

به نام خدا

# سنسورهای سنجش شتاب



# نوع اندازه گیری

ابتدا می خواهیم انواع اندازه گیری ابتدایی را توضیح دهیم. اندازه گیری شتاب به موارد زیر تقسیم می شود:

ارتعاش : به جسمی که در محدوده یک وضعیت متعادل نوسان کند گفته میشود که ارتعاش دارد. ارتعاش یا لرزش را می توان در حمل و نقل، جو زمین، و محیطهای صنعتی یافت. شوک یا ضربه : تحریک ناگهانی و زودگذر یک ساختار باعث ایجاد رزونانس ساختاری میشود. یک پالس ضربه می تواند در نتیجه انفجار، ضربه یک چکش، یا تصادف یک وسیله نقلیه ایجاد شود.

جنبش : عبارتست از حرکت آهسته یک رویداد مانند حرکت بازوی یک روبات. سیزمیک (لرزش وابسته به زمین لرزه) : این رویداد بیشتر شبیه یک حرکت کند یا ارتعاش با فرکانس پایین است. اندازه گیری این کمیت به شتاب سنج ویژه با دقت تفکیک بالا و نویز کم نیاز دارد. از شتاب سنجهای سیزمیک برای اندازه گیری حرکت پلها، سطوح، و زمین لرزه استفاده میشود

شُتاب سنج ها:

۱- شُتاب سنج مکانیکی

۲- شُتاب سنج الکترواستاتیکی

$$E = \frac{Q}{\epsilon_0 k \cdot S}$$

$$E = \frac{dV}{dx}$$

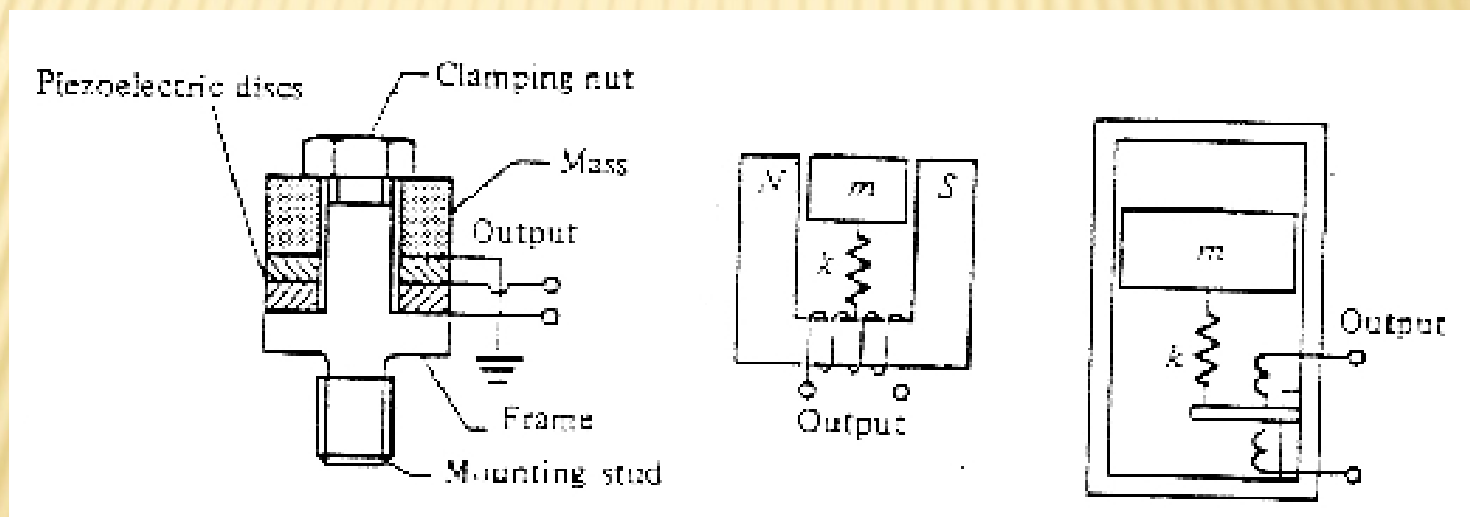
S سطح هادی  
k ثابت دی الکتریک

$$\frac{F}{3} = \frac{Q^2}{2(\epsilon_0 k \cdot S^2)} = \frac{\epsilon_0 k \cdot E^2}{2}$$

نیروی اعمال شده و اثر سطح بازدار

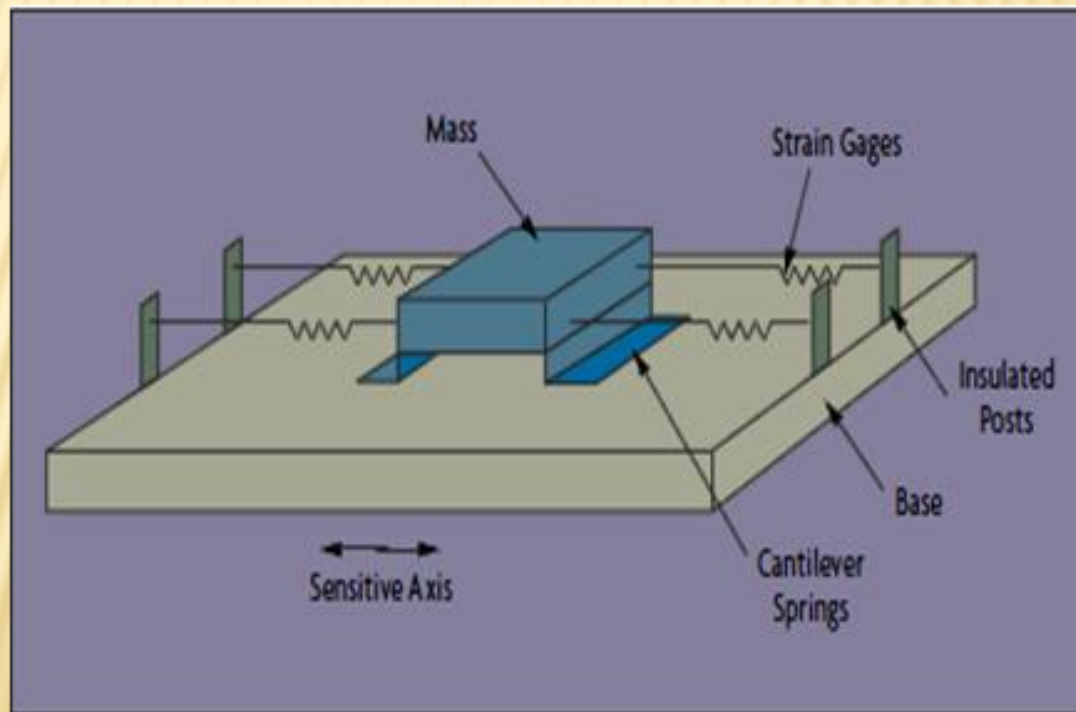
۳- شُتاب سنج های پیزو رزسونانسی: این شُتاب سنج ها در واقع کرنش سنج های با فریب بیج بزرگ هستند. ضرب بالا مقولاً وقتی حاصل می شود که کرنش سنج ضرب مقاومت الکتریکی ماده او در برابر آن باشد. حساسیت زیاد در این مقیاسات می تواند جبران شود زیرا که پیامد آن تقابل ابعاد فیزیکی شُتاب سنج است. اعداد شُتاب سنج های پیزو رزسونانسی بسیار بزرگتر است.

در حالت کلی از سنسورهای شتاب به دو روش در وضعیت سنجی استفاده می‌شود. روش اول انتگرال‌گیری از شتاب و بدست آوردن تغییر مکان می‌باشد و روش دوم استخراج فرکانس‌های ارتعاشی و شکل‌های مودی سازه می‌باشد که معمولاً روش دوم متداولتر است. از آنجایی که ویژگیهای مورد نیاز سنسور شتاب برای انجام هر یک از این دو هدف متفاوت است، انجام توأمان این دو عمل همواره امکان‌پذیر نیست



# ساختار

به طور مفهومی، یک شتاب سنج مانند یک جسم میرا کننده روی یک فنر عمل می کند. هنگامی که شتاب سنج با شتابی حرکت می کند، جسم به اندازه ای جابجا می شود که نیروی وارد شده از فنر به جسم، جسم را با شتابی برابر شتاب بدنه ی شتاب سنج حرکت دهد. سپس با اندازه گیری میزان جابجایی مقدار شتاب اندازه گیری می شود.



# ساختار

شتاب سنج های جدید معمولاً بر پایه ی سیستم های میکروالکترومکانیک (MEMS) هستند. این ادوات دارای یک تیر یک سر آزاد (cantilever beam) هستند که به یک جرم لرزه ای متصل است ؛ علاوه بر این، شتاب سنج ها شامل اجزای دیگر نیز می باشند. میراکنندگی شتاب سنج در اثر گازهای باقیمانده ی محبوس شده در داخل دستگاه ایجاد می شود. تحت اثر شتاب خارجی جرم لرزه ای متصل به تیر آزاد از مکان طبیعی خود منحرف می شود. این انحراف به صورت آنالوگ یا دیجیتال اندازه گیری می شود. معمولاً ظرفیت خازن بین مجموعه ای از تیرهای ثابت و مجموعه ای از تیرهایی که به جرم های لرزه ای متصل اند اندازه گیری می شوند. این روش ساده، قابل اعتماد و ارزان است. گنجاندن مقاومت های پیزو (piezoresistor) در فنر ها برای آشکارسازی تغییر شکل فنر و متعاقباً انحراف آن ها جایگزین خوبی برای روش قبل می باشد. این روش تنها چند مرحله پردازش اضافه در فرایند ساخت نیاز دارد. برای حساسیت های بالا از تونل زنی کوانتومی نیز استفاده می شود. این روش نیاز به یک پردازش اختصاصی دارد که آن را بسیار گران می کند .

# ساختار

شتاب سنج های میکروالکترومکانیکی برای اندازه گیری در محدوده های بسیار وسیعی، که به هزاران G هم می رسد، به کار می روند. طراح باید مصالحه ای بین حساسیت و حداکثر مقدار شتاب قابل اندازه گیری انجام دهد



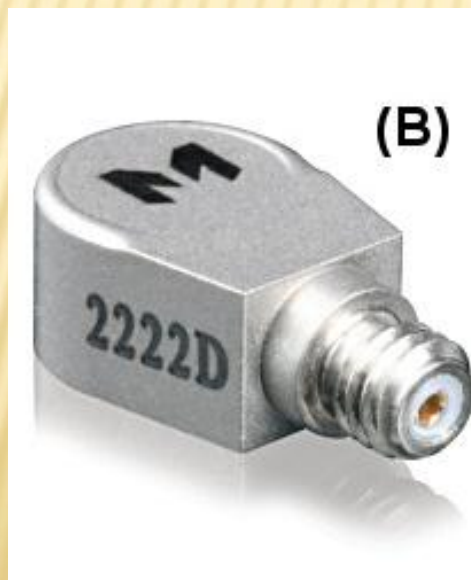
# شتاب سنج و G مجاز

شتاب (G) مجاز نوشته شده روی یک شتاب سنج به معنای توانایی اندازه گیری مقدار شتاب قبل از شکستن است. شتاب سنج مقدار شتاب صحیح را که شتاب نسبت به جسم در حال سقوط آزاد است اندازه گیری می کند. شتاب صحیح شتابی است که اجسام و اشخاص آن را احساس می کنند. به عبارت دیگر، بر اساس اصل هم ارزی در فیزیک در هر نقطه از فضا یک دستگاه مرجع مانا وجود دارد، و شتاب سنج شتاب نسبت به آن دستگاه شتاب را اندازه می گیرد. به این صورت که فرض می کند اگر قرار بود در دستگاه مرجع مانا بدون شتاب باشد هیچ نیرویی به آن وارد نمی شد و حال نیرو های وارد به خود را اندازه می گیرد و شتابی را که باید داشته باشد حدس می زند. معمولاً شتاب را برحسب نیروی G اندازه گیری می کنند برای مثال اگر جسمی با شتاب  $G_1$  بالا رود، شتاب سنج شتاب  $G_2$  را حس می کند (اصل دالامبر).



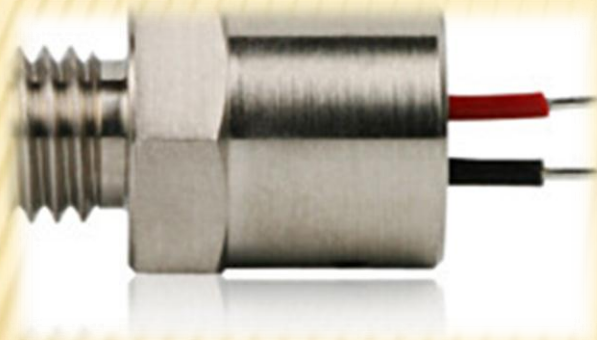
# کاربرد شتاب سنج

شتاب سنج در جهان سنسورها بسیار مهم است. زیرا می تواند محدوده زیادی از حرکات را حس کند. مثلا در آخرین لپ تاپ شرکت Apple برای شناسایی حرکات ناگهانی لپ تاپ ، از سنسور شتاب استفاده شده است. بنابراین هارد لپ تاپ در هنگام ضربه های ناگهانی قفل می شود. از این سنسور در دوربین های عکاسی دیجیتال ، در بازی های کامپیوتری برای شناسایی حرکات کج شدن دسته، در اتومبیل برای رها کردن کیسه هوا هنگام ترمز ناگهانی نیز استفاده می شود .



# کاربرد شتاب سنج

چندین مورد استفاده از سنسور شتاب سنج عبارت است از:



ربات های خود متعادل

هواپیماهای مدل بدون سرنشین

سیستم های هشدار

کشف برخورد

ردیابی حرکات انسان

سنسور تراز یا تعیین سطح افق

کشف ارتعاشات برای عایقهای ارتعاشی

کشف کننده شتاب زمین

# کاربرد شتاب سنج

از کاربردهای صنعتی شتاب سنج ها می توان به هشدار دهنده ی ارتعاشات در ابزار آلات، برای مثال شرایط نابالانسی اجزای دوار اشاره کرد. یک شتاب سنج بر پایه ی آنالیز ارتعاشات می تواند ارتعاشات غیر نرمال را شناسایی کند، سیگنال ارتعاشات را آنالیز کند و به شناسایی اثرات آن کمک کند.

از کاربردهای دیگر شتاب سنج ها انجام تست های ساختمانی است. وجود یک عیب، ترک یا جوشکاری بد یا خوردگی می تواند سیگنال ارتعاشاتی یک سازه را عوض کند. سازه ممکن است پایه ی یک موتور یا توربین، مجاری یا مخزن یک رآکتور باشد. تست با ضربه زدن به سازه با یک چکش یا تحریک سازه با یک بار شناخته شده انجام می شود. این روش یک الگوی ارتعاشاتی ارائه می دهد که می تواند ثبت، آنالیز و با یک سیگنال مرجع مقایسه شود .

## کاربرد شتاب سنج

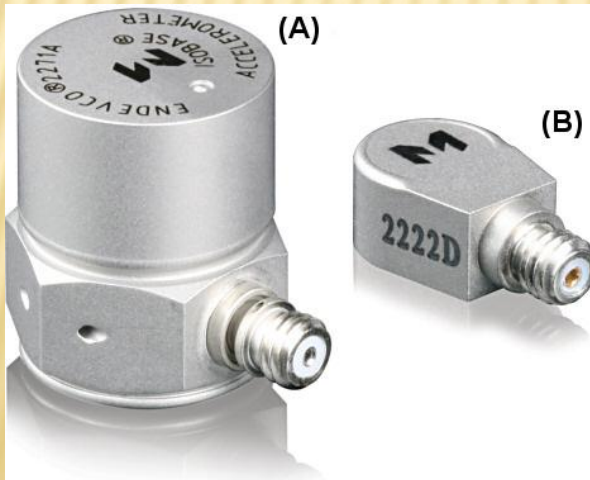
سنسورهای شتاب در جهت یابی و تعیین مسیر نیز نقش دارند به عنوان مثال سنسورهای شتاب مینیاتوری ۳محوره، تغییرات زاویه حول ۳محور X,Y,Z را شناسایی می کنند. این سنسورها به عنوان راهنمای قطب نما در جهت یابی، در شناورها و سیستم های زیر دریایی عمل می کنند و ژيروسکوپ را در سیستم هدایت اینرسیال جابجا می کنند.



# کاربرد شتاب سنج

یکی از معمول ترین کاربردهای شتاب سنج های MEMS در گسترش سیستم کیسه هوا در وسایل نقلیه مدرن است. در این حالت شتاب سنج ها برای شناسایی شتاب منفی سریع وسیله نقلیه استفاده می شوند تا مشخص کنند که چه زمانی یک برخورد صورت گرفته و شدت برخورد چقدر بوده است. یکی دیگر از کاربردهای این وسیله در خودروها، سیستم های کنترل پایداری الکترونیکی است که از یک شتاب سنج جانبی برای اندازه گیری نیروهای کناری استفاده می کند. استفاده از شتاب سنج ها در صنعت خودرو قیمت آنها را بطور قابل توجهی کاهش داده است. یکی دیگر از کاربردها در خودرو، چک کردن

نویز، لرزش و سختی است (NVH)، شرایطی که باعث ناراحتی برای رانندگان و مسافران می شود و همچنین ممکن است نشان دهنده ی نقص های مکانیکی باشد.



# انواع شتاب سنج ها

اولین قدم در پروسه انتخاب یک سنسور تعیین نوع اندازه گیری است که باید توسط سنسور صورت پذیرد. سه نوع تکنولوژی محبوب برای سنسورهای شتاب سنج موجودند:

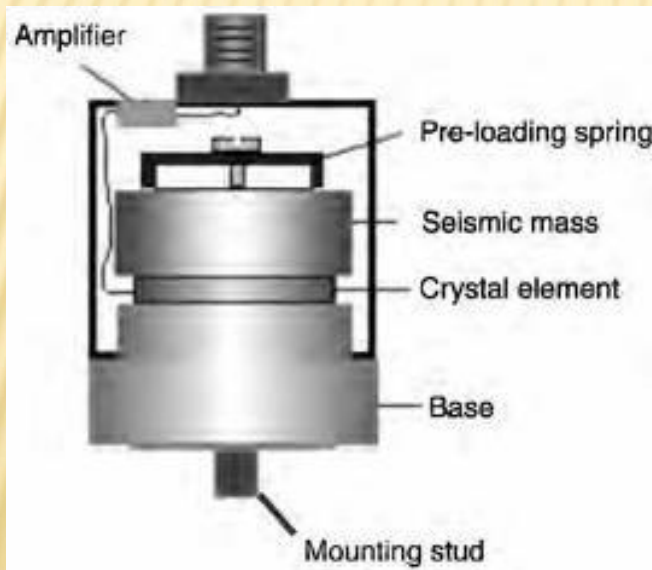
**شتاب سنج های پیزوالکتریکی PE.** این نوع تکنولوژی بطور گسترده ای در اندازه گیری شتاب کاربرد دارد. گستره فرکانسی اندازه گیری توسط این سنسورها از حدود چند هرتز تا ۳۰ کیلوهرتز، گستره وسیعی از حساسیت، وزن، اندازه، و شکل انتخاب مناسبی را در اختیار کاربر قرار می دهد. شتاب سنجهای PE با خروجی جریان و ولتاژ در دسترس اند. شتاب سنج های پیزوالکتریک مهمترین ابزار کاربردی برای اندازه گیری شوک و ارتعاشات هستند. این وسیله نیز شبیه سنسورهای مکانیکی شامل یک جرم است که وقتی تحت شتاب قرار می گیرد یک نیروی اینرسی در یک کریستال پیزوالکتریک اعمال می کند.

## انواع شتاب سنج ها

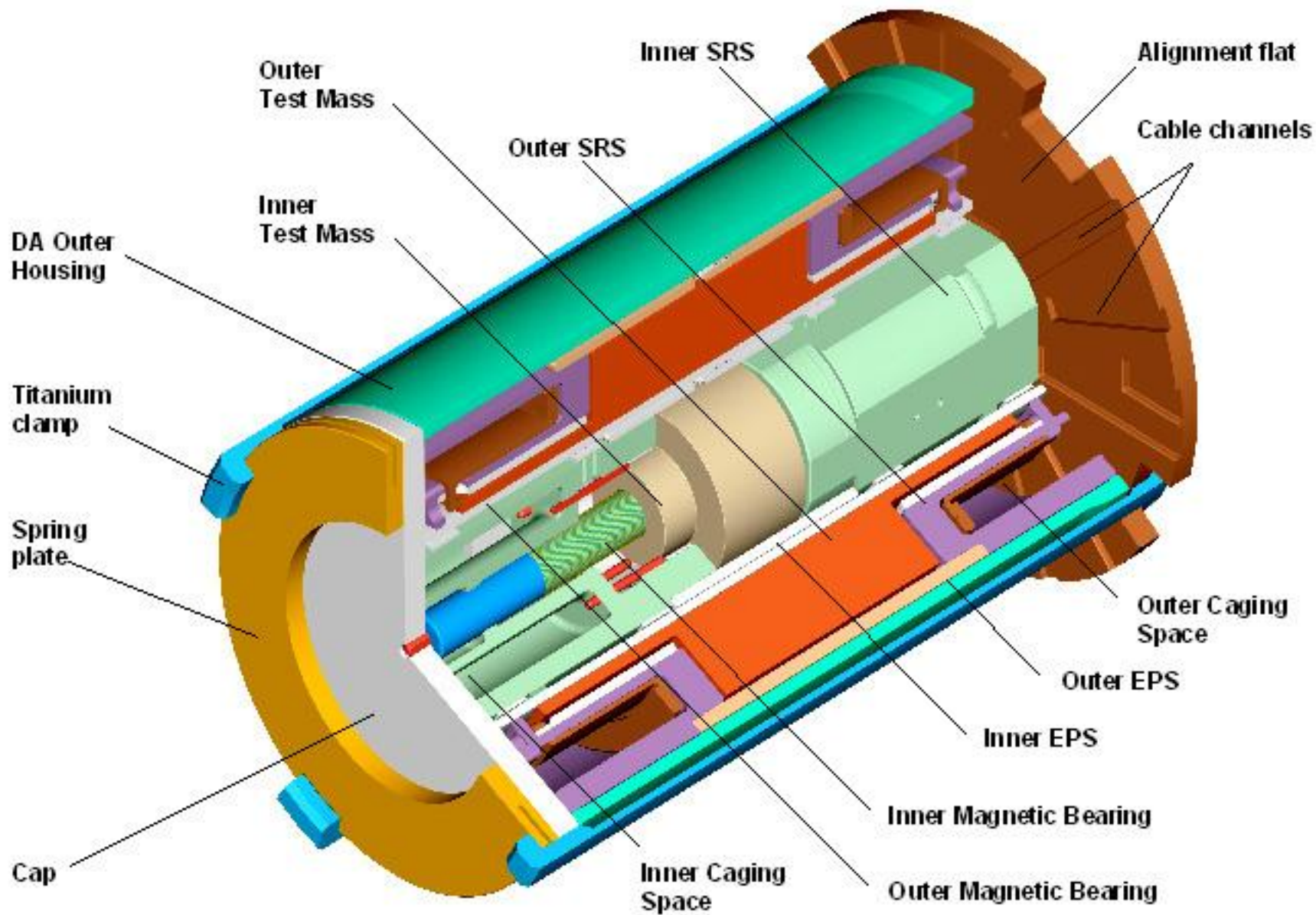
با کیفیت ترین شتاب سنج ها با استفاده از کریستال پیزوالکتریک ساخته می شوند که تغییر شکل آن باعث قطبی شدن بارها در دو سر کریستال می گردد. بالعکس، اعمال یک میدان الکتریکی به دو سر ماده ی پیزوالکتریک باعث تغییر شکل آن می گردد. شتاب سنج پیزوالکتریک شامل کریستالی است که به یک جرم متصل بوده و همراه با یک فنر در محفظه ای قرار گرفته است. علاوه بر خواص میرایی طبیعی ذاتی در کریستال و فنر، گاهی از میرایی اضافی نیز استفاده می شود (به عنوان مثال، با پر کردن محفظه از روغن). وقتی به شیء حامل، شتابی وارد شود، بر اثر اینرسی جرم، بین بدنه و جرم جابجایی نسبی بوجود می آید. کرنش که در نتیجه ی اثر پیزوالکتریک در کریستال به وجود می آید باعث جابجایی بار بین پوشش های رسانای دو طرف کریستال می گردد. شتاب سنجی که از کریستال پیزوالکتریک استفاده می کند به هیچ منبع تغذیه ی خارجی نیاز ندارد. توجه به این مسئله مهم است که شتاب سنج، شتاب را تنها در جهتی که در آن نصب شده است (یعنی در راستای محور فنر، جرم و کریستال) اندازه گیری می کند.

# انواع شتاب سنج ها

. شتاب سنجهای پیزوالکتریک از نظر نحوه تأثیر پذیری از ارتعاش و تولید سیگنال الکتریکی، در ۲ نوع دسته بندی می شوند: نوع فشاری (Compression type) و نوع برشی (Shear Type). المان اصلی این نوع از شتاب سنجهای از مواد پیزوالکتریک مثل کوارتز و یا انواع خاصی از سرامیک ساخته می شود. شماتیک ساختمان این نوع از سنسورها را در شکل زیر می بینید:









همانطور که در شکل پیداست، اجزاء اصلی عبارتند از: یک وزنه، ماده کریستال (پیزوالکتریک)، یک فنر برای پیش بارگذاری، تقویت کننده و پایه. این نوع پیکربندی به گونه ای است که نیروی وارد بر ماده پیزوالکتریک و در نتیجه سیگنال الکتریکی تولید شده توسط آن، متناسب با شتابی است که بر پایه (base) وارد می شود. از آنجاییکه سیگنال ایجاد شده معمولاً ضعیف است، از یک مدار داخلی برای تقویت سیگنال استفاده می شود. نهایتاً خروجی سنسور از طریق کابل‌های مناسب به ابزارهای پردازش سیگنال هدایت می شود.

## انواع شتاب سنج ها

**شتاب سنج های پیزومقاومتی PR.** از این شتاب سنج ها بعلت حساسیت کمی که دارند بیشتر برای اندازه گیری ضربه و تکان استفاده می شود تا اندازه گیری ارتعاش. از این سنسورها همچنین بصورت گسترده ای در تست تصادف وسایل نقلیه استفاده میشود. این شتاب سنج، شتاب را از روی تغییر مقاومت سیلیکونی قرار گرفته در پل واتسون اندازه میگیرد. المان حسگر، جرم سیلیکونی میکروماشین شده ای است که بوسیله چند تیر از قاب سیلیکونی معلق شده است. حرکت جرم معلق، در تیر خمش ایجاد میکند و کرنش تیر را تغییر میدهد و باعث تغییر مقاومت پیزویی قرار گرفته در تیرها میشود. شتاب سنج های PR پهنای باندی در حدود چند صد هرتز تا 130 kHz دارند و پاسخ فرکانسی آنها در حدود صفر هرتز است ( پاسخ DC) در نتیجه آنها میتوانند پاسخ گذرای طولانی مدّت را اندازه بگیرند. طبیعت پیزومقاومتی این شتاب سنج، امکان اندازه گیری شتاب ثابت (فرکانس صفر) را نیز فراهم میآورد

## انواع شتاب سنج ها

. سنسورهای پیزورزیستیو و گیج های اندازه گیری کرنش مانند روش فوق عمل می کنند، اما عناصر کرنش سنج به گرما حساسند و به جبرانگر احتیاج دارند. آنها برای ارتعاشات فرکانس پایین با شوک های طولانی و کاربردهای شتاب ثابت طراحی شده اند. واحدهای پیزورزیستیو سخت هستند و می توانند در فرکانس های بالای ۲۰۰۰ هرتز عمل کنند

به عنوان مثال شتاب سنجهای موجود در اداره کل خط راه آهن ایران، شتابسنج پیزومقاومتی با فناوری ساخت میکروماشین می باشد

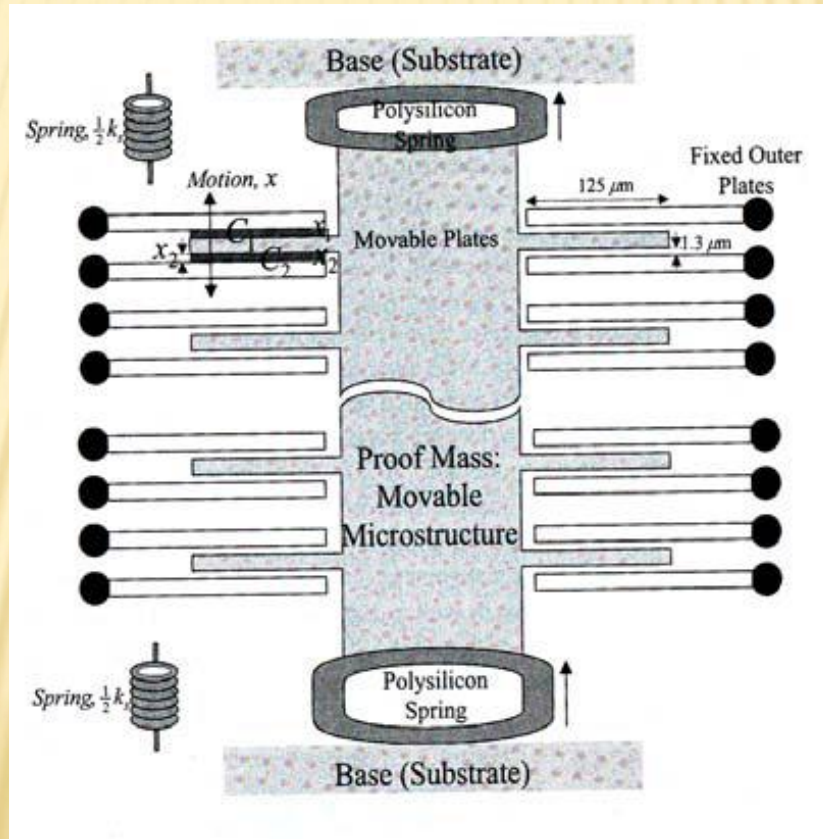


## انواع شتاب سنج ها

**شتاب سنج های خازنی VC:** این دسته از شتاب سنج ها نسبت به سایرین دارای تکنولوژی جدیدتری هستند. مانند PRها، پاسخ شتاب سنجهای VC از نوع DC است. حساسیت بالا، پهنای باند باریک (۱۵ تا ۳۰۰۰ هرتز)، و پایداری حرارتی عالی از مشخصات این سنسورهاست. حساسیت حرارتی این سنسورها کمتر از ۱.۵ درصد در گستره حرارتی ۱۸۰ درجه سلسیوس است. در سنسورهای حسی خازنی، صفحات خازنی میکروماشین شده (خازن های صفحه ای CMOS تنها ۶۰ میکرون عمق دارند) تنها ۵۰ میکروگرم جرم دارند. وقتی شتاب صفحات را تغییر شکل می دهد، یک تغییر قابل اندازه گیری در ظرفیت خازن رخ میدهد. برخی از مزایای این نوع مبدل، عبارت است از دقت بالا حتی تا چند  $\mu g$ ، حساسیت بالا، پاسخ مناسب به ورودی ثابت، عملکرد مناسب در برابر نویز، تغییر کم پارامترهای این شتاب سنجها در طول زمان، کم بودن حساسیت نسبت به دما، افت توان پایین، و سادگی ساختار مکانیکی. از این قطعات برای اندازه گیری ارتعاشات فرکانس پایین، جنبش، و شتاب حالت پایدار استفاده میشود.

# انواع شتاب سنج ها

بطور کلی سه نوع شتاب سنج خازنی : شانه جانبی، شانه محوری و صفحه ای وجود دارد. نمای شماتیک یک شتاب سنج شانه محوری در شکل نشان داده شده است.



## انواع شتاب سنج ها

در این نوع سنسور تغییرات ناشی از شتاب و حرکت جرم محک و جابجایی صفحات خازن، در امتداد عمود بر صفحه و نتیجتاً تغییر فاصله بین الکترودها است. در صورتیکه در نوع شانه جانبی جابجایی جرم محک و نتیجتاً صفحات خازن در امتداد صفحات صورت گرفته، دندان‌های شانه در هم فرورفته و ظرفیت متناسب با آن تغییر می‌کند. بخش متحرک سنسور (جرم محک) روی یک ویفر سیلیکون با نشاندن لایه پلی سیلیکان بر روی یک لایه اکسید ساخته می‌شود. لایه اکسید سپس حکاکی می‌شود که زیر جرم محک خالی شده و روی سطح ویفر بدون تماس قرار گیرد.



## انواع شتاب سنج ها

نوع غیر معمول دیگری از شتاب سنج های بر مبنای تکنولوژی MEMS شامل یک گرم کننده کوچک در پایین یک برآمدگی توخالی خیلی کوچک است. گرم کننده هوای داخل محفظه را گرم می کند و موجب بالا آمدن آن می شود. یک ترموکوپل بر روی محفظه مشخص می کند در کجا هوای گرم به محفظه می رسد و انحراف آن از مرکز برآمدگی محفظه اندازه گیری از شتابی است که به سنسور اعمال شده است. بیشتر شتاب سنج های میکرو مکانیکی در صفحه کار می کنند، به این معنی که طوری طراحی شده اند که تنها به شتاب در راستای برش زیرلایه (die) حساس هستند. به وسیله ترکیب کردن دو وسیله به صورت عمود بر یکدیگر بر روی یک زیرلایه می توان یک شتاب سنج دو محوری ساخت که شتاب را در دو راستا اندازه گیری می کند. به وسیله اضافه کردن یک وسیله شتاب سنج دیگر خارج از صفحه می توان در سه راستا شتاب را اندازه گیری کرد. این ترکیب همواره خطای بسیار کمتری نسبت به حالتی دارد که افزاره ها را پس از ساخت جداگانه با هم ترکیب کنیم.



# انواع شتاب سنج ها

در جدول زیر عملکرد چند شتاب سنج بر پایه تغییرات دمایی نشان داده شده است

Technology	Temperature range	Comments
Piezoelectric - general	-55 °C to 260°C	The range is extended in some cases
Piezoelectric-high temperature	-55 °C to 650°C	Special high temperature accelerometers
Cryogenic piezoelectric	-184°C to 177°C	
IEPE general types	-55 °C to 125°C	
IEPE high temperature	-55 °C to 175°C	
Piezoresistive	-55 °C to 66°C	

با تشکر از توجه شما