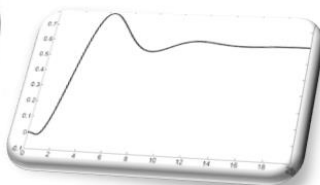
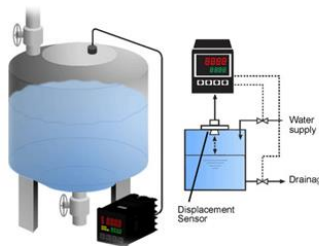


# کنترل PID به زبان آدمیزاد!

پیمان پربها



نگارش ۱۰



### چند کلامی به بهانه مقدمه کتاب

#### کنترل خوب یا کنترل بد؟ مسئله اینست!

آدم‌ها از گذشته‌های دور دوست داشتند فرمانروا باشند. چه جنگ‌ها که برای ارضای این حس آدمیزاد درنگرفت و چه فتنه‌هایی که به پا نشد. البته خیلی هم بی‌راه نبود! آدمی، کلاً سلطه‌طلبی در ذاتش بود! یک عده که دستشان می‌رسید تخت پادشاهی را گرفتند و بقیه هم اگر زورشان به نشان می‌رسید<sup>۱</sup>!] یک حکومت محلی کوچک در خانه‌شان راه می‌انداختند! یک عده هم بودند که دوست داشتند مخلوقات دست خودشان را به کارگیرند. این شد که ماشین‌ها ساختند و بعد یادش دادند که چطور دست‌به‌سینه، جلوی سازنده‌شان بیاستند! گاری‌هایی که تا دیروز با زور هول و یا ترکه پشت الاغ حرکت می‌کردند، تبدیل به ماشین‌هایی شدند که اول راه، مقصد را ازت می‌پرسند و بعد خودشان راه می‌افتند به سمت مقصد و آدمی مثل یک پادشاه پایش را می‌اندازد روی پایش و از مناظر اطراف لذت می‌برد! یا این که به جای اینکه به خودش زحمت بدهد خودش را به کلید لامپ برساند و خاموشش کند، مثل ارباب‌ها فریاد می‌زند “خاموش!” و لامپ خاموش می‌شود!

---

<sup>۱</sup> که البته این روزها بعید است!

حالا همه‌ی این‌ها که گفتیم برای چه بود؟! البته که اگر به عمق قضیه وارد شویم همین زندگی ماشینی مشکلاتی را به وجود آورده و چه‌بسا بعضی جاها نقش ارباب و رعیت هم عوض شده باشد! اما یادمان نمی‌رود که ماشینیزه کردن کارها یا درست‌ترش “خودکارسازی” کارها درواقع نوعی ابزارست و البته بازهم یادمان هست که ابزار به‌خودی‌خود، هدف و منش زندگی را تغییر نمی‌دهد. ابزار را اگر خوب استفاده کنی می‌شود یک قلب مصنوعی که در سینه یک پیرزن اجازه می‌دهد تا چند سالی بیشتر، بزرگ شدن نوه‌هایش را مشاهده کند و اگر بد استفاده کنی، می‌شود پیشرانه یک موشک بالستیک که به‌راحتی همان نوه‌ها را جلوی چشم پیرزن پری می‌کند! پس اگر ازتان پرسیدند که کنترل خوب است یا بد؟ شاید بهترین جواب این باشد که

**“بستگی دارد به این که نیت کنترل‌کننده چه باشد!”**

مقدمه را طولانی نمی‌کنم چون اسم این کتاب قرارست کتابچه باشد! این‌ها که گفتم برای این بود که بدانید آنچه در متن این کتاب (همان کتاب الکترونیکی!) می‌خوانید، با همه سادگی‌اش، اصول و مبنای همان

---

<sup>۲</sup> اگر فرصت کردید فیلم عصر جدید چارلی چاپلین را حتماً ببینید و اگر قبلاً دیده‌اید، دوباره ببینیدش. آنجایی که می‌خواهند به بهانه کاهش زمان ناهار خوردن کارگران، از یک دستگاه برای غذا دادن به آن‌ها استفاده کنند!

قلب مصنوعی یا موشک بالستیک است و بستگی دارد که درنهایت نیت خواننده<sup>۳</sup> از خواندن این کتاب چه باشد!

در مورد این کتاب، احتمالاً مطالب زیادی را قبلاً در کتاب‌های درسی و دانشگاهی‌تان دیده‌اید. هر کتابی را که باز کنید سرشار از مطالب علمی از انواع روش‌های کنترلی و محاسبات مربوط به آن است. اما چیزی که به نظرم رسید شاید با نوشتنش به دیگران کمکی کند، سادگی و خلاصه بودن مطالب است، به صورتی بتوانید در عرض یکی دو ساعت، روی مسائل اصلی و مهم مربوط به کنترل و لوپ‌های کنترلی مروری داشته باشید و بعدها هم اگر خواستید، با نگاهی سریع به این کتابچه مفاهیم اصلی را برای خودتان یادآوری کنید.

این کتال<sup>۴</sup> رایگان است و مهم‌تر از آن، این که ساخته دست بشر است! حتماً می‌تواند بهتر و کامل‌تر باشد. خواهش من اینست که اگر کتاب را تا انتها خواندید و برایتان مفید بود با دوستان علاقه‌مندان به اشتراکش بگذارید و خوشحال می‌شوم اگر هر انتقاد یا پیشنهادی که به ذهنتان رسید برایم ارسال کنید. مطمئن باشید نگارنده این کتاب خودش به

---

<sup>۳</sup> یعنی شما!

<sup>۴</sup> یادآوری مجدد: کتال مخفف کتاب الکترونیکی است! ©

اهمیت بی‌نهایت بازخورد<sup>۵</sup> در اصلاح کارها کاملاً واقف است و نظراتتان را با جان دل خواهد شنید.

از دو طریق زیر می‌توانید من را پیدا کنید:

ایمیل: [Porbaha14@gmail.com](mailto:Porbaha14@gmail.com)

صفحه اینستاگرام: [@PeimanPorbaha](https://www.instagram.com/PeimanPorbaha)

امیدوارم همیشه شاد باشید و یادگیرنده

دوستدار شما

پیمان پربها

## فهرست

|                                          |    |
|------------------------------------------|----|
| چرا کنترل؟                               | ۱۰ |
| آخر این کتابچه چه چیزی دستگیرتان می‌شود؟ | ۱۲ |
| فصل اول                                  | ۱۳ |
| از نافهم تا بافهم!                       | ۱۳ |
| فصل دوم                                  | ۱۸ |
| نقشه‌های کنترلی                          | ۱۸ |
| نقشه‌های کنترلی چطور نمایش داده می‌شوند؟ | ۱۸ |
| نقشه‌های PFD                             | ۱۹ |
| نقشه‌های PFD به درد چه کسانی می‌خورد؟    | ۲۰ |
| نقشه‌های P&ID                            | ۲۰ |
| نقشه‌های Loop Diagram                    | ۲۱ |
| علائم رایج استفاده‌شده در نقشه‌های P&ID  | ۲۲ |
| یک نماد مهم                              | ۲۲ |
| فصل سوم                                  | ۲۶ |

- ۲۶..... استراتژی کنترل لوپ‌ها
- ۲۸..... لوپ ساده
- ۲۹..... مثالی از یک لوپ ساده
- ۳۰..... کنترل آبشاری (Cascade)
- ۳۵..... چرا آبشار؟
- ۳۶..... مزیت‌های کنترل آبشاری
- ۳۶..... کنترل تناسبی یا Ratio
- ۳۷..... کنترل فیدفوروارد یا Feed Forward
- ۴۲..... کنترل حدی یا Limit Control
- ۴۴..... کنترل انتخاب‌گر یا Selector Control
- ۴۶..... کنترل لغوی یا Override
- ۴۸..... کنترل دوبخشی یا Split Range Control
- ۵۰..... فصل سوم
- ۵۰..... روش‌های کنترل لوپ
- ۵۱..... کنترل ON/OFF

- ۵۳..... کنترل PWM
- ۵۴..... کنترل PID
- ۵۵..... روش کنترل PID چیست؟
- ۵۶..... ضریب P (به دنبال حال!).....
- ۵۶..... اما ضریب P چطور کار می کند؟.....
- ۶۰..... ضریب I (نگاه به گذشته!).....
- ۶۲..... ضریب D (جادوگر پیشگوی آینده!).....
- ۶۳..... ضریب D چگونه سیستم را نجات می دهد؟!.....
- ۶۵..... یک سؤال فلسفی و مهم!.....
- هرکدام از ضرایب منحنی کنترلی را به چه شکلی درمی آورند؟
- ۶۶.....
- ۶۸..... فصل چهارم.....
- ۶۸..... سخت افزارهای مربوط به کنترل PID.....
- ۶۹..... کنترل کننده های دیجیتال PID Digital Controller.....
- ۶۹..... PLC.....
- ۷۰..... DCS.....





## کنترل PID به زبان آدمیزاد!

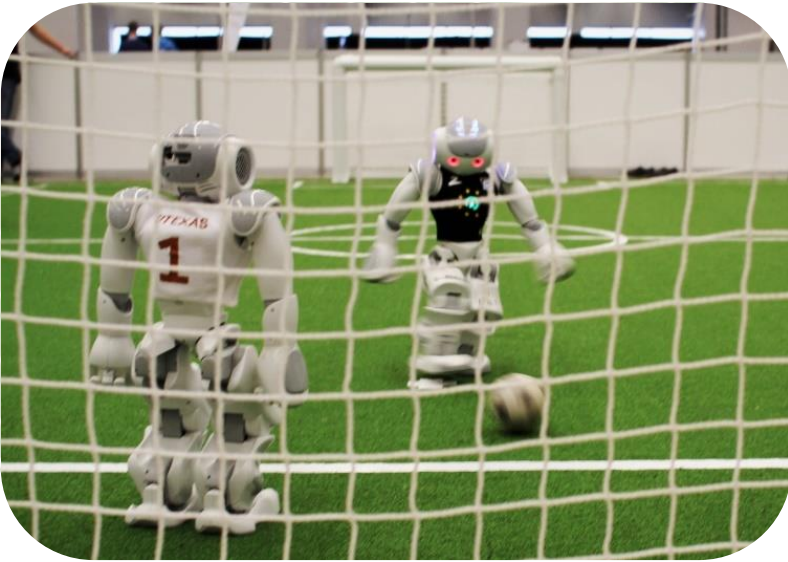
پیمان پربها

### چرا کنترل؟

این روزها اتوماسیون<sup>۶</sup> صنعتی یک قسمت جدانشدنی از زندگی ما انسان‌ها را تشکیل می‌دهد. همه‌چیز به‌سرعت در حال خودکار شدن است و به نظر می‌رسد نقش مستقیم بشر در انجام کارها روز به روز کم‌رنگ‌تر می‌شود. از طرف دیگر، نقش ما به‌عنوان مغز متفکر و خالق ماشین‌های قدرتمند (و البته باهوش) هرچه بیشتر به چشم می‌آید. درواقع این‌که چگونه یک فرآیند به‌صورت خودکار کنترل شود هنوز هم توسط ما انسان‌ها تعیین می‌شود و بعدازآن است که کنترل خودکار فرآیند به‌دستان پر قدرت ماشین‌ها سپرده می‌شود. گرچه مقدمه‌ای که ذکر کردم برای آغاز بحث این کتابچه کوچک زیاد از حد اغراق‌آمیز بود، اما واقعیت اینست که آنچه ما امروز به‌عنوان کنترل فرآیندهای پیچیده از هدایت پیش‌رانه‌های فضایی تا ربات‌های آشپز می‌بینیم، همگی مبتنی بر اصولی هستند که سال‌ها پیش و پس از کسب تجربه‌های علمی و عملی بسیار زیاد به‌دست آمده‌اند. یک لحظه به این فکر کنید که چه روندی در ذهن کوچک یک ربات دروازه‌بان طی می‌شود تا بتواند یک توپ کوچک را که با سرعت یک لاک‌پشت به سمت دروازه می‌آید تشخیص دهد و بعدازآن واکنش مناسب را در مقابل آن نشان دهد!

---

<sup>۶</sup> خودکارسازی



در این کتاب الکترونیکی قصد دارم تا آنچه را که به‌طور خلاصه اساس واکنش دستگاه‌های ساخت بشر به اتفاقات پیرامون را تشکیل می‌دهد، به‌صورت ساده و کاربردی بیان کنم. لوپ‌های کنترلی و چگونگی کنترل این لوپ‌ها همان ابزار بااهمیتی است که به یک ربات دروازه‌بان اجازه می‌دهد با یک واکنش درست، جلوی گل به دروازه‌اش را بگیرد. یک موشک را به نقطه مناسب برساند یا سطح آب یک دیگ بخار را در محدوده مجاز نگه دارد. درواقع مهم نیست هدف‌تان از یادگیری این بحث، کنترل چه چیزی باشد. همین‌که بخواهید کنترل انجام کاری را به چیزی غیر از یک انسان بسپارید، این کتابچه می‌تواند به شما کمک کند.

### آخر این کتابچه چه چیزی دستگیرتان می‌شود؟

در انتهای این کتابچه مطالب زیر را یاد خواهید گرفت:

- تفاوت کنترل فرآیندها به صورت حلقه باز و حلقه بسته
- انواع لوپ‌های کنترلی رایج در صنعت و کارکردی که هرکدام دارند
- استراتژی‌های مربوط به کنترل لوپ‌ها
- این‌که هرکدام از ضرایب PID به چه معنایی هستند و چه تأثیری در کنترل فرآیندها دارند
- مروری مختصر بر روش‌های تنظیم ضرایب PID و سخت افزارهای مربوط به کنترل PID

### فصل اول

#### از نافهم تا بافهم!



فرض کنید فردی ماشینش را جلوی درب خانه شما پارک کرده. در وهله اول شما به او محترمانه تذکر می‌دهید که ماشینش را حرکت

دهد. اگر حرکت داد، یعنی آن فرد با توجه به کنش شما یک واکنش مناسب نشان داده است. درواقع این فرد فهمیده که کارش یک اثر نادرست ایجاد کرده، پس سعی می‌کند تا با جابه‌جا کردن ماشینش آن اشکال را برطرف کند. حالا فردی را تصور کنید که هرچه به او تذکر می‌دهید هیچ‌گونه واکنشی از خود نشان نمی‌دهد! انگار نه‌انگار که شما او را مخاطب قرار داده‌اید! اینجاست که اصطلاحاً در باور اجتماع به آن فرد نافهم (همان نفهم!) گفته می‌شود!

### گام اول در راه شعور ماشینی

شاید این مثال کمی بی‌رحمانه باشد! ولی به جرت می‌توان گفت فرق بین یک ماشین کاملاً نافهم با یک ماشین نسبتاً فهیم! [!] فقط در همین یک مفهوم کوچک نهفته باشد. این که ماشین یا به‌طور کلی فرآیند ما، در مقابل تغییرات منفی خروجی سیستم بی‌تفاوت نباشد و بتواند در وهله اول آن اشکال را ببیند و در مرحله بعد تا حد امکان آن را برطرف کند. در بیان صنعتی به این مسئله اصطلاحاً بازخورد یا فیدبک گفته می‌شود. با توجه به این که یک سیستم دارای فیدبک است یا نه، سیستم‌های کنترلی به دودسته حلقه باز (بدون فیدبک) و حلقه بسته (با فیدبک) تقسیم‌بندی می‌شوند.



یک مثال دیگر، ماشین لباسشویی‌های معمولی هستند که به‌صورت یک سیستم حلقه باز عمل می‌کنند؛ یعنی فقط لباس را داخلش می‌ریزید و تایمر را می‌چرخانید. دیگر برایش اهمیت ندارد که چند کیلو لباس داخلش است یا اصلاً لباس‌ها در آخر تمیز شده‌اند یا نه! اما از آن طرف، چند

سالیست ماشین لباسشویی‌هایی به بازار آمده‌اند که نسبتاً فهیم و متعهد

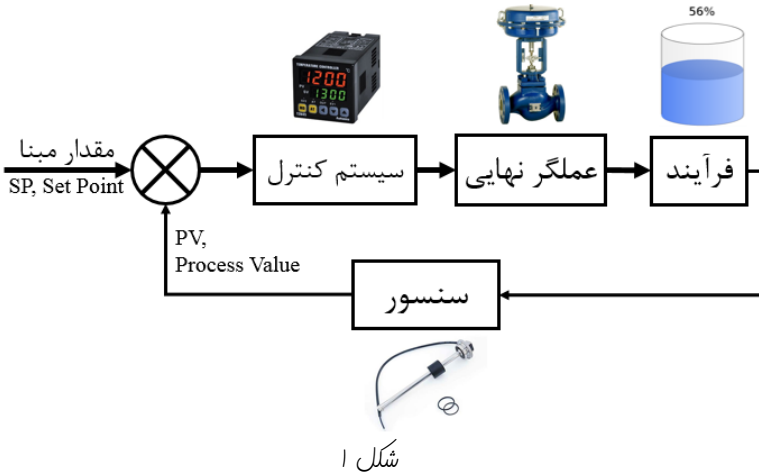
هستند و اتفاقاً به لباسشویی‌های هوشمند هم معروفند. نحوه کارشان این‌گونه است که با توجه به وزن و مقدار کثیفی لباس‌ها، زمان شستشو را تعیین می‌کنند. درنتیجه لباس‌های شما بعد از شستشو، لباس‌های تمیزتری خواهند بود و آب و زمان کمتری هم صرف خواهد شد.



به اطراف خودتان نگاه کنید و یک مورد از تجهیزاتاتی که قبلاً بدون هیچ گونه بازفوردی کار می‌کردند و امروزه به شکل هوشمند ساخته می‌شوند را نام ببرید.

### سنسورها، چشم و گوش فرآیندها هستند

در سیستم‌های حلقه بسته، عمل بازخورد گیری با استفاده از تجهیزاتاتی به نام حسگر یا سنسور انجام می‌شود. سنسورها درواقع مانند چشم‌های فرآیند هستند و کمیت‌های خروجی را به صورت قابل فهم سیستم درآورده و برای اعمال تغییرات به آن برمی گردانند. شماتیک یک سیستم حلقه بسته در شکل ۱ نمایش داده شده است:



در مزیت سیستم‌های حلقه بسته یا دارای فیدبک، همین بس که اگر به سیستم مسئولیتی را سپردید و خوب شیرفهمش کردید تا چطور انجامش دهد، می‌توانید راحت بروید و در اتاق بغلی چایتان را میل کنید! اما اگر سیستم‌تان فیدبک دار نبود باید یک نفر را دائم بگذارید بالای سرش تا هر از چند گاهی که احوالات سیستم به هم‌ریخت دوباره تنظیمش کند.

همان‌طور که در شکل ۱ می‌بینید سیستم کنترلی حلقه بسته از چند قسمت تشکیل شده است. در ابتدا یک مقدار مبنا (Set Point) یا به‌طور خلاصه (SP) به سیستم اعمال می‌شود که درواقع نقطه مطلوب سیستم را نشان می‌دهد. مثل فرض کنید یک مخزن آب دارید که



می‌خواهید ۸۰ درصد آن پر باشد. در این حالت مقدار مبنا روی ۸۰٪ تنظیم می‌شود. قسمت دیگر مقدار اندازه‌گیری شده از فرآیند هست که در شکل با عنوان PV یا Process Value نشان داده شده است. این مقدار توسط سنسورها اندازه‌گیری می‌شود و وضعیت فعلی سیستم را به ما نشان می‌دهد. بعد از آن، این دو مقدار باهم مقایسه می‌شود و مقدار تفاوت به قسمت بعدی که سیستم کنترل است فرستاده می‌شود.

سیستم کنترل همان قسمتی است که به عنوان مغز سیستم، تصمیم‌گیری را انجام می‌دهد. در این قسمت با توجه به مقایسه انجام شده در قسمت قبلی، تصمیم‌گیری می‌شود که باید چه تغییری اعمال شود تا سیستم به مقدار مطلوب نزدیک شود.

قسمت بعدی عملگر نهایی (Final Control Element) است. در واقع تمام تغییراتی که ما می‌خواهیم روی سیستم اعمال کنیم با استفاده از این تجهیز انجام می‌شود. عملگر نهایی در هر فرایند می‌تواند با فرآیند دیگر متفاوت باشد. مثلاً در مثال تنظیم سطح آب یک مخزن، عملگر نهایی یک شیر کنترلی است که مقدار آب ورودی به مخزن را تغییر می‌دهد. عملگر نهایی در حالت کلی می‌تواند طیف وسیعی از تجهیزات را شامل شود. یک بازوی رباتی، دریچه سوخت یک پیش‌رانه

فضایی یا حتی یک کلید کوچک مربوط به اتاق خواب نمونه‌هایی از عملگر نهایی هستند.



## فصل دوم

### نقشه‌های کنترلی

نقشه‌های کنترلی چطور نمایش داده می‌شوند؟

حالا که با اجزای اصلی یک حلقه یا اصطلاحاً لوپ کنترلی آشنا شدید باید راه‌های نمایش این لوپ‌ها را در صنعت بدانید. درواقع در این

قسمت می‌خواهیم روش‌های رایجی که نقشه‌های کنترلی در صنعت به نمایش درمی‌آیند را معرفی کنیم. برای این کار از سه نوع رایج از نقشه‌ها استفاده می‌شود:

(۱) نقشه‌های PFD

(۲) نقشه‌های P&ID

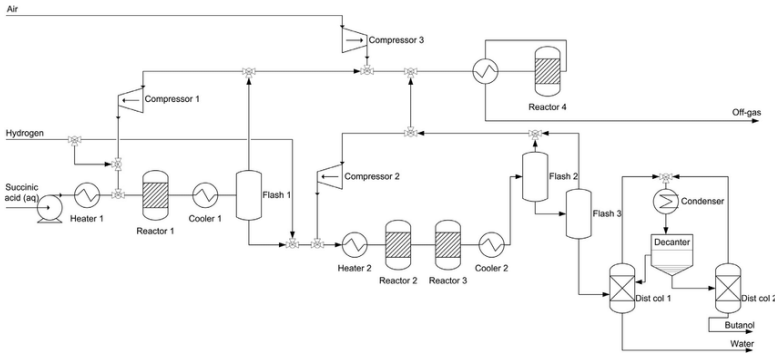
(۳) نقشه‌های Loop Diagram

در صنایع بزرگ افرادی که مشغول به کار هستند معمولاً به گروه‌های مختلفی تقسیم می‌شوند. گروه‌های بهره‌برداری، تعمیرات، بازرسی، مهندسی، پروژه و .... هر کدام از این دسته‌ها به تناسب وظایفی که دارند از مدارک مخصوص به خودشان استفاده می‌کنند. درواقع هر کدام از این مدارک حاوی اطلاعاتی هستند که به درد افراد مخصوصی می‌خورد.

### نقشه‌های PFD

نقشه‌های Process Flow Diagram یا به صورت مخفف PFD

نقشه‌هایی هستند که تجهیزات استفاده‌شده در فرایند (مخصوصاً تجهیزات ابزار دقیق) و نحوه ارتباط آن‌ها به همدیگر را نشان می‌دهد. شکل ۲ یک نمونه از این نقشه‌های را نشان می‌دهد.



## نقشه‌های PFD به درد چه کسانی می‌خورد؟

این نقشه‌ها معمولاً مورد استفاده گروه‌های بهره‌برداری قرار می‌گیرند. گروه‌های دیگر مثل گروه‌های تعمیراتی، معمولاً از نقشه‌هایی استفاده می‌کنند که جزئیات بیشتری از فرآیند را نمایش دهد.

## نقشه‌های P&ID

P&ID مخفف Process & Instrument Drawings یا

Piping and Instrumentation Diagram است و همان‌طور که از

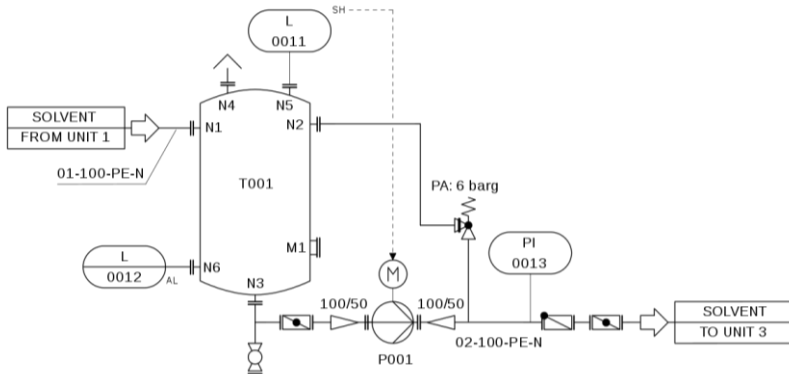
نامش پیداست، برای نمایش تجهیزات صنعتی فرآیند به همراه تجهیزات

ابزار دقیقی و همین‌طور اطلاعات نسبتاً دقیق‌تر مربوط به اتصالات این

تجهیزات مثل مشخصات لوله‌ها به کار می‌رود. اگر یک نقشه P&ID به

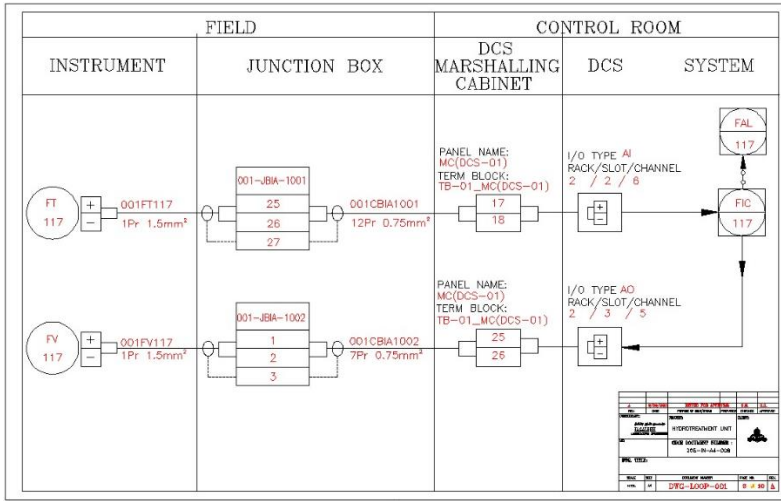
دست‌تان رسید تا حدود زیادی می‌توانید رفتار سیستم را متوجه شوید و

به همین خاطر هم هست که این نوع نقشه‌ها کاربرد بسیار زیادی در بین همه گروه‌ها به‌ویژه نفرات شاغل در قسمت‌های بهره‌برداری دارند. یک نمونه از نقشه‌های P&ID را می‌توانید در شکل ۳ ببینید.



## نقشه‌های Loop Diagram

این نقشه‌ها سهم‌بندی تجهیزات ابزار دقیقی را به‌طور کامل نشان می‌دهد و کاملاً به درد نفرات شاغل در تعمیرات ابزار دقیق می‌خورد. در این نقشه‌ها وظیفه هرکدام از تجهیزات ابزار دقیقی، نحوه اتصالات سیم‌بندی تجهیزات، شماره ترمینال‌ها و چگونگی اتصال سیم‌ها به آن‌ها، نوع و حتی رنگ سیم‌های مورد استفاده در سیم‌کشی تجهیزات توضیح داده شده است. نمونه‌ای از نوع نقشه‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است.

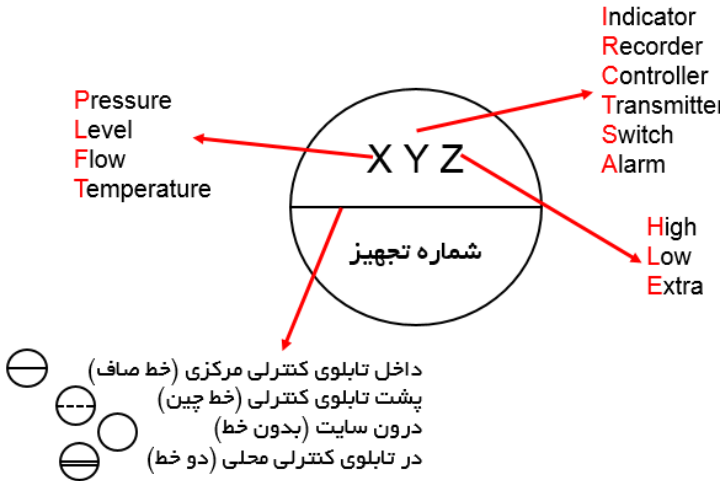


## علائم رایج استفاده شده در نقشه های P&ID

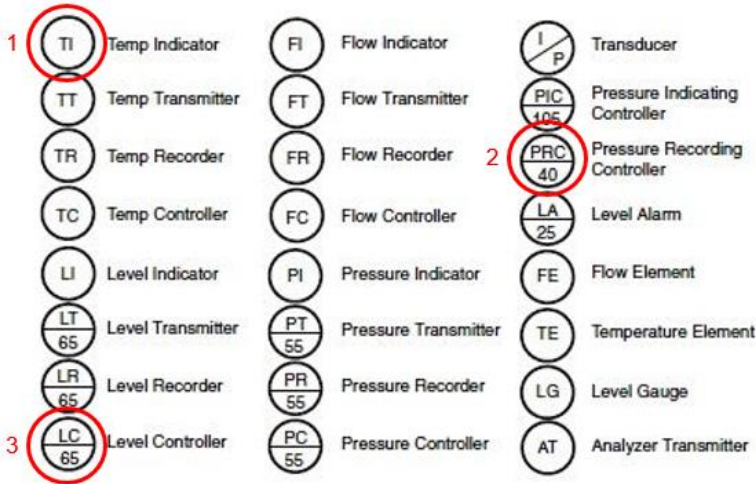
به دلیل این که این نقشه ها به وفور توسط گروه های مختلف در صنعت مورد استفاده قرار می گیرند، در این قسمت چند نماد معروف که در این نقشه ها کاربرد زیادی دارند را باهم بررسی می کنیم. البته نمادهای استفاده شده در این نقشه تعداد بسیار زیادی دارد اما نکته مهم اینست که می توان با مراجعه به راهنمای نقشه که در پایین سمت چپ نقشه نوشته شده است، معنی نمادهای استفاده شده را متوجه شد.

یک نماد مهم

به جرات می‌توان گفت پرکاربردترین نمادی که در این نوع نقشه‌ها به کار می‌رود به شکل زیر است:



این نماد برای نمایش تجهیزات ابزار دقیقی مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای مثال در شکل زیر چند نمونه واقعی از این نماد که در نقشه‌های مختلف P&ID استفاده شده را مشاهده می‌کنید:



برای نمونه در شکل بالا نماد شماره ۱ به اصطلاحاً گیج<sup>۷</sup> یا اندازه گیر دماست که صرفاً مقدار دما را نشان می دهد و از طرف دیگر این تجهیز در محل (سایت) قرار گرفته است. نماد ۲ یک ثبت کننده و کنترل کننده فشار را نشان می دهد که محل قرارگیری آن در اتاق کنترل مرکزی است. همان طور که مشخص است شماره یا تگ<sup>۸</sup> این تجهیز با عدد ۴۰ مشخص شده است. نماد شماره ۳ هم مربوط به کنترل کننده سطح (لول<sup>۹</sup>)

<sup>۷</sup> Gage

<sup>۸</sup> Tag

<sup>۹</sup> Level



هست که آن هم در محل اتاق کنترل مرکزی قرار گرفته و شماره تجهیز ۶۵ مختص شناسایی این تجهیز است.

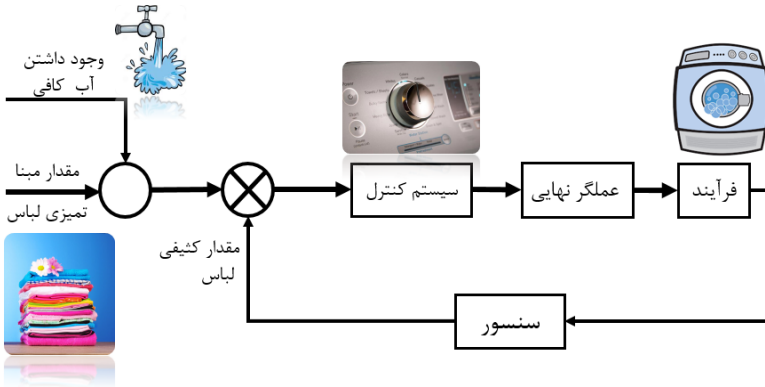
البته همان طور که گفته شد غیر از نماد بالا که نماد بسیار رایجی است، از شکل های دیگری هم در نقشه ها استفاده می کنند که به راحتی می توانید با مراجعه به قسمت راهنمای نقشه (اصطلاحاً Legend)، مفهوم هر کدام را متوجه شوید. به همین خاطر از ذکر بقیه تجهیزات در این کتابچه خودداری کرده ایم.

تا این جای کتاب، معرفی مختصری از مفهوم کنترل و لوپ کنترلی و همین طور نقشه خوانی ابزار دقیق داشتیم. در قسمت بعد به سراغ انواع روش های کنترل لوپ های کنترلی رایج در صنعت می رویم و با آن ها آشنا خواهیم شد.

### فصل سوم

### استراتژی کنترل لوپ‌ها

شکل و قالب اصلی لوپ‌های کنترلی را در شکل ۱ معرفی کردیم. درواقع همه لوپ‌ها اجزای این شکل را دارند؛ اما نکته مهم اینست که برخی فرایندها به فراخور شرایط و نیازهای خاصی که در کنترلشان وجود دارد یک سری قسمت‌هایی را مازاد بر اجزای شکل ۱ دارند. مثلاً فرض کنید در همان ماشین لباسشویی هوشمندی که پیش‌ازاین ذکر خیرش بود، فردی که می‌خواهد ماشین لباسشویی را روشن کند یادش رفته باشد که شیر آب ورودی به لباسشویی را روشن کند! در این حالت هرچه قدر هم که ماشین کار کند لباس‌ها فقط می‌چرخند و عملاً هیچ شستشویی اتفاق نمی‌افتد! به خاطر همین هم غیر از لوپ کنترلی اصلی مربوط به شستشوی لباس، ماشین لباسشویی باید در ابتدا بررسی کند ببیند اصلاً آبی وجود دارد یا نه تا بی‌جهت کل زحماتش به هدر نرود! در این حالت لوپ کنترلی ما به شکلی مثل زیر تبدیل خواهد شد:



درواقع در ابتدا، قبل از آنکه فرایند شستشوی لباس‌ها شروع شود وجود داشتن آب کافی بررسی شده، اگر مشکلی وجود نداشت شستن لباس‌ها آغاز می‌شود وگرنه کل فرایند متوقف شده و با یک خطا به کاربر اطلاع داده می‌شود که مشکلی در تأمین آب ورودی ماشین وجود دارد. مشاهده می‌کنید که به دلیل شرایط خاص فرایند، یک جز انتخاب‌کننده به لوپ اصلی ما اضافه شده است. در این قسمت می‌خواهیم استراتژی‌ها متفاوتی که به خاطر فرایندها باعث تغییر ساختار اصلی لوپ کنترلی می‌شوند را معرفی کنیم. به طول کلی استراتژی‌های کنترل لوپ‌ها به هشت دسته زیر تقسیم می‌شوند:

- (۱) لوپ ساده
- (۲) کنترل آبشاری (Cascade)
- (۳) کنترل تناسبی یا Ratio

۴ کنترل فید فوروارد Feed forward Control

۵ کنترل حدی یا Limit Control

۶ کنترل انتخاب‌گر یا Selector Control

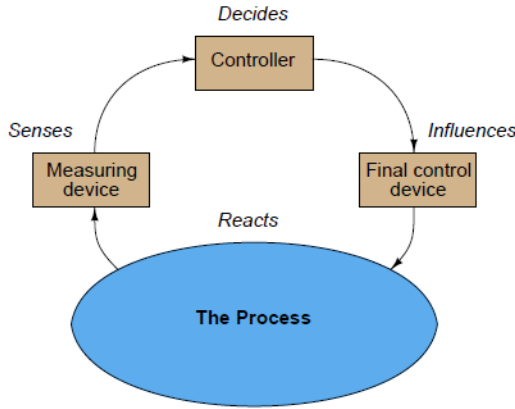
۷ کنترل لغوی یا Override

۸ کنترل دوبخشی یا Split Range Control

در ادامه هرکدام از این روش‌های کنترلی را معرفی خواهیم کرد.

### لوپ ساده

ساده‌ترین حالت کنترل یک سیستم به این شکل است. درواقع از یک پارامتر خروجی نمونه‌برداری می‌شود و بعد از مقایسه با مقدار مبنا، برای تصمیم‌گیری به مرکز کنترل ارسال می‌گردد. سپس مرکز کنترل سیستم مقدار تغییری که لازم است را تولید می‌کند و به عملگر نهایی می‌فرستد. شماتیک این نوع کنترل را در شکل ۲ می‌بینید:



شکل ۲

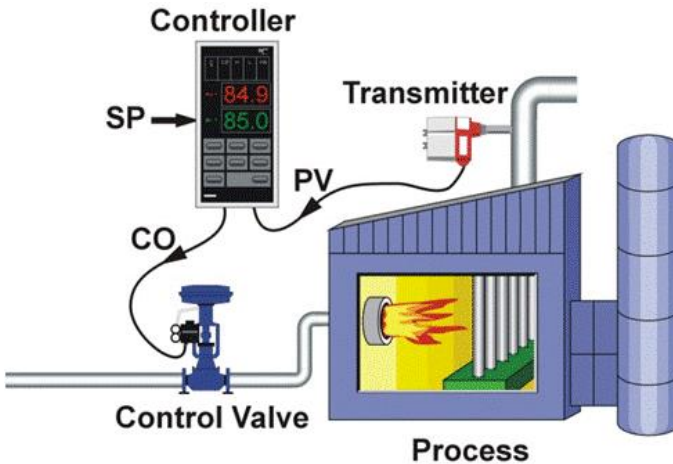
## مثالی از یک لوپ ساده

یک دیگ بخار یا اصطلاحاً بویلر<sup>۱۰</sup> را تصور کنید که با سوختن گاز در مشعل‌ها حرارت به لوله‌های آب برخورد کرده و آب گرم می‌شود. (مشابه شکل ۳). مقدار دما توسط یک ترانسمیتر (اندازه‌گیر) دما، اندازه‌گیری شده و به مرکز کنترل ارسال می‌شود. در قسمت کنترلر مقدار دمای فعلی آب جوش با مقدار مطلوب (مبنا) مقایسه می‌شود و در صورتی که دما از مقدار مطلوب بالاتر (پایین‌تر) بود، فرمان بستن (باز کردن) شیر کنترلی

---

<sup>۱۰</sup> Boiler

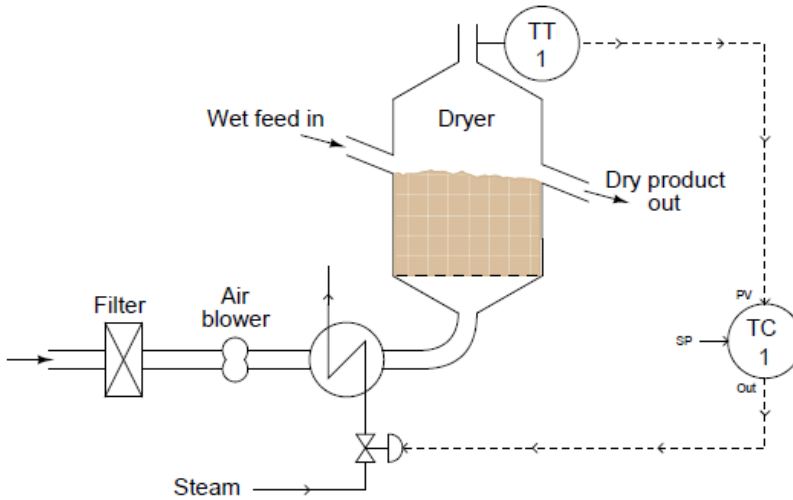
مربوط به گاز داده شده و مقدار شعله کمتر (بیشتر) خواهد شده و به این وسیله دمای آب جوش کنترل می گردد.



شکل ۳

### کنترل آبشاری (Cascade)

بگذارید این نوع کنترل را با یک مثال بررسی کنیم. فرض کنید در کارخانه‌ای، در یک قسمت از فرآیند قرار است دانه‌های ریز جامد رطوبت‌زدایی شده و خشک شود. برای انجام این کار شکل ۴ پیشنهاد شده است.



شکل ۴

اگر به شکل توجه کنید، یک خشک‌کن یا اصطلاحاً درایر<sup>۱۱</sup> وجود دارد که دانه‌ها از سمت چپ وارد شده و پس از رطوبت‌زدایی از سمت راست خارج می‌شود. برای خشک کردن دانه‌ها از هوای گرم استفاده می‌شود. به این صورت که هوا به وسیله یک دمنده یا اصطلاحاً بلوور<sup>۱۲</sup> به سمت درایر هدایت می‌شود و در طول این مسیر از یک گرم‌کن (هیتر) عبور می‌کند. درون این گرم‌کن، هوا با در مجاورت لوله‌های حاوی بخار

<sup>۱۱</sup> Dryer

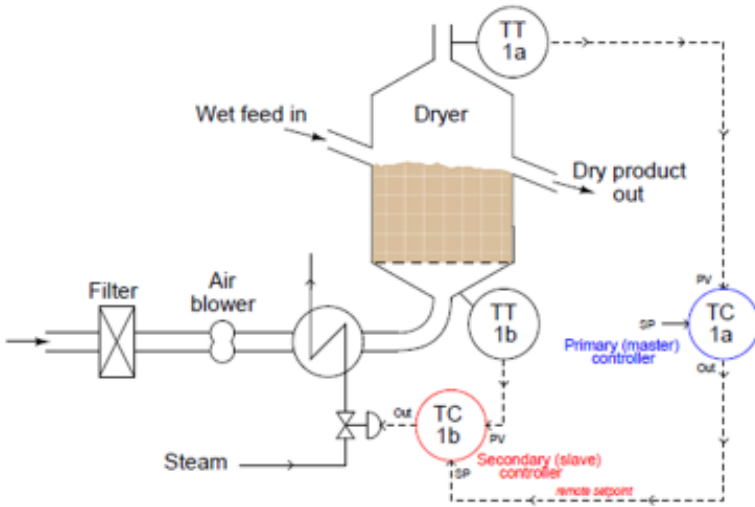
<sup>۱۲</sup> Blower

آب گرم می‌شود. سپس این هوا از پایین وارد درایر شده و بعد از خشک کردن دانه‌ها از بالای درایر خارج می‌شود. در این فرایند هدف آن است که دانه‌ها به طرز قابل قبولی خشک شوند. برای سنجش این مسئله، از یک ترانسمیتر دما در بالای درایر استفاده شده است. درواقع اگر دمای هوای خروجی از سیستم از مقدار مشخصی بیشتر بود به این معنی است که دانه‌ها کاملاً خشک شده‌اند. مقدار خوانده شده توسط این ترانسمیتر برای کنترلر دما (TC) ارسال می‌شود و نهایتاً با فرمان به شیر کنترلی بخار، دمای هوای ورودی تنظیم می‌گردد.

تا اینجا کار ما یک لوپ ساده کنترل دما داریم. حالا فرض کنید به بنا به دلایلی دمای هوای ورودی به سیستم یا فلوی هوای ورودی یا درجه حرارت بخار تغییر کند. هرکدام از این موارد باعث می‌شود تا دمای هوای ورودی به سیستم تغییر کند و عملاً رطوبت‌زدایی تحت تأثیر قرار گیرد. از طرف دیگر معمولاً تغییرات پارامتر خروجی (در اینجا منظور دمای هوای خروجیست) به‌کندی صورت می‌گیرد و اگر ما بخواهیم منتظر بمانیم تا تغییرات دمای ورودی تأثیر خود را در دمای هوای خروجی نشان دهد ممکن است زمانی را از دست بدهیم و در این مدت مقداری از دانه‌ها به‌اندازه کافی خشک نشوند. برای این‌که بتوانیم تأثیر تغییرات این‌گونه **عوامل محیطی** را بر سیستم به حداقل برسانیم و در سریع‌ترین زمان آن را کنترل کنیم، از روشی به‌عنوان کنترل آبشاری یا

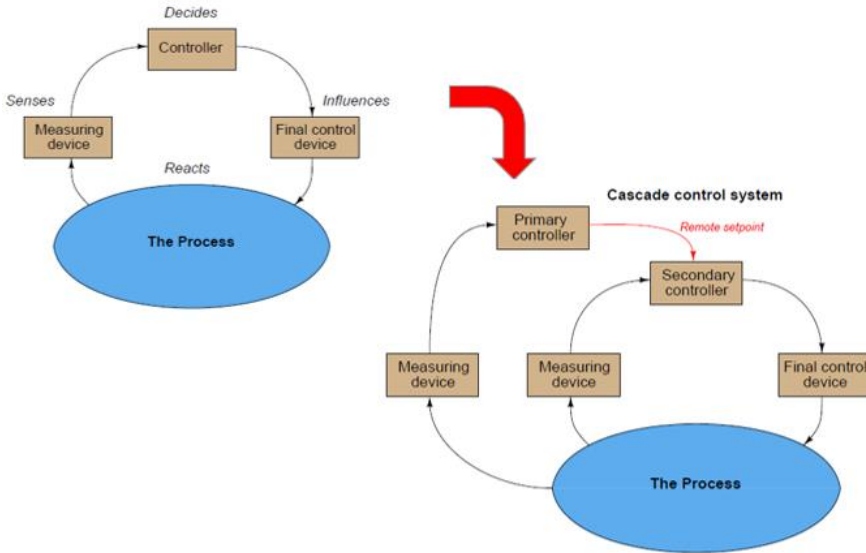


Cascade استفاده می‌کنیم. درواقع در این روش سعی می‌کنیم تا یک لوپ داخلی (فرعی) درون لوپ اصلی به وجود آوریم که وظیفه آن کنترل عوامل نامطلوب محیطی است. برای بهتر روشن شدن موضوع به سراغ مثال خشک‌کن برمی‌گردیم. در این حالت ما اگر بخواهیم تأثیر تغییر دمای هوای ورودی به سیستم را به حداقل برسانیم می‌توانیم دمای ورودی به درایر را اندازه‌گیری کنیم. در این حالت به محض تغییر دمای هوای خروجی متوجه تغییرات محیطی خواهیم شد. در ادامه این مقدار خوانده‌شده به‌عنوان یک PV (مقدار فرآیندی) به یک کنترلر دمای جدید ارسال می‌شود. نکته مهم اینست که در این مرحله، خروجی کنترلر دمایی که از دمای هوای خروجی درایر بازخورد (فیدبک) گرفته بود، به‌عنوان نقطه مبنای جدید وارد این کنترلر می‌شود و مقدار دمای خوانده‌شده از هوای ورودی با آن مقایسه می‌شود و درنهایت فرمان خروجی از این کنترلر به شیر کنترلی بخار اعمال می‌شود. سیستم کنترلی جدید در شکل ۵ آمده است.



شکل ۵

در حالت جدید، فرض کنید به هر دلیل دمای هوای ورودی به صورت ناگهانی بالا برود، قبل از آن که این افزایش دما خودش را در هوای خروجی (و کنترلر اول) نشان دهد، ترانسمیتر دمای ورودی آن را تشخیص داده و به کنترلر جدید می‌فرستد. در حالت با مقایسه با مقدار مبنا که از کنترلر اول آمده، مشخص می‌شود که در ورودی سیستم تغییر ناگهانی به وجود آمده و در نتیجه فرمان کاهش بخار به شیر کنترلی صادر می‌شود. چگونگی تبدیل یک سیستم کنترلی با لوپ ساده به یک سیستم کنترلی Cascade در شکل ۶ آمده است.



شکل ۶

## چرا آبشار؟

همان‌طور که در مثال هم دیدیم، مقدار مبنای یک لوپ کنترلی از یک لوپ کنترلی دیگر به وجود آمده است. در واقع مثل آبشاری که آب را



از بالای صخره‌ها به پایین می‌آورد، در اینجا هم یک لوپ مقدار مبنا را برای لوپ دیگر می‌سازد.

### مزیت‌های کنترل آبشاری

این نوع کنترل باعث می‌شود تا حلقه اصلی کنترلی از یک سری تغییرات محیطی ایزوله شود. خود این مسئله باعث پایداری سیستم خواهد شد. برای این‌که این تأثیر خودش را به‌خوبی در سیستم نشان دهد لازم است تا سرعت لوپ ثانویه یا فرعی بسیار بیشتر از سرعت لوپ اصلی باشد. (حدود ده برابر بیشتر)

### کنترل تناسبی یا Ratio



فرض کنید به حمام رفته‌اید و می‌خواهید دمای آب دوش را تنظیم کنید. احتمالاً اول آب گرم را مقداری باز می‌کنید و اگر قلق شیر آب دستتان باشد، با باز کردن شیر آب سرد مثلاً به

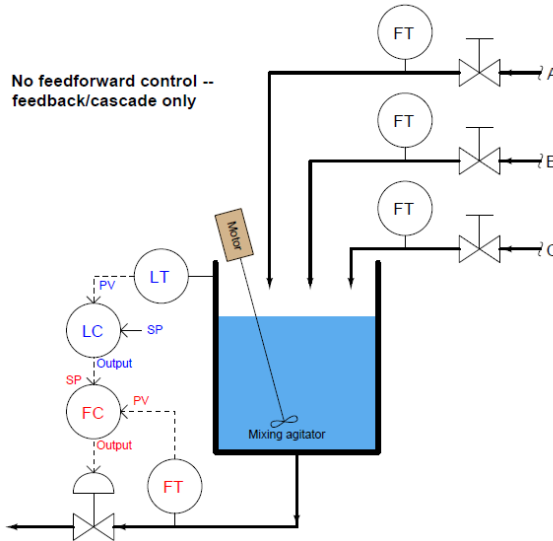
مقدار نصف آب گرم، دمای آب را به مقدار مطلوب می‌رسانید. شاید تابه حال نمی‌دانستید! اما این کار شما نوعی روش کنترلی، به اسم کنترل تناسبی یا Ratio است. درواقع اگر بخواهیم صنعتی‌تر صحبت کنیم، ابتدا به یک لوپ، ست پوینتی داده می‌شود و فرمان به عملگر مربوط به آن لوپ ارسال می‌گردد. بعد از اعمال تغییرات در سیستم لوپ اول از

خروجی آن فیدبک گرفته می‌شود و با اعمال یک ضریب مشخص، به‌عنوان ست پوینت لوپ بعدی در نظر گرفته می‌شود. درواقع در این نوع کنترل، مقدار خروجی لوپ‌های بعدی، به مقدار خروجی لوپ‌های قبلی بستگی دارد. یک مثال صنعتی مهم از این نوع کنترل در تنظیم مقدار سوخت و هوای دیگ‌های بخار است.

سعی کنید پیکونگی تنظیم سوخت و هوا در دیگ‌های بخار را توضیح دهید.

## کنترل فیدفوروارد یا Feed Forward

این روش کنترلی به‌نوعی، آینده سیستم را با توجه به ورودی‌های فعلی پیش‌بینی می‌کند و جلوی تغییرات سیستم را می‌گیرد. مثلاً در شکل ۷ یک مخزن وجود دارد که درون آن یک همزن قرار گرفته و قرار است سه مایع ۱ و ۲ و ۳ توسط سه لوله مجزا وارد این مخزن شده و سپس توسط همزن ترکیب شوند.

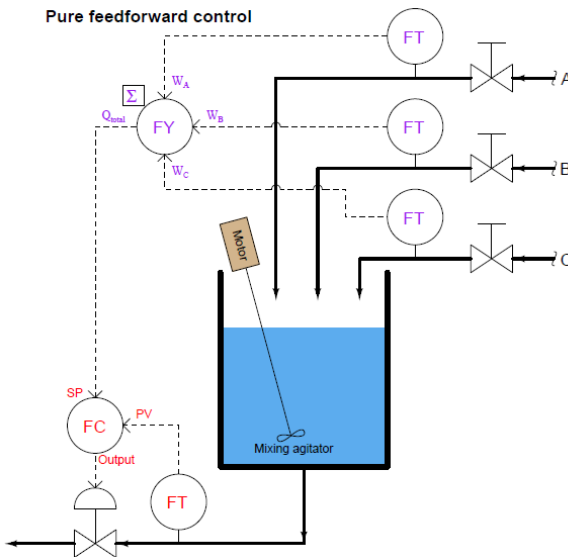


شکل ۷

در این فرآیند هدف این است که سطح مایع درون مخزن همیشه در یک مقدار مشخص باشد. خب یک روش کنترل در این حالت همان کنترل ساده است. همان‌طور که در شکل ۷ مشخص است برای کنترل لول مایع درون مخزن از یک کنترلر سطح استفاده شده است. برای از بین بردن تأثیر تغییرات ناگهانی در فلو ی خروجی مخزن، از یک لوپ ثانویه کنترل فلو به شکل Cascade در خروجی مخزن استفاده کرده‌ایم. در این حالت مقدار لول اندازه‌گیری شده به‌عنوان ست پوینت به فلو کنترلر

(FC) ارسال شده و بعد از مقایسه با فلوی خروجی، فرمان به شیر کنترلی اعمال می شود.

حالا فرض کنید در مثال به گونه ای دیگر عمل کنیم. در این حالت به جای آنکه از تغییرات سطح مایع به عنوان فیدبک استفاده کنیم، مجموع مایعات ورودی به مخزن را محاسبه کرده و با توجه تغییرات آن خروجی مخزن را تنظیم می کنیم. این حالت در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸

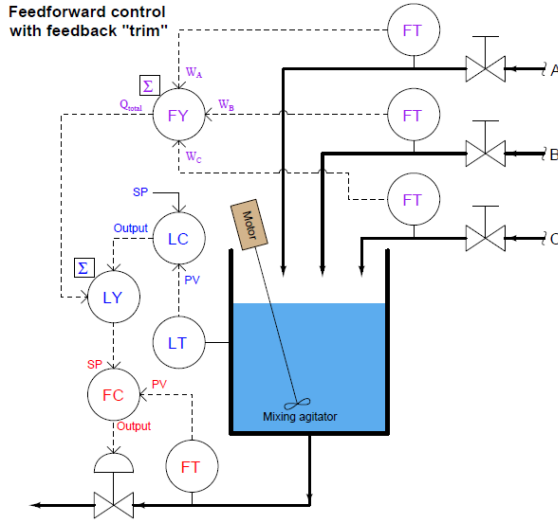
در اینجا چون مقدار خروجی و ورودی سیستم همواره با یکدیگر برابر است در نتیجه سطح مایع همیشه در مقدار مشخصی باقی می ماند. به این حالت اصطلاحاً کنترل Feed Forward گفته می شود. همان طور که مشخص است این روش با اندازه گیری تغییرات ورودی به سرعت می تواند واکنش مناسب را نشان داده و جلوی تغییرات را بگیرد. سیستم شکل ۸ اصطلاحاً یک سیستم کنترل صرفاً Feed Forward<sup>۱۳</sup> است.

فرض کنید در این سیستم صرفاً فیدفوروارد، یک نشتی در یکی از ورودی ها به وجود بیاید. در این حالت مجموع ورودی های با آنچه واقعاً وارد مخزن می شود تفاوت دارد و بعد از مدتی سطح مخزن به مقدار زیادی کم می شود. درواقع کنترلر ما نتوانسته تغییر به این بزرگی را در سیستم ما تشخیص دهد! این بزرگ ترین عیب کنترلر فیدفوروارد است. به همین دلیل هم هیچ گاه از این کنترلر به تنهایی استفاده نمی شود. برای اصلاح این مشکل این روش را با روش های دیگر ترکیب می کنند. مثلاً در مثال بالا کنترل نهایی به شکل زیر درمی آید:

---

<sup>۱۳</sup> Pure feedforward control



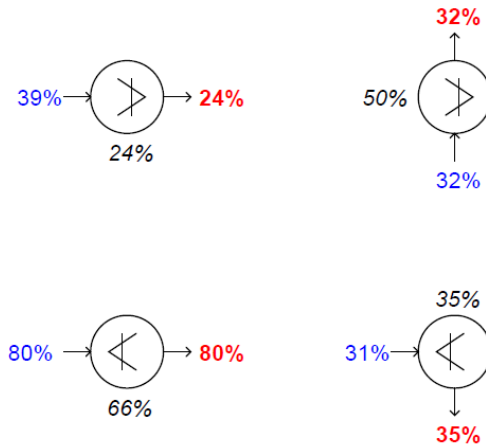


شکل ۹

در این حالت، هم از سرعت بالای کنترلر فیدفوروارد استفاده شده و هم با فیدبک گرفتن از سطح مخزن، اشکال نادیده گرفتن وضعیت سیستم مرتفع شده است. به حالت اصطلاحاً **Feed Forward with Trim** به معنای کنترلر فید فوروارد به همراه اصلاح گفته می‌شود. نکته‌ای که وجود دارد این است که این اصلاح (Trim) باید تأثیر کمی در کل کنترلر داشته باشد و عملاً کنترلر توسط کنترلر فیدفوروارد انجام شود تا سرعت بالای کنترلر تحت تأثیر یک پارامتر نسبتاً کند (در اینجا سطح مخزن) قرار نگیرد.

## کنترل حدی یا Limit Control

این نوع کنترل یک نوع تابع است که می‌توان در برنامه کنترل لوپ از آن استفاده کرد و معمولاً به دو شکل حد بالا و حد پایین مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل ۱۰ دو نماد بالا محدودکننده حد بالا و دو نماد پایین، محدودکننده حد پایین را نشان می‌دهد.

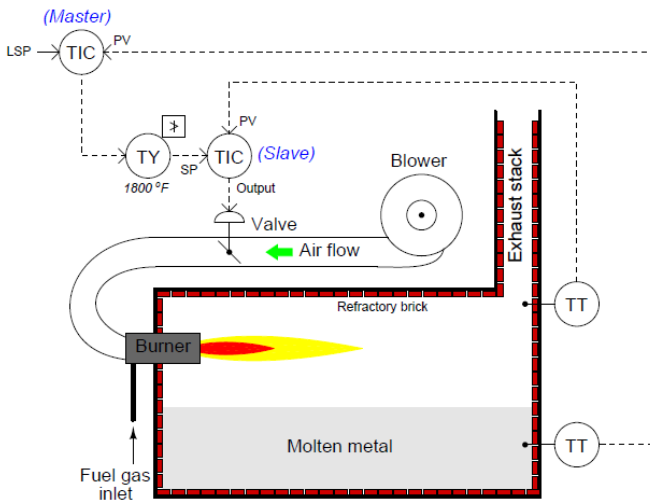


شکل ۱۰

در محدودکننده حد بالا مقدار ورودی با مقدار تنظیم‌شده مقایسه می‌شود در صورتی که مقدار آن از مقدار تنظیم‌شده کمتر باشد، همان عدد به خروجی منتقل می‌شود ولی اگر مقدار آن بیشتر باشد، خروجی محدودشده و همان مقدار تنظیم‌شده را به خروجی منتقل می‌کند.

محدودکننده حد پایین هم دقیقاً مشابه همین رفتار را دارد با این تفاوت مقدار خروجی را روی مقدار تنظیم شده حد پایین نگه می‌دارد. طرز کار این دو حالت به صورت خلاصه در شکل ۱۰ نمایش داده شده است.

یکی از کاربردهای رایج این نوع کنترل کننده در زمان‌هایی است که از کنترل آبشاری استفاده شده و نگران هستیم که ست پوینت تولیدی لوپ اول بیش از حد زیاد یا بیش از حد کم بوده و به تجهیزات آسیب برساند. مثلاً در شکل ۱۱ یک از لوپ Cascade برای کنترل دمای کوره استفاده شده است و نهایت دمایی هم که کوره می‌تواند تحمل کند ۱۸۰۰ درجه سانتی‌گراد باشد.

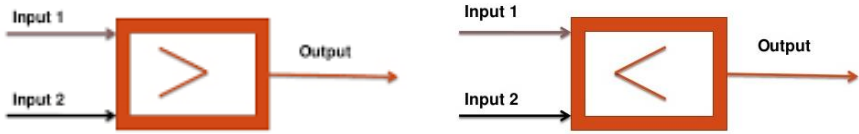


شکل ۱۱

حالا فرض کنید در یک شرایط خاص دمای فلز پایین کوره از زیادی کم شده و لوپ فرعی (مربوط به  $TT_1$ ) ست پوییتی را تولید کند که درنهایت دمای کوره را بیش از ۱۸۰۰ درجه برساند. برای اینکه کوره دچار آسیب نشود از یک محدودکننده حد بالا بر سر راه ست پوینت تولیدی حلقه اصلی استفاده شده است که دما را در حد قابل قبول نگه دارد.

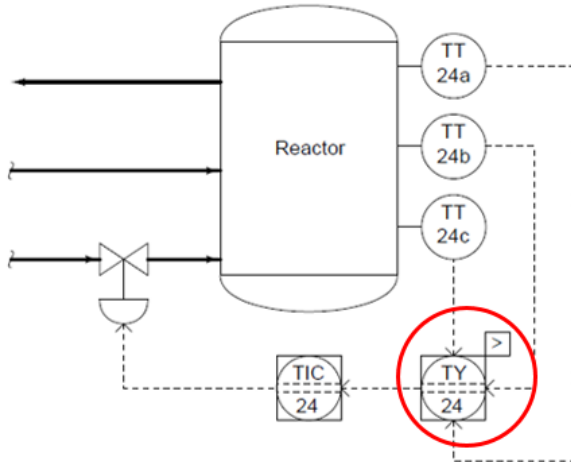
### کنترل انتخاب‌گر یا Selector Control

این نوع کنترل هم مانند کنترل محدودکننده درواقع نوعی تابع به حساب می‌آید. در این روش، چند نوع فیدبک از سیستم به یک سیستم انتخاب‌گر وارد شده و با توجه به نوع آن سیستم، یکی از چند فیدبک انتخاب شده و به مراحل بعدی ارسال می‌شود. به‌طورکلی دو نوع انتخاب‌گر “بزرگ‌تر” و “کوچک‌تر” داریم. انتخاب‌گر بزرگ‌تر، بزرگ‌ترین متغیر ورودی را انتخاب می‌کند و به خروجی می‌فرستد و انتخاب‌گر کوچک‌تر، کوچک‌ترین متغیر را در خروجی ظاهر می‌کند. شماتیک این دو نوع کنترلر در شکل زیر نشان داده شده است. شکل سمت راست مقدار کمتر و شکل سمت چپ، مقدار بیشتر را به خروجی منتقل می‌کند.



شکل ۱۲

یکی از موارد استفاده از این کنترلر در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. این شکل یک راکتور را نشان می‌دهد که دمای آن بسیار مهم بوده و افزایش دمای راکتور می‌تواند خطرات زیادی را به همراه داشته باشد.

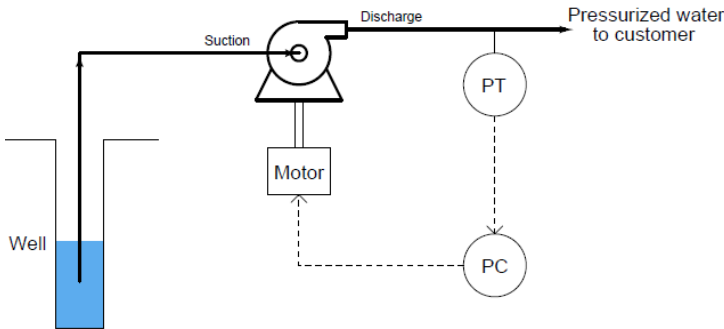


شکل ۱۳

برای اطمینان از این امر، دمای راکتور از سه قسمت اندازه‌گیری شده و بیشترین مقدار اندازه‌گیری شده، ملاک واکنش ما خواهد بود. برای این کار یک انتخاب‌گر بزرگ‌تر استفاده شده است که بیشترین دما را به کنترلر دما ارسال می‌کند.

### کنترل لغوی یا Override

در بعضی فرآیندها ممکن است برای کنترل یک فرآیند، چند لوپ مجزا وجود داشته باشد. به شکل زیر توجه کنید:

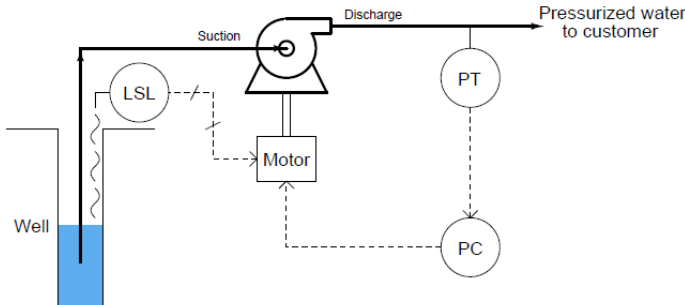


شکل ۱۴

این شکل یک پمپ آب را نشان می‌دهد که وظیفه تأمین فشار آب را به عهده دارد. مقدار فشار آب خروجی از این پمپ به وسیله یک لوپ ساده کنترل می‌شود. فشار خروجی اندازه‌گیری شده و به یک کنترلر فشار

فرستاده می‌شود و در نهایت فرمان کنترلر به یک تنظیم‌کننده دور موتور (اینورتر<sup>۱۴</sup>) ارسال شده و نهایتاً با تنظیم دور موتور، فشار پمپ هم تنظیم می‌شود.

تا اینجا کار همه چیز خوب است! حالا فرض کنید بنا به هر دلیل سطح آب چاه خیلی پایین بیاید. ممکن است پمپ اصطلاحاً هوا کشیده و بسوزد. برای جلوگیری از آن، از یک سیستم لغوی به صورت شکل ۱۵ استفاده می‌کنیم.



شکل ۱۵

در این حالت علاوه بر فیدبک از فشار خروجی پمپ، از سطح چاه آب هم یک فیدبک گرفته شده است. البته جنس این فیدبک از نوع سویچ

<sup>۱۴</sup> Inverter

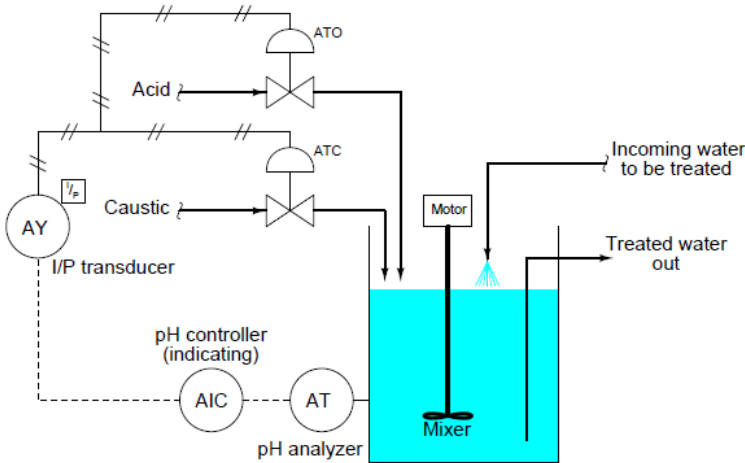
است؛ یعنی فقط در صورتی که لول به مقدار مشخصی کاهش یابد این سویچ قطع یا وصل می شود و دیگر مثل حالتی که از ترانسمیتر استفاده می کردیم مقدار سطح را به صورت عددی نخواهیم داشت. در این حالت زمانی که سویچ عمل کند یعنی مقدار سطح چاه از کاهش یافته است پس یک فرمان ارسال می شود. در اینجا با توجه به کنترل Override موتور فرمان ارسال شده از کنترلر فشار را نادیده گرفته و طبق فرمان سویچ از سرویس خارج می شود.

### کنترل دوبخشی یا Split Range Control

کنترل دوبخشی یا اسپلیت در واقع به حالتی گفته می شود که می خواهیم به وسیله یک کنترلر به دو یا چند عملگر فرمان دهیم. با اینکه این سیستم در صنعت مورد استفاده قرار می گیرد اما به خاطر ماهیت یکسان بودن فرمان ها روی دو عملگر مجزا، محدودیت هایی را هم دارد و در هر سیستمی پیشنهاد نمی شود.

یک مثال از این نوع کنترل را در شکل ۱۶ می بینید.





شکل ۱۶

این شکل فرآیند تنظیم pH را در یک مخزن آب نشان می‌دهد. pH آب توسط یک سنسور (آنالیزور) اندازه‌گیری شده و به کنترلر pH ارسال می‌کند. این کنترلر هم‌زمان به دو شیر کنترلی فرمان می‌دهد که یکی مربوطه تزریق اسید و دیگری مربوطه به تزریق اسید است. ترکیب مناسب این دو ماده می‌تواند pH مطلوب را برای آب درون مخزن ایجاد کند. در اینجا فرمان به‌صورت مشترک به دو شیر کنترلی ارسال شده است. به این معنا که اگر مقدار اسید روی ۵۰٪ تنظیم شده باشد مقدار سود هم روی

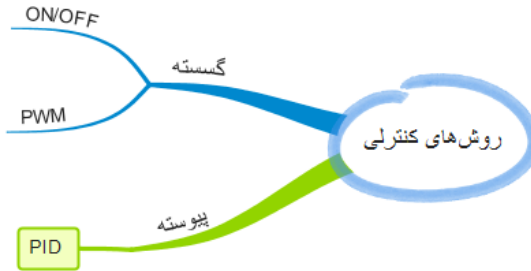
فرض کنید یک مخزن داریم که یک شیر کنترلی در ورودی و یک شیر کنترلی در خروجی دارد. می‌خواهیم سطح مایع این مخزن را با استفاده از روش **Split** کنترل کنیم. فکر می‌کنید چه محدودیت‌ها و مشکلاتی وجود خواهد داشت؟

۵۰٪ هست. اما اگر بنا به شرایط لازم باشد که مقداری pH تنظیم شود، مثلاً pH آب مقداری پایین آمده و باید مقداری سود به آن اضافه شود، در این حالت هم‌زمان مقدار اسید روی مقدار کمتر مثل ۴۰٪ تنظیم شده و مقدار سود به مقدار ۶۰٪ افزایش می‌یابد. درواقع هردو عملگر به یک اندازه اما با جهت‌های مختلف کنترل می‌شوند. به این شکل کنترل اصطلاحاً کنترل Split گفته می‌شود.

## فصل سوم

### روش‌های کنترل لوپ

تا این جای کار با انواع استراتژی‌های کنترلی آشنا شدیم. هرکدام از استراتژی‌ها می‌توانند به روش‌های مختلفی مورد استفاده قرار گیرند. درواقع تا اینجا فهمیدیم که مثلاً لوپ آبشاری چطور از سیستم بازخورد می‌گیرد و چه مسیری را طی می‌کند تا یک فرمان را برای عملگر نهایی تولید کند، اما در مورد این که فرمان خروجی از چه جنسی هست و چطور تولید می‌شود، صحبتی نکردیم. در این قسمت با روش‌های تولید این فرمان بیشتر آشنا خواهیم شد.



## کنترل ON/OFF

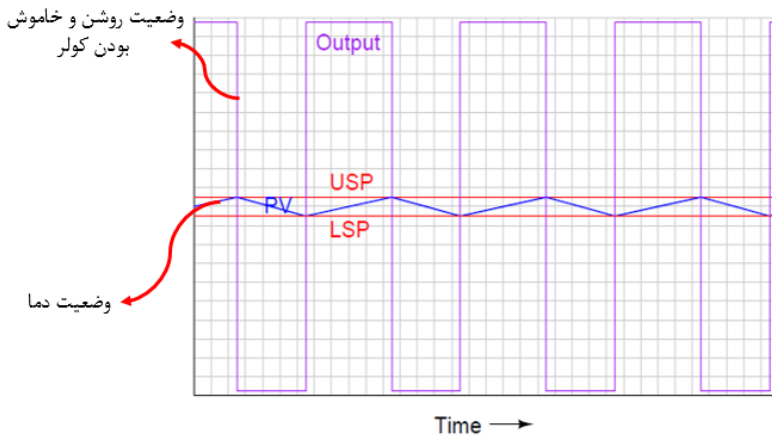
ساده ترین نوع کنترل یک فرآیند، به شکل کنترل دو وضعیتی یا اصطلاحاً ON/OFF است. کولرگازی های قدیمی یک مثال از این نوع کنترل هستند.



اگر یادتان باشد، این کولرها دارای یک ترموستات بودند که دمای محیط را اندازه می گرفت. فرض کنید می خواستیم دمای محیط روی ۱۸ درجه تنظیم

شود. به محض این که دمای محیط از این مقدار بیشتر می شد کولر روشن می شد و با تمام توان شروع به خنک کردن اتاق می کرد. بعد از آن که دما به کمتر از ۱۸ درجه می رسید کولر خاموش می شد و درواقع منتظر می ماند تا دوباره دمای اتاق بالا رود و دوباره کولر کار خود را با تمام توان

انجام دهد. این روش اگرچه کارایی داشت و گرمای تابستان را برای خانواده‌ها قابل تحمل می‌کرد اما به خاطر این که فقط در دو حالت روشن و خاموش کار کرد نمی‌توانست دما را روی یک عدد، ثابت نگه دارد و دما مرتباً حول آن عدد نوسان می‌کند. علاوه بر این که به خاطر تعداد زیاد روشن و خاموش شدن کولر، عمر آن کم شده و به خاطر جریان بالای راه اندازی موتور، هزینه برق هم بسیار زیاد می‌شد. اگر بخواهیم نمودار این نوع کنترل را نمایش دهیم شکلی مثل شکل زیر ایجاد خواهد شد:



شکل ۱۷

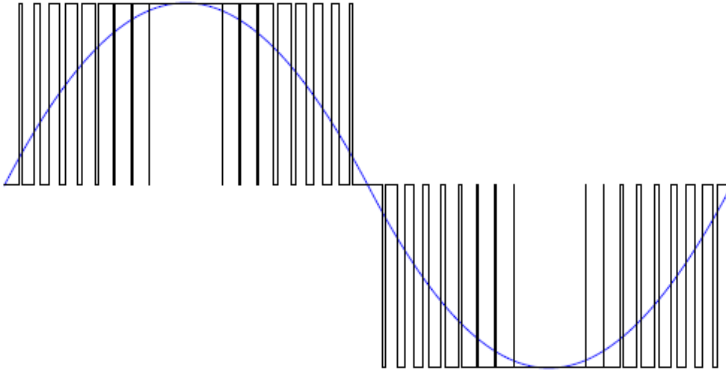
البته برای این که تعداد روشن و خاموش شدن‌ها را کاهش دهند از تکنیکی به اسم باند هیستریزیس استفاده می‌شود. مثلاً در مثال کولرگازی

به جای آنکه بگویند دقیقاً کولر در دمای بالای ۱۸ درجه در سرویس قرار بگیرد و به محض رسید به ۱۸ از سرویس خارج شود، یک محوطه‌ی مثلاً ۲ درجه را در نظر می‌گیرند به این صورت که کولرگازی در دمای ۲۰ درجه در سرویس قرار می‌گیرد و بعد از آنکه به ۱۸ رسید فوراً خاموش نمی‌شود بلکه اجازه می‌دهد باز هم دما کاهش یافته و به ۱۶ درجه برسد و آنگاه خاموش می‌شود. با این روش باینکه تعداد خاموش و روشن‌های کولر کمتر است اما نوسان دمای خروجی بیشتر خواهد شد.

## کنترل PWM

اگر بخواهیم یک مفهوم آنالوگ یا پیوسته را به وسیله یک موج صرفاً صفر و یک ایجاد کنیم از این نوع کنترل استفاده می‌کنیم. درواقع PWM رابط بین دنیای دیجیتال و آنالوگ است. برای این کار زمان صفر و یک شدن به گونه‌ای تنظیم می‌شود که در نهایت میانگین این صفر و یک شدن‌ها مقدار مطلوب را به دست دهد. مثلاً اگر زمان یک بودن ۲ ثانیه و زمان صفر بودن ۸ ثانیه باشد، در یک طول دوره ۱۰ ثانیه درواقع یک پنجم زمان که معادل یک موج با اندازه ۰,۲ است برای ما تولید می‌شود.

از همین روش برای تولید موج‌های متناوب هم می‌توان استفاده کرد. به شکل ۱۸ توجه کنید.



شکل ۱۸

با توجه به شکل ۱۸، پلگونی تولید یک موج سینوسی را با استفاده از روش PWM توضیح دهید.

## کنترل PID

فرض کنید یک کتری را روی گاز گذاشته‌اید و می‌خواهید دمای آب داخل آن را روی ۷۰ درجه نگه‌دارید. یک روش این است که وقتی دمای آب کمتر از ۷۰ درجه شعله گاز را تا آخر زیاد کنید و هر وقت دما بیشتر شد شعله را خاموش کنید که در این صورت دما احتمالاً خیلی زیاد شده

و سپس کم می‌شود. روش دیگر آن است که با توجه به سرعت گرم شدن آب درون کتری و مقدار دمای فعلی آب، مقدار شعله را تنظیم کنید. مثلاً زمانی که آب ۲۰ درجه است شعله را تا آخر زیاد کنید و بعد از این که دما به حدود ۵۰ درجه رسید آرام آرام شعله را کم کنید تا سرعت افزایش دما کمتر شود. در این حالت دمای آب به شکل مناسب‌تری به مقدار مطلوب خواهد رسید.

همان‌طور که پیش‌از این گفتیم روش اول روش ON/OFF بود. روش دوم که به صورت پیوسته فرایند را کنترل می‌کند، روش PID نام دارد.

### روش کنترل PID چیست؟

کلمه PID مخفف سه کلمه Proportional Integral Derivation به معنای تناسبی، انتگرال‌گیر و مشتق‌گیر است. در واقع همان‌طور هم که از اسم این روش مشخص است، این کنترل ترکیبی از سه تابع ریاضی مهم است که در این روش به شکل سه ضریب P، I و D ظاهر شده‌اند. هر کدام از این ضرایب کاربردهای خاص خودشان را دارند و به تأثیرات متفاوتی را در سیستم به جا می‌گذارند. در این قسمت فلسفه‌ی وجودی هر کدام از این ضرایب را بررسی کرده و کاربردهای هر کدام را معرفی می‌کنیم.

### ضریب P (به دنبال حال!)

حتماً شعار نوشابه‌های پپسی را دیده‌اید! همان که می‌گویند در لحظه زندگی کن! در دنیای لوپ‌های کنترلی ضریب P دقیقاً مصداق این شعار است. درواقع ضریب P وضعیت فعلی سیستم را نگاه کرده و با توجه به فاصله‌ای که با موقعیت مطلوب دارد مقدار مناسب برای اعمال به عملکرد نهایی را ایجاد می‌کند.

### اما ضریب P چطور کار می‌کند؟

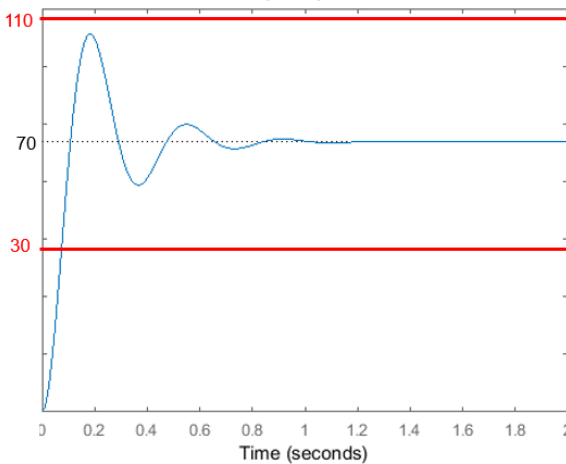
به شکل ۱۹ توجه کنید. این تابع دمایی همان کتری است که در ابتدا صحبتش را کردیم. گفتیم که هدف ما رساندن دمای آب از ۲۰ درجه به ۷۰ درجه و بعد از آن ثابت نگه‌داشتن این دما است. دو خط موازی قرمز رنگی که در شکل می‌بینید و مشابه یک جاده (اصطلاحاً باند<sup>۱۵</sup>) را ایجاد کرده‌اند، درواقع نمایان گر ضریب P هستند. هرچه که این ضریب عدد بزرگ‌تری باشد، فاصله این خطوط بیشتر شده و اصطلاحاً باند تناسبی یا Proportional Bound بزرگ‌تری خواهیم داشت. حالا این باند قرار است برای ما چه کاری انجام دهد؟! فرض کنید دمای اولیه آب ۲۰ درجه است و اندازه باند تناسبی ما هم به اندازه ۴۰ درجه است؛ یعنی

---

<sup>۱۵</sup> Bound



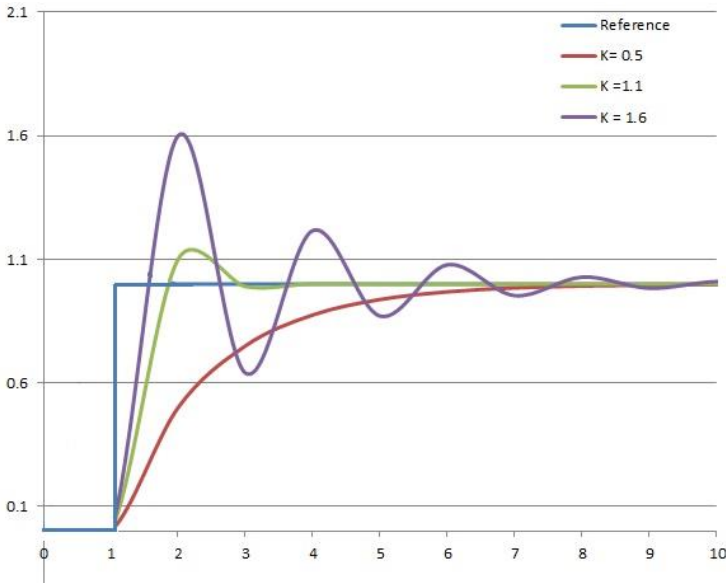
خط قرمز بالایی در فاصله ۲۰ درجه‌ای از مقدار مطلوب (۷۰ درجه) و خط قرمز پایینی در فاصله ۲۰ درجه‌ای پایین‌تر از مقدار مطلوب قرار دارد. در این حالت اگر کنترل را به دست کنترلر P بدهیم، در ابتدا که فاصله دمای آب با مقدار مطلوب زیاد است، شعله گاز روی بیشترین مقدار ممکن قرار می‌گیرد و دما با سرعت زیادی بالا می‌رود. بعد از آن که آب به دمای ۵۰ درجه (مرز باند تناسبی) رسید، شعله گاز آرام‌آرام کم می‌شود تا از سرعت افزایش دما را کمتر کند. این شعله همین‌طور کمتر و کمتر می‌شود تا آنجا که دمای آب به مقدار مطلوب برسد. البته ممکن است در هنگام افزایش دما، مقداری دمای آب از مقدار مطلوب بالاتر برود که در این صورت شعله گاز کمتر شده و دما را کاهش می‌دهد.



شکل ۱۹

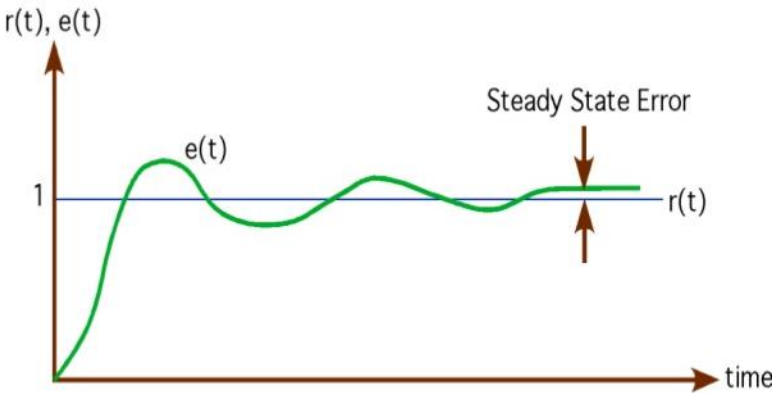
حالا فرض کنید اندازه  $P$  را کمتر کنیم که درواقع پهنای باند را کمتر کرده‌ایم. در این حالت زمانی که افزایش دمای آب با شعله کامل شروع می‌شود، دمای آب دیرتر درون باند تناسبی قرار می‌گیرد به همین ممکن است کنترلر نتواند شعله را به مقدار کافی کم کند یا این‌که افزایش دما به این راحتی‌ها مدیریت نشود و به همین دلیل ما یک افزایش دمایی را در ابتدای کنترل خواهیم داشت. در مباحث کنترلی به این افزایش اولیه بالا زدگی یا **Overshoot** گفته می‌شود.

هرچه که مقدار  $P$  کمتر شود درواقع زمانی که کنترلر می‌تواند روی عملگر کار کند، کمتر می‌شود و درنتیجه مقدار **Overshoot** پاسخ هم بیشتر خواهد شد. حال اگر ضریب  $P$  را برابر صفر قرار دهیم مثل این است که باند کنترلی کاملاً روی خط دمای مطلوب قرار گرفته و کنترل ما به شکل **ON/OFF** درمی‌آید. شکل ۲۰ تغییرات سیستم کنترلی در اثر تغییر ضریب  $K_p$  نشان می‌دهد. توضیح اینکه به‌جای پهنای باند  $P$  از ضریب  $K_p$  استفاده می‌کنند که درواقع عکس  $P$  است؛ یعنی با افزایش یکی دیگری کاهش می‌یابد.



شکل ۲۰

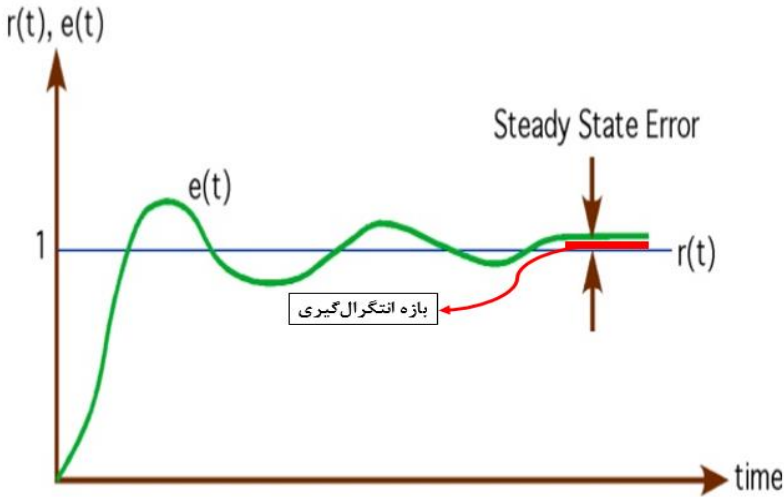
ضریب P یا کنترل زمان حال بیشترین نقش را بین سه کنترلر PID ایفا کند. شاید به جرئت بتوان گفت حدود ۸۰ درصد از کاری که کنترلرهای PID انجام می‌دهند به تنظیم ضریب P مربوط می‌شود؛ اما باین‌همه گاهی پیش می‌آید که هرچه زمان هم می‌گذرد باز مقداری خطا در سیستم باقی می‌ماند. نمونه‌ای از این خطا را در شکل ۲۱ می‌بینید. متأسفانه ضریب P با تمام قابلیت‌هایش توان جبران این خطا را که به خطای ماندگار مشهور است ندارد. به همین خاطر دست به دامن ضریب I می‌شویم.



شکل ۲۱

### ضریب I (نگاه به گذشته!)

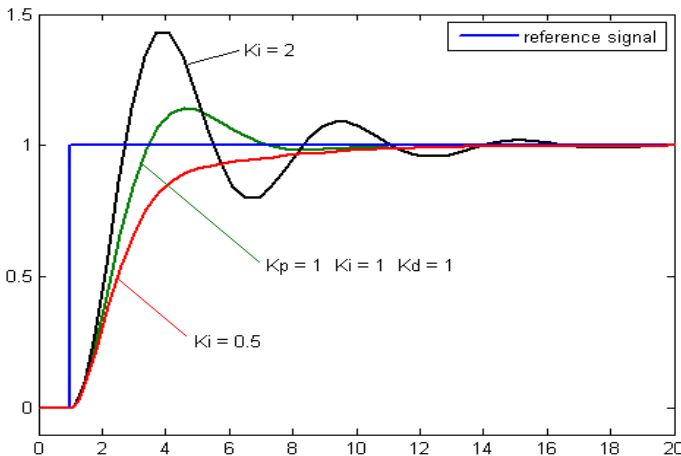
مهم‌ترین ابزار برای حذف خطاهای ماندگار در یک سیستم کنترلی، ضریب انتگرال گیر یا I است. کار ضریب I به این صورت است که بازه زمانی را در نظر می‌گیرد و در آن بازه زمانی مجموع اختلاف مقدار مطلوب را با مقدار فعلی فرایند حساب می‌کند. درواقع همواره نگاه این ضریب به گذشته است و در تاربخچه فرایند مقدار خطا را رصد می‌کند. شکل ۲۲ را ببینید. حالا اگر خطای مقدار موجود و مطلوب همواره یکسان بود، این ضریب پیوسته آن را جمع می‌زند و به سیستم نشان می‌دهد که باید این خطا برطرف شود. درنتیجه با اعمال یک فرمان مناسب به عملگر، خطای ماندگار سیستم کاملاً برطرف می‌شود.



شکل ۲۲

عددی که برای ضریب I در نظر گرفته می‌شود معمولاً از جنس ثانیه است و منظور از آن، بازه زمانی است که کنترلر انتگرال‌گیری را روی آن بازه انجام می‌دهد. درواقع هرچه این عدد بیشتر شود به دلیل اضافه شدن زمان، تأثیر انتگرال‌گیر کمتر و کمتر می‌شود و در زمان بی‌نهایت، عملاً این کنترلر از سیستم کنترلی حذف می‌شود. از طرف دیگر هرچه این ضریب کوچک‌تر شود به معنای این است که با سرعت بیشتر بازه‌های زمانی را انتگرال‌گیری می‌کند و به همین دلیل سریع‌تر نسبت به خطاها واکنش نشان می‌دهد. درنتیجه اگر مقدار I بیش‌ازحد کم شود ممکن سیستم به نوسان بیافتد.

در رابطه به مقدار استفاده از این کنترلر لازم به ذکر است که بعد از کنترلر P، کنترلر نوع I بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد و معمولاً هم به صورت مشترک با P به صورت کنترلر PI عمل می‌کند تا ضمن استفاده از مزایای P بتواند خطای ماندگار را هم از بین ببرد. شکل ۲۳ چگونگی تغییرات پاسخ سیستم کنترلی در اثر تغییرات ضریب I را نشان می‌دهد.



شکل ۲۳

## ضریب D (جادوگر پیشگوی آینده!)



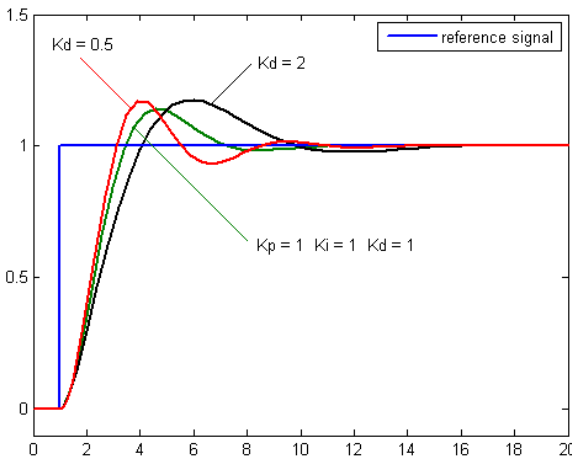
ضریب D از آن دست کنترلرهایی است که در حالت کلی در کنترل‌ها چندان استفاده نمی‌شود و وجودش ضروری نیست، اما اگر به خوبی تنظیم

شود می‌تواند کارایی سیستم کنترل را به‌ویژه در مقابل تغییرات ناگهانی به‌خوبی بالا ببرد. فرض کنید یک دیگ بخار وظیفه تأمین بخار یک مجتمع صنعتی را به عهده دارد و ناگهان بنا به دلایل فرآیندی مصرف بخار واحدها به مقدار زیادی افزایش بیابد. در این‌گونه مواقع ضریب  $I$  که هیچ مسئولیتی را به عهده نمی‌گیرد! ضریب  $P$  هم در بهترین حالت نگاه می‌کند که چقدر بخار افزایش‌یافته و متناسب با آن فرمان افزایش تولید بخار را می‌فرستد که این موارد معمولاً زمان بالایی را می‌برد و ممکن است سیستم کنترلی دیگ بخار نتواند به‌موقع پاسخگوی واحدهای فرایندی باشد. در این‌گونه مواقع است که ضریب  $D$  مثل یک منجی به فریاد سیستم کنترلی می‌رسد!

### ضریب $D$ چگونه سیستم را نجات می‌دهد؟!

ضریب  $D$  درواقع یک تابع مشتق‌گیر است که از تغییرات پارامتر خروجی سیستم مشتق می‌گیرد. به‌محض این‌که مقدار مصرف بخار به‌صورت ناگهانی و با شیب زیادی شروع به افزایش می‌کند، کنترلر  $D$  با مشتق‌گیری از شیب تغییرات، متوجه می‌شود که با توجه به این نرخ تغییرات در زمان نزدیک، مقدار زیادی بخار از سیستم درخواست خواهد شد. به همین خاطر به عملگر گاز فرمان داده و قبل از آنکه سیستم دچار مشکل شود بخار موردنیاز تولید خواهد شد.

کنترلر D در کنار نقش منجی‌گری خود، اگر به‌صورت مناسب تنظیم نشود می‌تواند به‌راحتی سیستم را ناپایدار کند. در صورتی که مقدار D به‌صورت نامناسب بزرگ انتخاب شود در واقع به این معناست که به تغییرات کوچک، بیش‌ازحد توجه کرده و ممکن است به خاطر نوسانات کوچک، فرمان‌های بزرگی را به عملگر اعمال کند. در نتیجه خیلی مهم است که استفاده از این ضریب با دقت کافی انجام شود. همان‌طور که پیش‌از این گفتیم نقش کنترلر D در بین دو ضریب دیگر کمتر از ۵ درصد است و می‌تواند در بسیاری از فرایندها مقدار آن را صفر گذاشته و تأثیر آن را نادیده گرفت. می‌توانید چگونگی تغییرات پاسخ سیستم کنترلی در اثر تغییرات ضریب D را در شکل ۲۴ مشاهده کنید.



شکل ۲۴



### یک سؤال فلسفی و مهم!

تا این جای کار مهم‌ترین روش‌های کنترلی را به همراه استراتژی‌های کنترلی یاد گرفتیم. اما با همه این‌ها باید به یک سؤال مهم جواب دهیم. سؤالی پاسخ به آن دقیقه انتظارات ما را از سیستم کنترلی موردنظرمان نشان می‌دهد:

### “یک سیستم کنترلی خوب، چه سیستمی هست؟”

پاسخ‌های زیادی به این سؤال داده شده. بعضی‌ها پایدار بودن سیستم را مهم‌ترین عامل دانسته‌اند. بعضی سرعت مناسب در مقابل پاسخ، بعضی خطای ماندگار کم و بعضی هم مثل آقایان ل و نیکولز یک سری عدد و رقم از سیستم بیرون آورده‌اند که مثلاً اگر نسبت قله دوم به قله اول از  $\frac{1}{4}$  کمتر باشد، کنترل مناسب است. اما شاید بهترین پاسخی که بتوان به این سؤال داد این باشد:

“سیستم کنترلی خوب و مناسب است که بتواند فرآیند موردنظر ما را به خوبی کنترل کند!”

بله به همین واضحی! واقعیت این است که هر فرآیندی برای نیازهایی دارد که ممکن است با نیازهای کنترلی فرآیند دیگر کاملاً متفاوت باشد. مثلاً شاید شاخص بالازدگی (Overshoot) در کنترل دمای یک اتاق

اهمیت چندانی نداشته باشد و ما بیشتر برایمان مهم باشد که هرچه زودتر دمای اتاق را به محدوده مطلوب برسانیم، اما همین بالا زدگی در دمای یک کوره یا فرآیند حساس بتواند باعث آسیب به تجهیزات یا خراب شدن محصولات شود. شاید یک فرآیند به دقت بالاتری نیاز داشته باشد درحالی که در فرایند دیگر سرعت بسیار مهم باشد. در یک فرآیند شاید حذف خطای ماندگار بسیار پراهمیت باشد درحالی که در فرایند دیگر حذف ثابت بودن و نوسانی نبودن پاسخ اولویت اول باشد. می بینید که با توجه به تنوع بسیار زیاد فرآیندها نمی توان به طور کلی نسخه واحدی را برای بهتر بودن یک سیستم نسبت به سیستم دیگر بیان کرد و هرکدام از عوامل بالا می توانند در شرایط خاص آن فرآیند بهترین روش کنترلی باشند.

### هرکدام از ضرایب منحنی کنترلی را به چه شکلی درمی آورند؟

یکی از مهم ترین نکاتی که باید قبل از تنظیم ضرایب PID بدانید این است که اصولاً تغییر هر پارامتر، باعث چه تغییراتی در منحنی سیستم کنترل خواهد شد. جدول زیر تأثیر هرکدام از این پارامترها را بر منحنی سیستم نشان می دهد:

| Parameter | Rise time    | Overshoot | Settling time | Steady-state error  | Stability <sup>[11]</sup> |
|-----------|--------------|-----------|---------------|---------------------|---------------------------|
| $K_p$     | Decrease     | Increase  | Small change  | Decrease            | Degrade                   |
| $K_i$     | Decrease     | Increase  | Increase      | Eliminate           | Degrade                   |
| $K_d$     | Minor change | Decrease  | Decrease      | No effect in theory | Improve if $K_d$ small    |

تنظیم ضرایب PID یا اصطلاحاً Tune کردن این ضرایب روش‌های گوناگونی دارد و در بسیاری از اوقات با توجه به شناختی که فرد با تأثیر ضرایب و همین‌طور رفتار فرآیند دارد، به‌صورت تجربی و گاهی آزمون و خطا انجام می‌شود. همچنین امروزه بسیاری از کنترلرها دیجیتالی از ویژگی به نام Auto tune برخوردار هستند که به‌صورت خودکار ضرایب مناسب را بعد از چند بار امتحان به دست می‌آورد. با توجه به این‌که بررسی این روش‌ها از حوصله بحث خارج است، در صورت تمایل می‌توانید به مراجعی که در انتهای این کتابچه معرفی شده یا کتابی که در رابطه با اصول کنترل و لوپ‌های کنترلی توسط این‌جانب در حال تدوین است و به‌زودی انتشار می‌یابد، مراجعه نمایید.

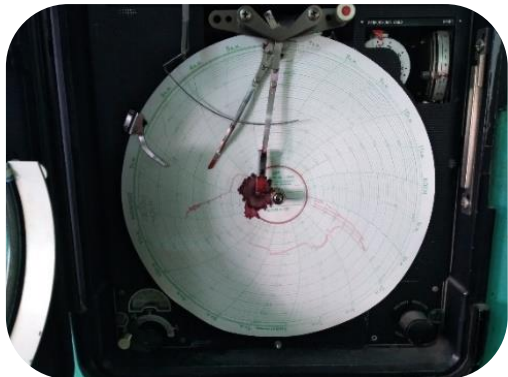
## فصل چهارم

### سخت افزارهای مربوط به کنترل PID

در گذشته و سال‌های نسبتاً دور، کنترل‌کننده‌های نیوماتیکی و آنالوگ برای خود برویا و احترامی داشتند! این روزها اما کمتر کسی به سراغ استفاده از این سیستم‌ها می‌رود. فقط از باب آشنایی و دیدن این تجهیزات منقرض شده! شکل ... مربوط به یک پنل کنترلی در اتاق کنترل مرکزی است که کل سیستم‌های آن با استفاده از هوای ابزار دقیق کنترل می‌شد و اصطلاحاً به صورت نیوماتیکی<sup>۱۶</sup> کار می‌کردند و شکل ... یکی از این کنترلرها را که علاوه بر کنترل نقش نمایشگر را هم داشته است نشان می‌دهد. اگر به بالا سمت راست این کنترلر دقت کنید ...های مربوط به تنظیم ضرایب را خواهید دید.



<sup>۱۶</sup> Pneumatic



## کنترل کننده‌های دیجیتال PID Digital Controller

یک سری تجهیزات که با عنوان کنترل کننده‌های PID مطرح هستند معمولاً فقط توانایی کنترل PID را دارا هستند و امکان اجرای سایر برنامه‌ها در آن‌ها وجود ندارد. البته این تجهیزات در انواع مختلفی ساخته می‌شوند که توانایی کنترل یک تا چند لوپ کنترلی را به صورت هم‌زمان دارا هستند. یک نمونه از این کنترل کننده‌ها در شکل روبرو می‌بینید.



## PLC

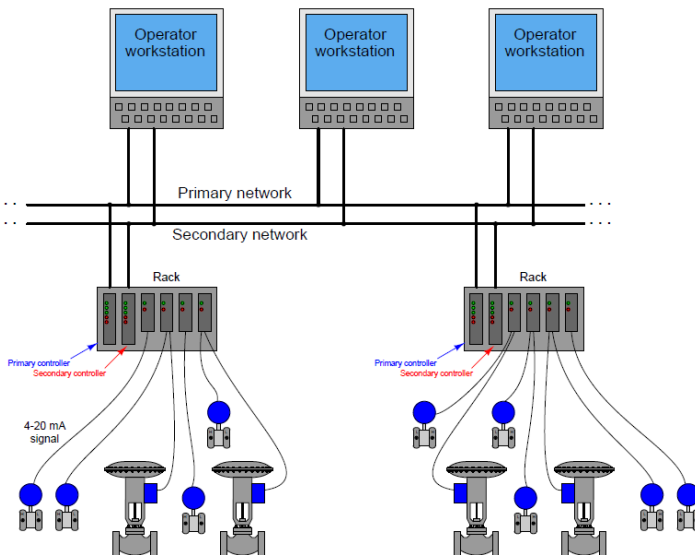
مگر می‌شود جایی حرف از کنترل وسط بیاید و PLC‌ها خودی نشان دهند! PLC‌ها برای پیاده‌سازی کنترل PID دو امکان را پیش روی ما قرار می‌دهند. اول استفاده از ماژول‌های خاص PID که روی PLC‌ها نصب می‌شوند. روش دوم برنامه‌نویسی مستقیم PLC است که



توسط کاربر انجام می‌شود. یک نمونه از PLC ها در شکل می‌بینید.

## DCS

اگر تعداد لوپ‌های کنترلی زیاد باشد، به جای استفاده از یک PLC از تعدادی PLC استفاده می‌شود که به صورت سیستم DCS با یکدیگر کار می‌کنند.



علاوه بر تجهیزات بالا از تجهیزات دیگری نیز برای کنترل PID استفاده می‌شود. سیستم‌های SCADA و FCS نیز نمونه‌های دیگری از

این تجهیزات هستند که برای آشنایی بیشتر با این تجهیزات می‌توانید به مراجع انتهایی این کتابچه یا کتابی که در رابطه با اصول کنترل و لوپ‌های کنترلی توسط این‌جانب در حال تدوین است و به‌زودی انتشار می‌یابد، مراجعه نمایید.

### سخن آخر

ممنونم که تا پایان این کتاب با من همراه بودید. امیدوارم هدف اصلی این کتاب که آشنایی شما دوست نادیده‌ام با مفاهیم اصلی لوپ‌های کنترلی به‌ویژه کنترل PID است، برآورده شده باشد. مجدداً ممنون می‌شوم اگر در هنگام مطالعه این کتاب الکترونیکی پیشنهاد یا انتقادی به ذہنتان رسید آن را از طریق ایمیل من به آدرس [Porbaha14@gamil.com](mailto:Porbaha14@gamil.com) یا صفحه اینستاگرامی‌ام به آدرس [@PeimanPorbaha](https://www.instagram.com/PeimanPorbaha) در میان بگذارید.

شادباشید و یادگیرنده

ارادتمند شما

پیمان پربها

مراجع:

- ۱) Kuphaldt, Tony R. *Lessons in industrial instrumentation*.  
Creative Commons Attribution/PAControl. com, ۲۰۱۸.