

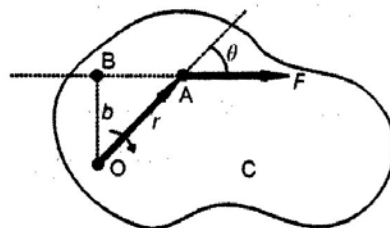
اندازه گیری گشتاور و توان مکانیکی

۱-۷ مقدمه و تعاریف

اغلب مواقع، مفهوم گشتاور حتی توسط مهندسين مجرب نير باعث ايجاد اشتباه می‌شود. عباراتی همچون «گشتاور عبارت است از مقدار پیچش محور» و یا اینکه «گشتاور عبارت از مقدار عاملی است که باعث چرخیدن جسم حول محوری می‌شود» زیاد به کار برده می‌شود. بنابراین واضح است که ابتدا باید تعریف روشنی از گشتاور داشته باشیم و بعد از آن به جنبه‌های مختلف اندازه‌گیری آن بپردازیم.

گشتاور را می‌توان به عنوان مقدار تمایل و توانایی نیرو برای چرخاندن جسمی که تحت اثر آن نیرو قرار دارد حول یک محور تعریف کرد. مشاهدات روزانه شخصی ما را به این نکته رهنمون می‌کند که مقدار اثر چرخشی نیرو با افزایش فاصله عمودی نقطه اثر نیرو از محور افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، در موقع بازکردن در ورودی، ما سعی می‌کنیم تا حد ممکن به دستگیره و لبه در که فاصله بیشتری تا لولاها دارد، نیرو وارد کنیم، ضمن اینکه سعی می‌کنیم جهت گشودن و یا هل دادن در، عمود بر سطح در باشد تا نتیجه بهتری به دست آید.

مقدار بزرگی اندازه گشتاوری که بر یک صفحه عمود بر محور وارد می‌شود عبارتست از حاصلضرب نیرو (یا مؤلفه‌ای از نیرو که در صفحه عمود بر محور چرخش قرار دارد) در فاصله عمودی از محور تا خط اعمال نیرو. این مفهوم در شکل ۱-۷ نشان داده شده است. واحدهای کمیت گشتاور در دستگاه SI نیوتن متر (Nm) است. تعریف بالا هم برای مسائل ایستا (که به عنوان مثال در آن یک عضو سازه‌ای تحت تأثیر یک ممان قرار می‌گیرد) و هم برای حالت کلی‌تر (در مهندسی) در مورد شافتهای در حال چرخش تحت پیچش مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای یک مهندس، دانستن گشتاور وارد بر یک محور در حال چرخش بسیار مهم است، چون گشتاور باعث ایجاد کرنش می‌شود و کرنش (یا لااقل کرنشی که محور می‌تواند بدون هیچگونه خطری تحمل کند) در تعیین اینکه محور چه مقدار توان را می‌تواند انتقال دهد عاملی تعیین کننده است.



نیروی F وارد بر جسم C می‌خواهد جسم C را حول نقطه O بچرخاند.

گشتاور : $\tau = Fb = Fr \sin \theta$

با نماد گذاری برداری : $\tau = r \times F$

شکل ۱-۷ تعریف گشتاور

معادلاتی که گشتاور را به توان و کرنش ربط می‌دهند کاملاً سراسر هستند. یک محور چرخان که دارای سرعت زاویه‌ای ω بوده و توان P را انتقال می‌دهد گشتاوری به مقدار T دارد که مقدار آن عبارت است از :

$$T = \frac{P}{\omega} \quad (۱-۷)$$

اگر محوری با طول l و ممان قطبی اینرسی J دارای مدول سختی G بوده و تحت گشتاور T قرار گیرد، تحت یک زاویهٔ پیچش θ قرار گیرد که مقدار آن از رابطهٔ زیر بدست می‌آید:

$$\theta = \frac{TL}{JG} \quad (۲-۷)$$

بیشترین مقدار تنش برشی τ در سطح محور اتفاق می‌افتد و مقدار آن با رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود :

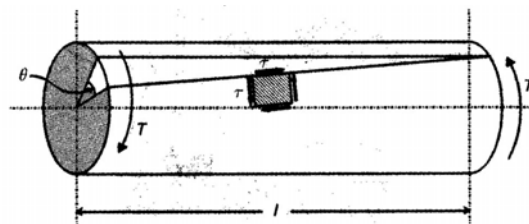
$$\tau = \frac{Tr}{J} \quad (۳-۷)$$

که در این رابطه همانطور که در شکل ۲-۷ نشان داده شده، r شعاع محور است.

در یک شافت با مقطع دایره‌ای با جایگزینی مقدار ممان قطبی اینرسی $J = \pi r^4 / 2$ خواهیم داشت :

$$\theta = \frac{2TL}{\pi r^4 G} \quad \text{و} \quad \tau = \frac{2T}{\pi r^3} \quad (۴-۷)$$

معادلات کرنشهای حاصل از پیچش در محورهای با سطح مقطع‌هایی غیر از دایره، از پیش آماده و در دسترس هستند. مهمترین کاربرد اندازه‌گیری گشتاور در بسیاری از گرایشهای رشته مهندسی عبارت از برآورد توان مکانیکی است. معادله (۱-۷) نشان می‌دهد که چگونه می‌توان با اندازه‌گیری سرعت چرخشی و گشتاور مقدار توان را باسانی محاسبه کرد. اندازه‌گیری سرعت چرخشی نسبتاً آسان و غالباً بدین صورت به دست می‌آید که علامت نقطه‌های رنگی روی سطح محور و یا فلاپول مربوطه به آن قرار می‌دهند و توسط انعکاس نور حاصل از آن و شمردن تعداد انعکاسها در واحد زمان سرعت چرخشی را اندازه می‌گیرند. اندازه‌گیری گشتاور دارای ترتیبات مشکل‌تری است. سنسورهای معمول گشتاور از نوع کرنش سنج (به بخش ۲-۷ مراجعه شود) در دسترس ولی گران قیمت هستند، ضمن اینکه به کارگیری آنها مشکل بوده و غالباً در دراز مدت قابل اعتماد نیستند.



شکل ۲-۷ شافت با مقطع دایره‌ای (به شعاع r) تحت پیچش تنش برشی $\tau =$

۲-۷ روشهای مکانیکی اندازه گیری گشتاور

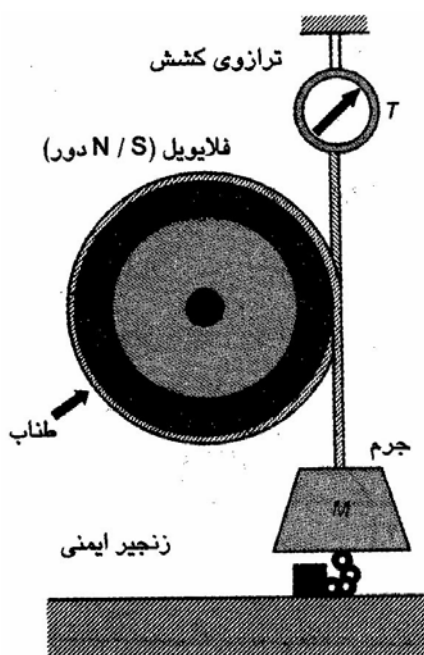
یکی از قدیمی ترین و در عین حال مفیدترین روشهای اندازه گیری گشتاور در یک محور چرخان، استفاده از ابزاری به نام دینامومتر جذبی است که در این نوع ابزار، کل توان تولید شده توسط اصطکاک در یک ترمز جذب می شود. یک ترمز طنابی یا تسمه مانند دور یک فلاپیول پیچیده شده و اغلب اوقات توسط آب خنک می شود. طناب فوق یک دور دور فلاپیول پیچیده شده و به جرم M در پایین متصل گردیده است (شکل ۷-۳). انتهای دیگر طناب به یک ترازوی فنری وصل شده است که مقدار کشش را در طناب T اندازه می گیرد. نیروی موجود در قسمت پایین طناب ناشی از وزن است و با Mg نشان داده شده است. اگر قرائت ترازوی فنری T باشد، اختلاف کشش بین دو انتهای طناب دارای $(Mg - T)$ خواهد بود. اگر شعاع فلاپیول R باشد، آنگاه گشتاور عبارت خواهد بود از :

$$R(Mg - T) = \text{گشتاور}$$

و توان عبارتست از :

$$W = 2\pi N R (Mg - T)$$

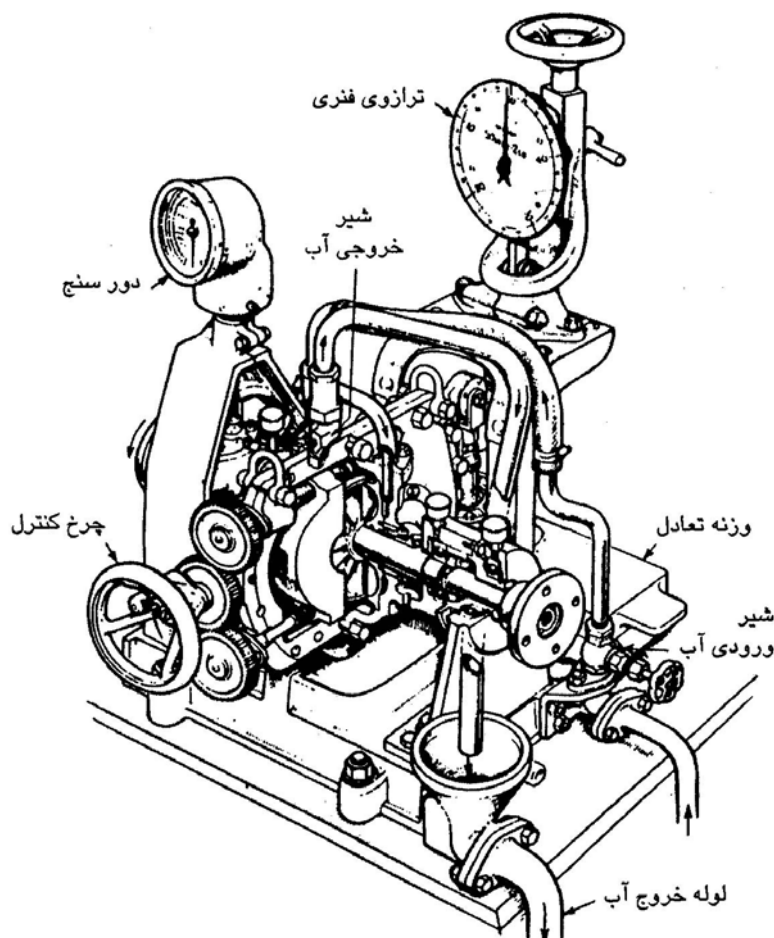
که مقدار N عبارت از تعداد دور فلاپیول در ثانیه است.



شکل ۷-۳ دینامومتر جذبی

این ترتیب اندازه گیری دارای خطراتی است، به طوریکه ممکن است ترمز گیر کند و وزنه را به بالای فلاپیول پرتاب کند. به منظور اجتناب از چنین پیش آمدی از یک طناب یا زنجر قوی استفاده می شود (شکل ۷-۳) که باعث می شود وزنه بیشتر از چند سانتی متر بالاتر نیاید. گونه کاملتر و پیچیده تر دینامومتر جذبی که غالباً برای اندازه گیری استفاده می شود، نوع هیدرولیکی است که ابتدا توسط فراود (W.Froude) اختراع شده است. در

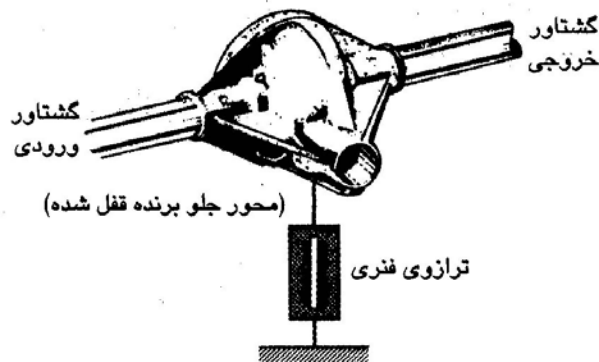
دینامومتر فراود (شکل ۷-۴) انرژی حاصل از محور چرخان تبدیل به انرژی جنبشی در آب می‌شود و سپس انرژی فوق مستهلک می‌شود.



شکل ۷-۴ دینامومتر فراود با ترمز آبی

گشتاور لازم برای مهار کردن ابزار معمولاً توسط یک ترازوی فنری اندازه‌گیری می‌شود. امتیاز دینامومتر فراود این است که بر خلاف آنچه در مورد ترمز طنابی گفته شد، امکان بریده شدن و پارگی در آن وجود ندارد اما، دینامومترهای فراود نسبت به دینامومترهای جذبی گرانتر هستند. بسیار جالب توجه است به طور اجمالی بدانیم که فلاپیول سیال خودرو تقریباً نوع بهبود یافته‌ای از دینامومتر فراود است.

یک روش کاملاً مکانیکی اندازه‌گیری گشتاور بر اساس نیروی مورد نیاز برای مهار کردن جعبه دنده استوار است و تا زمانی که نویسندگان معرفی نکنند، کاربرد گسترده‌ای نخواهد داشت، اگر چه جوابی برای این سؤال نمی‌توان یافت که چرا نایستی به طور موفقیت‌آمیزی مورد استفاده قرار گیرد. هر جعبه دنده‌ای که سرعت چرخشی یک محور را تغییر می‌دهد به نسبت معکوس گشتاور را نیز تغییر می‌دهد (با فرض اینکه از اصطکاک صرف‌نظر شود). نسبت گشتاور ورودی T_{in} به گشتاور خروجی T_{out} عبارت است از نسبت معکوس سرعت‌های آنها و اختلاف بین گشتاورهای ورودی و خروجی عبارت است از گشتاور مورد نیاز مهار کردن جعبه دنده.



شکل ۵-۷ ترانسدیوسر گشتاور «اکسل عقب»

بنابراین :

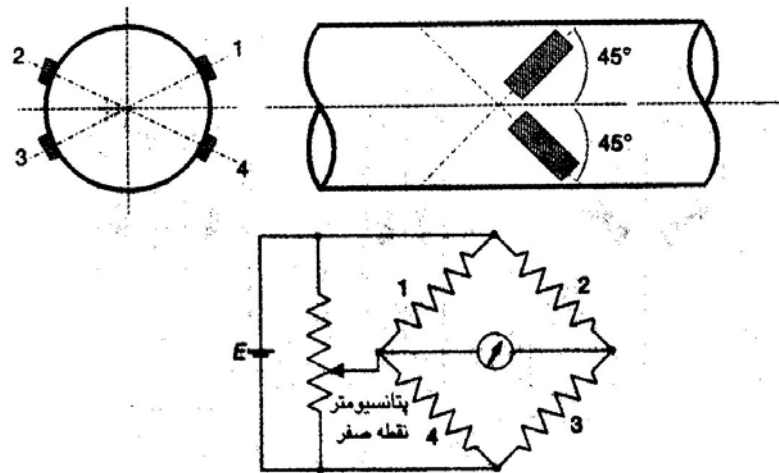
$$\frac{T_{in}}{T_{out}} = \frac{\omega_{out}}{\omega_{in}} \quad \text{و} \quad T_{in} - T_{out} = T_{\text{مهار}}$$

پس از اندازه‌گیری سرعت‌های ورودی و خروجی T_{in} و T_{out} را می‌توان محاسبه کرد. این روش در آزمایشگاه‌های دانشگاهی که در آنها هزینه‌ها اهمیت زیادی دارند به کار می‌روند به دلیل اینکه مطابق شکل ۵-۷ می‌توان با هزینه بسیار اندکی با استفاده از اکسل عقبی یک خودرو قراضه آن را تهیه کرد. موتور و یا دیگر منابع قدرت مکانیکی به یک محور چرخ وصل می‌شود و بار به محور دیگر چرخ متصل می‌گردد. کوپلینگ محور جلو برنده به محفظه دیفرانسیل متصل است. گشتاور مورد نظر برای مهار کردن محفظه توسط ترازوی فنری و یا ترانسدیوسر نیروی الکتریکی اندازه‌گیری می‌شود و دو برابر گشتاور ارسال شده به سیستم است و دلیل آن این است که محورهای ورودی و خروجی دارای جهت‌های چرخش عکس یکدیگر هستند.

۳-۷ ترانسدیوسرهای گشتاور از نوع کرنش سنج

ترانسدیوسرهای گشتاور مبتنی بر اندازه‌گیری کرنش معمولاً توسط نصب کرنش‌سنجها در روی یک محور برای اندازه‌گیری کرنش برشی که به وسیله پیچش به وجود آمده‌اند، همانند شکل ۷-۲، هستند و تفصیل بحث آن در بخش ۷-۱ آمده است. این نوع ترانسدیوسر در سطح وسیعی استفاده شده است و احتمالاً رایج‌ترین نوع سنسور گشتاور را تشکیل می‌دهد. مهمترین ضعف این روش، آن است که برای انتقال قدرت به محور چرخان و تحریک پل کرنش‌سنج و به دست آوردن کمیت‌های خروجی معمولاً به تجهیزات اضافی دیگری احتیاج داریم. این قطعات عبارتند از : حلقه‌های لغزان (slip ring)، ترانسفورمرهای چرخان و یا ابزار تله‌متری (دور سنجی) با تغذیه باتری. صرف‌نظر از اینکه کدامیک مورد نظر هستند، نیاز به نوع تغذیه و یا چگونگی انتقال اطلاعات اندازه‌گیری از محور چرخان، می‌تواند اندازه‌گیری گشتاور را نسبت به اندازه‌گیریهای فشار و حرارت گران‌تر کند. علاوه بر این، حلقه‌های لغزان (و تا حدودی ترانسفورمرهای چرخان) هنگامی که

در محیط کثیف قرار بگیرند کارشان رضایت بخش نخواهد بود و ممکن است باعث تداخل الکترومغناطیسی بشوند.



شکل ۶-۷ استفاده از کرنش سنجها برای اندازه گیری گشتاور شافت

تنشهای برشی که در شکل ۷-۲ نشان داده شده اند باعث می شوند کرنشها با زاویه 45° نسبت به محور طولی شافت ظاهر شوند. در شکل ۶-۷ آرایش معمولی کرنش سنجها برای اندازه گیری گشتاور نشان داده شده اند. گیجها بایستی دقیقاً با زاویه 45° نسبت به محور شافت نصب شوند، در غیر اینصورت آرایش فوق علاوه بر حساسیت نسبت به پیچش، به خمش و تنشهای محوری نیز حساسیت خواهد داشت. جاسازی دقیق گیج با دسترسی به چهار پره مخصوص قابل پیاده سازی است.

در این نوع نصب، همان طور که در شکل ۷-۷ مشاهده می شود، دو گیج دقیقاً روی یک پوشش مشترک نصب می شوند. استفاده از چهار عدد کرنش سنج فعال به صورت آرایش پل، جبران سازی حرارتی کاملی را به وجود می آورد [3].

شکل ۶-۷ یک نوع آرایش از نصب کرنش سنجها روی یک شافت با مقطع دایره ای توپر را نشان می دهد. همین ترتیب نصب را می توان برای یک شافت مقطع دایره ای تو خالی به کار برد. هنگامی که گشتاور به استوانه با دیوار نازک اعمال می شود فرض بر این است که تنش برشی در طول دیواره استوانه ثابت باشد [4]. در چنین حالاتی مناسب تر این است که کرنش سنجها روی سطح داخلی لوله نصب شوند تا حفاظت مکانیکی بهتری داشته باشند.

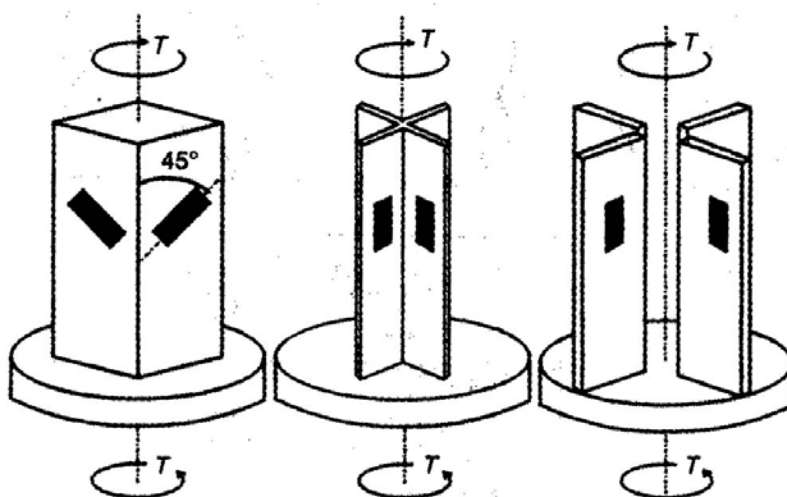
همانگونه که در شکل ۷-۸ مشاهده می شود بعضی اوقات شافتهایی با مقطع غیر دایره ای نیز مورد استفاده قرار می گیرد. برای اندازه گیری گشتاورهای سطح پایین گاهی اوقات از آرایش صلیبی و یا صلیبی تو خالی استفاده می شود.

برای اعمال مقادیر بزرگتر گشتاور، شافت مقطع مربعی توپر مناسبتر است و نسبت به شافت مقطع دایره ای شکل ۶-۷ دارای امتیازاتی است. کرنش سنجها راحت تر تنظیم می شوند و روی صفحه مسطح نصب می شوند و چون گوشه های مقطع مربع در موقع پیچش بدون تنش هستند [5]، این نقاط محل خوبی برای ایجاد

اتصالات لحیم کاری بین سیمها و کرنش سنج می باشد. اگر این اتصالات در ناحیه با تنش بالا قرار گیرد، اغلب اوقات به علت عیبهایی ناشی از خستگی، به نقاط غیر قابل اعتماد تبدیل می شوند. خلاصه اینکه شافت با



شکل ۷-۷ چهارپره کرنش سنج برای اندازه گیری پیچش



شکل ۷-۸ طرحهای مختلف سنسور گشتاور

مقطع مربعی نسبت به شافت با مقطع دایره ای با استحکام پیچشی معادل از نظر خمش خیلی محکم تر است، بنابراین اثرات خم شدن (که در صورت بد تنظیم شدن پدیدار خواهد شد) کاهش می یابد.

۷-۴ میله های پیچش

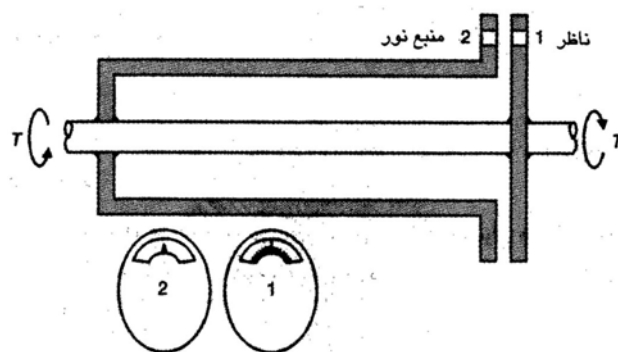
گشتاور در یک شافت باعث انحراف الاستیک می شود. کرنش منتهجه را می توان همانگونه که در بخش قبل شرح داده شد در یک نقطه اندازه گیری کرد و یا حرکت نسبی غیر خالص بین دو انتها را می توان برای اندازه گیری گشتاور مورد استفاده قرار داد.

همانند وضعیتی که در سیستمهای کرنش سنج پیش می‌آمد، مشکل عمده، لزوم توانایی اندازه‌گیری انحراف شافت در حین چرخش شافت است. اما استفاده از انحراف شافت دارای مزایای ویژه‌ای است. اول اینکه احتیاجی به تعیین محل دقیق و نقطه نصب سنسورهای کرنش سنج نیست. ثانیاً، چون اثر یک گشتاور به کار رفته در طول شافت جمع می‌شود، اثر هر گونه تغییرات محلی در خواص مواد و یا شکل هندسی شافت کاهش می‌یابد. سوم اینکه، جابه‌جاییهای (نسبتاً) زیاد پیش آمده در موقعی که حرکت‌های دو انتهای شافت با هم مقایسه می‌شوند طراحی انواع سیستمهای اندازه‌گیری گشتاور غیر تماسی بدون نیاز به حلقه‌های لغزان را ممکن می‌سازد.

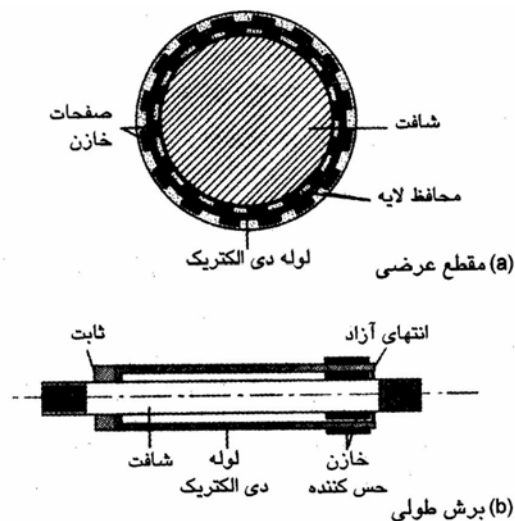
شکل ۷-۹ یک نمونه تورک‌متر که از روش نوری برای اندازه‌گیری انحراف استفاده می‌کند را نشان می‌دهد. جابه‌جایی زاویه‌ای نسبی بین دو انتهای عضو منتقل‌کننده گشتاور توسط نشانگر روی دیسک شماره ۲ نسبت به مقیاس کالیبره شده روی دیسک ۱ خوانده می‌شود. پافشاری بینایی بشر و اثر استروبوسکوپی مشاهده تناوبی کار این سیستم را از حدود 600 rpm (10 Hz) و بالاتر را میسر می‌سازد.

سیستم میله پیچش با استفاده از سنجش گشتاور به طریقه خازنی برای استفاده در خودرو عرضه شده است [6]. شافت متحرک خودرو همانطور که در شکل ۷-۱۰ نشان داده شده است به بوش هم مرکز از جنس دی‌الکتریک مجهز شده است. بوش از یک انتها به شافت متصل است و انتهای دیگر آن روی یک تکیه‌گاه لاستیکی قرار دارد. وقتی گشتاور به شافت وارد می‌شود باعث حرکت نسبی بین سطح شافت و انتهای آزاد بوش هم مرکز می‌گردد. از این حرکت برای تغییر ظرفیت بین دو الگوی مخالف هم نوارهای هادی، که یکی از آنها در شافت و دیگری در بوش است مورد استفاده قرار می‌گیرد.

سنسور گشتاور خازنی به یک سیم‌پیچ القا که به دور شافت پیچیده شد وصل شده است. بنابراین مدار پسیو متوجه دارای فرکانس تشدید است که مقدار آن بستگی به گشتاور به کار رفته دارد. مدار تشدید پسیو با شافت متحرک می‌چرخد و از محل یک دستگاه ساکن توسط تزویج سلفی با استفاده از یک سیم‌پیچ سلف دوم که توسط یک اسلایاتور همانطور که در شکل ۷-۱۱ نشان داده شده تحریک می‌شود. سپس مسئله اندازه‌گیری گشتاور اندازه‌گیری یکی از فرکانس‌هایی که در آن تشدید اتفاق می‌افتد تبدیل می‌شود. وقتی فرکانس اسلایاتور همان فرکانسی باشد که در آن فرکانس مدار پسیو دچار تشدید می‌شود جریانی اضافی کشیده می‌شود. اگر فرکانسی که در آن تشدید اتفاق می‌افتد اندازه‌گیری شود این اندازه‌گیری برای تعیین مقدار گشتاور مفید است. امتیاز این آرایش این است که هیچ ارتباط فیزیکی بین شافت چرخان و بدنه خودرو مورد نیاز نمی‌باشد.

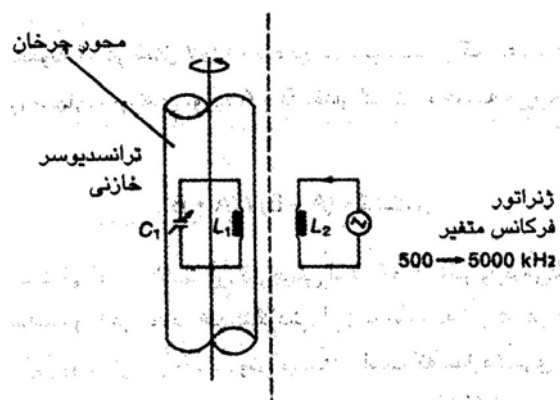


شکل ۷-۹ ترانس‌دیوسر گشتاور میله پیچش

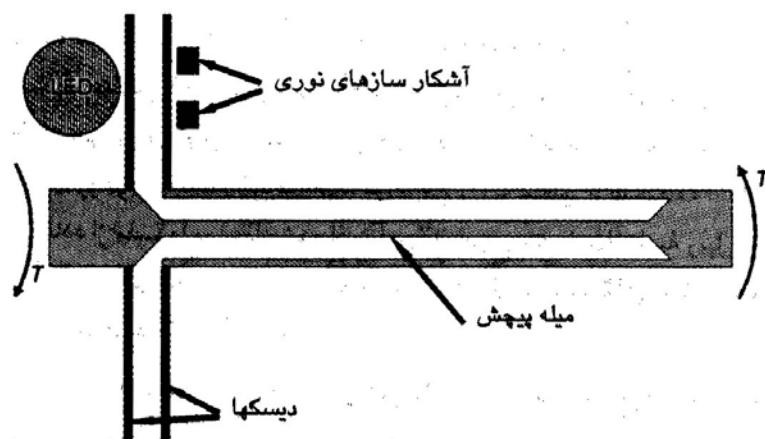


شکل ۷-۱۰ ساختمان سنسور گشتاور

یک سنسور میله پیچش از نوع نوری که به منظور استفاده به عنوان قسمتی از یک سیستم توسط مرکز مهندسی پیشرفته لوکاس (LOCUS) پیشنهاد شده است [7]. سنسور مورد نظر از یک جفت دیسک تشکیل شده است که مطابق شکل ۷-۱۲ دارای شکافهایی در دو انتهای میله پیچش است. نور حاصل از یک دیود



شکل ۷-۱۱ مدار تشدید چرخان که توسط تزویج سلفی تحریک میشود



شکل ۷-۱۲ سنسور گشتاور به طریق نسبتسنج EPAS لوکاس

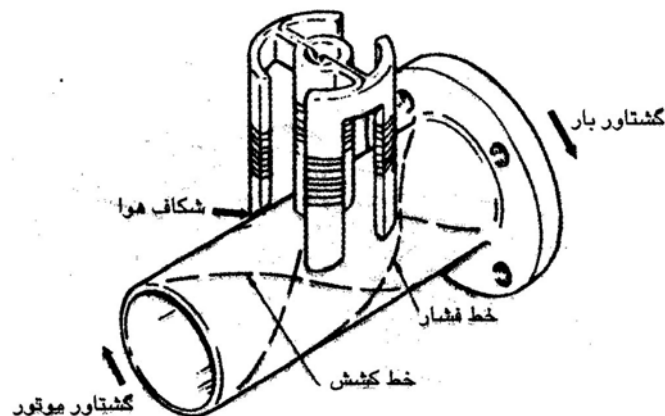
منتشر کننده نور (LED) از میان شکافهای دیسک عبور می کند و توسط یک آشکارساز نوری دریافت می شود. تغییرات گشتاور باعث می شود میزان همپوشانی بین دیسکها تغییر کند و بنابر این خروجی آشکارساز نوری نیز تغییر یابد. اما سیستم لوکاس باعث نوعی تصفیه می شود که باعث یکنواختی و صافی اطلاعات می شود و آن را برای استفاده خودرو مناسبتر می کند. مهمترین آنها استفاده از یک روش نسبت سنجی سرعت سنجها برای حذف اثر تغییرات در شدت روشنایی منبع است. دیسکهای شکافدار توسط یک LED مشترک مانند شکل ۷-۱۲ تحت تابش نور قرار می گیرند. اگر ولتاژ تغذیه تغییر کند، مقدار نور ساطع شده از دیود LED تغییر می کند. حتی در صورتی که تغذیه کاملاً رگوله شده ای LED را تغذیه کند، باز به دلیل عمر و استهلاک قطعه، نور خروجی از LED تا حدود 40% تنزل خواهد کرد. اثر نسبت سنجی بدین صورت استفاده می شود که هر دیسک شکافدار دارای دو باریکه شکاف است و به گونه ای تعبیه شده اند که به محض اعمال گشتاور در یک جهت شدت نور فرستاده شده از میان شیار بیرونی (A) افزایش می یابد در صورتی که با عبور از شیار داخلی (B) شدت آن کاهش می یابد.

نور عبوری از هر شیار همانگونه که در شکل ۷-۱۲ دیده می شود توسط یک جفت دیود نوری اندازه گیری می شود. با اندازه گیری خروجیهای دیودهای نوری A و B مقدار گشتاور محاسبه می شود و سپس توسط عبارت زیر :

$$\text{گشتاور} = (A - B) / (A + B).$$

مقدار بزرگی گشتاور به دست می آید و علامت آن در جهتی است که گشتاور وارد می شود (به عنوان مثال در جهت حرکت عقربه های ساعت و یا در خلاف جهت گردش آن). با توجه به آن که هر دو کانال به طور یکسان تحت تأثیر قرار می گیرند، این روش از این جهت روش مطمئنی است که اندازه گیری گشتاور در آن مستقل از منبع شدت منبع نور است. علاوه بر این برای یک شدت منبع معین، کمیت $(A + B)$ بایستی مقدار ثابتی باشد که مستقل از گشتاور است و این مقدار بایستی برای آزمایش صحت کار سنسور استفاده شود. اگر $(A + B)$ به سمت خارج از محدوده های از پیش تنظیم شده حرکت کند بایستی یک اخطار مناسب داده شود. امکانات خودآزمونی (selftest) برای سیستمهای با ایمنی بحرانی همانند هدایت خودرو بسیار ضروری است. مشکل عمده در رابطه به سیستم لوکاس این است که موقعیت و هندسه دیودهای نوری و محل آنها نسبت به شکافهای روی دیسکها، هنگامی که دیسکها می چرخند اگر از عبور ریلهای خروجی سنسور ممانعت شود حساس است. فقط در صورتی می توان از تغییرات خروجی جلوگیری که منطقه حساس آشکارسازهای نوری دقیقاً مربوط به مضرب زوجی از منطقه شکاف باشد. در مرجع [7] به منظور ارائه منطقه آشکار صحیح و میزان کردن منبع نور، استفاده از ماسکها پیشنهاد شده است. پس از این بهینه سازیها، دامنه ریل از 10% تمام مقیاس نیز کمتر خواهد شد. اگرچه این مقدار دقت برای یک سنسور گشتاور آزمایشگاهی قابل قبول نیست ولی در کاربردهای انتقال توان می تواند قابل قبول باشد.

همچنین گزارشهایی راجع به پیچش در امتداد طول میل لنگ با استفاده از دیسکهای شکافدار آمده است [8]. اما تغییرات گشتاور سطح بالا که از عمل چند سیلندر حادث می شود باعث می شود نتایج اندازه گیری دقیق نباشد.



شکل ۷-۱۳ سنسور گشتاور مغناطیسی

۵-۷ روشهای مغناطیسی غیر تماسی

انواعی از سنسورهای گشتاور که از اثر کشش مغناطیسی استفاده می کنند ساخته شده اند. مثال خوبی از این مدل نوعی از سنسور است که در مرجع شماره [8] معرفی شده و در شکل ۷-۱۳ شمای آن آورده شده است. کشش مغناطیسی اثری است که در مواد فرومغناطیس مانند فولاد اتفاق می افتد که در آنها نفوذپذیری (permeability) تحت تأثیر تنش قرار می گیرد. معادله ۷-۳ نشان می دهد که تنش در یک شافت متناسب با گشتاور وارده است و در نتیجه اگر شافت از جنس ماده مغناطیسی مانند فولاد باشد ضریب نفوذ پذیری آن تغییر می کند. اگر چه اثر مزبور بسیار ناچیز است ولی می توان با روشی شبیه به آنچه در شکل ۷-۱۳ آمده آن را اندازه گیری کرد. سنسور گشتاور عبارت است از پنج عدد سیم پیچ که همانگونه که در شکل نشان داده شده، روی یک هسته با چهار بازو پیچیده شده است. سیم پیچ وسطی را می توان به عنوان سیم پیچ اولیه یک ترانسفورماتور و چهار سیم پیچ محیطی را به عنوان سیم پیچهای ثانویه در نظر گرفت. تزویج مغناطیسی بین اولیه و ثانویه توسط شافت فولادی، که همانند شکل در مجاورت سنسور قرار گرفته اند، فراهم شده است.

سیم پیچ اولیه توسط یک جریان AC تحریک می شود و باعث ایجاد میدان مغناطیسی نوسان کننده در شافت می گردد. چهار سیم پیچ ثانویه به شکل آرایش پل وستون به یکدیگر وصل شده و به گونه ای قرار گرفته اند که روی خطهای تنش اصلی قرار گرفته اند، به طوری که مسیر مارپیچی با زاویه 45° را برای یک استوانه تنش طی می کنند. وقتی شافت تحت تنش نیست جریانهای مساوی در چهار سیم پیچ ثانویه ایجاد می شود و ولتاژ خروج از تعادل صفر است. وقتی گشتاور به شافت اعمال می شود مقادیر نفوذ پذیری در جهت های کشش و فشار به طور مساوی ولی در خلاف جهت یکدیگر تغییر می کنند و دامنه ولتاژ خروجی پل متوجه متناسب با گشتاور وارده است.

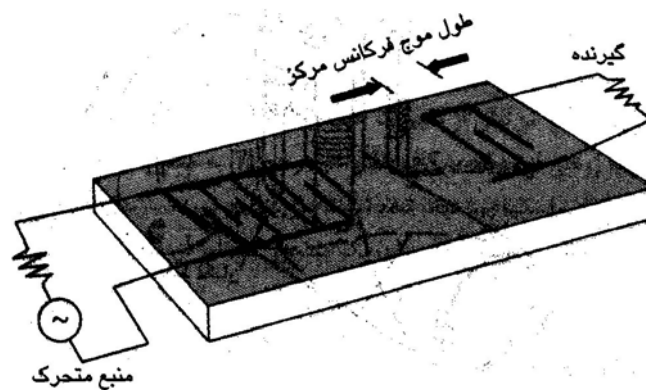
چهار مشکل عمده در مورد این نوع سنسور گشتاور مطرح است که عبارتند از :

- ۱) غیر همگن بودن جنس ماده شافت،
- ۲) حساسیت نسبت به تغییرات شکاف سنسور / شافت،

۳) اثرات حرارتی و

۴) تغییرات خروجی سنسور نسبت به تغییرات سرعت چرخش شافت.

مورد اول از همه مهمتر است. نفوذپذیری ماده‌ای که شافت از جنس آن ساخته شده می‌تواند روی محیط شافت تا 50% تغییر کند. در نتیجه برای یک گشتاور ثابت سیگنال خروجی سنسور می‌تواند در فرکانسی معادل با سرعت دوران ریپل داشته باشد. این مشخصه باعث می‌شود اندازه‌گیری سطح گشتاور لحظه‌ای حول یک شافت چرخان بسیار مشکل بشود. اما، استفاده از مدارات هموارکننده باعث می‌شود که بتوان از ابزار دقیق جهت اندازه‌گیری گشتاور میانگین با انتگرال‌گیری روی چند دوران استفاده کرد.

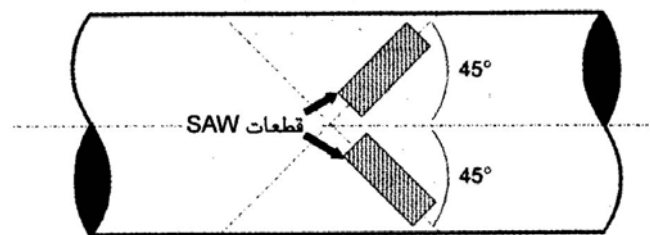


شکل ۷-۱۴ آرایش الکترو SAW

۷-۵ ترانسدیوسرهای موج اکوستیک سطحی (SAW)

ابزارهای SAW براساس نظریه‌های کار می‌کنند که نخستین بار توسط لرد ریلی (Lord Rayleigh) در سال ۱۸۸۵ تدوین و ارائه شد [10]. او نشان داد که امواج (که به عنوان امواج سطحی و یا امواج ریلی شناخته شده‌اند) می‌توانند در طول سطح یک محیط ایزوتروپیک الاستیک منتشر شوند.

امواج اکوستیک سطحی همانگونه که در شکل ۷-۱۴ نشان داده شده می‌توانند با استفاده از ترانسدیوسرهای پیزوالکتریکی که با نقش‌نگاری روی سطوح و درآوردن آنها به صورت الکترودهای در هم تافته به وجود آمده، تحریک و آشکار شوند. فرکانسی که ابزار SAW در آن فرکانس کار می‌کند توسط شکل هندسی الکترودها تعیین می‌شود. برای اندازه‌گیری گشتاور، بایستی دو قطعه SAW به شافتی که زیر بار پیچش است وصل شود. تنش برشی منتهی به گشتاور (شکل ۷-۲ ملاحظه شود) شکل هندسی الکترودها را تغییر می‌دهد و بنابراین فرکانس کار قطعه SAW تغییر می‌کند. در فرکانس 500 MHz، $1000 \mu\epsilon$ (میکرواستیشن) فرکانس SAW را با اندازه 500 kHz تغییر می‌دهد [11]. دو ترانسدیوسر همانند شکل ۷-۱۵ با زاویه 45° روی شافت نصب شده‌اند.



شکل ۷-۱۵ ترانسدیوسرهای SAW برای اندازه‌گیری گشتاور محوری

هر ترانسدیوسر یک قسمت از حلقه فیدبک اسیلاتور را تکمیل می‌کند به طوری که فرکانس خروجی تابعی از شکل هندسی ابزار SAW خواهد بود. در یک آرایش نیم پل دو عدد ترانسدیوسر SAW لازم است که یکی از آنها برای اندازه‌گیری کشش و دیگری برای اندازه‌گیری فشار استفاده می‌شود. دو فرکانس نتیجه با یکدیگر جمع و تفریق می‌شوند. تفاضل فرکانسها اندازه گشتاور را می‌دهد و جمع دو فرکانس می‌تواند برای تخمین دما به کار برود [11].

ابزارهای SAW را می‌توان در صورت استفاده از پیک آپهای سلفی و یا خازنی بدون احتیاج به هیچ نوع اتصال خازنی راه‌اندازی کرد [11]. این قابلیت مخصوصاً باعث می‌شود سیستمهای بر پایه SAW جهت اندازه‌گیری گشتاور بسیار کارآمد باشند چون (همانگونه که در بخش ۷-۳ گفته شد) تله‌متری توسط حلقه‌های لغزان و یا ترانسفورمرهای چرخان باعث ایجاد عدم اطمینان به نتایج می‌شود.

کانال مهندسی مکانیک

[telegram.me/Mechanical_Eng](https://t.me/Mechanical_Eng)