندازه‌گیری و دقیق استفاده می‌شود.

۱۱- مواد دیگری که گاهی اوقات برای استفاده می‌شوند

- **مفتول راکت Rocket**

مفتول راکت از لحاظ شیمیایی مشابه مفتول موزیک بوده، اما مخصوصا برای یکنواختی با کربن از ۰/۸۰ تا ۱/۰ درصد و منگنز از ۰/۲۵ تا ۱/۰ درصد انتخاب و سپس به منظور دستیابی به استحکام کششی حدود ۱۰ تا ۲۸ درصد بالاتر از مفتول موزیک، به صورت سخت کشیده می‌شود. مدول الاستیسیته آن E در کشش برابر (۲۹/۵۰۰/۰۰۰ psi) ۲۰۳۴۰۰ MPa و در پیچش G برابر (۱۱/۵۰۰/۰۰۰ psi) ۷۹/۲۹۰ MPa می‌باشد. حدالاستیک آن در کشش حدود ۷۰ درصد استحکام کششی ودر پیچش هنکامیکه برای فنرهای فشاری و کششی استفاده شد ۵۰ درصد است. این مفتول مستحکم بویژه برای فنرهای کوچکی که ممکن است در اثر تنش‌های عملکردی بالا، وامانده شوند، مناسب است. این مفتول نیز باید در دمایی مشابه با مفتول موزیک، تنش‌زدایی شود.

- **آلیاژ B، Hastelloy :**

آلیاژ B، Hastelloy یک آلیاژ نیکل ـ مولیبدن ـ آهن است که بویژخ برای استفاده در اسید هیدروکلرید در همه غلظت‌ها و درجه حرارت‌ها مناسب و مقاومت به خوردگی خوبی در اسید سولفوریک دارد. مفتول تمپر شده آن دارای استحکام کششی (۲۶۰/۰۰۰ psi تا ۲۲۵/۰۰۰) Mpa ۱۸۰۰ تا ۱۵۵۰ می باشد که اگر لازم باشد از طریق عملیات حرارتی قابل افزایش نیز می باشد.

- **آلیاژ C، Hastelloy :**

این آلیاژ نیز مانند آلیاژ B، یک آلیاژ پایه ـ نیکل است. این ماده بالایی در مقابل خوردگی داشته و می‌تواند در مقابل حمله گازها کلرینی مرطوب، ترکیب‌های اکسیدکننده قوی و اسید سولفوریک تحمل داشته باشد. خ.اص آن همانند نوع Bبوده ولی کمی کمتر از آن می‌باشد.

- **Havar:**

هـاوا یـک الیاژ کبالت ـ کروم ـ نیکل ـ آهن با مقادیر کمی تنگستن و مولیبدن است. این آلیاژ غیر مغناطیس و مقاوم به خوردگی بوده وبرای حرارت‌های زیر صفر تا (۷۵۰ ^{0}F) ۴۰۰ ^{0}C و تنش‌های پیچشی تا (۷۵،۰۰۰ psi) ۵۱۵ MPa مفید می‌باشد. این ماده از شکل‌دهی با قرار دادن در دمای (۹۵۰ ^{0}F) ۵۱۰ ^{0}C بـه مـدت ۳ سـاعت مـی‌تـوان سخت کرد و به استحکام کششی بالاتر از (psi ۳۰۰،۰۰۰) ۲۰۷۰ MPa و سـختی ۵۶ تـا ۶۰ راکول C و مدول الاستیسیته (psi ۳۰،۰۰۰،۰۰۰) E = ۸۰۰،۲۰۶ MPa دسـت یافت. این آلیاژ در فنر اصلی ساعت و فنرهای موتور و غیره بکار برده می‌شود.

- **تیتانیوم:**

چندیـن ترکیب آلیاژی از تیتانیوم (حدود یک سوم آلیاژهای فولادی) قابل دستیابی است. این آلیاژ در مقابل خوردگی مقاوم بسیار خوبی داشته و در دماهای بالا مفید می‌باشد.

- **چوب، شیشه، لاستیک، آلومینیوم و فنر شیشه:**

مـواد دیگـری از قبیل چوب، شیشه، پلاستیک، آلومینیوم و فیبر شیشه، گاهی اوقات به منظورهای مختلف برای فنرها بکار برده می‌شود.

فصل سوم

طراحی فنرهای مارپیچ

۱- طراحی فنرهای مارپیچ فشاری

۱-۱ مقدمه

شاید فنرهای فشاری، معمول‌ترین نوع فنری باشند که در صنعت مهندسی به کارمی‌روند، به طوریکه ۶۰٪ - ۵۰ تمام فنرهای تولید شده از این نوع هستند. مقدار ذخیره انرژی بر واحد حجم و همچنین کارآیی این فنرها در مقایسه با دیگر فنرها بیشتر بوده و فرآیند تولید آنها نیز ساده‌تر و در نتیجه ارزانتر می‌باشد. همچنین امکان تولید این فنرها با تلرانس‌های نسبتا بالا براساس بار و ابعاد وجود داشته و نشیمنگاه(محل استقرار) این فنرها به سادگی و با هزینه کم ساخته می‌شود.

بنا به دلایل فوق، اکثر کارهای تحقیقاتی، بر روی فنرهای فشاری انجام گرفته و لذا، اطلاعات و روابط جامع و مفیدی در مورد طراحی این فنرها وجود دارد. اگر این اطلاعات و داده‌ها به طرز صحیحی به کار گرفته شود، آنگاه طراح می‌تواند مطمئن باشد که نتیجه طراحی دقیق بوده و فنر می‌تواند از عهده وظیفه مربوطه در عمل برآید.

یک فنر فشاری در واقع توسعه یافته یک میله ساده است. به منظور استفاده کامل از فضا، خود میله به شکل یک مارپیچ درآمده تا بار را به صورت محوری تحمل کند. بنابراین، هر جزء از فنر فشاری به صورت پیچشی تغییر شکل داده و تنش‌ها در آن از نوع تنش‌های برشی(یا پیچشی) می‌باشند.

۱-۲ فهرست علایم

هـر یک از پارامترهایی که در این فصل در طراحی فنرهای پیچشی به کار رفته‌اند، در جدول زیر آورده شده است. همچنین بسیاری از کمیت‌های ابعادی و دیگر عبارات در شکل (۱-۱) نشان داده شده است.

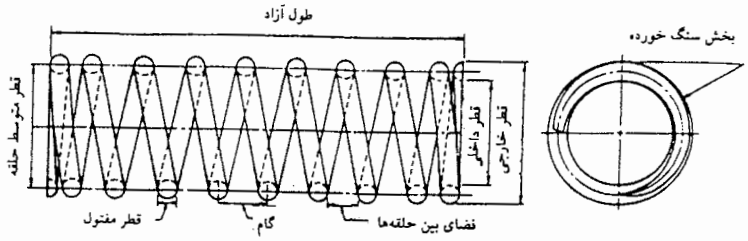
کمیت	نشانه	واحدها	
		متریک	اینچی
قطر مفتول	d	mm	in
قطر خارجی	D_0	mm	in
قطر داخلی	D_i	mm	in
قطر متوسط حلقه	D	mm	in
اندیس فنر	c	-	-
مدول پیچشی صلبیت(rigidity)	G	N/mm^2	lbf/in^2
طول آزاد	L_0	mm	in
طول کاری حداقل	L_n	mm	in
طول جمع‌شده(Solid)(طول بسته	L_S	mm	in
خیز(جابجایی)		mm	in
بار	P	N	lbf
بارکاری حداکثر	P_n	N	lbf
بار بسته(Solid)	P_S	N	lbf
سفتی(فرخ)فنر	S	N/mm	lbf/in
تعداد کل حلقه‌ها	N	-	-
تعداد حلقه‌های فعال	n	-	-
تعداد حلقه‌های غیرفعال	n'	-	-
تنش	τ	N/mm^2	lbf/in^2
تنش بسته شدن(Solid)	τ_s	N/mm^2	lbf/in^2

۱-۳ اندیس فنر

اندیس فنر C عبارت از نسبت متوسط حلقه D به قطر مفتول d می‌باشد، یعنی ،

$$C = \frac{D}{d} = \frac{D_0 - d}{d} \qquad (۱-۱)$$

اندیـس فـنر، یـک پارامتر مفید برای طراح است؛ زیرا نشان می‌دهد که فنر با چه درجه‌ای از سفتی پیچـیده شـده اسـت. یک اندیس با مقدار کم، فنری با سفتی خیلی بالا را نشان می‌دهد که با یک مفتول یا مـیله با قطر نسبتا بزرگ و یا قطر حلقه نسبتا کوچک پیچیده شده است. چنین فنرهایی به طور قطع، دارای سفتی(نرخ) محوری بسیار بالایی می‌باشند.



شکل ۱-۱ اصطلاحات و جزئیات یک فنر کشی مارپیچ

یـک اندیـس بـا مقـدار زیاد، نشانگر یک فنر پیچیده شده به صورت باز است که در امتداد محورش بسیار انعطاف‌پذیر می‌باشد(یعنی دارای سختی فنری پایین است).

تولـید فـنرهای بـا مقادیـر اندیـس خیلـی پاییـن و خیلی بالا در عمل بسیار مشکل است. استاندارد بریتانیایـی BS۱۷۲۶ بخـش اول ۱۹۸۷ تحت عنوان" **راهنمای طراحی فنرهای فشاری مارپیچ**" اشاره‌ای به مقادیر تلرانس تولید برای فنرهای با اندیس کمتر از ۳٫۵ یا بزرگتر از ۱۶ ندارد. طرح باید در صورت امکان سعی کند تا فنر را در محدوده اندیس بین ۵ تا ۱۰ طراحی کند تا از مشکلات مربوط به تولید اجتناب شود.

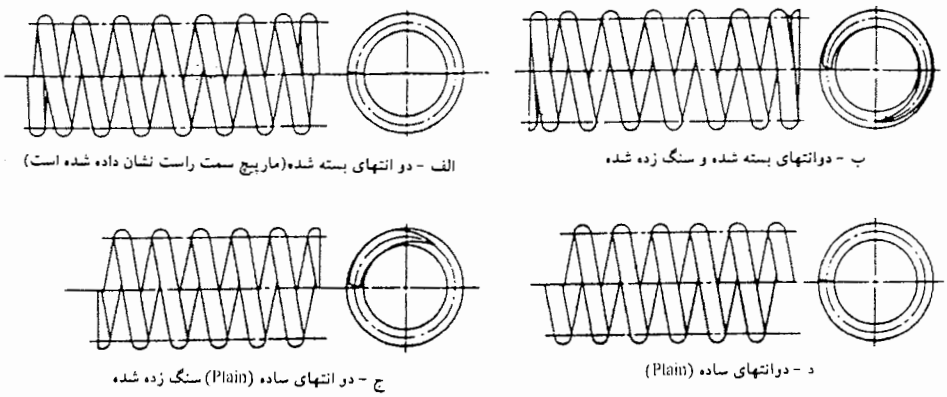
٤- ۱ انواع انتهای فنر

اولین تصمیمی که طرح باید در طراحی یک فنر بگیرد، انتخاب نوع انتهای آن می‌باشد. برای فنرهای فشاری سبک(حلقه شده به صورت سرد)، به طور کلی چهار نوع اصلی انتها وجود دارد که در شکل(۱-۲) نشان داده شـده اسـت. دو نـوع مرسـوم انتهای فنر، انواع A و B هستند که به ترتیب عبارتند از انتهای بسته و انتهای بسته و سنگ زده شده.

انـتهای صـاف(Plain- نـوع D) در تولـید، از بقـیه انواع ارزانتر بوده و بیشترین کارآیی را به لحاظ اشـغال فضـا دارد؛ زیـرا هیچ ماده غیر فعال یا « مرده‌ای» در حلقه‌های انتهایی آن وجود ندارد. با وجود این، روی هم رفته هنگامی که هزینه ایجاد شکل خاص نشیمنگاه در دو انتهای فنر در نظر گرفته شود، کم بودن قیمت فوق‌الذکر، دیگر امتیازی محسوب نمی‌شود. نشیمنگاه باید روی مارپیچی ماشینکاری شود، به طوریکه بافنر هنگامی که به حداقل طول کاری‌اش فشرده می‌شود، ساگار گردد. چنین نشیمنگاههایی دارای هزینه‌ای بالاتر از تولید خود فنر می‌باشند.

نوع انتها بسته(نوع A) ، به دلیل بسته‌شدن تصاعدی گام آخرین حلقه انتهایی، به طوریکه نوک حلقه انتهایی با حلقه قبلی تماس می‌یابد، تمایل به پایداری بیشتری در نشیمنگاهش دارد.

در نتیجه، دو انتهای به طور کلی غیر فعال شده و بنابراین فضای مفید محوری کاهش می‌یابد. در عین حال، تولید انتهای آن نسبتا ارزان است زیرا ماشین‌های فنر پیچ اتوماتیک طوری می‌توانند تنظیم شوند که بتواند به وسیله کنترل بادامک در حین سیکل فنرپیچی، آن را به شکل لازم درآورند.



شکل ۱-۲ انواع انتهای فنر برای فنرهای سبک

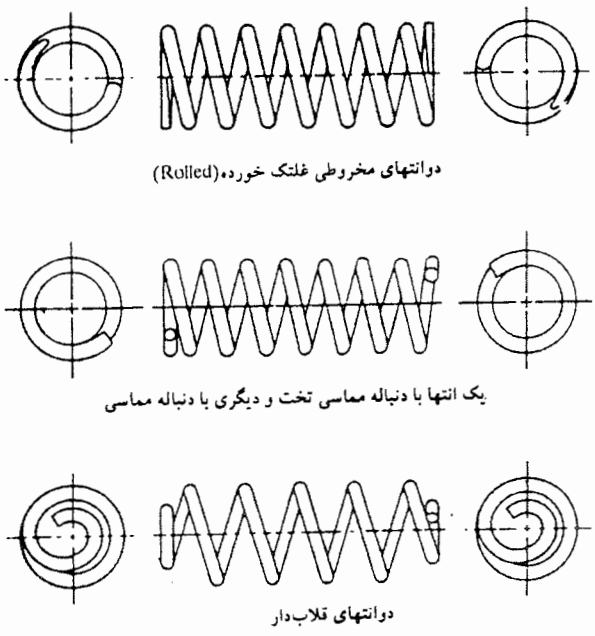
درجه پایداری ایجاد شده به وسیله نوک حلقه انتهایی نسبت به قطر حلقه کوچک بوده و لذا پایداری لازم ایجاد می‌گردد. به منظور اطمینان بیشتر از ثابت بودن انتهای فنر، هر دو نشیمنگاه انتهایی باید دارای تکیه‌گاهی باشند که در قطر داخلی فنر جای گیرد. ارتفاع تکیه‌گاه نباید بزرگتر از قطر مفتول باشد تا از تماس و سایش بین گوشه تکیه‌گاه و قطر داخلی بخش فعال فنر اجتناب شود. در عین حال، حتی با چنین وضعیتی، سایش قابل توجهی را در حلقه‌های انتهایی فعال فنر می‌توان انتظار داشت و بارهای جانبی نسبتا بالایی از طریق فنربه نشیمنگاههای انتهایی اعمال می‌گردد.

نوع انتهای بسته و سنگ خورده (نوع B) ، پایدارترین نوع انتهای فنر می‌باشد. شکل انتهایی در واقع همانند نوع انتها بسته، حلقه شده است. سپس در عملیات جداگانه‌ای بعد از حلقه کردن، هر دو انتها سنگ زده شده‌اند. عملیات سنگ‌زنی، نشیمنگاه صافی را در بیشتر از ۲۷۰ درجه محیط حلقه انتهایی ایجاد می‌کند که عمود بر محور فنر می‌باشد. به طور نمونه، ضخامت نوک حلقه انتهایی،تقریباً ۲۵٪ قطر مفتول اولیه می‌باشد، گرچه انحراف کمی از این مقدار را می‌توان انتظار داشت که ناشی از انحراف در طول آزاد فنرهای پیچیده شده توسط ماشین‌های حلقه‌پیچی می‌باشد.

از آنجایی که فنر یک عضو انعطاف‌پذیر می‌باشد، نیروهای ایجاد شده در حین سنگ‌زنی انتهای آن، باعث ایجاد خیز در حین فرایند می‌شود. این مسئله باعث انحراف در چهارگوش شدن، توازی و صافی حلقه می‌گردد. (هنگامی که انتهای فنر سنگ زده می‌شود سطوح ایجاد شده دارای شکلی مستطیلی، صاف و موازی با یکدیگر می‌باشند.) چنین تغییراتی به ندرت بر روی عملکرد فنر در سرویس اثر می‌گذارند. و

بنابرایـن فقـط باید در هنگام ضرورت تلرانس‌ها در آنها بررسی شود. مقادیر تلرانس در استاندارد BS ۱۷۲۶ بخش ۱ آورده شده است. سنگ‌زنی انتهای فنر برای مفتول‌های با قطر کوچکتر مشکل‌تر شده و معمولاً برای قطر مفتول کمتر از ۰٫۵mm (۰/۰۲اینچ) نحوه سنگ‌زنی ذکر نمی‌گردد.

انـواع انـتهای فنر برای فنرهای (حلقه شده به صورت گرم) سنگین در شکل (۱-۳) نشان داده شده است. مرسـوم‌تریـن نـوع، انـتهای نورد شده (فورج شده) به صورت مخروطی می‌باشد. قبل از حلقه کردن و زمانـی کـه مـاده هـنوز در حالـت نـرم (آنـیل) قرار دارد، دو انتهای میله به صورت مخروطی نورد و یا فورج مـی‌شـوند. ایـن فرآیند به طور قابل توجهی مقدار ماده‌ای که بعد از حلقه کردن باید برداشته شود را کاهش مـی‌دهد که این مسئله برای فنرهای با مقطع بزرگ که قبل از حلقه کردن، مخروطی نشده‌اند، می‌تواند مهم باشـد. انواع انتهای مماسی، اغلب در فنرهای سیستم تعلیق خودرو استفاده می‌شوند، که در آن زبانه انتهایی می‌تواند در جایگاه مخصوصی به منظور جلوگیری از چرخش فنر حول محور طولی خودش جای گیرد.



شکل ۱-۳ انواع انتهای فنر برای فنرهای فشاری که به صورت گرم حلقه شده‌اند

انـتهای نـوع قلابـی در جایـی اسـتفاده مـی‌شودکه فضای محوری در اولویت باشد، ولی درجه‌ای از پایداری نیز در محل نشیمنگاهها مورد نیاز باشد.

بـه وسـیله کاهش دادن قطر حلقه انتهایی، حلقه انتهایی می‌تواند هنگامی که فنر فشرده می‌شود، از دورن اولیـن حلقه فعال بگذرد. در عین حال، گذر از حلقه انتهایی با قطر کوچک به حلقه فعال مجاور با قطر بـزرگ، بـه لحـاظ کنترل مشکل بوده و باعث تغییرات نسبتاً زیادی در سفتی فنر، به ویژه در فنرهای با فقط

چند حلقه می‌گردد. خود قلاب انتهایی ممکن است بسته به درجه پایداری محوری مورد نیاز، سنگ زده شود و یا نشود.

۵- ۱ جهت حلقه پیچی

جهت حلقه‌پیچی روی فنرهای فشاری (چپگرد یا راستگرد) به ندرت یکی از پارامترهای مهم می‌باشد؛ به جز در فنرهای تودرتو (نکات بعدی را ببینید) یا هنگامی که مشکلات خاصی بین فنرهای مشابه وجود داشته باشد. با این وجود، تلاش قابل ملاحظه‌ای لازم است تا یک ماشین اتوماتیک حلقه‌پیچی را برخلاف جهت، تنظیم و آماده کرد. بنابراین، به منظور به حداقل رساندن هزینه‌ها و تأخیرهای تولید، طراح نباید جهت حلقه‌پیچی را مگر در هنگام ضرورت، به جهت خاصی محدود کند.

٦- ۱ تعداد حلقه‌ها

تعداد حلقه‌ها در یک فنر فشاری دارای تأثیر مستقیمی بر روی سفتی فنر و هم طول بسته آن دارد و بنابراین پارامتر مهمی در محاسبات مربوط به طراحی فنر می‌باشد. سه ضریب مختلف وجود دارد که باید در طراحی در نظر گرفته شوند:

الف)تعداد حلقه‌های کل (N)

تعداد کامل حلقه‌ها در فنر بوده و از نوک یک حلقه تا نوک حلقه دیگر اندازه‌گیری می‌شود و کسرهایی از یک حلقه را نیز شامل می‌شود.

ب)تعداد حلقه‌های غیرفعال (حلقه‌های مرده)(n'):

تعداد حلقه‌هایی از فنر است که در حین بارگذاری خیز برنداشته و بنابراین سهمی در سفتی فنر ندارند. حلقه‌های غیرفعال معمولاً فقط حلقه‌های انتهایی هستند، ولی حلقه‌های مرده گاهی می‌توانند بخشی از بدنه فنر باشند که به منظور جلوگیری از گیرکردن و پیچ و تاب خوردن فنر به کار می‌روند. تعداد واقعی حلقه‌های غیرفعال را در هر فنر نمی‌توان دقیقاً اندازه گرفت و بسته به اینکه شکل حلقه انتهایی چگونه باشد، تغییر می‌کند. برای انواع شکل‌های انتهایی، مقادیر متوسطی در طول این سالها پیشنهاد شده است؛ ولی باید بخاطر داشت که این مقادیر، مقادیر دقیقی نبوده و در عمل تفاوت می‌کنند. تعداد کل حلقه‌های غیرفعال فنر در فنرهای مرسوم مورد استفاده به شرح زیر می‌باشد.

نوع انتهای فنر	تعداد حلقه‌های غیرفعال ($\acute{n}$)
بسته شده و سنگ زده شده	۲
بسته شده و سنگ نخورده	۲
باز	۰
باز و سنگ زده شده	۱
مخروطی شده (فورج شده و به صورت گرم حلقه شده)	۱٫۵

ج)تعداد حلقه‌های فعال (n):

عبارتست از تعداد کل حلقه‌های فنر که در حین بارگذاری جابجای می‌شوند و بنابراین در سفتی فنر سهم می‌برند. تعداد حلقه‌های فعال را می‌توان مستقیماً اندازه گرفت و به وسیله تفریق کردن تعداد حلقه‌های غیرفعال از تعداد کل حلقه‌ها به دست می‌آورد. یعنی؛

$$n=N-\acute{n} \qquad (۲-۱)$$

از آنجایی که درجه‌ای از عدم اطمینان در تعیین تعداد حلقه‌های غیرفعال وجود دارد، بنابراین، به همان اندازه عدم اطمینان در محاسبه دقیق تعداد حلقه‌های فعال وجود دارد. این موضوع به ویژه در فنرهای با تعداد نسبتاً کمی از حلقه‌های کل، می‌تواند پر اهمیت باشد. به همین دلیل، تلرانس‌های استاندارد ۱۷۲۶ BS برای فنرهای با تعداد کمتر از ۳٫۵ حلقه کل اعتبار ندارد.

۷- ۱ طول بسته (کاملاً جمع شده)

طول کاملاً بسته به یک فنر، یکی از عوامل مهم در طراحی فنر می‌باشد. طول بسته، مقدار حرکت قابل دسترس فنر را محدود کرده و عبارتست از موقعیتی که باروتنش حداکثر در فنر ایجاد می‌شود. طول بسته محاسبه شده بستگی به سه عامل اصلی دارد: قطر مفتول، تعداد کل حلقه‌ها و نوع انتها برای انتهای بسته و سنگ زده شده یا نورد شده (فورج شده) به صورت مخروطی طول بسته از طریق مقدار سنگ زده شده یا مخروطی شده در هنگام تولید، نیز تأثیر می‌پذیرد.

معادلات آورده شده در جدول زیر قادر هستند تا طول بسته را برای هر نوع انتهای مختلف فنر محاسبه کنند:

نوع انتهای	تعداد حلقه‌های غیرفعال (ń)
بسته شده و سنگ زده شده	$N.d$
بسته شده و سنگ زده نشده	$(N+1)d$
بازو سنگ زده نشده	$(N+1)d$
باز و سنگ زده شده	$N.d$
مخروطی شده (فورج شده و به صورت گرم حلقه شده)	$N.d$

۸- ۱ محاسبات سفتی فنر

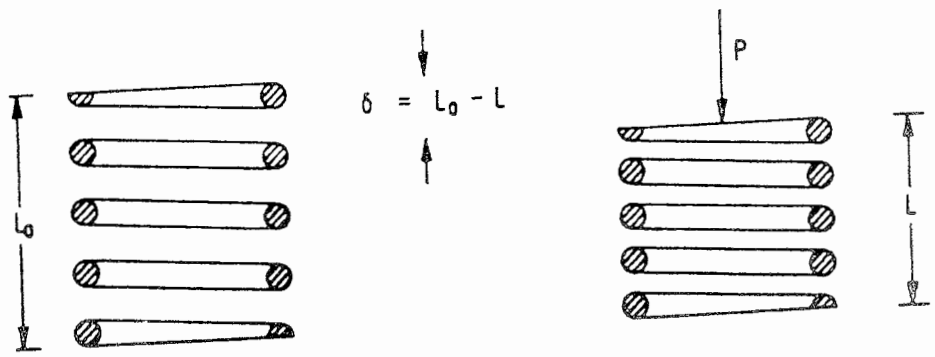
سفتی Sیک فنر فشاری برای هر فنر ثابت بوده و عبارتست از مقدار افزایش بار به ازای یک جابجایی مشخص، در واحد متر، یک واحد سفتی N/mm بوده و عبارتست از مقدار تغییر نیرو برحسب N به ازای هر میلیمتر جابجایی فنر در سیستم اینچی واحد آن 1bf/inبوده و عبارتست از تغییر نیرو برحسب 1bf به ازای هر in جابجایی فنر.

در فنر نشان داده شده در شکل ذیل، که L_0 طول آزاد و L آن در اثر اعمال بار P می‌باشد، سفتی فنر عبارتست از تغییر بار تقسیم بر تغییر طول. یعنی:

$$S = \frac{P}{L_0 - L} = \frac{P}{\delta} \qquad (۳-۱)$$

که در آن S تغییر طول می‌باشد. اگر سفتی و طول آزاد فنر معلوم باشند، بار را به ازای هر طول دلخواه فنر می‌توان به دست آورد. یعنی:

$$P = S(L_0 - L) = S\delta \qquad (۴-۱)$$



وضعیت فنر در دو حالت تغییر شکل یافته و تغییر شکل نیافته

بـالعکس، اگر سفتی و بار فنر در هر طول دلخواه معلوم باشد، آنگاه می‌توان طول آزاد فنر را از رابطه زیر محاسبه کرد. یعنی:

$$L_0 = \frac{P}{S} + L \qquad (۵-۱)$$

اگـر دو طول دو بار مشخص معلوم باشند، یا از طریق آزمایش بارگذاری اندازه‌گیری شوند (یعنی P_1 در L_1، P_2 در L_2)، آنگاه سفتی را مجدداً می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$S = \frac{P_2 - P_1}{L_1 - L_2} \qquad (۶-۱)$$

هنگامی که سفتی از رابطه (۱-۶) به دست آید، آنگاه طول آزاد را می‌توان با استفاده از معادله (۱-۵) به کمک P_1 و L_1 یا L_2 و P_2 محاسبه کرد.

بنابراین مشاهده می‌شود که سفتی فنر یک عامل بسیار مهم در محاسبات طراحی فنر می‌باشد، زیرا به کمک آن می‌توان بار فنر را در هر موقعیت کاری محاسبه کرد.

برای هر فنر سفتی را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$S = \frac{Gd^4}{8nD^3} = \frac{Gd}{8nC^3} \qquad (۷-۱)$$

لـذا اگر قطر مفتول، قطر حلقه، تعداد حلقه‌های فعال و ثابت ماده برای یک فنر خاص، معلوم باشند. آنگـاه سـفتی را مـی‌تـوان از معادـله (۱-۷) محاسـبه کـرد. روابـط مفید دیگری که می‌توان از رابطه (۱-۷) استخراج کرد عبارت است از:

$$n = \frac{Gd^4}{8SD^3} \qquad (۸-۱)$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{Gd^4}{8nS}} \qquad (۹-۱)$$

$$d = \sqrt[4]{\frac{8nSD^3}{G}} \qquad (۱۰-۱)$$

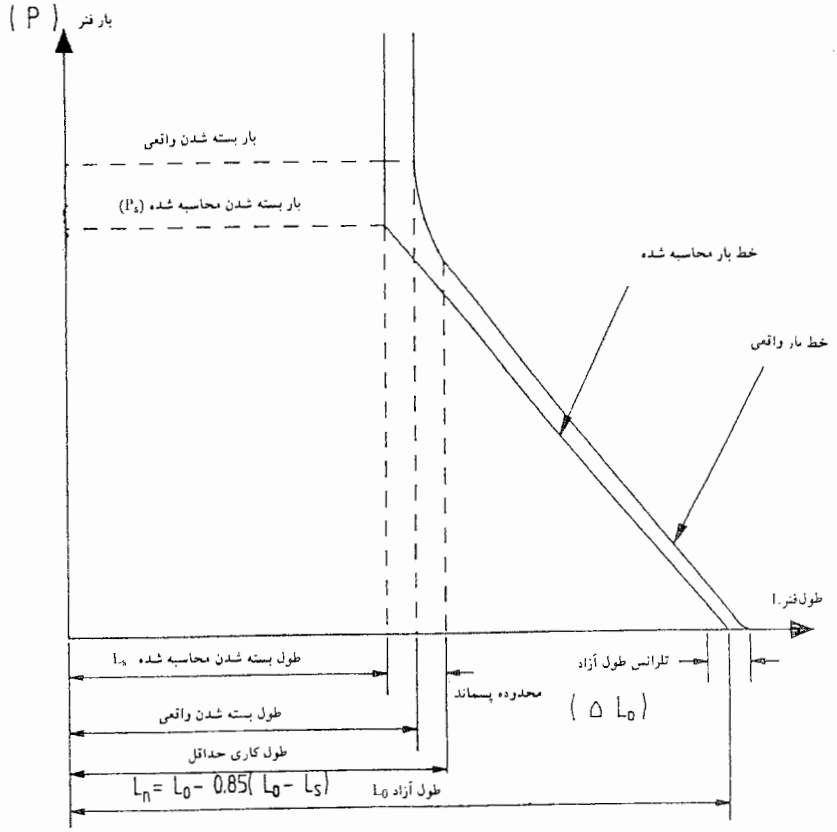
۹- ۱ نمودار نیرو- جابجایی

همانطوریکـه قبلاً گفته شد، برای یک فنر فشاری با دیواره‌های موازی و گام ثابت، سفتی فنر از لحاظ نظری، مقـداری ثابت است. در عین حال، به دلیل عدم دستیابی کامل به تلرانس‌های تولید، هنگامی که فنر حرکت خودش را آغاز می‌کند و هنگامی که به طول بسته خودش می‌رسد. سفتی از حالت خطی خارج می‌شود.

در شـروع فشار، نزدیک به موقعیت با طول آزاد، عدم مستطیلی بودن دو انتهای فنر نسبت به محور آن باعث می‌شود تا همزمان با اعمال بار، تأثیر منفی آن بر روی نشیمنگاه بیشتر شود. هنگام نزدیک شدن به

موقعیت طول بسته نابرابری گامهای حلقه‌های غیرفعال، باعث می‌شود تا حلقه‌های مجاور به یکدیگر نزدیک شده و قبل از دیگر حلقه‌ها با یکدیگر تماس پیدا کنند. هنگامی که حلقه‌ها با یکدیگر تماس پیدا می کنند، غیرفعال شده و به این ترتیب تعداد حلقه‌های فعال فنر کاهش می‌یابند. این عمل باعث می‌شود که سفتی به طور تصاعدی افزایش یافته تا اینکه فنر به طول بسته خودش برسد، در چنین موقعیتی هیچیک از حلقه‌های فنر دیگر فعال نیستند.

هر دو تأثیر در هر یک از انتهای مسیر حرکت فنر به صورت نموداری در شکل (۱-۴) نشان داده شده است که در آن متغیرهای بار- جابجایی واقعی و نظری جهت مقایسه با یکدیگر ارائه شده‌اند. همچنین با توجه به نمودار باید دقت کرد که طول آزاد و تلرانس‌های سفتی بین خطوط بار واقعی و نظری باعث انحراف بیشتری می‌شود. این تلرانس‌های تولید،غیرقابل دسترسی بوده و در BS ۱۷۲۶، بخش ۱ سال ۱۹۸۷ تحت عنوان راهنمای طراحی فنرهای فشاری مارپیچی آورده شده است.



شکل ۱-٤ خط بار-جابجایی واقعی برحسب ایده‌آل

همچنین طراح باید مراقب باشد که طول بسته واقعی فنر اغلب به طور ثابت بزرگتر از طول بسته نظری بوده که این مسئله ناشی از این واقعیت است که در موقعیت بسته، حلقه‌ها به طرز هموار روی یکدیگر قرار نمی‌گیرند و گاهی برخلاف یکدیگر عمل کرده و باعث می‌شوند که فاصله‌ای بین آنها به وجود

آیـد. همچنیـن اغلـب یـک پوشـش سطحی پسماند بر روی مفتول وجود دارد که جلوگیری می‌کند از اینکه حلقـه‌هـا بـه مقـدار ناچـیزی از یکدیگر جدا شوند. همچنین عوامل دیگری که می‌توانند طول بسته واقعی را افـزایش دهـند،تلـرانس قطـر مفـتول در حـد بالا وضخامت افزایش یافته نوک روی فنرهای سنگ زده شده می‌باشد.

۱۰- ۱ محدوده پسماند

محـدوده پسـماند بـر روی نمـودار شـکل (۱-۴) نشـان داده شده است که بیانگر یک جابجایی پسماند قابل دسترسـی بین طول کاری حداقل و طول بسته محاسبه شده به صورت نظری (تئوری) می‌باشد. این محدوده پسـماند بـه مـنظور جلوگـیری از اینکه فنر مورد استفاده، به طور پیوسته تا موقعیت جابجائی حداکثر، بسته بماند، باید همیشه وجود داشته باشد. در محدوده پسماند، حلقه‌ها به نظر می‌رسد که با یکدیگر تماس داشته و باعث سایش یکدیگر شوند. همچنین تلرانس بار در این وضعیت را به دلیل طبیعت غیرقابل پیش‌بینی تأثیر سخت‌شوندگی، به راحتی می‌توان ثابت نگه داشت.

محـدوده پسماند معمولاً به عنوان درصدی از جابجایی کل قابل دسترس، از طول آزاد تا طول بسته بـیان مـی‌شـود و در اسـتاندارد BS۱۷۲۶ شـماره ۱ بـه مقدار ۱۵٪ پیشنهاد می‌گردد. ولی استاندارد، مقدار تلرانس را برای بار فنر در این محدوده پسماند ارائه نمی‌دهد. اگر این مقدار به وسیله طراح مدنظر قرار گیرد، آنگـاه مشـکلات مربوط به تلرانس‌های بار افزایش و واماندگی زودرس ناشی از سایش، مرتفع خواهند شد. به کارگـیری مقـدار ۱۵٪ بـه ایـن معنـی اسـت که طول کاری حداقل (L_n) برای یک فنر فشاری باید به مقدار معینی به وسیله معادله زیر محدود شود:

$$L_n=L_0-0/85(L_0-L_s) \qquad (۱۱-۱)$$

بـه همیـن ترتیـب، طـول بسته مجاز حداکثر (L_s) را می‌توان برای یک طول کاری حداقل معلوم به وسیله دوباره مرتب کردن معادله (۱-۱۱) به صورت زیر محاسبه کرد:

$$L_s=\frac{L_n-0/15L_0}{0/85} \qquad (۱۲-۱)$$

از آنجایی که بار کری حداکثر P_n و بار در هنگام بسته شدن فنر P_s مستقیماً وابسته به طول کاری حداقل و طول بسته می‌باشند. معادلات (۱-۱۱) و (۱-۱۲) را می‌توان بصورت ساده‌تری برحسب مقادیر بار به صورت زیر بیان کرد:

$$P_n=0.\ 85P_s \qquad (۱۳-۱)$$

اگـر مقـداری بـرای محدوده پسماند انتخاب شود که متفاوت با ۱۵٪ باشد، آنگاه ضرایب۱۵٪ و ۸۶٪ موجود در معادلات (۱-۱۱) و (۱-۱۲) و (۱-۱۳) باید متناسب با آن اصلاح شوند.

۱۱- ۱ تنش‌های مجاز

همـان طـوری کـه قبلاً بیان شد، حلقه‌های فعال یک فنر فشاری، هنگامی که فشرده می‌شود، در اثر پیچش تحت تنش قرار می گیرند. یک محدودیت فیزیکی برای تنش پیچیشی حداکثر وجود دارد که هر ماده بیشتر از آن مقـدار را نمـی‌توانـد تحمـل کـند و آن محدودیت،تنش حداکثر است که نیروی حداکثری که یک فنر می‌تواند بهدست دهد را محدود می‌کند. به منظور اینکه فنر در حد الاستیک بماند، تنش حداکثر (معمولاً، و گاهی تنش بستن) باید پایین‌تر از حد الاستیک ماده۸ در پیچش باقی بماند.

حـد الاسـتیک ماده، بستگی به استحکام کشش نهایی (U.T.S) آن دارد. چه فنر پیش تنیده شده باشـد یـا نشـده باشـد یـا ایـنکه نفـر بعـد از حلقـه پیچـی تـنش‌زدایی شده باشد (LTHT) یا نشده باشد. خوشبختانه طراح می‌تواند حد الاستیک برای محدوده کلی مواد فنر را به عنوان درصد ساده‌ای از U.T.S در نظر بگیرد.

به عنوان مثال، فنرهای تنش‌زدایی شده که از فولاد کربنی سرد کشیده شده مطابق با استانداردهای BS۵۲۱۶ یـا BS۱۴۰۸ حلقـه شده‌اند، را می‌توان تا حداکثر ۴۹٪ مقدار U.T.S تحت تنش قرار دارد، اگر فنر پیش تنیده نشده باشد؛ یا ۷۰٪ مقدار U.T.S اگر عملیات پیش تنیدگی به منظور افزایش حد الاستیک انجام شده باشد.

با مراجعه به جداول مربوط به استحکام تسلیم کششی U.T.S در صفحات ۵۲ تا ۶۴ برای نوع ماده و اندازه مفتول استفاده شده، محاسبه تنش استاتیکی مجاز حداکثر برای فنرامکان‌پذیر است. این مسئله با در نظـر گرفتـن مقـدار حداقـل U.T.S از محـدوده ذکر شده برای قطر مفتول مورد نظر و ضرب کردن آن در درصد مربوطه از جدول ۱-۱، بسته به اینکه آیا طراحی یک فنر پیش تنیده شده و یا نشده مورد نیاز است یا خیر، انجام می‌گردد.

بـا داشتن تنش طراحی مجاز حداکثر، براساس اطلاعات مربوط به خواص ماده، طراح باید قادر باشد تا تنش پیچشی واقعی در فنر را طراحی کند، به طوریکه تنش محاسبه شده با تنش مجاز قابل مقایسه باشد، لذا از این طریق مطمئن می‌شویم که طراحی رضایت بخش است.

۱۲- ۱ محاسبات تنش

تنش به طور مستقیم، متناسب با بار اعمال شده بر فنر بوده و با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$\tau = \frac{8PDK}{\pi d^3} = \frac{8PCK}{\pi d^2} \qquad (۱۴-۱)$$

جدول ۱-۱

ماده	شناسه	تنش‌های حداکثر تسلیم و کاری			
		فنرهای فشاری پیش‌تنیده‌شده		فنرهای فشاری پیش تنیده نشده	
		تنش کاری، درصدی از U.T.S	تنش تسلیم، درصدی از U.T.S	تنش کاری، درصدی از U.T.S	تنش تسلیم، درصدی از U.T.S
مفتول فولاد فنر کشیده شده به صورت سرد	BS ۵۲۱۶ , BS ۱۴۰۸	۶۰	۷۰	۴۲	۴۶
مفتول کم آلیاژ و فولاد کربنی تمپر شده و پیش سخت شده	BS ۲۸۰۳	۶۰	۷۰	۴۵	۵۳
مفتول فولاد ضد زنگ آستنیتی	BS ۲۰۵۶ Gr ۳۰۲S۲۶	۵۰	۵۹	۳۵	۴۰
مفتول فولاد ضد زنگ مارتنزیتی	BS ۲۰۵۶ Gr ۵۲۰S۴۵	۶۰	۷۰	۴۵	۵۳
مفتول فولاد ضد زنگ رسوب سختی شده	BS ۲۰۵۶ Gr ۳۰۱S۸۱	۶۰	۷۰	۴۵	۵۳
فولادهای سخت‌شده‌وتمپرشده،بعداز حلقه‌پیچی: کربنی	BS ۱۴۲۹ و	۶۰	۷۰	۴۵	۵۳
کم آلیاژ	بخش ۵ : BS ۹۷۰	۶۰	۷۰	۴۵	۵۳
مفتول فنر برنجی	BS ۲۸۷۳ Gr CZ۱۰۷	۵۰	۵۹	۳۵	۴۰
مفتول فسفر - برنز فوق سخت	BS ۲۸۷۳ Gr PB۱۰۲/۱۰۳	۵۰	۵۹	۳۵	۴۰
مفتول مس - بریلیوم	BS ۲۸۷۳ Gr CB۱۰۱	۵۰	۵۹	۳۴	۴۰
آلیاژ مونل ۴۰۰	ASTM B۱۶۴-۸۴	۴۵	۵۳	۳۴	۴۰
آلیاژ مونل K ۵۰۰	BS ۳۰۷۵ Gr NA۱۸	۴۵	۵۳	۳۶	۴۰
آلیاژ اینکونل ۶۰۰	ASTM B۱۶۶-۸۴	۴۷	۵۵	۳۶	۴۲
آلیاژ اینکونل X ۷۵۰	ASM ۵۶۹۹C	۴۷	۵۵	۳۶	۴۲
آلیاژ نیومونیک ۹۰	BS ۳۰۷۵ Gr NA۱۹	۴۷	۵۵	۳۴	۴۲
آلیاژ Ni-Span C۹۰۲		۴۷	۵۳	۳۶	۴۰
آلیاژ اینکونل ۶۰۰	ASTM B۱۶۶-۸۴	۴۷	۵۵		۴۲

این رابطه ما را قادر می‌سازد که تحت هر بار مشخصی اعمالی، با داشتن قطر مفتول و قطر میانگین حلقه تنش را محاسبه کرده که در آن ضریب K به عنوان ضریب تصحیح انحناء برای تنش شناخته می‌شود. ایـن ضـریب اجـازه مـی‌دهد تا توزیع ناهموار تنش در امتداد مقطع ناشی از انحناء مفتول، اتفاق افتد. مقدار تنش محاسبه شده توسط معادله (۱-۱۴) با در نظر گرفتن مقدار K تنش حداکثری است که در داخل حلقه، و جایـی که بیشترین انحناء وجود دارد، اتفاق می‌افتد. از آنجاییکه انحناء مفتول در یک فنر مارپیچ مستقیماً بـه اندیس فنر مربوط می‌شود، ضریب تصحیح انحناء (K) با استفاده از رابطه‌ای که فقط به اندیس C وابسته است، محاسبه می‌شود.

چندین رابطه مختلف برای تعیین مقدار K وجود دارد. در انگلستان اغلب از ضریب تصحیح اسپوویچ اسـتفاده مـی‌شـود. حـال آنکه در آمریکا ضریب وال و در آلمان ضریب گوهنر مرسوم می‌باشند. در حقیقت، اختلاف بسیار کمی بین مقادیر K به دست آمده از طریق سه ضریب فوق وجود دارد به جز در مقادیر اندیس خیلی کم. درعین حال، محاسبه ضریب ساپویث بسیار ساده بوده و پیشنهاد می‌گردد که طراح برای محاسبه تنش از آن استفاده نماید. ضریب تصیح انحناء ساپویث عبارت است از:

$$K = \frac{C + 0/2}{C - 1} \qquad (۱۵-۱)$$

به منظور اینکه نشان دهیم ضریب Kچگونه با اندیس فنر تغییر می‌کند، جدول زیر مقادیر مختلف اندیس‌های فنر ارائه می‌دهد.

از مقادیـر جدول فوق می‌توان مشاهده کرد که درامتداد مقطع بین بخشهای بیرونی و درونی حلقه، در مقادیر کم اندیس، عدم توازن تنش افزایش می‌یابد. به عنوان مثال در اندیس فنر برابر۴، تنش روی بخش

داخلی حلقه حدود ۴۰٪ بالاتر از مقدار متوسط در حلقه می‌باشد؛ حال آنکه در بخش خارجی حلقه متناظر، کمتر از ۴۰٪ خواهد بود.

C	K
۲/۵	۱/۸
۳	۱/۶
۴	۱/۴
۶	۱/۲۴
۹	۱/۱۵
۱۲	۱/۱۱
۱۶	۱/۰۸
۲۱	۱/۰۶

در حالیکه معادله (۱-۱۴) ما را قادر می‌سازد تا تنش را در هر بار اعمالی متناظر محاسبه کنیم، طراح معمولاً به طور ویژه‌ای با تنش تسلیم در فنر τ_s سروکار دارد؛زیرا این تنش حداکثر است که باید با تنش حداکثر است که باید با تنش مجاز تعیین شده از U.T.S ماده مقایسه شود. تنش تسلیم آنگاه به وسیله رابطه زیر داده می‌شود:

$$\tau_s = \frac{8P_sDK}{\pi d^3} \qquad (۱-۱۶)$$

به روشی مشابه برای معادله سفتی فنر (معادله ۱-۷)، معادله تنش تسلیم فوق را می‌توان برحسب پارامترهای مختلف طوری معکوس کرد که بتوان هر مقدار ناشناخته دلخواه را به دست آورد. به عنوان مثال؛

$$d = \sqrt[3]{\frac{8P_sDK}{\pi\tau_s}} \qquad (۱-۱۷)$$

$$D = \frac{\tau_s\pi d^3}{8P_sK} \qquad (۱-۱۸)$$

$$P_s = \frac{8DK}{\tau_s\pi d^3} \qquad (۱-۱۹)$$

در معادلات (۱-۱۷) و (۱-۱۸) باید یک تخمین اولیه برای ضریب تصحیح تنش K در نظر گرفته شود، زیرا اندیس فنر هنوز ناشناخته است. هنگامی که d یا D براساس این تخمین اولیه محاسبه شوند، آنگاه مقدار اندیس قابل محاسبه است و در مرحله بعد، مقدار K به دست آمده با تخمین اولیه مقایسه می‌شود. اگر مقدار K خیلی متفاوت باشد، d یا D را می‌توان با استفاده از مقدار جدید K در معادله (۱-۱۷) یا (۱-۱۸) با دقت بیشتری مجدداً محاسبه کرد و این عمل را تا جواب نهایی ادامه داد.

اگـر فـنری بـرای کاربـردهای خسـتگی طراحـی شود، آنگاه علاوه بر محاسبه تنش تسلیم در فنر و مقایسـه آن بـا مقادیر درصد U.T.S مجاز، تنش‌های کاری در موقعیتهای کاری حداقل و حداکثر نیز باید با اسـتفاده از معادله (۱-۱۴) برای تسلیم نمودار گودمن مربوط به ماده مورد نظر نیز محاسبه شود. اگر ترکیب تـنش‌هـای کاری حداقل و حداکثر (اولیه و نهایی) زیر خط گودمن قرار گیرند آنگاه طراحی در وضعیت امن می‌باشد. در عین حال، اگر مقدار تنش بالای خط قرار گیرد، آنگاه می‌توان در سرویس واماندگی انتظار داشت و به منظور رسیدن به وضعیت ایمن باید از طریق کاهش تنش‌های کاری، تغییراتی را در طراحی ایجاد کرد.

۱۳- ۱ زاویه مارپیچ

در بسـیاری از مـراجع و متـن‌های قدیمی مربوط به طراحی فنر، به زاویه مارپیچ فنر برخورد می‌کنیم. زاویه مارپیچ، زاویه‌ای است که حلقه‌های فعال فنر نسبت به محور فنر می‌سازند. در بسیاری از مراجع زاویه مارپیچ را حداکـثر بـه مقـدار $7/5^{\circ}$(درجه) به عنوان یک محدودیت طراحی برای فنر پیشنهاد می‌کنند. در عین حال، هیچ دلیل عملکردی برای برشمردن چنین محدودیتی وجود ندارد.

در ابتدا چند دلیل برای محدودیت زاویه مارپیچ به مقدار ۷/۵ درجه به شرح زیر وجود داشت:

الـف) تنش: به وسیله محدود کردن زاویه مارپیچ به مقدار ۷/۵ درجه یک حد غیرمستقیم برای تنش اعمال مـی‌شود. با وجود این، این روش یک روش خام برای کنترل تنش می‌باشد. لذا ترجیح داده می‌شود که تنش حداکثر واقعی در فنر محاسبه شده و با مقادیر مجاز مقایسه گردد.

ب)اعوجـاج: مقادیـر زیـاد زاویه مارپیچ، فنری با طول نسبتاً زیاد را نشان می‌دهد که مستعد کمانش تحت بـارگذاری مـی‌باشـد. در عین حال روش‌هایی به طور مستقیم برای محاسبه اینکه چه موقع یک فنر کمانش می‌کند وجود دارد.

ایـن روشـها بعـداً بـه صورت مقالاتی تشریح شد و برای استفاده به صورت یک قاعده سرانگشتی که توسط محدودیت زاویه مارپیچ توسعه یافته است، قابل ترجیح می‌باشند.

ج)دقت: در هر دو رابطه مربوط به سفتی و تنش (معادلات ۷ و ۱۴)، فرض می‌شود که زاویه مارپیچ کوچک اسـت. یعنـی کسـینوس زاویه تقریباً برابر ۱ می‌باشد. زاویه بزرگتر باعث دقت کمتری در این فرض می‌گردد (مـثلاً $cos7/5^{\circ}=0/991$ و $cos5^{\circ}=0/996$). در عیـن حـال، همانگونـه که مشاهده می‌شود تفاوت در جواب به دلـیل کم دقتی حتی برای زوایای خیلی بزرگ مارپیچ خیلی ناچیز بوده و در مقایسه با دیگر کم دقتی‌ها در رابطه سفتی و تنش (مثلاً تلرانس‌های قطر مفتول) مهم در نظر گرفته نمی‌شود.

بنابرایـن، پیشـنهاد مـی‌شـود که زاویه مارپیچ نباید یک ضریب محدود کننده مهم بحساب آید ولی مـی‌تواند یک نماد مفید برای تنش‌های بالا و کمانش باشد، قبل از آنکه تنش واقعی و معیار کمانش محاسبه گردد.

۱۴- ۱ روش طراحی

به منظور طراحی یک فنر، مجموعه‌ای از اطلاعات اساسی مورد نیاز است:

الـف)عوامـل اساسـی در عملکـرد (بـار، جابجایـی، تعـداد بـارگذاری و غیره) این عوامل بستگی به کاربرد و مکانیزمی دارد که فنر باید در آن قرار گرفته و عمل نماید.

ب)فضایی که فنر اشغال می‌کند (قطر خارجی حداکثر، قطر داخلی حداقل، طول‌های کاری) این پارامترها به وسیله هندسه مکانیزمی که فنر در آن عمل می‌کند محدود می‌شود.

ج)عوامل محیطی (درجه حرارت، محیط و غیره) این عوامل نیز بستگی به کاربرد فنر و محیط عملکرد دارد.

د)اطلاعـات مـربوط بـه خـواص مـاده و عملکـرد (مقادیـر U.T.S، داده‌هـای مـربوط بـه نمـودار گودمن و تنش‌زدایی).

ه)رابطه طراحی (بارهای مربوطه، جابجایی و تنش‌ها).

عـلاوه بـر اطلاعـات اساسـی فـوق، طـراح بـه یـک روال منطقـی نیاز دارد که او را از مجموعه‌ای از محدودیـت‌هـا و نـیازهای عملـی بـه سوی طراحی فنری هدایت کند که آن نیازها را برآورده سازد. این روال ممکن است به ناچار شامل یک فرآیند سعی و خطا نیز باشد، زیرا نیازهای عملی باید در برابر محدودیت‌های تکنیکی به یک تعادل منطقی برسند و تعدادی از پارامترهای وابسته به هم فنر را، شامل شوند. بنابراین، این روال منطقی باید تعداد تکرارهای مورد نیاز برای طراحی، کاهش دهد. این مسئله به خوبی در مثال زیر نشان داده شده است.

۱۵- ۱ کمانش فنرهای فشاری مارپیچ

یک فنر مارپیچ بلند و باریک در جهت جانبی ناپایدار بوده و همانند یک تیر بلند، هنگامی که یک بار محوری فشاری زیادی به آن اعمال شود، کمانش می‌کند. کمانش در فنر نیز همانند کمانش تیر، به طول آن، صلبیت در خمش و روش تثبیت و نصب آن بستگی دارد.

در یـک فـنر مارپـیچ، صـلیب در برش و تغییر طول ناشی از بارگذاری نیز باید در نظر گرفته شوند. روشی برای تعیین وضعیت کمانش در شناسه BS۱۷۲۶ آورده شده است.

- **برای ماده با مقطع گرد**

یک فنر فشاری کمانش خواهد کر اگر خیز نسبی آن (δ / L_0) برابر یا بیشتر از مقدار بحرانی باشد.

$$\left[\frac{\delta}{L_0}\right]_{cr} = A\left[1 \pm \sqrt{1 - B\left[\frac{H}{L_0 / D}\right]^2}\right] \qquad (۲۰-۳)$$

که در آن H ضریب مربوط به چگونگی تثبیت نشیمنگاه فنر بوده و دارای مقادیر زیر است.

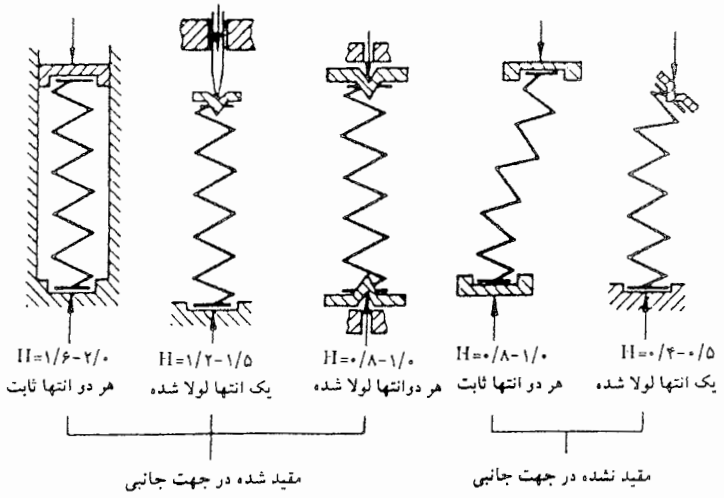
H=۱٫۶ هنگامی که هر دو طرف ثابت شده باشند، به صورت جانبی دارای راهنما باشد.

H=۰٫۸ هر دو طرف ثابت بوده و به صورت جانبی دارای راهنما نباشد.

و A=۰٫۸۱۱

B=۶٫۸۹ برای ماده‌ای از جنس فولاد و با مقطع دایره‌ای.

شکل (۱-۵) را برای دیگر مقادیر H به ازای شرایط دیگر تثبیت نشیمنگاه فنر می‌توانید مشاهده کنید. یک مقدار بالایی و پایینی برای H به ازای هر شرط تثبیت انتهایی در شکل (۱-۵) و در شناسه ۱۷۲۶ BS داده شده است. از لحاظ نظری، مقدار بالایی صحیح است؛ در عین حال، به دلیل تلرانس‌های مربوط به مستقیم بودن و چهارگوش بودن در فنر و به دلیل اینکه شرایط واقعی تثبیت فنر، در عمل به طور دقیق قابل دسترس نمی‌باشد، مقدار پایینی باید توسط طراح مورد استفاده قرار گیرد. به این ترتیب، پیش‌بینی محافظه‌کارانه‌ای (کمانش زودرس) از کمانش فنر در خیزهای کوچکتر به وجود می‌آید. محاسبات ممکن است خیلی پیچیده به نظر برسند ولی در بسیاری از موارد، می‌توان کمانش را به سادگی از روی نمودارهای ـ مربوط پیش‌بینی کرد. به این منظور می‌توانید به صورت زیر عمل کنید:



شکل ۱-۵

ابتدا نسبت $(\frac{H}{L_0/D})$ را محاسبه کنید.

اگر $(\frac{H}{L_0/D})^2 > \frac{1}{B}$، آنگاه فنر با وجود خیز زیاد، کمانش نخواهد کرد.

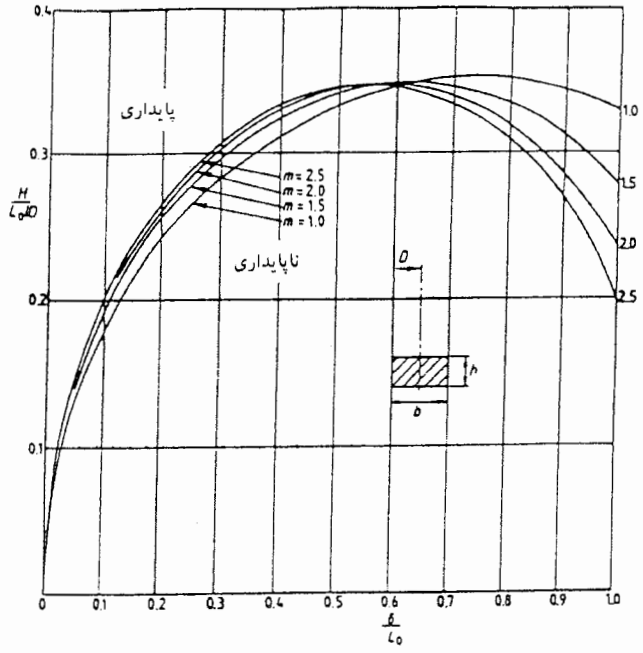
یعنی اگر $(\frac{H}{L_0/D})^2 > \frac{1}{6/89}$ یا $(\frac{H}{L_0/D}) > 0/381$

با در نظر گرفتن مرسوم‌ترین انواع تثبیت انتهای فنر، داریم: H=۱٫۶، H=۰٫۸ لذا می‌توان نوشت:

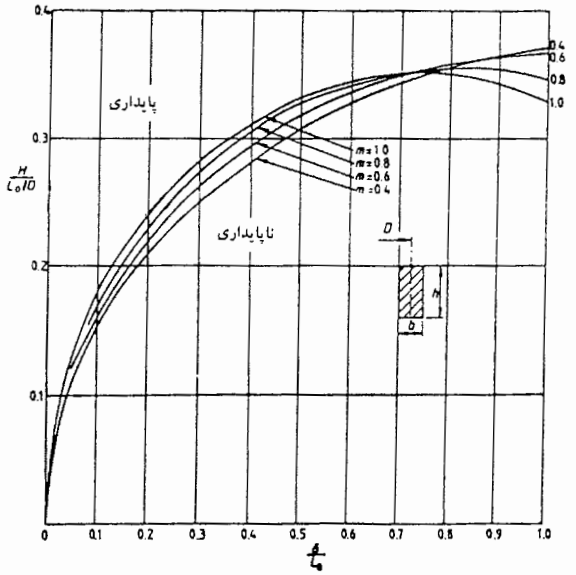
الف) برای H=۱٫۶ اگر $\frac{L_0}{D} < ۴٫۲$ آنگاه فنر کمانش نخواهدکرد.

ب) برای H=۰٫۸ اگر $\frac{L_0}{D} < ۲٫۱$ آنگاه فنر کمانش نخواهد کرد.

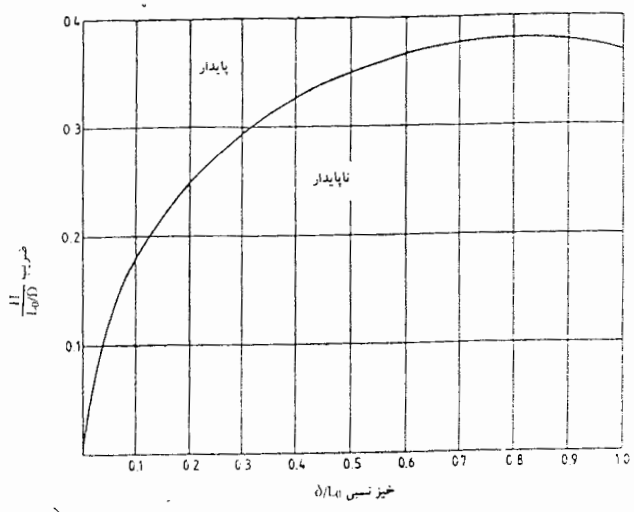
توجه: در جایی که مقادیر L_0/D بزرگتر از مقادیر فوق است، فنر تحت بار کاری، بسته به خیز نسبی (δ/L_0) ممکن است پایدار نباشد. این مسئله را می‌توان با مراجعه به منحنی‌های مربوط به پایداری مورد بررسی قرار داد. در این مورد شکل‌های (۱-۶) و (۱-۷) را ببینید.



شکل ۱-٦ خیز نسبی بحرانی $\left(\frac{\delta}{L_0}\right)_{cr}$ **و پایداری عرضی** $m=\frac{b}{h}=1-5$



شکل ۱-۷ (الف) خیز نسبی بحرانی $\left(\frac{\delta}{L_0}\right)_{cr}$ و پایداری عرضی $m=\frac{b}{h}=\frac{1}{5}-1$

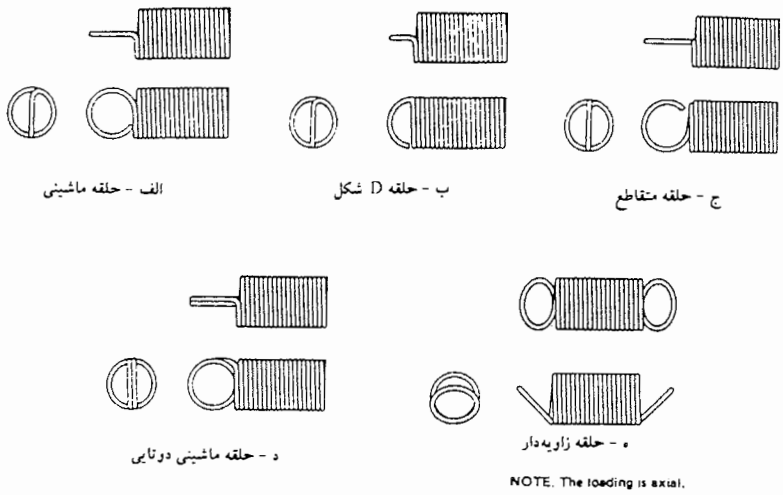


شکل ۱-۷ (ب) خیز نسبی بحرانی(مفتول گرد) و پایداری عرضی $\left(\frac{\delta}{L_0}\right)_{cr}$

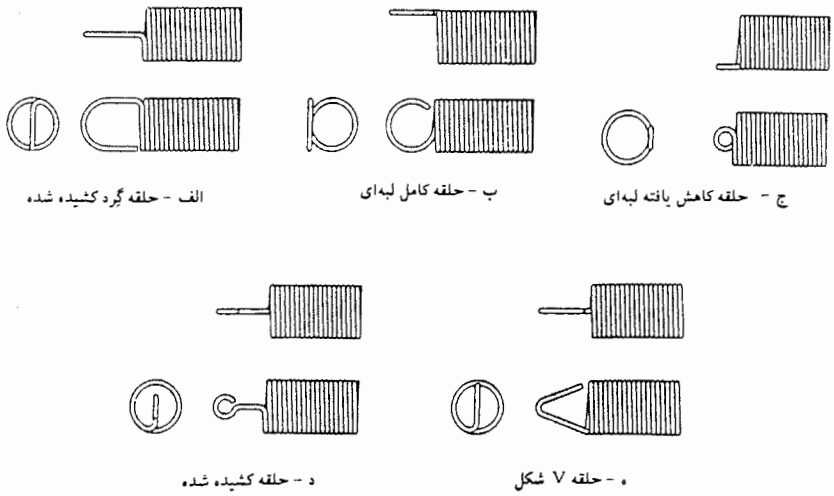
۲- طراحی فنرهای کششی مارپیچ

۲-۱ مقدمه

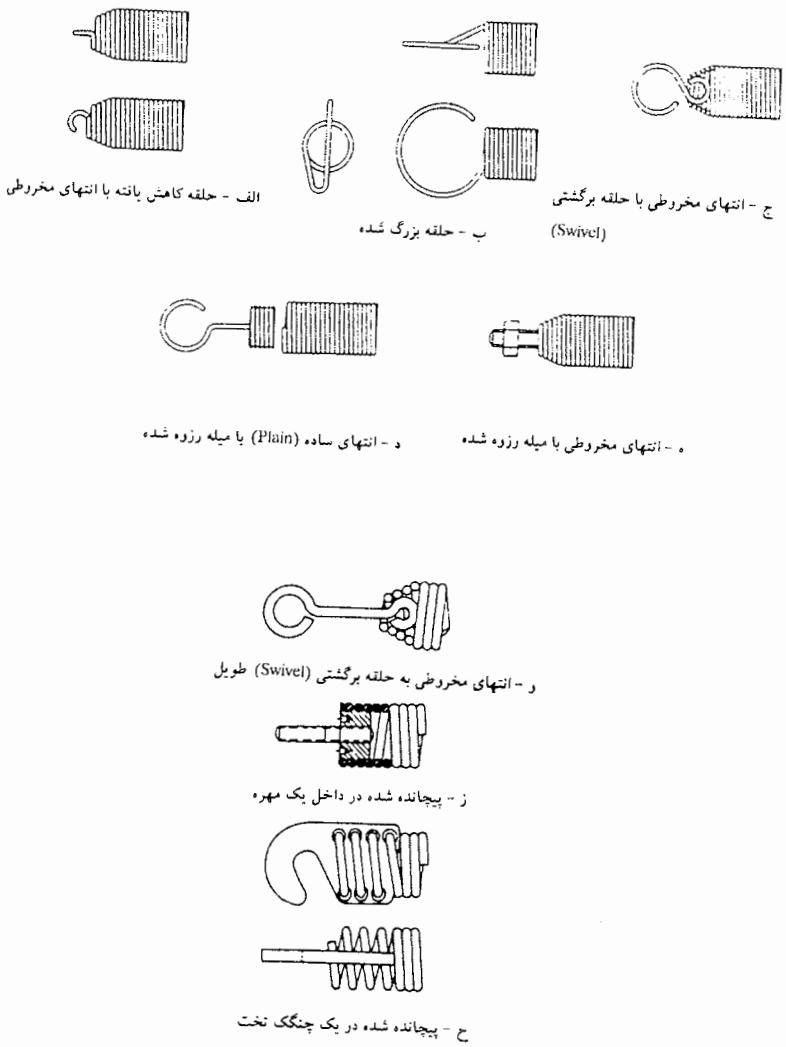
فنرهای کششی مارپیچ با فنرهای فشاری فقط در روش اعمال بار و در نتیجه در شکل انتهایی فنر با یکدیگر متفاوت هستند. اعمال یک بار کششی نیاز به چنگک یا حلقه‌ای دارد که بخشی از خود فنر بوده و یا اجزایی جداگانه که با وسیله‌ای همانند آنچه که در شکل (۲-۳) نشان داده شده است، انجام می‌گیرد. (شکل‌های (۲-۱)، (۲-۲)و (۲-۳)را ببینید). نوع آخر این اجازه را می‌دهد که تعداد حلقه‌های فعال متغیر گرفته شوند و لذا به کمک آن می‌توان سفتی فنر را به دقت تنظیم کرد.



شکل ۲-۱ انواع چنگک انتهایی برای فنرهای کششی



شکل ۲-۲ بعضی دیگر از انواع چنگک انتهایی برای فنرهای کششی



ر - انتهای مخروطی به حلقه برگشتی (Swivel) طویل

شکل ۲-۳ بعضی دیگر از انواع چنگک انتهایی برای فنرهای کششی

در عین حال، در اغلب فنرهایی که براساس چنگک طراحی شده‌اند، به دلیل خم‌های تیزی که وجود دارد افـزایش و تمرکـز تـنش در آنهـا زیـاد بـوده و لـذا مقاومت به خستگی فنرهای کششی به طور کلی در مقایسه با فنرهای فشاری کمتر می‌باشد.

۲-۴ رفتار بار- جابجایی در فنرهای کششی

همانطور که قبلاً توضیح داده شد، یک فنر کششی، رفتاری مشابه با یک فنر فشاری دارد، با این تفاوت که در مـد کششـی به کار گرفته می‌شود و لذا می‌توان انتظار داشت که مشخصه‌های بار- جابجایی آن نیز مشابه با فنرهای فشاری باشد.

ایـن وضعیت صحیح است به استثنای خاصیتی که کشش اولیه نامیده می‌شود؛ کشش اولیه نیرویی است که حلقه‌ها را روی یکدیگر بسته نگه می‌دارد.

ایـن بـدان معنی است که همیشه یک نیروی فشاری اولیه بر روی فنر وجود دارد که نیروی کششی اعمالی ابتدا باید بر آن غلبه کرده و سپس حلقه‌های فنر را از یکدیگر باز کند.

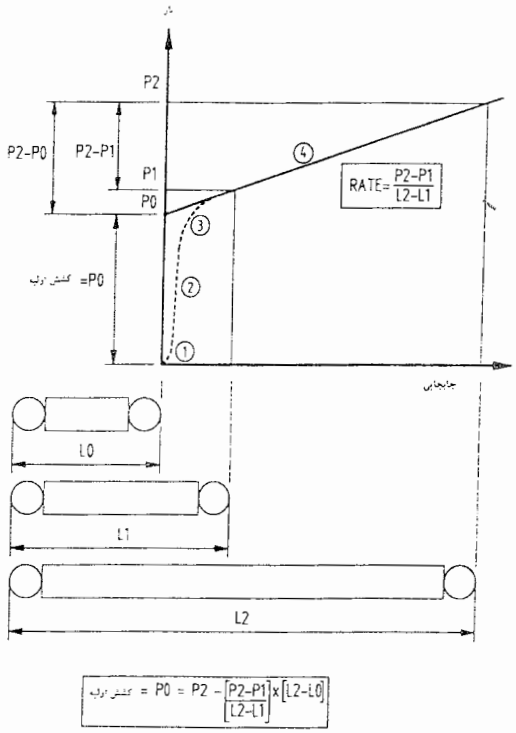
لحظه‌ای که فنر شروع به کشیده شدن می‌کند، رفتار منحنی بار- جابجایی آن مانند فنر مارپیچ نرمال شکل (۲-۴) می‌باشد.

از ایـن رو مطـابق شـکل (۲-۴)مشـاهده مـی‌شود که یک فنر با مقدار کشش اولیه زیاد می‌تواند با اندکی جابجایی مقدار بار زیادی را تحمل کند. به تحمل کند به علاوه اگر نرخ سفتی فنر کم باشد رفتار نیرو جابجایی آن ثابت می‌شود.

یـک استفاده عملی ازاین خاصیت، در شتاب دهنده نباید به طرز نامناسبی در سرتاسر مسیر حرکت آن افـزایش یـابد. ایـن ویژگـی همچنین دردنده کلید استفاده می‌شود که در آن نیروی تماس حداقلی برای کاربردهای الکتریکی نیاز است، بدون آنکه افزایش بار زیادی هنگامی که تماس برقرار نباشد به وجود آید.

همچنیـن کاربردهای متنوع دیگری برای فنرهای کششی در قفل‌ها، اتومبیل‌ها، دستگاههای تایپ و غیره وجود دارد.

بسـیاری از فـنرهای کششـی در متعادل کننده‌های فنری استفاده می‌شود که در آن کشش اولیه به عـنوان ضـرورتی برای داشتن مشخصه خطی بار، مورد نظر نیست. این یکی از چندین حالتی است که در آن فنر کششی به صورت باز حلقه پیچی می‌شود تا مطمئن شویم که کشش اولیه در آن صفر می‌باشد.



$$\text{کشش اولیه} = P0 = P2 - \frac{P2-P1}{L2-L1} \times (L2-L0)$$

شکل ۲-٤ رفتار منحنی بار- جابجایی یک فنر کششی

۲-۳ فنرهای کششی استاندارد

بخش دوم BS۱۷۲۶ در مورد فنرهای کششی بحث می‌کند: BS۱۷۲۶، بخش، ۱۹۸۸؛ راهنمای طراحی فنرهای کششی مارپیچ.

استاندارد DIN آلمان نیز این فنرها را بحث قرار می‌دهد و در حالت کلی بسیار مفید هستند:

DIN۲۰۸۹- محاسبات و طراحی فنرهای کششی

DIN۲۰۹۷- فنرهای کششی مارپیچی از مفتول گرد شامل ارائه به صورت نمودار، انواع فنر، تلرانس‌ها و آزمایش‌ها.

بخش ۲ شناسه BS۱۷۲۶، انواع حلقه انتهایی را به ۳ گروه تقسیم کرده و تلرانس‌های تولید را در عددی که مقدار آن به گروه حلقه وابسته است، ضرب می‌کند. یعنی؛

گروه اول حلقه‌ها: ۱×تلرانس‌ها

گروه دوم حلقه‌ها: ۱/۵×تلرانس‌ها

گروه سوم حلقه‌ها: (عددی که به توافق بین تولیدکننده و مشتری بستگی دارد)× تلرانس‌ها

BS۱۷۲۶ موارد زیر را در برمی‌گیرد:

- طول آزاد
- موقعیت نسبی حلقه‌ها
- سفتی فنر
- بار/طول‌ها

DIN۲۰۹۷ موارد زیر را در برمی‌گیرد:

- قطر خارجی
- طول آزاد
- سفتی فنر
- بار/طول‌ها

هرگاه در طراحی یک فنر، درجه بالایی از دقت مورد نیاز باشد، ضرورت دارد که به عوامل کنترل کننده تلرانس و اهمیت آنها توجه شود.

۲-٤ روابط طراحی برای فنرهای کششی

به دلیل اینکه هر کششی در فنر کششی نرمال، اصولاً شبیه به فنر فشاری است، لذا روابط طراحی آنها نیز مشابه می‌باشد:

علائم و نشانه‌های مورد استفاده:

D = قطر متوسط حلقه؛

d = قطر مفتول؛

C = اندیس فنر D/d؛

N = تعداد حلقه‌های فعال؛

L_c = طول آزاد سرتاسر چنگک‌های داخلی؛

P = بار فنر؛

P_0 = بار کششی اولیه؛

G = مدول برشی؛

δ = مقدار کشش (تغییر طول)؛

S = سفتی فنر؛

τ = تنش پیچشی حاصل از P؛

τ_0 = تنش پیچشی حاصل از P_0؛ و

K = ضریب تصحیح Spowith برابر $\frac{c=0/2}{c-1}$.

تنش پیچشی حاصل از P : $\tau = \frac{8PDK}{\pi d^3}$

ـ سفتی فنر بین دو بار P_2,P_1 و L_2,L_1 ، $\frac{Gd^4}{8nD^3}$ یا $S = \frac{P_2 - P_1}{L_2 - L_1} = \frac{GD}{8nC^3}$

به چگونگی وابستگی سفتی فنر به قطر مفتول و قطر متوسط حلقه توجه شود.

طـول آزاد یـک فنر کششی معمولاً از زیر چنگک‌ها اندازه گرفته می‌شود و برابراست با حاصل جمع طول بدنه فنر وطول چنگک:

$L_0=(N+1)d+$۲(طول قلاب)

بـرای ماشین استاندارد یا حلقه‌های متقاطع که با خمش آخرین حلقه ایجاد می‌شوند، طول حلقه را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$D-d$= طول حلقه

لذا طول آزاد حلقه در این حالت عبارتست از:

$$L_0=(N+1)d+2(D-d)$$

کشش اولیه از طریق ترسیم منحنی بار- جابجایی در پشت طول آزاد فنر محاسبه می‌شود. یعنی؛

$$P_0 = P_2 - \frac{P_2 - P_1}{L_2 - L_1}(L_2 - L_0)$$

$$P_0=P_2-S(L_2-L_0)$$

۲-۵ روابط مربوط به محاسبه تنش در حلقه‌های انتهایی فنر

حلقـه‌هـای انتهایـی فنرها همزمان تحت تأثیر تنش‌های خمشی و پیچشی با یکدیگر قرار دارند. تجربه نشان می‌دهد که واماندگی معمولاً به دلیل تنش‌های خمشی اتفاق می‌افتد.

- **فهرست علایم و نشانه‌ها:**

σ_b=تنش خمشی حاصل از بار P؛

D_L= قطر متوسط حلقه قلاب انتهایی؛

D=قطر مفتول؛

C_L= اندیس قلاب= $\frac{D_L}{d}$؛

K_L=ضریب تصحیح انحناء در خمش؛ $$K_L=\frac{4CL^2-C_L-1}{4C(C_L-1)}$$

تـنش در حلقـه‌هـا از جمع مؤلفه خمشی و کششی تنش حاصل می‌گردد. برای حلقه‌های با شکل استاندارد، مثل حلقه‌های متقاطع و ماشینی (شکل ۲-۵ را ببینید) می‌توان نوشت:

مؤلفه خمشی+ مؤلفه کششی= تنش خمشی

یا

$$\sigma_b=\frac{16PD_LK_L}{\pi d^3}+\frac{4P}{\pi d^2}$$

بـرای دیگـر طراحـی حلقـه‌هـا، فاصـله yاز راسـتای اعمال بار و دورترین بخش حلقه، جایگزین شعاع حلقه می‌شود. لذا می توان نوشت:

$$\sigma_b=\frac{16P_YK_L}{\pi d^3}+\frac{4P}{\pi d^2}$$

توجه شود که K_L باید با استفاده از اندیس C_L که به صورت زیر تعریف می‌گردد، محاسبه شود:

$$C_L=\frac{2R}{d}$$

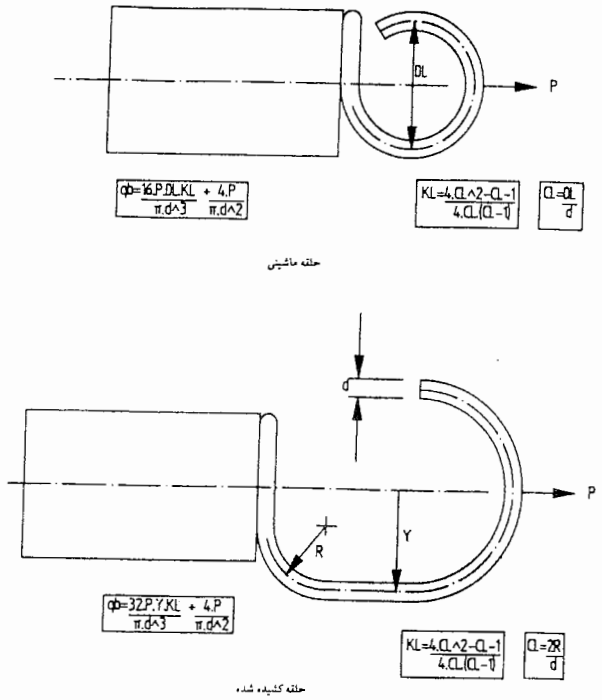
که در آن R شعاع یا شعاع‌گذرا یا فاصله yاز امتداد بار می‌باشد (شکل ۲-۵ را ببینید).

۲-۶ جزئیات طراحی مربوط به کشش اولیه

مقـدار کشـش اولـیه که می‌توان بر روی یک فنر گذاشت، محدود است. مقدار آن از طریق استحکام مفتول، اندیس فنر و فرایندهای تولید فنر کنترل می‌گردد. در شکل ۲-۷، تغییرات کشش اولیه که به عنوان درصدی از اسـتحکام مفتول است، نسبت به اندیس فنر آورده شده است. کشش اولیه به عنوان تنش محاسبه شده‌ای که درصدی از استحکام ماده مفتول است، در نظر گرفته می‌شود. یعنی؛

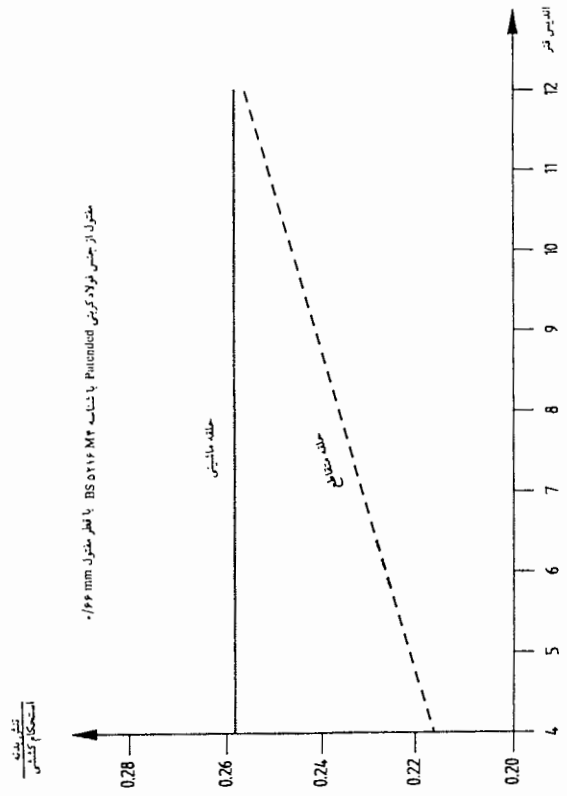
$$\text{درصد کشش اولیه} = \frac{q_0}{R_m} \times 100 = \% \frac{8 P_0 DK}{\pi d^3 R_m} \times 100$$

از معادـله فـوق می‌توان مشاهده کرد که مواد با استحکام بالاتر، قادر به تحمل کشش اولیه بیشتری هسـتند این نمودار، حداکثر کشش اولیه قابل دسترس تجاری برای فنرهایی که تنش‌زدائی نشده‌اند را نشان می‌دهد. منحنی می‌تواند از طریق فرایندهای مخصوص فنرپیچی با دست، کمی توسعه یابد.

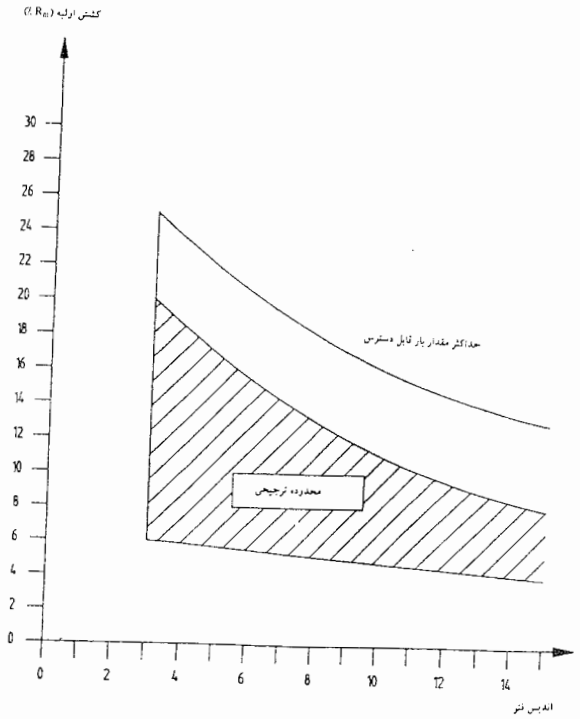


شکل ۲-۵ پارامترهای مربوط به محاسبه تنش حلقه انتهایی فنرهای کششی

همچنین مشخصه‌های خستگی حلقه‌های ماشینی و متقاطع در شکل ۲-۶ آورده شده است.

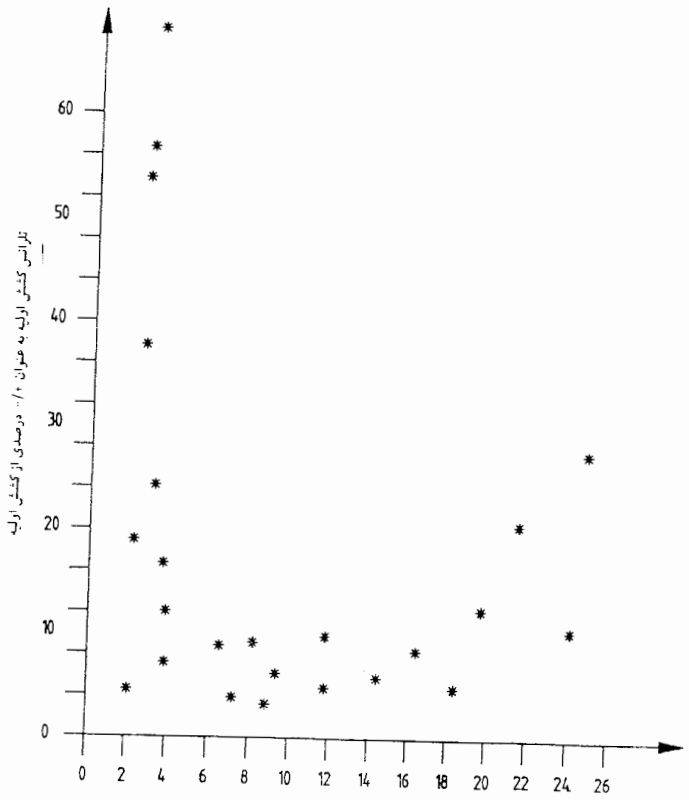


شکل ۲-۶ مشخصه‌های خستگی حلقه‌های ماشینی و متقاطع



شکل ۲-۷ کشش اولیه حداکثر برحسب اندیس فنر

همچنین در شکل ۲-۸ محدوده‌ای از تنش کششی قابل قبول نشان داده شده است. این محدوده به دلیل آنست که تلرانس‌های تولیدی در بارهای کششی اولیه خیلی پائین و خیلی بالا (شکل ۲-۸ را ببینید)، وخیم‌تر می‌شوند که دلیل آن مشکلات مربوط به تنظیم کردن ماشین‌های فنرپیچی خودکار.



شکل ۲-۸ تلرانس کشش اولیه برحسب کشش اولیه

۲-۷ تنش‌های کاری مجاز حداکثر در فنرهای کششی

تنش حداکثری که یک فنر می‌تواند تحمل کند به حد الاستیک ماده بستگی دارد. برای مثال، در یک فولاد کربنی با شماره شناسنامه BS۵۲۱۶، حدالاستیک در شرایط عملیات حرارتی نشده حدود ۴۰٪استحکام مفتول است.

در یک فولاد زنگ نزن مثل BS۳۰۲،۲۰۵۶S۲۶، تنش حداکثر مجاز به ۳۰٪ استحکام مفتول کاهش می‌یابد. با فرض ۱۵٪ محدوده پسماند، این مقادیر به ترتیب تا ۳۴٪ و ۲۴٪ تنش‌های کاری کاهش می‌یابد. این شکل‌ها، با انجام عملیات حرارتی بر روی فنر در دمای پائین و بعد از حلقه پیچی می‌توانندتوسعه یابند. درعین حال، این موضوع باعث افت مقدار کشش اولیه در فنر می‌شود.

جدول ۲-۱ فنرهایی را نشان می‌دهد که بعد از تولید در دمای پایین عملیات حرارتی می‌شوند ($^{\circ}C$ ۲۷۵ برای فولاد کربنی و $^{\circ}C$ ۴۲۵ برای فولاد ضدزنگ) و فقط در کاربردهای استاتیکی از آنها استفاده می‌شود (تا 10^4 سیکل).

جدول ۲-۱ فنرهایی که پس از تولید در دمای پایین عملیات حرارتی می‌شوند.

ماده	مقدار تنش پیچشی در بدنه		مقدار تنش خمشی درحلقه‌های آخری	
	٪ حداکثر	درصد پیشنهاد شده در کار	٪ حداکثر	درصد پیشنهاد شده در حین کار
BS۵۲۱۶	٪۴۹	٪۴۲	٪۱۰۰	٪۸۵
BS۲۰۵۶(۳۰۲S۲۶)	٪۴۰	٪۳۵	٪۸۲	٪۷۰

جدول ۲-۲ با استفاده از اطلاعات تجربی آماده شده است و تأثیر LTHT (عملیات حرارتی در دمای پایین) را بر روی کشش اولیه و حد الاستیک فنرهای ساخته شده از فولاد کربنی با شماره شناسه $BS5216ND_3$ نشان می‌دهد. قطر مفتول ۱٫۲mm و اندیس آن ۶٫۹ می‌باشد ($UTS=2000N/mm^2$).

جدول ۲-۲ تأثیر عملیات حرارتی در دمای پایین بر روی کشش اولیه و حد الاستیک

درجه حرارت LTHT ^0C .	کشش اولیه		حد الاستیک	
	تنش (N/mm^2)	٪U.T.S	تنش (N/mm^2)	٪U.T.S
NiL	۴۰۰	۲۰	۸۲۰	۴۰
۱۵۰	۳۵۰		۹۵۰	
۲۰۰	۳۰۰		۱۰۲۰	
۲۵۰	۲۵۰		۱۱۰۰	
۳۰۰	۲۰۰	۱۰	۱۰۰	۵۰

برخلاف فنرهای فشاری که اگر تحت تأثیر افزایش بار قرارگیرند، تسلیم می‌شوند، به یک فنر کششی به سادگی می‌توان افزایش تنش اعمال کرد. بنابراین، این نکته دارای اهمیت است که محدوده پسماند کافی به آن اعمال شود تا بتوان درحین جا زدن یا مونتاژ کردن فنر، از افزایش تنش ایجاد شده در آن استفاده کرد. تنش استاتیکی حداکثر کاری، همیشه باید ۸۵٪ تنش مجاز حداکثر باشد.

می‌توان مشاهده کرد که اوج مقدار حد الاستیک در دمای ^0C ۲۵۰ قرار می‌گیرد. در عین حال، تنش کششی اولیه به آرامی با افزایش دما، کاهش می‌یابد. تأثیر دیگر LTHT این است که باعث می‌شود فنرهای ساخته شده از فولادهای کربنی می‌چرخند ولی فنرهای ساخته شده از فولاد ضدزنگ نمی‌چرخند. در فنرهای کششی، این مسئله تأثیر نامطلوبی بر روی موقعیت نسبی حلقه می‌گذارد.

۲-۸ خواص خستگی فنرهای کششی

فنرهای کششی در کاربردهای خستگی به خوبی فنرهای فشاری عمل نمی‌کنند. این مسئله ناشی از این واقعیت است که بسیاری ازحلقه‌های انتهایی این فنرها به لحاظ هندسی طوری طراحی و ساخته شده‌اند که تنش‌های زیادی به دلیل خمیدگی‌های شدید و یا علائم ابزار (مثل خراشیدگی‌ها و یا برجستگی‌ها و غیره) در آنها به وجود می‌آید. در مقام مقایسه، فنرهای کششی در یک سطح تنش برابر، نسبت به فنرهای فشاری، حدود ۲۰٪ در مقابل خستگی ضعیف‌تر عمل می‌کنند. به علاوه، به دلیل اینکه به سادگی نمی‌توان این نوع از فنرها را ساچمه‌زنی و یا پیش‌تنیده کرد، در کاربردهای خستگی باید مقدار تنش بسیار پایینی به آنها اعمال کرد.

ساچمه‌زنی که همیشه یکی از فرایندهای عالی برای بهبود عملکرد خستگی در فنرها می‌باشد را فقط می‌توان برای فنرهای کششی با موفقیت محدودی اعمال کرد.عملیات ساچمه‌زنی بر روی حلقه‌های فنر خوب عمل می‌کند، ولی قادر نیست تا بر روی دیواره داخلی بدنه فنر نفوذ کند، زیرا فاصله‌ای بین حلقه‌های آن وجود ندارد. همچنین فنرهای ساچمه خوده باید بعد از ساچمه‌زنی تحت عملیات حرارتی LTHT در دمای ۲۲۰°C قرار گیرند تا تنش‌زدایی شده و کشش اولیه در آنها از بین برود. مشکل نهایی که در ساچمه زنی وجوددارد این است که ساچمه در بین حلقه‌ها قرار گرفته و سپس هنگامی که فنر عمل می‌کند فرو می‌افتد که به ندرت قابل قبول است.

- پیش‌تنیدگی فرایندی است که بسیار مرسوم بوده و برای فنرهای فشاری به سادگی قابل اعمال است، گرچه در فنرهای کششی به قید و بندهای ویژه‌ای نیاز بوده و عموماً یک عمل قابل دوام نمی‌باشد. به علاوه، مقدار پیش تنیدگی، بخش عمده‌ای از کشش اولیه را، نه همه آن را، از بین می‌برد که این مسئله باعث بهبود عملکرد خستگی می‌شود.

بنابراین، تنها راه برای اطمینان از عملکرد دینامیکی این است که فنر به طرز صحیحی مطابق با دستورالعمل زیر طراحی گردد.

همانطور که قبلاً نشان داده شد، حلقه‌ها معمولاً ضعیف‌ترین بخش از یک فنر کششی است و روشهای مختلف بهبود عملکرد آن پیشنهاد گردید. حلقه‌های ماشینی و متقاطع استاندارد از همه مرسومتر بوده و اگر به طرز صحیحی ساخته شوند، فنرها را قادر می‌سازند تا تحت تنشی برابر مقادیر نشان داده شده در شکل (۲-۶) قرار گیرند. از روی نمودار می‌توان مشاهده کرد که در حلقه متقاطع اگر اندیس فنر کاهش یابد، استحکام خستگی آن نیز کاهش می‌یابد. لذا حلقه ماشینی با شعاع‌گذرایی برابر با شعاع بدنه در مقایسه با حلقه متقاطع توصیه می‌گردد. مخروطی کردن انتهای فنر و شکل دادن حلقه به اندازه‌ای کوچک‌تر،

طراحی جالبی را به وجود می‌آورد. این مسئله را می‌توان با استفاده از این واقعیت توضیح داد که تنش خمشی در حلقه بستگی به قطر حلقه دارد. در عین حال، حلقه نباید خیلی کوچک باشد، در غیر این صورت، خمیدگی زیاد، ضریب تصحیح تنش و علایم ابزاری باعث کاهش عمر خستگی می‌شوند. حلقه‌های بزرگ هرگز نباید استفاده شوند، مگر اینکه در عمل ناچار به استفاده از آنها باشیم و لذا تنش کلی را می‌توان کاهش داد.

استفاده از انتهای مخروطی با حلقه‌های چرخان، می‌تواند بسیار مطمئن باشد، گرچه نوک لنگر چرخان فقط باید در بخش مخروطی با تنش کم با بدنه فنر در تماس باشد، وگرنه عملکرد خستگی کاهش می‌یابد.

استفاده از میله پیچ مانندی که در داخل بدنه فنر جای می‌گیرد برای عمر خستگی مضر بوده و باید از آن اجتناب شود. مگر با دقت و مراقبت زیاد به طوری که مطمئن شویم هیچگونه سایشی اتفاق نمی‌افتد و هنگام جا زدن، با سطح داخلی مفتول، تماس پیدا نمی‌کند.

استفاده از حلقه دوگانه که از دو حلقه انتهایی شکل گرفته است، نفعی برای عملکرد خستگی ندارد زیرا باز هم بوسیله یک بخش از مفتول به فنر متصل می‌گردد.

فرکانس طبیعی اغلب فنرهای کششی، بدلیل تعداد زیاد حلقه‌ها، نسبتاً کم است. لذا، در سرعتهای عملکردی نسبتاً پایین، تنشهای دینامیکی می‌تواند ایجاد گردد. توصیه می‌گردد که سرعت عملکردی هرگز از $\frac{1}{13}$ فرکانس طبیعی فنر بالاتر نرود، مگر آنکه کاهش مناسبی در تنش عملکردی برای آن برشمرده شود.

همچنین ارتعاش‌های جانبی یا تشدید در فنرهای استوانه‌ای خیلی بلند می‌توانند مشکلاتی را بوجود آورند و پیش‌بینی آنها بسیار مشکل است.

۹-۲ ملاحظات متفرقه طراحی

در کاربردهایی که فضا بسیار محدود است، می‌توان از مفتول مربعی یا مستطیلی استفاده کرد؛ گرچه در این مورد در حال حاضر استانداردی وجود نداشته و فنرها بصورت ویژه تولید می‌شوند. این فنرها در تعداد کمی ساخته می‌شوند و لذا قیمت آنها گران بوده و معمولاً تجویز نمی‌شوند. راه‌حل دیگر این است که از یک جفت فنر تودرتو که بمنظور جلوگیری از درگیر شدن در جهات متضاد حلقه پیچی شده‌اند،استفاده کرد؛ البته حلقه‌های آنها منحرف بوده به طوریکه فنر داخلی بتواند در داخل فنر بیرونی جای گیرد. فنرها باید طوری طراحی شوندکه فنر بیرونی بتواند $\frac{2}{3}$ بار و فنر داخلی $\frac{1}{3}$ بار را تحمل کنند.

آزمـایش کردن بار فنرهای کششی همیشه باید در محدوده ۲۰٪ تا ۸۰٪ خیزکاری با کشش اولیه‌ای کـه بوسیله ترسیم بخش خطی منحنی بار- جابجایی، بعد از طول آزاد فنر محاسبه می‌شود (مطابق آنچه در شکل ۲-۶ نشان داده شده است)، انجام گردد.

آزمایش دقیق بار فنرهای کششی کار ساده‌ای نبوده و وقت زیادی را طلب می‌کند.

۲-۱۰ خلاصه‌ای از عوامل طراحی به منظور استفاده در طراحی فنرهای کششی

۱-تنش‌ها در مقایسه با فنرهای کششی باید پائین‌تر نگهداشته شوند تا اجازه افزایش کشش در مونتاژ را داده و همچنین تنش‌ها در حلقه‌های انتهایی فنر کاهش یابند زیرا :

الف- اغلب حلقه‌ها ضعیف هستند،

ب- فنرهای کششی را نمی‌توان به آسانی پیش‌تنیده کرد

ج- فنرهای کششی را نمی‌توان به آسانی ساچمه‌زنی کرد.

۲- باید با کشش اولیه‌ای برابر با حداقل ۱۰٪ بار حداکثر طراحی شوند.

۳- همـه حلقـه‌ها فعال هستند حتی در بعضی اوقات حلقه‌های انتهایی را نیز شامل می‌شود. در اینجا ممکن است کاهشی در تعداد چرخش‌ها لازم شود، تا اجازه حرکت حلقه انتهایی را بدهد.

۴- چنگک‌ها تحت تأثیر تنش‌های خمشی قرار می‌گیرند و باید در مقابل داده‌های خستگی مربوطه، جایی که کاربردهای خستگی مورد نیاز می‌باشد، دقیقاً مورد بررسی قرار گیرند.

۵- اگر ممکن است،موقعیت نسبی چنگک، یا طول آزاد با تلرانس‌های بسته را مشخص نکنید، زیرا اغلب لازم می‌شود تا این پارامترها به منظور تعیین تلرانس‌های بار- طول مورد نیاز، تغییر داده شود.

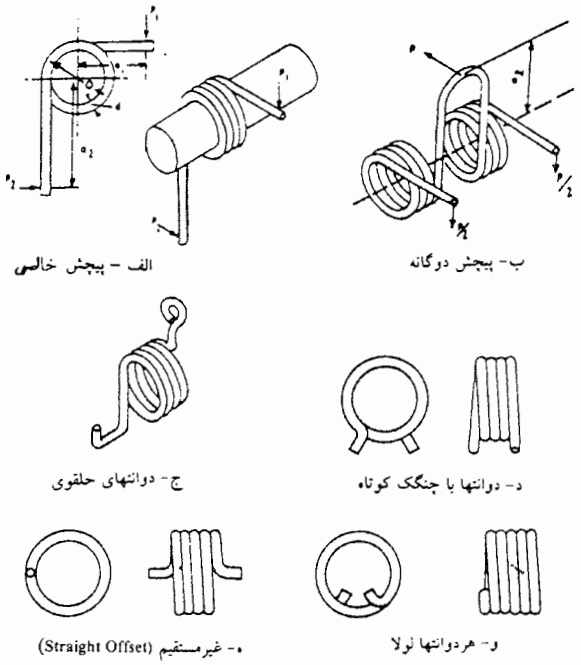
۶- عملـیات حرارتـی در دمـای پائیـن حـد الاسـتیک را بالا خواهد برد ولی به اندازه آن کشش اولیه کاهش می‌یابد.

۷- اگـر چنگکـی خیلـی پیچیده طراحی شود ساخت آن پرهزینه می‌باشد. روش‌های ثابت کردن انتهای فنر مـثل مـیله‌هـای رزوه شـده کـه در داخل فنر جای گذاشته می‌شوند، دارای مقاومت به خستگی ضعیف‌تری هستند ولی در جایی که یک نرخ واقعی مورد نیاز باشد، مفید می‌باشند.

۳- طراحی فنرهای پیچشی مارپیچ

۳-۱ مقدمه

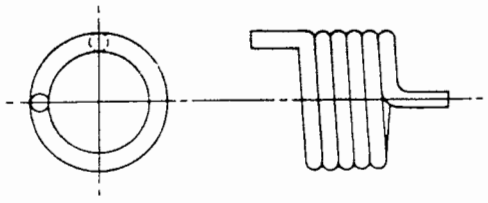
فـنرهای پیچشی مارپیچ با هر دو نوع فنرهای فشاری و کششی هم در بارگذاری و هم در مد عملیاتی تفاوت دارند. بار اعمال شده در آن ممکن است تبدیل به گشتاور شده و یا فنر برای تحمل یک گشتاور به کار گرفته شود. در یک فنر پیچشی در واقع بدنه آن است که کار انجام می‌دهد و به منظور انتقال بار یا گشتاور به بدنه فـنر، لازم اسـت تـا شـاخک‌هایـی داشـته باشد. این فنرها به شکل‌های بسیار متنوع وجود دارند و می‌توانند گشتاور را حول محورشان تحمل کنند. بعضی از انواع فنرهای پیچشی در شکل ۳-۱ آورده شده است.



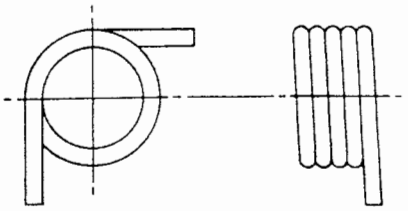
شکل ۳-۱ بعضی از انواع فنرهای پیچشی

۳-۱ شکل‌های مختلف شاخک فنر

شـکل شـاخک‌هـای انتهایی این نوع فنرها معمولاً بستگی به نشیمنگاهی دارد که باید به آن متصل شوند. به مـنظور سـهولت در تولـید، شـاخک‌هـای خروجـی از فـنر بـاید ممـاس بـر بدنـه آن باشند. تعدادی از انواع شاخک‌های فنر در شکل ۳-۲ نشان داده شده است.

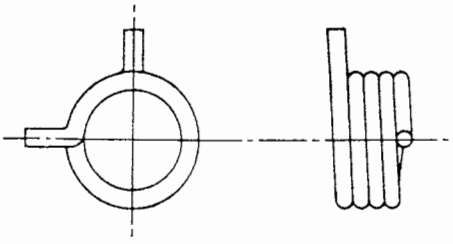


الف - شاخک‌های محوری

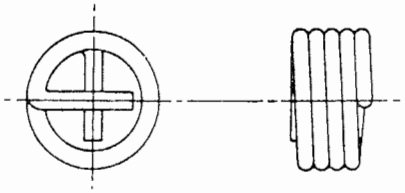


ب - شاخک‌های مماسی

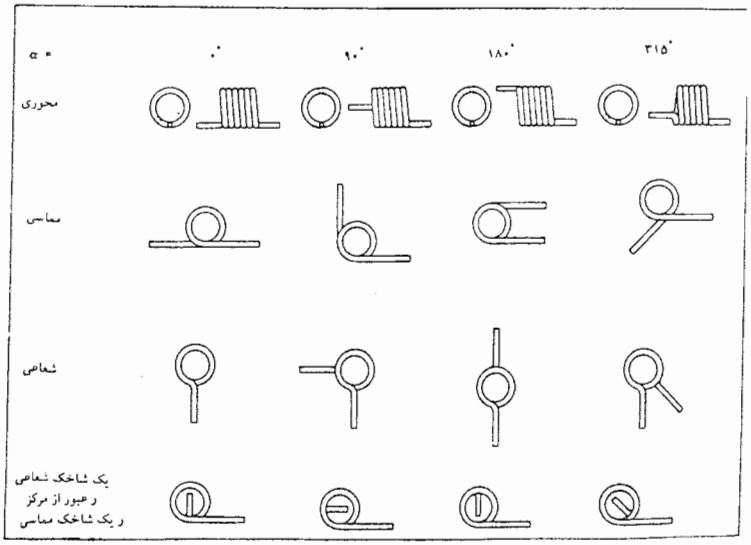
شکل ۳-۲ (الف)



ج - شاخک‌های خارجی شعاعی



د - شاخک‌های شعاعی عبور از مرکز



شکل ۳-۲ (ب)

شکل ۳-۲ انواع شاخک‌های انتهایی فنرهای پیچشی

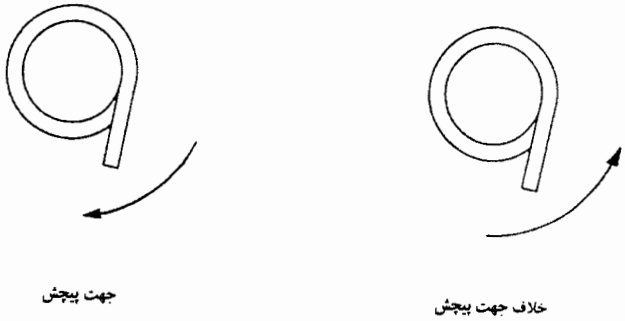
۳-۲ علایم و نشانه‌ها

کمیت	نشانه	واحدها متریک	اینچی
قطر مفتول	d	mm	In
قطر خارجی	D_0	Mm	In
قطر داخلی	D_i	Mm	In
قطر متوسط حلقه	D	mm	In
اندیس فنر	C	-	-
مدول یانگ	E	N/mm^2	$1bf/in^2$
طول آزاد بدنه فنر	L_0	Mm	In
طول تحت بار بدنه فنر	L_t	Mm	In
گشتاور پیچشی	T	N.mm	1bf.in
تعداد کل حلقه‌ها	N	-	-
سفتی	S	N.mm/deg	1bf.in/deg
طول شاخک اول	L_1	Mm	In
طول شاخک دوم	L_2	Mm	In
تغییر مکان زاویه‌ای	θ	درجه	درجه
زاویه نسبی شاخک	a	درجه	درجه
عرض محوری	h	Mm	In
عرض شعاعی	b	Mm	in

۳-۳ روش عملکرد

فنرهای پیچشی به دو روش می‌توانند عمل کنند. روش اول اینکه گشتاور پیچشی در جهت حلقه پیچی باشد و روش دوم برخلاف جهت آن (شکل ۳-۳ را ببینید).

جهت اعمال بار بر فنر طوری پیشنهاد می‌شود که چرخش حاصل از بارگذاری، برخلاف جهت پیچش فنر در هنگام تولید باشد. دلیل آن است که گشتاور بزرگتری را می‌تواند قبل از آنکه وضعیت پایدار در فنر اتفاق افتد، تحمل کند.



شکل ۳-۳ دو روش مختلف اعمال بار به فنرهای پیچشی(در جهت پیچش و خلاف جهت پیچش)

۳-٤ تغییرات ابعادی

در حیـن عملکـرد، فنرهای پیچشی گاهی اوقات در حد قابل توجهی تغییر ابعاد می‌دهند. برای فنری که در جهت پیچش عمل می‌کند. تغییرات زیر در فنر ایجاد می‌شود:

الف) تعداد حلقه‌های فنر افزایش می‌یابند.

برای یک چرخش کامل (۳۶۰ درجه) هر یک از شاخک‌ها، تعداد حلقه‌های فنر، یکی افزایش می‌یابد.

ب) طول فنر افزایش می‌یابد.

به ازای یک چرخش کامل هر یک از شاخک‌ها، طول فنر به اندازه یک قطر مفتول افزایش می‌یابد.

ج) قطر متوسط حلقه فنر کاهش می‌یابد.

کـاهش در قطر متوسط حلقه، متناسب با افزایش در تعداد حلقه‌ها است. این کاهش قطر می‌تواند قابل توجه باشد، اگر قطر چند حلقه وجود داشته باشد.

$$\text{قطر متوسط حلقه در موقعیت کاری} = \frac{\text{قطر متوسط حلقه در وضعیت آزاد} \times \text{تعداد حلقه‌ها در وضعیت آزاد}}{\text{تعداد حلقه‌ها در وضعیت کاری}}$$

مثال:

	طول آزاد	وضعیت کاری
تعداد حلقه‌ها در فنر	۴	۴٫۵
قطر متوسط حلقه	۲۵Mm	D_w

$$D_w = \frac{4 \times 25}{4.5} = 22.22mm$$

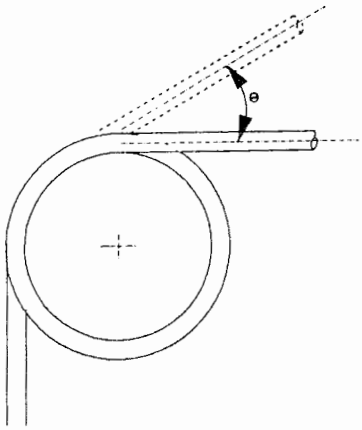
در هـنگام طراحـی یک فنر پیچشی باید سه نکته را همواره به خاطر داشت. ابتدا کاهش قطر فنری که روی یک میله (مندرل) (مد هم جهت) یا در یک لوله (تیوب) (مد غیر هم جهت) عمل می‌کند را باید به حسـاب آورد. اگر لقی مناسبی بین قطر داخلی فنر و میله وجود نداشته باشد، باعث می‌گردد که بدنه فنر بر روی مـیله قفل شود؛ آنگاه شاخک‌ها تنش و تغییر شکل اضافی دریافت کرده و ممکن است وامانده شوند. در چنیـن وضـعیتی شـاخک‌هـا بلافاصـله تغییـر شـکلی پایدار پیدا کرده و حالت طراحی شده خود را از دست می‌دهند. دوم آنکه افزایش طولی برای بدنه باید در نظر گرفته شود تا لقی مناسبی برای رشد بدنه فنر ایجاد گـردد. در غـیر ایـن صـورت وضعیت مشابه فوق‌الذکر به وجود خواهد آمد و نتیجه آن کاهش عملکرد فنر و واماندگی آن می‌باشد.

در نتـیجه، پیشـنهاد مـی‌شـود که لقی مناسبی بین قطر داخلی فنر و میله و همچنین طول بدنه و طول جایگاه آن (مکانی که فنر در آن قرار می‌گیرد) در نظر گرفته شود. به طور کلی لقی حدود ۱۰٪ باید در موقعیت کاری به حساب آید.

۳-۵ وضعیت شاخک‌ها نسبت به یکدیگر

قبل از طراحی یک فنر، موقعیت زاویه‌ای هر یک از شاخک‌ها باید با یکی از روش‌های زیر مشخص شود:

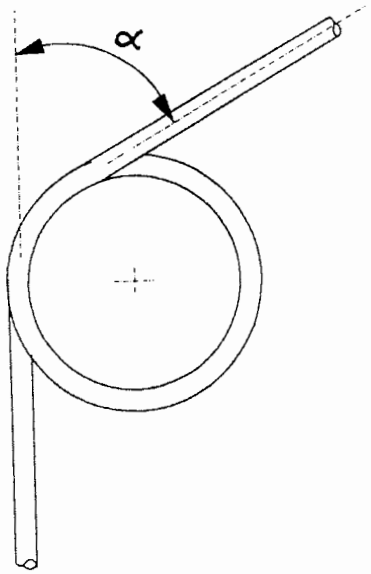
الف)گشتاور مورد نیاز بعد از چرخشی (حرکت) به اندازه θ درجه، به وجود آید (شکل ۳-۴). روش فوق زاویه نسبی دو شاخک را در موقعیت آزاد فنر مشخص نمی‌کند.



شکل ۳-٤ ایجاد گشتاور مورد نیاز پس از چرخش شاخک فنر به اندازه θ

ب)گشتاور مورد نیاز، در یک زاویه مشخص دو شاخه نسبت به یکدیگر به وجود آید (شکل ۳-۵).

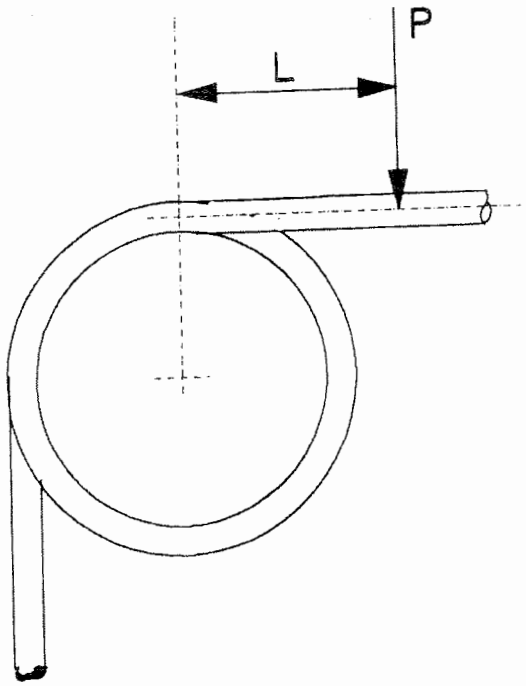
اگر سفتی فنر مشخص شود، آنگاه زاویه نسبی دو شاخک در موقعیت آزاد فنر ممکن است محاسبه شود.



شکل ۳-۵ ایجاد گشتاور مورد نیاز پس از چرخش شاخک فنر به اندازه α

۳-٦ محاسبه گشتاور پیچشی

در یک فنر پیچشی گاهی اوقات با گشتاور پیچشی و گاهی اوقات با بار، سروکار داریم. در نتیجه لازم است تا بتوان این دو پارامتر را به یکدیگر تبدیل کرد (شکل ۳-۶ را ببینید)



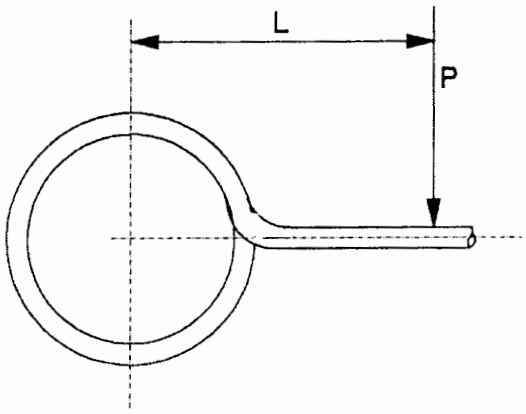
شکل ۳-٦ اعمال بار P به فاصله L از مرکز فنر

با توجه به شکل ۳-۶ می‌توان نوشت:

گشتاور = بار اعمال شده × فاصله تا محور فنر

بـاید بـه این نکته مهم توجه کرد که منظور از فاصله، فاصله عمود از خط عمل نیرو تا محور مرکزی فنر است. در شکل بالا، هنگامی که نیرو عمود بر شاخک عمل می‌کند، فاصله برای یک شاخک مماس بر فنر، برابر با طول شاخک است. برای فنری با شاخک‌های شعاعی گشتاور از رابطه زیر محاسبه می‌شود(شکل ۳-۷ را ببینید):

$$T=P\times L$$



شکل ۳-۷ فنری با شاخک شعاعی

۳-۷ محاسبه جابجایی

براساس ابعاد فنر جابجایی برای یک گشتاور پیچشی مشخص را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$\theta = \frac{64T}{E\pi d^4}\left[\frac{L_1+L_2}{3}+N\pi D\right]\frac{180}{\pi}$$ جابجایی زاویه‌ای

واحدها برحسب درجه هستند. در عین حال، گاهی اوقات در نقشه‌ها برحسب رادیان یا چرخش داده می‌شود که به صورت زیر می‌توان آنها را به یکدیگر تبدیل کرد:

برای تبدیل درجه به رادیان باید آن را ضربدر π تقسیم بر ۱۸۰ کرد.

برای تبدیل درجه به چرخش باید آن را تقسیم بر ۳۶۰ کرد.

گاهی اوقات رابطه فوق به صورت ساده شده زیر داده می‌شود:

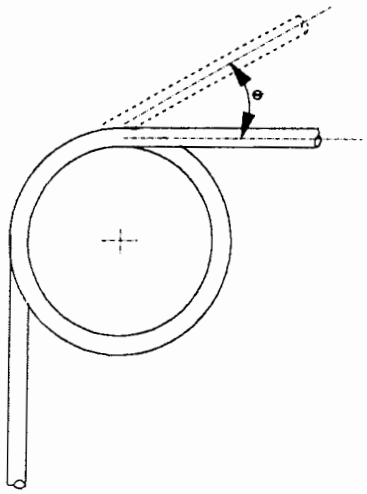
$$\theta = \frac{64ND}{Ed^4} * \frac{180}{\pi}$$

ایـن رابطه فقط برای حالتی که فنر هیچگونه شاخکی نداشته و لذا هیچ جابجایی برای شاخک در نظر گرفته نشده است؛ می‌باشد.

پیشـنهاد مـی‌شود که همیشه از رابطه کامل فوق استفاده شود تا به طور خودکار اثرخیز شاخک در نظـر گرفـته شـود. جابجایـی کـل مـی‌تواند وابستگی زیادی به طراحی فنر داشته باشد (کل حلقه‌ها و طول شاخک).

۳-۸ محاسبه سفتی

سـفتی یـک فـنر پیچشـی برای هر طراحی فنر ثابت بوده و برابر مقدار افزایش گشتاور پیچشی به ازای یک جابجایی مشخص می‌باشد. (شکل ۳-۸ را ببینید.)

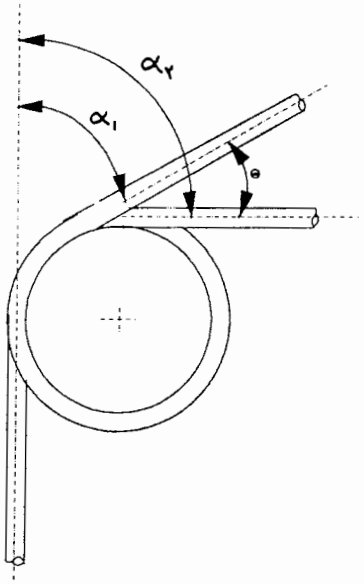


شکل ۳-۸ فنری که شاخک آن به اندازه θ چرخیده است

در شـکل، فـنر نشـان داده شـده در بالا که یکی از شاخک‌ها در اثر گشتاور T به اندازه π جابجا شده است؛ سفتی به صورت تغییر گشتاور تقسیم بر جابجایی تعریف می‌شود، یعنی:

$$S = \frac{T}{\theta}$$

همچنیـن اگـر گشتاور در دو موقعیت زاویه‌ای مختلف شاخک معلوم باشد، آنگاه سفتی برابر است با تغییرات گشتاور تقسیم بر تغیرات زاویه شاخک (شکل ۳-۹ را ببینید)



شکل ۳-۹ شاخک فنر در دو موقعیت مختلف و معلوم α_1 و α_2

مطابق شکل ۳-۹ می‌توان نوشت؛

تحت گشتاور T_1، زاویه شاخک برابر است با a_1

تحت گشتاور T_2، زاویه شاخک برابر است با a_2

در نتیجه می‌توان نوشت:

$$S = \frac{T_2 - T_1}{a_2 - a_1} \quad \text{یا} \quad S = \frac{T_2 - T_1}{\theta}$$

- اگر سفتی معلوم باشد، رابطه فوق را می‌توان برای یکی از پارامترها نوشت.

• مفتول با مقطع گرد

برخلاف فنرهای کششی و فشاری که در آن تنش ایجاد شده پیچشی است، در فنرهای پیچشی که به صورت خمش عمل می‌کنند، تنش خمشی ایجاد می‌گردد که مستقیماً متناسب است با گشتاور ایجاد شده در فنر و به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\text{تنش} = \frac{32T}{\pi d^3}$$

$$\text{خیز } \theta = \frac{64T}{E\pi d^4}\left(\frac{L_1 + L_2}{3}\right) + N\pi D\left(\frac{180}{\pi}\right)$$

بـرای حالتـی که فنر بازوهای مماسی ندارد، عبارت $\frac{L_1 + L_2}{3}$ صفر شده و عبارت خیز به صورت زیر خلاصه می‌شود.

$$\theta = \frac{64TND \times 180}{E\pi d^4}$$

$$\frac{T}{\theta} = \frac{E\pi d^4}{11520[(L_1 + L_2)/3 + N\pi D]}$$ (گشتاور بر درجه)

طول بدنه (حلقه بسته شده)$=(N+1)D$

$$\text{طول بدنه (در موقعیت کاری)} = (N + 1 + \frac{\theta}{360})d$$

- **مفتول با مقطع مستطیلی**

$$\text{تنش} = \frac{6T}{hb^2}$$

$$\text{خیز}\theta = \frac{12T}{Ehb^4}(\frac{L_1 + L_2}{3}) + N\pi d(\frac{180}{\pi})$$

$$\text{سفتی}S = \frac{E\pi hb^3}{2160[(L_1 + L_2)/3 + N\pi D]}$$

L_0*طول* بدنه (حلقه بسته)$=(N+1)H$

$$L_t = (N + 1 + \frac{\theta}{360})h$$ طول بدنه (موقعیت کاری)

۳-۱۰ محاسبه طول بدنه

ـ طول بدنه یک فنر حلقه شده به صورت بسته در موقعیت آزاد عبارتست از:

$$L_0=(N+1)d$$

در موقعیت کاری طول بدنه عبارتست از:

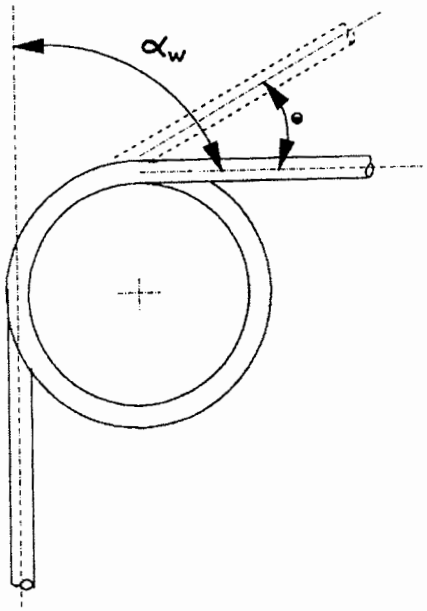
$$L_t = (N + 1 + \frac{\theta}{360})d$$

۳-۱۱ محدوده پسماند

پیشنهاد می‌شود تا فنرها همیشه در محدوده پسماندی برابر ۱۵٪ طراحی شوند تا اطمینان حاصل شود که فنر در عمل یا در هنگام نصب هرگز تحت تأثیر تنش‌های بزرگتر از حد مجاز قرار نمی‌گیرد.

۳-۱۲ تعیین حلقه‌ها

همانطور که قبلاً ذکر شد، فنرهای پیچشی را باید طوری طراحی کرد تا به یک رابطه مشخصی برای شاخک تحت یک گشتاور مشخص، دست یابیم. این رابطه با استفاده از شکل ۳-۱۰ به روش زیر قابل دستیابی است:



شکل ۳-۱۰

سفتی فنر : S

گشتاور نهایی : T

رابطه زاویه‌ای مشخص شده : a_w

$$S = \frac{T}{\theta}$$

که در آن θ تغییر شکل زاویه‌ای از موقعیت آزاد به موقعیت کاری است.

$$\theta = \frac{T}{S}$$

لذا با داشتن گشتاور و سفتی می‌توان تغییر شکل را محاسبه کرد.

زاویه شاخک در موقعیت آزاد عبارت خواهد بود از : $a_w - \theta$

لذا در هر طراحی فنر، باید تعدادکل حلقه‌ها I باشد به علاوه :

$$\frac{a_w - \theta}{360}$$

یعنی اگر:

a_w=۹۰

θ=۴۰

$a_w - \theta$=۵۰

در نتیجه تعداد کل حلقه‌ها در فنر عبارت خواهد بود از:

$$N = I + \frac{50}{360} = I + 0.14$$

ایـن عـدد ممکـن اسـت بسـته بـه قطر مفتول و فنر برابر ۵٫۱۴، ۵٫۱۴ و یا ۱۱٫۱۴ باشد. در هر صورت تعداد حلقه‌ها باید برابر تعداد کل+۰٫۱۴ باشد تا وضعیت مورد نیاز شاخک تحت گشتاور اعمال شده به دست آید.

۳-۱۳ تنش‌های مجاز

همـانطور کـه قبلاًبـیان شـد، برخلاف فنرهای فشاری و کششی، فنرهای پیچشی در خمش تحت تنش قرار مـی‌گیرند نه در پیچش. لذا می‌توان نتیجه گرفت که فنرهای پیچشی در مقایسه با فنرهای فشاری می‌توانند تحـت تـنش‌های بالاتری قرار گیرند. به عنوان مثال، برای یک فولاد کربنی مطابق با شناسه BS ۵۲۱۶ یک فـنر فشـاری پـیش تنیده نشده را می‌توان تا حدود ۴۹٪ استحکام کششی‌اش تحت تنش قرار داد، حال آنکه یک فنر پیچشی پیش تنیده نشده را تا حدود ۷۰٪ استحکام کششی‌اش می‌توان تحت تنش قرار داد.

برای مفتول‌های از جنس فولاد کشیده شده به صورت سرد از قبیل BS۵۲۱۶ و ۳۰۲S۲۶ و ۲۰۵۹ BS تـنش‌هـای خمشی مجاز (تنش‌های کاری) را می‌توان به ترتیب بین ۶۰٪ و ۵۰٪ استحکام کششی ماده در نظر گرفت. با وجود این، برای مفتول سخت شده در روغن و تمپر شده، این مقدار می‌تواند بین ۶۰٪ و ۷۰ ٪ افـزایش داده شـود. بـا انجـام عملـیات حرارتی مناسب بر روی فنرها در دمای پایین و بعد از حلقه پیچی، می‌توان تنش کاری مجاز را تا حد قابل توجهی افزایش داد.

جـدول زیـر سـطح تـنش پیشنهادی برای کاربردهای استاتیکی رانشان می‌دهد (تا ۱۰/۰۰۰ سیکل بارگذاری):

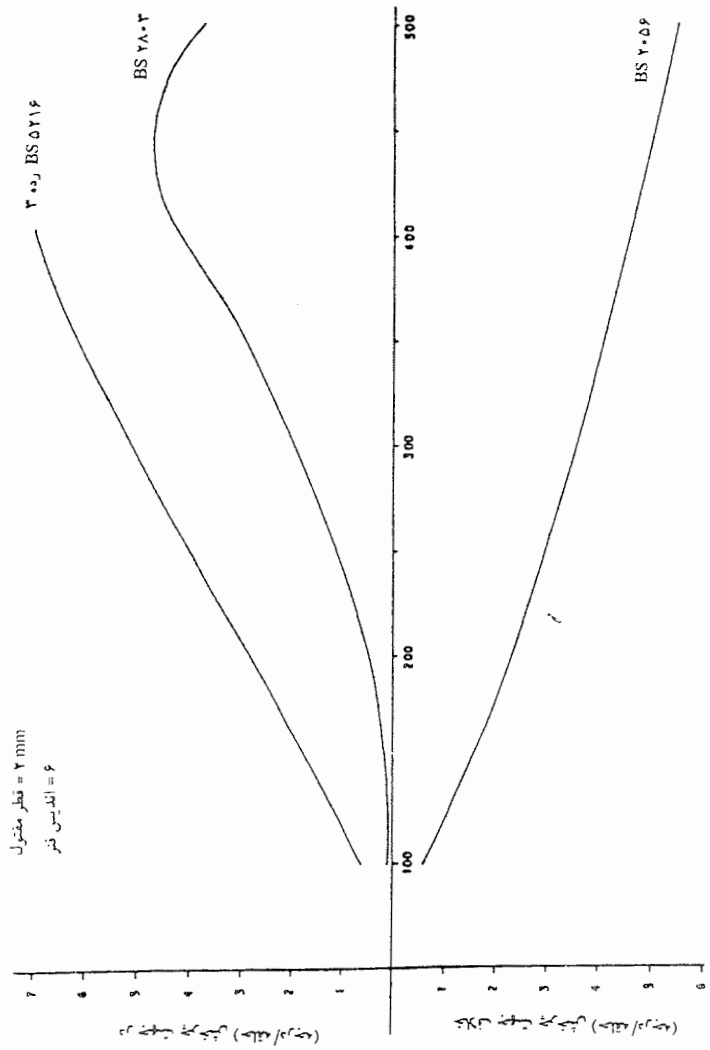
ماده	سطح تنش درصدی از استحکام کششی
BS۵۲۱۶	۷۰
BS۵۲۱۶	۷۰
BS۵۲۱۶ (۳۰۲S۲۶)	۶۰

بـرای ماده BS۵۲۱۶، تنش حداکثر کاری را می‌توان تا حدودی ۸۵٪ استحکام کششی با استفاده از انجـام عملـیات حرارتـی LTHT افـزایش داد. نکته‌ای که باید به خاطر داشت این است که عملیات حرارتی موقعیـت شـاخک‌هـا را تحـت تأثیر قرار می‌دهد که بسته به نوع ماده، آن را در جهت پیچش یا بر خلاف آن می‌چرخاند (ماده BS۵۲۱۶ و BS۲۸۰۳ در جهت چرخش و ۳۲۰S۲۶ BS۲۰۵۶ بر خلاف آن) این موضوع

بـه صورت نموداری در شکل ۳-۱۱ نشان داده شده است. تنش‌های کاری حداکثر هنگامی که فنر در شرایط پیچش در جهت خلاف به کار گرفته شوند، حدود ۱۵ تا ۳۰٪ استحکام کششی کمتر می‌باشند.

بـه طـور کلـی، فـنرهای پیچشی، حلقه بسته می‌باشند و لازم است کشش اولیه بین حلقه‌ها از بین بـرود، زیـرا مـی‌توانـد مشخصـه‌های پیچشی را تحت تأثیر قرار دهد. در حالیکه فنر باید طول بدنه مشخصی داشته باشد که در صورت لزوم می‌توان حلقه‌های آن را باز کرد.

اطلاعـات بیشـتر در مـورد تـنش‌هـای طراحـی در فـنرهای پیچشی را می‌توان در گزارش تحقیقی SRAMA شـماره ۲۳۵ و در مجله فنر، شماره ۱۲۱ به تاریخ دسامبر ۱۹۷۵ و یا BS۱۷۲۶ ، بخش ۳ پیدا کرد.



شکل ۳-۱۱ تاثیر عملیات حرارتی LTHT بر وری موقعیت شاخک‌های فنر پیچشی

۴- آزمایش‌های خستگی فنرها

انجـام آزمایشـهای خسـتگی بـر روی فنرها، بهترین روش برای تخمین طول عمر خستگی فنرهایی است که تحت تاثیر بارهای تکراری قرار دارند. چنین آزمایش‌هایی باید به دقت انجام شده و برای تعیین یک نقطـه از منحنـی خسـتگی، حداقـل از ۵ تـا ۱۰ فـنر مشابه استفاده شود. سرعت آزمایش از اهمیت ویژه‌ای بـرخوردار اسـت. بـارگذاری با سرعت بالا، حرارت ایجاد کرده و باعث می‌شود که در چند حلقه اول نسبت به دیگـر حلقـه‌هـا، خـیز بیشتری به وجود آید و شکست زودرس اتفاق افتد. تعداد سیکل ها بین ۲۰۰ تا ۳۵۰ سـیکل بـر دقـیقه ترجـیح داده می‌شود؛ البته کمتر از ۲۰۰ و بیشتر از ۳۵۰ سیکل بر دقیقه هم به کار برده مـی‌شـود ولـی باید از بارگذاری سریع اجتناب کرد، مگر در مواقعی که فنر در عمل نیز تحت چنین شرایطی قرار داشته باشد.

تعـدادی از فـنرهای فشاری از جنس فولاد زنگ‌نزن نوع ۳۰۲، فولاد فنر MB تمپر شده با روغن و سیم موزیک در ۲۰۰ سیکل بر دقیقه مورد آزمایش قرار گرفتند. قطر مفتول در همه آنها ۱/۶ میلی‌متر و قطر خارجـی ۱۴/۳ میلـی‌مـتر و طول آزاد ۵۰ میلی‌متر بوده و دو انتهای آن‌ها سنگ‌زده شد. خیز اولیه آنها برابر ۶/۳۵mm بود و سپس ۱۹mm به آن اضافه می‌شد. تنش‌هایی که به فنرها اعمال می‌شد تقریبا بین (۳۰۰۰۰ psi) ۲۰۰Mpa تا (۱۰۷۵۰۰psi) ۷۴۰Mpa بود. تحت شرایط فوق، عمر میانگین آنها عبارت بود از:

ماده	تعداد سیکل تا شکست
فولاد زنگ‌نزن نوع ۳۰۲	۱۹۵۷۰۰
فولاد MB تمپر شده با روغن	۲۰۲۴۰۰
سیم موزیک	۱۸۵۳۱۸۵

توجـه: فـنرهای سـیم موزیـک کـه بـه صورت چرخشی (rotary straightened) و برای استفاده در حلقـه‌های پیچشی (torsion coilers) تولید می‌شوند، فقط ۱۵۱،۸۰۰ سیکل را توانستند تحمل کنند. دلـیل شکسـت زودرس چنین مفتول‌هایی این است که استحکام کششی در مفتول‌هایی که به طریق کشش سـرد تولید شده‌اند، طولی (longitudinal) است، حال آنکه در مفتول‌های چرخشی (rotary) عرضی است، لذا خواص کششی و حدالاستیک در آنها پایین است.

- نکات مربوط به آزمایش‌های خستگی:

۱. تعداد فنرها در هر مورد حداقل باید ۵ عدد باشند و تمام مشخصات آنها از قبیل ابعاد، جنس، محدوده تنش و دیگر جزئیات باید به دقت ثبت گردد.

۲. سرعت آزمایش برای رسیدن به نتایج یکسان باید بین ۲۰۰ تا ۳۰۰ (۳۰۰ بهتر است) سیکل بر دقیقه باشد.

۳. پس از ۱۰۰۰ سیکل بارگذاری، آزمایش را متوقف کرده و دقت کنید که پارامترهای آزمایش مثل دامنه بار و غیره تغییر نکرده و یا فنر در محل خود نشست نکرده باشد.

۴. عمر متوسط هر سری از پنج فنر را به صورت زیر تعیین کنید:

کمترین و بیشترین مقادیر را در نظر نگیرید، آنگاه میانگین دو مقداری که به یکدیگر نزدیکتر هستند را حساب کنید.

۵. کمترین محدوده تنش، بیشترین عمر را در پی دارد.

۶. فنرهای فشاری که نشیمنگاه آنها سنگ زده شده است، عمر طولانی‌تری دارند.

۷. فنرهای فشاری ساخته شده به صورت نیم حلقه (Half coil)، مثل آنهایی که $9\frac{1}{2}$ یا $10\frac{1}{2}$ حلقه فعال دارند، نسبت به فنرهای که تعداد حلقه زوج دارند، طول عمر بیشتری دارند، زیرا توزیع تنش در آنها بهتر بوده و تمایل کمتری به کمانش دارند.

۸. فنرهای آزمایش شده در موتور AC با سرعت ۱۸۰۰ دور بر دقیقه، در $\frac{1}{11}$ فرکانس طبیعیشان نوسان می‌کنند، به طوری که اگر آنها ۱۱ برابر سریع‌تر، یعنی با سرعت ۱۹۸۰۰ سیکل بر دقیقه، نوسان کنند، دچار خستگی زودرس می‌شوند.

۹. شکست صحیح حاصل از خستگی از روی سطح داخلی یک حلقه، جایی که تنش حداکثر می‌باشد، شروع می‌شود.

۱۰. ابزار آزمایش و فنرها کاملا روانکاری شوند.

٤-١ تعاریف

٤-١-١ واماندگی خستگی (Fatigue Failure)

وقتی یک فنر به طور پیوسته تحت بارگذاری و تغییر شکل قرار دارد، ماده اصطلاحا خسته شده و شکست ممکن است در تنش‌هایی بسیار پایین‌تر از حد الاستیک اتفاق افتد. این نوع واماندگی در محدوده تنش‌های کوچک اتفاق نمی‌افتد. مثلا شکست در پنج فنر در تعداد سیکل‌های زیر اتفاق افتاده است: ۱۵۰۰۰۰،

۲۱۰۰۰۰، ۲۴۰۰۰۰، ۳۰۰۰۰۰ سیکل. به منظور تعیین مقدار میانگین از بیشترین و کمترین مقدار صرف‌نظر شده و بین دو مقداری که به یکدیگر نزدیکتر هستند، میانگین گرفته می‌شود. در این حالت، دو مقداری که به یکدیگر نزدیک‌تر هستند، ۱۹۰۰۰۰ و ۲۱۰۰۰۰ هستند؛ لذا مقدار میانگین برابر ۲۰۰۰۰۰ می‌باشد. به منظور دسترسی به نتایج دقیق‌تر، می‌توان پنج گروه پنج فنری را مورد آزمایش قرار داد و میانگین هر گروه را به روش فوق به دست آورد و سپس از بین پنج میانگین به دست آمده، یک متوسط‌گیری نهایی به عمل آورد. به منظور دستیابی به یک مقدار متوسط، فقط کافی است، چهار فنر از هر گروه پنج فنری بشکنند.

٤-١-٢ عمر خستگی (Fatigue Life)

عمر خستگی عبارت است از تعداد سیکل‌های بارگذاری شده تا شکست در یک محدوده تنش مشخص و ثابت.

٤-١-٣ استحکام خستگی (Fatigue Strength)

استحکام خستگی تنش است که در آن واماندگی (Failure)، چه از طریق شکست (Fracture) و چه از طریق نشست پایدار (Permenent set)، بعد از تعداد سیکل بارگذاری مشخص، اتفاق می‌افتد. لازم است جهت اعداد سیکل بارگذاری به همراه استحکام خستگی ذکر گردد. اغلب استحکام خستگی، استحکام دوام (Endurance Strenght) نیز نامیده می‌شود.

٤-١-٤ حد دوام (Endurance Limit)

حد دوام، بالاترین تنش یا محدوده تنشی است که می‌تواند بدون واماندگی به صورت تکراری به قطعه اعمال گردد. معمولا ده میلیون (10^7) سیکل، عمر نامحدود خوانده شده و برای تعیین این حد، رضایت بخش می‌باشد. در عین حال، باید توجه شود که در بسیاری از اوقات فنرهایی که می‌توانند سه میلیون سیکل بارگذاری را تحمل کنند، قادر خواهند بود ده میلیون را نیز تحمل کنند.

٤-٢ تنش‌های طراحی

سه منحنی برای فنرهای فشاری و کششی و سه منحنی برای فنرهای پیچشی برای هر ماده بر اساس چندین پارامتر مثل استحکام کششی، حد الاستیک، نتایج حاصل از هزاران آزمایش و مقایسه با پیشنهادات

دیگـر محققیـن تهیه شده که از آنها برای طراحی موفق هزاران فنر به کار برده شده در صنایع، استفاده شده است.

منحنـی‌هـا شـامل اغلـب مـواد فـنری مرسـوم، در قطرهای مختلف مفتوهای تجاری قابل دسترسی می‌باشد.

این منحنی‌ها مخصوص مفتول‌های با مقاطع مربعی، مستطیل یا شکل‌های خاص دیگر نمی‌باشند. از ایـن منحنـی نـباید بـرای فـنرهای مارپیچ (Spiral)، ساعت (Clock)، تخت (Flat)، حلزونی مارپیچ (Volute) یـا نـورد شـده بـه صـورت گـرم (hot-rolled) اسـتفاده شـود؛ زیرا چنین فنرهایی نیاز به آزمایش‌های خستگی ویژه‌ای دارند.

نـوع عملکـرد فـنر، ماده انتخاب شده و تنش‌های اعمالی، از مهم‌ترین عوامل در تعیین عمر یک فنر می‌باشند.

شـرایط دیگـری کـه بر عمر فنر اثر می‌گذارند عبارتند از: اندازه ماده، محدوده تنش، نوع بارگذاری (مـثل اسـتاتیکی ـ دینامیکـی یـا ضـربه‌ای)، دمای محیط (چه خیلی سرد یا بالاتر از حد معمول) و طراحی عمومی (شامل اندیس فنر، خم‌های شدید، حلقه‌های با خم تند و محیط‌های خود).

منحنـی‌ها برای فنرهایی با محدوده تنش متوسطی که معمولا خیزی برابر ۲۵ تا ۷۵ درصد خیز کل فـنر را در دمـای اتـاق، بـا اندیس‌های معمولی فنر و بدون کمانش ایجاد می‌کنند، مناسب هستند. همچنین بـرای فنرهایی که دارای روش ساخت و عملیات حرارتی (به منظور تنش‌زدایی، بعد از حلقه‌پیچی) مناسب و صحیحی باشند.

بـرای فنرهایـی کـه تـنش‌زدایی شده و ساچمه خورده‌اند می‌توان بین ۲۰ تا ۳۰ درصد به مقادیر به دسـت آمـده‌انـد، ولـی با کاهش مقدار ۱۰ تا ۱۵ درصد و بررسی تنش‌های خمشی در قلاب‌ها (hooks) و مقایسـه تنش‌های قلاب با منحنی‌های تنش مربوط به فنرهای پیچشی، می‌توان از آنها برای فنرهای کششی نـیز اسـتفاده کـرد. ضـریب تصـحیح انحـناء نـیز در تنش‌های محاسبه شده، قبل از مقایسه آنها با تنش‌های منحنـی‌هـا بـاید اعمال گردد. به ویژه برای منحنی‌های تنش مخصوص کاربردهای متوسط (avarage) و سخت (Severe).

منحنیها شامل هر دو سیستم متریک SI و اینچ ـ پوند می باشند.

منحنـی‌هـای حـد دوام (شکل ۴-۱) بر اساس محدوده تنش بین اولین تنش (تنش اولیه) و دومین تـنش (تـنش نهایـی) ترسـیم شـده‌انـد. هـر چه این محدوده باریک‌تر باشد، عمر طولانی‌تر خواهد بود. نحوه اسـتفاده از نمـودار توسط خط‌چین نشان داده شده است. در این مورد یک فنر فشاری از جنس مفتول تمپر

شـده بـا روغن با رده MB، در محدوده تنش (۱۷۰۰۰psi) ۱۱۷Mpa تا (۷۱۵۰۰psi) ۴۹۳Mpa قرار داشـته و دارای عمر نامحدود است (فنرهایی که تنش‌های آنها در داخل محدوده منحنی‌ها قرار گیرد، دارای عمر خستگی نامحدود هستند).

شکل ٤-١ منحنی‌هاب حد دوام

تـنش‌های پیشنهادی برای طراحی، ممکن است برای تعیین یک تنش مطمئن (Safe Stress)، قبل از طراحی یک فنر یا بعد از طراحی آن، به منظور تعیین عمر احتمالی نیز، استفاده شود.

مثال:

بـا توجـه به منحنی‌های تنش طراحی پیشنهادی برای فنرهای فشاری (شکل ۴-۲) از جنس سیم موسیقی، خـط‌چیـن در بخش پایین سمت چپ نشان می‌دهد که خط عمودی که از (۰٫۰۸۵in) ۲٫۱۶mm به سمت بـالا ادامـه مـی‌یـابد، پایین‌ترین منحنی را در (۱۰۳۰۰۰psi) ۷۱۰Mpa قطع می‌کند که مخصوص کاربرد سـخت (Sever Service) بـوده و منحنـی میانـی را در (۱۲۵۰۰۰psi) ۸۶۰Mpa قطـع کـرده کـه مخصوص کاربرد متوسط (avarage service) بوده و منحنی بالایی را در (۱۳۸۰۰۰psi) ۹۵۰Mpa قطع کرده که برای کاربرد سبک است.

شکل ٤-٢

همچنیـن، بـرای طراحـی بـر اساس سیستم متریک، خط‌چین در بخش پایینی، سمت راست نشان می‌دهد که خط عمودی که از ۳٫۸۵mm به سمت بالا حرکت می‌کند، منحنی بالایی را در ۸۶۰Mpa قطع مـی‌کـند کـه مخصـوص کاربـرد سبک و عمر کوتاه بوده و منحنی میانی را در ۷۸۰Mpa قطع می‌کند که مخصـوص کاربرد متوسط و منحنی پایینی را در ۶۵۰Mpa قطع می‌کند که مخصوص کاربرد سخت و عمر طولانی می‌باشد.

٤-٣ کار سبک (Light Service)

کـار سـبک بـه بـارگذاری‌هـای بین ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ سیکل اطلاق می‌گردد و فنرهایی را شامل می‌شود که تحـت تاثـیر بارهای استاتیکی بوده و دارای خیزهای کم و محدوده تنش پایین می‌باشند. این فنرها به ندرت در چاشـنی‌هـای مواد منفجره، پرتابه‌ها (موشک‌ها و غیره)، ضربه‌گیرها و ابزار ایمنی استفاده می‌شوند. چنین فنرهایی را می‌توان با تنش‌های نسبتا بالا تا حداقل حد الاستیک هر ماده، طراحی کرد.

٤-٤ کار متوسط (Average Service)

کار متوسط به بارگذاری‌های بین ۱۰۰۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰۰ سیکل اطلاق می‌گردد و فنرهایی را شامل می‌شود که برای کاربردهای عمومی در ماشین‌ها، ترمزها، موتورها، سویچ‌ها و انواع متفاوت محصولات مکانیکی، استفاده می‌شوند. فرکانس عادی تا حدود ۳۰۰ سیکل بر دقیقه و نیروهای متوسط بدون ضربه در این فنرها، باعث شده است که آنها بتوانند بیشتر از ۱۰۰۰۰۰ سیکل بارگذاری را بدون شکست تحمل کنند و در مقادیر تنش در زیر منحنی میانی، اغلب می‌توانند تا ۱۰۰۰۰۰۰ سیکل بارگذاری را تحمل کنند به شرط آن که ماده و شرایط کاری، معمولی باشند. تنش‌های کمتر، عمر بیشتری را در پی خواهد داشت.

٤-٥ کار دشوار (Severe Service)

کار دشوار به بارگذاری‌های بالاتر از ۱۰۰۰۰۰۰ سیکل اطلاق می‌گردد و فنرهایی را شامل می‌شود که با سرعت زیاد و در مدت زمان طولانی، تحت بارگذاری قرار دارند؛ مثل فنرهای سوپاپ در موتور اتومبیل، چکش‌های بادی، پرس‌ها، کنترل‌کننده هیدرولیکی و کاربردهای مشابه. تنش‌های مربوط به پایین‌ترین منحنی، حداقل ۱۰۰۰۰۰۰ بارگذاری را در پی دارد، و این تنش‌ها باید حداقل ۱۰ درصد کاهش داده شود تا بتوان ۱۰۰۰۰۰۰۰ سیکل بارگذاری که نشانه عمر نامحدود است را به دست آورد. برای کاربردهای دشوار، باید به منحنی‌های دوام (شکل ۴-۱)، قبل از تعیین یک تنش مجاز مطمئن، توجه کرد.

مراجع :

1- Carlson, Spring DESIGNER,S Handbook, p173, فصل ۱۰

2- Compression Springs , IST(Institute of Spring Technology) Reports.

3- Wahl, Mechanical Springs.

مقدمه

فرآیند طراحی فنر در بعضی موارد بسیار وقت گیر و طاقت فرسا می باشد. لذا استفاده از نرم افزار طراحی فنر می تواند کمک قابل ملاحظه ای به طراح نماید. نرم افزار Spring Design Studio، با حمایت دانشگاه صنعتی شاهرود و شرکت تولیدی فنرلول طراحی شده است، از قابلیتهای فراوانی برخوردار است. این نرم افزار نسبت به نمونه های طراحی شده توسط انجمن های فنرسازان انگلیس و آمریکا برتری هایی دارد که در قسمت های بعدی به تفضیل توضیح داده خواهند شد. این نرم افزار حاصل تلاش های فراوان در مدت ۳ سال می باشد.

مراحل طراحی نرم افزار

- **انتخاب بهترین زبان برنامه نویسی**

در انتخاب زبان برنامه نویسی مورد نیاز برای طراحی این نرم افزار، چندین ویژگی شاخص در نظر گرفته شده است که در زیر به آنها اشاره شده است :

- **نرم افزار طراحی شده باید تحت سیستم عامل Microsoft Windows اجرا شود.**

از آنجایی که تکنولوژی کامپیوتر در پند سال اخیر پیشرفت چشمگیری داشته است، نیاز روزافزون کاربران به سیستم عامل های جدیدتر و پیشرفته تر، شرکت های تولید کننده نرم افزار را بر آن داشت تا سیستم عاملی پیشرفته قدرتمند را ارائه دهند. معروفترین و پرسابقه ترین این شرکت ها، Microsoft می باشد که توانسته با ارائه سیستم عامل Windows، صنعت برنامه نویسی را دگرگون کند و بسیاری از مشکلات کاربران در استفاده از کامپیوتر را رفع نماید. بعد از ارائه این سیستم عامل، تمامی شرکت های تولید کننده نرم افزارهای خود را تحت این سیستم طراحی نمودند و اکنون می توان گفت که اکثر نرم افزارهای کاربردی تحت این سیستم عامل اجرا می شوند. لذا ما هم بر آن شدیم تا نرم افزار خود را تحت این طراحی کنیم.

- **نرم افزار طراحی شده باید توان ایجاد محیط گرافیکی قوی و زیبا را داشته باشد.**

از جمله ویژگیهای هر نرم افزار که باعث ایجاد تاثیر عمیقی بر روی کاربر می شود، ظاهر آن می باشد. در نرم افزارهای جدید، این موضوع مورد توجه بسیاری قرار گرفته است، تا حدی شرکت ها در این زمینه هم دست به رقابت زده اند.

- **با توجه به زمان محدود پروژه، زبان برنامه نویسی انتخابی باید از سرعت بالایی برخوردار باشد.**

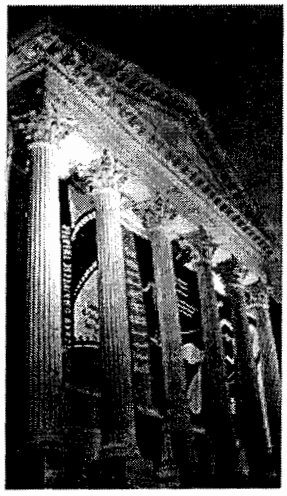
یکی از پارامترهای مهم پروژه، مدت زمان انجام پروژه می باشد. لذا اولویت با زبان برنامه نویسی می باشد که از سرعت بالاتر طراحی نسبت به بقیه برخوردار است.

- **زبان برنامه نویسی مورد نظر باید توانایی انجام پروژه های غیر تیمی را دارا باشد.**

با توجه به اینکه از لحاظ این پروژه از لحاظ تعداد اعضای تیم محدودیت دارد و از لحاظ حجم کار بسیار بزرگ است، لذا باید زبان برنامه نویسی انتخاب شود که حتی یک برنامه نویس هم بتواند از ابتدا تا انتهای پروژه را بدست گیرد. به عنوان مثال MS Visual C++ ازجمله زبانهایی است که باید حتما بصورت تیمی با آن کار کرد.

با توجه به معیارهای ارائه شده در بالا و با توجه به اینکه امروزه عمدتا برای انجام پروژه های برنامه نویسی از سه زبان Visual C++ ، Visual Basic و Borland Delphi استفاده میشود می توان بهترین زبان برنامه نویسی را انتخاب نمود.

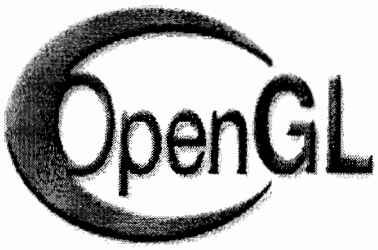
از آنجایی که Visual C++ یک زبان برنامه نویسی کاملا تیمی می باشد، نمی تواند به عنوان بهترین گزینه مطرح شود. زبان برنامه نویسی Visual Basic هم نسبت به Borland Delphi از سرعت پایین تری برخوردار است و در عین حال ایجاد واسطه گرافیکی در این مشکل تر می باشد. با توجه به توضیحات فوق تنها گزینه زبان برنامه نویسی Borland Delphi می باشد که تمامی معیارهای فوق را ارضاء می کند.



- **انتخاب بهترین تکنولوژی سه بعدی سازی**

یکی از برتری های این نرم افزار نسبت به نمونه های دیگر، قدرت نمایش سه بعدی فنرهای طراحی شده می باشد. لذا انتخاب یک تکنولوژی برتر در ایجاد یک محیط گرافیکی سه بعدی بسیار ضروری می باشد. دو تکنولوژی که امروزه استفاده از آنها بسیار گسترش یافته است، تکنولوژی DirectX (Direct 3D) و OpenGL می باشد. تکنولوژی DirectX یک بسته نرم افزاری است که توسط شرکت Microsoft ارائه شده است و شامل : Direct 3D ، Direct Draw ، Direct Show ، Direct Input می باشد. بخش Direct 3D آن مختص ایجاد محیط های گرافیکی سه بعدی با قدرت بالا می باشد. تکنولوژی OpenGL تکنولوژی نرم افزاری است که توسط شرکت OpenGL Architecture Review Board (ARB) تولید شده است. امروزه اکثر بازیهای کامپیوتری این دو تکنولوژی را به طور کامل پشتیبانی می کنند.

از بین دو تکنولوژی فوق OpenGL برای این پروژه مناسب تر می باشد. دلیل آن، این است که در DirectX کل نرم افزار وارد محیط سه بعدی شده که مطلوب ما نیست. ولی در OpenGL می توان در هر قسمت از نرم افزار این تکنولوژی را به کار برد بدون آنکه به در بقیه قسمت ها تغییری ایجاد شود.



- **_طراحی ساختار اصلی نرم افزار**

در ابتدا نوع ورودی ها و خروجی ها به صورت کلی مشخص گردید. برای این قسمت بیشتر از نرم افزار IST ایده گرفته شده است. سپس ویژگی های برتری که این نرم افزار باید نسبت به نرم افزار های نمونه می داشت ، مشخص گردید. البته لازم به ذکر است ه این نرم افزار در سه بخش مجزای فنرهای فشاری، کششی و پیچشی طراحی گردیده است.

از جمله ورودی های مورد نیاز نرم افزار می توان: مشخصات ماده، قطر مفتول، قطر خارجی حلقه، تعداد حلقه، طول آزاد، طول های کاری را نام دارد. همچنین می توان از خروجی های نرم افزار به موارد زیر اشاره کرد: ضریب سختی، طول بسته، نیروی بسته، تنش بسته، فرکانس طبیعی، جرم فنر، مکان کمانش، اندیس فنر، ضریب تصحیح تنش، مشخصات کامل نمودار گودمن، نمای دوبعدی و محاسبات تلرانس.

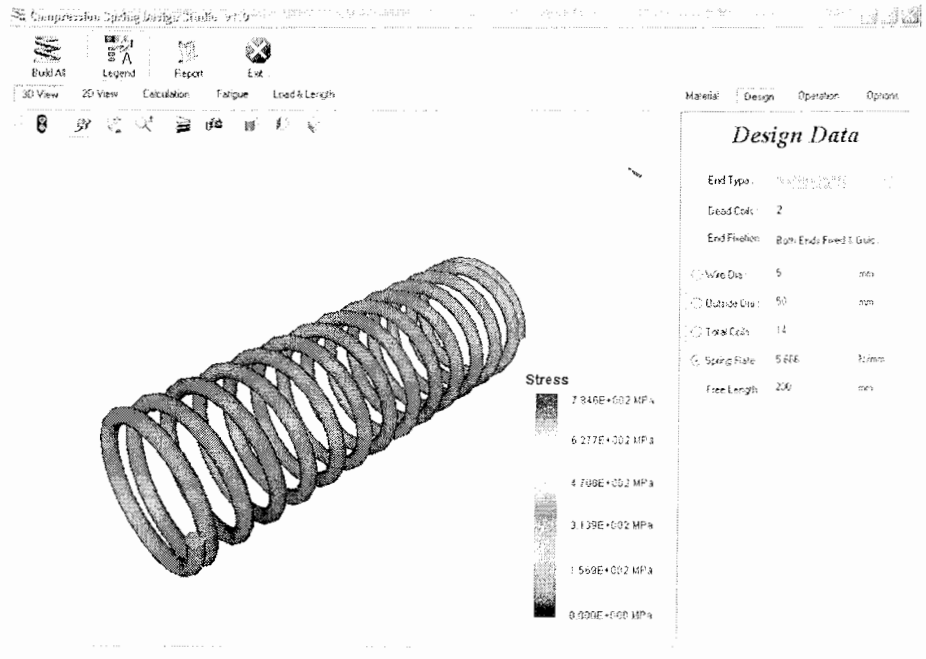
از ویژگی های برتر نرم افزار می توان : طراحی سه بعدی فنر، متحرک کردن شرایط کاری فنر همزمان با نمایش توزیع رنگ تنش های ایجاد شده در فنر را نام برد.لازم به ذکر است که نام این نرم افزار Spring Design Studio یا به صورت خلاصه SDS انتخاب شده است.

- **اعمال استانداردهای طراحی فنر در نرم افزار**

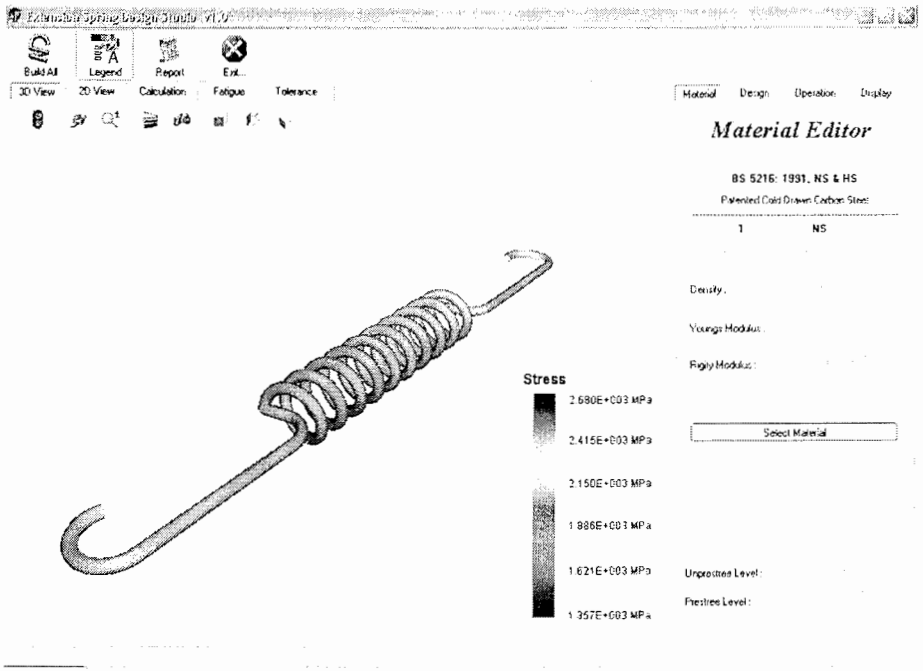
از آنجایی که این نرم افزار باید قابلیت رقابت با نمونه های خارجی خود را داشته باشد، می بایستی توانایی انجام محاسبات بر اساس استانداردهای معتبر جهانی را دارا باشد. این قسمت از طراحی نرم افزار شامل جمع آوری روابط تئوری و تجربی طراحی فنر و سپس پیاده کردن این روابط در نرم افزار می باشد. این استانداردها شامل دو قسمت می باشد: قسمت اول شامل استانداردهای مواد فنری می باشد که در آن خواص مکانیکی و شیمیایی ارائه شده است. قسمت دوم شامل روابط تئوری و تجربی طراحی فنر می باشد. استانداردهایی که در این نرم افزار استفاده شده است شامل : ASTM (استاندارد انجمن تست مواد آمریکا)، SAE (استاندارد انجمن خودروسازان آمریکا)، BSI (مجموعه استاندارد های انگلیس)، EN (استاندارد های اروپا) می باشد.

- **طراحی ویژوال نرم افزار**

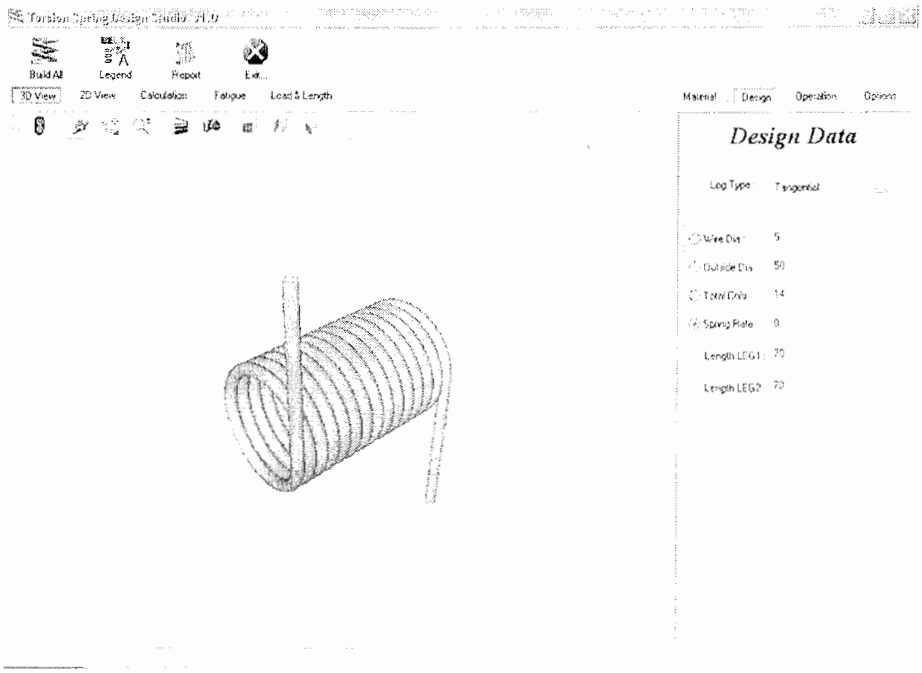
بعد از طراحی ساختار کلی نرم افزار شامل موقعیت ورودی ها، خروجی ها و در کل شمای کلی نرم افزار مشخص گردید. در این قسمت سعی بر این بوده است که کاربری طوری طراحی شود که کاربری آن بسیار ساده باشد. در طراحی این قسمت از نرم افزار های SolidWorks, 3D Studio Max بیشتر کمک گرفته شده است. قسمت Control Panel نرم افزار طوری طراحی شده است که کاربر به راحتی می تواند ورودی ها وارد کرده و به سرعت از یک قسمت طراحی به قسمت دیگر برود. بخش نتایج به گونه ای طراحی شده است که کاربر به راحتی می تواند به تمامی نتایج دسترسی کامل داشته باشد.



شمای کلی محیط نرم افزار – بخش فشاری



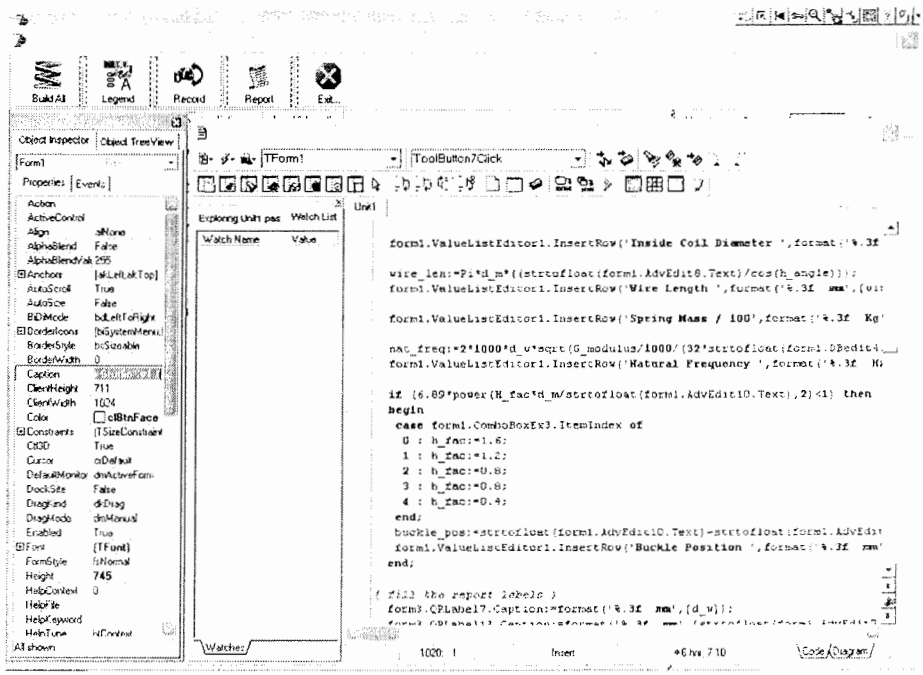
شمای کلی محیط نرم افزار – بخش کششی



شمای کلی محیط نرم افزار – بخش پیچشی

- **کد نویسی نرم افزار**

بعد از طراحی ویژوال نرم افزار نوبت به برقراری ارتباط بین اجزای سازنده این نرم افزار می باشد. این ارتباط باید به گونه ای برقرار شود که بتواند حداکثر کارآیی را برای محیط طراحی شده ایجاد نماید. برای انجام محاسبات ریاضی پیشرفته از نوعی کامپوننت بنام Parser استفاده شده است که توانایی تجزیه و تحلیل روابط ریاضی را دارد. همچنین جهت تسریع فرآیند کد نویسی از کامپوننتی بنام CodeRush محصول کمپانی .Eagle Software, Inc استفاده شده است. لازم به ذکر است که کد های مربوط به هر بخش از نرم افزار اعم از فشاری، کششی و پیچشی به طور متوسط شامل ۳۰۰۰ خط می باشد. که این تعداد کد بدون احتساب کد های آماده استفاده شده است.

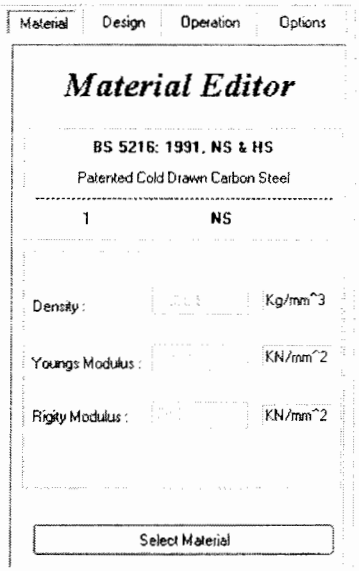


محیط کد نویسی Borland Delphi

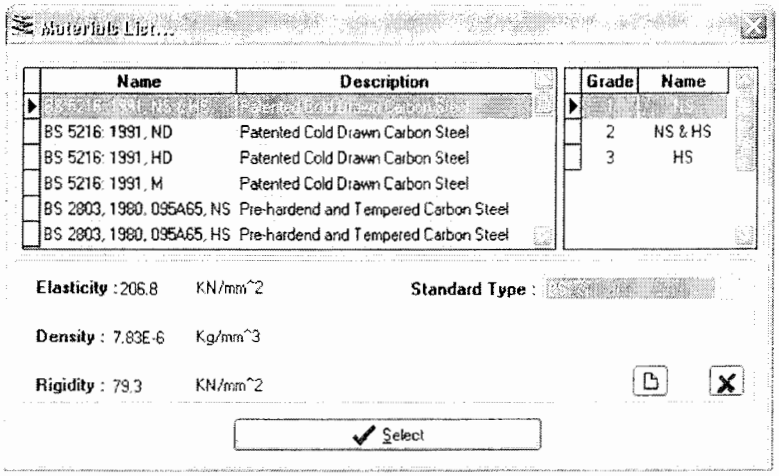
امکانات نرم افزار

- **بخش بانک مواد فنری :**

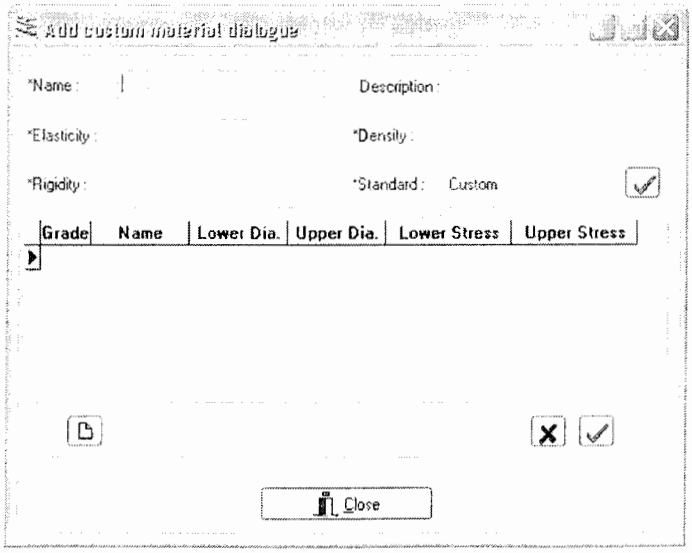
در این بخش کاربر می تواند مشخصات ماده فنری فعلی را مشاهده کند و در صورت نیاز ماده دیگری را برای طراحی خود انتخاب نماید. در صفحه انتخاب مواد کاربر می تواند با انتخاب استاندارد مورد نظر لیست مواد فنری مربوط به این استاندارد را مشاهده نماید. در صورتی که کاربر ماده مورد نظر خود را در این بانک اطلاعاتی نیابد می تواند این ماده را خود به بانک مواد فنری اضافه کند.



بخش ماده فنری در Control Panel نرم افزار



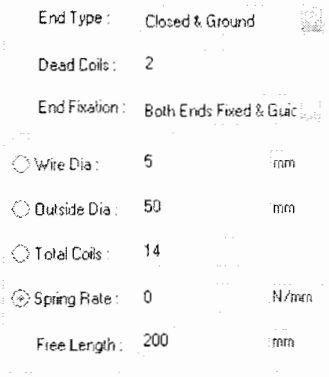
پنجره لیست مواد فنری



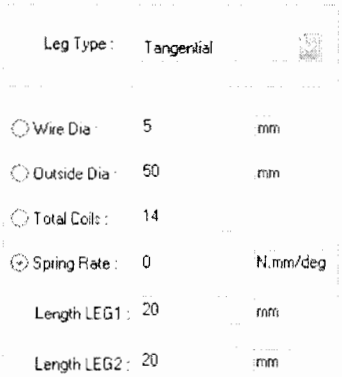
پنجره اضافه کردن یک ماده فنری جدید

- **بخش طراحی هندسی**

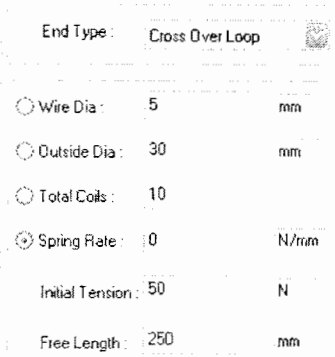
در این بخش کاربر می تواند مشخصات هندسی فنر را وارد کند. این مشخصات هندسی با توجه به نوع فنر متفاوت می باشند. فنر های فشاری شامل: نوع انتها، تعداد حلقه های بسته، نوع تکیه گاه، قطر مفتول، قطر خارجی، تعداد کل حلقه ها، ضریب سختی فنر و طول آزاد، فنرهای کششی شامل: نوع انتها، ، قطر مفتول، قطر-خارجی، تعداد کل حلقه ها، ضریب سختی فنر، کشش اولیه و طول آزاد، فنرهای پیچشی شامل: نوع شاخک ها، ، قطر مفتول، قطر خارجی، تعداد کل حلقه ها، ضریب سختی فنر و طول شاخک ها می باشند. در طراحی یک فنر کاربر می تواند یکی از پارامترهای ، قطر مفتول، قطر خارجی، تعداد کل حلقه ها، ضریب سختی را به عنوان مجهول انتخاب نماید، تا نرم افزار این پارامتر را برای کاربر محاسبه نماید.



پارامترهای هندسی فنر فشاری



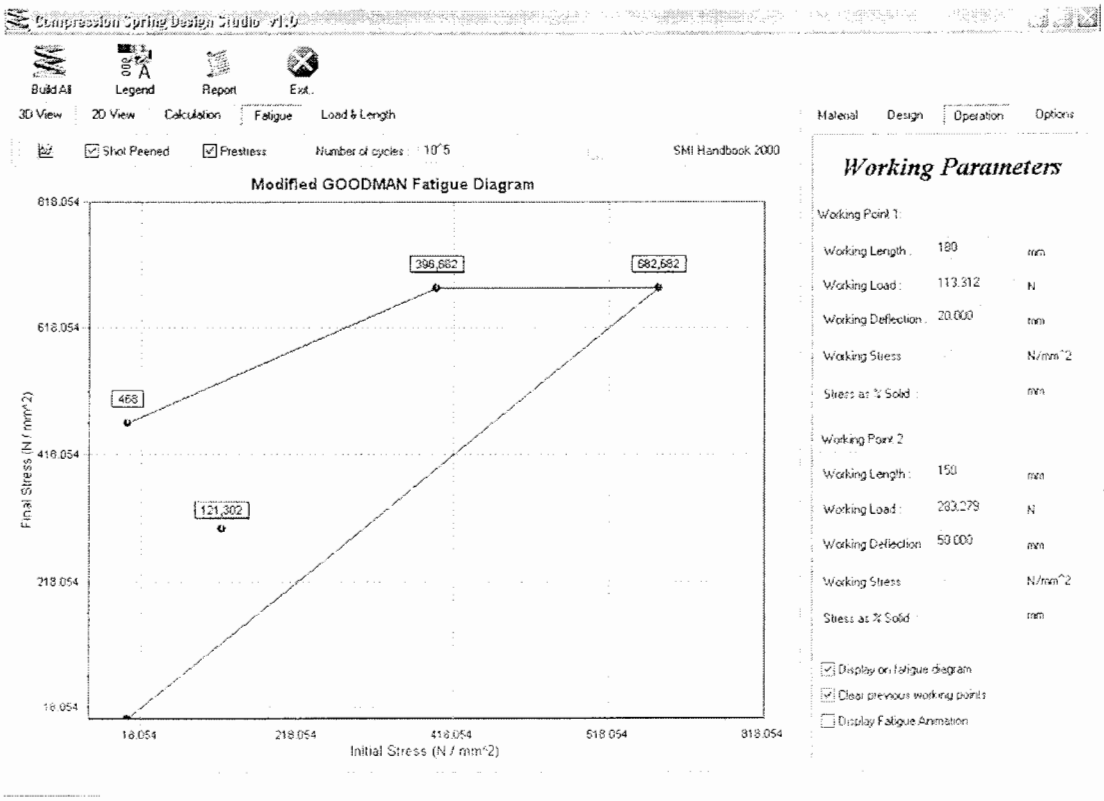
پارامترهای هندسی فنر پیچشی



پارامترهای هندسی فنر کششی

- **بخش بارگذاری دینامیکی**

این قسمت که در نرم افزار با نام Operation مشخص شده است، قابلیت شبیه سازی دینامیکی فنر را داراست. همانطور که می دانید، حد بالا و حد پایین برای بازه نوسانی فنر در عمل با طول آزاد و طول بسته فنر متفاوت می باشد. در این قسمت کاربر می تواند حد بالا و حد پایین را که با عناوین Working Point 1 و Working Point 2 مشخص شده اند وارد کند. بعد از وارد کردن این اطلاعات کاربر می تواند مقادیر مهم فنر از جمله تنش و نیرو را در این طول ها مشاهده نماید. سپس نرم افزار با استفاده از معیار گودمن بهبود یافته که یکی از پرکاربرد ترین معیارهای خستگی می باشد، نقطه کاری را بر روی این دیاگرام بصورت ترسیمی مشخص میکند تا کاربر بتواند تعیین کند که آیا نقطه کاری در منطقه امن قرار دارد یا خیر. همچنین کاربر می تواند اثر فرآیندهای ساچمه زنی و پیش تنیدن و همچنین تغییر تعداد سیکل های کاری را بر روی دیاگرام گودمن بهبود یافته مشاهده نماید.

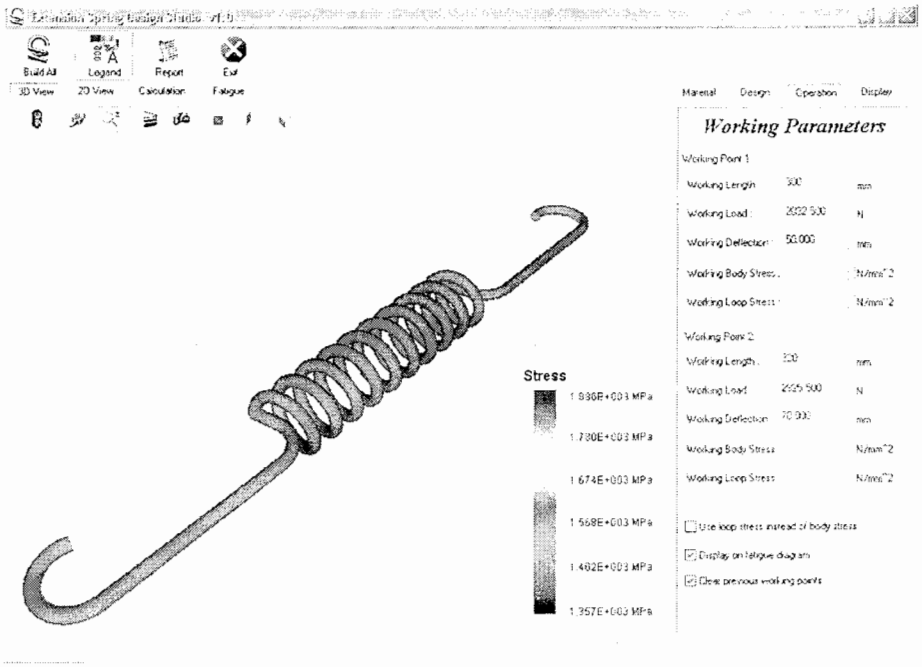


- **بخش نتایج**

این قسمت شامل شبیه سازی سه بعدی، نماهای دو بعدی، محاسبات فنر، خستگی در فنر و نمودار نیرو-تغییر طول می باشد.

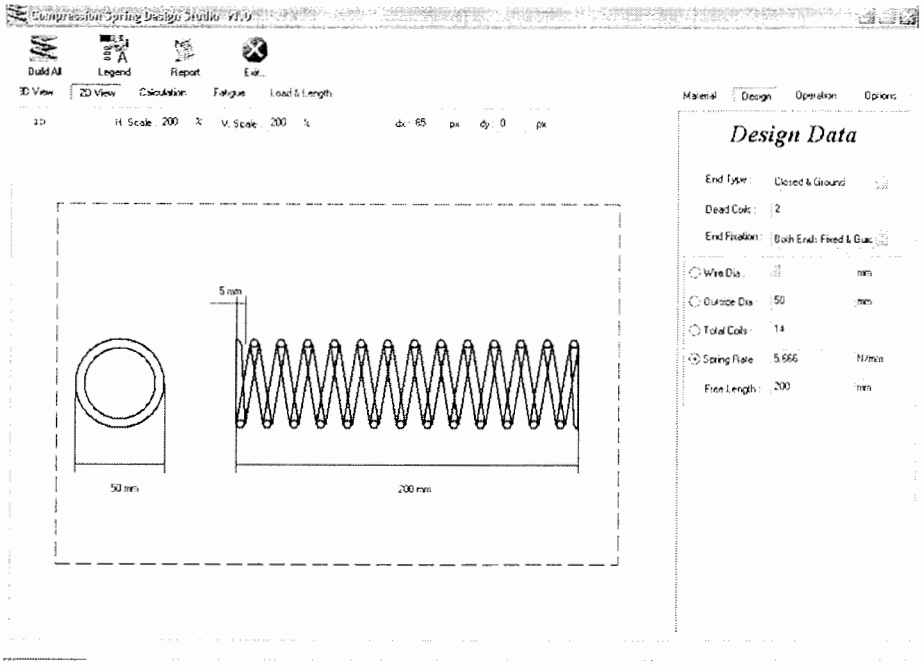
- **شبیه سازی سه بعدی (3D View)**

در این قسمت یک مدل سه بعدی از فنر طراحی شده تا کاربر بتواند تجسم بهتری داشته باشد. تعدادی ابزار کمکی در این قسمت برای بررسی بهتر این مدل در نظر گرفته شده است. از جمله این ابزار ها می توان چرخش (Roate)، جابجا کردن (Pan)، بزرگ نمایی/کوچک نمایی (Zoom)، عکس فوری (Snapshot)، شبیه سازی متحرک، نوسان فنر (Animate) و نماهای استاندارد سه بعدی (Front, Right and Isometric)، را نام برد.



- **نماهای دو بعدی**

در این بخش دو نمای روبرو جانبی از فنر برای کاربر ترسیم می شود. همچنین برای راحتی کاربر ابزاری در اختیار کاربر قرار داده شده است تا بتواند این دو نما را در کادری که مشخص کننده منطقه قابل چاپ است تنظیم کند.



- **محاسبات فنر**

مشخصاتی از فنر که دانستن آنها برای طراحی و ساخت، نیاز می باشد در این قسمت محاسبه و ارائه می شود. همچنین تلرانس های مهم ساخت نظیر تلرانس طول آزاد و قطر خارجی، نیز در این قسمت محاسبه می شود. پارامتر های ارائه شده در این قسمت بر حسب نوع فنر متفاوت هستند. این پارامترها در جدول زیر ارائه شده اند.

فنر فشاری	فنر کششی	فنر پیچشی
طول بسته	تنش اولیه	طول بدنه
نیروی بسته	طول بدنه	ضریب تنش
تنش بسته	ضریب تنش	اندیس فنر
حلقه های فعال	اندیس فنر	قطر متوسط حلقه
ضریب تنش	قطر متوسط حلقه	قطر داخلی حلقه
اندیس فنر	قطر داخلی حلقه	
زاویه مارپیچ	طول مفتول	
قطر متوسط حلقه	وزن فنر	
قطر داخلی حلقه	فرکانس طبیعی	
طول مفتول		
وزن فنر		
فرکانس طبیعی		
محل کمانش		

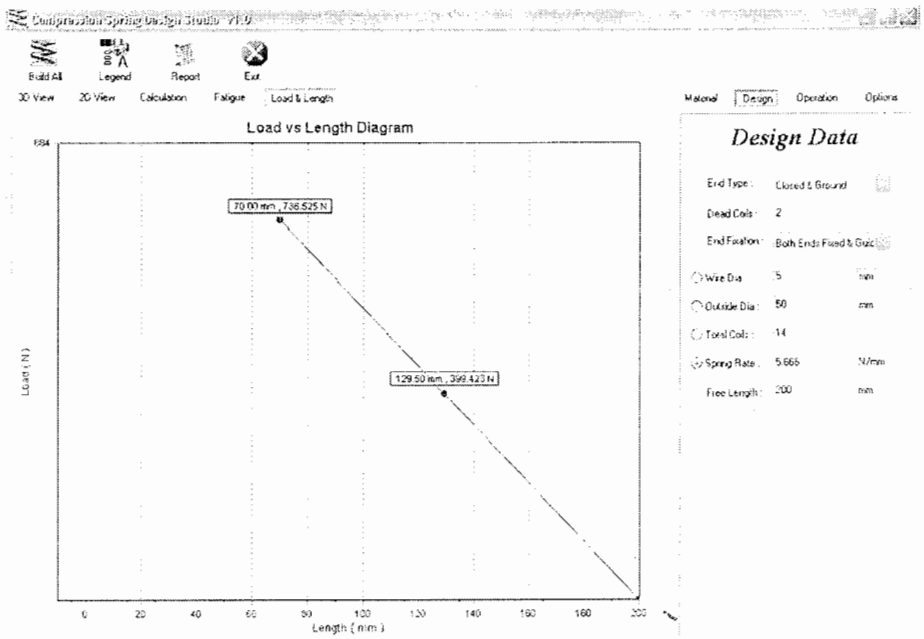
- **خستگی در فنر**

توضیحات کامل مربوط به این قسمت در بخش بارگذاری دینامیکی ارائه شده است.

- **نیرو – تغییر طول**

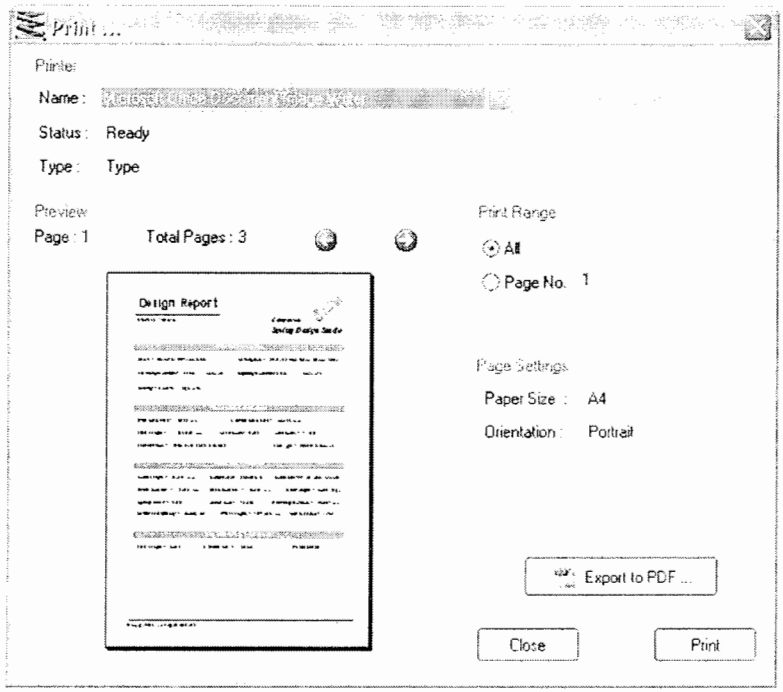
در فنرهای فشاری در این بخش دیاگرامی ترسیم می شود که نشان دهنده تغییرات نیرو بر حسب طول فنر می باشد که در آن طول بسته، طول آزاد و طول بحرانی مشخص شده است. طول بحرانی طولی است که فنر نباید بیشتر از آن فشرده شود، در غیر اینصورت فنر تغییر شکل پلاستیک خواهد داد.

در فنر های پیچشی این دیاگرام نشان دهنده تغییرات گشتاور بر حسب مقدار پیچش فنر می باشد.



- **بخش گزارشات**

برای راحتی، در این نرم افزار بخشی قرار داده شده است که کاربر از طریق آن می تواند یک گزارش سه صفحه ای از نتایج نرم افزار را مشاهده کند. همچنین در این قسمت کاربر می تواند این گزارشات را چاپ کرده و یا بصورت فایل PDF ذخیره نماید.



- نمونه گزارش ارائه شده توسط نرم افزار در زیر ارائه شده است.

Design Report

12/20/2004 13:07:00

Compression

Spring Design Studio

Material Properties

Name : BS 5216: 1991, NS & HS **Description :** Patented Cold Drawn Carbon Steel

Elasticity Modulus : 206.8 KN/mm^2 **Rigidity Modulus :** 79.3 KN/mm^2

Density : 7.83E-6 Kg/mm^3

Geometric Parameters

Wire Diameter : 5.000 mm **Outside Diameter :** 50.000 mm

Free Length : 200.000 mm **Dead Coils :** 2.000 **Total Coils :** 14.000

End Fixation : Both Ends Fixed & Guided **End Type :** Closed & Ground

Calculation Results

Solid Length : 70.000 mm **Solid Load :** 736.525 N **Solid Stress :** 784.635 N/mm^2

Inside Coil Dia. : 40.000 mm **Mean Coil Dia. :** 45.000 mm **Helix Angle :** 6.390 deg.

Spring Index : 9.000 **Active Coil :** 12.000 **Buckling Position :** 90.871 mm

Natural Frequency : 73.693 Hz **Wire Length :** 1991.578 mm **Stress Factor :** 1.162

Manufacturing Tolerances

Free Length : 3.570 **Outside Dia. :** 0.268 **BS Standard**

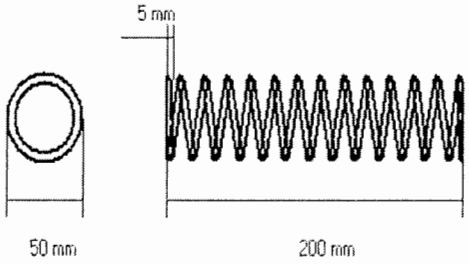
Design Report

12/20/2004 13:07:00

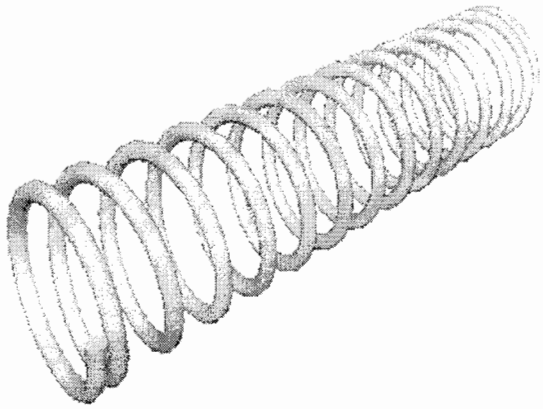
Compression

Spring Design Studio

2D Views



3D View



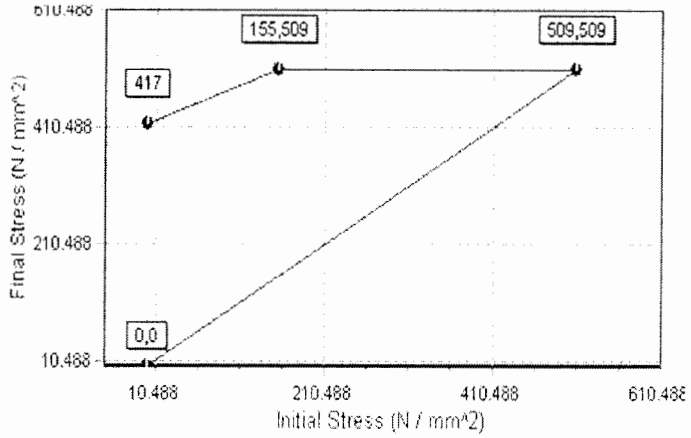
Design Report

12/20/2004 13:07:00

Compression

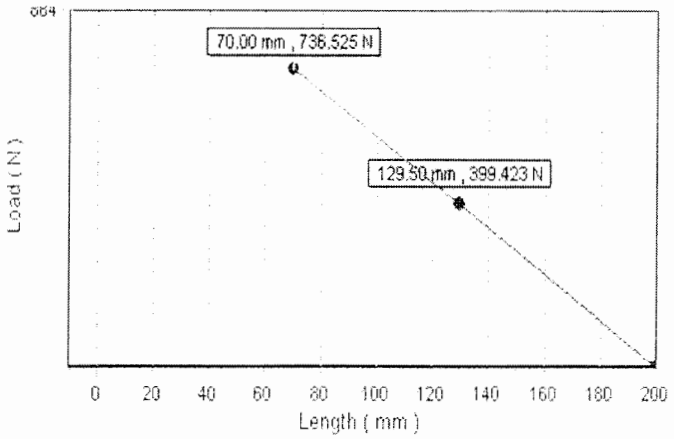
Spring Design Studio

Modified GOODMAN Fatigue Diagram



Prestressed : Prestress : **Shot Peened :** Prestress : **No. of Cycles :** Prestress :

Load vs Length Diagram



مقایسه نتایج آزمایشات تجربی با نتایج نرم افزار

فنرها در ابتدا با کمک این نرم افزار مدل سازی شده و سپس آزمایش بر روی این فنرها در شرکت فنر لول ایران انجام شده و نتایج با یکدیگر مقایسه شده، که برای تمامی فنرها نتایج نرم افزار مورد تایید قرار گرفتند. همچنین نتایج تحلیل خستگی که مهمترین بخش طراحی یک فنر می باشد به صورت نموداری در زیر توسط نرم افزار ارائه شده است. همانطور که در این شکل ها مشاهده می کنید، تمامی نقاط کاری در منطقه ایمن بار گذاری می باشند، که تایید کننده نتایج نرم افزار می باشد. همچنین مقادیر نیرو حاصل از محاسبات نرم افزار و آزمایشات تجربی در طول های مشخص برای هر کدام از فنرها ارائه شده است. اختلاف کم مشاهده شده می تواند بدلیل تفاوت آزمایشگاهی با شرایط مرزی روابط تئوری باشد. تمامی اطلاعات مربوط به این قسمت در زیر ارائه شده است.

مشخصات فنرهای مورد آزمایش

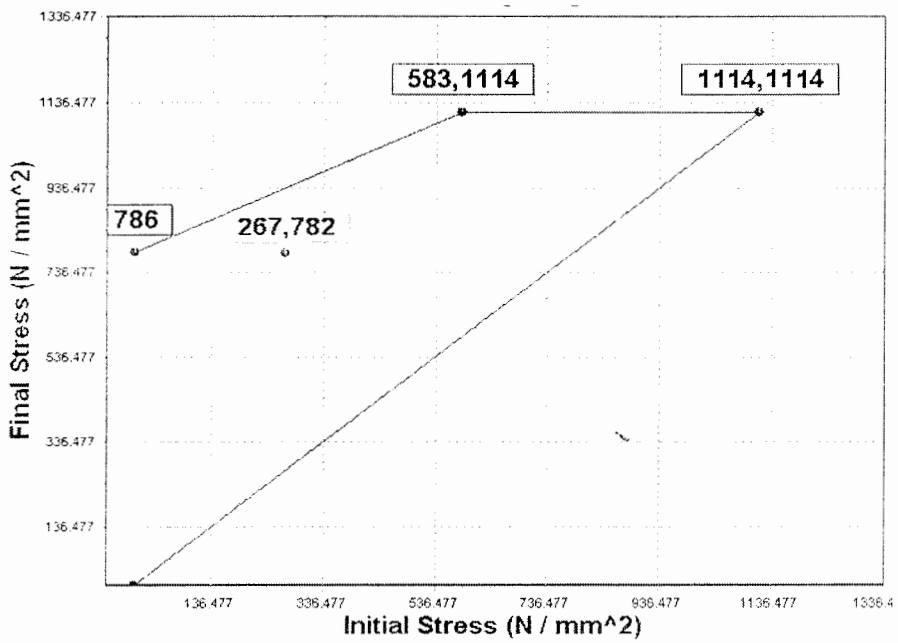
پارامتر	فنر سوپاپ پیکان ۱۶۰۰	فنر اکسل جلوی پژو	فنر اکسل جلوی پراید	فنر اکسل جلوی پیکان ۱۶۰۰	فنر لولای درب صندوق عقب
قطر مفتول m	0.00452	0.0127	0.0127	0.01215	0.00325
قطر خارجیm	0.03538	0.158	0.1053	0.1355	0.0325
طول آزاد m	0.04044	0.469	0.396	0.354	0.240
تعداد حلقه	5.05	6.5	10.25	7.3	43.25
حد بالا m	0.03487	0.270	188.6	0.319	0.505
حد پایینm	0.0241	0.120	130.6	0.111	0.349
تعداد سیکل	10^7	$4x10^5$	$15x10^4$	$25x10^4$	$25x10^3$

مشخصات جنس فنرهای سوپاپ واکسل

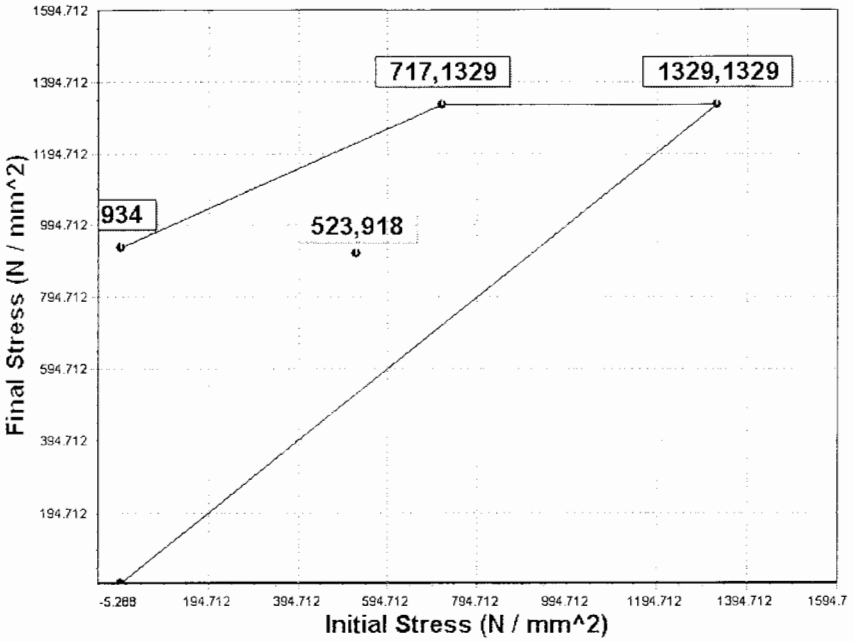
مدول الاستیسیته .Pa	205 E9
مدول صلابت .Pa	79.3 E9
چگالی kg/m^3	7830
محدوده قطر m	0.007 - 0.012
محدوده حد استحکام کششی .Pa	1910 E6 - 2060 E6

نتایج آزمایشات تجربی و نرم افزار SDS

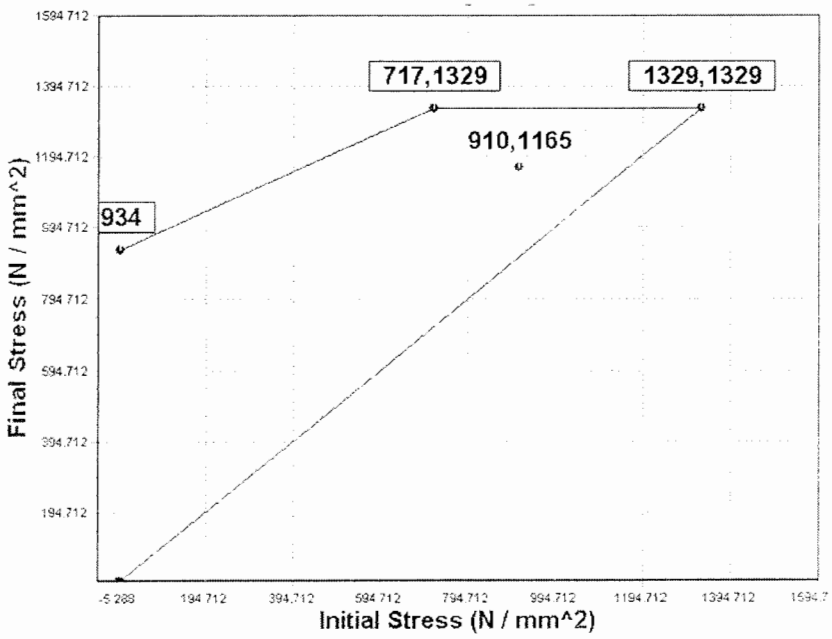
		نیرو(N)	طول (m)
فنر سوپاپ	SDS	754.2	0.0241
	تجربی	823	0.0241
فنر اکسل جلوی پیکان ۱۶۰۰	SDS	2300	0.2082
	تجربی	2760	0.2082
فنر اکسل جلوی پژو	SDS	3854	0.171
	تجربی	4230	0.171
فنر لولای درب صندوق عقب	SDS	161.36	0.349
	تجربی	150	0.349



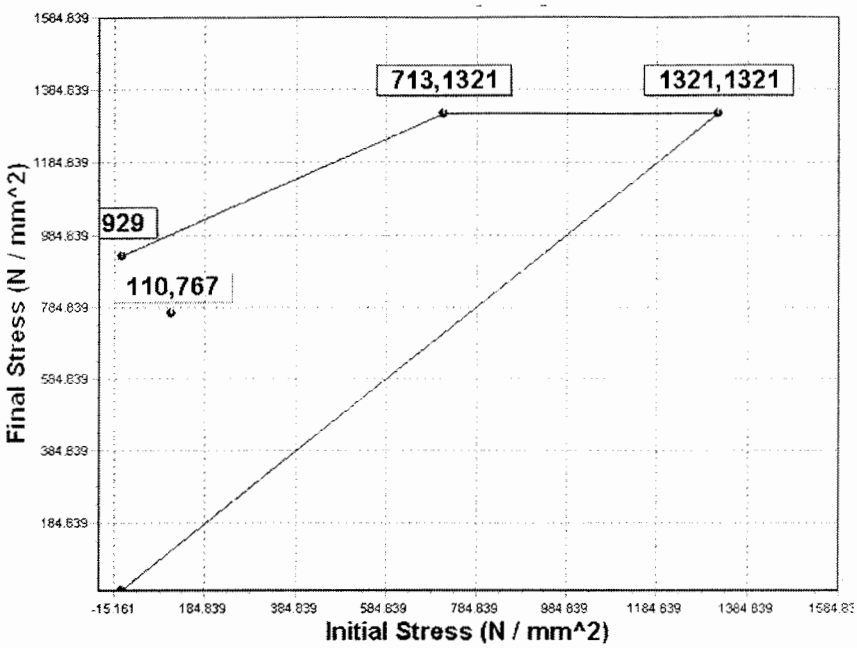
نمودار بهبود یافته گودمن برای فنر سوپاپ پیکان ۱۶۰۰



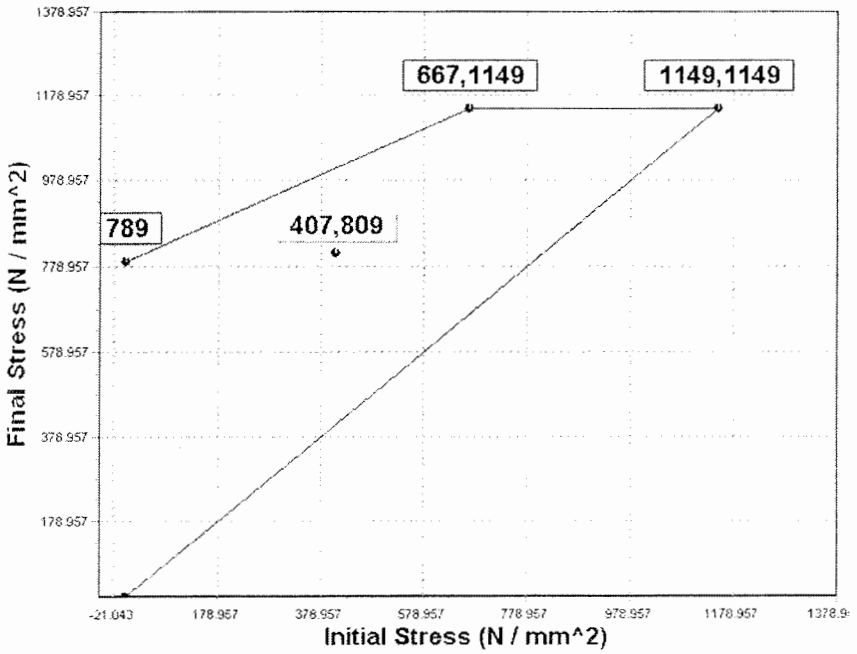
نمودار بهبود یافته گودمن برای فنر لول اکسل جلوی پژو



نمودار بهبود یافته گودمن برای فنر لول اکسل جلوی پراید



نمودار بهبود یافته گودمن برای فنر لول اکسل جلوی پیکان ۱۶۰۰



نمودار بهبود یافته گودمن برای فنر لولای درب صندوق عقب

مقایسه نتایج نرم افزار انستیتو تکنولوژی فنر انگلیس با نتایج نرم افزار SDS

نرم افزار طراحی شده توسط انستیتو تکنولوژی فنر انگلیس (IST) از لحاظ اعتباری در سطح بالایی می باشد. لذا مقایسه ای بر روی نتایج محاسبه شده توسط این نرم افزار و نرم افزار SDS انجام شد تا تاییدی بر صحت محاسبات نرم افزار SDS باشد. مشخصات فنرهای آزمایش شده در بخش قبل ارائه شده است. نتایج حاصلّ از این مقایسه در جدول زیر ارائه شده است. اختلاف ناچیزی که بین نتایج وجود دارد بعلت تفاوت بانک مواد فنری دو نرم افزار می باشد.

مقایسه نتایج نرم افزار IST و SDS

	فنر سوپاپ پیکان ۱۶۰۰		فنر اکسل جلوی پژو		فنر اکسل جلوی پراید		فنر اکسل جلوی پیکان ۱۶۰۰		فنر لولای درب صندوق عقب	
	SDS	**IST**	**SDS**	**IST**	**SDS**	**IST**	**SDS**	**IST**	**SDS**	**IST**
طول بسته m	0.022	0.0228	0.082	0.0825	0.130	0.1302	0.088	0.0887	-----	-----
نیروی بسته N	851.158	813	5004	4998	8428	8422	4194	4183.1	-----	-----
تنش بسته .Pa	883 E3	834 E3	1017.6 E3	910 E6	1168 E6	970 E6	839 E6	740 E6	-----	-----
حلقه های فعال	3.1	3.1	6.5	6.5	10.3	10.3	7.3	7.3	-----	-----
ضریب تنش	1.219	1.21	1.126	1.12	1.204	1.19	1.143	1.13	1.147	1.15
اندیس فنر	6.827	6.83	11.44	11.44	7.291	7.29	10.152	10.15	9	9
قطر میانگین حلقه m	0.309	0.309	0.1453	0.1453	0.0926	0.0926	0.12335	0.12335	0.0293	0.0293
قطر داخلی حلقه m	0.263	0.263	0.1326	0.1326	0.0799	0.0799	0.1112	0.1112	0.026	0.026
۱۰۰/ جرم فنر Kg	6.186	6.19	298.7	298.71	299.12	299.12	259.5	259.48	27.52	27.38
فرکانس طبیعی .Hz	557.32	556.6	33.103	33.1	51.685	51.685	39.127	39.12	31.73	31.42
زاویه مارپیچ .deg	6.062	6.06	8.982	8.98	7565	7.29	7.133	7.13	-----	-----
طول مفتول m	0.492	0.4915	3.004	3.0031	3.008	3.008	2.851	2.8509	4.213	4.205

نتیجه‌گیری

بـا توجه به نرم‌افزار نوشته شده و آزمایش‌های تجربی انجام شده و نمونه فنرهای تحلیل شده توسط نرم‌افزار که نتایج آن در مبحث پیشین آورده شد، می‌توان نتایج زیر را استخراج کرد:

۱- تحلیل و محاسبات مربوط به طراحی فنرها با سرعت بسیار زیادی قابل انجام است.

۲- تحلـیل و محاسـبات مربوط به طراحی فنرها با دقت بالایی قابل انجام بوده و از خطاهای انسانی که معمولا در محاسبات دستی بروز می‌کند، اجتناب شده است.

۳- با توجه به نتایج حاصل از نرم‌افزار و نتایج تجربی که در شرکت فنرلول ایران انجام شده است، نتایج خروجی نرم‌افزار کاملا قابل قبول است.

۴- بـا توجـه بـه نزدیک بودن بسیار زیاد نتایج حاصل از نرم‌افزار نوشته شده (SDS) و نتایج حاصل از نرم‌افزار انستیتو معروف تحقیقات فنر انگلیس(IST) ، می توان به نتایج حاصل از این نرم‌افزار کاملا اطمینان داشت.

۵- کار با نرم‌افزار کاملا راحت بوده و آموزش آن بسیار ساده می‌باشد.

مراجع :

1- Carlson, Spring DESIGNER,S Handbook, p173, فصل ۱۰

2- Compression Springs , IST(Institute of Spring Technology) Reports.

3- Wahl, Mechanical Springs.

۴- محمود شریعتی، "شناسایی و انتخاب مواد فنری"، نشر بخشایش، ۱۳۸۰.

۵- محمود شریعتی ، " فنرهای لول" ۱۳۸۰ .

معرفی نرم افزاری برای طراحی فنرهای مارپیچ (فشاری، کششی، پیچشی)

محمود شریعتی[۱] ، کاوه اشکفتی[۲]

شاهرود، دانشگاه صنعتی شاهرود،

دانشکده مهندسی مکانیک

Email: MShariati@Shahrood.ac.ir

چکیده

در این مقاله ابتدا برخی از مواد فنری آورده شده است و سپس انواع فنرهای مارپیچ (فشاری، کششی و پیچشی) و نحوه طراحی آنها مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته اند. سپس نرم افزاری که می تواند با سرعت و دقت زیاد به طراحی اینگونه فنرها بپردازد معرفی و روش کار با آن بطور خلاصه تشریح شده است. در انتها نتایج خروجی نرم افزار برای طراحی فنرهای سوپاپ، اکسل جلوی پژو، پراید، پیکان ۱۶۰۰ و لولای درب صندوق عقب با نتایج مقایسه شده است. نتایج نرم افزار نزدیکی بسیار خوبی با نتایج تجربی دارد و لذا جواب های آن کاملا قابل قبول است.

واژه های کلیدی: مواد فنری – فنرهای مارپیچ – طراحی فنرها – نرم افزار

۱ – مقدمه

شاید فنرهای مارپیچ، معمول ترین نوع فنری با شند که در صنعت مهندسی به کار می روند، به طوریکه ۵۰-۶۰٪ تمام فنرهای تولید شده از این نوع هستند. مقدار ذخیره انرژی بر واحد حجم و همچنین کارآیی این فنرها در مقایسه با دیگر فنرها بیشتر بوده و فرآیند تولید آنها نیز ساده تر و در نتیجه ارزانتر میباشد. همچنین امکان تولید این فنرها با تلرانس های نسبتا بالا بر اساس بار و ابعاد وجود داشته و نشیمن گاه این فنرها به سادگی و با هزینه کم ساخته می شود.

بنا به دلایل فوق، اکثر کارهای تحقیقاتی، بر روی فنرهای مارپیچ انجام گرفته و لذا، اطلاعات و روابط جامع و مفیدی در مورد طراحی این فنرها وجود دارد. اگر این اطلاعات و داده ها به طرز صحیحی به کار گرفته شود، آنگاه می توان مطمئن بوده و که نتیجه طراحی دقیق باشد و فنر بتواند در عمل از عهده وظیفه مربوطه برآید.

یک فنر مارپیچ در واقع توسعه یافته یک میله ساده است. به منظور استفاده کامل از فضا، میله به شکل یک مارپیچ درآمده تا با را به صورت محوری تحمل کند. بنابراین، هر جزء از فنر مارپیچ به صورت پیچشی تغییر شکل داده و تنش ها در آن از نوع تنش های برشی می باشند.

۲ –مواد فنری

یک ماده فنر را می توان ماده ای دانست که قابلیت ذخیره انرژی به وسیله تغییر شکل الاستیک را داشته باشد. در حالیکه این تعریف ممکن است شامل بسیاری از "مواد" مثل اغلب فلزات، گازها و بعضی پلاستیک ها بشود، ولی در انتخاب ماده برای فنر، ملاحظات دیگری نیز باید در نظر گرفته شود.

۱- استادیار

۲- دانشجوی کارشناسی

متاسفانه خواص قابل انتظار و مورد نیاز از یک ماده فنر، قبل و بعد از تولید با یکدیگر مغایرت دارند. در عین حال، با تکنیک های مدرن تولید، تا حد زیادی می توان بر این مشکلات فائق آمد. اصلی ترین خصوصیات لازم برای ساختن فنر عبارتست از : ۱- شکل پذیری خوب یعنی نرمی کافی به همراه خواص الاستیک کم ۲- عاری بودن از نقص های ظاهری و درونی ۳- هزینه پایین ۴- قابل دسترس بودن در عین حال، بعد از ساخت فنر، خواص مورد انتظار، به شرح زیر می باشد: ۱- استحکام مکانیکی بالا، به ویژه حد الاستیک بالا ۲- مقاومت بالا در مقابل خستگی ۳- مدل الاستیک مناسب ۴- مقاومت بالا در مورد خوردگی ۵-مقاومت بالا در مقابل خزش و افت بار ۶- تاثیر پذیری کم از درجه حرارت ۷-خواص الکتریکی خوب ۸- خواص مغناطیسی مناسب. وجود همه خصوصیات فوق در یک ماده فنری، بسیار سخت می باشد. با این وجود، خوشبختانه این حالت به ندرت اتفاق می افتد و در اغلب موارد، بعضی خصوصیات ذکر شده در عمل مورد نیاز است.
مواد مخصوص فنرهای سبک کار مارپیچی و فنرهای تخت کوچک را می توان به طور مرسوم به شش گروه اصلی تقسیم کرد: فولادهای کربنی، فولادهای آلیاژی، فولادهای زنگ نزن، آلیاژهای پایه مس، آلیاژهای پایه نیکل و مواد متفرقه. به طور مشابه، مواد مخصوص مارپیچی سنگین کار و فنرهای تخت مثل فنرهای تخت لایه ای و غیره را میتوان به صورت زیر تقسیم بندی نمود: فولادهای کربنی و فولادهای کم آلیاژ [۱].

۳ -طراحی فنرهای مارپیچ

طراحی فنرهای مارپیچ، دارای چندین روش می باشد که این برعهده مهندس طراح است که ساده ترین و کوتاه ترین روش را برای طراحی استفاده کند. اصلی ترین مشخصات طراحی فنر، نیرو، جابجایی و تنش می باشند [۲].

۳-۱ – طراحی فنرهای فشاری

فنرهای مارپیچ فشاری (شکل ۱) برای مقاومت در برابر نیروهای فشاری وارده و یا برای ذخیره کردن انرژی در حالت ضربه استفاده میشوند. این نوع فنرها ساده ترین پیکر بندی را دارند و کاربردهای بسیاری از جمله در خودرو، فضا پیما و غیره را دارند. روابط طراحی که برای فنرهای فشاری وجود دارد، در زیر ارائه شده است [۲]،[۳]،[۴]،[۵]:

$$P = k.\delta \qquad (1)$$

$$k = \frac{Gd^4}{8D^3N_a} \qquad (2)$$

$$S = \frac{8PD}{\pi d^3}K_w \qquad (3)$$

$$K_w = \frac{4C-1}{4C-4} + \frac{0.615}{C} \qquad (4)$$

که در آن، δ تغییر طول، k سختی فنر، S تنش در بدنه فنر، G مدول صلابت، d قطر مفتول، D قطر متوسط حلقه، N_a تعداد حلقه های فعال، P نیروی فشاری، K_w ضریب تصحیح وال (Wahl) و C اندیس فنر می باشد.

۳-۲ – طراحی فنرهای کششی

فنرهای مارپیچ کششی (شکل ۲) برای ذخیره کردن انرژی و تحمل نیروهای کششی استفاده می شوند و معمولا از مفتول های گرد و حلقه های بسته با کشش اولیه ساخته می شوند. کاربردهای رایج این نوع فنرها در خودرو، ضبط صوت، درب گاراژ، ماشین های شستشو خودکار و غیره می باشد. .روابط طراحی که برای فنرهای کششی وجود دارد، در زیر ارائه شده است[۲]،[۳]،[۴]،[۵]:

$$P_0 \quad P_1 \quad k.\delta \qquad (5)$$

$$k = \frac{Gd^4}{8D^3N_a} \qquad (6)$$

$$S = \frac{16PD_LK_L}{\pi d^3} + \frac{4P}{\pi d^2} \qquad (7)$$

$$K_L = \frac{4C_L^{\,2} - C_L - 1}{4C_L \times (C_L - 1)} \qquad (8)$$

که در این روابط، k سختی فنر، S تنش در بدنه فنر، G مدول صلابت، d قطر مفتول، D_L قطر متوسط حلقه قلاب انتهایی، N_a تعداد حلقه های فعال، P_0 نیروی کششی اولیه، P_I نیروی کششی خارجی، K_W ضریب تصحیح انحناء در خمش و C_L اندیس فنر می باشد.
در فنرهای کششی تنش در حلقه ها معمولا بیشتر از تنش در بدنه فنر می باشد که این روابط در استانداردها موجود می باشد.

۳-۳ - طراحی فنرهای پیچشی

فنرهای مارپیچ پیچشی (شکل ۳) برای ذخیره کردن انرژی دورانی و تحمل گشتاورهای پیچشی استفاده می شوند. دو نوع رایج آن فنرهای یک شاخه و دو شاخه می باشد. کاربردهای رایج این نوع فنرها در سایبان پنجره، مکانیزمهای تعادلی و غیره می باشد. روابط طراحی که برای فنرهای پیچشی وجود دارد، در زیر ارائه شده است [۲]،[۳]،[۴]،[۵]:

$$\theta = \frac{64 N_a D}{E d^2} \times \frac{180}{\pi} \qquad (9)$$

$$k = \frac{M}{\theta} = \frac{E d^4}{10.8 D N_a} \qquad (10)$$

$$S = \frac{32M}{\pi d^3} K_B \qquad (11)$$

$$K_{BII)} = \frac{4C^2 - C - 1}{4C \times (C-1)} \qquad (12)$$

که در این روابط، θ جابجایی پیچشی، k سختی فنر، S تنش در بدنه فنر، E مدول الاستیسیته، d قطر مفتول، D قطر متوسط حلقه فنر، N_a تعداد حلقه های فعال، M گشتاور پیچشی، K_{BID} ضریب تصحیح تنش و C اندیس فنر می باشد.

۴ -خستگی در فنرها

خستگی یک مکانیزم اصلی واماندگی بوده که نتیجه بار-گذاری تکراری می باشد (معمولا بیشتر از ۱۰۰۰ سیکل بار گذاری) که در آن در ابتدا ترکی کوچک در قطعه ایجاد شده و سپس تحت اثر محدوده تنش های حاصل از بار-گذاری، رشد می کند. این محدوده تنش ممکن است در حد قابل توجهی کوچکتر از تنش طراحی فنر در حالت استاتیکی باشد. به ویژه، اگر مقادیر تنش در محدوده ای که فنر عمل می کند، نسبتا بالا باشد، اثر تخریب پدیده خستگی بیشتر خواهد شد. عواملی که عمدتا باعث ایجاد و تشدید پدیده خستگی میشوند عبارتند از: کیفیت سطح فنر، استحکام ماده، حالت تنش پسماند در سطح، صاف و صیقلی بودن سطح فنر و تمیزی ماده از آلودگی های هنگام تولید.

عوامل اصلی وقوع پدیده شکست ناشی از خستگی عبارتند از : ۱- تنش های کششی حداکثر، ۲- تکراری بودن تنش، ۳- تعداد زیاد سیکلهای بار گذاری.

عوامل جانبی موثر در پدیده خستگی عبارتند از : ۱-تمرکز تنش، ۲-خوردگی، ۳-دما، ۴-بار اضافی، ۵-ساختار متالورژیکی، ۶-تنش های پسماند، ۷-تنش های مرکب.

به کمک عوامل زیر میتوان درصد احتمال ایجاد واماندگی حاصل از خستگی را کاهش داد: ۱-ساچمه زنی یا فرآیندهایی که منجر به ایجاد تنش های پسماند فشاری بالا در سطح گردد، ۲-استفاده از ماده ای با استحکام بالا و استفاده مفید از پیش تنیدگی در طراحی، ۳-استفاده از ماده ای با کیفیت سطح مطلوب، ۴- تنش زدایی بهینه توسط عملیات حرارتی پس از فنر پیچی، ۵-استفاده از مواد خام تمیز برای کاربردهای کاملا سخت، ۶-صیقل کردن الکتریکی.

برای بررسی پدیده خستگی در فنرها معمولا از نمودار بهبود یافته گودمن استفاده می شود. در شکل شماره ۴ دیاگرام بهبود یافته گودمن مربوط به ماده BS 5216: 1991, ND Quality برای 10^7 سیکل کاری مشاهده می-شود. خطوط ممتد نشان دهنده منطقه ایمن بدون عملیات ساچمه زنی می باشد و خطوطی که به صورت خط چین می باشند نشان دهنده محدوده ایمن جدید بعد از عملیات ساچمه زنی می باشد. همانطور که مشاهد عملیات ساچمه-زنی تاثیر قابل ملاحظه ای بر روی حد استحکام نهایی ماده می گذارد [۶]. ساچمه زنی فرآیندی است که در آن سطح فنر توسط ساچمه های ریز فولادی بمباران می شود.

۵ -معرفی نرم افزار

این نرم افزار با کمک زبان برنامه نویسی Borland Delphi نوشته شده و در سه بخش مجزا برای طراحی فنرهای فشاری، کششی و پیچشی تهیه شده است که از لحاظ ساختاری مشابه می باشند (شکل ۵، ۶ و ۷). هر کدام از این بخش ها مستقل بوده و شامل حدود ۳۰۰۰ خط کد برنامه نویسی و در مجموع ۹۰۰۰ خط کد برنامه نویسی می باشد.

ویژگی هایی که باعث شدند تا از زبان برنامه Borland Delphi برای طراحی این نرم افزار استفاده شود، می توان

قدرت برنامه نویسی بالا، توانایی در ایجاد محیط های گرافیکی، فراوانی اجزای سازنده (Component)، توانایی طراحی بانک های اطلاعاتی قوی را نام برد.

۵-۱ - ویژگیهای عمومی نرم افزار

- بانک اطلاعات مواد فنری بر اساس استانداردهای معتبر جهانی BS, EN, SAE و ASTM [۶]،[۷].
- قابلیت اضافه کردن مواد فنری جدید توسط کاربر.
- محاسبه تمامی پارامترهای مورد نیاز برای طراحی فنر بر اساس استاندارد انجمن فنر سازان امریکا (SMI) [۲].
- محاسبه تلرانسهای ساخت فنر بر اساس دو استاندارد BS و SMI [۸].
- محاسبه اثرات ناشی از بارهای دینامیکی و نمایش نتایج محاسبات با ترسیم نمودار بهبود یافته گودمن (Modified GOODMAN Diagram) بر اساس استاندارد SMI.
- بررسی اثرات ناشی از عملیات ساچمه زنی و پیش تنیدن بر خواص مکانیکی فنر.
- محاسبه و نمایش نمودار نیرو-طول برای فنر طراحی شده.
- ترسیم دو نمای استاندارد دو بعدی جهت ارائه گزارش.

۵-۲ - ویژگیهای برتر نرم افزار

- کاربری بسیار قدرتمند و در عین حال ساده.
- استفاده از تکنولوژی پیشرفته سه بعدی سازی OpenGL جهت نمایش مدل سه بعدی فنر طراحی شده.
- نمایش گرافیکی تنش های وارده بر فنر بر اساس جابجایی فنر به صورت توزیع رنگ و قابلیت متحرک کردن فنر، همچنین امکان تهیه خروجی تصویر با فرمت های استاندارد ویندوز.
- انجام سه عملیات جابجایی (Pan)، بزرگ نمایی (Zoom) و دوران (Rotate) بر روی مدل سه بعدی ترسیم شده.
- نمایش سه نمای استاندارد جلو، چپ و ایزومتریک از مدل سه بعدی ترسیم شده.
- تهیه گزارش کاملی در سه صفحه، جهت راحتی کاربر در ارائه نتایج طراحی با قابلیت تهیه خروجی با فرمت PDF.
- ترسیم نقطه کاری به تنش های محاسبه شده در نمودار بهبود یافته گودمن جهت تعیین ایمنی شرایط کاری.

۵-۳ - حداقل سخت افزار مورد نیاز

- Pentium III, 1000 MHz
- Microsoft Windows XP
- Minimum 128MB RAM, (256MB is recommended)
- 50MB of available hard-disk
- 1024 x 768 pixels, 16-bit color display compatible monitor
- Minimum 32MB graphic memory, (64MB is recommended)

۵-۴ - نحوه کاربرد نرم افزار

۵-۴-۱- بخشهای مختلف نرم افزار

بخش های مختلف این نرم افزار در شکل های ۸، ۹، ۱۰، ۱۱ نشان داده شده است.

- نوار ابزار اصلی: شامل دکمه های Build All، Legend، Report و Exit می باشد.
- پانل پارامترهای طراحی: شامل بخش های Material، Design، Operation و Options می باشد.
- بخش نتایج: شامل بخش های 3D View، 2D View، Calculation، Fatigue و Load & Length می باشد.

۵-۴-۲- مراحل انجام تحلیل

طراحی یک فنر با کمک نرم افزار SDS بسیار راحت می-باشد و نیاز به صرف زمان زیادی ندارد. این مراحل مختصرا در زیر توضیح داده شده اند.

- انتخاب جنس فنر: در این مرحله کاربر بایستی جنس فنر را برای نرم افزار توسط بخش Material مشخص کند. برای این کار می تواند از بانک مواد فنری داخل نرم افزار استفاده کند و یا در صورت ماده فنری در نرم افزار موجود نباشد، آن را به صورت دستی به بانک مواد فنری نرم افزار اضافه کند.
- تعیین پارامترهای طراحی: بعد از تعیین جنس فنر، باید پارامترهای طراحی برای نرم افزار مشخص شود. برای این کار با ید وارد قسمت Design شده و با توجه به نوع فنر (فشاری، کششی و پیچشی) مقادیر پارامتر ها را کنید.
- تحلیل استاتیکی: در این مرحله کاربر می تواند با زدن دکمه Build All فنر را برای حالت استاتیکی طراحی کرده و نتایج را که شامل مدل سه بعدی، نقشه های دو بعدی، نتایج عددی و نمودار نیرو-جابجایی مشاهده کند. برای مشاهده نتایج به صورت گرافیکی می توانید دکمه Animate را زده تا نمایش گرافیکی نحوه توزیع تنش به صورت انیمیشن نمایش داده شود.
- تحلیل دینامیکی: مهمترین بخش طراحی فنرها، بررسی اثرات بارهای دینامیکی می باشد که با نرم-افزار SDS می توان به راحتی این اثرات را بررسی کرد. برای انجام این تحلیل وارد قسمت Fatigue شده و اثرات Shot Peened و Prestressed را در صورت تمایل انتخاب کنید. همچنین می توانید تعداد سیکل های کاری را نیز انتخاب کنبد. از پانل-های سمت راست، پانل Operation را انتخاب کرده و در قسمت Working Points منطقه کاری فنر را مشخص کنید.
- نحوه گزارش گیری: بعد از انجام تحلیل و مشاهده نتایج در صورت تمایل می توانید گزارشی کاملی از نتایج ازائه شده توسط نرم افزار را در سه صفحه چاپ کرده و یا به صورت فایل PDF دریافت نمایید. برای این کار می توانید دکمه Report را بزنید.

۶ - آزمایشات تجربی

به منظور حصول اطمینان از نتایج محاسباتی که توسط نرم افزار ارائه می شود، با کمک شرکت فنر لول ایران، چندین نوع فنر از جمله، فنر سوپاپ پیکان ۱۶۰۰، فنر لول اکسل جلو پژو، فنر لول جلوی پراید، فنر لول اکسل جلو پیکان ۱۶۰۰ و فنر لولای درب صندوق عقب و چند نمونه دیگر را آزمایش شدند و نتایج آزمایش با نتایج نرم افزار مقایسه نمودیم. مشخصات فنرهای آزمایش شده در جدول شماره ۱ ارائه شده است. همچنین مشخصات جنس این فنرها در جدول شماره ۴ ارائه شده است.

آزمایشات توسط یک دستگاه خستگی Servo Hydraulic در فرکانس 1Hz انجام شده است.

۶-۱ - مقایسه نتایج آزمایشات تجربی با نتایج نرم افزار Spring Design Studio

فنرها در ابتدا با کمک این نرم افزار مدل سازی شده و سپس آزمایش بر روی این فنرها در شرکت فنر لول ایران انجام شده و نتایج با یکدیگر مقایسه شده، که برای تمامی فنرها نتایج نرم افزار مورد تایید قرار گرفتند. در جدول شماره ۲ بخشی از این نتایج ارائه شده است. همچنین نتایج تحلیل خستگی که مهمترین بخش طراحی یک فنر می باشد به صورت نموداری در شکل های شماره ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵ و ۱۶ توسط نرم افزار ارائه شده است. همانطور که در این شکل ها مشاهده می کنید، تمامی نقاط کاری در منطقه ایمن بار گذاری می باشند، که تایید کننده نتایج نرم افزار می باشد. همچنین مقادیر نیرو حاصل از محاسبات نرم افزار و آزمایشات تجربی در طول های مشخص برای هر کدام از فنرها ارائه شده است. اختلاف کم مشاهده شده می تواند بدلیل تفاوت آزمایشگاهی با شرایط مرزی روابط تئوری باشد. نتایج این مقایسه در جدول شماره ۳ ارائه شده است.

۶-۲ - مقایسه نتایج نرم افزار انستیتو تکنولوژی فنر انگلیس با نتایج نرم افزار Spring Design Studio (SDS)

نرم افزار طراحی شده توسط انستیتو تکنولوژی فنر انگلیس (IST) از لحاظ اعتباری در سطح بالایی می باشد. لذا مقایسه ای بر روی نتایج محاسبه شده توسط این نرم افزار و نرم افزار SDS انجام شد تا تاییدی بر صحت محاسبات نرم افزار SDS باشد. مشخصات فنرهای آزمایش شده در جدول شماره ۱ ارائه شده است و نتایج حاصل از این مقایسه در جدول شماره ۲ ارائه شده است. اختلاف ناچیزی که بین نتایج وجود دارد بعلت تفاوت بانک مواد فنری دو نرم افزار می باشد.

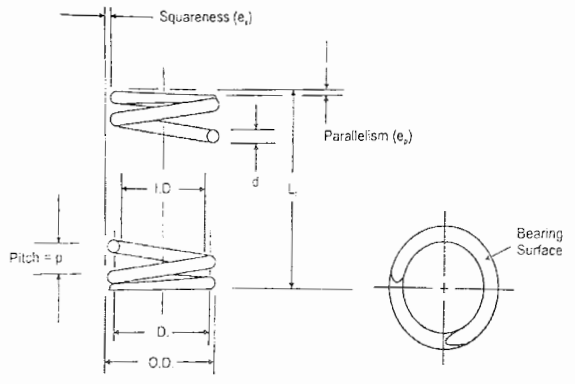
۷ -مراجع

۱. م، شریعتی، "شناسایی و انتخاب مواد برای فنر"، انتشارات بخشایش، ۱۳۷۹.

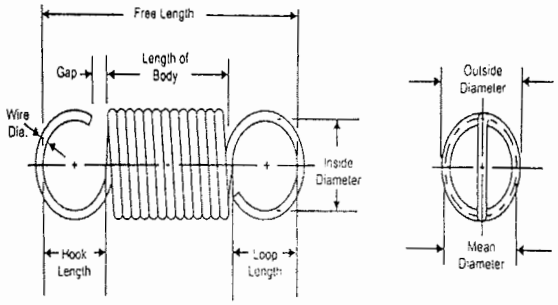
2. SMI, “Fundamentals of Spring Design”, Spring Manufacturers Institute, 2000.

۳. م، شریعتی، "فنرهای لول"، انتشارات بخشایس، ۱۳۸۰.

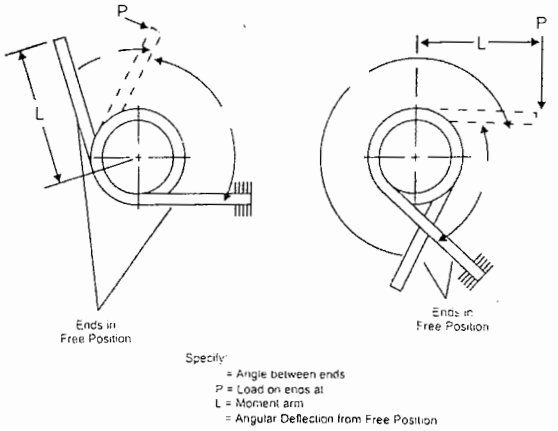
4. Carlson, “Spring Designer’s Handbook”, Marcel Dekker, 1978.
5. Wahl, “Mechanical Springs”, McGRAW-HILL, 1963.
6. Spring Research and Manufacturing Association, “Spring Materials Selector”, S.R.A.M.A, 1991.
7. Society of Automotive Engineers, "Spring Design Manual", S.A.E, 1990.
8. M. P. Hayes, B.Sc., C.Eng., M.I.M, “Achievable extension and torsion spring tolerances”, S.R.A.M.A, 1994.



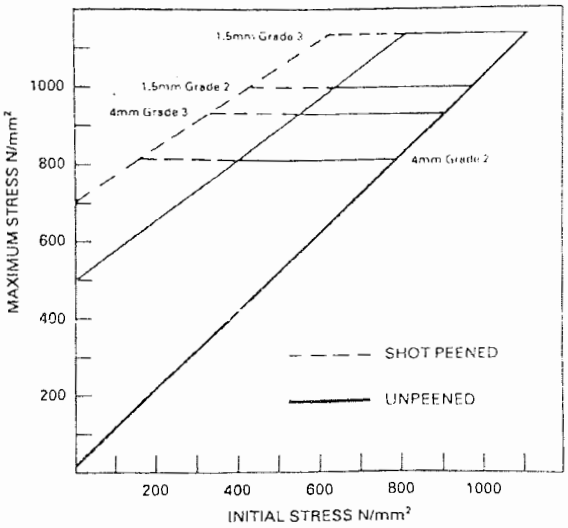
شکل ۱-فنر لول فشاری



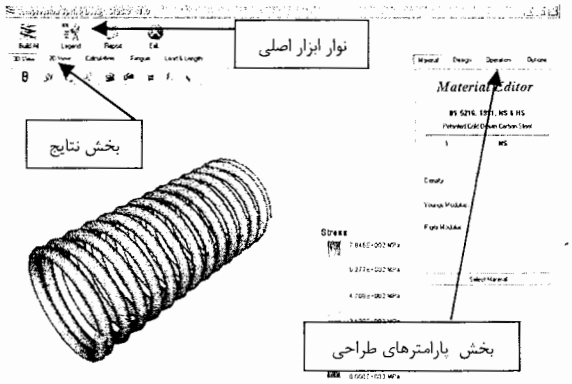
شکل ۲-فنر لول کششی



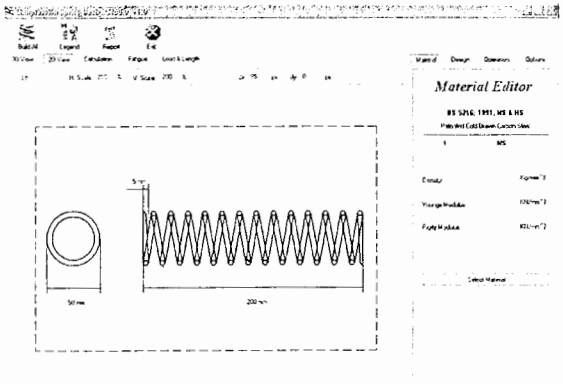
شکل ۳-فنر لول پیچشی



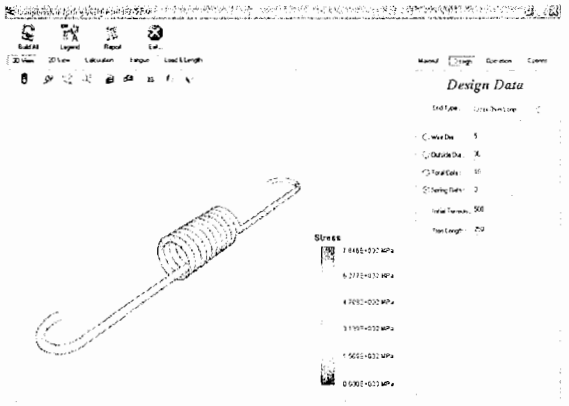
شکل ۴-نمودار بهبود یافته گودمن BS 5216, ND



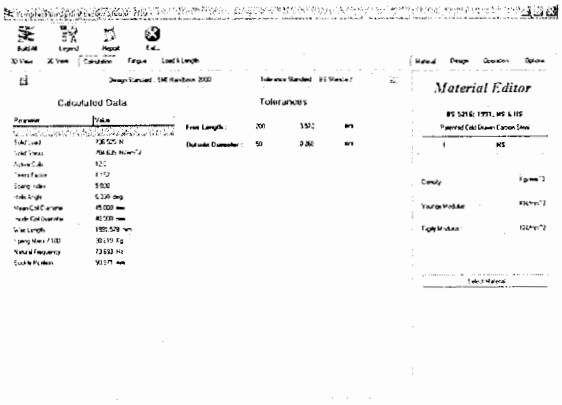
شکل ۵- بخش های مختلف نرم افزار(فشاری)



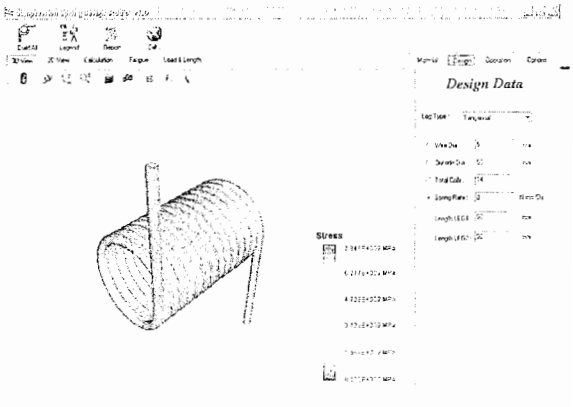
شکل ۸- نحوه ترسیم نماهای دو بعدی(فشاری)



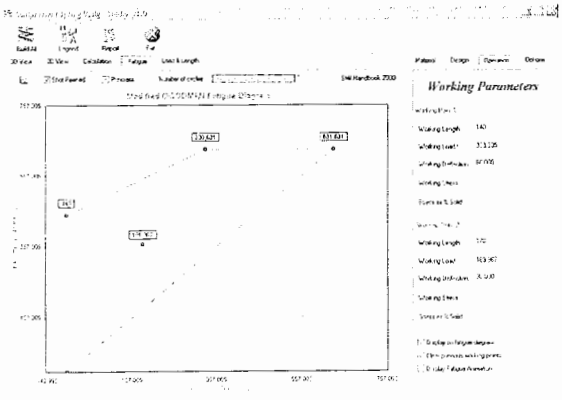
شکل ۶- بخش طراحی فنرهای کششی



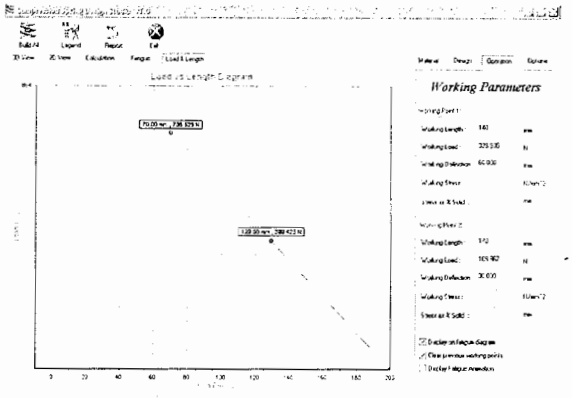
شکل ۹- نحوه نمایش نتایج محاسبات(فشاری)



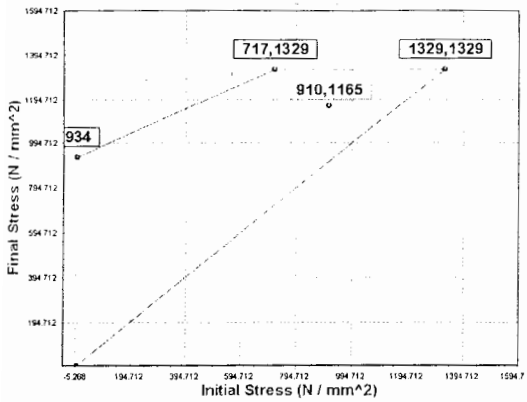
شکل ۷- بخش طراحی فنرهای پیچشی



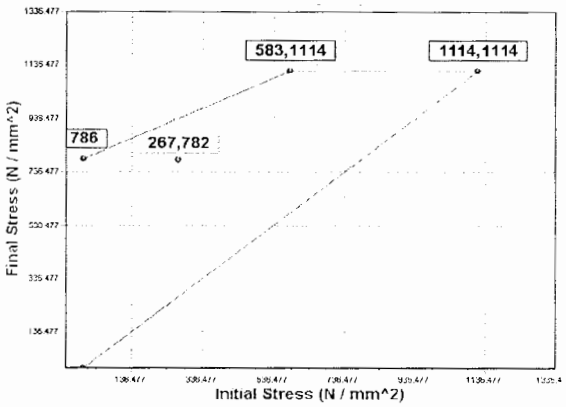
شکل ۱۰- نحوه نمایش نمودار بهبود یافته گودمن(فشاری)



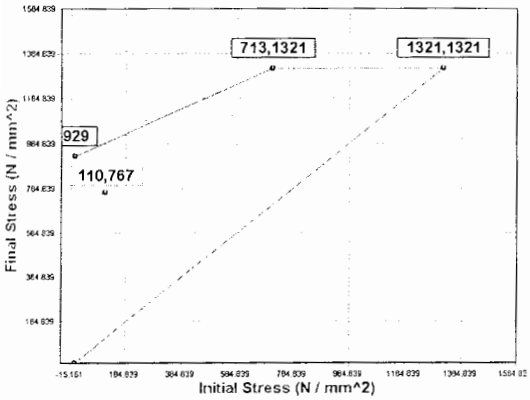
شکل ۱۱- نحوه نمایش نمودار نیرو-جابجایی(فشاری)



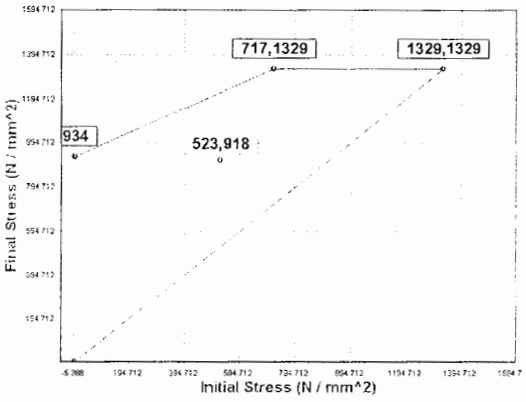
شکل ۱۴-نمودار بهبود یافته گودمن برای فنر لول اکسل جلوی پراید



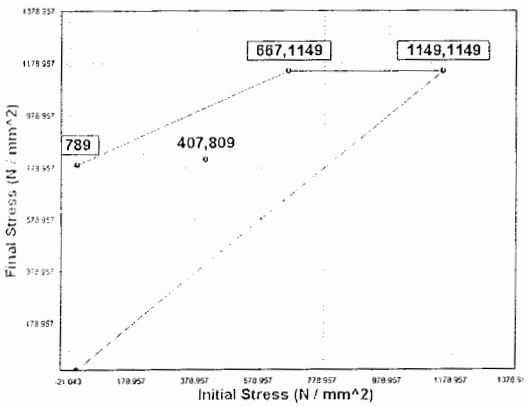
شکل ۱۲-نمودار بهبود یافته گودمن برای فنر سوپاپ پیکان ۱۶۰۰



شکل ۱۵-نمودار بهبود یافته گودمن برای فنر لول اکسل جلوی پیکان ۱۶۰۰



شکل ۱۳-نمودار بهبود یافته گودمن برای فنر لول اکسل جلوی پژو



شکل ۱۶-نمودار بهبود یافته گودمن برای فنر لولای درب صندوق عقب

جدول۱–مشخصات فنرهای مورد آزمایش

پارامتر	فنر سوپاپ پیکان ۱۶۰۰	فنر اکسل جلوی پژو	فنر اکسل جلوی پراید	فنر اکسل جلوی پیکان ۱۶۰۰	فنر لولای درب صندوق عقب
قطر مفتول m	0.00452	0.0127	0.0127	0.01215	0.00325
قطر خارجی m	0.03538	0.158	0.1053	0.1355	0.0325
طول آزاد m	0.04044	0.469	0.396	0.354	0.240
تعداد حلقه	5.05	6.5	10.25	7.3	43.25
حد بالا m	0.03487	0.270	188.6	0.319	0.505
حد پایین m	0.0241	0.120	130.6	0.111	0.349
تعداد سیکل	10^7	$4x10^5$	$15x10^4$	$25x10^4$	$25x10^3$

جدول۲- نتایج آزمایشات تجربی و نرم افزار SDS

		نیرو N	طول m
فنر سوپاپ	SDS	754.2	0.0241
	تجربی	823	0.0241
فنر اکسل جلوی پیکان ۱۶۰۰	SDS	2300	0.2082
	تجربی	2760	0.2082
فنر اکسل جلوی پژو	SDS	3854	0.171
	تجربی	4230	0.171
فنر لولای درب صندوق عقب	SDS	161.36	0.349
	تجربی	150	0.349

جدول۳- مقایسه نتایج نرم افزار IST و SDS

	فنر سوپاپ پیکان ۱۶۰۰		فنر اکسل جلوی پژو		فنر اکسل جلوی پراید		فنر اکسل جلوی پیکان ۱۶۰۰		فنر لولای درب صندوق عقب	
	SDS	IST	SDS	IST	SDS	IST	SDS	IST	SDS	IST
طول بسته m	0.022	0.0228	0.082	0.0825	0.130	0.1302	0.088	0.0887	-----	-----
نیروی بسته N	851.158	813	5004	4998	8428	8422	4194	4183.1	-----	-----
تنش بسته Pa.	883 E3	834 E3	1017.6 E3	910 E6	1168E 6	970 E6	839 E6	740 E6	-----	-----
حلقه های فعال	3.1	3.1	6.5	6.5	10.3	10.3	7.3	7.3	-----	-----
ضریب تنش	1.219	1.21	1.126	1.12	1.204	1.19	1.143	1.13	1.147	1.15
اندیس فنر	6.827	6.83	11.44	11.44	7.291	7.29	10.152	10.15	9	9
قطر میانگین حلقه m	0.309	0.309	0.1453	0.1453	0.0926	0.0926	0.12335	0.12335	0.0293	0.0293
قطر داخلی حلقه m	0.263	0.263	0.1326	0.1326	0.0799	0.0799	0.1112	0.1112	0.026	0.026
۱۰۰/ جرم فنر Kg	6.186	6.19	298.7	298.71	299.12	299.12	259.5	259.48	27 52	27.38
فرکانس طبیعی Hz.	557.32	556.6	33.103	33.1	51.685	51.685	39.127	39.12	31 73	31.42
زاویه مارپیچ deg.	6.062	6.06	8.982	8.98	7565	7.29	7.133	7.13	-----	-----
طول مفتول m	0.492	0.4915	3.004	3.0031	3.008	3.008	2.851	2.8509	4.213	4.205

جدول۴- مشخصات جنس فنرهای سوپاپ واکسل

مدول الاستیسیته Pa.	205 E9
مدول صلابت Pa	79.3 E9
چگالی kg/m^3	7830
محدوده قطر m	0.007 - 0.012
محدوده حد استحکام کششی Pa.	1910 E6 - 2060 E6