

فصل ۱

کنترل

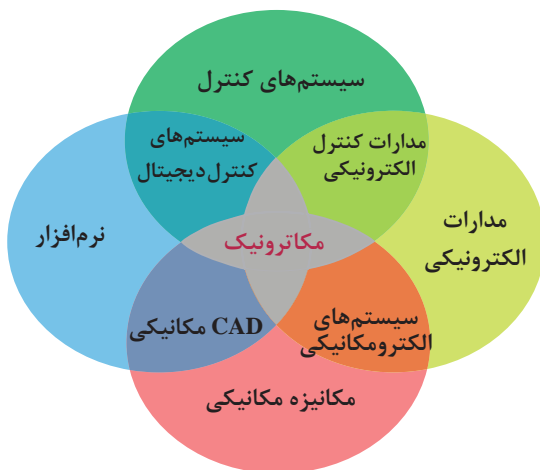


- مکاترونیک را تعریف کنید.
- نمونه وسایل مکاترونیکی را که در اطراف خود وجود دارد نام برده و دیاگرام بلوکی آنها را رسم کنید.
- مشاغل مکاترونیکی را نام ببرید.
- اجزای سیستم مکاترونیکی را همراه با مصادیق آن نام ببرید.
- کنترل حلقه باز و بسته را توضیح دهید.
- تفاوت سیستم کنترل دستی و خودکار را بیان کنید.
- ویژگی ها و وظایف کنترل کننده را توضیح دهید.

مکاترونیک چیست؟

در اوایل قرن بیستم علوم مهندسی، برق، مکانیک، عمران، و شیمی در حوزه‌های تخصصی مجزا، منابع علمی و مشاغل مربوط به خود را داشتند. با گذشت زمان و پیشرفت فناوری‌های نوین، پردازنده‌های کامپیوتری، قطعات الکترونیکی و مکانیزم‌ها، نیاز به تخصص‌های ترکیبی برای طراحی و نگهداری دستگاه‌ها و سیستم‌های جدید بسیار پر اهمیت گردید. مکاترونیک یکی از این زمینه‌های تخصصی ترکیبی بوده و شامل بخش‌های الکترونیک، مکانیک و نرم‌افزار کامپیوتری است که توسط سیستم کنترل با یکدیگر مرتبط و هماهنگ شده‌اند.

به عبارت دیگر، سیستم مکاترونیکی حاصل کنار هم قرار دادن بخش‌های الکترونیکی، مکانیکی و سیستم کنترل با ترکیب بهینه و همراه با هم‌افزایی این سیستم‌ها است.



در یک سیستم مکاترونیکی مانند خودرو، مرز مشخصی بین بخش‌های الکترونیک، مکانیک و سیستم کنترل وجود ندارد، شکل ۱-۱ نحوه ارتباط بخش‌های مختلف علم مکاترونیک را نشان می‌دهد.

شکل ۱-۱- حوزه گستردگی علم مکاترونیک

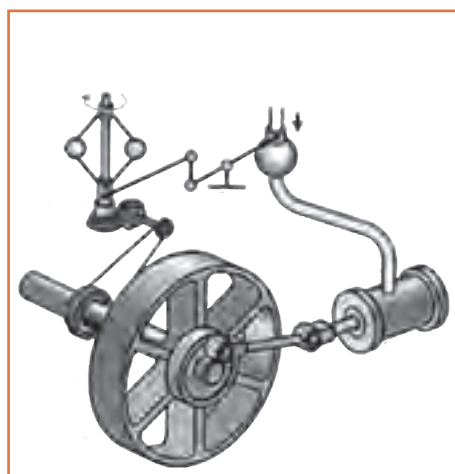
تاریخچه مکاترونیک

تلاش‌های صورت گرفته جهت ساخت سامانه‌های کنترل خودکار مکانیکی تاریخچه‌ای جالب و طولانی دارند. درواقع واژه «اتوماسیون»^۱ تا دهه ۴۰ میلادی رواج نداشت؛ اما سرانجام توسط کمپانی فورد موتور^۲ برای نام‌گذاری فرایندی استفاده شد که طی آن، یک ماشین قطعه‌ای را از یک ایستگاه کاری به ایستگاه کاری دیگر جهت مونتاژ انتقال داده و سپس آن قطعه را دقیقاً در محل معینی برای انجام مراحل بعدی مستقر

۱- Automation

۲- Ford Motor

می‌کرد. با وجود این، توسعه موفقیت‌آمیز سامانه‌های کنترل خودکار مکانیکی قبل از آن مقطع اتفاق افتاده بود. به‌طور مثال کاربردهای ابتدایی سامانه‌های کنترل خودکار در یونان و در سال ۳۰۰ قبل از میلاد با توسعه مکانیسم‌های **تنظیم‌کننده**^۱ شناور آب به اجرا درآمد. **ساعت آبی Ktesibios** که در آن از تنظیم‌کننده شناور آب استفاده شده و یک چراغ نفتی شناور که از آن جهت ایجاد سطحی ثابت استفاده شده بود، دو نمونه دیگر هستند. بعدها، در قرن اول میلادی، هرون^۲ در اسکندریا کتابی به نام *نیوماتیکا*^۳ انتشار داد که طی آن گونه‌های مختلف مکانیسم‌های تنظیم سطح آب را با استفاده از تنظیم‌کننده‌های شناور تشریح کرد.



شکل ۱-۲- نمایشی از گاورنر جیمز وات

در اروپا و روسیه حد واسط قرون ۱۷ و ۱۹ میلادی تجهیزات مهم بسیاری اختراع شد که بعضاً مرتبط با مکترونیک بودند. کورنلیت دربل^۴ **تنظیم‌کننده حرارتی** اختراع کرد که در واقع جزء اولین سیستم‌های پسخور، در آن دوره محسوب می‌شد. به‌دنبال آن (۱۶۴۷-۱۷۲۰) دنیس پاپیس^۵ تنظیم‌کننده ایمنی فشار جهت دیگ‌های بخار را در سال ۱۶۸۱ میلادی اختراع کرد. تنظیم‌کننده فشاری وی بیشتر مشابه شیر فشار دیگ‌های زودپز امروزی بوده است.

تکامل بعدی در اتوماسیون با پیشرفت‌های حاصل در نظریه کنترل مربوط به گاورنر فلای‌بال^۶ جیمز وات در سال ۱۷۶۹ میلادی است. گاورنر فلای‌بال که در شکل ۱-۲ آمده است، جهت کنترل سرعت موتور بخار استفاده می‌شود. با اندازه‌گیری سرعت شفت خروجی و به‌کارگیری حرکت چرخشی فلای‌بال، شیر بخار ورودی به موتور به‌طور خودکار کنترل می‌شود. با افزایش سرعت موتور، گوی‌های فلزی روی گاورنر بلندشده و از محور شفت فاصله می‌گیرند و به این ترتیب راه شیر بسته می‌شود. با کاهش سرعت موتور، کره‌های فلزی روی گاورنر پایین می‌آیند و راه شیر باز می‌شود. این نمونه‌ای از سامانه کنترل پسخور است که سیگنال بازخورد و سیگنال راه‌انداز کنترل به‌طور کامل در یک سخت‌افزار مکانیکی ترکیب شده‌اند.

پیشرفت سیستم‌های مکانیکی که دارای کنترل خودکار هستند در نهایت منجر به ایجاد سیستم‌های مکترونیکی امروزی گردید.

۱- Regulator

۲- Heron

۳- Pneumatica

۴- Cornelis Derbel

۵- Dennis Papis

۶- Flyball

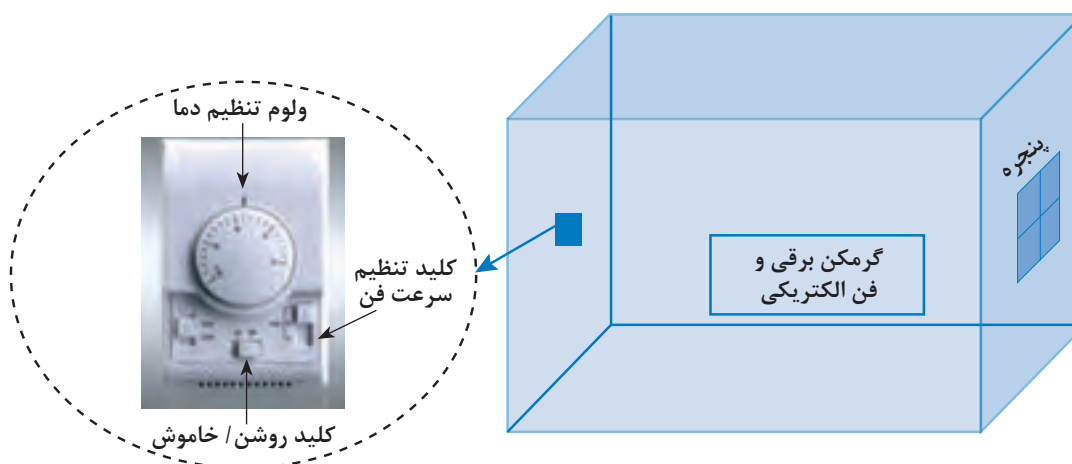
نمونه‌هایی از سیستم‌های مکترونیکی

در سال‌های اخیر نمونه‌های بسیاری از سیستم‌های مکترونیکی به‌طور گسترده تولید و استفاده شده‌اند. خودرو، ماشین لباسشویی، یخچال، پرینتر و بسیاری از اسباب‌بازی‌ها از این موارد هستند.



شکل ۳-۱- نمونه‌هایی از سیستم‌های مکترونیکی

سیستم کنترل دمای داخلی اتاق با استفاده از گرمکن برقی هم یک سیستم مکترونیکی به‌حساب می‌آید.



شکل ۴-۱- سیستم مکترونیکی کنترل دمای داخلی اتاق. حسگر دما در داخل ترمومتر نصب‌شده روی دیوار قرار دارد. کلید تنظیم سرعت فن و ولوم تنظیم دمای مطلوب هم روی ترمومتر قرار دارند.

در این سیستم یک گرمکن وجود دارد که پس از روشن شدن، دمای اتاق را افزایش می‌دهد. همچنین، یک حسگر دما، ولوم تنظیم دمای مطلوب، کلید تنظیم سرعت فن و کلید روشن - خاموش هم در پنل ترمومتر^۱

۱- Thermometer Panel

روی دیوار نصب شده‌اند. در داخل پنل یک نرم‌افزار کنترل‌کننده وجود دارد که دمای واقعی اتاق را از حسگر دما می‌خواند. سپس، با توجه به سرعت فن و مقدار مطلوب دمای تنظیم‌شده توسط کاربر، فن و گرمکن را کنترل کرده و به‌طور خودکار آنها را روشن و خاموش می‌کند.

در سال‌های اخیر نمونه‌های بسیاری از سیستم‌های مکترونیکی پیشرفته طراحی شده‌اند. در شکل زیر دو نمونه سگویی^۱ نشان داده شده است. این وسیله برای جابه‌جایی انسان طراحی شده است.



شکل ۵-۱- دو نمونه سگویی برای جابه‌جایی افراد در حالت ایستاده

ربات انسان‌نما^۲ نمونه‌ای از سیستم‌های مکترونیکی جدید است. این ربات‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که ظاهر و حرکاتی شبیه انسان داشته باشند. برخی از این ربات‌ها قابلیت راه رفتن، بالا رفتن از پله، دویدن، صحبت کردن، انجام پرسش و پاسخ با اطرافیان و حتی ابراز احساسات را نیز دارند.



شکل ۶-۱- نمونه‌ای از ربات انسان‌نما به نام سُرنا طراحی شده در دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تهران



(الف)



(ب)



(ج)



(د)

علاوه بر سیستم‌های مکاترونیکی که روی زمین حرکت می‌کنند، دسته وسیعی از سیستم‌های مکاترونیکی مانند هواپیما، پهباد، بالزن^۱، و پرنده^۲ چهار موتوره^۳ در هوا حرکت می‌کنند و جابه‌جا می‌شوند.

پرنده^۴ چهار موتوره، دارای چهار موتور الکتریکی چرخان و تعدادی حسگر موقعیت، سرعت و ارتفاع است که با استفاده از آنها می‌تواند در هوا حرکت کند. این پرنده برای مأموریت‌های فیلم‌برداری، عملیات نجات، عبور از مکان‌های صعب‌العبور و رساندن بسته‌های پستی استفاده می‌شود.

این پرنده در ارتفاع و بُرد پروازی پایین استفاده می‌شود. بالزن نمونه‌ای جدیدتر است که مکانیزم حرکتی آن از پرنده‌ها و حشرات الهام گرفته شده است. این پرنده با بال زدن، خود را در هوا نگه می‌دارد و می‌تواند حرکت کند. قدرت مانور این پرنده زیاد بوده و ارتفاع و برد پروازی آن کم است و برای فیلم‌برداری استفاده می‌شود.

پهبادها، همان هواپیمای بدون سرنشین هستند که کاربردهای وسیعی در نقشه‌برداری و حمل بار دارند.

شکل ۱-۷

الف) پرنده^۴ چهارموتوره

ب) بالزن

ج) و د) دو نمونه پهباد.

صنایع و مشاغل مکترونیک

مهندسی مکترونیک در صنایع متنوعی کاربرد دارد. کمک مهندس، تعمیرکار، نصاب، راه انداز، تکنسین، طراح سیستم اتوماسیون، اپراتور و برنامه ریز نمونه‌هایی از این مشاغل هستند که نمونه‌هایی از آنها در جدول ۱-۱ به اختصار آورده شده‌اند.

جدول ۱-۱ - نمونه‌هایی از مشاغل و صنایع مرتبط با مکترونیک

اتوماسیون (Automation)	سیستم‌های آموزش (Training Systems)	صنایع اتومبیل (Automotive Technology)
صنعت فرش (Carpentry Industry)	فناوری اتاق تمیز (Clean Room Technology)	صنعت جابه‌جایی (Handling & Transport)
صنعت پوشاک (Garment Industry)	صنعت پلاستیک (Plastic Industry)	صنعت سرامیک (Ceramic Industry)
تست و مونتاژ قطعات ریز (Assembler)	صنعت برق و الکترونیک (Electronic and Electric Industry)	صنعت هیدرولیک (Hydraulic Industry)
صنعت پتروشیمی (Petrochemical Industry)	صنعت نفت و گاز (Oil & Gas Industry)	صنعت غذایی (Food Industry)
صنعت اسباب‌بازی (Toy Industry)	فلزکاری (Metal Working)	صنعت چوب (Wood Industry)
صنعت خودرو (Mobile Technology)	صنعت پزشکی (Medical Industry)	صنعت چاپ و کاغذ (Paper & Printing)
صنعت داروسازی (Medicine Industry)	صنعت کشتی‌سازی (Shipping)	صنعت هوایی (Airspace Industry)
صنعت ابزارآلات (Tools Technique)	صنعت ساختمان (Building Industry)	صنعت بسته‌بندی (Packaging)
صنعت معدن (Mining)	صنعت نوشیدنی (Drink Industry)	صنعت بطری‌سازی (Filling & Botteling)
ساخت ماشین‌آلات (Machinery)	کنترل فرایند (Process Control)	صنعت شیشه (Glass Industry)

سیستم مکاترونیکی

قبل از آشنایی با سیستم مکاترونیکی باید با مفهوم سیستم آشنا شویم. **سیستم مجموعه‌ای از اجزا است که برای رسیدن به هدف خاصی کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند.** قلب، مغز، سیستم آب و هوا و منظومه شمسی تعدادی از سیستم‌های طبیعی هستند. خودرو، هواپیما، کشتی، ربات، بازار بورس، پالایشگاه‌ها و کارخانه‌ها از جمله سیستم‌های مصنوعی هستند که توسط انسان ساخته شده‌اند. یک سیستم خاص ممکن است به یک یا چند بخش مختلف تقسیم شود که به هریک از آنها زیرسیستم می‌گویند. به‌عنوان مثال، خودرو شامل زیرسیستم‌های انتقال قدرت، موتور، ECU^۱، زیرسیستم فرمان، زیرسیستم تعلیق و غیره است.

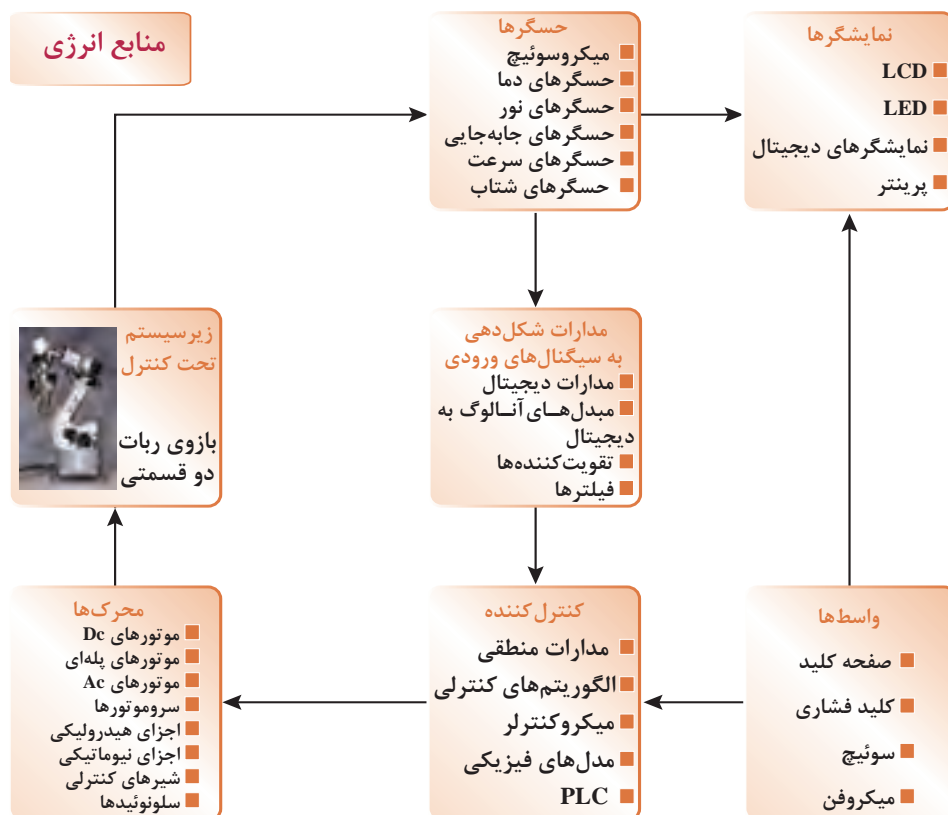
تحقیق کنید



در مورد سیستم‌هایی که در زیر آمده تحقیق کنید. زیرسیستم‌های آنها را نام ببرید و مشخص کنید هر کدام مربوط به چه رشته تحصیلی (مانند مکانیک، الکترونیک، کنترل، کامپیوتر، شیمی و غیره) هستند. «هواپیما، خانه هوشمند، الکترو پمپ آب، جاروبرقی...»

اجزای سیستم مکاترونیکی

یک سیستم مکاترونیکی شامل زیرسیستم‌های مکانیک و الکترونیک می‌شود که توسط یک زیرسیستم کنترل به هم مرتبط شده‌اند. در شکل زیر اجزای یک سیستم مکاترونیکی (به‌طور خاص بازوی ربات دو قسمتی^۲) آورده شده است. توجه کنید، ممکن است یک سیستم مکاترونیکی برخی از این اجزا را نداشته باشد.



شکل ۸-۱- اجزای یک سیستم مکاترونیکی

به عنوان مثال دیگر، در یک پهباد، حسگرها موقعیت و ارتفاع را اندازه گیری می کنند. ولتاژ خروجی حسگرها پس از تقویت و حذف نوسانات غیرمجاز به کنترل کننده ارسال می شود. کنترل کننده با توجه به موقعیت فعلی و موقعیت مطلوب پهباد تصمیم گیری می کند که با چه توانی موتورهای پهباد را به حرکت درآورد و زاویه هریک از بالکها چگونه باشند تا پهباد به موقعیت مطلوب برسد.

سیستم کنترل

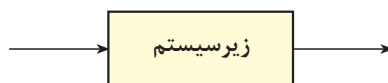
امروزه سیستم های کنترل یا به عبارت دقیق تر سیستم کنترل پسخور^۱ بخشی اساسی تمامی تولیدات صنعتی بشری و حتی زندگی روزمره هستند. اولین سیستم های کنترل ساخته شده به چندین قرن قبل از میلاد بازمی گردد. با گذشت زمان، ابزار و مبانی علمی سیستم های کنترل پیشرفت پیدا کرده و از سیستم های ساده اولیه به سمت سیستم های کنترلی بسیار پیچیده امروزی توسعه یافته است. از مهم ترین سیستم های کنترلی بشر، گاورنر ماشین بخار طراحی شده توسط جیمز وات است که در دوران انقلاب صنعتی ساخته شد و در توسعه دانش کنترل تأثیر به سزایی داشت (ر.ک: ۲-۱ شکل). در حال حاضر نظریه سیستم های کنترل در هواپیماها، پهبادها، ماهواره ها، صنایع نفت و گاز، ربات ها، اتومبیل، لباس شویی، یخچال، ماکروفر، سیستم های اقتصادی، سیستم های بیولوژیکی و حتی کنترل رفتارهای اجتماعی به کار می رود.

بر اساس تعریف سیستم کنترل شامل الگوریتم ها، توابع ریاضی، نرم افزارهای کامپیوتری و سخت افزارهایی است که هدف آنها هماهنگ سازی کل سیستم است.

به عنوان مثال خلبان خودران^۲ هواپیما بخشی از سیستم کنترل است. در یک خانه هوشمند^۳ سیستم کنترل وظیفه دارد و بر اساس مقادیر اندازه گیری شده دمای اتاق و شدت نور ورودی از پنجره، وضعیت پرده های پنجره و دمای موتورخانه را تغییر دهد به طوری که دمای داخلی خانه مطلوب باشد.

نمودار بلوکی^۴

بخش مهمی از یک سیستم مکترونیکی زیرسیستم کنترل است. این زیرسیستم وظیفه دارد قسمت های مختلف را هماهنگ کند به گونه ای که نیل به هدف مورد نظر ممکن شود. برای اینکه بتوانیم نحوه تأثیر قسمت های مختلف سیستم مکترونیکی بر یکدیگر را بهتر درک کنیم از نمودارهای بلوکی استفاده می کنیم. نمودار بلوکی شامل بلوک های مختلف است که هر بلوک یک زیرسیستم را نشان می دهد.



شکل ۱-۹ نمودار بلوکی یک زیرسیستم، هر بلوک دارای ورودی و خروجی است.

هر بلوک یا زیرسیستم دارای ورودی و خروجی کنترلی است. باید ورودی و خروجی کنترلی زیرسیستم، روی بلوک مربوط به آن زیرسیستم مشخص شوند. از دیدگاه کنترلی کمیتی یا پارامتری که می خواهیم کنترل

۱- Feedback Control System

۲- Autopilot

۳- Smart House

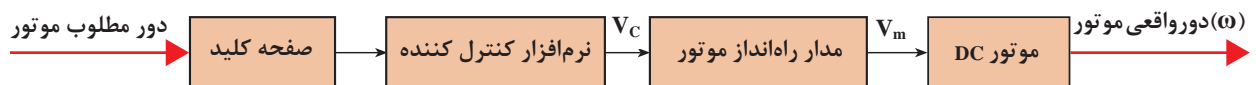
۴- Block Diagram

کنیم خروجی کنترلی است. کمیت یا پارامتری که با استفاده از آن خروجی را کنترل می‌کنیم، ورودی کنترلی است؛ به‌عنوان مثال سیستم کنترل دور موتور شکل ۱۰-۱ را در نظر بگیرید.



شکل ۱۰-۱- نمایی از سیستم کنترل دور موتور

در این سیستم سرعت مطلوب موتور با صفحه کلید در کامپیوتر وارد می‌شود. نرم‌افزار کنترل‌کننده که داخل کامپیوتر قرار دارد عدد وارد شده را دریافت کرده و پس از انجام یک سری محاسبات ریاضی سیگنال خروجی (V_c) را تولید می‌کند. این سیگنال که ولتاژ کنترلی نام دارد به مدار راه‌انداز موتور انتقال پیدا می‌کند. راه‌انداز با توجه به سیگنال دریافتی بخشی از ولتاژ تغذیه (V_s) را به ولتاژ ورودی موتور (V_m) منتقل می‌کند. (V_m) به موتور اعمال شده و آن را با دور مورد نظر کاربر به حرکت درمی‌آورد. دیاگرام بلوکی سیستم مکترونیکی در زیر آورده شده است:



شکل ۱۱-۱- دیاگرام بلوکی سیستم کنترل موتور DC

در شکل ۱۱-۱ برای زیرسیستم موتور DC، دور موتور (ω) خروجی کنترلی و V_m ورودی کنترلی هستند. برای زیرسیستم مدار راه‌انداز، V_m خروجی کنترلی و V_c ورودی کنترلی است. در صورتی که کاربر دور مطلوب جدید را وارد کند، V_c ، V_m و به تبع آن ω تغییر می‌کنند.

توجه شود، نمودار بلوکی تنها توابع و مسیر حرکت منطقی سیستم را نشان می‌دهد و نوع سیگنال‌های بین بلوک‌ها و اتصالات مکانیکی و الکتریکی را مشخص نمی‌کند.

نکته



ورودی و خروجی کنترلی زیرسیستم‌های زیر را تعیین کرده و نمودار بلوکی آنها را رسم کنید:
«سیستم ترموستات خودرو، سیستم آب گرمکن، سیستم کنترل سرعت خودرو»

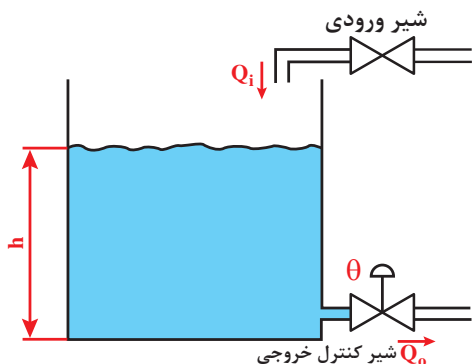
تمرین





در مورد وظیفهٔ درایور موتور DC و نحوهٔ عملکرد آن تحقیق کنید.

کنترل حلقه باز^۱ و حلقه بسته^۲

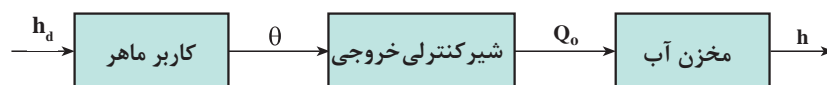


شکل ۱۲-۱ مخزن آب روباز

سیستم‌های کنترلی از جنبه‌های مختلف دسته‌بندی می‌شوند. از این جمله می‌توان سیستم‌های کنترل دستی^۳ و خودکار^۴ و یا سیستم‌های حلقه باز، حلقه بسته و پیشخور^۵ را نام برد. نام دیگر سیستم کنترل حلقه بسته سیستم کنترل پیشخور^۶ است. این اصطلاحات در ادامه با یک مثال توضیح داده شده‌اند. مخزن آب روباز شکل روبه‌رو را در نظر بگیرید.

حداکثر ارتفاع مخزن H_m ۵ متر و سطح مقطع آن ۱۰ مترمربع است. آب از شیر ورودی با دبی Q_i وارد مخزن می‌شود و با دبی Q_o از آن خارج می‌گردد. اگر دبی آب خروجی بیشتر از دبی آب ورودی باشد سطح آب در مخزن h پایین می‌رود. اگر دبی آب ورودی بیشتر از دبی آب خروجی باشد، سطح آب مخزن بالا می‌رود. با توجه به شکل ۱۲-۱ دبی آب ورودی قابل کنترل نیست (چون شیر ورودی دستگیره‌ای برای کنترل ندارد)، ولی دبی آب خروجی با استفاده از تغییر زاویه θ شیر کنترلی خروجی قابل تنظیم است. هدف این است که سطح آب مخزن، در ارتفاع مطلوب h_d تنظیم شود.

از آنجا که هدف، تنظیم سطح آب مخزن با استفاده از تنظیم دبی خروجی است، پس از دیدگاه کنترلی h خروجی و Q_o ورودی زیر سیستم مخزن هستند. همچنین، θ و Q_o به ترتیب ورودی و خروجی زیر سیستم شیر کنترلی هستند. برای انجام کنترل از کاربر ماهر استفاده شود که براساس تجربه می‌داند شیر کنترلی را در چه زاویه‌ای قرار دهد تا سطح آب به ارتفاع h_d برسد. نمودار بلوکی این سیستم در شکل زیر آورده شده است:



شکل ۱۳-۱ دیگرام بلوکی مخزن در حالت کنترل حلقه باز

۱- Open Loop

۲- Closed Loop

۳- Manual Control System

۴- Automatic Control System

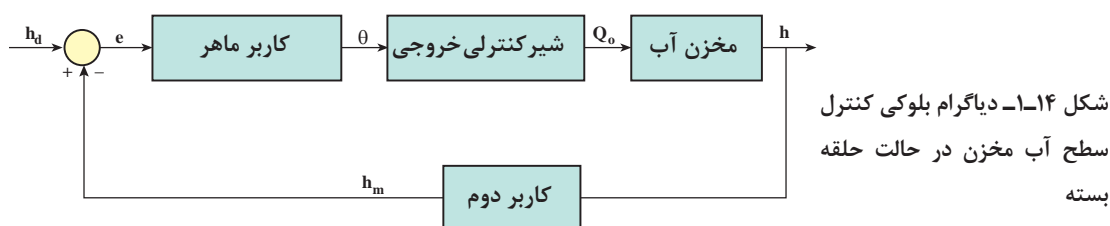
۵- Feed Forward

۶- Feedback

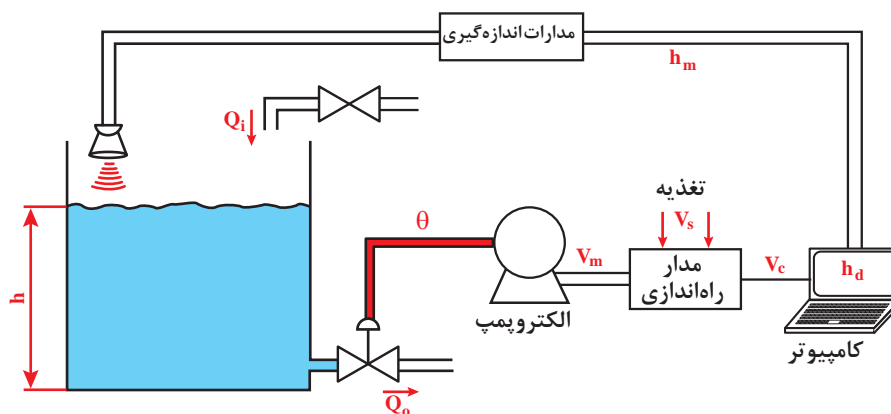
۷- دبی (Flow)، حجمی از آب که در یک ثانیه از یک مقطع لوله عبور می‌کند.

در این سیستم کاربر از مقدار سطح واقعی آب (h) در هر لحظه اطلاعی ندارد و تنها براساس تجربه عمل می‌کند. به این ترتیب که از قبل می‌داند برای هر ارتفاع مطلوب h_d چقدر باید زاویه شیر (A) را بچرخاند. به این سیستم کنترل، **سیستم کنترل حلقه باز** گویند.

در اثر عواملی مانند بارندگی، به وجود آمدن لقی در شیر کنترلی و یا ایجاد نشتی در بدنه مخزن سطح آب تغییر می‌کند. در ادبیات رشته کنترل، این **عوامل مزاحم را اغتشاش^۱ و یا نویز^۲** می‌نامند. نویز نوسانات شدید و سریع و اغتشاش نوسانات و تغییرات کند دارد. با وجود عوامل مزاحم کاربر قادر به تنظیم صحیح زاویه شیر کنترلی برای رسیدن به مقدار سطح مطلوب آب (h_d) نخواهد بود و سیستم کنترلی دچار خطا می‌شود. برای رفع این مشکل یک نفر بالای مخزن می‌رود و با استفاده از شاخصی که در مخزن نصب شده سطح واقعی آب را اندازه‌گیری کرده و مقدار آن را هر لحظه به کاربر ماهر در پایین مخزن اطلاع می‌دهد. سطح آب اندازه‌گیری شده با h_m نمایش داده می‌شود. اگر $h_d > h$ باشد، کاربر ماهر شیر کنترلی را کمی می‌بندد و اگر $h_d < h$ باشد شیر کنترلی را کمی باز می‌کند. نمودار بلوکی این سیستم در زیر آورده شده است.



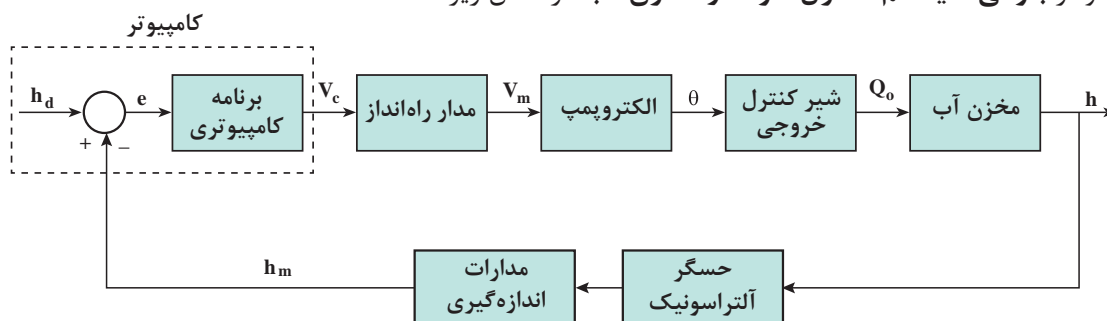
به این سیستم کنترلی **سیستم حلقه بسته یا سیستم پسخور** می‌گوییم. اگر در اثر عوامل مزاحم h تغییر کند، کاربر دوم آن را اندازه می‌گیرد و به اطلاع کاربر ماهر می‌رساند و زاویه شیر کنترلی مجدداً تنظیم می‌شود. خطای سیستم کنترل حلقه بسته کمتر و مقاومت آن در برابر عوامل مزاحم بسیار زیادتر از سیستم حلقه باز است. بخش اصلی سیستم حلقه بسته، سیگنال پسخور و یا همان زیر سیستم اندازه‌گیری است. پسخور باعث می‌شود کنترل‌کننده (کاربر ماهر) بتواند با توجه به خروجی لحظه‌ای اندازه‌گیری شده، عمل کنترلی خود را تنظیم کند.



شکل ۱۵-۱-۱ نمایش از سیستم کنترل خودکار (حلقه بسته) مخزن آب

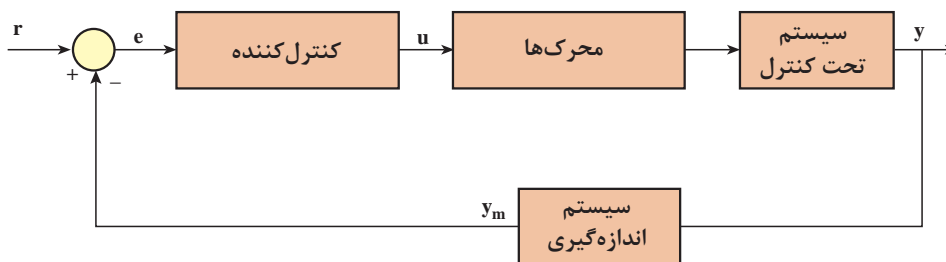
ایده سیستم پسخور حتی در زندگی روزمره نیز کاربرد دارد و می‌تواند عملکرد رفتاری انسان را بهبود بخشد. اگر در زندگی بدون توجه به برآمد اعمال قبلی و خروجی رفتارهای خود، تصمیم‌گیری و عمل کنیم، نمی‌توانیم مطمئن باشیم در آینده به شرایط مناسبی دست پیدا می‌کنیم. در صورتی که در نظر گرفتن برآمد اعمال و کارهای قبلی (پسخور) در تصمیمات روزمره، به نتایج بهتری در آینده منجر می‌شود. هر دو سیستم‌های کنترل گفته شده برای مخزن از نوع **کنترل دستی** هستند و به نیروی انسانی نیاز دارند. برای کاهش اثر نیروی انسانی و افزایش دقت عملکرد، از سیستم کنترل خودکار استفاده می‌شود. در این سیستم h_d توسط کاربر در کامپیوتر وارد می‌شود. همچنین، از یک حسگر آلتراسونیک جهت اندازه‌گیری لحظه‌ای سطح آب مخزن استفاده شده است. خروجی حسگر که ولتاژ ضعیف و نویزی است به مدارات اندازه‌گیری ارسال می‌شود که پس از طی مراحل خروجی اندازه‌گیری شده h_m را ایجاد و آن به کامپیوتر ارسال می‌کند. کامپیوتر با توجه به اختلاف h_d و h_m و $e = h_d - h_m$ ، و با استفاده از توابع کنترلی از پیش طراحی شده موجود در کامپیوتر، ولتاژ کنترلی (V_c) مناسب را به مدار راه‌انداز ارسال می‌کند. مدار راه‌انداز با توجه به V_c ، ولتاژ V_m را به الکتروپمپ اعمال می‌کند و باعث می‌شود به ترتیب θ ، Q_o و در نهایت h تغییر کنند.

نمودار بلوکی سیستم کنترل خودکار مخزن آب در شکل زیر آمده است.



شکل ۱-۱۶- نمودار بلوکی سیستم کنترل خودکار (حلقه بسته) مخزن آب

در این سیستم اگر h_d تغییر کند، به‌طور خودکار ولتاژها و سیگنال‌های قسمت‌های مختلف تغییر خواهد کرد تا اختلاف h و h_d کاهش پیدا کند. اکثر سیستم‌های کنترلی و سیستم‌های مکترونیک از نوع سیستم حلقه بسته و خودکار هستند. در شکل دیاگرام بلوکی یک سیستم کنترل خودکار حلقه بسته را در حالت کلی مشاهده می‌کنید.

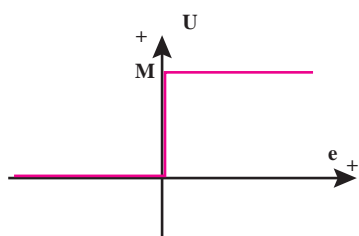


شکل ۱-۱۷- نمودار بلوکی سیستم کنترل خودکار حلقه بسته

r ورودی مرجع^۱ یا ورودی مطلوب، e خطا^۲، u ورودی کنترلی^۳ یا عمل کنترل^۴، y خروجی^۵، y_m خروجی اندازه‌گیری شده^۶ هستند. به سیستم اصلی تحت کنترل plant یا سیستم می‌گویند. زیرسیستم‌های یک سیستم حلقه بسته کنترل‌کننده^۷، محرک‌ها^۸، سیستم تحت کنترل و سیستم اندازه‌گیری^۹ هستند. در بخش‌های بعدی این فصل هر یک از این زیرسیستم‌ها توصیف شده‌اند.

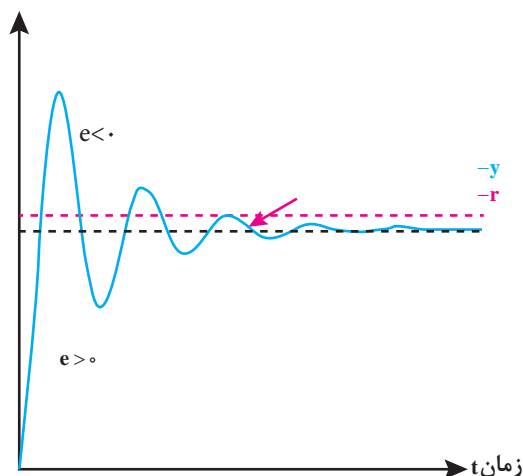
کنترل‌کننده

کنترل‌کننده شامل الگوریتم و یا توابع ریاضی است که وظیفه هماهنگ‌سازی در سیستم کنترل را انجام می‌دهند، به عنوان مثال در یخچال کنترل‌کننده، دمای داخل یخچال را دریافت می‌کند و پس از مقایسه آن با دمای مطلوبی که توسط کاربر وارد شده، کمپرسور را روشن یا خاموش می‌کند. کنترل‌کننده‌ها انواع مختلفی دارند که به دو دسته کلی، کنترل‌کننده‌های کلاسیک و کنترل‌کننده‌های پیشرفته تقسیم می‌شوند.

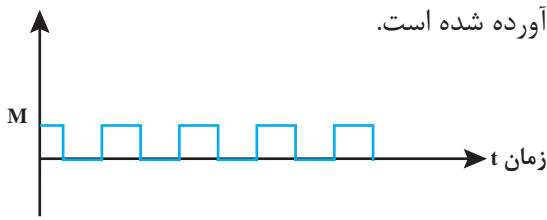


شکل ۱۸-۱ نمودار عملکرد کنترل‌کننده روشن - خاموش

معمولاً در سیستم‌های مکترونیکی و صنایع کنترل‌کننده‌های کلاسیک کاربرد بیشتری دارند، مگر اینکه پیچیدگی سیستم تحت کنترل بسیار زیاد باشد. در این کتاب تنها کنترل‌کننده‌های کلاسیک بررسی می‌شوند. ساده‌ترین نوع کنترل‌کننده، کنترل‌کننده روشن - خاموش^{۱۰} است. رابطه ورودی کنترل‌کننده روشن - خاموش (e) با خروجی آن (u) در شکل ۱۸-۱ نمایش داده شده است.



اگر خروجی اندازه‌گیری شده کوچک‌تر از ورودی مطلوب باشد، خطا مثبت است و عمل کنترل انجام خواهد شد ($u=M$). مقدار M به نوع سیستم کنترل و محرک‌ها بستگی دارد. اگر خروجی اندازه‌گیری شده بیشتر از ورودی مطلوب باشد، خطا منفی است و عمل کنترل صفر می‌شود. در شکل زیر مثالی از نمودار زمانی ورودی مرجع، خروجی و عمل کنترل آورده شده است.



شکل ۱۹-۱ نمودار زمانی ورودی مرجع و خروجی (شکل سمت چپ). نمودار زمانی ورودی کنترلی (شکل سمت راست).

۱- Reference Input

۵- Output

۹- Measurement System

۲- Error

۶- Measured Output

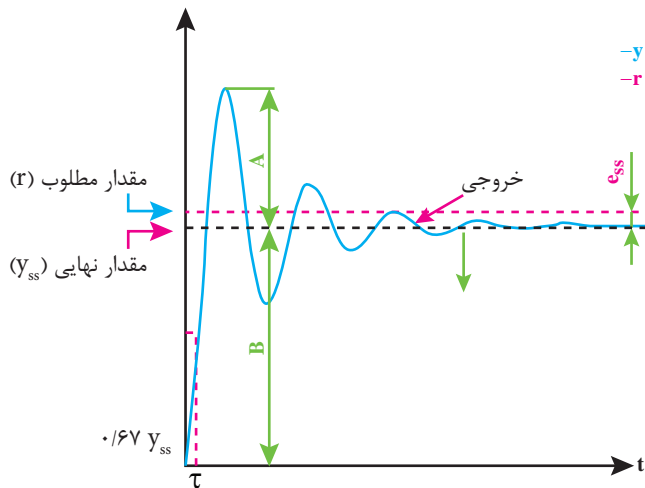
۱۰- On / Off Controller

۳- Control Input

۷- Controller

۴- Control Action

۸- Actuator

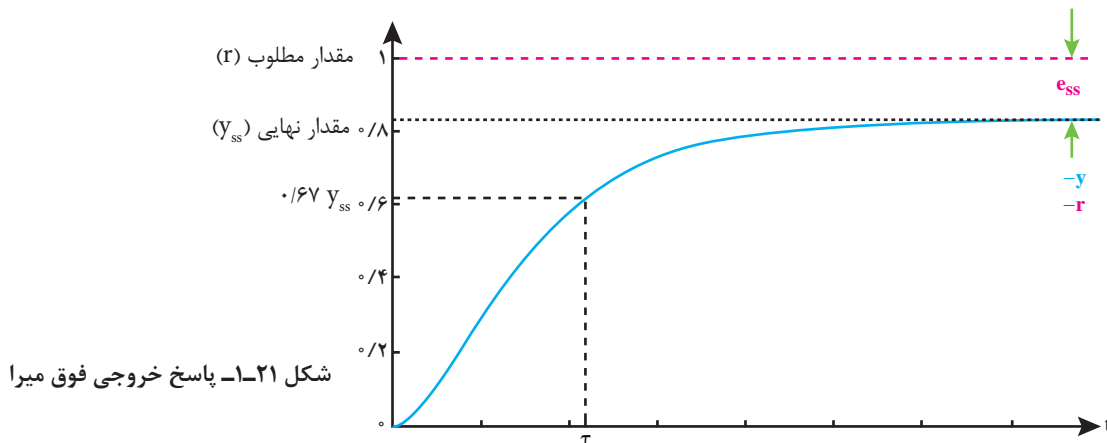


اگر کنترل‌کننده مناسب طراحی شده باشد، خروجی ویژگی‌های مطلوبی خواهد داشت. در شکل ۱-۲۰ خروجی سیستم حلقه بسته به ازای ورودی مرجع ثابت r نشان داده شده است. در حالت ایده‌آل خروجی y دقیقاً روی ورودی مرجع r قرار می‌گیرد ولی در عمل نمودارهایی مطابق شکل ۱-۲۰ به دست می‌آید.

شکل ۱-۲۰- نمودار زمانی خروجی سیستم کنترلی با نمایش ویژگی‌های خروجی

مقداری را که y در زمان‌های طولانی به آن می‌رسد مقدار نهایی (y_{ss}) می‌نامند. مناسب است که **خطای حالت دائمی**^۱ ($e_{ss} = r - y_{ss}$) تا حد ممکن کمتر باشد. در بهترین حالت e_{ss} صفر است. در این حالت ردیابی ورودی مرجع به خوبی انجام شده است. مدت زمانی را که طول می‌کشد تا خروجی به $0.67 y_{ss}$ برسد **ثابت زمانی**^۲ (τ) گویند. به طور سرانگشتی، بعد از 4τ ثانیه خروجی به مقدار نهایی خود می‌رسد. هرچه τ کوچک‌تر باشد؛ یعنی خروجی سریع‌تر به مقدار نهایی می‌رسد و سیستم سریع‌تر است. در شکل نسبت $100 \times \frac{A}{B}$ را **درصد بالا زدگی**^۳ (M_p) می‌نامند.

فرض کنید در یک سیستم مکاترونیکی هدف تنظیم دور موتور به ۱۰۰ دور بر دقیقه است. وجود بالازدگی به این معناست که دور موتور افزایش می‌یابد و پس از رسیدن به ۱۰۰، حول آن نوسان می‌کند و پس از گذشت مدتی روی ۱۰۰ ثابت می‌ماند. به رفتار خروجی در شکل ۱-۲۰ **پاسخ زیرمیرا**^۴ می‌گویند. نوع دیگری از رفتار خروجی **پاسخ فوق‌میرا**^۵ است که در شکل ۱-۲۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱-۲۱- پاسخ خروجی فوق میرا

۱- Steady State Error

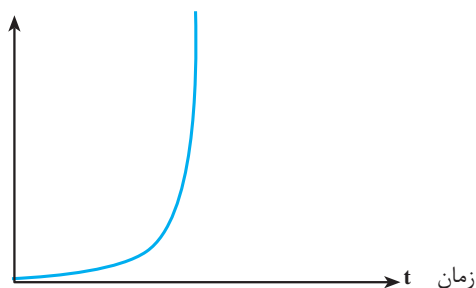
۲- Time Constant

۳- Maximum Overshoot

۴- Underdamped

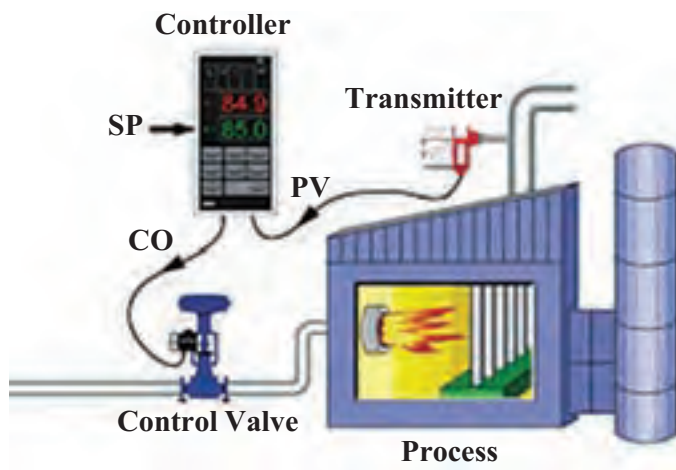
۵- Overdamped

در این پاسخ بالازدگی صفر است. در عمل هرچه بالازدگی کمتر باشد، خروجی بهتر است. اگر طراحی کنترل کننده نامناسب باشد خروجی با گذشت زمان افزایش می یابد تا جایی که سیستم حلقه بسته معیوب شود. در این حالت سیستم ناپایدار^۱ شده است.



شکل ۱-۲۲ نمونه ای از پاسخ خروجی یک سیستم ناپایدار

کنترل کننده های خانواده PID دسته ای بسیار مهم از کنترل کننده های کلاسیک شامل PID، PI، PD، و P هستند. این کنترل کننده ها سه ضریب I، P، و D دارد که با تنظیم آنها می توان به پاسخ مطلوب رسید.



شکل ۱-۲۳ کنترل کننده PID صنعتی برای تنظیم دمای داخل کوره

طراحی کنترل کننده براساس تجربه و محاسبات ریاضی انجام می شود. جدول ۱-۲ برای انتخاب نوع کنترل کننده به کار می آید.

۱- Unstable

جدول ۱-۲- ویژگی‌های کنترل‌کننده‌های خانواده PID

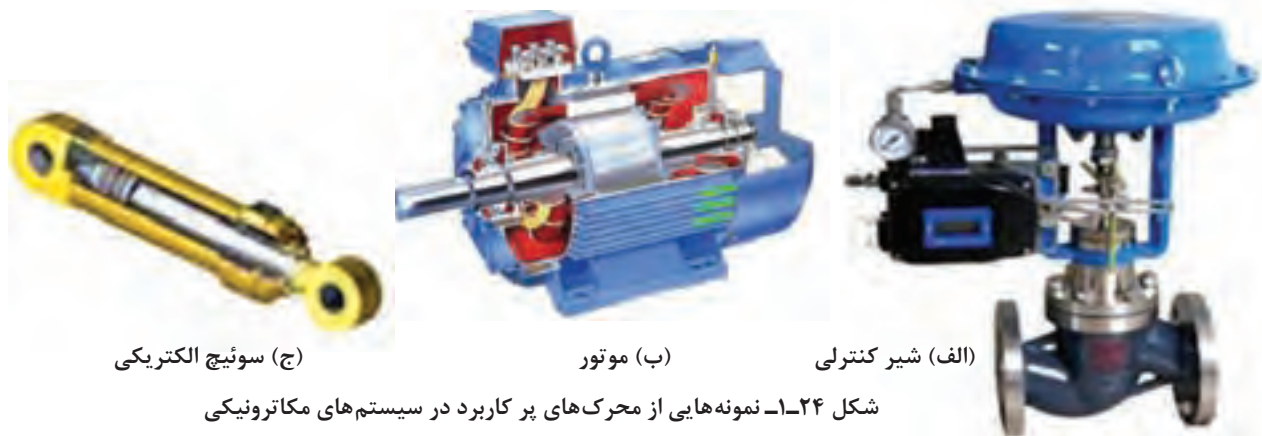
در حضور نویز کاربرد دارد؟	افزایش سرعت خروجی	کاهش M_p	کاهش e_{ss}	پایداری	نوع کنترل‌کننده
بلی	گاهی	بلی	بلی	بلی	PID
بلی	خیر	بلی	بلی	بلی	PI
خیر	بلی	خیر	گاهی	بلی	PD
بلی	بلی	گاهی	بلی	بلی	P

ضریب P باعث افزایش پایداری و کاهش خطای حالت دائمی می‌شود. **ضریب I** باعث کاهش خطای حالت دائمی، کاهش اثر عوامل مزاحم نویزی، و در عین حال کندی پاسخ خروجی می‌شود. **ضریب D** سرعت خروجی را افزایش می‌دهد، از طرف دیگر ضریب D تأثیر عوامل مزاحم نویزی خروجی را بیشتر می‌کند. به دلیل اینکه در تمام سیستم‌های واقعی عوامل مزاحم نویزی وجود دارند، عموماً در عمل ضریب D را صفر قرار می‌دهند.

محرك

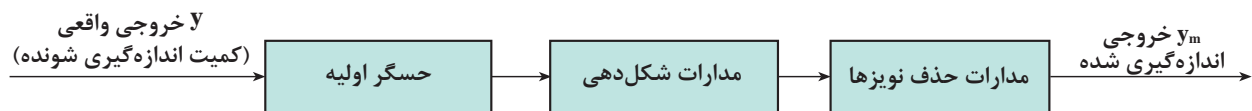
به زیرسیستم‌هایی که بین خروجی کنترل‌کننده تا ورودی سیستم اصلی تحت کنترل قرار دارند **محرك** یا **عملگر** می‌گویند. وظیفهٔ محرك این است که سیگنال خروجی کنترل‌کننده را از نظر جنس، دامنه و شکل زمانی به گونه‌ای تغییر دهد که برای اعمال به سیستم تحت کنترل مناسب باشد. در سیستم کنترل سطح مخزن، ورودی کنترلی مخزن دبی Q_c است، درحالی که خروجی کنترل‌کننده ولتاژ الکتریکی V_c است. با استفاده از شیر کنترلی، الکتروپمپ، و مدار راه‌انداز (که همگی محرك به حساب می‌آیند)، ولتاژ V_c را به ولتاژ مناسب برای موتور (V_m) تبدیل می‌کنند.

سوئیچ‌های مکانیکی و الکترونیکی، سولنوئیدها، موتورها، پمپ‌ها و شیرهای کنترلی، از جمله محرك‌های پرکاربرد در سیستم‌های مکاترونیکی هستند.



سیستم اندازه‌گیری

همان‌طور که گفته شد مهم‌ترین قسمت سیستم حلقه بسته، پسخور است. برای ایجاد پسخور باید خروجی اندازه‌گیری و به‌عنوان ورودی به کنترل‌کننده فرستاده شود. برای اندازه‌گیری کمیت خروجی به یک سیستم اندازه‌گیری دقیق نیاز است. سیستم اندازه‌گیری در مسیر پسخور قرار می‌گیرد و در حالت کلی شامل بلوک‌های زیر است:



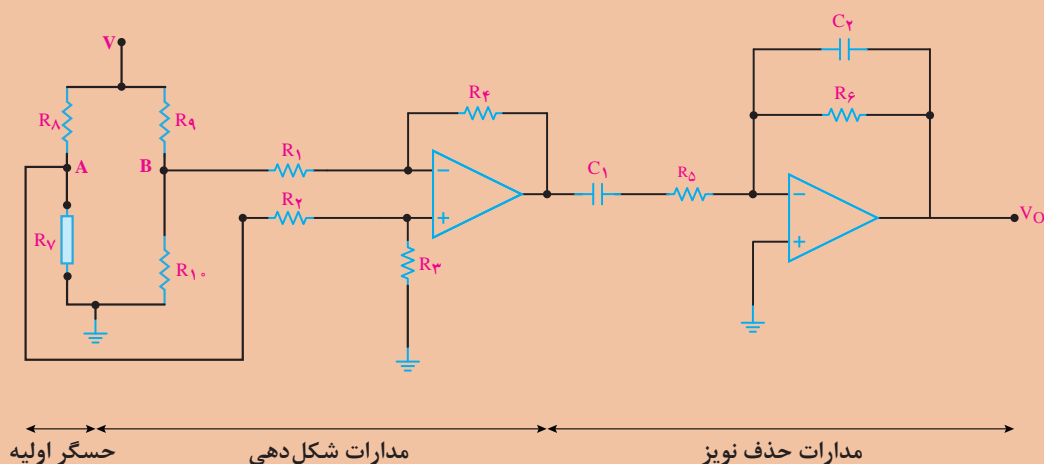
شکل ۲۵-۱- نمودار بلوکی سیستم اندازه‌گیری

حسگر اولیه کمیت مورد نظر را اندازه می‌گیرد و مقدار آن را به یک کمیت الکتریکی مانند مقاومت، ولتاژ، جریان، فرکانس و غیره تبدیل می‌کند. سپس، مدارهای شکل‌دهی وجود دارند که کمیت الکتریکی را تقویت می‌کنند و شکل آن را به طور مناسب اصلاح می‌نمایند. مدارات بعدی اثر نویزها را کاهش می‌دهند. در نهایت، خروجی اندازه‌گیری شده به کنترل‌کننده می‌رود.

مثال



سیستم کنترل دمای اتاق با گرمکن برقی را در نظر بگیرید. دمای اتاق با استفاده از ترمومتر مقاومتی اندازه‌گیری می‌شود و پس از عبور از مدارهای مختلف، یک ولتاژ که با دمای اندازه‌گیری شده متناسب است به کنترل‌کننده دما ارسال می‌گردد. کنترل‌کننده گرمکن را روشن و خاموش می‌کند. نمای این سیستم اندازه‌گیری دما در زیر آورده شده است.



در زیر نمونه‌هایی از حسگرهای اندازه‌گیری دما آورده شده است.



شکل ۲۶-۱. نمونه‌هایی از حسگرهای اندازه‌گیری دما

در مورد ترمومتر مقاومتی (RTD) و ترموکوپل تحقیق کرده و نحوه عملکرد و نوع سیگنال خروجی آنها را تعیین کنید.

تحقیق کنید



کاربرد کامپیوتر در کنترل

پس از طراحی کنترل‌کننده و به دست آوردن الگوریتم و رابطه ریاضی باید آن را به صورت عملی پیاده‌سازی و خروجی آن را به محرک‌ها وصل کرد. برای پیاده‌سازی کنترل‌کننده، یکی از روش‌های زیر را به کار می‌رود.

- ۱ مدارات هیدرولیکی و نیوماتیکی
- ۲ مدارات الکترونیکی
- ۳ مدارات دیجیتال و قابل برنامه‌ریزی

در مدارات هیدرولیکی و نیوماتیکی سیلندر، شیرکنترلی، مخزن و بخش‌های دیگری وجود دارد که با استفاده از فشار روغن یا هوا راه‌اندازی می‌شوند و تابع کنترلی طراحی شده را پیاده‌سازی می‌کنند. در روش دوم با استفاده از قطعات الکترونیکی تابع ریاضی کنترل‌کننده را پیاده‌سازی می‌کنند. در روش سوم با استفاده از نرم‌افزارهای کامپیوتری مناسب و میکروکنترلرها^۱ کنترل‌کننده طراحی شده را پیاده‌سازی می‌کنند.

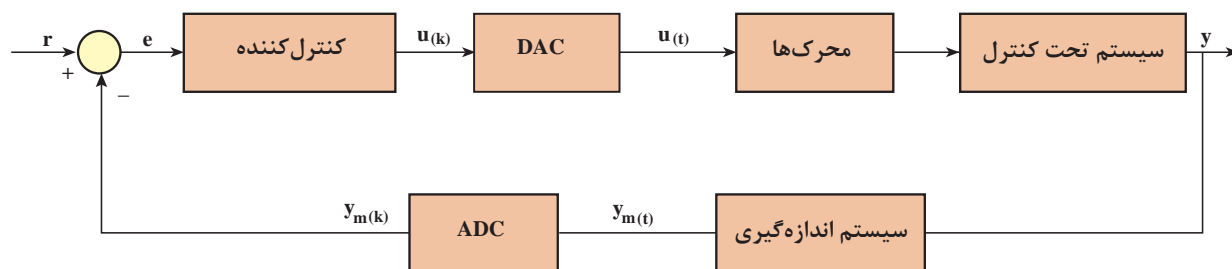
۱- Microcontroller

در جدول ۱-۳ مقایسه‌ای بین این روش‌ها انجام شده است.

جدول ۱-۳- ویژگی‌های روش‌های مختلف پیاده‌سازی کنترل‌کننده‌ها

ویژگی روش پیاده‌سازی	قدرت خروجی کنترل‌کننده	سرعت	هزینه تعمیرات و نگهداری	قابلیت به‌روزرسانی
هیدرولیکی - نیوماتیکی	عالی	کم	بالا	کم
مدارهای الکترونیکی	خوب	خوب	متوسط	خوب
مدارات دیجیتال قابل برنامه‌ریزی	خوب	عالی	کم	عالی

با توجه به جدول بهترین روش پیاده‌سازی کنترل‌کننده در یک سیستم مکترونیکی استفاده از کامپیوتر و میکروکنترلر است. سیستم‌کنترلی را که در آن کنترل‌کننده با استفاده از کامپیوتر و یا میکروکنترلر پیاده‌سازی شده است **سیستم کنترل کامپیوتری**^۱ می‌نامند. در سال‌های اخیر در پیاده‌سازی اکثر سیستم‌های مکترونیکی از روش سوم و گاهی از روش دوم استفاده می‌شود. علاوه بر این، در پیاده‌سازی با کامپیوتر و میکروکنترلر امکانات جانبی مانند قابلیت ذخیره‌سازی سیگنال‌ها، قابلیت گزارش‌گیری و نمایش گرافیکی سیگنال‌ها وجود دارد که در دو روش دیگر ممکن نیست. در شکل زیر نمودار بلوکی سیستم کنترل کامپیوتری را مشاهده می‌کنید.

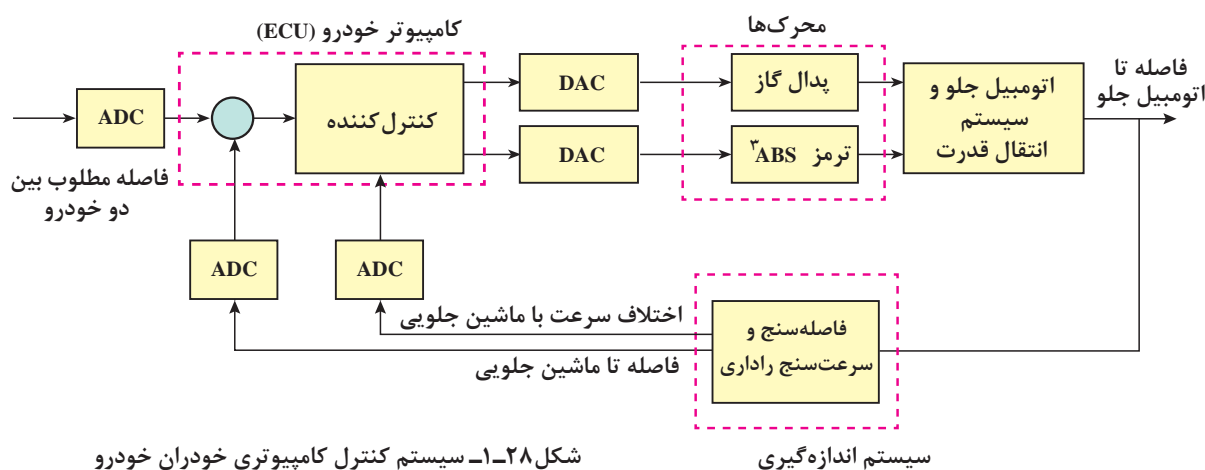


شکل ۱-۲۷- دیاگرام بلوکی سیستم کنترل کامپیوتری

فصل اول: کنترل

حرف k برای نمایش سیگنال‌های دیجیتال و حرف t برای نمایش سیگنال‌های پیوسته هستند. همان‌طور که مشاهده می‌شود کامپیوتر و میکروکنترلر تنها ورودی و خروجی‌های دیجیتال را می‌پذیرند. در حالی که، خروجی سیستم اندازه‌گیری ($y_m(t)$) و ورودی محرک‌ها ($u(t)$) عموماً سیگنال‌هایی پیوسته (غیر دیجیتال) هستند.

$y_m(t)$ با استفاده از مبدل آنالوگ به دیجیتال^۱ (ADC) به یک سیگنال دیجیتال تبدیل می‌شود. همچنین، خروجی کامپیوتر با استفاده از مبدل دیجیتال به آنالوگ^۲ (DAC) به یک سیگنال پیوسته و مناسب برای اعمال به محرک‌ها تبدیل می‌گردد. در شکل زیر سیستم کنترل کامپیوتری خودروان اتومبیل را مشاهده می‌کنید.



شکل ۲۸-۱ سیستم کنترل کامپیوتری خودروان

سیستم اندازه‌گیری

ارزشیابی پایانی

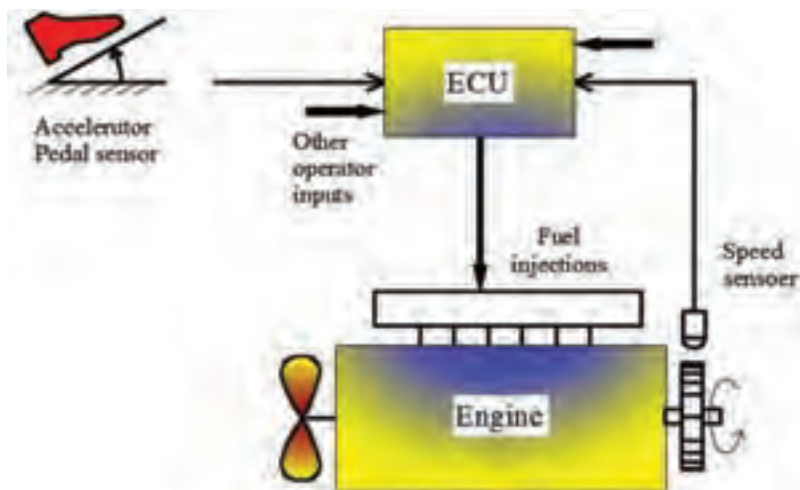
۱ موارد زیر را تعریف کنید:

- الف) کنترل حلقه باز
- ب) کنترل خودکار
- ج) محرک
- د) حسگر

۲ تفاوت سیستم کنترل حلقه باز و کنترل حلقه بسته را در مثالی توضیح دهید.

۳ برای سیستم‌های زیر دیاگرام بلوکی را رسم کنید و کنترل کننده، محرک و سیستم اندازه‌گیری را مشخص کنید.

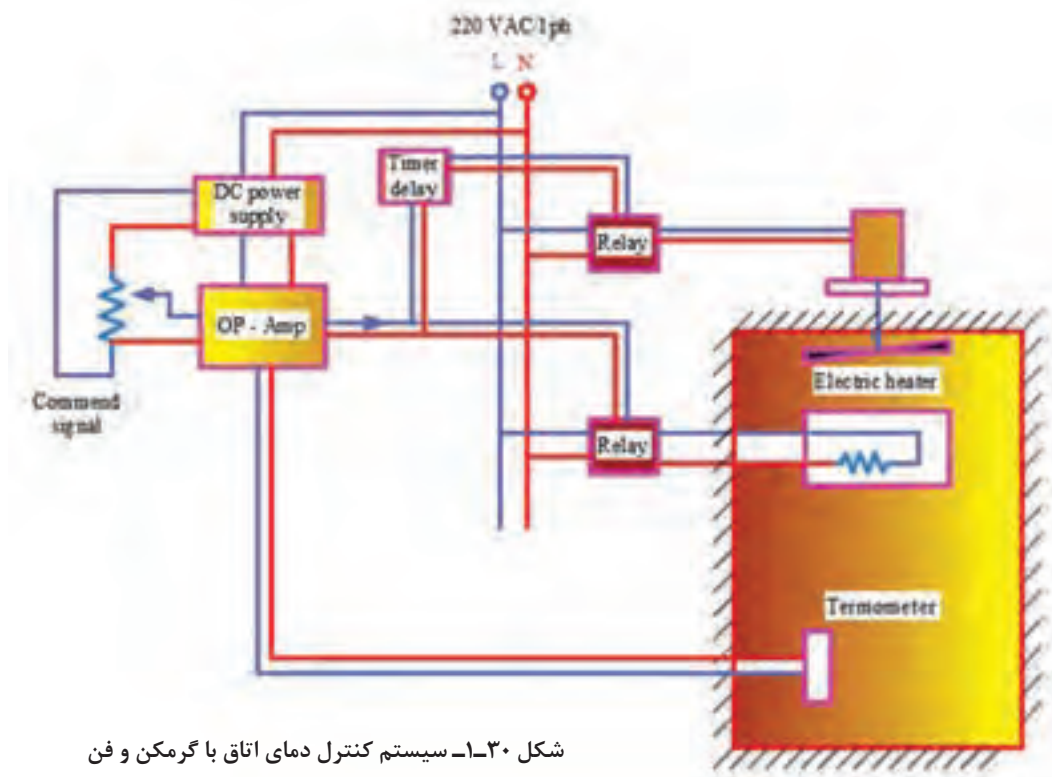
- الف) سیستم کنترل فشار مدار آب
- ب) کنترل سطح آب داخل کولر
- ج) سیستم کنترل دور موتور خودرو
- د) سیستم شارژ باتری



۴ در شکل روبه‌رو نمای سیستم کنترل دور الکترونیکی موتور خودرو با توجه به میزان فشردن پدال گاز را مشاهده می‌کنید. در این شکل میکروکنترلی که در ECU قرار دارد با توجه به اطلاعات حسگر سرعت در مورد نحوه زمان‌بندی روشن و خاموش شدن سیستم احتراق موتور تصمیم می‌گیرد. دیاگرام بلوکی این سیستم را رسم کنید و ورودی و خروجی هر بلوک را مشخص کنید.

شکل ۲۹-۱ سیستم کنترل دور موتور خودرو با توجه به میزان فشردن پدال گاز

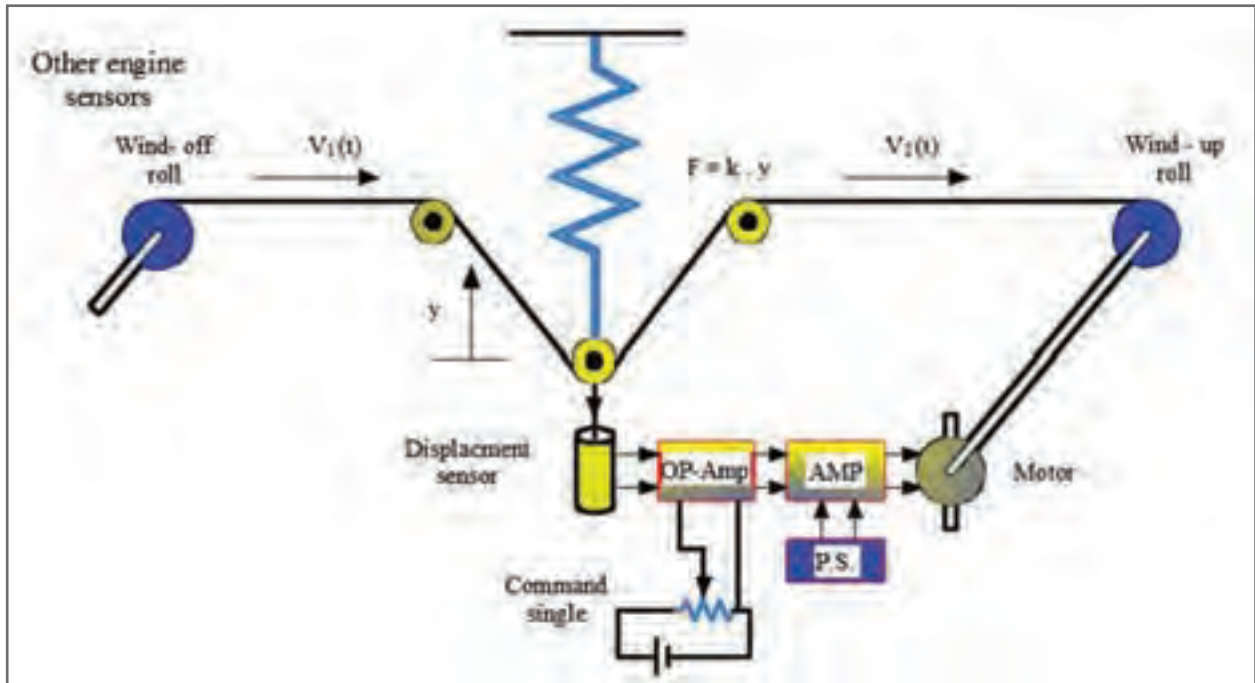
۵ در شکل زیر سیستم گرمایی اتاقی را مشاهده می‌کنید که در آن با توجه به مقدار حسگر دما (Thermometer) در مورد نحوه روشن و خاموش شدن گرمکن و فن تصمیم‌گیری می‌شود. دیاگرام بلوکی را ترسیم و ورودی و خروجی هر بلوک را مشخص کنید.



شکل ۳۰-۱ سیستم کنترل دمای اتاق با گرمکن و فن

فصل اول: کنترل

سیستم کنترلی نمایش داده شده جهت کنترل سرعت نوار نقاله در کارخانه‌ها استفاده می‌شود. تنظیم سرعت نوار نقاله توسط کنترل دور موتور صورت می‌گیرد. دیاگرام بلوکی را ترسیم، حسگرها و محرک‌ها را مشخص کنید.



شکل ۱-۳۱- سیستم کنترل سرعت حرکت نوار نقاله

یک سیستم کنترل کامپیوتری در آپارتمان را نام ببرید و دیاگرام بلوکی آن را رسم کنید.