فصل ۱

کنترل چیست؟

۱-۱ تعاریف اولیه:

در زندگی روزمره، واژه کنترل بسیار بکار برده می‌شود.اصطلاحاتی نظیر کنترل رشد جمعیت، کنترل قیمت ها، کنترل ترافیک، کنترل رفتارها و برخوردهای اجتماعی، کنترل اتومبیل، کنترل حرارت چراغ خوراک پزی، کنترل ورود و خروج افراد به محل کار و... در گفتگوهای روزمره بسیار شنیده می‌شوند. معمولاً کلمه کنترل وقتی بکار برده می‌شود که نوعی مهار کردن و تسلط بر یک پدیده مورد نظر باشد.

علاقه انسان به تحت اختیار در آوردن و تسلط بر پدیده‌ها باعث پیدایش شاخه جدیدی از دانش‌ها به نام علم کنترل گردیده است، علمی که امروزه حوزه نفوذ خود را به شاخه‌های دیگر علوم از صنعت و تکنولوژی گرفته تا اقتصاد و سیاست و علوم پزشکی ... گسترش داده است.

از آنجائیکه هدف این کتاب بیان اصول و معرفی اجزائی است که در کنترل فرآیندهای صنعتی بکار برده می‌شوند، لذا بهتر است در ابتدای کار به تعریف پاره ای از مفاهیم و اصطلاحاتی که زیاد بکار خواهیم برد بپردازیم:

علم کنترل: علمی است که در مورد چگونگی تحت اختیار در آوردن و هدایت رفتارهای پروسه‌ها صحبت می‌کند.

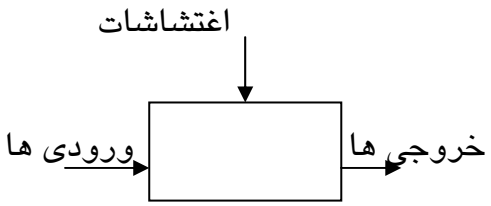
علم پروسه: فرایند یا پدیده‌ای است که مایل به تحت اختیار در آوردن آن هستیم. در این کتاب از کلمه فرایند بعنوان معادل فارسی پروسه استفاده می‌کنیم.

ورودی: فرمانی که برای هدایت پروسه به آن اعمال می‌شود را ورودی پروسه گوئیم. بدیهی است که یک پروسه ممکن است دارای چندین ورودی باشد. ورودی را گاهی مقدار مطلوب نیز می‌گویند.

خروجی: رفتار یا رفتارهائی که مورد توجه ما هستند و مایل به تحت اختیار درآوردن آنها هستیم را خروجی (خروجی های) پروسه گوئیم.

اغتشاش: ورودی‌های مزاحم و ناخواسته‌ای که باعث انحراف خروجی از مقدار مطلوب می‌گردند و در امر کنترل اخلال می‌کنند را نویز یا اغتشاش می‌گوئیم. اغتشاش ممکن است از طریق ورودی و یا طرق دیگر وارد پروسه گردد.

با توجه به تعریف فوق، وضعیت یک فرآیند را در حالت کلی مطابق شکل (۱-۱) نمایش می‌دهیم:



شکل ۱-۱ نمایش یک فرآیند در حالت کلی

اکنون هدف از فرآیند را بصورت زیر خلاصه می‌نمائیم:

" می**خواهیم با استفاده از تدابیر و تجهیزات خاص بگونه‌ای عمل کنیم که علیرغم وجود ورودی‌های مزاحم (اغتشاشات) خروجی پروسه تنها از ورودی تبعیت کند و اثر اغتشاشات بر خروجی حتی‌الامکان ناچیز باشد.**"

معمولاً از مجموعه تدابیر و قطعات و تجهیزات فوق بعنوان سیستم کنترل پروسه نام برده می‌شود. در اینجا بهتر است در مورد سیستم نیز تعریف زیر را بیان نمائیم:

سیستم: مجموعه‌ای از عناصر، اجزاء و قطعات که با همکاری و ارتباط با یکدیگر هدف مشترکی را دنبال می‌کنند، سیستم می‌گوئیم.

با توجه به تعریف فوق سیستم کنترل در یک پروسه به مجموعه‌ای از عناصر و اجزاء اطلاق می‌گردد که هدف مشترک آنها مهار خروجی (خروجی های) پروسه می‌باشد.

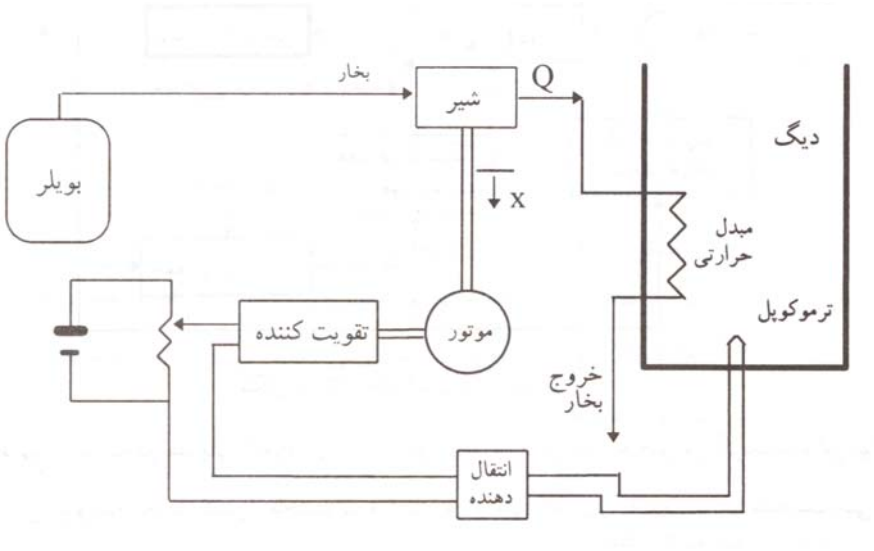
برای نمایش سیستم‌های کنترل معمولاً از نمایش جعبه‌ای استفاده می‌کنیم. در نمایش جعبه‌ای هر جزء یا قطعه‌ای که دارای وظیفه مشخص و قابل تفکیک از سایر عناصر است را با یک مربع (بلاک) نمایش می‌دهیم و نحوه ارتباط و همکاری آن را با سایر اجزاء با خطوط جهت‌دار مشخص می‌کنیم.

اکنون برای مرور آنچه تاکنون یاد گرفته‌ایم و تمرین دیدگاه سیستمی در کنترل پروسه‌ها و همچنین تأکید بر تنوع و شمول سیستم‌های کنترل، به نمایش و بیان عملکرد چندین سیستم کنترل می‌پردازیم:

۱- مثال صنعتی:

کنترل درجه حرارت دیگ آبگرم:

تنظیم درجه حرارت دیگها یکی از موارد بسیار متداول و معمول کاربرد کنترل در صنعت می‌باشد. شکل (۱-۲) یک سیستم کنترل درجه حرارت ساده را نشان می‌دهد.



شکل (۱-۲). سیستم کنترل درجه حرارت

دراین مثال دیگ آبگرم پروسه، و دمای آن خروجی یا رفتار تحت کنترل می‌باشد، همچنین مصرف آبگرم را که ورودی‌ای اتفاقی است می‌توان بعنوان یکی از اغتشاشات وارد شده به سیستم در نظر گرفت.

سؤال: اغتشاشات دیگری را که به نظرتان می‌رسد بیان نمائید؟

طرز کار سیستم کنترل را می‌توان بصورت زیر بیان نمود:

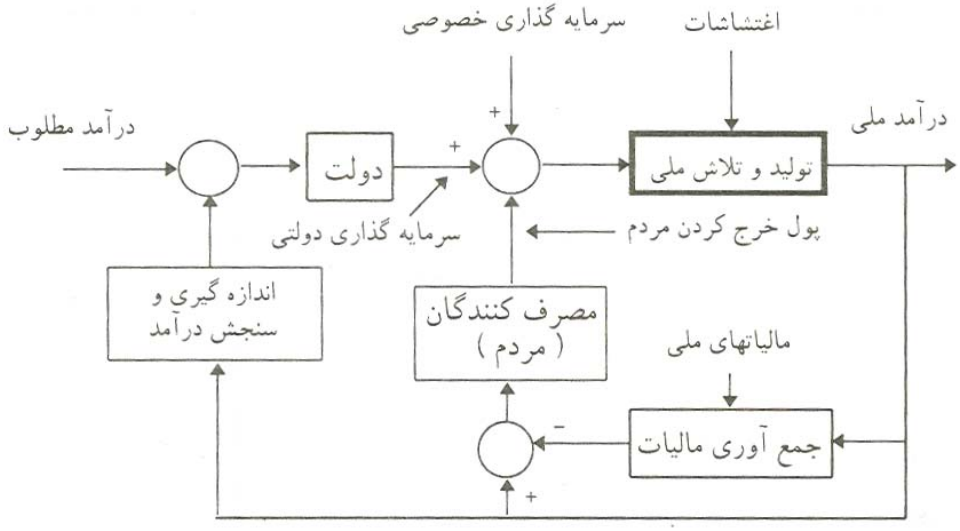
دمای دیگ توسط ترموکوپل اندازه‌گیری شده و تبدیل به سیگنال الکتریکی می‌گردد، و با دمای مطلوب (که آنهم با یک کمیت الکتریکی بیان شده) مقایسه می‌شود، سیگنال خطای حاصل، تقویت شده به شیر موتوری اعمال می‌گردد وشیر با توجه به خطای موجود، تغییر وضعیت می‌دهد و بخار بیشتر یا کمتری را به داخل مبدل حرارتی (کویل گرم کننده) می‌فرستد و بدین ترتیب دمای دیگ تنظیم می‌شود.

۲-مثال اقتصادی:

کنترل در آمد ملی:

معمولاً دولتها با توجه به برنامه‌های اقتصادی خود مایل به کنترل درآمد ملی در مقاطع مختلف زمانی می‌باشند و این کار را توسط اهرم هائی که در اختیار دارند انجام می‌دهند.

نمایش جعبه‌ای سیستم کنترل درآمد ملی ساده در شکل (۳-۱) آمده است.



شکل ۱-۳ حلقه کنترل درآمد ملی

بدیهی است که درآمد ملی (خروجی) از طریق تولید و تلاش ملی حاصل می‌گردد بنابراین تولید و تلاش ملی، پروسه تحت کنترل محسوب می‌شود و عواملی که آن را تقویت یا تضعیف می‌کنند ورودی به شمار می‌آیند. در اینجا سرمایه (گذاری) را بعنوان ورودی پروسه در نظر گرفته‌ایم.

توجه نمائید که سیستم تعیین و جمع آوری مالیات و سیستم اندازه‌گیری و سنجش درآمد در مسیر برگشت (فیدبک) قرار گرفته‌اند و عملکرد درست آنها در تنظیم درآمد ملی نقش مهمی دارد.

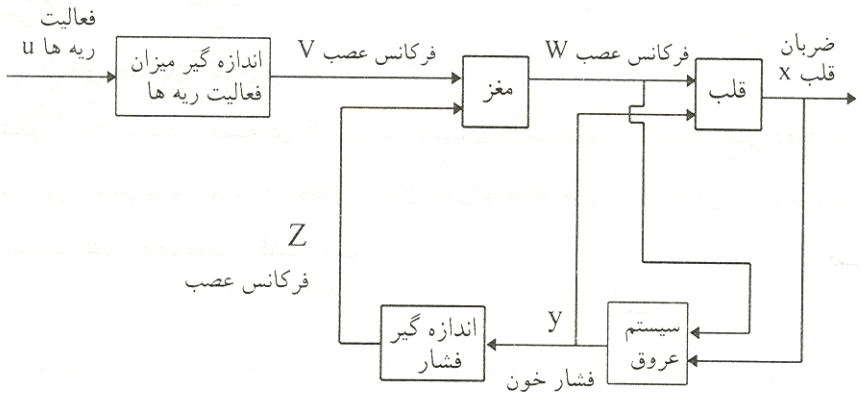
تمرین: نمایش جعبه‌ای شکل (۱-۳) را مورد بررسی قرار داده طرز کار آن رابیان نمائید.

۳- مثال زیستی:

کنترل ضربان قلب:

قلب انسان در شرایط عادی ٤ الی ٦ لیتر خون را در دقیقه تلمبه می‌زند، اما در جریان فعالیت عضلانی این مقدار می‌بایستی در حدی که لازم است تنظیم شود. یکی از راه‌های تنظیم برون دهی قلب تنظیم ضربان آن در دقیقه می‌باشد. در شکل (۱-٤) قسمتی از نمایش جعبه‌ای سیستم کنترل ضربان قلب، بطور خلاصه آمده است:

مطابق این شکل میزان فعالیت ریه‌ها (سرعت تنفس) و همچنین اندازه فشار خون در سیستم عروق توسط اعصاب مربوطه به مغز ارسال می‌گردند. در بلوک مغز بر روی سیگنال‌های دریافتی پردازش انجام شده و فرکانس مناسب جهت ضربان قلب تعیین می‌گردد و به سمت قلب ارسال می‌شود.



شکل ۱-۴ حلقه کنترل ضربان قلب در حالت ساده

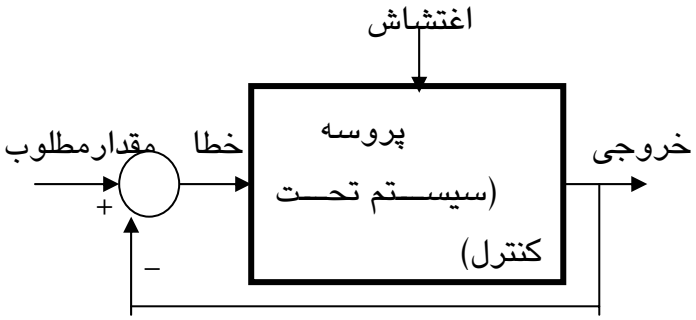
حلقه کنترل ضربان قلب یک حلقه چند متغیره می‌باشد و هر یک از متغیرهای نشان داده شده در شکل (X,Y, W, V, Z, U) خود متغیرهائی چند بعدی می‌باشند. دراین نمایش سیستم عروق و فشار خون در مسیر برگشت قرار گرفته‌اند.

۱-۲ انواع سیستم‌های کنترل:

سیستم‌های کنترل را به دو دسته کلی تقسیم می‌نمائیم:

الف) سیستم‌های حلقه بسته (با فیدبک):

شکل (۱-۵) نمودار جعبه‌ای یک سیستم کنترل حلقه بسته را نشان می‌دهد.

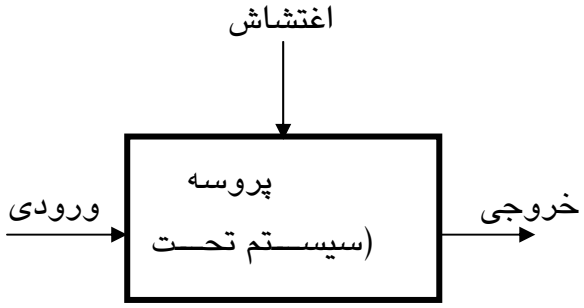


شکل ۱-۵ سیستم کنترل حلقه بسته

در اینگونه سیستم‌ها یک (یا چند) مسیر برگشت از خروجی به ورودی سیستم وجود دارد و بنابراین ورودی به پروسه در هر لحظه، تحت تأثیر اختلاف خروجی با مقدار مطلوب می‌باشد. در سیستم‌های حلقه بسته حاصل مقایسه خروجی واقعی پروسه (آنچه که هست) با مقدار مطلوب (آنچه که باید باشد) را سیگنال خطا می‌نامیم و تدابیر لازم برای کنترل پروسه بر اساس میزان خطا انجام می‌گردد.

ب) سیستم‌های حلقه باز (بدون فیدبک)

شکل (۱-٦) نمایش جعبه‌ای یک سیستم کنترل حلقه بازرسی را نشان می‌دهد. در چنین سیستم هائی ورودی به فرآیند در هر لحظه از زمان بدون توجه به خروجی آن تعیین می‌گردد به عبارت دیگر سیستم کنترل فاقد مسیر برگشت است.



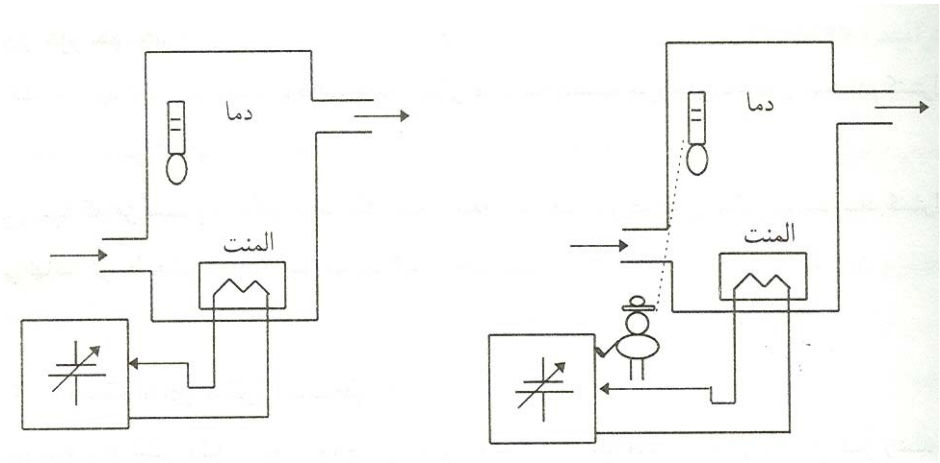
شکل ۱-۶ سیستم کنترل حلقه باز

مثلاً در یک ماشین لباسشوئی مراحل کار ماشین بدون توجه به میزان تمیزی لباس‌ها (خروجی سیستم) انجام می‌گردد و ماشین برنامه شستشو را بدون توجه به تمیز شدن یا تمیز نشدن لباس‌ها به پایان می‌رساند.

سیستم‌های حلقه باز و حلقه بسته هر یک کاربرد و اهمیت مخصوصی درند و در پروسه‌های صنعتی بر حسب نیاز و ملاحظات اقتصادی مورد استفاده قرار می‌گیرند. اساساً سیستم‌های حلقه بسته گرانتر بوده و طراحی آنها پیچیده تر می‌باشند. در عمل بسیاری از

سیستم‌های کنترل که ظاهراً حلقه باز به نظر می‌رسند هرگاه عامل انسانی (اپراتور) را نیز در نظر بگیریم بصورت حلقه بسته در می‌آیند. در واقع حلقه تجهیزات طرح شده برای کنترل یک پروسه ممکن است از طریق اپراتور بسته شود و یا به بیان دیگر اپراتور در مسیر برگشت سیستم کنترل قرار گیرد. بعنوان مثال شکل (۱-۷ الف) را که چگونگی کنترل دمای یک آبگرمکن برقی را نشان می‌دهد در نظر بگیرید:

فرض کنید در شرایط عادی هرگاه درجه تنظیم روی عدد ۲ باشد دمای آب روی مقدار قابل قبول باقی بماند.



(الف) (ب)

شکل ۱-۷ کنترل دما بصورت حلقه بازرسی و حلقه بسته

حال اگر در اثر مصرف غیرعادی و یا عوامل خارجی دیگر (اغتشاشات) دمای آب کم یا زیاد گردد سیستم قادر به تنظیم مجدد حرارت نخواهد بود، چرا که انرژی گرمائی ورودی به سیستم از تغییرات مقدار دمای آبگرمکن (خروجی) مطلع نمی گردد و تنها از فرمان تنظیم شده قبلی تبعیت می‌کند.

اکنون اگر مطابق شکل ۱-۷ ب عامل انسانی را نیز وارد کنیم بگونه‌ای که اپراتور به محض مشاهده کاهش یا افزایش دما، انرژی ورودی به المنت را زیاد یا کم کند، در اینصورت هرچند سیستم از نظر تجهیزات فنی فرقی با قبل نکرده است اما این بار بصورت یک کنترل حلقه بسته عمل می‌کند و به عبارت دیگر مسیر برگشت از طریق اپراتور برقرار می‌شود.

هنگام تجزیه و تحلیل یک سیستم هر چند حلقه باز باشد در صورتیکه حلقه فیدبک توسط عامل انسانی بسته شود، بایستی آن را یک سیسم حلقه بسته دانسته و مسائل پایداری و سایر نکات لازم را در مورد آن مورد توجه قرار داد.

در عمل و در کنترل کابردی برای روشن کردن نقش عامل انسانی، سیستم‌های کنترل را به دو دسته خودکار (اتوماتیک) و غیر خودکار (دستی) تقسیم‌بندی می‌کنند.

کنترل خودکار:

یک سیستم کنترل (معمولاً حلقه بسته) که بدون دخالت عامل انسانی و خودبخود قادر به تنظیم خروجی باشد را سیستم کنترل خودکار (اتوماتیک) گوئیم.

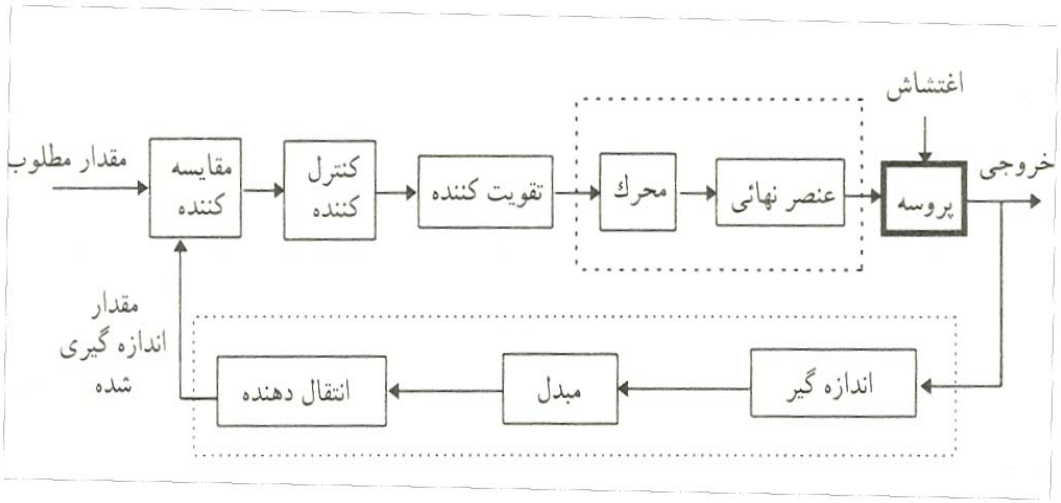
کنترل غیر خودکار:

یک سیتم کنترل که فقط با دخالت عامل انسانی قادر به تنظیم خروجی باشد را سیستم کنترل غیرخودکار (دستی) گوئیم.

بدیهی است که هر سیستم خودکار الزاماً یک کنترل حلقه بسته نیست و همچنین ممکن است یک کنترل دستی نهایتاً توسط عامل انسانی بصورت یک کنترل حلقه بسته درآید.

۱-۳ سیستم‌های کنترل صنعتی:

در دهه‌های اخیر بدنبال رشد و توسعه روز افزون صنعت سیستم‌های کنترل صنعتی نیز رشد و توسعه فراوانی یافته‌اند و رقابت شدید بین تولید کنندگان برای تولید محصول بیشتر و مرغوبتر لزوم بکارگیری تجهیزات پیشرفته و جدید را الزامی ساخته است و این امر به نوبه خود به تنوع و پیچیدگی سیستم‌های کنترل صنعتی منجر گردیده است. از آنجائیکه هدف این کتاب آشنائی مهندسین با اصول و اجزاء کنترل صنعتی بصورتی فراگیر و عام می‌باشد، لذا لازم است در ابتدای امر مدلی فراگیر و کلی برای اینگونه سیستم‌ها ارائه نمائیم. بعلاوه چون در قسمت‌های قبل با مفاهیم ابتدائی و پایه لازم آشنا شده‌ایم اکنون آمادگی کافی جهت درک این مدل را داریم. ارائه چنین مدلی با توجه به تنوع سیستم‌های کنترل صنعتی بزرگی به شناخت هر سیستم دلخواه نمود. نمایش جعبه‌ای یک سیستم کنترل صنعتی در حالت کلی مطابق شکل ۱-۸ می‌باشد که در زیر به تعریف و تشریح هر یک از قسمت‌های آن می‌پردازیم:



کل ۱-۸ نمایش یک حلقه کنترل صنعتی در حالت کلی

فرآیند (Process):

پدیده یا فرآیندی است که هدف، کنترل آن می‌باشد. همانطور که قبلاً اشاره شد پروسه پروسه‌های صنعتی بسیار متنوع می‌باشند. با این وجود در فصل بعد خواهیم دید که رفتارهای آنها از دیدگاه کنترل بسیار شبیه به هم می‌باشند. در این کتاب از کلمه "فرآیند" بعنوان معادل فارسی پروسه استفاده می‌شود.

اندازه‌گیر، مبدل، انتقال دهنده:

اندازه‌گیری خروجی پروسه توسط قسمت اندازه‌گیر انجام می‌شود و کمیت اندازه‌گیری شده معمولاً تبدیل به کمیتی دیگر می‌گردد. عمل تبدیل در قسمت مبدل انجام می‌شود.

مقایسه کننده معمولاً در فاصله‌ای دوردتر از پروسه قرار دارد. بنابراین کمیت تبدیل شده می‌بایستی بگونه‌ای مطمئن به طرف مقایسه کننده منتقل شود. این کار توسط واحد انتقال دهنده انجام می‌پذیرد. گاهی کار اندازه‌گیری، تبدیل و انتقال تماماً توسط یک جزء انجام می‌شود. به همین دلیل این قسمت را داخل یک بلاک خط چین قرار داده‌ایم. بعنوان مثال یک ترموکوپل دما را اندازه‌گیری وبه یک کمیت الکتریکی تبدیل می‌کند بنابراین ترموکوپل یک اندازه‌گیر و در عین حال یک مبدل می‌باشد.

مقایسه کننده (comparator):

خروجی اندازه‌گیری شده پروسه می‌بایستی با مقدار مطلوب مقایسه گردد تا در صورت وجود خطا، تدابیر لازم بکار گرفته شوند. کار مقایسه در قسمت مقایسه کنند انجام می‌پذیرد. گاهی اوقات در صورتی که کمیت‌های مقایسه شونده از نظر جنس متفاوت باشند کار تبدیل یکی یا هر دوی آنها در قسمت مقایسه کننده انجام می‌شود.

کنترل کننده (Controller):

کنترل کننده‌ها یکی از قسمت‌های مهم و حساس سیستم‌های کنترل صنعتی می‌باشند و طرح و تنظیم آنها از اهمیت و حساسیت ویژه‌ای برخوردار است. مهندسین طراح سیستم‌های کنترل صنعتی معمولاً با پروسه هائی از پیش ساخته شده و تحمیلی روبرو هستند و بعلاوه استفاده از بعضی اجزاء و قطعات مانند اندازه‌گیرها و عناصر نهائی با مشخصاتی معین بر آنها تحمیل می‌گردد. بنابراین آخرین قسمتی که مهندس طراح می‌تواند خواسته‌های کنترلی خود را از طریق آن اعمال نموده و رفتار پروسه را بگونه‌ای مطلوب تحت اختیار درآورد، قسمت کنترل کننده می‌باشد. کنترل کننده سیگنال خطا را دریافت نموده و با توجه به تنظیمات انجام شده قبلی، فرمانی صادر می‌کند و این فرمان توسط قسمت‌های بعدی اجراء می‌شود.

تقویت کننده (Amplifier):

فرمان ارسالی از کنترل کننده آنقدر قوی نیست که بتواند واحد محرک را به حرکت درآورد، بنابراین می‌باید قبلاً تقویت گردد. کار تقویت فرمان‌های کنترلی در قسمت تقویت کننده انجام می‌پذیرد.

محرک (Actuator):

محرک عنصر نهائی را به حرکت وادار می‌کند. در مثال صنعتی که قبلاً دیدیم حرکت موتور موجب بازوبسته شدن شیر بخار می‌گردد. بنابراین در آن مثال موتور نقش محرک را در سیستم کنترل بر عهده دارد.

عنصر نهائی (Final-element):

عنصر نهائی بهمانطور که از نامش پیداست آخرین قسمت کنترل می‌باشد و ورودی از طریق آن به پروسه اعمال می‌شود. معروفترین عناصر نهائی در کنترل صنعتی شیرها می‌باشند. در مثال صنعتی باز وبسته شدن شیر بخار انرژی حرارتی را که به پروسه وارد می‌شود کنترل می‌کند. توجه نمائید آنچه که بعد از باز و بسته شدن شیر اتفاق می‌افتد مربوط به پروسه است. با توجه به توضیحات فوق اکنون می‌توان گفت که تجهیزات یک حلقه کنترل صنعتی با عنصر اندازه‌گیر آغاز و به عنصر نهائی ختم می‌شوند.

بلوک دیاگرام ارائه شده در شکل ۱-۸ نمایشی کلی و پایه از سیستم‌های کنترل صنعتی است و بعنوان یک الگوی متداول در طراحی، عیب‌یابی و تعمیر و شناخت سیستم‌های کنترل صنعتی بکار می‌رود.

مسائل:

۱-۱ در حلقه کنترل درآمد ملی:

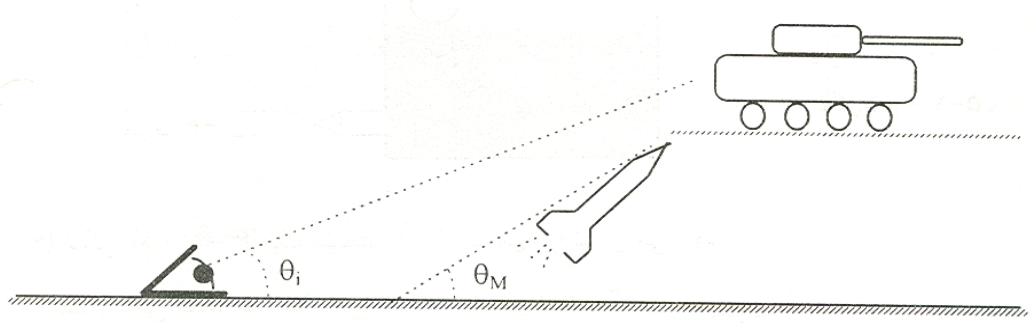
الف) واحد کنترل کننده کدام است؟

ب) علامت خروجی قسمت مصرف کنندگان نسبت به سرمایه گذاری‌ها چیست؟

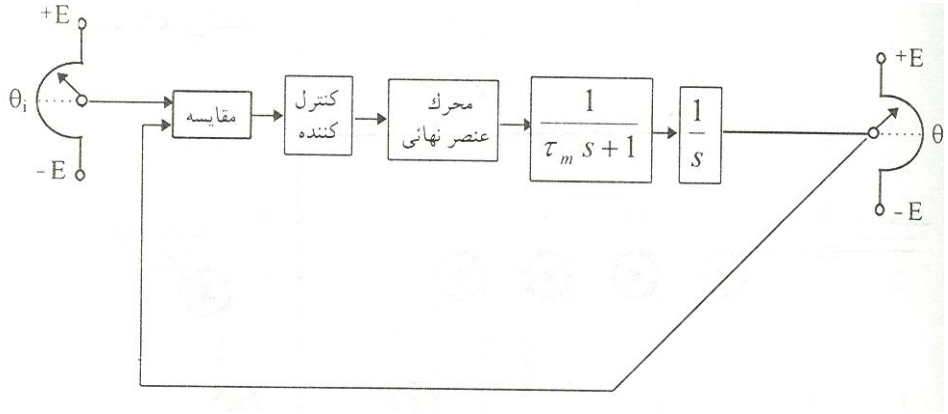
ج) در مورد علامت خروجی قسمت مالیات نسبت به درآمد ملی توضیح دهید؟

۱-۲ در یک نمایش جعبه‌ای، هر چه ممکن است خود از چندین جعبه مرتبط با هم تشکیل شده باشد، در شکل ۱-۳ سعی کنید جعبه "تولید و تلاش ملی" را با جزئیات بیشتر نمایش دهید.

۱-۳ در یک سیستم کنترل ضربان قلب (مثلاً شکل ۱-٦) چند نمونه از اغتشاشات وارد بر سیستم را بر شمارید.



شکل (م ـ ۱ـ۴ الف)



شکل (م ـ ۱ـ۴ ب)

۱-٤ در بعضی از انواع موشک‌های ضد تانک که توسط نفر شلیک می‌شوند (تاو) اپراتور با یک دوربین تانک را تعقیب می‌کند و در این حال سیستم کنترل نیز وضعیت موشک را مانند

وضعیت دوربین متوجه هدف نگه می‌دارد نمائی کلی از این گونه سیستم‌ها در شکل (م ـ ۱ـ٤ الف و ب) آمده است.

الف) با توجه به شکل (م ـ ۱ـ٤ الف و ب) طرز کار سیستم را بیان نمائید.

ب) محرک و عنصر نهائی در اینجا کدامند و طرز کار آنها چگونه است؟

ج) در نمایش جعبه‌ای دوربین چگونه نمایش داده شده است؟

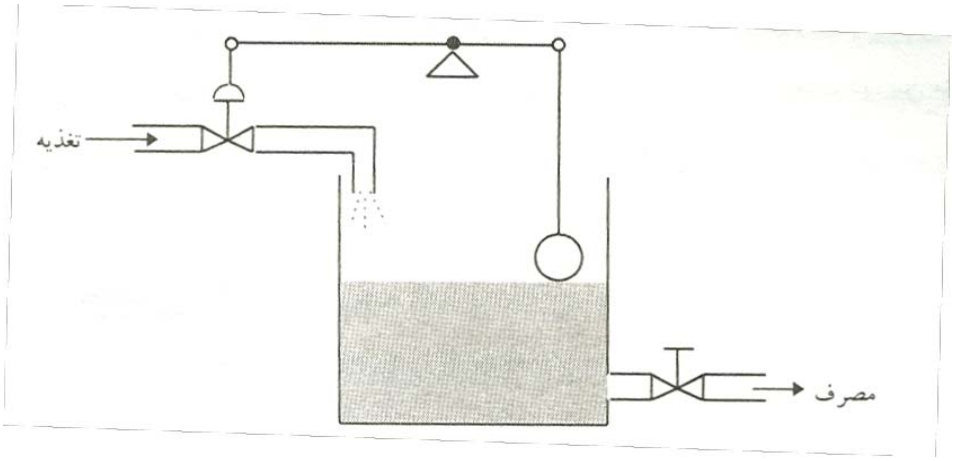
۱–۵ در شکل (م ـ ۱ـ۵) مطلوب است تعیین:

الف) عناصر اندازه‌گیر، مبدل و انتقال دهنده.

ب) کنترل کننده.

ج) محرک و عنصر نهائی.

د) بنظر شما کنترل کننده را چگونه می‌توان تنظیم نمود؟

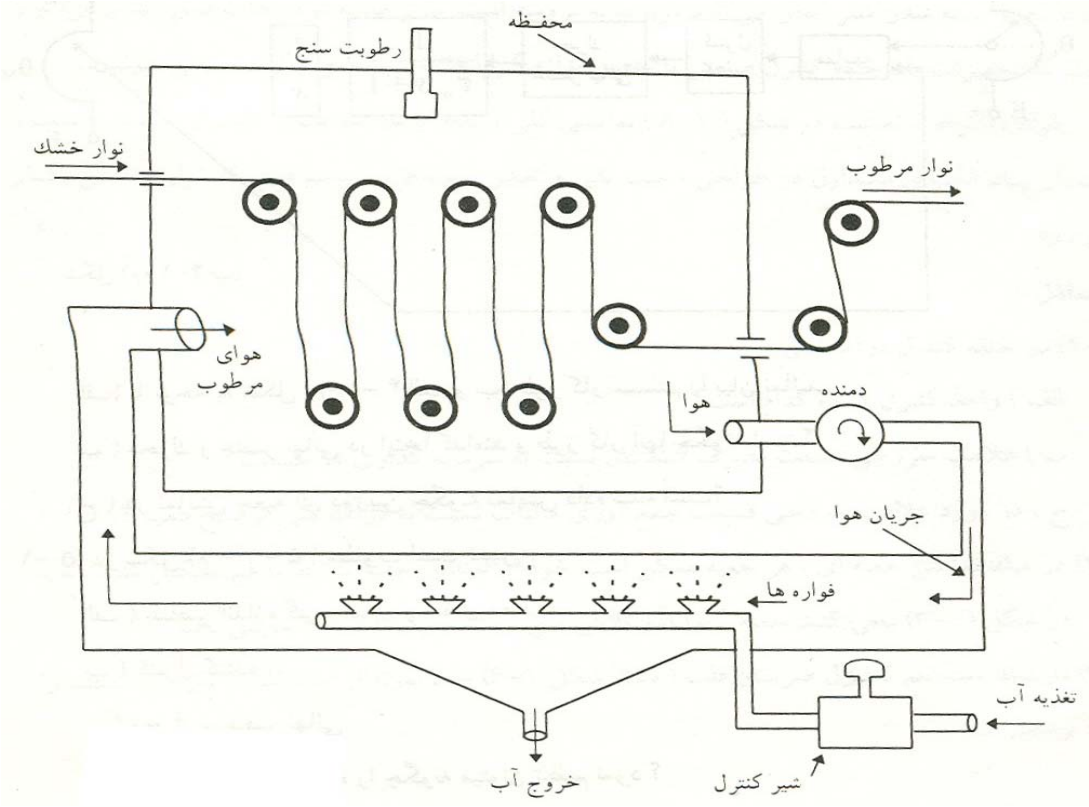


شکل (م ـ ۱ـ۵)

۱–٦ شکل (م ـ۱ـ٦) یک سیستم کنترل صنعتی را نشان می‌دهد.

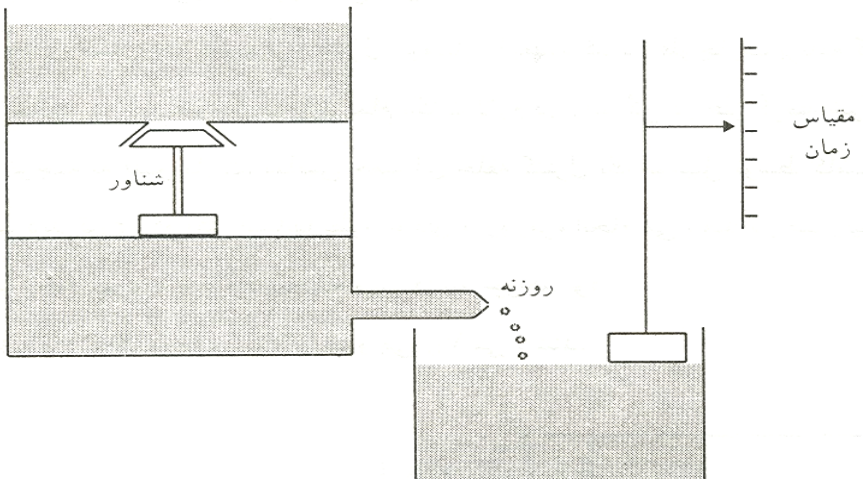
الف) سعی کنید طرز کار این سیستم را بیان نمائید؟

ب) با توجه به نمایش کلی حلقه‌های کنترل فرآیندهای صنعتی (شکل ۱–۸) اجزاء مختلف این سیستم را تعیین کنید.



شکل (م ـ۱ـ۶)

۱-۷ ساعت آبی در دوره قبل از میلاد توسط ایرنیان مورد استفاده قرار می‌گرفته است. شکل (م ـ ۱ـ۷) ساختمان کلی یک ساعت آبی را نشان می‌دهد:



شکل(م ـ ۱ـ۷)

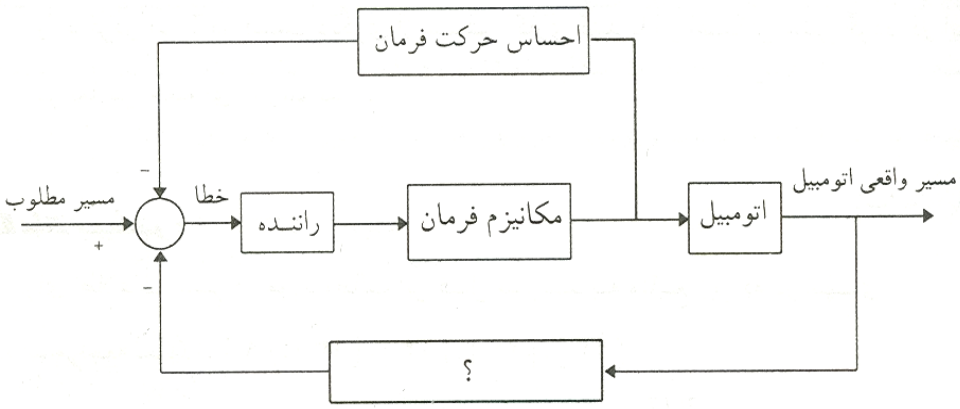
الف) طرز کار آن را بیان کنید.

ب) نمایش جعبه‌ای این سیستم را رسم نموده و وظیفه هر قسمت را تشریح کنید.

ج) به نظر شما این سیستم چه نواقصی دارد، برای رفع هر یک از این نواقص چه پیشنهادی دارید.

د) سیستم را بگونه‌ای کامل کنید که دارای یک ثانیه شمار، یک دقیقه شمار، یک ساعت شمار و همچنین یک روز شمار باشد. بنظر شما برای اینکار چه مشکلات عملی وجود دارد.

۱-۸ نمایش جعبه‌ای حلقه کنترل مسیر حرکت یک اتومبیل در شکل (م- ۱-۸) آمده است:



شکل (م-۱-۸)

الف) بلوک مجهول چیست؟

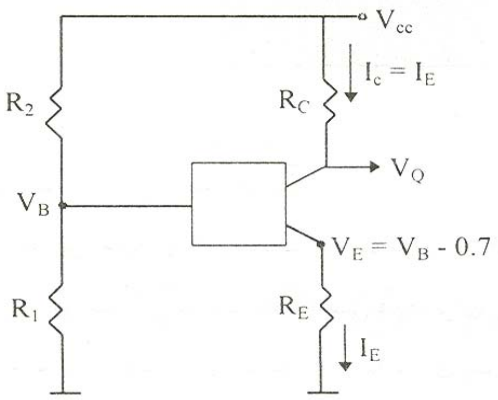
ب) آیا سیستم داده شده، حلقه بسته است یا حلقه باز؟

ج) طرز کار حلقه کنترل را بطور کامل بیان نمائید.

د) اگر بجای انسان یک کامپیوتر، کنترل اتومبیل را بعهده گیرد، فلوچارت برنامه کامپیوتری مربوطه را رسم نمائید. در این فلوچارت باید تمام نکات لازم در رانندگی در نظر گرفته شود.

ح) با توجه به فلوچارت، نمایش جعبه‌ای حلقه کنترل یک اتومبیل توسط کامپیوتر را رسم کنید. خواهید دید کاری که اکثر انسان‌ها بطور عادی و روزمره انجام می‌دهند در صورتیکه بخواهد توسط کامپیوتر انجام شود تا چه حد پیچیده و پر هزینه خواهد بود.

۱-۹ در شکل (م-۱-۹) ورودی V_{CC}و خروجی V_Q می‌باشند.



شکل (م-۱-۹)

الف) نمایش جعبه‌ای سیستم را رسم کنید.

ب) اکنون فرض کنید داسته باشیم: IC=IEKT که در آن K ثابت و T یک اغتشاش می‌باشد. با وارد کردن اثر T در قسمت دیگری از سیستم کاری کنید تا اثر اغتشاش خنثی گردد. در این حالت نیز نمایش جعبه‌ای را رسم نمائید.

اطلاعات بیشتر:

برای اطلاعات بیشتر در مورد مطالب این فصل می‌توانید به منابع زیر که در انتهای کتاب معرفی شده‌اند مراجعه نمائید: [۹]،[۱۳]،[۱٤]،[۲۱]،[۲۲]

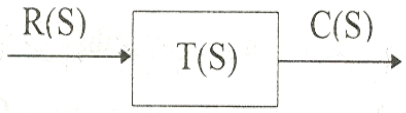
فصل ۲

فرآیندها

۲-۱ فرآیندهای صنعتی:

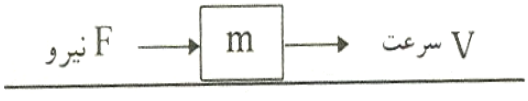
در فصل قبل دیدی کلی در مورد کنترل و کنترل صنعتی بدست آوردیم و دریافتیم که کنترل یعنی تحت اختیار درآوردن پدیده‌ها و فرآیندها و مراد از کنترل صنعتی تحت اختیار درآوردن فرآیندهای صنعتی بعنوان پدیده مورد نظر می‌باشد. همچنین حلقه کنترل یک فرآیند صنعتی را مطابق شکل (۱-۸) بیان نمودیم. اولین قدم در طراحی و ساخت یک حلقه کنترل، شناخت فرآیند مورد نظر می‌باشد. در واقع برای کنترل و مهار یک پدیده قبل از هر چیز می‌باید آن پدیده را شناخت و با رفتارهای آن آشنا شد.

رفتار یک فرآیند با تابع تبدیل آن کاملاً مشخص می‌گردد، تابع تبدیل یک پروسه نسبت خروجی به ورودی پروسه در حوزه لاپلاس می‌باشد. در شکل (۲-۱) مفهوم تابع تبدیل یک فرآیند نمایش داده شده است. در اینجا R(s) و C(s) به ترتیب ورودی و خروجی فرآیند در حوزه لاپلاس می‌باشند و T(s) نیز تابع تبدیل فرآیند است.



شکل (۲-۱) نمایش مفهوم تابع تبدیل

مثلاً هر گاه مطابق شکل (۲-۲)، هدف کنترل سرعت یک جرم (پروسه) توسط نیروئی که به آن اعمال می‌گردد باشد، رابطه بین ورودی (نیرو) و خروجی (سرعت) بصورت زیر بدست می‌آید:



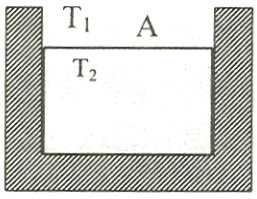
شکل (۲-۲) رابطه نیرو- سرعت در جرم

که در این تابع تبدیل $T(s)=\frac{1}{ms}$ می‌باشد.

در این بخش به معرفی چندین پروسه متداول و معمول در صنعت می‌پردازیم و توابع تبدیل آنها را با تقریب قابل قبول بگونه‌ای که پاسخگوی نیازهای طراحی در کنترل صنعتی باشند بدست خواهیم آورد.

۲-۱-۱ فرآیندهای حرارتی

پروسه‌های حرارتی اصطلاحاً به فرآیندهائی اطلاق می‌گردند که در آنها انرژی حرارتی از یک محیط به محیط دیگر منتقل می‌شود، مانند کوره‌ها، خشک‌کن‌ها، دیگ‌های آبگرم و بخار و سردخانه‌ها و... مدل کلی که برای اینگونه پروسه‌ها می‌توان ارائه داد مطابق شکل (۲-۳) می‌باشد.



شکل ۲-۳ فرآیند حرارتی در حالت کلی

دراین مدل T_1 دمای محیط گرما دهنده و T2 دمای محیط گرما گیرنده است و تبادل حرارتی فقط از طریق سطح A انجام می‌شود. بدیهی است که جریان حرارتی از محیط گرم به محیط سرد متناسب با اختلاف دمای دو محیط است و به ازای یک اختلاف دمای ثابت، هر چه سطح تماس و ضریب انتقال حرارت از مرز بزرگتر باشند، جریان حرارتی شدیدتر خواهد بود یعنی:

$$Q=h.A.(T_1-T_2) \qquad (۲-۱)$$

در این رابطه:

Q= اندازه جریان حرارت A= سطح انتقال h= ضریب انتقال حرارت

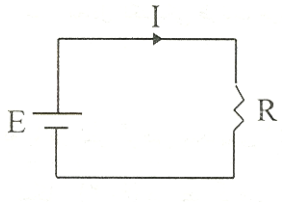
T_1= دمای محیط گرم T_2= دمای محیط سرد

رابطه (۲-۱) را بصورت زیر نیز می‌توان نوشت:

$$Q=\frac{1}{R_T}(T_1-T_2) \qquad (۲-۲)$$

در رابطه (۲-۲) R_T را مقاومت حرارتی معادل می‌گوئیم. توجه کنید که R_T مشابه مقاومت الکتریکی است و در واقع رابطه (۲-۲) را می‌توان بصورت یک مدار الکتریکی مطابق شکل (۲-٤) نمایش داد:

$$E=T_1-T_2$$



$R=R_T \quad \Rightarrow I=\frac{1}{R}E$

I= Q

شکل (۲-۴) مدار الکتریکی مقاومت گرمائی

جریان حرارتی به جسم سرد موجب افزایش دمای آن می‌گردد، و بدیهی است هر چه جرم جسم سرد و یا گرمای ویژه آن بیشتر باشند، تغییر درجه حرارت آن نسبت به زمان، در اثر یک جریان حرارتی ثابت، کمتر خواهد بود و یا به عبارت دیگر:

$$\frac{dT_2}{dt}=\frac{1}{MC}.Q \qquad (۳-۲)$$

$$Q=MC.\frac{dT_2}{dT} \qquad (۴-۲)$$

که در این رابطه:

M= جرم محیط سرد

C= گرمای ویژه محیط سرد

رابطه (۲-۴) را در حوزه لاپلاس می‌توان بصورت زیر نوشت:

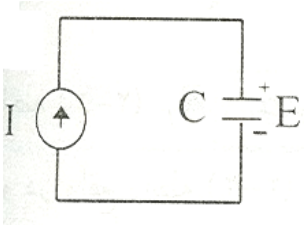
$Q=M.C.S.T_2$

و یا:

$Q=C_T.S.T_2 \qquad C_T=MC \qquad (۵-۲)$

C_T را ظرفیت گرمائی محیط سرد گوئیم.

رابطه (۲-۵) شبیه به رابطه‌ای است که بین جریان و ولتاژ یک خازن وجود دارد مطابق شکل (۲-۵). همانطور که جریان جاری شده به داخل یک خازن موجب شارژ آن و افزایش پتانسیل دو سر خازن می‌گردد جریان حرارتی به داخل محیط سرد نیز موجب شارژ انرژی حرارتی به داخل محیط و افزایش دمای آن می‌شود.



$I=C.\frac{dE}{dt} \Rightarrow I(s)=C.SE(s)$

$I=Q$

$E=T$

$C=C_T$

شکل (۲-۵)
مدار معادل الکتریکی ظرفیت حرارتی

در واقع با در نظر گرفتن شکل‌های (۲-۴) و (۲-۵) می‌توان مدار الکتریکی معادل یک فرایند حرارتی را مطابق شکل (۲-۶) در نظر گرفت:

شکل (۲-۶). مدار الکتریکی معادل فرآیند حرارتی ولتاژ T=E دما

مقاومت الکتریکی $R_T=R$ مقاومت حرارتی

ظرفیت الکتریکی $C_T=C$ ظرفیت گرمائی

جریان الکتریکی $Q=I$ جریان حرارتی

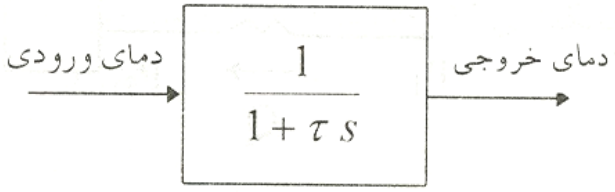
اکنون اگر دمای محیط سرد (T2) را بعنوان کمیت خروجی و دمای محیط گرم (T1) را بعنوان ورودی در نظر بگیریم، با مساوی قرار دادن روابط (۲-۲) و (۲-۵) بدست می‌آید:

$$Q(s)=\frac{T_1-T_2}{R_T}=C_T.S.T_2$$

$$T_2=\frac{1}{1+R_TC_TS}.T_1 \qquad (۲-۶)$$

رابطه(۲-۶) فرم کلی تابع تبدیل فرآیندهای انتقال حرارت می‌باشد.

عبارت R_TC_T را ثابت زمانی حرارتی گویند پس بطور کلی یک پروسه حرارتی را می‌توان بصورت شکل (۲-۷) نمایش داد:



شکل (۲-۷). تابع تبدیل یک فرآیند حرارتی در حالت کلی $\tau=R_TC_T$

همانطور که ملاحظه می‌فرمائید یک پروسه حرارتی را با تقریب قابل قبول، می‌توان بصورت یک پروسه درجه یک در نظر گرفت. در عمل پروسه‌های حرارتی بر حسب نوع و پیچیدگی آنها ممکن است دارای چندین ثابت زمانی مختلف باشند.

۲-۱-۲ فرآیندهای انتقال سیال:

یکی از انواع پروسه‌هائی که در صنعت زیاد با آنها روبرو هستیم، فرآیندهای انتقال سیال می‌باشند. در این پروسه ها، سیالات (آب، مواد نفتی، محلول‌های شیمیائی، انوع گازها و ...) از یک محیط به محیط دیگر منتقل می‌شوند، در این پروسه‌ها معمولاً هدف کنترل جریان (دبی) و یا کنترل ارتفاع و یا فشار سیال در یک مخزن می‌باشد.

پروسه‌های انتقال سیال را معمولاً به دو دسته تقسیم می‌کنند:

۱. پروسه‌های انتقال سیال تراکم ناپذیر

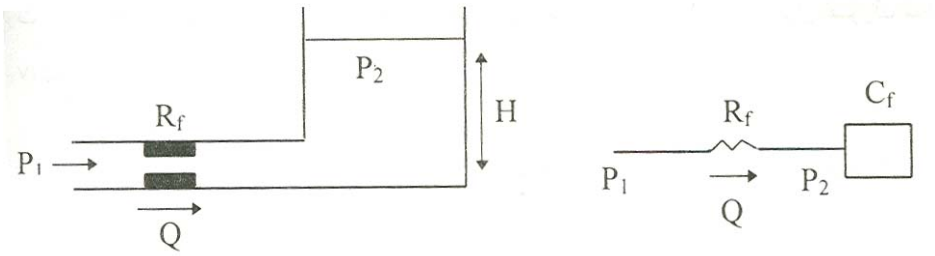
۲. پروسه‌های انتقال سیال تراکم پذیر

در اینجا جهت سهولت مایعاتی نظیر (آب، محلول‌های شیمیائی، مایعات نفتی ...) را سیالات تراکم ناپذیر و گازها مانند (هوا، گازهای سوختی، ...) را بعنوان سیالات تراکم پذیر در نظر می‌گیریم.

۲-۱-۲-۱فرآیندهای انتقال ناپذیر:

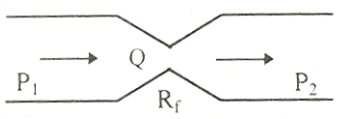
مدل کلی یک پروسه انتقال سیال تراکم ناپذیر مطابق شکل (۲-۸) می‌باشد.

در این مدل سیال توسط فشار P_1 به داخل مخزن شارژ می‌گردد پروسه‌های انتقال سیال تراکم ناپذیر را معمولاً بر اساس دبی حجمی (مقدار جریان حجم در واحد زمان) مورد بررسی قرار می‌دهند. در این مدل R_f مقاومت معادل کل مسیر در برابر عبور سیال می‌باشد.



شکل (۲-۸). فرآیند انتقال سیال تراکم ناپذیر

در شکل (۲-۹) دبی عبوری سیال از مقاومت R_f متناسب با اختلاف فشار دو طرف مقاومت می‌باشد:

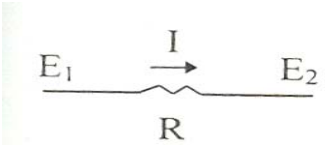


$$Q = \frac{P_1 - P_2}{R_f}$$

شکل (۲-۹). بیان رابطه دبی با فشار

این اتفاق شبیه به عبور جریان الکتریکی از یک مقاومت الکتریکی است. مطابق شکل (۲-۱۰).

$$I = \frac{E_1 - E_2}{R}$$



شکل (۲-۱۰)

بیان جریان با ولتاژ در مقاومت الکتریکی

اندازه جریان الکتریکی متناسب با اختلاف پتانسیل بین دو سر مقاومت است، و همچنین نسبت عکس با مقاومت الکتریکی دارد.

با این توضیحات اکنون با توجه به شکل ۲-۹ می‌توان نوشت:

$$Q = \frac{1}{R_f}(P_1 - P_2) \qquad (۷-۲)$$

حجم وارد شده به داخل موجب افزایش ارتفاع سیال می‌گردد، اگر سطح مقطع مخزن A باشد و دبی وارد شده را برای مدت زمان کوچک dt ثابت در نظر بگیریم و تغییر ارتفاع را در این مدت dH خواهیم داشت:

$$dH = \frac{1}{A} Q dT \qquad (۸-۲)$$

$$Q = A.\frac{dH}{dt} \qquad (۹-۲)$$

$$P_2 = \rho H \qquad (۱۰-۲)$$

در رابطه (۲-۹)، ρ وزن مخصوص سیال می‌باشد. با جایگذاری (۲-۱۰) در (۲-۹) بدست می‌آید:

$$Q = \frac{A}{\rho}\frac{dP_2}{dt} \qquad (۱۱-۲)$$

$$Q = C_f \frac{dP_2}{dt} \qquad C_f = \frac{A}{\rho} \qquad (۱۲-۲)$$

C_f را ظرفیت معادل پروسه گوئیم اکنون با مساوی قرار دادن (۲-۷) با (۲-۱۲) بدست می‌آوریم:

$$Q = \frac{P_1 - P_2}{R_f} = C_f.S.P_2$$

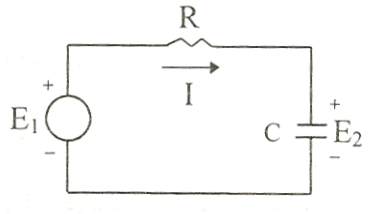
$$P_2 = \frac{1}{1 + (R_f C_f)S}.P_1 \qquad (۱۳-۲)$$

همچنین با استفاده از رابطه (۲-۱۰) در رابطه (۲-۱۳) می‌توان نوشت:

$$H = \frac{{}^{1}\rho}{1+(R_f C_f)S}.P_1 \qquad (۲-۱٤)$$

روابط (۲-۱۳) و (۲-۱٤) تابع تبدیل یک پروسه انتقال سیال را بیان می‌دارند. عبارت $R_f.C_f$ را ثابت زمانی انتقال می‌نامند و با τ نشان می‌دهند.

مدل الکتریکی یک پروسه انتقال سیال تراکم ناپذیر در شکل (۲-۱۱) آمده است:



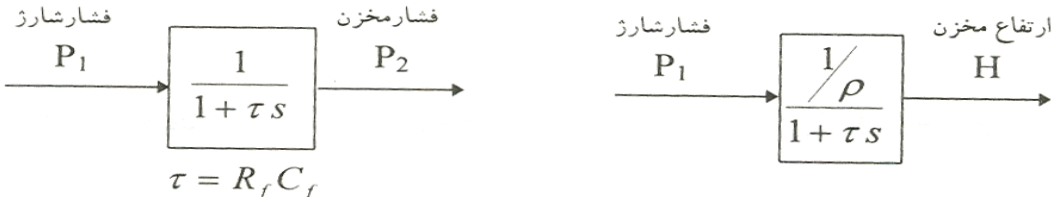
$E_1=P_1$ $\quad I=Q$

$E_2=P_2$ $\quad C=C_f$

$R=R_f$

شکل (۲-۱۱)مدار معادل الکتریکی فرآیند انتقال سیال

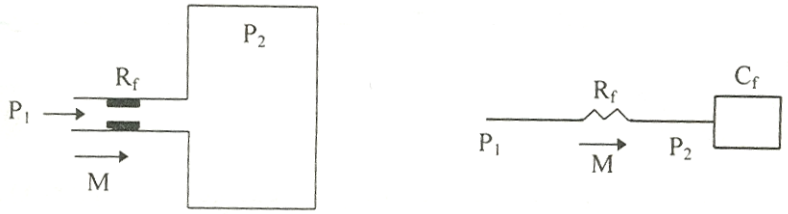
پس بطور خلاصه، یک پروسه انتقال سیال تراکم ناپذیر را بر حسب آنکه خروجی مورد نظر ارتفاع سیال داخل مخزن یا فشارآن باشد، می‌توان مطابق شکل (۲-۱۲) نمایش داد.



شکل (۲-۱۲). تابع تبدیل فرآیند انتقال سیال تراکم پذیر

۲-۱-۲-۲ فرآیندهای انتقال سیال تراکم پذیر

در بسیاری از پروسه‌های صنعتی، یک سیال تراکم پذیر مثل (هوا یا گاز) از محلی به محل دیگر منتقل می‌گردد، در چنین پروسه‌هائی معمولاً هدف، پر کردن یک مخزن مسدود، با سیال مورد نظر می‌باشد. مثل شارژ هوا در یک مخزن هوای فشرده و یا شارژ محفظه فعل و انفعال شیمیائی، با یک گاز بی اثر. مدل کلی چنین پروسه‌هائی مطابق شکل (۲-۱۳) می‌باشد:



شکل (۲-۱۳). فرآیند انتقال سیال تراکم پذیر

در بررسی پروسه‌های انتقال سیال تراکم پذیر معمولاً دبی جرمی (جریان جرم در واحد زمان) را در نظر می‌گیریم. در این مدل R_f مقاومت معادل کلی است که در مسیر شارژ مخزن وجود دارد، بدیهی است که جریان جرم به داخل مخزن متناسب با اختلاف فشار P_1 و P_2 و نسبت عکس با مقاومت R_f دارد یعنی:

$$M = \frac{1}{R_f}(P_1 - P_2) \qquad (۱۵-۲)$$

درست شبیه به جریان الکتریکی که از یک مقاومت الکتریکی می‌گذرد:

$$I = \frac{1}{R}(E_1 - E_2) \qquad (۱۶-۲)$$

قانون عمومی گازها (سیال تراکم پذیر) رابطه بین حجم (V)، جرم (m)، فشار (P) و دمای (T) یک سیال را بصورت زیر می‌دهد:

$$PV = m.RT \qquad (۱۷-۲)$$

در رابطه (۲-۱۷) R ثابت گاز است.

فرآیند ورود سیال به داخل مخزن را یک فرایند دما ثابت در نظر می‌گیریم بنابراین با مشتق گیری از دو طرف رابطه (۲-۱۷) خواهیم داشت:

$$V\frac{dp}{dt} = RT.\frac{dm}{dt}$$

ویا:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{V}{RT}.\frac{dp}{dt} \qquad (۱۸-۲)$$

$$\frac{dm}{dt} = C_f\frac{dp}{dt} \quad , \quad C_f = \frac{V}{RT} \qquad (۱۹-۲)$$

C_f را ظرفیت معادل پروسه گوئیم.

با توجه به تعریف دبی جرمی خواهیم داشت:

$$dm = M.dt \qquad (۲۰-۲)$$

و یا:

$$M = \frac{dm}{dt} \qquad (۲۱-۲)$$

اکنون با توجه به روابط (۲-۱۹) و (۲-۲۱) خواهیم داشت:

$$M = C_f\frac{dp}{dt} \qquad (۲۲-۲)$$

و یا در حوزهٔ لاپلاس:

$$M(s) = C_f.S.P(s) \qquad (۲-۲۳)$$

حال اگر روابط (۲-۱۵) و (۲-۲۳) را در مدل شکل (۲-۱۳) مورد استفاده قرار دهیم و فشار شارژ را بعنوان ورودی پروسه و فشار مخزن را بعنوان خروجی پروسه در نظر بگیریم خواهیم داشت:

$$M(s) = C_f.S.P(s)$$

$$M(s) = \frac{1}{R_f}\left(P_1(s) - P_2(s)\right)$$

و از مساوی قرار دادن دو رابطه فوق بدست می‌آید:

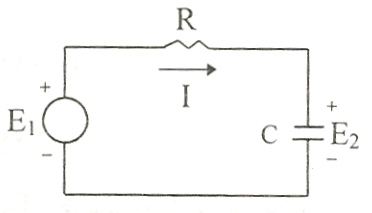
$$P_2(s) = \frac{1}{1 + R_f C_f S} P_1(s) \qquad (۲-۲۴)$$

و یا:

$$P_2(s) = \frac{1}{1 + \tau s} P_1(s) \qquad , \qquad \tau = R_f C_f \qquad (۲-۲۵)$$

عبارت R_fC_f را ثابت زمانی معادل پروسه گوئیم و با τ نشان می‌دهیم.

رابطه (۲-۲۵) نشان می‌دهد که پروسه شارژ یک مخزن با سیال تراکم پذیر یک پروسه درجه یک است و مدار الکتریکی معادل آن را می‌توان مطابق شکل (۲-۱۴) نمایش داد:



$E_1 \equiv P_1$ $\quad I \equiv M$

$E_2 \equiv P_2$

$R \equiv R_f$

$C \equiv C_f$

شکل (۲-۱۴) مدار معادل الکتریکی فرآیند انتقال سیال تراکم پذیر

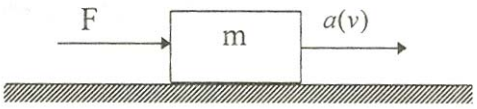
۲-۱-۳ فرآیندهای مکانیکی:

پروسه‌های مکانیکی معمولاً از عناصری نظیر جرم، فنر و دمپر (ویسکوز) ساخته شده‌اند و در این پروسه‌ها با کمیت‌هائی نظیر نیرو (گشتاور)، سرعت و جابجائی سر و کار داریم. بعنوان مثال آنتن بشقابی، یک پروسه مکانیکی است که با استفاده از نیروی موتور، وضعیت آن، در جهت دلخواه تنظیم می‌شود.

جهت آشنائی با پروسه‌های مکانیکی، ابتدا سه عنصر مکانیکی متداول را معرفی می‌کنیم.

جرم:

جرم یک عنصر ذخیره کننده انرژی است و هر گاه بر آن نیرو وارد شود، شتاب خواهد گرفت:



$$F = M.a$$
$$a = \frac{dv}{dt}$$
$$F = m.\frac{dv}{dt}$$

(۲-۲۶)

اگر رابطه (۲-۲۶) را در حوزهٔ لاپلاس بنویسیم خواهیم داشت:

$$F = m.s.V$$

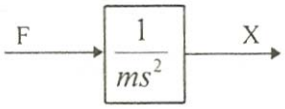
و یا:

$$V = \frac{1}{MS}.F \qquad (۲-۲۷)$$

اگر رابطه (۲-۲۷) را برحسب جابجائی جرم (x) بنویسیم خواهیم داشت:

$$V = \frac{dx}{dt} = \frac{1}{ms}.F$$
$$X = \frac{1}{ms^2}F \qquad \frac{X}{F} = \frac{1}{ms^2} \qquad (۲-۲۸)$$

بنابراین در پروسه مکاینکی شامل یک جرم، هرگاه ورودی، نیروی اعمالی به جرم و خروجی، جابجائی جرم باشد تابع تبدیل پروسه مطابق رابطه (۲-۲۸) است و می‌توان پروسه را بصورت زیر نمایش داد:



شکل (۲-۱۵). نمایش جعبه‌ای فرآیند مکانیکی (جرم)

فنر:

فنر نیز یک عنصر ذخیره کننده انرژی می‌باشد و هرگاه نیرو بر آن وارد شود، کشیده و یا فشرده می‌شود که اندازه جابجائی آن طبق رابطه زیر بدست می‌آید:

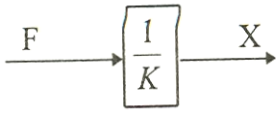
$$F = KX \qquad (۲-۲۹)$$

$$X = \frac{1}{K}F$$

در رابطه (۲-۲۹)، K ضریب فنریت می‌باشد که عبارت است از مقدار نیروی

لازم برای آنکه فنر به اندازه واحد طول کشیده و یا فشرده گردد.

بنابراین هر گاه نیروی وارد بر یک فنر را ورودی و جابجائی آن را خروجی در نظر بگیریم آن پروسه را می‌تواند بصورت شکل (۲-۱۶) نمایش داد.



شکل (۲-۱۶). نمایش جعبه‌ای فرآیند مکانیکی (فنر)

دمپر (ویسکوز):

دمپر یا همان کمک فنر، یک عنصر تلف کننده انرژی است (اصطکاک)، سرعت جابجائی (V) در یک دمپر متناسب با نیروی وارد شده به آن است:

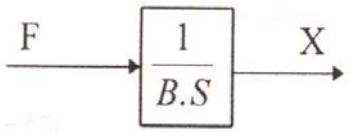
$$F = B.V$$
$$F = B\frac{dx}{dt} \qquad (۲-۳۰)$$

B را ضریب دمپر می‌گوئیم.

بنابراین در یک پروسه شامل دمپر، هرگاه ورودی را نیروی اعمالی و خروجی را جابجائی دمپر در نظر بگیریم با استفاده از رابطه (۲-۳۰) تابع تبدیل پروسه بدست می‌آید:

$$F = B.S.X$$
$$\frac{X}{F} = \frac{1}{B.S} \qquad (۲-۳۱)$$

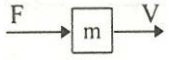
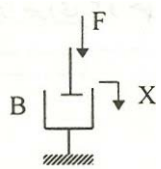
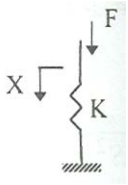
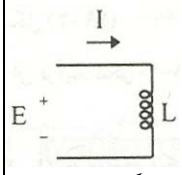
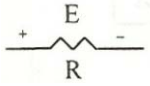
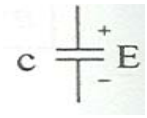
رابطه (۲-۳۱) یک پروسه شامل دمپر را بصورت شکل (۲-۱۷) بیان می‌کند



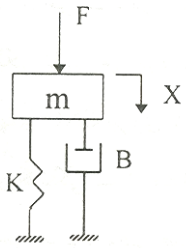
شکل (۲-۱۷). نمایش جعبه‌ای فرآیند مکاینکی (د

درک هر یک از عناصر مکانیکی گفته شده، جهت شناخت پروسه‌های مکانیکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. توجه به معادل الکتریکی هر یک از عناصر فوق نیز کمک بزرگی به درک بهتر آنها خواهد نمود، هرگاه ولتاژ را معادل نیرو در نظر بگیریم، معادل الکتریکی هریک از عناصر فوق با روابط مربوطه در جدول (۲-۱) آمده است:

جدول (۲-۱). معادل الکتریکی عناصر مکانیکی

عنصر مکانیکی	$F = m\frac{dv}{dt}$ 	F= B.V 	F= K.X 
عنصر الکتریکی	 $E = L\frac{dI}{dt}$	 E=R.I	 $E = \frac{1}{C}q$

پروسه‌های مکاینکی معمولاً شامل چندین عنصر مکانیکی می‌باشند. برای بدست آوردن تابع تبدیل این پروسه‌ها می‌بایستی به چگونگی توزیع نیرو در عناصر و نحوه اتصال آنها به یکدیگر توجه نمود. بعنوان مثال شکل (۲-۱۸) را در نظر بگیرید:



شکل (۲-۱۸) یک فرآیند مکانیکی نمونه شامل سه عنصر

در این شکل نیروی F بین سه عنصر توزیع می‌شود و جابجائی X و سرعت V کلیه عناصر با یکدیگر مساوی هستند و می‌توان نوشت:

$$F = m\frac{d^2x}{dt^2} + B\frac{dx}{dt} + kx \qquad (۲-۳۲)$$

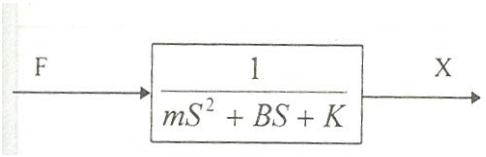
رابطه (۲-۳۲) را در حوزه لاپلاس می‌نویسیم:

$$F = \left(mS^2 + BS + K\right)X \qquad (۲-۳۳)$$

با توجه به رابطه (۲-۳۳)، اگر در این سیستم ورودی را نیروی F و خروجی را جابجائی x در نظر گیریم، تابع تبدیل بدست می‌آید:

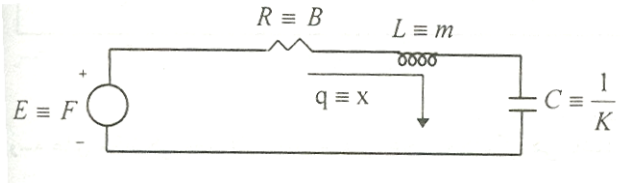
$$\frac{X}{F} = \frac{1}{mS^2 + BS + K} \qquad (۲-۳٤)$$

و می‌توان سیستم را مطابق شکل (۲-۱۹) نمایش داد:



شکل (۲-۱۹) نمایش جعبه‌ای فرآیند شکل (۲-۱۸)

با استفاده از جدول (۲-۱) مدار الکتریکی معادل این سیستم نیز مطابق شکل (۲-۲۰) بدست می‌آید:



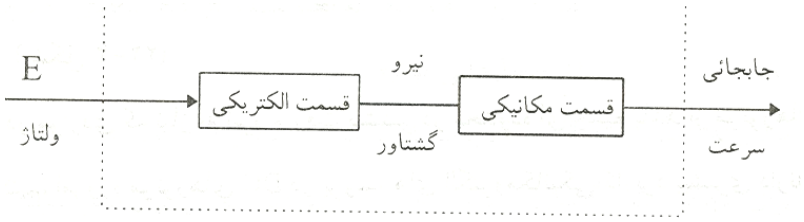
شکل (۲-۲۰) مدار معادل الکتریکی شکل (۲-۱۸)

۲-۱-٤ فرآیندهای الکترومکانیکی:

برای حرکت دادن پروسه‌های مکاینکی نیاز به نیرو می‌باشد و این نیرو معمولاً توسط محرک‌های الکتریکی تأمین می‌گردد، مثلاً در سیستم‌های کنترل وضعیت آنتن و یا دستگاه‌های کپی تراش، یا ماشین‌های CNC نیروی لازم (گشتاور) توسط یک موتور الکتریکی تأمین می‌گردد.

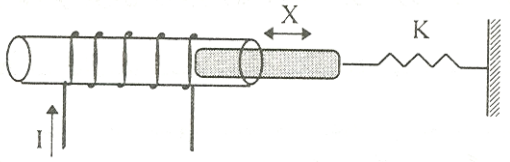
پروسه‌های الکترومکانیکی بسیار متداول و معمول می‌باشند بنابراین بررسی آنها بعنوان پروسه‌هائی مستقل بسیار مفید خواهد بود. وقتی صحبت از پروسه الکترومکانیکی می‌شود، منظور پروسه‌ای است که از یک قسمت الکتریکی و یک قسمت مکانیکی تشکیل شده است. ورودی به این پروسه‌ها را معمولاً ولتاژ (یا جریان) و خروجی آنها را جابجائی (وضعیت) یا سرعت در نظر می‌گیرند. پس بطور خلاصه این پروسه‌ها را می‌توان مطابق شکل (۲-۲۱) نمایش داد.

در پروسه‌های الکترومکاینکی برای ایجاد جابجائی‌های (نیروهای) خطی محدود از سلونوئیدها و برای ایجاد جابجائی‌های دورانی یا جابجائی‌های خطی با دامنه زیاد از موتورهای الکتریکی استفاده می‌کنیم.



شکل (۲-۲۱) فرآیند الکترومکانیکی

شکل (۲-۲۲) یک محرک سلونوئیدی را در حالت کلی نشان می‌دهد:



شکل (۲-۲۲). محرک سلونوئیدی در حالت کلی

نیروئی که توسط سیم‌پیچ تولید می‌شود متناسب با مجذور جریان است:

$$F = K_s I^2 \qquad (۳۵-۲)$$

در رابطه (۲-۳۵) K_s ضریب سیم‌پیچ می‌باشد. در شکل (۲-۲۲) در حالت تعادل (force alance) خواهیم داشت:

$$F = KX$$
$$K_s I^2 = K.X$$
$$X = \frac{K_s}{K} I^2 \qquad (۳۶-۲)$$

رابطه (۲-۳۶) یک رابطه غیرخطی بین جابجائی و جریان را بیان می‌دارد.

سیم‌پیچ‌ها محرک‌هائی غیرخطی هستند و در مواردی که به دقت و نیروی زیاد نیاز نباشد مورد استفاده قرار می‌گیرند و از مزایای آنها می‌توان به سادگی و ارزانی اشاره نمود.

سیم‌پیچ‌ها همچنین در کنترل‌های دوضعیتی و در حالت قطع و وصل نیرو مورد استفاده قرار می‌گیرند. از موارد مهم کاربرد سیم‌پیچ‌ها می‌توان به ایجاد جایجائی‌های خطی برای توپی شیرهای کنترل اشاره نمود. د ر چنین مواردی جابجائی معمولاً در حد چند سانتی متر بوده و بار عمدتاً فنری می‌باشد. مانند (شکل ۲-۲۲).

در مواردی که نیاز به نیرو و دقت بیشتر در محدوده‌ای وسیع باشد از موتورهای الکتریکی استفاده می‌کنیم. امروزه موتورهای DC در پروسه‌های الکترومکانیکی کاربرد

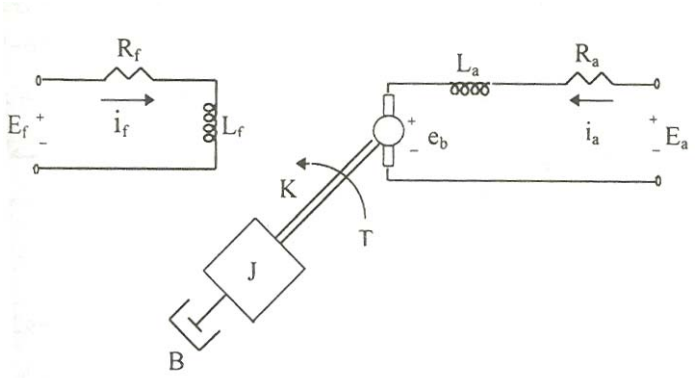
بیشتری دارند و سایر موتورها نیز اگر از دیدگاه ایجاد گشتاور در اثر جریان و میدان مورد توجه قرار گیرند دارای رفتاری کم و بیش مشابه هستند.

یک موتور الکتریکی در حالت کلی از دو قسمت میدان و آرمیچر تشکیل شده است از اثر فلوی میدان (ϕ) بر جریان آرمیچر (I_a)، گشتاور (نیرو) تولید می‌گردد:

$$T = K_1.I_a.\phi \qquad (۳۷-۲)$$

در رابطه (۲-۳۷) K_1 ضریب ثابتی است که بستگی به ویژگی‌های موتور دارد.

اکنون یک پروسه الکترومکانیکی را با جزئیاتی بیشتر مطابق شکل (۲-۳۲) نمایش می‌دهیم:



شکل (۲-۲۳). فرآیند الکترومکانیکی (موتور dc) در حالت کلی

در این شکل داریم:

R_f= مقاومت سیم‌پیچ میدان

L_f= اندوکتانس سیم‌پیچ میدان

I_f= جریان سیم‌پیچ میدان

E_f= ولتاژ اعمالی به سیم‌پیچ میدان

T= گشتاور تولید شده توسط موتور

J= اینرسی (بار)

B= خاصیت دمپری (بار)

K= ضریب تبدیل جریان میدان به گشتاور

R_a= مقاومت سیم‌پیچ آرمیچر

L_a= اندوکتانس سیم‌پیچ آرمیچر

I_a= جریان آرمیچر

E_a= ولتاژ اعمالی به سیم‌پیچ آرمیچر

ω= سرعت چرخش موتور

E_b= نیروی ضد محرکه القا شده در سیم‌بندی آرمیچر

θ= جابجائی موتور

K_2= ضریب تبدیل سرعت به نیروی ضد محرکه

با توجه به رابطه (۲-۳۷) برای ایجاد و تغییر گشتاور (نیرو) معمولاً به دو صورت می‌توان عمل نمود:

الف) فلوی میدان (ϕ) را ثابت نگاه داشته و جریان آرمیچر را تغییر دهیم، ب) جریان آرمیچر را ثابت نگه داشته و فلوی میدان را تغییر دهیم.

رفتار پروسه در هر یک ار موارد فوق متفاوت خواهد بود که در زیر به بررسی آن می‌پردازیم:

الف) میدان ثابت. (فرمان آرمیچر):

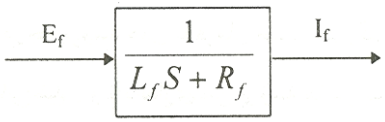
سیم‌پیچ آرمیچر معمولاً از سیم‌های کلفت با تعداد دور کم تشکیل شده است، بنابراین با تقریب خوب می‌توان از خاصیت سلفی آن صرف نظر نمود، در چنین شرایطی تابع تبدیل پروسه، یعنی نسبت سرعت خروجی به ولتاژ اعمالی به مدار آرمیچر با در نظر گرفتن بار اینرسی و دمپر، بصورت زیر بدست می‌آید:

$$\frac{\omega(s)}{E_a(s)} = \frac{K_m}{\tau_m s + 1} \qquad (۲-۳۸)$$

با توجه به رابطه (۲-۳۸)، تابع تبدیل پروسه درجه یک می‌باشد. K_m را گین وτ_m را ثابت زمانی پوسه می‌نامیم.

ب)جریان آرمیچر ثابت. (فرمان میدان):

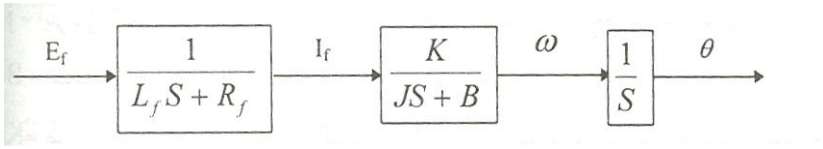
سیم‌پیچ از سیم‌های نازکتر با تعداد دور زیاد تشکیل شده، بنابراین خاصیت اهمی و سلفی آن هر دو دارای اهمیت می‌باشند. ولتاژ اعمالی به سیم‌پیچ میدان ابتدا مطابق شکل (۲-۲٤) بر امپدانس سیم بندی میدان تقسیم شده و به جریان میدان تبدیل می‌گردد،



شکل (۲-۲۴) نمایش جعبه‌ای سیم‌پیچ میدان

سپس جریان میدان به فلوی میدان تبدیل شده و طبق رابطه (۲-۳۷) کوپل ایجاد می‌کند و کوپل ایجاد شده بر قسمت‌های مکانیکی اثر نموده، موجب تغییر سرعت یا جابجائی بار می‌گردد.

بنابراین آنچه که اتفاق می‌افتد را می‌توان مطابق شکل (۲-۲۵) نمایش داد:



شکل (۲-۲۵). نمایش جعبه‌ای موتور dc (فرمان میدان)

با توجه به شکل (۲-۲۵) تابع تبدیل بصورت زیر بدست می‌آید:

$$\frac{\omega(s)}{E_f(s)} = \frac{K}{(l_f s + R_f)(J_s + B)} \qquad (۳۹-۲)$$

رابطه (۲-۳۹) را معمولاً بصورت زیر می‌نویسیم:

$$\frac{\omega(s)}{E_f(s)} = \frac{K_m}{(\tau_f s + 1)(\tau_m s + 1)} \qquad (۴۰-۲)$$

که در این رابطه:

$K_m = \frac{k}{R_f . B}$ گین موتور

$\tau_f = \frac{l_f}{R_f}$ ثابت زمانی‌الکتریکی

$\tau_m = \frac{J}{B}$ ثابت زمانی مکانیکی

توجه کنید که در این حالت پروسه از درجه دو بوده و دارای دو ثابت زمانی است و می‌تواند رفتاری نوسانی داشته باشد.

هنگام کار با پروسه‌های الکترومکانیکی به صورت فرمان میدان یا فرمان آرمیچر می‌باید به نکاتی چند توجه نمود که در زیر به پاره‌ای از آنها اشاره می‌شود.

۱. درجه پروسه‌های با فرمان میدان، بزرگتر از پروسه‌های با فرمان آرمیچر است، بنابراین احتمال نوسانی شدن و ناپایداری این پروسه‌ها نیز بیشتر می‌باشد.

۲. برای تغییر E_f به قدرت کمتری نیاز داریم از این نظر فرمان دادن به پروسه‌های با فرمان میدان راحت است.

۳. به دلیل مشکل تامین منبع جریان ثابت برای آرمیچر معمولاً این کار به سری کردن یک مقاومت بزرگ با سیم‌بندی آرمیچر و تغذیه سیم‌بندی با یک منبع ولتاژ ثابت انجام می‌گردد بنابراین جریان آرمیچر بطور تقریبی ثابت می‌باشد.

٤. بدلیل رفتار غیرخطی هسته میدان، پروسه در حالت فرمان میدان اندکی غیرخطی خواهد بود.

۵. از آنجائیکه در مدار میدان، نیروی ضدمحرکه‌ای وجود ندارد ثابت نگه داشتن جریان میدان در سرعت‌های مختلف بسیار راحت تر از ثابت نگه داشتن جریان آرمیچر است، بنابراین فرمان میدان اساساً ساده‌تر و رفتار پروسه با صرف‌نظر از رفتارهای غیرخطی هسته، خطی‌تر است.
٦. اساساً هنگامی که در کنترل پروسه به دقت، ظرافت و پاسخ دهی سریع در دامنه وسیعی از تغییرات گشتاور نیاز باشد، از فرمان میدان استفاده می‌کنیم، مانند ماشین‌های کپی تراش. در کاربردهای عادی نیز معمولاً از فرمان آرمیچر استفاده می‌شود، مانند کنترل وضعیت آنتن.

۲-۲ بررسی رفتارهای کلی فرآیندهای صنعتی:

در ابتدای این فصل با مدل‌هائی کلی از فرآیندهای صنعتی آشنا شدیم. فرآیندهای صنعتی هرچند ظاهراً متنوع و گوناگون هستند، اما از دیدگاه کنترل، خواص و رفتارهای کم و بیش مشابه‌ای دارند. شناخت این رفتارهای کلی به شناسائی و درک هر پروسه صنعتی جدید کمک خواهد کرد. در این بخش به بررسی پاره‌ای از این رفتارها می‌پردازیم.

۲-۲-۱ ثابت زمانی:

ثابت زمانی در یک پروسه مدت زمانی است که طول می‌کشد تا پاسخ پروسه به ورودی پله به ٦۳/۲٪ مقدار نهائی آن برسد ثابت زمانی در واقع ملاکی برای تعیین سرعت پاسخ دهی یک پروسه است و یا به عبارت دیگر معرف لختی یا تنبلی پروسه می‌باشد. در عمل یک پروسه ممکن است دارای چندین ثابت زمانی باشد که در این صورت بزرگترین ثابت زمانی رفتار پروسه را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد. هنگام ساخت پروسه‌ها سعی می‌شود ثابت زمانی حاصل حتی‌الامکان کوچک شود و چون ثابت زمانی حاصلضرب مقاومت در ظرفیت پروسه است. کاهش هر یک می‌تواند منجر به کاهش آن گردد، در عمل برای کاهش ثابت زمانی، سعی در کاهش مقاومت می‌کنیم، زیرا بزرگ بودن ظرفیت یک پروسه باعث کاهش اثر اغتشاشات بر آن می‌گردد که امری مطلوب است.

۲-۲-۲ ظرفیت:

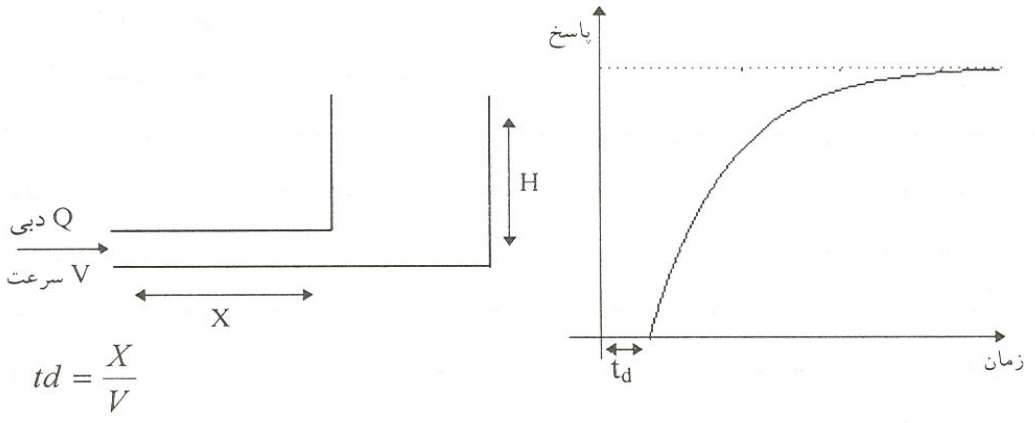
ظرفیت یک پروسه خاصیت ذخیره کنندگی انرژی و یا ذخیره کنندگی ماده در پروسه می‌باشد. در ابتدای این فصل با مفهوم ظرفیت پروسه در ذخیره کنندگی ماده (پروسه‌های انتقال سیال) و همچنین ذخیره کنندگی انرژی در جرم بصورت اینرسی، و دما در پروسه حرارتی آشنا شدیم. ظرفیت را از دیدگاه دیگری می‌توان خاصیت کاهش اثر تغییرات ورودی در خروجی پروسه تعریف نمود.

۲-۲-۳ مقاومت:

پروسه‌ها در برابر جریان انرژی یا ماده به داخل خود مقاومت نشان می‌دهند. مثلاً برای انتقال مایع به داخل یک منبع، با اصطکاک یا مقاومت لوله‌ها روبرو هستیم و یا جهت انتقال انرژی حرارتی با مقاومت سطح تبادل روبرو می‌شویم نسبت نیروی اعمالی به جریان ایجاد شده را اصطلاحاً مقاومت گوئیم. همانطور که قبلاً دیدیم حاصلضرب ظرفیت در مقاومت یک پروسه را ثابت زمانی می‌نامیم.

۲-۲-٤ زمان مرده:

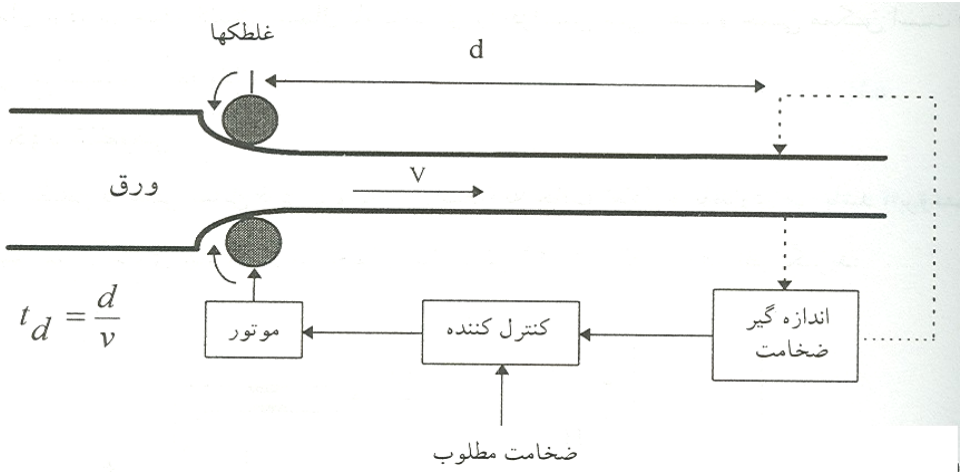
گاهی اوقات وقتی فرمانی به پروسه داده می‌شود، مدتی طول می‌کشد تا پروسه شروع به پاسخ دادن به آن فرمان نماید. بعنوان مثال شکل ۲-۲٦-الف را در نظر بگیرید، برای آنکه دبی Q به مخزن رسیده و شروع به پر کردن آن کند می‌بایستی طول لوله (X) را طی نماید، بنابراین هر فرمان دبی به مدت t_d ثانیه طول می‌کشد تا به مخزن برسد. در این حالت تغییرات ارتفاع سیال بر حسب زمان در حالت کلی مطابق شکل ۲-۲٦-ب می‌باشد.



(الف) (ب)

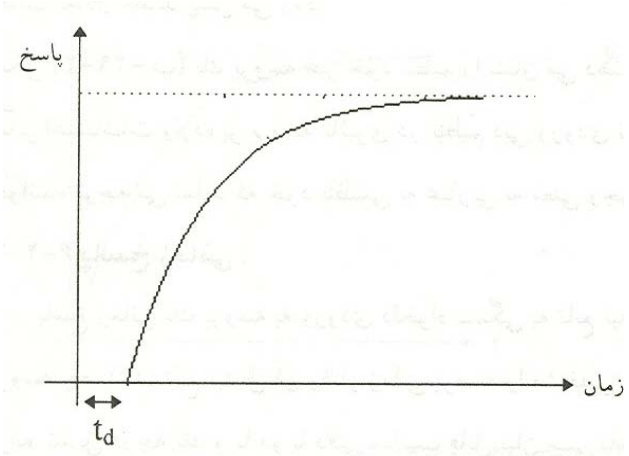
شکل (۲-۲۶). یک فرآیند با زمان مرده

زمان مرده گاهی در اثر موقعیت مکانی عنصر اندازه‌گیر ایجاد می‌گردد. بعنوان مثال شکل ۲-۲۷ که یک سیستم نورد را بطور ساده نشان می‌دهد در نظر بگیرید:



شکل (۲-۲۷). سیستم نورد

برای تنظیم ضخامت ورق، بایستی فاصله غلطک‌ها را از یکدیگر تنظیم نمائیم. اگر ورق با سرعت v از بین غلطک‌ها عبور کرده و عنصر اندازه‌گیر (ضخامت‌سنج) در فاصله d از غلطک‌ها قرار داشته باشد هر تغییری که در ضخامت ورق داده شود، پس از t_d ثانیه حساسیت می‌شود و در صورتیکه تأخیر دیگری در حلقه کنترل وجود نداشته باشد، بعد از این مدت است که کنترل کننده از اجراء یا عدم اجراء فرمان خود مطلع می‌گردد بنابراین پاسخ پله فرمان تغییر ضخامت، می‌تواند بصورت شکل ۲-۲۸ باشد.



شکل (۲-۲۸). پاسخ زمانی یک فرآیند با تأخیر

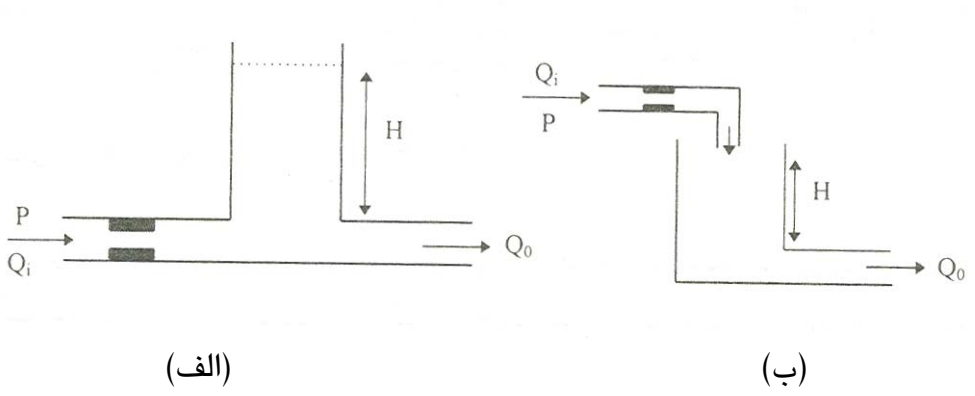
زمان مرده را گاهی تأخیر انتقال (Transportation-lag) یا تأخیر مسافت–سرعت (Distance-velocity lag) و یا تأخیر خالص (Pur-delay) نیز می‌نامیم.

زمان مرده از ویژگی‌های پروسه‌هائی است که در آنها خطوط لوله با نوارهای نقاله وجود دارند، همچنین تأخیر در اندازه‌گیری نیز مانند مثال فوق، منجر به ایجاد زمان مرده می‌شود.

وجود زمان مرده در حلقه کنترل احتمال ناپایداری را افزایش می‌دهد و حتی ممکن است موجب ناپایداری یک سیستم درجه یک شود.

۲-۲-۵ خود تنظیمی:

خود تنظیمی به معنی تمایل ذاتی پروسه در رسیدن به حالت تعادل و پایداری می‌باشد، پروسه‌های خود تنظیم کنترل‌پذیری بهتری دارند، بعنوان مثال شکل ۲-۲۹-الف را در نظر بگیرید:



(الف) (ب)

شکل (۲-۲۹). فرآیند خودتنظیم و غیر خودتنظیم

در حالت تعادل دبی خروجی با دبی ورودی برابر و ارتفاع H ثابت می‌باشد، حال اگر دبی خروجی افزایش یابد، ارتفاع کم شده و چون فشار شارژ ثابت است باعث افزایش دبی ورودی می‌گردد و پروسه به سمت حالت تعادل جدید پیش می‌رود.

شکل ۲-۲۹-ب یک پروسه غیرخودتنظیم را نشان می‌دهد. در این پروسه تغییرات دبی خروجی و یا سایر اغتشاشات وارده بر پروسه تأثیری در تنظیم دبی ورودی ندارد.

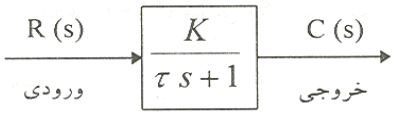
خواننده توجه می‌نماید که خود تنظیمی به عبارتی به معنی وجود فیدبک ذاتی در داخل پروسه می‌باشد.

۲-۲-٦ پاسخ زمانی:

پاسخ زمانی یک پروسه به ورودی دلخواه بستگی ب تابع تبدیل پروسه دارد. بنابراین صرفنظر از اینکه پروسه چه باشد، تابع تبدیل آن رفتار زمانی پروسه را مشخص خواهد کرد. معمولاً پورسه‌های صنعتی با توابع تبدیل درجه یک و یا دو با دقتی مناسب قابل بیان می‌باشند، بنابراین بررسی پاسخ زمانی پروسه‌های درجه یک و دو مفید خواهد بود.

۲-۲-٦-۱ پاسخ زمانی پروسه‌های درجه یک:

یک پروسه درجه یک را در حالت کلی بصورت شکل ۲-۳۰ نمایش می‌دهیم:



شکل (۲-۳۰). فرآیند درجه یک

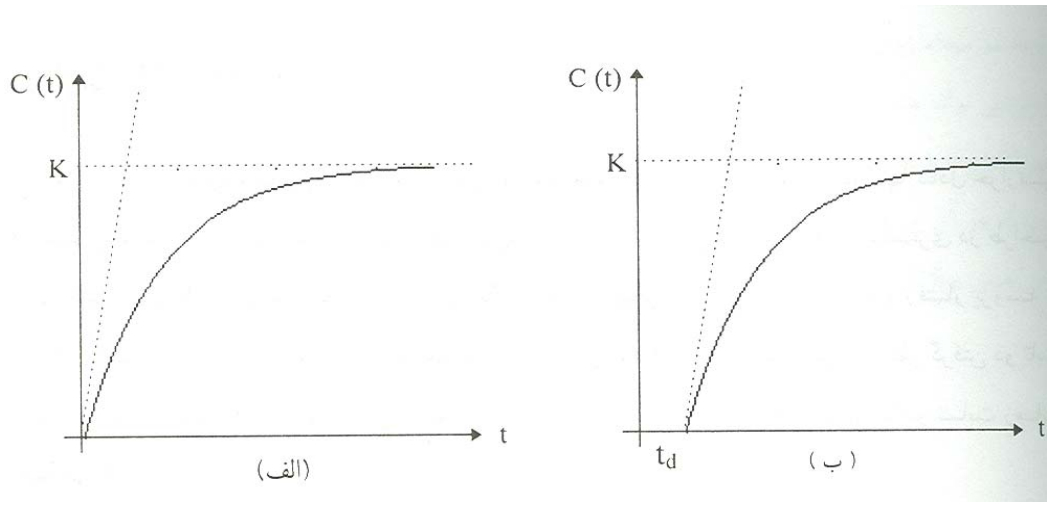
هرگاه ورودی به پروسه یک فرمان پله‌ای (واحد) باشد، خروجی پروسه بصورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$C(s)=\frac{1}{s}\times\frac{k}{\tau s+1}$$

$$C(s)=\frac{k}{s}-\frac{k\tau}{\tau s+1}$$

$$C(t)=k(1-e^{-1/\tau}).u(t) \qquad (٤١-٢)$$

رابطه (۲-٤۱) پاسخ زمانی یک پروسه درجه یک به ورودی پله واحد را بیان می‌دارد. در شکل ۲-۳۱-الف این پاسخ رسم شده است، توجه نمائید که وجود ثابت زمانی باعث می‌گردد تا پاسخ پروسه بطور نمائی به مقدار نهائی خود (k) نزدیک شود، بدیهی است هر چه ثابت زمانی کوچکتر باشد پاسخ نهائی پروسه زودتر حاصل می‌گردد.



شکل (۲-۳۱). پاسخ پله فرآیند درجه یک

در صورتیکه پروسه دارای تأخیر خالص (t_d) باشد، شکل کلی پاسخ به همان صورت قبلی است اما شروع پاسخ به مدت t_d به تأخیر می‌افتد، مانند شکل ۲-۳۱-ب.

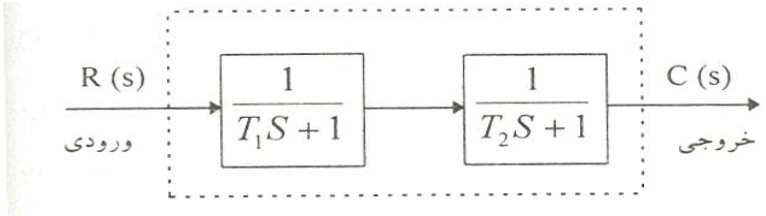
اگر از رابطه (۲-٤۱) مشتق بگیریم بدست می‌آید:

$$C'(t) = \frac{k}{\tau} e^{-1/\tau} \qquad (٤٢-٢)$$

رابطه (۲-٤۲) نشان می‌دهد که مشتق پاسخ زمانی همواره مثبت می‌باشد، یعنی پاسخ زمانی متوجه محور زمانها است، بعلاوه شیب خط مماس بر پاسخ در مبدأ برابر $\frac{k}{\tau}$ می‌باشد، بنابراین هر چه ثابت زمانی (τ) کوچکتر باشد، خیزش پاسخ به سمت مقدار نهائی تندتر است.

۲-۲-٦-۲ پاسخ زمانی فرآیندهای درجه دو با دو ثابت زمانی:

نمای کلی یک پروسه با دو ثابت زمانی در شکل (۲-۳۲) آمده است:



شکل (۲-۳۲). فرآیند درجه دو با ثابت زمانی

مثال متداول پروسه‌های با چند ثابت زمانی پروسه‌های حرارتی می‌باشند که در آنها تبادل حرارتی در چندین مرحله و توسط چندین محیط انجام می‌شود، در عمل جائی که به دقت بیشتری در طراحی حلقه کنترل نیاز باشد، از بین چند ثابت زمانی مطرح شده، آنهائی را که بزرگتر بوده و رفتار پروسه را بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهند، در نظر می‌گیرند. در کاربردهای علمی و معمولی در نظر گرفتن دو ثابت زمانی بزرگتر، دقت کافی را تأمین می‌نماید، بنابراین در اینجا به بررسی پروسه‌هائی با دو ثابت زمانی اکتفا می‌کنیم.

با توجه به شکل ۲-۳۲ پاسخ یک پروسه با دو ثابت زمانی به ورودی پله واحد را به دست می‌آوریم:

$$C(s) = R(s).T(s)$$

$$C(s) = \frac{1}{s} \times \frac{1}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$$

$$C(s) = \frac{1}{s} + \frac{\frac{T_1}{T_2 - T_1}}{s + 1/T_1} - \frac{\frac{T_2}{T_2 - T_1}}{s + 1/T_2}$$

$$C(t) = (1 + \frac{T_1}{T_2 - T_1} e^{-1/T_1} - \frac{T_2}{T_2 - T_1} e^{-1/T_2}) u(t) \qquad (۴۳-۲)$$

$$\frac{T_1}{T_2} = a \qquad (۴۴-۲)$$

$$C(t) = (1 + \frac{a}{1-a} e^{-at/T_1} - \frac{1}{1-a} e^{-at/T_1}) u(t) \qquad (۴۵-۲)$$

اگر $T_1 >> T_2$ باشد، رابطه (۲-۴۵) شبیه به رابطه (۲-۴۱) می‌گردد، یعنی می‌توان پروسه را یک پروسه درجه یک با ثابت زمانی غالب یعنی T_1 در نظر گرفت.

از رابطه (۲-۴۵) مشتق می‌گیریم:

$$c'(t) = \frac{a}{1-a} . \frac{1}{T_1} (e^{-at/T_1} - e^{-1/T_1}) \qquad (۴۶-۲)$$

رابطه (۲-۴۶) نشان می‌دهد که مشتق پاسخ زمانی در مبدأ زمان صفر است و یا به عبارت دیگر پاسخ پروسه در مبدأ زمان بر محور زمان مماس است، از طرف دیگر در زمانهای مختلف با توجه به مقدار a مشتق می‌تواند مثبت یا منفی باشد، یک نقطه مفید در پاسخ زمانی اینگونه پروسه ها، نقطه تغییر انحناء (inflection-point) می‌باشد که آن $t_{i\ n}$ نشان می‌دهیم. نقطه تغییر انحناء نقطه‌ای است که در آن پاسخ زمانی تغییر انحناء می‌دهد و یا مشتق پاسخ زمانی تغییر علامت می‌دهد.

برای تعیین $t_{i\,n}$ از رابطه (۲-۴۶) مشتق گرفته، مساوی صفر قرار می‌دهیم که بدست می‌آید:

$$t_{in} = T_2 . \frac{\frac{T_1}{T_2}}{\frac{T_1}{T_2} - 1} \ln \frac{T_1}{T_2}$$

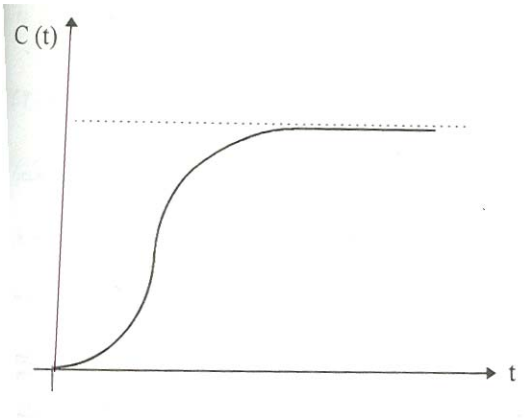
$$\frac{t_{in}}{T_2} = \frac{\frac{T_1}{T_2}}{\frac{T_1}{T_2} - 1} \ln \frac{T_1}{T_2} \qquad (٤٧-٢)$$

با قرار دادن مقدار t_{in} در (٢-٤٥) و (٢-٤٦) اندازه پاسخ زمانی و شیب خط مماس در نقطه تغییر انحناء را بدست می‌آوریم.

$$C(t_{in}) = 1 - (a+1)e^{-a\frac{t_{in}}{T_1}} \qquad (٤٨-٢)$$

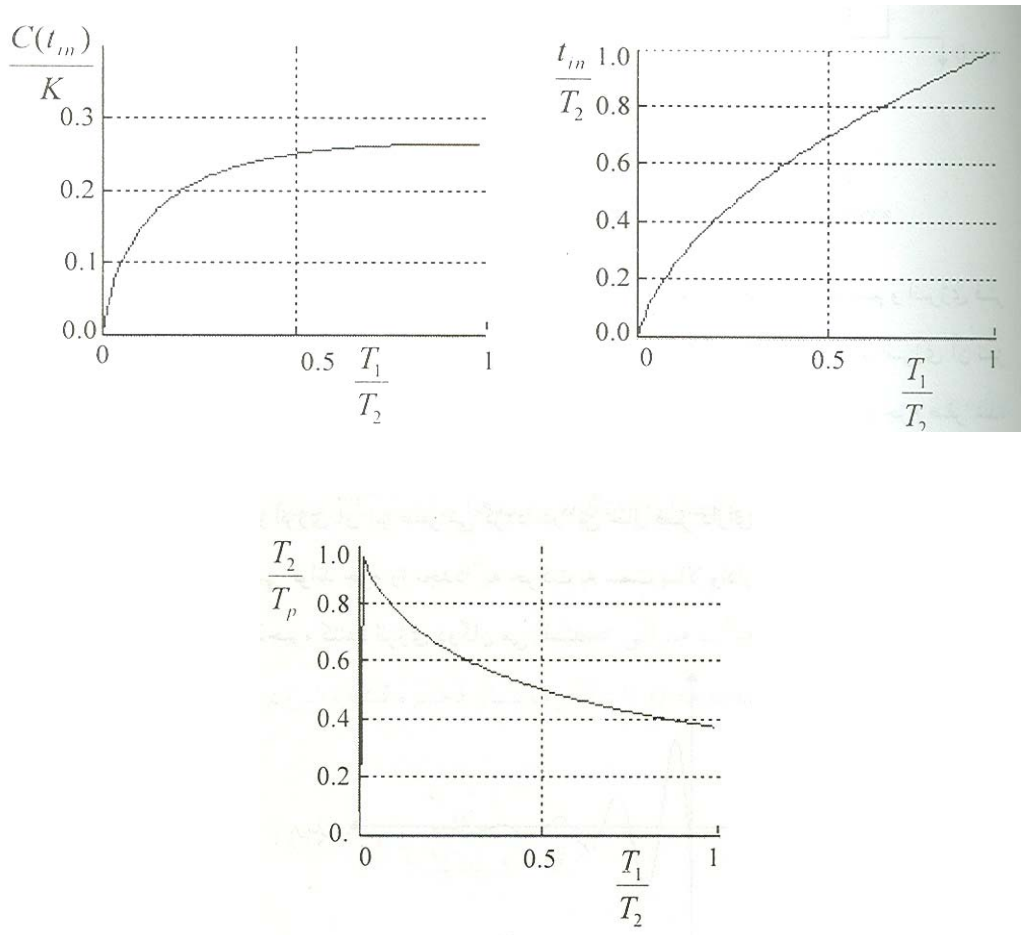
$$C'(t_{in}) = \frac{a}{T_1} e^{-a\frac{t_{in}}{T_1}} \qquad (٤٩-٢)$$

شکل ٢-٣٢ پاسخ زمانی یک پروسه با دو ثابت زمانی را در حالت کلی نشان می‌دهد:



شکل (٢-٣٢) پاسخ پله فرآیند با دو ثابت زمانی در حالت کلی

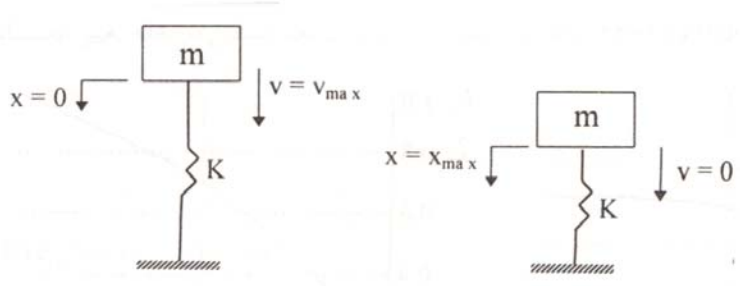
روابط بدست آمده قبل نشان می‌دهند که رفتار چنین پروسه‌هائی را می‌توان بر حسب مقادیر a و $\frac{t_{in}}{T_2}$ و $c(t_{in})$ بیان نمود. در کابردهای علمی از منحنی‌هائی شبیه به شکل ٢-٣٤ استفاده می‌کنیم. با مشخص بودن a طبق رابطه (٢-٤٧) می‌توان مقدار $\frac{t_{in}}{T_2}$ را تعیین نمود وسپس با استفاده از رابطه (٢-٤٨) مقدار $c(t_{in})$ را مشخص کرد، در بخش بعدی از این نمودارها استفاده خواهیم نمود.



شکل (۲-۳۴) نمودارهای مورد استفاده برای تعیین تابع تبدیل فرآیند دو ثابت زمانی با تأخیر خالص

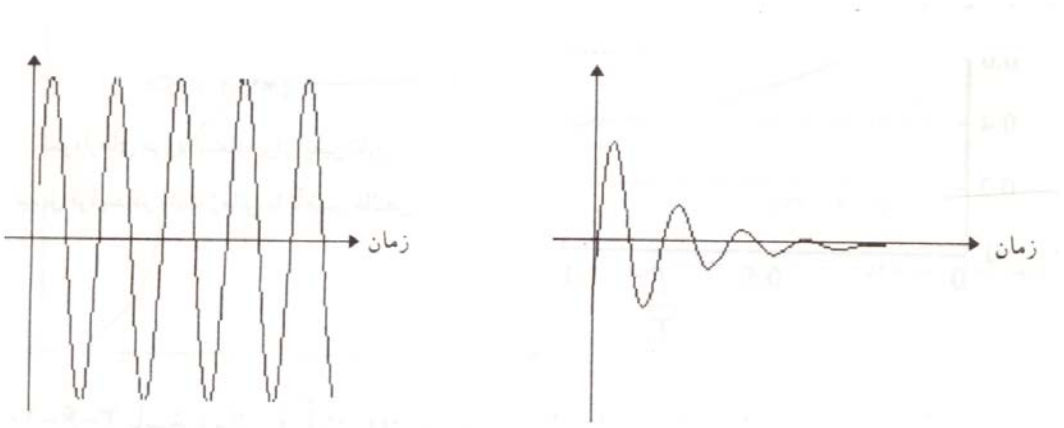
۲-۲-۶-۳ پاسخ زمانی فرآیندهای درجه دو با عناصر ذخیره‌کننده انرژی دوگان:

در قسمت قبل پروسه‌های درجه دو، شامل دو ثابت زمانی را مورد بررسی قرار دادیم. هر ثابت زمانی معرف یک عنصر ذخیره کننده انرژی می‌باشد، عناصر ذخیره کننده انرژی ممکن است ماهیتی یکسان داشته باشد و یا متفاوت بوده و حالت دوگان داشته باشند، دوگان به این معنی است که تغییرات انرژی در یکی مخالف تغییرات انرژی در دیگری باشد و یا بعبارت دیگر هنگامی که انرژی یکی کاهش می‌یابد انرژی دیگری افزایش یابد و برعکس، بعنوان مثال، پروسه مکانیکی شکل (۲-۳۵) را که شامل یک جرم و یک فنر است در نظر بگیرید:



شکل (۲-۳۵) فرآیند مکانیکی
شامل دو عنصر ذخیره کننده انرژی

هنگامی که جرم دارای سرعت است و فنر هنوز فشرده نشده است، انرژی جرم ماکزیمم و انرژی فنر صفر است، هنگامی که جرم به سمت پائین حرکت می‌کند، رفته رفته سرعت آن کم شده و انرژی آن نیز کاهش می‌یابد، اما از طرفی فنر فشرده شده و انرژی آن افزایش می‌یابد، تا جائیکه سرعت جرم صفر شده و انرژی آن نیز صفر می‌گردد، دراین حال فنر دارای حداکثر فشردگی یعنی حداکثر انرژی است و می‌تواند جرم را مجدداً به حرکت به سمت بالا وادار نماید. در این پروسه جرم و فنر دو عنصر ذخیره کننده انرژی دوگان می‌باشند.

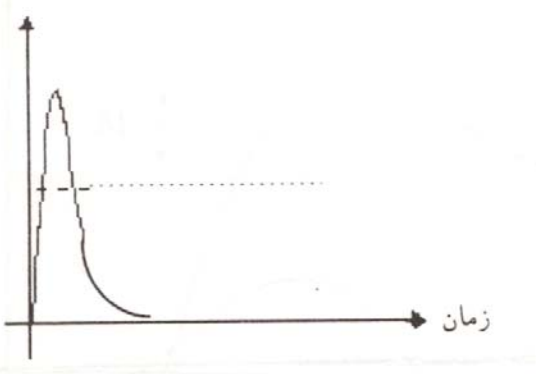


الف) پاسخ بدون تلفات　　ب) پاسخ نوسانی میراء

شکل (۲-۳۶). دو حالت از پاسخ نوسانی

اگر تلفات انرژی موجود نباشد، تغییرات x نسبت به زمان شکل ۲-۳٦-الف حالت نوسانی سینوسی خواهد داشت و در صورتیکه تلفات موجود باشد، مثلاً یک ویسکوز با فنر موازی کنیم، سیستم مطابق شکل ۲-۳٦-ب بعد از چند نوسان به حالت سکون می‌رسد. این حالت را نوسانی میراء یا میرائی ضعیف می‌گوئیم.

اگر مقدار تلفات خیلی زیاد باشد عناصر ذخیره کننده انرژی فرصت تبادل انرژی را نخواهند داشت و انرژی موجود در پروسه سریعاً تلف می‌شود، در این حالت تغییرات x بر حسب زمان، می‌تواند به شکل ۲-۳٦- ج باشد. این حالت را [illegible] قوی می‌گوئیم.



شکل (۲-۳۶- ج) پاسخ میرائی قوی

حالت فوق میرائی شبیه به حالت پروسه با دو ثابت زمانی است، و حالـت نوسـانی نیـز بـه دلیل وجود تلفات در پروسه ها، کمتر اتفاق می‌افتد، بنابراین حالت مهم و متداول در ایـن گونـه پروسه‌ها حالت نوسانی میرا است.

فصل ۳

اندازه‌گیرها

۳-۱ معرفی اندازه‌گیرها:

در فصل قبل گفتیم اولین قدم برای کنترل یک فرآیند، شناخت و درک دینامیک و رفتارهای آن فرآیند (تابع تبدیل) می‌باشد. بعد از شناخت پروسه می‌باید کمیت تحت کنترل را اندازه‌گیری نمائیم. به عبارت دیگر برای کنترل یک کمیت باید در هر لحظه اطلاعات دقیق از آن داشته باشیم. یعنی باید کمیت تحت کنترل را همواره اندازه‌گیری نمائیم.

اندازه‌گیری و کسب اطلاع از کمیت تحت کنترل و مطابق شکل ۱-۸ توسط عنصر اندازه‌گیر انجام می‌گردد و بنابراین اندازه‌گیر یکی از قسمت‌های مهم و حساس حلقه کنترل می‌باشد.

امروزه ساخت و ابداع اندازه‌گیرهای جدید، یکی از زمینه‌های پرتحرک و پر رقابت بین کمپانی‌های سازنده می‌باشد و مراکز تحقیقاتی زیادی در این زمینه فعالیت می‌کنند و در واقع بسیاری از پیشرفتهای چشمگیر در سیستم‌های پیچیده نظامی، صنعتی، پزشکی و جراحی و... مرهون اختراع اندازه‌گیرهای جدید می‌باشد.

در صنعت از اندازه‌گیرها معمولاً با نام‌های دیگری نیز یاد می‌شود. مانند سنسورها (Sensors)، ترانسمیترها (Transmiters) و یا ترانسدیوسرها (Transducers) هر چند هر یک از اسامی فوق نام وسیله یا عنصری مستقل با طرز کار بخصوص می‌باشد، اما یک اندازه‌گیر گاهی اوقات می‌تواند شامل هر سه عنصر یاد شده باشد، بگونه‌ای که بتوان عملیات فوق را در آن از یکدیگر جدا نمود. در اینجا بهتر است قبل از ادامه بحث تعاریف دقیق‌تری از سه عنصر فوق ارائه نمائیم:

سنسور: عنصری است که به کمیت خاصی حساس می‌باشد و یا در برابر آن کمیت خاص، از خود عکس‌العمل نشان می‌دهد، مثلاً ترموکوپل یک سنسور دما است، چرا که با تغییرات دما خروجی آن (ولتاژ) تغییر می‌کند. ترموکوپل سنسور شتاب نیست چرا که در اثر تغییرات شتاب عکس‌العملی از خود نشان نمی دهد و خروجی آن تغییر نمی کند.

ترانسدیوسر: عنصری است که یک نوع انرژی را به نوع دیگر تبدیل می‌کند. بنابراین ترانسدیوسر را می‌توان مبدل انرژی یا بطور خلاصه مبدل نامید. با تعریف فوق یک سنسور

گاهی اوقات می‌تواند در عین حال ترانسدیوسر نیز باشد، مثلاً توموکوپل علاوه بر آنکه یک عنصر حساس به دماست یک ترانسدیوسر نیز می‌باشد، چرا که انرژی گرمائی (دما) را به انرژی الکتریکی (ولتاژ) تبدیل می‌کند، در سنسورها اگر تبدیل انرژی انجام شود، کل انرژی ناشی از کمیت تحت اندازه‌گیری می‌باشد. مثلاً در توموکوپل‌ها انرژی الکتریکی خروجی تماماً ناشی از انرژی گرمایی دمای مورد اندازه‌گیری می‌باشد.

یک ترانسدیوسر صنعتی برای تبدیل انرژی ممکن است از منبع تغذیه خارجی نیز استفاده کند. مثلاً یک ترانسدیوسر فشار معمولاً دارای یک منبع تغذیه الکتریکی می‌باشد، تا انرژی مکانیکی (فشار) را با مقیاس بزرگتری به انرژی الکتریکی (ولتاژ) تبدیل کند. در این حالت ترانسدیوسر را بعضاً ترانسدیوسر نیز می‌توان نامید.

ترانسمیتر: اکثر وسایل و تجهیزاتی که برای کنترل یک پروسه بکار برده می‌شوند، معمولاً روی پروسه و یا در فاصله‌ای دور از پروسه نصب می‌شوند از طرفی عنصر اندازه‌گیر معمولاً روی پروسه و یا در فاصله ای نزدیک به آن نصب می‌گردد. بنابراین سیگنال ناشی از کمیت اندازه‌گیری شده می‌بایستی به گونه‌ای مطمئن به اتاق فرمان ارسال گردد، این کار توسط ترانسمیتر انجام می‌شود ترانسمیترها سیگنال ناشی از سنسور را معمولاً تقویت و گاهی تبدیل به کمیتی دیگر می‌کنند. مثلاً در صنایع نفت اکثر کمیت‌های اندازه‌گیری شده تبدیل به سیگنال فشار هوا می‌شوند. از دیدگاه تقویت کنندگی و تبدیل انرژی ممکن است نتوان یک ترانسدیوسر را از ترانسمیتر متمایز ساخت. اما معمولاً ترانسدوسرها به کمیت تحت اندازه‌گیری نزدیکترند و گاهی با آن تماس مستقیم دارند، ولی ترانسمیترها با کمیت مورد اندازه‌گیری تماس ندارند و بعلاوه میزان انرژی و توان ترانسمیترها بسیار بیشتر از ترانسدیوسرها است.

از آنجائیکه در کنترل پروسه‌های صنعتی غالباً نیاز به سنسور، مبدل و انتقال دهنده می‌باشد کمپانی‌های سازنده نیز این سه عنصر را معمولاً یکجا و به صورت یک دستگاه می‌سازند و به همین دلیل ممکن است هر یک از نام هائی را که ذکر کردیم برای آن دستگاه بکار ببریم.

در این فصل همه این عناصر را تحت نام اندازه‌گیرها مورد بررسی قرار می‌دهیم.

اندازه‌گیرهای مورد استفاده در صنعت بسیار متنوع و گوناگون می‌باشند و معرفی یا شرح مختصری درباره آنها خود موضوع کتاب مستقلی است، بنابراین تنها به معرفی و تشریح عملکرد نمونه هائی از آنها می‌پردازیم و نخست در مورد خواص کلی و ویژگی‌های اندازه‌گیرها صحبت می‌کنیم.

۳-۲ خواص و ویژگی‌های اندازه‌گیرها:

یک اندازه‌گیر خوب می‌بایستی دارای چه خواص و ویژگی هائی باشد. اساساً خواص و ویژگی‌های اندازه‌گیرها کدامند؟ ویژگی هائی که معمولاً برای یک اندازه‌گیر ذکر می‌گردند به شرح زیر می‌باشند:

حوزه اندازه‌گیری (renge)

محدوده‌ای از دامنه تغییرات کمیت مورد اندازه‌گیری است، که عنصر اندازه‌گیر قادر به اندازه‌گیری آن می‌باشد، بنابرین همواره باید اندازه‌گیری را انتخاب نمود که حوزه اندازه‌گیری آن دامنه تغییرات احتمالی کمیت مورد کنترل را تحت پوشش قرار دهد، معمولاً برای اطمینان بیشتر حوزه اندازه‌گیری را بزرگتر از دامنه تغییرات احتمالی کمیت مورد اندازه‌گیری انتخاب می‌کنند.

صفر اندازه‌گیری (Zero)

معمولاً نقطه مشخصی را در حوزه اندازه‌گیری بعنوان نقطه صفر در نظر می‌گیریم، مثلاً در اندازه‌گیرهای حرارت، نقطه صفر دمائی است که آب یخ می‌زند و یا در اندازه‌گیرهای فشار، فشار اتمسفر بعنوان فشار صفر در نظر گرفته می‌شود. توجه نمائید که در نقطه صفر خروجی اندازه‌گیر لزوماً صفر نمی باشد و ممکن است دارای مقدار باشد، در عمل بهتر است اندازه‌گیر را به گونه‌ای تنظیم کنیم که در نقطه صفر، خروجی آن نیز صفر باشد. در این صورت کمیت مورد اندازه‌گیری نسبت به نقطه صفر اندازه‌گیری می‌گردد.

انحراف صفر (Zero drift)

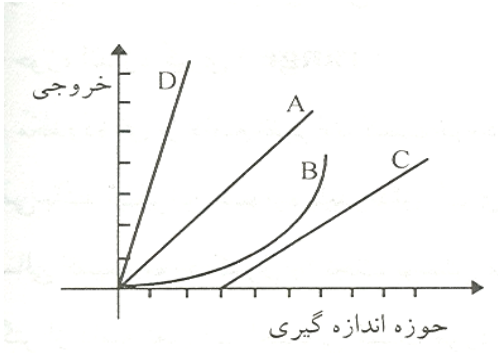
همانطور که در بند قبل گفتیم، معمولاً اندازه‌گیر را بگونه ای تنظیم می‌کنند که خروجی آن در نقطه صفر، مساوی صفر (و یا مقدار مشخص دیگری) باشد، اما متأسفانه اندازه خروجی در نقطه صفر ممکن است با گذشت زمان یا در اثر عوامل دیگری تغییر کند، این پدیده را پدیده انحراف صفر گوئیم. پدیده انحراف صفر ممکن است منجر به ایجاد خطاهای جدی در حلقه کنترل گردد. انحراف از صفر را به دو دسته سطحی (short-term) و ذاتی (long-term) تقسیم بندی می‌کنیم. انحراف سطحی، انحرافی است که ناشی از عومل

خارجی و محیطی مثل دما، تغییرات تغذیه و غیره می‌باشد. انحراف ذاتی، انحرافی است که ناشی از فرسودگی و یا تغییر خواص عنصر اندازه‌گیر با گذشت زمان می‌باشد.

حساسیت (Sensitivity)

حساسیت یک اندازه‌گیر عبارت است از نسبت تغییرات خروجی اندازه‌گیر به واحد تغییرات در کمیت مورد اندازه‌گیری. به بیان دیگر حساسیت شیب مشخصه عنصر اندازه‌گیر می‌باشد.

شکل ۳-۱ مشخصه چند اندازه‌گیر فرضی را نشان می‌دهد. اگر شیب مشخصه در حوزه اندازه‌گیری ثابت باشد، اندازه‌گیر را خطی می‌گوئیم.



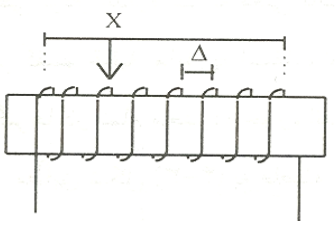
شکل ۳-۱ حالات ممکن برای مشخصه اندازه‌گیر

مانند اندازه‌گیر (A)، اگر شیب مشخصه در حوزه اندازه‌گیری ثابت نباشد، اندازه‌گیر را غیرخطی گوئیم، مانند اندازه‌گیر (B).

اگر اندازه‌گیررا بگونه‌ای تنظیم کرده باشیم که در نقطه صفر اندازه‌گیری (Zero) خروجی آن نیز صفر باشد آنگاه مشخصه آن از مبدأ می‌گذرد، مانند اندازه‌گیرهای A و B در شکل ۳-۱. مشخصه یک اندازه‌گیر ممکن است با گذشت زمان یا در اثر عوامل محیطی تغییر کند. در عمل از اندازه‌گیرهای خطی با شیب زیاد و با مشخصه‌ای که از مبدأ عبور نموده و با ثبات باشد، استفاده می‌کنیم مانند اندازه‌گیر (D) در شکل (۳-۱).

حد تفکیک (resolution)

حد تفکیک عبارت است از کوچکترین اندازه تغییرات کمیت مورد نظر که می‌تواند توسط عنصر اندازه‌گیر، اندازه‌گیری شود. بعنوان مثال شکل ۳-۲ که یک اندازه‌گیر وضعیت (جابجائی) مقاومتی است را در نظر بگیرید:

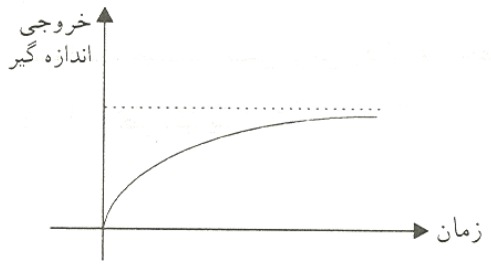


شکل ۳-۲ بیان حد تفکیک در اندازه‌گیر وضعیت مقاومتی

اگر فاصله سیم‌بندی رئوستا Δ^{mm} باشد، بنابراین سر وسط رئستا قادر به اندازه‌گیری جابجائی‌های کوچکتر از Δ^{mm} نمی باشد، یعنی حد تفکیک در این اندازه‌گیر Δ میلیمتر می‌باشد.

پاسخ دهی (response)

یک اندازه‌گیر خوب باید کمیت مورد اندازه‌گیری را به سرعت اندازه‌گیری نماید اما در عمل اندازه‌گیرها دارای ثابت زمانی و بعضاً تأخیر خالص می‌باشند. اگر اندازه‌گیر دارای یک ثابت زمانی باشد و کمیت مورد اندازه‌گیری بصورت پله واحد تغییر کند، شکل کلی تغییرات خروجی مطابق شکل (۳-۳)خواهد بود:

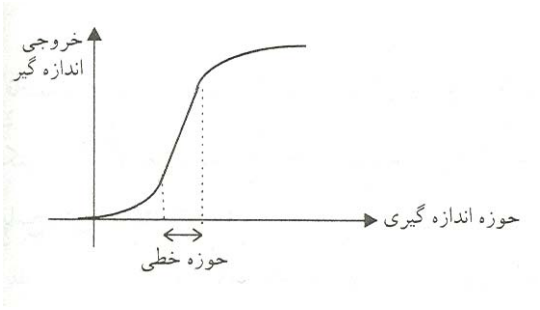


شکل (۳-۳) بیان پاسخ دهی اندازه‌گیربا ثابت زمانی

مشاهده می‌شود مدتی طول می‌کشد تا خروجی اندازه‌گیر به مقدار پایدار و نهائی خود برسد بنابراین اندازه‌گیر قادر به دنبال کردن و اندازه‌گیری تغییرات سریع کمیت مورد نظر نخواهد بود. ثابت زمانی عنصر اندازه‌گیر باید از کوچکترین ثابت زمانی موجود در حلقه کنترل بسیار بزرگتر از ثابت زمانی اندازه‌گیر است بنابراین مشکلی ایجاد نمی شود، اما به هر حال هنگام استفاده از یک اندازه‌گیر می‌بایست به ثابت زمانی و احتمالاً تأخیر خالص در آن توجه نموده واثر احتمالی آنها را در پایداری و رفتار حلقه کنترل منظور داشت.

خطی بودن (Linearity)

خطی بودن اندازه‌گیر به معنی ثابت بودن شیب مشخصه ورودی – خروجی آن می‌باشد. همانطور که قبلاً نیز گفتیم غالباً مایل به استفاده از اندازه‌گیرهائی با مشخصه خطی می‌باشیم اما در عمل اکثر اندازه‌گیرها در تمام محدوده حوزه اندازه‌گیری خود مشخصه خطی ندارند در این صورت حوزه اندازه‌گیری مطلوب مطابق شکل (۳-٤) به فاصله‌ای که مشخصه اندازه‌گیر خطی است، محدود می‌گردد.

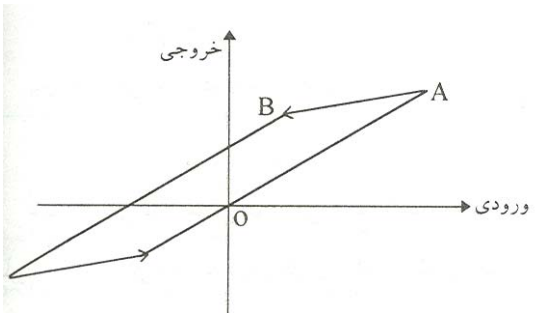


شکل (۳-۴). مشخصه اندازه‌گیر غیر خطی

گاهی اوقات بهترین خطی که مشخصه اندازه‌گیر را بیان می‌کند بعنوان مشخصه اندازه‌گیر، در نظر گرفته می‌شود.

پسماند (Hysteresis)

پسماند یا هیسترزیس نوعی رفتار غیرخطی در اندازه‌گیرها است، برای روشن‌تر شدن مطلب شکل (۳-۵) را در نظر بگیرید:



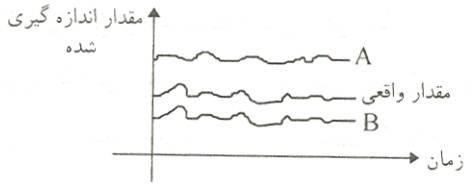
شکل (۳-۵) پدیده پسماند در اندازه‌گیر

ابتدا هنگامی که ورودی از صفر شروع به افزایش می‌کند. مشخصه اندازه‌گیر روی خط OA می‌باشد و بعد از رسیدن به نقطه A (حوزه اندازه‌گیری) هنگامی که ورودی مجدداً شروع

به کاهش می‌کند، مشخصه بـه روی خـط AB خواهـد بـود، مشـاهده مـی‌گـردد کـه مشخصـه اندازه‌گیر در مسیر افزایش ورودی با مشخصه اندازه‌گیر در مسیر کاهش ورودی تفاوت دارد. این پدیده را پسماند گوئیم.

دقت (Accuracy)

دقت به معنی تطابق مقدار انـدازه‌گیـری شـده بـا مقـدار واقعـی کمیـت مـورد انـدازه‌گیـری می‌باشد. برای روشن تر شدن مطلب شکل (۳-٦) را در نظر بگیرید:



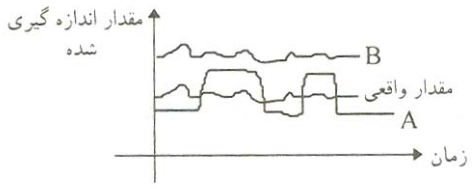
شکل (۳-۶) مقایسه دقت در دو اندازه‌گیر

در این شکل اندازه‌گیرB دقیق تر از اندازه‌گیرA است چرا که اندازه‌گیری آن با مقدار واقعی کمیت مورد اندازه‌گیری نزدیکتر است.

دقت اندازه‌گیر را معمولاً بر حسب درصد خطا در تمام محدوده اندازه‌گیری بیـان مـی‌کننـد، مثلاً اندازه‌گیری که محدوده کار آن ۱۰۰ واحد است و در اندازه‌گیـری ۱۰۰ واحـد حـداکثر یـک واحد خطا دارد. دقت آن 1±% می‌باشد. بدیهی است کاربرد اندازه‌گیرهایی با دقـت بیشـتر و یـا خطای کمتر معمولاً در امر کنترل دقت بیشتری را فراهم می‌آورد.

تکرار پذیری

تکرار پذیری در اندازه‌گیرها ویژگی مهمی است و به معنی نتیجه یکسان در اندازه‌گیری یک کمیت در شرایط ثابت می‌باشد. شکل ۳-۷ را در نظر بگیرید:



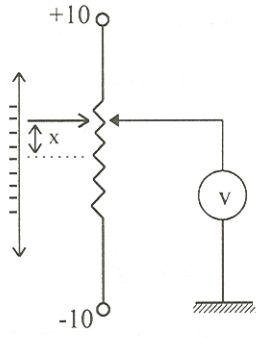
شکل (۳-۷) مقایسه تکرار پذیری در دو اندازه‌گیر

اندازه گیر B اندازه‌گیری تکرار پذیر است چرا که با گذشت زمان خطای اندازه‌گیری تقریبـاً ثابت بوده و اندازه‌گیر، یکسان عمل می‌نماید. اما اندازه‌گیر A تکرارپذیر نیست چرا که هـر چنـد

خطای آن از اندازه‌گیر B بسیار کمتر است و کمیت مورد اندازه‌گیری را با دقت بیشتری نشان می‌دهد، اما عملکرد آن با گذشت زمان تغییر می‌کند و یک کمیت را در زمان‌های مختلف با دقت‌های مختلف اندازه‌گیری می‌نماید. در طرح حلقه‌های کنترل، تکرارپذیری اهمیت بیشتری نسبت به دقت دارد، چرا که یک اندازه‌گیر تکرارپذیر و غیر دقیق را می‌توان به راحتی اصلاح نمود اما یک اندازه‌گیر غیر تکرار پذیر هر چند هم دقت بیشتری داشته باشد، بدلیل تغییرات رفتار، مشکلاتی را به وجود خواهد آورد.

۳-۳ طراحی و ساخت اندازه‌گیرها

برای طراحی و ساخت یک اندازه‌گیردستورالعمل یا فرمول خاصی وجود ندارد و این کار بیشتر به ذوق و ابتکار سازنده مربوط می‌شود، معمولاً ابداع و اختراع یک اندازه‌گیر را با این سئوال آغاز می‌کنیم که چگونه می‌توان کمیتی مورد نظر را اندازه‌گیری کرد؟ آنگاه به جستجوی یک اصل فیزیکی می‌پردازیم تا از آن طریق کمیت مربوطه را اندازه‌گیری نمائیم، سپس به مشکلات عملی، و چگونگی استفاده از اجزاء و قطعات می‌پردازیم و نهایتاً با حل مشکلات عملی، اندازه‌گیری با ویژگی‌های مطلوب می‌سازیم. بعنوان مثال فرض کنید بخواهیم یک اندازه‌گیر جابجائی (وضعیت) بسازیم یک اصل فیزیکی می‌گوید: مقاومت الکتریکی یک جسم با طول آن متناسب است، پس اگر جابجائی مورد نظر موجب تغییر طول یک مقاومت الکتریکی شود آن مقاومت الکتریکی می‌تواند مبین جابجائی باشد. مقاومت الکتریکی را نیز می‌توان به یک کمیت الکتریکی دیگر مثلاً ولتاژ تبدیل نمود. طرح پیشنهادی می‌تواند مطابق شکل ۳-۸ باشد:



شکل (۳-۸). اندازه‌گیر وضعیت مقاومتی

در این طرح جابجائی سر وسط پتانسیومتر می‌گردد و جابجائی سر وسط نیز ولتاژی متناسب با آن تولید می‌کند، این ولتاژ مبین کمیت مورد اندازه‌گیری (x) است و می‌تواند در

قسمت‌های بعدی حلقه کنترل مورد استفاده واقع شده و یا با مقیاس کردن یک ولتمتراز آن بعنوان نشان دهنده وضعیت استفاده شود.

تمرین: معایب این طرح را بیان نموده ویژگی‌های دهگانه‌ای که قبلاً گفتیم را در مورد آن بررسی نمائید.

در جدول (۳-۱) پاره‌ای از اصول فیزیکی که در ساخت اندازه‌گیرها مورد استفاده قرار می‌گیرند آمده است:

جدول (۳-۱) پاره‌ای از اصول فیزیکی مورد استفاده در ساخت اندازه‌گیرها

پاره‌ای از اصول مورد استفاده در ساخت اندازه‌گیری	
اصول کنترل انرژی	اصول تبدیل انرژی
مقاومت	الکترومغناطیس
اندکتانس	پیزو الکتریک
کاپاسیتانس	ترموالکتریک
تغییر مقاومت با تنش	فوتوالکتریک
تغییر مقاومت با دما	فوتوولتایک
تغییر مقاومت با نور	.....
مقاومت مغناطیسی	.....
اثر هال	.....
یونیزاسیون رادیواکتیو	
پرتو نگاری	
.....	

اکنون که با مسائل کلی اندازه‌گیرها آشنا شدیم، به معرفی و تشریح عملکرد تعدادی از اندازه‌گیرهای متداول و معمول در صنعت می‌پردازیم و بررسی‌های خود را بر حسب کیمت هائی که اندازه‌گیری می‌شوند ادامه می‌دهیم.

۳-۴ اندازه‌گیرهای وضعیت:

در صنعت یکی از کمیت هائی که زیاد با آن سروکار داریم، وضعیت یا جابجائی است. جایجائی ممکن است بصورت خطی (طول) و یا زاویه‌ای (زاویه) انجام شود، که به هر حال با کمیت فیزیکی طول یا زاویه سروکار داریم. دستگاه‌های کپی تراش، سیستم‌های کنترل ارتفاع

مخـازن، آنـتن‌هـای رادار و تلسـکوپ، روبـوت‌هـای صـنعتی و ... مـواردی از کاربردهـای اندازه‌گیرهای وضعیت می‌باشند. برای اندازه‌گیری وضعیت از اصول فیزیکی مختلف مـی‌تـوان استفاده نمود، که هرکدام مزایا، معایب و ویژگی‌های مربوط به خود را دارند.

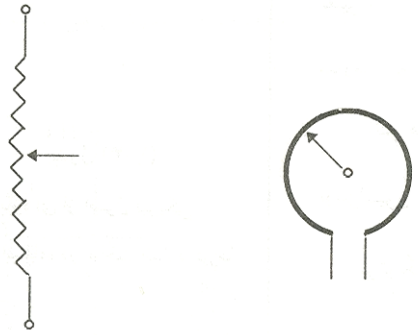
۳-٤-۱ اندازه‌گیرهای مقاومتی:

مقاومت الکتریکی یک جسم از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$R = \rho \frac{L}{A} \qquad (۱-۳)$$

در رابطه (۳-۱)، Lطول، Aمقطع و ρ مقاومت مخصوص جسم مـی‌باشـند. اگـر A و ρ ثابـت باشند، مقاومت متناسب با طول خواهد بود و بنابراین از آن می‌توان بعنوان یک اصـل فیزیکـی برای ساخت اندازه‌گیرهای وضعیت استفاده نمود.

سـاده‌ترین نوع اندازه‌گیرهای مقاومتی، اندازه‌گیرهای پتانسیومتری می‌باشـد. در شـکل (۳-۹) نمایش مداری دو نمونه اندازه‌گیر طول و زاویه آمده است.



شکل (۳-۹). اندازه‌گیر وضعیت مقاومتی

سر وسط پتانسومتر با جابجائی مورد نظر حرکت می‌کنـد بنـابراین مقـاومتی متناسـب بـا وضعیت خواهیم داشت.

همانطور که گفتیم اصل فیزیکـی مـورد اسـتفاده در انـدازه‌گیرهـای مقـاومتی رابطـه (۳-۱) می‌باشد، و بر حسب نیاز و مسـئله‌ای کـه بـا آن روبـرو هسـتیم، شـکل اسـتفاده از ایـن اصـل می‌تواند متفاوت باشد.

پتانسیومترها بصورت رئوستایی و یا فیبری ساخته می‌شوند. حد تفکیـک انـدازه‌گیـر نـوع اول به فاصله بین سیم بندی‌ها محدود می‌گردد و حد تفکیک نوع دوم نیز با توجه به پیوسـتگی مقاومت بسیار خوب است.

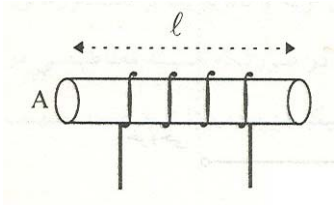
از مزایای اندازه‌گیرهای مقاومتی می‌توان به سادگی، ارزانی و سهولت کاربرد اشـاره کـرد و از معایب آنها نیز به اسـتهلاک مکـانیکی، محـدود بـودن حـوزه انـدازه‌گیـری و ایزولاسـیون ضعیف ورودی – خروجی اشاره نمود.

۳-٤-۲ اندازه‌گیرهای سلفی:

مشکل اساسی اندازه‌گیرهای مقاومتی استهلاک آنها است، چرا که لغزش سر وسط پتانسیومتر بر روی آن موجب اصطکاک و سایش می‌شود، بعلاوه لقی سر وسط ایجاد نویز و خطا در اندازه‌گیری می‌نماید، همچنین گرد و غبار و آلودگی هائی که در محیط‌های صنعتی وجود دارند نیز موجب کثیف شدن پتانسیومتر و انحراف مشخصات اولیه آن می‌شوند. عدم ایزولاسیون الکتریکی ورودی – خروجی نیز یکی از معایب عمده اندازه‌گیرهای مقاومتی است. در بسیاری از کاربردها برای رفع مشکلات فوق از اندازه‌گیرهای سلفی استفاده می‌کنیم.

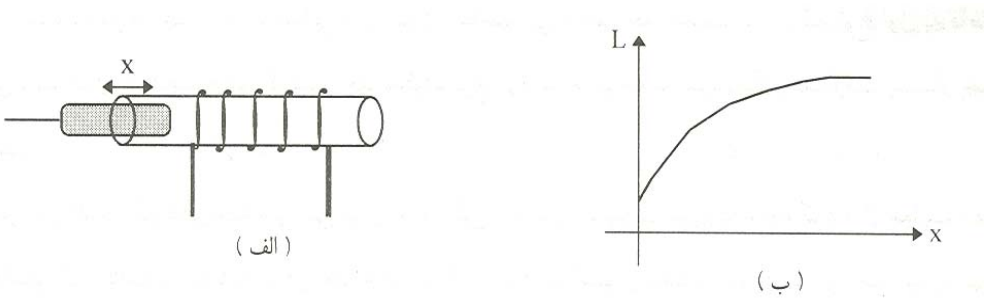
یک سیم‌پیچ یا سلف را مطابق شکل ۳-۱۰ در نظر بگیرید. ضریب خود القائی (L) این سیم‌پیچ برابر است با:

$$L = \mu \frac{N^2 . A}{l} \qquad (۲-۳)$$



شکل (۳-۱۰). اصل مورد استفاده در اندازه‌گیر وضعیت سلفی

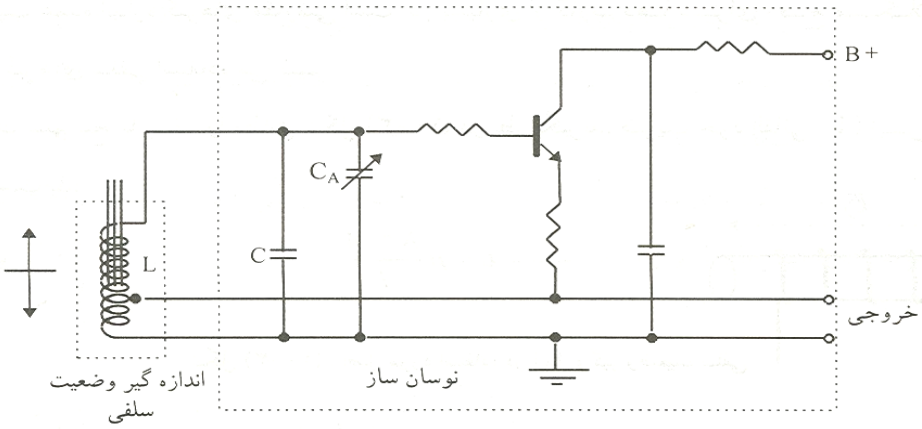
در رابطه (۳-۲)، A سطح مقطع، l طول، N تعداد دور سیم و μ ضریب نفوذ مغناطیسی هسته سیم‌پیچ می‌باشند، رابطه (۳-۲) اصل فیزیکی مورد استفاده در اندازه‌گیرهای سلفی می‌باشد. اگر جابجائی مورد اندازه‌گیری را به هسته سلف متصل کنیم بگونه‌ای که مطابق شکل (۳-۱۱-الف) موجب خارج یا وارد شدن هسته به داخل سیم‌پیچ گردد، آنگاه ضریب خودالقائی (L) که متناسب با μ است متناسب با جابجائی خواهد شد. در عمل شکل کلی تغییرات L با جابجائی مطابق شکل ۳-۱۱- ب است.



شکل (۳-۱۱). تغییرات خاصیت سلفی با موقعیت هسته

برای آشکار سازی L سیم‌پیچ را مطابق شکل ۳-۱۲ در مدار یک اسیلاتور قرار می‌دهیم تغییرات L موجب تغییرات فرکانس اسیلاتور می‌گردد، بنابراین در این گونه اندازه‌گیرها جابجائی معمولاً به فرکانس تبدیل می‌شود که در نتیجه ایمنی اندازه‌گیری نسبت به نویز نیز بیشتر می‌گردد.

از مزایای اندازه‌گیرهای سلفی می‌توان به کمی استهلاک، ایزولاسیون ورودی – خروجی و عدم حساسیت به گرد و غبار اشاره نمود و از معایب آن به محدود بودن حوزه اندازه‌گیری (renge)، گرانی قیمت و پیچیدگی مدارات جانبی اشاره کرد.



شکل (۳-۱۲) مدار آشکارساز اندازه‌گیر وضعیت سلفی

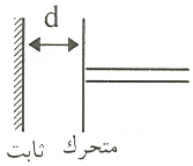
۳-٤-۳ اندازه‌گیرهای خازنی

با همان انگیزه هائی که اندازه‌گیرهای سلفی را پیشنهاد کردیم، می‌توانیم به معرفی اندازه‌گیرهای وضعیت خازنی بپردازیم. اصل فیزیکی مورد استفاده رابطه(۳-۳) می‌باشد:

$$C = \varepsilon \frac{A}{d} \qquad (۳-۳)$$

دراین رابطه ε ضریب دی الکتریک، A سطح جوشن ها، و d فاصله جوشن‌های

خازن از یکدیگر می‌باشند. با ثابت بودن ε و A، ظرفیت خازن متناسب (معکوس) با فاصله d خواهد بود.



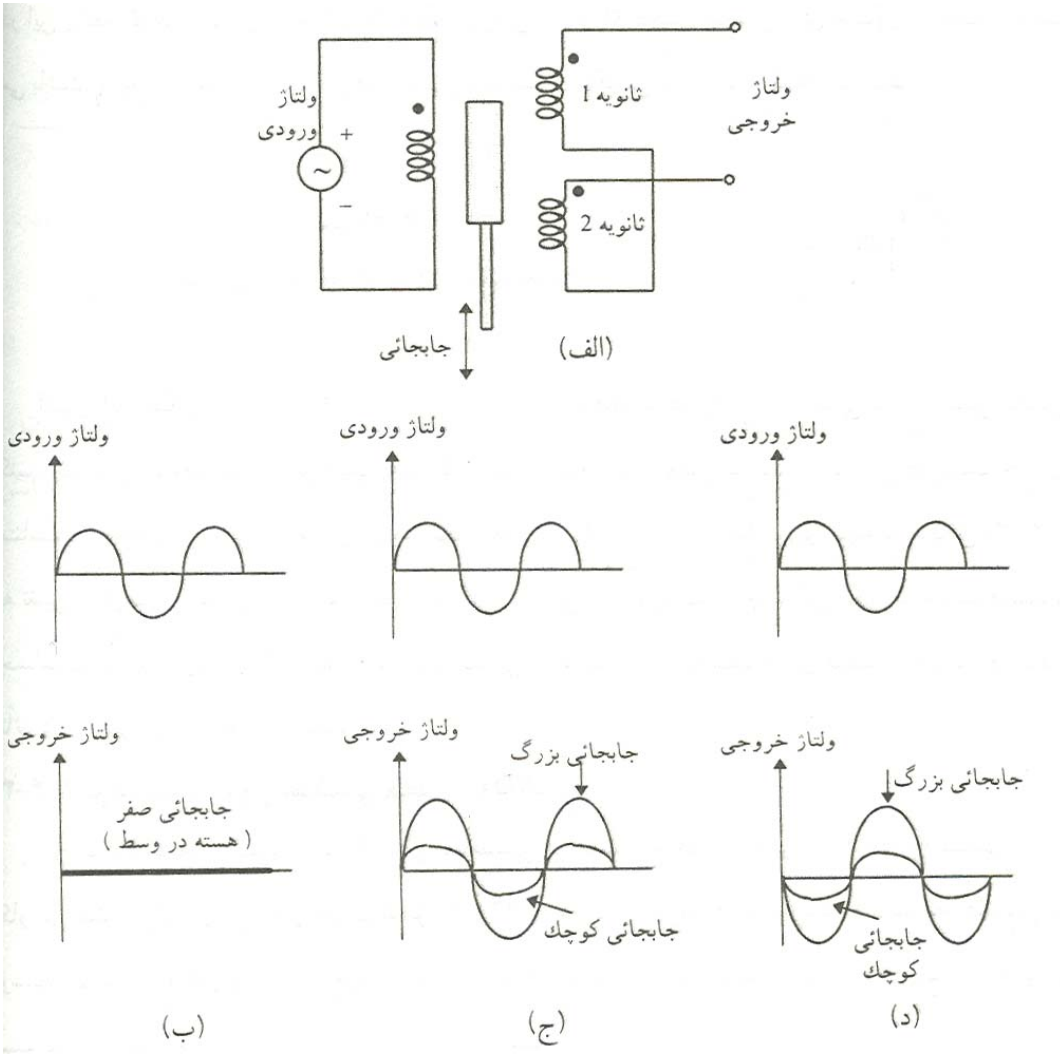
شکل (۳-۱۳) اصل مورد استفاده در اندازه‌گیر وضعیت خازنی

اکنون اگر مطابق شکل ۳-۱۳ یک صفحه را ثابت و صفحه دیگر را به جابجائی مورد نظر متصل کنیم جابجائی صفحه متحرک موجب تغییر d، و در نتیجه تغییر C می‌گردد و بنابراین ظرفیت خازن متناسب (معکوس) با جابجائی خواهد شد، تغییرات C را در مدار اسیلاتوری شبیه به شکل ۳-۱۲ به تغییرات فرکانس تبدیل می‌کنیم. اندازه‌گیرهای خازنی در اندازه‌گیری جابجائی‌های کوچک، دقت و حساسیت بهتری دارند، بعلاوه میدان‌های مغناطیسی که معمولاً در محیطهای صنعتی وجود دارند، تأثیری بر کار آنها نخواهند گذاشت.

۳-٤-٤ ترانسفورماتور تفاضلی خطی (LVDT):

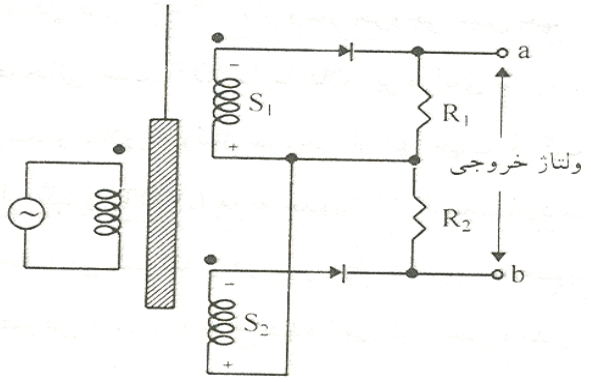
این اندازه‌گیرها بر اساس اصل کوپلاژ مغناطیسی بین سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه یک ترانسفورماتور کار می‌کنند. برای روشن شدن مطلب شکل ۳-۱٤ را در نظر بگیرید. در صورتیکه هسته مغناطیسی وسط باشد، کوپلاژ بین سیم‌پیچ‌های ثانویه ۱ و ۲ با سیم‌پیچ اولیه یکسان بوده و با توجه به جهت سیم‌بندی، ولتاژ خالص خروجی (V_0) صفر می‌باشد.

در صورتیکه هسته به سمت بالا حرکت کند دامنه ولتاژ در ثانویه ۱ بیشتر از ثانویه ۲ گردیده ولتاژ خروجی (V_o) مطابق شکل ۳-۱٤- ج می‌گردد، و اگر هسته به سمت پائین حرکت کند، دامنه ولتاژ القائی در ثانویه ۲ بیشتر از ثانویه ۱می گردد و ولتاژ خروجی مطابق شکل۳-۱٤-د می‌شود. با توجه به شکل‌های ۳-۱٤ فاز ولتاژ خروجی مبین جهت جابجائی (بالا یا پایین) و دامنه آن مبین اندازه جابجائی است LVDTها علاوه بر مزایای اندازه‌گیرهای سلفی به مدارت جانبی ساده‌تر و ارزانتری نیاز دایند و پلاریته ولتاژ خروجی از آنها جهت حرکت نسبت به وضعیت صفر را مشخص می‌کند. حوزه اندازه‌گیری LVDTها به حدود $\pm ۲^{cm}$ محدود می‌گردد. LVDTها بسیار محکم و با استقامت ساخته می‌شوند و در شرایط سخت به خوبی کار می‌کنند، با استفاده از مکانیزم‌های مخصوص (اهرم یا چرخ دنده) می‌توان حوزه اندازه‌گیری LVDT را افزایش داد.



شکل (۳-۱۴) شکل موج‌های ورودی – خروجی یک LVDT

مطابق شکل ۳-۱۵ با استفاده از چند دیود یکسوساز می‌توان LVDT با ولتاژ خروجی مستقیم ساخت، بررسی عملکرد این مدار را به خوانند علاقمند واگذار می‌کنیم.

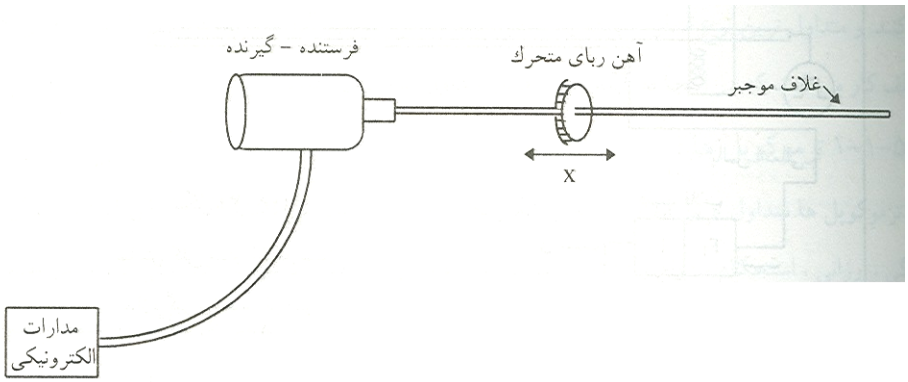


شکل (۳-۱۵) اندازه‌گیر وضعیت LVDT با خروجی dc

نقطه ضعف LVDTها همچون اندازه‌گیرهای سلفی، حساسیت آنها به میدان‌های مغناطیسی است که موجب محدودیت در کاربرد آنها می‌شود.

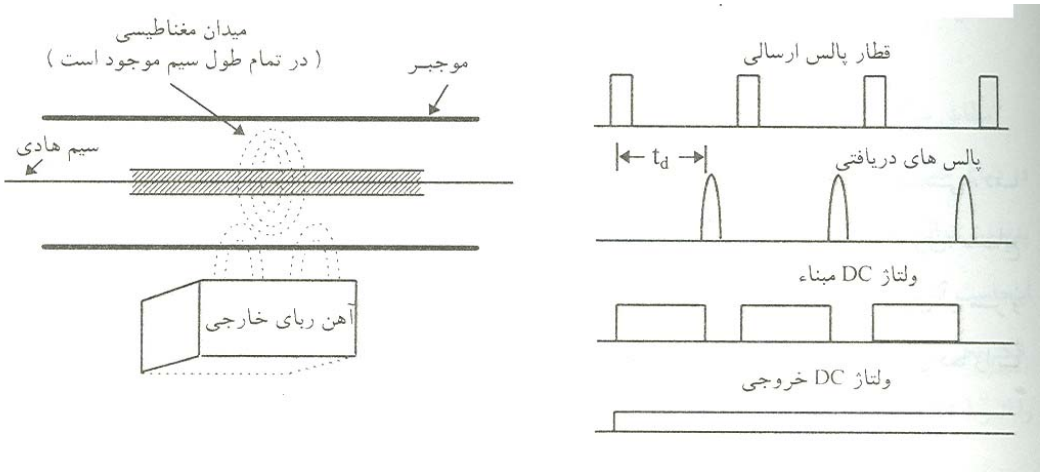
۳-٤-٥ اندازه‌گیر وضعیت آلترسونیک:

اندازه‌گیرهای فراصوتی (ultrasonic) کاربردهای فراوانی در صنعت دارند. در این جا به شرح عملکرد یک اندازه‌گیر جابجائی فراصوتی، ساخت کمپانی BALLUFF می‌پردازیم. طرح کلی این اندازه‌گیر مطابق شکل ۳-۱٦ می‌باشد.



شکل (۳-۱۶) اندازه‌گیر وضعیت فراصوتی (کمپانی BALLUFF)

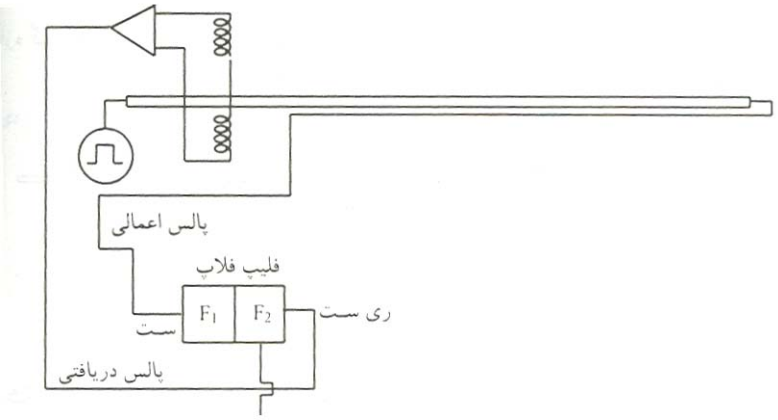
داخل غلاف موجبر مطابق شکل ۳-۱۷- الف یک سیم هادی به ضخامت ۰/۰۵ میلیمتر که خود داخل لوله‌ای توخالی به قطر ۰/۵۵ میلیمتر قرار گرفته وجود دارد. لوله از آلیاژهای مخصوص ساخته شده و طوری پرداخت گردیده که خاصیت ارتجاعی آن تا حد زیادی مستقل از درجه حرارت است و با گذشت زمان تغییر نمی کند. مواد تضعیف کننده امواج صوتی در اطراف لوله پر شده‌اند تا از انعکاس امواج و اثر نویزهای خارجی جلوگیری نمایند.



شکل (۳-۱۷) ساختمان داخلی اندازه‌گیر وضعیت فراصوتی

قطاری از پالس‌های الکتریکی مطابق شکل ۳-۱۷- ب در طول سیم هادی ارسال می‌گردند. عبور جریان الکتریکی از سیم موجب ایجاد میدان مغناطیسی شکل ۳-۱۷- الف در اطراف آن می‌شود. برخورد این میدان با میدان ناشی از آهن‌ربای متحرک، ایجاد تنش چرخش می‌نماید که در طول موجبر با سرعت فراصوتی منتقل می‌شود. پالس‌های تنش توسط سیم‌پیچ‌های حساس مطابق شکل (۳-۱۸) احساس می‌شوند. با اندازه‌گیری زمان بین ارسال پالس الکتریکی و دریافت پالس مکانیکی، موقعیت آهن‌ربا نسبت به انتهای لوله مشخص می‌شود. این موقعیت با استفاده از مدارات الکترونیکی تبدیل به ولتاژی dc می‌گردد. (شکل ۳-۱۷- ب)

این اندازه‌گیرها با طول‌های مختلف و تا حدود ۱۰ متر نیز ساخته می‌شوند و از دقت و سرعت خوبی برخوردارند و حد تفکیک آنها حدود ۰/۱ میلیمتر می‌باشد.



شکل (۳-۱۸) نمایش کلی مدار آشکارساز اندازه‌گیر وضعیت فراصوتی

۳-۵ اندازه‌گیرهای دما:

شاید دما اولین کمیتی باشد که انسان به کنترل آن فکر کرده است. دراکثر محیط‌های صنعتی، دما یکی از کمیت هائی است که مایل به کنترل یا اندازه‌گیری آن می باشیم. صنایع فولاد و ریخته‌گری، صنایع غذائی و شیمیایی، صنایع نساجی و سیمان و ... همگی بگونه‌ای با دما و کنترل و اندازه‌گیری آن سروکار دارند. با توجه به اهمیت کنترل و اندازه‌گیری دما در صنایع مختلف، در اینجا اندازه‌گیرهای دما را با جزئیات بیشتری مورد بررسی قرار می‌دهیم.

اندازه‌گیرهای دما را می‌توان به سه دسته کلی تقسیم بندی کرد:

اندازه‌گیرهای الکتریکی دما

اندازه‌گیرهای مکانیکی دما

اندازه‌گیرهای تشعشعی دما

۳-۵-۱ اندازه‌گیرهای الکتریکی دما:

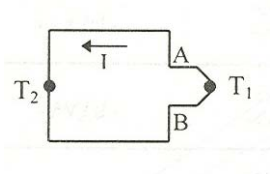
اندازه‌گیرهای الکتریکی دما آنهائی هستند که دما را به گونه‌ای تبدیل به کمیتی الکتریکی می‌کنند. و متداول‌ترین نوع اندازه‌گیرهای دما می‌باشند، این اندازه‌گیرها، بر اساس اصول فیزیکی مختلف کار می‌کنند که در اینجا به کلیه نمونه‌های متداول اشاره می‌کنیم:

۳-۵-۱-۱ ترموکوپل ها:

ترموکوپل‌ها متداول ترین اندازه‌گیرهای الکتریکی دما در صنعت می‌باشند. از مزایای آنها می‌توان به سادگی، ارزانی، استحکام، دوام و دقت مناسب اشاره نمود. از ترموکوپل‌ها می‌توان در حوزه اندازه‌گیری نسبتاً وسیع (۱۵۰۰+ تا ۲۰۰- درجه سانتیگراد) و شرایط محیطی گوناگون استفاده نمود.

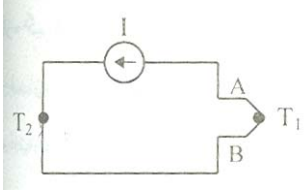
ترموکوپل‌ها دارای سرعت پاسخ دهی نسبتاً خوب (ثابت زمانی کوچک) می‌باشند اما بلحاظ رعایت مواردی در محل نصب آنها، این سرعت پاسخ دهی تا حد زیادی کاهش می‌یابد.

ترموکوپل‌ها بر اساس پدیده ترموالکتریک (seeback-effect) کار می‌کنند.



شکل (۳-۱۹) نمایش کلی ترموکوپل (پدیده ترموالکتریک)

مطابق شکل ۳-۱۹ هر گاه دو فلز غیر یکسان تشکیل یک مدار بسته دهند و دو محل اتصال آنها در دو دمای متفاوت نگه داشته شود، جریان الکتریکی در مدار ایجاد می‌شود. این اثر را اثر seeback پدیدهٔ ترموالکتریک گویند. دمای T_1 را دمای اندازه‌گیری و دمای T_2 را دمای مبنا گوئیم. نکته جالب اینجاست که عکس این پدیده نیز امکان‌پذیر است، یعنی اگر در مداری مطابق شکل (۳-۲۰) جریان الکتریکی ثابت I را برقرار کنیم دماهای متفاوتی در محل‌های اتصال مشاهده خواهیم کرد. این پدیده را اثر (peltier) می‌گویند.



شکل (۳-۲۰) مشاهده دماهای متفاوت در محل اتصال دو فلز مختلف (پدیده peltier)

یک ترموکوپل مطابق شکل ۳-۱۹ از اتصال دو فلز غیر یکسان تشکیل شده است. این اتصال در محلی که مایل به اندازه‌گیری دمای آن T_1 هستیم قرار داده می‌شود، اتصال مبنا T_2 را نیز معمولاً در دمای صفر قرار می‌دهیم که در این حالت جریان الکتریکی یا ولتاژ ایجاد شده مستقیماً متناسب با دمای مورد اندازه‌گیری T_1 می‌باشد.

جدول (۳-۲) اسامی و مشخصات ترموکوپل‌ها بر اساس استاندارد ISA

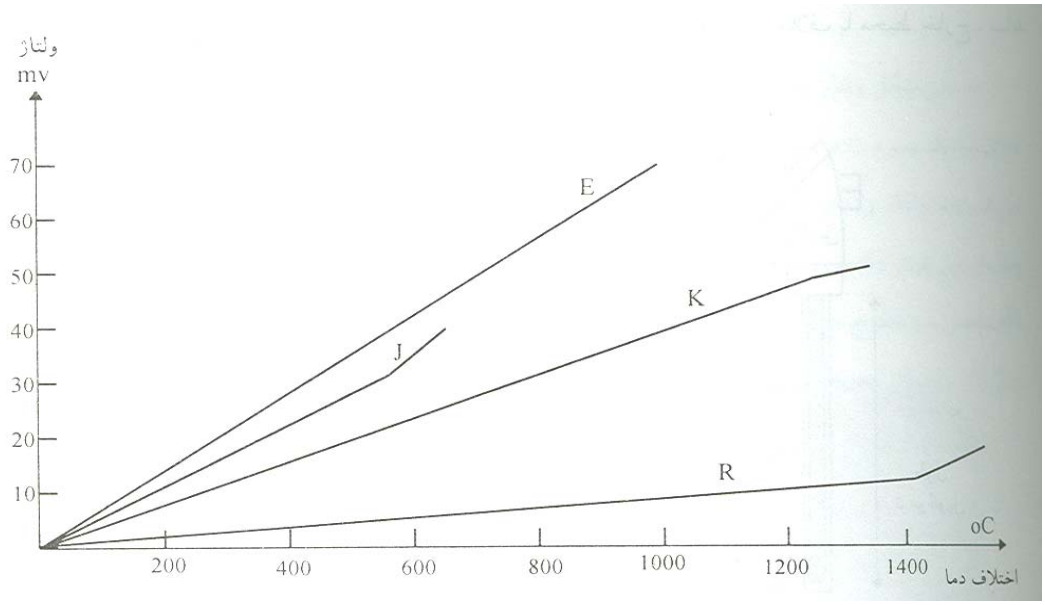
نام ترموکوپل	سیم مثبت (P) سیم منفی (N)	جنس فلز	°c حوزه اندازه‌گیری
B	BP BN	روبیدیوم ۳۰٪ – پالتین روبیدیوم ٦٪ – پلاتین	۱۸۰۰ تا ۰
E	EP EN	کروم – نیکل مس – نیکل	۱۰۰۰ تا ۱۹۰-
J	JP JN	آهن مس – نیکل	۱۰۰۰ تا ۰
K	KP KN	کروم – نیکل سیلیکن – آلومینیوم- نیکل	۱۲۰۰ تا ۰
R	RP RN	روبیدیوم ۱۳٪ – پلاتین پلاتین	۱۷۹۰ تا ۰
S	SP SN	روبیدیوم ۱۰٪ – پلاتین پلاتین	۱۷۹۰ تا ۰
T	TP TN	مس مس – نیکل	۳۸۰ تا ۱۹۰-

در کاربردهای دیگر، ترموکوپل را مستقیماً توسط سیم‌های رابط به دستگاه اندازه‌گیری متصل می‌نمایند. در این حالت دمای مبنا T_2 همان دمای محیط یعنی دمای محل اتصال سیم‌های رابط به دستگاه اندازه‌گیری می‌باشد. در چنین مواردی اندازه‌گیری می‌بایستی بر اساس دمای محیط مقیاس شود و در صورتیکه تغییرات آن زیاد باشد، مدارهائی جهت حذف اثر تغییرات دمای محیط در نظر گرفته شود. ترموکوپل‌ها بر حسب دو فلز تشکیل دهنده آنها نامگذاری می‌شوند. مثلاً ترموکوپل Copper/Constantant، یعنی ترموکوپلی که از دوفلز مس و

کنستانتانت تشکیل شده با این قرار داد که هرگاه دمای اندازه‌گیری T_1 بیشتر از دمـای مرجـع T_2 باشد، فلز سمت چپ دارای ولتاژ مثبت نسبت به فلز سمت راسـت خواهـد بـود. در صـنعت ترموکوپل‌ها با نام‌های اختصاری استاندارد مطـابق جـدول (۳-۲) شـناخته مـی‌شـوند. بعضـی سازندگان فلزات تشکیل دهنده ترموکوپل را با نام‌هـای تجـاری معرفـی مـی‌کننـد. مـثلاً بجـای Copper nickel از نام Constantan و بجای Nickel chromium از نام Chromel و بجـای Nickel aluminium silicon از نام Alumel استفاده می‌شود.

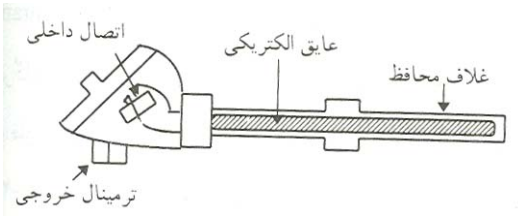
ترموکوپل‌های با فلزات پایه (Base) یعنی E, K, T, J برای اندازه‌گیری دمـای کمتـر از ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد مناسـب مـی‌باشـند. بـرای انـدازه‌گیـری دمـا تـا حـدود ۲۰۰۰ درجـه نیـز از ترموکوپل هائی با فلـزات اصـیل (Nobel) و دیرگـداز (Refratory) یعنـی نـوع S و R اسـتفاده می‌کنیم.

در شکل (۳-۲۱) مشخصه ولتاژ بر حسب اختلاف درجه حرارت اتصال گرم با سرد، بـرای چند نمونه ترموکوپل آورده شده است.



شکل (۳-۲۱). مشخصه چند ترموکوپل

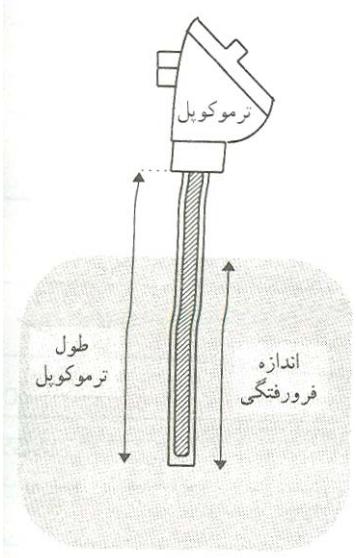
برای جلوگیری از خوردگی و آلودگی که منجر به تغییر مشخصات ترموکوپل و اخـلال در کار آن می‌شود و همچنین حفاظت مکانیکی آن، معمولاً ترموکوپل را در یک غلاف محافظ قـرار می‌دهند که مجموعه حاصل مطابق شکل (۳-۲۲) می‌باشد.



شکل (۳-۲۲) شکل ظاهری ترموکوپل

این غلاف همچنین امکان نصب ترموکوپل در محل مورد نظر را فراهم می‌آورد. معمولاً جنس غلاف متناسب با دمای محیطی است که توموکوپل در آن نصب می‌گردد. همانطور که قبلاً نیز گفتیم متأسفانه استفاده از غلاف محافظ موجب افزایش ثابت زمانی ترموکوپل می‌گردد.

محل و چگونگی نصب ترموکوپل دارای اهمیت فراوانی است چرا که نقاط مختلف و حتی نزدیک به هم در یک پروسه ممکن است دماهای مختلف داشته باشند، بنابراین باید توجه نمود که ترموکوپل در محلی نصب گردد که نقطه اندازه‌گیری منطبق بر نقطه اتصال دو فلز در توموکوپل شود. نحوه نصب ترموکوپل بر حسب پروسه مورد نظر می‌تواند متفاوت باشد، اگر مطابق شکل (۳-۲۳) بخواهیم دمای یک ماده ثابت و ساکن را اندازه‌گیری کنیم برای جلوگیری از خطای ناشی از تبادل حرارتی غلاف با محیط خارج، باید اندازه فرورفتگی غلاف در ماده حداقل ۱۰ برابر قطر غلاف باشد.



شکل (۳-۲۳). طریقه نصب صحیح ترموکوپل

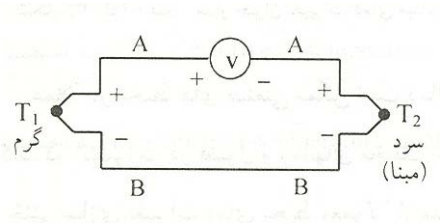
در حالتی که ماده مورد نظر در حال حرکت است ترموکوپل باید در محلی نصب گردد که دارای بیشترین سرعت حرکت ماده باشد در این صورت تبادل حرارتی سریع بوده و اندازه‌گیری دقت و سرعت بیشتری دارد.

اگر سرعت ماده خیلی کم باشد بهتراست از دمنده برای افزایش سرعت تبادل حرارت بین ماده و ترموکوپل استفاده کنیم، در پروسه هائی با دمای خیلی بالا مثل کوره ها، بهتر است ترموکوپل را بطور عمودی از سقف نصب کنیم چرا که نصب افقی موجب خمیدگی ترموکوپل می‌شود.

مشخصات ترموکوپل ها، بخصوص آنهائی که در دمای بالا و شرایط سخت کارمی کنند ممکن است به مرور زمان تغییر کند، بنابراین لازم است هر چند وقت یکبار، صحت عملکرد آنها بررسی و در صورت نیاز تنظیمات جدید انجام گردد.

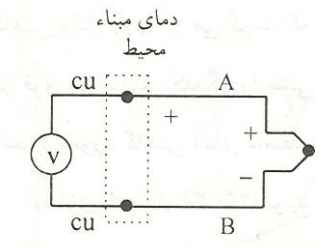
تصحیح تغییرات دمای محیط:

یک سیستم اندازه‌گیر دمای ترموکوپلی بطور ساده مطابق شکل ۳-۲٤ می‌باشد:



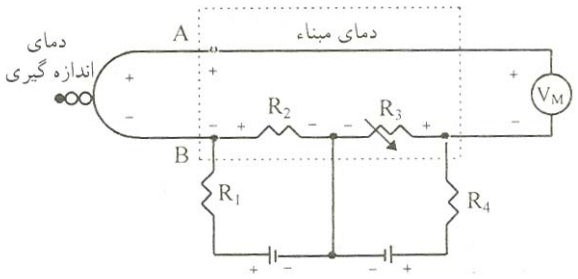
شکل (۳-۲۴) طرح کلی اندازه‌گیری دما با ترموکوپل

در این شکل ولتاژ متناسب با اختلاف دمای محیط گرم با محیط سرد می‌باشد همانطور که گفتیم دمای محیط سرد را معمولاً بعنوان مبناء انتخاب نموده و برابر صفر درجه سانتیگراد قرار می‌دهیم، در این صورت ولتاژ ولتمتر متناسب با دمای محیط گرم (محیط اندازه‌گیری) خواهد بود و با مقیاس مناسب می‌توان ولتمتر را مستقیماً به ترمومتر تبدیل نمود. در این طرح، مسئله تهیه دمای مبنا و ثابت نگه داشتن آن مطرح می‌شود. در طرح‌های ساده‌تر و متداول معمولاً دمای مبنا را حذف و یا به عبارت دیگر آن را دمای محیط در نظر می‌گیرند. این طرح مطابق شکل ۳-۲۵- الف می‌باشد.



شکل (۳-۲۵- الف) اندازه‌گیری دما با ترموکوپل و دمای مبنا محیط

در واقع فلز A و B در محیط مبنا از طریق سیم‌های ارتباطی (مسی) به یکدیگر متصل می‌گردند. در اینجا دمای مبناء، دمای محیطی است که در آن ترمینال‌های ترموکوپل به سیم‌های ارتباطی (معمولاً مسی) متصل گردیده‌اند. اگر دمای محیط ثابت باشد، در شکل ۳-۲۵- الف نیز مانند شکل ۳-۲٤ می‌توان ولتمتر را با رعایت مقیاس به ترمومتر تبدیل نمود. اما اگر دمای محیط تغییر کند، دیگر ولتمتر دما را به درستی نشان نخواهد داد.



شکل (۳-۲۵-ب) مدار جبران تغییرات دمای مبناء

عملاً در محیطهای صنعتی ممکن است دمای محیط از $15\ ^{\circ}c$ در زمستان تا $30^{\circ}c$ در تابستان تغییر کند در این صورت در فصول و زمان‌های مختلف اندازه‌گیری با خطاهای متغیر توأم خواهد بود. برای جبران و خنثی سازی تغییرات دمای محیط معمولاً از مدار ساده‌ای مطابق شکل ۳-۲۵- ب استفاده می‌کنیم. در این مدار تقسیم ولتاژ بین چهار مقاومت R_1 الی R_4 بگونه‌ای است که افت ولتاژ در مقاومت‌های R_2 و R_3 در جهت نشان داده شده با یکدیگر برابر است. بنابراین در شرایط عادی ولتمتر مانند شکل ۳-۲٤ می‌تواند بعنوان تومومتر مقیاس شود، R_3 یک مقاومت متغیر با دما و شیب منفی است یعنی با افزایش دمای محیط مقدار آن کاهش و با کاهش دمای محیط مقدار آن افزایش می‌یابد. اکنون اگر دمای محیط افزایش یابد بدون در نظر گرفتن اثر مدار جبران ساز، ولتمتر می‌خواهد عددی کمتر را نشان دهد چرا که اختلاف دمای محیط گرم و سرد کمتر شده است اما افزایش دمای محیط موجب کاهش R_3 و در نتیجه کاهش ولتاژ روی آن می‌گردد که در این صورت ولتمتر می‌خواه عددی بیشتر را نشان دهد بنابراین دو اثر فوق می‌توانند یکدیگر را خنثی نموده و ولتمتر عدد ثابتی که همان دمای اتصال گرم T_1 باشد را نشان دهد. در مورد کاهش دمای محیط نیز بطور مشابه می‌توان استدلال نمود.

ولتاژی که مدار ۳-۲۵ تولید می‌کند ولتاژ dc کوچکی است که مبین کمیت اندازه‌گیری شده (دما) می‌باشد. این ولتاژ قبل از انتقال و ارسال به قسمت‌های بعدی حلقه کنترل می‌باید تقویت

شود. تقویت سیگنال‌های توموکوپلی معمولاً بصورت ac و توسط مدارهای چاپر صورت می‌پذیرد.

۳-۵-۱-۲ اندازه‌گیرهای دما، مقاومتی:

نوع دیگری از اندازه‌گیرهای الکتریکی دما، اندازه‌گیرهای مقاومتی می‌باشند. این اندازه‌گیرها تغییرات درجه حرارت را به تغییرات مقاومت الکتریکی تبدیل می‌کنند. اصل فیزیکی مورد استفاده در این اندازه‌گیرها رابطه زیر است:

$$R = \rho \frac{L}{A} \qquad (٤-٣)$$

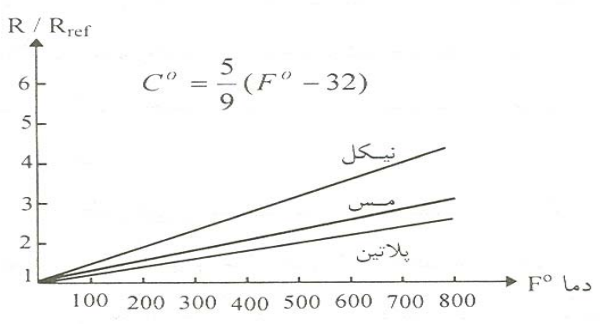
در این رابطه L طول جسم، A سطح مقطع آن و ρ مقاومت مخصوص آن است ρ به ویژگی‌های ذاتی جسم و دمای آن بستگی دارد بنابراین با ثابت بودن سایر پارامترها در صورتی که دمای جسم تغییر کند مقاومت الکتریکی آن تغییر خواهد کرد. اندازه‌گیرهای مقاومتی را به دو دسته تقسیم بندی می‌کنیم:

۱. اندازه‌گیرهائی با ضریب حرارتی مثبت (Positve-temperature coefficient) یا به اختصار PTC
۲. اندازه‌گیرهائی با ضریب حرارتی منفی (Negative-temperature cofficient) یا به اختصار NTC.

مقاومت الکتریکی PTCها با افزایش دما افزایش و با کاهش آن کاهش می‌یابد.
مقاومت الکتریکی NTCها با افزایش دما کاهش و با کاهش آن افزایش می‌یابد.

:PYC

فلزات اساساً عناصر PTC هستند. در شکل (۳-۲۶) مشخصه مقاومت چند فلز معروف نسبت به درجه حرارت آمده است، توجه نمائید که در این شکل محور عمودی نسبت مقدار مقاومت در دمای مورد نظر به مقدارمقاومت در صفر درجه فارنهایت می‌باشد.



شکل (۳-۲۶). مشخصه چند اندازه‌گیر دمای PTC

همانطور که شکل ۳-۲۶ نشان می‌دهد این مشخصه‌ها چندان خطی نیستند و شیب قابل توجه‌ای نیز ندارند، در جدول (۳-۳) مشخصات دقیق‌تر این فلزات آمده است.

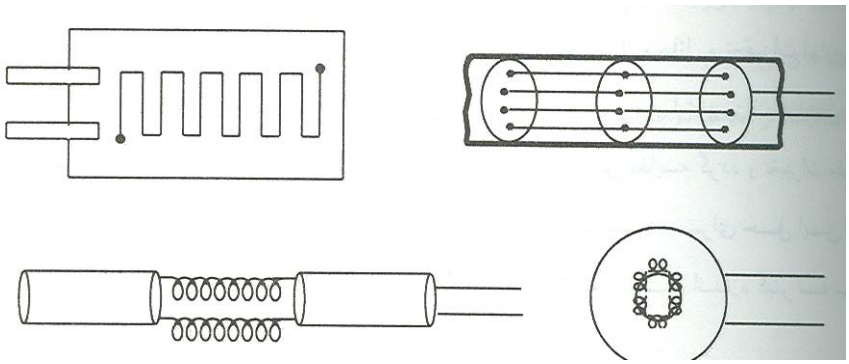
پلاتینیم متداول ترین فلزی است که برای ساخت PTCها استفاده می‌شود، مس هر چند مشخصه‌ای نسبتاً خطی دارد، حوزه اندازه‌گیری آن کمتر از پلاتینیم است. شیب مشخصه نیکل بیشتر از پلاتینیم است اما مشخصه آن برای دماهای بیش از ٤٠٠ به شدت غیر خطی است.

جدول (۳-۳) مشخصه مقاومت الکتریکی چند فلز معروف

	پلاتین	مس	نیکل	تنگستن
ضریب تغییر مقاومت Ω/Ω_0 c°	۰/۰۰۳۸۵	۰/۰۰٤۲	۰/۰۰٦۷	۰/۰۰٤٥
مقاومت مخصوص (Ωcm)	$۹/۸۱\times۱۰^{-٦}$	$۱/٥۲\times۱۰^{-٦}$	$٥/۹۱\times۱۰^{-٦}$	$٤/۹۹\times۱۰^{-٦}$
خطی بودن	خوب	خوب	ضعیف	ضعیف
حوزه اندازه‌گیری مفید c°	۲٦۰- تا ۸۰۰	۲٦۰- تا ۸۰۰	۱۰۰- تا ۱٥۰	۷۰- تا ۲۷۰۰

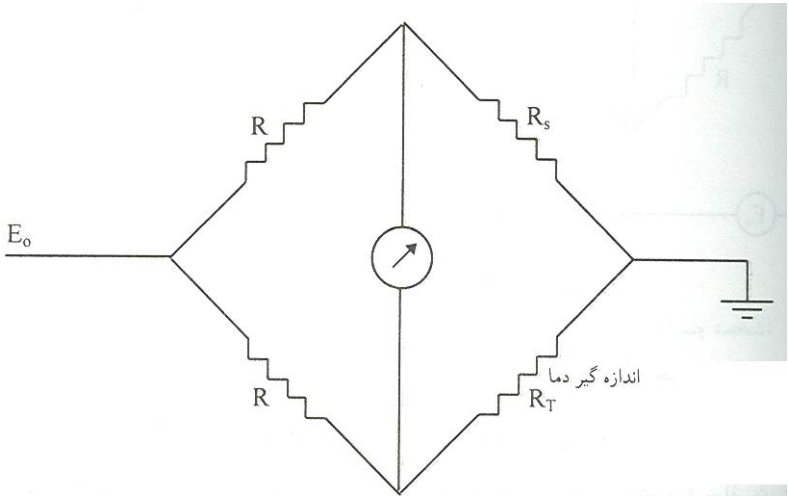
از تنگستن می‌توان برای اندازه‌گیری دماهای خیلی بالا استفاده نمود اما متأسفانه به دلیل مشکلات ساخت و ناپایداری ویژگی‌های آن، کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

فلزات اساساً مقاومت الکتریکی کمی دارند بنابراین برای آشکار سازی تغییرات مقاومت الکتریکی می‌باید اندازه مقاومت فلز در دمای صفر نسبتاً بزرگ باشد، به همین دلیل با ساخت مقاومت بصورت سیم‌پیچ با توجه به رابطه (۳-٤) طول آن را افزایش داده و مقاومت بزرگی می‌سازند. چند نمونه اشکال سیم‌پیچ که معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرند در شکل (۳-۲۷) آمده است. در طراحی و نصب اندازه‌گیری سیم‌پیچ‌ها باید به این نکته توجه نمود که تنش‌های مکانیکی بر آنها وارد نشود چرا که تنش‌های مکانیکی نیز مانند تغییرات درجه حرارت می‌توانند موجب تغییر مقاومت الکتریکی شوند. سیم‌پیچ‌های اندازه‌گیر حرارت را با چسب‌های مخصوص با هدایت حرارتی خوب در محل مورد نظر بطور محکم نصب می‌کنند.



شکل (۳-۲۷) طرح‌های مختلف اندازه‌گیر دمای فلزی (PTC)

برای آشکارسازی تغییرات مقاومت معمولاً از مدار پل وتسون مطابق شکل ۳-۲۸ استفاده می‌کنیم.



شکل (۳-۲۸) مدار آشکارساز اندازه‌گیر دمای PTC

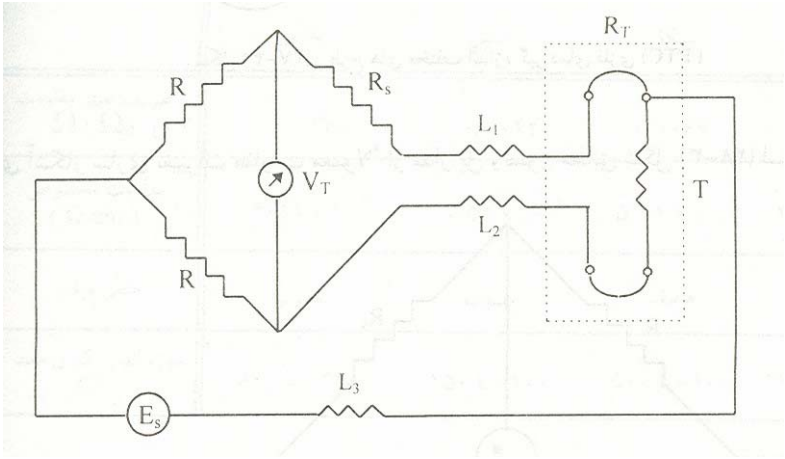
در این مدار مقاومت R_s بگونه‌ای تنظیم می‌شود که در دمای صفر درجه پل در حالت بالانس بوده و ولتمتر صفر را نشان دهد در این شرایط داریم:

$$R_s = R_{To} \qquad (۵-۳)$$

در رابطه (۳-۵) R_{To} مقاومت اندازه‌گیر در دمای صفر درجه سانتیگراد می‌باشد. حال اگر در اثر افزایش دما R_T زیاد گردد،ولتمتر در جهت مثبت منحرف شده و این انحراف می‌تواند بعنوان درجه حرارت مقیاس شود. به همین ترتیب اگر در اثر کاهش دما R_T کم شود، ولتمتر در جهت منفی منحرف شده و دمائی کمتر از صفر را نشان می‌دهد.

در عمل ممکن است عنصر اندازه‌گیر در فاصله‌ای دورتر از وسائل و تجهیزات اندازه‌گیری و کنترل نصب گردد و در نتیجه طول سیم اتصال بین عنصر اندازه‌گیر با تجهیزات افزایش یابد، بگونه‌ای که مقاومت سیم‌های رابط با مقاومت عنصر اندازه‌گیر قابل مقایسه گردد و تغییرات مقاومت سیم‌های رابط با دما منجر به بروز خطاهای بزرگ در اندازه‌گیری شود. برای

حل این مشکل اندازه‌گیرهای سه سیمه یا چهار سیمه می‌سازند. شکل ۳-۲۹ نحوه اتصال اندازه‌گیر سه سیمه به پل نشان می‌دهد:



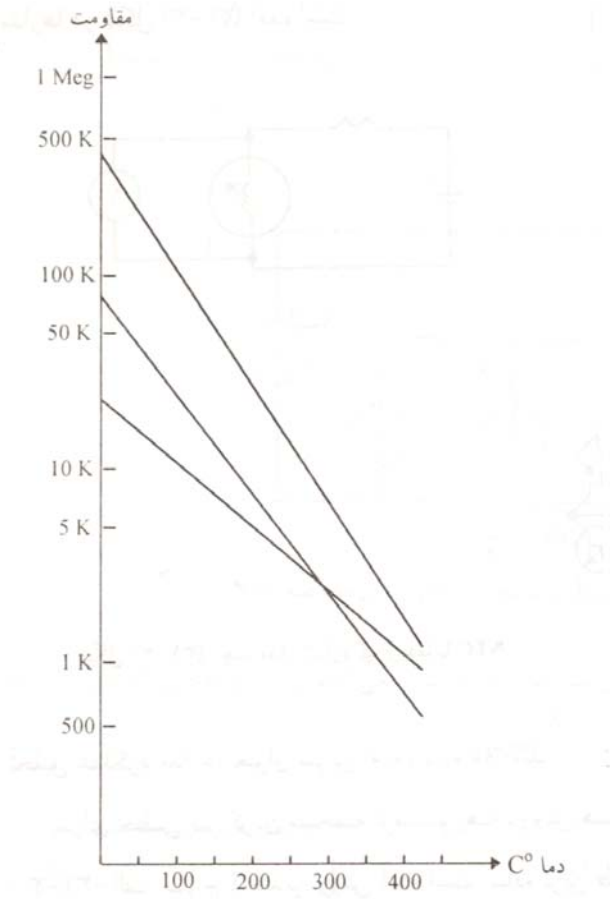
شکل (۳-۲۹). اندازه‌گیر دمای سه سیمه

در این شکل L_1 و L_2 مقاومت سیم‌های ارتباطی پل به اندازه‌گیر هستند که چون در دو بازوی مخالف پل قرار گرفته‌اند اثر یکدیگر را خنثی می‌کنند. L_3 نیز معادل مقاومت الکتریکی سیم ارتباطی از منبع تغذیه به اندازه‌گیر می‌باشد و از آنجائیکه با منبع تغذیه سری شده است، بعد از تنظیم پل، اثری در بر هم زدن تعادل آن ندارند.

طرح چهار سیمه دقت بیشتری ایجاد می‌کند. اما از آنجائیکه تنظیم و کالیبراسیون آن با مشکلاتی توأم است کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

اندازه‌گیرهای دما NTC

ترمیستورها معروف‌ترین اندازه‌گیرهای دما با شیب منفی می‌باشند. ترمیستورهای امروزی قادر به اندازه‌گیری دماهای پایین حدود ۱۰۰°c- تا دماهای بالا حدود ۵۰۰°c+ می‌باشند. ترمیستورها ممکن است بوصرت عناصری با شیب مثبت نیز ساخته شوند ولی نوع NTC آنها متداول تر است و اساساً در صنعت منظور از ترمیستور فقط نوع NTC آن می‌باشد. ترمیستورها عناصری نیمه هادی هستند و با توجه به پیشرفت‌های فن‌آوری ساخت ادوات نیمه هادی، قیمت آنها بسیار پائین می‌باشد. شکل ۳-۳۰ مشخصه مقاومت بر حسب درجه حرارت را برای چند نوع ترمیستور نشان می‌دهد.

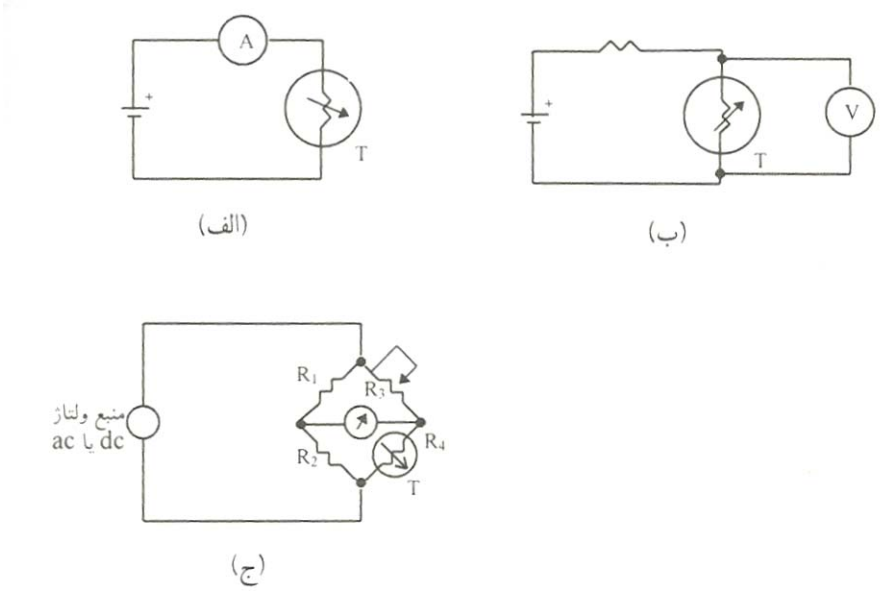


شکل (۳-۳۰) مشخصه چند اندازه‌گیر دمای NTC

شیب مشخصه ترمیستورها بسیار بیشتر از عناصر PTC که در قسمت قبل دیدیم می‌باشد و این به معنی حساسیت بیشتر و امکان اندازه‌گیری دقیق‌تر می‌باشد. درصد تغییرات مقاومت یک ترمیستور در اثر یک درجه تغییر دما چیزی در حدود ۳ الی ۵ درصد می‌باشد که در مقایسه با عدد ۰/٤ درصد برای فلزات PTC قبلی عددی قابل توجه است. یک ترمیستور را می‌توان با مقاومتی حدود چند ده کیلو اهم ساخت در حالیکه مقاومت‌های فلزی تا حدود چند صد اهم ساخته می‌شوند. بنابراین اثر سیم هادی ارتباطی در ترمیستورها اساساً منتفی می‌گردد در حالیکه در مقاومت‌های فلزی این اثر مشکل قابل توجه‌ای را بوجود می‌آورد.

در برابر این مزایا، مشخصه ترمیستورها بسیار غیر خطی تر از فلزات است و از طرف دیگر حوزه اندازه‌گیری آنها نیز کوچکتر از فلزات می‌باشد.

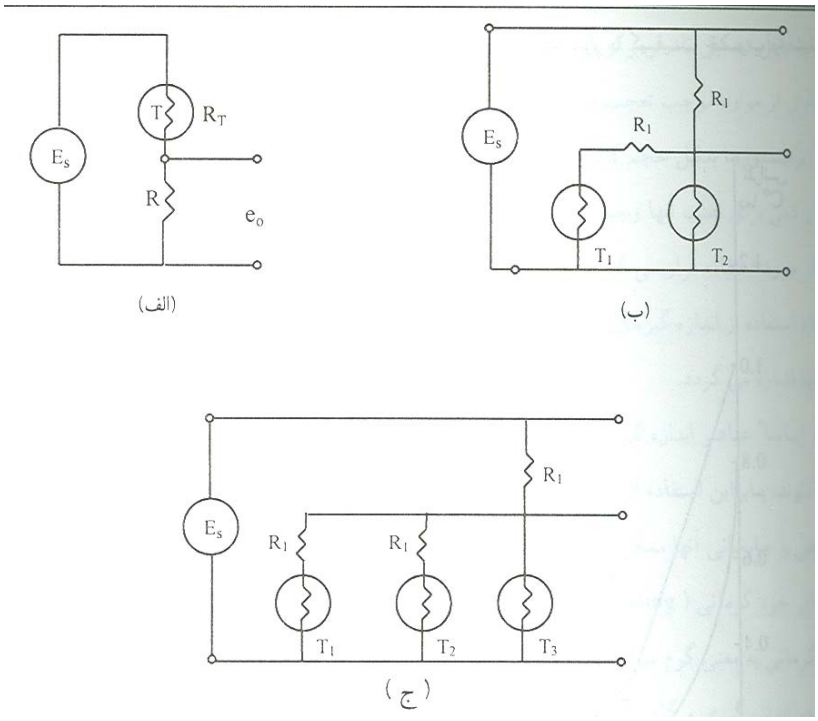
برای اندازه‌گیری دما توسط ترمیستورها از مدارهای بسیار ساده می‌توان استفاده نمود. نمونه‌ای از اینگونه مدارها در شکل ۳-۳۱ آمده است.



شکل (۳-۳۱). چند مدار اندازه‌گیری دما با NTC

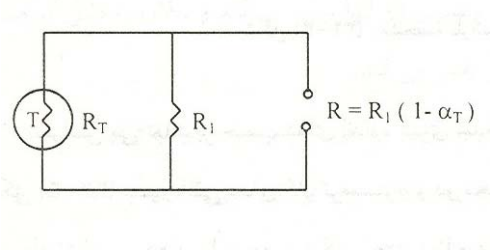
تحلیل عملکرد مدارها بعنوان تمرین به خواننده علاقمند واگذار می‌گردد.

برای خطی تر کردن مشخصه ترمیستورها روش‌های مختلفی ارائه شده است. در شکل ۳-۳۲ چندین روش آمده است. ساده ترین طرح روش تقسیم ولتاژ است که در شکل ۳-۳۲- الف نشان داده شده است. روش تقسیم ولتاژ را می‌توان با استفاده از چندین ترمیستور یکسان، مطابق شکلهای ۳-۳۲- ب و ۳-۳۲- ج بهبود بخشید که در این حالت مشخصه خطی بهتری بدست می‌آید.



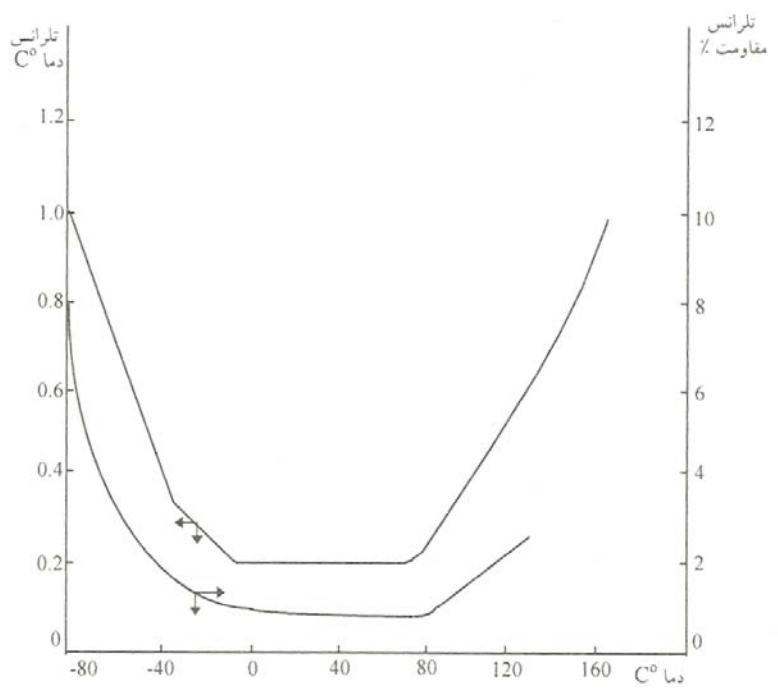
شکل (۳-۳۲) چند مدار نمونه برای خطی کردن مشخصه NTC

در حالتی که اندازه‌گیری دما با اندازه‌گیری مقاومت انجام شود، می‌توان برای خطی کردن مشخصه ترمیستور از طراحی شکل ۳-۳۳ استفاده نمود.



شکل (۳-۳۳) اندازه‌گیری دما با اندازه‌گیری مقاومت خطی شده

یکی از مشکلات ترمیستورها وجود تلرانس در آنهاست به طوری که ترمیستورهای ساخت یک کمپانی و تحت یک نام و شماره از نظر رفتار و مشخصه با یکدیگر تفاوت دارند و این امر هنگام تعویض و جابجائی عناصر اندازه‌گیر مشکل آفرین خواهد شد. بنابراین کمپانی‌های سازنده معمولاً یک مشخصه تلرانس برای محصول خود ارائه میدهند تا طراح در طرح خود حتی‌الامکان اثر تلرانس عناصر را منظور دارد. شکل ۳-۳٤ یک نمونه از مشخصه تلرانس برای یک ترمیستور با کیفیت خوب رانشان میدهد.



شکل (۳-۳۴). مشخصه تلرانس برای یک ترمیستور نمونه

تلرانس می‌تواند بر حسب دمای اندازه‌گیری شده یا بر حسب درصد مقاومت نشان داده شود در شکل ۳-۳٤ محور افقی دمای کار ترمیستور و دو محور عمودی تلرانس‌های ذکر شده

را در دمای کار مربوطه نشان می‌دهند. با توجه به شکل بهترین ناحیه برای کارکرد این ترمیستورهای ساخته شده دارای رفتار نسبتاً یکنواخت و پایداری می‌باشند و از تکرارپذیری نسبتاً خوبی برخوردارند.

لحیم کاری پایه‌های ترمیستور می‌بایستی سریع و در دمای پایین انجام شود زیرا این امکان وجود دارد که عناصر فلز لحیم کاری از طریق پایه‌ها به اتصال فلز – نیمه هادی در ترمیستور نفوذ کرده و عملاً در آن محل شرکت یک ترموکوپل دهند. و در اندازه‌گیری ایجاد خطا و اشتباه نمایند پدیده‌ای که در بسیاری از موارد موجب تعجب و سردرگمی مهندسین می گردد.

ترمیستورها بدلیل حجم کم و ثابت زمانی کوچک، برای اندازه‌گیری‌های سریع و در محل هائی که جای کمی برای نصب آنها وجود دارد بسیار مناسب می‌باشند از این رو در وسایل و تجهیزات پزشکی بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند و عناصر شناخته شده‌ای برای مهندسین پزشکی می‌باشند.

هنگام استفاده از اندازه‌گیرهای دمای مقاومتی می‌بایستی به نکاتی چند توجه نمود که درزیر به پاره‌ای از آنها اشاره می‌گردد.

اساساً عناصر اندازه‌گیر دمای مقاومتی فلزی بر اساس استانداردهای مشخص و فراگیری ساخته نمی شوند. بنابراین استفاده از PTCهای کمپانی‌های و حتی PTCهای ساخت یک کمپانی و تعویض و جابجائی آنها ممکن است مشکلاتی را به وجود آورد.

اثر خودگرمائی (Self-heating) در اندازه‌گیری مقاومتی می‌بایستی مورد توجه قرار گیرد، خودگرمائی به معنی گرم شدن اندازه‌گیر در اثر جریان الکتریکی است که از آن می‌گذرد. این اثر موجب خطا در اندازه‌گیری و گاهی گرم شدن پروسه تحت کنترل می‌گردد که در مواردی ممکن است زیانبار باشد، به همین دلیل سعی می‌شود مدارات اندازه‌گیری بگونه‌ای طرح گردند که جریان عبوری از اندازه‌گیر به کمترین حد ممکن محدود گردد.

پدیده خودگرمائی در ترمیستورها حادتر است چرا که ترمیستورها معمولاً دارای مقاومت بزرگتری هستند و بنابراین عبور یک جریان مشخص حرارت بیشتری در آنها تولید می‌کند و بعلاوه به دلیل کوچک بودن ثابت زمانی دمای آنها در اثر این پدیده سریعتر تغییر می‌کند.

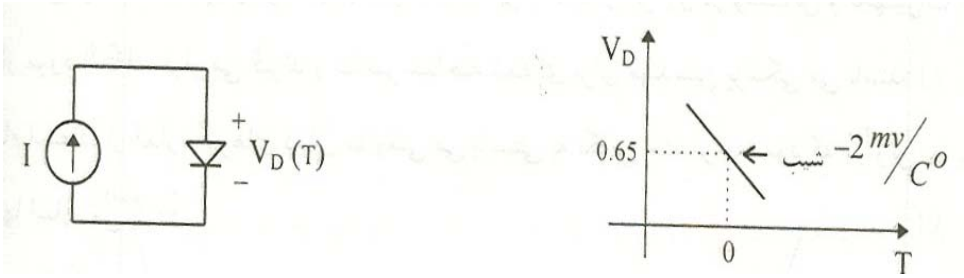
تغییر ویژگی‌های ذاتی و فیزیکی اندازه‌گیر با مرور زمان می‌بایستی مورد توجه قرار گیرد، چرا که عنصر اندازه‌گیر در اثر تحمل حرارت، یا در اثر فعل و انفعال شیمیائی تدریجی با محیطی که با آن در تماس است، ویژگی‌های اولیه خود را به تدریج از دست می‌دهد.

در بعضی از کاربردها که نیاز به دقت و اطمینان زیادی داریم یک اندازه‌گیر مقاومتی و یک ترموکوپل را در یک غلاف قرار می‌دهیم و با این کار اندازه‌گیری می‌سازیم که دما را با

استفاده از دو اصل فیزیکی متفاوت اندازه‌گیری می‌کند. بدین ترتیب عمل اندازه‌گیری قابلیت اطمینان بیشتری دارد.

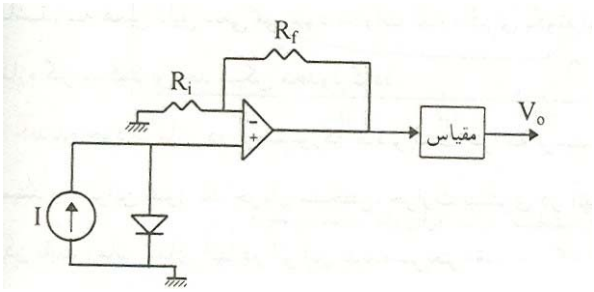
۳-۵-۱-۳ اندازه‌گیرهای نیمه هادی دما:

در شکل ۳-۳۵ یک دیود سیلیکون که با جریان ثابت تغذیه شده است می‌تواند بعنوان اندازه‌گیر درجه حرارت مورد استفاده قرار گیرد.



شکل (۳-۳۵). اندازه‌گیر نیمه هادی دما و مشخصه آن

شیب تغییرات ولتاژ بر حسب دما در یک اتصال PN با جریان ثابت برابر ۲ mv/ °c− می‌باشد که بعنوان اصل فیزیکی برای ساخت اندازه‌گیرهای نیمه هادی دما مورد استفاده قرار می‌گیرد با استفاده از یک مدار الکترونیکی ساده مطابق شکل ۳-۳۶ می‌توان مدار را بگونه‌ای مقیاس نمود که ولتاژ خروجی نشان دهنده دمای اندازه‌گیری شده باشد.

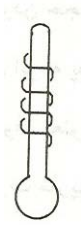


شکل (۳-۳۶). مدار آشکارساز اندازه‌گیر دمای مقاومتی

حسن این اندازه‌گیرها سادگی و ارزانی می‌باشد، اما حوزه اندازه‌گیری آنها به کمتر از ۲۰۰۰°c محدود می‌گردد، بعلاوه به دلیل رفتارهای ناپایدار و غیرخطی در کاربردهای دقیق از آنها استفاده نمی شود و بیشتر برای آشکارسازی حدود اندازه‌گیری و بکار انداختن مدارهای ایمنی و آلارم مورد استفاده واقع می‌شوند.

۳-۵-۲ اندازه‌گیرهای مکانیکی دما:

قدیمی ترین نوع اندازه‌گیرهای دما، اندازه‌گیرهای مکانیکی می‌باشند. در این اندازه‌گیرها، دما به یک کمیت مکانیکی (معمولاً جابجائی) تبدیل می‌گردد. ترمومتر جیوه‌ای مثال آشنای اندازه‌گیرهای مکانیکی است. این اندازه‌گیر دما را به جابجائی ستون جیوه در لوله تبدیل می‌کند، در بسیاری از موارد برای استفاده از مزایای کمیت‌های الکتریکی اندازه‌گیرهای مکانیکی را به اندازه‌گیرهای الکترومکانیکی تبدیل می‌کنند. بعنوان مثال اگر مطابق شکل ۳-۳۷ به دور لوله ترمومتر یک سیم‌پیچ بسته شود تغییرات ارتفاع ستون جیوه را می‌توان به تغییرات ضریب خودالقائی سیم‌پیچ تبدیل نمود و با استفاده از مدارات بعدی دمای اندازه‌گیری شده را به یک کمیت الکتریکی تبدیل کرد.



شکل (۳-۳۷). تبدیل تغییرات دما به تغییرات ضریب خودالقائی

حوزه اندازه‌گیری اندازه‌گیرهای مکانیکی از ۵۰°c- تا ۱۰۰۰°c+ محدود می‌گردد.

اصل فیزیکی مورد استفاده در اندازه‌گیرهای مکانیکی دما، تغییر حجم اجسام در اثر تغییر دما می‌باشد. نوع ماده بکار برده شده و ساختمان پیشنهادی برای اندازه‌گیر می‌بایستی متناسب به نوع کاربرد و دامنه اندازه‌گیری باشد که در زیر به نمونه هائی اشاره می‌شود.

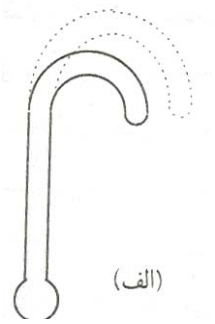
۳-۵-۲-۱ اندازه‌گیرهای مانومتری:

ترمومترهای مدرج نمونه‌ای از این نوع می‌باشند. در اندازه‌گیرهای مانومتری معمولاً از یک مایع مناسب مانند الکل استفاده می‌شود جیوه نیز که یک فلز سیال است، بدلیل ویژگی‌های جالب آن بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد. حد بالا و پائین حوزه اندازه‌گیری به حدود نقطه جوش و انجماد مایع مورد استفاده محدود می‌شود.

۳-۵-۲-۲ اندازه‌گیرهای دما از طریق فشار:

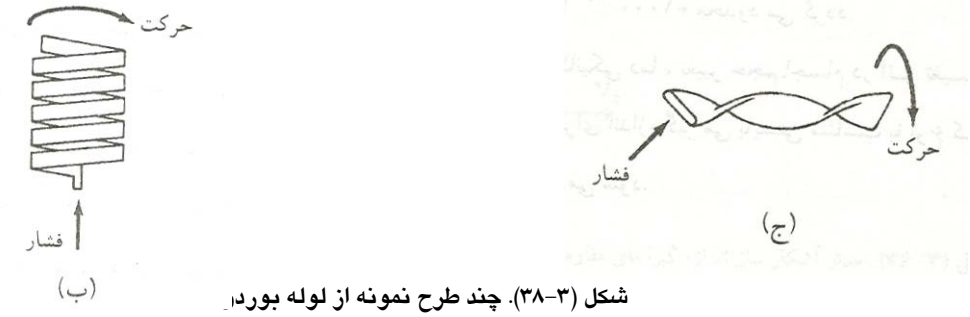
حوزه اندازه‌گیری اندازه‌گیرهای مانومتری دما محدود است. برای افزایش حوزه اندازه‌گیری می‌توان تغییرات دما را به تغییرات فشار تبدیل نمود.

شکل ۳-۳۸- الف ساختمان کلی چنین اندازه‌گیری را نشان ...



شکل (۳-۳۸) طرح کلی اندازه‌گیر دما لوله بوردن

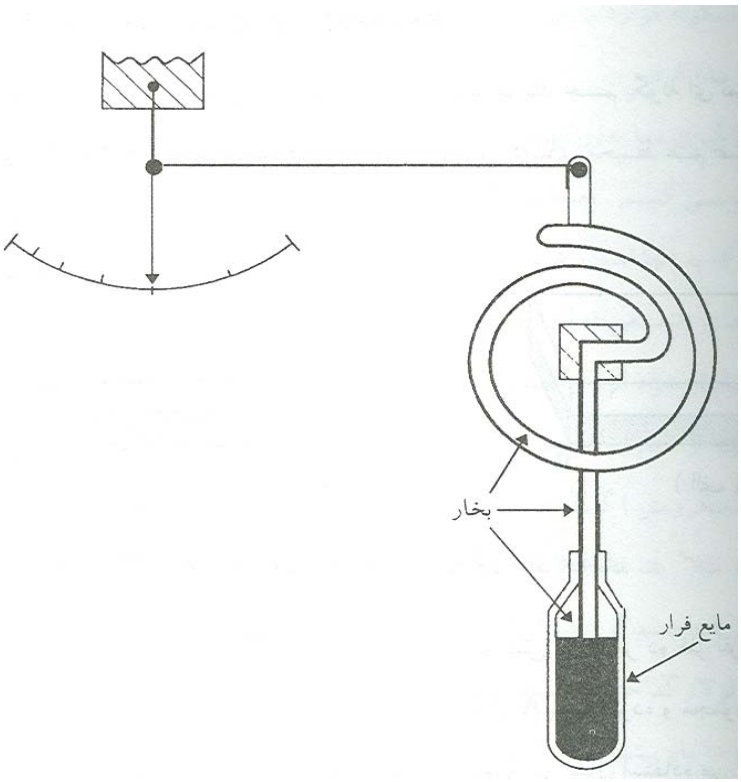
این اندازه‌گیر از یک مخزن و یک لوله مسدود (لوله بردون) که با یک گاز کامل (معمولاً نیتروژن) پر شده‌اند. این اندازه‌گیر از قانون گازهای ایده‌آل استفاده می‌کند. با توجه به ثابت بودن حجم در اثر افزایش دما فشار گاز افزایش یافته و موجب جابجائی انتهای لوله می‌گردد. (این اثر به پدیده لوله بردون مشهور است) که بعداً در مورد آن صحبت خواهیم کرد) جابجائی لوله بردون می‌تواند بعنوان دمای اندازه‌گیری شده مقیاس گردد. در عمل برای افزایش جابجائی لوله بردون را بصورت مارپیچ و یا شکل‌های دیگر می‌سازند.



شکل (۳-۳۸). چند طرح نمونه از لوله بوردن

۳-۵-۲-۳ اندازه‌گیری دما از طریق فشار بخار:

فشار بخار یک مایع تابعی از دمای آن است. از این اصل می‌توان برای اندازه‌گیری دما استفاده نمود. اندازه‌گیرهایی که از این اصل استفاده می‌کنند دارای سرعت پاسخ دهی خوبی نسبت به دو نمونه قبل می‌باشند. این اندازه‌گیر از بحاظ ساختمان و قطعات شبیه به دو نمونه قبل است با این تفاوت که اولاً به جای مایع یا گاز از یک مایع فرار مانند اتر استفاده می‌شود و ثانیاً تمام حجم مخزن از مایع پر نمی شود بلکه در شرایط عادی در بالای مخزن و در لوله‌ها بخار وجود دارد و در واقع فشار توسط بخار به قسمت انتهایی لوله بوردن منتقل می‌گردد. شکل ۳-۳۹ ساختمان کلی چنین اندازه‌گیری را نشان میدهد.



شکل (۳-۳۹) طرح کلی اندازه‌گیر دما از طریق فشار بخار

ملکول‌های یک مایع از طریق سطح آزاد آن به محیط خارج رفت و آمد می‌کنند میزان خروج ملکول‌ها از سطح آزاد بستگی بـه دمـای مـایع دارد. در نقطـه جـوش مـایع فشـار ملکـول‌هـای خروجی برابر فشار محیط است. اگـر فضـای بـالای مـایع مسـدود باشـد فشـار مولکـول‌هـای خروجی قابل اندازه‌گیری خواهد بود که این فشار متناسب با دمای مایع می‌باشد.

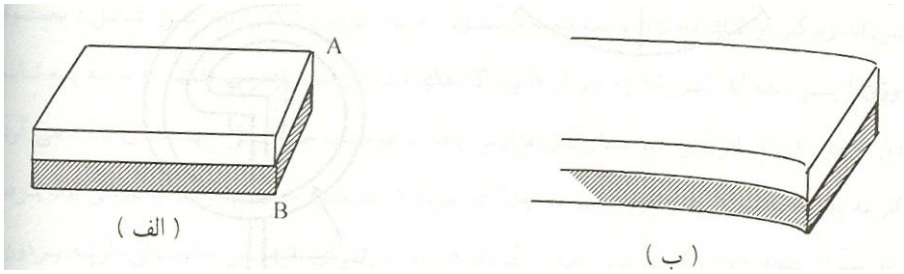
در انتخاب مایع برای اینگونه اندازه‌گیرها می‌بایستی به نکاتی چند توجه نمود:

۱. نقطه جوش مایع می‌بایستی کمتر از کمترین دمائی باشد کـه مـی‌خـواهیم انـدازه‌گیـری کنیم.
۲. مایع مورد استفاده می‌بایستی از لحاظ شیمیائی بی اثر باشد تا موجب خوردگی مخـزن و لوله‌ها نشود.

اندازه‌گیرهای مانومتری و اندازه‌گیرهائی که دما را از طریـق فشـار انـدازه‌گیـری مـی‌کننـد مسائل و مشکلات مربوط به خود را دارند که از جمله می‌توان به تغییر حجم لوله‌هـا بـا درجـه حرارت و کامل نبودن گاز مورد استفاده اشاره نمود. با این وجود سازندگان با تجربه با بکـار بستن تدابیر ویژه تا حد زیادی بر این مشکلات فائق آمده‌اند و اندازه‌گیرهای اسـتفاده شـده در سیستم‌های قدیمی همچنان بکار خود ادامه می‌دهند.

۳-۵-۲-٤ اندازه‌گیرهای دما، دوفلزی (Bimetal):

اجسام با تغییرات دما منبسط و منقبض می‌شوند. ضریب انبساط یک جسم بگونه‌ای نمایانگر افزایش دما است. مطابق شکل ۳-٤۰ دو فلز مختلف A و B را که در دمای محیط هم طول هستند، به یکدیگر متصل می‌کنیم.



شکل (۳-۴۰). اصل مورد استفاده در اندازه‌گیر دمای دو فلزی

فرض کنید ضریب انبساط فلز A بیشتر از B باشد هرگاه دما را افزایش دهیم هر دو فلز افزایش طول می‌دهند، اما چون ضریب انبساط A بزرگتر از B است، تغییر طول A بیشتر بوده و مجموعه به شکل ۳-٤۰- ب در می‌آید. از این پدیده در ساخت اندازه‌گیرهای دمای بی متال استفاده می‌کنیم. در عمل برای افزایش تغییرات طول در اثر تغییرات دما، بی متال را به صورت حلزونی و یا مارپیچ می‌سازند. تغییرات طول را می‌توان مستقیماً بعنوان دمای اندازه‌گیری شده مقیاس نمود و یا آن را به سیگنال‌های الکتریکی و غیره تبدیل کرد.

فلزهای مورد استفاده معمولاً از آلیاژهای آهن – نیکل می‌باشند. یک آلیاژ نیکل بنام (Invar) دارای ضریب انبساط بسیار کوچکی است که معمولاً بعنوان فلز با ضریب انبساط کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. اندازه‌گیرهای بی متال ارزان، ساده، محکم و بادوام می‌باشند و معمولاً برای کنترل‌های خاموش – روشن و حفاظت و آلارم مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۳-۵-۳ اندازه‌گیرهای تشعشعی دما:

اندازه‌گیرهایی که قبلاً به آنها اشاره شد در تماس مستقیم یا غیرمستقیم ب پروسه، دما را اندازه‌گیری می‌کنند. در مواردی تماس اندازه‌گیر با پروسه امکان‌پذیر نیست. مثلاً هنگامی که پروسه متحرک است و یا دمای آن بسیار بالا است بگونه‌ای که هر گونه تماس موجب ذوب شدن و خرابی اندازه‌گیر می‌شود و یا هنگامی که پروسه دارای مواد مخرب و زیانبار است.

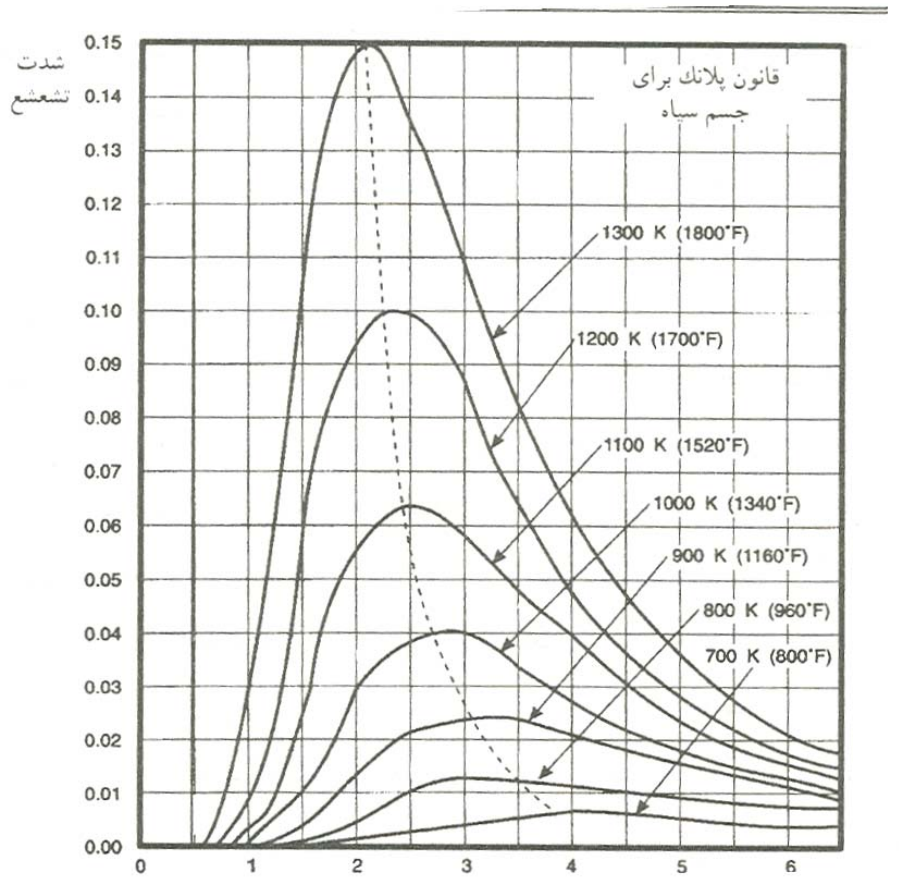
نمونه هائی از این‌گونه موارد را می‌توان در صنایع ریخته‌گری و فولاد و همچنین صنایع چینی و سرامیک و صنایع شیمیایی پیدا کرد.

برای اندازه‌گیری دما بدون تماس مستقیم یا غیرمستقیم با پروسه، از اندازه‌گیرهای تشعشعی و نوری استفاده می‌کنیم حد بالای دمای قابل اندازه‌گیری با اندازه‌گیرهای تشعشعی از کلیه اندازه‌گیرهائی که به آنها اشاره کردیم بیشتر است و مقدار آن به حدود ٤٠٠٠ درجه سانتیگراد می‌رسد.

اندازه‌گیرهای تشعشعی دما را پیرومتر (Pyrometer) گویند. اصل فیزیکی مورد استفاده در پیرومترها این است: اجسام از خود انرژی تشعشع می‌کنند. این انرژی بصورت امواج الکترومغناطیسی است که طول موج آنها از حوزه امواج مرئی (۰/۳۵ الی ۰/۷۵ میکرومتر) تا حوزه امواج مادون قرمز (۰/۷۵ الی ۲۰ میکرومتر) گسترده شده است. در حوزه امواج مرئی انرژی تشعشع شده بصورت رنگ نمایان می‌شود. مثلاً یک قطعه فولاد گداخته رنگ قرمز شدید و فیلامان یک لامپ تنگستن رنگ سفید ساطع می‌کنند. یک جسم گرم ممکن است بیشتر انرژی خودرا در حوزه امواج مادون قرمز ساطع کند مثلاً یک قطعه فولاد گداخته در دمای ۸۵۰ درجه سانتیگراد، مقدار انرژی که در حوزه مادون قرمز ساطع می‌کند، ۱۰۰۰۰۰ با بیشتر از انرژی است که در حوزه نور مرئی صادر می‌کند.

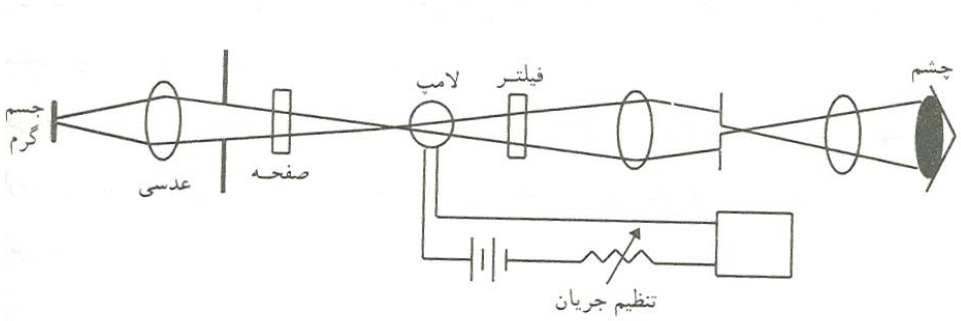
برای بیان رابطه بین دمای جسم با طول و شدت موج ساطع شده، مفهومی بنام جسم سیاه Black-body را تعریف می‌کنیم: جسم سیاه، جسمی است که هیچ اشعه‌ای را از خود عبور نداده و منعکس نمی کند و در وقع یک ساطع کننده کامل است و به بیان دیگر هر گونه گرمائی که به آن داده می‌شود را جذب نموده و بصورت امواج تشعشع می‌کند. رابطه بین دما، طول موج و شدت تشعشع توسط رابطه پلانک بیان می‌گردد. این رابطه بصورت نمودار در شکل (۳-٤۱) آمده است.

در حالت کلی می‌توان گفت انرژی ساطع شده از جسم سیاه متناسب با توان چهارم درجه حرارت آن است. یعنی اگر دمای جسم سیاه دو برابر شود، انرژی تشعشع شده توسط آن 2^4 یعنی شانزده برابر می‌شود.



شکل (۳-۴۱) نمودار قانون پلانک برای جسم سیاه

در عمل جسم سیاه به معنی واقعی آن وجود ندارد. بنابراین انرژی که یک جسم عادی در یک دمای مشخص ساطع می‌کند بسیار کمتر از انرژی است که یک جسم سیاه در همان دما ساطع می‌نماید. شکل ۳-۴۲ ساختمان کلی یک پیرومتر نوری را نشان می‌دهد.



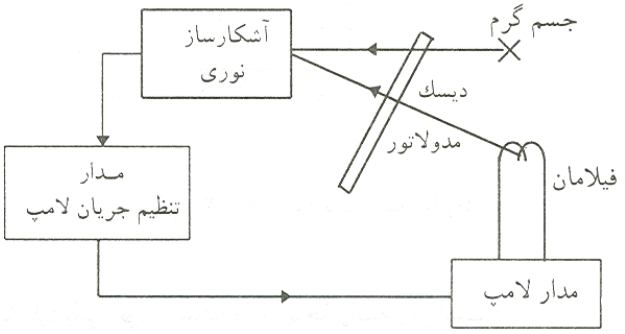
شکل (۳-۴۲). ساختمان کلی یک پیرومتر نوری.

نور ساطع شده توسط جسم گرم، بعد از فیلتر شدن بوسیله عدسی بر روی صفحه بصورت یک زمینه رنگی متمرکز می‌گردد. از طرف دیگر نور ناشی از یک منبع نورانی قابل تنظیم (لامپ) نیز بر روی صفحه متمرکز شده و جریان لامپ بگونه ای تنظیم می‌شود که رنگ ناشی از فیلامان لامپ یکسان شوند. در این صورت جریان لامپ که قبلاً با دمای فیلامان

مقیاس شده است، نشان دهند دمای جسم گرم خواهد بود. پیرومترهای نوری اگر بخوبی کالیبره و تنظیم گردند، نتایج دقیق و خوبی خواهند داد.

از آنجائیکه حساسیت چشم انسان محدود بوده و تنها قادر به تشخیص رنگ‌های (امواج) مرئی است، برای افزایش دقت پیرومترها می‌توان از آشکارسازهای نور الکترونیکی بجای چشم انسان استفاده نمود.

شکل ۳-۴۳ ساختمان کلی یک پیرومتر نوری اتوماتیک را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۴۳). پیرومتر نوری اتوماتیک

در این دستگاه آشکارساز نوری، نور ناشی از جسم گرم را با نور ناشی از فیلامان مقایسه و جریان فیلامان را به گونه‌ای تنظیم می‌کند که شدت دو نور یکسان شوند، در این حالت جریان با مقیاس مناسب نشان دهنده دمای جسم گرم است.

امروزه پیرومترهای صنعتی به آشکارسازهای مجهز هستند که قادر به اندازه‌گیری تشعشع در حوزه مرئی و مادون قرمز (نامرئی) می‌باشند، بنابراین از دقت بالائی در اندازه‌گیری دما برخوردار هستند. هنگام استفاده از پیرومترهای نوری باید دقت نمود که گرد و غبار و یا موانعی بین جسم گرم و دوربین اندازه‌گیری نباشد چرا که وجود گرد و غبار و بخار موجب نوعی فیلترینگ و حذف یا تضعیف تشعشعات در بعضی طول موجها می‌گردد. همچنین تمیز بودن عدسی پیرومتر از اهمیت زیادی برخوردار است.

۳-۶ اندازه‌گیرهای فشار:

فشار یکی دیگر از کمیت هائی است که در بسیاری از پروسه‌های صنعتی مایل به اندازه‌گیری و کنترل آن می‌باشیم. فشار یعنی مقدار نیروی وارد شده بر واحد سطح:

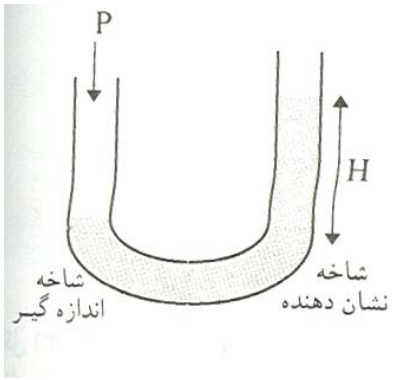
$$P = \frac{F}{A} \qquad (۳-۶)$$

در رابطه (۳-۶)، F نیرو و A سطحی است که نیرو بر آن اعمال می‌گردد.

همانطور که مشاهده می‌شود فشار یک کمیت اصلی نیست و حاصل تقسیم کمیت اصلی نیرو بر سطح (مجذور طول) می‌باشد. با این وجود اندازه‌گیری فشار بیشتر از اندازه‌گیری نیرو مطرح می‌گردد و در بسیاری از موارد اندازه‌گیری نیرو از طریق اندازه‌گیری فشار انجام می‌پذیرد.

۳-۶-۱ اندازه‌گیری‌های مانومتری

یک اندازه‌گیر فشار مانومتری در حالت کلی مطابق شکل (۳-٤٤) می‌باشد.

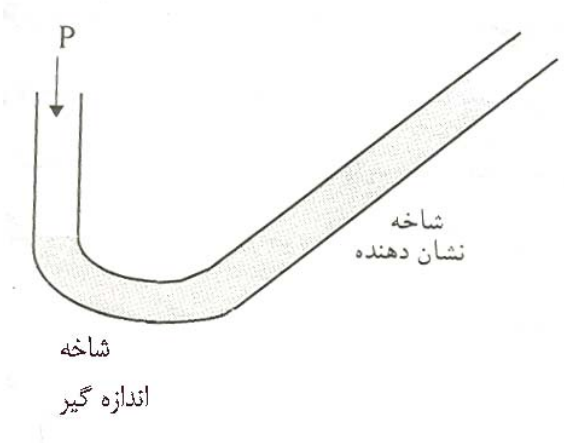


شکل (۳-۴۴) اندازه‌گیر فشار مانومتری

اصل فیزیک استفاده شده در اینجا رابطه زیر است:

$$P = \rho g h \qquad (۳-۷)$$

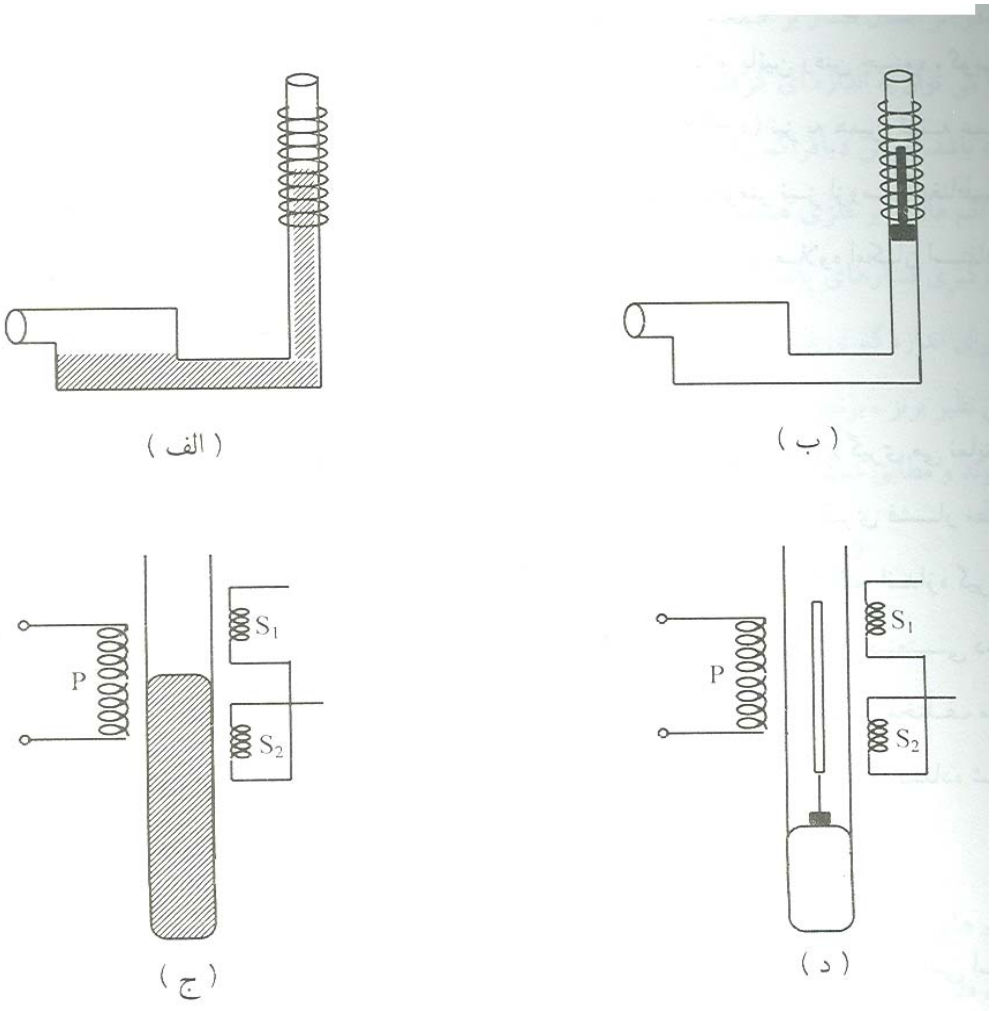
در رابطه (۳-۷) ρ جرم مخصوص مایع مانومتر، g شتاب جاذبه و h ارتفاع مایع در شاخه نشان دهنده می‌باشد. برای سهولت در خواندن تغییرات کوچک فشار مانومتر را می‌توان به صورت شکل (۳-٤٥) ساخت .



شکل (۳-۴۵). اندازه گیر مانومتری فشار با حد فیدبک بهتر

برای اندازه گیری فشارهای بالا معمولا از سیالی با جرم مخصوص بزرگ مثل جیوه استفاده می‌شود و برای اندازه گیری فشارهای پایین و به منظور ایجاد حساسیت بیشتر می‌توان از مایعات سبکتر همانند آب استفاده نمود.

اندازه گیرهای فشار نشان داده شده در شکل‌های (۳-٤٤) و (۳-٤٥) صرفاً نشان دهنده‌های فشار می‌باشند. اما در کاربردهای کنترل معمولاً فشار می‌بایستی به کمیتی دیگر (معمولاً الکتریکی)تبدیل و به کنترل کننده ارسال گردد. برای تبدیل طرح کلی نشان دهنده فشار شکل (۳-٤٤) به یک اندازه‌گیر صنعتی می‌توان هر یک از طرح‌های شکل (۳-٤٦) را پیشنهاد نمود:



شکل (۳-۴۶) چند طرح اندازه‌گیر مانومتری الکتریکی فشار

در شکل (۳-٤٦- الف) با ایجاد یک سیم‌پیچ به دور لوله نشان دهنده، آن را تبدیل به یک اندازه‌گیر فشار با استفاده از خاصیت سلفی نموده‌ایم. توجه نمائید که در این حالت سیال مانومتر می‌بایستی دارای خواص مغناطیسی باشد. (مثل جیوه). با افزایش فشار، ارتفاع سیال در داخل سلف بیشتر می‌شود و این به معنی داخل شدن هسته مغناطیسی به سلف می‌باشد که

موجب افزایش ضریب خودالقائی می‌گردد در این اندازه‌گیر تغییرات فشار را به تغییرات ضریب خوالقائی تبدیل می‌نمائیم. عیب این اندازه‌گیرآن است که سیال مانومتر باید مغناطیسی باشد برای رفع این مشکل می‌توان طرح مطابق شکل ۳-٤٦-ب استفاده نمود.

در این طرح به جای سیال مغناطیسی از یک کپسول مغناطیسی شناور بر روی سیال غیرمغناطیسی استفاده می‌کنیم. در اثر تغییرات فشار، شناور داخل سلف بالا و پائین رفته و ضریب خودالقائی آن را تغییر می‌دهد. برای استفاده از مزایای LVDTها می‌توان از فشار سنج‌های مانومتری با طرح هائی شبیه به اشکال ۳-٤٦- ج و ۳-٤٦- د استفاده نمود. در شکل ۳-٤٦- ج بالا و پائین رفتن جیوه کوپلاژ بین سیم‌پیچ اولیه و سیم‌پیچ‌های ثانویه را تغییر می‌دهد. شکل ۳-٤٦- ج نیز به همین گونه عمل می‌کند منتها هسته مغناطیسی خود سوار بر شناور دیگری است و مایع مانومتر نیز لزوماً مغناطیسی نمی باشد. این طرح موجب افزایش حوزه اندازه‌گیری فشارسنج شده و بعلاوه امکان استفاده از هسته‌های مغناطیسی مختلف و تنظیم راحت تر فشارسنج را فراهم می‌آورد.

تمرین: معایب اندازه‌گیرهای فشار مانومتری را که به نظرتان می‌رسد بیان کنید.

اندازه‌گیرهای فشار مانومتری ساده و ارزان هستند و معمولاً فشار نسبی را اندازه‌گیری می‌نمایند. به عبارت دیگر فشار مورد اندازه‌گیری را نسبت به فشار محیط می‌سنجند. برای اندازه‌گیری فشار مطابق می‌بایستی فضای بالای لوله نشان دهنده را از هوا تخلیه و مسدود نمود. از آنجائیکه اندازه‌گیرهای مانومتری معمولاً از شیشه ساخته می‌شوند خطر شکستگی کار با آنها را در محیط‌های صنعتی دشوار می‌کند بعلاوه تبخیر مایع مانومتر و یا تغییر خواص آن در شرایط آب و هوائی و دماهای مختلف ممکن است موجب بروز خطا در اندازه‌گیری گردد، در صورتیکه از جیوه بعنوان مایع مانومتر استفاده شود می‌بایستی به خاصیت سمی آن توجه نمود.

۳-۶-۲ اندازه‌گیرهای با خاصیت ارتجاعی در برابر فشار:

مواد در برابر فشار تغییر شکل می‌دهند. از این خاصیت در ساخت فشار سنج‌های ارتجاعی استفاده می‌شود. این گونه فشار سنج‌ها با توجه به شکل ماده ارتجاعی به چندین دسته تقسیم بندی می‌شوند که در اینجا به انواع معروف آنها اشاره می‌کنیم.

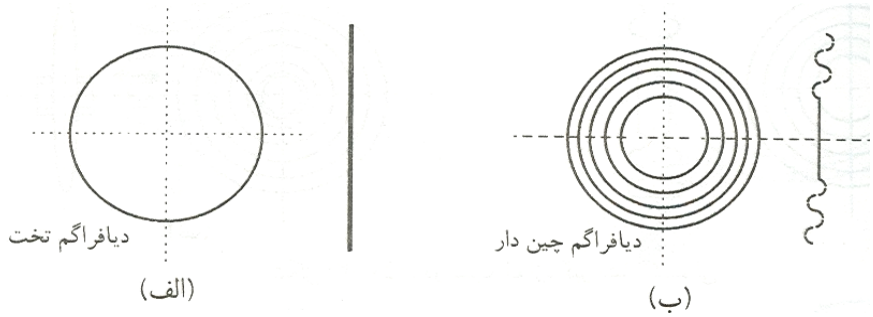
۳-۵-۲-۱ اندازه‌گیر فشار دیافراگمی:

اصول کار یک اندازه‌گیر فشار دیافراگمی مطابق شکل ۳-٤۷ می‌باشد:

شکل (۳-۴۷). اصل مورد استفاده در اندازه‌گیر فشار یا دیافراگمی

در اثر اعمال فشار بر صفحه A، سطح A تغییر شکل داده و به شکل ۳-٤٧- ب در می‌آید. سطح A را می‌توان به اندازه‌ای گرفت تا تغییرات x نیز به نوبه خود بزرگ بوده و اندازه‌گیر حساسیت دلخواه را داشته باشد. جنس دیافراگم را می‌توان فلز یا غیرفلز انتخاب نمود. لاستیک و چرم از انواع متداول دیافراگم‌های غیرفلزی هستند. دیافراگم‌های غیرفلزی معمولاً در ابعاد بزرگ ساخته می‌شوند و برای اندازه‌گیری فشارهای پائین تر مورد استفاده قرار می‌گیرند.

برای اندازه‌گیری فشارهای بالاتر از دیافراگم‌های فلزی استفاده می‌کنیم. دیافراگم‌های فلزی از فلزاتی نظیر برنز، برنج، آلیاژهای مس، فولاد ضدزنگ، برلیوم و آلیاژهای مخصوص دیگر ساخته می‌شوند و مطابق شکل ۳-٤٨ بصورت چین دار یا تخت می‌باشند.

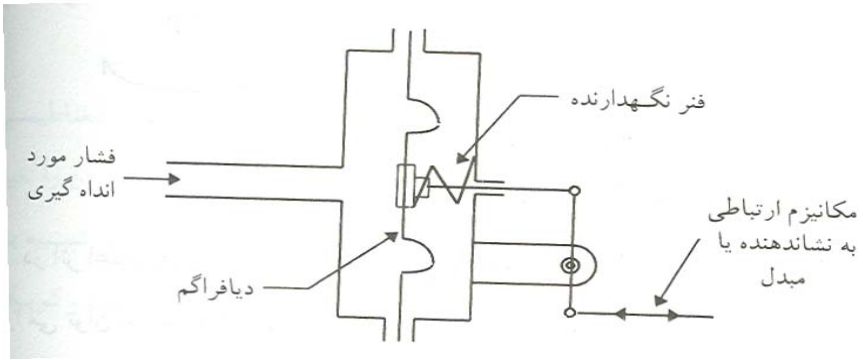


شکل (۳-۴۸). چند نمونه دیافراگم.

دیافراگم‌های فلزی چون با فشارهای بالاتر کارمی کنند معمولاً کوچکتر ساخته می‌شوند و ابعاد آنهبه ضخامت فلز مورد استفاده، مدول الستیسیته، شکل و تعداد چین‌های دیافراگم بستگی دارد. دیافراگم‌ها از هر جنس که باشند بگونه‌ای ساخته می‌شوند که اندازه تغییر شکل آنها متناسب با فشار اعمالی باشد.

از آنجائیکه دیافراگم‌های غیرفلزی در ابعاد بزرگتر ساخته می‌شوند معمولاً مطابق شکل ۳-٤٩ نیاز به یک فنر نگهدارنده دارند تا از خمیدگی آنها در حالت تعادل جلوگیری شود. اما دیافراگم‌های فلزی چون محکم تر هستند و در ابعاد کوچکتر ساخته می‌شوندنیاز به فنر نگهدارنده ندارند. برای آشکارسازی فشار و تبدیل جابجائی دیافراگم به کمیتی قابل ارسال به

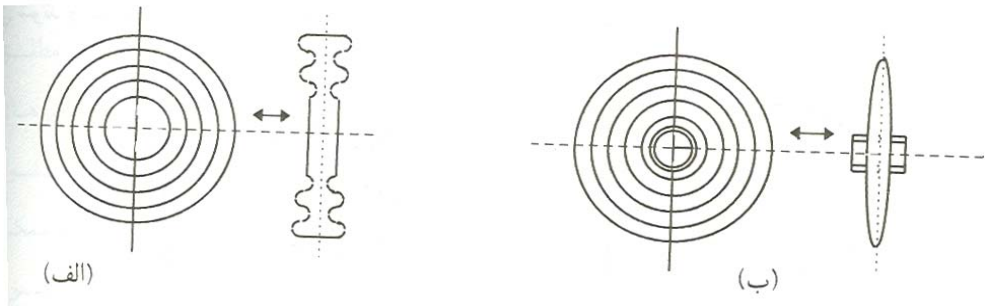
کنترل کننده روش‌های گوناگونی وجود دارند که در واقع همان روش‌های معمول انـدازه‌گیـری جابجائی می‌باشند.



شکل (۳-۴۹) اندازه‌گیر فشار دیافراگمی همراه به فنر نگه دارنده

۳-٦-۲-۲ اندازه‌گیر فشار کپسولی:

یک کپسول از دو دیافراگم فلزی تشکیل شده که در محیط به یکدیگر جوش شده‌اند. فضای بین دو دیافراگم با سیال تراکم ناپذیری با ویژگی‌های مخصوص پر شده است. شکل ۳-۵۰ یک کپسول را نشان میدهد:

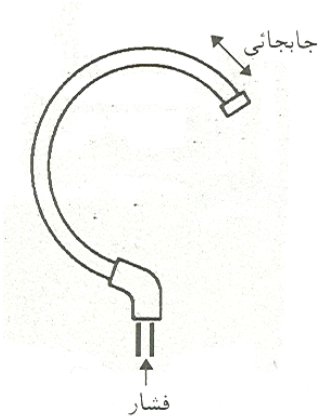


شکل (۳-۵۰) دو نمونه اندازه‌گیر فشار کپسولی

در بعضی طرح‌ها می‌توان چندین کپسـول سـری نمـود. در ایـن حالـت جابجـائی ناشـی از فشار، برابر مجموع جابجائی‌های کپسول‌ها می‌باشد و بدین ترتیـب شـیب انـدازه‌گیـر افـزایش می‌یابد.

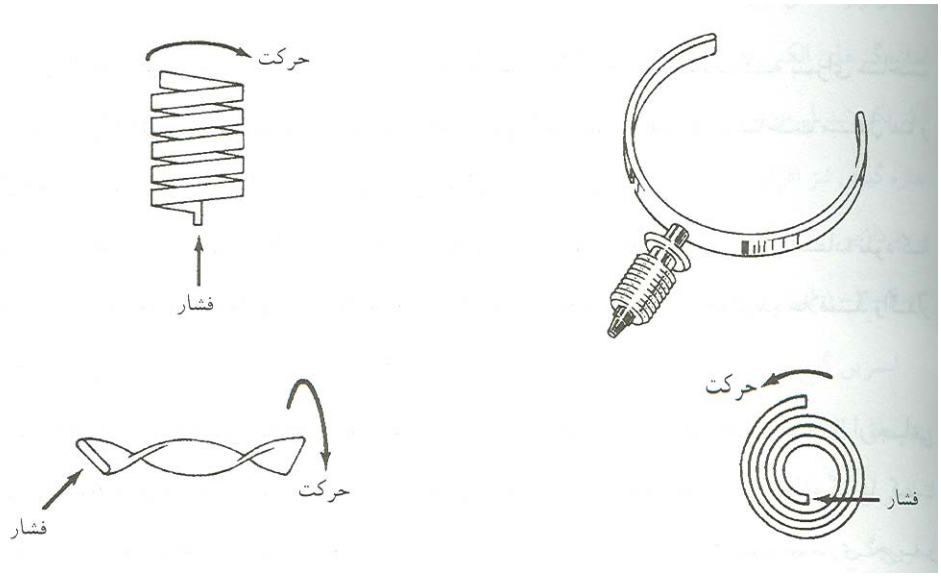
۳-٦-۲-۳ اندازه‌گیر لوله بوردن:

این اندازه‌گیر در سال ۱۸۵۲ توسط بوردن اختراع گردید. اساس کار این اندازه‌گیر در شکل ۳-۵۱ آمده است.



شکل (۳-۵۱). طرح کلی لوله بوردن

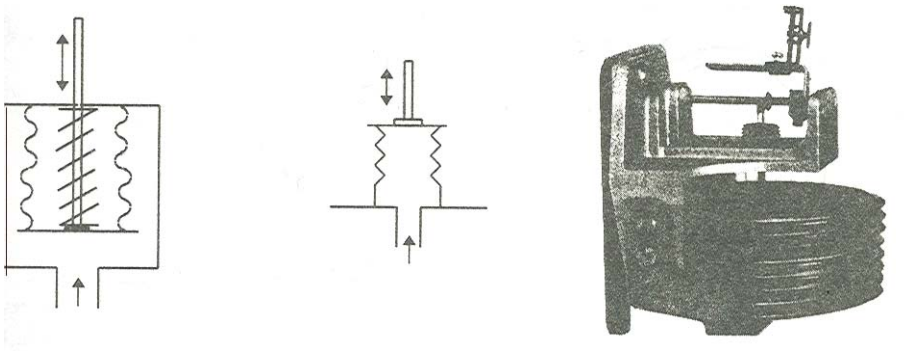
لوله بوردن یک لوله مسدود با شکل دسته عصا می‌باشد (حدود ۲۵۰ درجه) که وقتی به آن اعمال شود به دلیل تفاوت اندازه محیط بیرونی و درونی، تمایل به راست شدن پیدا می‌کند در این حالت اندازه تغییر وضعیت لوله متناسب با فشار مورد اندازه‌گیری است. حوزه اندازه‌گیری لوله بوردن بیشتر از دیافراگم و کپسول می‌باشد و معمولاً برای اندازه‌گیری فشارهای بالا مورد استفاده واقع می‌شود. در عمل ممکن است لوله بوردن بر حسب کاربرد به صورت‌های دیگر نیز ساخته شود. شکل ۳-۵۲ چند نمونه از اشکال مختلف لوله بوردن را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۵۲) طرح‌های لوله بوردن

۳-٦-۲-٤ اندازه‌گیر دم (بلوز):

دم یا بلوز ساختمانی شبیه به آکاردئون یا دم آهنگری دارد. شکل ۳-۵۳ ساختمان کلی یک دم را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۵۳). اندازه‌گیر فشار (دم)

ساختار آکاردئونی دم موجب انبساط آن در اثر اعمال فشار می‌شود و اندازه جابجائی متناسب با فشار مورد اندازه‌گیری است. رابطه فشار با باز و بسته شدن دم شبیه به رابطه‌ای است که در یک فنر وجود دارد و می‌توان آن را بصورت زیر نوشت:

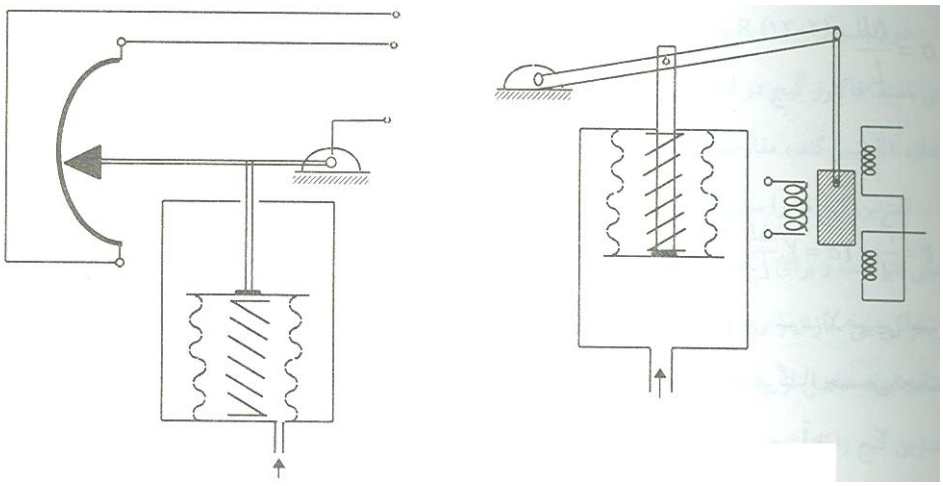
$$X = K_s (PA) \qquad (۸-۳)$$

در رابطه (۳-۸)P فشار مورد اندازه‌گیری و A سطح دم است و K_s را ضریب دم (ضریب فنری) می‌گوئیم معمولاً حوزه جابجائی دم حدود ۵ الی ۱۰٪ کل طول آن می‌باشد. توجه نمائید از آنجائیکه فشار محیط خارج دم فشار اتمسفر می‌باشد، بنابراین دم، فشار نسبی را اندازه‌گیری می‌نماید.

آلیاژهائی که برای ساخت دم استفاده می‌شود معمولاً همان آلیاژهائی هستند که برای ساخت دیافراگم‌های فلزی و کپسول‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. دم‌ها در ساخت مبدل‌ها و انتقال دهنده نیز کاربرد فراوان دارند و عناصری محکم و بادوام می‌باشند.

برای آشکارسازی جابجائی می‌توان استفاده نمود که در شکل (۳-٥٤) نمونه هائی از آنها آمده است و تجزیه و تحلیل آن را به خواننده علاقمند واگذار می‌نمائیم.

اندازه‌گیرهای دیافراگمی، کپسول ها، لوله بوردن و دم‌ها چهار نمونه اصلی اندازه‌گیرهای ارتجاعی فشار می‌باشند و مزیت عمده آنها سادگی، استحکام و دوام آنها است. نکته مهم در این اندازه‌گیرها کیفیت آلیاژی است که در ساخت آن مورد استفاده قرار می‌گیرد و معمولاً سازندگان انگشت شماری تجزیه و مهارت کافی برای ساخت آن را دارند و مشخصات این آلیاژها جزء اسرار کمپانی سازنده می‌باشد. اندازه‌گیرهای فوق بطور گسترده در صنایع نفت و گاز، کشتی‌ها و هواپیماها و سایر صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرند.



شکل (۳-۵۴) چند طرح الکتریکی آشکارسازی فشار

۳-۶-۳ اندازه‌گیرهای الکتریکی فشار:

در اندازه‌گیرهای مانومتری و ارتجاعی معمولاً فشار اندازه‌گیری شده می‌بایستی تبدیل به کمیتی الکتریکی گردد. این امر استفاده از قطعات و اجزای اضافی و افزایش هزینه را بدنبال دارد و همچنین احتمال وارد شدن نویز و ایجاد خطا را افزایش می‌دهد.

اندازه‌گیرهای الکتریکی فشار علاوه بر مزایای خاص اندازه‌گیرهای الکتریکی، فشار را مستقیماً به کمیتی الکتریکی تبدیل می‌نمایند و از این نظر صرفه‌جوئی قابل ملاحظه‌ای در هزینه می‌شود و همچنین دقت اندازه‌گیری نیز افزایش می‌یابد. در این بخش به معرفی چندین نمونه از اندازه‌گیرهای الکتریکی فشار می‌پردازیم:

۳-۶-۳-۱ استرین گیج‌ها (Strain-gages):

استرین گیج‌های معروف ترین اندازه‌گیرهای الکتریکی فشار می‌باشند و اساساً برای اندازه‌گیری فشارهای بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مواردی برای اندازه‌گیری فشارهای کوچک نیز ممکن است از استرین گیج استفاده نمائیم.

استرین گیج‌ها در اصل اندازه‌گیر استرین یا تنش می‌باشند. استرین یا تنش به عبارتی به معنی تغییر شکل اجسام در اثر نیروی اعمالی به آنها می‌باشد.

هرگاه بر جسمی نیرو وارد شود (کشش یا فشار) جسم در جهت نیرو تغییر طول می‌دهد. نسبت این تغییر طول به طول اولیه جسم را تنش می‌گوئیم:

$$\sigma = \frac{\Delta L}{L_o} \qquad (۹-۳)$$

در رابطه (۳-۹)، ΔL تغییر طول، L_o طول اولیه و σ تنش است.

قانون هوک رابطه تنش با نیروی اعمالی (فشار) رابیان می‌دارد:

$$P = \frac{F}{A} = Y\sigma = Y.\frac{\Delta L}{L_O} \qquad (۱۰-۳)$$

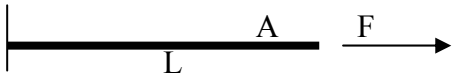
در رابطه (۳-۱۰)p فشار، F نیرو و A سطح جسم است که نیرو بر آن وارد می‌شود. Y ضریبی است که به آن مدول یانگ می‌گوئیم. پس بطور خلاصه رابطه (۳-۱۰) بدست می‌آید.

مقاومت الکتریکی یک جسم با ابعاد و ویژگی‌های الکتریکی آن جسم رابطه دارد. رابطه‌ای که

این ارتباط را بیان می‌دارد بصورت زیر است:

$$R = \rho\frac{L}{A} \qquad (۱۱-۳)$$

در رابطه (۳-۱۱)، L طول جسم، A مقطع آن و ρ ضریبی است که مقاومت مخصوص جسم نامیده می‌شود رابطه (۳-۱۱) نشان می‌دهد که هرگاه طول جسم افزایش یا مقطع آن کاهش یابد مقاومت الکتریکی جسم افزایش می‌یابد.



شکل (۳-۵۵) اصل مورد استفاده استرین گیج ها

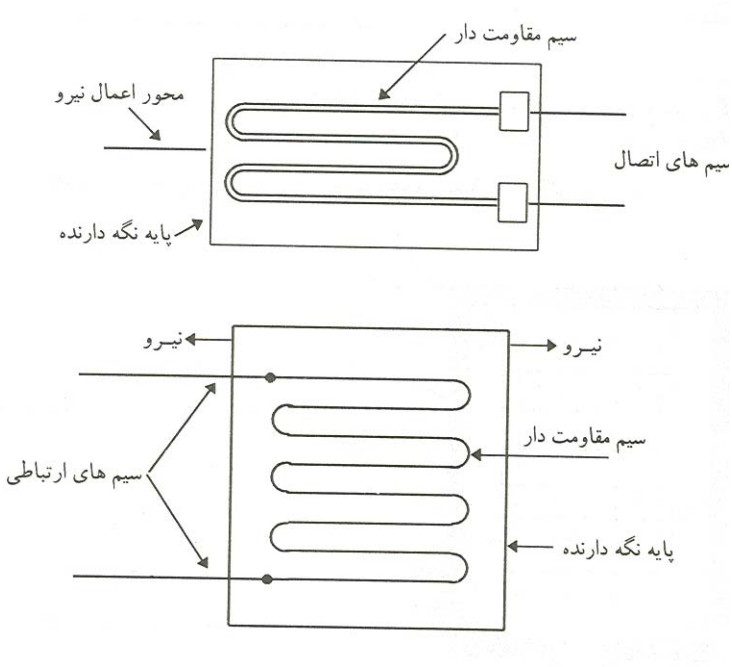
مطابق شکل (۳-۵۵) سیمی به طول L و مقطع A را در نظر بگیرید هر گاه سیم تحت نیروی کششی F قرار گیرد طول آن افزایش و مقطع آن کاهش می‌یابد که هر دو باعث افزایش مقاومت الکتریکی آن می‌شوند. اگر طول سیم بسیار بزرگتر از مقطع آن باشد، افزایش طول به مراتب بیشتر از کاهش مقطع است و عملاً می‌توان از تغییرات مقطع صرفنظر کرد. افزایش طول به نوبه خود موجب افزایش مقاومت الکتریکی سیم می‌گردد بنابراین در اینجا با دو اثر روبرو هستیم. یکی افزایش طول در اثر نیروی کششی و دوم افزایش مقاومت در اثر افزایش طول. در استرین گیج‌ها برای آنکه نشان دهیم در اثر یک تغییر طول چه تغییر مقاومتی در آن حاصل می‌شود ضریبی به نام فاکتور گیج را تعریف می‌کنیم که بصورت زیر بیان می‌شود:

$$G_f = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} \qquad (۱۲-۳)$$

در رابطه (۳-۱۲)، R و L به ترتیب مقاومت و طول جسم در حالت آزاد (بدون اعمال نیرو) می‌باشند. فاکتور گیج در استرین گیج‌های صنعتی حدود ۲ می‌باشد به این معنی که اگر طول جسم به اندازه ۱٪تغییر کند، مقاومت آن به اندازه ۲٪ تغییر خواهد کرد.

استرین گیج‌ها را معمولاً از سیم هائی با آلیاژ مس- نیکل می‌سازند. قطر این سیم‌ها حدود ۰/۰۲ میلیمتر است و برای آنکه در اثر یک نیروی معین تغییر طول بیشتری داشته باشیم

معمولاً آنها را بشکل زیکزاکی می‌سازند و بر روی یک صفحه پایه ارتجاعی، از جنس پلاستیک‌های مقاوم می‌چسبانند در این حالت ابعاد حاصل از چند میلی متر مربع تا چندین سانتی متر مربع می‌باشد. شکل (۳-۵۶) نمونه‌ای از استرین گیج را نشان میدهد. مقاومت استرین گیج‌ها از چند ده تا چند هزار اهم می‌باشد.

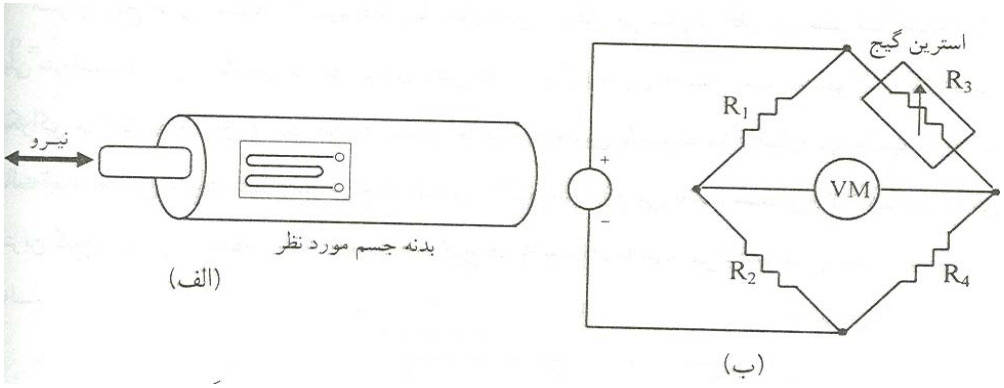


شکل (۳-۵۶) نمای کلی استرین گیج

استرین گیج‌ها به دو دسته باند شده و باند نشده تقسیم می‌شوند. شکل (۳-۵۵) نوعی استرین گیج باند نشده است چرا که یک طرف آن به جائی متصل و محکم شده و طرف دیگر آن آزاد است. از استرین گیج‌های باند نشده معمولاً فقط برای اندازه‌گیری کشش استفاده می‌کنیم.

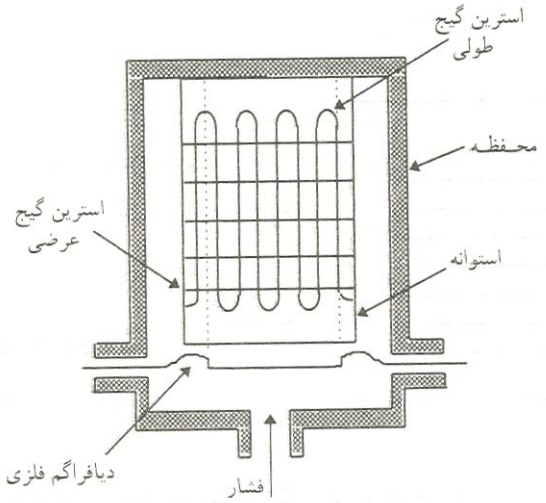
استرین گیج‌های باند شده مطابق شکل (۳-۵۷) بر روی پایه خود کاملاً محکم چسبانده شده‌اند.

برای اندازه‌گیری تنش، پایه را نیزمحکم بر روی جسم مورد نظر می‌چسبانیم. مطابق شکل ۳-۵۷ استرین گیج، پایه و جسم بطور یک پارچه به یکدیگر متصل و محکم شده‌اند و هادی‌های استرین گیج به تبعیت از تغییرات طول جسم در جهت نیرو می‌باشند. به همین دلیل به آن استرین گیج باند شده می‌گوئیم. استرین گیج‌های باند شده برای اندازه‌گیری کشش و فشار مورد استفاده قرار می‌گیرند.



شکل (۳-۵۷). اندازه‌گیری و آشکارسازی تنش با استرین گیج

شکل دیگری از استرین گیجهای باند شده مطابق شکل ۳-۵۸ می‌باشد.



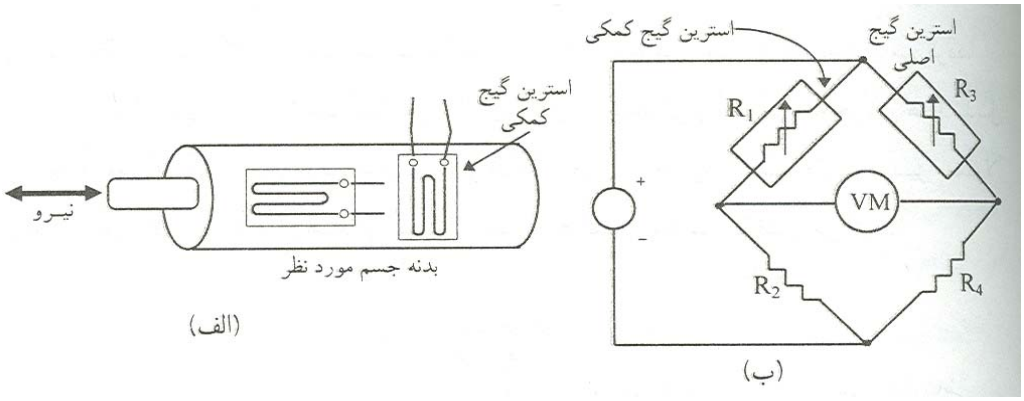
شکل (۳-۵۸) استرین گیج باند شده با خطای اندازه‌گیری کمتر

پایه این استرین گیج‌ها یک استوانه توخالی است که یک سیم‌پیچ زیکزاکی در طول استوانه به دور آن قرار گرفته و سیم‌پیچ دیگری در عرض استوانه قرار داده شده است. مطابق شکل اگر فشاری بر محور استوانه وارد شود آن را در جهت طول فشرده و در جهت عرض منبسط می‌کند و یا به عبارت دیگر ارتفاع استوانه را کم و قطر آن را افزایش می‌دهد و بدین ترتیب می‌توان فشار را از دو راه افزایش مقاومت (سیم‌پیچ عرضی) و کاهش مقاومت (سیم‌پیچ طولی) اندازه‌گیری نمود. این روش خطای اندازه‌گیری را کاهش می‌دهد و بعلاوه به طریقی که بعداً خواهیم دید خطای ناشی از تغییرات درجه حرارت را نیز حذف می‌نماید.

برای تبدیل تغییرات مقاومت الکتریکی به سیگنال الکتریکی (ولتاژ یا جریان) معمولاً از اشکال مختلف مدار پل وتسون استفاده می‌کنیم. مطابق شکل ۳-۵۷- ب معمولاً پل بگونه‌ای تنظیم می‌گردد که در حالت بدون فشار متعادل باشد.

در رابطه (۳-۱۱) مقاومت مخصوص جسم خود تابعی از درجه حرارت است بنابراین تغییرات درجه حرارت محیط نیز می‌تواند موجب تغییر مقاومت الکتریکی استرین گیج گردد و از این بابت تولید خطا در اندازه‌گیری نماید. انی اثر بخصوص هنگامیکه پروسه مورد اندازه‌گیری تولید حرارت می‌کند بسیار قابل توجه است. مثلاً هنگامیکه فشار یک سیال یا تنش‌های یک جسم گرم را اندازه‌گیری می‌نمائیم.

برای خنثی سازی اثر تغییرات درجه حرارت معمولاً از یک استرین گیج کمکی استفاده می‌کنیم. استرین گیج کمکی را مطابق شکل ۳-۵۹- الف در جهتی عمود بر استرین گیج اصلی و در نزدیکی آن قرار می‌دهیم.



شکل (۳-۵۹) خنثی سازی اثر دما در اندازه‌گیری فشار با استرین گیج

محور نیروی وارد شده بر جسم در جهت محور استرین گیج اصلی است بنابراین موجب ایجاد تنش در آن می‌گردد اما بر استرین گیج کمکی که عمود بر آن است اثری ندارد. دو استرین گیج را مطابق شکل ۳-۵۹- ب در دو بازوی پل قرار می‌دهیم.

اثرتغییرات دما با تغییر مقاومت دو بازوی پل خنثی می‌شود چرا که هر دو استرین گیج تغییرات دمای یکسانی را تجزیه می‌کنند. تغییرات نیرو نیز مانند مدار قبل فقط توسط استرین گیج اصلی اندازه‌گیری می‌شود.

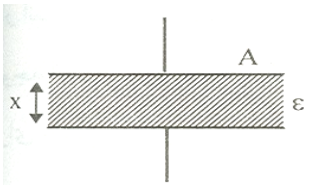
یکی از کاربردهای مهم استرین گیج‌های اندازه‌گیری نیروی وزن است. استرین گیج هائی که برای اندازه‌گیری وزن استفاده می‌شوند در صنعت به نام سلول‌های اندازه‌گیر بار یا Load cell معروفند.

یک لودسل، عنصری است که خوداز چندین استرین گیج تشکیل گردیده که در چند محور با زوایای مختلف محکم شده‌اند. یک لود سل از پایداری حرارتی خوبی نیز برخوردار است و خروجی آن بطور خطی متناسب با نیروی وزن است.

۳-٦-۳-۲ اندازه‌گیرهای ظرفیتی فشار:

یک خازن در حالت کلی مطابق شکل ۳-٦۰ می‌باشد و ظرفیت آن مطابق رابطه (۳-۱۳) بدست می‌آید:

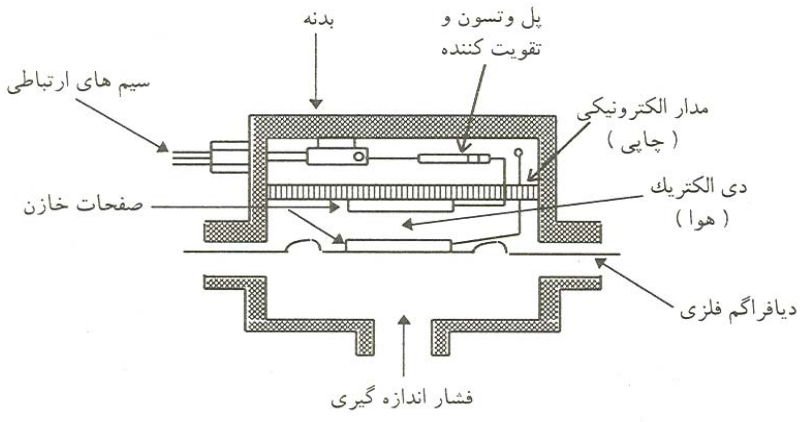
$$C = \varepsilon \frac{A}{x} \qquad (۱۳-۳)$$



شکل (۳-۶۰). اندازه‌گیری فشار از طریق ظرفیت خازنی

در رابطه (۳-۱۳)، A سطح جوشن ها، x فاصله جوشن‌ها از یکدیگر و ε ضریب دی‌الکتریک خازن می‌باشد. مطابق رابطه (۳-۱۳) تغییر هر یک از اجزاء A و x و ε موجب تغییر ظرفیت خازن می‌گردد.

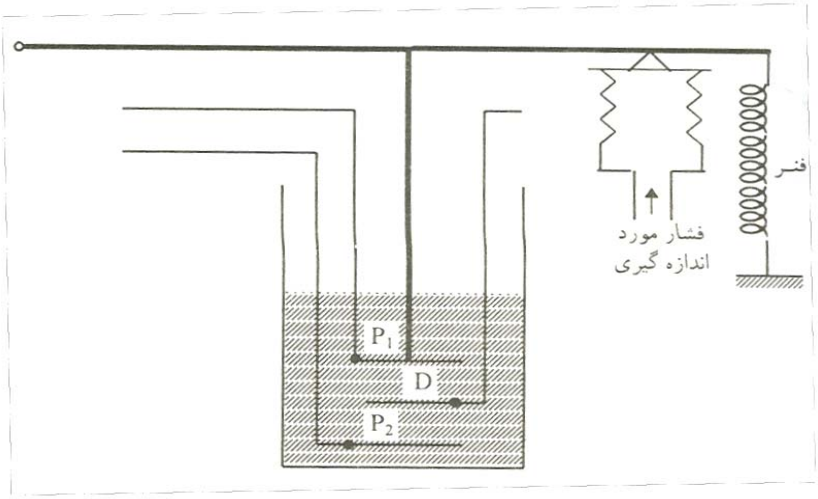
در اندازه‌گیرهای خازنی، اغلب فشار مورد اندازه‌گیری به جابجائی و تغییر فاصله جوشن‌ها تبدیل می‌شود و تغییر فاصله جوشن‌ها نیز منجر به تغییر ظرفیت خازن می‌گردد. تغییر ظرفیت نیز معمولاً توسط یک پل AC و یا یک مدار اسیلاتور تبدیل به ولتاژ یا فرکانسی متناسب با فشار می‌گردد.



شکل (۳-۶۱). اندازه‌گیر فشار خازنی

شکل ۳-٦۱ یک اندازه‌گیر فشار خازنی را نشان می‌دهد. در این اندازه‌گیر فشار موجب جابجائی دیافراگم شده و جابجائی دیافراگم نیز فاصله بین دو جوش و نهایتاً ظرفیت خازن را تغییر می‌دهد.

شکل ۳-۶۲ نیز نمونه ای قدیمی و متداول از اندازه‌گیر فشار خازنی را نشان می‌دهد.

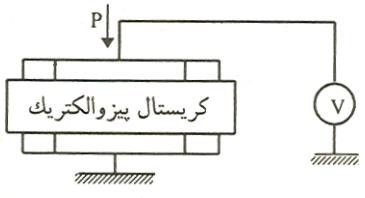


شکل (۳-۶۲) اندازه‌گیر فشار خازنی

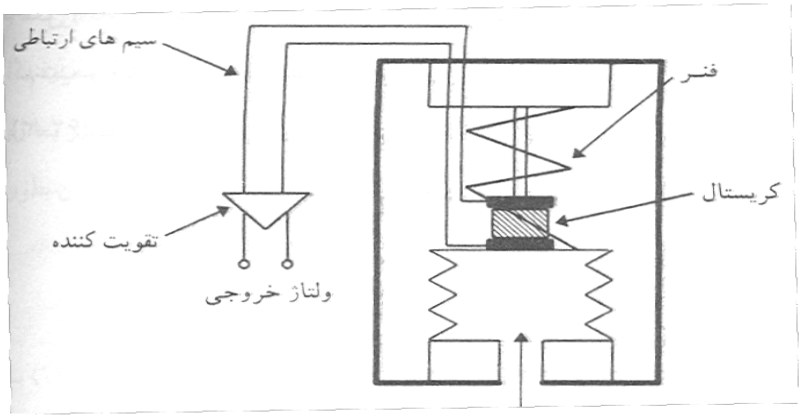
تغییرات فشار موجب جابجائی صفحه P_1 می‌شود. این امر موجب تغییر ظرفیت خازن P_1D نسبت به P_2D می‌شود. این دو خازن را می‌توان در دو بازوی یک پل وتسون قرار داد و فشار مورد اندازه‌گیری را تبدیل به یک کمیت الکتریکی نمود. در این طرح از آنجائیکه ظرفیت دو خازن با یکدیگر مقایسه می‌شوند و در واقع اندازه‌گیری دیفرانسیلی است اثرات نویز و تغییرات شرایط محیطی تا حد قابل ملاحظه‌ای حذف می‌گردند.

۳-۶-۳-۳ اندازه‌گیرهای پیزوالکتریکی فشار:

عناصر پیزوالکتریک عناصری با قابلیت تبدیل انرژی مکانیکی به الکتریکی و برعکس می‌باشند مطابق شکل ۳-۶۳ هرگاه یک عنصر پیزوالکتریک مانند کوارتز تحت فشار P قرار گیرد میلی ولتمتر ولتاژی متناسب با فشار را نشان خواهد داد. از این خاصیت برای اندازه‌گیری فشار می‌توان استفاده نمود.



شکل (۳-۶۳) اندازه‌گیر پیزوالکتریکی فشار



شکل ۳-۶۴ طرحی عملی از اندازه‌گیری پیزوالکتریکی فشار را نشان می‌دهد.

فشار مورد اندازه‌گیری از طریق دم موجب اعمال تنش مکانیکی به عنصر پیزوالکتریک می‌شود و این تنش تولید ولتاژی متناسب می‌کند. این ولتاژ توسط تقویت کننده تقویت شده و به ولتاژ DC بزرگتری تبدیل می‌گردد.

در عناصر پیزوالکتریک، پلاریته ولتاژ تولید شده متناسب به جهت فشار است به عبارت دیگر اگر عنصر تحت کشش قرار گیرد ولتاژی با پلاریته مخالف نسبت به زمانی که تحت فشار قرار گیرد تولید می‌کند.

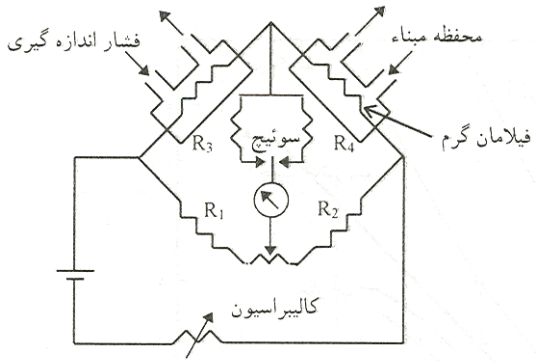
۳-۶-۴ اندازه‌گیرهای فشار در حالت‌های خالص:

اندازه‌گیری یک کمیت در محدوده یا شرایطی غیرمتعارف، مسائل و مشکلات خاصی را بوجود می‌آورد. مثلاً اندازه‌گیری فشارهای خیلی بالا یا فشارهای خیلی پائین نیاز به وسائل و تجهیزات بر طراح تحمیل می‌شود. فرض کنید بخواهیم فشار یک محفظه فعل و انفعال شیمیایی را که در محدوده‌ای کمتر از یک میلی متر جیوه تغییر می‌کند اندازه‌گیری کنیم و فرکانس تغییرات فشار نیز در حدود یک الی چندهزار هرتز باشد. یقیناً هیچ یک از طرح‌های ارائه شده قبلی پاسخ گوی نیاز ما نخواهند بود. بعنوان مثالی دیگر اندازه‌گیری فشار در تجهیزات و وسائل پزشکی همواره توأم با خواسته‌های ویژه و بعضاً ناسازگار می‌باشد و از نظر دامنه اندازه‌گیری، دقت، سرعت و ایمنی شرایط دشواری را برای طراح بوجود می آورد.

امروزه در کاربردهای صنعتی اندازه‌گیری فشارهای خیلی بالا توسط استرین گیج‌ها و مدارات مربوطه امکان پذیر گردیده است و از این نظر مشکلی وجود ندارد. مشکل اصلی اندازه‌گیری فشارهای خیلی پایین و مخصوصاً اندازه‌گیری فشارهای خیلی پائین با فرکانس نسبتاً زیاد می‌باشد. بدین منظور کمپانی‌های سازنده طرح‌های خاص خود را ارائه نموده‌اند و

معمولاً این وسائل اندازه‌گیری به نام کمپانی‌های سازنده معروف می‌باشند. در این بخش به معرفی چند نمونه از اندازه‌گیرهای فشار خیلی پائین می‌پردازیم.

۳-٦-٤-۱ فشار سنج پیرانی در شکل ۳-٦٥ آمده است.



شکل (۳-۶۵) فشار سنج پیرانی

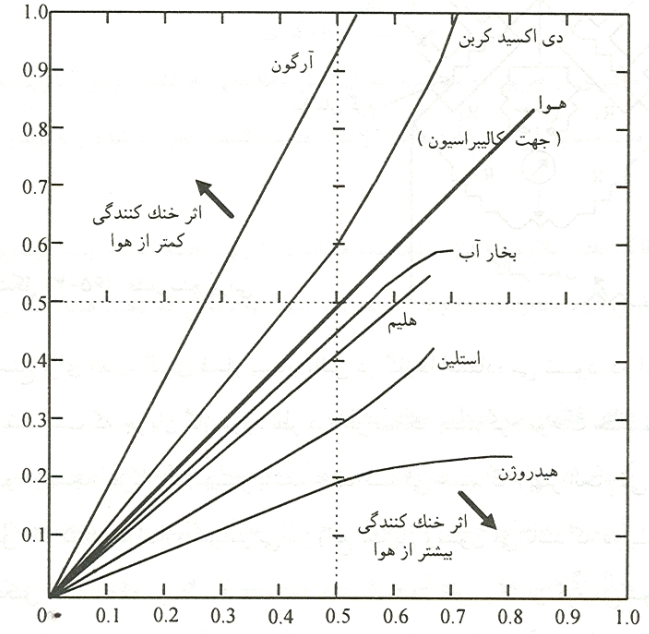
این فشارسنج برای اندازه‌گیری فشار بسیار پائین در گازها استفاده می‌شود. در اینجا اصل مورد استفاده این حقیقت است که جریان گاز مورد نظر در اطراف یک جسم گرم موجب خنک شدن آن می‌شود و هر چه فشار و در نتیجه جریان گاز بیشتر باشد، خنک کنندگی جسم گرم بهتر انجام می‌گردد.

مطابق شکل ۳-٦٥ یک اندازه‌گیری پیرانی در واقع یک پل وتسون می‌باشد که دو بازوی R_3 وR_4 آن از دو المنت تشکیل شده‌اند که توسط یک منبع تغذیه تثبیت شده بطور یکسان گرم می‌شوند. المنت R_4 در یک محفظه خلاء قرار داده شده و هیچگونه تبادل حرارتی با محیط خارج ندارد. این محفظه مبنا می‌نامیم. المنت R_3 در محفظه اندازه‌گیری قرار داده شده است و قادر به تبادل حرارتی با گاز مورد اندازه‌گیری می‌باشد. بدیهی است هر چه فشار و به عبارت دیگر جریان گاز بیشتر باشد تبادل حرارتی بهتر انجام شده و این المنت خنک‌تر می‌گردد و مقاومت الکتریکی آن نسبت به R_4 کمتر می‌شود. این امر موجب بر هم خوردن تعادل پل و عبور جریان از آمپرمتر می‌گردد و می‌توان صفحه آمپرمتر را بر حسب فشار گاز مورد اندازه‌گیری مقیاس‌بندی کرد.

کیفیت خنک‌کنندگی یک گاز علاوه بر فشار یا جریان به خواص آن گاز نیز بستگی دارد. بنابراین فشارسنجی که برای اندازه‌گیری فشار هوا کالیبره شده برای اندازه‌گیری فشار گاز دیگری قابل استفاده نیست و در صورت نیاز بایستی مجدداً برای آن گاز کالیبره شود.

برای اجتناب از کالیبراسیون‌های مکرر کمپانی سازنده معمولاً یک نمودار تصحیح کالیبراسیون ارائه می‌نماید.

شکل ۳-٦٦ نمونه‌ای از منحنی تصحیح کالیبراسیون برای فشارسنج پیرانی را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۶۶) نمودار کالیبراسیون فشارسنج پیرانی

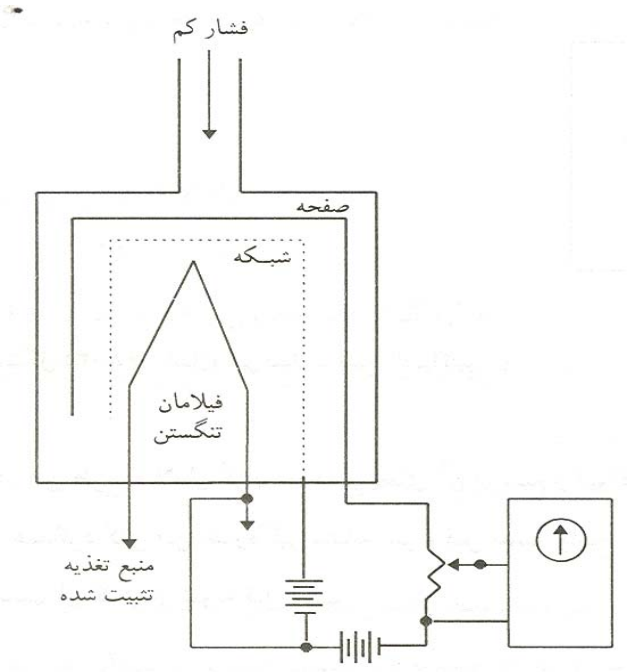
این فشار سنج با هوا کالیبره شده است، در این صورت اگر از آن مثلاً برای اندازه‌گیری فشار گاز دی‌اکسیدکربن استفاده کنیم و فشارسنج فشار ۰/۵ میلیمتر جیوه را نشان دهد، فشار واقعی با توجه به منحنی تصحیح دی‌اکسیدکربن ۰/٦ میلیمتر جیوه خواهد بود.

محدوده کار فشارسنج‌های پیرانی به کمتر از ۱ میلی متر جیوه محدود می‌گردد.

از ترمیستورها و ترموکوپل‌ها نیز برای ساخت فشارسنج هائی با استفاده از اثر خنک کنندگی استفاده می‌شود.

۳-٦-٤-۲ اندازه‌گیرهای یونی فشار:

برای اندازه‌گیری فشارهای کمتر از ۰/۱ میلیمتر جیوه از فشارسنج‌های یونی استفاده می‌کنیم. شکل ۳-٦۷ طرحی نمونه از این فشارسنج را نشان می‌دهد.

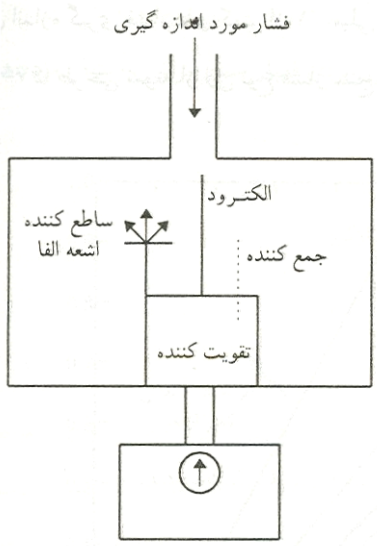


شکل (۳-۶۷). اندازه‌گیر فشاریونی

مطابق شکل گرم شدن فیلامان تشعشع الکترون از آن می‌گردد. این الکترونها به سمت شبکه که دارای پتانسیل مثبت است سرعت می‌گیرند. چون شبکه به شکل توری ساخته شده، بسیاری از این الکترونهای پرسرعت از آن عبور کرده و به ملکولهای گاز مورد اندازه‌گیری برخورد می‌کنند و آنها را یونیزه می‌نمایند. یون‌های مثبت گاز به سمت صفحه (Plate) که پتانسیل منفی دارد حرکت کرده، جریانی در آن بوجود می‌آورند. این جریان متناسب با تعداد یون‌های مثبت است و یونهای مثبت نیز مبین تراکم و حضور مولکولهای گاز می‌باشند. تراکم مولکول‌های گاز می‌باشند. تراکم مولکول‌های گاز نیز در فشارهای خیلی پائین بگونه‌ای مبین فشار گاز است.

از آنجائیکه فیلامان در دمای بالا کار می‌کند در معرض اکسیداسیون می‌باشد و بعلاوه دمای بالا ممکن است موجب واکنش شیمیائی گاز با قطعات موجود در محفظه اندازه‌گیری شود. برای رفع این مشکلات در طرحی دیگر از یک منبع رادیواکتیو برای تشعشع ذرات الفا استفاده می‌شود.

شکل ۳-۶۸ طرح کلی چنین فشارسنجی را نشان می‌دهد.



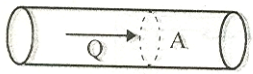
شکل (۳-۶۸). اندازه‌گیر فشار با منبع رادیواکتیو

در این طرح فیلامان گرم، حذف و بجای آن از منبع رادیواکتیو مولد ذرات پرانرژی الفا استفاده شده است. عملکرد کلی این اندازه‌گیر مشابه نمونه قبل است. پاسخ فرکانس اندازه‌گیر فشار یا اشعه الفا بهتر و حساسیت آن کمتر از نمونه قبل است.

۳-۷ اندازه‌گیرهای فلو:

در بسیاری از پروسه‌های صنعتی مایل به اندازه‌گیری و کنترل فلو یا دبی می‌باشیم. صنایع نفت و گاز، صنایع شیمیایی و پتروشیمی و صنایع غذائی مثال‌های معروفی از این موارد می‌باشند. از طرف دیگر گاهی کنترل فلو بعنوان یک کمیت اولیه منجر به کنترل کمیت اولیه منجر به کنترل کمیت دیگری بعنوان کمیت ثانویه می‌شود. بعنوان مثال می‌توان از کنترل دبی سوخت (کمیت اولیه) بمنظور کنترل درجه حرارت (کمیت ثانویه) نام برد. همچنین در مواردی کنترل سطح سیال در مخزن و یا کنترل فشار، از طریق کنترل فلو انجام می‌گردد. به دلایل فوق اندازه‌گیری فلو در کنترل صنعتی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

فلو یا دبی بصورت حجمی یا جرمی در نظر گرفته می‌شود. برای روشن تر شدن مطلب شکل ۳-۶۹ را در نظر بگیرید:



شکل (۳-۶۹). بیان دبی حجمی از میان یک لوله

در این شکل سیال از لوله‌ای به مقطع A و در حال عبور است. دبی حجمی مقدار حجم سیال است که در واحد زمان از یک مقطع لوله عبور کرده و بطور مشابه دبی جرمی مقدار جرمی است که در زمان از آن عبور می‌نماید. اگر سرعت سیال v و جرم مخصوص آن ρ باشد دبی حجمی و جرمی به سادگی از روابط زیر بدست می‌آیند:

$Q=V.A$ دبی حجمی

$Q= \rho.V.A$ دبی جرمی

در اغلب پروسه‌ها A و ρ معلوم هستند و بنابراین فلو اندازه‌گیری حجمی یا فلو جرمی مترادف با اندازه‌گیری سرعت سیال می‌باشد. چرا که با اندازه‌گیری سرعت و داشتن A و ρ می‌توان با استفاده از روابط (۳-۱٤) و (۳-۱۵) دبی مربوطه را بدست آورد.

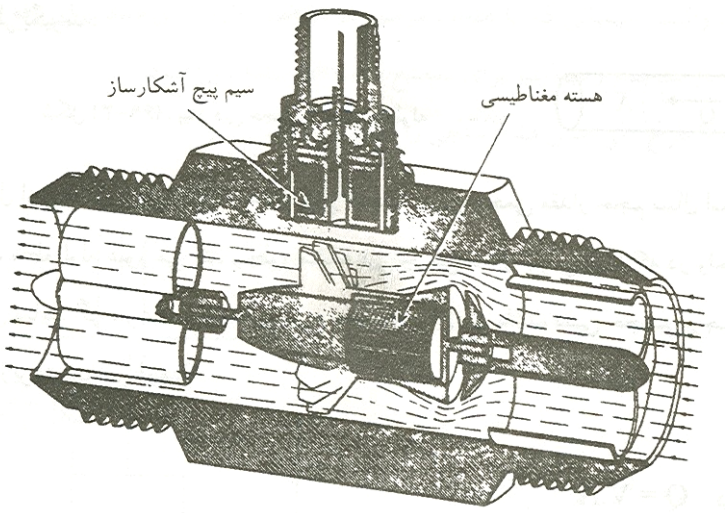
بنابراین اکثر فلومترها در واقع نوعی اندازه‌گیر سرعت سیال می‌باشند.

۳-۷-۱ فلومتر توربینی

شکل ۳-۷۰ یک فلومتر توربینی را نشان می‌دهد. مطابق شکل یک توربین در مسیر سیال در حال حرکت قرار گرفته است. طرف دیگر توربین متصل به یک هسته مغناطیسی است. در مقابل هسته و در پوسته خارجی فلومتر سیم‌پیچ آشکارساز قرار دارد. عبور هسته مغناطیسی از مقابل سیم‌پیچ موجب القاء نیروی محرکه در آن می‌شود. هر چه سرعت سیال بیشتر باشد، چرخش توربین و در نتیجه سرعت چرخش هسته مغناطیسی بیشتر می‌شود و نیروی محرکه بزرگتری در سیم‌پیچ القاء می‌گردد.

در طرح‌های جدید هسته و سیم‌پیچ آشکار ساز را بگونه‌ای می‌سازند که سرعت سیال تبدیل به فرکانس پالس می‌شود و با شمارش پالس‌ها و میانگین‌گیری توسط مدارات مربوطه، سرعت سیال و بدنبال آن فلو حجمی یا جرمی را بدست می‌آورند.

این فلومترها برای اندازه‌گیری فلوی سیال‌های تمیز مناسب می‌باشند و در صورتیکه سیال دارای ذرّات و ناخالصی‌های معلق و چسبنده باشد، اندازه‌گیری با مشکلاتی روبرو خواهد شد. همچنین این فلومتر می‌بایستی در مسیر لوله‌های مستقیم نصب گردد.

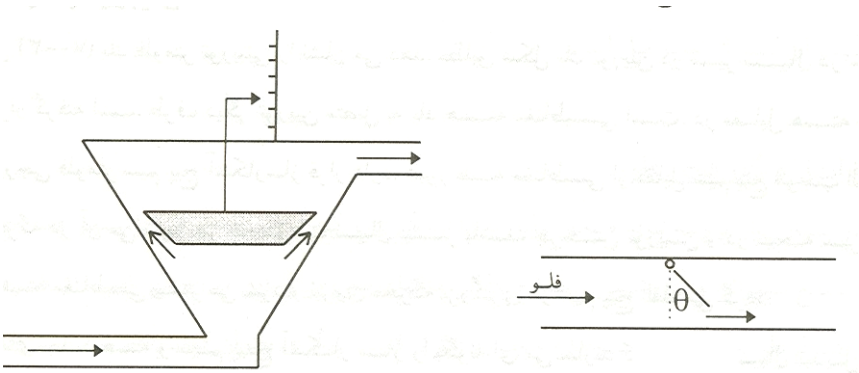


شکل (۳-۷۰) اندازه‌گیر فلو توربینی

اشکال عمده این فلومترها ایجاد مزاحمت و اخلال در حرکت طبیعی سیال می‌باشد و ممکن است خود باعث تغییر فلوی مورد اندازه‌گیری شوند. خوردگی و نیاز به تعمیرات از معایب دیگر آنها می‌باشند همچنین این فلومترها برای اندازه‌گیری جریان‌های کم مناسب نمی باشند.

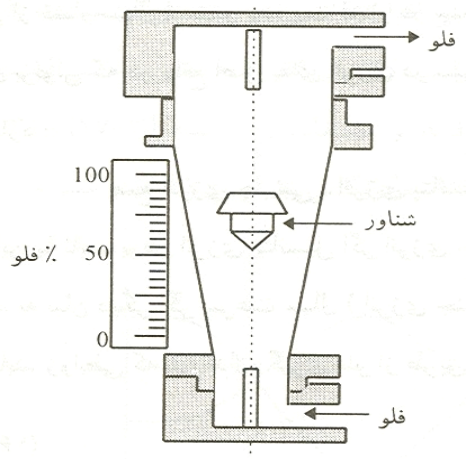
۳-۷-۲ فلومتر با مقطع متغییر (Rotameter):

شکل (۳-۷۱) دو طرح کلی روتامتر را نشان می‌دهد:



شکل (۳-۷۱). دو طرح کلی از روتامتر

طرح (الف) از یک محفظه که مقطع آن به پایین به بالابیشتر می‌شود تشکیل شده هر چه مقدار جریان (دبی حجمی) بیشتر باشد شناور در قسمت بالاتری قرار می‌گیرد. بنابراین محل قرار گرفتن شناور و نشان دهنده متصل به آن متناسب با دبی مورد اندازه‌گیری است. شکل (۳-۷۲) نمونه واقعی از این نوع را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۷۲). فلومتر با مقطع متغیر (روتامتر)

از روتامتر برای اندازه‌گیری فلوی گازها نیز می‌توان استفاده نمود. محفظه روتامتر را می‌توان از شیشه یافلز ساخت. در مواردی که سیال مورد اندازه‌گیری قابل اشتعال یا خطرناک باشد از محفظه فلزی استفاده می‌کنیم. در این حال حرکت شناور دیگر قابل رؤیت نمی باشد و برای آشکارسازی موقعیت آن باید از روش‌های دیگری استفاده نمود.

طرح‌های فوق ساده بوده و قطعات و متعلقات کمی دارند و بعلاوه استهلاک آنها نیز ناچیز است.

۳-۷-۳ اندازه‌گیری فلو از طریق فشار:

گاهی اوقات می‌توان یک کمیت را از طریق کمیتی مرتبط با آن اندازه‌گیری نمود. اندازه‌گیری فلو مترادف با اندازه‌گیری سرعت است و اندازه‌گیری سرعت معمولاً نیاز به اجزاء و قطعات مکانیکی و متحرک دارد که بدنبال آن استهلاک و نیاز به تعمیر و سرویس مطرح می‌گردد. با اندازه‌گیری فلو از طریق فشار می‌توان اجزاء و قطعات متحرک را حذف نموده و دوام و استحکام اندازه‌گیر را بالا برد. بعلاوه چنین طرحی معمولاً ساده‌تر و ارزانتر می‌باشد.

یک سیال تحت فشار و در حال حرکت در یک لوله دارای سه نوع انرژی است. انرژی پتانسیل، انرژی جنبشی و انرژی فشاری.

انرژی پتانسیل نسبت به سطح مبنا سنجیده می‌شود و اگر لوله افقی باشد ثابت است. انرژی جنبشی، ناشی از حرکت و جریان سیال است و متناسب با مجذور سرعت می‌باشد. انرژی فشاری نیز ناشی از فشار سیال است و بصورت فشار در سیال ذخیره می‌شود.

قانون برنولی که در واقع اصل بقای انرژی در سیالات است رابطه این انرژی‌ها را به صورت زیر بیان می‌دارد:

" جمع انرژی جنبشی، انرژی پتانسیل و انرژی فشاری در یک سیال ثابت است"

بنابراین با ثابت بودن انرژی پتانسیل اگر انرژی جنبشی افزایش یابد آنگاه انرژی فشاری کاهش خواهد یافت. به بیان دیگر اگر سرعت سیال (انرژی جنبشی) را افزایش دهیم، فشار (انرژی فشاری) کاهش می‌یابد. روابطی که در اندازه‌گیری فلو از طریق فشار مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از:

$$V = K.\sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \qquad (۱۶-۳)$$

$$Q = K.A\sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}} \qquad (۱۷-۳)$$

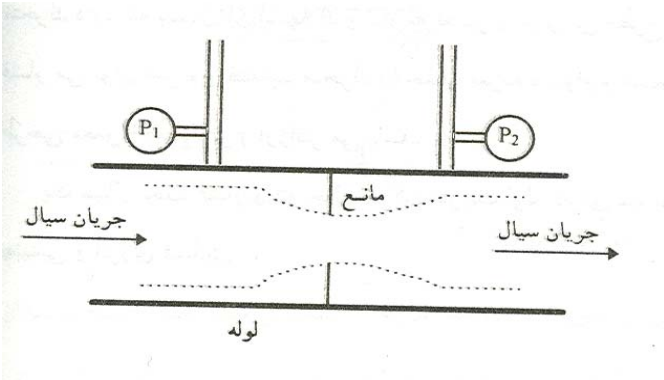
$$M = K.A\sqrt{\rho \Delta P} \qquad (۱۸-۳)$$

در رابطه فوق K، ضریب ثابت است، Q و M به ترتیب دبی حجمی و دبی جرمی می‌باشند، ρ چگالی سیال است و A سطح لوله‌ای است که سیال از آن عبور می‌کند. ΔP نیز اختلاف فشار می‌باشد.

برای اندازه‌گیری فلو از طریق فشار می‌توان روابط فوق را در طرح هائی گوناگون مورد استفاده قرار داد که در اینجا به چند نمونه آن اشاره می‌کنیم:

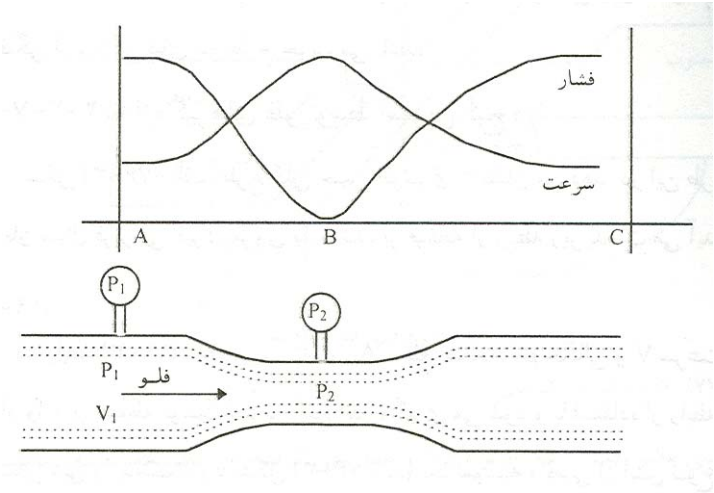
۳-۷-۳-۱ فلومتر لوله وانتوری و دال (Venturi-dall-tubes):

طرح کلی یک فلومتر و لوله وانتوری در شکل ۳-۷۳ آمده است.



شکل (۳-۷۳) فلومتر وانتوری

در این طرح در مسیر عبور سیال در داخل لوله یک مانع بصورت روزنه (Orifice) ایجاد می‌کنیم. دبی حجمی سیال در سراسر لوله ثابت است بنابراین سرعت سیال بلافاصله بعد از خروج از روزنه افزایش می‌یابد تا دبی حجمی را ثابت نگه دارد و این به معنی افزایش انرژی جنبشی در سمت راست روزنه است و اصل برنولی لازم می‌دارد تا فشار در سمت راست کاهش یابد. این امر موجب اختلاف فشار در دو طرف روزنه می‌شود. با اندازه‌گیری اختلاف فشار و استفاده از روابط (۳-۱۷) و (۳-۱۸) می‌توان دبی حجمی یا جرمی را محاسبه نمود. شکل (۳-۷٤) چگونگی تغییرات فشار و سرعت را در طول لوله نشان می‌دهد.



شکل (۳-۷۴) تغییرات سرعت و فشار در لوله وانتوری

فشار و سرعت سیال در قبل از روزنه عادی و به ترتیب برابر P_1 و V_1 می‌باشند. به محض رسیدن به روزنه مقطع عبور کوچک می‌شود و برای ثابت ماندن دبی سرعت می‌بایستی افزایش یابد و این امر طبق قانون برنولی منجر به افت فشار در مجاورت سمت راست روزنه می‌شود. در نقطه‌ای مانند B، سرعت سیال ماکزیمم و فشار آن مینیمم است (P_2). محل نقطه B بستگی به نسبت قطر روزنه به قطر داخلی لوله دارد. مطابق نمودار در فاصله‌ای دورتر از سمت راست روزنه فشار و سرعت مجدداً به حوالی مقدار عادی در سمت چپ می‌رسند. با اندازه‌گیری P_1 و P_2 و محاسبه $\Delta p = P_1-P_2$ و استفاده از رابطه (۳-۱۷) یا (۳-۱۸) می‌توان دبی سیال را تعیین نمود. در طرح این گونه فلومترها نسبت قطر روزنه به قطر لوله را برای مایعات حدود ۰/۱۵ الی ۰/۷۵ و برای گازها حدود ۰/۰۲ الی ۰/۰۷ می‌گیریم. شکل مانع و چگونگی نصب آن در مسیر لوله دارای اهمیت است. مانع معمولاً بصورت روزنه (Orifice) شکل (۳-۷۵- الف) یا بصورت نازل شکل ۳-۷۵- ب و یا بصورت لوله وانتوری شکل ۳-۷۵- ج ساخته می‌شود. اثر لوله وانتوری در مختل کردن جریان سیال و تلفات انرژی کمتر از دو نمونه دیگر است اما قیمت آن نیز بیشتر می‌باشد.

شکل (۳-۷۵). انواع مانع برای اندازه‌گیری فلو

وجود ذرّات معلق در جریان سیال ممکن است موجب گرفتگی روزنه شود. بنـابراین امکـان رفع سریع گرفتگی از ویژگی‌های یک طرح خوب می‌باشد.

۳-۷-۳-۲ اندازه‌گیرهای فلو توسط استرین گیج:

شکل ۳-۷۶- الف طرح کلی چنین فلومتری را نشان می‌دهد. در این طرح صفحه کـوچکی در برابر جریان سیال قرار می‌گیرد. نیروی وارد شده بر صفحه از رابطه زیر بدست می‌آید:

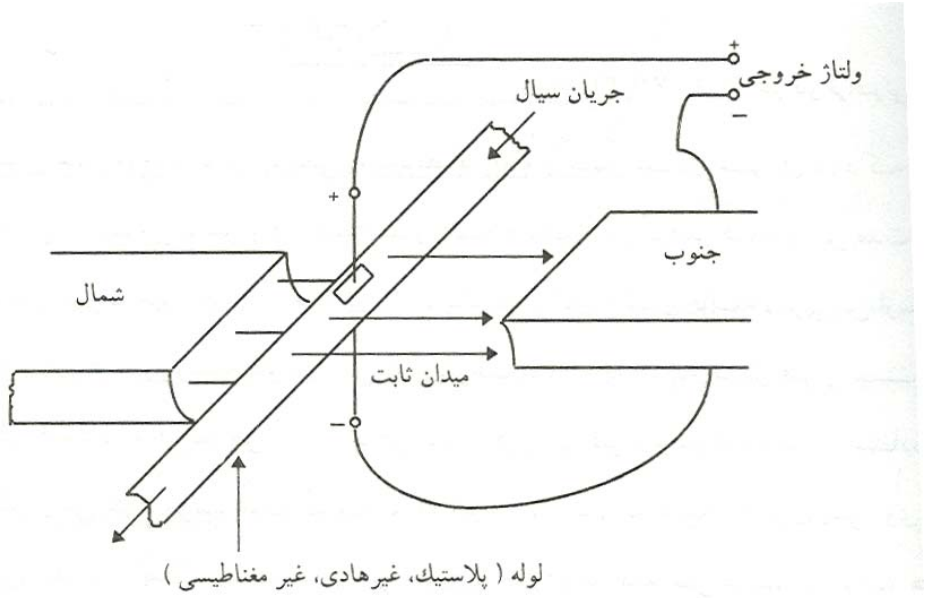
$$F = K.A.\rho.V^2 \qquad (۱۹-۳)$$

در رابطه (۳-۱۹)، K ضریب ثابت، A سطح صفحه، ρ چگالی و V سرعت سـیال مـی‌باشـند. نیرو یا فشار وارد بر صفحه توسط گیج اندازه‌گیری مـی‌شـود و بـا اسـتفاده از رابطـه (۳-۱۹) می‌توان سرعت و سپس دبی را بدسـت آورد. شـکل ۳-۷۶- ب یـک نمونـه واقعـی از ایـن نـوع فلومتر ساخت کمپانی Ramupo را نشان می‌دهد. این طرح مشکل گرفتگی روزنه در طرح قبل را ندارد و برای اندازه‌گیری فلوی سیال هائی با فشار و دمای بالا و با ذرّات معلق می‌تواند مـورد استفاده قرار می‌گیرد. بعلاوه با کوچکتر سـاختن صـفحه حسـاس، مـی‌تـوان اثـرات اخـلال در جریان طبیعی سیال و افت انرژی را نیز کاهش داد.

شکل (۳-۷۶) اندازه‌گیر فلو توسط استرین گیج

۳-۷-۴ اندازه‌گیر فلو اثر هال (Hall-Effect):

برای اندازه‌گیری جریان سیالاتی که دارای یون‌های آزاد می‌باشند می‌توان از پدیده هال استفاده نمود. در این گونه سیالات، حرکت سیال معادل با حرکت بارهای الکتریکی است و حرکت بارها نیز به منزله جریان الکتریکی می‌باشد. طرح کلی چنین فلومتری مطابق شکل ۳-۷۷ است.



شکل (۳-۷۷) اندازه‌گیر فلو اثر هال

در اینجا یک میدان مغناطیسی یکنواخت از خارج لوله بر آن اعمال می‌گردد و از آنجائیکه عبور یونها از داخل لوله معادل یک جریان الکتریکی از میان میدان است از طرف میدان نیروئی بر بارها وارد می‌شود که اندازه و جهت آن از رابطه زیر بدست می‌آید:

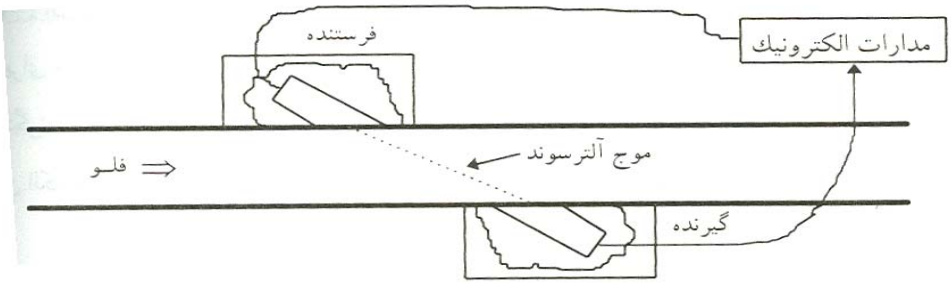
$$\vec{F} = q.\vec{V} \times \vec{B} \qquad (۲۰-۳)$$

در اثر این نیرو یون‌های مثبت به سمت بالا و یون‌های منفی به سمت پائین رانده می‌شوند و یک پتانسیل در جهت نشان داده شده ایجاد می گردد. این ولتاژ اثر هال می‌گوئیم که متناسب با جریان یا همان سرعت سیال می‌باشد.

مزیت مهم فلومتر اثر هال در این است که هیچگونه تأثیری در کمیت مورد اندازه‌گیری ندارد ولی شرط استفاده از آن یونی بودن سیال می‌باشد.

۳-۷-۵ اندازه‌گیر فلوالسترسونیک:

طرح کلی این اندازه‌گیرها مطابق شکل ۳-۷۸ می‌باشد.
در اینجا فرستنده موج فراصوت در یک لوله و گیرنده آن در طرف دیگر قرار می‌گیرند.



شکل (۳-۷۸) اندازه‌گیرفلو فراصوتی

مدت زمان عبور موج از لوله بستگی به مشخصات لوله و جنس سیال عبور دارد که در یک اندازه‌گیری خاص، ثابت می‌باشند و در کالیبراسیون دستگاه منظور می‌گردند. همچنین این مدت زمان بستگی به جهت و سرعت عبور سیال درلوله نیز دارد. بنابراین با اندازه‌گیری فاصله زمانی بین ارسال موج توسط فرستنده و گیرنده هر دو در یک طرف لوله قرار می‌گیرند و سرعت سیال با استفاده از اثر دوپلر اندازه‌گیری می‌شود. مزیت عمده این گونه اندازه‌گیرها این است که هیچگونه اثری بر روی کمیت مورد اندازه‌گیری ندارند. و بعلاوه از دقت و سرعت خوبی برخوردارند. البته این مزیت دربرابر هزینه و پیچیدگی بیشتر بدست می‌آید.

۳-۷-۶ اندازه‌گیر فلو مواد جامد:

مواد جامد معمولاً توسط نوارهای نقاله جابجا می‌شوند. ماسه، خاک، چغندر قند، گندم، سیمان و انواع پودرها و ... نمونه هائی از این قبیل می‌باشند. فلو مواد جامد می‌تواند بصورت حجمی یا جرمی اندازه‌گیری شود.

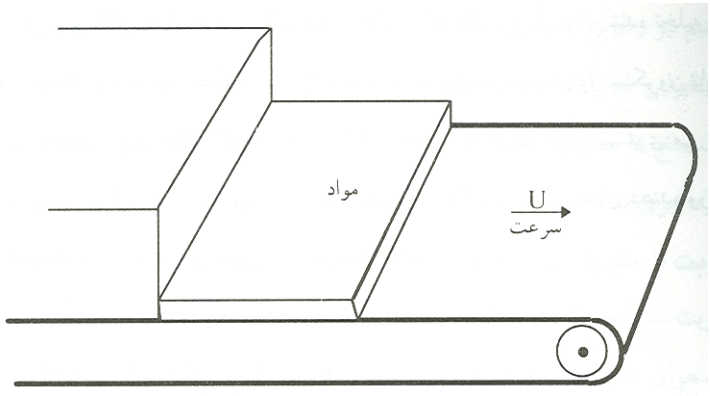
اندازه‌گیری دبی حجمی در صورتیکه حجم مواد موجود بر واحد طول (V) نوار نقاله مشخص باشد به سادگی با داشتن سرعت نوار (U) نقاله طبق رابطه زیر مشخص می‌شود:

دبی حجمی

$$Q = V.U \quad m^3/s$$

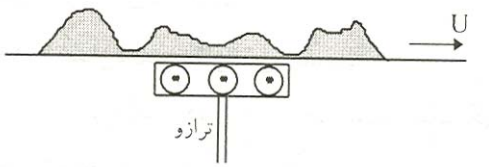
برای اندازه‌گیری دبی وزنی، می‌باید وزن ماده موجود بر واحد طول (M) نوار نقاله را تعیین نمود و سپس از رابطه زیر استفاده کرد:

$Q = M.U \quad {}^{kg}/_{s}$ دبی وزنی



شکل (۳-۷۹) اندازه‌گیری فلو مواد جامد منظم

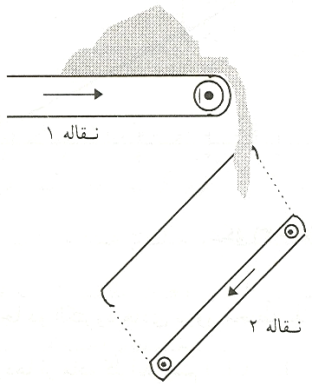
در صورتی که چگالی ماده مشخص باشد، از طریق اندازه‌گیری دبی وزنی میتوان دبی حجمی را نیز بدست آورد. برای وزن کردن می‌توان از یک ترازو مطابق طرح کلی شکل ۳-۸۰ استفاده نمود:



شکل (۳-۸۰) وزن کردن مواد جامد در حال عبور

معمولاً چون مواد جامد به شکل نامنظمی بر روی نوار نقاله قرار می‌گیرند دبی لحظه‌ای متغیر است بنابراین با استفاده از یک مدار انتگرال گیر دبی متوسط اندازه‌گیری می‌شود.

وزن کردن مواد در حال حرکت در روی نوار نقاله روش‌ها و مشکلات مربوط به خود را دارد. برای اجتناب از این امر می‌توان طرحی مطابق شکل ۳-۸۱ را بکار برد.



شکل (۳-۸۱) طرحی برای اندازه‌گیری وزن مواد در حال حرکت

در این شکل نقاله ۱ مواد را بر روی نقاله ۲ که عمود بر آن شده تخلیه مـی‌کنـد. نقالـه ۲ بـا سرعتی ثابت توسط موتور سنکرون حرکت می‌کند. چون سرعت موتور سنکرون ثابـت اسـت هر چه وزن مواد تخلیه شده بر روی نقاله ۲ بیشتر باشد موتور مجبور به تولید کوپل بیشتری می‌شود. بنابراین کوپل ایجاد شده توسط موتور که به روش‌های مختلف قابل اندازه‌گیری است نشان دهنده وزن مواد است و با داشتن سرعت نقاله می‌توان دبی وزنی را بدست آورد.

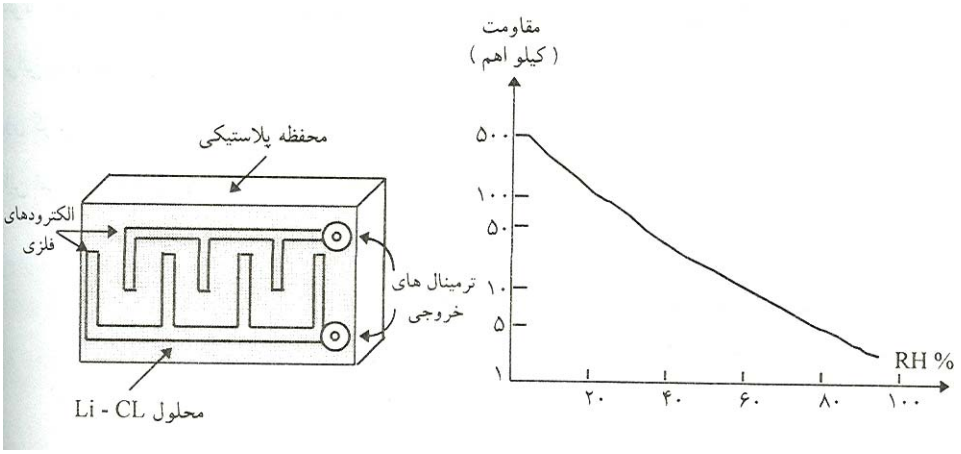
۳-۸ اندازه‌گیرهای رطوبت:

در بسیاری از فرآیندهای صنعتی، مایل به اندازه‌گیری رطوبت می‌باشیم. گاهی اندازه‌گیـری رطوبت در یک محیط مورد نظر است زمانی اندازه‌گیری رطوبت در یـک محصـول مـورد نظـر می‌باشد.

رطوبت در یک محیط بصورت رطوبت نسبی (RH) انـدازه‌گیـری مـی‌شـود و رطوبـت یـک محصول نیز بصورت مطلق اندازه‌گیری می‌گردد.

۳-۸-۱ اندازه‌گیر مقاومتی رطوبت:

در این نوع اندازه‌گیر، از تغییرات الکتریکی یک عنصر حساس به رطوبت استفاده مـی‌شـود شکل ۳-۸۲ طرح کلی چنین رطوبت سنجی را نشان می‌دهد:



شکل (۳-۸۲) اندازه‌گیر مقاومتی رطوبت

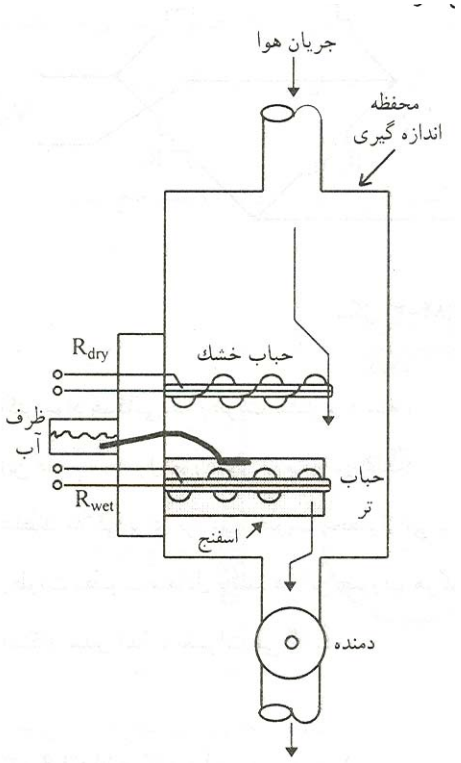
در اینجا دو الکترود هادی درون محفظه پلاستیکی با فاصله‌ای از یکدیگر قرار گرفته‌اند. فضای بین الکترودها از ماده کلراید لیتیم (Li-CL) که جاذب رطوبت است پر شده است. اگر رطوبت محیط افزایش یابد، ماده کلراید لیتیم نیز رطوبت بیشتری را جذب می‌کند و در نتیجه مقاومت الکتریکی بین الکترودها کاهش می‌یابد. بنابراین تغییرات مقاومت الکتریکی مقیاسی برای تغییرات رطوبت نسبی در محیط می‌باشد. این رطوبت سنج‌ها معمولاً قادر به اندازه‌گیری محدوده کامل یعنی ۰٪ تا ۱۰۰٪ نمی باشند و حد بالای اندازه‌گیری به ۹۰٪ محدود می‌گردد.

۳-۸-۲ اندازه‌گیر رطوبت از طریق دما (Psychrometer):

ساختمان کلی این رطوبت سنج‌ها مطابق شکل ۳-۸۳ می‌باشد. در این طرح با مقایسه دمای دو حباب خشک و تر، رطوبت هوای عبوری اندازه‌گیری می‌شود.

اختلاف دمای حباب خشک و تر °C

	17.2	15	12.2	9.5	6.7	3.9
4.5	92	60	_	_	_	_
10	93	68	38	12	_	_
15.5	94	73	49	26	6	_
21.1	95	77	55	37	20	3
26.7	96	79	61	44	29	16
32.3	96	81	65	50	36	24
37.8	96	83	68	54	42	31

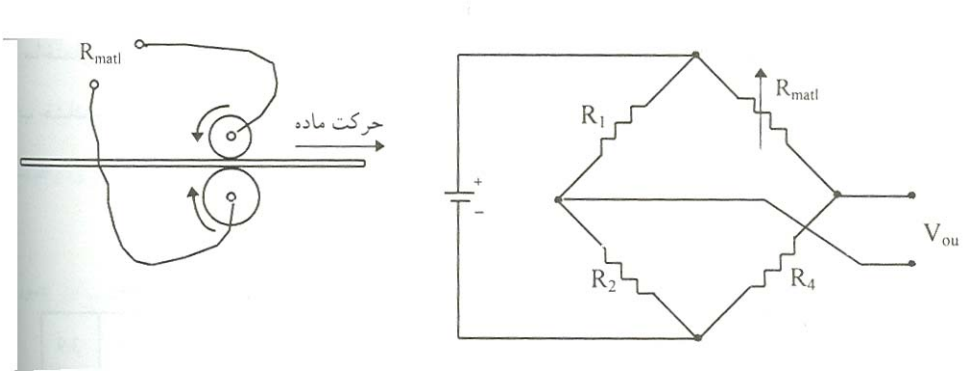


شکل (۳-۸۳). اندازه‌گیر رطوبت از طریق گرما

مطابق شکل هوای محیط به داخل محفظه دمیده می‌شود اندازه‌گیر دمای بالائی دمای هوای محیط را نشان می‌دهد. در این حال اندازه‌گیر پائینی که در حبابی کاملاً خیس قرار گرفته، دمائی کمتر از مقدار بالائی را اندازه‌گیری می‌کند زیرا جریان هوا موجب تبخیر رطوبت اسفنج و خنک تر شدن حباب خیس می‌شود. میزان تبخیر رطوبت اسفنج بستگی به رطوبت هوای عبوری دارد زیرا هوای خشک قادر به تبخیر بیشتر و هوای مرطوب قادر به تبخیر کمتری است. با دانستن دمای حباب خشک و اختلاف دمای دو حباب خشک و تر، رطوبت نسبی را مطابق جدول ۳-۸۳- ب می‌توان بدست آورد.

۳-۸-۳ اندازه‌گیر رطوبت مطلق در محصول:

در بعضی موارد به تنظیم رطوبت در یک محصول می‌باشیم. در این حالت اندازه‌گیری و بیان رطوبت چندان مورد نظر نیست بلکه می‌خواهیم مطمئن باشیم که میزان رطوبت موجود در محصول بیشتر یا کمتر از حد مطلوب نباشد. شکل ۳-۸٤ طرح کلی یک اندازه‌گیر رطوبت مطلق را نشان می‌دهد:



شکل (۳-۸۴). اندازه‌گیری رطوبت مطلق

اکثر مواد هنگامی بیشتری داشته باشند، مقاومت الکتریکی کمتری از خود نشـان مـی‌دهنـد، در این طرح محصول مورد نظـر از میـان دو غلطـک هـادی عبـور مـی‌کنـد. بنـابراین مقاومـت الکتریکی بین دو غلظت ملاکی برای بررسی رطوبت محصول می‌باشد. پل وتسون را بگونـه‌ای تنظیم می‌کنیم که به ازای رطوبت مطلوب متعادل باشد. دراین صورت هر گونه موجـب بـر هـم خوردن تعادل پل و آشکار شدن اندازه تغییرات می‌گردد.

۳-۹ اندازه‌گیرهای سرعت (Tachometers):

سرعت یکی دیگر از کمیت‌های بسیار متداول در صنعت می‌باشد که برای اندازه‌گیری آن از تاکومتر (سرعت‌سنج) استفاده می‌کنیم. تاکومترها در واقع ژنراتورهای کوچکی هسـتند کـه بـه دو دسته کلی تقسیم می‌شوند:

الف) تاکومترهای دامنه

ب) تاکومترهای فرکانس

در تاکومترهای دامنه، دامنه ولتاژ خروجی متناسب با خروجی متناسـب بـا سـرعت مـورد اندازه‌گیری می‌باشد.در تاکومترهای فرکانس، فرکانس ولتاژ خروجی با سرعت متناسب است.

۳-۹-۱ تاکومتر DC:

یک تاکومتر DC ژنراتور جریان مستقیم ساده و کوچکی است که رابطه ولتـاژ ترمینـال آن V_T با سرعت N بصورت زیر است:

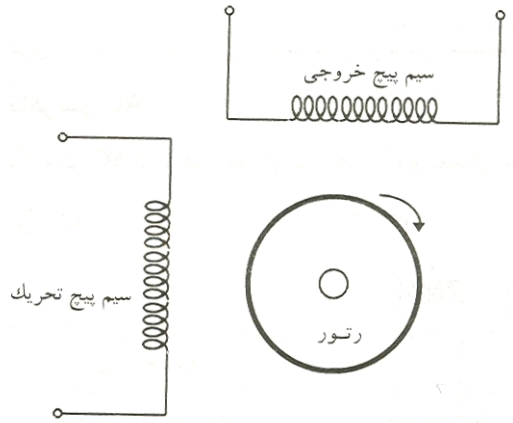
$$V_T = K_g.N$$

در رابطه فوق K_g را ضریب تاکومتر می‌گوئیم. استاتور تاکومترهای DC معمولاً آهن ربـای طبیعی است. پلاریته ولتاژ خروجی با تغییر جهت سرعت، عوض می‌شود و از این نظر شـرایط

خوبی را برای مدارهای اندازه‌گیری و کنترل فراهم می‌آورد. حسن دیگر این اندازه‌گیرها سادگی و ارزانی آنها است.

۳-۹-۲ تاکومتر دوفاز:

طرح کلی یک تاکومتر دوفاز در شکل ۳-۸۵ آمده است این تاکومتر دارای دو سیم‌پیچ است.



شکل (۳-۸۵) سرعت سنج دو فاز

یکی سیم‌پیچ تحریک که معمولاً توسط ولتاژ ۵۰ac هرتز تغذیه می‌شود و دیگری سیم‌پیچ خروجی که با زاویه ۹۰ درجه نسبت به سیم‌پیچ تحریک قرار گرفته است. رتور این ژنراتور یک استوانه توخالی است. میدان مغناطیسی ناشی از سیم‌پیچ باعث القاء جریان ادی(Eddy-current) در رتور می‌گردد. این جریان به نوبه خود میدانی بوجود می‌آورد که موجب القاء ولتاژ در سیم‌پیچ خروجی می‌گردد که دامنه آن متناسب با سرعت چرخش رتور است. بدیهی است که فرکانس ولتاژ القائی برابر فرکانس ولتاژ تغذیه می‌باشد. فاز ولتاژ القائی نیز بسته به جهت چرخش رتور، ۹۰ درجه نسبت به ولتاژ تغذیه پیش یا پس فاز است.

این تاکومترها را بدلیل شکل رتور آن، گاهی Drag-Cup-Tachometr نیز می‌نامند. دو تاکومتری که معرفی شدند تاکومتر دامنه می‌باشند، چرا که دامنه ولتاژ خروجی در آنها متناسب با سرعت مورد اندازه‌گیری می‌باشد. معایب اصلی تاکومترهای دامنه را می‌توان بصورت زیر برشمارد:

بار شدن تاکومتر بعبارت دیگر افت ولتاژ در سیم‌پیچ خروجی موجب وارد شدن خطا در اندازه‌گیری می‌شود.

تغییرات دما و شرایط کار، خواص تاکومتر را تغییر می‌دهد.

لرزش شفت و تنش‌های مکانیکی موجب بروز خطا در اندازه‌گیری می‌شود.

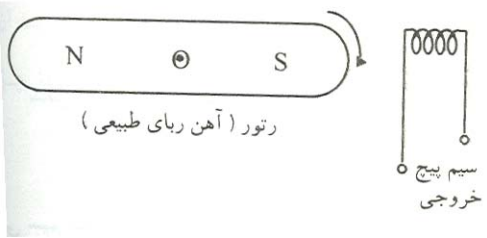
نویزهای دامنه که در محیط‌های صنعتی زیاد هستند اندازه‌گیری را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهند.

خاصیت غیرخطی و اشباع شوندگی مدارهای مغناطیسی رفتاری غیرخطی در تاکومترهای دامنه بوجود می‌آورد.

به دلایل فوق در بسیاری موارد از تاکومترهای فرکانس استفاده می‌کنیم.

۳-۹-۳ تاکومتر AC:

یک تاکومتر AC در واقع یک ژنراتور ac ساده و معمولی می‌باشد که طرح کلی آن مطابق شکل ۳-۸٦ می‌باشد.



شکل (۳-۸۶) طرح کلی تاکومتر AC

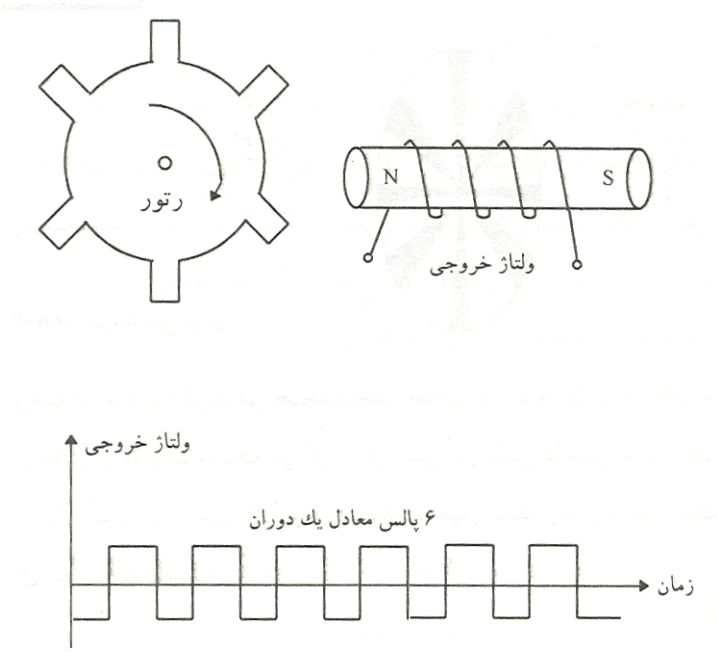
در این طرح، رتور یک آهن ربای طبیعی است و فرکانس ولتاژ القائی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$f = \frac{PN}{60}$$

در رابطه فوق f فرکانس ولتاژ خروجی، P تعداد زوج قطب و N سرعت چرخش بر حسب دور بر دقیقه (r.p.m) می‌باشد.

۳-۹-۴ تاکومتر با رتور دندانه‌ای:

ساختمان این تاکومتر در شکل ۳-۸۷ نشان داده شده است.



شکل (۳-۸۷). سرعت سنج با رتور دندانه‌ای

رتور این تاکومتر بصورت دندانه‌ای و از فلز فرومغناطیس ساخته شده می‌شود. استاتور نیز از یک آهن‌ربای طبیعی و یک سیم‌پیچ تشکیل شده است. هنگامی که یک دندانه به نزدیکی آهن‌ربا می رسد رلوکتانس مدار مغناطیسی کاهش یافته و شدت میدان مغناطیسی افزایش می‌یابد و هنگامی که دندانه‌ای مقابل آهن‌ربا می‌رسد رلوکتانس مدار مغناطیسی کاهش یافته و شدت میدان مغناطیسی افزایش می‌یابد و هنگامی که دندانه ای مقابل آهن‌ربا نباشد میدان مغناطیسی کاهش می‌یابد. افزایش و کاهش میدان موجب القاء ولتاژ در سیم‌پیچ می‌گردد. بطوریکه با گذشت هر دندانه ازمقابل آهن‌ربا یک پالس ولتاژ در سیم‌پیچ بوجود می‌آید. در شکل فوق برای رتوری با شش دندانه رابطه فرکانس ولتاژ القاء شده با سرعت چرخش رابطه زیر بدست می‌آید:

$$f = \frac{N_{(r.p.m)}}{10}$$

این تاکومتر نسبت به سایر تاکومترهای مولد فرکانس، متداول تر است.

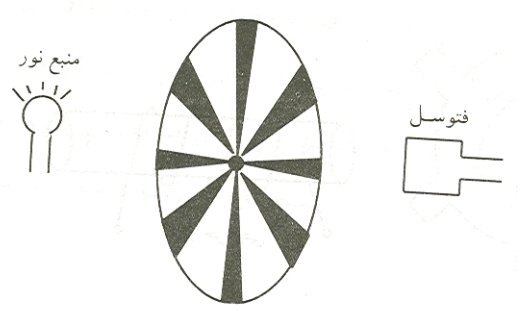
۳-۹-۵ تاکومتر با سنسور فتوسل (Photocell Pickup Tachometers):

اساس کار این اندازه‌گیرها در شکل (۳-۸۸) نشان داده شده است.

رتور این تاکومتر یک دیسک چرخان است که بین منبع نور و سلول حساس قرار گرفته است. دیسک از قسمت‌های متوالی تاریک که مانع عبور نور است و قسمت‌های روشن که مانع عبور نیست تشکیل گردیده است. دیسک با سرعت مورد اندازه‌گیری می‌چرخد و عبور مناطق تاریک و روشن از مقابل سلول حساس، موجب ایجاد پالس هائی در مدارات مربوطه می‌گردد.

فرکانس این پالس‌ها مبین سرعت چرخش دیسک یعنی سرعت مورد اندازه‌گیری می‌باشد. مثلاً برای دیسکی با چهار منطقه روشن و چهار منطقه تاریک. فرکانس پالس‌های ایجاد شده بدست می‌آید:

$$f = \frac{N_{(r.p.m)}}{15}$$



شکل (۳-۸۸). سرعت سنج نوری

تاکومترهای مولد فرکانس دارای رفتاری خطی بوده و معایب انواع مولدهای دامنه را ندارند. اما مدارات جانبی بیشتر و در نتیجه هزینه بیشتری دارند. برای تبدیل خروجی یک تاکومتر مولد فرکانس به سرعت اندازه‌گیری شده عملیاتی شامل مراحل زیر می‌باید انجام گیرد.

۱- شمارش (Count)
۲- ذخیره سازی (Store)
۳- تبدیل و نمایش (Display)
٤- شروع مجدد (Reset)

از آنجائیکه سیگنال آنالوگ ناشی از تاکومترهای دامنه می‌تواند مستقیماً در حلقه کنترل مورد استفاده قرار گیرد و نیازی به مدارات جانبی ندارد استفاده از آنها در بسیاری از موارد ترجیح داده می‌شود.

۳-۱۰ اندازه‌گیری با اشعه:

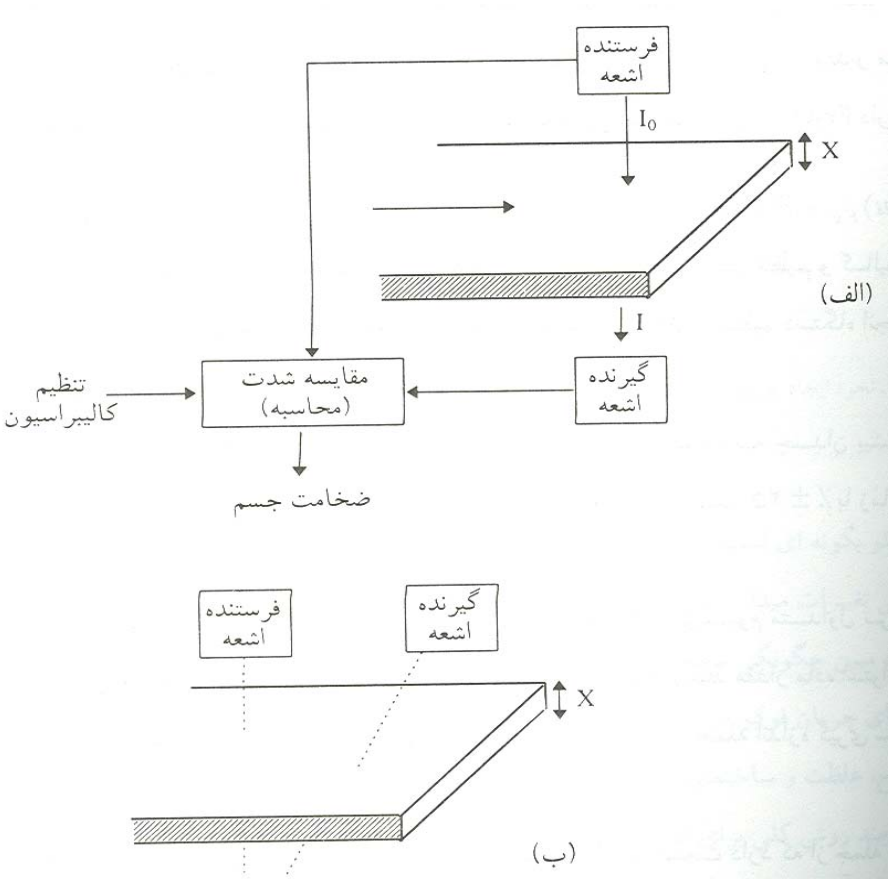
در بعضی صنایع، اندازه‌گیری و کنترل ضخامت یک صفحه در حال عبور مطرح می‌شود. پروسه‌های نورد نمونه این صنایع می‌باشند. اندازه‌گیری در چنین مواردی باید دارای ویژگی‌های زیر می‌باشد:

سریع باشد.
بدون تماس فیزیکی انجام شود.
دقت بالا (گاهی در حد میکرومتر) داشته باشد.

روش‌های تشعشعی نیازهای فوق را برآورده می‌سازند و هم اکنون بطور گسترده در صنایعی نظیر صنایع کاغذسازی، لاستیک، پلاستیک، مس، فولاد، آلومینیوم و ... مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در صنعت عموماً از اشعه ایکس و در مواردی از اشعه بتا یا گاما استفاده می‌شود. میزان جذب اشعه در یک محیط بستگی به مقدار ماده در آن محیط دارد. بنابراین اگر سطح محیط و چگالی ماده ثابت باشند میزان جذب اشعه متناسب با ضخامت محیط خواهد بود.

طرز کار یک سیستم اندازه‌گیر ضخامت با اشعه را مطابق شکل (۳-۸۹) می‌توان نشان داد.



شکل (۳-۸۹) اندازه‌گیری ضخامت با اشعه

در بعضی از پروسه‌ها که امکان نصب گیرنده در طرف دیگر جسم وجود ندارد از روش انعکاس مطابق شکل ۳-۸۹- ب استفاده می‌کنیم. در این روش یک منعکس کننده در طرف دیگر نصب می‌گردد و انعکاس اشعه در طرف گیرنده اندازه‌گیری می‌شود. سرعت پاسخ دهی این روش با توجه به آنکه اشعه دوبار ضخامت جسم را طی می‌کند کندتر از روش قبل است و بیشتر در مورد ورقه‌های بسیار نازک و یا ورقه هائی که جذب زیادی ندارند بکار می‌رود (مثلاً الیاف).

همانطور که گفتیم در صنعت بیشتر از اشعه ایکس استفاده می‌شود و رابطه‌ای که معمولاً این اندازه‌گیرها مورد استفاده قرار می‌دهند بصورت زیر است:

$$I = I_0 e^{-UX} \qquad (۲۱-۳)$$

در رابطه (۳-۲۱)، I_0 شدت اشعه منبع و I شدت اشعه دریافتی توسط گیرنده می‌باشد. e^{-UX} را ضریب جذب می‌گوئیم که در آن x ضخامت ماده و U تابعی از مقدار ماده (نوع ماده) است. U تابعی از مقدار ماده (نوع ماده)است. U معمولاً از جمع Uهای اتم‌های مستقل ماده بدست می‌آید. مثلاً برای Fe_2O_3 داریم:

$$U_{Fe_2O_3} = 2(u)_{Fe} + 3(u)_0$$

اندازه‌گیرهای تشعشعی قبل از استفاده می‌باید بر حسب ماده مورد نظر تنظیم و کالیبره گردند. این کار با گذاشتن اسلایدهای استاندارد با ضخامت معین از ماده مورد نظر و تنظیم دستگاه انجام می‌پذیرد. با این کار در واقع مقدار U برای آن ماده تنظیم می‌شود.

جهت داشتن تصویری از دقت و سرعت این گونه اندازه‌گیرها، یک نمونه نه چندان پیشرفته در صنایع آلومینیوم قادر به اندازه‌گیری ضخامت هائی از ۰/۱۵ تا ۹ میلیمتر با دقت ۲۵±٪ با زمان پاسخ دهی ۵۰ میلی ثانیه می‌باشد.

اشعه بتا در صنایع مس و کاغذ و اشعه ایکس در صنایع فولاد و آلومینیم متداول تر می‌باشند. از آنجائیکه اساس عملکرد اندازه‌گیرهای تشعشعی بر پایه جذب اشعه توسط مقدار ماده استوار است از این خاصیت در اندازه‌گیری کمیت‌های دیگر نیز می‌توان استفاده نمود. از جمله اندازه‌گیری سطح مواد داخل مخازن و اندازه‌گیری دانسیته مواد که بسیار متداول می‌باشند.

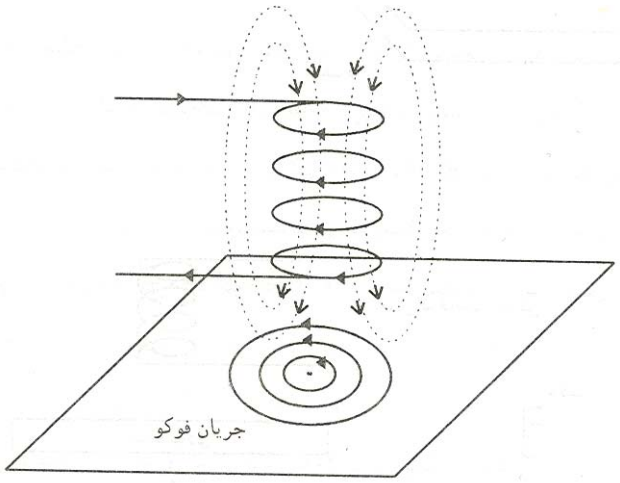
تشعشع و خواص رادیو ایزوتوپ‌ها کاربردهای دیگری نیز در صنعت دارد که از جمله می‌توان به کاربردهائی در تعیین موقعیت (Position)، کنترل و تعیین مخلوط مواد، تعیین نشتی، اندازه‌گیری فلو و تعیین آلودگی (ناخالصی) اشاره نمود.

۳-۱۱ اندازه‌گیرهای الکترومغناطیسی:

اندازه‌گیرهای الکترومغناطیسی به آن دسته از اندازه‌گیرها اطلاق میگردد که کمیت مورد نظر را از طریق سنجش یک میدان مغناطیسی اندازه‌گیری می‌کنند. اندازه‌گیرهای جریان فوکو معروفترین آنها می‌باشند.

۳-۱۱-۱ اندازه‌گیرهای جریان فوکو:

هر گاه جسمی مطابق شکل ۳-۹۰ در معرض میدان مغناطیسی قرار گیرد جریان‌های گردابی شکل در سطح آن القاء می‌شود که به آنها جریان فوکو می‌گویند.

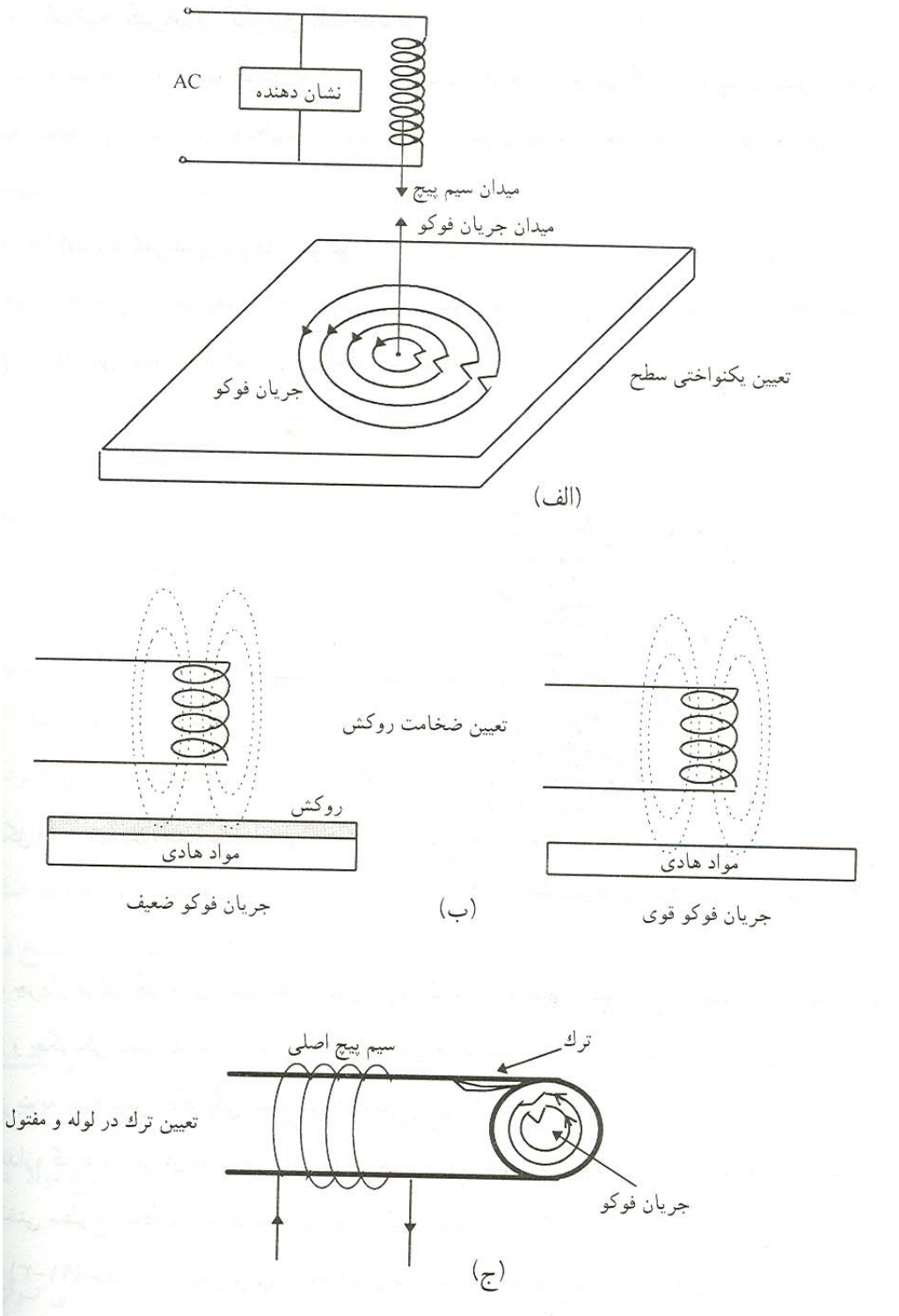


شکل (۳-۹۰) نحوه ایجاد جریان فوکو

جهت جریان فوکو بگونه‌ایست که با میدان ایجاد کننده آن مخالفت نموده آن را تغییر می‌دهد بنابراین میزان و چگونگی تغییرات میدان اصلی در اثر جریان فوکو مبین چگونگی و میزان جریان فوکو است که آن نیزبه نوبه خود مبین چگونگی سطح مورد آزمایش می‌باشد.

اندازه‌گیرها جریان فوکو در تست‌های غیرمخرب تظیر تست لوله، ورق، روکش مواد، رسانائی و یکنواختی سطوح، غلظت و ساختمان مواد و ... کاربرد فراوان دارند.

شکل ۳-۹۱ چند روش کلی برای اندازه‌گیری با استفاده از خاصیت جریان فوکو را نشان میدهد. کمپانی Forster آلمان معروفترین سازنده اندازه‌گیرهای گوناگون به روش جریان فوکو می‌باشد.



شکل (۳-۹۱). کنترل کیفی با استفاده از جریان فوکو

۳-۱۲ اندازه‌گیرهای تحلیلی (Analytical):

تاکنون با اندازه‌گیرهائی آشنا شده‌ایم که کمیتی فیزیکی مانند سرعت، فشار، دما و ... را اندازه‌گیری می‌کنند. گاهی با اندازه‌گیری یک کمیت غیرفیزیکی روبرو هستیم. بعنوان مثال برا

کنترل فرآیند احتراق به اندازه‌گیری میزان گاز منواکسیدکربن Co در دودکش نیاز داریم. تعیین مقدار Co اندازه‌گیری یک کمیت فیزیکی نیست بلکه عبارت است از تشخیص و اندازه‌گیری غلظت یک ماده درمیان مواد دیگر.

کمیت هائی نظیر کمیت فوق را توسط اندازه‌گیرهای تحلیلی یا آنالایزرها (Analysers) اندازه‌گیری می‌کنیم. آنالایزرها یک کمیت را بر اساس تجزیه و تحلیل و استفاده از فرمول‌ها و جداول لازم اندازه‌گیری می‌کنند. مواردی نظیر تشخیص انواع گازها، هدایت الکتریکی محلول‌ها، میزان اکسیژن اندازه PH، اندازه ویسکوزیته تشخیص عناصر در یک آلیاژ، تشخیص غبار، دود، ذرّات معلق و... نمونه هائی از کمیت هائی هستند که توسط آنلایزرها اندازه‌گیری می‌شوند. آنالایزرها بخصوص در صنایعی که با ترکیبات شیمیائی سروکار دارند بطور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند.

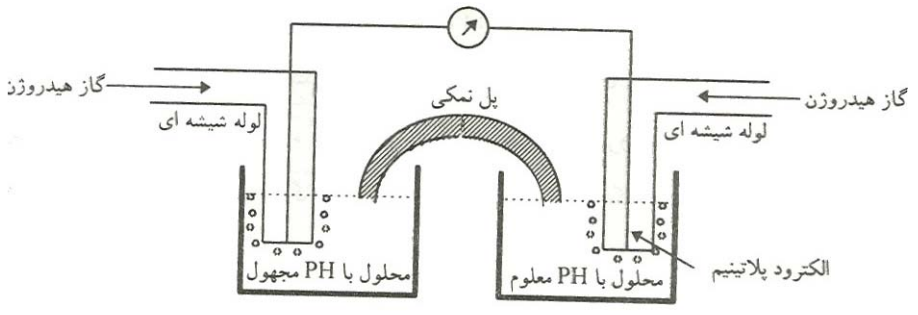
بحث مربوط به آنالایزرها خود موضوع کتاب مستقلی است و در اینجا تنها به معرفی یک آنالایزر بسیار مفید در صنعت می‌پردازیم.

۳-۱۲-۱ آنالایزر PH:

آنالایزر PH یا به اختصار PH متر یک اندازه‌گیر تحلیلی است که در صنعت بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد. از موارد استفاده این آنالایزر می‌توان به صنایع آب و فاضلاب، صنایع کاغذ، صنایع غذایی، سیستم‌های تاسیسات مرکزی، نیروگاه ها، پالایشگاه‌ها و... اشاره نمود.

PH یک محلول، معرف میزان غلظت یون هیدروژن در آن محلول می‌باشد بنابراین برای اندازه‌گیری PH باید غلظت یونهای هیدروژن را اندازه‌گیری نمائیم. نیروی محرکه الکتریکی تولید شده توسط یک الکترود غوطه ور در محلول متناسب با غلظت یونی در آن محلول است. از این خاصیت می‌توان برای اندازه‌گیری غلظت یون‌های هیدروژن (PH) استفاده نمود.

جهت درک بهتر طرز کار یک PHمتر شکل ۳-۹۲ را در نظر بگیرید.



شکل (۳-۹۲) اصول کار PH متر

در این شکل با دمیدن گاز هیدروژن در اطراف الکترودهائی از پلاتین در واقع الکترودی از جنس هیدروژن می‌سازیم. میدانیم هر گاه فلزی را در محلولی که حاوی یون‌های آن فلز است قرار دهیم نیروی محرکه‌ای بین فلز و محلول بوجود می‌آید که متناسب با غلظت یون‌های فلز درمحلول است. پیل سمت چپ حاوی محلولی که هدف اندازه‌گیری PH آن است می‌باشد و پیل سمت راست حاوی مبنا با PH معین می‌باشد.

اختلاف پتانسیل بین این دو پیل متناسب با اختلاف غلظت یون‌های هیدروژن (PH) در آنها است و با توجه به معین بودن PH محلول مبنا، می‌توان PH محلول مورد نظر را تعیین نمود.

برای اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل بین دو پیل می‌باید آنها را با یکدیگر سری نمود و اتصال باید بگونه‌ای باشد که تغییری در مشخصات محلول‌ها و پتانسیل‌های موجود بوجود نیاورد. این اتصال از طریق یک پل نمکی غیرقابل حل در محلول‌ها ایجاد می‌گردد. این پل در واقع نقش یک بافر شیمیایی دراتصال دو پیل را بازی می‌کند.

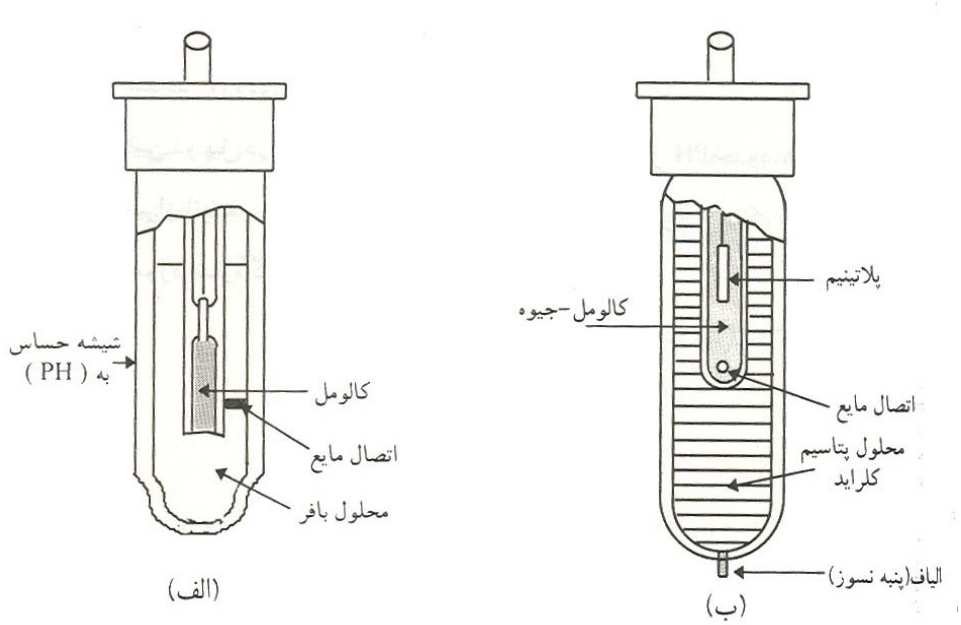
طرح فوق روش کلی اندازه‌گیری PH را بیان می‌دارد و برای عملی ساختن آن کمپانی‌های سازنده روش‌های کم و بیش مشابه‌ای را بکار می‌برند. برای اندازه‌گیری PH معمولاً از دو الکترود مطابق شکل ۳-۹۳ استفاده می‌کنیم. شکل ۳-۹۳- الف الکترود اندازه‌گیر و شکل ۳-۹۳- ب الکترود مبناء را نشان میدهد.

الکترود اندازه‌گیر:

بدنه اصلی این الکترود لوله‌ای است که قسمت انتهائی آن از یک غشاء شیشه‌ای بسیار نازک ساخته شده است. داخل لوله شیشه‌ای از محلول بافر (معمولاً کلرید پتاسیم) پر شده است. فلز الکترود معمولاً از کالومل (Calomel) و اخیراً از جنس نقره- کلرید نقره (Ag-gcl) که پتانسیل نیمه سلولی پایداری دارد ساخته می‌شود و از طریق یک سیستم هادی با روکش نقره‌ای به خروجی الکترود متصل می‌گردد.

الکترود مبناء:

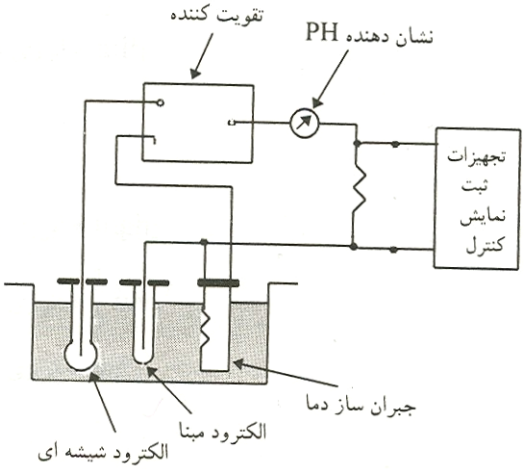
بدنه اصلی این الکترود نیز از لوله‌ای شیشه‌ای ساخته شده و داخل لوله محلول بافری (کلرید پتاسیم) پر شده است. در انتهای لوله شیشه‌ای سوراخ ریزی قرار دارد که از طریق الیافی نظیر پنبه نسوز اتصال محلول بافر با محلول مورد اندازه‌گیری برقرار می‌گردد. قسمت فلزی الکترود نیز که معمولاً جیوه-کلرید جیوه و یا نقره- کلرید نقره می‌باشد توسط یک فلز مثل پلاتین یا نقره به خروجی الکترود متصل می‌گردد.



شکل (۳-۹۳). الکترودهای PHمتر

اختلاف پتانسیل بین دو الکترود که متناسب با PH محلول مورد اندازه‌گیری است توسط یک مدار تقویت کننده با امپدانس ورودی بسیار زیاد اندازه‌گیری می‌شود.

اختلاف پتانسیل بین دو پیل در دمای ۲۵°c به ازای هر واحد تغییر PH حدود ۵۹ میلی وات تغییر می‌کند. برای جبران اثر تغییرات دما در اندازه‌گیری از یک مقاومت جبران ساز که مطابق شکل ۳-۹٤ در داخل محلول مورد اندازه‌گیری قرار داده می‌شود استفاده می‌کنیم.



شکل (۳-۹۴). جبران سازی تغییرات دما در اندازه گیری PH

فصل ۴

کنترل کننده ها

۴-۱ کنترل کننده ها:

در فصل اول گفتیم که کنترل کننده‌ها یکی از قسمت‌های مهم و حساس در حلقه کنترل صنعتی می‌باشند. زیرا عملکرد حلقه کنترل نهایتاً از طریق کنترل کننده تعیین و تنظیم می‌شود.

در نمایش جعبه‌ای شکل ۱-۸ مقایسه کننده را بصورت دو بلوک مجزا نشان داده‌ایم اما در عمل، مقایسه کننده و کنترل کننده بطور یکجا و به صورت یک واحد ساخته می‌شوند و عمل مقایسه رفتار خروجی با رفتار مطلوب نیز در کنترل‌کننده انجام می‌گردد. ما نیز در این فصل کار مقایسه کنندگی و کنترل کنندگی را بطور یکجا تحت نام کنترل کنندگی مورد بررسی قرار می‌دهیم بدین ترتیب وظیفه کنترل کننده در یک حلقه کنترل صنعتی را بصورت زیر بیان می‌نمائیم:

" کنترل کننده با توجه به خطای موجود (اختلاف رفتار پروسه با رفتار مطلوب) با در نظر گرفتن قوانین کنترل (استراتژی کنترل) که طراح به آن یاد داده است، دستوری را جهت اصلاح خطا به قسمت‌های بعدی (محرک، عنصر نهائی) ارسال می‌دارد"

کنترل کننده‌ها را از دو نظر می‌توان دسته بندی نمود:

الف) از نظر نیرو یا انرژی محرکه

ب) از نظر قانون کنترل یا عملیاتی که بر روی سیگنال خطا انجام می‌دهند.

۴-۲ کنترل کننده‌ها از نظر نیرو و انرژی محرکه:

کنترل کننده‌ها را از نظر نیرو و انرژی محرکه به سه دسته اصلی تقسیم بندی می‌کنند:

کنترل کننده‌های الکتریکی و الکترونیکی

کنترل کننده‌های پنوماتیکی (بادی)

کنترل کننده‌های هیدرولیکی (روغنی)

تقسیم‌بندی فوق از آنجا ناشی می‌گردد، که اساساً سیستم‌های صنعتی نیز از نظر نوع نیروی محرکه به سه دسته الکتریکی، پنوماتیکی و هیدرولیکی تقسیم می‌شوند، معمولاً هر سیستم، کنترل کننده نظیر خود را مورد استفاده قرار می‌دهد. بدیهی است حالت‌های ترکیبی نیز می‌توانند وجود داشته باشند، مثلاً یک کنترل کننده می‌تواند الکتروپنوماتیک یا الکتروهیدرولیک و ... باشد.

سیستم‌های الکتریکی، پنوماتیکی و هیدرولیکی هر یک مزایا و کاربرد مخصوص به خود را دارند. در مواردی که به نیروهای عظیم با نسبت نیرو به وزن بزرگ احتیاج باشد، از سیستم‌های هیدرولیک استفاه می‌کنیم. مانند پرس‌های سنگین و کشتی‌های بزرگ. در محل‌هائی که خطر آتش‌سوزی وجود دارد و یا در محیط‌های تمیز و بهداشتی، معمولاً از سیستم‌های پنوماتیکی استفاده می‌کنیم، مانند صنایع نفت و گاز و صنایع غذائی در کاربردهای عادی و مواردی که برای انتقال نیرو نیاز به مکانیزم‌های پیچیده و زیاد نباشد از سیستم‌های الکتریکی و معمولاً موتورهای الکتریکی استفاده می‌کنیم. در فصل‌های بعد در مورد مزایا و معایب هر یک از انواع سیستم‌های فوق توضیحات بیشتری داده شده است.

۴-۳ کنترل کننده‌ها از نظر قانون کنترل

کنترل کننده‌ها را از نظر قانون کنترل یا عملی که بر روی سیگنال خطا انجام می‌دهند به چند دسته زیر تقسیم‌بندی می‌کنند:

کنترل کننده‌های دو وضعیتی (on/off)

کنترل کننده‌های تناسبی (prportional)

کنترل کننده‌های انتگرالی (Integral)

کنترل کننده‌های مشتق‌گیر (Derivative)

کنترل کننده‌های تناسبی- انتگرالی (PI)

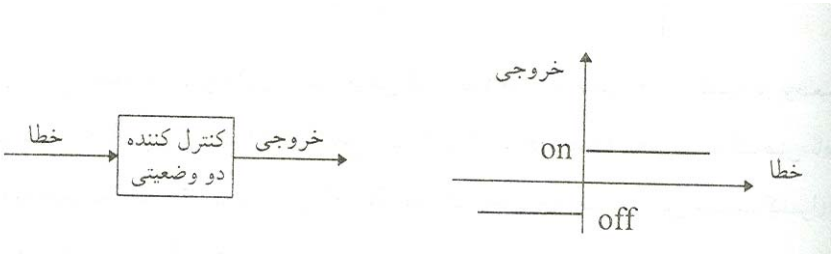
کنترل کننده‌های تناسبی- مشتق‌گیر (PD)

کنترل کننده‌های تناسبی- انتگرالی- مشتق‌گیر (PID)

درک عملکرد هر یک از انواع فوق از اهمیت زیادی برخوردار است زیرا این سوال همواره برای مهندسین وجود دارد که برای کنترل یک پروسه خاص از چه کنترل کننده‌ای می‌باید استفاده نمود و چگونه آن را تنظیم کرد؟ بدیهی است که انتخاب و تنظیم کنترل کننده‌ها منوط به شناخت و درک خواص آنها است. به نظر نویسنده مهندسین می‌بایستی علاوه بر درک ریاضی عملیات فوق، احساس درونی نیز نسبت به آنها داشته باشند. این احساس به تنظیم حلقه‌های کنترل کمک فراوانی خواهد کرد.

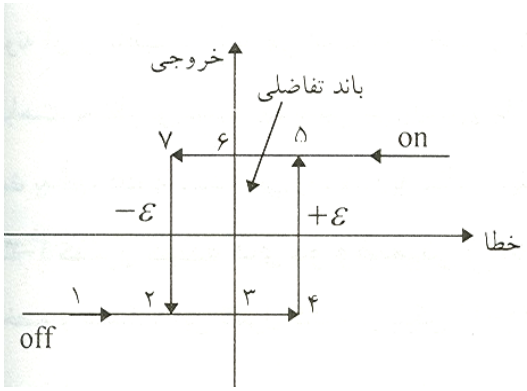
۴-۳-۱ کنترل کننده‌های دو وضعیتی (on/off)

مشخصه و عملکرد این کنترل کننده در شکل ٤-١ نمایش داده شده است.



شکل (۴-۱). مشخصه کنترل کننده دو وضعیتی

خروجی این کنترل کننده همانطور که از نام آن پیدا است تنها دو حالت روشن یا خاموش (on/off) می‌تواند داشته باشد مطابق مشخصه ٤-١ در صورتی که خطا مثبت باشد یعنی مقدار کمیت اندازه‌گیری شده از مقدار مطلوب کمتر باشد، کنترل کننده فرمان روشن شدن (on) را صادر می‌نماید و در صورتیکه مقدار کمیت تحت کنترل بیشتر از مقدار مطلوب باشد (خطای منفی) کنترل کننده فرمان خاموش شدن (off) را به محرک و عنصر نهائی ارسال می‌دارد نمونه ساده و متداول کنترل کننده‌های دووضعیتی را می‌توان ترموستات سماور برقی مثال زد. در سماور برقی با یک حلقه کنترل دما روبرو هستیم و همانطور که می‌دانید اگر دمای آب کمتر از مقدار مطلوب باشد ترموستات وصل (on) و المنت (عنصر نهائی) تولید گرما می‌نماید و در صورتیکه دمای آب بیشتر از مقدار مطلوب شود ترموستات قطع (off) و المنت خاموش می‌گردد. مشخصه ٤-١ دارای یک اشکال عملی مهم می‌باشد و آن اینکه بدلیل اثر اغتشاشات مختلف (هر چند ناچیز) بر پروسه که به هر حال همیشه وجود دارند خطای سیستم هیچگاه صفر نشده و کنترل کننده همواره در حال قطع و وصل (on, off) است و این امر موجب استهلاک کنترل کننده و عناصر محرک و نهائی می‌گردد. در عمل کنترل کننده دو وضعیتی را با هیسترزیس و باند مرده یعنی با مشخصه‌ای مطابق شکل ٤-٢ می‌سازند. باند مرده (Dead-band) را باند تفاضلی (Differential-gap) نیز می‌نامند. در این مشخصه مادامی که خطا از باند تفاضلی تجاوز نکند، کنترل کننده در وضعیت قبلی خود باقی می‌ماند.



شکل (۴-۲)مشخصه کنترل کننده دو وضعیتی با باند تفاضلی

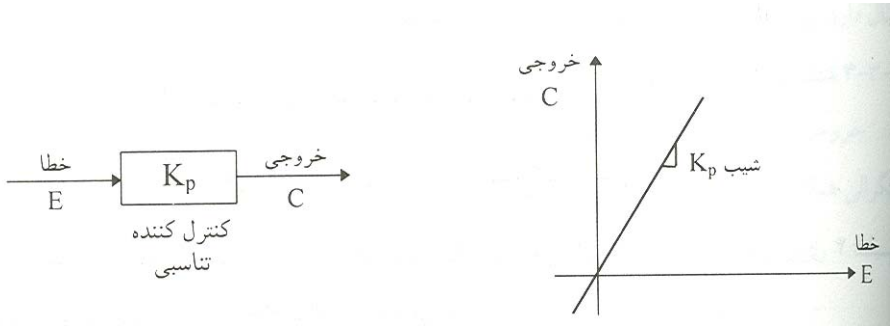
برای تشریح عملکرد این کنترل کننده فرض کنید خطا مقداری منفی و کنترل کننده در وضعیت قطع (off) در نقطه ۱ قرار گرفته باشد با قطع بودن کنترل کننده، اندازه خطا کم‌کم کاهش یافته و به نقطه ۲ سپس به نقطه ۳ یعنی جائی که خطا صفر است می‌رسیم. در این حالت کنترل کننده همچنان قطع بوده و خطا کم‌کم مثبت می‌گردد تا به مقدار $\varepsilon+$ (نقطه ٤) می‌رسد. در اینجا کنترل کننده وصل شده (نقطه ٥) و موجب تصحیح خطا و حرکت به سمت نقطه ٦ و ۷ می‌شود. همانطور که ملاحظه می‌فرمائید کنترل کننده برای خطای مثبت تا $\varepsilon+$ و خطاهای منفی تا $\varepsilon-$ عکس العملی نشان نداده و در حالت قبلی خود باقی می‌ماند. این امر موجب جلوگیری از قطع و وصل مداوم کنترل کننده می‌شود.

باند تفاضلی در کنترل کننده‌های دو وضعیتی معمولاً قابل تنظیم می‌باشد و استفاده کننده بر حسب نیاز مقدار آن را تنظیم می‌نماید. مثلاً در یک کنترل دو وضعیتی دما هرگاه باند تفاضلی را روی ۱۰ درجه تنظیم نمائیم. در صورتیکه دمای مطلوب ۸۰ درجه سانتیگراد تعیین شود دمای پروسه عملاً ممکن است بین ۷۵ تا ۸۵ درجه تغییر نماید.

از مزایای مهم کنترل کننده‌های دو وضعیتی می‌توان به سادگی و ارزانی آنها اشاره نمود و عیب اصلی آنها عدم دقت و وجود خطای همیشگی در حلقه کنترل می‌باشد، با این وجود در کنترل پروسه‌هائی که نیاز به دقت بالائی نداریم کنترل کننده‌های دو وضعیتی بهترین انتخاب می‌باشند.

۴-۳-۲ کنترل کننده تناسبی:

عملکرد و مشخصه یک کنترل کننده تناسبی مطابق شکل ٤-۳ می‌باشد:



شکل (۴-۳) مشخصه کنترل کننده تناسبی

در اینجا خروجی کنترل کننده ضریبی از خطای سیستم می‌باشد. این ضریب را ضریب تناسب می‌گوئیم و با K_P نمایش می‌دهیم. کنترل کننده‌های تناسبی برای رفع مشکل قطع و وصل‌های مکرر در کنترل کننده‌های دو وضعیتی ساخته شده‌اند. گین کنترل کننده‌های تناسبی قابل تنظیم می‌باشد و گاهی بجای گین از اصطلاح باند تناسبی (PB) که طبق رابطه زیر با گین مربوط می‌شود استفاده می‌کنیم:

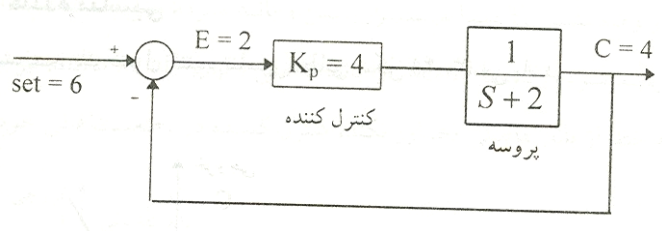
$$\%PB = \frac{100}{K_P}$$

با استفاده از کنترل کننده‌های تناسبی و تنظیم درست گین می‌توان دقت و حساسیت بیشتری در کنترل یک پروسه نسبت به کنترل کننده‌های دو وضعیتی بوجود آورد اما این امر از طرفی منجر به پرداخت هزینه بیشتری جهت عناصر بعد از کنترل کننده یعنی محرک و عنصر نهائی می‌گردد.

گاهی برای استفاده توأم از مزایای کنترل کننده‌ای بنام کنترل کننده‌های دو وضعیتی و تناسبی زمانی (Time-proportional) استفاده می‌کنند. در این روش عنصر نهائی در یک فاصله زمانی ثابت، مدتی باز مدتی بسته می‌باشد، اما نسبت مدت باز بودن به مدت بسته بودن متناسب با اندازه خطا می‌باشد.

با توجه به شکل ٤-٣ یک کنترل کننده تناسبی را می‌توان یک آمپلی فایر با بهره قابل تنظیم دانست.

کنترل کننده‌های تناسبی قادر به اصلاح کامل خطا نیستند و در حالت ماندگار بین خروجی پروسه و مقدار مطلوب (Set-point) اختلاف وجود دارد. برای روشن شدن مطلب شکل ٤-٤ را در نظر بگیرید.



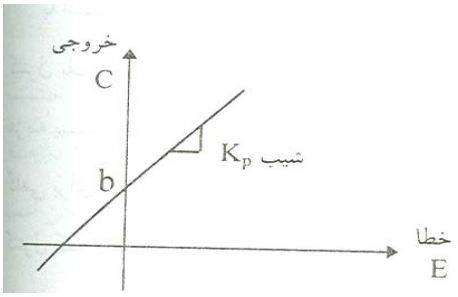
شکل (۴-۴). کنترل یک فرآیند با کنترل کننده تناسبی

مطابق شکل در حالت ماندگار در حالیکه مقدار مطلوب ٦ می‌باشد، خروجی پروسه روی ٤ تنظیم می‌گردد و حلقه کنترل دارای خطای ماندگار ٢E می‌باشد.

$$C = E \times 4 \times \frac{1}{2} = 2E$$
$$E = (set) - C = 6 - C$$
$$E = 6 - 2E$$
$$E = 2 \qquad \text{خطا}$$
$$C = 2 \times 2 = 4 \qquad \text{خروجي}$$

این خطا را آفست (Offset) می‌گوئیم، آفست را می‌توان با افزایش بهره کاهش داد، اما این افزایش به نوبه خود مشکلاتی را بوجود می‌آورد.

گاهی کنترل کننده‌های تناسبی را بطور بایاس‌دار می‌سازند. به این معنی که خروجی کنترل کننده به ازای خطای صفر مقداری ثابت (Bias) دارد. مشخصه اینگونه کنترل کننده‌ها مطابق شکل ٤-٥ می‌باشد.



شکل (۴-۵) مشخصه کنترل کننده تناسبی بایاس‌دار

رابطه ورودی – خروجی در اینجا بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$C = K_p.E + b \qquad (١-٤)$$

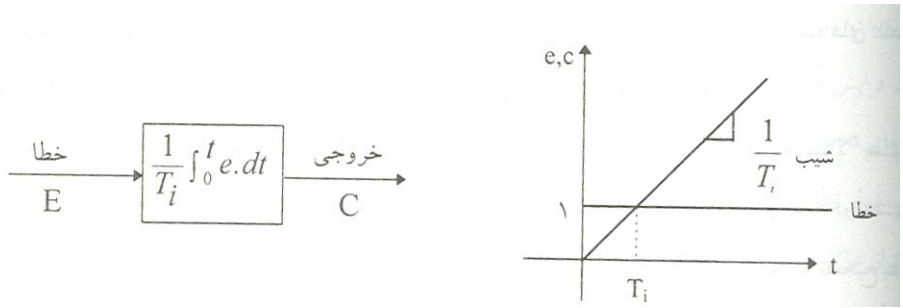
در رابطه (٤-١)، K_p را بهره و b را بایاس کنترل کننده گوئیم.

تمرین: در مثال شکل (١١-٤) تحقیق کنید، با تنظیم b=١٢ می‌توان خروجی پروسه را در حالت ماندگار روی مقدار مطلوب تنظیم نمود و یا به عبارت دیگر خطای کنترل را به صفر رسانید.

بدیهی است با تغییر مقدار مطلوب، بایاس را نیز مجدداً تنظیم نمود که این امر مشکلاتی را به دنبال دارد. بهترین راه برای از بین بردن خطا در حالت ماندگار استفاده از عمل انتگرال‌گیری است.

۴-۳-۳ کنترل کننده انتگرالی:

خروجی این کنترل کننده انتگرال خطای ورودی به آن می‌باشد. عملکرد و مشخصه یک کنترل کننده انتگرالی هنگامی که خطای ورودی پله واحد باشد مطابق شکل ٤-٦ است:



شکل (۴-۶). مشخصه کنترل کننده انتگرالی

کنترل کننده انتگرالی یک کنترل کننده حافظه دار است، یعنی خروجی آن در هر لحظه تحت تأثیر خطاهای سیستم در زمان‌های گذشته می‌باشد. T_i را زمان انتگرال‌گیری می‌گوئیم و آن مدت زمانی است که طول می‌کشد تا خروجی انتگرال‌گیر، هنگامی که ورودی آن پله واحد است از صفر به مقدار واحد برسد. شکل (٤-٦).

کنترل کننده‌های انتگرالی را کنترل کننده ریست (Reset) نیز می‌گویند. که در این صورت T_i را زمان در نظر بگیرید:

$$C(t) = \frac{1}{T_1}\int_0^1 e(t).dt \qquad (٤-٢)$$

رابطه (٤-٢) را می‌توان بصورت زیر نیز نوشت:

$$\frac{dc(t)}{dt} = \frac{e(t)}{T_1} \qquad (٤-٣)$$

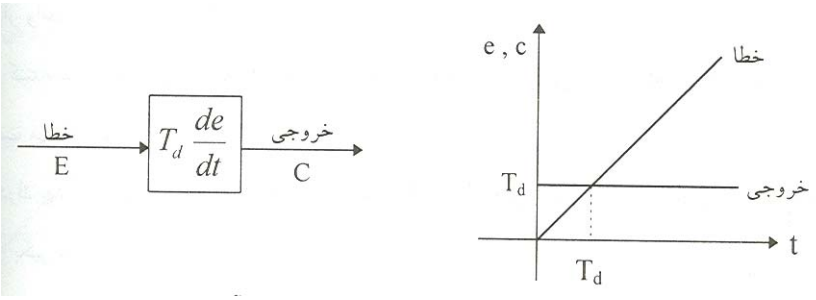
مطابق رابطه (٤-٣) تغییرات خروجی در هر لحظه یعنی $\frac{dc(t)}{dt}$، متناسب با خطای ورودی e(t) در آن لحظه است و ضریب تناسب $\frac{1}{T_1}$ می‌باشد. بنابراین مادامی که خطا مخالف با صفر باشد، خروجی تغییر می‌کند و تغییرات خروجی در جهت اصلاح خطا بکار گرفته می‌شود. هنگامیکه خطا صفر شود خروجی در مقدار ثابتی تثبیت می‌گردد. این مقدار ثابت در واقع بگونه‌ای معادل اندازه بایاس در کنترل کننده تناسبی بایاس‌دار می‌باشد و یا بعبارت دیگر کنترل کننده‌های انتگرالی با توجه به خواص کنترل کننده‌های تناسبی بایاس‌دار ابداع گردیده‌اند. با این مزیت که مقدار بایاس در آنها، با توجه به سوابق قبلی سیگنال خطای ورودی بطور خودکار تنظیم می‌شود در حالی که در کنترل کننده‌های تناسبی بایاس‌دار، برای هر مقدار مطلوب می‌بایستی مقدار بایاس را مجدداً تنظیم نمود.

کنترل کننده‌های انتگرالی معمولاً به تنهایی مورد استفاده قرار نمی‌گیرند و معمولاً بصورت تناسبی – انتگرالی استفاده می‌شوند. که بعداً در مورد آنها صحبت خواهیم کرد. با این وجود در بعضی از پروسه‌های کنترل سطح مایع، یا کنترل دما و یا کنترل PH، که بدلیل ماهیت پروسه نیاز به تصحیح بطئی و آهسته پروسه داریم ممکن است از کنترل کننده‌های انتگرالی به تنهائی استفاده شود.

مزیت کنترل کننده‌های انتگرالی عدم آفست و توانایی در کاهش خطای ماندگار می‌باشد و عیب آنها کند بودن و ایجاد تأخیر در پاسخ دهی است که احتمال ناپایداری را بدنبال دارد.

۴-۳-۴ کنترل کننده مشتق‌گیر:

قانون کنترل و مشخصه یک کنترل کننده مشتق‌گیر در شکل ٤-۷ نشان داده شده است:



شکل (۴-۷). مشخصه کنترل کننده مشتق‌گیر

شکل ٤-۷ خروجی کنترل کننده را هنگامی که خطا شیب واحد باشد نشان می‌دهد. T_d را اصطلاحاً زمان مشتق گیری می‌گوئیم. ملاحظه می‌گردد که یک کنترل کننده مشتق‌گیر، تنها به تغییرات خطا حساس است نه به مقدار آن. بعبارت دیگر اگر خطا مقداری ثابت باشد و تغییر نکند، کنترل کننده عکس‌العملی نسبت به آن نشان نخواهد داد و به همین دلیل معمولاً از عمل مشتق‌گیری به تنهائی استفاده نمی‌شود. عمل مشتق‌گیری برای پروسه‌های تأخیردار و یا با ثابت زمانی بزرگ مناسب است. زیرا معمولاً تغییرات خطا مقدمه ای برای افزایش آن است و کنترل‌کننده مشتق‌گیر از این نظر آمادگی لازم برای تصحیح خطاهای آتی را فراهم می‌آورد یعنی کنترل کننده دیدی آینده‌گر و پیش‌بین دارد، به همین دلیل گاهی آن را کنترل کننده پیش فاز نیز می‌گویند. کنترل کننده مشتق‌گیر در صنعت بنام کنترل کننده میزان (Rate) مشهور است.

پروسه‌هائی که تحت تأثیر نویزهای شدید هستند و در کنترل آنها از عمل مشتق‌گیری نیز استفاده می‌شود در معرض خطر اشباع کنترل کننده و عنصر نهائی می‌باشند چرا که

تغییرات شدید ناشی از نویز باعث افزایش خروجی کنترل کننده و اشباع آن و همچنین اشباع عنصر نهائی می‌شود. در چنین مواردی از فیلترهای مخصوص برای حذف کردن نویز استفاده می‌گردد. همچنین تغییرات شدید خطا هنگام تنظیم مقدار مطلوب (Set-point) نیز ممکن است موجب بروز مشکل فوق گردد، برای رفع این مشکل بعضی از سازندگان، کنترل کننده را بگونه‌ای می‌سازند که عمل مشتق‌گیری بر روی سیگنال اندازه‌گیری شده انجام می‌گردد و نه سیگنال خطا، بنابراین تغییرات Set-point خروجی کنترل کننده را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد.

استفاده از عمل مشتق‌گیری در یک حلقه کنترل را می‌توان بصورت چند قانون سرانگشتی خلاصه نمود:

تنظیم عمل مشتق‌گیری بعد از تنظیم سایر عملیات انجام می‌شود.

در پروسه‌های کند، به عمل مستق‌گیری بیشتری نیاز است.

در پروسه‌هائی با گین کم و تغییرات نادر مقدار مطلوب، معمولاً از عمل مشتق‌گیری نیز در کنترل کننده استفاده می‌شود.

در حلقه‌های غیرخودتنظیم (Non-self-regulating) استفاده از عمل مشتق‌گیری مطلوب است، چرا که مشتق‌گیری اساساً پایداری حلقه کنترل را افزایش می‌دهد.

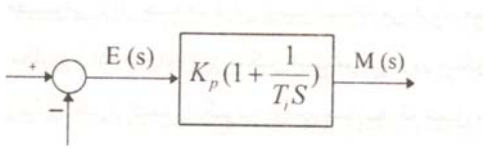
در حلقه‌های کنترل با تأخیر زیاد در اندازه‌گیری، استفاده از عمل مشتق‌گیری مطلوب است.

در کنترل پروسه‌هائی با چندین ثابت زمانی معمولاً از عمل مشتق‌گیری استفاده می‌کنیم. تجربه نشان می‌دهد که در این حالت بهتر است زمان مشتق‌گیری حدود دومین یا سومین ثابت زمانی بزرگ پروسه انتخاب گردد.

هنگام معرفی کنترل کننده‌های تناسبی، انتگرالی و مشتق‌گیر، که گفتیم که معمولاً این عملیات به تنهائی مورد استفاده واقع نمی‌شوند،هدف ما نیز تا اینجا آشنائی مستقل با هر یک از این عملیات بوده است سعی نموده‌ایم احساسی نسبت به آنها در خواننده بوجود آوریم. اکنون به معرفی کنترل کننده‌هائی می‌پردازیم که از ترکیب عملیات سه گانه فوق بدست می‌آیند. بدیهی است اگر هر یک از این عملیات را بدرستی درک کرده باشیم، درک کنترل کننده‌های ترکیبی با استفاده از اصل جمع آثار بسیار آسان می‌باشد.

۴-۳-۵ کنترل کننده تناسبی- انتگرالی (PI):

عملی که این کنترل کننده بر روی سیگنال خطا انجام می‌دهد همانطور که از نام آن پیداست شامل عملیات تناسب و انتگرال می‌باشد که آن را بصورت زیر نمایش می‌دهیم:

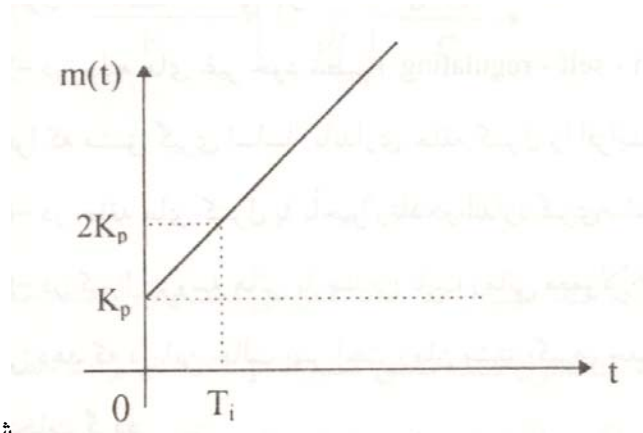


$$m(t) = K_p\, e(t) + \frac{K_p}{T_1}\int_0^1 e(t).dt \qquad (٤-٤)$$

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p(1+\frac{1}{T_i s}) \qquad (٤-٥)$$

در یک کنترل کننده PI ضرایب K_p و T_i قابل تنظیم می‌باشند. با توجه به روابط فوق تنظیم T_i قسمت انتگرال و تنظیم K_p هر دو قسمت انتگرالی و تناسبی را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

این کنترل کننده خواص کنترل کننده‌های تناسبی و انتگرالی را دارا می‌باشد و پاسخ آن به خطای پله واحد مطابق شکل ٤-٨ است:

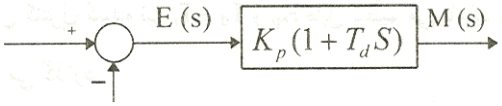


شکل (۴-۸) مشخصه کنترل کننده PI

با توجه به شکل ٤-٨ خروجی کنترل کننده با گذشت هر زمان T_i به اندازه یک K_p افزایش می‌یابد.

۴-۳-۶ کنترل کننده تناسبی- مشتق‌گیر (PD):

عملیات این کنترل کننده بر روی سیگنال خطا شامل تناسب و مشتق می‌باشد که بصورت زیر نمایش داده می‌شود:

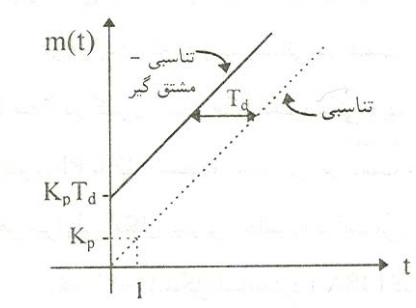


$$m(t) = K_P e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \qquad (٦-٤)$$

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p(1 + T_d s) \qquad (٧-٤)$$

در یک کنترل کننده PD، ضرایب K_p و T_d قابل تنظیم می‌باشند. تنظیم T_d بر روی عمل مشتق و تنظیم K_p برروی عملیات تناسب و مشتق تأثیر می‌گذارد.

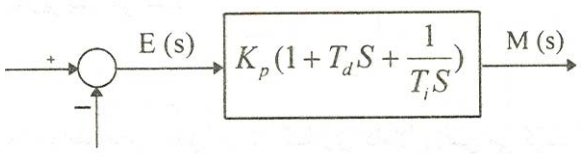
این کنترل کننده دارای هر دو خواص کنترل کننده‌های مشتق‌گیر می‌باشد و پاسخ آن به خطای شیب واحد مطابق شکل ٤-٩ است.



شکل (۴-۹) مشخصه کنترل کننده PD

۴-۳-۷ کنترل کننده تناسبی- انتگرالی- مشتق‌گیر (PID):

این کنترل کننده، عملیات تناسب، انتگرال و مشتق را بر روی سیگنال خطا انجام می‌دهد. نمایش جعبه‌ای و رابط مربوطه زیر ارائه می‌گردند:

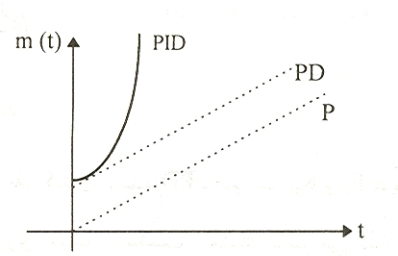


$$m(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} + \frac{K_p}{T_i}\int_0^1 e(t).dt \qquad (٨-٤)$$

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p(1 + T_d s + \frac{1}{T_i s}) \qquad (٩-٤)$$

در این کنترل کننده نیز T_i و T_d و K_p قابل تنظیم می‌باشند و تنظیم K_p بر عملیات مشتق و انتگرال نیز تأثیر می‌گذارد.

در شکل ٤-١٠ پاسخ یک کنترل کننده PID به ورودی شیب واحد بطور کیفی آمده است:



شکل (۴-۱۰) مشخصه کنترل کننده PID

یک کنترل کننده PID دارای کلیه خواص کنترل کننده‌های P، I و D می‌باشد و با تنظیم ضرایب مربوط می‌توان به ترکیبی از خواص هر یک از آنها رسید.

در مواردی که تفاوت چندانی در قیمت کنترل کننده‌های PD و PI با کنترل کننده‌های PID نباشد (مثلاً در کنترل کننده‌های الکترونیکی) بهتر است کنترل کننده PID خریداری و در صورت نیاز از آن بعنوان PI و PD استفاده می‌شود. این امر دست طراح را در استفاده از انواع کنترل کننده‌ها باز می‌گذارد و در هر شرایطی امکان بهترین تنظیم را فراهم می‌سازد.

رابطه (٤-٩) شکل استاندارد (ISP) کنترل کننده‌های PIC را بیان می‌دارد. در عمل بسیاری از سازندگان به دلایل تاریخی و مسائل تولید، طرح‌های دیگری را بکار می‌برند. مثلاً طرحی به نام ساختار سری کوپلاژدار (Interacting Form) که در کنترل کننده‌ها ی بادی اولیه مورد استفاده قرار می‌گرفت هنوز هم توسط بسیاری از سازندگان معروف از سازندگان معروف بکار برده می‌شود. تابع تبدیل کنترل کننده دراین طرح بصرت زیر بیان می‌شود:

$$G_C'(s) = K_p'(1+\frac{1}{T'S_1})(1+T_d'S)$$

با توجه به رابطه فوق، دلیل این نام‌گذاری کاملاً روشن می‌گردد. چرا که در اینجا تنظیم هر یک از ضرائب مشتق یا انتگرال بر روی دیگری اثر می‌گذارد.

با مقایسه توابع تبدیل طرح‌های استاندارد و سری، برای معادل بودن آن می‌باید داشته باشیم:

$$K_P = K_P' \frac{T_i' + T_d'}{T_i'}$$

$$T_i = T_i' + T_d'$$

$$T_d = \frac{T_i' T_d'}{T_i' + T_d'}$$

از روابط فوق می‌توان بدست آورد که از یک طرح استاندارد زمانی می‌توان به یک طرح معادل سری رسید که داشته باشیم $T_i \geq 4T_d$

سازندگان دیگری از طرحی بنام ساختار موازی مطابق رابطه زیر استفاده می‌کنند

$$G''_C(s) = K''_p + \frac{K_i}{S} + K_d s$$

به این طرح از آن جهت موازی گفته می‌شود که تنظیم هر یک از ضرائب بر روی دیگری اثری ندارد و هر یک مستقلاً تنظیم می‌گردند. برای معادل بودن این طرح استاندارد باید داشته باشیم:

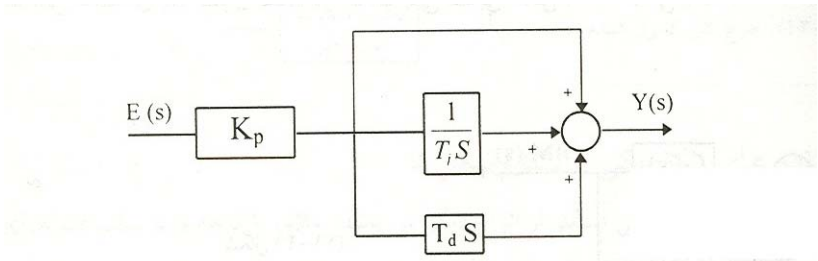
$$K_p = K''_p$$

$$T_i = \frac{K''_p}{K_i}$$

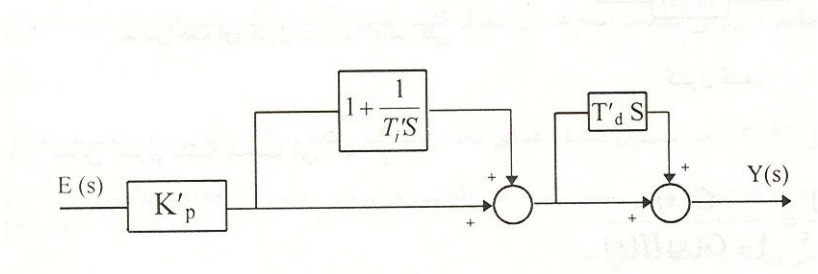
$$T_d = \frac{K_d}{K''_p}$$

نمایش جعبه‌ای سه طرح را می‌توان مطابق شکل زیر ارائه نمود:

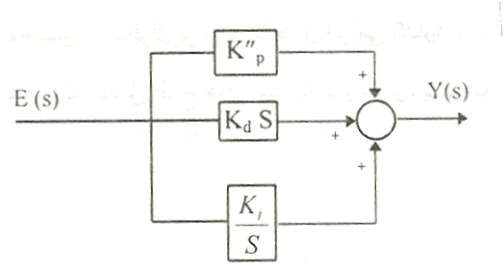
الف)طرح استاندارد



ب)طرح سری



ج) طرح موازی

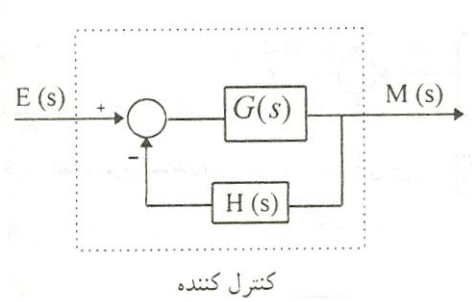


هنگام تنظیم کنترل کننده می‌باید به این نکته توجه شود که سازنده از کدام طرح استفاده نموده است. در اینجا لازم به یادآوری است که کنترل کننده‌هائی که در صنایع نفت و گاز ایران مورد استفاده قرار گرفته‌اند عموماً دارای طرح سری می‌باشند.

کنترل کننده‌های PID کنترل فرآیندهای عادی بسیار مناسب می‌باشند. مخصوصاً هنگامی که دینامیک غالب سیستم، درجه دو باشد یا به عبارت دیگر سیستم دارای دو قطب مسلط باشد. با این وجود برای کنترل بعضی فرآیندها نیاز به کنترل کننده‌های پیچیده‌تری می‌باشد و یا در بعضی موارد اساساً استفاده از کنترل کننده‌های PID امکان‌پذیر نمی‌باشد.

۴-۴ اصل کلی ایجاد عملیات در کنترل کننده ها:

در بخش‌های گذشته به معرفی انواع کنترل کننده‌ها بلحاظ عملیات کنترلی پرداختیم. اکنون در مورد نحوه ایجاد یک یا چند عمل دلخواه در یک کنترل کننده (الکتریکی، بادی، هیدرولیکی) صحبت می‌کنیم. نمایش جعبه‌ای یک کنترل کننده در حالت کلی مطابق شکل ٤-١١ می‌باشد.



شکل (۴-۱۱) نمایش جعبه‌ای کنترل کننده در حالت کلی

تابع تبدیل کنترل کننده بدست می‌آید:

$$T_C(s)=\frac{M(s)}{E(s)}=\frac{G(s)}{1+G(s)H(s)} \qquad (١٠-٤)$$

در ساخت کنترل کننده ها، بهره مسیر رفت (G(s)) را بسیار بزرگ انتخاب می‌کنیم بطوریکه در همه فرکانس‌های کار، بهره حلقه (G(s).H(s)) بسیار بزرگتر از واحد باشد. بعبارت دیگر:

$$\left|G(s)H(s)\right| >> 1 \qquad (١١-٤)$$

که در این صورت رابطه (٤-١٠) می‌شود:

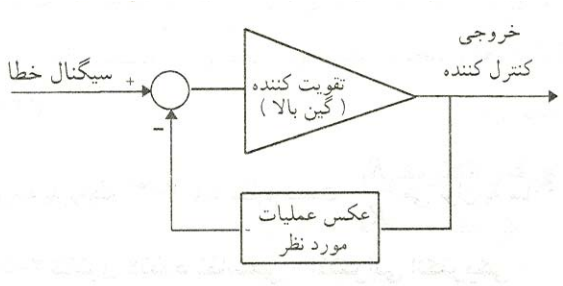
$$T_C(s)\approx\frac{G(s)}{G(s)H(s)}$$

$$T_C(s)=\frac{1}{H(s)} \qquad (١٢-٤)$$

رابطه (٤-١٢) بیان می‌دارد که تحت شرایط (٤-١١):

" برای ساخت یک کنترل کننده با عملیاتی دلخواه کافی است عکس آن عملیات را در مسیر برگشت قرار دهیم."

همانطور که گفتیم برای تحقق شرط (٤-١١) معمولاً G(s) را یک تقویت کننده با گین بسیار بالا انتخاب می‌کنیم. بنابراین ساختمان یک کنترل کننده در حالت کلی مطابق شکل ٤-١٢ خواهد بود:



شکل (۴-۱۲). طرح کلی کنترل کننده

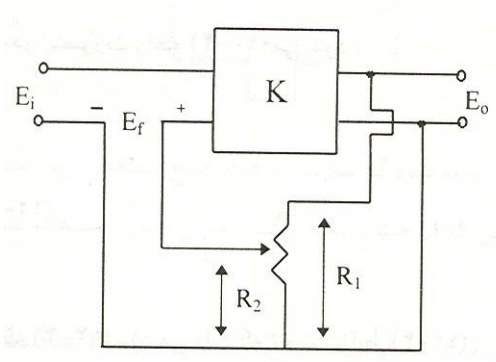
۴-۵ کنترل کننده‌های الکتریکی (الکترونیکی):

طراحی کنترل کننده الکتریکی آسانتر از انواع دیگر می‌باشد. بعلاوه با توجه به پیشرفت‌های تکنولوژی حالت جامد و ارزانی قطعات نیمه هادی کنترل کننده‌های الکترونیکی بسیار ارزانتر از انواع دیگر می‌باشند.

با توجه به شکل ٤-١٢ در کنترل کننده‌های الکترونیکی معمولاً از تقویت کننده‌های عملیاتی(Op-Amp) که دارای گین بسیار زیاد می‌باشند در مسیر رفت و از عناصر مقاومت (R) و خازن (C) در مسیر برگشت استفاده می‌شود.

٤-٥-١کنترل تناسبی الکتریکی:

شکل ٤-١٣ بکارگیری اصل کلی برای ساخت یک کنترل کننده تناسبی را نشان می‌دهد. در این شکل داریم:



$$G(s) = K$$

$$H(s) = \frac{R_2}{R_1}$$

و می‌توان نوشت: $E_0 = K(E_i - \frac{R_2}{R_1} E_0)$

$$E_0 = \frac{K}{1 + K\frac{R_2}{R_1}} E_i$$

شکل (۴-۱۳). طرح کلی کنترل کننده تناسبی الکتریکی

$$K.\frac{R_2}{R_1} = G(s).H(s) >> 1$$

$$E_0 = \frac{R_1}{R_2} E_i$$

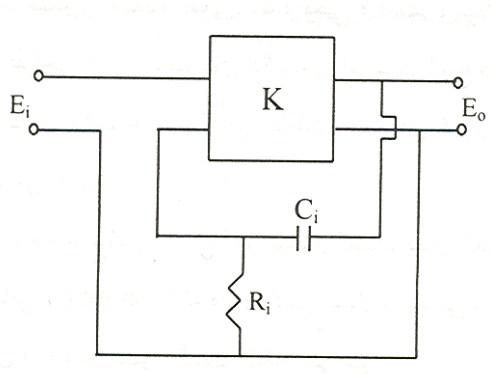
$$K_P = \frac{R_1}{R_2}$$

(۱۳-٤)

با توجه به رابط (۱۳-٤) با تنظیم نسبت $\frac{R_1}{R_2}$ به سادگی می‌توان مقدار K_p را تنظیم نمود.

٤-٥-٢ کنترل تناسبی- انتگرالی الکتریکی:

شکل ١٤-٤ اعمال اصل کلی برای ساخت یک کنترل کننده PI را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۱۴). کنترل کننده PI الکتریکی

در این شکل دریم:

$$G(s) = K$$

$$H(s) = \frac{R_i}{R_i + \frac{1}{C_i S}}$$

محاسباتی همچون حالت قبل بدست می‌دهد:

$$E_0(s) = \frac{K}{1 + K.\frac{R_i}{R_i + \frac{1}{C_i S}}}$$

$$K.\frac{R_i}{R_i + \frac{1}{C_i S}} >> 1$$

$$E_0(s) = (1 + \frac{1}{R_i C_i S}).E_i(s)$$

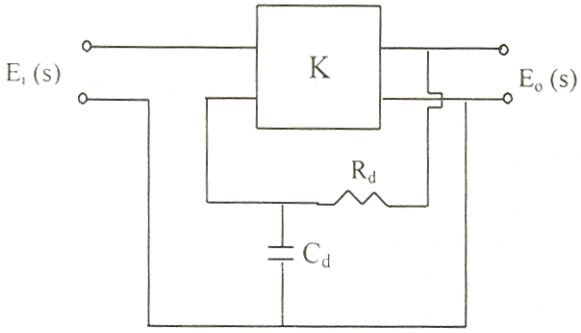
$$E_0(s) = (1 + \frac{1}{T_1 S}).E_i(s) \qquad T_i = R_i C_i$$

(۱٤-٤)

رابطه(۱٤-٤) یک رابطه تناسبی-انتگرالی (K_p=1) را بیان می‌دارد. با استفاده از یک تقویت کننده در خروجی مدار فوق می‌توان ضریب K_p را به مقدار دلخواه تنظیم نمود. همچنین با تنظیم R_i می‌توان زمان انتگرال‌گیری (T_i) را نیز مستقلاً تنظیم کرد.

٤-٥-٣ کنترل کننده تناسبی- مشتق‌گیر الکتریکی:

ساختمان کلی یک کنترل کننده PD الکتریکی مطابق شکل ٤-١٥ می‌باشد.



شکل (۴-۱۵). کنترل کننده PD الکتریکی

در این شکل داریم:

$$G(s) = K$$

$$H(s) = \frac{\frac{1}{C_d S}}{R_d + \frac{1}{C_d s}} = \frac{1}{1 + R_d C_d S}$$

و تابع تبدیل کننده بدست می‌آید:

$$\frac{E_0(s)}{E_i(s)} = \frac{K}{1 + \frac{K}{1 + R_d C_d S}}$$

$$\left|G(s).H(s)\right| >> 1$$

$$\left|\frac{K}{1 + R_d C_d S}\right| >> 1$$

$$\frac{E_0(s)}{E_i(s)} = \frac{K}{\frac{K}{1 + R_d C_d S}} = 1 + R_d C_d S$$

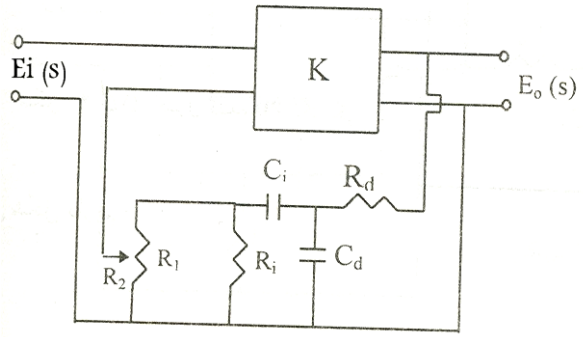
$$\frac{E_0(s)}{E_i(s)} = 1 + T_d S \qquad T_d = R_d C_d$$

(۱۵-٤)

رابطه (۱۵-٤) یک کنترل کننده PD را بیان می‌دارد. در اینجا نیز با استفاده از یک تقویت کننده در خروجی می‌توان K_p را به دلخواه تنظیم نمود. همچنین توجه فرمائید که زمان مشتق‌گیری (T_d) را می‌توان از طریق R_d یا C_d تنظیم نمود و همانطور که قبلاً هم گفتیم معمولاً تنظیم از طریق R_d یعنی با استفاده ازیک پتانسیومتر، به آسانی انجام می‌گردد.

٤-۵-٤ کنترل کننده تناسبی- انتگرالی- مشتق‌گیر الکتریکی:

با توجه به مدارهائی که برای کنترل کننده‌های P_d و C_d الکتریکی ارائه شده ارائه و درک مدار یک کنترل کننده PID آسان می‌گردد. طرح کلی چنین کنترل کننده‌ای مطابق شکل ٤-۱۶ می‌باشد:



شکل (۴-۱۶) کنترل کننده PID الکتریکی

در این مدار داریم:

$$G(s) = K$$

$$H(s) \approx \frac{R_2}{R_1} \times \frac{R_i}{R_i + \frac{1}{C_i S}} \times \frac{\frac{1}{C_d S}}{R_d + \frac{1}{C_d S}}$$

$$H(s) \approx \frac{R_2}{R_1} \times \frac{R_i C_i S}{R_i C_i S + 1} \times \frac{1}{R_d C_d S + 1}$$

$$H(s) \approx \frac{R_2}{R_1} \times \frac{T_i S}{T_i S + 1} \times \frac{1}{T_d S + 1}$$

با رعایت اصل کلی در ساخت کنترل کننده‌ها یعنی $|G(s).H(s)| >> 1$ می‌توانیم بنویسیم:

$$T_C(s) = \frac{E_0(s)}{E_i(s)} = \frac{1}{H(s)}$$

$$T_C(s) = \frac{R_1}{R_2} \times (1 + \frac{1}{T_i S})(T_d S + 1)$$

$$T_C(s) = \frac{R_1}{R_2}(1 + \frac{T_d}{T_i} + \frac{1}{T_i S} + T_d S) \quad , \quad \alpha = 1 + \frac{T_d}{T_i}$$

(۱٦-٤)

رابطه (۱٦-٤) بیان کلی یک کنترل کننده PID می‌باشد. با تنظیم مقادیر R_d, R_i و R_2 می‌توان کنترل کننده را به دلخواه تنظیم نمود.

رابطه (۱٦-٤) تقریبی است و نیاز به تصحیحاتی دارد. همچنین تغییر هر یک از مقادیر R_i یا R_d بر روی کلیه ضرایب اثر می‌گذارد. در عمل، طرح کنترل کننده باید بگونه‌ای باشد که زمانهای انتگرال گیری T_i و مشتق گیری T_d مستقل از یکدیگر قابل تنظیم باشند.

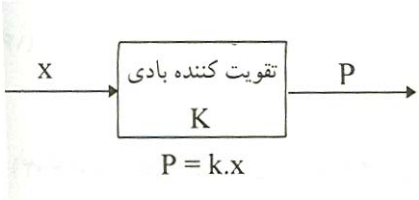
درک مدارهای کلی انواع کنترل کننده‌ها که در بخش‌های قبل به آنها اشاره کردیم به دو جهت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. اول آنکه قالب کلی انواع کنترل کننده‌های الکترونیکی که توسط کمپانی‌های مختلف ساخته می‌شوند همان طرح‌های فوق می‌باشند. دوم آنکه درکنترل کننده‌های بادی و هیدرولیکی نیز قالب‌های فوق کم و بیش رعایت می‌گردد با این تفاوت که عناصر الکتریکی جای خود را به عناصر بادی یا هیدرولیکی می‌دهند. مثلاً با استفاده از یک تقویت کننده بادی با گین زیاد و یک مقاومت و یک ظرفیت (خازن) بادی و رعایت قالب شکل ٤-١٤ می‌توان یک کنترل کننده PI بادی ساخت.

۴-۶ کنترل کننده‌های بادی (پنوماتیکی):

سیستم‌های بادی مزایا و کاربردهای خاص خود را دارند که از جمله می‌توان به ایمنی و در پاره‌ای موارد ارزانی آنها اشاره نمود. با توجه به اصل کلی، طرح‌های کنترل کننده‌های بادی شبیه به طرح‌های انواع الکتریکی می‌باشد یعنی برای ساخت یک کنترل کننده بادی نیاز به یک تقویت کننده با گین زیاد و عناصر مقاومت و ظرفیت (خازن) داریم.

٤-٦-١ تقویت کننده بادی:

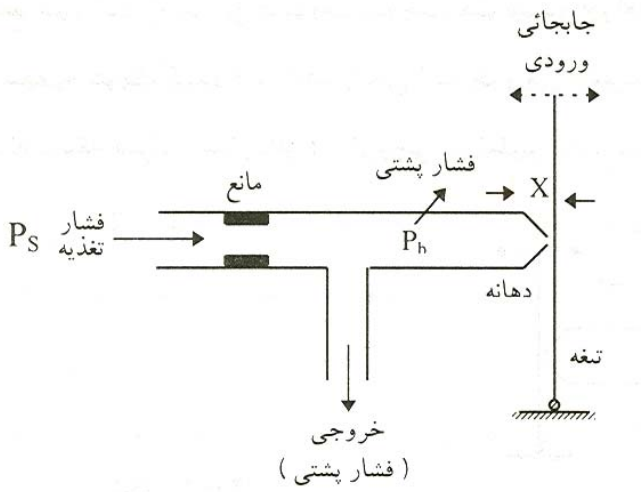
مطابق شکل ٤-١٧ ورودی یک تقویت کننده بادی معمولاً جابجائی (طول) و خروجی آن فشار می‌باشد. برای ساخت تقویت کننده‌های بادی معمولاً از طرح‌های دهانه- تیغه (Nozzle-Flapper) استفاده می‌شود.



شکل (۴-۱۷) نمایش جعبه‌ای تقویت کننده بادی در حالت کلی

٤-٦-١-١ تقویت کننده دهانه- تیغه (Nozzle-Flapper):

شکل ٤-١٨ یک تقویت کننده دهانه-تیغه را نشان می‌دهد. اگر فاصله تیغه (Flapper) از دهانه (Nozzle) زیاد باشد فشار تغذیه از طریق دهانه به خارج جریان پیدا می‌کند. جریان هوا از میان مانع (Orifice) موجب افت فشار در دو طرف آن می‌شود بگونه‌ای که فشار بعد از مانع یعنی فشار پشتی (Back-Pressure) بسیار کمتر از فشار تغذیه (P_S) می‌گردد. از طرف دیگر اگر تیغه به دهانه نزدیک شود جریان هوا از دهانه کاهش می‌یابد و این امربه کاهش جریان از میان مانع می‌انجامد و بنابراین افت فشار روی مانع نیز کاهش یافته، فشار پشتی افزایش می‌یابد. مشخصه فشار خروجی (پشتی) بر حسب فاصله تیغه از دهانه چسبیده و آن را کاملاً مسدود کرده باشد، در این حالت جریان هوا صفر است و بنابراین افت فشاری بر روی مانع نخواهیم داشت و فشار دو طرف مانع برابر فشار تغذیه می‌شود.

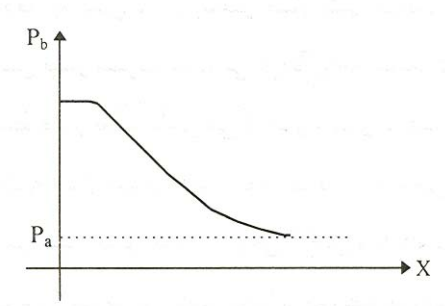


شکل (۴-۱۹) مشخصه تقویت کننده دهانه- تیغه در حالت کلی

اگر فاصله تیغه از دهانه زیاد شود فشار خروجی کاهش می‌یابد که حداقل آن فشار اتمسفر (P_a) خواهد شد. برای آنکه مشخصه تقویت کننده حتی‌الامکان خطی باشد می‌بایستی مواردی را در ساخت رعایت نمود از جمله قطر دهانه حتی‌الامکان کوچک (حدود ۰/۳ میلیمتر) انتخاب می‌گردد و قطر مانع اندکی از قطر دهانه در نظر گرفته می‌شود (حدود ۰/۲۵ میلیمتر). دامنه

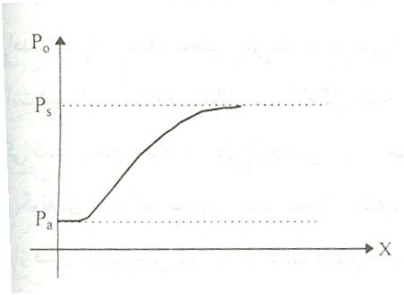
تغییرات سیگنال ورودی باید بگونه‌ای باشد که حداقل فاصله تیغه از دهانه صفر و حداکثر آن در حدود قطر دهانه باشد.

از فشار خروجی تقویت کننده دهانه- تیغه نمی‌توان مستقیماً برای راه‌اندازی قسمت‌های بعدی (مثلاً محرک ها) استفاده نمود چرا که در صورت جریان هوا در خروجی، این جریان می‌بایستی از میان مانع عبور می‌کند که در این صورت موجب افت فشار خواهد شد. برای حل این مشکل از یک مدار بافر (شبیه به تقویت کننده الکترونیکی) در خروجی استفاده می‌کنیم. در شکل ٤-٢٠ یک تقویت کننده دهانه- تیغه همراه با مدار بافر در خروجی آن نمایش داده شده است.



شکل (۴-۲۰) تقویت کننده دهانه- تیغه با مدار بافر

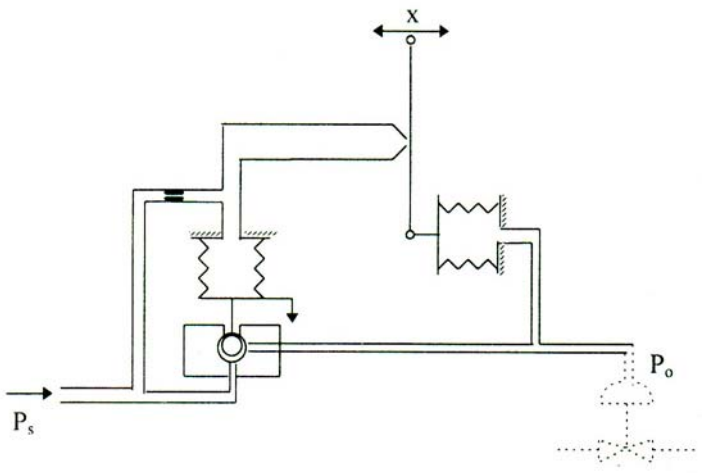
مدار بافر را گاهی رله معکوس نیز می‌گویند. مطابق شکل افزایش فشار پشتی موجب حرکت دیافراگم به سمت پائین و بسته‌تر شدن شیر می‌گردد و این امر فشار خروجی (مصرف کننده) را کاهش می‌دهد. به همین ترتیب کاهش فشار پشتی موجب حرکت دیافراگم به سمت بالا و بازتر شدن شیر و افزایش فشار مصرف کننده می‌گردد. توجه نمائید که در هر حالت جریان هوای مورد نیاز مصرف کننده توسط فشار تغذیه تأمین می‌گردد و تأثیری بر فشار پشتی ندارد. مدار بافر علاوه بر بافر کردن فشار پشتی بر فشار مصرف کننده تغییرات فشار خروجی نسبت به فشار پشتی را معکوس می‌کند یعنی با افزایش فشار پشتی فشار خروجی کاهش و با کاهش آن افزایش می‌یابد. به همین دلیل مدار بافر را رله معکوس کننده نیز می‌نامیم. بنابراین مشخصه ورودی- خروجی تقویت کننده شکل ٤-٢٠ در حالت کلی مطابق شکل ٤-٢١ می‌باشد.



شکل (۴-۲۱) مشخصه تقویت کننده دهانه- تیغه با بافر

تقویت کننده شکل ٤-٢٠ دارای گین بسیار زیادی است بطوریکه در اثر تغییرات در دامنه‌ای حدود چند دهم میلی متر اندازه تغییرات فشار بسیار عظیم خواهد بود بگونه‌ای که تقویت کننده عملاً در محدوده اشباع بالا یا اشباع پائین قرار خواهد گرفت. همچنین تنظیم گین تقویت کننده بر روی یک مقدرا دلخواه مقدور نمی‌باشد. این تقویت کننده را می‌توان به یک تقویت کننده آپ آمپ (Op-Amp) تشبیه نمود. در اینجا نیز مشابه Op-Ampها می‌توانیم با برقراری فیدبک، گین تقیوت کننده را کاهش و حوزه عمل کرد خطی آن را افزایش دهیم.

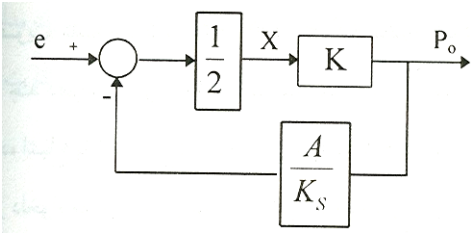
مداری که معمولاً در اینگونه موارد استفاده می‌شود مطابق شکل ٤-٢٢ می‌باشد. در این مدار با استفاده از یک دم، فیدبکی بر تیغه (ورودی) اعمال می‌کنیم.



شکل (۴-۲۲) تقویت کننده دهانه- تیغه فیدبک شده

برای روشن‌تر شدن مطلب فرض کنید در اثر اعمال ورودی تیغه از دهانه دور شود. در این حال فشار پشتی کاهش و فشار خروجی P_o افزایش می‌یابد. افزایش فشار خروجی موجب باز شدن دم فیدبک و حرکت انتهای دیگر تیغه به سمت دهانه می‌گردد که این امر موجب نزدیکتر شدن تیغه به دهانه و کاهش اثر ورودی (یعنی دور شدن تیغه از دهانه) می‌شود. بیان فوق به معنی برقراری فیدبک منفی در تقویت کننده است.

در شکل ٤-٢٣ نمایش جعبه‌ای تقویت کننده فیدبک شده فوق برای حالتی که فاصله دهانه از دو انتهای تیغه یکسان می‌باشد آمده است.



شکل (۴-۲۳) نمایش جعبه‌ای تقویت کننده شکل (۴-۲۲)

در این شکل k، گین تقویت کننده بدون فیدبک است و A و K_s به ترتیب سطح و ضریب فنریت دم می‌باشند. گین تقویت کننده در این حالت بدست می‌آید:

$$\frac{P_o}{e}=\frac{\frac{1}{2}K}{1+\frac{1}{2}K.\frac{A}{K_S}} \qquad (١٧-٤)$$

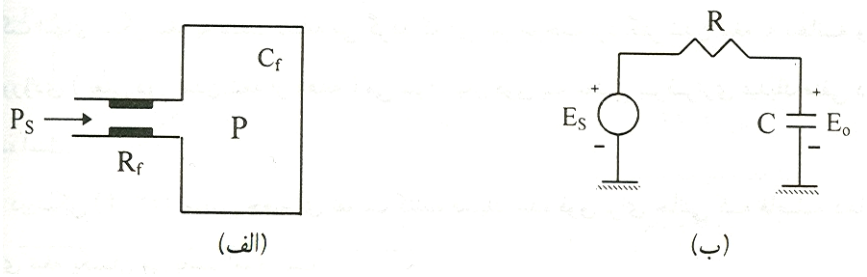
رابطه (٤-١٧) را با فوض زیاد بودن بهره حلقه (Loop-Goin) می‌توان بصورت زیر ساده نمود:

$$\frac{P_o}{e}=\frac{K_S}{A} \qquad (١٨-٤)$$

ضریب فنریت دم را می‌توان با استفاده از فنرهای کمکی که موازی با دم به تیغه متصل می‌شوند تنظیم نمود.

٤-٦-٢ عناصر مسیر برگشت در کنترل کننده‌های بادی:

در بخش قبل با تقویت کننده گین زیاد بادی آشنا شدیم و همانطور که گفته شد اصل کلی در ساخت کنترل کننده‌های لازم می‌دارد که عناصری با تابع تبدیل عکس عملیات مورد نیاز، در مسیر فیدبک تقویت کننده قرار گیرد تا عملیات دلخواه بدست آید. در کنترل کننده‌های الکتریکی از عناصر مقاومت (R) و(C) در مسیر برگشت استفاده نمودیم. همانطور که می‌دانند مقاومت یک عنصر الکتریکی تلف کننده انرژی و خازن یک عنصر الکتریکی ذخیره کننده انرژی است. در سیستم‌های بادی نیز همانطور که در فصل دوم دیدیم عناصر تلف کننده و ذخیره کننده انرژی داریم. بعنوان یادآوری شکل ٤-٢٤-الف را در نظر بگیرید.



شکل (۴-۲۴) مدار RC الکتریکی و بادی

در این شکل رابطه بین فشار شارژ (P_S) و فشار مخزن (P) بصورت زیر بدست می‌آمد:

$$P_0 = \frac{1}{R_f C_f S + 1} P_S$$

$$P_0 = \frac{1}{\tau_f S + 1} P_S \qquad (۱۹-٤)$$

که مشابه رابطه بین ولتاژهای E_S و E_o در مدار الکتریکی معادل آن شکل ٤-٢٤- الف می‌باشد:

$$E_o = \frac{1}{RCS + 1} E_s$$

$$E_o = \frac{1}{\tau S + 1} E_s$$

بنابراین هر ظرف مسدود که قابلیت ذخیره‌سازی فشار را داشته باشد مانند یک خازن عمل می‌نماید و هر مانع در برابر عبور جریان هوا که افت فشار ایجاد کند مانند یک مقاومت عمل می‌نماید.

٤-٦-٢-١ مقاومت بادی:

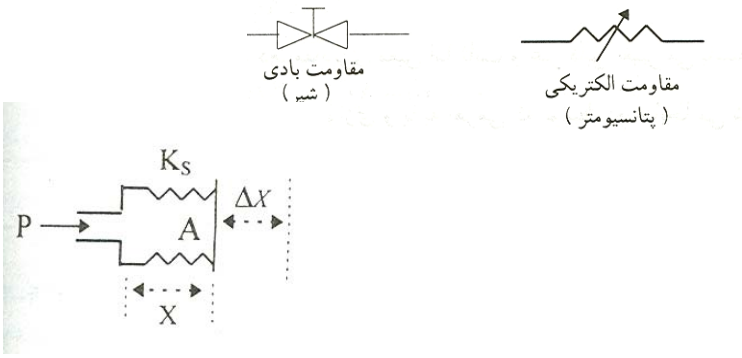
در کنترل کننده‌های بادی ازشیرهای ظریف قابل تنظیم بعنوان مانع در برابر عبور جریان هوا یا بعبارت دیگر بعنوان مقاومت بادی استفاده میکنیم. باز و بسته کردن شیر قطر روزنه عبور هوا را افزایش یا کاهش می‌دهد که این به معنی کاهش یا افزایش مقاومت بادی می‌باشد.

تنظیم مقاومت بادی به آسانی تنظیم یک پتانسیومتر است و بنابراین تنظیم کنترل کننده‌های بادی معمولاً مانند کنترل کننده‌های الکتریکی از طریق تنظیم مقاومت (شیرها) انجام می‌گردد.

٤-٦-٢-٢ ظرفیت (خازن) بادی:

در کنترل کننده‌های بادی سیگنال خطا جابجائی است و خروجی کنترل کننده فشار است دیدیم که هر ظرف مسدود مانند یک ظرفیت (خازن) بادی عمل می‌کند. بنابراین عناصر مسیر

برگشت می‌بایستی ضمن فیدبک (خروجی بـه ورودی) بگونـه‌ای فشـار را تبـدیل بـه جابجـائی نمایند. بدین منظور از یک دم بعنوان ظرف مسدود (خـازن) اسـتفاده مـی‌گـردد. دم عـلاوه بـر ذخیره فشار به دلیل خاصیت ارتجاعی، تغییر طولی متناسب با فشار ذخیره شده تولید می‌کنـد. برای روشن‌تر شدن مطلب شکل ٤-٢٥ را در نظر بگیرید:



شکل (۴-۲۵) بیان عملکرد دم در برابر فشار

در حالت عادی (بدون فشار) طول دم X می‌باشد. هر گاه فشار P بداخل آن اعمـال گـردد و سطح مؤثر دم A باشد نیروی وارده بر آن برابر خواهد بود با:

$$F = PA \qquad (٢٠-٤)$$

بدلیل خاصیت ارتجاعی (فنری) این نیرو موجب باز شدن دم (آکاردئون) می‌گردد که رابطه بین نیرو و مقدار بازشدگی همان رابطه فنر می‌باشد یعنی:

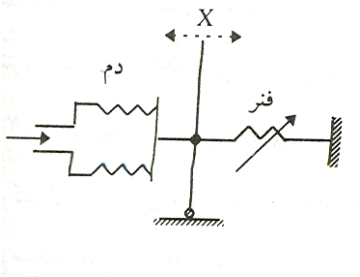
$$F = K_S.X \qquad (٢١-٤)$$

در رابطه (٤-٢١) K_S، ضریب فنریت دم مـی‌باشـد. جابجـائی X را بـر حسـب فشـاراعمالی می‌توان با استفاده از روابط (٤-٢٠) و (٤-٢١) بدست آورد:

$$X = \frac{F}{K_S}$$

$$X = \frac{A}{K_S}.P \qquad (٢٢-٤)$$

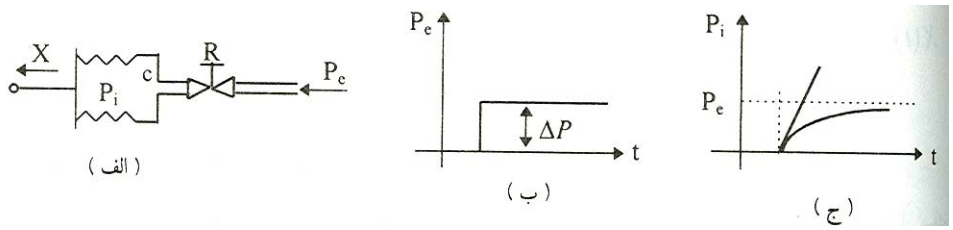
A و K_S برای یک دم مقادیری معین اما ثابت و غیرقابـل تغییـر مـی‌باشـند. در عمـل بـرای ایجاد تغییر و تنظیم K_S یک فنر با دم موازی و یا به اهرمی که توسط دم جابجا می‌شود متصل می‌کنند. شکل (٤-٢٦).



شکل (۴-۲۶). خازن پنوماتیک (بادی)

٤-٦-٢-٣ مدار انتگرال‌گیر بادی:

شکل ٤-٢٧ یک مدار انتگرال‌گیر بادی را نشان می‌دهد. طرفیت (دم) و مقاومت (شیر) یک پاسخ نمائی به فشار پله‌ای ورودی را ایجاد می‌کنند.



شکل (۴-۲۷) مدار RC بادی و عملکرد آن

در شکل ٤-٢٧- الف همانطور که قبلاً نیز دیده‌ایم رابطه بین فشار ورودی (P_e) و فشار داخل دم (P_i) یک رابطه نمائی بصورت زیر است:

$$P_i(s) = \frac{1}{RCS+1} P_e(s)$$

$$P_i(t) = P_e(1 - e^{-1/RC}) \qquad (٢٣-٤)$$

شکل کلی رابطه (٤-٢٣) به ازای تغییر فشار ورودی ΔP در شکل ٤-٢٧- ج رسم شده است که رابطه دقیق آن عبارت است از:

شیب این منحنی در لحظات اولیه برابر است با: $P_i(t) = \Delta P(1 - e^{-1/RC})$

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = \frac{1}{RC} \Delta P e^{-1/RC}$$

$$\frac{dP_i(t)}{dt} \approx \frac{1}{RC} \Delta P \qquad (t = 0) \qquad (٢٤-٤)$$

رابطه (٤-٢٤) به معنی متناسب بودن تغییرات فشار داخل دم $(\frac{dP_i(t)}{dt})$ با فشار ورودی ΔP است یا به بیان دیگر فشار داخل دم ($P_i(t)$)متناسب با انتگرال فشار ورودی است:

$$P_i(t) \approx \frac{1}{RC} \int_0^1 \Delta P(t).dt \qquad (٢٥-٤)$$

رابطه(٤-٢٥) ارتباط انتگرال فشار داخل دم با سیگنال ورودی را بیان می‌دارد. فشارداخل دم نیز از طریق رابطه (٤-٢٢) به جابجائی آن تبدیل می‌گردد. بعبارت دیگر:

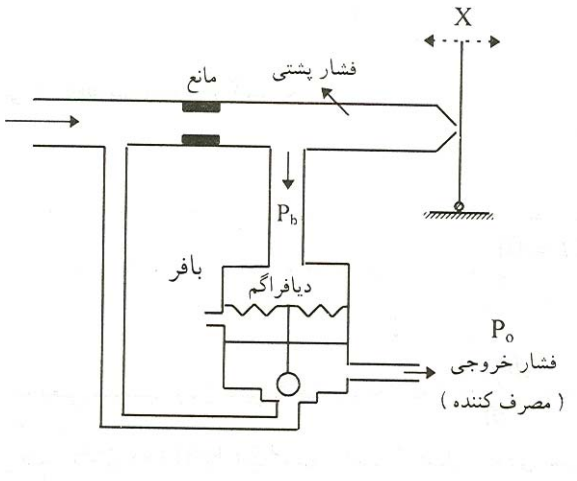
$$X(t) = \frac{1}{RC} \cdot \frac{A}{K_S} \int_0^1 \Delta P(t).dt \qquad (٢٦-٤)$$

۴-۶-۳ انواع کنترل کننده‌های بادی:

همانطور که گفتیم عناصر لازم برای ساخت یک کنترل کننده با هر عملیات دلخواه عبارتند از یک تقویت کننده با گین زیاد و عناصری در مسیر برگشت. اکنون که با تقویت کننده و عناصر بادی R و C که در حلقه فیدبک قرار می‌گیرند آشنا شدیم آمادگی لازم را داریم تا طرح‌هائی برای انواع عملیات کنترل کننده ارائه نمائیم.

٤-٦-٣-١ کنترل کننده دو وضعیتی بادی:

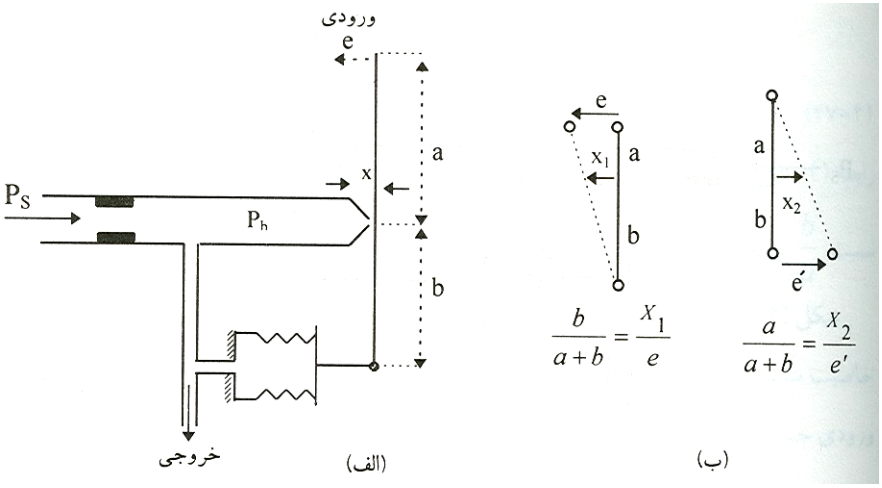
یک کنترل کننده دو وضعیتی در واقع یک تقویت کننده با گین زیاد است که در دو حالت اشباع بالا یا اشباع پائین کار می‌کند بنابراین شکل ٤-٢٨ که تکرار شکل ٤-٢٠ است یک کنترل کننده بادی دو وضعیتی می‌باشد.



شکل (۴-۲۸) کنترل کننده دو وضعیتی بادی

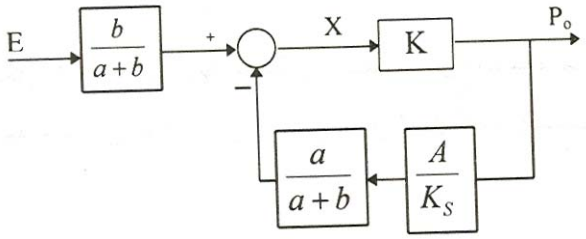
٤-٦-٣-٢ کنترل کننده تناسبی بادی:

با اعمال فیدبک بر یک تقویت کننده گین زیاد می‌توان آن را به یک تقویت کننده خطی با گین کمتر و قابل تنظیم تبدیل نمود. شکل ٤-٢٩ یک کنترل کننده بادی تناسبی را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۲۹). کنترل کننده تناسبی بادی

این شکل در واقع همان شکل ٤-١٨ می‌باشد با این تفاوت که با تنظیم فواصل a و b می‌توان گین تقویت کننده یا همان ضریب تناسب (K_p) را بـه راحتـی تنظـیم نمـود. نـایش جعبـه‌ای ایـن کنترل کننده مطابق شکل ٤-٣٠ می‌باشد که بررسی صحت آن را بـه خواننـده علاقمنـد واگـذار می‌نماییم.

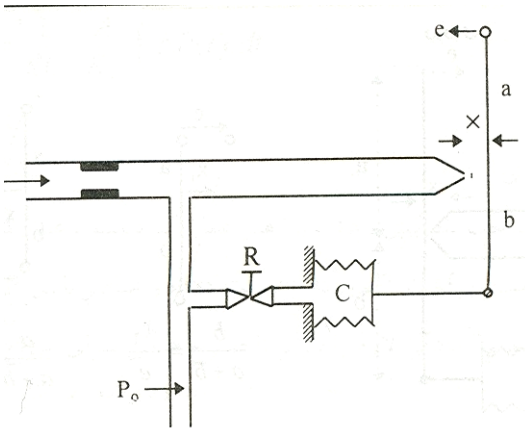


شکل (۴-۳۰) نمایش جعبه‌ای کنترل کننده تناسبی بادی

٤-٦-٣-٣ کنترل کننده تناسبی- مشتق‌گیر بادی:

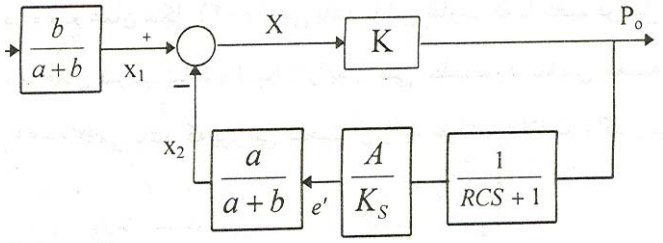
طرح ساده این کنترل کننده مطابق شکل ٤-٣١ می‌باشد.

در این شکل برای سادگی قسمت رله معکوس را حـذف نمـوده‌ایـم. خواننـده بـا طـرز کـار قسمت‌های مختلف قبلاً آشنا گردیده است.



شکل (۴-۳۱). کنترل کننده PD بادی

نمایش جعبه‌ای این کنترل کننده مطابق شکل ٤-۳۲ می‌باشد.



شکل (۴-۳۲). نمایش جعبه‌ای کنترل کننده شکل (۴-۳۱)

در شکل ٤-۲۹- ب روابط جابجائی در تیغه نمایش داده شده اند.

با توجه به نمایش جعبه‌ای می‌توان تابع تبدیل کنترل را بدست آورد:

$$\frac{P_O(s)}{E(s)} = \frac{\frac{b}{a+b}\times K}{1+K\times\frac{a}{a+b}.\frac{A}{K_S}.\frac{1}{RCS+1}}$$

و با رعایت اصل کلی در ساخت کنترل کننده‌ها یعنی:

$$\left|K.\frac{a}{a+b}.\frac{A}{K_S}.\frac{1}{RCS+1}\right| >> 1$$

خواهیم داشت:

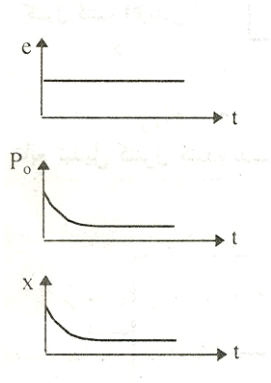
$$\frac{P_O(S)}{E(s)} = \frac{b}{a.\frac{A}{K_S}.\frac{1}{RCS+1}} = \frac{b}{aA}(K_S RCS + K_S)$$

$$\frac{P_0(s)}{E(s)} = \frac{bK_S}{aA}(RCS+1) \quad , \quad \frac{bK_s}{aA} = K_p \quad , \quad RC = T_d$$

$$\frac{P_0(s)}{E(s)} = K_P(T_d S+1) \qquad (۲۷-٤)$$

رابطه (٤-٢٧) شکل کلی تابع تبدیل یک کنترل کننده PD را بیان می‌نماید. در عمل ضریب K_p را با تنظیم نسبت $\frac{b}{a}$ و مقدار T_d را با تنظیم R تعیین و تنظیم می‌نمائیم.

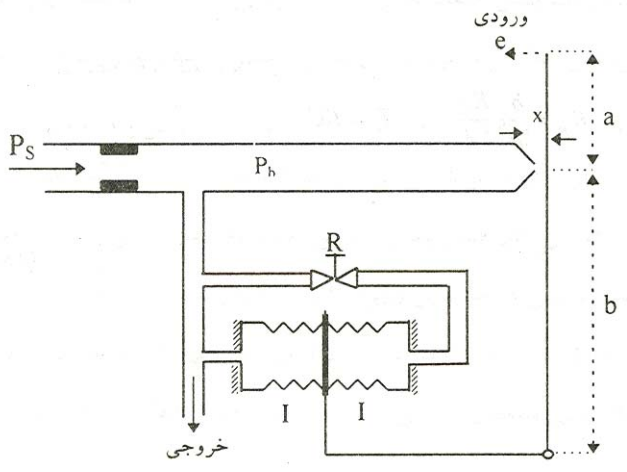
شکل ٤-٣٣ تغییرات زمانی P_0 و x را به ازای خطای ورودی پله نشان می‌دهد. با توجه به شکل خاصیت مشتق‌گیری کنترل کننده مشهود است. همچنین دقت نمائید که کنترل کننده تنها به تغییرات ورودی حساس است و در صورتیکه ورودی ثابت بماند، کنترل کننده در وضعیت تعادل تثبیت می‌گردد.



شکل (۴-۳۳). تغییرات زمانی فشار خروجی در اثر ورودی پله در کنترل کننده PD بادی

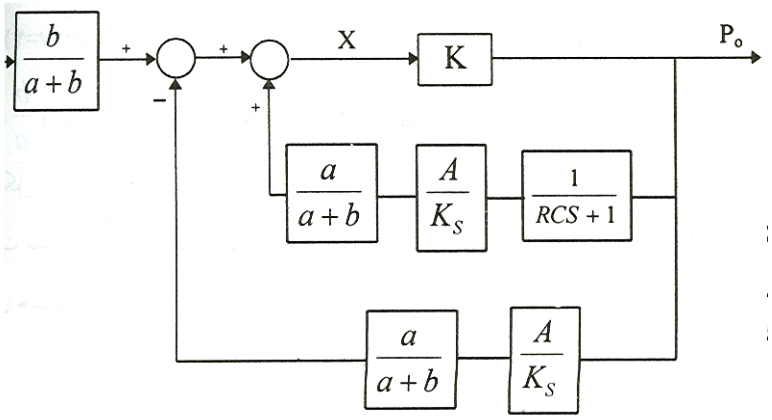
٤-٦-٣-٤ کنترل کننده تناسبی- انتگرالی بادی:

شکل ٤-٣٤ طرح کلی یک کنترل کننده تناسبی- انتگرالی را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۳۴) کنترل کننده PI بادی

این طرح از نظر تجهیزات شبیه به طرح قبل (کنترل کننده PD) می‌باشد با این تفاوت که فیدبک عناصر R و C روی تقویت کننده مثبت می‌باشد. نمایش جعبه‌ای این کنترل کننده مطابق شکل ٤-٣٥ است.



شکل (۴-۳۵) نمایش جعبه‌ای کنترل کننده PI بادی

تابع تبدیل کنترل کننده بدست می‌آید:

$$\frac{P_0(s)}{E(s)} = \frac{\frac{b}{a+b}K}{1+\frac{Ka}{a+b}.\frac{A}{K_S}(1-\frac{1}{RCS+1})}$$

و با رعایت اصل کلی در طراحی کنترل کننده‌ها داریم:

$$\left|\frac{Ka}{a+b}.\frac{A}{K_S}(1-\frac{1}{RCS+1})\right| >> 1$$

$$\frac{P_0(s)}{E(s)} = \frac{b}{a}.\frac{K_S}{A}.(1+\frac{1}{RCS}) \quad , \quad K_P = \frac{b}{a}.\frac{K_S}{A} \quad , \quad T_i = RC$$

$$\frac{P_0(s)}{E(s)} = K_P(1+\frac{1}{T_iS})$$

(۴-۲۸)

رابطه (۴-۲۸) یک کنترل کننده PI را بیان می‌دارد. در اینجا نیز بوسیله نسبت $\frac{b}{a}$، K_p و توسط R مقدار T_i تنظیم می‌شود.

طرح کنترل کننده PI ظاهراً با آنچه که انتظار داشتیم متفاوت بنظر می‌رسد اما با دقت بیشتر در واقع این طور نیست. زیرا اگر عمل تناسب- انتگرال را بصورت زیر نمایش دهیم:

$$T_C \equiv 1+\frac{1}{T_iS}$$

عکس آن می‌شود:

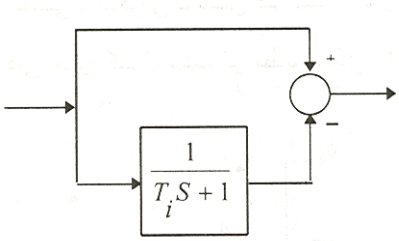
$$\frac{1}{T_C} = \frac{T_iS}{T_iS+1}$$

که می‌توان آن را بصورت زیر هم نشان داد:

$$\frac{1}{T_C} = 1-\frac{1}{T_iS+1}$$

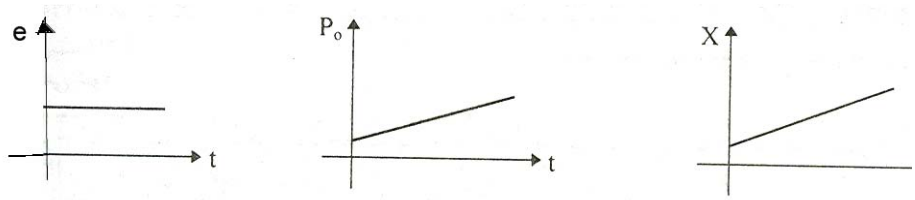
(۴-۲۹)

نمایش جعبه‌ای رابطه (٤-٢٩) بصورت زیر می‌باشد:



که در واقع به شکل مسیر برگشت در نمایش جعبه‌ای ٤-٣٥ می‌باشد. اساساً در انواع کنترل کننده‌های بادی که به نوع عمل انتگرال وجود داشته باشد یک مسیر برگشت بصورت فیدبک مثبت نیز وجود دارد.

طرز کار این کنترل کننده‌ها را بگونه‌ای دیگر نیز می‌توان توجیه نمود. فرض کنید تیغه در یک حرکت پله‌ای به دهانه نزدیک شود. در این حال فشار پشتی بالا می‌رود و دم I در شکل ٤-٣٤ فیدبک منفی را برقرار می‌کند. (قسمت تناسبی). اما بدلیل وجود R دم II هنوز تأثیری در کار سیستم ندارد. اما رفته رفته دم II نیز از طریق R شارژ شده و فیدبک مثبت را برقرار می‌کند یعنی با انبساط خود تیغه را بیشتر دهانه نزدیک نموده و فشار پشتی همچنان بالا می‌رود. در اینجا آنچه که اتفاق می‌افتد بطور کیفی در شکل ٤-٣٦ نمایش داده شده است.



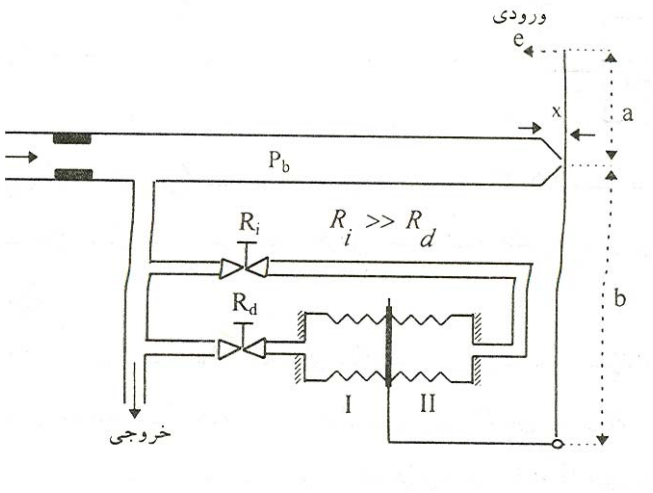
شکل (۴-۳۶) پاسخ کیفی کنترل کننده PI بادی به خطای پله

توجه نمایید که بدین ترتیب فشار P_0 هیچگاه به مقدار تعادل بر نمی‌گردد مگر آنکه خطا e برای مدتی برابر با مدت فوق بصورت یک پله منفی (قرینه مقدار قبل) باقی بماند و این همان رفتاری است که از مدار انتگرال گیر انتظار داریم.

٤-٦-٣-٥ کنترل کننده تناسبی- انتگرالی- مشتق‌گیر بادی:

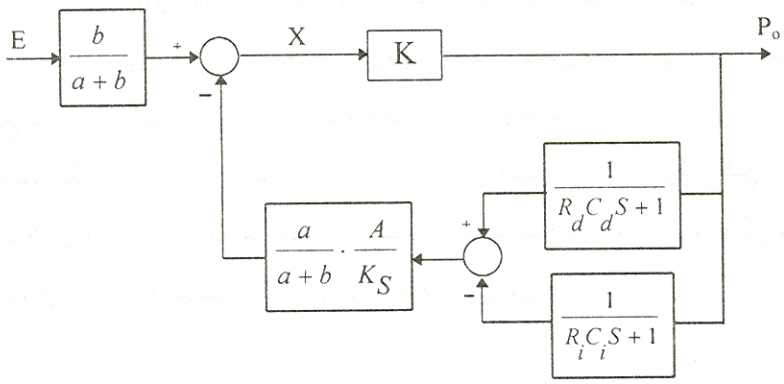
با شناختی که از کنترل کننده‌های تناسبی- انتگرالی و تناسبی- مشتق‌گیر داریم طراحی یک کنترل کننده تناسبی- انتگرالی- مشتق گیر بسیار آسان است.

طرح کلی چنین کنترل کننده‌ای مطابق شکل ٤-٣٧ می‌باشد.



شکل (۴-۳۷) کنترل کننده PID بادی

نمایش جعبه‌ای این کنترل کننده نیز در شکل ٤-۳۸ آمده است و بیان طرز کار آن بعنوان تمرین بعهده خواننده واگذار می‌گردد. توجه نمائید که در این طرح قسمت PD فیدبک منفی و قسمت PI فیدبکی مثبت حول تقویت کننده دهانه- تیغه برقرار می‌کند.



شکل (۴-۳۸) نمایش جعبه‌ای کنترل کننده PID بادی

با توجه به نمایش جعبه‌ای تابع تبدیل کنترل کننده را بصورت زیر بدست می‌آوریم:

$$\frac{P_0(s)}{E(s)}=\frac{\frac{bK}{a+b}}{1+\frac{Ka}{a+b}\cdot\frac{A}{K_S}\cdot\frac{(R_iC_i-R_dC_d)S}{(R_dC_dS+1)(R_iC_iS+1)}} \qquad (٤-٣٠)$$

مشتق گیری عمل سریع و کوتاه مدتی است در حالیکه انتگرال گیری عملی دراز مدت و مداوم است.

بنابراین طبیعی است که در یک کنترل کننده PID زمان انتگرال گیری (میانگین گیری) بسیار بزرگتر از زمان مشاهده تغییرات (پنجره تعیین تغییرات) باشد. بنابراین در رابطه (٤-۳۰) شرط $R_iC_i>>R_dC_d$ یا $T_i>>T_d$ شرطی الزامی است.

اکنون اصل کلی در طرح کنترل کننده‌ها را می‌نویسیم:

$$\left|\frac{KaA(T_i - T_d)S}{(a+b)K_S(T_dS+1)(T_iS+1)}\right| >> 1$$

با رعایت اصل فوق تابع بصورت زیر در می‌آید:

$$T_c(s) = \frac{P_0(s)}{E(s)} = \frac{bK_S}{aA}.\frac{(T_dS+1)(T_i+1)}{(T_i - T_d)S}$$

$$T_c(s) = \frac{bK_S}{aA}.\frac{T_dT_iS^2 + T_iS + 1}{T_iS} \qquad T_i >> T_d$$

$$T_c(s) = K_P(1 + T_dS + \frac{1}{T_iS}) \qquad (۳۱-٤)$$

دررابطه (۳۱-٤) $K_P = \frac{bK_S}{aA}$ می‌باشد.

کنترل کننده‌های بادی که توسط کمپانی‌های مختلف ساخته می‌شوند کم و بیش از طرح‌هایی مشابه با طرح‌های فوق استفاده می‌نمایند و در صورت درک عمیق طرح‌هائی که در اینجا ارائه گردیدند طرح‌های جدید احتمالی نیز قابل درک و شناسائی خواهند بود.

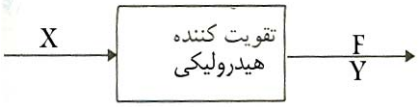
کیفیت قطعات و در نتیجه قیمت کنترل کننده‌ها بر حسب مورد کاربرد ممکن است تفاوت‌های چشمگیری داشته باشند. مسلماً یک کنترل کننده PI مورد استفاده در هواپیما بسیار گرانتر از کنترل کننده مشابه‌ای است که در ماشین پخت تایر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۴-۷ کنترل کننده‌های هیدرولیکی:

سیستم‌های هیدرولیکی به دلیل ویژگی‌های خاص خود کاربردهای فراوانی در صنعت دارند. مهمترین ویژگی سیستم‌های هیدرولیکی توانائی در اعمال، تثبیت و کنترل نیروهای عظیم می‌باشد. در دسترس بودن هوا موجب سهولت کار در طراحی سیستم‌های پنوماتیکی می‌گردد بگونه‌ای که تخلیه هوای فشرده از طریق دهانه یک تقویت کننده و یا از قسمت‌های دیگر اشکالی در محیط زیست یا در عملکرد سیستم ایجاد نمی‌کند. اما در مورد سیستم‌های هیدرولیکی چنین نیست و تخلیه یا نشت روغن پرفشار تولید خطر و آلودگی می‌کند. بعلاوه روغن هیدرولیک با ارزش است و از بین رفتن آن هزینه را بالا می‌برد. به همین دلیل سیستم‌های هیدرولیکی می‌باید دارای مسیر برگشت روغن باشند و این امر طراحی آنها را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

ساخت کنترل کننده‌های هیدرولیکی نیز از اصل کلی که در بخش (٤-٤) گفته شد پیروی می‌کند. با این وجود ویژگی‌های خاص آنها از جمله پیش‌بینی مسیر برگشت تدابیر ویژه‌ای را طلب می‌کند.

٤-٧-١ تقویت کننده‌های هیدرولیکی معمولاً مطابق شکل ٤-٣٩ ورودی را جابجائی و خروجی را نیرو و یا جابجائی در نظر می‌گیرند.



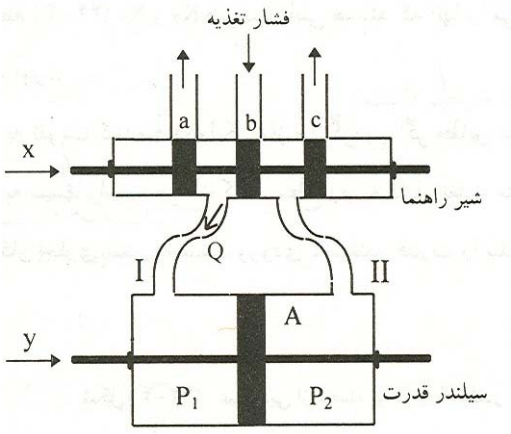
شکل (۴-۳۹) بیان کلی تقویت کننده هیدرولیکی

گاهی یک تقویت کننده علاوه بر تقویت کنندگی، عملی دیگر (مثل انحراف‌دهی) نیز بر روی ورودی انجام می‌دهد.

٤-٧-١-١ تقویت کننده سیلندر پیستونی (سروموتور):

شکل ٤-٤٠ یک تقویت کننده سیلندر پیستونی هیدرولیکی را نشان می‌دهد. در این شکل X سیگنال ورودی (جابجائی) و Y سیگنال خروجی است.

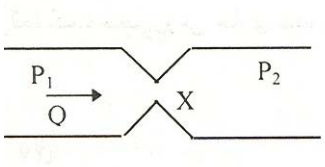
اگر X به راست حرکت کند شیر راهنما فشار تغذیه را به ورودی I و فشار تانک را به ورودی II سیلندر قدرت متصل می‌سازد و با جاری شدن روغن پر فشار، پیستون قدرت به سمت راست حرکت می‌کند.



شکل (۴-۴۰) تقویت کننده سیلندر پیستونی هیدرولیکی

در این حالت جابجائی Y نیز به سمت راست خواهد بود.به همین ترتیب جابجائی X به سمت راست موجب جابجائی Yبه سمت چپ می‌گردد.

برای درک بهتر، رابطه بین X و Y شکل ٤-٤١ را در نظر بگیرید. در این شکل بدلیل اختلاف فشار P_1 و P_2 سیال تراکم ناپذیر از روزنه‌ای به مساحت X عبور می‌کند.



شکل (۴-۴۱) عبور دبی در اثر اختلاف فشار در دو طرفه روزنه

اصل بقای انرژی در حرکت یک سیال تراکم‌ناپذیر رابطه دبی حجمی جاری شده از میان روزنه را بصورت زیر نشان می‌دهد:

(٤٢-٤)

$$Q = KX\sqrt{P_1 - P_2}$$

در رابطه (٤-٤٢) K ضریب ثابت است.

اگر فشار P_1 همواره ثابت باشد و تغییرات فشار P_2 را حول نقطه تعادل با P_2 نشان می‌دهیم رابطه (٤-٤٢) را بصورت زیر می‌توان نوشت:

(٤٣-٤)

$$Q = KX\sqrt{P_2}$$

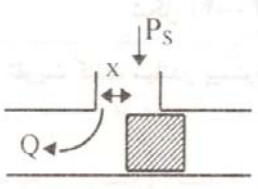
رابطه (٤-٤٣) رابطه‌ای غیرخطی است و نشان می‌دهد که دبی جاری شده به فشار P_2 و سطح روزنه بستگی دارد. اگر تغییرات $X(x)$ و تغییرات $P_2(p)$ حول نقطه تعادل کوچک می‌باشند، رابطه (٤-٤٣) را می‌توان با یک رابطه خطی بصورت زیر تخمین زد:

(٤٤-٤)

$$Q = k_1 x - k_2 p$$

در رابطه (٤-٤٤) K_1 و K_2 ضرایب ثابتی هستند که آنها را می‌توان حول هر وضعیت دلخواه با آزمایش بدست آورد.

اکنون به تقویت کننده هیدرلیکی باز می‌گردیم. اگر مطابق شکل ٤-٤٢ ورودی X به اندازه x از وضعیت تعادل به سمت راست حرکت کند سطح روزنه فشار تغذیه متناسب با x باز می‌شود و روغن تحت فشار P_s امکان جاری شدن به سمت ورودی I سیلندر قدرت را پیدا می‌کند.



شکل (۴-۴۲) عبور دبی از فاصله پیستون با سیلندر

با توجه به رابطه (٤-٤٤) می‌توان نوشت:

(٤٥-٤)

$$Q = k_1 x - k_2 \Delta P$$

(٤٦-٤)

$$\Delta P = P_1 - P_2$$

اگر جریان روغن به مدت dt ادامه داشته باشد و در این مدت پیستون به اندازه dy به سمت راست حرکت کند، حجم روغن جاری شده برابر حجمی است که پیستون به سمت راست جابجا شده است یعنی:

$$A.dy = Q.dt$$

$$\frac{dy}{dt} = \frac{1}{A}.Q \qquad (٤٧-٤)$$

و با استفاده از روابط (٤-٤٥) و (٤-٤٧) خواهیم داشت:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{1}{A}(k_1 x - k_2 \Delta P)$$

$$\Delta P = \frac{1}{k_2}(k_1 x - A\frac{dy}{dt}) \qquad (٤٨-٤)$$

رابطه (٤-٤٨) فشار برآیند وارد بر پیستون قدرت را می‌دهد که نیروی وارد بر پیستون بدست می‌آید:

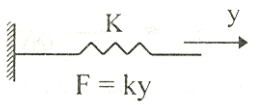
$$F = \Delta P.A$$

$$F = \frac{A}{k_2}(k_1 x - A\frac{dy}{dt}) \qquad (٤٩-٤)$$

رابطه (٤-٤٩) ارتباط بین ورودی (x) و خروجی (y) تقویت کننده را از طریق یک کمیت سوم (F) بیان می‌کند. بنابراین برای آنکه رابطه بین x و y را بدست آوریم ناچاراً F می‌باید بر حسب x یا y بیان شود و بدیهی است که می‌باید F را بگونه‌ای بر حسب y بین نمائیم.

بار فنری:

اگر بار متصل به تقویت کننده، فنری باشد خواهیم داشت:



و رابطه (٤-٤٩) می‌دهد:

$$ky = \frac{A}{k_2}(k_1 x - A\frac{dy}{dt})$$

$$\frac{A^2}{k_2}\frac{dy}{dt} + ky = \frac{Ak_1}{k_2}x$$

$$(\frac{A^2}{k_2}S + K)Y(s) = \frac{Ak_1}{k_2}X(s)$$

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{A^{k_1}\!/_{k_2}}{\frac{A^2}{k_2}S + k}$$

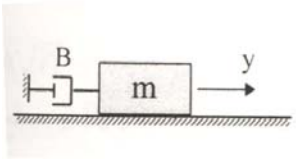
$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{a}{TS+1} \quad ، \quad T = \frac{A^2}{Kk_2} ، a = \frac{Ak_1}{Kk_2} \qquad (٥٠-٤)$$

در رابطه (٤-٥٠) اگر ثابت زمانی T خیلی کوچک باشد یک تقویت کننده با گین a خواهیم داشت. (این حالت معمولاً برقرار نیست)

بار جرم و اصطکاک:

در این حالت داریم:

$$F = m\frac{d^2y}{dt^2} + B\frac{dy}{dt}$$



و رابطه (٤-٤٩) می‌دهد:

$$m\frac{d^2y}{dt^2} + B\frac{dy}{dt} = \frac{A}{k_2}(k_1x - A\frac{dy}{dt})$$

که بدست می‌آوریم:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{S\left[\frac{mk_2}{Ak_1}S + \frac{Bk_2}{Ak_1} + \frac{A}{k_1}\right]}$$

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K}{S(TS+1)} \qquad (٥١-٤)$$

$$K = \frac{1}{\frac{Bk_2}{Ak_1} + \frac{A}{k_1}} \quad , \quad T = \frac{mk_2}{Bk_2 + A^2}$$

سیستم‌های هیدرولیکی با فشارهای خیلی بالا کار می‌کنند بنابراین برای ایجاد نیروئی دلخواه یک سطح پیستون کوچک کافی است. به همین دلیل وزن و حجم سیستم‌های هیدرولیکی با توجه به نیروئی که تولید می‌کنند بسیار پائین است. همچنین به دلیل تراکم ناپذیری سیال و فشار بالای آن انتقال نیرو بسیار سریع است. بنابراین در رابطه (٤-٥١) معمولاً از ثابت زمانی T می‌توان صرفنظر نمود و نوشت:

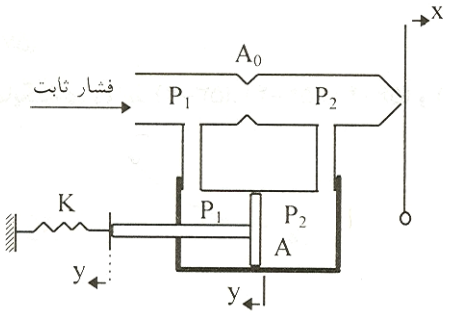
$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K}{S} \qquad (٥٢-٤)$$

رابطه (٤-٥٢) نشان می‌دهد که یک تقویت کننده سیلندر پیستونی هیدرولیکی تحت بار جرم و اصطکاک یک تقویت کننده انتگرالی می‌باشد و چنین رفتاری با توجه به ساختمان آن مورد انتظار است. (چرا؟)

شرایطی که در آن سروموتور هیدرولیکی را مورد بررسی قرار دادیم شرایطی کاملاً ایده‌آل می‌باشند. در عمل برای برقراری نسبی شرایط فوق مخصوصاً رابطه (٤-٤٤) می‌باید نکاتی را در طراحی سیستم‌های هیدرولیکی مورد توجه قرار داد. از جمله ویژگی‌های پمپ‌های تأمین کننده فشار، کمیت روغن هیدرولیک و تمیز بودن آن، شکل روزنه و توپی (Spool) در شیرها و ...

٤-٧-١-٢ تقویت کننده دهانه- تیغه هیدرولیکی

طرح کلی یک تقویت کننده دهانه- تیغه مطابق شکل ٤-٤٢ می‌باشد.



شکل (۴-۴۲) تقویت کننده دهانه- تیغه هیدرولیکی

این تقویت کننده‌ها مشکلات و پیچیدگی انواع سیلندر پیستونی را ندارند و از نظر قیمت ارزانتر نیز می‌باشند. طرز کار آنها تاحد زیادی شبیه به تقویت کننده‌های دهانه- تیغه پنوماتیکی می‌باشد. در اینجا P_1 فشار ثابت تغذیه می‌باشد. بنابراین تغییرات کوچک X موجب تغییرات شدید فشار P_2 می‌گردد. هنگامیکه تیغه کاملاً به دهانه چسبیده است جریان روغن متوقف و بنابراین فشار P_2 برابر فشار P_1 می‌گردد و در صورتی که تیغه از دهانه کاملاً دور شود فشار P_2 کم و برابر فشار محیط می‌شود.

با توجه به مطالب بخش قبل و ثابت بودن سطح مانع مقدار دبی روغن که از سمت چپ مانع به سمت راست جریان پیدا می‌کند برابر است با:

$$Q_i = -k_2 P_2 \qquad (٥٣-٤)$$

همچنین دبی روغنی که از دهانه به بیرون جریان پیدا می‌کند با توجه به ثابت بودن قطر دهانه با تقریب خوب نوشته می‌شود:

$$Q_o = k_1 x + k_3 P_2 \qquad (٥٤-٤)$$

با توجه به روابط (٤-٥٣) و (٤-٥٤) دبی رغنی که وارد (خارج) محفظه سیلندر و پیستون می‌گردد برابر است با:

$$Q = Q_i - Q_o \qquad (٥٥-٤)$$

این دبی برابر تغییر حجم سیلندر (در طرف چپ یا راست) می‌باشد. بنابراین اگر پیستون در زمان dt جابجائی dy را داشته باشد خواهیم داشت:

$$Q = A\frac{dy}{dt} \qquad (٥٦-٤)$$

تقویت کننده‌های دهانه- تیغه را معمولاً برای بارهای فنری بکار می‌برند. در این صورت فشار P_2 به صورت زیر به جابجائی y مربوط می‌گردد.

$$F = P_2.A$$

$$F = Ky \qquad (٤-٥٧)$$

$$P_2 = \frac{k}{A}.y$$

از جایگذاری روابط (٤-٥٣)، (٤-٥٤)، (٤-٥٦) و (٤-٥٧) در رابطه (٤-٥٥) حاصل می‌گردد:

$$A\frac{dy}{dt} + (k_3 + k_2)\frac{k}{A}.y = -k_1 x$$

$$Y(s)(AS + \frac{(k_3 + k_2)k}{A}) = -k_1 X(s)$$

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = -\frac{C}{TS+1} \qquad (٤-٥٨)$$

$$C = \frac{k_1 A}{(k_3 + k_2)k}$$

$$T = \frac{A^2}{(k_3 + k_2)k}$$

علامت منفی در رابطه (٤-٥٨) بدلیل عکس بودن جهت حرکت x و y می‌باشد.

بدلیل بالا بودن فشار (تغذیه) مقادیر k_2 و k_3 خیلی بزرگ هستند و بنابراین مقدار ثابت زمانی T کوچک و در پاره‌ای موارد قابل صرفنظر می‌باشد.

در حالت تعادل دبی ورودی (خروجی) به سیلندر صفر است و بطور دقیق می‌توان نوشت:

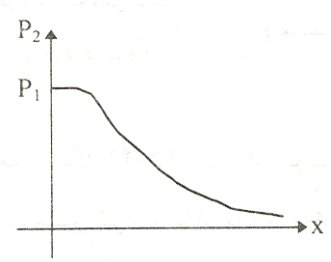
$$Q_i - Q_o = 0$$

$$Q_i = Q_o$$

$$C_1 A_0 \sqrt{P_1 - P_2} = C_2 x \sqrt{P_2}$$

$$P_2 = \frac{P_1}{1 + (\frac{C_2}{C_1 A_0})^2 x^2}$$

رابطه (٤-٥٩) را در شکل ٤-٤٣ بطور کیفی رسم نموده‌ایم. با توجه به شکل، رابطه P_2 با x را در محدوده‌های خاصی می‌توان با تقریب خوب یک رابطه خطی در نظر گرفت. تقویت کننده‌های دهانه- تیغه نسبت به کیفیت روغن هیدرولیک و تغییرات ویسکوزیته آن با دما حساسیت کمتری دارند و وابستگی عملکرد آنها به بار نوع بار نیز کمتر است.



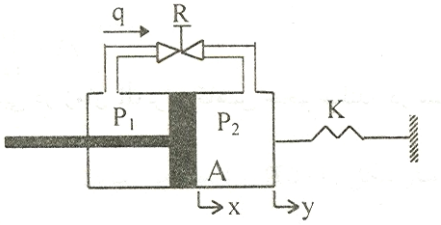
شکل (۴-۴۳) رسم رابطه (۴-۵۹) بطور کیفی

٤-٧-٢ عناصر مسیر برگشت کنترل کننده‌های هیدرولیک

مسیر برگشت در کنترل کننده‌های هیدرولیکی نیز مانند کنترل کننده‌های الکتریکی و پنوماتیکی معمولاً از یک مدار R و C تشکیل می‌گردد.

٤-٧-٢-١ داش‌پوت (Dashpots):

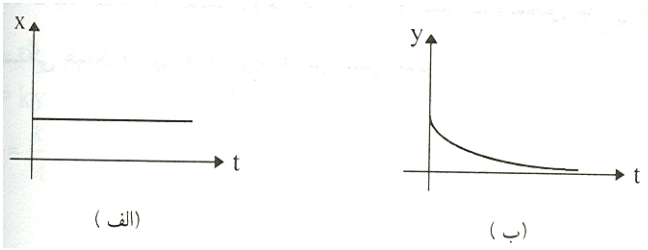
به مدار RC در کنترل کننده‌های هیدرولیکی داش‌پوت می‌گوئیم. ساختمان کلی یک داش‌پوت مطابق شکل ٤-٤٤ می‌باشد.



شکل (۴-۴۴) داش‌پوت بعنوان مدار RC در سیستم‌های هیدرولیکی

در این مدار جابجائی پیستون (x) ورودی و جابجائی بدنه سیلندر (y) خروجی می‌باشد. اگر جابجائی بصورت یک پله به x داده شود در لحظات اول بدلیل مقاومت، روغن تراکم‌ناپذیر نمی‌تواند سریعاً از سمت راست به سمت چپ پیستون جریان پیدا کند. بنابراین مقدار جابجائی x عیناً به Y منتقل می‌گردد.

اما رفته رفته روغن از مقاومت R نشت نموده و بدنه سیلندر (Y) به وضعیت اولیه باز می‌گردد. با توجه به توضیحات فوق شکل کلی پاسخ به ورودی پله مطابق شکل ٤-٤٥ می‌باشد.



شکل (۴-۴۵) حرکت بدنه داش‌پوت در اثر ورودی پله

با توجه به شکل ٤-٤٥- ب داش‌پوت ظاهراً بعنوان یک عنصر مشتق‌گیر عمل می‌کند. اکنون صحت خاصیت مشتق‌گیری را با استفاده از روابط بررسی می‌نمائیم:

اختلاف فشار دو طرف پیستون برابر است با:

$$\Delta P = P_2 - P_1$$

$$q = \frac{\Delta P}{R}$$

دبی روغنی (از راست به چپ) از میان شیر برابر است با:

این دبی در زمان dt برابر کاهش حجم سیلندر در سمت راست می‌باشد:

$$q.dt = A(dx - dy)$$

و یا:

$$\frac{dx}{dt} - \frac{dy}{dt} = \frac{q}{A}$$
$$\frac{dx}{dt} - \frac{dy}{dt} = \frac{\Delta P}{AR}$$

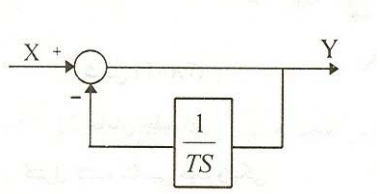
که بدست می‌آید:

$$\frac{dy}{dt} + \frac{k}{A^2 R} y = \frac{dx}{dt}$$
$$Y(s)(S + \frac{k}{A^2 R}) = SX(s)$$
$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{S}{S + \frac{k}{A^2 R}}$$
$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{TS}{TS+1} \quad , \quad T = \frac{A^2 R}{K} \qquad (٦٠-٤)$$

رابطه (٦٠-٤) را بصورت زیر نیز می‌توان نوشت:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{1 + 1/TS} \qquad (٦١-٤)$$

نمایش جعبه‌ای رابطه (٦١-٤) بشکل ٤٦-٤ می‌باشد:



شکل (٤٦-٤) نمایش جعبه‌ای مدار داش‌پوت

اگر $\left|\frac{1}{TS}\right| << 1$ باشد رابطه (٦١-٤) را می‌توان بصورت زیر نوشت:

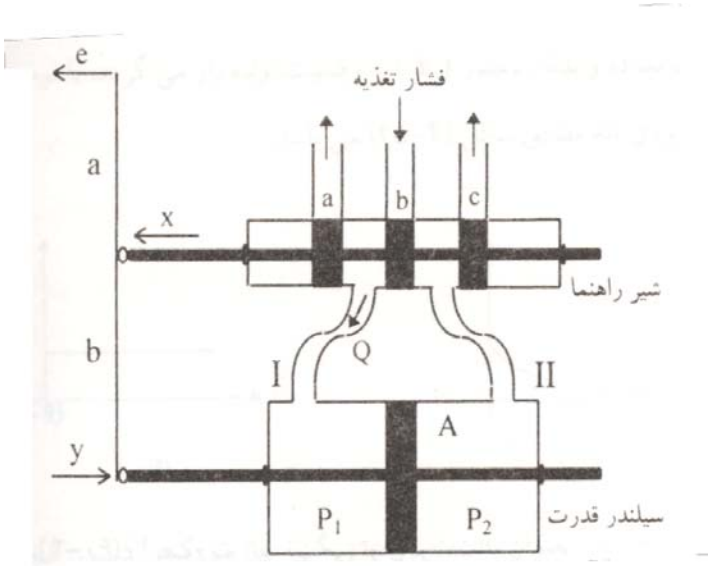
$$\frac{Y(S)}{X(S)} \approx TS \qquad (٦٢-٤)$$

رابطه (٦٢-٤) مربوط به یک عنصر مشتق‌گیر است و رفتار شکل ٤٥-٤ را توجیه می‌نماید.

۴-۷-۲ کنترل کننده‌های تناسبی هیدرولیکی

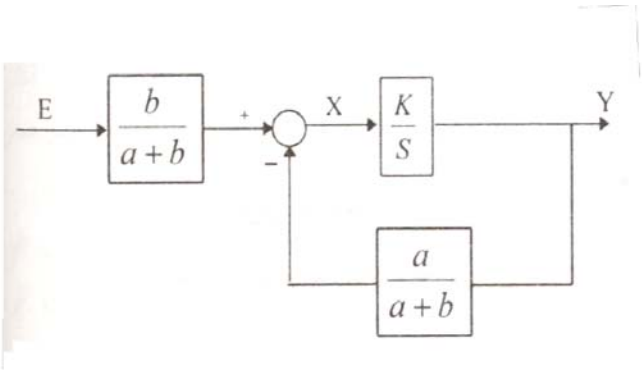
در بخش ٤-٧-١ دیدیم که تقویت کننده سیلندر پیستونی شکل ٤٠-٤ به ازای بارهای جرمی و اصطکاکی معادل با یک تقویت کننده انتگرالی با گین زیاد (رابطه ٥٢-٤) می‌باشد. با توجه بـه

اصل کلی در طراح کنترل کننده‌ها با ایجاد یک فیدبک تناسبی قابل تنظیم در حول این تقویت کننده می‌توان آن را به یک کنترل کننده تناسبی تبدیل نمود. شکل ٤-٤٧ طرح کلی چنین کنترل کننده‌ای را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۴۷)کنترل کننده تناسبی هیدرولیکی

برای بدست آوردن تابع تبدیل این کنترل کننده ابتدا نمایش جعبه‌ای آن را با استفاده از اطلاعات قبلی مطابق شکل ٤-٤٨ رسم می‌نمائیم



شکل (۴-۴۸) نمایش جعبه ای کنترل کننده تناسبی هیدرولیکی

با توجه به نمایش جعبه‌ای ٤-٤٨ تابع تبدیل کنترل کننده بدست می‌آید:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\frac{b}{a+b}\cdot\frac{K}{S}}{1+\frac{K}{S}\cdot\frac{a}{a+b}}$$

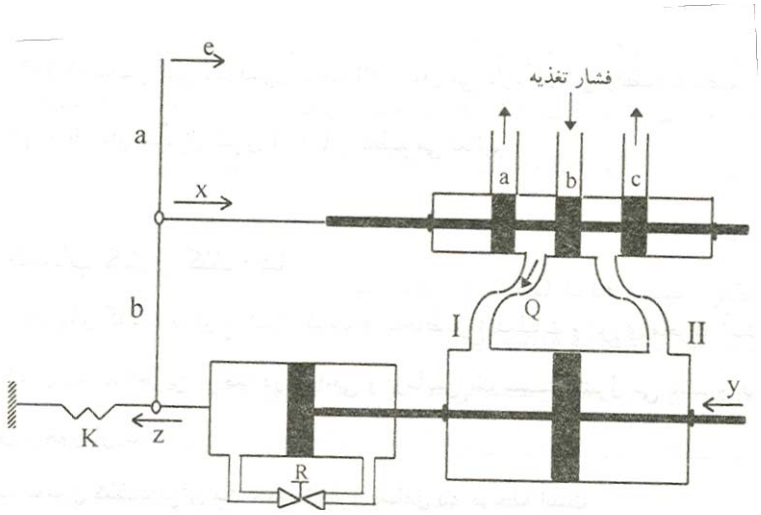
با فرض $\left|\frac{K}{S}.\frac{a}{a+b}\right| >> 1$ خواهیم داشت:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b}{a} = k_p \qquad (٦٣-٤)$$

رابطه (٤-٦٣) یک کنترل کننده تناسبی را بیان می‌دارد. توجه نمائید که با تنظیم $\frac{b}{a}$ ضریب تناسب را به راحتی می‌توان تنظیم نمود.

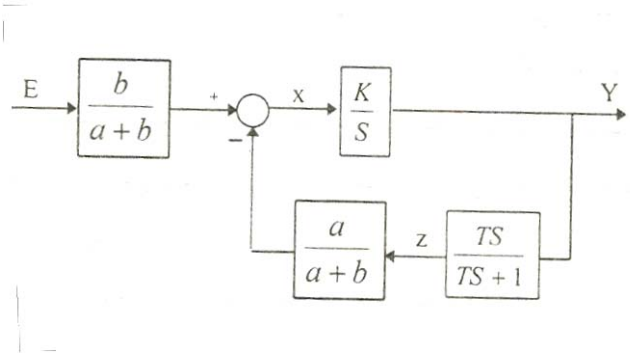
۴-۷-۳ کنترل کننده تناسبی- انتگرالی هیدرولیکی

با اضافه کردن یک عنصر دیگر در مسیر برگشت کنترل کننده تناسبی می‌توان یک کنترل کننده تناسبی- انتگرالی ساخت. این طرح در شکل (٤-٤٩) آمده است.



شکل (۴-۴۹) کنترل کننده PI هیدرولیکی

با توجه به شناخت کلیه عناصر موجود در این طرح نمایش جعبه‌ای آن را مطابق شکل ٤-٥٠ رسم می‌نمائیم:



شکل (۴-۵۰) نمایش جعبه‌ای کنترل کننده PI هیدرولیکی

با توجه به شکل ٤-٥٠ تابع تبدیل کنترل بدست می‌آید:

$$\frac{Y(s)}{E(s)} = \frac{\frac{b}{a+b}.\frac{k}{S}}{1+\frac{ka}{a+b}.\frac{T}{TS+1}} \qquad (٦٤-٤)$$

و با رعایت شرط $\left|\frac{ka}{a+b}.\frac{T}{TS+1}\right| >> 1$ خواهیم داشت:

$$\frac{Y(s)}{E(s)} = K_p(1+\frac{1}{T_1 S}) \qquad (٦٥-٤)$$

$$K_p = \frac{b}{a} \quad , \quad T_i = T = \frac{RA^2}{K}$$

رابطه (٤-٦٥) شکل کلی یک کنترل کننده PI را بیان می‌دارد. در این رابطه با تنظیم $\frac{b}{a}$ ضریب تناسب (K_p) و با R زمان انتگرال‌گیری (T_i) را تنظیم می‌نمائیم.

۴-۸ انتخاب کنترل کننده ها:

در بخش‌های گذشته با انواع کنترل کننده‌ها بلحاظ نوع عملیات و انرژی محرکه آشنا شدیم. انتخاب و تنظیم کنترل کننده، آخرین مرحله در طراحی و آزمایش یک سیستم کنترل می‌باشد و بدین لحاظ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

انتخاب کنترل کننده برای یک حلقه کنترل شامل دو مرحله است:

الف) انتخاب کنترل کننده به لحاظ نوع انرژی محرکه

ب) انتخاب کنترل کننده به لحاظ نوع عملیات (PI, P, ...)

انتخاب کنترل کننده به لحاظ انرژی محرکه با توجه به نوع پروسه، محیط کار، مسائل ایمنی، مسائل اقتصادی و ... صورت می‌پذیرد. مثلاً هرگاه با توجه به ملاحظات فوق برای کنترل یک پروسه، اجزاء بادی انتخاب شوند در واقع کنترل کننده متناسب با آن نیز انتخاب گردیده است.

مرحله انتخاب کنترل کننده به لحاظ نوع عملیات اندکی دشوارتر از مرحله قبل است و نیاز به اطلاعات تئوری و تجربی بیشتری دارد.

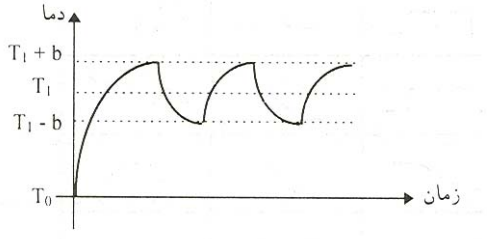
گاهی با توجه به تجارب و انتظاراتی که از حلقه کنترل داریم نوع کنترل کننده بطور یقینی مشخص می‌گردد. مثلاً برای کنترل ارتفاع آب در یک مخزن با خطای حدود یک متر استفاده از کنترل کننده دو وضعیتی (On/Off) کفایت می‌کند، اما در بسیاری موارد نمی‌توان نوع کنترل کننده را با این قطعیت تعیین نمود. در چنین مواردی اگر از نظر هزینه مشکلی نباشد بهتر است کنترل کننده PID خریداری گردد و در عمل از عملیاتی که مورد نیاز است استفاده گردد. این

امر در مورد کنترل کننده‌های الکترونیکی بیشتر صادق است چرا که یک کنترل کننده PI یا PD الکترونیکی با یک کنترل کننده PID از نظر قیمت در کنترل کننده‌های بادی و هیدرولیکی با عملیات مختلف تفاوت قیمت قابل توجه است و این تفاوت در کنترل کننده‌هایی با کیفیت عالی و کاربردهای مخصوص (مثلاً سیستم‌های پرنده) بیشتر می‌باشد. همچنین در پروسه‌های بزرگ که تعداد زیادی کنترل کننده بکار برده می‌شوند اگر مثلاً بجای همه کنترل کننده‌های دو عملیاتی (PD, PI) از کنترل کننده‌های سه عملیاتی (PID) استفاده کنیم تفاوت هزینه چشمگیر خواهد بود. بنابراین در این گونه موارد بهتر است قبلاً در مورد نوع کنترل کننده‌ها مناسب (PID, PD, PI, P, On/Off) بررسی و تصمیم گیری نمائیم و سپس مناسبترین آنها را انتخاب کنیم.

۴-۸-۱ انتخاب کنترل کننده‌ها به لحاظ نوع عملیات

موارد انتخاب کنترل کننده دو وضعیتی:

اگر در کنترل پروسه‌ای وجود خطای همیشگی در یک باند اشکالی نداشته باشد، از کنترل کننده دو وضعیتی می‌توانیم استفاده نمائیم. همانطور که قبلاً نیز اشاره گردید مثال آشنای این کنترل کننده، ترموستات سماور برقی است. در سماور برقی دمای آب هیچگاه بر روی مقدار مشخصی ثابت باقی نمی‌ماند بلکه همواره در یک باند تغییر می‌کند. مثلاً هر گاه سماور در دمای اولیه T_0 روشن شود و دمای مطلوب T_1 باشد، منحنی تغییرات دما مطابق شکل (٤-٥١) خواهد بود.



شکل (۴-۵۱) حالت کلی تنظیم دما در سماور برقی

همانطور که ملاحظه می‌گردد دمای آب بین مقادیر T_1+b و T_1-b در نوسان است. مقدار $2b$ را باند تفاضلی می‌گوئیم. هر چه باند تفاضلی بزرگتر باشد مقدار ماکزیمم خطا در اطراف مقدار مطلوب بیشتر است. توجه نمائید که در حالت کلی باند تفاضلی می‌تواند متقارن نباشد.

کنترل کننده دو وضعیتی، یک کنترل کننده غیرخطی است و تحت شرایطی می‌تواند موجب بروز نوعی ناپایدار بنام سیکل حدی (Limit-Cycle) در حلقه کنترل شود. با این وجود در اکثر پروسه‌های صنعتی بدون نگرانی می‌توان از آن استفاده نمود.

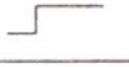
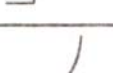
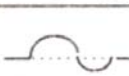
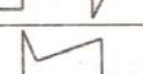
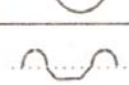
موارد انتخاب کنترل کننده تناسبی:

عیب عمده کنترل کننده‌های تناسبی وجود انحراف از تنظیم (افست) در پاسخ ماندگار آنها است و به همین دلیل معمولاً از آنها به تنهائی استفاده نمی‌شود. در موارد نادری که مقدار تنظیم (مطلوب) ثابت است و پروسه تحت اغتشاشات شدید و مداوم نمی‌باشد و یا مقدار و محل ورود اغتشاشات مشخص می‌باشد می‌توان از کنترل کننده تناسبی بایاس‌دار استفاده نمود. با این وجود استفاده از این کنترل کننده به تنهائی به ندرت مشاهده گردیده است. اساساً استفاده از کنترل کننده‌های تناسبی در پروسه‌هایی با درجه بالاتر از یک معمول نمی‌باشد.

موارد انتخاب کنترل کننده‌های PID, PD, PI:

قبل از هر چیز بهتر است دانش‌های قبلی خود را در مورد کنترل کننده‌های فوق مرور نمائیم و مطمئن شویم احساسی را که مورد نظر مؤلف است در این زمینه بدست آورده‌ایم. برای کمک به انجام این کار اطلاعات خود را در جدول (٤-١) خلاصه می‌نمائیم. سعی کنید این جدول را همیشه به خاطر داشته باشید.

جدول (۴-۱). شکل کلی پاسخ زمانی کنترل کننده‌های مختلف

ورودی / عملیات کنترل کننده	پله	پالس	شیب	سینوسی
P				
I				
D				
PI				
PD				
PID				

اگر درجه پروسه بالاتر از یک باشد می‌توان مطمئن به استفاده از یک کنترل کننده دو عملیاتی PD (PI,) و یاسه عملیاتی PID به شرحی که خواهد آمد بود. همچنین برای کنترل پروسه‌های درجه یک با تأخیر خالص می‌توان به استفاده از کنترل کننده دو عملیاتی مطمئن و در مورد کنترل کننده سه عملیات بررسی نمود.

در مورد پروسه‌های ذاتاً ناپایدار می‌توان با انتخاب کنترل کننده PD مطمئن و در مورد کنترل کننده PID بررسی نمود.

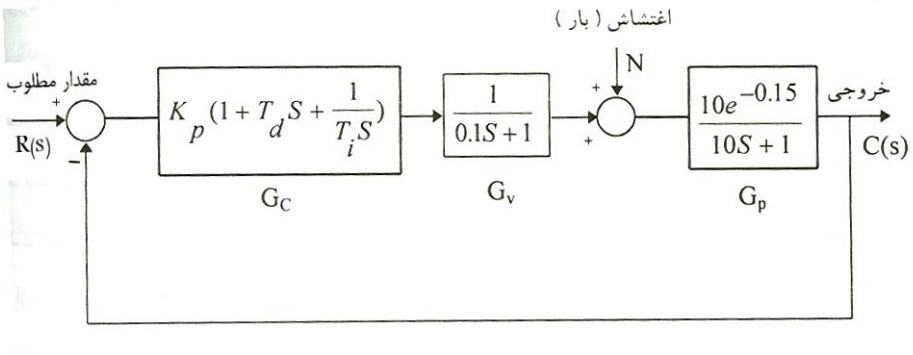
در جائی که اصطلاح خطای ماندگار در اولویت باشد می‌باید از کنترل کننده PI استفاده نمود. با این وجود کنترل کننده PI به دلیل ایجاد تأخیر فاز به ناپایداری سیستم کمک می‌کند. در جائی که به افزایش سرعت پاسخ سیستم علاقمند باشیم و تکان دادن یا عکس‌العمل سریع سیستم مهمتر از رفتارهای دیگر آن باشد از کنترل کننده PD استفاده می‌نمائیم در حالی که هم سرعت پاسخ‌دهی و هم اصلاح خطای ماندگار مورد نظر باشد می‌باید از کنترل کننده PID استفاده شود.

۴-۹ تنظیم کنترل کننده ها:

در فرآیند تولید یک محصول کیفیت محصول تحت تأثیر عملکرد درست حلقه‌های کنترل می‌باشد. بعنوان مثال کیفیت و مرغوبیت سرامیک تولید شده تا حد زیادی متأثر از کنترل دما تونل پخت می‌باشد و یا کیفیت و مرغوبیت سرامیک تولید شده نتیجه دقت درکنترل نسبت مواد تشکیل دهنده آن است وغیره. در موارد دیگری عملکرد حلقه‌های کنترل مبین عملکرد درست کنترل کننده‌ها کیفیت و مرغوبیت سیستم را تعیین می‌کند. عملکرد کنترل کننده ها، تحت تأثیر تنظیم آنها می‌باشد و بنابراین تنظیم کنترل کننده‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تنظیم کنترل کننده‌های آخرین مرحله طراحی و ساخت یک سیستم کنترل می‌باشد و نیاز به دقت، دانش و تجربه کافی دارد.

کنترل کننده‌ها را بر اساس انتظاراتی که از حلقه کنترل داریم تنظیم می‌نمائیم و این انتظارات از یک پروسه به پرسه دیگر تغییر می‌کنند به همین دلیل برای تنظیم کنترل کننده‌ها معیارهای مختلفی ارائه گردیده است و شخص بر اساس نیاز و تجربه خود از آنها استفاده می‌نماید. همچنین با توجه به پروسه‌ای که با آن روبرو هستیم ممکن است شخصاً معیاری مخصوص را تعریف و مورد استفاده قرار دهیم.

نوع و محل ورودی‌ای که کنترل کننده بر اساس آن تنظیم می‌شود نیز دارای اهمیت است. برای روشن‌تر شدن مطلب شکل ٤-٥٢ را که نمایش جعبه‌ای یک حلقه کنترل دمای کوره است. در نظر بگیرید:



شکل (۴-۵۲) حلقه کنترل دمای یک کوره

در بعضی از کوره‌ها دمای تنظیم (S.P) ثابت است و به ندرت تغییر می‌کند و در این صورت وظیفه حلقه کنترل آن است که علیرغم ورود مواد خام و اغتشاشات (Load) به کوره، دما را بر روی مقدار مطلوب ثابت نگه دارد. در اینجا ضرائب کنترل کننده (K_p, T_i, T_d) با در نظر گرفتن معیار و با توجه به ورودی N(s) تنظیم می‌شوند. تابع تبدیل سیستم در این حالت عبارت است از:

$$\frac{C(s)}{N(s)} = \frac{G_P}{1+G_C G_V G_P} \qquad (٤-٦٦)$$

در انواع دیگری از کوره‌های حرارتی دمای تنظیم شده در طول فرآیند تولید تغییر می‌کند و این در حالی است که مواد موجود در کوره ثابت می‌باشند در این حالت تغییرات بار ناچیز است و وظیفه حلقه کنترل آن است که دما را در هر لحظه با سرعت و دقت بر روی مقدار مطلوب تنظیم نماید. بنابراین تنظیم کنترل کننده بر اساس تغییرات مقدار مطلوب انجام می‌شود. تابع تبدیل سیستم در این حالت بدست می‌آید:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_C G_V G_p}{1+G_C G_V G_p} \qquad (٤-٦٧)$$

مقایسه روابط (٤-٦٦) و (٤-٦٧) نشان می‌دهد که هر چند اجزاء و قطعات موجود در حلقه کنترل در هر دو حالت یکسان هستند اما بدلیل تفاوت محل ورودی ها، توابع تبدیل متفاوتی بدست می‌آیند بنابراین تنظیم کنترل کننده‌ها نیز متفاوت خواهند بود.

۴-۹-۱ معیارهای تنظیم کنترل کننده

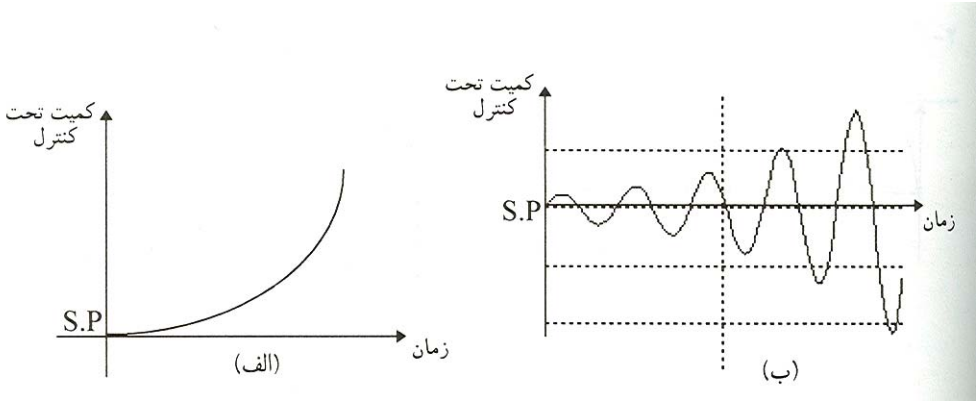
همانطور که گفتیم کنترل کننده‌ها را بر اساس انتظاراتی که از حلقه کنترل داریم تنظیم می‌نمائیم. مثلاً هرگاه در یک سیستم کنترل دما، خطای ماندگار دارای اهمیت باشد یعنی

بخواهیم خطا سیستم بعد از گذشت زمان به حداقل ممکن برسد باید معیار تنظیم کنترل کننده را بگونه‌ای انتخاب نمائیم که به خطای ماندگار حساس باشد.

در این بخش به معرفی چندین معیار معروف در تنظیم کنترل کننده‌ها می‌پردازیم:

٤-٩-١-١ معیار پایداری:

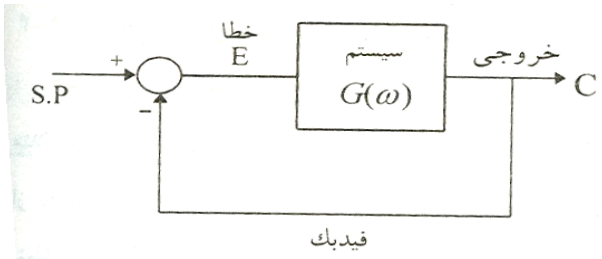
در معیار پایداری کنترل کننده را بگونه‌ای تنظیم می‌نمائیم که کمیت مورد نظر تحت هیچ شرایطی از مقادیر محدود فراتر نرود و یا بعبارت دیگر سیستم در هر شرایطی پایدار باشد. شکل ٤-٥٣ دو حالت ممکن از تغییرات کمیت تحت کنترل را در حالت ناپایداری نشان می‌دهد:



شکل (۴-۵۳) پاسخ سیستم ناپایدار در دوحالت

در حالت الف ورود اغتشاش به سیستم موجب افزایش بدون حد کمیت تحت کنترل می‌گردد. در حالت ب کمیت تحت کنترل حالت نوسانی داشته و دامنه نوسان آن رفته رفته افزایش می‌یابد. در عمل رفتار غیرخطی سیستم موجب می‌گردد تا دامنه نوسانات روی مقدار مشخصی ثابت گردد و سیستم دارای نوساناتی با دامنه محدود شود. افزایش دامنه کمیت تحت کنترل در مواردی بسیار خطرناک است و موجب انفجار سیستم می‌گردد.

وجود فیدبک در حلقه‌های کنترل احتمال ناپایداری را افزایش می‌دهد. برای روشن‌تر شدن مطلب مدل ساده شکل ٤-٥٤ را در نظر بگیرید:



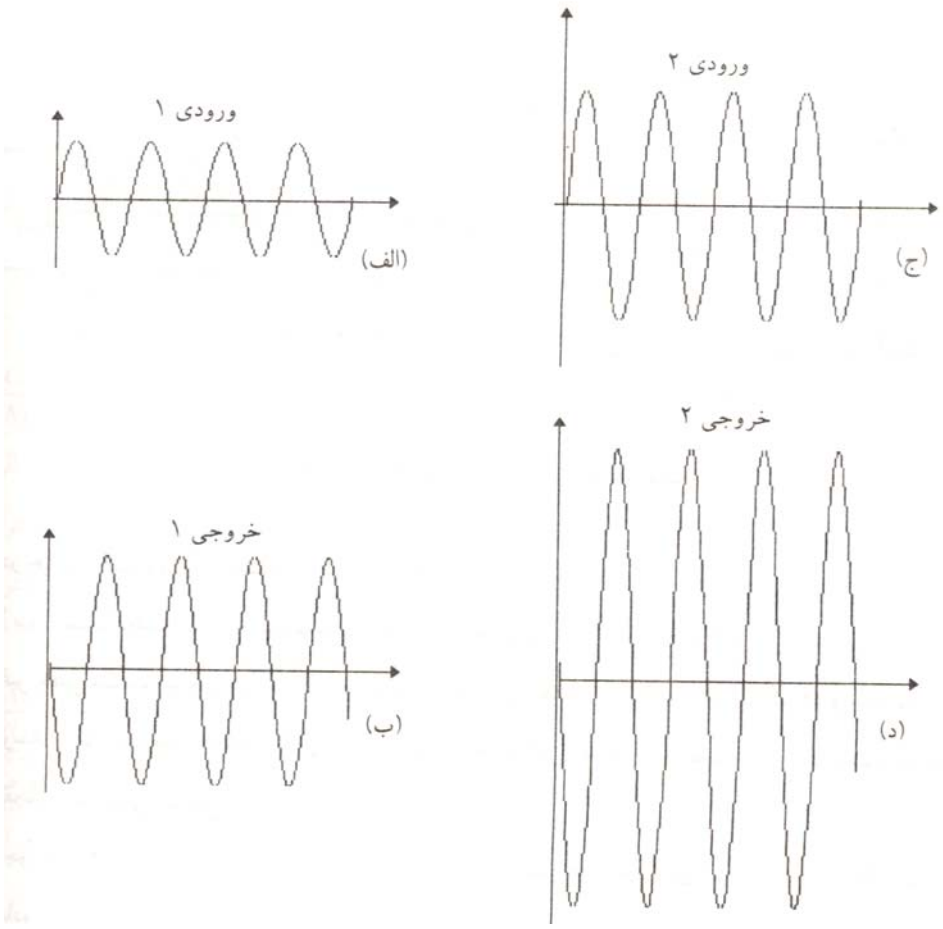
شکل (۴-۵۴) مدل ساده یک سیستم فیدبک شده

در این شکل $G(\omega)$ تابع تبدیل معادل کلیه عناصر موجود در مسیر رفت حلقه کنترل می‌باشد و داریم:

$G(\omega) \times$ خطا = خروجی

$|G(\omega)| \times$ دامنه خطا= دامنه خروجی

$(G(\omega))$ فاز+ فاز خطا= فاز خروجی



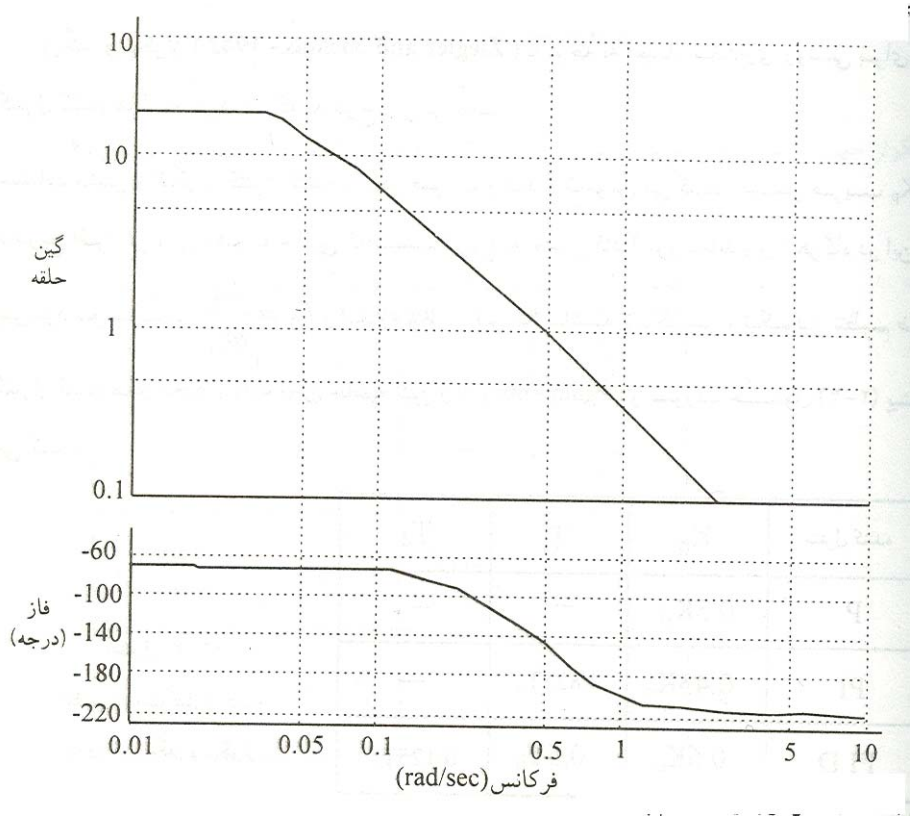
شکل (۴-۵۵)رفتار کلی سیستم (۴-۵۴) در حالت نوسانی

اکنون با توجه به روابط فوق در نظر بگیرید که سیگنال خطا یک سینوسی مطابق شکل ٤-٥٥- الف بوده و فاز $G(\omega)$ در این فرکانس ۱۸۰- درجه و دامنه آن عددی بزرگتر از یک مثلاً دو باشد، در این شرایط دامنه خروجی مطابق شکل ٤-٥٥- ب است. این خروجی فیدبک شده و با خطای قبلی جمع جبری می‌شود و خطای جدیدی مطابق شکل ٤-٥٥- ج تولید می‌کند. این خطا مجدداً در گین ۲ ضرب و با تغییر فاز ۱۸۰- درجه به خروجی ارسال می‌گردد شکل ٤-٥٥- د. این روند ادامه یافته و دامنه خروجی و خطای سیستم دائماً افزایش می‌یابند. در بحث فوق فرض کردیم فرکانسی وجود داشته باشد که در آن فاز $G(\omega)$، ۱۸۰- و دامنه آن بزرگتر از یک باشد که در این صورت می‌توان انتظار داشت نویزهای اتفاقی موجود در آن فرکانس

آغاز کننده نوسان گردیده و ایجاد ناپایداری کنند. با توجه به مطالب فوق اکنون به دو نتیجه کلی برای پایداری یک سیستم می‌رسیم:

اگر در فرکانس‌هایی که گین سیستم (گین حلقه) بزرگتر از یک است اندازه فاز آن (فاز حلقه) کمتر از ۱۸۰ درجه باشد سیستم پایدار است.

اگر در فرکانس‌هایی که اندازه فاز سیستم (حلقه) ۱۸۰ درجه است دامنه آن کوچکتر از یک باشد سیستم پایدار است.



شکل (۴-۵۶). نمودار بد یک سیستم پایدار

دامنه و فاز یک سیستم بر حسب فرکانس در نمودار بود (Bode-Plot) نمایش داده می‌شوند. در شکل ٤-٥٦ نمودار بود یک سیستم نمونه آمده است. این سیستم در فرکانس ω=۰/۵ rad/sec دارای فاز ۱٤۰- درجه و گین یک می‌باشد توجه می‌نمائید در فرکانسی که فاز ۱۸۰- درجه است (ω=۰/۸۵ rad/sec) گین کمتر از یک (تقریباً ۰/۵) می‌باشد و بنابراین سیستم ناپایدار است.

در معیار پایداری کنترل کننده را بگونه‌ای تنظیم می‌نمائیم که سیستم حتی‌الامکان از شرایط ناپایداری فاصله بگیرد. فاصله گرفتن سیستم از حالت ناپایداری، فاصله اطمینانی برای تغییر پارامترهای حلقه کنترل فراهم می‌آورد. این فاصله اطمینان معمولاً بر حسب حاشیه گین (Gain-margin) یا حاشیه فاز (Phase-margin) تعریف می‌شود. مثلاً اگر در فرکانسی که گین

حلقه یک است فاز آن ۱٤۰ درجه باشد حاشیه فاز ٤۰ درجه خواهد بود و یا اگـر در فرکانسـی که فاز حلقه ۱۸۰ درجه است گین آن ۰/۵ باشد حاشیه بهره ۲ است یعنی گین حلقه را می‌تـوان تا دو برابر مقدار فعلی افزایش داد. در حالی که سیستم همچنان پایدار بماند.

زیگلر و نیکولز (Ziegler and Nichols-1942)

با توجه به معیار پایداری روشی برای تنظیم کنترل کننده‌ها ارائه نموده‌اند که به شرح زیـر می‌باشد:

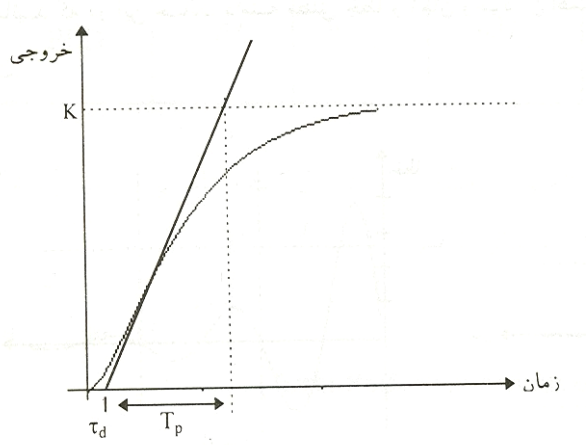
عملیات مشتق و انتگرال کنترل کننده را (در صورت وجود) خاموش می‌کنیم. سپس ضریب K_p را به تدریج افزایش می‌دهیم تا جائی که سیسـتم شـروع بـه نوسـان کنـد (مـرز ناپایـداری) هرگاه در این حالت پریود نوسانات $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}$ و اندازه K_p برابر K_0 باشند زیگلر و نیکولز تنظیم ضرایب کنترل کننده‌های مختلف را به ازای حاشیه گین (Gain-Margin) دو بصورت جدول (٤-۲) پیشنهاد می‌کنند:

جدول (۴-۲) تنظیم ضرائب کنترل کننده به روش زیگلر و نیکولز

کنترل کننده	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_0$	–	–
PI	$0.45\ K_0$	$0.825\ T_0$	–
PID	$0.6\ K_0$	$0.5\ T_0$	$0.125\ T_0$

در بعضی موارد ممکن است رسانیدن سیستم به مرز ناپایداری خطرناک باشد و یا اساسـاً امکان‌پذیر نباشد و یا در صورت امکان، اندازه‌گیری نوسانات مقدور نباشـد در چنـین مـواقعی زیگلر و نیکولز از روش پاسخ زمانی استفاده می‌کنند.

در روش پاسخ زمانی ابتدا حلقه کنترل را بـاز و یـک اغتشـاش پلـه‌ای از طریـق نهـائی بـه پروسه اعمال می‌کنیم. فرض کنید پاسخ کلی پروسه به شکل ٤-۵۷ باشد:



شکل (۴-۵۷)

پاسخ کلی یک فرآیند نمونه به ورودی پله

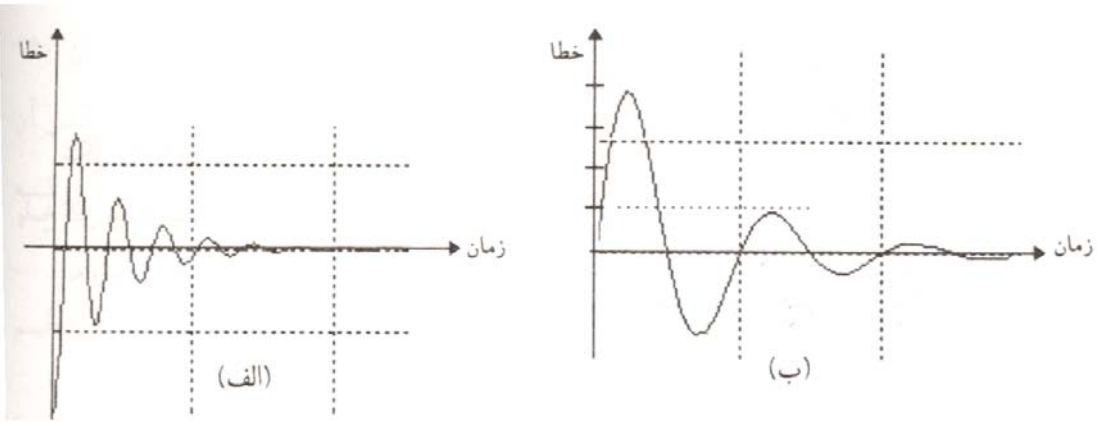
زیگلر و نیکولز جهت پایداری سیستم با حاشیه گین ۲ ضرائب کنترل کننده را مطابق جدول (٤-۳) می‌دهند:

جدول (۴-۳). تنظیم کنترل کننده با حاشیه گین ۲ به روش زیگلر و نیکولز

کنترل کننده	K_p	T_i	T_d
P	$K\frac{T_p}{\tau_d}$	–	–
PI	$0.9K\frac{T_p}{\tau_d}$	$3.34\tau_d$	–
PID	$1.2K\frac{T_p}{\tau_d}$	$2\tau_d$	$0.5\ \tau_d$

٤-۹-۱-۲ معیار یک چهارم دامنه (Quarter-Amplitude):

این معیارها برای تنظیم حلقه‌هائی که دارای پاسخ نوسانی می‌باشند بکار می‌رود. شکل ٤-۵۸- الف تغییرات کلی خطا در یک حلقه با پاسخ نوسانی میراء را نشان می‌دهد. اکنون اگر مطابق شکل(٤-۵۸-ب) کنترل کننده را بگونه‌ای تنظیم می‌نمائیم که ماکزیمم دامنه خطا در هر سیکل به یک چهارم دامنه در سیکل قبل کاهش یابد آنگاه حلقه بر اساس معیار یک چهارم دامنه تنظیم شده است. توجه نمائید که در این حالت دامنه مطلق خطا و زمان وجود آن اهمیتی ندارد بلکه روند میراء شدن مهم است.



شکل (۴-۵۸). پاسخ حلقه کنترل با معیار۱/۴ دامنه

این معیار نسبت به معیار پایداری و همچنین روش پاسخ زمانی آسانتر و عملی تر است و خطرات و اشکالات آنها را ندارد. در این روش بصورت زیر عمل می‌کنیم:

۱- عملیات مشتق و انتگرال را خاموش می‌کنیم.

۲- ضریب K_p را بر روی مقداری عادی (کوچک) تنظیم می‌کنیم.

۳- با اعمال ورودی به حلقه، پاسخ آن را ملاحظه می‌کنیم و نسبت دامنه‌ها در ماکزیمم‌های متوالی را یادداشت می‌نماییم.

٤- با شروع از K_pهای کم و افزایش آن مقداری از K_p که به ازای آن نسبت دامنه‌ها در ماکزیمم‌های متوالی ۱/٤ می‌شود (K_{pq}) را بدست می‌آوریم و زمان متناوب (T_q) را نیز در این حالت یادداشت می‌کنیم. برای حلقه‌های سریع ضرائب کنترل کننده‌ها مطابق جدول (٤-٤-) بدست می‌آید:

جدول (۴-۴) تنظیم ضرائب کنترل کننده با معیار ۱/۴ دامنه

کنترل کننده	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{K_{pq}}{1.2}$	–	–
PI	$\frac{K_{pq}}{2.4}$	$1.0T_q$	–
PID	$\frac{K_{pq}}{1.2}$	$0.5T_q$	$0.1T_q$

در صورتیکه به سرعت زیادی در حلقه نیاز نباشد برای کنترل کننده تناسبی، تناسبی- انتگرالی و تناسبی- انتگرالی- مشتق گیر Kp را با اندکی کاهش زیر در نظر می‌گیریم:

$$\frac{1}{1.5}K_{pq}, \frac{1}{3}K_{pq}, \frac{1}{1.5}K_{pq}$$

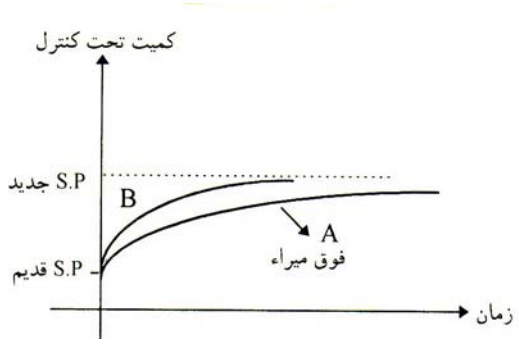
٤-٩-١-٣ معیار خطا (Erorr Performannce indexes):

وظیفه حلقه کنترل تنظیم کمیت تحت کنترل بر روی مقدار مطلوب (Set-Point) می‌باشد. هنگام وارد شدن اغتشاش به سیستم و یا هنگامی که مقدار مطلوب تغییر داده می‌شود کمیت تحت کنترل نیز شروع به تغییر می‌کند. در حالت اول مایلیم کمیت تحت کنترل همچنان بر روی مقدار مطلوب ثابت باقی بماند و در حالت دوم می‌خواهیم سریعاً و دقیقاً بر روی مقدار جدید تنظیم شود.

به هر حال در صورت بروز اغتشاش یا تغییر مقدار تنظیم برای مدتی بین کمیت تحت کنترل و مقدار مطلوب اختلاف (خطا) وجود دارد و مدت زمان وجود خطا و مقدار آن معیاری جهت عملکرد حلقه کنترل به شمار می‌آید. قبل از ادامه بحث در مورد معیار خطا بهتر است با سه شکل کلی تغییرات خروجی سیستم بر حسب زمان آشنا شویم:

الف) پاسخ فوق میراء (Over-Damped):

در شکل ٤-٥٩ منحنی A پاسخ یک سیستم به تغییرات نقطه تنظیم را در حالت فوق میرائی نشان می‌دهد. در این سیستم خطا به تدریج و بدون نوسان به سمت صفر میل می‌کند. در این گونه سیستم‌ها خطر ناپایداری وجود ندارد و دامنه و زاویه خطا نیز بهینه نمی‌باشند.



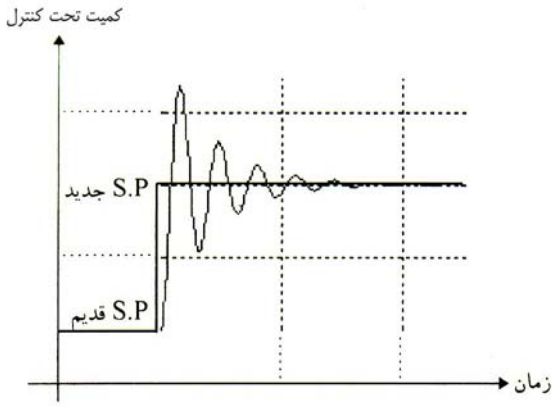
شکل (۴-۵۹) مقایسه پاسخ فوق میراء با میرائی بحرانی

ب) پاسخ میرائی بحرانی (Critically Damped):

منحنی B در شکل ٤-٥٩ یک پاسخ میرائی بحرانی را نشان می‌دهد. در صورتیکه سیستم در حالت میرائی بحرانی تنظیم شود زمان وجود خطا برای پاسخ غیر نوسانی می‌نیمم است. بنابراین هرگاه بخواهیم سیستمی در حداقل زمان ممکن و بدون نوسان به نقطه تنظیم برسد می‌بایستی آن را در حالت میرائی بحرانی تنظیم کنیم.

ج) پاسخ زیرمیراء (Under damped):

شکل ٤-٦٠ پاسخ کلی یک سیستم در حالت نوسانی زیر میراء (نوسانی میراء) را به تغییرات نقطه تنظیم نشان می‌دهد:



شکل (۴-۶۰) شکل کلی پاسخ زیر میراء

در چنین سیستم‌هائی خطا دارای نوساناتی است و در حالت کلی امکان تنظیم آن بر روی حداقل زمان و حداقل دامنه وجود دارد. اساساً در سیستم‌هائی که وجود نوسان قابل قبول می‌باشد تنظیم سیستم در حالت زیر میراء بهترین نتایج را بدست می‌دهد.

در روش معیار خطا با توجه به شکل پاسخ سیستم و میزان اهمیتی که برای زمان وجود یا دامنه خطا و یا هر دو قائل هستیم یک تابع معیار (J) بصورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$J=j(e, t)$$

و سپس ضرائب کنترل کننده را بگونه‌ای تنظیم می‌نمائیم که تابع فوق بهینه (می نیمم) شود توابعی که معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از:

۱- تابعی معیار I.S.E

نام این عبارت مخفف Integral-Square-Error می‌باشد و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$J = \int_0^\infty e^2 .dt$$

در این معیار، خطاهای مثبت و منفی یکسان در نظر گرفته می‌شوند و خطاهای کوچک سهم کم و خطاهای بزرگ سهم بزرگتری در معیار دارند. بنابراین کنترل کننده‌ای که ای معیار را مینیمم می‌کند خطاهای بزرگ را با شدت بیشتری سرکوب می‌نماید.

۲- تابعی معیار I.A.E

نام این معیار مخفف Integral-Square-Error می‌باشد و بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$J = \int_0^\infty |e(t)|.dt$$

در این معیار نیز با توجه به تعریف آن خطاهای مثبت و منفی یکسان در نظر گرفته می‌شوند و خطاهای بزرگ و کوچک دارای اهمیت یکسان می‌باشند.

۳- تابعی معیار I.T.A.E

نام این معیار مخفف Integral Time Absolute Error می‌باشد و بصورت زیر تعریف می‌گردد:

$$J = \int_0^\infty t|e|dt$$

این معیار به خطاهایی که بعد از گذشت زمان هنوز در حلقه وجود ندارند اهمیت بیشتری می‌دهد و بر خطاهای اولیه تأکید کمتری می‌کند.

اکنون فرض کنید تابعی مناسب جهت یک پروسه را انتخاب نموده‌ایم، تابع تبدیل کلی کنترل کننده را بصورت زیر در نظر می‌گیریم:

$$G_C = K_p(1 + T_d S + \frac{1}{T_i S})$$

از آنجائیکه هدف تنظیم ضرائب کنترل کننده بنحوی است که تابعی معیار J حداقل شود، بنابراین مشتق‌های نسبی تابع معیار نسبت به پارامترهای کنترل کننده را مساوی صفر قرار می‌دهیم. بعبارت دیگر ضرائب T_d ,K_p ,T_i را از دستگاه معادلات زیر تعیین می‌نمائیم:

$$\frac{\partial J}{\partial K_p} = 0$$

$$\frac{\partial J}{\partial T_i} = 0$$

$$\frac{\partial J}{\partial T_d} = 0$$

در عمل حل دستگاه معادلات فوق بصورت تحلیلی کاری بسیار مشکل است زیرا در حالت کلی تابعی معیار، تابع پیچیده‌ای از ضرائب کنترل کننده و سایر پارامترهای حلقه کنترل می‌باشد.

با روش‌های عددی و استفاده از کامپیوتر، دستگاه معادلات فوق را می‌توان حل نمود.

این معادلات برای پروسه‌ای با تابع تبدیل $G_p(s)=\frac{Ke^{-\tau}d^s}{1+T_pS}$ بصورت عددی حل گردیده و نتایج حاصل در جدول (٤-٥) آمده است.

جدول (۴-۵). تنظیم ضرائب کنترل کننده با معیارهای ذکر شده

(الف)کنترل کننده تناسبی

$$K_p=\frac{1}{K}a(\frac{\tau_d}{T_p})^{-b}$$

معیار	a	b
IAE	0.9	0.98
ISE	1.4	0.92
I TAE	0.5	1.08

(ب)کنترل کننده تناسبی- انتگرالی

$$K_p=\frac{1}{K}a(\frac{\tau_d}{T_p})^{-b}$$

$$T_i=T_pc(\frac{\tau_d}{T_p})^{d}$$

معیار	a	b	C	d
IAE	0.98	0.98	1.65	0.71
ISE	1.3	0.96	2.03	0.74
I TAE	0.86	0.98	1.48	0.68

(ج) کنترل کننده تناسبی- انتگرالی – مشتق‌گیر

$$K_P=\frac{1}{K}a(\frac{\tau_d}{T_p})^{-b}$$

$$T_i=T_Pc(\frac{\tau_d}{T_P})^{d}$$

$$T_d=T_pe(\frac{\tau_d}{T_p})^{f}$$

معیار	a	b	c	d	e	f
IAE	1.43	0.92	1.14	0.75	0.48	1.14
ISE	1.5	0.95	0.92	0.77	0.56	1.0
I TAE	1.36	0.95	1.18	0.74	0.38	1.0

فصل ۵

عناصر نهائی و محرک ها

عنصر نهائی، همانطور که از نامش پیداست آخرین حلقه کنترل می‌باشد. به عبارت دیگر فرمان کنترل کننده در نهایت توسط عنصر نهائی اجراء می‌گردد. بعنوان مثال در یک حلقه کنترل ارتفاع آب در مخزن معمولاً یک شیر نقش عنصر نهائی را بازی می‌کند و باز و بسته شدن آن دبی آب ورودی به مخزن را کنترل می‌نماید. توجه نمائید آنچه که بعد از باز و بسته شدن شیر اتفاق می‌افتد مربوط به پروسه می‌باشد. در واقع یک حلقه کنترل با اندازه‌گیری خروجی پروسه آغاز و با اعمال ورودی به پروسه پایان می‌یابد. به همین دلیل عنصری که ورودی مناسب را به پروسه اعمال می‌کند، عنصر نهائی می‌نامیم.

برای حرکت عنصر نهائی نیاز به انرژی می‌باشد. مثلاً باز و بسته کردن شیر مستلزم صرف انرژی است. فرمانی که از کنترل کننده ارسال می‌شود یک سیگنال کنترلی است و انرژی لازم برای حر کت دادن عنصرنهائی را ندارد. بنابراین معمولاً این فرمان تقویت و سپس به عنصر محرک اعمال می‌گردد و محرک نیز عنصر نهائی را به حرکت در می‌آورد.

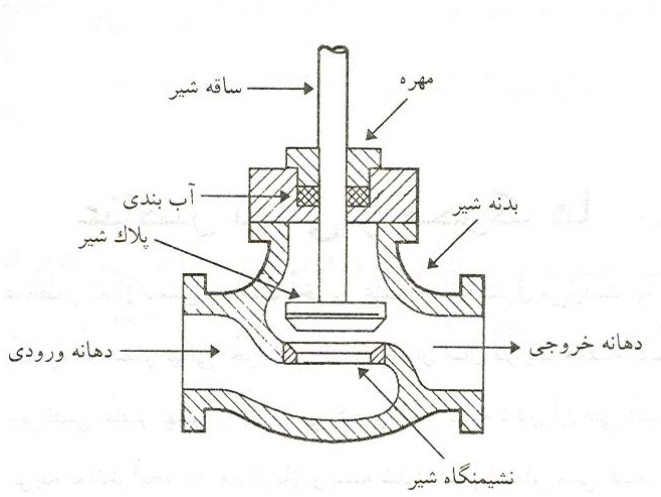
بسیاری از کمپانی‌ها عنصر نهائی و محرک مربوطه را بطور یکجا عرضه می‌دارند که شیرهای سلونوئیدی نمونه متداول آن می‌باشند. در یک شیر سلونوئیدی، عنصر نهائی، شیر و سلونوئید، محرک آن است.

محرک‌ها را می‌توان به دو دسته دورانی و خطی تقسیم بندی کرد. محرک‌های دورانی شامل انواع موتورها است که می‌تواند الکتریکی، پنوماتیکی یا هیدرولیکی باشد. محرک‌های خطی نیز شامل سلونوئیدها و سیلندر پیستون‌های (جک) پنوماتیکی یا هیدرولیکی می‌باشد.

با توجه به مطالب فوق و رابطه نزدیک عناصر نهائی و محرک ها، در این فصل آنها را تحت عنوان عناصر نهائی مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۵-۱ شیرها:

شیرها معروفترین عناصر نهائی می‌باشند و از آنها برای کنترل جریان سیال استفاده می‌کنیم. یک شیر مطابق شکل ۵-۱ از قسمت‌های زیر تشکیل شده است:



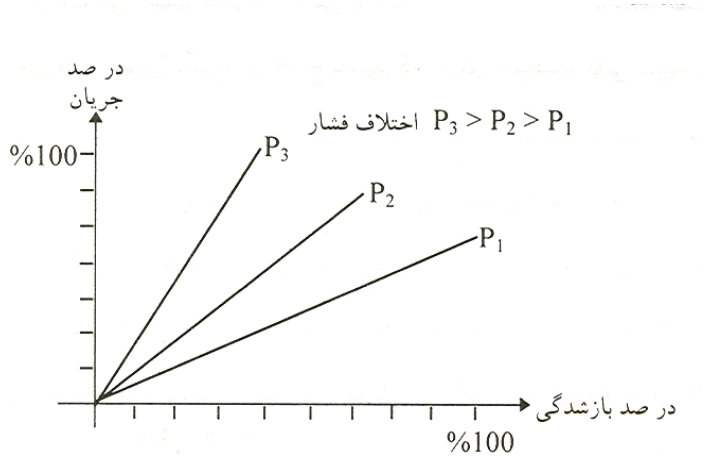
شکل (۵-۱) ساختمان شیر در حالت کلی

۱- بدنه یا پوسته که ظاهر شیر را تشکیل می‌دهد و قسمت‌های بعدی بگونه‌ای به آن متصلند.
۲- ساقه یا محور که از یک طرف به محرک و از طرف دیگر به توپی شیر متصل می‌گردد.
۳- پلاک یا توپی، صفحه‌ای است که معمولاً بر حسب نوع شیر به شکل‌های مختلف ساخته می‌شود و با حرکت بر روی نشیمنگاه، شیر را باز و بسته می‌کند.
٤- نشیمنگاه، سوراخ یا روزنه‌ای است که توسط توپی باز و بسته شده و از طریق آن اجازه عبور به سیال داده می‌شود.
٥- مدخل ورودی محل اتصال شیر به دبی ورودی است.
٦- خروجی، محل خروج سیال از شیر می‌باشد. هنگام نصب شیر باید به اتصال درست ورودی خروجی دقت نمود، زیرا در صورت اشتباه مشکلاتی برای آب‌بندی و عملکرد درست شیر بوجود خواهد آمد.
۷- آب‌بندی یا سیل، ساقه شیر قسمتی متحرک است ومی باید نسبت به پوسته آب‌بندی شود زیرا در غیر این صورت سیال عبوری از درز بین ساقه و پوسته نشت می‌کند و نشت آن از نظر ایمنی، اقتصادی یا بهداشتی ممکن است زیانهائی را به دنبال داشته باشد. بنابراین بر حسب اهمیت موضوع می‌باید در هر کاربرد از شیری با آب‌بندی مناسب استفاده شود.

۵-۱-۱ مشخصه شیر:

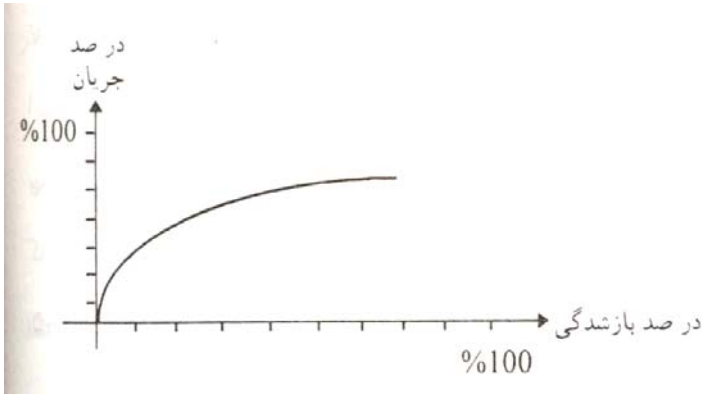
با باز و بسته کردن یک شیر می‌توان جریان سیال عبوری از آن را زیاد و کم کرد. مشخصه شیر رابط جریان سیال از میان شیر با میزان بازشدگی آن را نشان می‌دهد. یک شیر را می‌توان یک مقاومت متغیر تصور نمود که با تغییر مقاومت جریان عبوری از آن تغییر

می‌کند. همانطور که می‌دانیم جریان عبوری از یک مقاومت علاوه بر مقدار آن به ولتاژ دو سر مقاومت نیز بستگی دارد. در مورد شیرها نیز چنین است و میزان فلو به ازای یک بازشدگی مشخص به فشار دو طرف شیر بستگی دارد. بنابراین مشخصه یک شیر را معمولاً بر اساس درصد جریان از میان شیر بر حسب درصد بازشدگی آن تحت یک فشار مشخص بیان می‌کنند. شکل ۵-۲ نمونه‌ای از یک مشخصه شیر را نشان می‌دهد:



شکل (۵-۲) مشخصه شیر

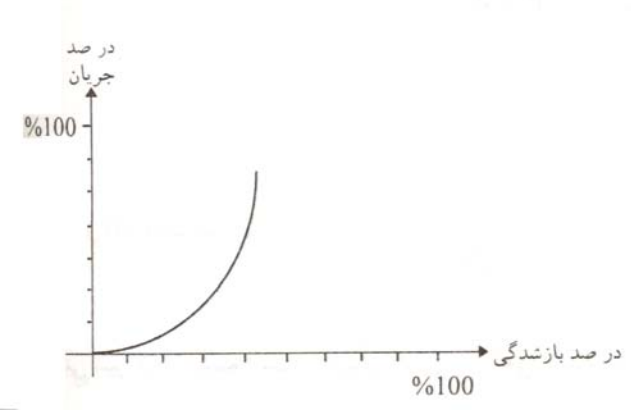
وقتی شیر کاملاً بسته است و جریانی از آن عبور نمی کند اختلاف فشار دو طرف شیر کاهش می‌یابد در این حال افزایش بازشدگی، افزایش جریان و کاهش اختلاف فشار را بدنبال دارد به طوریکه وقتی شیر کاملاً باز می‌شود اختلاف فشار دو طرف آن نیز تقریباً صفر می‌شود. رفتار فوق در عمل مشخصه‌ای شبیه به شکل ۵-۳ را برای یک شیر توجود می‌آورد بطوریکه در بازشدگی‌های کم بدلیل اختلاف فشار زیاد در دو طرف شیر، تغییرات بازشدگی زیاد است اما رفته رفته این تغییرات کاهش یافته و حالتی اشباع شده به خود می‌گیرد.



شکل (۵-۳).خاصیت اشباع شوندگی در مشخصه شیر

با توجه به موارد فوق یک شیر در واقع دارای دو نوع مشخصه می‌باشد. یک مشخصه هنگامی که اختلاف فشار در دو طرف آن ثابت باشد که به آن "مشخصه ذاتی" شیر می‌گوئیم و مشخصه هنگامی است که شیر در یک مدار واقعی نصب می‌گردد و معمولاً فشار در دو طرف آن با میزان بازشدگی شیر تغییر می‌کند. این مشخصه را "مشخصه نصب شده" می‌گوئیم.

مشخصه شیر تحت تأثیر شکل روزنه و پلاک شیر و همچنین شکل ساقه و مکانیزم هائی است که آن را حرکت می‌دهند. معمولاً مایل به داشتن شیری به مشخصه نصب شده خطی می‌باشیم در این صورت می‌باید شیر را بگونه‌ای طرح نمائیم که دارای مشخصه ذاتی شبیه به شکل ٥-٤ باشد.



شکل (٥-۴) مشخصه شیر، عکس اشباع شوندگی

این شیر در یک فشار ثابت، در بازشدگی‌های ابتدائی جریانی کمتر و در بازشدگی‌های انتهائی جریانی بیشتر را تولید می‌کند. این پدیده با پدیده کاهش فشار در اثر افزایش بازشدگی که قبلاً به آن اشاره نمودیم (شکل ٥-٣) در برابر هم قرار می‌گیرند و برآیند آن یک مشخصه نسبتاً خطی مطابق شکل ٥-٢ می‌باشد.

٥-١-٢ کنترل پذیری شیر (Rangeability):

نسبت ماکزیمم فلوی قابل کنترل به مینیمم فلوی قابل کنترل در یک شیر را " کنترل پذیری شیر" می‌گوئیم. کنترل پذیری شیرهای ساندرس حدود ٥:١ و نوعی از شیرهای کروی حدود ١٠٠:١ است. سایر شیرها نیز کنترل پذیری مابین این مقادیر دارند.

از آنجائیکه رفتار شیر در حالت نصب شده از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشد. در عمل کنترل پذیری آن را نیز بصورت نصب شده بیان می‌کنند. در این حال رابطه‌ای بصورت زیر بدست می‌آید:

$$R = \frac{q_{\max}\sqrt{\Delta P_{\min}}}{q_{\min}\sqrt{\Delta P_{\max}}} \qquad (١-٥)$$

در رابطه (۵-۱) q_{max} حداکثر فلو از میان شیر و ΔP_{max} اختلاف فشار در این حالت است و q_{min} حداقل فلو از میان شیر و ΔP_{min} اختلاف فشار مربوطه می‌باشد.

انتخاب یک شیر بعنوان عنصر نهائی در یک حلقه کنترل علاوه بر مشخصه شیر و کنترل پذیری آن تحت تأثیر عوامل دیگری نیز می‌باشد که می‌بایستی به آنها نیز توجه نمود. شکل پوسته شیر، سهولت نصب و همچنین سهولت تعمیر و تعویض آن از موارد مهمی هستند که باید مورد توجه قرار گیرند.

جنس پوسته و قطعات مختلف شیر با توجه به خواص شیمیایی سیال می‌بایستی تعیین گردند. شرایط محیطی و مسائل ایمنی و خطرات احتمالی ناشی از گیر کردن شیر نیز می‌بایستی مورد توجه قرار گیرند. شیرهای با مشخصه نصب شده خطی معولاً بسیار گرانتر از انواع دیگر می‌باشند بنابراین با توجه به اهمیت فرآیند تحت کنترل می‌باید مسائل اقتصادی را نیز در نظر گرفت مثلاً در یک کنترل دو وضعیتی (On/Off) مشخصه شیر اهمیت چندانی ندارد و می‌توان از یک شیر با مشخصه نصب شده غیر خطی و با سرعت بازشدگی بالا و قیمت پائین استفاده نمود.

در پروسه هائی که به کنترل پذیری حدود ۸:۱ و بیشتر نیاز باشد، می‌باید از شیرهائی با مشخصه خطی و کیفیت خوب و طبیعتاً قیمت بیشتر استفاده شود.

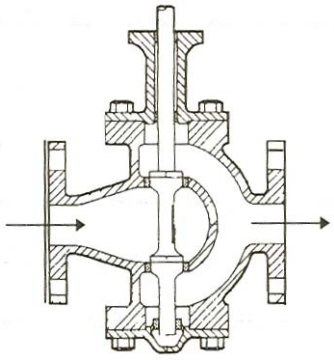
همانطور که قبلاً گفتیم شکل پلاک و نشیمنگاه شیر خواص ویژه‌ای را بوجود می‌آورند و معمولاً انواع مختلف شیرها نیز بر همین اساس نامگذاری می‌گردند. از آنجائیکه بررسی همه انواع شیرها و خواص آنها بحثی طولانی است، در اینجا فقط به معرفی چند نوع متداول و معروف می‌پردازیم.

۵-۱-۳ شیرهای دو روزنه‌ای (Double-Port):

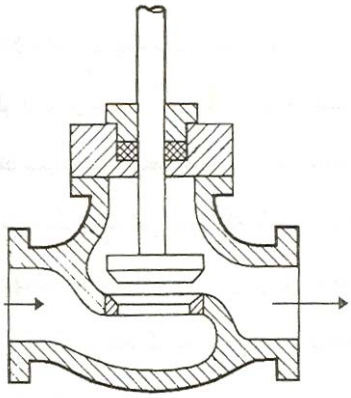
شکل ۵-۵ یک شیر معمولی با کاربردی عمومی که به شیر گلوب (Globe) معروف است را نشان می‌دهد. این شیر را تک روزنه‌ای (Single-Port) نیز می‌گویند.

در عمل تعداد و شکل روزنه خواص مثبت یا منفی ویژه‌ای را برای شیر بوجود می‌آورد. مثلاً شیر فوق دارای این اشکال است که توپی آن همواره در معرض فشار سیال ورودی می‌باشد. بنابراین برای بسته نگه داشتن آن محرک باید همواره نیروئی به سمت پائین بر آن اعمال کند. برای رفع این مشکل می‌توان از شیر دو روزنه‌ای مطابق شکل ۵-۶ استفاده نمود. در این شیر فشاری که از جانب سیال بر پلاک بالائی وارد می‌شود با فشار وارده شده بر پلاک پائینی خنثی می‌شود و ساقه شیر همواره در حالت بالانس نیرو قرار می‌گیرد. بنابراین

برای باز و بسته کردن چنین شیری به نیروی کمتری نیاز می‌باشد و کنترل و تثبیت وضعیت آنها راحت تر است.



شکل (۵-۶). شیر دو راهه روزنه‌ای



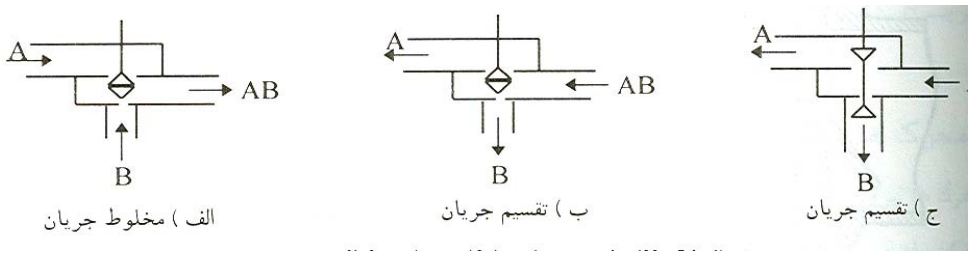
شکل (۵-۵). شیر یک روزنه ای

شیرهای دو راهه معمولاً د۰ر ابعاد بزرگتر از دو اینچ ساخته می‌شوند. متأسفانه وجود ذرّات معلق و آشغال در سیال عملکرد صحیح آنها را مختل می‌سازد.

۵-۱-٤ شیرهای چند راهه (Multi-Way):

در بسیاری از پروسه‌های شیمیائی و کنترل‌های نسبت (Ratio) اختلاط دو یا چند جریان و یا تقسیم یک جریان به دو یا چند جریان دیگر مطرح می‌گردد. در چنین مواردی از شیرهای چند راهه استفاده می‌کنیم.

شکل ۵-۷ ساختمان کلی یک شیر سه راهه را نشان می‌دهد:



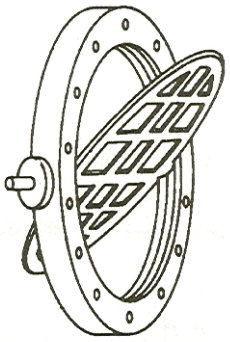
شکل (۵-۷) شیر سه راهه با کاربردهای مختلف

اتصال شکل ۵-۷- الف برای مخلوط کردن و اتصال‌های ۵-۷- ب و ج برای تقسیم کردن جریان استفاده می‌شود.

برای کنترل شیرهای چند راهه معمولاً به محرک‌های قوی و اتخاذ تدابیر ویژه نیازمندیم. زیرا پلاک این شیرها معمولاً تحت تأثیر فشارهای متفاوتی از طرف سیال‌های متصل به آن قرار دارند و به شدت در حالت غیربالانس نیرو می‌باشند.

۵-۱-۵ شیرهای پروانه‌ای (Butterfly-Valve):

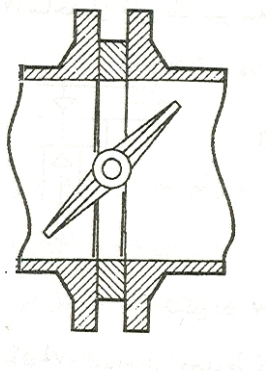
ساختمان کلی یک شیر پروانه‌ای مطابق شکل ۵-۸ می‌باش



شکل (۵-۸). نوعی شیر پروانه‌ای

این شیرها را گاهی شیرهای صفحه‌ای یا دمپری نیز می‌گویند چرا که در حالت کلی از یک صفحه که می‌تواند حول محوری دوران کند تشکیل گردیده‌اند. شیرهای پروانه‌ای در ابعاد بزرگ و برای کنترل جریان‌های بزرگ ساخته می‌شوند.

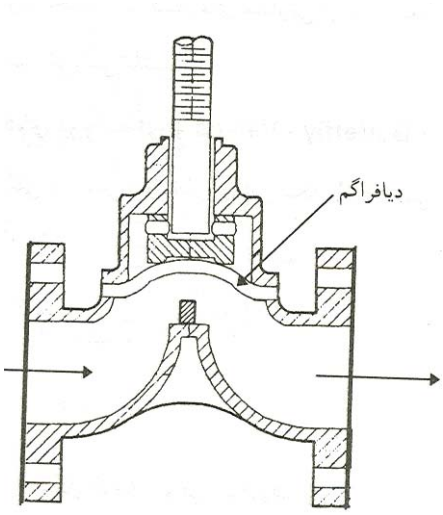
برای بهبود مشخصات شیرهای پروانه‌ای بعضی از سازندگان صفحه شیر را مطابق شکل ۵-۹ به شکلی شبیه به دم ماهی می‌سازند.



شکل (۵-۹). شیر پروانه‌ای دم ماهی

۵-۱-۶ شیرهای دیافراگمی (ساندرس):

شکل ۵-۱۰ ساختمان کلی یک شیر دیافراگمی را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۱۰). شیر ساندرس

در این شیرها یک دیافراگم از جنس با دوام و مرغوب، کار پلاک و همچنین آب‌بندی ساقه را انجام می‌دهد. این شیرها عموماً برای کنترل جریان سیالاتی با ویسکوزیته بالا (غلیظ و چسبنده) بکار می‌روند.

از شیرهای ساندرس معمولاً در ظرفیت‌های بالا استفاده می‌شود. کنترل این شیرها مشکلات خاص خود را دارد. فشار سیال همواره در جهت باز کردن شیر عمل می‌کند و بنابراین سرعت باز شدگی آن بسیار بیشتر از سرعت بسته شدن آن است و نیروئی که محرک برای باز کردن شیر اعمال می‌کند با نیروئی که برای بستن آن بکار می‌برد بسیار متفاوت است. برای نگه داشتن دیافراگم این شیرها در وضعیت میانی نیاز به تثبیت کننده وضعیت (Positioner) می‌باشد. با توجه به موارد فوق از این شیرها بیشتر برای کنترل‌های دو وضعیتی استفاده می‌شود.

۵-۲ محرک‌ها (Actuators):

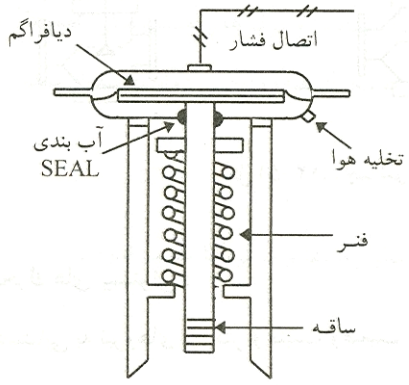
محرک‌ها نیروی لازم برای حرکت عنصر نهائی را فراهم می‌آورند. محرک می‌تواند الکتریکی، بادی یا هیدرولیکی باشد. هر یک از انواع محرک‌ها موارد کاربرد خاص خود را دارند و بطور کلی نوع محرک تحت تأثیر نوع سیستم کنترل می‌باشد. مثلاً در یک سیستم کنترل پنوماتیکی معمولاً از محرک‌های بادی استفاده می‌شود و در یک سیستم هیدرولیکی از محرک‌های هیدرولیکی و ...

۵-۲-۱ محرک‌های بادی:

محرک‌های بادی از انرژی هوای فشرده برای تولید نیرو استفاده می‌کنند. محرک‌های بادی در اثر اضافه بار و یا گیر کردن عنصر نهائی آسیب نمی بینند و این مهمترین مزیت آنها می‌باشد. محرک‌های بادی معمولاً به دو دسته تقسیم می‌شوند:

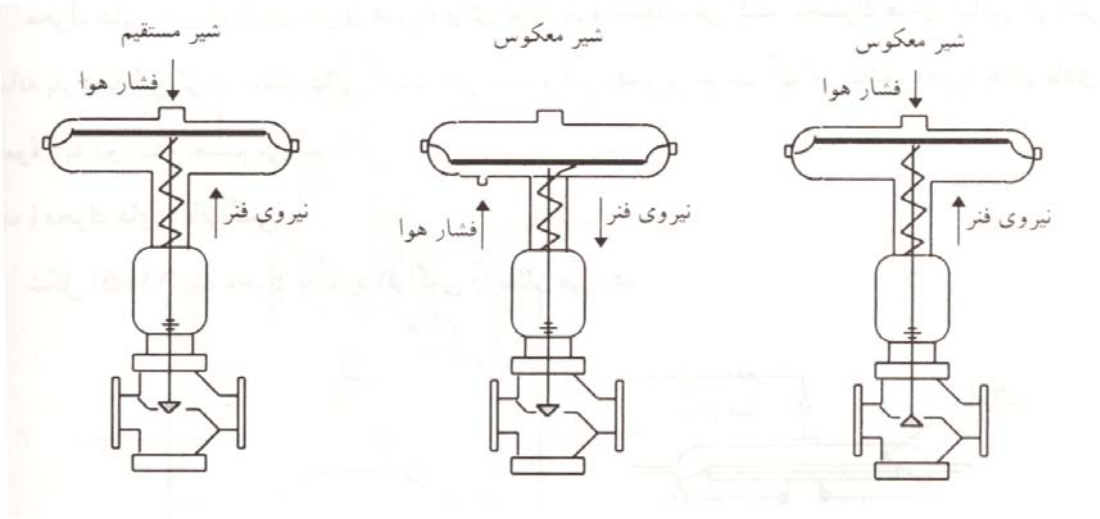
الف)محرک‌های دیافراگمی:

شکل ۵-۱۱ یک محرک بادی دیافراگمی را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۱۱). محرک دیافراگمی

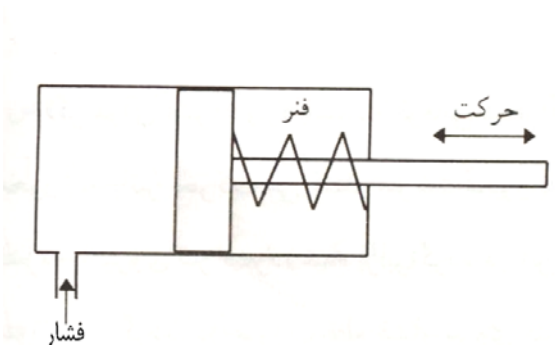
اگر هوای فشرده وارد قسمت فوقانی دیافراگم شود در اثر نیروی تولید شده دیافراگم و در نتیجه محور به پائین حرکت می‌کنند. حرکت محور به سمت پائین تا جائی ادامه می‌یابد که نیروی هوای فشرده با نیروی فنی فشرده شده برابر گردد در این حالت تعادل نیرو برقرار و محور در یک وضعیت خاص متوقف می‌گردد. در صورت قطع فشار نیروی فنر موجب حرکت دیافراگم و محور به سمت بالا و قرار گرفتن در وضعیت ابتدائی می‌گردد. بنابراین با اتصال محور محرک به ساقه شیر می‌توان آن را به دلخواه باز و بسته نمود. معمولاً با حرکت ساقه به بالا شیر باز و با حرکت ساقه به پائین شیر بسته می‌شود. این گونه شیرها را شیر مستقیم و محرک به آن (مثلاً محرک فوق) را نیز محرک مستقیم می‌گوئیم. به عبارت دیگر در محرک‌های مستقیم اعمال فشار به دیافراگم موجب بسته شدن شیر می‌گردد. این محرک‌ها را گاهی محرک فشار – بسته (Air-To-Close) نیز می‌گویند. توجه نمائید که در اینجا در صورت قطع هوای فشرده فشار فنر موجب باز شدن شیر می‌شود. در صورتیکه ورودی هوای فشرده به محرک فوق را تغییر دهیم به گونه‌ای که هوای فشرده از پائین به دیافراگم اعمال شود محرک تبدیل به یک محرک معکوس و یا محرک فشار – باز (Air-To-Open) خواهد شد. شکل ۵-۱۲ نمونه هائی از محرک بادی دیافراگمی با عملکردهای مختلف را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۱۲). چند نمونه محرک دیافراگمی بادی

ب) محرک‌های پیستونی :

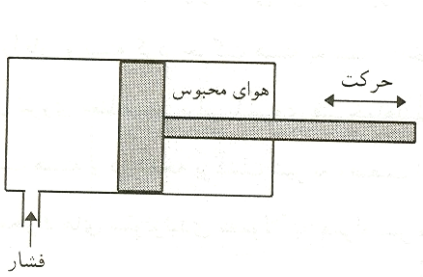
برای دستیابی به نیروهای بزرگتر و تثبیت وضعیت دقیق‌تر از محرک‌های پیستونی استفاده می‌کنیم. شکل ۵-۱۳ یک محرک بادی پیستونی را نشان می‌دهد:



شکل (۵-۱۳). محرک پیستونی

در حالت عادی فنر در وضعیت آزاد قرار دارد. با ورود هوای فشرده پیستون به سمت راست حرکت می‌کند و فنر فشرده می‌شود. حرکت پیستون تا جائی که نیروی ناشی از هوای فشرده با نیروی فنر برابر شود، ادامه می‌یابد. در صورت قطع فشار، پیستون در اثرنیروی فنر به محل اولیه خود باز می‌گردد. محرک‌های پیستونی نوعی رفتار انتگرالی دارند و این رفتار برای ساخت شیرهائی با تثبیت کننده وضعیت (Positioner) بسیار مفید می‌باشد.

در محرک‌های پیستونی گاهی به جای فنر از هوا استفاده می‌شود. بعبارت دیگر هوای حبس شده در طرف راست پیستون در شکل ۵-۱٤ می‌توانند مانند فنر عمل نماید. استفاده از این روش نرمی و قابلیت‌های خوبی را فراهم می‌آورد.



شکل (۵-۱۴) محرک پیستونی با هوای محبوس به جای فنر

۵-۲-۲ محرک‌های هیدرولیکی:

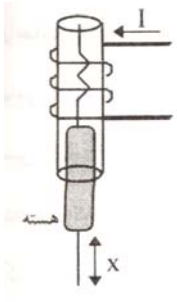
برای باز و بسته کردن شیرهای بسیار بزرگ از محرک‌های هیدرولیکی استفاده می‌کنیم. همچنین هنگامی که فشار سیال تحت کنترل بالا است، بگونه‌ای که نیروی بزرگی بر پلاک شیر اعمال می‌نماید باید برای تثبیت وضعیت آن، از محرک‌های هیدرولیکی استفاده نمائیم. محرک‌های هیدرولیکی معمولاً بصورت پیستونی (جک) ساخته می‌شوند و در مواردی که نیاز به محرک هیدرولیکی دوار باشد از هیدروموتور استفاده می‌شود.

۵-۲-۳ محرک‌های الکتریکی:

محرک‌های الکتریکی را می‌توان به دو دسته کلی سلونوئیدها و موتورها تقسیم نمود:

الف) سلونوئیدها:

سلونوئیدها معمولاً درکنترل‌های دو وضعیتی بکار برده می‌شوند. در کنترل دو وضعیتی عنصر نهائی تنها دو حالت باز یا بسته می‌تواند داشته باشد. شکل ۵-۱۵ نمای کلی یک محرک سلونوئیدی را نشان می‌دهد:



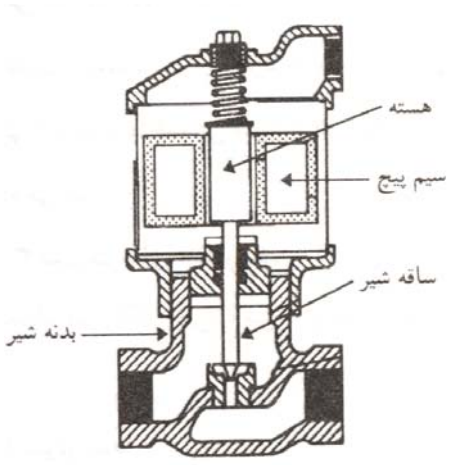
شکل (۵-۱۵) محرک سلونوئیدی

عبور جریان از سیم‌پیچ موجب ایجاد میدان مغناطیسی می‌شود واین میدان بر هسته مغناطیسی نیروئی اعمال می‌نماید. این نیرو متناسب با مجذور جریان الکتریکی است و موجب

حرکت هسته به سمت داخل سلونوئید می‌گردد. محور هسته را میتوان بـه سـاقه شـیر متصـل نمود و از طریق آن شیر را باز و بسته کرد. حرکت هسـته بـه سـمت داخـل سـیم‌پـیچ موجـب فشرده شدن فنر می‌گردد و در حالت تعادل نیروی مغناطیسی برابر با نیروی فنر خواهـد بـود. در صورت قطع جریان الکتریکی نیروی فنر موجب برگشت هسته و در نتیجه برگشت شیر بـه وضعیت اولیه می‌شود.

محرک‌های سلونوئیدی معمولاً به همراه شیر مربوطه بطور یکجا عرضه مـی‌گردنـد و بنـام شیرهای سلونوئیدی معروف می‌باشند.

شکل ٥-١٦ یک شیر سلونوئیدی نمونه را نشان می‌دهد. سـلونوئیدها بصـورت AC یـا DC ساخته می‌شوند و انواع AC متداول‌تر هستند.



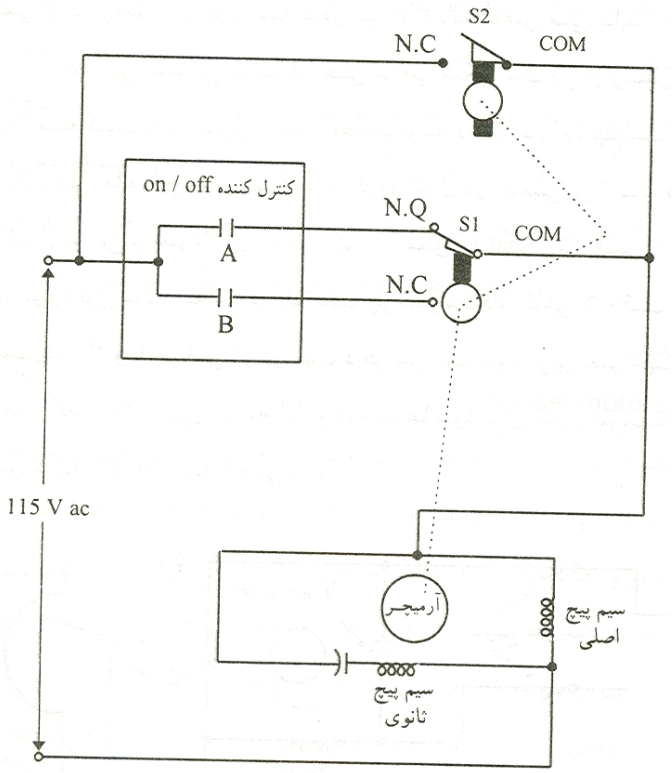
شکل (۵-۱۶). شیر با محرک سلونوئیدی

احتمال سوختن سلونوئیدهای AC بیشتر از نـوع DC مـی‌باشـد زیـرا اگـر جریـان بـرق در سیم‌پیچ برقرار شود و به هر دلیل (مثلاً گیر کردن شیر) هسته داخل آن نشود بدلیل کـم بـودن اندوکتاس سیم‌پیچ بدون هسته، جریان زیادی از آن عبور خواهد کرد که موجـب گـرم شـدن و در صورت تداوم موجب سوختن سیم‌پیچ می‌شود.

ب) موتورها:

محرک‌های سلونوئیدی معمولاً در شیرهای کوچکتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای بـاز و بسته کردن شیرهای بزرگتر و همچنین برای کنتـرل پیوسـته حرکـت شـیرها از موتورهـای الکتریکی استفاده می‌کنیم. برای باز و بسته کردن شیرها معمولاً از موتورهـای القـائی بـا فـاز شکسته (Split-Phase-Induction- Motor) استفاده می‌شود. معمولاً برای افزایش کوپل خروجی، موتور را از طریق یک گیربکس به شیر متصل می‌کنند.

برای توقف موتور در نقاط انتهائی کورس شیر و همچنین تغییر جهت به موقع آن در باز یا بسته کردن از مداری مطابق شکل ۵-۱۷ استفاده می‌شود.



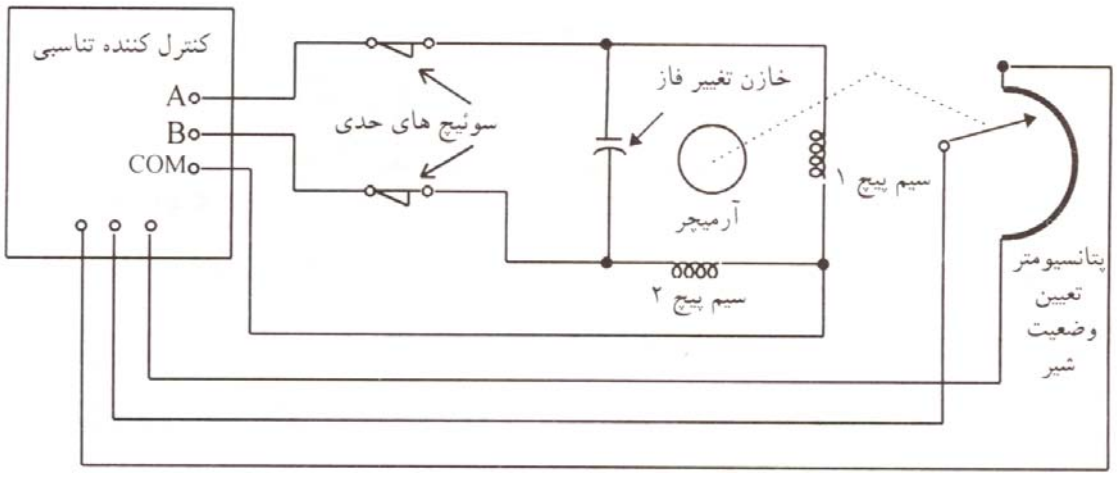
شکل (۵-۱۷). مدار کنترل دو وضعیتی شیر

برای بررسی نحوه عملکرد این مدار حالتی را در نظر بگیرید که شیر کاملاً بسته است. در این حالت میکروسوئیچ‌های S_1 و S_2 هر دو تحریک شده می‌باشند. یعنی S_2 باز و S_1 بسته می‌باشد.

حال اگر کنترل کننده فرمان باز شدن شیر را صادر کند، کنتاکت A برای لحظه‌ای بسته می‌شود و ولتاژ از طریق S_1 به موتور اعمال می‌شود و موتور شروع به چرخش می‌کند. به محض حرکت موتور چون شیر از وضعیت کاملاً بسته خارج می‌شود، S_1 و S_2 تغییر حالت می‌دهند و بنابراین تغذیه موتور از طریق S_2 برقرار می‌گردد. هنگامیکه شیر کاملاً باز گردید S_2 قطع و در نتیجه موتور از حرکت باز می‌ایستد. در صورت نیاز به بسته شدن شیر، کنترل کننده کنتاکت B را برای لحظه‌ای می‌بندد و موتور از طریق S_1 تحریک می‌گردد و به محض حرکت، S_2 متصل و S_1 قطع می‌شود و حرکت موتور تا بسته شدن کامل شیر ادامه می‌یابد. توجه نمائید که در این مدار هنگامی که وضعیت محور موتور در صفر درجه است شیر بسته و هنگامیکه وضعیت آن به ۱۸۰ درجه می‌رسد شیر کاملاً باز است و همچنین هنگامیکه موتور از ۱۸۰ درجه به سمت ۳۶۰ درجه تغییر وضعیت می‌دهد شیر مجدداً شروع به بسته شدن می‌کند. با استفاده از گیربکس و مکانیزم‌های مناسب می‌توان سرعت باز و بسته کردن شیر را

تنظیم نمود. در بعضی از کاربردها زمان باز و بسته کردن شیر تا ۳ ثانیه کاهش می‌یابد و در بعضی موارد آن را تا حدود یک دقیقه نیز تنظیم می‌نمائیم. در چنین مواقعی ممکن است قبل از رسیدن شیر به موقعیت کاملاً باز یا کاملاً بسته کمیت تحت کنترل به مقدار مطلوب برسد در این صورت بهتر است شیر در موقعیتی که در آن لحظه دارد باقی بماند. این روش کنترل نه در گروه کنترل دو وضعیتی باز/بسته قرار می‌گیرد و نه در گروه کنترل تناسبی و معمولاً آن را روش کنترل "معلق" (Float) می‌نامیم.

در موارد فوق موتور همواره در یک جهت چرخش می‌کند. گاهی لازم است که با چرخش موتور در یک جهت شیر باز و با چرخش آن در جهت دیگر شیر بسته شود. برای تغییر جهت چرخش موتور می‌توان محل خازن تغییر فاز را بین سیم‌پیچ اول و دوم جابجا نمود. برای کنترل پیوسته حرکت شیر از مداری مطابق شکل ۵-۱۸ استفاده می‌شود.



شکل (۵-۱۸). مدار کنترل پیوسته وضعیت شیر

در این مدار وضعیت محور موتور (شیر) توسط یک پتاسیومتر (اندازه‌گیر زاویه) اندازه‌گیری و به کنترل کننده اعلام می‌شود. فرض کنید لازم باشد که شیر بسته‌تر شود. در این حالت کنترل کننده سیگنال حرکت AC را به ترمینال A اعمال می‌کند. در اینجا خازن تغییر فاز با سیم‌پیچ ۲ موتور سری شده و موتور در جهت عقربه‌های ساعت می‌چرخد و شیر بسته‌تر می‌شود و هنگامی که شیر به وضعیت مطلوب رسید فرمان حرکت قطع می‌شود. به همین ترتیب هنگامی که شیر بایستی بازتر شود کنترل کننده سیگنال AC را به ترمینال B اعمال نموده و این بار خازن با سیم‌پیچ ۱ سری می‌شود و موتور در جهت عکس می‌چرخد و شیر بازتر می‌گردد. در این مدار وضعیت‌های نهایی (کاملاً بسته یا کاملاً باز) توسط میکروسوئیچ‌های مربوطه تشخیص و به کنترل کننده اعلام می‌گردد.

در مواردی علاوه بر وضعیت، سرعت باز و بسته شدن شیر نیز می‌باید قابل تنظیم و تغییر باشد. در این حالت به مداری جهت کنترل سرعت چرخش موتور نیاز مـی‌باشـد. بـرای کنتـرل سرعت موتورها مدارها و روش‌های گوناگونی وجود دارد که اغلب آنها نیاز به اجزاء و قطعات گران قیمت دارند و مدار حاصل نیز پیچیده می‌باشد. در چنـین مـواردی اگـر ضـرورت ایجـاب نکند از محرک‌های الکتریکی استفاده نمی شود و معمـولاً بـه دلیـل سـادگی کنتـرل سـرعت در محرک‌های بادی، از آنها اسـتفاده مـی‌کنـیم. محـرک‌هـای الکتریکـی بـرای بـاز و بسـته کـردن شیرهای سنگین و دارای اصطکاک و مواردی که احتمال گیر کردن عنصـر نهـائی وجـود دارد مناسب نمی باشند.

ج) موتورهای پله‌ای (Stepper Motors):

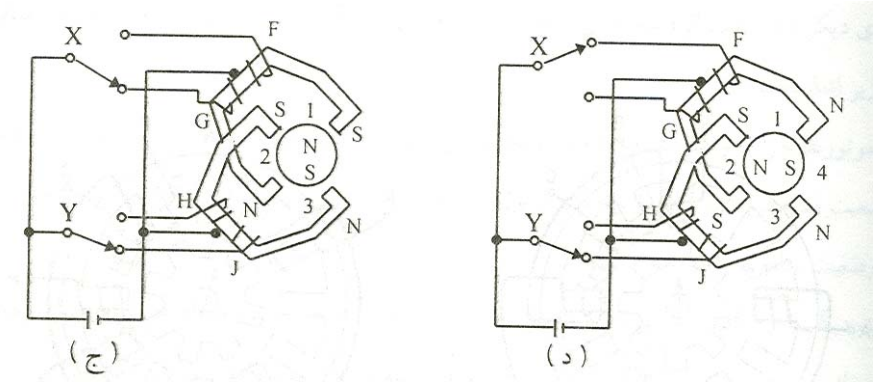
موتورهای پلـه‌ای عضـو دیگـری از خـانواده محـرک‌هـای الکتریکـی چرخـان (موتورهـای الکتریکی) می‌باشند و همانطور که از نام آنها پیداسـت چـرخش ایـن گونـه موتورهـا بصـورت پله‌ای یا گسسته می‌باشد. کاربرد این گونه موتورها در مقایسه با انـواع موتورهـای AC و DC کمتر است. اما با توجه به رشد روزافزون سیستم‌های دیجیتالی، کاربرد آنها نیز روبه افـزایش است ولزوم ساخت موتورهای پله‌ای با قدرت و توانائی بیشتر و قیمت ارزانتر کـاملاً احسـاس مـی‌گـردد. بـه همـین دلیـل سـازندگان ایـن گونـه موتورهـا توجـه خاصـی بـه بهبـود کیفیـت محصولاتشان ندارند. امروزه موتورهای پله‌ای با تکیه بر اصول کم و بـیش مشـابه‌ای سـاخته می‌شوند. در اینجا به بررسی دو نوع متداول و ساده می‌پردازیم:

۱- موتورهای پله‌ای نوع آهن‌ربای طبیعی (Permanent Magnet Stepper Motors):

شکل ۵-۱۹ شمای ساده‌ای از این نوع موتور را نشان می‌دهـد. رتـور اینگونـه موتورهـا از آهن‌ربای طبیعی و معمولاً با چند زوج قطب می‌باشد. در اینجـا موتـور نشـان داده شـده دارای یک زوج قطب می‌باشد.

استاتور این موتور دارای چهار سری سیم‌پیچ می‌باشد که مطابق شکل هر دو سیم‌پیچ یـک زوج قطب استاتور پیچیده شده اسـت. جهـت پـیچش هـر یـک از سـیم‌پـیچ‌هـا روی زوج قطـب بگونه‌ای است که عبور جریان الکتریکی از هر یک از آنها پلاریته زوج قطب استاتور را معکوس می‌کند. برای بررسی طرز کار این موتور فرض کنید سوئیچ‌های x و y در وضعیت نشـان داده شده در شکل ۵-۱۹- الف باشند.

در این حالت سیم‌پیچ‌های F و H تغذیه می‌شوند و پلاریته قطب‌های استاتور مطابق شکل خواهد بود. با توجه به تقارن حالت مینیمم انرژی رتور ایجاب می‌کند که در وضعیتی مطابق شکل قرار گیرد.



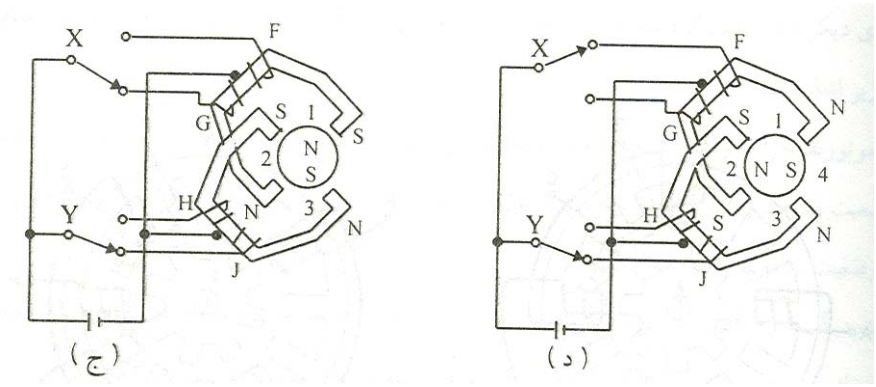
شکل (۵-۱۹) موتور پله‌ای با آهن‌ربای طبیعی

یعنی قطب جنوب رتور در وضعیت ۱ باشد و هر گونه تغییر بار خارجی برای جابجائی رتور با کوپل مغناطیسی ایجاد شده خنثی می‌گردد.

اکنون اگر وضعیت سوئیچ x تغییر کند سیم‌پیچ G تغذیه شده و پلاریته قطب‌های استاتور مطابق شکل ۵-۱۹- ب خواهد بود. این امر باعث می‌گردد که قطب جنوب رتور به وضعیت ۲ رانده شده و در آن وضعیت پایدار گردد. در این صورت رتور به اندازه ۹۰ درجه در خلاف جهت عقربه‌های ساعت چرخیده است. و همین طور اگر وضعیت سوئیچ‌های x و Y را به ترتیب مطابق شکل (۵-۱۹- ج و د) قرار دهیم قطب جنوب رتور در موقعیت‌های ۳ و ٤ قرار خواهد گرفت.

اگر در هر یک از شکل‌های قبل تغییر سوئیچ‌های را بصورت عکس انجام دهیم موتور در جهت عکس خواهد چرخید. مثلاً اگر در شکل ۵-۱۹- الف به جای عوض کردن وضعیت سوئیچ x وضعیت سوئیچ Y را عوض کنیم رتور در جهت عقربه‌های ساعت چرخیده و به وضعیت شکل ۵-۱۹- د در می‌آید.

ترتیب تعویض سوئیچ‌های x و Y و اطلاع از موقعیت سوئیچ‌ها در هر لحظه برای حرکت درست و پیش‌بینی شده موتور حائز اهمیت می‌باشد.



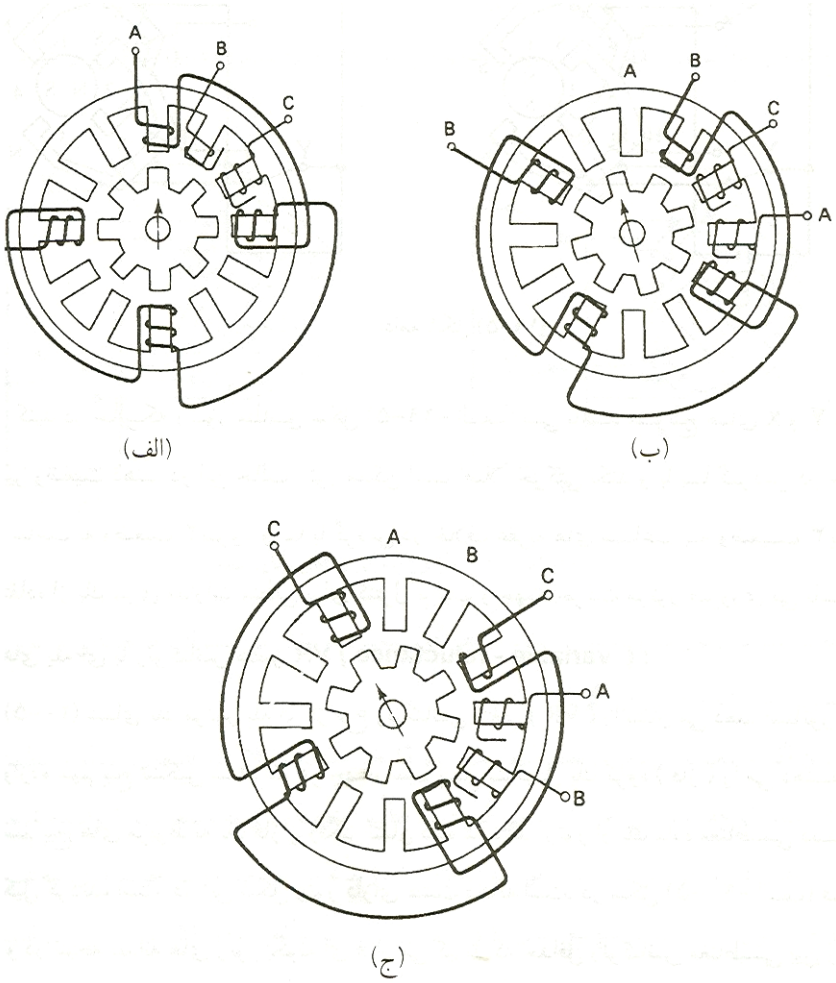
ادامه شکل (۵-۱۹)

مثلاً فرض کنید در حالی که رتور مطابق شکل ۵-۱۹- الف می‌باشد سوئیچ‌های x و Y بطور همزمان تغییر وضعیت دهند. در این حالت رتور ممکن است اصلاً حرکتی نکند و یا با گردش در جهت عقربه‌های ساعت به وضعیت ۳ برود و یا با گردش در خلاف عقربه‌های ساعت به وضعیت ۳ برود. بنابراین استفاده از یک سری مدارات منطقی برای کنترل ترتیب و جهت حرکت موتور ضروری می‌باشد.

۲- موتورهای پله‌ای با رلوکتانس متغیر VR (Variable-Reluctance):

شکل ۵-۲۰ شمای یک موتور پله‌ای از نوع رلوکتانس متغیر (VR) را نشان می‌دهد. استاتور این موتور از دوازده سیم‌پیچ تشکیل شده که هر چهار سیم‌پیچ تشکیل یک گروه (فاز) را می‌دهند. در این شکل سیم‌پیچ‌های مربوطه به یک فاز پررنگتر نشان داده شده‌اند. رتور از یک ماده مغناطیسی دندانه دندانه تشکیل شده است. در این شکل رتور دارای هشت دندانه است. در شکل ۵-۲۰- الف فاز A تغذیه شده و در نتیجه دندانه‌های رتور بگونه‌ای قرار می‌گیرند که حداقل رلوکتانس مغناطیسی بین رتور و استاتور بوجود آید. اکنون اگر مطابق شکل ۵-۲۰- ب تغذیه فاز A قطع و تغذیه فاز B برقرار گردد، رعایت اصل فوق باعث می‌گردد که رتور به اندازه ۱۵ درجه چرخیده و دندانه‌ها در وضعیتی که نشان داده شده‌اند قرار گیرند. به همین ترتیب تغذیه فاز C باعث می‌گردد که رتور ۱۵ درجه دیگر در خلاف جهت عقربه‌های ساعت بچرخد.

در مرحله فوق اگر بجای فاز C مجدداً فاز A تغذیه شود رتور ۱۵ درجه در خلاف جهت عقربه‌های ساعت می‌چرخد و مجدداً به حالت شکل ۵-۲۲- الف برمی گردد. ملاحظه می‌نمائید که در این نوع موتور هم نیاز به مدارات منطقی جهت رعایت ترتیب تغذیه فازها و پیش‌بینی جهت چرخش موتور می‌باشد.



شکل (۵-۲۰). موتور پله‌ای با رلوکتانس متغیر

موتورهای (VR) با زاویه پله کوچکتر نسبت به موتورهای PM قابل ساخت هستند و بدین لحاظ در کاربردهائی که نیاز به گامهای چرخشی ظریف‌تری می‌باشد مورد استفاده قرار می‌گیرند. اما کوپل نگهدارنده این نوع موتور در یک وضعیت دلخواه از نوع PM است.

موتورهای پله‌ای دارای مزایا و معایب مخصوص به خود هستند. از معایب عمده آنها می‌توان قدرت و راندمان کم و قیمت زیاد در مقایسه به موتورهای معمولی را نام برد. اما علیرغم این معایب ماهیت دیجیتالی و مزایای دیگر آنها باعث گردیده تا مورد استفاده قرار گیرند. از مزایای این موتورها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- این موتورها خودبخود دارای یک فیدبک وضعیت می‌باشند. بدین معنی که هر گاه فرمانی برای چرخش به یک وضعیت مشخص داده شود با توجه به اصول کار موتور پله‌ای رتور تنها می‌تواند در یک موقعیت که همان وضعیت مطلوب باشد متوقف گردد.
- مزیت دیگر کمی خطای مطلق وضعیت می‌باشد. بدین معنی که هر گاه هدف چرخش از یک وضعیت فعلی به یک وضعیت مطلوب باشد و اینکار با طی چندین پله مقدور شود خطای وضعیت احتمالی خطای ناشی از آخرین پله خواهد بود یعنی اینکه رتور در

آخرین پله با دقتی در موقعیت گسسته مطلوب قرار می‌گیرد. به بیان دیگر در این گونه موتورها خطاهای وضعیت از یک پله به پله دیگر جمع نمی شوند بلکه خطای وضعیت در هر لحظه ناشی از خطای وضعیت قطبهای رتور نسبت به قطبهای استاتور در آن لحظه می‌باشد. بدین ترتیب خطای موجود صرفاً ناشی از ساختمان مکانیکی موتور می‌باشد و با دقت در ساخت مکانیکی موتور می‌توان آن را حتی‌الامکان کمتر نمود.

- در بسیاری از مواقع لازم است تا یک جسم (بار) با منحنی خاصی سرعت گرفته و با دقت زیاد در یک سرعت تثبیت گردد و سپس در صورت نیاز با شتاب کنترل شده‌ای مجدداً متوقف گردد. از نمونه‌های این نیاز می‌توان به واحد دیسک درایو کامپیوتر واحدهای اطلاعات با نوار مغناطیسی و دستگاه‌های ویدئو اشاره نمود. در چنین کاربردهائی استفاده از موتورهای معمولی اگر هم مقدور باشد با صرفه نخواهد بود، زیرا نیاز به مدارات جانبی بسیار پیچیده و سنسورهای سرعت و شتاب با مدارهای مربوطه دارد.
- مزایای قبلی موتورهای پله‌ای و ماهیت دیجیتالی آنها استفاده از اینگونه موتورها را در کاربردهای فوق عملی و باصرفه نموده است. در چنین سیستم‌هایی می‌توان با استفاده از یک اسیلاتور قابل کنترل مناسب، نیازهای فوق را بخوبی برآورده نمود. بدین ترتیب که پالس‌های ایجاد شده توسط اسیلاتور بصورت فرمان‌های پله‌ای به موتور اعمال می‌گردند و با تغییر فرکانس پالس ها، سرعت موتور به دلخواه کم و زیاد می‌شود.

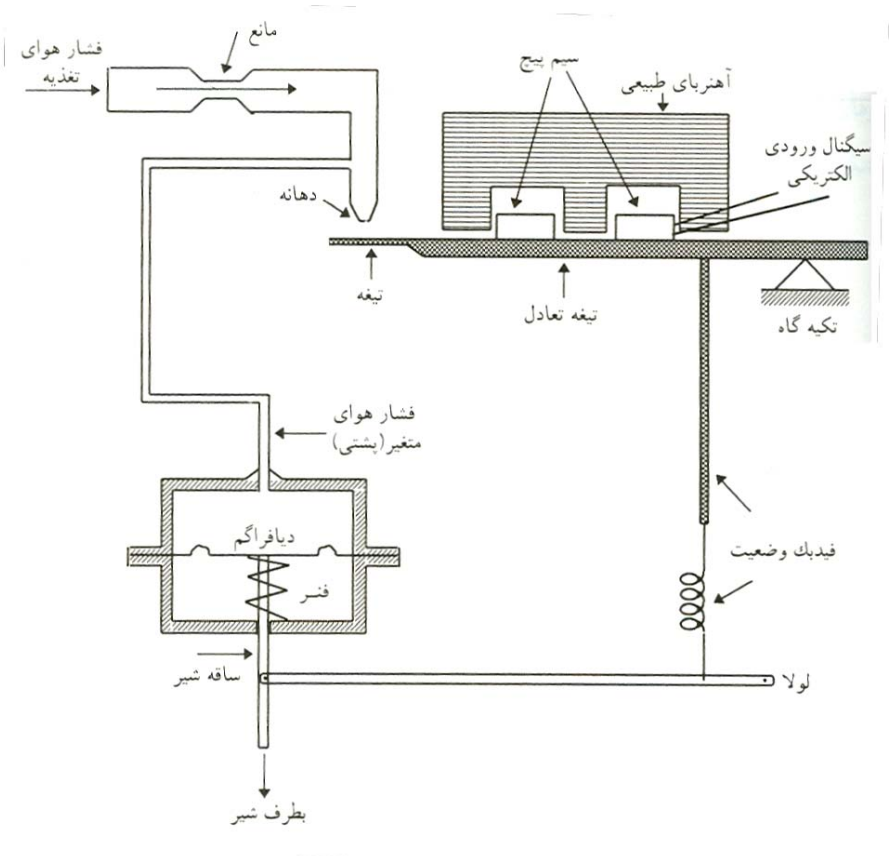
۵-۳ تثبیت کننده شیر (Valve Positioner):

پلاک شیر توسط محرک در وضعیتی که کنترل کننده تعیین می‌کند قرار می‌گیرد. با این وجود ممکن است نویزها و عوامل خارجی دیگری موجب تغییر وضعیت شیر از مقدار مطلوب گردند. یکی از این عوامل نیروهائی هستند که توسط سیال تحت کنترل بر پلاک شیر وارد می‌گردند. این نیروها را نیروهای نامتعادل کننده (Unbalance) می‌گوئیم. نوسانات فشار سیال در اثر ضربه‌های کمپرسور، یا هر منبع دیگر مولد فشار، تغییرات فشار در اثر باز و بسته شدن شیرهای دیگر و ضربه‌های قوچی از جمله عواملی هستند که ممکن است موجب تغییر وضعیت شیر گردند. بعلاوه گاهی تثبیت وضعیت بارهای بزرگ توسط شیرها انجام می‌گردد که این کار نیز نیاز به دقت کافی دارد. در چنین مواردی در مدار محرک از یک پوزیشنر یا تثبیت کننده وضعیت استفاده می‌کنیم و شیرهائی که اینگونه تثبیت وضعیت می‌شوند را شیرهای پوزیشنردار می‌گوئیم. تثبیت کننده وضعیت (Positioner) در واقع یک فیدبک محلی است که در محل اتصال محرک به شیر برقرار می‌گردد. مداری که در شکل ۵-۱۸ ارائه دادیم

در واقع یک محرک پوزیشنردار بود. در اینجا به معرفی چند مدار تثبیت کننده وضعیت که غالباً مورد استفاده قرار می‌گیرند می‌پردازیم:

۵-۳-۱ پوزیشنر الکتروپنوماتیکی:

شکل ۵-۲۱ یک پوزیشنر الکتروپنوماتیکی را نشان می‌دهد. فرمان کنترل کننده بصورت جریان الکتریکی است که موجب ایجاد نیروی مغناطیسی می‌شود. در اثر این نیرو تیغه به سمت بالا حرکت می‌کند و فشار پشتی افزایش می‌یابد. افزایش فشار به دیافراگم اعمال و موجب حرکت آن به سمت پائین می‌گردد و در نتیجه محور محرک به پائین حرکت می‌کند. حرکت محور نیز از طریق ساقه شیر منجر به تغییر وضعیت پلاک شیر می‌گردد. در این شکل حرکت محور از طریق مکانیزم اهرم و فنر بصورت یک فیدبک منفی مجدداً به تیغه اعمال و موجب حرکت آن به سمت پائین و در نتیجه کاهش فشار پشتی می‌گردد و در نهایت شیر در وضعیتی تثبیت می‌شود که نیروی مغناطیسی اعمال شده بر تیغه با نیروی فنری که از طریق فیدبک بر آن اعمال می‌گردد مساوی شود.



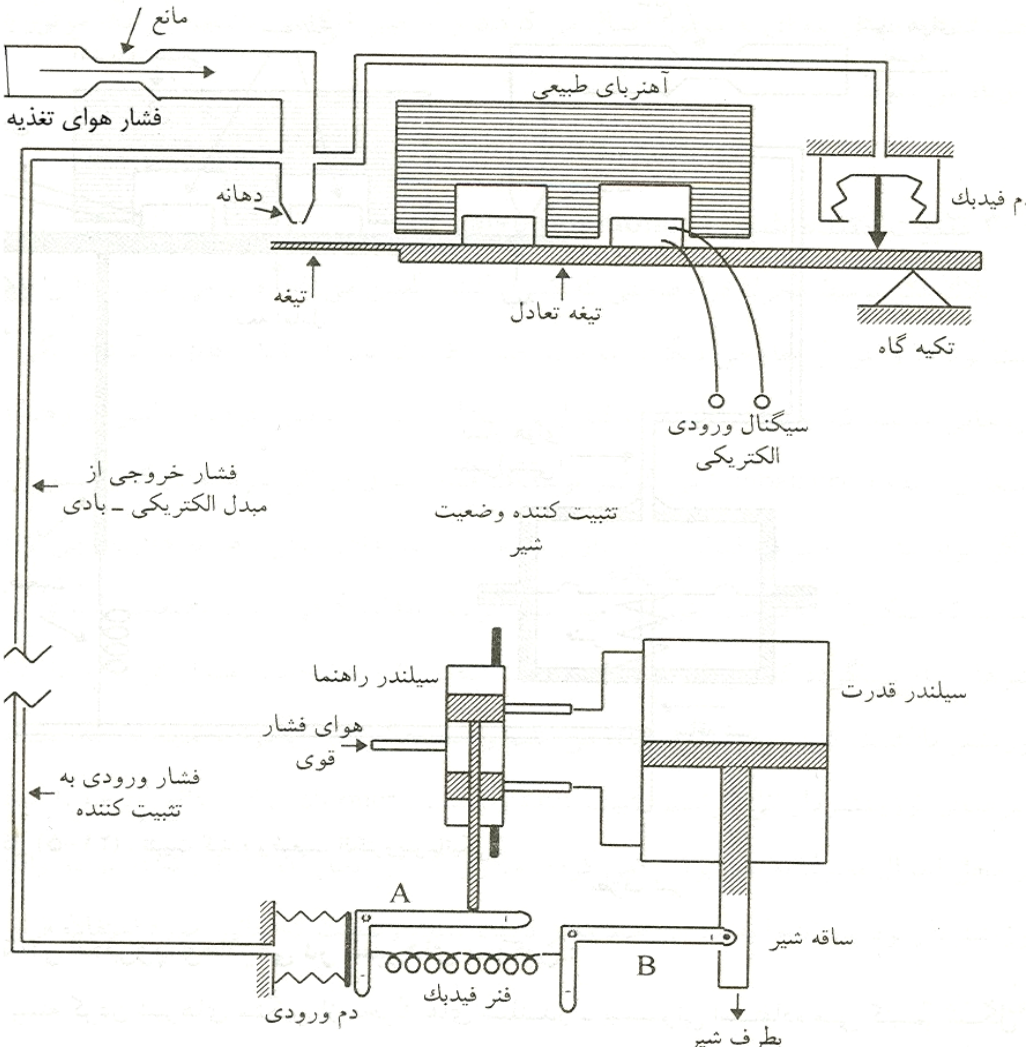
شکل (۵-۲۱). تثبیت کننده وضعیت الکتروپنوماتیکی

۵-۳-۲ پوزیشنر الکتروپنوماتیکی در شیرهای سنگین:

برای باز و بسته کردن شیرهای سنگین از محرک‌های سیلندر- پیستونی استفاده می‌کنیم. شکل (۵-۲۲) یک محرک پنوماتیکی سیلندر پیستونی با پوزیشنر را نشان می‌دهد. این محرک دارای دو فیدبک محلی جهت تثبیت وضعیت می‌باشد و طرز کار آن را بصورت زیر می‌توان بیان نمود:

فرمان کنترل کننده بصورت جریان الکتریکی نیروی مغناطیسی ایجاد می‌کند که باعث بالا رفتن تیغه می‌شود. بالا رفتن تیغه به نوبه خود باعث افزایش فشار پشتی می‌شود. این افزایش فشار در مرحله اول به دم واقع در حلقه فیدبک اعمال شده و باعث حرکت آن به سمت پائین و نهایتاً اعمال نیرو به تیغه می‌گردد و در نتیجه تیغه در وضعیتی تثبیت می‌شود که نیروی مغناطیسی با نیروی دم بالانس گردد.

این قسمت از محرک در واقع بصورت یک مبدل جریان الکتریکی به فشار عمل می‌کند و در طراحی آن سعی بر این است که مشخصه‌ای خطی داشته باشد. فشار ایجاد شده در این مرحله به قسمت بعدی که ممکن است در فاصله‌ای دورتر نسبت به آن قرار داشته باشد ارسال می‌گردد. فشار در آن قسمت باعث انبساط دم و چرخش مکانیزم A به سمت بالا می‌گردد که این خود موجب حرکت پیستون راهنما به بالا و ورود هوای فشار قوی به بالای سیلندر قدرت می‌گردد و در نتیجه پیستون به سمت پائین حرکت کرده محور محرک تغییر وضعیت می‌دهد. از طرف دیگر حرکت پیستون به سمت پائین از طریق مکانیزم B و فنر بصورت فیدبک منفی بر دم اثر کرده و مکانیزم A را وادار به حرکت در خلاف جهت قبل می‌کند و در نهایت پیستون قدرت یا محور شیر در محلی تثبیت می‌گردد که نیروی فیدبک برابر با نیروی فشار هوا در دم گردد.

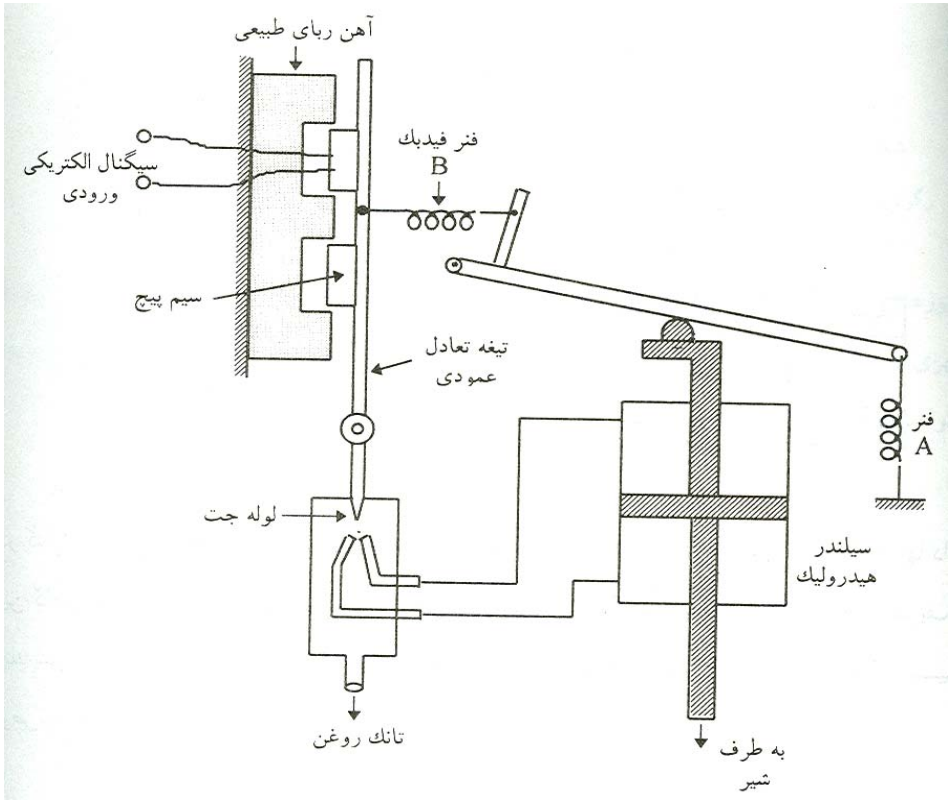


شکل (۵-۲۲). تثبیت کننده وضعیت برای شیرهای سنگین

۵-۳-۳ پوزیشنر الکتروهیدرولیکی:

برای باز و بسته کردن شیرهای بسیار سنگین و یا شیرهایی که به ندرت باز و بسته می‌شوند و احتمال زنگ زدگی یا گیر کردن در آنها وجود دارد و یا زمانی که جهت تثبیت وضعیت یک شیر به اعمال نیروهای بزرگی نیاز باشد از محرک‌های پوزیشنردار الکتروهیدرولیکی استفاده می‌کنیم.

در شکل ۵-۲۳ نمای کلی یک محرک الکتروهیدرولیکی پوزیشنردار نشان داده شده است:

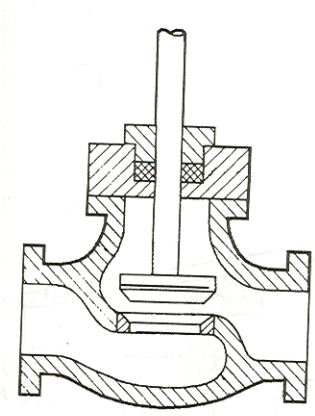


شکل (۵-۲۳). تثبیت کننده وضعیت الکتروهیدرولیکی

در اینجا جریان الکتریکی ارسالی از کنترل کننده باعث اعمال نیروئی متناسب با آن بر تیغه عمودی می‌گردد. حرکت تیغه حول مفصل آن باعث افزایش فشار هیدرولیکی ناشی از لوله جت (Jet-Pipe) در بالای سیلندر نسبت به پائین آن می‌گردد و این امر موجب حرکت پیستون و محور متصل به آن به سمت پائین می‌گردد. حرکت پیستون به سمت پائین باعث فشرده شدن فنر A و کشش فنر B می‌گردد. نیروی کشش در فنر B بعنوان فیدبک منفی بر تیغه عمودی اثر کرده و نهایتاً وضعیت شیر بگونه‌ای تثبیت می‌گردد که نیروی مغناطیسی ناشی از جریان ورودی با نیروی کشش فنر B بالانس گردد. در این صورت تیغه مجدداً در وضعیت عمودی قرار گرفته و فشار در دو طرف پیستون برابر می‌گردد.

۵-۴ شیرهای مخصوص:

شیرها یکی از انواع عناصر نهائی می‌باشند که برای کنترل یا قطع و وصل جریان سیال بکار می‌روند. در حالت کلی عنصری که بعنوان شیر (Valve) می‌شناسیم ساختمانی مطابق شکل ٥-٢٤ دارد.

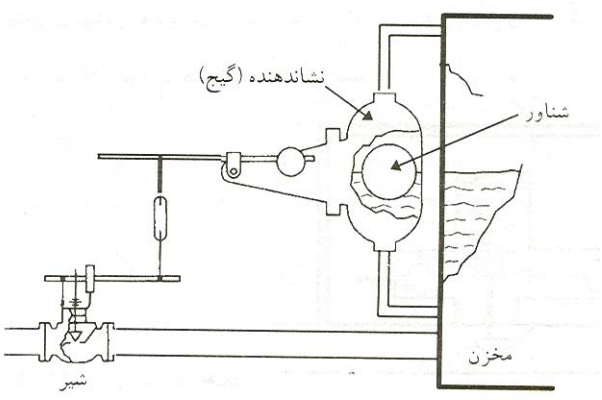


شکل (۵-۲۴). شکل عادی شیر مرسوم به شیر گلوب

در کنترل صنعتی عناصری وجود دارند که ظاهری شبیه به شیرها، اما عملکردی متفاوت با آنها دارند. همچنین گاهی در نام یک عنصر از کلمه شیر استفاده می‌شود در حالیکه عملکرد آن با عملکرد تعریف شده برای یک شیر متفاوت است. در این بخش برای آشنایی با این دسته از عناصر آنها را تحت عنوان شیرهای مخصوص معرفی می‌نمائیم.

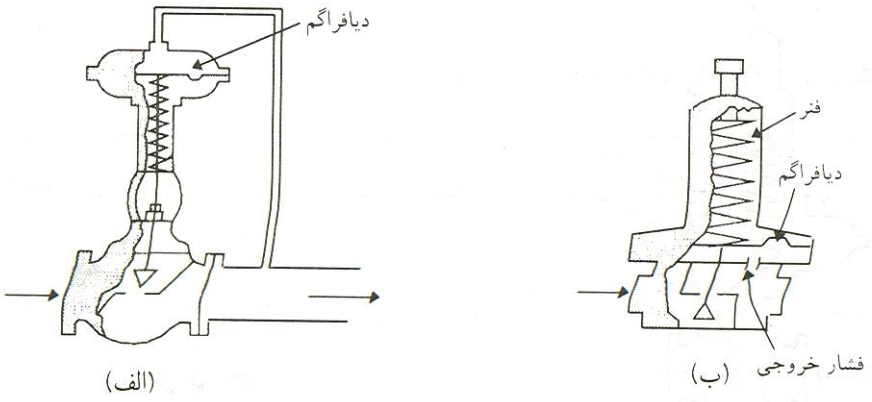
۵-٤-۱ رگولاتورها (Regulators):

رگولاتور عنصری است که کلیه عملیات لازم برای کنترل یک کمیت را به تنهایی انجام می‌دهد و انرژی لازم برای اینکار را از کمیت مورد نظر تأمین می‌نماید. از رگولاتورها هنگامی استفاده می‌کنیم که کمیت تحت کنترل تغییرات زیادی ندارد و همچنین دقت زیادی در تنظیم آن مورد نظر نمی باشد و بعلاوه مقدار مطلوب نیز یکبار تنظیم و به ندرت تغییر می‌یابد. در صنعت رگولاتورهای فشار، فلو، دما و ارتفاع سیال متداول می‌باشند. شیر شناور در کولر آبی یک رگولاتور ارتفاع سیال می‌باشد، در شکل ۵-۲۵ نمای کلی یک رگولاتور ارتفاع سیال آمده است.



شکل (۵-۲۵). رگولاتور ارتفاع سیال

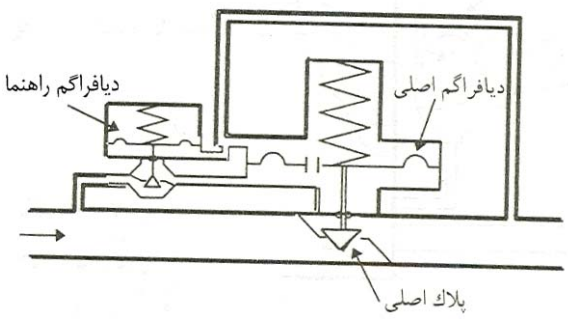
رگولاتورهای فشار در خطوط انتقال و توزیع گاز کاربرد فراوان دارند و حضور آنها را در مدخل ورودی گاز شهری به خانه‌ها بسیار می‌بینیم. شکل ۵-۲۶ ساختمان کلی یک رگولاتور فشار را نشان می‌دهد. این رگولاتور از طریق تنظیم فلو، فشار مصرف کننده را ثابت نگه می‌دارد.



شکل (۵-۲۶). چند نوع رگولاتور فشار

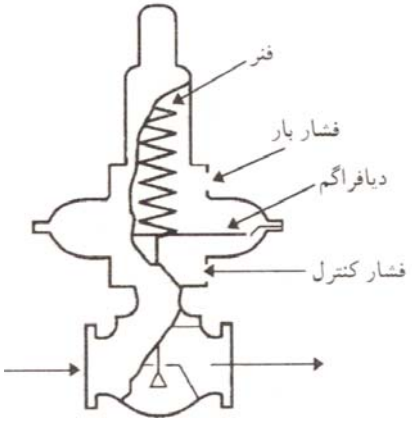
برای بررسی عملکرد این رگولاتورها شکل ۵-۲۶- الف را در نظر بگیرید و فرض کنید در یک لحظه از زمان مصرف بالا رود در این حالت اتفاقات زیر به وقوع می‌پیوندند:

فشار سمت راست شیر شروع به کاهش می‌نماید و به دنبال آن فشاری که از بالا به دیافراگم اعمال می‌شود کم می‌گردد بنابراین در اثر نیروی فنر ساقه و پلاک شیر به طرف بالا حرکت می‌کنند و شیر بازتر می‌شود و دبی درخواستی را تأمین نموده، ازافت فشار در طرف مصرف کننده جلوگیری می‌نماید. رگولاتور شکل ۵-۲۶- ب نیز دارای عملکردی مشابه است و در فشار و دبی کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در هر دو نمونه با تنظیم فنر فشار مورد نیاز تنظیم می‌شود. توجه نمائید که فشار تنظیم شده همواره کمتر از فشار تغذیه می‌باشد. شکل ۵-۲۷ نوع دیگری از رگولاتورهای فشار را که به رگولاتور با راهنما (Pilot) معروف هستند نشان می‌دهد:



شکل (۵-۲۷). رگولاتور با راهنما

رگولاتورهای با راهنما دقت بیشتری نسبت به انواع معمولی دارند. گاهی قسمت راهنما را دورتر از قسمت اصلی نصب می‌کنند و بدین ترتیب امکان تنظیم رگولاتور از فاصله دور فراهم می‌شود. شکل ٥-٢٨ نوع دیگری از رگولاتور موسوم به رگولاتور فشار تفاضلی را نشان می‌دهد:

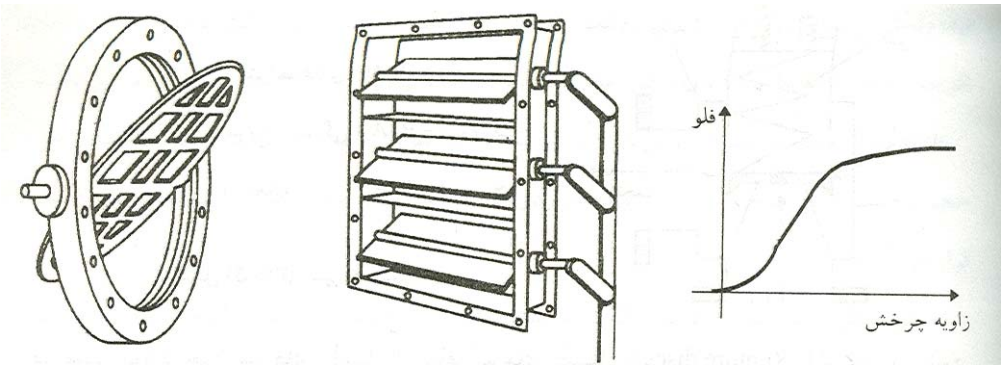


شکل (٥-٢٨). رگولاتور فشار تفاضلی

در اینجا دبی عبوری از شیر بر اساس اختلاف فشار P_1 و P_2 که می‌توانند سیگنال هائی با مفهوم خاص باشند تنظیم می‌شود.

٥-٤-٢ دمپرها (Dampers):

برای کنترل و هدایت جریان‌های بزرگ سیال تحت فشار پائین از دمپرها استفاده می‌کنیم. در چنین مواردی معمولاً به دقت زیاد در تنظیم احتیاج نمی باشد. دمپرها برای تنظیم جریان ذرّات جامد نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. ابعاد دمپرها بزرگتر از شیرهای کنترل می‌باشد. شکل ٥-٢٩ چند نمونه دمپر را نشان می‌دهد:



شکل (٥-٣١). چند نوع دمپر

ساخت دمپرهائی با مشخصه خطی بازشدگی- جریان موضوع مورد علاقه سازندگان می‌باشد. همچنین دمپرهائی با پروفیل جریان مخصوص برای کاربردهائی خاص ساخته می‌شوند. از دمپرها در سیستم‌های تهویه مطبوع، سیستم‌های کنترل جریان هوا در کوره ها، تنظیم ظرفیت فن‌ها و کمپرسورها استفاده فراوان می‌شود.

۵-٤-۳ شیرهای اطمینان (Safety-Valves):

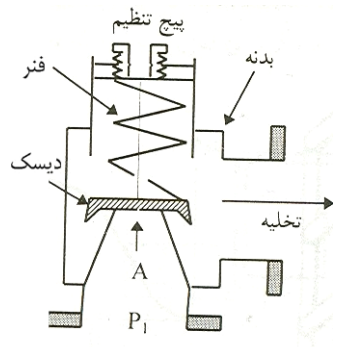
طبق مقررات ایمنی سیستم هائی که احتمال تولید فشارهای بالا و خطرناک در آنها وجود دارد می‌باید به شیرهای اطمینان مجهز باشند زیرا افزایش فشار می‌تواند خطراتی برای افراد و یا تجهیزات ایجاد نماید. مثلاً یک سیستم هوای فشرده هر چند اغلب دارای سیستم‌های کنترل فشار می‌باشد اما این احتمال وجود دارد که در یک زمان همه سیستم‌های کنترل از کار افتاده و فشار تا حد خطرناکی افزایش یابد.

شیر اطمینان مادامی که فشار کمتر از حد تنظیم شده باشد بسته می‌ماند و به محض رسیدن آن به مقدار تنظیم سریعاً باز و فشار را تخلیه می‌نماید. شکل ۵-۳۰ ساختمان کلی یک شیر اطمینان را نشان می‌دهد. در این شکل مادامی که فشار تحت کنترل کمتر از فشار فنر باشد، نیروی فنر قادر به بسته نگه داشتن شیر است اما در صورت افزایش فشار نیروی فنر برای اینکار کفایت نکرده و شیر باز می‌شود. طراحی شیرهای اطمینان بگونه‌ای است که عمل بازشدگی به سرعت صورت می‌پذیرد. شیرهای اطمینان را گاهی شیرهای تخلیه اطمینان (Safety-Relief-Valve) و یا شیرهای تخلیه فشار (Pressure-Relief-Valve) نیز می‌نامند.

شرایط عادی P_1A > نیروی فنر

شروع بازشدگی P_1A = نیروی فنر

تخلیه P_1A < نیروی فنر

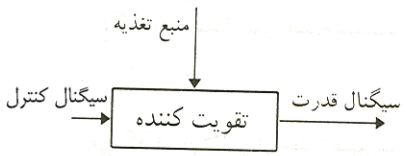


شکل (۵-۳۰). شیر اطمینان

در بعضی موارد بجای شیرهای اطمینان از دیافراگم‌های اطمینان (Rupture Discs) استفاده می‌شود. در این روش روزنه هائی را در محل‌های مورد نظر ایجاد نموده و با دیافراگم هائی که قدرت تحمل کشش در آنها محاسبه شده است مسدود می‌سازند. در صورت افزایش فشار دیافراگم پاره شده و فشار را تخلیه می‌نماید.

۵-۵ تقویت کننده ها:

سیگنال خروجی از کنترل کننده از سیگنال فرمان یا سیگنال کنترل می‌گوئیم. انرژی این سیگنال معمولاً در آن حد نیست که بتواند محرک یا عنصر نهائی را به حرکت در آورد، بنابراین قبل از ارسال به محرک در واحد تقویت کننده، تقویت می‌شود. یک تقویت کننده را در حالت کلی می‌توان مطابق شکل ۵-۳۱ نمایش داد.

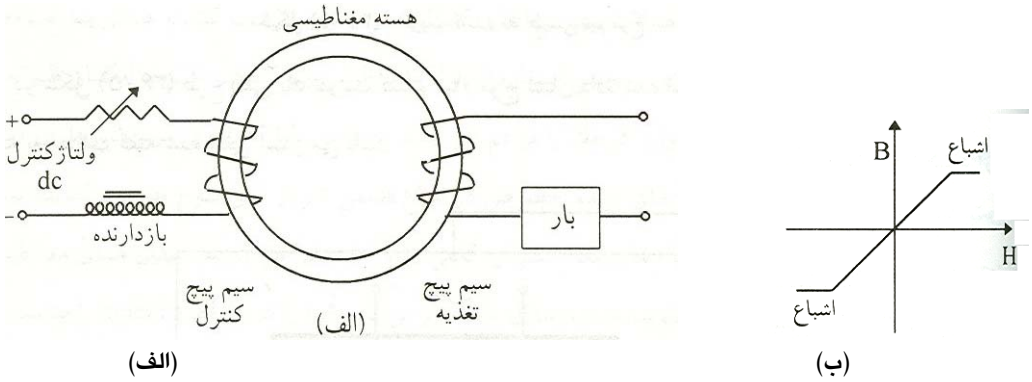


شکل (۵-۳۱) نمایش یک تقویت کننده در حالت کلی

در یک تقویت کننده، انرژی لازم برای تقویت سیگنال کنترل از منبع تغذیه تأمین می‌گردد، مثلاً در یک تقویت کننده دهانه – تیغه مطابق شکل (٤-۲۰)، سیگنال کنترل جابجائی x می‌باشد که تبدیل به تغییرات قوی فشار خروجی (P_o) می‌گردد. بدیهی است که فشار خروجی بوسیله فشار تغذیه (P_s) تأمین می‌شود. نوع تقویت کننده بستگی به نوع سیستم کنترلی دارد که در آن مورد استفاده قرار گرفته است، مثلاً در یک سیستم پنوماتیکی طبیعتاً از تقویت کننده پنوماتیکی استفاده می‌شود و در یک سیستم هیدرولیکی از تقویت کننده‌های هیدرولیکی استفاده می‌کنیم. در فصل کنترل کننده‌ها با چند نمونه تقویت کننده پنوماتیکی و هیدرولیکی آشنا شدیم، و این آشنایی نیاز ما را در این حد برآورده می‌سازد.

امروزه با توجه به پیشرفت‌های فن‌آوری نیمه هادی تقویت کننده‌های الکترونیکی با کیفیت خوب و حجم و قیمت پائین ساخته می‌شوند و در مواردی که محدودیت خاصی وجود نداشته باشد مورد استفاده قرار می‌گیرند.

یکی دیگر از تقویت کننده هائی که در سیستم‌های کنترل صنعتی زیاد مورد استفاده واقع می‌شوند، تقویت کننده‌های مغناطیسی (Magnetic Amplifiers) می‌باشند که از مزایای مهم آنها می‌توان به سادگی، ارزانی و استحکام مکانیکی اشاره نمود. شکل (۵-۳۲- الف) طرح کلی یک تقویت کننده مغناطیسی را نشان می‌دهد:

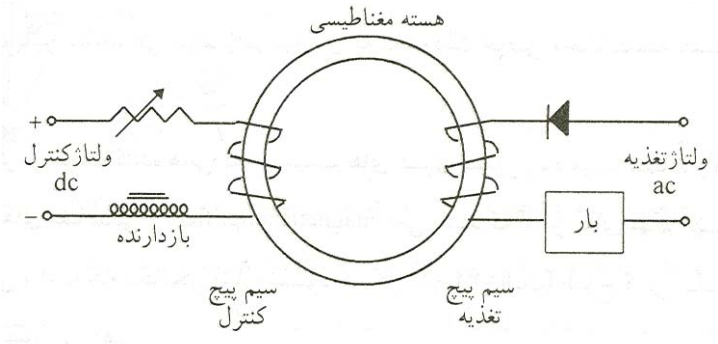


شکل (۵-۳۲). طرح کلی تقویت کننده مغناطیسی

سیم پیچ تغذیه در فرکانس کاری خود دارای امپدانس است که جریان بار را محدود می‌سازد. منحنی مغناطیسی هسته (Magnetization Carve) نیز مطابق شکل (۵-۳۲- ب) می‌باشد، حال اگر بوسیله ولتاژ کنترل نقطه کار هسته مغناطیسی را در نزدیکی محل اشباع شدگی بایاس کنیم ضریب خودالقائی سیم‌پیچ تغذیه و در نتیجه امپدانس آن کاهش می‌یابد. ($L = \frac{d\varphi}{di}$) و بنابراین جریان باز افزایش می‌یابد، با این استدلال جریان ارسالی به بار در یک ولتاژ تغذیه مشخص با تنظیم ولتاژ (جریان) کنترل تنظیم می‌شود.

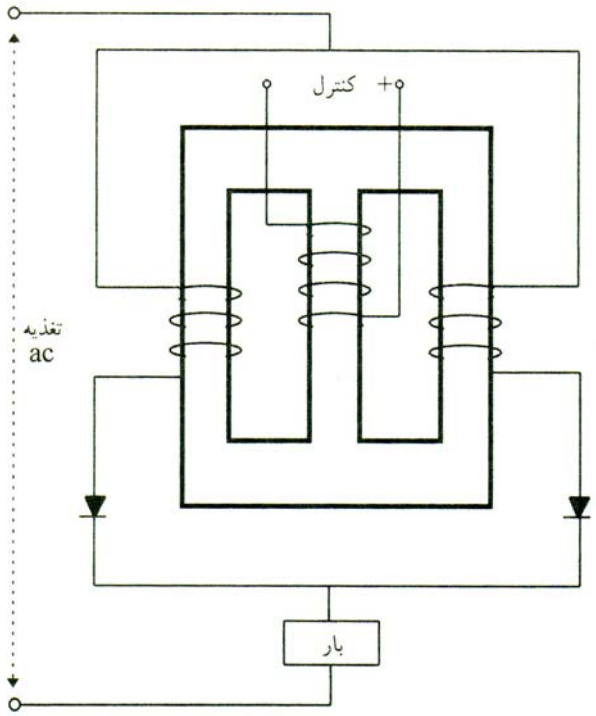
سیم‌پیچ کنترل را معمولاً با تعداد دور زیاد در نظر می‌گیرند تا بتوان با جریان‌های کنترلی کوچک آمپر دور بیشتری تولید نمود برای جلوگیری از فرستادن (القاء) جریان از سیم‌پیچ تغذیه به سیم‌پیچ کنترل (در اثر خاصیت ترانسفورماتوری) یک سلف بازدارنده با مدار کنترل سری می‌کنند.

در نیم سیکلی که جریان بار در جهت کاهش اشباع شوندگی هسته عمل می‌کند، در کار و مشخصات تقویت کننده اخلال ایجاد می‌شود، برای جلوگیری از این امر می‌توان یک دیود یکسوساز مطابق شکل ۵-۳۳ با سیم‌پیچ تغذیه سری نمود. این امر موجب می‌گردد تا تقویت کننده شکل ۵-۳۲ به یک تقویت کننده نیم موج تبدیل شود.



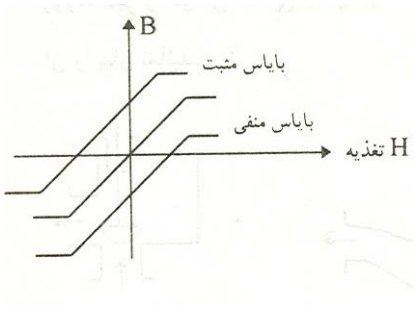
شکل (۵-۳۳). تقویت کننده مغناطیسی نیم موج

در شکل ٥-٣٤ طرح کلی یک تقویت کننده تمام موج نشان داده شده است که بیـان عملکـرد آن با توجه به مطالب گفته شده قبلی آسان می‌باشد.



شکل (٥-٣٤).تقویت کننده مغناطیسی تمام موج

در طرح‌های عملی حداقل از دو سیم‌پـیچ کنتـرل اسـتفاده مـی‌شـود. در ایـن حالـت یکـی از سیم‌پیچ‌ها برای تأمین بایاس تقویت کننده بکـار مـی‌رود و دیگـری بـه سـیگنال کنتـرل متصـل می‌شود، شکل ٥-٣٥ مشخصه مغناطیسی یک تقویت کننده را به ازای چند مقدار بایـاس نشـان می‌دهد:



شکل (٥-٣٥) مشخصه مغناطیسی تقویت کننده به ازای مقادیر مختلف بایاس

با انتخاب تعداد و چگونگی اتصالات سیم‌پیچ‌هـای کنتـرل مـی‌تـوان تقویـت کننـده هـائی بـا خواص مشخصات جالب توجه ساخت، همچنین استفاده از مـواد مغناطیسـی بـا کیفیـت خـوب

امکان طراحی تقویت کننده هائی با حجم و وزن کوچک را فراهم می‌نماید، به همین دلیل عـلاوه بر سیستم‌های کنترل صنعتی در کشتی‌ها و سیستم‌های پرنده بخصوص در انواع قدیمی تر از این نوع تقویت کننده بسیار استفاده شده است. تقویت کننده‌های مغناطیسی را گاهی Amplistat نیز می‌گویند. میدان‌های مغناطیسـی خـارجی ممکـن اسـت در کـار تقویـت کننـده اخـلال کننـد بنابراین باید آنها را در حفاظ (Shield) مناسب قرار داد.

عیب اساسی تقویت کننده‌های مغناطیسی وجود تأخیر قابل توجه در آنها می‌باشد که ممکن است موجب ناپایداری حلقه کنترل گردد.

فصل ۶

طرح تجهیزاتی سیستم‌های کنترل صنعتی

در فصول گذشته با تعدادی از اجزاء و قطعات در کنترل صنعتی آشنا شدیم و چهارچوب کلی یک حلقه کنترل صنعتی را مطابق شکل (۱-۸) ارائه نمودیم. همچنین ضمن معرفی اجزاء بعضی از اصولی را که در طراحی سیستم‌های کنترل صنعتی مفید می‌باشند بیان نموده مورد بررسی قرار دادیم. در این فصل دانش‌های بدست آمده را مورد استفاده قرار می‌دهیم و چگونگی طرح و پیاده‌سازی یک حلقه کنترل را می‌آموزیم. ابتدا صورت مسئله‌ای که با آن روبرو هستیم را بیان می‌داریم:

" پروسه شناخته شده‌ای در دست است و می‌خواهیم رفتار معینی از آن را تحت کنترل در آوریم. عملکرد مطلوب حلقه کنترل برای ما مشخص بوده و قادریم کنترل کننده و سایر اجزاء را بر اساس عملکرد مطلوب تنظیم نمائیم. تحت این شرایط طرح را چگونه ارائه و به موقع اجراء بگذاریم؟ "

ارائه و اجراء طرحی با شرایط فوق شامل مراحل زیر است:

۱- پیاده کردن طرح بر روی کاغذ.

۲- انجام محاسبات و بررسی‌های تئوری در مورد عملکرد درست حلقه کنترل و احتمالاً انجام تصحیحات لازم بر روی طرح اولیه.

۳- سفارش خرید اجزاء و قطعات مورد نیاز با رعایت مسائل اقتصادی و سایر مشخصات مورد نظر.

٤- تصحیح مجدد طرح در صورت موجود نبودن بعضی از قطعات در بازار و جایگزینی با قطعات موجود.

٥- نصب و راه‌اندازی و آزمایش اجزاء و قطعات.

٦- راه‌اندازی سرد حلقه کنترل و انجام تنظیمات اولیه.

۷- راه‌اندازی گرم حلقه کنترل با رعایت موارد ایمنی و انجام تنظیمات نهائی.

۸- استفاده آزمایشی از حلقه کنترل و رفع نواقص و اشکالات احتمالی.

۹- تهیه نقشه اجراء شده طرح و ثبت مشخصات نهائی اجزاء در چندین نسخه و تحویل آن به بایگانی فنی جهت مراجعات بعدی.

۶-۱ استاندارد ISA

هر نقشه مهندسی علائم و قراردادهای مخصوص به خود را دارد بگونه‌ای که برای همه متخصصین آن رشته مشخص و قابل فهم است. امروزه در تهیه طرح‌های کنترل صنعتی از قراردادهای استاندارد و بین‌المللی استفاده می‌کنیم. استانداردهای موجود در این زمینه کم و بیش شبیه به یکدیگر هستند و با یادگیری یکی می‌توان استانداردهای دیگر را نیز درک نمود.

در این کتاب از استاندارد ISA استفاده می‌کنیم. در این روش هر عنصر با حروفی که داخل یک دایره قرار دارند نشان داده می‌شود و این حروف نمایانگر نوع و عملکرد آن عنصر می‌باشند.

مثال: S.P↓

عنصر (TC) یعنی یک کنترل کننده دما. دقت نمائید که در این مثال حرف T به معنی دما (Temperature) و حرف C به معنی کنترل کننده (Controller) است.

معانی حروف بکار برده شده در استاندارد ISA به زبان فارسی مطابق جدول (۶-۱) می‌باشد. در ستون اول جدول، حروف الفبای لاتین که مورد استفاده قرار می‌گیرند نوشته شده و در ستون دوم معنی این حروف وقتی که بعنوان حرف اول بکار روند آمده است. در این ستون همچنین معانی دیگری که برای بعضی از حروف ممکن است در نظر گرفته شوند، نوشته شده است. برای مثال حرف S بعنوان حرف اول معمولاً بمعنی سرعت (Speed) است. اما ممکن است در بعضی مواقع به معنی ایمنی (Safety) نیز باشد. با توجه به شرحی که برای حروف بعنوان حرف اول آمده است در می‌یابیم که در استاندارد ISA، حرف اول مبین کمیتی است که آن عنصر با آن سروکار دارد. در ستون دوم جدول شرح معنی حروف وقتی بعنوان حرف دوم و یا حرف بعدی بکار روند آمده است. مثلاً اگر حرف T، جز در محل حرف اول قرار گیرد به معنی انتقال دهنده (Transmitter) می‌باشد. در استاندارد ISA حرف دوم و بعد از آن مبین عملی هستند که عنصر انجام می‌دهد.

برای اجتناب از هر گونه اشتباه در معادل سازی اصطلاحات و افزایش دقت در نقشه‌خوانی طرح‌های تجهیزاتی سیستم‌های کنترل صنعتی، در ضمیمه یک جدول (۶-۱) به زبان لاتین، آنطور که در متون فنی مورد استفاده قرار می‌گیرد، آمده است.

جدول (۶-۱). معانی حروف در استاندارد ISA					
	معنی به عنوان حرف اول		معنی بعنوان حرف بعدی		
	کمیت	موارد دیگر	عمل	عمل	موارد دیگر
A	آنالیز	–	هشدار	–	–
B	شعله مشعل	–	اختیاری	اختیاری	اختیاری
C	هدایت الکتریکی	–	–	کنترل	–
D	چگالی یا وزن مخصوص	تفاضلی	–	–	–
E	ولتاژ	–	عنصر ابتدائی	–	–
F	اندازه جریان (فلو)	نسبت	–	–	–
G	نشان دهنده (گیج)	–	شیشه‌ای	–	–
H	دستی	–	–	–	زیاد
I	جریان (الکتریکی)	–	نشان دادن	–	–
J	توان	اسکن	–	–	–
K	زمان یا برنامه زمانی	–	–	مرکز کنترل	–
L	سطح (مایع)	–	چراغ (پایلوت)	–	کم
M	رطوبت	–	–	–	میان – مابین
N	اختیاری	–	اختیاری	اختیاری	اختیاری
O	اختیاری	–	اورفیس (مایع)	–	–
P	فشار	–	نقطه تست	–	–
Q	مقدار	مجموع	–	–	–
R	رادیواکتیویته	–	ثبت (چاپ)	–	–
S	سرعت (فرکانس)	ایمنی	–	کلید (سوئیچ)	–
T	دما	–	–	انتقال	–
U	چند متغیره	–	چندکاره	چند کاره	چند کاره
V	ویسکوزیته	–	–	شیر (دمپری)	–
W	وزن یا نیرو	–	صحیح	–	–
X	مجهول	–	مجهول	مجهول	مجهول
Y	اختیاری	–	–	محاسبه	–
Z	وضعیت	–	–	حرکت محرک (عنصر نهایی)	–

مثال:

عنصر (LRC) در استاندارد ISA به چه معنی است؟

حرف اول این عنصر L می‌باشد که مطابق جدول به معنی کمیت سطح (سطح سیال) است. حرف دوم R است که مطابق جدول اگر حرف اول باشد به معنی کمیت رادیواکتیویته است. اما در این عنصر R، بعنوان حرف دوم بکار رفته است پس به معنی عمل ثبت (Record) می‌باشد. حرف سوم C است که مطابق جدول اگر حرف اول باشد به معنی کمیت هدایت الکتریکی

(Conductivity) است که در این عنصر بعنوان حرف سوم بکار رفته و به معنی عمل کنترل کنندگی یا همان کنترلر است. پس عنصر فوق یک ثبات و کنترل کننده سطح سیال می‌باشد.

کنترل یک پروسه ممکن است شامل کنترل کمیت‌های زیادی باشد و یا در یک محیط صنعتی حلقه‌های کنترل زیادی داشته باشیم. در این حالت برای جلوگیری از اشتباه معمولاً حلقه‌های کنترل را شماره‌گذاری می‌کنیم و در داخل دایره شماره حلقه‌ای را که عنصر متعلق به آن است می‌نویسیم.

مثال:

عنصر (TR 4) در استاندارد ISA به چه معنی است؟

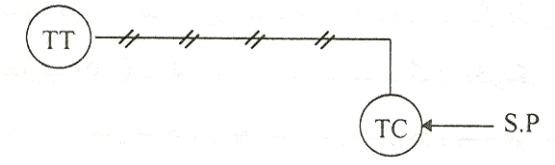
با استفاده از جدول، عنصر مذکور یک ثبات درجه حرارت و متعلق به حلقه کنترل شماره ٤ می‌باشد. نحوه ارتباط عناصر مختلف در یک حلقه کنترل با علائم و استانداردهای ویژه‌ای مشخص می‌گردند. در جدول (٦-٢) قراردادهای ISA در این زمینه آمده است:

ارتباط الکتریکی	
ارتباط توسط لوله موئی	
ارتباط هیدرولیکی	
ارتباط پنوماتیکی	
ارتباط بدون سیم (رادیوئی)	
ارتباط مکانیکی یا صرفاً ارتباط	

مثال:

در یک حلقه کنترل دما، ترانسمیتر دما از طریق خطوط هوای فشرده، دمای اندازه‌گیری شده را به سمت کنترل کننده ارسال می‌دارد. این دو عنصر و طریقه اتصال آنها را با استاندارد ISA نشان دهید.

با استفاده از جداول (٦-١) و (٦-٢) و مطالب گفته شده طرح خواسته شده مطابق شکل (٦-١) می‌باشد.

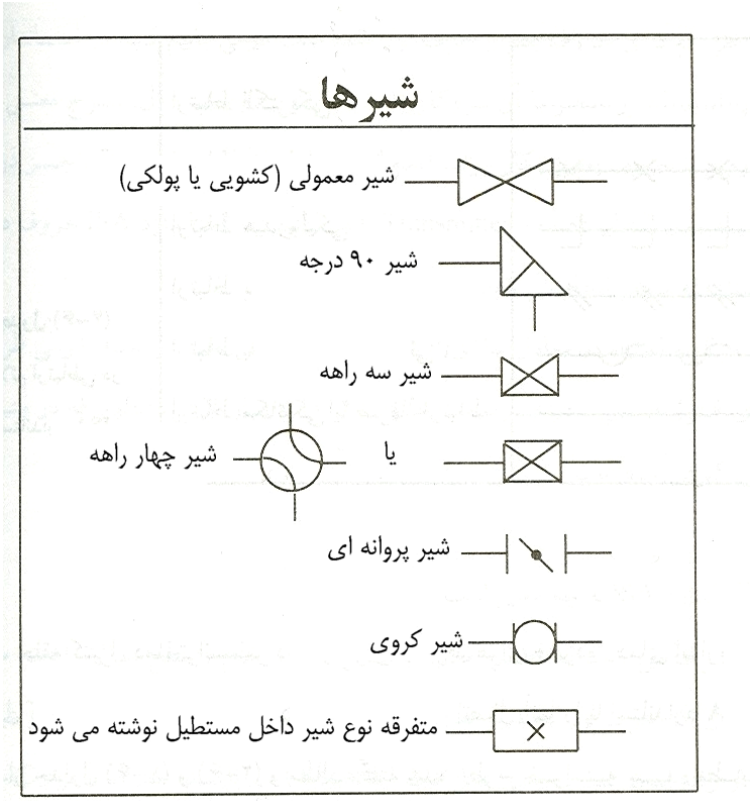


شکل (٦-١) طرح تجهیزاتی مثال فوق

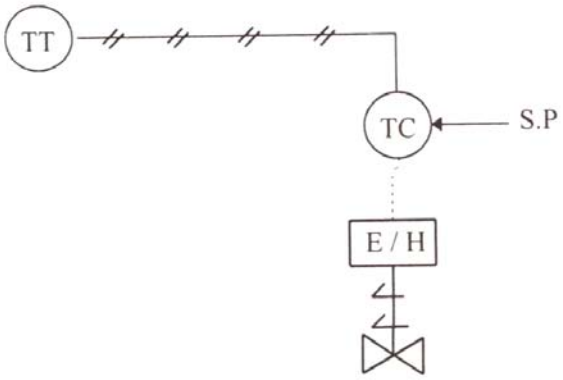
توجه نمائید که در شکل (٦-١) نمایش S.P← به معنی تنظیم مقدار مطلوب (Set-Point) بر روی کنترل کننده می‌باشد.

عناصر نهائی و محرک‌ها نیز در استاندارد ISA مطابق جدول (٦-٣) نمایش داده می‌شوند:

جدول (۶-۳) علائم شیرها در استاندارد ISA



مثال: در مثال قبل کنترل کننده بعد از دریافت سیگنال دمای اندازه‌گیری شده و مقایسه آن با مقدار مطلوب (S.P) فرمان لازم را بصورت یک سیگنال الکتریکی به سمت محرک هیدرولیکی ارسال می‌دارد و محرک نیز شیر سوخت را به مقدار مورد نیاز باز و بسته می‌کند. طرح لازم را ارائه نمائید.



شکل (۶-۲). طرح تجهیزاتی مثال فوق

قسمتی از طرح را در مثال قبل ارائه داده‌ایم. در اینجا باید اتصال کنترل کننده بـه محـرک و عنصر نهائی را بشکل خواسته شده اضافه نمائیم. طرح مورد نظر در شکل (٦-٢) آمده است.

گاهی اوقات در حلقه‌های کنترل به عملیات ویژه‌ای نظیر ضرب، تقسیم و یـا تـوابعی خـاص نیاز داریم. قراردادهای ISA در این مورد مطابق جدول (٦-٤) می‌باشد.

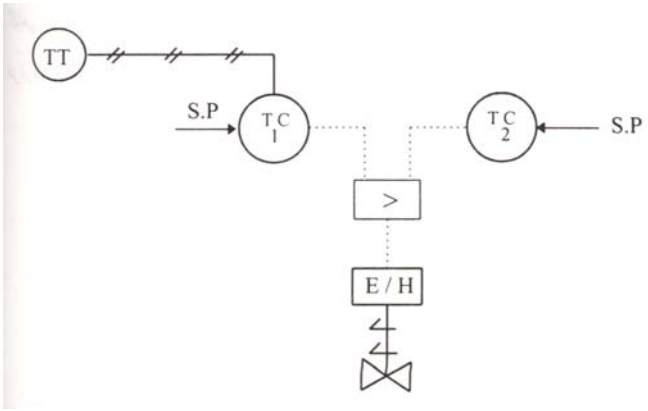
جدول (۶-۴) پاره‌ای از علائم در استاندارد ISA

انتخاب بزرگتر	>	جمع	ADD یا $\sum$
انتخاب کوچکتر	<	تفریق	DIFF یا Δ
معکوس	REV	میانگین	AVG
بیان جنس ورودی/خروجی	P/I یا E/P	ضرب	×
بشرح زیر:		تقسیم	÷
ولتاژ	E	جذر	SQRT یا $\sqrt{}$
هیدرولیک	H	توان	x^n یا $x^{\frac{1}{n}}$
جریان	I	تابع ساز	f (x)
پنوماتیک	P	بافر (تقویت)	1:1
الکترومغناطیس یاسونیک	O		
آنالوگ/دیجیتال	A/D		
دیجیتال/آنالوگ	D/A		
انتگرال	$\int$		
مشتق	D یا $\frac{d}{dt}$		

مثال:

در مدار مثال قبل می‌خواهیم از طریق دو کنترل کننده دما که آنها را به ترتیب بـا شـماره ۱ و ۲ مشخص می‌کنیم به عنصر نهائی فرمان دهیم، کنترل کننده ۱ همان کنترل کننده مـدار قبـل است و کنترل کننده شماره ۲، کنترل کننده‌ای است که از محلی فرمان می‌گیرد. در این شـرایط می‌خواهیم عنصر نهائی همواره پیرو دستورات کنترل کننده‌ای باشد که اندازه فرمان بزرگتری را ارسال می‌دارد.

با توجه به خواسته هاس مسئله می‌بایستی کنترل کننده شماره ۲، و یک مدار انتخاب کننـده بزرگتر را به مدار قبلی اضافه نمائیم. طرح حاصل مطابق شکل (٦-٣) است.



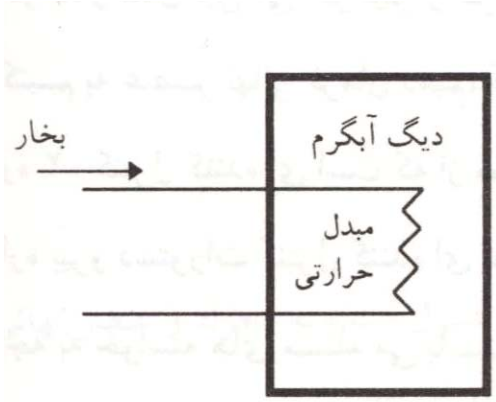
شکل (۶-۳). طرح تجهیزاتی مثال صفحه پیش

۶-۲ طرح‌های ویژه در کنترل فرآیندهای صنعتی:

چهارچوب اصلی در طراحی یک حلقه کنترل صنعتی همان شکل (۱-۸) می‌باشد. با این وجود در بسیاری از موارد، ایجاد تغییرات در چهارچوب یاد شده موجب بهبود امر کنترل می‌گردد. این طرح‌ها را طرح‌های ویژه یا طرح‌های بهبود یافته (Improved) در کنترل صنعتی می‌گوئیم. از آنجائیکه این فصل را به طراحی حلقه‌های کنترل صنعتی اختصاص داده‌ایم و طرح‌های بهبود یافته عملاً در صنعت کاربرد فراوانی دارند، بنابراین آشنائی مهندسین کنترل با آنها امری لازم است و در این بخش به تشریح تعدادی از این طرح‌ها می‌پردازیم:

٦-٢-١ کنترل سری (Cascade):

یک پروسه را گاهی می‌توان به دو یاچند قسمت متمایز با سرعت پاسخ‌دهی متفاوت تقسیم نمود. بعنوان مثال پروسه زیر را در نظر بگیرید:



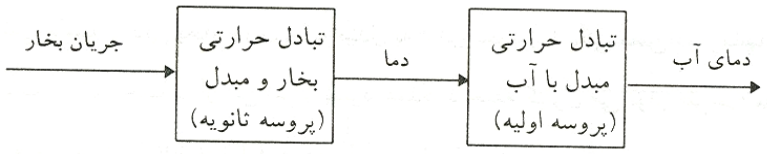
شکل (۶-۴). طرح کلی دیگ آب گرم

این پروسه یک دیگ آب گرم است که توسط مبدل حرارتی بخاری (Steam heat-exchanger) گرم می‌شود:

در اینجا ابتدا بخار به داخل مبدل حرارتی جریان یافته، با دیواره مبدل، تبادل حرارت می‌نماید و سپس دیواره مبدل با آب داخل مخزن به تبادل حرارتی می‌پردازد. بدیهی است که تبادل حرارتی بخار با دیواره بدلیل سرعت جریان آن و کم بودن مقاومت حرارتی و بالا بودن دمای بخار، به سرعت انجام می‌پذیرد.

در مقابل تبادل حرارتی دیواره مبدل با آب مخزن به دلیل زیاد بودن اینرسی حرارتی آب و همچنین زیاد بودن مقاومت حرارتی سطح تماس بسیار آهسته‌تر انجام می‌شود.

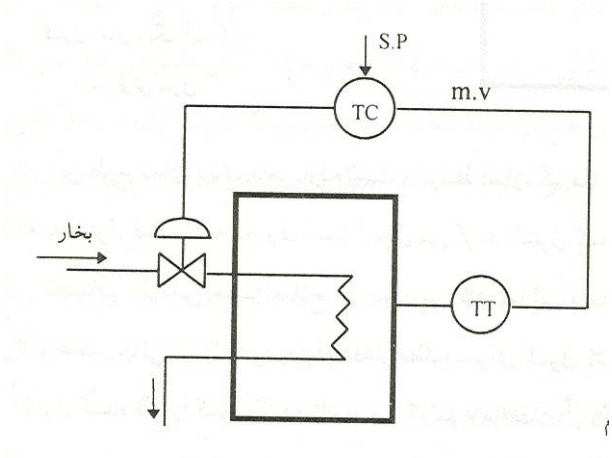
پروسه فوق را می‌توان به دو قسمت مطابق شکل (٦-٥) تقسیم نمود:



شکل (۶-۵). نمایش جعبه‌ای فرآیند دیگ آب گرم

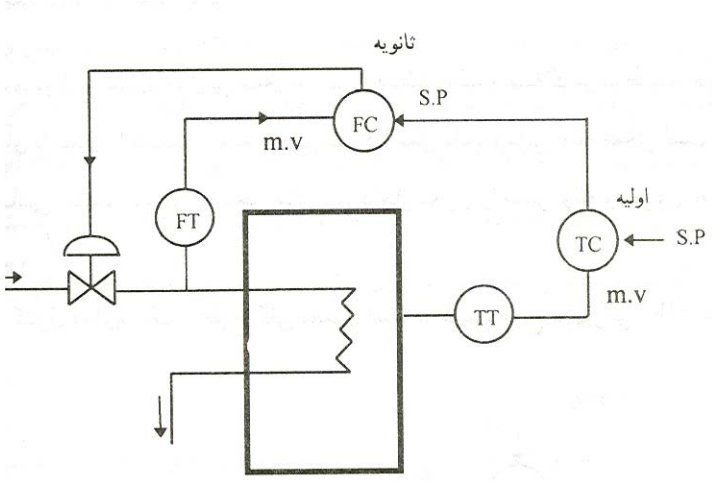
بلاک مربوط به تبادل حرارتی مبدل با آب را قسمت اولیه و بلاک مربوط به جریان بخار و تبادل حرارتی آن با مبدل را قسمت ثانویه می‌گوئیم. در عمل ثابت زمانی اولیه ممکن است تا حدود ده برابر ثابت زمانی ثانویه باشد. در اینجا دمای آب داخل مخزن را متغیر اولیه و جریان بخار را متغیر ثانویه می‌گوئیم.

اگر برای کنترل دمای دیگ از طرح کلی معمول استفاده کنیم، طرح تجهیزاتی مطابق شکل (٦-٦) خواهد بود.



شکل (۶-۶) طرح معمولی کنترل دمای دیگ آب گرم

در این طرح طبق معمول اندازه‌گیر، دمای آب را اندازه گرفته و به طرف کنترل کننده ارسال می‌دارد. کنترل کننده با مقایسه مقدار اندازه‌گیری شده بـا مقـدار مطلـوب (S.P) مقـدار خطـا را تعیین می‌نماید و بر اساس تنظیمات انجام شده، فرمان حرکت محرک و عنصر نهائی را صـادر می‌کند که در اثر آن شیر بخار تنظیم و دمای مخزن تصحیح می‌گردد. اشکال اساسی این طرح فاصله زمانی طولانی بین ارسال فرمان کنترل کننده تا احساس نتیجـه حاصـل از آن اسـت بـه طوریکه در این فاصله ممکن است اغتشاشات و یا تغییرات جدیـدی بـر پروسـه وارد شـوند و نهایتاً خطر ناپایداری حلقه کنترل بوجود آید. بعلاوه باز و بسته شدن شیر بخار لزوماً به معنی تنظیم دبی بخار به مقدار مناسب نیست زیرا فشار و دمای بخار تحت کنترل نمی‌باشـند و دبـی بخار ورودی به مبدل به ازای یک بازشدگی معین در زمانهای مختلف می‌تواند متفـاوت باشـد. برای اجتناب از این امر و بهبود عملکرد حلقه کنترل می‌توان طرحی مطابق شـکل (٦-٧) کـه بـه روش سری (Cascade) معروف است ارائه نمود.



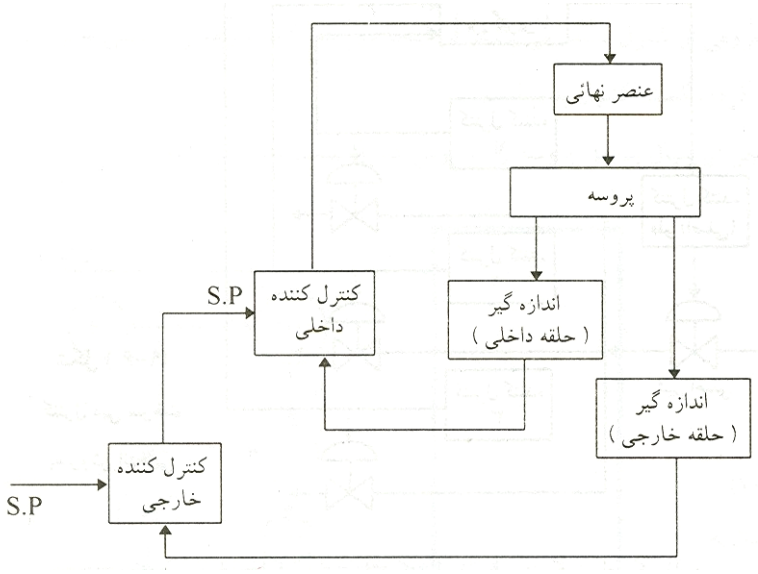
شکل (۶-۷) کنترل دمای دیگ آب گرم به روش سری

در این طرح دمای دیگ متغیر اولیه است و توسط اندازه‌گیـر دمـا، انـدازه‌گیـری شـده و بـه کنترل کننده دما که به کنترل کننده اولیه معروف است ارسال مـی‌گـردد. کنتـرل کننـده خطـای سیستم را تعیین می‌نماید و مطابق تنظیمات، فرمانی جهت اصلاح آن صـادر مـی‌کنـد. امـا ایـن فرمان به جای آنکه مطابق طرح قبلی به محـرک و عنصـر نهـائی ارسـال شـود بعنـوان مقـدار مطلوب برای کنترل کننده فلو ارسال می‌گردد.

کنترل کننده فلو را کنترل کننده ثانویه می‌گوئیم. زیرا نقش آن تنظیم بخار (متغیر ثانویه) بر اساس خطا موجود در دما (متغیر اولیه) می‌باشد. بنابراین مادامی که خطای دمـا مقـدار ثـابتی باشد، دبی بخار نیز روی مقداری مناسب تنظیم می‌گردد و اثر ثابت زمانی قسمت اولیه تـا حـد زیادی کاهش می‌یابد. این امر پایداری حلقه کنترل را بهبود می‌بخشد. همچنین اغتشاشات وارد شده بر قسمت ثانویه قبل از آنکه بر قسمت اولیه اثر بگذارد توسط کنترل کننـده ثانویـه خنثـی

می‌گردند. بعلاوه برقراری فیدبک در قسمت ثانویه ثابت زمانی معادل این قسمت را به مراتب کاهش می‌دهد.

با توجه به مثال فوق اکنون طرح کلی یک کنترل سری را مطابق شکل (٦-٨) ارائه می‌نمائیم.



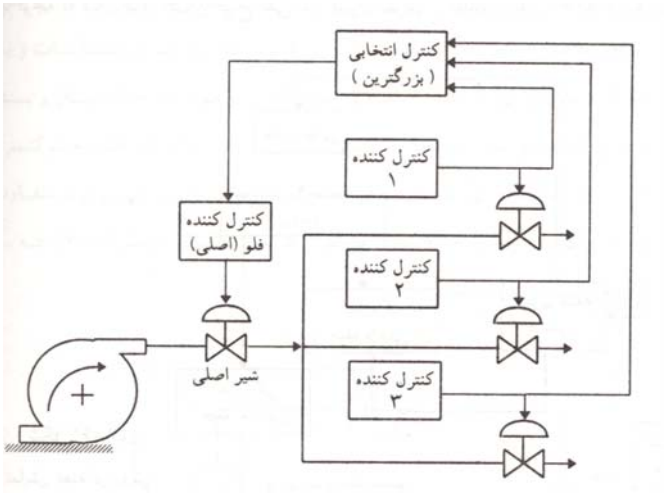
شکل (۶-۸) نمایش جعبه‌ای روش کنترل سری

در این طرح کمیت‌های اولیه و ثانویه توسط دو اندازه‌گیر مجزا اندازه‌گیری می‌شوند و خروجی کنترل کننده حلقه خارجی (اولیه) مقدار تنظیم (Set Point) کنترل کننده حلقه داخلی (ثانویه) را تعیین می‌کند. بنابراین اگر در کمیت اولیه خطائی مشاهده شود مقدار تنظیم حلقه داخلی تغییر می‌کند حتی اگر در کمیت اندازه‌گیری شده حلقه داخلی تغییری ایجاد نشده باشد. همچنین اگر کمیت اولیه در حد مطلوب باشد اما در کمیت ثانویه خطائی مشاهده شود قبل از آنکه این خطا موجب تغییرات در کمیت اولیه گردد توسط کنترل کننده ثانویه تصحیح می‌شود.

روش کنترل سری در مبدل‌های حرارتی بخاری، بویلر نیروگاه ها، کوره‌های حرارتی با روش پیش گرم‌کن و برج‌های تقطیر کاربرد فراوان دارد.

٦-٢-٢ کنترل انتخابی (Selector-Control):

کنترل کننده وظیفه نظارت بر عملکرد حلقه کنترل را بر عهده دارد و در صورت مشاهده خطا فرمان‌های لازم را برای تصحیح آن صادر می‌کند. در بعضی موارد دو یا چند کنترل کننده به عنصر نهائی واحدی فرمان می‌دهند به گونه‌ای که هر کنترل کننده تحت شرایطی خاص، کنترل پروسه را بر عهده می‌گیرد. این روش را کنترل انتخابی می‌نامیم. مثال متداول این روش توزیع سوخت بین چندین مصرف کننده توسط یک پمپ می‌باشد. در شکل (٦-٩) سوخت از مخزن به سمت مصرف کنندگان پمپ می‌گردد.



شکل (۶-۹) کنترل دبی سوخت به روش انتخابی

هر مصرف کننده محلی دارای یک حلقه کنترل فلو است بگونه‌ای که فلوی سوخت را بر حسب نیاز خود تنظیم می‌نماید. توجه به نکات ایمنی و صرفه اقتصادی لازم می‌دارد که شیر اصلی تنظیم فلو درهر لحظه آماده پاسخ گوئی به بزرگترین اغتشاش معمولاً از جانب بزرگترین مصرف کننده ایجاد می‌شود. بدین منظور درخواست مصرف کنندگان علاوه بر شیر تنظیم فلوی محلی به مدار انتخاب کننده " بزرگترین" ارسال می‌گردد. این مدار در هر لحظه بزرگترین مصرف کننده را به کنترل کننده اصلی متصل می‌سازد و بدین ترتیب عمل کنترل در دست بزرگترین مصرف کننده در آن لحظه قرار می‌گیرد.

کنترل انتخابی در سیستم‌های توزیع هوای فشرده در مراکز صنعتی و پالایشگاه‌ها کاربرد فراوان دارد. همچنین جهت حفاظت کمپرسورهای هوا از روش کنترل انتخابی استفاده می‌کنیم.

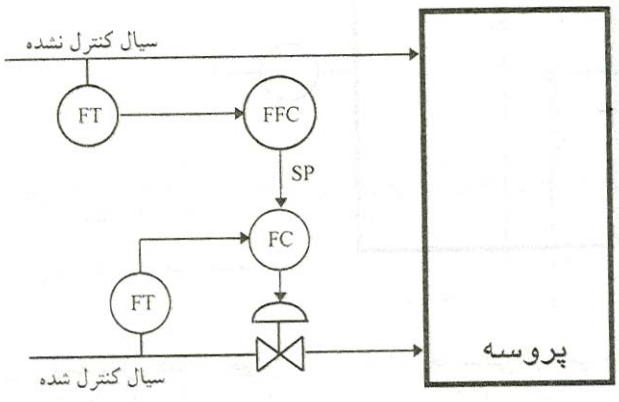
سیستم‌های توزیع کننده سوخت در کوره‌های حرارتی مثال دیگری از کاربرد این روش می‌باشند. بدلیل کاربرد فراوان کنترل انتخابی جهت حفاظت سیستم‌ها این روش را گاهی روش کنترل حفاظتی نیز می‌گویند.

٦-٢-٣ کنترل نسبت (Ratio-Control):

گاهی به جای کنترل مقدار مطلق یک کمیت، کنترل مقدار آن نسبت به کمیتی دیگر مطرح می‌گردد. در چنین مواردی معمولاً با یک کمیت کنترل ناپذیر روبرو هستیم و ناچاراً باید کمیت یا کمیت‌های دیگری را متناسب با آن تنظیم نمائیم. در این گونه موارد کمیت کنترل‌ناپذیر را کمیت مستقل یا کمیت وحشی (Wild) و کمیت کنترل پذیر را که متناسب با آن تنظیم می‌گردد کمیت آرام می‌گوئیم. تنظیم نسبت سوخت به هوا مثال معروفی از کنترل نسبت می‌باشد. در

اینجا دبی هوا کمیت وحشی و دبی سوخت که نسبت به آن تنظیم می‌گردد کمیت کنترل پذیر است.

شکل (٦-١٠) تنظیم جریان سیال بداخل پروسه را به روش کنترل نسبت نشان می‌دهد:



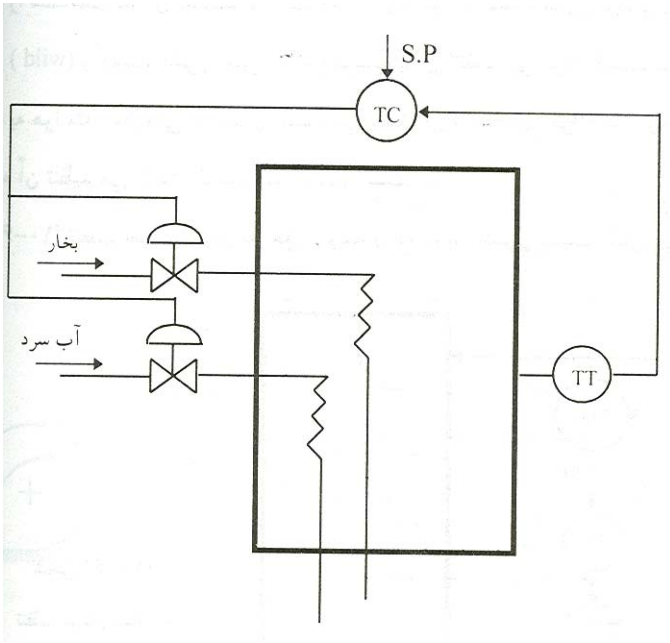
شکل (۶-۱۰) تنظیم جریان سیال به روش کنترل نسبت

مطابق شکل جریان سیال مستقل توسط اندازه‌گیر فلو اندازه‌گیری و به کنترل کننده نسبت ارسال می‌گردد و با توجه به تنظیمات انجام شده کنترل کننده نسبت، فلوی مورد نیاز را برای جریان آرام تعیین می‌کند. این مقدار بعنوان مقدار مطلوب (S.P) به کنترل کننده فلو ارسال می‌شود. کنترل کننده فلو نیز با مقایسه آن با مقدار اندازه‌گیری شده (جریان آرام) فرمان لازم را برای تصحیح خطا به محرک و عنصر نهائی ارسال می‌دارد.

٦-٢-٤ کنترل تقسیم مقیاس (Split-Range-Cntrol):

گاهی مشکلات فنی ایجاب می‌کنند که کمیتی را در یک محدوده از طریق یک عنصر نهائی و در محدوده‌ای دیگر از طریق عنصر نهائی دیگری کنترل نمائیم. مثلاً در پروسه استریل شیر، دما طبق یک منحنی زمانی کنترل می‌شود. در اینجا افزایش دما در اثر جریان بخار و کاهش آن در اثر جریان آب سرد تنظیم می‌گردد. بنابراین کنترل کننده در یک محدوده دمائی به یک عنصر نهائی و در محدوده‌ای دیگر به عنصر نهائی دیگری فرمان می‌دهد.

روشی که در آن یک کنترل کننده به دو یا چند عنصر نهائی فرمان می‌دهد را کنترل تقسیم مقیاس می‌گوئیم. بعنوان مثال طرح تجهیزاتی کنترل دما در یک محفظه را مطابق شکل (٦-١١) در نظر بگیرید.



شکل (۶-۱۱) کنترل دما به روش تقسیم مقیاس

در این پروسه کنترل دما در حوالی ۱۴۰ و یا ۲ درجه سانتی گراد مورد نظر است. برای افزایش دما از مبدل حرارتی بخاری استفاده می‌کنیم.

بدیهی است هرگاه بخواهیم دما را در محدوده ۲ درجه کنترل کنیم، بسته شدن شیر بخار به تنهائی کارساز نمی‌باشد و باید از یک مدار سرد کننده استفاده شود. این کار مطابق شکل از طریق کنترل شیر آب سرد مبدل حرارتی انجام می‌پذیرد. در طرح فوق دامنه خروجی کنترل کننده در حوزه خطاهای احتمالی و همچنین نوع محرک‌ها باید به گونه‌ای باشند که هر عنصر نهائی در محدوده خاص خود فعال باشد و در این حال عنصر نهائی دیگر غیرفعال بماند.

فصل ۷

ایمنی در سیستم‌های کنترل صنعتی

در فصول قبل هر جا صحبت از طراحی یک حلقه کنترل صنعتی و یا انتخاب یک جزء به میان می‌آمد ملاحظاتی از قبیل هزینه، سادگی، مزایا، معایب و... نیز مطرح می‌شدند. با این وجود آنچه که در انتخاب یک جزء یا طراحی یک مدار قبل از هر چیز باید مورد توجه قرار گیرد، ایمنی و سلامت افراد و محیط کار می‌باشد. همانطور که در ابتدای کتاب گفتیم علم کنترل مانند بسیاری دیگر از علوم اساساً جهت آسایش و رفاه انسان ابداع گردیده، بنابراین در طراحی و ساخت هر ماشین یا سیستم می‌باید به این نکته توجه داشت که ماشین آلات جهت خدمت به انسان ساخته می‌شوند و نه انسان برای خدمت به ماشین آلات. در این صورت هنگام طراحی و ساخت یک ماشین ایمنی انسان و محیط کار او و همچنین آسایش و سهولت کار با ماشین بیش از هر چیز می‌باید مورد توجه قرار گیرد.

نکات ایمنی در طرح مدارهای کنترل صنعتی مطابق با استانداردهائی تعریف می‌شوند و آشنائی مهندسین کنترل با این استانداردها امری لازم است. استانداردهای معروف در این زمینه عبارتند از:

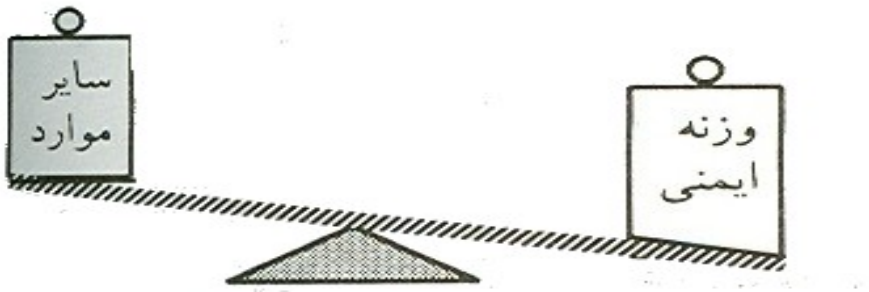
استاندارد ANSI (آمریکا)، CSA (کانادا)، DIN (آلمان)، IEC (اروپا) و ISO (بین‌المللی)

امروزه از بین استانداردهای ذکر شده، استانداردهای ISO و IEC متداول‌تر می‌باشند. در این فصل قصد شرح و بسط استانداردهای فوق را نداریم بلکه می‌خواهیم توجه خواننده را به اصول بدیهی ومهم ایمنی جلب نموده، و پاره‌ای از نکاتی را که در عین سادگی از نظر ایمنی دارای اهمیت بسیار می‌باشند یادآوری نمائیم.

۷-۱ اصل اول در طراحی سیستم‌های کنترل صنعتی:

شعاری معروف در محیط‌های کار می‌گوید:

" اول ایمنی، بعد کار " به پیروی از این شعار باید گفت در طراحی یک سیستم کنترل بین هزینه و ایمنی، ایمنی را انتخاب می‌کنیم. بین سادگی و ایمنی، ایمنی را انتخاب می‌کنیم. بین ایمنی و ...، ایمنی را انتخاب می‌کنیم. در واقع در هر طرحی کفه ترازو به نفع ایمنی سنگین می‌شود. شکل (۷-۱) را همیشه بخاطربسپارید.



شکل (۷-۱) در طرح سیستم‌های کنترل صنعتی ایمنی بیشترین اهمیت را دارد

۷-۲ اصل دوم در طراحی سیستم‌های کنترل صنعتی:

بعد از ایمنی، آسایش و سلامت (Comfort) انسان در استفاده از یک ماشین بر سایر اصول رجحان دارد بعنوان مثال اپراتوری را در نظر بگیرید که وظیفه گذاشتن و برداشتن قطعه بر روی پرس را بر عهده دارد. طراحی ماشین و اجزاء و قطعات باید بگونه‌ای باشند که در عین رعایت موارد ایمنی، اپراتور این کار را با سهولت و آسایش انجام دهد هر چند رعایت این امر موجب افزایش هزینه یا پیچیدگی طرح شود.

۷-۳ اصل سوم در طراحی سیستم‌های کنترل صنعتی:

طرح باید بگونه‌ای باشد که خسارت‌های مالی احتمالی ناشی از حوادث یا خرابی ماشین حتی‌الامکان کاهش یابد. توجه به سه اصل فوق موجبات ایمنی جانی و مالی انسان را فراهم آورده، ماشین را در جهت آسایش و رفاه انسان بکار می‌گیرد.

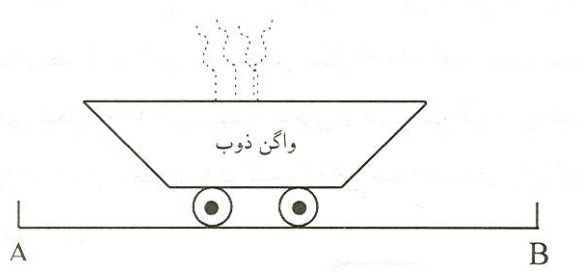
برای پی بردن به اهمیت ایمنی در کنترل یک پروسه باید این سوال را مطرح کنیم:

" اگر مدار کنترل کار نکند و یا اخلالی در آن ایجاد شود چه اتفاقی خواهد افتاد؟" این اتفاق گاهی موجب خسارت جانی و یا به خطر افتادن جان افراد می‌شود و گاهی موجب خسارت مالی (کم یا زیاد) می‌شود. در حالت اول طبق قوانین، طراح موظف به رعایت استانداردهای ایمنی به هر قیمت ممکن می باشد و در حالت دوم صرفه اقتصادی تعیین کننده چگونگی طرح خواهد بود. موارد فوق با ارائه چند مثال روشن‌تر خواهند شد.

۷-۴ مثال ها:

مثال ۱:

در یک خط ریخته‌گری اتوماتیک مطابق شکل (۷-۲) واگن ذوب بین ایستگاه A و B حرکت می‌کند.



شکل (۷-۲) برای حرکت واگن ذوب باید تدابیر ایمنی لازم اتخاذ گردد

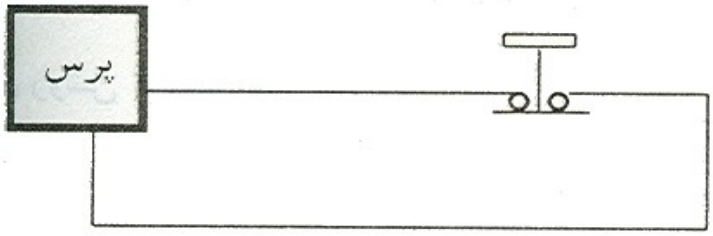
برای کنترل حرکت واگن و توقف به موقع آن مدارهائی طرح شده است. با این همه این احتمال وجود دارد که در یک زمان تمام مدارهای کنترل از کار بیفتد. در این حالت واگن به شدت به نقاط انتهائی برخورد خواهد کرد. در این صورت چه اتفاقی خواهد افتاد؟ واگن و ریل باید به گونه‌ای طرح شوند که حتی‌الامکان احتمال واژگون شدن آن کاهش یابد با این وجود اگر واگن واژگون شود چه اتفاقی خواهد افتاد؟ مسلماً فلز مذاب به اطراف پراکنده می‌گردد. بنابراین باید یک حریم ایمنی در اطراف واگن در نظر گرفته شود. تا افراد و اشیاء از آسیب پراکندگی مواد مذاب در امان بمانند. با این حال باز هم احتمال پرتاب مواد مذاب به خارج از حریم وجود دارد بنابراین افرادی که در این محیط کار می‌کنند باید از کفش و لباس و پوشش ایمنی مناسب استفاده نمایند.

با در نظر گرفتن هر یک از احتمالات فوق و روش برخورد با آن می‌توان احتمال آسیب یا خطر جانی برای افراد را به صفر رسانید.

مثال ۲:

برای به حرکت درآوردن یک پرس ازمداری مطابق شکل (۷-۳) استفاده شده است.

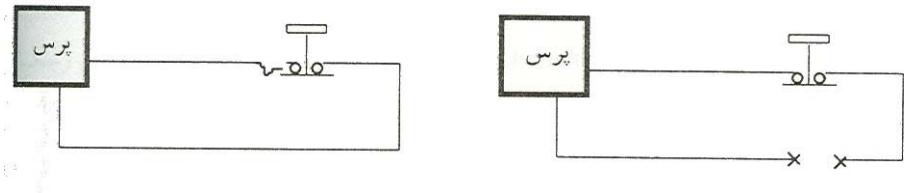
در این مدار اپراتور با فشار دادن یک پوش باتون NC (در حالت عادی بسته) فرمان حرکت پرس را صادر می‌نماید. این مدار را از نظر ایمنی بررسی کنید.



شکل (۷-۳) فرمان حرکت پرس با پوش باتون NC خلاف مقررات ایمنی است

با توجه به صورت مسئله فشردن پوش باتون موجب قطع مدار و حرکت پرس می‌گردد.

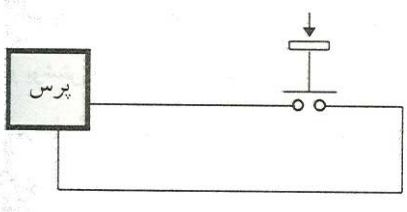
سیستم‌های ارتباطی در یک مدار فرمان همواره در معرض خطر پارگی و قطع شدن قرار دارند. بعلاوه اتصال سیم‌ها در محل ترمینال‌ها ممکن است شل یا قطع شود و یا در اثر خوردگی اتصال بین سیم و ترمینال قطع گردد. اکنون اگر مطابق شکل (۷-٤- الف) اتصال سیم به ترمینال پوش باتون قطع شود و یا مطابق شکل (۷-٤- ب) سیم در محلی از مسیر قطع گردد، برداشت مدار کنترل فرمان اپراتور برای حرکت پرس است و این حرکت ناخواسته و اتفاقی خطرات جدی برای افرادی که با پرس کار می‌کنند بدنبال خواهد داشت.



شکل (۷-۴). اشکالات احتمالی در استفاده از پوش باتون NC

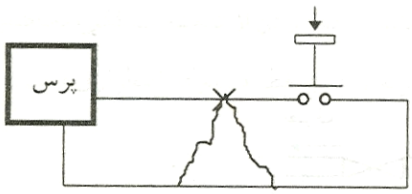
با توجه به یک اصل ایمنی " استفاده از پوش باتون‌های NC بعنوان صادر کننده نهائی فرمان برای حرکت‌های خطر آفرین مجاز نمی باشد "

بنابراین بجای مدار شکل (۷-۳) باید از مداری مطابق شکل (۷-۵) استفاده کنیم.



شکل (۷-۵) برای فرمان حرکت‌های خطرناک از پوش باتون NO استفاده می‌کنیم

در این مدار از یک پوش باتون NO استفاده شده است. فشردن پوش باتون موجب وصل مدار و حرکت پرس می‌گردد. در اینجا چون در حالت عادی مدار قطع است پاره شدن سیم‌های ارتباطی و یا شل شدن ارتباطات، خطری از نظر صدور فرمان حرکت ناخواسته ایجاد نمی کند.

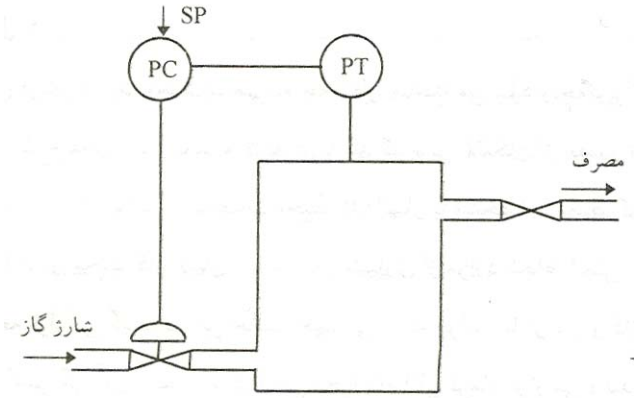


شکل (۷-۶) اتصال ناخواسته سیم‌های ارتباطی موجب حرکت پرس می‌شود

در این مدار اتصال اتفاقی سیم‌های ارتباطی مطابق شکل (۷-٦) موجب حرکت ناخواسته پرس می‌شود. در صورت استفاده از سیم هائی با روکش سالم و کیفیت خوب و رعایت استانداردها در سیم کشی مدارهای فرمان بسیار بیشتر از احتمال اتصال سیم‌ها به یکدیگر است. بنابراین مدار (۷-۵) بسیار ایمن‌تر از مدار (۷-۳) است.

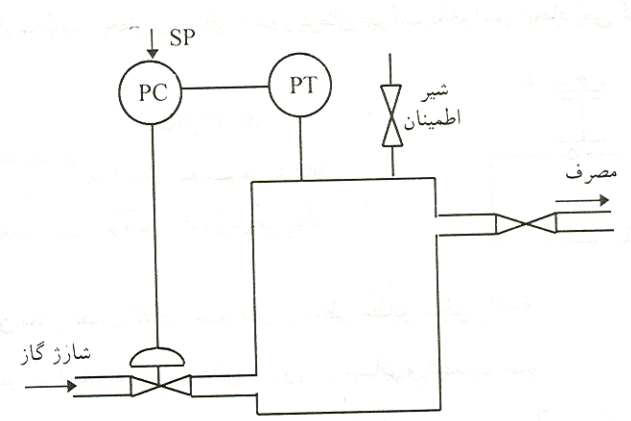
مثال ۳:

شکل (۷-۷) طرح تجهیزاتی کنترل فشار داخل یک مخزن را نشان می‌دهد. این طرح را از نظر ایمنی بررسی نمائید:



شکل (۷-۷) طرح تجهیزاتی کنترل فشار داخل مخزن

مخازن تحت فشار همواره در معرض خطر انفجار قرار دارند. طبق قوانین ایمنی کلیه مخازن تحت فشار صرف نظر از مدارهای کنترل مرتبط با آن می‌باید به شیر تخلیه ایمنی Relife Valve مستقلی مجهز باشند تا در صورت از کار افتادن مدارهای کنترل شیر ایمنی به موقع عمل نموده و از افزایش فشار مخزن جلوگیری بعمل آورد. بنابراین به طرح فوق مطابق شکل (۷-۸) باید یک شیر ایمنی مستقل نیز اضافه نمود.



شکل (۷-۸) کنترل فشار با رعایت ایمنی (شیر اطمینان)

شیرهای ایمنی می‌باید همواره مورد بازدید و آزمایش قرار گیرند تا از عملکرد درست آنها اطمینان حاصل شود تخلیه محتویات مخزن نیز می‌باید با رعایت موارد ایمنی انجام شود. مثلاً تخلیه هوای فشرده از یک منبع بگونه‌ای مناسب به محیط اطراف مجاز است. اما تخلیه گازهای خطرناک و یا قابل اشتعال به محیط اطراف مجاز نبوده و تابع مقررات خاصی است. اساساً مخازن حاوی مواد خطرناک باید در فاصله‌ای دور نسبت به محل کار افراد نصب گردند و برای تخلیه اضطراری آنها تدابیر لازم اندیشه شود.

مثال ۴:

اتاق فرمان در یک محیط صنعتی چه ویژگی هائی باید داشته باشد؟

طرح‌های کنترل باید به گونه‌ای باشند که حتی‌الامکان از حضور انسان در نزدیکی ماشین اجتناب گردد، چرا که اساساً مشخصات محیط کار انسان ماشین معمولاً متفاوت است. جدا کردن محیط کار انسان و ماشین در بسیاری از موارد بلحاظ ایمنی، سلامت و صرفه اقتصادی مورد توجه قرار می‌گیرد. در این حالت تجهیزاتی را که اپراتور با آن سروکار دارد در فاصله‌ای مناسب نسبت به ماشین گردآوردی نموده و در اتاقی مجزا بنام اتاق فرمان قرار می‌دهند.

این کار علاوه بر حفظ ایمنی اپراتور موجبات آسایش وی را نیز فراهم می‌آورد و بعلاوه با گردآوری تجهیزات مربوط به چندین ماشین مرتبط با هم در یک اتاق می‌توان در هزینه و تعداد افراد صرفه‌جوئی نمود. طرح اتاق‌های فرمان تابع مقررات خاصی است و چون اپراتورها برای مدت زیادی در آنجا بسر می‌برند امکانات ایمنی و سلامت آنها باید فراهم شود. از جمله این امکانات می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

تهویه و هوای پاکیزه و سالم، دمای مناسب، سکوت و آرامش، نور مناسب بگونه‌ای که اجزاء و قطعات نصب شده در اتاق به راحتی قابل رؤیت باشند، رطوبت مناسب، دور بودن از

تشعشعات الکترومغناطیس و کلیه تشعشعات ناراحت کننده و زیان‌آور، امکان خروج سریع و بدون خطر در مواقع اضطراری و ...

مثال ۵:

هشدارها (آلارم ها) و علائم چگونه باید باشند؟

آلارم‌ها باید علائمی هستند که اپراتور را از یک اتفاق آگاه می‌کنند. آلارم‌ها بر حسب نوع اتفاقی که اعلام می‌کنند اهمیت خاص خود را دارند. یک هشدار می‌تواند از طریق حس شنوائی یا بینائی به اپراتور اعلام گردد. آلارم‌های صوتی از نظر شدت و فرکانس باید از نویزهای صوتی موجود در محیط قابل تشخیص باشند.

آلارم‌های نوری از نظر رنگ وشدت تابع استانداردهای مخصوص می‌باشند. در طرح مدارها کنترل و فرمان تأخیر اپراتور در عکس‌العمل نسبت به یک آلارم می‌باید در نظر گرفته شود. زمان تأخیر معمولاً از تأخیر در احساس بعلاوه تأخیر در عکس‌العمل مکانیکی تشکیل می‌شود. تأخیر در احساس معمولاً کوچک است. مثلاً احساس شنوائی در چیزی حدود ۱۴۰ میلی ثانیه تکمیل می‌گردد. بنابراین زمان تأخیر اپراتور بیشتر تحت تأثیر تأخیر مکانیکی یعنی زمان حرکت دست یا انگشت می‌باشد.

حروف و نوشته‌ها باید در ابعادی که به راحتی قابل خواندن و رؤیت باشند نوشته شوند. یک قانون سر انگشتی برای ارتفاع یک حرف، یک شماره یا یک شکل به میلی متر عبارت است از:

حاصلضرب فاصله خواندن بر حسب متر در ده و تقسیم کردن آن بر سه، ارتفاع حرف یا علامت را بر حسب میلی متر می‌دهد و عرض آن حرف یا شکل نیز معمولاً ۷۰ الی ۸۰ درصد طول در نظر گرفته می‌شود.

مثال ۶:

نصب عناصر و اجزاء در روی تابلو فرمان چگونه باید باشد.

طبق مقررات ایمنی، اجزاء و عناصر قدرت باید جدای از اجزاء و عناصر کنترل و فرمان و یا در فاصله‌ای مناسب نسبت به آنها نصب گردند. همچنین مسیر کابل‌های قدرت و یا خطوط پرفشار سیال باید جدای از کابل‌ها یا خطوط کنترل و فرمان باشند. عناصر و اجزاء کنترل و فرمان مربوط به یک پرسه حتی‌الامکان باید در یک گروه و در نزدیکی یکدیگر نصب شوند تا زمان عیب‌یابی حتی‌الامکان کاهش یابد و عملیات تعمیر یا عیب‌یابی موجب اخلال در کار سایر قسمت‌ها نگردد.

اساساً شلوغ بودن سیم کشی و نامنظم بودن محل نصب تجهیزات، کار مونتاژ اولیه وسائل و همچنین تعمیرات آتی را دشوار می‌سازد.

فصل ۸

سیستم‌های هیدرولیکی

۸-۱ معرفی سیستم‌های هیدرولیکی:

استفاده از سیالات برای انتقال انرژی از دیرباز متداول و معمول بوده است. چرخ‌های آبی مثالی آشنا و قدیمی در این مورد می‌باشند. در این چرخ‌ها از جریان آب (انرژی جنبشی) و یا سقوط آن (انرژی پتانسیل) برای به حرکت در آوردن چرخ استفاده می‌شود.

در سیالات انرژی بصورت فشار نیز می‌تواند ذخیره و انتقال یابد. برای داشتن ایده‌ای واقعی‌تر از این اثر می‌توان یک فنر فشرده شده را در نظر گرفت. انتقال فنر فشرده شده از یک نقطه به نقطه دیگر به معنی انتقال انرژی ذخیره شده در آن از یک نقطه به نقطه دیگر می‌باشد.

سیستم‌هائی که از روغن هیدرولیک بعنوان سیال تحت فشار استفاده می‌کنند را اصطلاحاً سیستم‌های هیدرولیکی می‌گوئیم.

سیستم‌های هیدرولیکی مزایای خاصی نسبت به سیستم‌های پنوماتیکی و الکتریکی دارند که موجب استفاده وسیع از آنها گردیده است. یکی از ویژگی‌های مهم آنها انتقال سریع و بدون تأخیر انرژی و سیگنال‌های کنترلی می‌باشد. چرا که روغن هیدرولیک (سیال تراکم‌ناپذیر) هر گونه تغییر فشاری را سریعاً منتقل می‌نماید. در حالی که در سیستم‌های پنوماتیکی بدلیل تراکم‌پذیر بودن سیال (هوا) و در سیستم‌های الکتریکی بدلیل تأخیر در مدارهای مغناطیسی سرعت انتقال پائین‌تر است. در سیستم‌های هیدرولیکی انتقال انرژی و سیگنال‌ها بدون استفاده از اهرم‌ها یا چرخ دنده‌ها و یا سایر مکانیزم‌های مکانیکی بطور ساده و ارزان امکان‌پذیر می‌باشد.

سیستم‌های هیدرولیکی قابلیت تولید نیروهای عظیم با فشارهای بالا و در عین حال قابلیت تثبیت بسیار خوبی را دارا می‌باشند. بعنوان مثال در این سیستم‌ها می‌توان نیروهای چندین هزار تنی را با دقت میکرومتری تثبیت وضعیت نمود.

موتورها و محرک‌های هیدرولیکی قابلیت تولید نیروهای عظیم با فشارهای بالا و در عین حال قابلیت تثبیت بسیار خوبی را دارا می‌باشند. بعنوان مثال در این سیستم‌ها می‌توان نیروهای چندین هزار تنی را با دقت میکرومتری تثبیت وضعیت نمود.

موتورها و محرک‌های هیدرولیکی بسیار کوچکتر و سبک‌تر از انواع الکتریکی و نسبت توان به وزن بزرگی دارند. استقامت و دوام سیستم‌های هیدرولیکی زیاد است و لرزش‌ها و شوک‌های مکانیکی خللی در کار آنها ایجاد نمی‌کنند و توانائی انجام وظیفه در شرایط سخت را دارند.

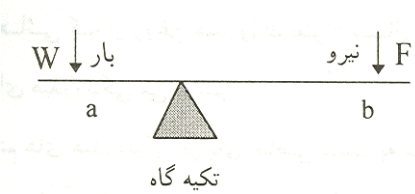
ویژگی‌های سیستم‌های هیدرولیکی موجب گردیده تا علاوه بر محیط‌های صنعتی در کشتی ها، هواپیماها وماشین‌های سنگین نیز مورد استفاده قرار گیرند.

هر یک از سیستم‌های هیدرولیکی، الکتریکی و پنوماتیکی ممکن است در کابرد خاصی بهتر از بقیه باشند. با این وجود در بعضی از کاربردها شاید هر سه یکسان بنظر برسند. بنابراین هر طرح می‌باید از جنبه‌های گوناگون نظیر وزن، حجم، هزینه، دقت، استحکام و ... مورد بررسی قرار گیرد.

برای طراحی و عیب‌یابی سیستم‌های کنترل صنعتی آشنائی مهندسین کنترل با هر سه سیستم امری لازم است. در این فصل آشنائی مختصر و مفیدی با سیستم‌های هیدرولیکی پیدا می‌کنیم.

۸-۲ اصول اساسی انتقال انرژی در سیستم‌های هیدرولیکی:

همه ما با اصل انتقال نیرو در اهرم‌ها آشنا هستیم. جهت یادآوری شکل (۸-۱) را در نظر بگیرید:



شکل (۸-۱) انتقال نیرو در یک اهرم

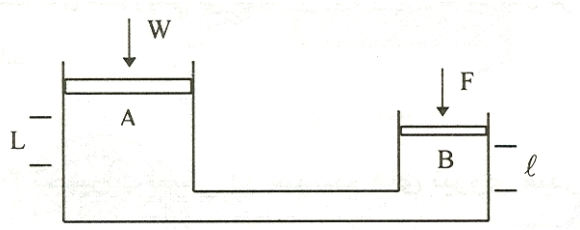
اگر از نیروی F برای جابجائی بار W استفاده کنیم در حالت تعادل گشتاور حول تکیه گاه برای نیرو و بار برابر می‌باشند و می‌توان نوشت:

$$W.a = F.b \qquad (۸-۱)$$

$$\frac{W}{F} = \frac{b}{a} \qquad (۸-۲)$$

رابطه (۸-۲) بیان می‌دارد که با تنظیم $\frac{b}{a}$ می‌توان بار بزرگی را توسط نیروی کوچکی جابجا نمود.

سیستم هیدرولیکی مشابه اهرم فوق را مطابق شکل (۸-۲) در نظر بگیرید:



شکل (۸-۲) بیان اهرم هیدرولیکی

روغن هیدرولیک تراکم ناپذیر، فشار را عیناً به تمام نقاط منتقل می‌نماید. در حالت تعادل فشار در سراسر سیال یکسان است و می‌توان نوشت:

$$\frac{F}{B} = \frac{W}{A} \qquad (۸-۳)$$

در رابطه (۸-۳)، A و B به ترتیب سطح پیستون طرف بار و طرف نیرو می‌باشند و از آن بدست می‌آید:

$$\frac{W}{F} = \frac{A}{B} \qquad (۸-٤)$$

$$W = \frac{F}{B}.A = P.A \qquad (۸-٥)$$

رابطه (۸-٤) بیان می‌دارد که با تنظیم نسبت $\frac{A}{B}$ می‌توان بار بزرگی را توسط نیروی کوچکی جابجا نمود. اکنون سیستم را در حال حرکت در نظر می‌گیریم. برای حرکت W، سیال باید از سیلندر کوچک به سیلندر بزرگ جریان یابد بطوریکه حجم سیال جابجا شده در دو طرف مساوی باشد:

$$B.\ell = A.L \qquad (۸-٦)$$

کار انجام شده توسط نیرو با کار انجام شده بر روی بار مساوی است یعنی:

$$WL = F.\ell \qquad (۸-۷)$$

با استفاده از رابطه (۸-۵) در (۸-۷) خواهیم داشت:

$$\text{کار انجام شده روی بار} = P.A.L \qquad (۸-۸)$$

رابطه (۸-۸)، ارتباط کار انجام شده بر روی بار را بافشار و حجم روغن ارسالی توسط نیرو نشان می‌دهد یعنی:

$$\text{کار انجام شده بر روی بار} = (\text{فشار سیال}) \times (\text{حجم سیال شده}) \qquad (۸-۹)$$

روابط (۸-۳) تا (۸-۹) روابطی ساده و بدیهی هستند و درک آنها کمک بزرگی به طراحی و شناخت سیستم‌های هیدرولیکی می‌نماید. این ادعا را با ارائه یک مثال طراحی در آخر این فصل به اثبات خواهیم رساند.

۸-۳ تجهیزات اصلی در سیستم‌های نیروی هیدرولیکی:

سه عنصر اساسی در سیستم‌های هیدرولیکی عبارتند از:

۱- پمپ‌ها

۲- شیرها

۳- محرک‌ها (عناصر مصرف کننده انرژی)

بدیهی است مدارها هیدرولیکی دارای لوازم و ملحقات و عناصر دیگری نیز می‌باشند که چون هدف ما آشنائی کلی می‌باشد از پرداختن به آنها خودداری می‌نمائیم.

پمپ ها:

پمپ‌ها مهمترین قسمت سیستم‌های هیدرولیکی می‌باشند، شاید یک پمپ را عامل ایجاد فشار بدانیم، اما در واقع پمپها عامل ایجاد فلو در مدارها هیدرولیکی می‌باشند و به عبارت دیگر از طریق ایجاد فلو فشار تولید می‌کنند. از نظر معادل الکتریکی یک پمپ را می‌توان یک منبع جریان (فلو) تصور نمود که بر روی مقاومت الکتریکی (هیدرولیکی) تولید ولتاژ (فشار) می‌کند.

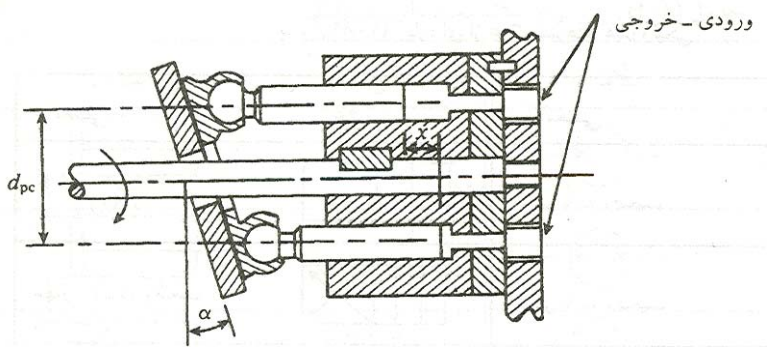
پمپ‌ها به لحاظ ساختمان، انواع گوناکون دارند و هر یک بدلیل ویژگی‌های مخصوص، کاربرد خاصی دارند. پمپ‌ها را می‌توان به سه دسته کلی تقسیم نمود.

۱- پمپ‌های دنده‌ای (Gear-Pump)

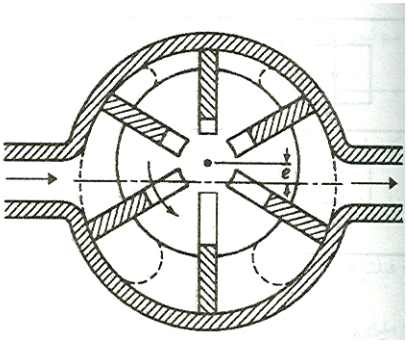
۲- پمپ‌های پره‌ای (Vane-Pump)

۳- پمپ‌های پیستونی (Piston-Pump)

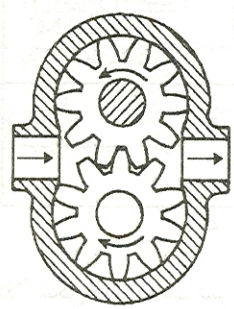
در شکل (۸-۳) نمایش کلی و ساده از هر یک از انواع فوق آمده است. هر یک از انواع ذکر شده خود به انواع دیگری تقسیم می‌شوند.



پمپ پیستونی



پمپ پره‌ای



پمپ دنده‌ای

شکل (۸-۳). انواع پمپ‌های هیدرولیکی

از ویژگی‌های مهم یک پمپ می‌توان به دبی خروجی، فشار، سرعت دوران، میزان سروصدا، نوسانات فشار، راندمان، آب‌بندی، دوام، استهلاک و قیمت اشاره نمود.

شیرها:

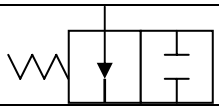
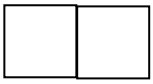
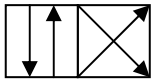
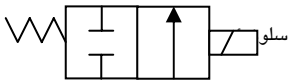
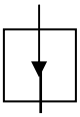
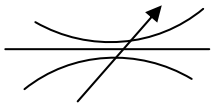
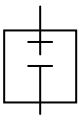
در مدارهای هیدرولیکی شیرها معمولاً وظایفی نظیر قطع و وصل، هدایت جهت دبی، کم و زیاد کردن مقدار دبی و تنظیم فشار را بر عهده دارند.

شیرها با علائم و اختصارات خاصی نمایش داده می‌شوند. در جدول (۸-۱) تعدادی از این علائم آمده‌اند.

شناسائی انواع شیرها و آشنائی با عملکرد آنها امری لازم در طراحی مدارهای فرمان و کنترل هیدرولیکی می‌باشد.

شیرها را معمولاً بر اساس تعداد اتصال به آنها (ورودی‌ها و خروجی ها) و تعداد وضعیت ممکن شیر نامگذاری می‌کنند.

جدول (۸-۱). پاره‌ای از علائم شیرهای هیدرولیکی

معنی	علامت	معنی	علامت
دوراه- دو وضعیت (NO)		شیر با دو وضعیت	
چهارراه- دووضعیت		شیر با سه وضعیت	
دوراه- دو وضعیت NC (توسط فنر) باز (توسط سلونوئید)		شیر با دو را (باز)	
شیر تنظیم فلو		شیر با دو راه (بسته)	

مثلاً شکل (۸-٤) یک شیر ٤/۲ را نشان می‌دهد همانطور که ملاحظه میفرمائید این شیر دارای ٤ اتصال a ,b ,c ,d است که در دو وضعیت ممکن می‌توانند به یکدیگر متصل شوند.

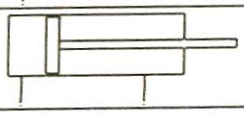
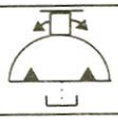
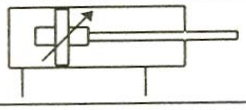
شکل (۸-۴). عملکرد شیر ۴/۲

محرک ها:

محرک‌ها عناصری هستند که انرژی هیدرولیکی را به انرژی مکانیکی (حرکت) تبدیل می‌کنند و به عبارت دیگر عناصری هستند که توسط آنها بار جابجا می‌گردد.

محرک‌های متداول در مدارهای هیدرولیکی، سیلندر پیستون‌ها (جک ها) و موتورهای هیدرولیکی (هیدروموتورها) می‌باشند. از جک‌ها برای تولید حرکت خطی (جابجائی) و از هیدروموتورها برای تولید حرکت دورانی استفاده می‌کنیم.

جک‌ها و هیدروموتورها نیز دارای انواع گوناگون و کاربردهای مخصوص می‌باشند. در جدول (۸-۲) علائم اختصاری چند نمونه جک و هیدروموتور آمده است.

معنی	علامت	معنی	علامت
موتور		سیلندر یك طرفه	
موتور دو جهته		سیلندر دو طرفه	
موتور نوسانی		سیلندر دو طرفه با بالشتکهای قابل تنظیم	

جدول (۸-۲). پاره ای از علائم محرک‌های هیدرولیکی

ممکن است عناصر فرعی دیگری نیز بر حسب نیاز در سیستم‌های هیدرولیکی مورد استفاده قرار گیرند که پاره‌ای از آنها عبارتند از:

۱- فیلترها که بمنظور گرفتن ذرّات معلق و آشغال از مدار هیدرولیک بکار می‌روند.

۲- مدارهای خنک کننده روغن.

افزایش دما بر ویسکوزیته و ویژگی‌های روغن اثر می‌گذارد بنابراین لازم است از افزایش دمای روغن هیدرولیک جلوگیری شود. این کار توسط مدارهای خنک کننده صورت می‌پذیرد.

۳- آکومولاتور.

نقش آکومولاتور در یک مدار هیدرولیک شبیه به نقش خازن صافی در یک منبع تغذیه می‌باشد. مهمترین وظایف آکومولاتور عبارتند از:

الف)جبران کمبود جریان سیال در لحظه‌های کوتاه.

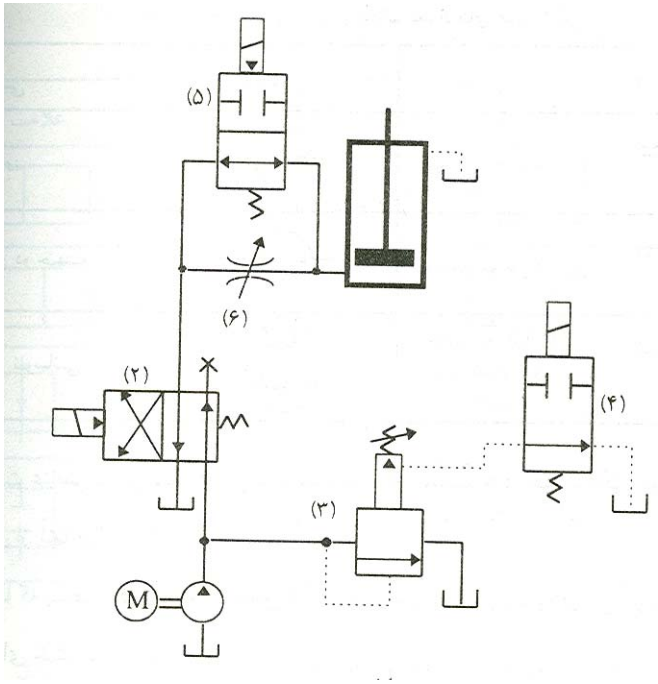
ب) صاف کردن ضربات فشاری ناشی از پمپ.

ج) گرفتن امواج فشار (ضربات قوچی) ناشی از قطع و وصل شیرها.

اکنون که آشنائی مختصر و مفیدی با سیستم‌های هیدرولیکی پیدا نمودیم این فصل را با ارائه یک مثال به پایان می‌بریم.

۸-۴ طراحی یک مدار کنترل حرکت پرس (هیدرولیک):

برای کنترل حرکت یک پرس قالب‌گیری رو به بالا از مداری مطابق شکل (۸-۵) استفاده می‌کنیم:



شکل (۸-۵). مدار کنترل حرکت پرس هیدرولیک

طرز کار مدار:

۱- روغن هیدرولیک توسط الکترو پمپ به داخل مدار پمپ می‌شود.

۲- توسط شیر کنترل جهت ٤/۲ (شماره ۲) دبی به سمت جک را قطع و وصل می‌کنیم.

۳- چون پمپ همواره در حال کار و ارسال دبی می‌باشد، هنگام قطع شیر شماره ۲ فشار در خروجی پمپ بسیار بالا می‌رود. برای کنترل فشار خروجی پمپ و جلوگیری از ازدیاد زیان‌آور آن از شیر تنظیم کننده فشار (شماره ۳) استفاده می‌کنیم. این شیر بگونه‌ای تنظیم می‌شود که در صورت افزایش فشار از حد تنظیم شده عمل کرده و خروجی پمپ را به مخزن (فشار صفر) هدایت می‌کند و بنابراین از افزایش فشار جلوگیری می‌نماید.

٤- در صورتیکه بخواهیم فشار سیستم را بطور کامل تخلیه نمائیم (مثلاً برای ایمنی) از شیر شماره ٤ استفاده می‌نمائیم.

۵- برای حرکت سریع جک به سمت بالا (اتصال فشار) و یا حرکت سریع آن به سمت پائین (اتصال به سمت مخزن) از شیر ٤/۲ شماره ۵ استفاده می‌کنیم.

٦- در مقطعی از سیکل کاری پرس لازم است که پرس به آرامی (با سرعت تنظیم شده) به سمت بالا پائین حرکت کند. در این حالت شیر شماره ٥ قطع است و مسیر اتصال به فشار یا اتصال به تانک از طریق شیر قابل تنظیم شماره ٦ انجام می‌گردد.

مشخصات خواسته شده:

مدار ارائه شده فوق می‌بایستی بر اساس مشخصات زیر طراحی گردد:

قطر پیستون جک ٤٠٠ میلی متر، دامنه حرکت (Stroke) آن ٢٥٠ میلی متر که بایستی در فاصله ٢٢٥ میلی متر اولیه فشار ٢٠ bar و در ٢٥ میلی متر باقیمانده فشار ٣٥٠ بار را بر قالب وارد کند.

سرعت کار این پرس ٦٠ قطعه در ساعت می‌باشد. سایر مشخصات به شرح زیر است:

زمان طی مسیر ٢٢٥ میلی متر اولیه = ٥ ثانیه

زمان طی مسیر ٢٥ میلی متر نهائی = ٥ ثانیه

زمان نگهداری قطعه تحت فشار نهائی = ٢٥ ثانیه

زمان برگشت = ١٠ ثانیه

زمان برداشتن قطعه و گذاشتن قالب جدید = ١٥ ثانیه

زمان کل یک سیکل کاری = ٦٠ ثانیه (جمع زمانهای فوق)

شاید در نگاه اول تأمین خواسته‌های فوق با آشنائی مختصری که با سیستم‌های هیدرولیکی داریم کاری دشوار بنظر آید اما مراحل بعدی نشان خواهند داد که چند فرمول ساده‌ای ک فراگرفته‌ایم برای این منظور کافی می‌باشند.

محاسبات:

محاسبات نیروی مورد نیاز در حرکت اولیه:

استفاده از رابطه (٨-٥) نیروی مورد نیاز در ٢٢٥ میلی متر حرکت اولیه پرس را می‌دهد:

سطح × فشار = نیرو

$$F = 20\times10^5\times(\pi/4)\times(0.4)^2 = 251KN$$

محاسبه نیروی مورد نیاز در حرکت نهائی:

سطح × فشار = نیرو

$$F_2 = 350\times10^5(\pi/4)\times0.4^2 = 4.4MN$$

محاسبه دبی ارسالی توسط پمپ:

دبی مورد نیاز در حرکت اولیه:

$$\text{سطح پیستون} = \pi \times \frac{0.4^2}{4} = 0.126 \quad m$$

$$\text{سرعت سیلندر} = \frac{0.225}{5} \quad m/s$$

$$\text{دبی حجمی} = 0.126 \times (\frac{225}{5}) \quad m^3/s$$

$$= 340 \quad liters/\min$$

دبی مورد نیاز در حرکت نهائی:

$$\text{سرعت سیلندر} = \frac{0.025}{5} \quad m/s$$

$$= \frac{(0.126 \times 0.025)}{5} \quad m^3/s$$

$$= 37.81 \quad liters/\min$$

دقت نمائید که در مرحله اول به دبی بزرگ و فشار کم و در مرحله دوم به دبی کم و فشار بزرگ نیاز داریم. قدرت پمپ می‌باید بگونه‌ای انتخاب گردد که توانائی پاسخ گوئی به بدترین شرایط لحظه‌ای را داشته باشد که این حالت ارسال دبی $340 L/\min$ در فشار ۳۵۰ (bar) می‌باشد:

$$\text{توان ماکزیمم} = \frac{340}{10^3 \times 60} \times 350 \times 10^5 = 198.3 \quad KW$$

بنابراین می‌باید یک الکتروپمپ با توان حدود ۲۰۰KW انتخاب نمائیم.

فشار ۳۵۰ (bar) فقط در مرحله نهائی و زمانی که قطعه تحت فشار نگه داشته می‌شود (مجموعاً ۳۰ ثانیه) مورد استفاده قرار می‌گیرد و در این زمان کمترین مصرف دبی را داریم ($37.81 \quad liters/\min$) بنابراین در این مدت دبی اضافی توسط شیر تنظیم (شماره ۳) به مخزن بازگردانده می‌شود.

کار انجام شده در حرکت اولیه:

کار = نیرو × مسافت

$=0.251 \times 10^6 \times 0.225$

$= 56.5 \quad KN\ m$

کار = نیرو × مسافت

$= 0.4 \times 10^6 \times 0.025$

$= 110 \times 3 \quad KN\ m$

انرژی داده شده به پمپ:

در مرحله اولیه در مدت ۵ ثانیه

$$\text{انرژی} = 20\times10^{5}\times(\frac{340\times10^{-3}}{60})\times5 = 56.7 \quad KNm$$

در مرحله نهائی در مدت ۳۰ ثانیه:

$$\text{انرژی} = 350\times10^{5}\times340\times10^{3}\times30 = 5950 \quad KNm$$

کل انرژی در یک سیکل کاری:

$$\text{انرژی کل} \quad 56.7 + 5950 = 6006.7 \quad KNm$$

راندمان سیستم:

راندمان= کار مفید انجام شده/ انرژی کل داده شده $\approx 2.7\%$

نتایج بدست آمده از محاسبات فوق نشان می‌دهند که در این طرح می‌باید از یک الکتروپمپ با قدرت تقریبی ۲۰۰ KW با دبی ۳٤۰ لیتر در دقیقه با فشار ۳۵۰ bar استفاده کنیم و همانطور که توجه می‌نمائید بازده این طرح بسیار پائین یعنی ۲/۷٪ می‌باشد.

تمرین: در طرح فوق اگر به جای یک پمپ از دو پمپ یکی با دبی ۳۷/۸۱ و فشار ۳۵۰ و دیگری با دبی ۳۰۲/۲= ۳۷/۸ – ۳٤۰ و فشار ۲۰ استفاده کنیم مدار لازم را طراحی و راندمان آن را محاسبه نمائید. (جواب حدود ۲۳٪)

آنالیز سیستم‌های بادی تا حد زیادی شبیه به آنالایز سیستم‌های هیدرولیکی است با این تفاوت که این آنالیز بدلیل تراکم‌پذیر بودن سیال (هوا) بصورت دبی جرمی انجام می‌پذیرد و برای افزایش سرعت و جبران تراکم‌پذیری فشار سیستم را بالاتر در نظر می‌گیریم. در فصل ۹ سیستم‌های بادی را با جزئیات بیشتری بررسی می‌نمائیم.

فصل ۹

سیستم‌های پنوماتیک (بادی)

۹-۱ معرفی سیستم‌های پنوماتیکی:

در سیستم‌های بادی از هوای فشرده بعنوان سیال تحت فشار استفاده می‌کنیم. سیستم‌های بادی بلحاظ اصول و اجزاء تا حد زیادی شبیه به سیستم‌های هیدرولیکی می‌باشند با این تفاوت و مزیت که سیال مورد استفاده (هوا) همه جا در دسترس می‌باشد.

انجام یک عمل توسط محرک بادی با تخلیه هوای فشرده به محیط آزاد همراه است و بنابراین سیستم‌های بادی نیازی به خط برگشت سیال ندرند و سبک‌تر و ارزانتر از سیستم‌های هیدرولیکی تمام می‌شوند.

خطر آتش‌سوزی یکی از نقاط ضعف سیستم‌های هیدرولیکی و الکتریکی است که این خطر در سیستم‌های بادی وجود ندارد.

نشت روغن و آلودگی محیط از دیگر معایب سیستم‌های هیدرولیکی می‌باشد که این عیب در سیستم‌های بادی مصداق ندارد.

تقریباً کلیه عناصر مدارهای منطقی الکترونیکی نظیر گیت ها، فیلیپ فلاپ‌ها و ... بصورت پنوماتیکی نیز قابل ساخت می‌باشند و از این بابت امکانات وسیعی در اختیار طراحان مدارهای کنترل قرار می‌گیرد. موتورهای بادی ساده، سبک و ارزان هستند و کنترل سرعت در آنها به سادگی و ارزانی میسر است. همچنین نیازی به مدارهای حفاظتی اضافه بار ندارند و می‌توانند تا توقف کامل اضافه بار شوند.

موتورهای کوچک و پرقدرت و با دور زیاد بصورت بادی قابل ساخت هستند و در ماشین‌های مته کوچک از جمله مته دندان پزشکی کاربرد فراوان دارند.

ذخیره هوای فشرده در مخازن بزرگ امکان دسترسی به نیروهای عظیم لحظه‌ای را فراهم می‌سازند و این امر بسیار آسان‌تر و ارزانتر از سیستم‌های الکتریکی و حتی هیدرولیکی صورت می‌پذیرد.

تعمیر، نگهداری و سرویس سیستم‌های بادی آسان‌تر است و نیاز به متخصص‌های کمتری نسبت به سیستم‌های هیدرولیکی و الکتریکی دارد. همچنین آب‌بندی‌ها و لقی‌ها (Clearance) در سیستم‌های بادی ساده‌تر از سیستمهای هیدرولیکی می‌باشد.

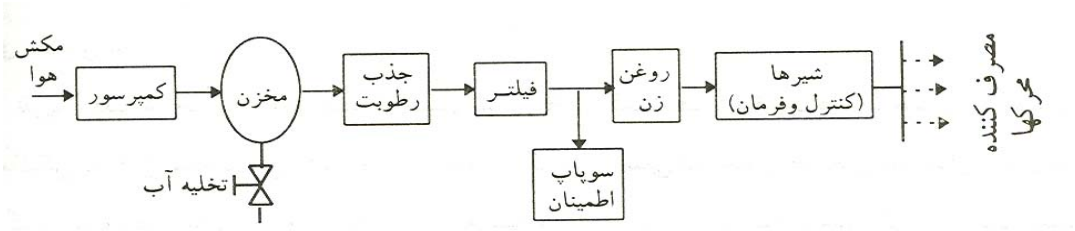
ویژگی‌های فوق موجب گردیده‌اند تا سیستم‌های بادی بطور گسترده در صنعت و مخصوصاً صنایع نفت و گاز، شیمی و پتروشیمی وصنایع غذائی مورد استفاده قرار گیرند.

در سیستم‌های بادی تراکم‌پذیر بودن سیال (هوا) موجب کندی و بروز رفتارهای غیرخطی می‌شود. همچنین صدای تخلیه هوای فشرده موجب ایجاد سر و صدا و آلودگی صوتی در محیط‌های صنعتی می‌گردد.

آنالیز سیستم‌های بادی شبیه به آنالیز سیستم‌های هیدرولیکی است با این تفاوت که بدلیل تراکم‌پذیر بودن سیال (هوا) این آنالیز بصورت دبی جرمی انجام می‌پذیرد. معمولاً برای افزایش سرعت و جبران تراکم‌پذیری، فشار تغذیه سیستم‌های بادی را حتی‌الامکان بالا در نظر می‌گیرند.

۹-۲ تجهیزات اصلی در سیستم‌های پنوماتیکی:

شکل (۹-۱) اجزاء اساسی یک سیستم توزیع هوای فشرده را نشان می‌دهد، بدیهی است با توجه به نوع و شرایط کار ممکن است قسمت‌هائی به این نمایش اضافه یا کم شوند.



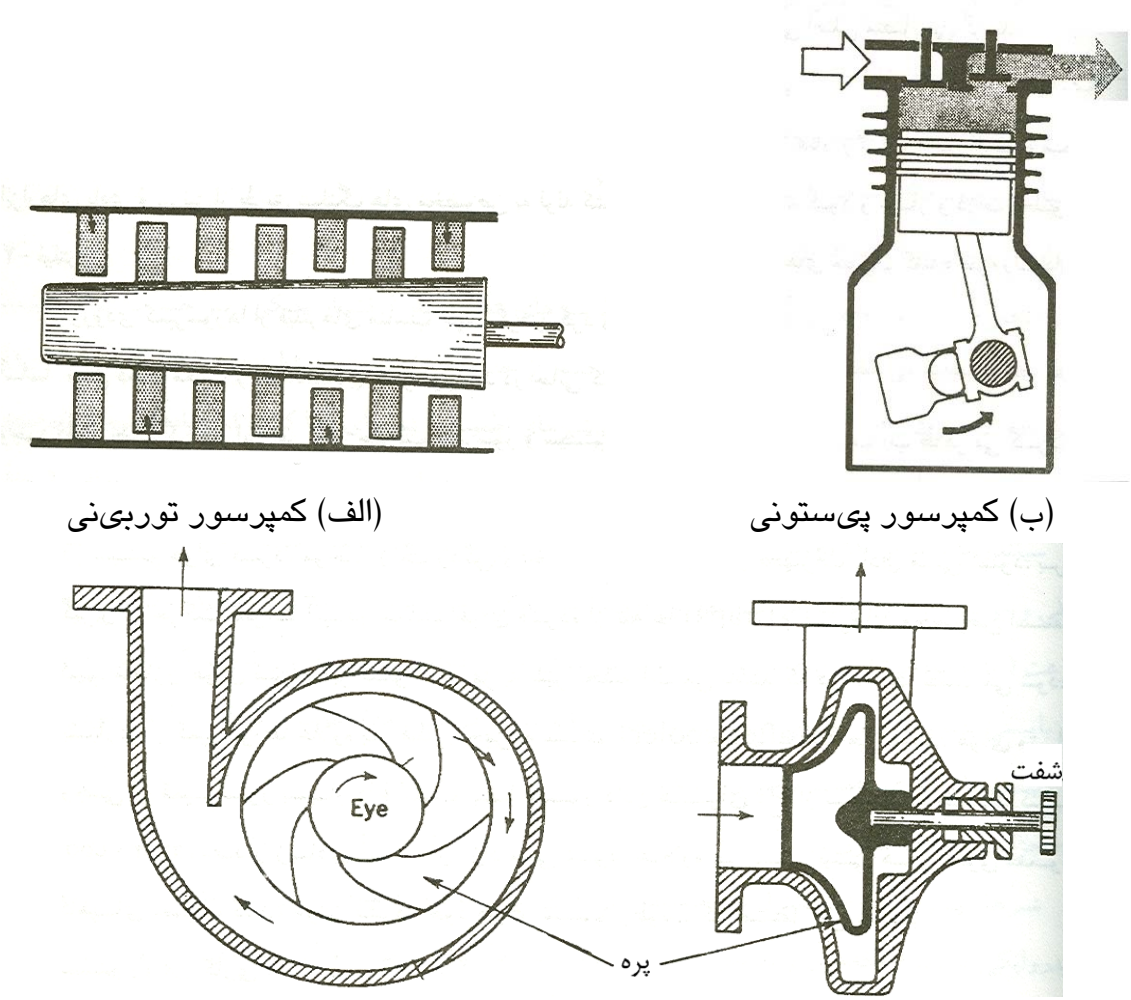
شکل (۹-۱) تجهیزات اصلی در سیستم‌های بادی

با توجه به شکل (۹-۱) اجزاء اساسی یک سیستم پنوماتیکی عبارتند از:

۱- کمپرسور هوا:

وظیفه کمپرسور تهیه هوای فشرده می‌باشد. کمپرسور از طریق دهانه ورودی هوا را از محیط اطراف می‌مکد و تحت فشار تنظیم شده‌ای به خروجی (مخزن) ارسال می‌دارد. کمپرسورها انواع و اقسام گوناگون دارند و سه نوع اصلی آنها عبارتند از: کمپرسورهای پیستونی، کمپرسورهای پره‌ای و کمپرسورهای توربینی.

کمپرسورهای پیستونی در مصارف کم و متوسط استفاده می‌شوند و کمپرسورهای توربینی در مصارف زیاد و فشارهای بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند. شکل (۹-۲) ساختمان کلی سه نوع کمپرسور را نشان می‌دهد.



شکل (۹-۲). انواع کمپرسور

۲- مخزن:

هوای فشرده در مخزن ذخیره می‌گردد. استفاده از مخزن امکان ذخیره انرژی را به آسانی فراهم می‌آورد و بدین ترتیب می‌توان به مصرف‌های لحظه‌ای بزرگ پاسخ داد. بعلاوه در کار مداوم (یا زیر بار بودن همیشگی) کمپرسور نیز صرفه‌جوئی می‌گردد. حجم و نوع مخازن بر حسب فشار و میزان مصرف سیستم متفاوت می‌باشند. همچنین مخازن نیز سیستم‌های حفاظتی و ملحقات مخصوص به خود را دارند.

۳- لوله‌های ارتباطی:

هوای فشرده از طریق لوله‌کشی در دسترس مصرف کننده‌های مختلف قرار می‌گیرد. بدین منظور معمولاً از لوله‌های گالوانیزه و یا لوله‌های سیاه استفاده می‌شود. در محل‌های اتصال به

مصرف‌کننده نیز گاهی از لوله‌های مسی و یا لاستیکی و پلاستیکی استفاده می‌گردد. مصرف‌کننده‌های متحرک مانند ابزارهای بادی و ... نیز از طریق شیلنگ‌های مخصوص به لوله کشی اصلی متصل می‌گردند.

٤- فیلتر ها:

در ورودی کمپرسورها از فیلترهای مناسب جهت گرفتن گرد و غبار و ذرّات معلق استفاده می‌شود. اساساً محل دهانه مکش (Sunction) کمپرسور باید در جائی که گرد و غبار و ذرّات معلق کمتری وجود دارند نصب گردد و این امر برای حفاظت کمپرسور و سیستم‌های مصرف کننده ضرورت دارد. با این وجود بر حسب محیط کار می‌باید از فیلترهای مناسب استفاده نمود.

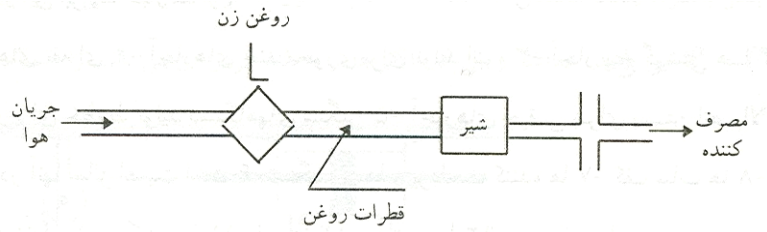
٥- فیلترهای آب:

هوای محیط دارای رطوبت است. رطوبت در هوای فشرده بصورت ذرّات آب ظاهر می‌گردد. وجود آب در سیستم هوای فشرده موجب زنگ زدگی و اخلال در کار ادوات و تجهیزات بادی می‌شود. برای جلوگیری از حرکت قطرات آب در سیستم هوای فشرده از تله‌ها (Traps) و فیلترهای مخصوص استفاده می‌کنیم. مخازن هوای فشرده نیز معمولاً مجهز به شیر تخلیه آب می‌باشند که در ته آنها نصب می‌شود.

بسیاری از کمپرسورها علاوه بر فیلترها مجهز به سیستم (After-Cooler) نیز می‌باشند. هوای متراکم خروجی از کمپرسور بسیار داغ است. با عبور دادن هوای داغ از سیستم خنک کننده(After-Cooler) مقدار زیادی آب از آن آزاد می‌شود. علاوه بر پیش‌بینی‌های فوق معمولاً دستگاه‌های مصرف کننده هوای فشرده خود دارای سیستم رطوبت گیر مستقل می‌باشند.

٦- سیستم روغن کاری:

برای جلوگیری از استهلاک و همچنین عملکرد درست و روان ادوات و تجهیزات بادی، این تجهیزات می‌باید روغن‌کاری شوند. بسیاری از سیستم‌های هوای فشرده مجهزبه سیستم روغن کاری اتوماتیک می‌باشند. در این سیستم‌ها روغن به هوای فشرده تزریق می‌شود و بدین ترتیب کلیه قطعات مصرف‌کننده هوای فشرده، بطور خودکار روغن کاری می‌گردند. شکل (۹-۳) یک طرح ساده و روغن زنی را نشان می‌دهد. بعضی از تجهیزات نیز دارای سیستم روغن کاری مستقل می‌باشند.



شکل (۹-۳) سیستم روغن کاری

۷- سوپاپ‌ها و شیرهای اطمینان

فشار هوا در قسمت‌های مختلف توسط شیرهای تنظیم فشار (فشار شکن) بر حسب نیاز تنظیم می‌گردد. با این وجود گاهی ممکن است فشار از حد مجاز بالاتر رود و خطراتی را ایجاد نماید. برای جلوگیری از افزایش بیش از حد فشار از شیرهای اطمینان (شیرهای رها کننده) استفاده می‌شود. شیر اطمینان بر روی فشار مجاز تنظیم می‌گردد و در صورت افزایش بیش از حد، باز می‌شود و هوای فشرده را به محیط خارج تخلیه می‌کند.

۸- اجزاء و ادوات قدرت:

سیلندرها و موتورها مهمترین ادوات تولید کننده نیرو و حرکت می‌باشند. سیلندرها برای تولید حرکت خطی و موتورها برای تولید حرکت دورانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. رابطه بین فشار، نیرو، دبی وسرعت (یا جابجائی) مشابه با روابط سیستم‌های هیدرولیکی است با این تفاوت که دبی حجمی می‌بایستی بصورت دبی جرمی (وزنی) در نظر گرفته شود. همچنین ملاحظات مربوط به ثابت بودن دما در سیستم‌های بادی اهمیت بیشتری دارند.

۹- اجزاء وادوات کنترل:

شیرها مهمترین ادوات کنترل در سیستم‌های بادی می‌باشند و به همان صورت که در سیستم‌های هیدرولیکی دیدیم نامگذاری و نمایش داده می‌شوند. شیرها انواع و اقسام و کاربردهای گوناگون دارند.

گیت‌های منطقی (AND, OR, ...) و مدارهای حافظه‌دار (Flip-Flap) بادی نیز از ادوات بسیار متداول در سیستم‌های کنترل پنوماتیکی می‌باشند.

امروزه در صنعت علاوه بر کاربردهای هدایت و کنترل، در ابزارهای بادی نیز از هوای فشرده بسیار استفاده می‌شود و این استفاده وسیع بدلیل مزایای سیستم‌های بادی می‌باشد که قبلاً به آنها اشاره نمودیم. نمونه‌ای از این ابزارها عبارتند از:

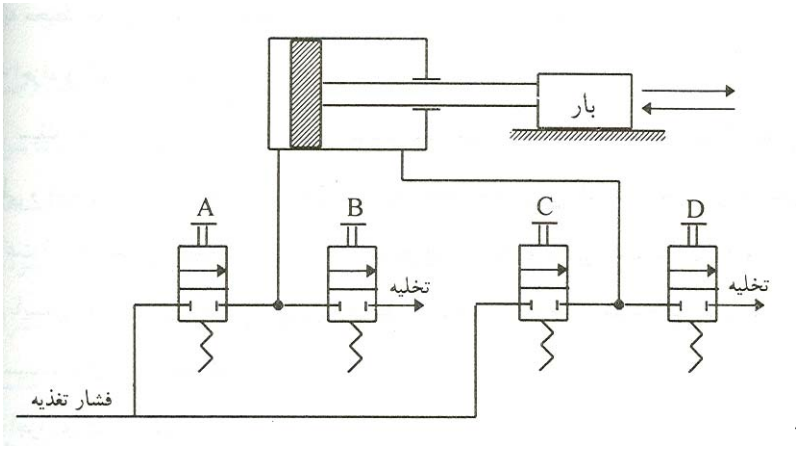
۱- آچارهای تقه‌ای ۲- آچارهای چند محوری برای تولید انبوه ۳- آچار پیچ گوشتی‌ها ٤- آچارهای پرگشتاور برای خطوط تولید دستگاه‌های سنگین ٥- آچارهای چپقی برای بستن

اتصالاتی که دقت گشتاور در آنها حائز اهمیت است ٦- سنگ زن‌ها و پرداخت کننده‌ها ۷- کف ساب‌ها ۸- دریل‌ها ۹- قلاویز زنها ۱۰- چکش‌ها ۱۱- اره‌ها ۱۲- ورق‌ها ۱۳- پرچ کن‌ها و ... .

همچنین در معادن نیز در سیستمهای تزریق آب فشرده و بسیاری کاربردهای دیگر از هوای فشرده استفاده می‌شود.

در جدول (۹-۱) پاره‌ای از علائم و اختصارات که در سیستم‌های پنوماتیکی استفاده می‌شوند آمده است. این علائم بطور مشابه در سیستم‌های هیدرولیکی نیز کم و بیش مورد استفاده قرار می‌گیرند و بنابراین یادگیری آنها مفید خواهد بود.

مثال: شکل (۹-٤) مدار کنترل حرکت یک جک پنوماتیکی را نشان می‌دهد.

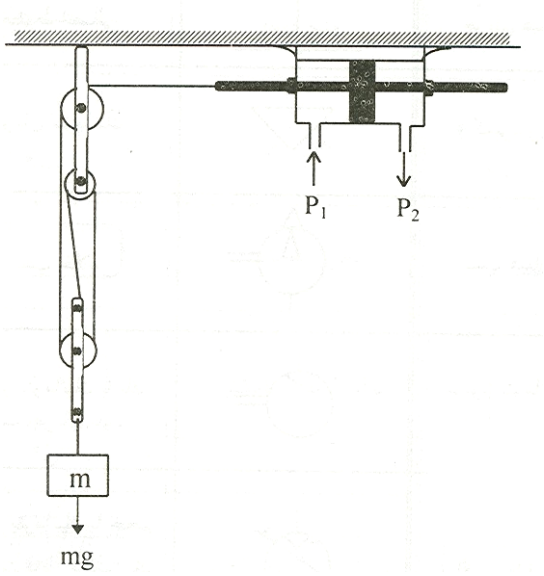


شکل (۹-۴) مدار کنترل حرکت جک بادی

در این مدار از چهار شیر ۲/۲ استفاده نموده‌ایم. برای حرکت بار به سمت راست، شیر A و D عمل می‌کنند. در این حال شیر A فشار تغذیه را به سمت چپ پیستون هدایت می‌کند و شیر D سمت راست پیستون را به محیط متصل می‌سازد. این کار موجب می‌گردد تا هوای فشرده موجود در سمت راست پیستون تخلیه شده و امکان حرکت پیستون به سمت راست فراهم شود. با تنظیم میزان بازشدگی شیر D میتوان سرعت حرکت پیستون را تنظیم نمود. همچنین می‌توان یک حالت فنری و سفتی در حرکت پیستون به راست یا چپ ایجاد کرد. حرکت پیستون به سمت چپ نیز با روش مشابه صورت می‌پذیرد.

مثال:

در بالابر پنوماتیک شکل (۹-۵) مساحت پیستون محرک ۱۰۰ سانتی متر مربع و فشار P_1- $P_2 = 70^{psi}$ می‌باشد. حداثر وزنی که بالابر قادر به بلند کردن آن می‌باشد را حساب کنید:



شکل (۹-۵) بالابر بادی با مکانیزم‌های مربوطه

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 70 \ \frac{lb}{in^2}(psi)$$

$$\Delta P = 48.26 \times 10^4 \ \ N/m^2$$

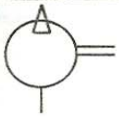
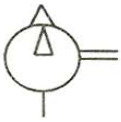
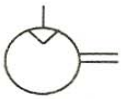
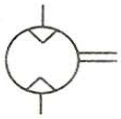
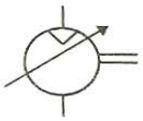
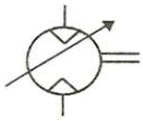
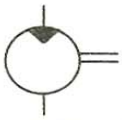
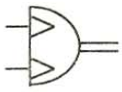
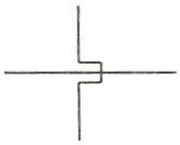
با توجه به تحمل وزن توسط سه رشته سیم:

$$W = 3 \times A \times \Delta P$$

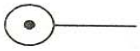
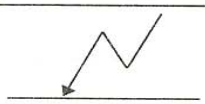
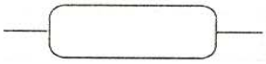
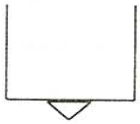
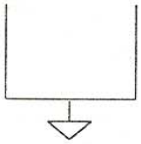
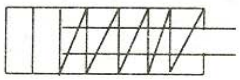
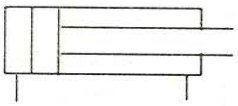
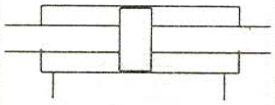
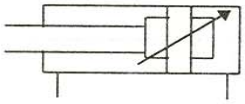
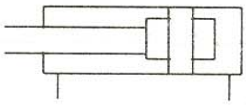
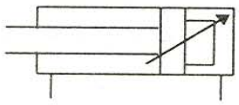
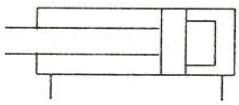
$$W = 1.4 \times 10^4 \qquad \text{نیوتن}$$

$$m = 1.4 \qquad \text{تن}$$

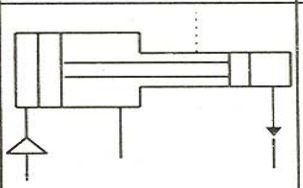
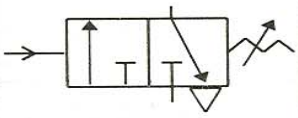
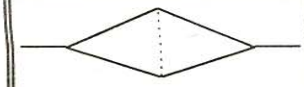
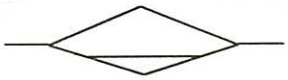
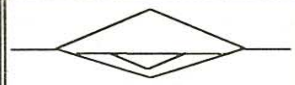
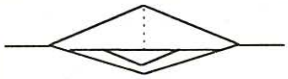
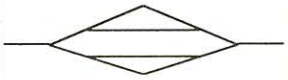
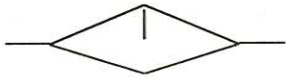
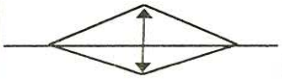
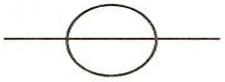
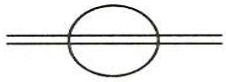
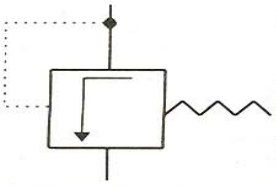
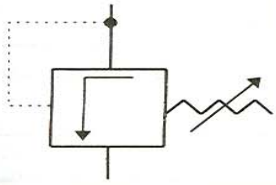
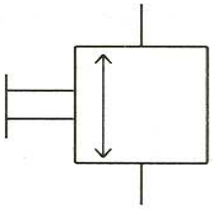
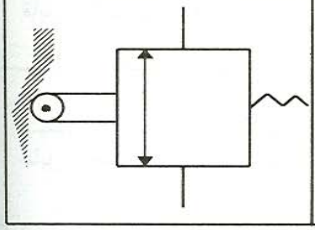
جدول (۹-۱) علائم و قراردادهای مدارهای پنوماتیکی

معنی	علامت	معنی	علامت
خط اصلی	———	خط تخلیه	.....
خطوط اتصالی		جریان هیدرولیکی	
جریان پنوماتیک		کمپرسور هوا	
پمپ خلاء		پمپ هیدرولیکی	
موتور پنوماتیک با یک جهت جریان ثابت		موتور پنوماتیک با دو جهت جریان ثابت	
موتور پنوماتیک با حجم تراکمی قابل تنظیم، یک جهت جریان		موتور پنوماتیک با حجم تراکمی قابل تنظیم، دو جهت جریان	
موتور هیدرولیکی		موتور پنوماتیک با حوزه نوسانی محدود	
خط سیگنال	- - - - - -	خط سیگنال	- - - - - -
تقاطع خطوط جریان		عبور خطوط جریان از روی هم	

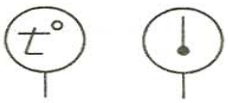
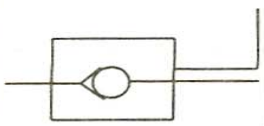
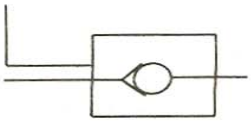
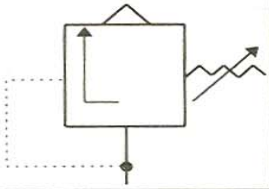
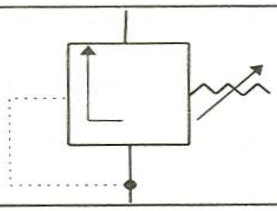
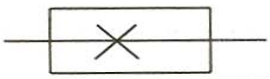
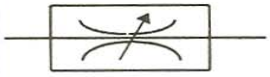
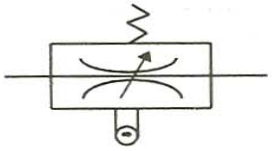
علائم و قراردادهای مدارهای پنوماتیکی ادامه جدول (۹-۱)

معنـی	علامت	معنـی	علامت
منبع تغذیه		خط جریان خروجی	
مسدود بودن نقطه اتصال فشار		منبع فشار	
خط قابل انحناء		خط برق	
نقاط تخلیه		مخزن پنوماتیك	
لوله بدون آبکش		لوله با اتصال آبکش	
سیلندر یك کاره ، حرکت برگشت توسط نیروی خارجی		سیلندر یك کاره ، حرکت برگشت توسط فنـــر	
سیلندر دو کاره ، با میله پیستون یکطرفه		سیلندر دو کاره ، با میله پیستون دو طرفه	
سیلندر با ضربه گیر قابل تنظیم دوطرفه		سیلندر با ضربه گیر غیر قابل تنظیم دوطرفه	
سیلندر با ضربه گیر قابل تنظیم یکطرفه		سیلندر با ضربه گیر غیرقابل تنظیم یکطرفه	

علائم و قراردادهای مدارهای پنوماتیکی ادامه جدول (۹-۱)

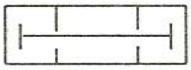
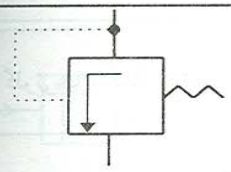
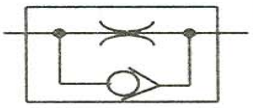
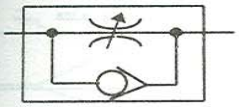
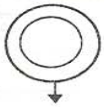
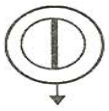
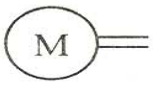
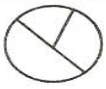
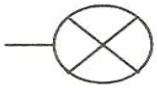
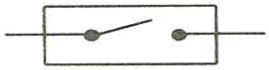
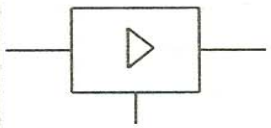
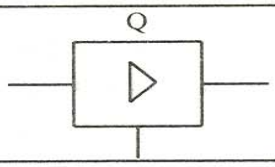
معنی	علامت	معنی	علامت
تشدید کننده فشار برای هوا و مایع		شیر تابع فشار با تخلیه قابل تنظیم	
فیلتر		آبگیر با کار انداز دستی	
آبگیر با تخلیه اتوماتیک		فیلتر با آبگیر اتوماتیک	
خشک کن		روغن زن	
خنک کننده		شدت جریان سنج	
اتصال دورانی یک خطه		اتصال دورانی دو خطه	
شیر تنظیم فشار غیر قابل تنظیم		شیر تنظیم فشار قابل تنظیم	
شیر گلوئی قابل تنظیم با کار انداز دستی		شیر گلوئی قابل تنظیم با کار مکانیکی برگشت فنر	

علائم و قراردادهای مدارهای پنوماتیکی — ادامه جدول (۹-۱)

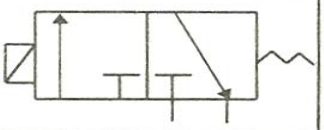
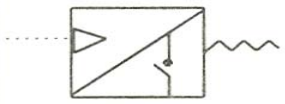
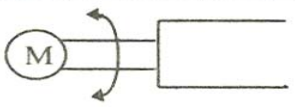
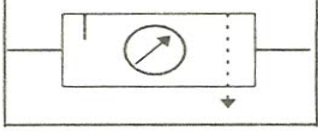
معنـی	علامت	معنـی	علامت
شیر گلوئی با تنگنای ثابت		شیر دیافراگمی با تنگنای ثابت	
شیر قطع و وصل		مانومتر فشار سنج	
فشار سنج اختلاف فشار		حرارت سنج (ترمومتر)	
شیر با مانع برگشت بدون فنـر		شیر با مانع برگشت با فنـر	
شیر با مانع برگشت و پیلوت کنترل		شیر با مانع برگشت و پیلوت کنترل	
شیر محدود کننده فشار قابل تنظیم		شیر تابع فشار قابل تنظیم	
شیر گلوئی		شیر دیافراگمی	
شیر گلوئی قابل تنظیم چنیـن شیرهائـی بـا مقطع تنگنای قابل تنظیم میتوانند شدت جریان راکنترل کنند		شیر گلوئی با کارانداز مکانیکی برگشت در مقابل فنر، از مزایای این شیر نصب مستقیم برروی سیلندر می باشد	

علائم و قراردادهای مدارهای پنوماتیکی

ادامه جدول (۹-۱)

معنی	علامت	معنی	علامت
شیر دو فشاره		شیر تابع فشار	
شیر کنترل جریان با عبور جریان ثابت از یك جهت		شیر کنترل جریان با کنترل قابل تنظیم	
وصل		قطع	
قطع / وصل		وصل اتوماتیك	
الکتروموتور		عملیات هیدرولیکی	
عملیات پنوماتیکی		عملیات مکانیکی	
عملیات الکتریکی		نشان دهنده فشار	
شدت جریان سنج		کلید برق	
تقویت کننده		تقویت کننده شدت جریان	

علائم و قراردادهای مدارهای پنوماتیکی ادامه جدول (۹-۱)

معنـی	علامت	معنـی	علامت
تبدیل کننده الکتریك - پنوماتیك		تبدیل کننده پنوماتیك - الکتریك	
الکترو موتور با حرکت دورانی دائمی		واحد مراقب شامل: فیلتر، شیرتنظیم فشار، مانومتر و روغن پاش	

فصل ۱۰

زمینه‌های جدید در کنترل صنعتی

در فصول گذشته با اصول و اجزاء اساسی در کنترل صنعتی آشنا شدیم. فراگیری مطالبی که گفته شد برای مهندسین کنترل و تمامی کسانی که با طراحی و یا تعمیرات سیستم‌های صنعتی سروکار دارند امری لازم است.

پیشرفت‌های علم و فن‌آوری موجب تحول و پیشرفت در عرصه‌های مختلف زندگی انسان گردیده است. این پیشرفت‌ها از یک طرف زندگی انسان را متحول ساخته‌اند و از طرف دیگر موجبات بروز تحولاتی جدید را در سایر علوم فراهم آورده‌اند. تحول و پیشرفت در یک علم به نوبه خود زمینه پیشرفت در علوم دیگر را فراهم می‌سازد و این رابطه متقابل رشد و شکوفائی تصاعدی علوم و فن‌آوری را بدنبال دارد.

امروزه اصول و اجزاء کنترل صنعتی نیز از پیشرفت‌های علوم و فن‌آوری بی نصیب نمانده و دستخوش تحولات و پیشرفت‌های چشمگیری شده است. این پیشرفت‌ها از یک طرف موجب افزایش کمی تولیدات صنعتی گردیده‌اند و از طرف دیگر با بکارگیری روش‌های و امکانات جدید کیفیت و مرغوبیت محصولات را افزایش داده‌اند.

بنابراین استفاده از روش‌ها و امکانات جدید، زمینه‌ای برای رقابت مراکز صنعتی و تولیدکنندگان فراهم نموده است بطوریکه هم اکنون اکثر تولیدکنندگان مایل به استفاده از روش‌ها و ماشین آلات جدید می‌باشند. در کشور ما نیز صنایعی که اخیراً شروع بکار کرده‌اند بطور گسترده از زمینه‌های جدید در کنترل صنعتی استفاده نموده‌اند. در فصل حاضر اشاره کوتاهی به این زمینه‌ها می‌نمائیم.

۱۰-۱ روبوت‌های صنعتی:

در سال ۱۸۰۱ وقتی اولین ماشین بافندگی قابل برنامه‌ریزی با کارتهای سوراخ شده اختراع گردید در واقع اولین گام در جهت ساخت و بکارگیری روبوت‌ها نیز بر داشته شدند. در سال‌های بعد عده‌ای به فکر ساخت ماشین‌های تراش قابل برنامه‌ریزی به روش فوق افتادند و در این راه طرح‌هائی را ارائه نمودند. در سال ۱۹۲۱ در یک فیلم سینمائی تخیلی از کلمه ربوتا (Robota) استفاده گردید. روبوتا کلمه‌ای با ریشه چک و به معنی کارگر یا مستخدم است، و در آن فیلم به یک انسان مصنوعی گفته می‌شد. از آن پس کلمه ربوت اصطلاحی معمول برای

انسان‌های مصنوعی گردید و در صنعت نیز گاهی ماشین‌های قابل برنامه‌ریزی را روبوت می‌نامیدند.

تا سال‌های ۱۹۶۰ پیشرفت و تحول چشمگیری در ساخت ماشین‌های قابل برنامه‌ریزی ایجاد نشد و مقارن این سالها بود که صنعت ادوات نیمه هادی و میکروالکترونیک دستخوش تحولاتی عظیم گردید و همزمان با روی کار آمدن میکروپروسسورها، ماشین‌های قابل برنامه‌ریزی نیز رشد و توسعه روز افزونی یافتند ومقدمات پیدایش روبوت‌های امروزی فراهم گردید.

هم اکنون روبوت‌هائی با قابلیت‌های جالب اختراع گردیده است. روبوت‌هائی با حواس بینائی، شنوائی و حتی لامسه ساخته شده و در عرصه‌های مختلف از جمله صنعت بکار گرفته می‌شوند. کمپانی‌های مشهوری با تخصص ساخت روبوت‌های صنعتی مشغول به کار می‌باشند و روبوت‌هائی با قابلیت‌های متنوع از قبیل جوشکاری، رنگ آمیزی، مونتاژ و جابجائی قطعات و ... تولید می‌کنند.

هنوز یک تعریف دقیق علمی و قابل قبول همگان برای یک روبوت ارائه نگردیده است اما تعریفی که در زیر ارائه می‌گردد طرفداران بیشتری دارد.

" یک روبوت ماشینی است قابل برنامه‌ریزی مجدد (Reprogrammable) که می‌تواند یک یا چند حرکت را شبیه به انسان انجام دهد. "

کلمات اصلی در تعریف فوق، قابل برنامه‌ریزی مجدد بودن و حرکت شبیه به انسان می‌باشد.

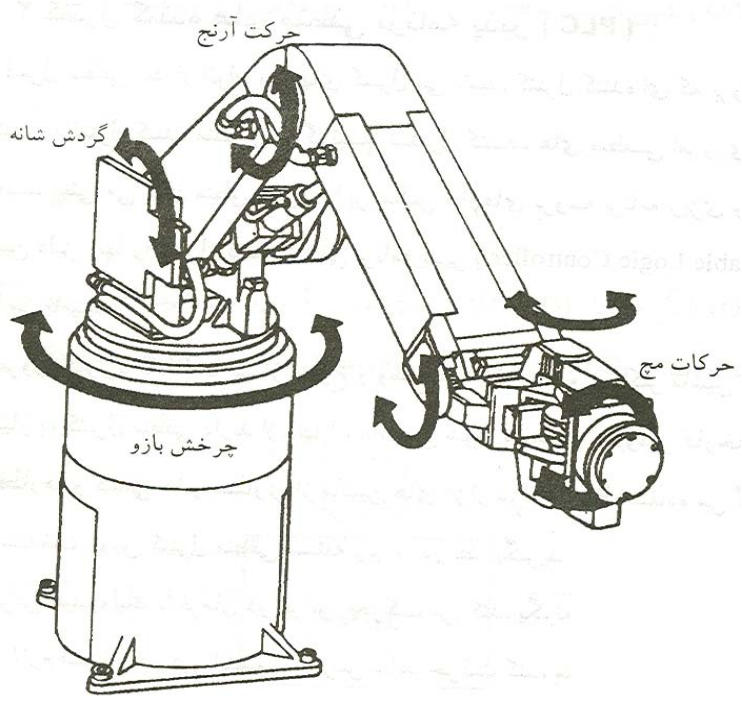
علاوه بر پیشرفت‌های علمی و صنعتی عوامل دیگری نیز موجب کاربرد یا عدم کاربرد روبوت‌ها در صنعت می‌باشند. از جمله این عوامل می‌توان به انگیزه‌های نظامی، اقتصادی، کارگری،اجتماعی و حتی ایدئولوژیکی اشاره نمود.

کشور ژاپن در حال حاضر بلحاظ استفاده از روبوت‌ها در صنعت اولین مقام را حائز است و بعد از آن می‌توان از آمریکا و آلمان نام برد. نکته جالب توجه اینکه کشوری مانند انگلستان به دلیل مسائل کارگری در این زمینه پیشرفت چندانی ننموده است.

روبوت‌های صنعتی معمولاً بصورت بازو (Robot-Arm) ساخته می‌شوند. بدیهی است که یک بازو می‌تواند برای جابجائی اجسام یا مونتاژ قطعات و یا جوشکاری و رنگ‌آمیزی مورد استفاده قرار گیرد. به همین دلیل طرح قسمت انتهائی بازو (End of Arm) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و امکان اتصال ابزارهای مختلف به روبوت را فراهم می‌آورد.

شکل(۱۰-۱) یک بازوی روبوت ساخت کمپانی Milacrom را نشان می‌دهد.

شرایط کاری و محیطی که روبوت در آنجا انجام وظیفه می‌کند از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد و ساختمان روبوت را تحت تأثیر قرار می‌دهد. امروزه روبوت‌هائی برای کار در محیط‌های خطرناک و آلوده ساخته شده‌اند.



شکل (۱۰-۱) بازوی روبوت مفصل دار Milacrom

یک روبوت مانند هر ماشین دیگری دارای مشخصات مخصوصی است. بعضی از مشخصات روبوت‌های صنعتی عبارتند از:

۱- واحد نیرو Power-unit

۲- دقت

۳- تکرارپذیری Repeatability

٤- فضای کار Work-Envelope

٥- درجه آزادی Degree of freedim

٦- اتصال ابزار به مچ

۷- سرعت Speed

۸- ظرفیت بار Pay-Load

۱۰-۲ کنترل کننده‌های منطقی برنامه پذیر (PLC):

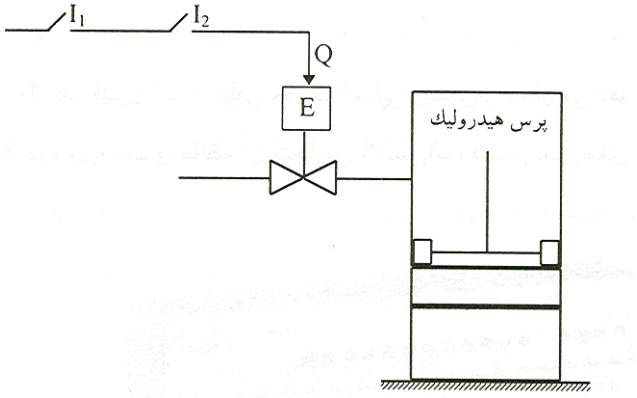
کنترل منطقی یکی از انواع روش‌های کنترل می‌باشد. کنترل کننده‌ای که پروسه را به روش منطقی کنترل می‌کند، را کنترل کننده منطقی می‌گوئیم. کنترل کننده‌های منطقی امروزی قابل برنامه‌ریزی نیز می‌باشند یعنی می‌توان منطق کنترل را بر اساس نیازهای پروسه برنامه‌ریزی و در صورت نیاز تغییر داد. به همین دلیل آنها را کنترل کننده منطقی برنامه پذیر (Programmable Logic Controller) یا به اختصار PLC می‌نامیم.

امروزه کاربرد PLCها بسیار متنوع و وسیع گردیده است و در اکثر ماشین‌آلاتی که در سیکل کاری خود نیاز به کنترل منطقی دارند از آنها استفاده می‌شود. همچنین علاوه بر کارخانجات و مراکز صنعتی در انواع قطارها و کشتی‌ها و بسیاری از ماشین‌های ابزار نیز از PLC استفاده می‌گردد.

جهت شناخت روش کنترل منطقی مسئله زیر را در نظر بگیرید:

" یک پرس هیدرولیک با فرمان دو اپراتور حرکت می‌کند، بگونه‌ای که برای حرکت پرس فرمان هر دو اپراتور لازم است و در غیر اینصورت پرس نباید حرکت کند، مدار کنترل لازم را طرح نمائید."

مدار پیشنهادی مطابق شکل (۱۰-۲) می‌تواند باشد.



شکل (۱۰-۲). کنترل منطقی یک پرس هیدرولیک

در این مدار اپراتور اول از طریق پوش باتون I_1 (No) و اپراتور دوم باتون I_2(No) فرمان حرکت را صادر می‌کنند.

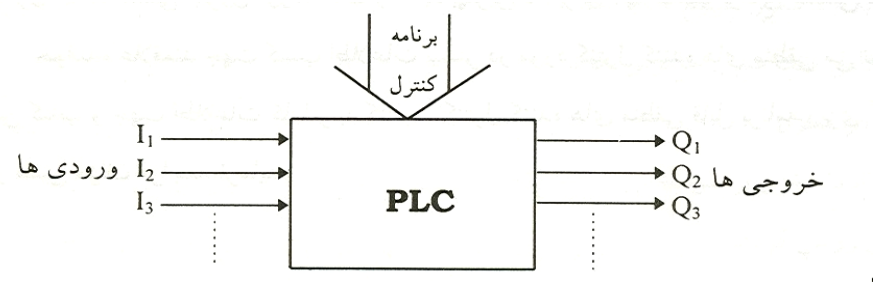
دقت نمائید مادامی که هر دو اپراتور فرمان حرکت را صادر ننمایند عنصر نهائی تحریک نخواهد شد و بعبارت دیگر فرمان حرکت (Q) ناشی از تابع منطقی "و" (AND) ورودی‌های I_1 و I_2 می‌باشد، یعنی می‌توانیم بنویسیم:

$$Q = I_2 \text{ (AND) } I_2$$

و یا:

$$Q = I_1 \hat{} I_2$$

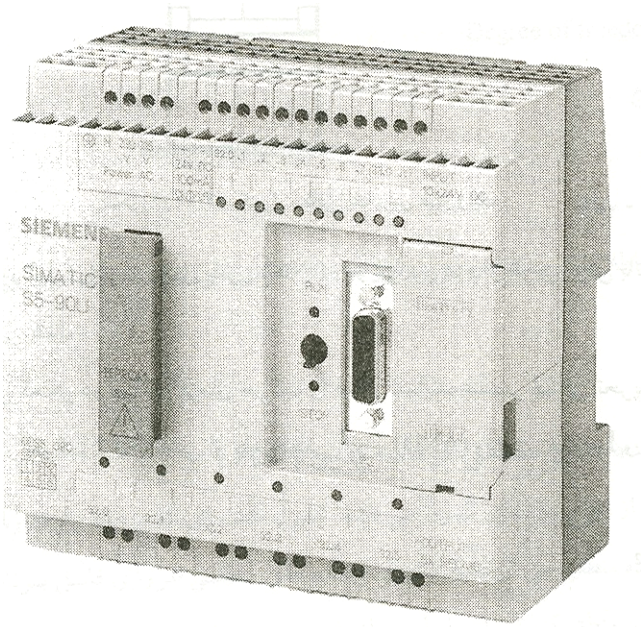
از آنجائیکه فرمان حرکت (Q) تابعی منطقی (AND) از ورودی‌های I_1 و I_2 می‌باشد، این کنترل را کنترل منطقی می‌گوئیم. با این توضیحات یک PLC امروزی را می‌توان مطابق شکل (۱۰-۳) نمایش داد:



شکل (۱۰-۳). نمایش کلی PLC

برنامه کنترل بصورت یک سری دستورالعمل‌های منطقی در حافظه PLC ضبط می‌گردد. PLC در حین کار ورودی‌ها را خوانده و بر اساس برنامه موجود، فرمان‌های خروج‌ها را محاسبه و به عنصر نهائی ارسال می‌دارد.

شکل (۱۰-٤) یک کنترل کننده منطقی ساخت کمپانی زیمنس را نشان می‌دهد. این کنترل کننده دارای ۱۰ ورودی و ٦ خروجی است و حافظه آن گنجایش ٤ کیلوبایت دستورالعمل‌های منطقی را دارد.

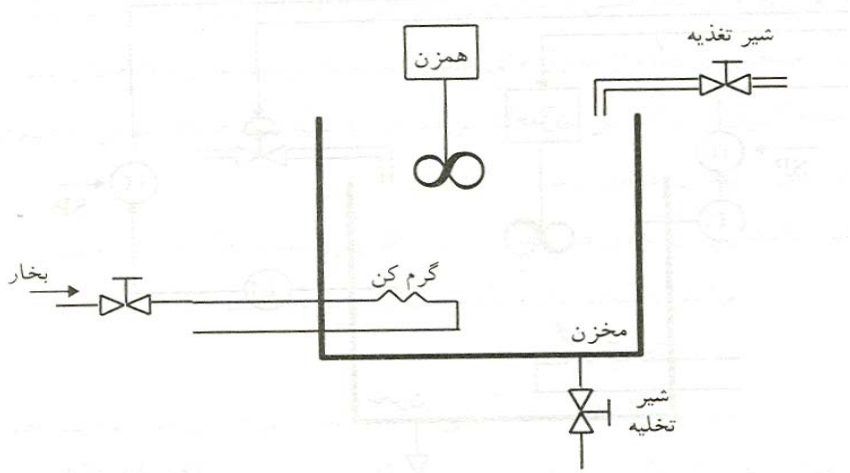


شکل (۱۰-۴). کنترل کننده منطقی S5-90 U ساخت زیمنس

کنترل کننده‌های منطقی امروزی دارای قابلیت‌های دیگری نیز هستند که آنها را از صورت فقط یک کنترل کننده منطقی، بیرون آورده است و شاید بهترین نام برای آنها کامپیوترهای صنعتی باشد.

۱۰-۳ سیستم‌های کنترل توزیع شده (Distributed Control Systems):

کنترل پروسه‌های بزرگ و پیچیده مسائل و مشکلات مخصوص به خود را دارد. بعنوان مثال شمار حلقه‌های کنترل در یک مجتمع پتروشیمی گاهی به بیش از یک هزار حلقه می‌رسد و در این حال رقم اندازه‌گیرها و عناصر نهائی از چند هزار نیز فراتر می‌رود. همچنین هر یک از این حلقه‌ها علاوه بر ارتباطات داخلی ممکن است با حلقه‌های دیگر نیز ارتباطاتی داشته باشد. در چنین مواردی حجم سیم کشی و مدارهای ارتباطی حلقه‌ها با یکدیگر (Interlocks) بسیار بالا می‌رود و هزینه زیادی را بخود اختصاص می‌دهد. بعنوان مثالی ساده، پروسه‌ای مطابق شکل (۱۰-۵) را در نظر بگیرید:



شکل (۱۰-۵) یک فرآیند نمونه در صنایع شیمیائی با خواسته‌های کنترلی مربوطه

خواسته‌های کنترلی در این پروسه به شرح زیر می‌باشند:

الف) گرم کن

۱- در صورتی که ارتفاع ماده در مخزن کمتر از حد مجاز باشد گرم کن نباید روشن شود.

ب) همزن

۱- با رسیدن دما به T_1 همزن شروع بکار کند.
۲- بعد از تخلیه کامل تانک همزن خاموش شود.

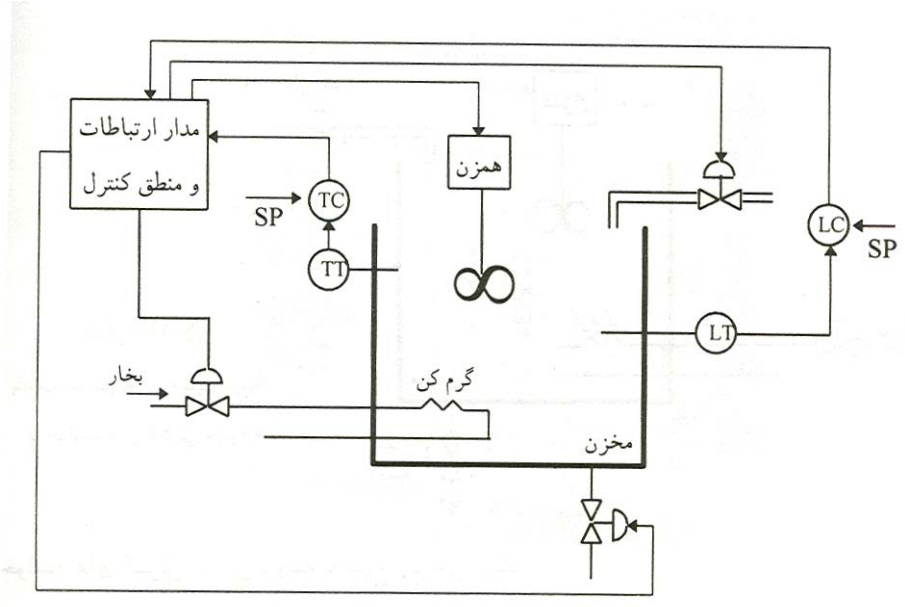
ج) پر و خالی کردن مخزن

۱- در شروع کار ابتدا مخزن پر شود.
۲- سپس گرم کن روشن گردد.
۳- آنگاه با رسیدن به دمای T_1 همزن شروع بکار کند.
٤- با رسیدن به دمای T_2 تخلیه تانک آغاز شود.
٥- تا تخلیه کامل مخزن، همزن روشن بماند.
٦- در صورت نیاز سیکل دیگری آغاز گردد.

در پروسه فوق با سه حلقه کنترل روبرو هستیم:

۱- حلقه کنترل گرم کن (دما). ۲- حلقه کنترل ارتفاع ماده. ۳- حلقه کنترل همزن.

طرح تجهیزاتی کنترل پروسه بصورت شکل (۱۰-٦) می‌تواند باشد:



شکل (۱۰-۶). طرح تجهیزاتی کنترل فرآیند (۱۰-۵)

در شکل (۱۰-٦) قسمتی که با نام مدار ارتباطات و منطق کنترل مشخص گردیده است خود شامل تعدادی رله یا مدارهای الکترونیکی است بگونه‌ای که ارتباطات خواسته شده بین حلقه‌های کنترل را برآورده می‌سازد. به جای این قسمت از یک PLC نیز می‌توان استفاده نمود.

حال فرض کنید علاوه بر خواسته‌های فوق بخواهیم تغییرات دما و ارتفاع ماده در مخزن را بطور روزانه و یا در هر شیفت کاری ثبت کنیم. همچنین ممکن است مخزن توسط مواد مختلف پر و خالی شود و خواسته باشیم آمار فوق را برای هر ماده بطور جداگانه ثبت نمائیم. برای اینکار نیاز به تعدادی ثبات (Recorder)و مدارات ارتباطی جدیدی می‌باشد.

ملاحظه می‌فرمائید که تأمین خواسته های فوق حتی در پروسه‌ای چنین کوچک تا چه اندازه پیچیده و پرهزینه خواهد بود. با توجه به این مثال می‌توان تصوری از پیچیدگی و هزینه کنترل یک مجتمع با دهها هزار اندازه‌گیر و عنصر نهائی بدست آورد.

سیستم‌های توزیع شده (Dcs) با توانائی‌های جالب خود مشکل پیچیدگی و هزینه مجتمع‌های بزرگ را حل می‌کنند. یک سیستم DCS را به عبارتی می‌توان یک شبکه کامپیوتری تصور نمود که با جمع آوری اطلاعات از اندازه‌گیرهای محلی و استفاده از مدول‌های کنترل کننده به طور نرم‌افزاری ارتباطات و منطق کنترل را تأمین می‌نماید و فرمان‌های لازم را به عنصر نهائی ارسال می‌دارد. توجه نمائید که استفاده از نرم‌افزار به جای سیم کشی و مدارهای ارتباطی (Interlocks) صرفه‌جوئی عظیمی در هزینه بدنبال خواهد داشت. همچنین استفاده از مدول‌های کنترل کننده با سرعت‌های بالا امکان استفاده از یک مدول جهت چندین حلقه کنترل را فراهم می‌سازد که این امر نیز به نوبه خود صرفه‌جوئی اقتصادی و کاهش پیچیدگی سخت‌افزاری را بدنبال خواهد داشت.

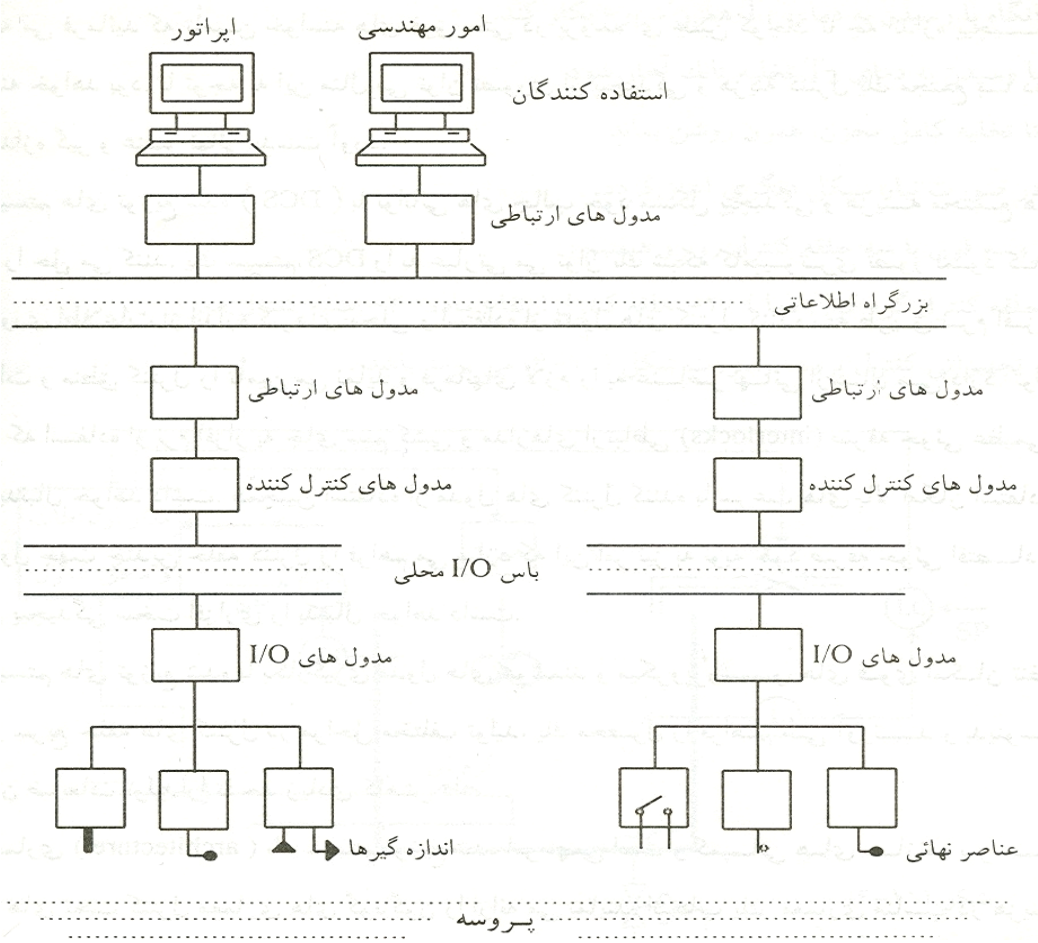
سیستم‌های توزیع شده با بکارگیری مدول‌های هوشمند و میکروپروسسورهای قوی امکان تنظیم دقیق و سریع حلقه‌های کنترل در مراحل مختلف تولید، یک محصول را فراهم می‌آورند و بدین وسیله می‌توان ضایعات تولیدرا تا حد زیادی کاهش داد.

معماری (Architecture) یک سیستم توزیع شده امر مهمی است و کمپانی‌های سازنده بر حسب پروسه‌های تحت کنترل معماری‌های گوناگون را ارائه می‌نمایند. انتخاب یک معماری مناسب در هزینه و مرغوبیت محصول تولید شده نقش بسزائی دارد. سیستم‌های توزیع شده همچنین به نرم‌افزارهای مورد استفاده حساسیت زیادی دارند و استفاده از نرم‌افزار مناسب سرعت، دقت و توانائی‌های سیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

در شکل (۱۰-۷) یک نمونه معماری ابتدائی از سیستم‌های توزیع شده نمایش داده شده است. وظایف قسمت‌های مختلف در این معماری بشرح زیر می‌باشد:

۱- مدل‌های I/O

وظیفه این قسمت گرفتن اطلاعات از ورودی‌ها یا ارسال آن به خروجی‌ها می‌باشد. برای اینکار گاهی لازم است اطلاعات از حالت آنالوگ به دیجیتال و یا برعکس تبدیل شود که این کار نیز در این قسمت صورت می‌پذیرد. کار دیگر مدول‌های I/O عمل بافر کردن و ایزولاسیون ورودی‌ها و و خروجی‌ها نسبت به سیستم DCS می‌باشد.



شکل (۱۰-۷). یک نمونه معماری ابتدائی از سیستم‌های توزیع

۲- باس‌های I/O محلی

اتصال مدول‌های I/O به کنترل کننده‌های از طریق این باس‌ها انجام می‌شود. باس‌های I/O محلی امکان اتصال گروه‌های ورودی- خروجی را به یک یا چند کنترل کننده فراهم می‌سازند و به بیان دیگر با مولتی پلکس کردن گروه‌های ورودی – خروجی با یک کنترل کننده می‌توان تعداد و هزینه کنترل کننده‌ها را پائین آورد.

۳- مدول‌های کنترل کننده

این مدول‌ها وظیفه متداول و معمول کنترل کننده‌ها در حلقه‌های کنترلی را بر عهده دارند و از آنجائیکه معمولاً دیجیتالی هستند، تنظیم و تصحیح آنها بصورت نرم‌افزاری انجام می‌گردد که این امر امکانات جالبی را فراهم می‌سازد. این کنترل کننده‌ها علاوه بر انواع کلاسیک می‌توانند از نوع منطقی (PLC) و یا فازی (Fazzy) و ... نیز باشند.

٤- بزرگراه اطلاعاتی

کلیه قسمت‌های یک سیستم DCS می‌توانند از طریق این بزرگراه (BUS) به قسمت‌های دیگر دسترسی و کسب اطلاع داشته باشد. این بزرگراه در واقع یک شبکه ارتباطی گسترده می‌باشد.

٥- ارتباطات استفاده کننده با سیستم

ارتباطات استفاده (User) با DCS می‌تواند بصورت اپراتوری، یعنی جهت نظارت و کنترل باشد و یا بصورت ارتباطات مهندسی، جهت تنظیم، بررسی‌های کنترل کیفی، تهیه آمار و ارقام و یا تعمیر و نگهداری باشد. این کار نیز از طریق ترمینال‌های استفاده کننده صورت می‌پذیرد.

معماری فوق همانطور که گفتیم طرح ابتدائی است و در سیستم‌های جدید به ندرت مورد استفاده قرار می‌گیرد.

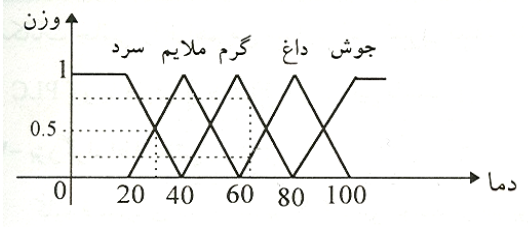
هدف ما دراین بخش صرفاً ارائه دیدی کلی از سیستم‌های DCS بود.

۱۰-۴ کنترل فازی (Fazzy-Control):

کنترل فازی بر پایه منطق فازی استوار است. نظریه منطق فازی نخستین بار توسط دانشمند ایرانی آقای لطفی زاده ارائه گردید. منطق فازی یکی از سه منطق (منطق ارسطوئی، منطق دیالتیک، منطق فازی) شناخته شده برای انسان امروزی است.

در منطق فازی یک شیء یا یک کمیت می‌تواند با ضرائب وزنی گوناگون، شیء و یا کمیت دیگری نیز باشد. مثلاً هرگاه مجموعه انسان‌های با قد بیش از دو متر را انسان‌های بلند قد و مجموعه انسان‌های کمتر از ۱/٥ متر را انسان‌های کوتاه قد تعریف می‌کنیم، آنگاه در مورد شخص با قد ۱/۷٥ متر چه می‌توان گفت؟ در منطق فازی این شخص با یک ضریب عضویت، جزء مجموعه بلندقدها و با ضریب دیگری عضو مجموعه کوتاه قدها می‌باشد.

در کنترل فازی کمیت‌ها بصورت عبارات و نه بصورت مقادیر دقیق بیان می‌شوند. بعنوان مثال فرض کنید دمای یک مخزن آبگرم بین مقادیر صفر تا ۱۰۰ درجه تغییر کند. نمایش فازی این کمیت (دما) می‌تواند بصورت شکل (۱۰-۸) باشد.

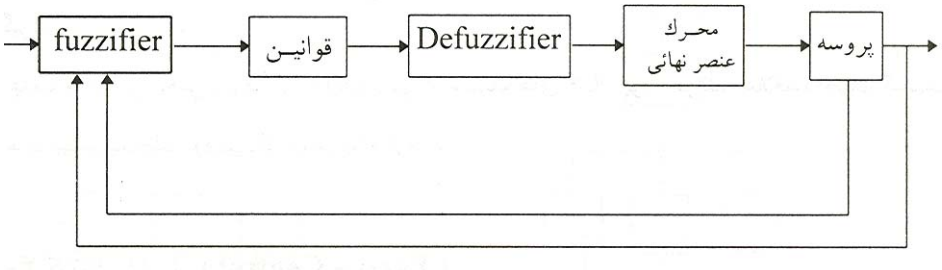


شکل (۱۰-۸) بیان کمیت دما به روش فازی

در اینجا دمای صفر تا صد درجه را به پنج مجموعه سرد، ملایم، گرم، داغ و جوش تقسیم کرده‌ایم.

فرض کنید در یک لحظه از زمان دمای دیگ ۳۰ درجه باشد. در نگرش فازی بجای آنکه بگوئیم دمای آب ۳۰ درجه است باید بگوئیم دما با ضریب ۰/۵ ملایم و با ضریب ۰/۵ سرد است. همچنین دمای ٦٥ درجه کمیتی با ضریب ۰/۷۵ گرم و با ضریب ۰/۲۵ داغ می‌باشد.

نمایش جعبه‌ای کلی یک سیستم کنترل به روش منطق فازی مطابق شکل (۱۰-۹) می‌باشد:



شکل (۱۰-۹) طرح کلی یک سیستم کنترل به روش فازی

در قسمت Fuzzifier اطلاعات (ورودی ها، خروجی ها، مقادیر اندازه‌گیری شده ...) به عبارات و قضاوت‌های فازی تبدیل می‌شوند سپس در قسمت قوانین (Rules) تصمیمات بر اساس قوانین مورد نظر اتخاذ می‌گردند آنگاه این تصمیمات مجدداً در قسمت Defuzzifier به فرمان‌های آنالوگ یا دیجیتال تبدیل شده و به محرک و عنصر نهائی اعمال می‌گردند.

امروزه کشور ژاپن در استفاده از کنترل فازی پیشتاز می‌باشد و از این روش در ساخت لوازم خانگی، سیستم‌های پرنده (مخصوصاً هلی کوپترها) و نیروگاه‌های گازی استفاده می‌کند. استفاده از کنترل فازی در ماشین‌های لباس‌شوئی موجب صرفه‌جوئی قابل توجه‌ای در مصرف آب و زمان شستشو می‌گردد.

یک کمپانی آلمانی از روش کنترل فازی در PLCهای کنترل کننده نیروگاه‌های بادی استفاده می‌نماید و بالاخره یک شرکت سازنده اتومبیل در آمریکا نیز از این روش در ساخت سیستم‌های دنده اتوماتیک استفاده می‌کند.

امروزه مدارات مجتمع و کامپیوترهای دیجیتال انجام عملیات فازی را بصورت عملیات جبری امکان پذیر ساخته‌اند و انتظار می‌رود در آینده نزدیک استفاده از کنترل فازی در صنعتی توسعه بیشتری یابد.

۱۰–۵ کنترل با شبکه‌های عصبی (Neural Networks):

امروزه شبکه‌های عصبی در کنترل، پردازش سیگنال ها، شناسائی سیستم ها، پردازش اطلاعات آماری و... کاربرد فراوان یافته است. قابلیت‌ها وسرعت بالای پردازش در شبکه‌های عصبی موجب کاربرد وسیع آنها در کنترل مخصوصاً کنترل سیستم‌های غیرخطی شده است.

۱۰–۶ کنترل آماری و اتفاقی:

بسیاری از سیستم هایی که در صنعت با آنها سروکار داریم ماهیتی اتفاقی دارند. مثلاً اغتشاشات اساساً ورودی‌هائی اتفاقی هستند که می‌توان خواص آماری آنها را (میانگین، واریانس و ...) تعیین نمود. در کنترل اتفاقی اصول و اجزاء کنترل با توجه به خواص آماری سیگنال‌ها و فرامین، تعیین می‌شود کنترل اتفاقی درسیستم‌های پرنده و موشک‌های پیشرفته کاربرد فراوان دارد.