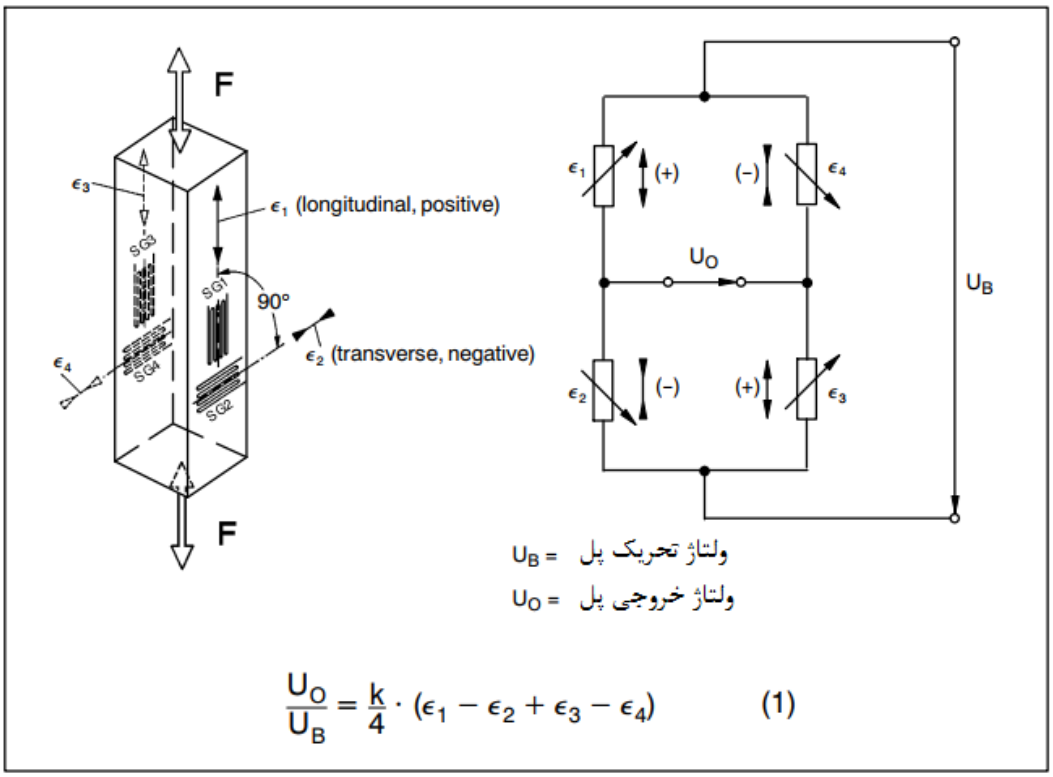
نحوه ساخت مبدل های اندازه گیری

مبدل ها یا سنسورهایی که اینجا مورد بحث قرار خواهند گرفت، عمدتا از دو جز اصلی عنصر ارتجاعی یا فنری و استرین گیج تشکیل شده اند. عنصر فنری نسبت به متغیر اندازه گیری تغییر شکل خواهد داد و این تغییر شکل ها توسط استرین گیج ها که روی سطح عنصر فنری نصب شده اند، به سیگنال الکتریکی تبدیل خواهند شد، برای این کار معمولا از مدار پل وتستون استفاده می شود. برای کسب اطلاعات بیشتر درباره نحوه کار مدار پل وتستون و استرین گیج ها لطفا به مقالات ما در این مورد رجوع کنید.



شکل 1: دیاگرام شماتیکی و مدار پایه یک مبدل برای اندازه گیری نیرو

مبدل هایی که از این اصل برای اندازه گیری کمیت فیزیکی مورد نظر استفاده می کنند، استفاده بسیار فراوانی در شاخه های مختلف صنعت و همچنین در پروژه های تحقیقاتی دارند. دلیل این امر این است که استرین گیج های فلزی یک سری مزیت های غیرقابل انکاری دارند که آنها را به مهم ترین عضو در مبحث اندازه گیری توسط مبدل ها، تبدیل کرده است. از مهم ترین مزیت های آنها می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- خطی بودن بی نظیر آنها به همراه خطای پسماند بسیار کم و همچنین تکرارپذیری عالی آنها به همراه پل وتستون و خاصیت جبرانسازی گیج ها، اندازه گیری با دقت های بسیار بالا را در مبدل ها فراهم می کند

- کمیت های اندازه گیری توسط آنها را می توان هم در جهت مثبت و هم در جهت منفی اندازه گیری کرد.

- فرآیندهای دینامیکی و استاتیکی را به راحتی می توان توسط آنها مانیتور کرد.

- وزن ناچیز گیج ها این اجازه را به آنها می دهد که بتوانند کمیت های با فرکانس های بالا را اندازه گیری کنند .

- عمر بالایی در برابر بارهای نوسان دار دارند

- علاوه بر نصب آسان و مدار ساده آنها، می توان گفت که رنج اندازه گیری آنها از نظر ظرفیت، بسیار وسیع می باشد.

نقشه راه ساخت مبدل های اندازه گیری نیرو:

آیا تابحال به فکر ساخت مبدل های اندازه گیری توسط خودتان بودید؟ ما به شما مسیر انجام این کار را قدم به قدم نشان می دهیم. علاوه بر مباحث تئوری مورد نیاز، ما مراحل پایه‌ای ساخت مبدل ها را به زبان ساده تر به همراه مثال در بخش های بعدی تشریح خواهیم کرد.

طراحی مفهومی عنصر فنری:

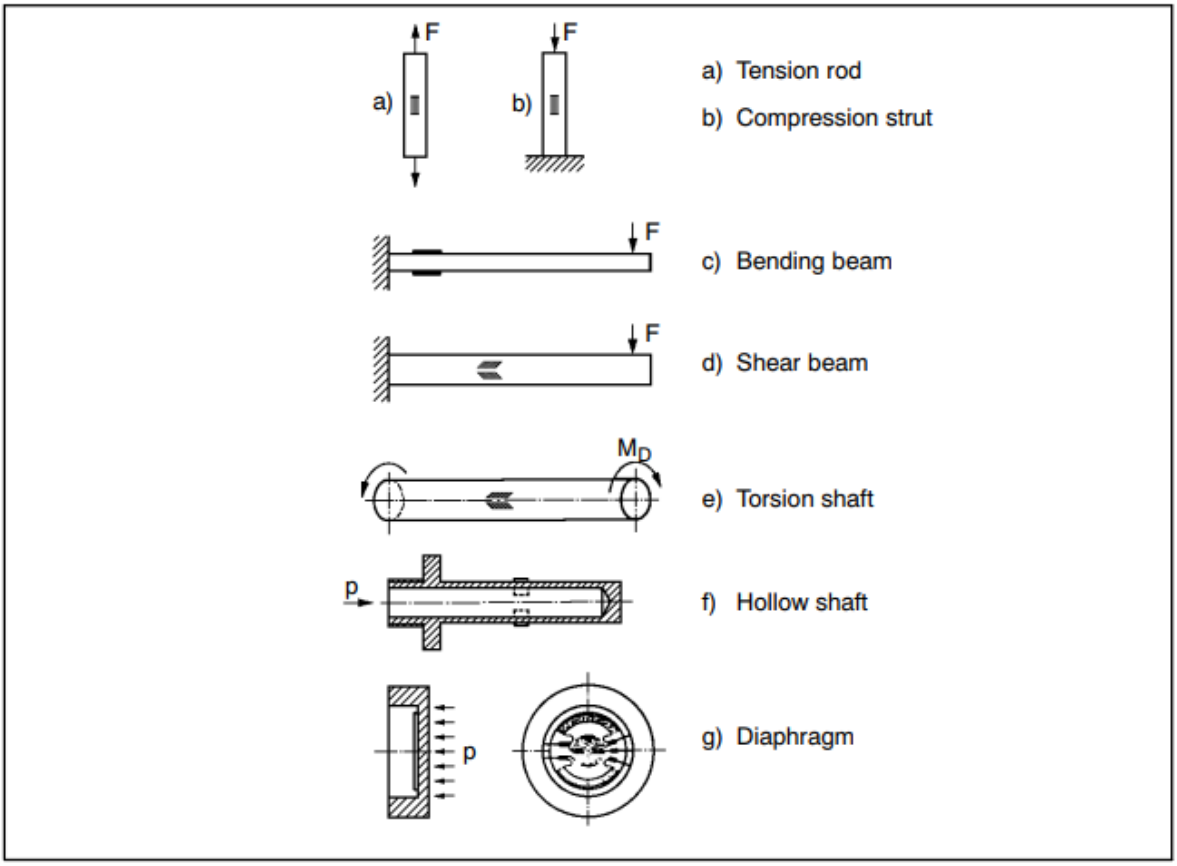
وقتی عنصر ارتجاعی یا فنری توسط بارهای مکانیکی اعمالی به آن دچار تنش های مکانیکی می شود، این تنش ها باعث تغییر شکل قیزیکی عنصر ارتجاعی می شوند که به این تغییر شکل ها اصطلاحا "کرنش" می گوییم. این کرنش ها همیشه باید به صورا خالص ارتجاعی باشد، یعنی در محدوده قانون هوک اتفاق بیفتد. اگر این شرط رعایت نشود، مبدل مورد نظر با خطاهای بسیاری مواجه خواهد بود و عملا هیچ کارایی نخواهد داشت. برای ارضای این شرط، هندسه عنصر ارتجاعی، ابعاد و همچنین جنس مواد آن بسیار مهم می باشند.

در زیر به بررسی تک تک این موارد می پردازیم.

شکل هندسی عنصر ارتجاعی:

فاکتورهای مهمی که در تعیین هندسه عنصر ارتجاعی نقش دارند عبارت اند از، ماهیت کمیت فیزیکی که قرار است اندازه گیری شود، و همچنین مقدار و جهت آن همگی در تعیین شکل هندسی مبدل تاثیر دارند.

مهم ترین ویژگی های یک مبدل خوب مانند خاصیت خطی بودن آن، خطای پسماند و همچنین خطای خزش کم، بستگی زیادی به هندسه عنصر ارتجاعی دارند. مبدل هایی که از استرین گیج استفاده می کنند نه تنها برای اندازه گیری نیرو مناسب هستند، بلکه برای اندازه گیری کمیت های دیگری که به نیرو مرتبط هستند مانند جرم، نیروهای خمشی، گشتاور، فشار، لرزش ها و شتاب نیز به کار گرفته می شوند. شکل و هندسه مورد نظر برای عنصر ارتجاعی جهت اندازه گیری این کمیت ها در شکل زیر آورده شده است.



شکل 2: هندسه عنصر ارتجاعی برای اندازه گیری کمیت های مختلف فیزیکی

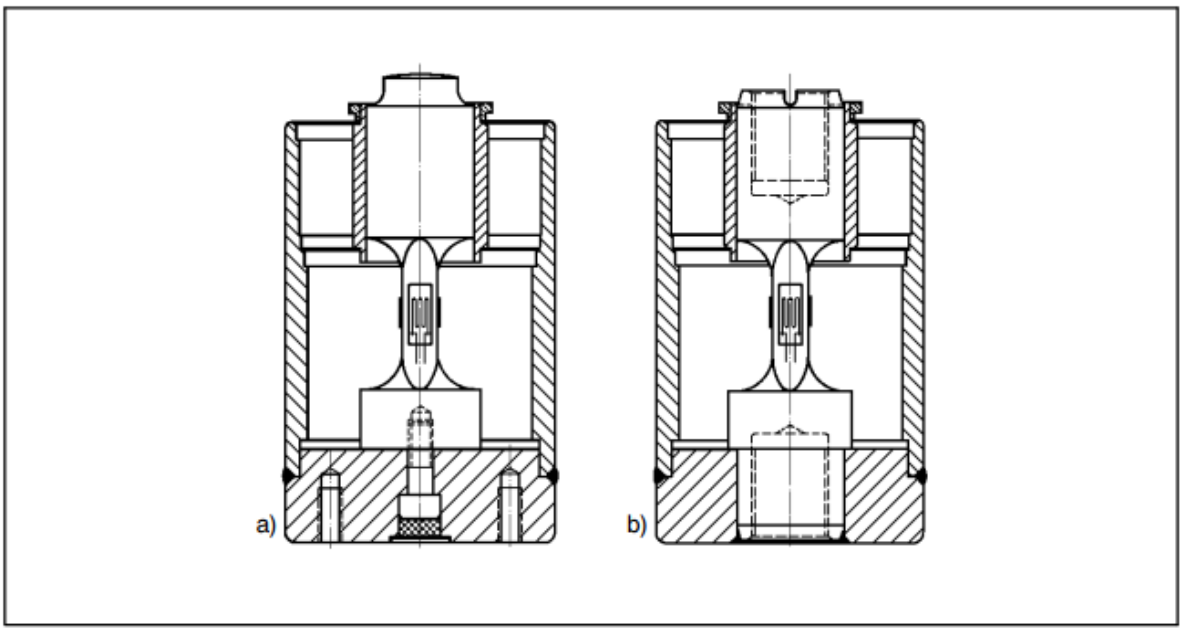
برای دریافت بیشترین حساسیت ممکن نسبت به کمیت اندازه گیری شده، ضروری است در صورت امکان از چهار گیج فعال در بازوهای پل وتستون استفاده شود (شکل 1). شکل هندسی

عنصر ارتجاعی باید طوری باشد که استرین گیج های نصب شده روی آن بتوانند به صورت آنی نسبت به بارهای اعمالی واکنش نشان دهند. همچنین توزیع تنش در محل نصب گیج ها باید تا حد امکان یکنواخت باشد.

متناسب با کاربرد هر مبدلی، می توان از روی هندسه های پایه برای هر کمیت، شکل مورد نظر مبدل را برای برآورده کردن نیازهای آن کاربرد، به صورت خاص طراحی کرد. در زیر به چند مثال از این موارد اشاره شده است.

مبدل های اندازه گیری نیرو:

شکل 3 به وضوح نشان می دهد که ساختار مبدل های عملی به مراتب پیچیده تر از ساختارهای پایه ای آنان که قبلا نشان داده شد، می باشد. عنصر ارتجاعی در این گونه از مبدل ها از یک میله استوانه ای ضخیم که سطح مقطع آن در وسط های آن کاهش یافته است، تشکیل شده است. سطح مقطع آن باید با توجه به ظرفیت نامی مبدل و همچنین حساسیت آن محاسبه شود. هر چقدر طول و قطر آن بزرگتر باشد، توزیع تنش ها در محل نصب استرین گیج یکنواخت تر خواهد بود. سطح مقطع دو انتهای آن به حد کافی بزرگ در نظر گرفته می شود، تا در مقابل بارهای اعمالی این قسمت ها تغییر شکل آنچنانی نداشته باشند.



شکل 3: مثالی از طراحی مکانیکی یک مبدل

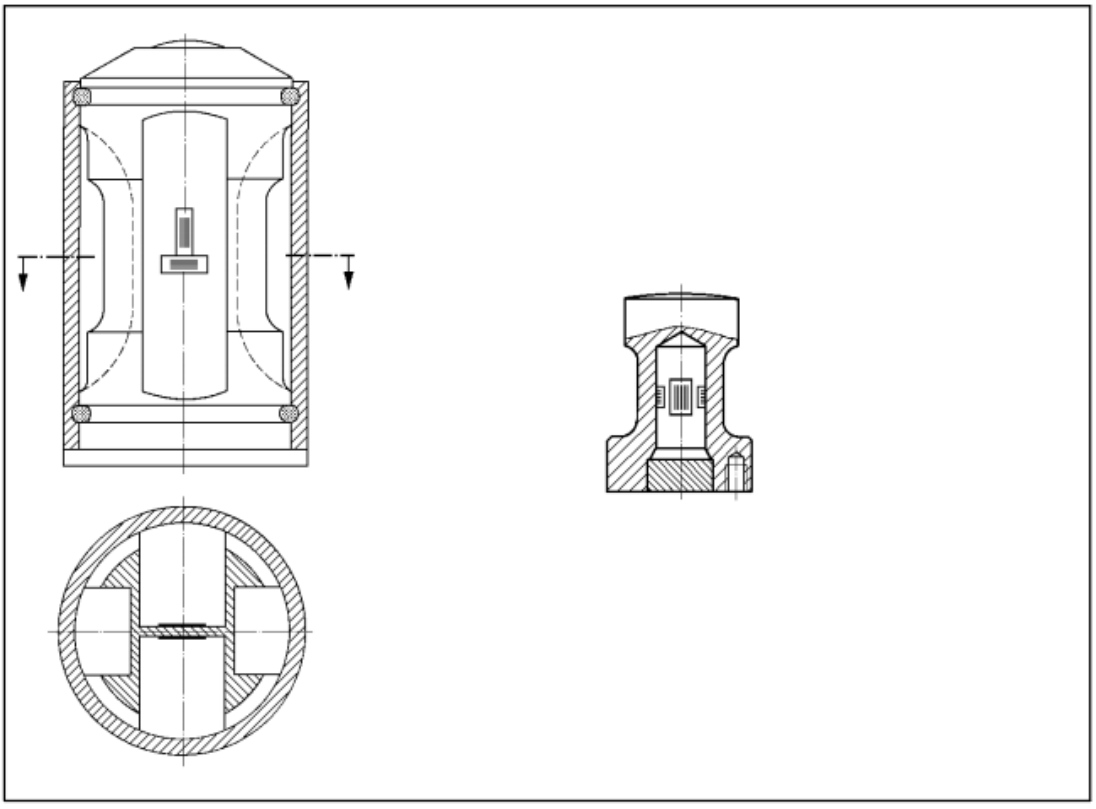
a) برای بارهای فشاری

b) برای بارهای کششی (البته قابل استفاده برای بارهای فشاری)

محفظه محافظ به کار رفته در آن از انتقال نیروهای جانبی ایجاد شده توسط بارهای مکانیکی اعمالی، به عنصر ارتجاعی جلوگیری می کند. همچنین این محفظه مبدل را در برابر شرایط محیطی مانند گرد وغبار، نفوذ آب و رطوبت و ... به داخل آن جلوگیری می کند. حفاظت در برابر نیروی های جانبی وارد شده به مبدل ضروری است. زیرا این عمل از اعمال اضافه بار به عنصر ارتجاعی جلوگیری می کند و دقت اندازه گیری را بالا می برد. برای جلوگیری از تاثیر گذاری محفظه حفاظتی روی دقت اندازه گیری مبدل، معمولا دو انتهای آن را که در راستای اندازه گیری کمیت مورد نظر است، دیافراگمی قرار می دهند که در جهت اندازه گیری نیرو حالت "نرم" را دارد ولی در جهت های عرضی کاملا محکم می باشد.

عنصر ارتجاعی ستونی شکل نشان داده شده در شکل 3 برای اندازه گیری نیروهایی با مقدار 10KN/1t تا 1MN/1000t مناسب می باشد. شکل 4 یک حالت اصلاح شده عنصر ارتجاعی ستونی را نشان می دهد.

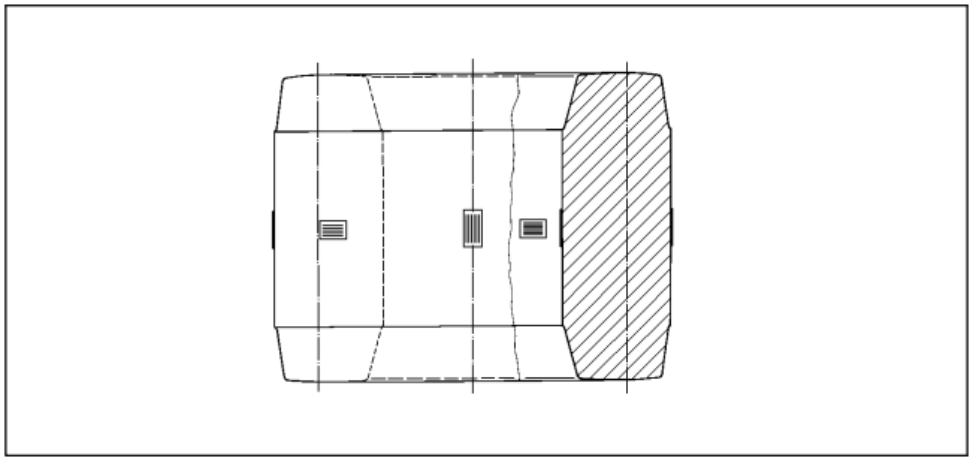
سطح مقطع H شکل این عنصر ارتجاعی باعث می شود که آن در مقابل نیروهای جانبی مقاومتر از حالت استوانه ای یکنواخت باشد. استرین گیج ها برای این عنصر در ناحیه H روی یک دیواره افقی نصب شده اند، زیرا در این ناحیه، به خاطر نزدیک بودن آنها به محور خنثی ممان خمشی، حداقل ممان خمشی به آنها از طرف نیروهای جانبی وارد می شود.



شکل 4: مبدل نیرو با عنصر ارتجاعی H شکل

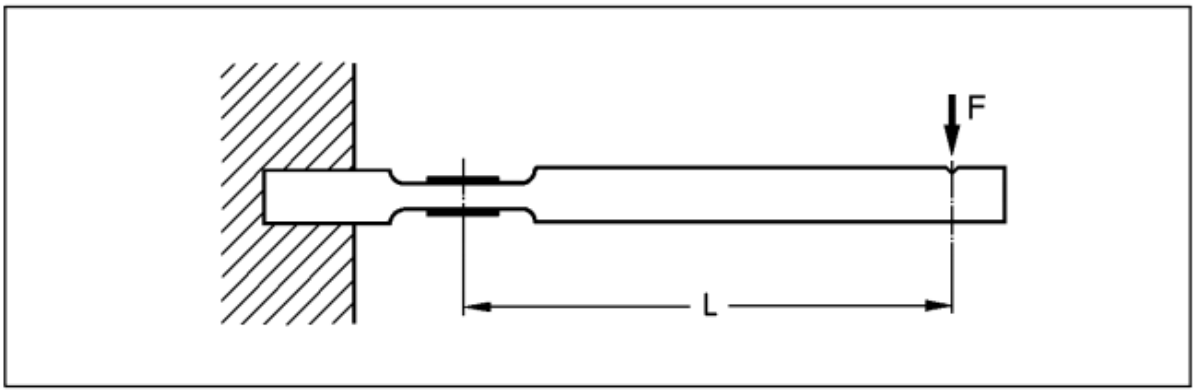
در برخی از موارد معمولا مشکل کمبود فضای لازم برای نصب این نوع از مبدل ها وجود دارد. این مشکل طراح را مجبور به استفاده از عنصرهای ارتجاعی اصطلاحا Low-profile می کند. با این حال استفاده از دیسک های ساده در این گونه موارد توصیه نمی شود، زیرا شرط یکنواختی توزیع تنش در این دیسک ها برقرار نیست. از آنجایی که این مورد پیش نیاز اندازه گیری های دقیق می باشد، و چیزی که ما اندازه گیری می کنیم صرفا کرنش های ایجاد شده روی عنصر ارتجاعی هستند که به صورت غیر یکنواخت در سرتاسر حجم عنصر ارتجاعی توزیع شده اند، حال اگر میانگین این کرنش ها اندازه گیری شود، در این صورت نتایج بدست آمده درست خواهد بود. یک نمونه از عنصر ارتجاعی برای این کار در شکل 5 نشان داده شده است که این عنصر الزامات گفته شده در بالا را نسبت به دیسک های مسطح، بهتر برآورده می کند.

اگر هدف اندازه گیری نیروهای کوچک در حد میکرو باشد، در این صورت اعمال نیرو به صورت عمودی و ایجاد تنش در عنصر ارتجاعی همانند قبل، انتخاب درستی نخواهد بود. برای دستیابی به حساسیت قابل قبول ما نیاز به کرنش خاصی روی عنصر فنری داریم. از آنجایی که ما محدودیت هایی در انتخاب عنصر ارتجاعی با سطح مقطع کوچک و همچنین مدول یانگ پایین داریم، بنابراین باید روش دیگری برای این چالش پیدا کنیم. یکی از این روش ها استفاده از بازوی اهرمی و اندازه گیری نیروی خمشی است.



شکل 5: عنصر ارتجاعی لوله مانند

یک حالت ساده از عنصر ارتجاعی برای تیر خمشی در شکل 6 نشان داده شده است.

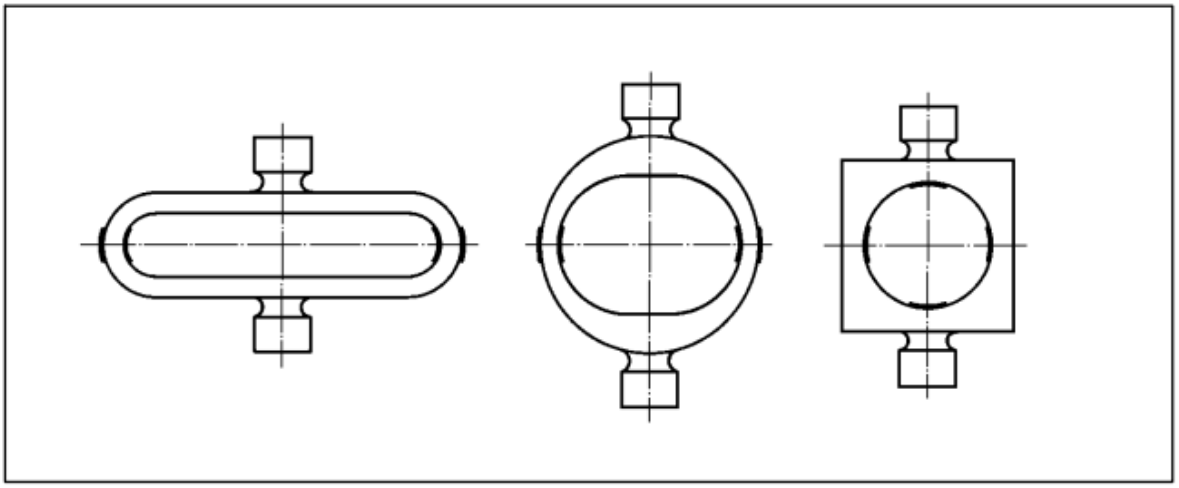


شکل 6: تیر خمشی ساده

در این آرایش، سیگنال اندازه گیری شده متناسب با نیروی خمشی اعمالی به عنصر فنری می باشد.

اگر ما بخواهیم با استفاده از این آرایش، نیروهای خمشی اعمالی را اندازه گیری کنیم، باید یک نقطه ثابت و غیرقابل تغییر برای اعمال نیرو در نظر بگیریم، در این صورت طول موثر بازوی اهرمی یعنی L ثابت خواهد ماند. عامل مهم دیگر نحوه اعمال نیرو می باشد که باید به صورت عمودی اعمال شود. این شرط ممکن است در خیلی از موارد به خاطر ساختار تیر کششی، تامین نشود و نیروی اعمالی با زاویه های مختلف به عنصر فنری اعمال شود. با توجه به محدودیت های بالا، عنصر ارتجاعی ساده نشان داده شده در شکل 6 به ندرت در عمل مورد استفاده قرار می گیرد. و به جای آن می توان از آرایش های بهتری برای این کار استفاده کرد. شکل 7 سه مورد از این آرایش ها را نشان می دهد.

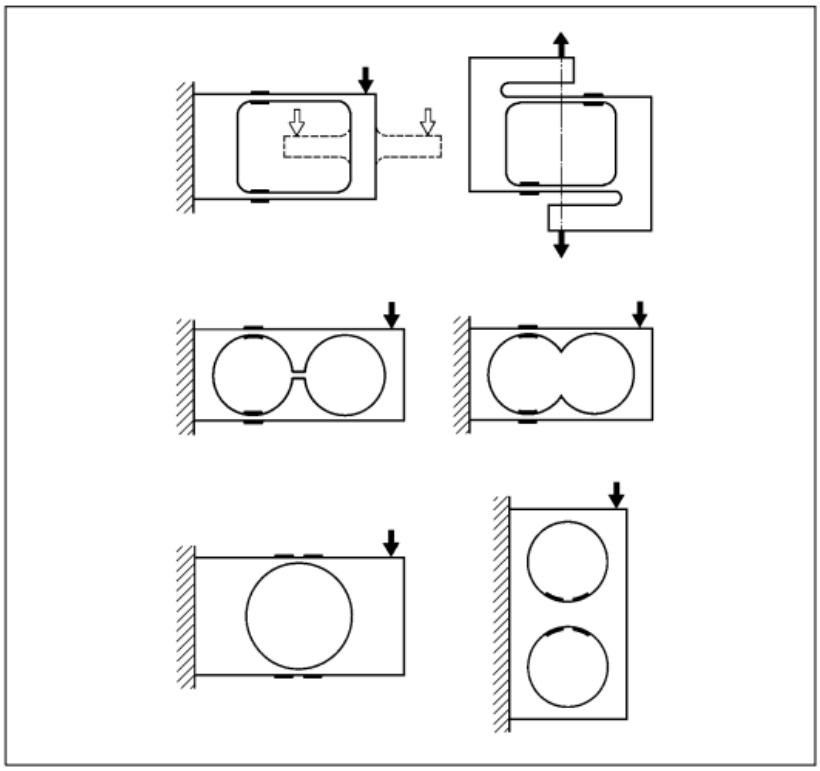
عنصر سمت چپ شکل 7 بیشترین هم خوانی را با عنصر ارتجاعی شکل 6 دارد. حساسیت شکل سمت چپ، برای ظرفیت های یکسان، از دو تای دیگر بیشتر می باشد. و شکل سمت راست کمترین حساسیت را دارد



شکل 7: عناصر فنری متعدد برای اندازه گیری نیروی خمشی

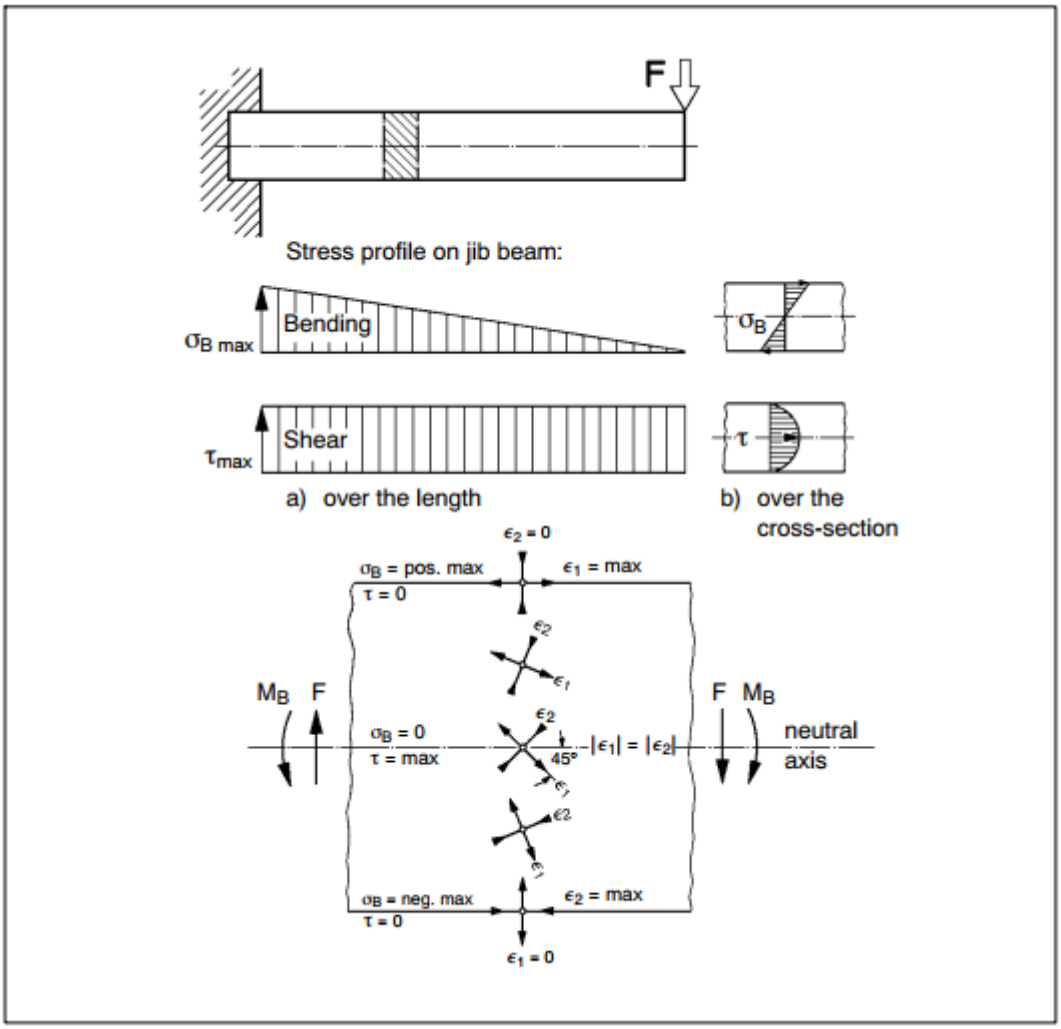
شکل سمت راست در عوض از نظر تولید، ساده ترین ساختار را دارد. همچنین به خاطر شکل هندسی آن، فرکانس های طبیعی آن از بقیه بیشتر است. عنصرهای فنری شکل 7 را می توان برای طراحی مبدل هایی با ظرفیت نامی 5000N/500Kg تا 500KN/50t استفاده کرد.

برای اندازه گیری نیروهای کوچکتر از 100N/10Kg عنصر فنری دیگری توسعه داده شده است که از ویژگی "میله خمشی دوسر" بهره می برد. این عنصرهای فنری در شکل زیر نشان داده شده اند.



شکل 8: انواع مختلف عنصرهای فنری میله خمشی دو سر

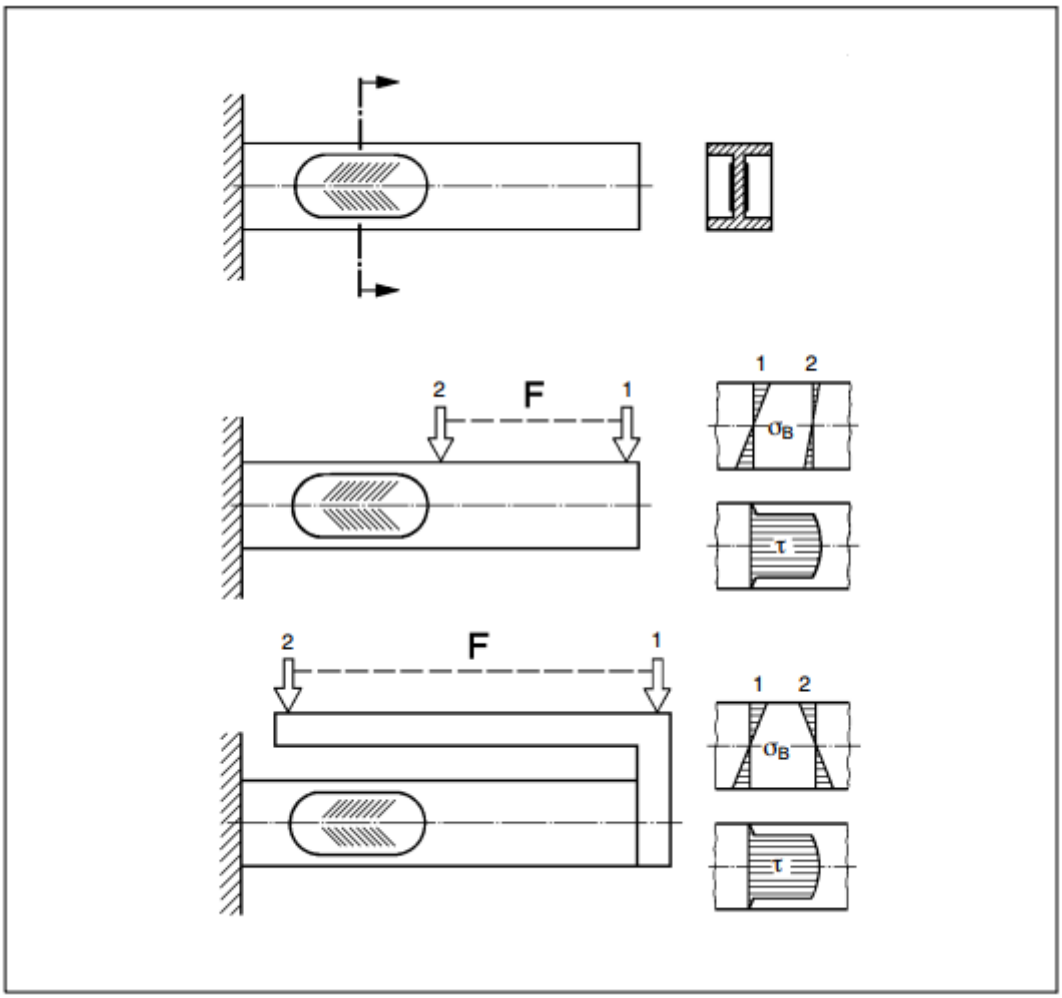
یـک طراحـی قابـل اسـتفاده دیگـر بـرای انـدازه گیـری نیـرو، اسـتفاده از تـنش هـای برشـی مـی باشـد. تنش های برشی بـه صـورت خـالص مـثلا در میلـه هـای پیچشـی اتفـاق مـی افتنـد. تـنش هـا و کـرنش های برشی بـه وجـود آمـده در میلـه، نسـبت بـه صـفحه برشـی اعمـال بـار، در زاویـه هـای $\pm 45°$ و بـا علامـت هـای مخـالف هـم بـه وجـود مـی آینـد. انـواع مختلفـی از میلـه هـای برشـی (Shear beam) برای اندازه گیـری نیـرو مـورد اسـتفاده قـرار مـی گیرنـد. اصـول کـار ایـن نـوع از مبـدل هـا در شـکل 9 آورده شـده اسـت. در نتیجـه‌ی مجمـوع اثـرات متقابـل تـنش هـای خمشـی و برشـی، جهـت برآینـدهای کلـی مولفـه هـای اصـلی تـنش و کـرنش در میله،بـه نسـبت تـنش هـای برشـی بـه خمشـی و همچنـین فاصله آنها از محور خنثی بسـتگی دارد. کـرنش هـای اصـلی، زمـانی کـه گـیج هـا در زاویـه هـای ± 45 درجه نسـبت بـه محـور خنثـی و روی آن نصـب شـوند، بـه صـورت صـحیح قابـل انـدازه گیـری خواهنـد بود. البته این عمل به خاطر تغییر در مساحت گیج ها، به صورت تقریبی می باشد.



شکل 9: جهت کـرنش هـای اصـلی ε_1 و ε_2 در راسـتای یـک خـط سـطح مقطـع نسـبت بـه تـنش هـای خمشـی و برشـی جمع شده

با تغییر شکل عنصر فنری به صورت شکل 10 می توان به یک بهبود اساسی دست پیدا کرد. در این ساختار به خاطر شکل هندسی محلی که گیج ها نصب می شوند، تنش های خمشی در مقایسه با تنش های برشی

بسیار کوچک هستند. به طوری که اثرات آنها در محل نصب گیج ها قابل چشم پوشی می باشد.



شکل 10: مثالی از میله برشی با مقطع I شکل در محل نصب گیج ها

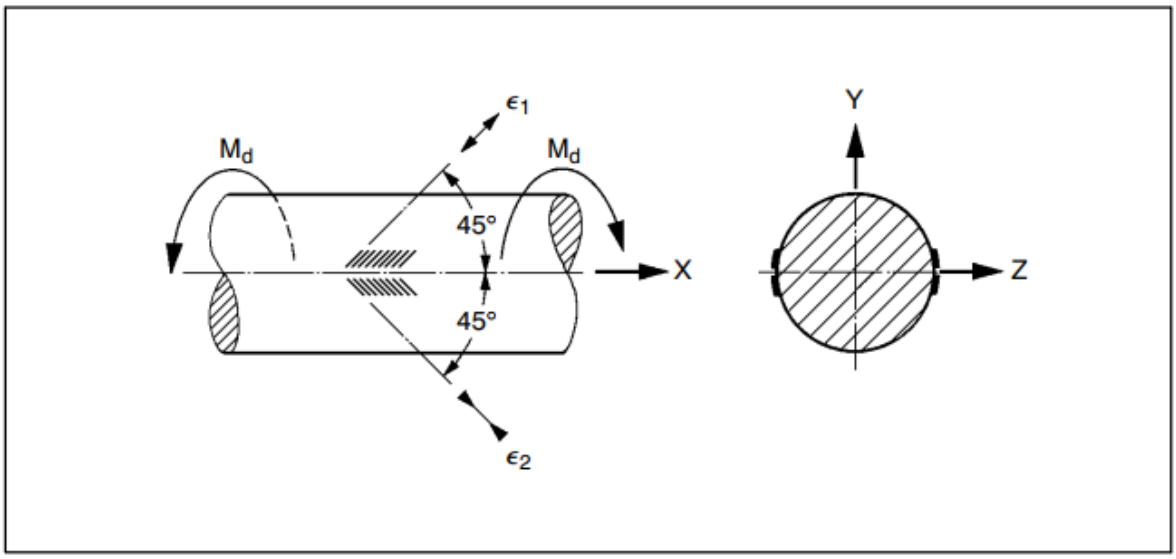
یکی از مزیت های مهم استفاده از عنصر فنری شکل 10 این است که در این ساختار نقطه اعمال نیرو می تواند روی محور طولی آن تغییر کند بدون آنکه خطای قابل توجهی در خروجی ایجاد شود. و این در تضاد با میله ساده استفاده شده در شکل 6 برای اندازه گیری نیروهای خمشی می باشد.

مبدل های گشتاور:

مانند مبدل های نیرو، مبدل های گشتاور نیز به یک عنصر ارتجاعی مناسب جهت تبدیل گشتاور به کرنش های سطحی، و اندازه گیری آنها توسط استرین گیج ها، نیاز دارد. ساده ترین حالت

برای عنصر ارتجاعی، استفاده از یک شفت استوانه ای مانند شکل 11 می باشد. در این شفت استرین گیج ها در جهت مولفه های اصلی کرنش های ε_1 و ε_2 با زاویه $\pm 45^\circ$ نسبت به صفحه برشی و محور آن نصب می شوند. همانطور که قبلا هم در شکل 1 برای مبدل نیرو نشان داده شد، استفاده از چهار گیج فعال روی عنصر ارتجاعی و در بازوهای پل وتستون، از یک طرف باعث ایجاد سیگنال های خروجی با دامنه بزرگتر و از طرفی برخی از

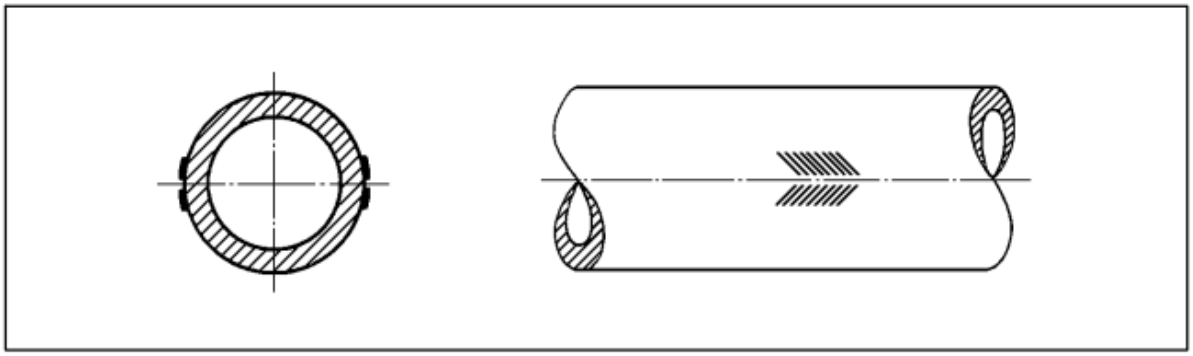
کارهای جبرانسازی را انجام می دهد. اگر استرین گیج ها به صورت دوتایی در طرف های مخالف هم روی عنصر ارتجاعی نصب شوند، تنش های خمشی ایجاد شده اثرات همدیگر را در صفحات X-Y و X-Z از خنثی می کنند. و به همیت ترتیب تنش های عمودی در راستای محور X نیز جبران می شود.



شکل 11: عنصر ارتجاعی به صورت یک شفت استوانه ای

برای گشتاورهای کوچک استفاده از شفت های توپر، هم حساسیت لازم را به دست نمی دهد و هم حساسیت آن در برابر نیروهای خمشی غیرقابل قبول است. یعنی اثرات تنش های خمشی ایجاد شده روی شفت، به طور قابل توجهی در سیگنال خروجی مبدل جبران نمی شوند.

یک راه حل مناسب برای حل این مشکلات استفاده از شفت استوانه ای تو خالی همانند شکل 12 است. ترتیب قرارگیری گیج ها روی این استوانه هم مانند شکل 11 می باشد.



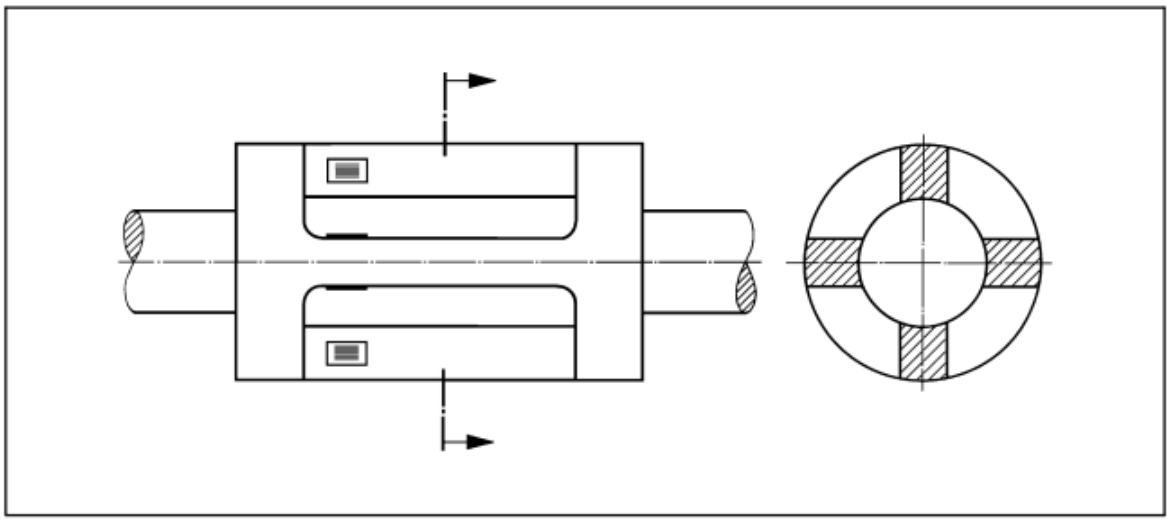
شکل 12: عنصر ارتجاعی به صورت یک شفت استوانه ای توخالی

همانند مبدل های نیرو، باید در انتخاب عنصر ارتجاعی برای مبدل های گشتاور باید دقت های لازم صورت

گیرد، تا این مبدل ها بتوانند حساسیت های لازم را برای گشتاورهای کوچک در خروجی خود ایجاد کنند.

این امر مخصوصا برای مبدل هایی که قرار است در صنعت مورد استفاده قرار بگیرند، اهمیت دوچندان پیدا می کند. زیرا در صنعت ممکن است اختلالات شدید در خطوط تغذیه و یا مسیرهای انتقال، سیگنال اصلی خروجی مبدل را دچار اعوجاج و نویز کند.

شکل 13 یک عنصر ارتجاعی قفس مانندی را نشان می دهد. رنج اندازه گیری این شفت را می توان توسط تعداد میله های قفس ، ابعاد و هم چنین جنس آنها کنترل کرد. برای اندازه گیری گشتاور در این حالت از تنش های برشی ایجاد شده روی شفت استفاده نمی شود بلکه از تنش های خمشی ایجاد شده روی میله ها عمل اندازه گیری صورت می گیرد.



شکل 13: عنصر ارتجاعی قفس مانند