سنسور های اثر هال : Hall Effect Sensors

سنسورهای مغناطیسی، اطلاعات مغناطیسی یا کد شده به صورت مغناطیسی را به سیگنال‌های الکتریکی برای پردازش در مدارهای الکترونیک تبدیل می‌کنند. این **سنسورها**، نوعی از قطعات حالت جامد هستند که روز به روز به محبوبیت آنها افزوده می‌شود. زیرا می‌توان آنها را در اشکال مختلف و برای کاربردهای متفاوت ساخت؛ مانند سنسور تشخیص مکان، تشخیص سرعت یا تشخیص حرکت جهت‌دار. همچنین این سنسورها، برای طراحان الکترونیک، انتخاب مناسبی هستند. زیر هزینه نگهداری پایین و طراحی مطمئن دارند. این سنسورها نسبت به فضای اطراف خود، عایق هستند. بنابراین نسبت به لرزش و گرد و غبار و آب حساسیت ندارند.

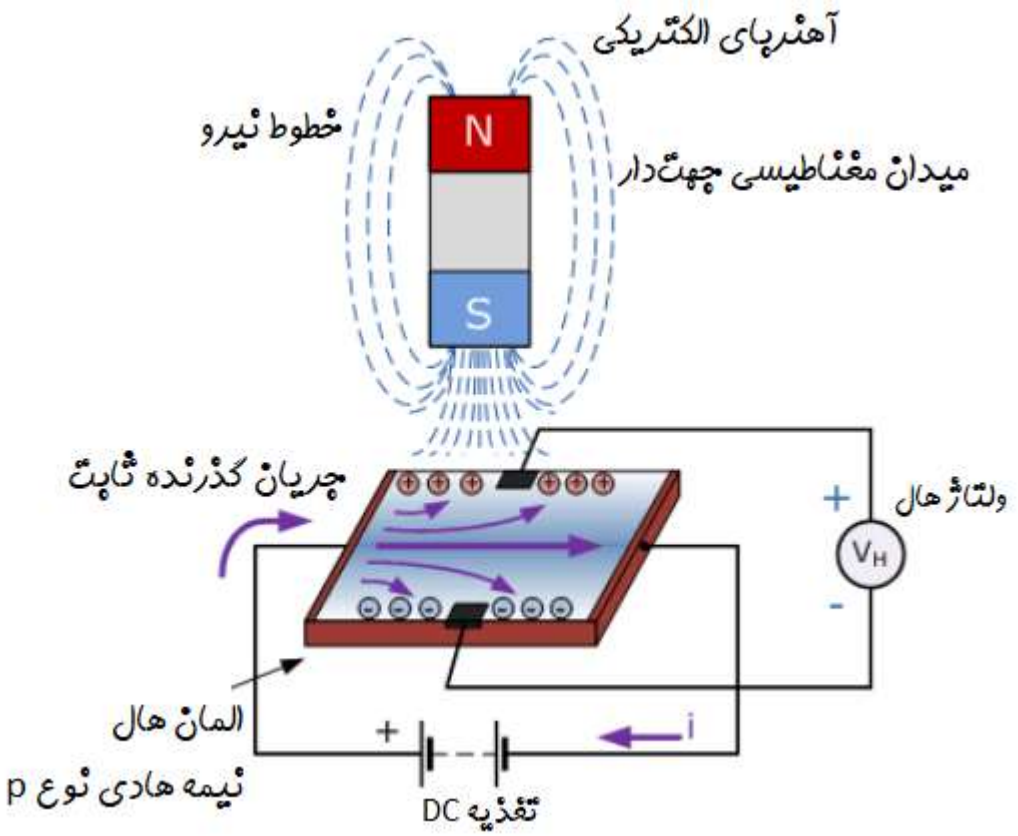
یکی از کاربردهای اساسی این نوع سنسورها، اندازه‌گیری مکان، فاصله و سرعت در سیستم‌های مربوط به وسایل نقلیه است. برای مثال، شمع خودرو برای جرقه‌زنی نیاز به اطلاعات مکان زاویه‌ای میل‌لنگ موتور دارد. یک سنسور اثر هال به محاسبه این اطلاعات می‌پردازد. محل صندلی و کیسه هوای خودرو با سنسور اثر هال، کنترل می‌شود. به عنوان مثالی دیگر، تشخیص سرعت حرکت ماشین برای فعال شدن «سیستم ضد قفل (ABS) «بر عهده این سنسور است.

سنسورهای مغناطیسی برای تشخیص میدانهای مغناطیسی در کاربردهای متفاوتی استفاده می‌شوند. یک نوع از این سنسورها، که در آن سیگنال خروجی، تابعی از چگالی میدان مغناطیسی اطراف آن است، «سنسور اثر هال « (Hall Effect Sensor)نامیده می‌شود.

سنسور اثر هال دستگاهی است که با اعمال میدان مغناطیسی، فعال می‌شود. می‌دانیم میدان مغناطیسی دو مشخصه مهم دارد. یکی چگالی شار مغناطیسی (B) و دیگری قطبیت (قطب شمال و جنوب). سیگنال خروجیِ سنسور اثر هال، تابعی از چگالی میدان مغناطیسی اعمال شده به سنسور است. هنگامی که چگالی شار مغناطیسی اطراف سنسور، از یک آستانه مشخص عبور کند، سنسور این موضوع را تشخیص می‌دهد و یک ولتاژ خروجی به نام» **ولتاژ هال**(VHVH) (Hall Voltage) «، تولید می‌کند.

اصول عملکرد سنسور اثر هال

سنسور یا حسگر اثر هال از یک ماده نیمه‌هادی مستطیلی نوع p مانند گالیم آرسناید(GaAs) ، ایندیم آنتیمونید (InSb)یا ایندیم آرسناید (InAs) تشکیل شده است. یک جریان به صورت پیوسته از این ماده می‌گذرد. هنگامی که سنسور، در یک میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، خطوط شار مغناطیسی، نیرویی به نیمه‌هادی اعمال می‌کند. این نیرو، باعث جهت‌گیری حامل‌های بار موجود در نیمه‌هادی (یعنی الکترون‌ها و حفره‌ها) به دو طرف تیغه می‌شود. حرکت حامل‌های بار، نتیجه نیروی مغناطیسیِ وارد شده به آنها است.



اصول عملکرد

سنسور اثر هال

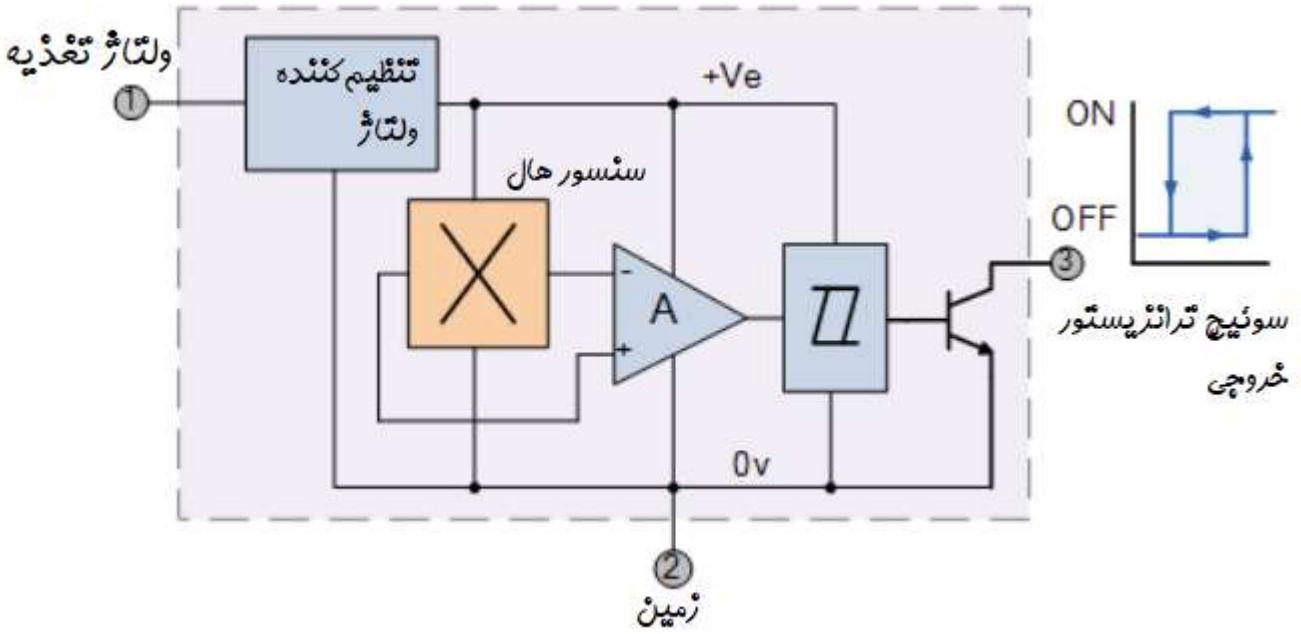
به دلیل تجمع حامل‌های بار در دو طرف تیغه، یک اختلاف پتانسیل بین دو طرف نیمه هادی ایجاد می‌شود. پدیده تولید ولتاژ در دو طرف نیمه‌هادی (ناشی از میدان مغناطیسی)، «اثر هال (The Hall Effect) «نام دارد. اصل فیزیکی که باعث این پدیده می‌شود نیروی لورنتس است. برای تولید این اختلاف پتانسیل در ماده، خطوط شار

مغناطیسی باید بر جهت جریان متعامد و قطبش (پلاریته) آن مناسب باشد. در حالت کلی، قطب جنوب آهنربا باید بر جهت جریان عمود باشد.

اثر هال به قطب مغناطیسی آهنربا و شدت میدان مغناطیسیِ اعمالی، بستگی دارد. برای مثال، استفاده از قطب جنوب برای فعال کردن سنسور، باعث ایجاد اختلاف ولتاژ می‌شود. این اختلاف ولتاژ قابل اندازه‌گیری است. اما استفاده از قطب شمال هیچ اختلاف ولتاژی ایجاد نمی‌کند (یعنی باعث حرکت حامل‌های بار نمی‌شود). در کل، سنسورها و کلیدهای اثر هال برای حالت «خاموش» (شرایط مدار باز) ساخته می‌شوند. در این حالت، میدان مغناطیسی وجود ندارد. تنها در حالتی که میدان مغناطیسی به اندازه کافی قوی باشد و پلاریزاسیون آن نیز صحیح باشد، سنسور فعال شده و به اصطلاح کلید به حالت روشن (شرایط مدار بسته) تغییر وضعیت می‌دهد.

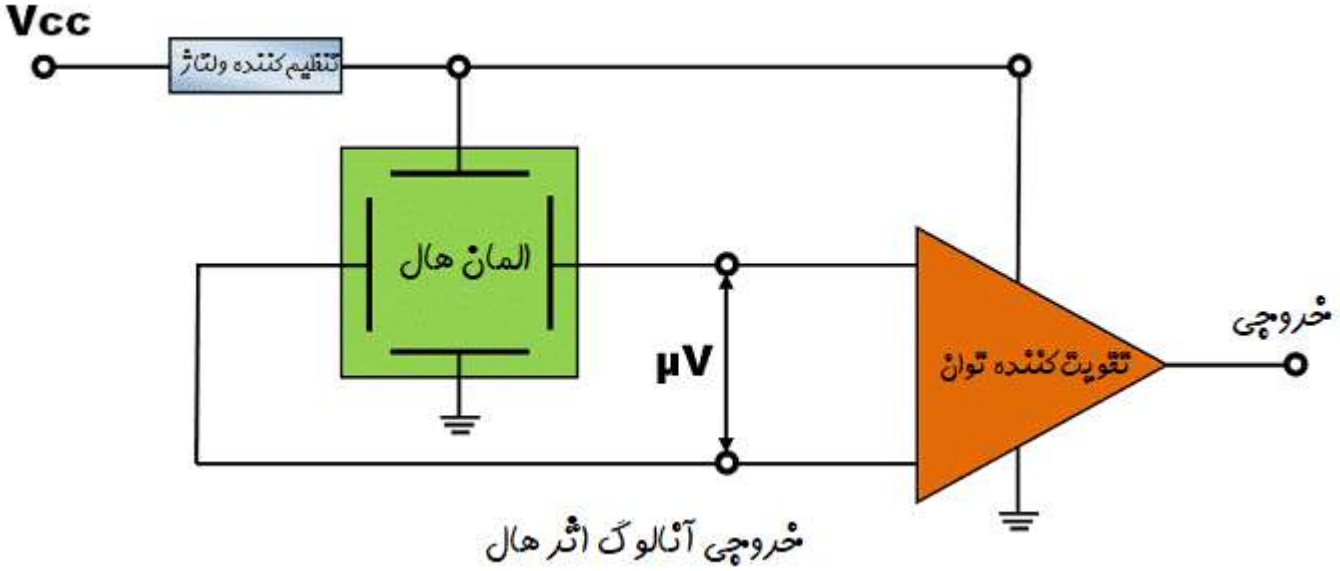
سنسور مغناطیسی اثر هال

ولتاژ خروجی که به نام ولتاژ هال (VHVH) شناخته می‌شود، با شدت میدان مغناطیسی متعامد بر نیمه‌هادی، رابطه مستقیمی دارد. وقتی این سنسور در معرض میدان مغناطیسی مناسب قرار گیرد، ولتاژ خروجی آن، معمولا از چند میکروولت بیشتر نمی‌شود. به همین دلیل، اغلب سنسورهای اثر هال برای ارتقای حساسیت سنسور، کم کردن خطای ناشی از **تلفات هیسترزیس** و گرفتن ولتاژ مطلوب در خروجی، در داخل خود، **تقویت‌کننده** داخلیDC ، مدارات منطقی برای کلیدزنی و تنظیم‌کننده ولتاژ دارند. به این صورت می‌توان حساسیت سنسور را برای اندازه‌های مختلف میدان مغناطیسی و شرایط مختلف تغذیه تنظیم کرد.



یک سوئیچ با استفاده از سنسور اثر هال

خروجی سنسور اثر هال می‌تواند دیجیتال یا خطی باشد. در سنسورهای خطی (آنالوگ)، خروجی سنسور مستقیما به یک تقویت‌کننده متصل است. سیگنال نیز از خروجی تقویت‌کننده گرفته می‌شود. این مسئله در شکل زیر نشان داده شده است.



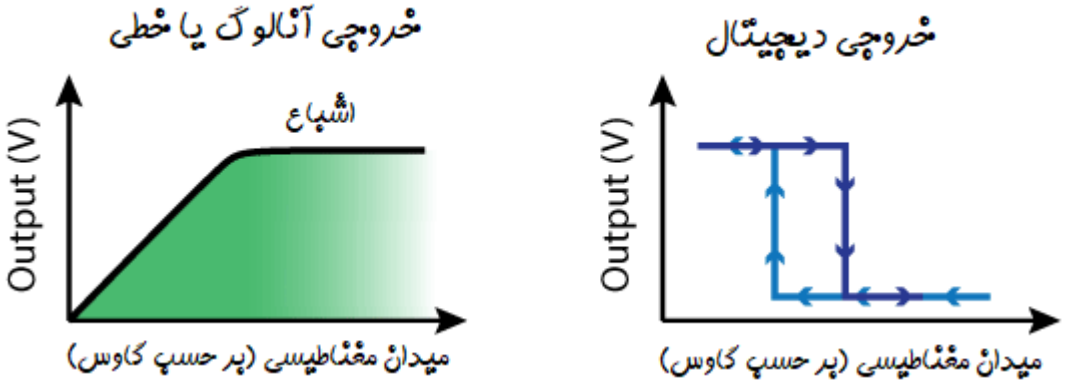
ولتاژ خروجی در این حالت به صورت مستقیم، با میدان مغناطیسی عبوری از سنسور متناسب است. ولتاژ خروجی هال به صورت زیر داده می‌شود:

$$VH=RH(It\times B)VH=RH(It\times B)$$

که در آن:

- VHVHولتاژ هال با واحد ولت است.
- RHRHضریب اثر هال است.
- II جریان عبوری از سنسور با واحد آمپر است.
- ttضخامت سنسور با واحد میلی‌متر است.
- BBچگالی شار مغناطیسی با واحد تسلا است.

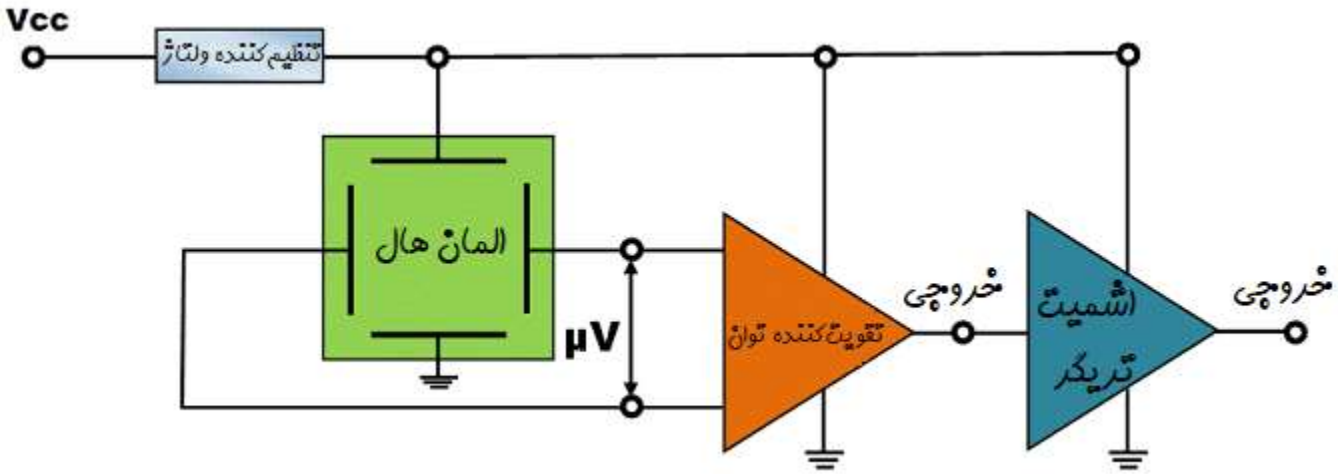
ولتاژ خروجیِ سنسورهای خطی یا آنالوگ، پیوسته است. این ولتاژ، با افزایش شدت میدان مغناطیسی زیاد می‌شود. اگر میدان مغناطیسیِ اعمالی کم شود، ولتاژ خروجی کاهش می‌یابد. در سنسورهای اثر هال خطی یا آنالوگ، هرچه شدت میدان مغناطیسی زیاد شود، خروجی تقویت‌کننده تا یک نقطه مشخص زیاد می‌شود و به نقطه اشباع خود می‌رسد. از این نقطه به بعد، هر افزایشی در میدان مغناطیسی هیچ اثری روی ولتاژ خروجی ندارد. اگر میدان مغناطیسی را افزایش دهیم، سنسور بیشتر به حالت اشباع می‌رود.



انواع خروجی در سنسور اثر هال

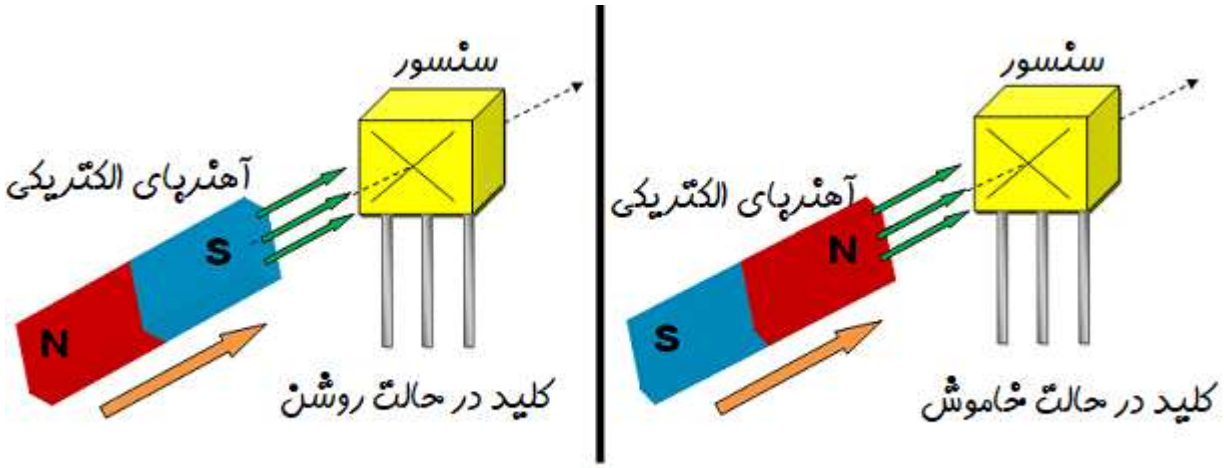
از سوی دیگر، در سنسورهای دیجیتال، از» **اشمیت تریگر** (Schmitt trigger) «استفاده می‌شود. اشمیت تریگر یک مدار مقایسه‌کننده است که از فیدبک مثبت استفاده می‌کند. اشمیت تریگر، یک مدار فعال است که

سیگنال ورودی آنالوگ را به سیگنال خروجی دیجیتال تبدیل می‌کند. در این مدار، وقتی ولتاژ ورودی از آستانه مشخصی فراتر رود، ولتاژ خروجی، یک ولت خواهد بود. یعنی کلید در وضعیت «روشن (ON) «قرار می‌گیرد. وقتی ولتاژ ورودی از مقدار آستانه کمتر باشد، ولتاژ خروجی این مدار صفر ولت خواهد بود. یعنی کلید در وضعیت «خاموش (OFF) «قرار می‌گیرد. هنگامی که این سنسور در معرض میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد یا میدان مغناطیسی حذف می‌شود، به دلیل وجود مدار اشمیت تریگر، هیچ نوسانی در مدار خروجی سنسور مشاهده نمی‌شود.

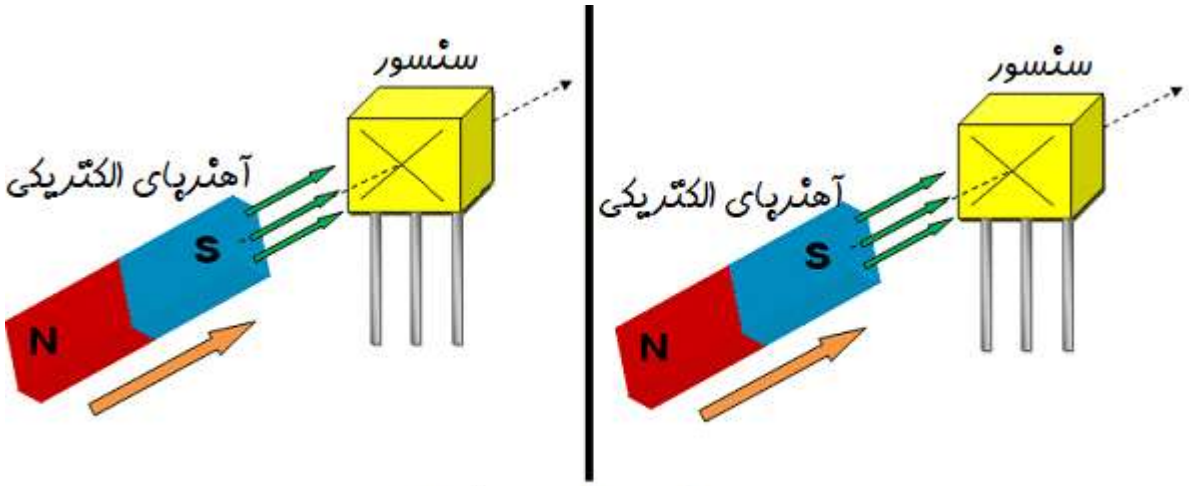


سنسور اثر هال دیجیتال

دو نوع اصلی از سنسور اثر هال دیجیتال وجود دارد. یکی «دوقطبی (Bipolar) «و دیگری «تک قطبی « .(Unipolar)سنسورهای دیجیتالِ دوقطبی برای فعال شدن، به میدان مغناطیسی مثبت (قطب جنوب آهنربا) و برای غیر فعال شدن، به میدان مغناطیسی منفی (قطب شمال آهنربا) نیاز دارند. در حالی که سنسورهای تک قطبی، با قرار گرفتن در معرض قطب جنوب آهنربا فعال می‌شوند. اگر آهنربا را از طرف قطب جنوب از سنسور دور کنیم، سنسور غیرفعال خواهد شد و احتیاجی به قطب شمال آهنربا نیست.



سنسور اثر هال دو قطبی



سنسور اثر هال تک قطبی

سنسور اثر هال تک قطبی

کلیدهایی که با سنسور اثر هال کار می‌کنند، توانایی کلیدزنی برای داشتن خروجی با جریان الکتریکی بزرگ را ندارند، زیرا توانایی آنها بسیار محدود است. جریان خروجی این مدارها بسیار کوچک و در حدود ۱۰ تا ۲۰ میلی آمپر است. برای داشتن جریان‌های الکتریکی بزرگ در خروجی از یک تقویت‌کننده) یک ترانزیستور NPN با کلکتور باز (استفاده می‌شود.

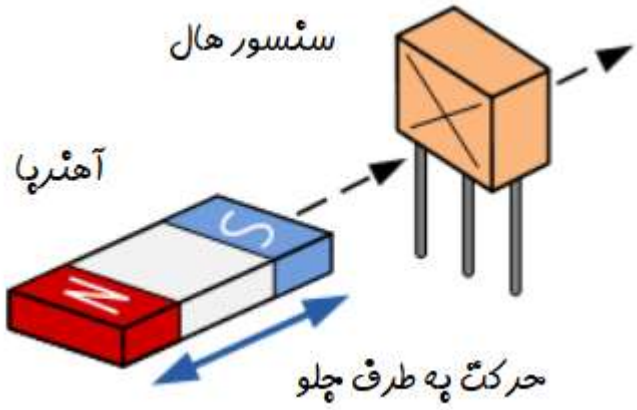
این ترانزیستور مثل یک کلید NPN عمل می‌کند. هرگاه، چگالی شار مغناطیسی اعمالی به سنسور، از مقدار آستانه بالاتر رود، کلید، خروجی را زمین می‌کند. این ترانزیستور را می‌توان به صورت کلکتور باز یا به صورت امیتر باز استفاده کرد. به این ترتیب، یک مدار تقویت‌کننده پوش – پول داریم. حال می‌توان این سنسور را به بارهایی با جریان بالا مانند رله، موتور، LEDو لامپ وصل کرد.

کاربردهای سنسور اثر هال

همانطور که بیان شد، سنسور اثر هال با میدان مغناطیسی فعال می‌شود. در بسیاری از کاربردها، سنسور به همراه یک آهنربای دائم روی یک استوانه متحرک قرار می‌گیرد. حرکت سنسور و آهنربا نسبت به هم می‌تواند حالت‌های متفاوتی داشته باشد. حالت‌های رو به جلو، جانبی (به طرفین)، «پوش – پول (Push-Pull) «و «پوش – پوش « (Push-Push)انواع مختلف حرکت سنسور و آهنربا نسبت به هم هستند. در همه این حالت‌ها، برای آنکه حداکثر حساسیت سنسور تضمین شود، خطوط شار مغناطیسی باید بر سنسور عمود باشند و قطبش آن نیز صحیح باشد (یعنی از قطب جنوب آهنربا برای فعال کردن سنسور استفاده کنیم).

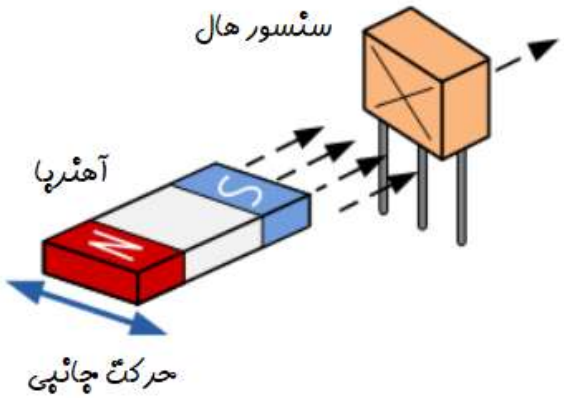
همچنین برای تضمین رفتار خطی سنسور، از آهنربای قوی استفاده می‌شود. به این صورت با حرکت آهنربا، تغییر شدیدی در شدت میدان مغناطیسی عبوری از سنسور خواهیم داشت. برای تشخیص میدان مغناطیسی، سنسور و آهنربا می‌توانند وضعیت‌های مختلفی نسبت به هم داشته باشند. دو نوع معمول در سنسورهای اثر هال حرکت رو به جلو و حرکت جانبی است.

حرکت رو به جلو : در این حالت، سنسور اثر هال و میدان مغناطیسی به صورت عمود بر هم قرار می‌گیرند. برای آنکه سنسور فعال شود، آهنربا به طور مستقیم به سمت سنسور حرکت می‌کند.



در این حالت، یک سیگنال در خروجی سنسور (VHVH) ایجاد می‌شود. این ولتاژ در سنسورهای خطی، نشان‌دهنده آن است که شدت میدان مغناطیسی و چگالی شار مغناطیسی تابعی از فاصله آهنربا از سنسور است. هرچه آهنربا به سنسور نزدیک‌تر باشد، شدت میدان مغناطیسی بیشتر است. پس ولتاژ خروجی سنسور نیز بزرگتر خواهد بود.

حرکت جانبی : در این حالت، حرکت آهنربا نسبت به سنسور به صورت جانبی است. این وضعیت برای حالتی مناسب است که بخواهیم فاصله بین آهنربا و سنسور را ثابت نگه داریم. مثلا در حالتی که آهنربای چرخشی داریم از این روش برای تشخیص استفاده می‌شود؛ مانند: تشخیص سرعت چرخش موتور.



خط وسط سنسور اثر هال، نقطه صفر آن به حساب می‌آید. با حرکت آهنربا به صورت جانبی، ولتاژ خروجی سنسور، می‌تواند مثبت یا منفی می‌شود.

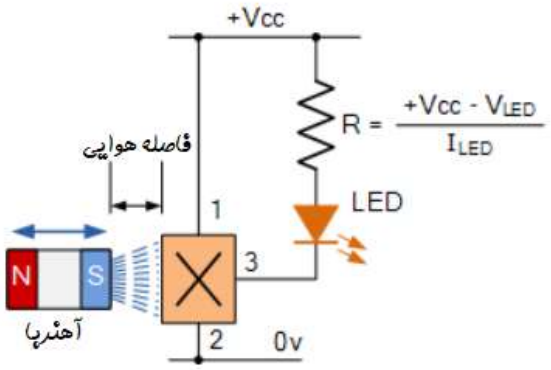
سنسورهای اثر هال به طور خاص به عنوان «سنسور مجاورتی (Proximity sensor) «نیز کاربرد دارند. در شرایطی که محیط خاص داریم، مثل مجاورت با آب، گرد و خاک، لرزش یا روغن، از این سنسورها به جای سنسور نوری استفاده می‌شود. مثال مناسب این محیط خاص، داخل سیستم خودرو است. همچنین سنسور اثر هال را برای اندازه‌گیری جریان نیز می‌توان به کار برد.

از آموزش‌های قبلی می‌دانیم وقتی یک جریان از هادی عبوری می‌کند، یک میدان **الکترومغناطیسی** دایره‌ای اطراف هادی به وجود می‌آید. در این حالت بدون آنکه نیازی به **ترانسفورماتور** و **سیم‌پیچ** باشد، با قرار دادن سنسور اثر هال در نزدیکی هادی، جریان‌های الکتریکی، از چند میلی‌آمپر تا چندین هزار آمپر قابل اندازه‌گیری است.

می‌دانیم سنسورهای اثر هال برای تشخیص وجود یا عدم وجود میدان مغناطیسی یا آهنربا به کار می‌رود. همچنین می‌توان از آنها برای تشخیص مواد فرومغناطیس مثل آهن یا فولاد استفاده کرد. برای این کار، یک آهنربای دائم در نزدیکی ناحیه فعال سنسور قرار می‌گیرد تا سنسور به اصطلاح «بایاس» شود. در این حالت، سنسور در یک میدان مغناطیسی دائم و ساکن قرار می‌گیرد. حال اگر یک قطعه آهنی در کنار سنسور قرار دهیم، میدان مغناطیسی برخورد کننده به سنسور، دچار تغییر و اختلال می‌شود و سنسور وجود این قطعه آهنی را تشخیص می‌دهد. حساسیت سنسور را می‌توان حتی تا حدود چند میلی‌ولت نیز بالا برد.

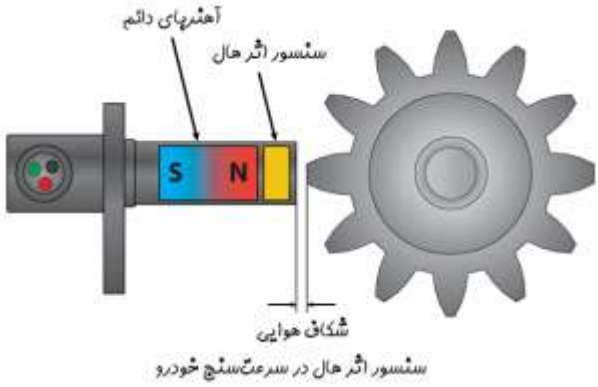
دیود نوری(LED)

یک کاربرد مرسوم از سنسور اثر هال، «دیود نوری ساطع‌کننده نور یا نور افشان (Light-Emitting Diode) «)به اختصار (LED :است. این کاربرد در شکل زیر نشان داده شده است. وقتی میدان مغناطیسی وجود ندارد (صفر گاوس) کلید در وضعیت «خاموش» است. هنگامی که قطب جنوب آهنربا به صورت عمودی به ناحیه فعال سنسور، نزدیک می‌شود، کلید در وضعیت «روشن» قرار می‌گیرد و دیود روشن می‌شود. در نتیجه، سنسور اثر هال در وضعیت «روشن» باقی می‌ماند.



برای خاموش کردن دیود سنسورهای تک قطبی، باید آهنربا را از آن دور کنیم. برای سنسورهای دو قطبی نیز باید قطب شمال آهنربا را در کنار سنسور قرار دهیم. در دستگاه‌هایی که بار الکتریکی بزرگتری دارند و جریان بزرگتری می‌خواهند، باید از ترانزیستور توان بالا در خروجی سنسور استفاده کنیم.

به عنوان مثالی دیگر از این سنسور، می‌توان به سرعت‌سنج خودرو اشاره کرد. این سنسور در کنار یک آهنربای دائم روی یک میله تعبیه شده است. در کنار این میله، یک چرخ‌دنده قرار دارد. شکاف هوایی بین چرخ‌دنده و سنسور هال بسیار کم است. در نتیجه با عبور هریک از دندانه‌ها از نزدیکی سنسور، میدان مغناطیسی اطراف سنسور تغییر می‌کند. این موضوع باعث می‌شود سیگنال خروجی سنسور صفر یا یک شود. بنابراین سیگنال خروجی سنسور، یک موج مربعی است. از دوره تناوب این موج مربعی می‌توان برای محاسبه سرعت استفاده کرد.



سنسور اثر هال در سرعت‌سنج خودرو

از دیگر کاربردهای این سنسور، استفاده در جوی‌استیک و «مغناطیس‌سنج (Magnetometer) «است. در مقایس بزرگتر، از اثر هال برای «پیشرانه اثر هال (Hall Effect Thruster) «استفاده می‌شود که کاربرد آن در فرستادن فضاپیما به فضا است .