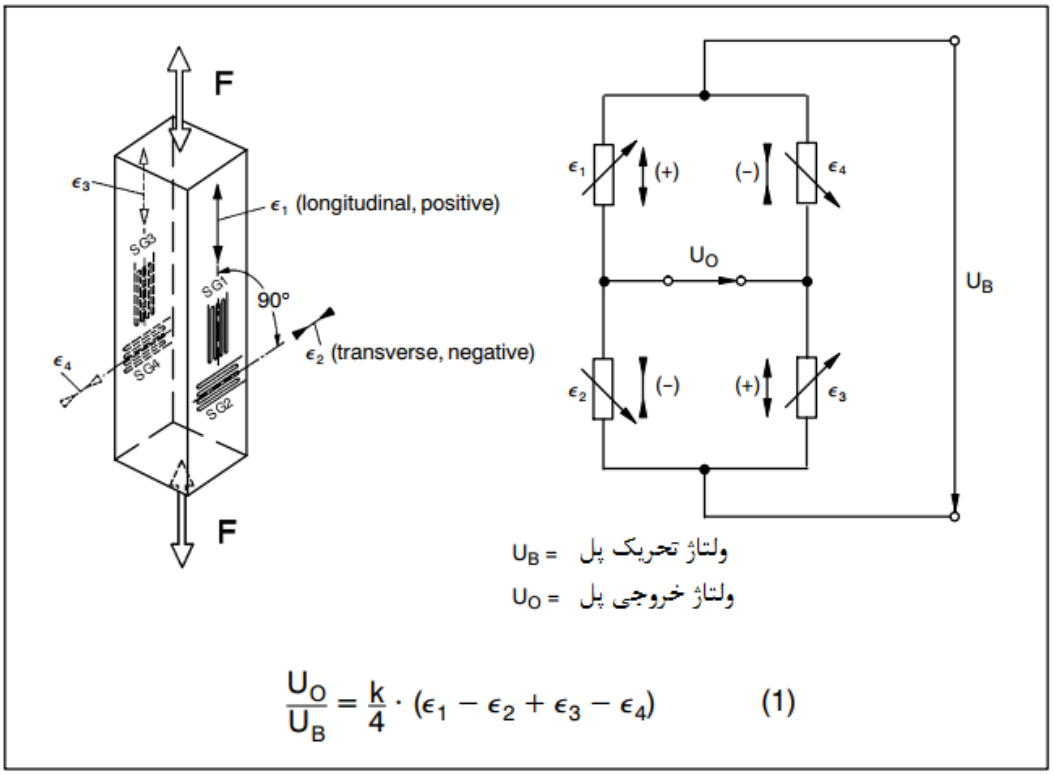
نقشه راه ساخت مبدل‌های اندازه‌گیری

بخش اول

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:

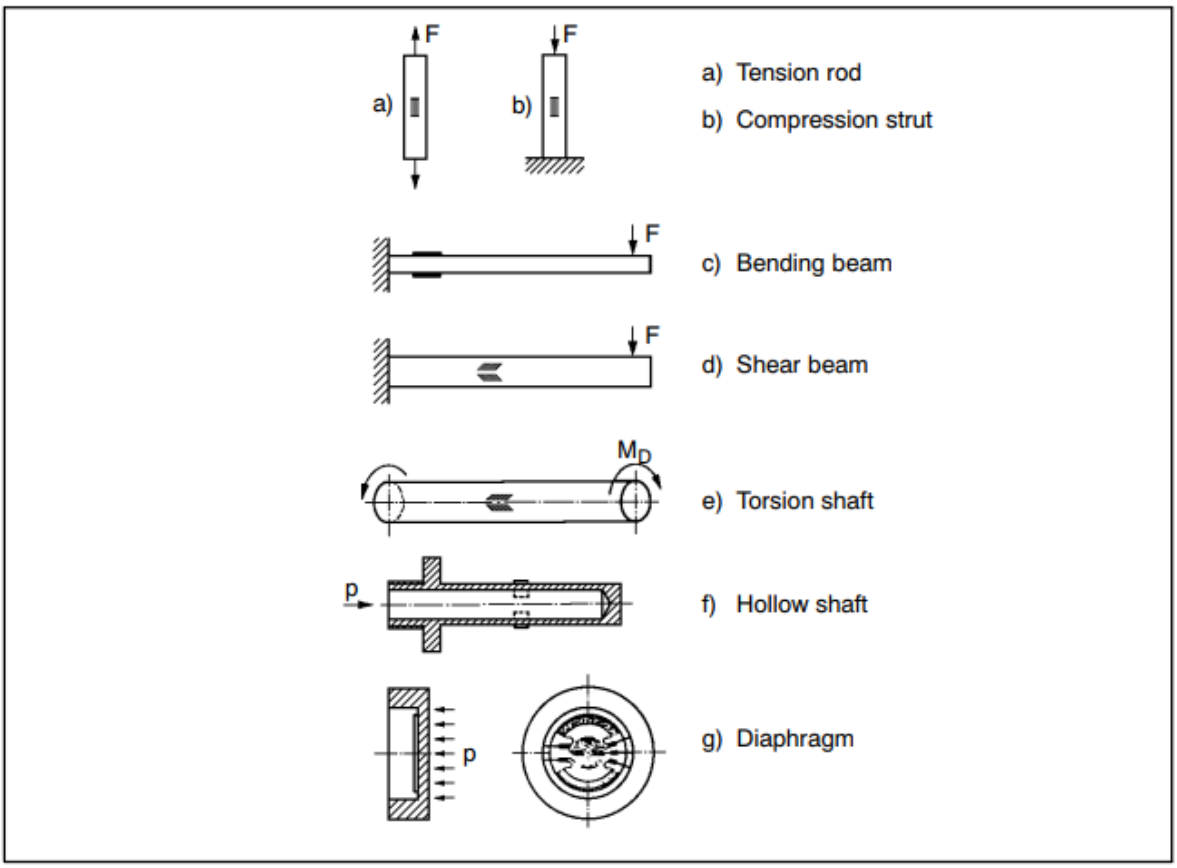
وقتی عنصر ارتجاعی یا فنری توسط بارهای مکانیکی اعمالی به آن دچار تنش های مکانیکی می شود، این تنش ها باعث تغییر شکل قیزیکی عنصر ارتجاعی می شوند که به این تغییر شکل ها اصطلاحا "کرنش" می گوییم. این کرنش ها همیشه باید به صورا خالص ارتجاعی باشد، یعنی در محدوده قانون هوک اتفاق بیفتد. اگر این شرط رعایت نشود، 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

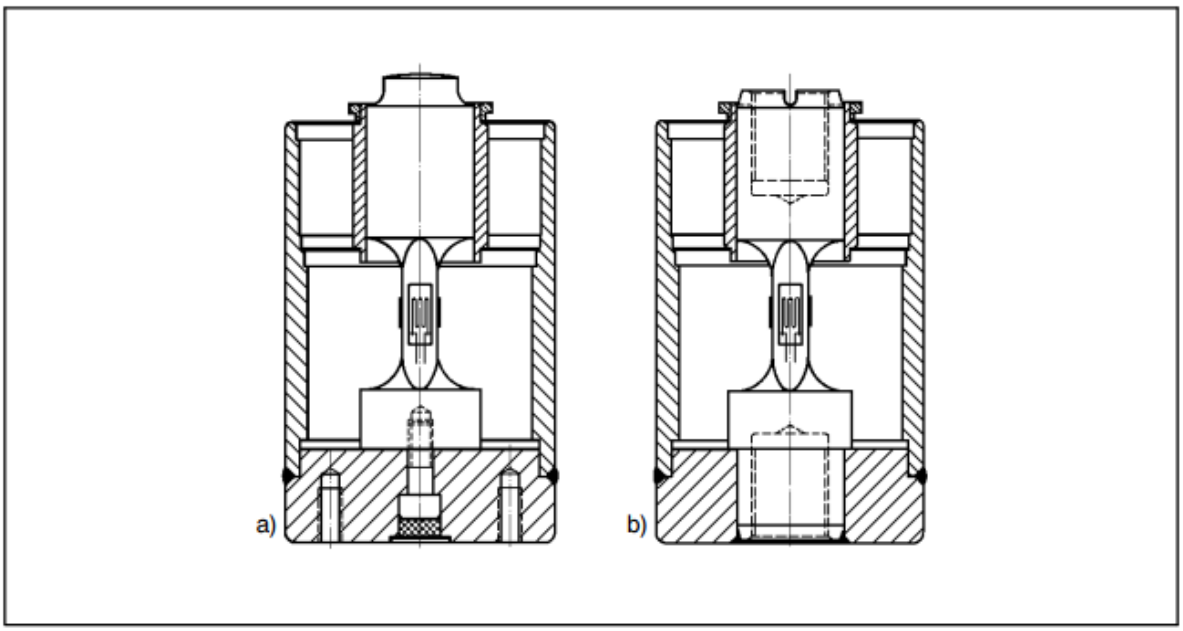
برای دریافت بیشترین حساسیت ممکن نسبت به کمیت اندازه گیری شده، ضروری است در صورت امکان از چهار گیج فعال در بازوهای پل وتستون استفاده شود (شکل 1). شکل هندسی

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

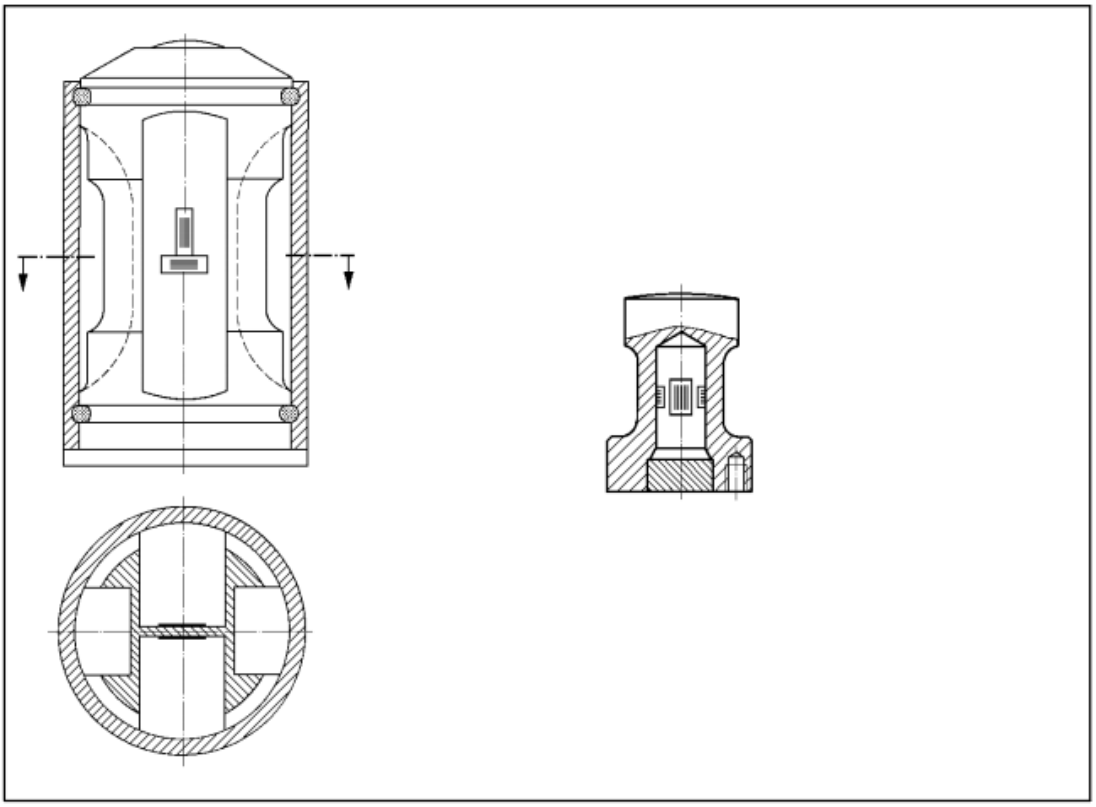
a) برای بارهای فشاری

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.

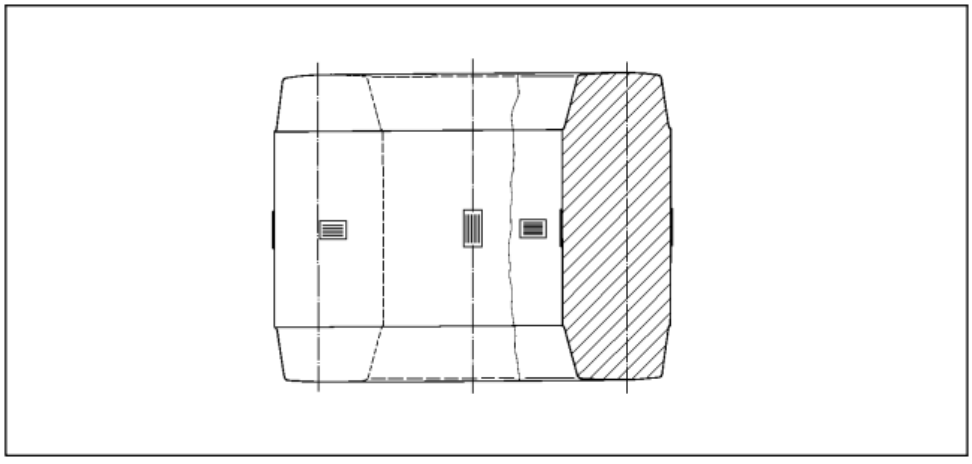
سطح مقطع H شکل این عنصر ارتجاعی باعث می شود که آن در مقابل نیروهای جانبی مقاومتر از حالت استوانه ای یکنواخت باشد. استرین گیج ها برای این عنصر در ناحیه H روی یک دیواره افقی نصب شده اند، زیرا در این ناحیه، به خاطر نزدیک بودن آنها به محور خنثی ممان خمشی، حداقل ممان خمشی به آنها از طرف نیروهای جانبی وارد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



شکل 4: مبدل نیرو با عنصر ارتجاعی H شکل

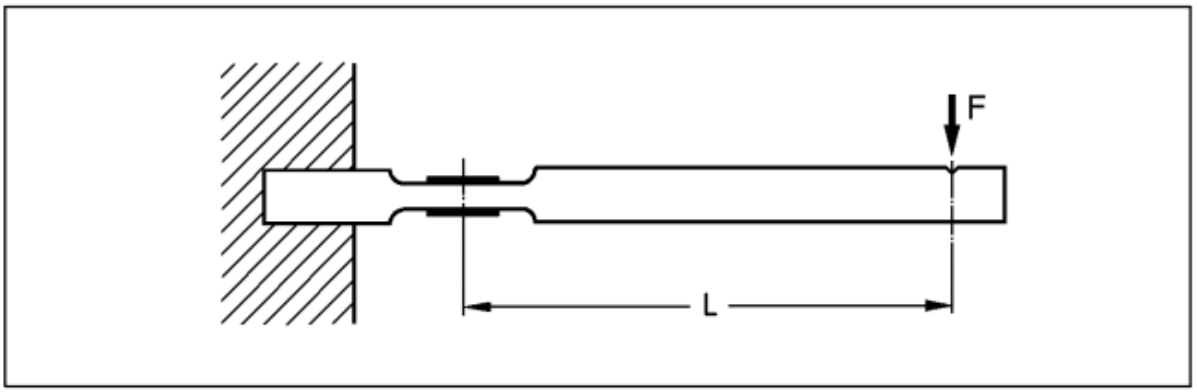
در برخی از موارد معمولا مشکل کمبود فضای لازم برای نصب این نوع از مبدل ها وجود دارد. این مشکل طراح را مجبور به استفاده از عنصرهای ارتجاعی اصطلاحا Low-profile می کند. با این حال استفاده از دیسک های ساده در این گونه موارد توصیه نمی شود، زیرا شرط یکنواختی توزیع تنش در این دیسک ها برقرار نیست. از آنجایی که 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.

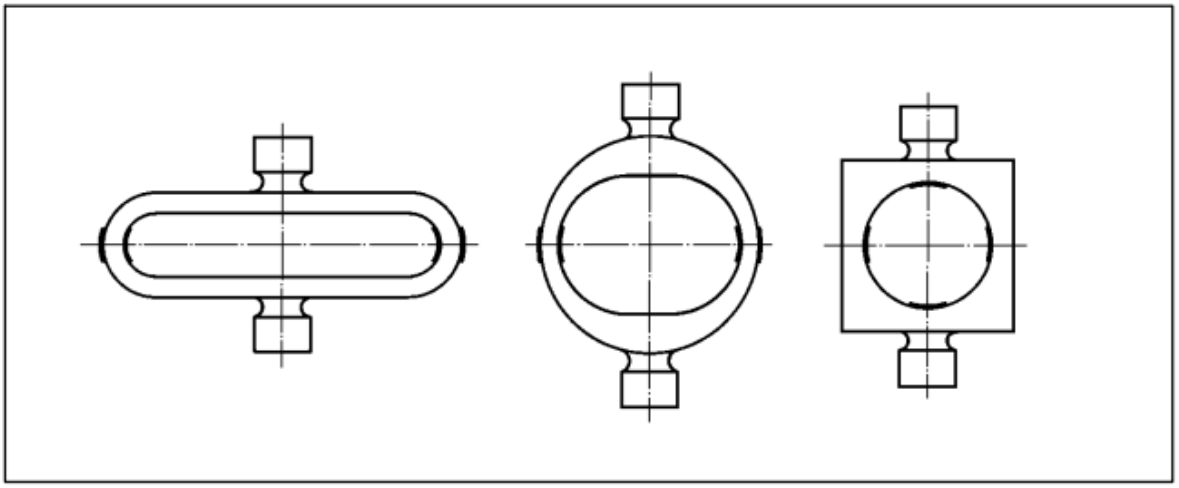


شکل 6: تیر خمشی ساده

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.

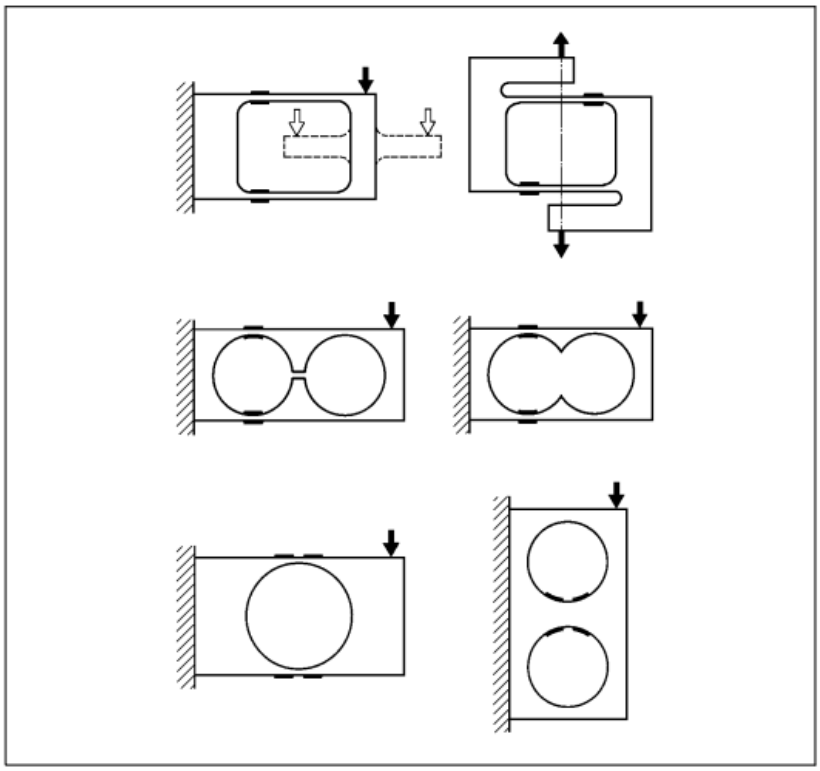
عنصر سمت چپ شکل 7 بیشترین هم خوانی را با عنصر ارتجاعی شکل 6 دارد. حساسیت شکل سمت چپ، برای ظرفیت های یکسان، از دو تای دیگر بیشتر می باشد. و شکل سمت راست کمترین حساسیت را دارد



شکل 7: عناصر فنری متعدد برای اندازه گیری نیروی خمشی

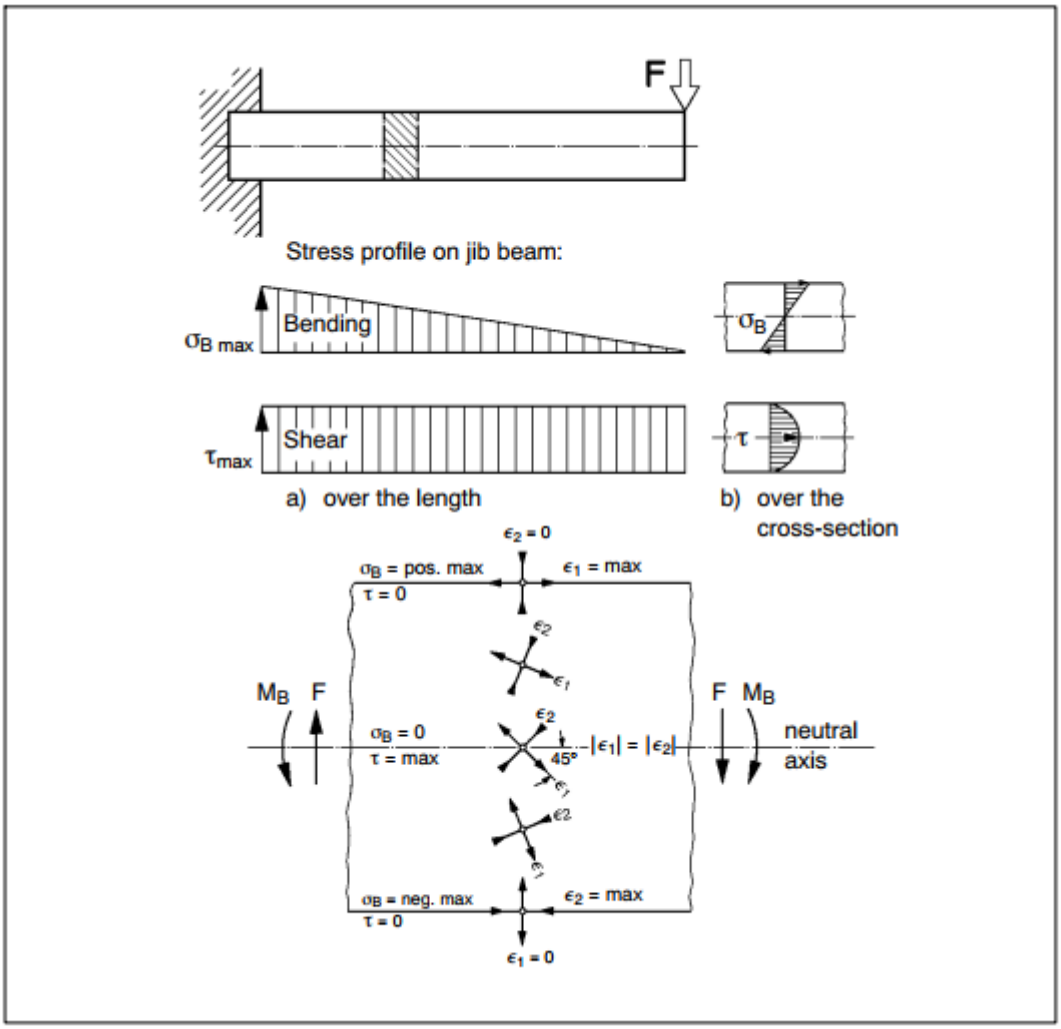
شکل سمت راست در عوض از نظر تولید، ساده ترین ساختار را دارد. همچنین به خاطر شکل هندسی آن، فرکانس های طبیعی آن از بقیه بیشتر است. عنصرهای فنری شکل 7 را می توان برای طراحی مبدل هایی با ظرفیت نامی 5000N/500Kg تا 500KN/50t استفاده کرد.

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

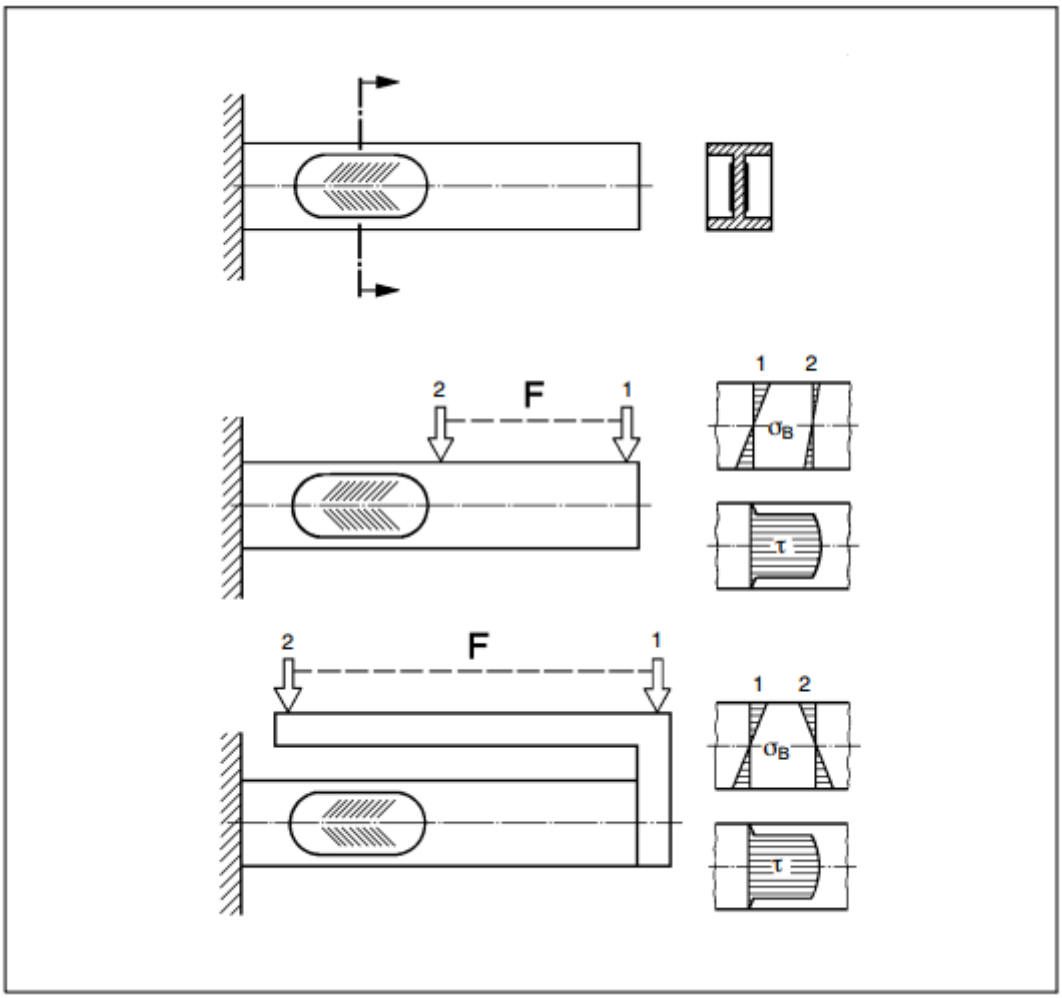
یـک طراحـی قابـل اسـتفاده دیگـر بـرای انـدازه گیـری نیـرو، اسـتفاده از تـنش هـای برشـی مـی باشـد. تنش های برشی بـه صـورت خـالص مـثلا در میلـه هـای پیچشـی اتفـاق مـی افتنـد. تـنش هـا و کـرنش های برشی بـه وجـود آمـده در میلـه، نسـبت بـه صـفحه برشـی اعمـال بـار، در زاویـه هـای $\pm 45°$ و بـا علامـت هـای 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

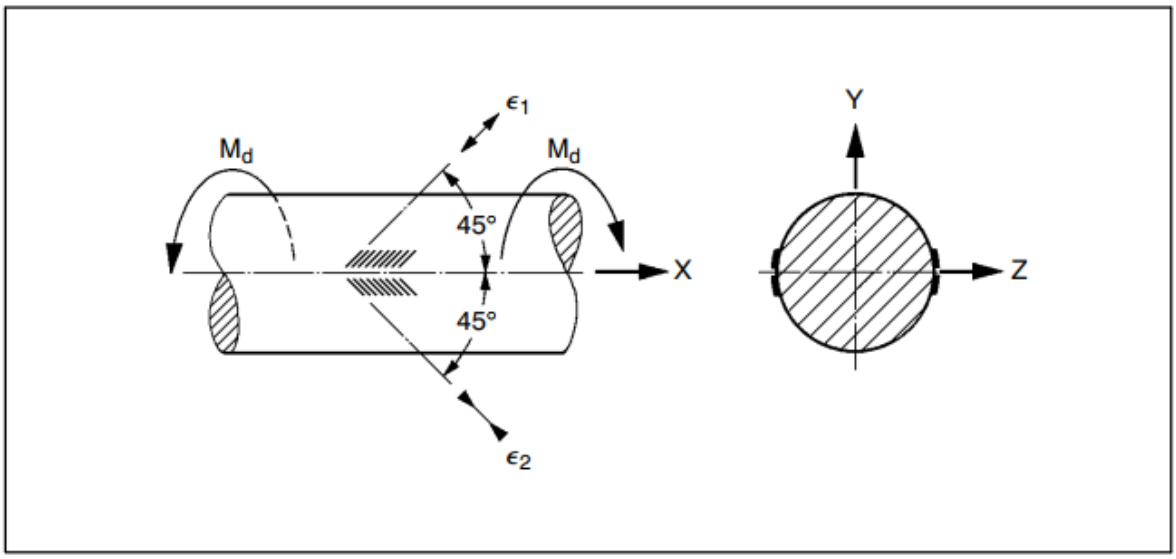
یکی از مزیت های مهم استفاده از عنصر فنری شکل 10 این است که در این ساختار نقطه اعمال نیرو می تواند روی محور طولی آن تغییر کند بدون آنکه خطای قابل توجهی در خروجی ایجاد شود. و این در تضاد با میله ساده استفاده شده در شکل 6 برای اندازه گیری نیروهای خمشی می باشد.

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

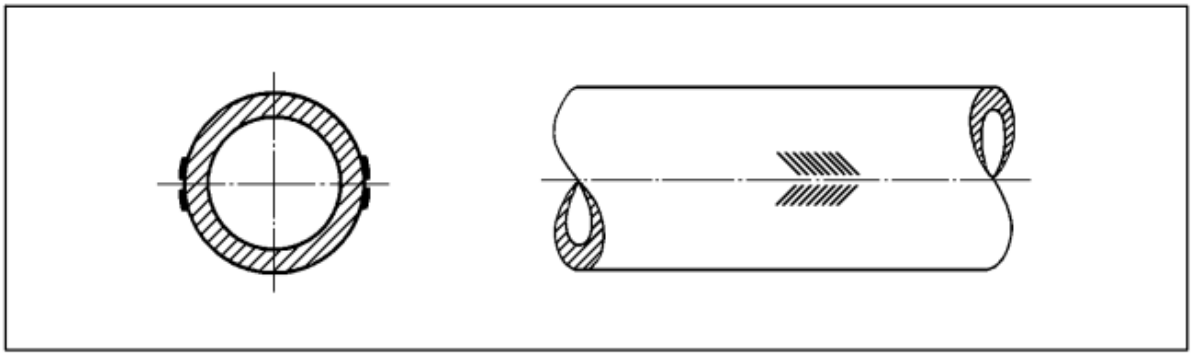
کارهای جبرانسازی را انجام می دهد. اگر استرین گیج ها به صورت دوتایی در طرف های مخالف هم روی عنصر ارتجاعی نصب شوند، تنش های خمشی ایجاد شده اثرات همدیگر را در صفحات X-Y و X-Z از خنثی می کنند. و به همیت ترتیب تنش های عمودی در راستای محور X نیز جبران می شود.



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.



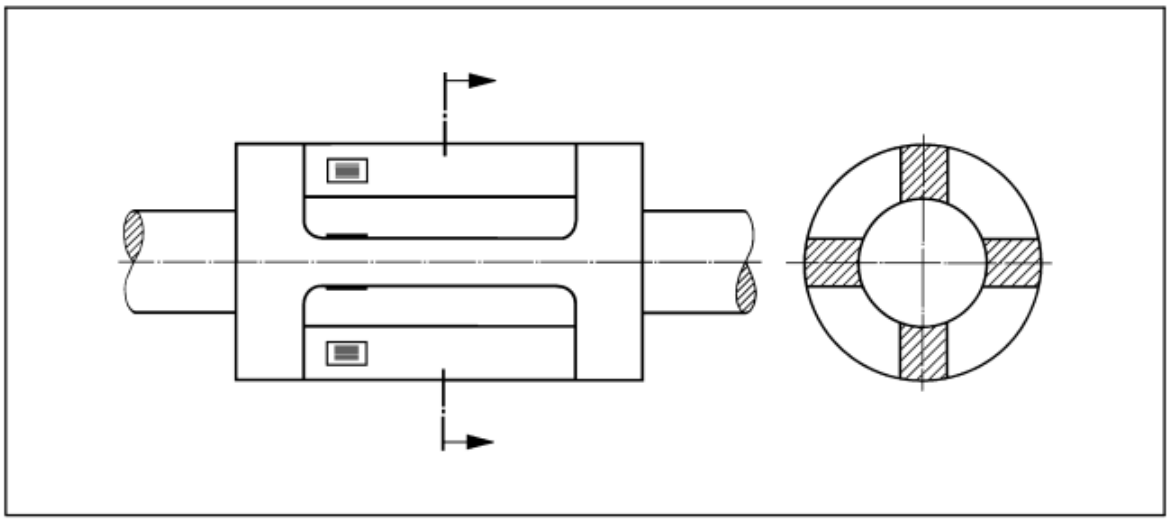
شکل 12: عنصر ارتجاعی به صورت یک شفت استوانه ای توخالی

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.

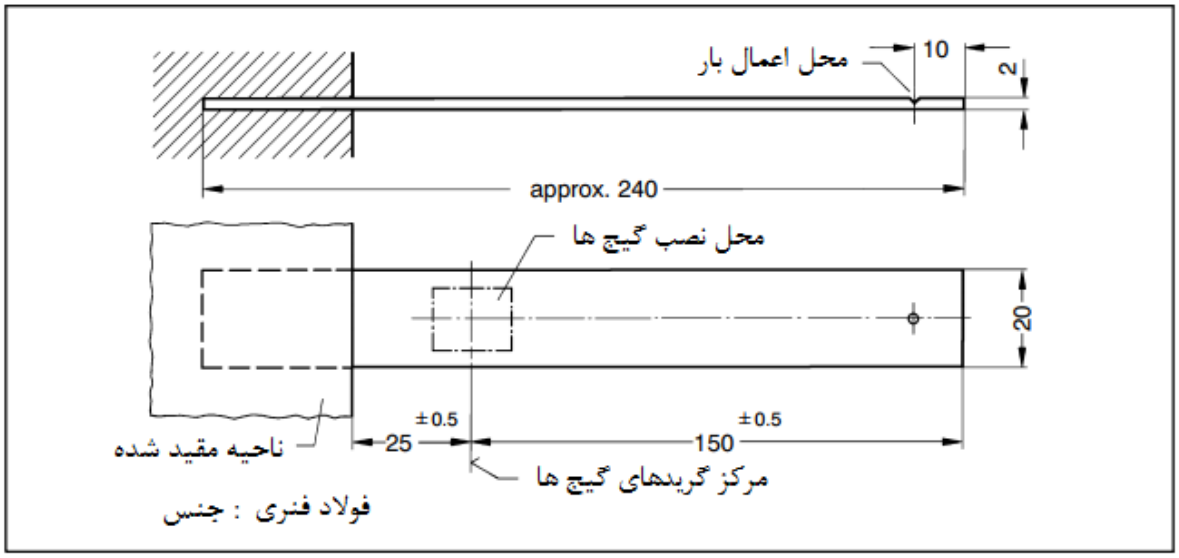


شکل 13: عنصر ارتجاعی قفس مانند

بخش دوم

ملاحظات عملی در انتخاب هندسه عنصر ارتجاعی

همانطور که قبلا در بخش مقدمه گفته شد، بسیاری از مفاهیم ساخت مبدل را می خواهیم از طریق یک مثال جلو ببریم. در این بخش می خواهیم عنصر ارتجاعی مبدلی را که می خواهیم به عنوان مثال برای تشریح قسمت های مختلف آن استفاده کنیم، انتخاب کنیم. برای این منظور ساده ترین انتخاب شاید "میله برشی" یا "تیر برشی" باشد، که در عین ساده بودن می تواند بسیاری از مفاهیم ساخت مبدل را پوشش دهد.



شکل 1: نقشه عنصر ارتجاعی تیر خمشی برای در نظر گرفتن ملاحظات عملی ساخت مبدل ها

یکی دیگر از مزیت های انتخاب این عنصر ارتجاعی، این است که محاسبات مکانیکی آن ساده تر است.

همانطور که در بخش های قبلی عنوان شد اگر از این عنصر ارتجاعی ساده به عنوان مبدل استفاده شود، تعیین یک نقطه ثابت و غیرقابل تغییر برای اعمال بار جهت ثابت نگه داشتن طول موثر بازوی اهرم، ضروری است. برای تحقق این شرط، یک سوراخ در مرکز نقطه ای که قرار است بار از آنجا به مبدل اعمال شود، ایجاد شده است، تا با قرار دادن یک پیستون داخل این سوراخ، نیرو به پیستون اعمال شده، و در نتیجه از جابجایی نقطه اعمال بار جلوگیری می شود.

استرین گیج ها در فاصله 150 میلی متری از نقطه اعمال بار (تا مرکز استرین گیج) بر روی عنصر ارتجاعی نصب شده اند. این فاصله متناظر با طول موثر بازوی اهرمی می باشد. برای ثابت نگه داشتن این عنصر ارتجاعی، انتهای آن توسط پیچ روی یک جسم ثابت جامد پیچ شده است.

انتخاب جنس مواد:

ویژگی های عنصر ارتجاعی یک مبدل اندازه گیری کامل، بستگی زیادی به جنس مواد به کار رفته در آن و همچنین به شکل هندسی آن دارد.

مواد به کار رفته در عنصر ارتجاعی باید شرایط و ویژگی های زیر را داشته باشد:

- ساختار ریزدانه‌ای آن کامل همگن باشد.
- تغییر شکل ارتجاعی، خواص کشسانی و نقطه تسلیم بالایی داشته باشد.
- رفتار خزش خوبی داشته باشد.
- حلقه هیسترزیس یا همان پسماند پایینی کوچکی باشد.
- مدول یانگ آن کمترین وابستگی را به دما داشته باشد.
- هدایت گرمایی بالایی داشته باشد.

	Designation	Material-No.	Young's modulus (N/mm^2)	Approx. values temperature coeff. of Young's modulus $\Delta E / \Delta\vartheta$ (10^{-5} / K)	Thermal expansion coefficient α (10^{-6} / K)	Misc.
Spring steel	51CrV4	1.2241	210 000	-26	11	rusting
Spring steel	X5CrNi CuNb1744	1.4548	207 000	-19	11	stainless
Copper-beryllium	CuBe2	2.1247	130 000	-35	17	-
Aluminum	AlCuMg2	3.1355	73 000	-58	23	-

شکل 2: جنس مواد بکار رفته در عنصر ارتجاعی مبدل ها

اگر جنس ماده انتخابی، مدول یانگ پایینی را (در مقایسه با فولاد) داشته باشد، برای یک ظرفیت و ابعاد مشخص، می توان به حساسیت های بالایی دست یافت.

مواد لیست شده در شکل 2 شرایط گفته شده در بالا را برای عنصر ارتجاعی، در حد قابل قبولی دارا می باشند و به خاطر همین سال ها این مواد در تولید مبدل های مختلف در صنعت به کار می روند. به همین دلیل این مواد به عنوان مواد استاندارد برای ساخت مبدل ها شناخته می شوند.

تعیین محل نصب گیج ها:

تعیین محل نصب گیج ها، بستگی زیادی به شکل هندسی عنصر ارتجاعی انتخاب شده و همچنین نوع استرین گیجی که قرار است نصب شود، دارد. بنابراین در نظر گرفتن هر دوی این موارد به صورت هم زمان برای تعیین محل نصب گیج ها ضروری است.

استرین گیج ها:

برای دستیابی به بیشترین حساسیت ممکن، گیج ها باید در محلی نصب شوند که بیشترین کرنش در آنجا اتفاق می افتد. جهت بهره بردن هر چه بیشتر از مزیت های پل وتستون، مانند ایجاد سیگنال های خروجی بزرگتر و توانایی های جبران سازی پل وتستون، باید از چهار گیج فعال، که دوتای آنهای برای اندازه گیری کرنش های کششی و دو تای دیگر برای اندازه گیری کرنش های فشاری به کار می رود، استفاده شود.

قطعات به کار رفته برای بالانس کردن و عمل جبرانسازی در پل:

المان های بالانس و جبرانسازی همانطور که بعدا توضیح داده خواهد شد، می توانند به همان روش گیج های اصلی، روی عنصر ارتجاعی نصب شوند.

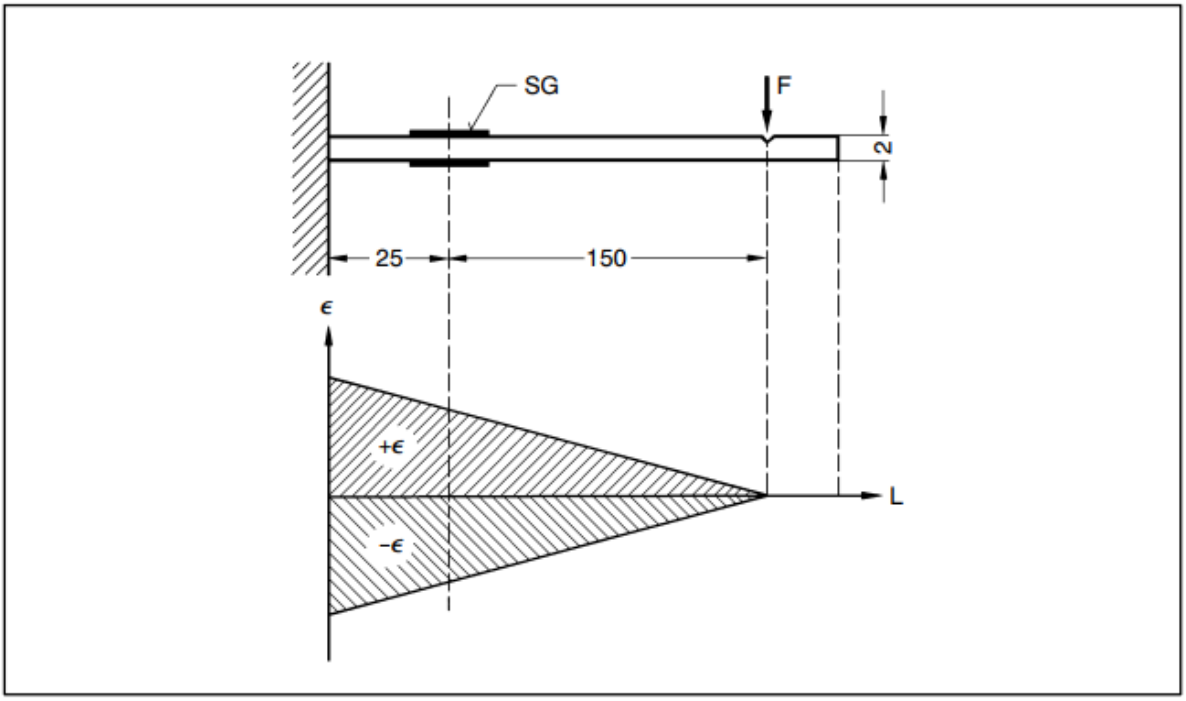
برای انتخاب موقعیت نصب این المان ها، در نظر گرفتن دو شرایط متناقض زیر ضروری است: اول اینکه این المان ها باید در جایی که کرنش در آنجا حداقل است، نصب شوند. تا مقاومت الکتریکی آنها در اثر اعمال بار مکانیکی، تغییری نداشته باشد. این به این معنی است که این المان ها باید در فاصله زیادی از جایی که کرنش ها در آن ناحیه حداکثر است نصب شوند. یعنی دور از جایی که گیج های اصلی آنجا نصب شده اند. از طرف دیگر المانهایی که مقاومت آنها با دما تغییر می کند، باید روی عنصر ارتجاعی و خیلی نزدیک به گیج های اصلی نصب شوند، تا این المان ها دقیقا هم دما با گیج های اصلی باشند و پاسخ حرارتی آنها به تغییرات دما سریع باشد. در این

شرایط، اولویت با برآورده ساختن شرایط دمایی می باشد، زیرا این المان ها حساسیت کمتری نسبت به کرنش های ایجاد شده دارند.

علاوه بر موارد بالا، انتخاب محل نصب گیج ها و المان های مربوطه باید طوری باشد که در اتصالات مداری تقارن حاصل شود و سیم های اتصال در حد امکان باید کوتاه در نظر گرفته شوند.

ملاحظات عملی در تعیین موقعیت نصب گیج های اندازه گیری کرنش:

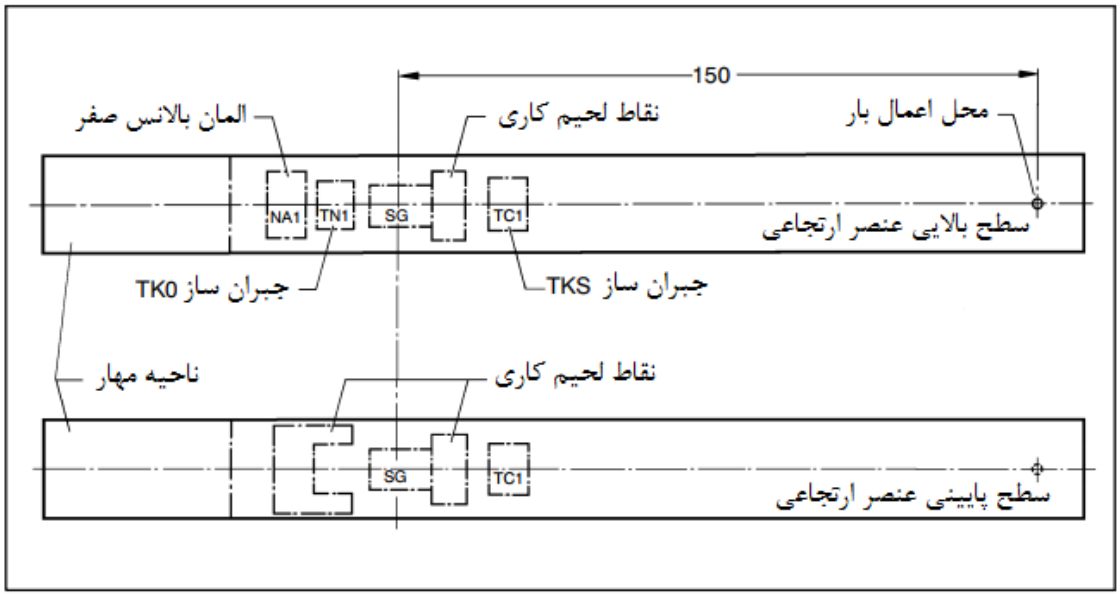
شکل 3 توزیع کرنش روی عنصر ارتجاعی انتخاب شده برای این مثال را به همراه دامنه و علامت آن نشان می دهد. مطابق با این شکل، باید دو عدد از گیج ها روی سطح بالا و دو عدد دیگر روی سطح پایینی عنصر ارتجاعی و نزدیک به محل مهار عنصر ارتجاعی، یعنی پیچ های مهار نصب شوند. این دید تئوری که گیج ها



شکل 3: توزیع کرنش و محل نصب گیج ها- مثال عملی

برای تجربه ماکزیمم کرنش باید در محل نزدیکی پیچ های مهار نصب شوند، در عمل قابل پیاده سازی نیست. زیرا پیچ های اتصال ممکن است باعث ایجاد تداخلاتی در کرنش های نزدیک به این محل باشند، و در نتیجه باعث شوند توزیع کرنش در این ناحیه غیریکنواخت گردد. از طرفی المان جبران ساز نقطه صفر دمایی به خاطر برآورده کردن الزاماتی که در بالا گفته شد، باید نزدیک گیج ها نصب شود. با در نظر گرفتن این دو مورد، و همچنین برای ایجاد ساختار مداری

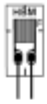
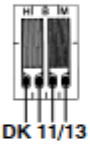
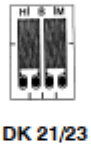
ساده و سیم کشی های متقارن عملی، محل نصب گیج ها دور از پیچ های اتصال در نظر گرفته می شود.



شکل 4: تعیین موقعیت های نصب المان های مختلف مبدل

انتخاب استرین گیج ها:

در انتخاب پترن و هندسه استرین گیج، پارامتر و هدف اندازه گیری و همچنین نوع عنصر ارتجاعی، باید در نظر گرفته شود. در جدول زیر چندین نوع از استرین گیج های شرکت HBM برای کاربردهای مختلف آورده شده است.

Basic form / Type	Designation	Application
 LK 11/13 LK 21/23	Linear-SG	To detect strains in one direction. When single SG individually aligned in direction of principal strain basically usable for all transducer designs. Preferably where use of single SG's is unavoidable, e.g., on narrow webs.
LK 31/33 LK 41/43	Linear-SG	as above In special cases, different connection geometry to the basic form facilitates the shortest possible and symmetrical wiring within the bridge.
  DK 11/13 DK 21/23	Double-SG with parallel measuring grids	Specially suitable for simple bending beams to measure strains on the top and bottom surfaces with positive and negative strains respectively. Less expensive, since the half-bridge can be installed in a single working step.
XK 51/53 XK 61/63	SG-rosette T-form measuring grids at 90° to each other	Specially suitable for tensile and coin pression rods. The mutually perpendicular grids measure longitudinal strain(positive signal) and transverse strain (negative signal). Less expensive, since the half-bridge can be installed in a single working step.
XK 11/13 XK 21/23	SG-rosette V-form "Firtree", measuring grids are each at 45° to axis of symmetry	Special for torsion shafts and shear beams. The measuring grids are aligned with the direction for principal strain. Less expensive, since the half-bridge can be installed in a single working step.
MK 11 MK 21	Diaphragm rosette	Specially designed for diaphragm-type pressure transducers. Less expensive, since the full bridge can be installed in a single working step.

جدول 1: انواع مختلفی از گیج های شرکت HBM برای کاربردهای مختلف

پایه های اتصال گیج ها:

تمامی استرین گیج های موجود در بازار معمولا از نظر اتصالات، در دو نوع عرضه می شوند که عبارت اند از:

1- استرین گیج هایی به همراه سیم های اتصالات لحیم شده به آن و پوشش محافظ روی آن

2- استرین گیج هایی با پدهای لحیم کاری بدون پوشش محافظ

در کل، مورد اول استفاده عمومی بیشتری دارد. زیرا در این حالت نیازی به لحیم کاری خود گیج نسیت، در نتیجه اینجا دیگر از روغن لحیم که یکی از عوامل اصلی ناپایداری گیج می باشد(در صورتی که به طور کامل پاک نشود)، استفاده نمی شود. همچنین لحیم کاری گیج نیاز به رعایت یک سری اصول و قواعد دارد که با انتخاب این نوع گیج ها دیگر درگیر این موارد نیستیم.

همچنین پوشش محافظ روی این گیج ها، عملکرد گیج را پایدارتر می کند و از گریدهای اندازه گیری آن در مقابل آلودگی ها و آسیب های مکانیکی محافظت می کند.

با این حال گیج های نوع دوم نیز در مواردی که محدودیت فضا برای نصب وجود دارد، مورد استفاده قرار می گیرند.

طول گریدهای اندازه گیری:

طول گریدهای اندازه گیری گیج ها معمولا از 3 میلی متر تا 6 میلی متر در بازار موجود می باشد. این نوع گیج ها بیشترین استفاده را در مبدل ها دارند.

انتخاب طول گیج، بستگی به ابعاد عنصر ارتجاعی و همچنین مسیر کرنش دارد. اگر روی عنصر ارتجاعی، جایی که قرار است گیج آنجا نصب شود، فضای کافی موجود باشد، و کرنش نیز در این ناحیه یکنواخت باشد، استفاده از گیج هایی با طول 6 میلی متر ترجیح داده می شود. زیرا در این حالت استرین گیج میانگین کرنش را روی یک ناحیه بزرگ اندازه گیری می کند و اثرات تغییرات محلی مانند ذرات کثیف حین نصب، در خروجی کمتر می شود. اگر مبدل قرار است با ولتاژهای بیشتر از 10 ولت کار کند، در این صورت نیز لازم است که از گیج هایی با طول بزرگتر استفاده شود. زیرا این گیج ها گزمای ایجاد شده را به خاطر بزرگ بودن سطح مقطع آنها، بهتر دفع می کنند. گیج های 3 میلیمتری باید جایی نصب شوند که محدودیت فضا در نصب گیج های بزرگ وجود دارد. در کل اولویت استفاده از گیج هایی با طول گریدهای بلندتر می باشد و اگر به هر دلیلی نتوانیم از این گیج ها استفاده کنیم باید سراغ گیج هایی با طول کوتاه تر برویم.

مقاومت الکتریکی گیج:

گیج هایی با مقاومت الکتریکی پایین تر، کمتر تحت تاثیر تداخلات الکتریکی نسبت به گیج های با مقاومت اهمی بالاتر قرار می گیرند. اما گیج هایی که مقاومت الکتریکی بالایی دارند، توان تلف شده روی آنها کمتر است، در نتیجه گرمای ایجاد شده روی گیج کمتر می باشد. همچنین اثرات سیم های اتصال در این گیج ها کمتر است.

با توجه به توضیحات بالا، اولویت در انتخاب گیج هایی با مقاومت بالا می باشد، زیرا این گیج ها توان مصرفی پایینی دارند و در سیستم هایی که از باتری تغذیه می شوند، این موضوع اهمیت زیادی پیدا

می کند.

جبرانساز حرارتی:

مـواد از جملـه فلـزات در اثـر تغییـرات دمـایی دچـار انبسـاط و یـا انقبـاض مـی شـوند. هـر مـاده‌ای در فیزیـک یـک پـارامتری بـه نـام ضـریب انبسـاط حرارتـی دارد. مقـدار ایـن پـارامتر میـزان انبسـاط یـا انقباض ماده را برای تغییرات دمـایی معلـوم، مشـخص مـی کنـد. اسـترین گـیج هـایی کـه بـرای سـاخت مبدل ها به کار می رونـد، طـوری طراحـی و تولیـد مـی شـوند کـه بتواننـد اثـرات تغییـرات دمـایی را بـر روی عنصر ارتجـاعی ایجـاد مـی شـوند، جبـران کننـد. بـه ایـن نـوع از اسـترین گـیج هـا اصـطلاحا گـیج های خود-جبران ساز حرارتی گفته می شود.

چون ضـریب انبسـاط حرارتـی بـرای مـواد مختلـف، متفـاوت مـی باشـد، معـولا سـازندگان اسـترین گـیج ها، کدهای حرارتی مختلفی برای گیج هـای خـود در نظـر مـی گیرنـد، کـه هـر یـک از ایـن کـدها بـرای ماده‌ای با جنس مشخص مناسـب مـی باشـد. بنـابراین متناسـب بـا جـنس مـواد بـه کـار رفتـه در عنصـر ارتجاعی، باید کد حرارتی مناسب آن انتخاب شود.

جبران ساز خزش:

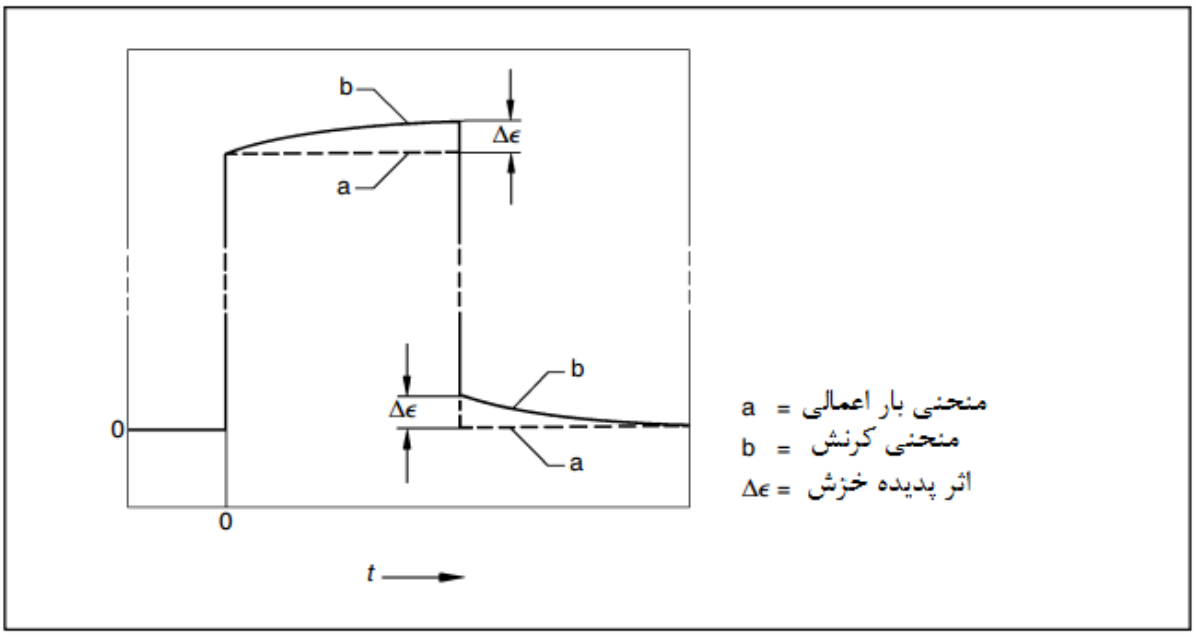
همه مواد بکار رفتـه در عنصـر ارتجـاعی، پدیـده خـزش را تجربـه مـی کننـد. یعنـی بعـد از تغییـرات بـار مکانیکی آنی در عنصـر ارتجـاعی، همچنـان عنصـر ارتجـاعی بـه صـورت آهسـته مقـداری کـرنش (مثبـت یا منفی) را در طول یک دوره زمانی معین، از خود نشان می دهد.

از آنجایی که در انتخـاب جـنس عنصـر ارتجـاعی محـدودیت هـایی وجـود دارد، بنـابراین اثـر ایـن پدیـده در خروجی گیج باید جبران شود، و یا بایـد خطـایی کـه ایـن پدیـده بـه وجـود مـی آورد، تـا حـد امکـان کـاهش داده شـود. دسـت کـاری در گریـدهای انـدازه گیـری اسـترین گـیج، یکـی از ایـن روش هـا مـی باشد. امروزه استرین گیج های فویلی این امکـان را فـراهم کـرده انـد کـه رفتـار خـزش آنهـا حـین تولیـد طوری تنظیم شود که بتوانند خزش ایجاد شده در عنصر ارتجاعی را جبران کنند.

اثر خزش در عنصر ارتجاعی:

بـه عنـوان یـک قاعـده کلـی، تـنش هـای ایجـاد شـده در عنصـر ارتجـاعی مبـدل هـا بایـد در ناحیـه الاسـتیکی آن اتفـاق بیفتـد. بـه عنـوان مثـال اگـر یـک میلـه اسـتیل در ناحیـه الاسـتیکی خـود، تحـت بارهای مکانیکی کشسـانی قـرار بگیـرد، روی ایـن میلـه کـرنش هـای آنـی کـه مقـدار آنهـا توسـط قـانون هوک قابل محاسبه است، ظـاهر مـی شـوند. همزمـان بـا ریلکـس شـدن مـاده، ایـن کـرنش آنـی، بـا یـک کرنش دیگری که مقدار آن به طـور آهسـته بـا زمـان تغییـر مـی کنـد، همـراه خواهـد بـود. وقتـی بـار از روی میله برداشته شود، میله به همان میزانی که به صورت

آنی توسط بار اعمالی تغییر یافته بود، بـه حالـت قبلـی خـود بـاز مـی گـردد. چیـزی کـه بـاقی مـی مانـد، یک کرنش کوچک پسماند می باشـد کـه قـبلا در طـول زمـان بـه صـورت آهسـته ایجـاد شـده بـود. ایـن کرنش نیز به تدریج مقدارش کاهش مـی یابـد تـا میلـه بـه حالـت اولیـه اصـلی خـود بـاز گـردد. بـه ایـن پدیده "خزش الاستیک" می گویند. شکل زیر این پدیده را نشان می دهد.

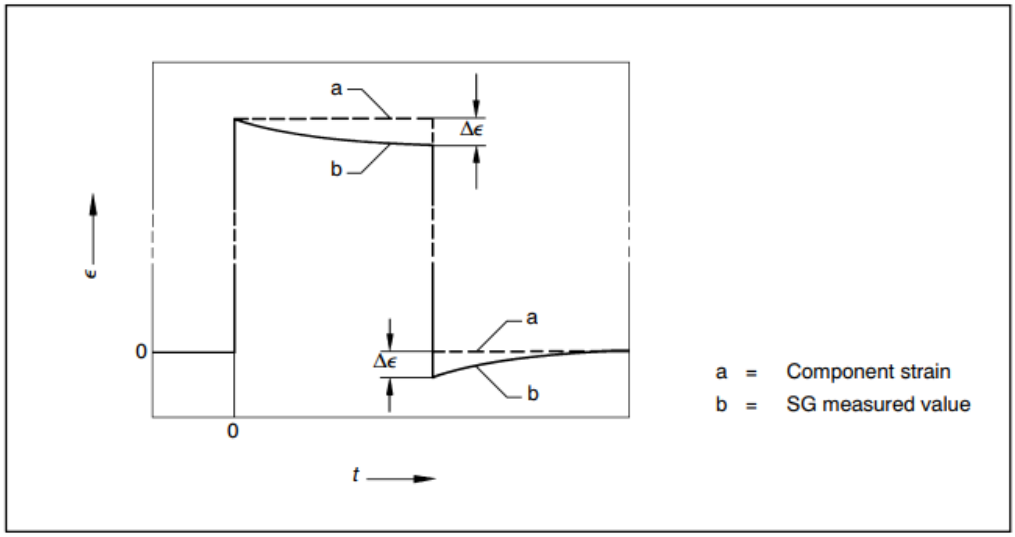


شکل 5: منحنی کرنش یک نوع المان زیر بار ثابت و بعد از برداشت کامل بار

همانطور که از شکل 5 مشـخص اسـت پدیـده خـزش الاسـتیک در عنصـر ارتجـاعی، یـک خطـای مثبـت وابسته به زمان ایجاد می کند.

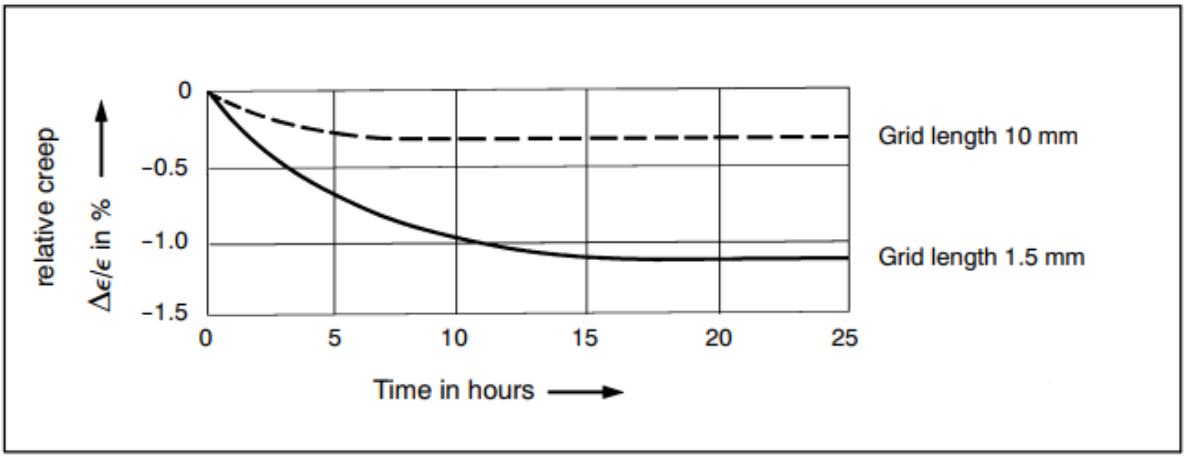
خزش در استرین گیج:

اگـر یـک اسـترین گـیج در معـرض یـک کـرنش اسـتاتیک قـرار بگیـرد، بـا وجـود کـرنش ثابـت روی آن، تغییـرات مقاومـت وابسـته بـه زمـان در آن مشـاهده خواهـد شـد. ایـن تغییـرات در خروجـی سـیگنال اندازه گیری شده در گیج تحـت بـار کشسـانی (یـا فشـاری)، بـه صـورت خیلـی آهسـته اتفـاق مـی افتـد. این پدیده یک خطای منفی وابسته به زمان در خروجی گیج ایجاد می کند (شکل 6).



شکل 6: خروجی اندازه گیری شده یک استرین گیج بعد از اعمال بار آنی به یک المان و بعد از حذف آنی بار از روی آن

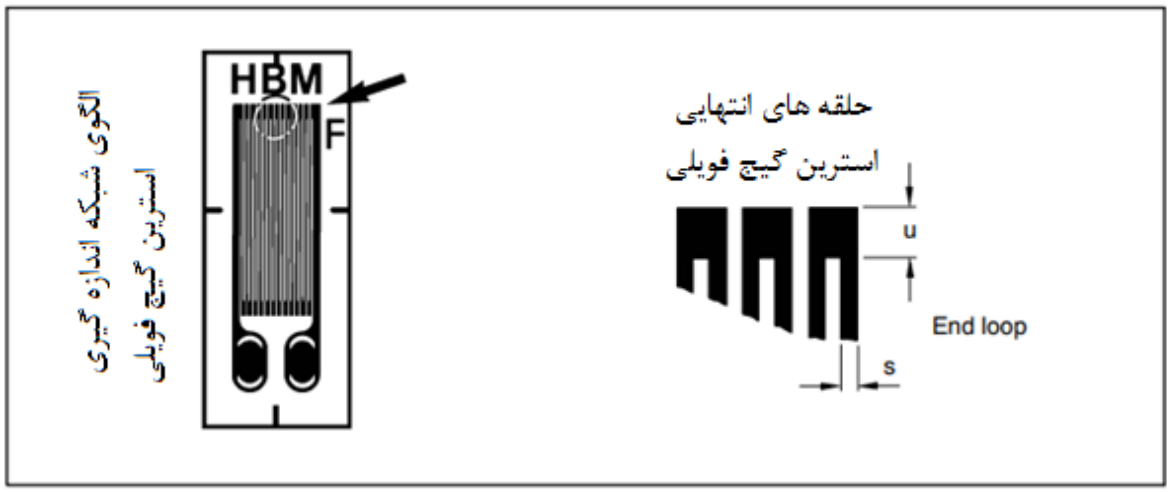
از آنجایی که این فرآیند در انتهای گریدهای اندازه گیری نیز اتفاق می افتد، اثر آن در گیج های با طول کوتاه تر بیشتر از گیج های با گریدهای بلندتر می باشد.



شکل 7: مثالی از منحنی خزش برای نوع استرین گیج با طول های مختلف

می توان با کنترل حلقه های انتهایی گیج، میزان خزش استرین گیج را کنترل کرد. چون مواد مختلف دارای ویژگی های خزش متفاوتی می باشند، بنابراین گیج ها هم در حین تولید با کدهای خزش مختلفی تولید می شوند. همانطور که در شکل 8 نشان داده شده است می توان با تغییر نسبت طول حلقه های انتهایی گریدهای گیج U به عرض گریدها S میزان خزش در استرین گیج را کنترل کرد.

وقتی صحبت از پدیده خزش در استرین گیج می کنیم، نباید فراموش کرد که این پدیده علاوه بر خود گیج به عوامل مهم دیگری نیز ارتباط دارد. به عنوان مثال یکی از این عوامل مهم نوع و ضخامت چسب مورد استفاده می باشد، علاوه بر این دما نیز در پدیده خزش خیلی مهم است.

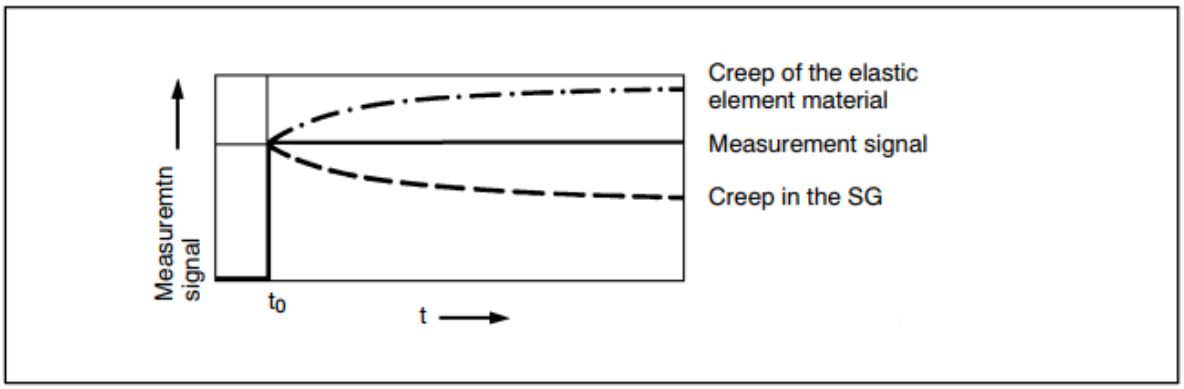


شکل 8: استرین گیج فویلی و حلقه های انتهایی آن

اثر جبران سازی خزش:

قبلا نشان داده شد کـه چطـور یـک اسـترین گـیج خطـای خـزش منفـی ایجـاد مـی کنـد، و دیـدیم کـه عنصر ارتجاعی نیـز خطـای خـزش مثبـت در خروجـی ایجـاد مـی کنـد. در حالـت ایـده‌آل مطـابق شـکل 9 این دو پدیده اثر هم دیگر را در خروجی خنثی می کنند.

از آنجـایی کـه ویژگـی هـای خـزش عنصـر ارتجـاعی را نمـی تـوان تغییـر داد، بنـابراین بایـد گیجـی را انتخاب کرد که نزدیکترین خزش را نسبت به خزش عنصر ارتجاعی دارد.



شکل 9: حالت ایده آل جبران خطای خزش

به عنوان یک قاعده اساسی، گیج هـایی کـه طـول حلقـه هـای انتهـایی آنهـا کوتـاه تـر اسـت خـزش آنهـا منفی تر، و گـیج هـایی کـه طـول حلقـه هـای انتهـایی آنهـا بلنـدتر اسـت، خـزش مثبـت تـر تولیـد مـی کنند.

از آنجایی که عوامل زیادی در ایجاد خطای خزش در مبدل وجود دارند، بنابراین تعیین مقدار خطای خزش

فقط به صورت عملی و از طریق اندازه گیری میسر است، بنابراین برای حذف خطای خزش، ابتدا باید استرین گیجی با کد میانی خزش روی عنصر ارتجاعی تست شود. از روی نتایج اندازه گیری، اگر خطای خزش اندازه گیری شده مثبت بود، باید سراغ گیج هایی رفت که نسبت به گیج نصب شده (انتخاب اول) خطای خزش منفی بیشتری دارد و بالعکس.

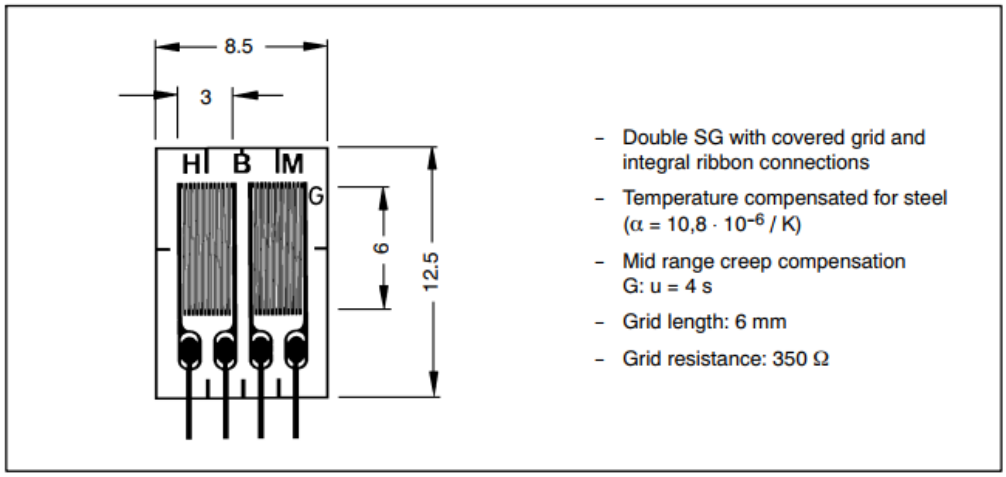
ملاحظات عملی انتخاب نوع استرین گیج:

مثال مبدل نشان داده شده در قبل، یک میله خمشی ساده بود. برای اندازه گیری میزان کرنش روی سطح بالایی و پایینی آن توسط تمام پل، نیاز به دو استرین گیج در هر طرف آن می باشد. در اصل تمامی گیج های خطی برای این کار مناسب می باشند. برای این مورد خاص می توانیم از گیج های دوبل استفاده کنیم. مزیت این گیج ها این است که با یک مرحله ، دو گیج به صورت هم زمان روی عنصر ارتجاعی نصب می شود، و این عمل به میزان قابل توجهی مدت زمان پروسه نصب گیج ها را کاهش می دهد.

چون در این مبدل فضای نصب کافی برای گیج ها وجود دارد و همچنین کرنش در ناحیه نصب گیج ها کاملا یکنواخت است، پس استرین گیجی را انتخاب می کنیم که طول گریدهای آن 6 میلی متر است و همچنین سیم های اتصال لحیم شده روی خود دارد.

جنس ماده عنصر ارتجاعی این مبدل، فولاد فنری با ضریب انبساط حرارتی $\alpha = 10.8 * 10^{-6}/K$ می باشد. برای استفاده از قابلیت اثر خود-جبران سازی دمای استرین گیج، باید گیجی که کد جبران سازی حرارتی آن با مقدار ضریب انبساط حرارتی عنصر ارتجاعی سازگار است، انتخاب شود.

در مثال مبدل ما نیاز چندانی برای بررسی دقیق و حذف خطای خزش وجود ندارد. با در نظر گرفتن موارد فوق گیج زیر از شرکت HBM برای این مبدل انتخاب می شود.



شکل 10 : گیج انتخاب شده برای مثال مبدل

بخش سوم

مراحل نصب استرین گیج

برای اندازه گیری کرنش های مکانیکی و همچنین تجربه دماها هم زمان با آن، نیاز است که استرین گیج ها، المان های بالانس و المان های جبران ساز حرارتی روی عنصر ارتجاعی چسبانده شوند.

اولین مرحله در پروسه نصب گیج ها و بقیه المان ها، آماده سازی سطح محل نصب گیج ها می باشد. مراحل حیاتی در این قسمت، پاک سازی و زبر کاری سطح نصب می باشد. برای نصب دقیق گیج ها در محل تعیین شده روی عنصر ارتجاعی، لازم است جهت های نصب قبلا علامت گذاری شوند. برای همین قبل از شروع کار باید نقشه نصب گیج ها و بقیه المان ها را داشته باشیم. در این نقشه باید محل دقیق نصب هر المان با در نظر گرفتن بقیه الزامات مشخص شده باشد. نحوه تعیین و موقعیت نصب المان ها قبلا توضیح داده شده است.

برای نصب گیج ها از هر چسبی که مناسب آن گیج باشد، می توان استفاده نمود. اما در ساخت مبدل ها معمولا از چسب های کوره ای استفاده می شود، زیرا این چسب ها پایداری طولانی مدت خوبی را دارا می باشند.

اگر از گیج های Open-face استفاده شود، باید بعد از نصب گیج، یک لایه نازکی از چسب روی گیج نیز اعمال شود. این پوشش محافظ چسبی، تکرارپذیری رفتار خزش را بهبود می بخشد و در عین حال گریدهای حساس و ظریف گیج توسط یک پوشش محافظ اولیه، پوشش داده می شوند. در این مرحله چسب نباید روی پدهای لحیم کاری گیج برخورد کند.

نحوه نصب المان های بالانس و جبران ساز حرارتی:

مراحل نصب این المان ها تفاوتی با نصب گیج های اصلی ندارد. در اینجا می توان از همه چسب هایی که برای نصب المان های مورد نظر مناسب می باشند، استفاده کرد. سخت گیری هایی که در نصب با کیفیت گیج های اصلی باید رعایت شوند، اینجا الزامی نیستند، چون این المان ها قرار نیست کرنش را اندازه گیری کنند. برای همین جایگذاری دقیق آنها در حین نصب هم از حساسیت بالایی برخوردار نیست.

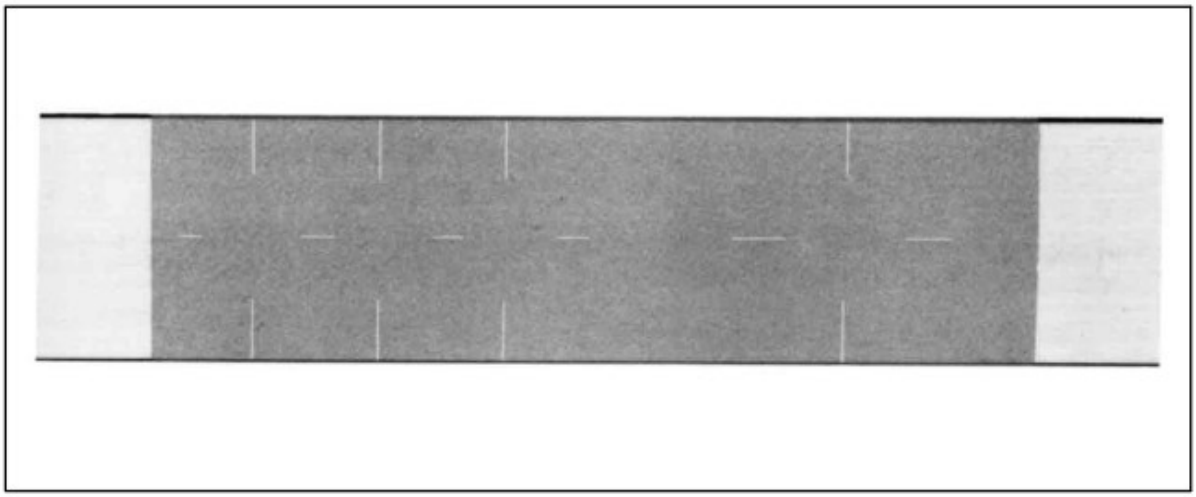
در نصب این المان ها باید دقت شود که چسب به گریدهای آنها برخورد نکند. زیرا چسب عمل بالانس و جبران سازی را تحت تاثیر خود قرار می دهد.

در اینجا ما برای مثال مبدل خودمان، از چسب Z70 پخت سریع، شرکت HBM استفاده می کنیم. گیج های اصلی به همراه بقیه المان ها، همگی توسط این چسب روی عنصر ارتجاعی چسبانده شده اند.

وقتی جهت های نصب گیج در موقعیت های آنها، روی عنصر ارتجاعی علامت گذاری می شود، باید دقت شود که در حین این کار خراش های قابل توجهی در محل نصب گیج ها ایجاد نشود. اگر این اتفاق بیفتد

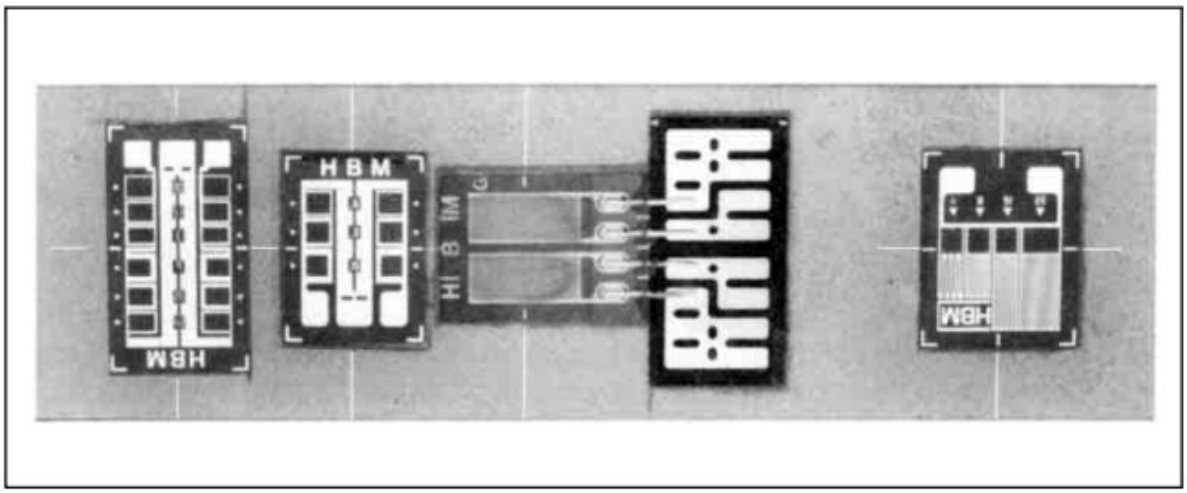
ممکن است مبدل وقتی در معرض بارهای دینامیکی قرار می گیرد، صدمه ببیند.

وقتی با استرین گیج های Open-face کار می کنید، مطمئن شوید که نوک پنس با گریدهای حساس گیج برخورد نداشته باشد.

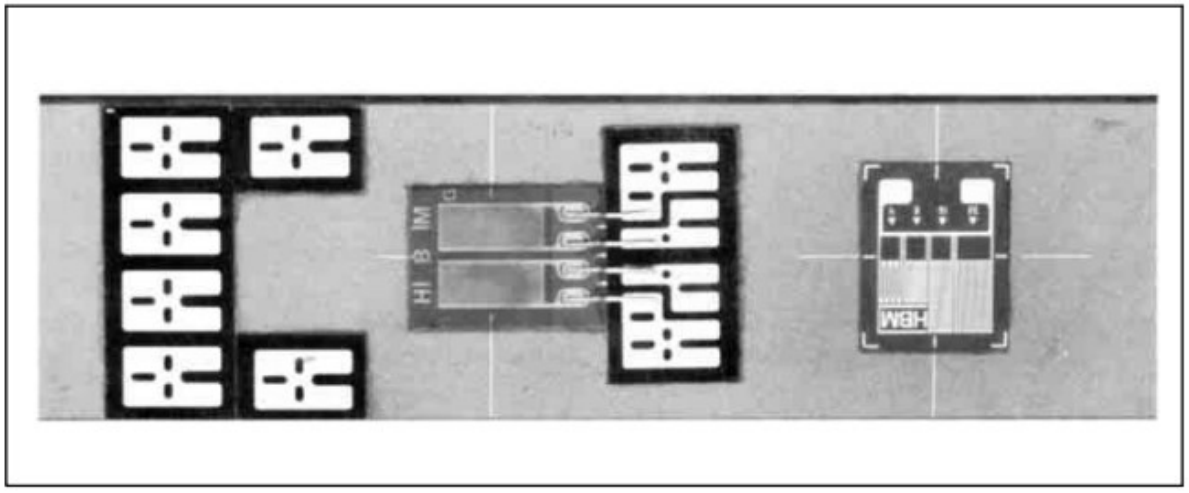


شکل 1: عنصر ارتجاعی که برای نصب المان ها آماده شده است

شکل های 2 و 3 سطح بالایی و پایینی عنصر ارتجاعی را که گیج های اصلی و بقیه المان ها روی آن نصب شده است، نشان می دهند.



شکل 2: سطح بالایی عنصر ارتجاعی

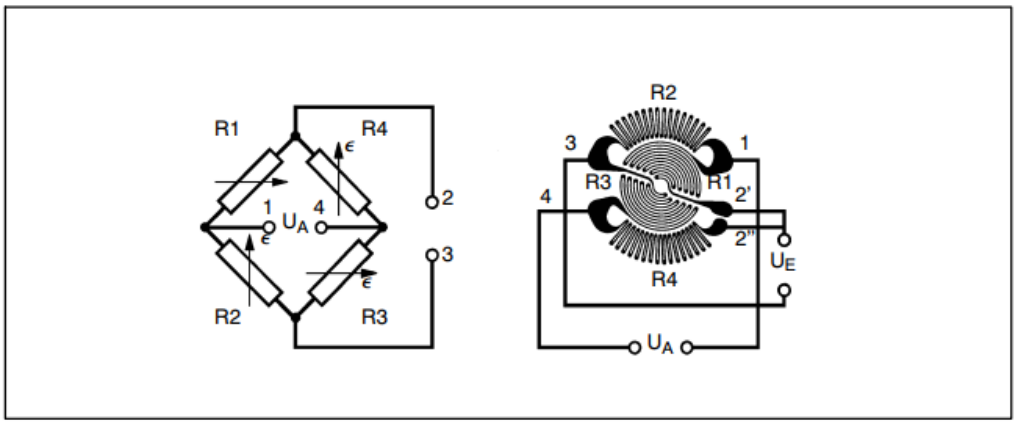


شکل 3: سطح پایینی عنصر ارتجاعی

آرایش مداری:

اگر دقت هایی بالاتر از 1 تا 2% عدم قطعیت اندازه گیری برای مبدل مورد نظر باشد، حتما باید گیج های اندازه گیری به صورت مدار پل وتستون بسته شوند. این آرایش مداری نه تنها حساسیت خروجی زیادی را بدست می دهد، بلکه به همراه استرین گیج های خود-جبرانساز حرارتی، عمل جبران سازی انبساط های حرارتی عنصر ارتجاعی را به خوبی انجام می دهد. با این حال باید توجه شود که این مدار نمی تواند اثرات عدم تقارن های مقاومتی مانند مقاومت سیم های اتصال در بازوهای مختلف را جبران کند. بنابراین باید به موضوع تقارن مقاومتی پل، اعم از مساوی بودن طول سیم های اتصال در بازوهای پل و دیگر موارد آن توجه ویژه ای کرد.

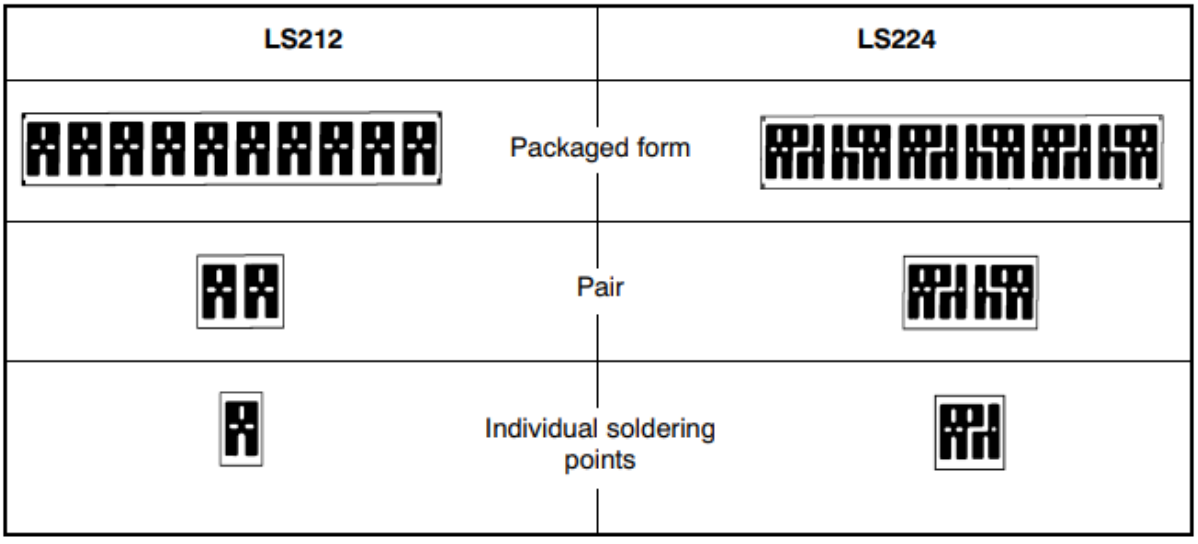
وقتی از روزت هـای دیـافراگمی اسـتفاده مـی شـود، مشـکل عـدم تقـارن مقـاومتی در ایـن حالـت وجـود ندارد. زیرا روزت قبلا به صورت تمام پل سیم بندی شده است.



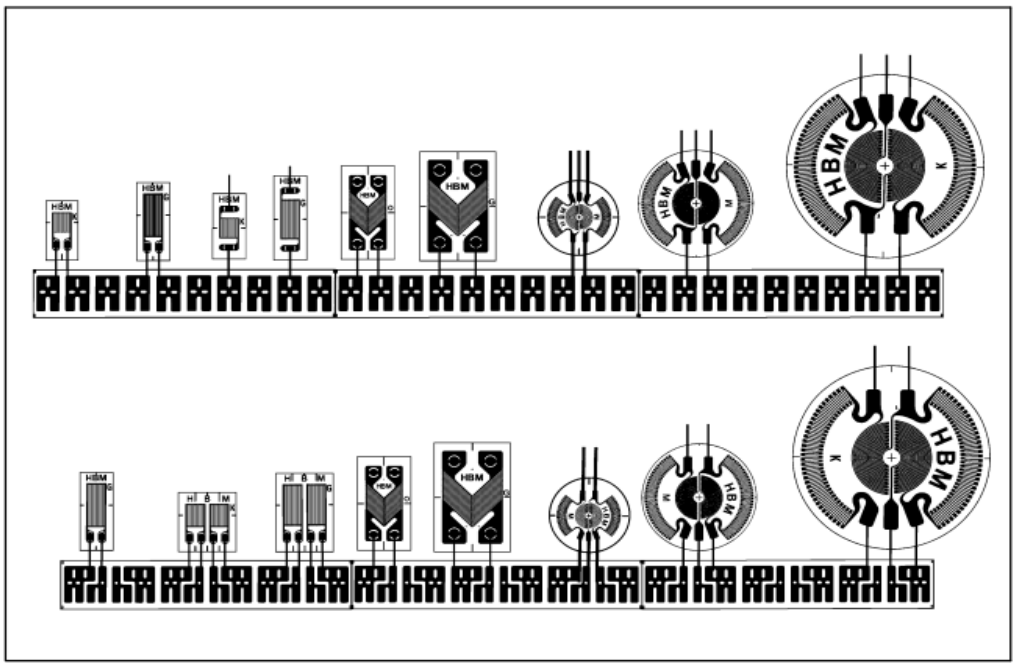
شکل 4: آرایش مداری روزت دیافراگمی

پدهای اتصال:

پدهای اتصال المان هـای مهمـی جهـت اتصـال اسـترین گـیج هـا، المـان هـای بـالانس و جبرانسـازها بـه مدار پل وتستون می باشند. اهمیـت آنهـا زمـانی کـه از گـیج هـای لحـیم شـده (سـیم هـای اتصـال گـیج ها قبلا توسط سـازنده آن لحـیم شـده اسـت) اسـتفاده مـی شـود، بـه خـوبی نمایـان اسـت. آنهـا در ایـن موارد به همراه استرین گیج هـا بایـد نصـب شـوند، تـا از ایجـاد مشـکلات اتصـال کوتـاه بـین سـیم هـای گـیج کـه ممکـن اسـت برخـی از آنهـا بـه بدنـه عنصـر ارتجـاعی اتصـال داشـته باشـند، جلـوگیری شـود. شکل 5 مجموعه ای از پدهای اتصال را که برای مبدل ها طراحی شده اند، نشان می دهد.



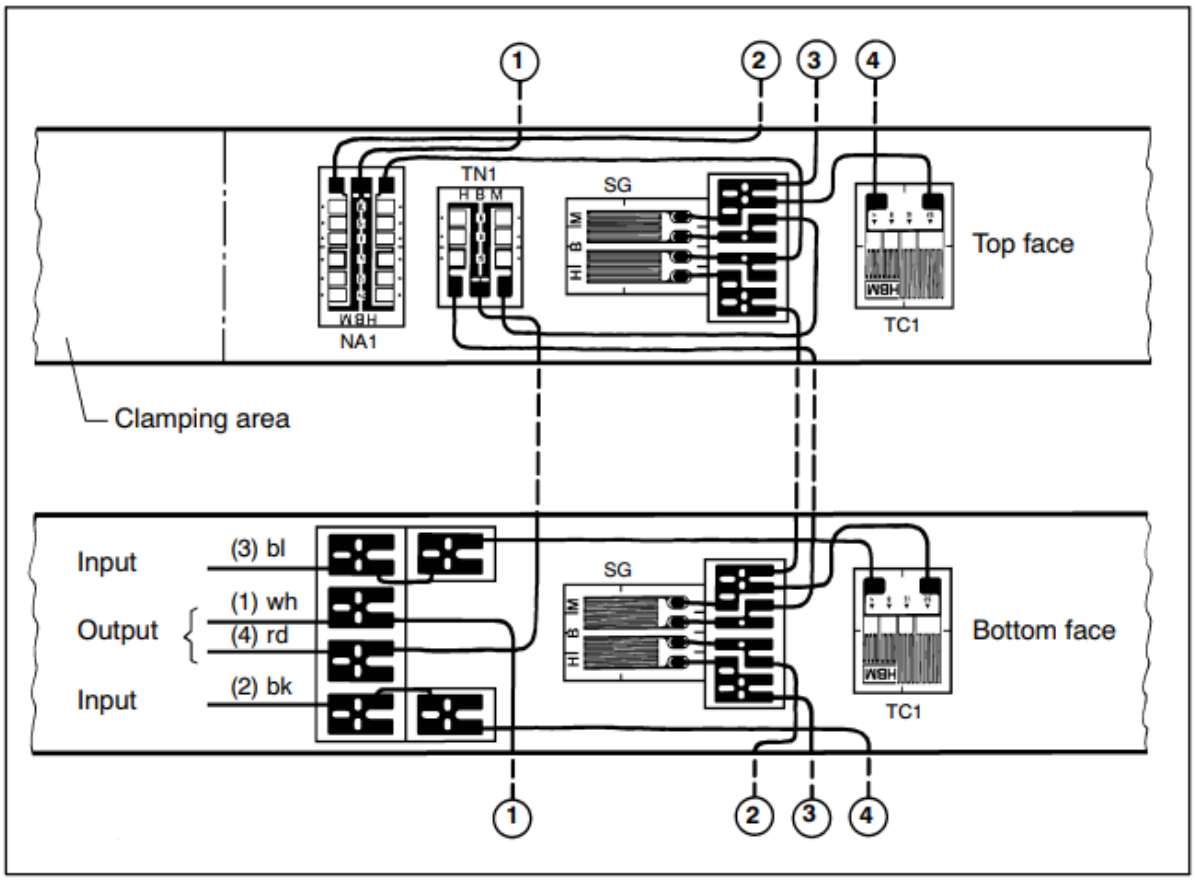
شکل 5: انواع مختلف پدهای اتصال مخصوص مبدل ها



شکل 6: مثالی از ترکیب پدهای اتصال

ملاحظات عملی سیم بندی مبدل:

برای سیم بندی مبدل، بهتر است قبل از انجام این کار، شماتیک و نقشه سیم بندی را در دست داشته باشیم. شکل 7 دیاگرام سیم کشی برای مثال مبدل خودمان را نشان می دهد. این دیاگرام علاوه بر مشخص کردن محل دقیق المان ها و تعداد آنها، باید مسیرهای سیم کشی را نیز نشان دهد.



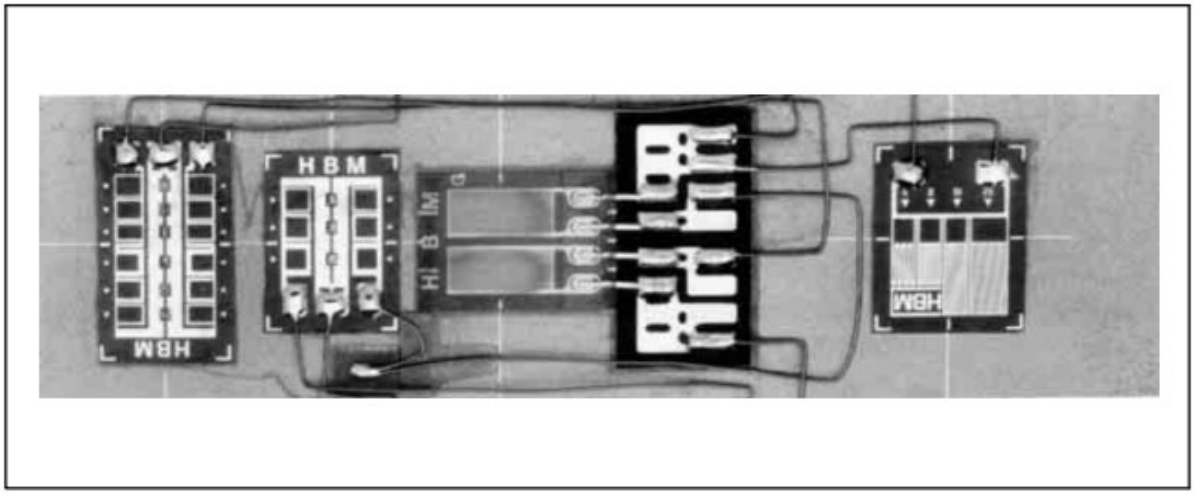
شکل 7: دیاگرام سیم بندی برای مثال مبدل

با توجه به دیاگرام سیم بندی مبدل، اتصالات منحصر به فردی باید صورت گیرد. سیم های اتصال در هر نصفه از بازوهای پل(R_1 و R_2 : R_3 و R_4) باید طول های یکسانی باهم داشته باشند. اگر از سیم لاکی جهت اتصالات مداری مبدل استفاده می شود، این سیم ها نباید از لبه های تیز عبور داده شوند. زیرا احتمال از بین رفتن عایق آنها و ایجاد اتصال کوتاه در مدار وجود دارد.

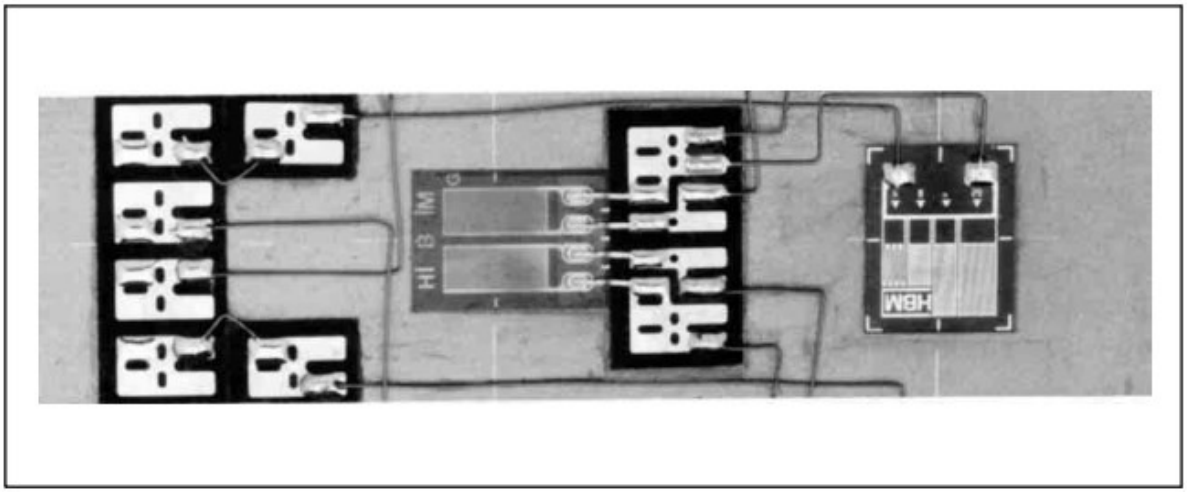
بعد از سیم کشی اتصالات مدار، بهتر است آنها با چسب های مخصوص روی عنصر ارتجاعی چسبانده شوند.

مثلا برای این کار می توان از همان چسب Z70 که برای چسباندن گیج ها هم به کار گرفته شد، استفاده کرد.

در شکل های زیر سطح بالایی و پایینی مبدل بعد از سیم کشی کامل آن نشان داده شده است.



شکل 8 : سطح بالایی عنصر ارتجاعی که به صورت کامل سیم کشی آن انجام شده است.



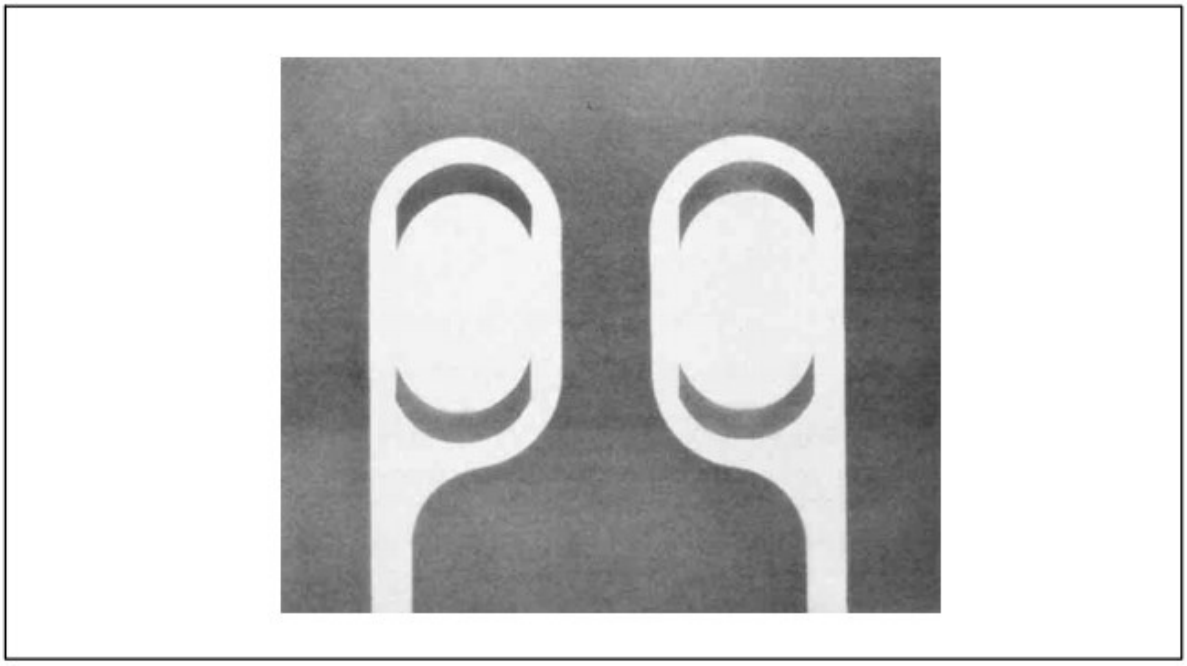
شکل 9 : سطح پایینی عنصر ارتجاعی که به صورت کامل سیم کشی آن انجام شده است.

نکاتی راجع به لحیم کاری پدهای استرین گیج های Open-face:

برای اطمینان از لحیم کاری درست پایه هایی که به سختی لحیم کاری شده اند، نیاز است که این پایه ها زیر یک میکروسکوپ بررسی شوند. پایه اتصال نباید لحیم سرد داشته باشد و همچنین سیم لحیم باید به صورت منسجم روی پدها لحیم کاری شده باشد. دمای لحیم کاری در این مرحله نباید بیشتر از 300 درجه تجاوز کند. در غیر این صورت ممکن است به پدهای لحیم کاری گیج در اثر حرارت زیاد صدمه وارد شود. همچنین برای لحیم کاری پدهای گیج ها نباید زیاد از روغن لحیم استفاده کرد. زیرا اگر روغن لحیم به خوبی پاک نشود باعث ناپایداری سیگنال خروجی می شود.

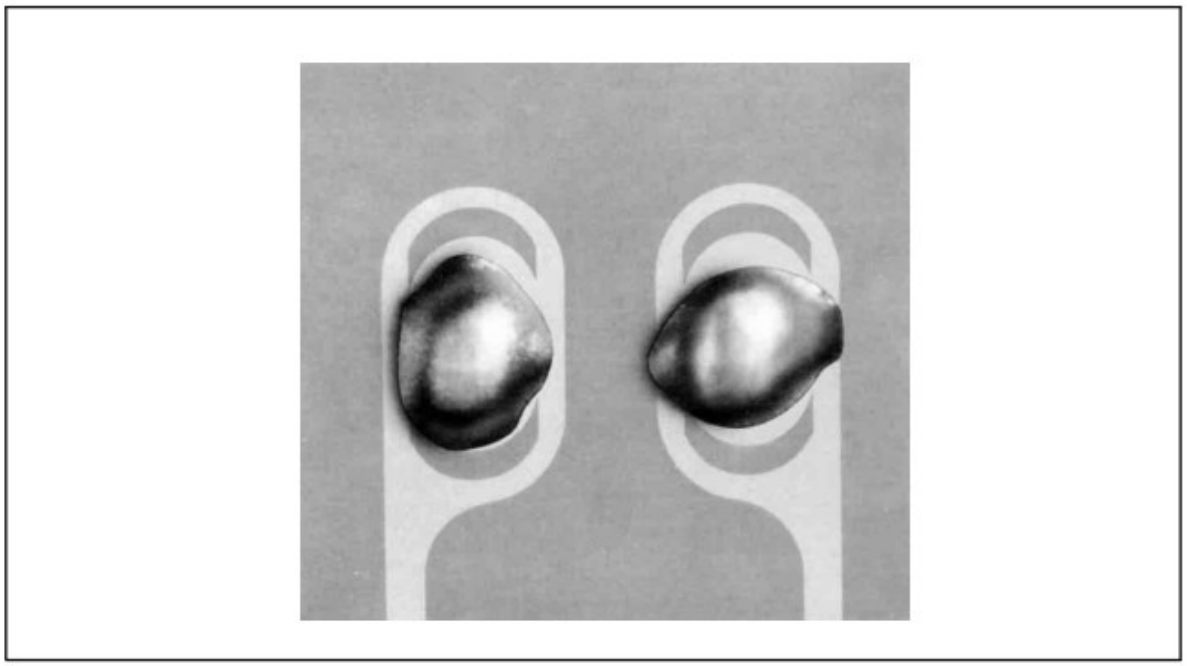
پـدهای لحـیم گـیج هـا همـانطور کـه در شـکل 10 نشـان داده شـده اسـت، در بسـته بنـدی کارخانـه، معمـولا کـاملا تمیـز هسـتند و قابلیـت لحـیم کـاری روی آنهـا وجـود دارد. بـا ایـن حـال جهـت لحـیم کاری آسان و همچنین

جهـت جـذب بهتـر سـیم لحـیم روی پـدهای اتصـال، بهتـر اسـت پـدهای لحـیم کـاری گـیج هـا انـدکی ساییده یا زبر شوند. سپس این پدها باید توسط مواد مخصوص و حلال ها دوباره تمیز شوند.



شکل 10: پدهای لحـیم کـاری اسـترین گـیج، ایـن پـدها طـوری طراحـی شـده انـد کـه از سـرازیر شـدن لحـیم بـه طـرف گریدهای اندازه گیری جلوگیری می شود.

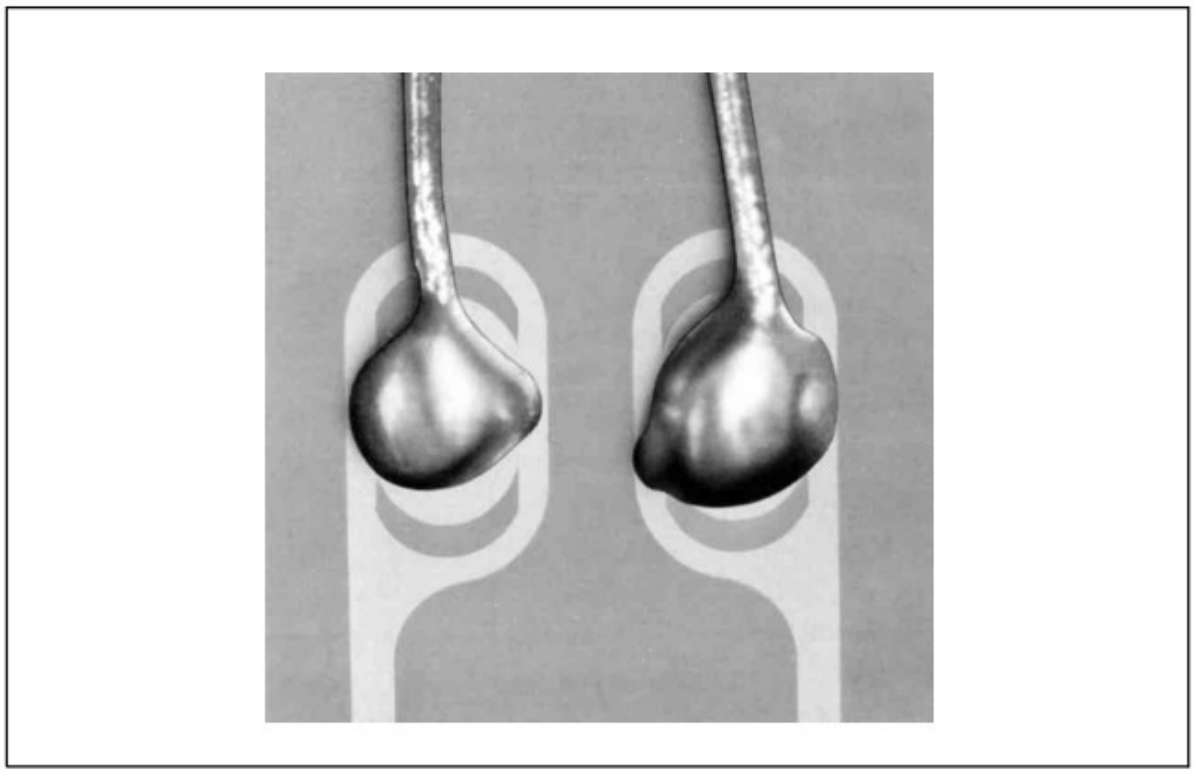
بعد از انجام این کار، پدهای گیج بایـد بـا سـیم لحـیم قلـع انـدود شوند(شـکل 11). در ایـن مرحلـه بایـد دقت شود که بیش از حد سیم لحیم به پدها اعمال نشود.



شکل 11: پدهای قلع اندود شده گیج

دمای 300 درجه لحیم کاری نباید بیشتر از یک ثانیه به پدهای گیج اعمال شود.زیرا اگر مدت زمان اعمال حرارت بیشتر از این حد باشد، باعث ذوب ماده حامل زیر پدهای لحیم کاری می شود و عملا پد گیج با بدنه عنصر ارتجاعی اتصال کوتاه می شود.

قبل از لحیم سیم های اتصال یا کابل ها، ابتدا باید نوک این سیم ها قلع اندود شوند. لحیم کاری سیم های اتصال باید سریع صورت گیرد تا آسیبی به گیج در اثر حرارت زیاد وارد نشود. برای لیحم کاری این سیم ها، نوک قلع اندود شده آنها روی پد اتصال گیج که قبلا لحیم شده است، قرار می گیرد سپس به مدت کوتاهی نوک هویه روی سیم اتصال گرفته می شود و به این ترتیب سیم های اتصال لحیم می شوند. شکل 12 نمونه کامل را بعد از لحیم کاری صحیح آن نشان می دهد.



شکل 12: تصویر کامل لحیم کاری سیم های اتصال به پدهای استرین گیج

بعد از انجام مراحل لحیم کاری، پایه های اتصال و همچنین اطراف آنها باید به خوبی تمیز شوند تا اثری از روغن لحیم و یا مایع فلکس نباشد. مقاومت الکتریکی بین پایه های اتصال گیج و عنصر ارتجاعی، حداقل باید بزرگتر از 2000MΩ باشد. فلکس باقی مانده می تواند به همراه رطوبت باعث کاهش این مقاومت الکتریکی شود و یا خروجی را به خاطر تغییرات مقاومت ناپایدار کند.

بخش چهارم

عملیات بالانس و جبرانسازی

عملیات بالانس و جبرانسازی نقش بسیار مهمی در دستیابی به مشخصات فنی مطلوب در مبدل ها دارند. این عملیات که در این بخش به جزئیات آنها خواهیم پرداخت، عبارت اند از:

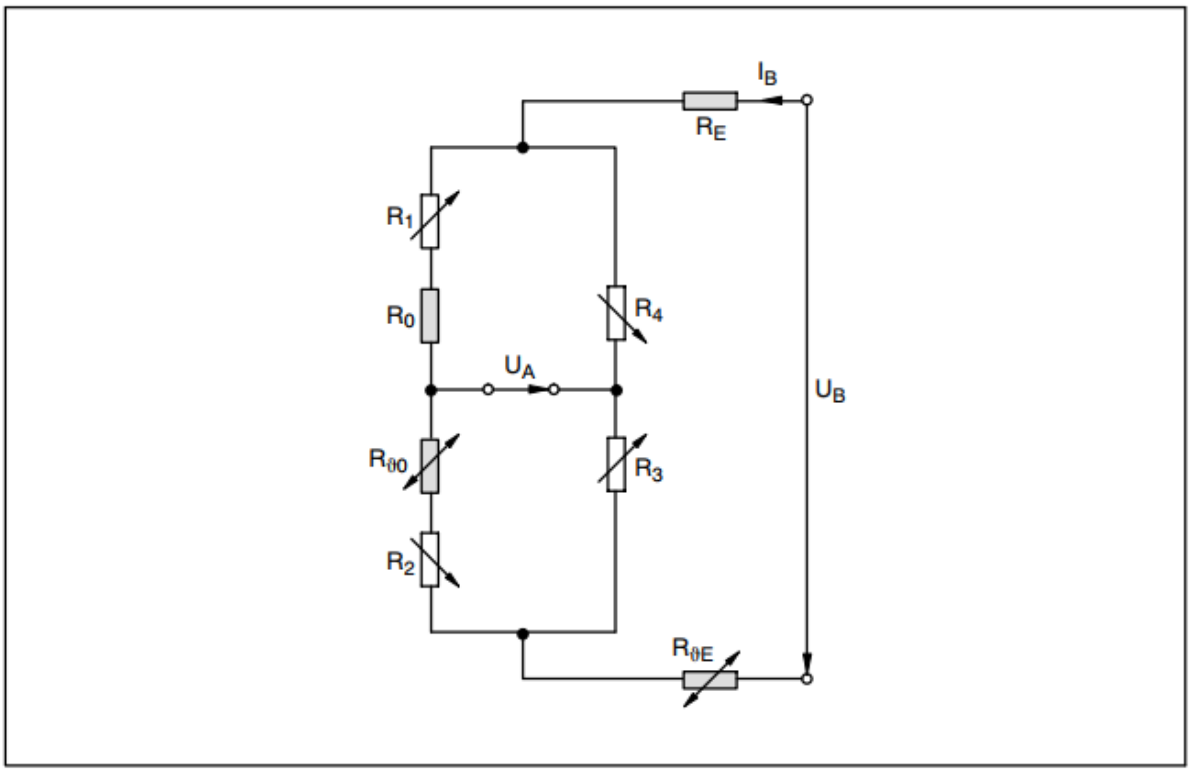
- جبران سازی خطای حرارتی در مدار پل وتستون، و همچنین جبران سازی خطای حرارتی نقطه صفر مبدل (TC_0).

- تصحیح نامتعادلات مقاومتی در مدار پل وتستون، و همچنین جبران یا بالانس نقطه صفر پل وتستون

- جبران وابستگی های حرارتی حساسیت خروجی مبدل، و همچنین جبران دمایی خود حساسیت (TC_C).

- حساسیت و مقدار نامی بالانس مبدل

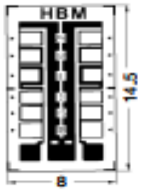
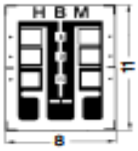
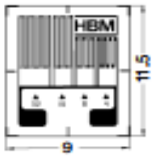
برای انجام عملیات بالا در عمل، نیاز به اضافه کردن مقاومت های ثابت و حساس به دما در مدار پل وتستون ویا به صورت سری در خطوط تغذیه می باشد. شکل 1 مدار پایه‌ای یک مبدل را با در نظر گرفتن این مقاومت ها نشان می دهد.



شکل 1: دیاگرام مداری پایه برای مبدل هایی که از استرین گیج استفاده می کنند

مقاومت های بالانس و جبران سازی:

جبران سازها و مقاومت های بالانس برای طراحی های عملی اهمیت ویژه ای دارند. شبکه های مقاومتی به همان روش استرین گیج ها، به سادگی قابل استفاده در مبدل ها هستند. بخش های بعدی نحوه استفاده این مقاومت ها را نشان می دهد و جدول 1 انواع مختلفی از آنها را به همراه مشخصات فنی آنها نشان می دهد. این جدول برای شرکت HBM می باشد.

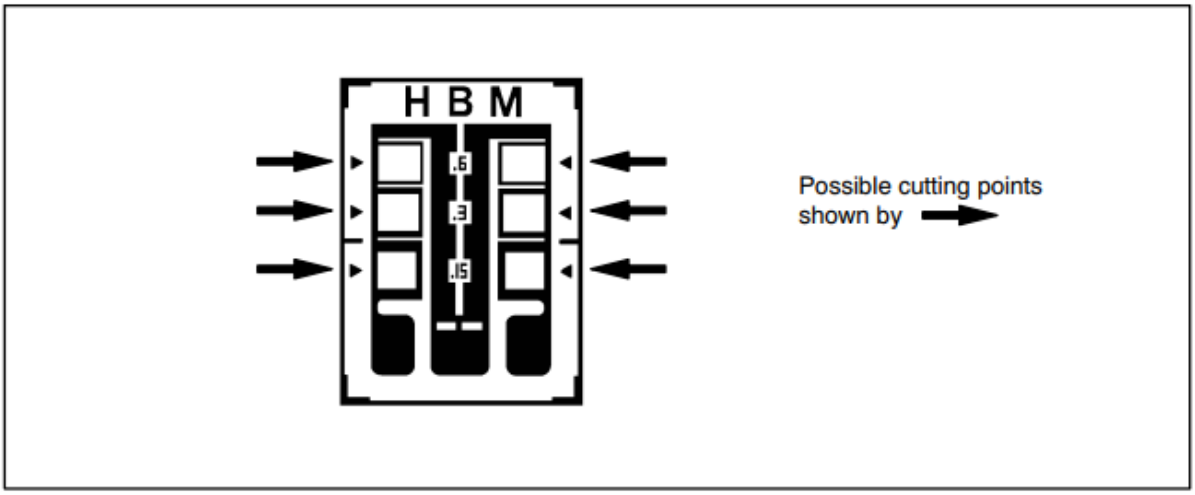
Designation	Adjustable foil resistors		
	for zero point balancing	for temperature compensation of the zero point	for temperature compensation of sensitivity
Type	NA1 6/4, 73	TN1 3/1,05	TC 1 4/60
Design (magnified)			
Resistor material	Constantan alloy	Nickel	Nickel
Temp. coeff. of the resistor (+20 °C...+70 °C)	–	$5{,}0 \cdot 10^{-3}$ / °C	$5{,}0 \cdot 10^{-3}$ / °C
Maximum resistance [Ω]	4,73 (per half)	1,05 (per half)	60
No. of stages	6 (per half)	3 (per half)	4
Individual resistance in steps Resist. tolerance [Ω]	2,4 1,2 0,6 0,3 0,15 0,08 ± 20 %	0,6 0,3 0,15 ± 20 %	32 16 8 4 ± 20 %
Special features	Resistance values can be set by cutting the conducting paths. Binary incrementing of the settable resistance values. Explicit marking of all resistance values on the elements. Symmetrical, double structure with three connections to link onto bridge corner points, so allowing balancing or compensation in positive and negative direction.		
Achievable	Zero point balancing to approx. 0.0285 mV/V or 57 µm/m (smallest resistance step: 0.08 Ω ≙ 114 µm/m)	TC0 error can be compensated to approx. 0.15 % / 10 K relative to 2 mV/V or 4000 µm/m (at smallest resistance step: 0.15 Ω ≙ 11 µm/m/10 K)	TC_C error in steel or aluminum elastic elements can be compensated to approx. 0.03 % / 10 K (at smallest resistance step: 4 Ω ≙ 2.3 µm/m/10 K)

جدول 1: المان های بالانس و جبران ساز شرکت HBM

نحوه تنظیم مقادیر مقاومت ها:

آرایش و ساختار شبکه های مقاومتی این اجازه را به کاربر می دهد که مقدار آن را به راحتی و با اطمینان تنظیم کند. روش کار برای هر سه المان مشابه هم می باشد. با برش های مکانیکی، مقاومت خروجی این المان ها تغییر می کند، و می توان مقدار دلخواه را با برش های خاص ایجاد و از آنها در پل وتستون

استفاده کرد. نقاط برش همانطور که در شکل 2 نشان داده شده است، توسط فلش هایی مشخص شده است.



شکل 2: شبکه مقاومتی فویلی قابل تنظیم برای جبران اثر حرارتی نقطه صفر مبدل

جبران سازی خطای حرارتی نقطه صفر پل وتستون(TC_0):

ایـن خطـای حرارتـی تـاثیر مسـتقیمی بـر روی پایـداری نقطـه صـفر مبـدل دارد. از ایـن رو بـه آن "ضـریب حرارتـی نقطـه صـفر(Temperature Coefficient of zero point)" نیـز گفتـه مـی شود. برای حذف این خطا ابتدا باید منشا ایجاد آن را بدانیم.

برخلاف حالت های ایده آل تئوری پـل وتسـتون متقـارن کـه تـاثیر پـذیر از تغییـرات دمـایی نیسـت، در عمل خروجی نقطه صفر پـل نشـان داده اسـت کـه وابسـتگی هـایی بـه دمـای محـیط اطـراف خـود دارد. این وابستگی های دمـایی بـه دلیـل وجـود مقاومـت هـای حسـاس بـه دمـای نامتقـارن، در بازوهـای پـل می باشد. حتی با عمل کردن دقیق هم ،این عـدم تعـادل هـا را نمـی تـوان از بـین بـرد. دلایـل ایـن ادعـا عبارت اند از:

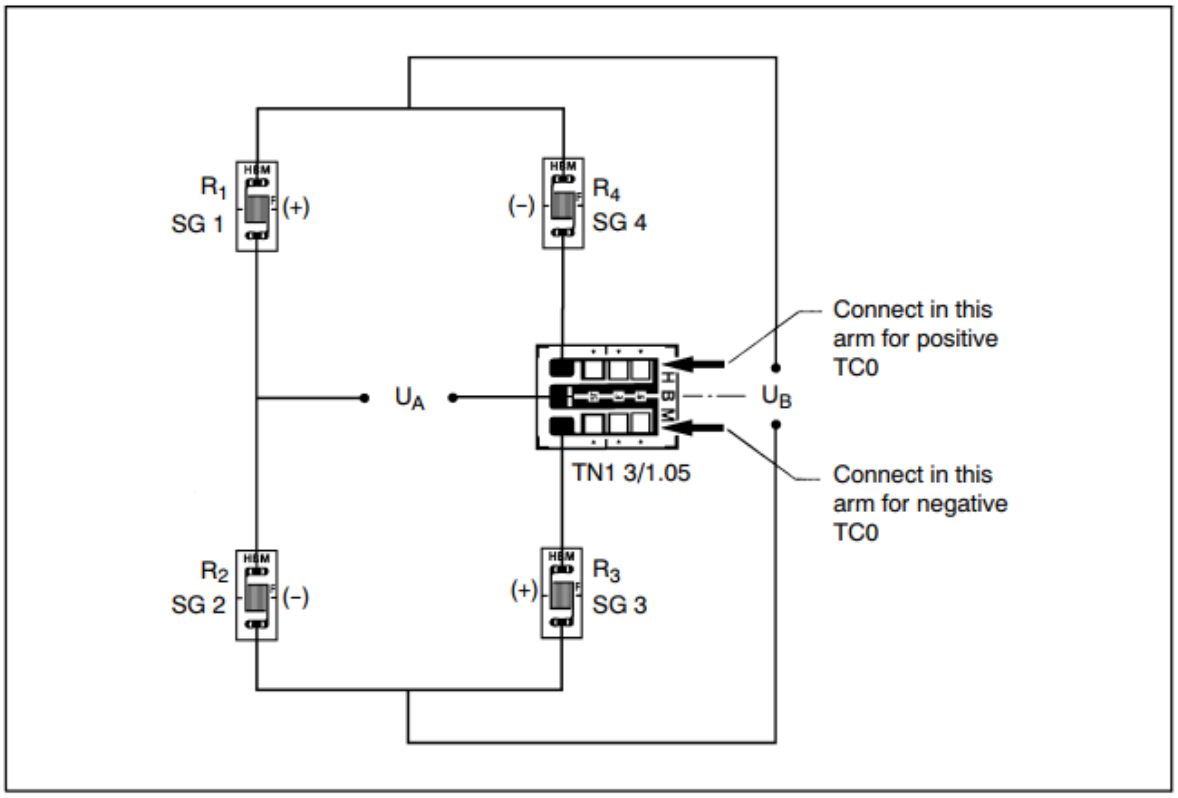
- تفاوت در اندازه و طول سیم های اتصال در بازوهای مختلف پل وتستون

- حتـی در اسـترین گـیج هـای بـا دقـت بـالا، تفـاوت انـدکی در مشخصـات حرارتـی آنهـا وجـود دارد. یعنی دو گیج عینا ویژگی های حرارتی یکسانی را ندارند.

اگر دقت های اندازه گیـری بـالایی نیـاز باشـد، مـی تـوان خطاهـای گفتـه شـده در بـالا را بـه طـور قابـل توجهی از خروجـی مبـدل حـذف کـرد. ایـن کـار بـا اضـافه کـردن یـک مقاومـت حسـاس بـه حـرارت در بازوهای پـل انجـام مـی شـود. میـزان تغییـرات مقاومـت ایـن المـان حسـاس بـه حـرارت بایـد بـه حـدی باشـد کـه بتوانـد عـدم تقـارن ایجـاد شـده توسـط حـرارت را در خروجـی پـل جبـران کنـد. مطـابق بـا تئوری مدار پل، تغییرات مقاومت در بازوهای

مجاور پل با علامت های یکسان، اثرات آنها را از هم کم می کند و اگر این تغییرات دقیقا از نظر دامنه یکسان باشند، اثر آنها در خروجی حذف می شود.

یک روش ساده برای جبران این خطا، استفاده از مقاومت های فویلی قابل تنظیم حساس به دما می باشد. نحوه قرار گرفتن این مقاومت در مدار پل، در شکل 3 نشان داده شده است.



شکل 3: نحوه قرار گرفتن مقاومت جبران ساز اثر حرارتی نقطه صفر فویلی در مدار پل وتستون

الان نوبت محاسبه مقدار این مقاومت می باشد. برای محاسبه مقدار این مقاومت ابتدا باید خطای حرارتی مبدل در محدوده دمایی کاری آن اندازه گیری شود.

بستگی به ابزارهای اندازه گیری، خطای حرارتی می تواند در واحد های mV/V یا $\mu m/m$ اندازه گیری شود.

در مرحله اول مقدار مقامت R_{TN1} که قرار است در پل قرار داده شود، از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$R_{TN1} = 4 \cdot \frac{U_O}{U_B} \cdot \frac{R_{SG}}{\Delta\vartheta \cdot TC_{TN1}} \qquad (1)$$

رابطه (2) از رابطه (1) مشتق گرفته شده است:

$$\frac{U_O}{U_B} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta R_\vartheta}{R_{SG}} \qquad (2)$$

که در آن:

$$\Delta R_\vartheta = \alpha \cdot R_0 \cdot \Delta\vartheta$$

$$\Delta R_\vartheta = TC_{TN1} \cdot R_{TN1} \cdot \Delta\vartheta \qquad (3)$$

مـی باشـد. وقتـی خطـای حرارتـی بـه صـورت $\mu m/m$ انـدازه گیـری شـود، مقـدار R_{TN1} از رابطـه زیـر قابل محاسبه است.

$$R_{TN1} = 2 \cdot \frac{\epsilon \cdot R_{SG}}{\Delta\vartheta \cdot TC_{TN1}} \qquad (4)$$

روابط زیر از رابطه (4) مشتق گرفته شده است:

$$\frac{\Delta R_\vartheta}{R_{SG}} = k \cdot \epsilon \approx 2 \cdot \epsilon$$

$$\Delta R_\vartheta = 2 \cdot \epsilon \cdot R_{SG} \qquad (5)$$

در روابط بالا

R_{TN1} : مقدار مقاومت جبران ساز اثر دما که باید در بازوهای پل قرار داده شود.

R_{SG} : مقدار مقاومت اهمی استرین گیج بر حسب Ω

R_0 : مقدار مقاومت اصلی در دمای مرجع بر حسب Ω

ΔR_ϑ : میزان تغییر مقاومت در اثر تغییرات دما بر حسب Ω

TK_{TN1} : ضریب حرارتی مقاومت جبران ساز بر حسب $(\Omega/\Omega)/K$

$\Delta\vartheta$: تغییرات دما بر حسب K (کلوین)

$\frac{U_O}{U_B}$: حساسیت خروجی پل بر حسب V/V (سیگنال خروجی که در اثر تغییر دما به وجود آمده است)

ε : میزان کرنش به وجود آمده در اثر تغییرات دما بر حسب m/m

در اینجا باید خاطر نشان شود که اندازه گیری رفتار خروجی مبدل در دماهای مختلف، جهت بدست آوردن خطاهای حرارتی و حذف آنها، یک عمل پرهزینه‌ای می باشد. زیرا در حین اندازه گیری سیگنال خروجی، مبدل دقیقا باید در دماهای مشخص شده بماند. رنج دمای کاری بسیاری از مبدل ها معمولا از *10-* تا *70+* درجه سانتی گراد می باشد. خروجی مبدل معمولا در حدهای بالایی و پایینی رنج دمایی مورد نظر و در چند نقطه بین آنها اندازه گیری می شود. قبل از هر اندازه گیری در یک دمای مشخص، باید به مبدل فرصت داد تا به دمای تعادل برسد. مدت زمان رسیدن مبدل به دمای تعادل و پایدار شدن خروجی آن، به جرم عنصر ارتجاعی بستگی دارد. هر چه جرم آن بزرگتر باشد، مدت زمان رسیدن به دمای تعادل نیز بیشتر خواهد بود و برعکس.

مبدل مثال ما در رنج دمایی اشاره شده در بالا، مقدار $\varepsilon = +30\mu m/m$ خطای حرارتی برای آن اندازه گیری شده است. برای محاسبه مقدار مقاومت جبران ساز اثر دما R_{TN1} داریم:

$$\epsilon = +30\ \mu m/m = +30 \cdot 10^{-6}\ m/m$$

$$\Delta\vartheta = 80\ K$$

$$R_{SG} = 350\ \Omega$$

$$TC_{TN1} = 5 \cdot 10^{-3}\ \frac{\Omega}{\Omega}/K$$

$$k \approx 2$$

$$R_{TN1} = 2 \cdot \frac{\epsilon \cdot R_{SG}}{\Delta\vartheta \cdot TC_{TN1}}$$

$$= 2 \cdot \frac{30 \cdot 10^{-6} \cdot 350\ \Omega}{80\ K \cdot 5 \cdot 10^{-3}}$$

$$R_{TN1} = \underline{0,053\ \Omega}$$

مقدار این مقاومت باید توسط برش های مکانیکی در شبکه مقاومتی ایجاد، و در پل قرار داده شود. گاهی اوقات مقدار بدست آمده را دقیقا نمی توان توسط شبکه های مقاومتی ایجاد کرد. در

این حالت باید نزدیکترین مقدار قابل ایجاد را با مقدار محاسبه شده، در شبکه مقاومتی تنظیم و در پل قرار داده شود.

تصحیح بالانس صفر پل وتستون:

با اینکه تقویت کننده های مدرن امروزی که به همراه مبدل ها مورد استفاده قرار می گیرند، قابلیت انجام عمل بالانس صفر را دارند، یعنی عمل آفست گیری را به راحتی می توانند انجام دهند، اما هدف در طراحی مبدل ها این است که خروجی مبدل بدون اعمال بار مکانیکی به آن، صفر باشد. شرط تحقق این امر، تقارن کامل مدار پل می باشد.

دلایل وجود سیگنال در خروجی مبدل ها بدون اعمال بار به آنها، یعنی عدم تعادل پل وتستون به شرح زیر می باشند:

- وجود عدم تقارن در اندازه و طول سیم های اتصال در پل وتستون

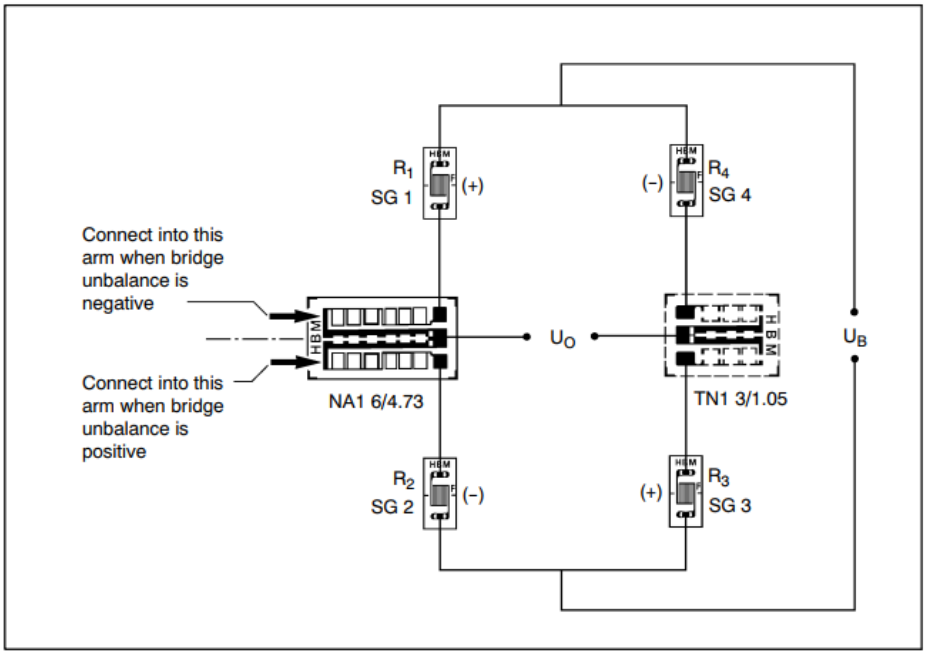
- وجود عدم تقارن هایی در مقاومت اهمی خود گیج ها که اندکی با هم تفاوت دارند

- عدم تقارن هایی که از قرار دادن یک سری مقاومت های جبران کننده بخش قبل در مدار پل به وجود می آیند.

- عدم تقارن هایی که ناشی از عدم نصب صحیح گیج ها و ایجاد اختلال ها در آنها به وجود می آیند.

این عدم تقارن هایی که از موارد گفته شده در بالا به وجود می آیند، با قرار دادن یک مقاومت کوچک غیر حساس به حرارت جبران می شوند.

راحت ترین روش برای بالانس پل وتستون، استفاده از "مقاومت های فویلی قابل تنظیم" در مدار پل می باشد. شکل 4 نحوه قرار گیری این مقاومت در مدار پل وتستون را نشان می دهد. که در جهت مخالف مقاومت جبران ساز اثر حرارتی قرار گرفته است.



شکل 4: نحوه قرارگیری مقاومت فویلی قابل تنظیم در پل جهت بالانس کردن خروجی آن

برای محاسبه مقدار این مقاومت باید میزان عدم تعادل پل در دمای مرجع اندازه گیری شود. این اندازه گیری می تواند در واحدهای mV/V یا $\mu m/m$ باشد.

اگر اندازه گیری بر حسب mV/V باشد، از روابط زیر برای محاسبه مقدار مقاومت R_{NA1} استفاده می کنیم.

$$R_{NA1} = 4 \cdot R_{SG} \cdot \frac{U_O}{U_B} \qquad (6)$$

یا

$$\frac{U_O}{U_B} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R_{SG}}$$

که در آن $R_{NA1} = \Delta R$ می باشد.

اگر اندازه گیری بر حسب $\mu m/m$ باشد، از روابط زیر برای محاسبه مقدار مقاومت R_{NA1} استفاده می کنیم.

$$R_{NA1} = 2 \cdot \epsilon \cdot R_{SG} \qquad (7)$$

یا

$$\frac{\Delta R}{R_{SG}} = k \cdot \epsilon \approx 2 \cdot \epsilon$$

که در آن $R_{NA1} = \Delta R$ می باشد.

در روابط بالا:

R_{NA1} : مقدار مقاومتی که باید در بازوهای پل قرار داده شود تا پل بالانس شود.

R_{SG} : مقدار مقاومت اهمی استرین گیج بر حسب Ω

ΔR: میزان تغییرات مقاومت متناظر با عدم تعادل پل،

$\frac{U_O}{U_B}$: حساسیت خروجی پل بر حسب V/V (سیگنال خروجی پل که در دمای مرجع اندازه گیری شده است و میزان عدم تعادل پل را نشان می دهد)

ε : میزان کرنش اندازه گیری شده ناشی از عدم تعادل پل بر حسب m/m

در مثال مبدل خودمان، مقدار عدم تعادل $-342\mu m/m$ در دمای مرجع 20 درجه سانتی گراد، بعد از انجام عملیات جبران سازی TC_0 اندازه گیری شده است.

$$\epsilon = -342\ \mu m/m = -342 \cdot 10^{-6}\ m/m$$

$$R_{SG} = 350\ \Omega$$

$$R_{NA1} = \Delta R$$

$$R_{NA1} = 2 \cdot \epsilon \cdot R_{SG}$$

$$= 2 \cdot 342 \cdot 10^{-6} \cdot 350\ \Omega$$

$$R_{NA1} = \underline{\underline{0,24\ \Omega}}$$

حال باید این مقاومت که توسط شبکه مقاومتی فویلی قابل تنظیم، ایجاد و در پل مطابق شکل 4 قرار داده شود.

جبران سازی اثر دما بر حساسیت مبدل:

تغییرات دما، علاوه بر تغییر نقطه صفر خروجی، حساسیت مبدل را نیز تحت تاثیر خود قرار می دهد. برای مبدل هایی که از روش ولتاژ ثابت تغذیه می شوند، داریم:

$$\text{حساسیت نامی} = \frac{\text{سیگنال صفر} - \text{ولتاژ خروجی پل در بار نامی}}{\text{ولتاژ تحریک پل}}$$

$$C = \frac{U_O}{U_B}$$

دلایل وابستگی حساسیت مبدل به تغییرات دما عبارت است از:

1- وابستگی دمایی مدول یانگ عنصر ارتجاعی

مدول یانگ عنصر ارتجاعی E با افزایش دما مقدار آن کاهش پیدا می کند. در نتیجه عنصر ارتجاعی که بار ثابتی به آن اعمال شده است، در دماهای بالا نسبت به دماهای پایین بیشتر دچار کرنش می شود. و متعاقبا کرنش ثبت شده توسط استرین گیج نه تنها به بار اعمالی، بلکه به دما نیز بستگی دارد.

Material		$\Delta E / \Delta \vartheta$ [10^{-5} / K]
Spring steel	51 CrV4	-26
Spring steel	X5 CrNi CuNb 1744	-19
Copper-beryllium	CuBe 2	-35
Aluminum	AlCuMg 2	-58

جدول 2: وابستگی دمایی مدول یانگ برخی از مواد مورد استفاده در مبدل ها در دمای 0 الی 100 درجه

2 – وابستگی دمایی فاکتور گیج (K) استرین گیج ها

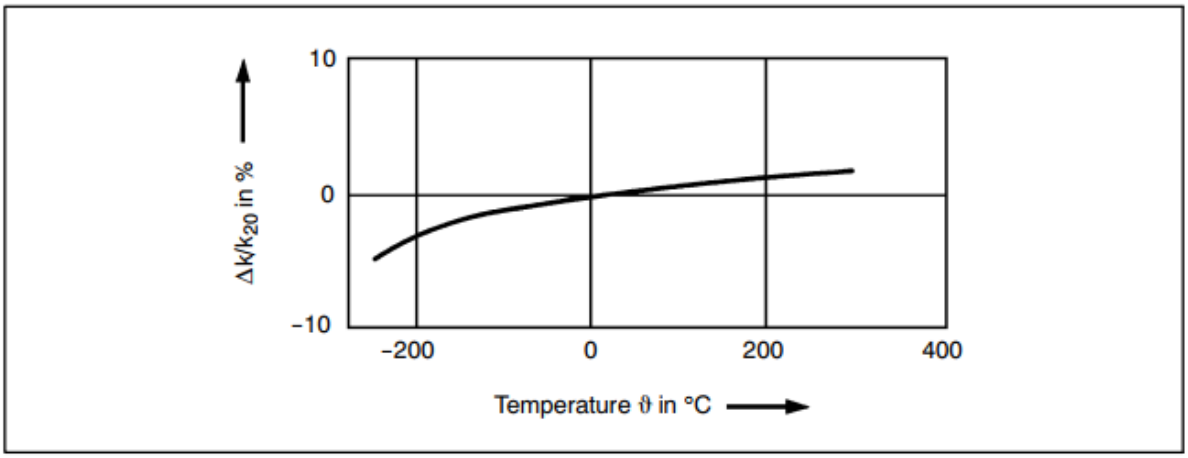
فاکتور گیج معیاری برای اندازه گیری حساسیت استرین گیج می باشد.

$$k = \frac{\Delta R/R_0}{\Delta l/l_0}$$

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \epsilon$$

$$k = \frac{\Delta R/R_0}{\epsilon} \qquad (8)$$

فاکتور گیج نیز وابستگی دمایی از خود نشان می دهد. شکل 5 یک نمونه منحنی فاکتور گیج را در برابر تغییرات دما نشان می دهد.

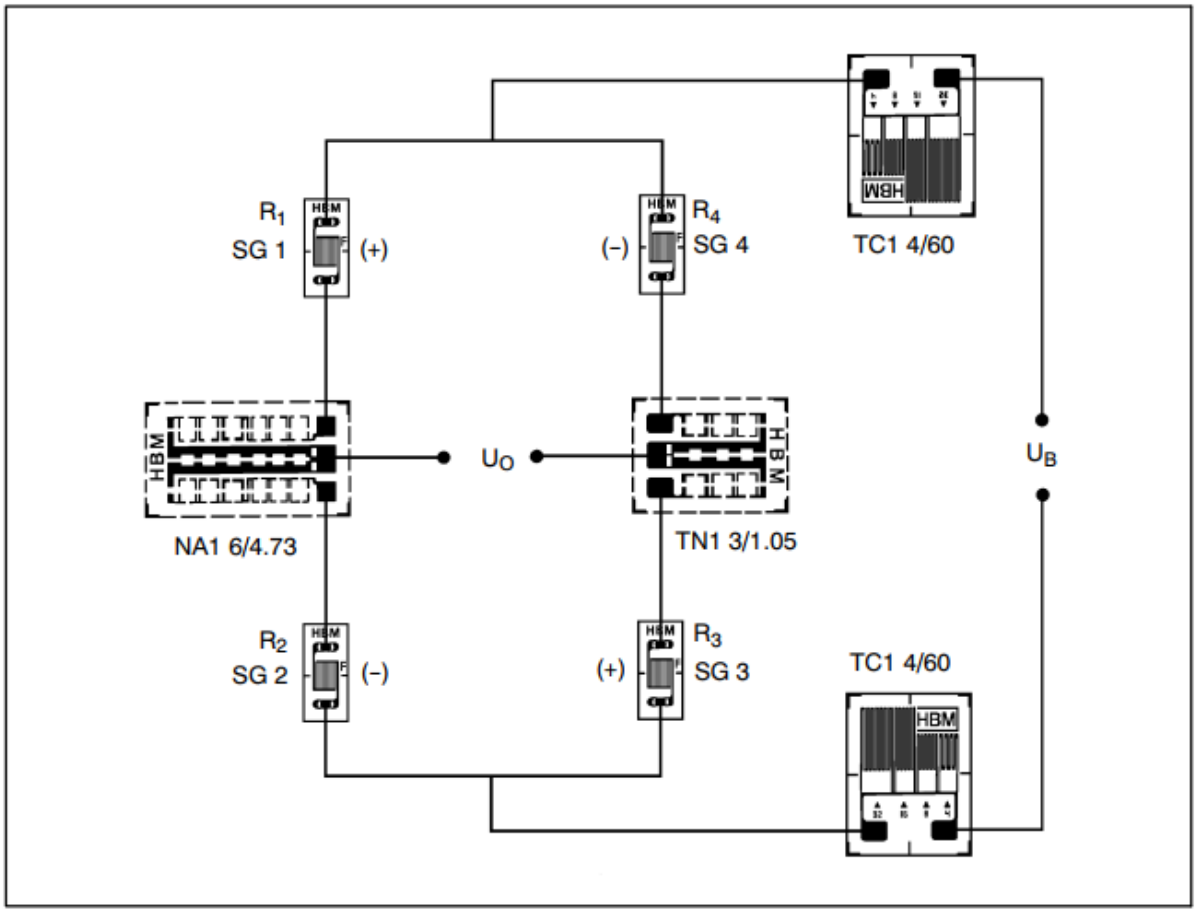


شکل 5: وابستگی فاکتور گیج نسبت به دما. این منحنی برای استرین گیج با آلیاژ کنستانتان می باشد.

برای جبران سازی این خطا به مقاومت های حساس به دما با ضریب حرارتی مقاومتی بالا نیاز است. این

مقاومت ها به صورت سری با خطوط تغذیه در مدار پل وتستون قرار می گیرند. با افزایش حرارت مقدار این مقاومت ها بالا رفته و ولتاژ ورودی پل به میزانی که خروجی آن به خاطر موارد گفته شده در بالا، افزایش یافته بود، کاهش می یابد. این عمل تقریبا حساسیت خروجی را ثابت نگه می دارد.

نحوه قرار گیری این مقاومت های حساس به دما در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل 6: نحوه قرارگیری مقاومت های حساس به دما جهت جبران اثر دما بر روی حساسیت مبدل

برای محاسبه مقدار این مقاومت ها باید خروجی مبدل در ظرفیت نامی آن در دماهای مورد نظر اندازه گیری شود.

مقدار مقاومت R_{TC1} به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\Delta R_\vartheta = \left(\frac{K_1}{K_2} - 1\right) \cdot R_B \qquad (9)$$

$$R_{TC1} = \frac{\Delta R_\vartheta}{TC_{TC1} \cdot \Delta\vartheta} \qquad (10)$$

که در آن:

R_{TC1} : مقدار مقاومت جبران ساز اثر دما بر حساسیت خروجی که باید به صورت سری با پل قرار داده شود.

R_B : مقدار مقاومت اهمی پل بر حسب Ω

ΔR_ϑ : میزان تغییر مقاومت در اثر تغییرات دما بر حسب Ω

TC_{TC1} : ضریب حرارتی مقاومت جبران ساز بر حسب $\Omega/\Omega/K$

K_1 : حساسیت خروجی مبدل در بار نامی در ماکزیمم دمای کاری مبدل بر حسب mV/V یا $\mu m/m$

K_2 : حساسیت خروجی مبدل در بار نامی در دمای مرجع بر حسب mV/V یا $\mu m/m$

وابستگی دمایی حساسیت مبدل مثال ما، به صورت زیر اندازه گیری شده است:

سیگنال خروجی مبدل در بار نامی 1 کیلوگرم و در دمای مرجع 20 درجه سانتی گراد:

$$2498\ \mu m/m = K_2$$

سیگنال خروجی مبدل در بار نامی 1 کیلوگرم و در ماکزیمم دمای کاری آن در 70 درجه سانتی گراد:

$$2539\ \mu m/m = K_1$$

داریم:

$$K_1 = 2539\ \mu m/m$$

$$K_2 = 2498\ \mu m/m$$

$$\Delta\vartheta = 50\ K$$

$$R_B = 350\ \Omega$$

$$TC_{TC1} = 5 \cdot 10^{-3} \frac{\Omega}{\Omega}/K$$

$$\Delta R_\vartheta = \left(\frac{K_1}{K_2} - 1\right) \cdot R_B$$

$$= \left(\frac{2539\ \mu m/m}{2498\ \mu m/m} - 1\right) \cdot 350\ \Omega$$

$$= 5.7\ \Omega$$

$$R_{TC1} = \frac{\Delta R_\vartheta}{TC_{TC1} \cdot \Delta\vartheta}$$

$$= \frac{5.7\ \Omega}{5.0 \cdot 10^{-3} \frac{\Omega}{\Omega}/K \cdot 50\ K}$$

$$\underline{22.8\ \Omega} = \underline{(2 \cdot 11.4\ \Omega)}$$

تنظیم حساسیت خروجی مبدل:

مبدل هایی که از استرین گیج استفاده می کنند، معمولا به گونه ای طراحی می شوند که حساسیت خروجی آنها $2mV/V$ شود یعنی به ازای ورودی 1 ولت بتوان از خروجی مبدل سیگنالی به اندازه $2mV$ در بار نامی آن دریافت کرد.

به خاطر وجود خطاهای غیرقابل اجتناب، ساخت مبدل هایی که دقیقا حساسیت مورد نظر را دهد، امکان پذیر نیست. برای همین عنصر ارتجاعی باید طوری طراحی شود که در بار نامی خود برای حساسیت مثلا $2mV/V$، حساسیت $2.4mV/V$ را بدست بدهد.

حال برای رسیدن به حساسیت $2mV/V$ باید در مسیر سیگنال های ورودی، مقاومت های ثابت غیر حساس به حرارت R_E قرار داده شود. وظیفه این مقاومت ها کاهش تغذیه ورودی پل وتستون و در نتیجه کاهش حساسیت مبدل به مقدار مورد نظر است.

مقدار مقاومت R_E جهت تنظیم حساسیت خروجی مبدل، از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$R_E = R_B \cdot \left(\frac{K_1}{K_2} - 1\right) \qquad (11)$$

که در آن :

R_E : مقدار مقاومت مورد نیاز جهت تنظیم حساسیت مبدل به مقدار مورد نظر

R_B : مقاومت ورودی پل وتستون

K_1 : حساسیت مبدل قبل از تنظیم آن

K_2 : حساسیت مورد نظر برای مبدل

اقدامات حفاظتی محل نصب گیج ها:

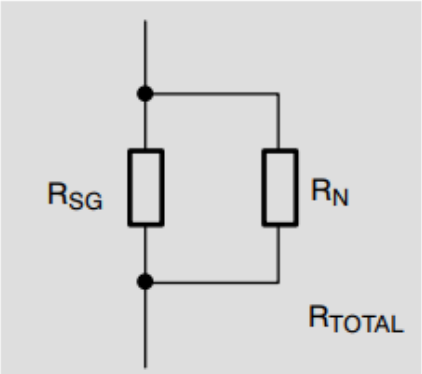
حفاظت از محل نصب گیج ها در مبدل ها از اهمیت ویژه ای برخوردار است، اینکه یک مبدل در طولانی مدت بتواند عملکرد مطلوب خود را در برابر عوامل خارجی مزاحم حفظ کند یا نه، بستگی زیادی به پوشش محل نصب گیج ها دارد.

پوشاندن گیج ها از آنها در برابر عوامل محیطی مانند رطوبت، گرد وغبار و عوامل مکانیکی مانند ضربه و ... محافظت می کند.

در میان این عوامل، رطوبت از همه مهم تر است. رطوبت مقاومت الکتریکی عایق را که به صورت یک مقاومت شنت که با نقطه اندازه گیری موازی شده است، کاهش می دهد.

مقدار این مقاومت های شنت با دما و رطوبت تغییر می کند و باعث می شود در خروجی مبدل خزش وجود داشته باشد.

مثال زیر یک معیاری را برای خطای رطوبت نشان می دهد. در این مثال از یک گیج 350 اهمی با فاکتور گیج 2 استفاده شده است. مقدار تغییرات مقاومت این گیج در بار نامی $1000\mu m/m$ برابر با 0.7 اهم می باشد. اگر مقاومت عایق الکتریکی به صورت یک مقاومت شنت در دو سر استرین گیج در نظر گرفته



$$\frac{1}{R_{Total}} = \frac{1}{R_{SG}} + \frac{1}{R_N} \qquad (12)$$

$$R_{Total} = \frac{R_N \cdot R_{SG}}{R_{SG} + R_N} \qquad (13)$$

شـود، در ایـن صـورت مقاومـت کـل از روابـط (12) و (13) قابـل محاسـبه اسـت. بـا در نظـر گـرفتن مقدار 20000 مگااهم برای R_N داریم:

$$R_{Total} = \frac{350\ \Omega \cdot 2 \cdot 10^{10}\ \Omega}{2 \cdot 10^{10}\ \Omega + 350\ \Omega}$$

$$\underline{\underline{R_{Total} = 349.999\ \Omega}}$$

همانطور کـه مـی بینیـد، ایـن تغییـر بسـیار کوچـک در مقـدار مقاومـت گـیج قابـل چشـم پوشـی اسـت. حال اگر مقاومت عایق الکتریکی به خاطر رطوبت به 2 مگااهم کاهش یابد، داریم:

$$R_{Total} = \frac{350\ \Omega \cdot 2 \cdot 10^{6}\ \Omega}{2 \cdot 10^{6}\ \Omega + 350\ \Omega}$$

$$\underline{\underline{R_{Total} = 349.94\ \Omega}}$$

تغییـرات مقاومـت در ایـن حالـت نسـبت بـه حالـت قبـل، $\Delta R = 0.06\Omega$ مـی باشـد، ایـن تغییـرات در مقاومـت معـادل $85.7\mu m/m$ تغییـرات در کـرنش مـی باشـد. ایـن میـزان تغییـرات در برابـر کـرنش نامی $1000\mu m/m$ ، خطایی تقریبا *10%* را نشان می دهد.

این مثال میزان تاثیر رطوبـت بـر عملکـرد مبـدل را بـه خـوبی نشـان مـی دهـد، هرچقـدر مقاومـت گـیج بیشتر باشد، اثرگذاری رطوبت به همان میـزان بیشـتر خواهـد بـود. بـرای همـین محـل نصـب گـیج هـا و بقیـه المـان هـا بایـد بـه خـوبی در برابـر ایـن عوامـل محافظـت گـردد. بـرای ایـن کـار چسـب هـای مخصوصی از طرف سازندگان گیج ها وجود دارد کـه هـر کـدام از ایـن چسـب هـا محـل نصـب المـان هـا را در برابر برخی از عوامل محیطی و مکانیکی محافظت می کند.