فصل ۷ - اندازه گیری گشتاور و توان مکانیکی

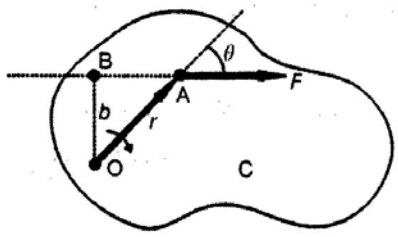
۷-۱ مقدمه و تعاریف

اغلب مواقع، مفهوم گشتاور حتی توسط مهندسین مجرب نیر باعث ایجاد 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 واردکنیم، ضمن اینکه سعی می‌کنیم جهت گشودن و یا هل دادن در، عمود بر سطح در باشد تا نتیجه بهتری به دست آید.

مقدار بزرگی اندازهٔ گشتاوری که بر یک صفحه عمود بر محور وارد می‌شود عبارتست از حاصلضرب نیرو (یا مؤلفه‌ای از نیرو که در صفحهٔ عمود بر محور چرخش قرار دارد) در فاصله عمودی از محور تا خط اعمال نیرو. این مفهوم در شکل ۷-۱ نشانداده 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 وکرنش (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 می خواهد جسم C را حول نقطه o بچرخاند.

گشتاور : $\tau = Fb = Fr\sin\theta$

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

شکل ۷-۱ تعریف گشتاور

معادلاتی که گشتاور را به توان و کرنش ربط می‌دهند کاملاً سرراست 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 :

$$T = \frac{P}{\omega} \qquad (۱-۷)$$

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:

$$\theta = \frac{TI}{JG} \qquad (۲-۷)$$

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

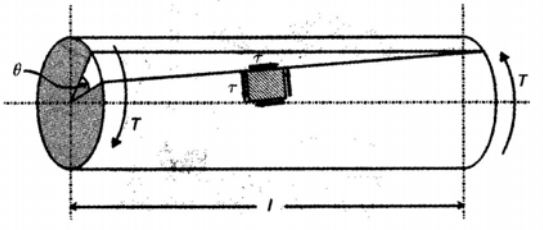
$$\tau = \frac{Tr}{J} \qquad (۳-۷)$$

که در این رابطه همانطور که درشکل ۷-۲ نشانداده شده، r شعاع محور است.

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

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

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 (۷-۱) نشان می‌دهد که چگونه می‌توان با اندازه‌گیری سرعت چرخشی و گشتاور مقدار توان را بآسانی محاسبه کرد. اندازه‌گیری سرعت چرخشی و گشتاور مقدار توان را بآسانی محاسبه کرد. اندازه‌گیری سرعت چرخشی نسبتاً آسان و غالباً بدین صورت به دست می‌آید که علامت نقطه‌های رنگی روی سطح محور و یا فلایول 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 کرنش‌سنج (به بخش ۷-۲ مراجعه شود) در دسترس ولی گران‌قیمت هستند، ضمن اینکه به کارگیری آنها مشکل بوده و غالباً در دراز مدت قابل اعتماد نیستند.



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

۲-۷ روشهای مکانیکی اندازه گیری گشتاور

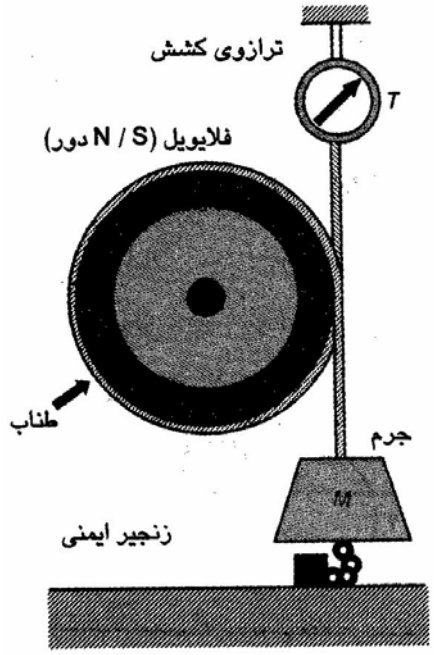
یکی از قدیمی‌ترین و در عین حال مفیدترین روشهای اندازه‌گیری گشتاور در یک محور چرخان، استفاده از ابزاری به نام دینامومتر جذبی است که در این نوع ابزار، کل توان تولید شده توسط اصطکاک در یک ترمز جذب می‌شود. یک ترمز طنابی یا تسمه مانند دور یک فلایویل پیچیده شده و اغلب اوقات توسط آب خنک می‌شود. طناب فوق یک دور دور فلایویل 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 اندزاه می‌گیرد. نیروی موجود در قسمت پایین طناب ناشی از وزن است و با Mg نشانداده شده است. اگر قرائت ترازوی فنری T باشد، اختلاف کشش بین دو انتهای طناب دارای (Mg – T) خواهد بود. اگر شعاع فلایویل R باشد، آنگاه گشتاور عبارت خواهد بود از :

$$\text{گشتاور} = (Mg - T)R \text{ ,}$$

و توان عبارتست از :

$$\text{توان} = 2\pi N (Mg - T) R \text{ (W)}$$

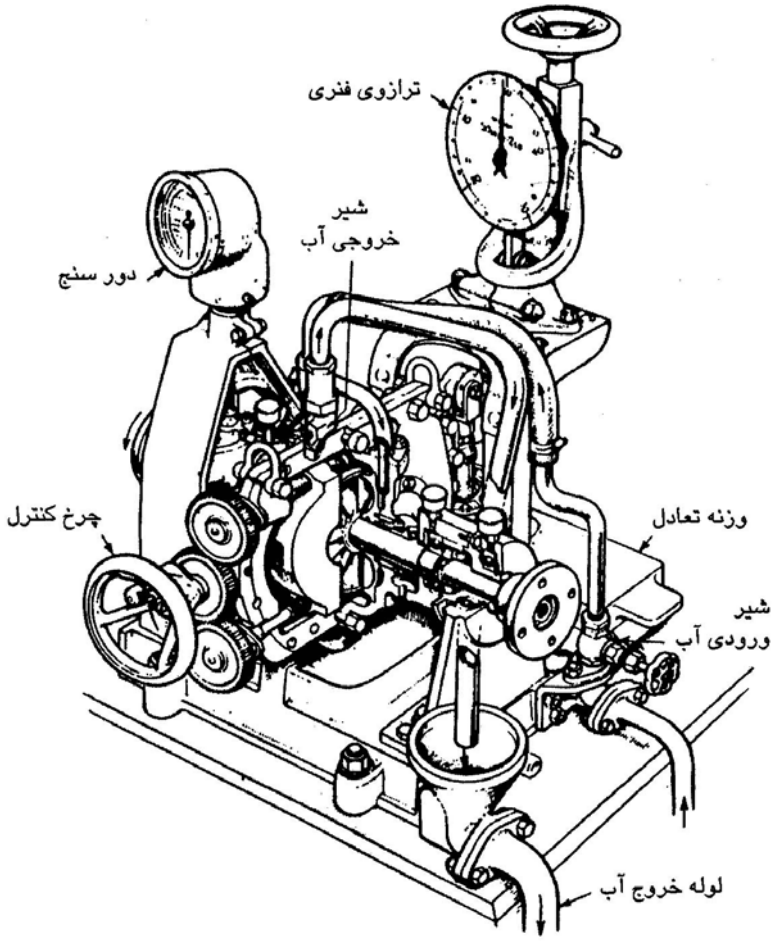
که مقدار N عبارت از تعداد دور فلایویل در ثانیه است.



شکل ۷-۳ دینامومتر جذبی

این ترتیب اندازه‌گیری دارای خطراتی است، به طوریکه ممکن است ترمز گیر کند و وزنه را به بالای فلایویل پرتاب کند. به منظور اجتناب از چنین پیش آمدی از یک طناب یا زنجیر قوی استفاده می‌شود (شکل ۷-۳) که باعث می‌شود وزنه بیشتر از چند سانتی متر بالاتر نیاید. گونهٔ کاملتر و پیچیده‌تر دینامومتر جذبی که غالباً برای اندازه‌گیری استفاده می‌شود، 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.

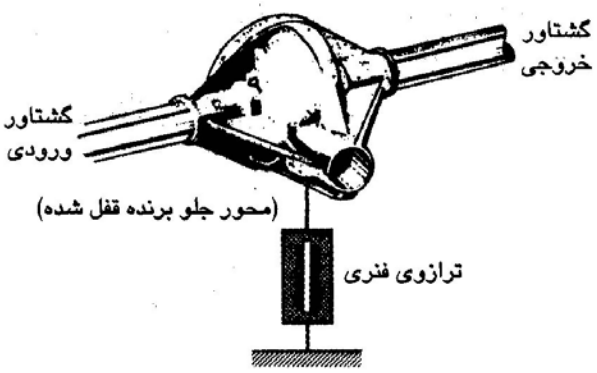


شکل ۷-۴ دینامومتر فرواد با ترمز آبی

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 فلایویل 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 نبایستی 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.



شکل۷-۵ تراتنسدیوسر گشتاور «اکسل عقب»

بنابراین :

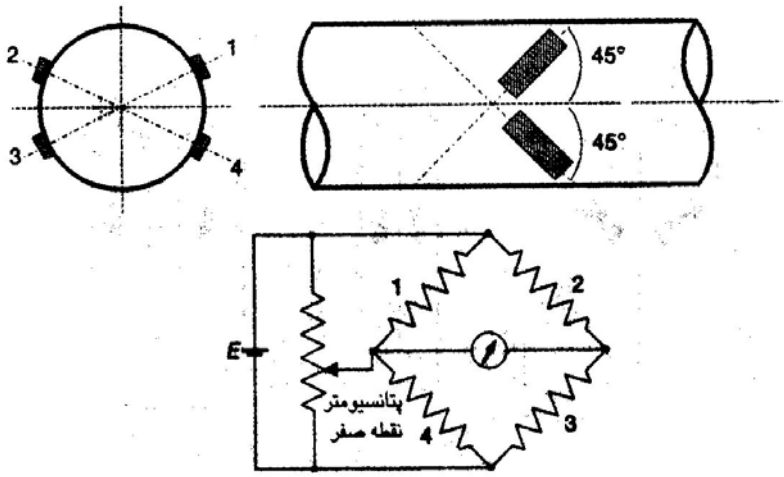
$$\frac{T_{in}}{T_{out}} = \frac{\omega_{out}}{\omega_{in}} \qquad \text{و} \qquad T_{in} - T_{out} = T_{\text{مهار}}$$

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 ۷-۵ 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 جلوبرنده 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 یکدیگرهستند.

۷-۳ ترانسدیوسرهای گشتاور از نوع کرنش‌سنج

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.

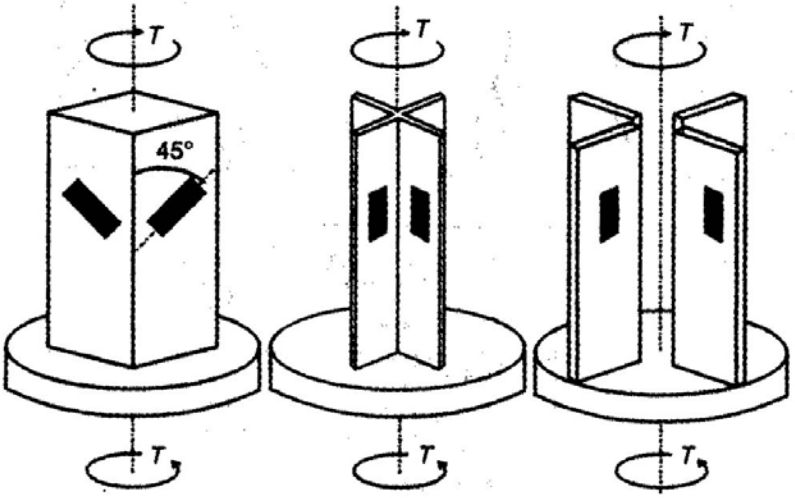


شکل ۷-۶ استفاده از کرنش‌سنجها برای اندازه‌گیری گشتاور شافت

تنشهای برشی که در شکل ۷-۲ نشانداده شده‌اند باعث می‌شوند کرنشها با زاویه °45 نسبت به محور طولی شافت ظاهر شوند. در شکل ۷-۶ آرایش معمولی کرنش‌سنجها برای اندازه‌گیری گشتاور نشانداده شده‌اند.
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 پیاده‌سازی است.
در این نوع نصب، همان طور که در شکل ۷-۷ مشاهده می‌شود، دو گیج دقیقاً روی یک پوشش مشترک نصب می‌شوند. استفاده از چهار عدد کرنش‌سنج فعال به صورت آرایش پل، جبران‌سازی حرارتی کاملی را به وجود می‌آورد [3].
شکل ۷-۶ یک نوع آرایش از نصب کرنش‌سنجها روی یک شافت با مقطع دایره‌ای توپر را نشان می‌دهد. همین ترتیب نصب را می‌توان برای یک شافت مقطع دایره‌ای تو خالی به کار برد. هنگامی که گشتاور به استوانه با دیوار نازک اعمال می‌شود فرض بر این است که تنش برشی در طول دیوارهٔ استوانه ثابت باشد [4]. در چنین حالاتی مناسب‌تر این است که کرنش‌سنجها روی سطح داخلی لوله نصب شوند تا حفاظت مکانیکی بهتری داشته باشند.
همانگونه که در شکل ۷-۸ مشاهده می‌شود بعضی اوقات شافتهایی با مقطع غیر دایره‌ای نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای اندازه‌گیری گشتاورهای سطح پایین گاهی اوقات از آرایش صلیبی و یا صلیبی تو خالی استفاده می‌شود.
برای اعمال مقادیر بزرگتر گشتاور، شافت مقطع مربعی توپر مناسبتر است و نسبت به شافت مقطع دایره‌ای شکل ۷-۶ دارای امتیازاتی است. کرنش‌سجها راحت‌تر تنظیم می‌شوند و روی صفحه مسطح نصب می‌شوند و چون گوشه‌های مقطع مربع در موقع پیچش بدون تنش هستند [5]، این نقاط محل خوبی برای ایجاد

اتصالات لحیم‌کاری بین سیمها و کرنش‌سنج می‌باشد. اگر این اتصالات در ناحیه با تنش بالا قرار گیرد، اغلب اوقات به علت عیبهای ناشی از خستگی، به نقاط غیر قابل اعتماد تبدیل می‌شوند. خلاصه اینکه شافت با

شکل ۷–۷ چهارپره کرنشسنج برای اندازهگیری پیچش



شکل ۷–۸ طرحهای مختلف سنسور گشتاور

مقطع مربعی نسبت به شافت با مقطع دایره‌ای 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 می‌یابد.

۷–٤ میله‌های پیچش

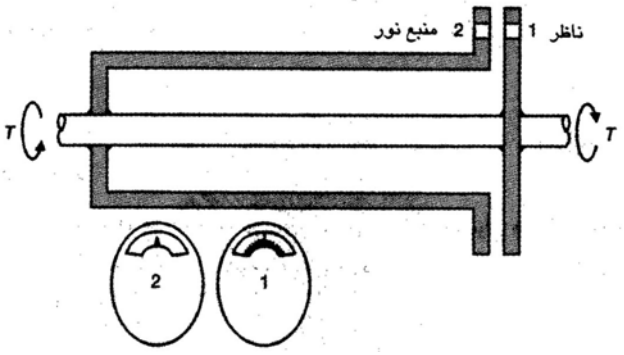
گشتاور در یک شافت باعث انحراف الاستیک می‌شود. کرنش منتجه را می‌توان همانگونه که در بخش قبل شرح داده شد در یک نقطه اندازه‌گیری کرد و یا حرکت نسبی غیر خالص بین دو انتها را می‌توان برای اندازه‌گیری گشتاور مورد استفاده قرار داد.

همانند وضعیتی که در سیستمهای کرنش‌سنج پیش می‌آمد، مشکل عمده، لزوم توانایی انـدازه‌گیـری انحـراف شافت در حین چرخش شافت است. اما استفاده از انحراف شـافت دارای مزیتهـای ویـژه‌ای اسـت. اول اینکـه احتیاجی به تعیین محل دقیق و نقطه نصب سنسورهای کرنش‌سنج نیست. ثانیاً، چون اثر یک گشتاور بـه کـار رفته در طول شافت جمع می‌شود، اثر هر گونه تغییرات محلـی در خـواص مـواد و یـا شـکل هندسـی شـافت کاهش می‌یابد. سوم اینکه، جابه‌جاییهای (نسبتاً) زیاد پیش آمده در موقعی که حرکتهای دو انتهـای شـافت بـا هم مقایسه می‌شوند طراحی انواع سیستمهای اندازه‌گیری گشتاور غیر تماسی بدون نیاز به حلقه‌هـای لغـزان را ممکن می‌سازد.

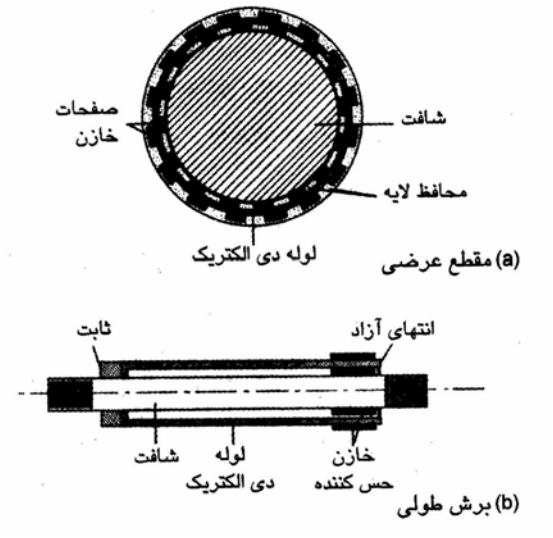
شکل ۷–۹ یک نمونه تورک‌متر که از روش نوری برای اندازه‌گیری انحراف استفاده می‌کند را نشان مـی‌دهـد. جابه‌جایی زاویه‌ای نسبی بین دو انتهای عضو منتقل‌کنندهٔ گشتاور توسط نشانگر روی دیسک شـماره 2 نسـبت به مقیاس کالیبره شده روی دیسک 1 خوانده می‌شود. پافشاری بینایی بشر و اثر استربوسکوپی مشاهده تناوبی کار این سیستم را از حدود (10 Hz) 600 rpm و بالاتر را میسر می‌سازد.

سیستم میله پیچش با استفاده از سنجش گشتاور به طریقه خازنی برای استفاده در خـودرو عرضـه شـده اسـت [6]. شافت متحرک خودرو همانطور که در شکل ۷–۱۰ نشـانداده شـده اسـت بـه بـوش هـم مرکـز از جـنس دی‌الکتریک مجهز شده است. بوش از یک انتها به شافت متصل است و انتهای دیگر آن روی یـک تکیـه‌گـاه لاستیکی قرار دارد. وقتی گشتاور به شافت وارد می‌شود باعث حرکت نسبی بـین سـطح شـافت و انتهـای آزاد بوش هم مرکز می‌گردد. از این حرکت برای تغییر ظرفیت بین دو الگوی مخالف هم نوارهای هادی، که یکـی 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 اسـت. بنـابراین مـدار پسـیو منتجه دارای فرکانس تشدیدی است که مقدار آن بستگی به گشتاور به کار رفتـه دارد. مـدار تشـدید پسـیو بـا شافت متحرک می‌چرخد و ازمحل یک استگاه ساکن توسط تزویج سلفی با استفاده از یک سیم‌پـیچ سـلف دوم که توسط یک اسیلاتور همانطور که در شکل ۷–۱۱ نشانداده شده تحریک می‌شود. سپس مسئله اندازه‌گیـری گشتاور اندازه‌گیری یکی از فرکانسهایی که در آن تشدید اتفـاق مـی‌افتـد تبـدیل مـی‌شـود. وقتـی فرکـانس اسیلاتور همان فرکانسی باشد که در آن فرکانس مدار پسیو دچـار تشـدید مـی‌شـود جریـانی اضـافی کشـیده می‌شود. اگر فرکانسی که در آن تشدید اتفاق می‌افتد اندازه‌گیری شود ایـن انـدازه‌گیـری بـرای تعیـین مقـدار گشتاور مفید است. امتیاز این آرایش این است که هیچ ارتباط فیزیکی بین شافت چرخان و بدنـهٔ خـودرو مـورد نیاز نمی‌باشد.

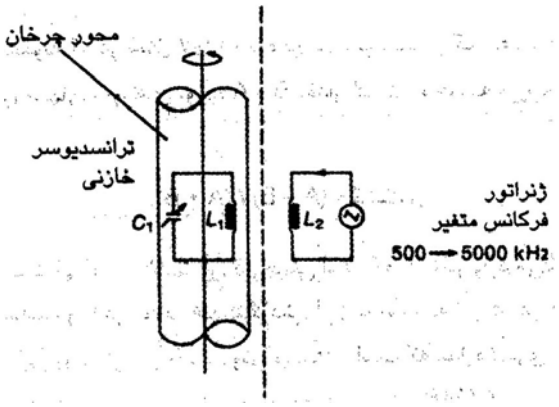


شکل ۷–۹ ترانسدیوسر گشتاور میله پیچش

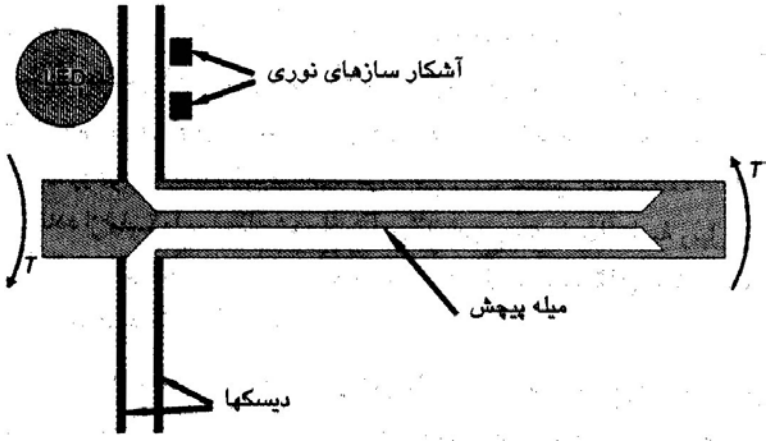


شکل ۷-۱۰ ساختمان سنسور گشتاور

یک سنسور میله پیچش از نوع نوری که به منظور استفاده بـه عنـوان قسـمتی از یـک سیسـتم توسـط مرکـز مهندسی پیشرفتهٔ لوکاس (Locus) پیشنهاد شده است [7]. سنسور مورد نظـر از یـک جفـت دیسـک تشـکیل 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 کنندهٔ نور (LED) از میان شکافهای دیسک عبور می‌کند و توسط یک آشکارساز نوری دریافت می‌شود. تغییرات گشتاور باعث می‌شود میزان همپوشانی بین دیسکها تغییر کند و بنابر این خروجی آشکارساز نوری نیز تغییر یابد. اما سیستم لوکاس باعث نوعی تصفیه می‌شود که باعث یکنواختی و صافی اطلاعات مـی‌شـود و آن را برای استفاده خودرو مناسبتر می‌کند. مهمترین آنها استفاده از یک روش نسبت سنجی سرعت‌سـنجها بـرای حذف اثر تغییرات در شدت روشنایی منبع است. دیسکهای شکاف‌دار توسط یک LED مشترک مانند شـکل ۷–۱۲ تحت تابش نور قرار می‌گیرند. اگر ولتاژ تغذیه تغییر کند، مقدار نور ساطع شده از دیود LED تغییر مـی‌کنـد. حتی در صورتی که تغذیه کاملاً رگوله شده‌ای LED را تغذیه کند، باز به دلیـل عمـر و اسـتهلاک قطعـه، نـور خروجی از LED تاحدود 40% تنزل خواهد کرد. اثر نسبت سنجی بدین صورت استفاده می‌شود که هر دیسـک شکاف‌دار دارای دو باریکهٔ شکاف است و به گونه‌ای تعبیه شده‌اند که به محض اعمال گشـتاور در یـک جهـت شدت نور فرستاده شده از میان شیار بیرونی (A) افزایش می‌یابد در صورتی که بـا عبـور از شـیار داخلـی (B) شدت آن کاهش می‌یابد.

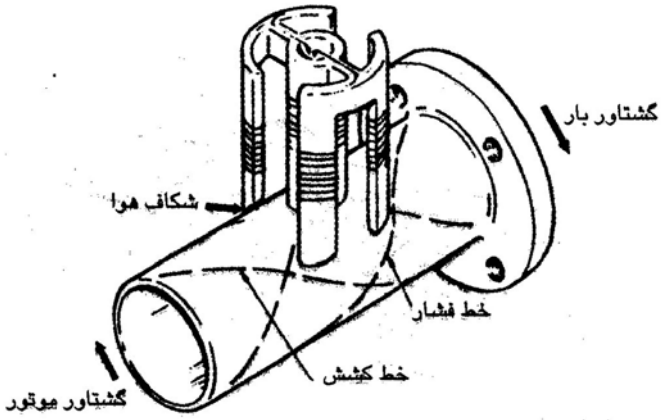
نور عبوری از هر شیار همانگونه که در شکل ۷–۱۲ دیده می‌شود توسط یک جفـت دیـود نـوری انـدازه‌گیـری می‌شود. با اندازه‌گیری خروجیهای دیودهای نوری A و B مقدار گشـتاور محاسـبه مـی‌شـود و سـپس توسـط عبارت زیر :

گشتاور = (A - B) / (A + B).

مقدار بزرگی گشتاور به دست می‌آید و علامت آن در جهتی است که گشتاور وارد می‌شود (به عنـوان مثـال در جهت حرکت عقربه‌های ساعت و یا در خلاف جهت گردش آن). با توجه بـه آن کـه هـر دو کانـال بـه طـور یکسان تحت تأثیر قرار می‌گیرند، این روش از این جهت روش مطمئنی است که انـدازه‌گیـری گشـتاور در آن مستقل از منبع شدت منبع نور است. علاوه بر این برای یک شدت منبع معین، کمیت (A + B) بایستی مقـدار ثابتی باشد که مستقل از گشتاور است و این مقدار بایستی برای آزمایش صحت کار سنسور استفاده شـود. اگـر (A + B) به سمت خارج از محدوده‌های از پیش تنظیم شده حرکت کند بایستی یک اخطار مناسـب داده شـود. 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 محـل آنهـا نسـبت به شکافهای روی دیسکها، هنگامی که دیسکها می‌چرخند اگر از عبور ریپلهای خروجی سنسور ممانعـت شـود حساس است. فقط در صورتی می‌توان از تغییرات خروجی جلوگیری که منطقـهٔحسـاس آشکارسـازهای نـوری دقیقاً مربوط به مضرب زوجی از منطقه شکاف باشد. در مرجع [7] به منظور ارائهٔ منطقه آشکار صحیح و میزان کردن منبع نور، استفاده از ماسکها پیشنهاد شده است. پـس از ایـن بهینـه‌سـازیها، دامنـهٔ ریپـل از 10% تمـام مقیاس نیز کمتر خواهد شد. اگرچه این مقدار دقت برای یک سنسور گشتاور آزمایشگاهی قابـل قبـول نیسـت ولی در کاربردهای انتقال توان می‌تواند قابل قبول باشد.

همچنین گزارشهایی راجع به پیچش در امتداد طول میل‌لنگ با استفاده از دیسکهای شکاف‌دار آمده اسـت [8]. اما تغییرات گشتاور سطح بالا که از عمل چند سیلندر حادث می‌شود باعث می‌شـود نتـایج انـدازه‌گیـری دقیـق نباشد.



شکل ۷-۱۳ سنسور گشتاور مغناطیسی

۷-۵ روشهای مغناطیسی غیر تماسی

انواعی از سنسورهای گشتاور که از اثر کشش مغناطیسی استفاده می‌کنند ساخته شده‌اند. مثال خوبی از این مدل نوعی از سنسور است که در مرجع شمارهٔ [8] معرفی شده و در شکل ۷-۱۳ شمای آن آورده شده است. کشش مغناطیسی اثری است که در مواد فرومغناطیس مانند فولاد اتفاق می‌افتد که در آنها نفوذپذیری (permeability) تحت تأثیر تنش قرار می‌گیرد. معادله ۷-۳ نشان می‌دهد 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 می‌کند. اگر چه اثر مزبور بسیار ناچیر است ولی می‌توان با روشی شبیه به آنچه در شکل ۷-۱۳ آمده آن را اندازه‌گیری کرد. سنسور گشتاور عبارت است از پنج عدد سیم‌پیچ که همانگونه که در شکل نشانداده شده، روی یک هسته با چهار بازو پیچیده شده است. سیم‌پیچ وسطی را می‌توان به عنوان سیم‌پیچ اولیهٔ یک ترانسفورماتور و چهار سیم‌پیچ محیطی را به عنوان سیم‌پیچهای ثانویه در نظر گرفت.

تزویج مغناطیسی بین اولیه و ثانویه توسط شافت فولادی، که همانند شکل در مجاورت سنسور قرار گرفته‌اند، فراهم شده است.

سیم‌پیچ اولیه توسط یک جریان AC تحریک می‌شود و باعث ایجاد میدان مغناطیسی نوسان‌کننده در شافت می‌گردد. چهار سیم‌پیچ ثانویه به شکل آرایش پل وستون به یکدیگر وصل شده و به گونه‌ای قرار گرفته‌اند که روی خطهای تنش اصلی قرار گرفته‌اند، به طوری که مسیر مارپیچی با زاویه 45° را برای یک استوانه تنش طی می‌کنند. وقتی شافت تحت تنش نیست جریانهای مساوی در چهار سیم‌پیچ ثانویه ایجاد می‌شود و ولتاژ خروج از تعادل صفر است. وقتی گشتاور به شافت اعمال می‌شود مقادیر نفوذ پذیری در جهتهای کشش و فشار به طور مساوی ولی در خلاف جهت یکدیگر تغییر می‌کنند و دامنهٔ ولتاژ خروجی پل منتجه متناسب با گشتاور وارده است.

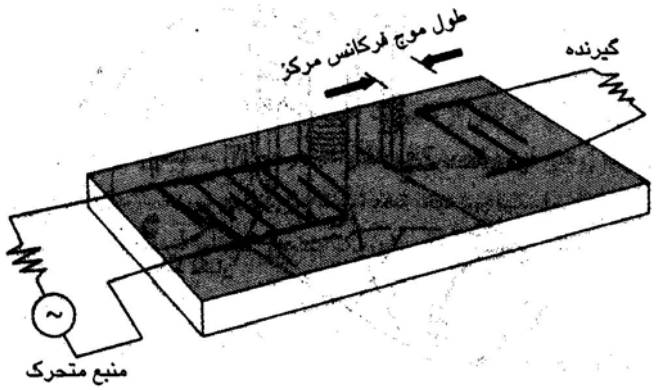
چهار مشکل عمده در مورد این نوع سنسور گشتاور مطرح است که عبارتند از :

۱) غیر همگن بودن جنس مادهٔ شافت،

۲) حساسیت نسبت به تغییرات شکاف سنسور / شاف،

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.

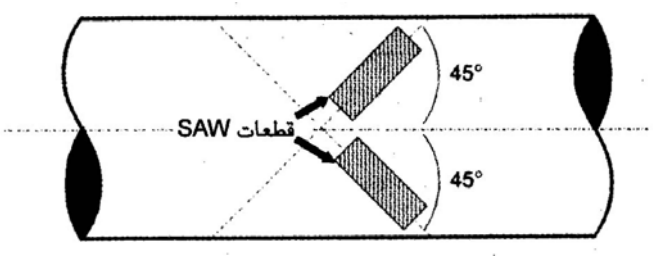


شکل ۷–۱۴ آرایش الکترود SAW

۷–۵ ترانسدیوسرهای موج اکوستیک سطحی (SAW)

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

امواج اکوستیک سطحی همانگونه که در شکل ۷–۱۴ نشانداده شده می‌توانند با استفاده از ترانسدیوسرهای پیزوالکتریکی که با نقش نگاری 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 الکترود تعیین می‌شود. برای اندازه‌گیری گشتاور، بایستی دو قطعه SAW به شافتی که زیر بار پیچش است وصل شود. تنش برشی منتجه از گشتاور (شکل ۷–۲ ملاحظه شود) شکل هندسی الکترودها راتغییر می‌دهد و بنابراین فرکانس کار قطعه SAW تغییر می‌کند. در فرکانس 500 MHz، 1000 με (میکرواستیشن) فرکانس SAW را باندازه 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 منتجه با یکدیگر جمع و تفریق می‌شوند. تفاضل فرکانسها اندازهٔ 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 پایهٔ 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.