۱

آشنایی با سیستم‌های کنترل

اهداف فصل:

۱ـ آشنایی با ایده کنترل: کنترل به معنی عام و کنترل اتوماتیک

۲ـ معرفی سه استراتژی اصلی در سیستم‌های کنترل: کنترل حلقه ـ باز، کنترل پیش خور و کنترل حلقه ـ بسته

۳ـ مروری مختصر بر تاریخچه کنترل اتوماتیک

۴ـ معرفی چند سیستم کنترل اتوماتیک مهندسی

۵ـ تعاریف برخی لغات بکار گرفته شده در متن کتاب

۱-۱ اصول کنترل

در جامعه صنعتی و پیشرفته امروز سیستم‌های کنترل اتوماتیک جزء لاینفکی از زندگی روزمره ما بشمار می‌آیند. اگرچه تاریخچه اولین سیستم کنترل ساخت بشر را به چند صدسال قبل از میلاد نسبت می‌دهند، لیکن مسلم آنست که تحول اساسی در زمینه طراحی و ساخت سیستم‌های کنترل اتوماتیک، با طراحی و ساخت اولین گاورنر توسط جیمزوات در دوران انقلاب صنعتی رخ داده است. امروزه اکثر وسایل خانگی مانند ماشین لباسشویی، آبگرمکن، خشک‌کن، توستر، حرارت مرکزی ساختمانها و غیره و یا در اتومبیل‌ها، هواپیماهای مسافربری و جنگنده، کشتیهای بزرگ و کوچک، ربات‌ها، وسایل پیشرفته مهندسی و پزشکی و ... همگی از نوعی سیستم کنترل بهره‌مند هستند و عملکرد آنها بدون سیستم کنترل، به کلی مختل و یا بسیار ضعیف می‌گردد.

لغت «کنترل» را مهندسین، حسابدارها، افسران ارتش، مدیران کارخانه‌ها و صنایع، مربیان ورزشی، و بسیاری از افراد دیگر استفاده می‌کنند. اگرچه هرکدام از این افراد با زمینه‌های کاری بسیار متفاوت، در محیطهای مختلف، با اهداف و وسایل مختلف کار می‌کنند، لیکن همگی آنها به نوعی در محدوده‌های مختلف کاری اعمال کنترل کرده‌و ایده‌های اولیه این افراد از کنترل مشابهت‌هایی نیز دارد.

مهندسین کنترل، که مخاطبان اصلی این کتاب هستند، به اعمال کنترل در سیستم‌های مهندسی می‌پردازند. این سیستم‌ها و یا فرایندهای صنعتی می‌توانند موشکهای پیشرفته هدایت شونده، ماشین‌های کاغذ یا شیشه‌سازی، اقمار مصنوعی در فضا، نیروگاههای قدرت، پالایشگاههای نفت، موتورهای الکتریکی (و یا دیزلی)، ربات‌ها، آنتن‌های ردیاب و یا بسیاری از ماشین‌ها و فرایندهای دیگر باشند. تفاوتهای عمده‌ای بین ساختار ایده‌های کنترلی مهندسین کنترل و سایر استفاده‌کنندگان از ایده کنترل، به طور عام وجود دارد. مهندسین کنترل ایده کنترل را در کنترل فرایندهای صنعتی بکار می‌گیرند. در واقع آنان (بر خلاف سایر موارد ذکر شده) خود کنترل کننده یک موشک، قمر مصنوعی و یا پالایشگاه نفت نیستند، بلکه سیستم‌های کنترل اتوماتیکی را طراحی می‌کنند و با اعمال این سیستم‌های طراحی شده، به کنترل سیستم مورد نظر خواهند پرداخت.

قبل از آنکه بتوان کنترل را به هر مفهوم در هر نوع سیستمی اعمال کرد باید یک هدف و

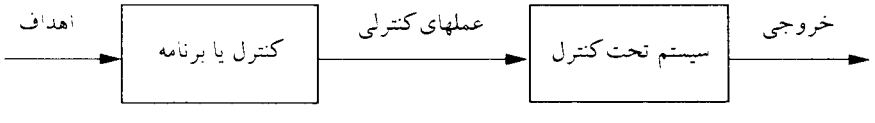
انگیزه مشخص برای اعمال کنترل وجود داشته باشد که ما آنرا مشخصه‌های عملکرد سیستم می‌نامیم. برای مثال مدیر کارخانه سعی دارد تا با اعمال یک سری قوانین و برقراری نظمی خاص در کارخانه به تولید بیشتر یا کیفیت بهتر با قیمت ارزانتر برسد. مربی ورزشی قصد دارد تا با انجام یکسری تمرینات و دستورات، بر تیم مقابل پیروز گردد. بدیهی است که برای انجام این عملیات و اجرای برنامه‌های مناسب، کنترل کننده باید آزادی عمل کافی در تغییر دادن سیستم تحت کنترل داشته باشد. مدیر کارخانه با ارایه برنامه‌هایی به قسمتهای مختلف کارخانه انتظار انجام آنها را داشته و مربی ورزشی نیز به ورزشکاران تحت نظر خود دستوراتی را می‌دهد. باید توجه داشت که تقریباً هیچگاه در عمل آزادی کامل به کنترل کننده داده نمی‌شود و همواره محدودیتهایی در راه رسیدن به هدف و اجرای برنامه و اعمال کنترل وجود دارد که غیر قابل تغییر می‌باشند. مدیر کارخانه نمی‌تواند برای پایین آوردن قیمت از مواد اولیه ایده‌ال استفاده کند (به دلایل اقتصادی) و یا اینکه به کارگران مزدی پرداخت نکند و یا اینکه ابزار و ماشین آلات مورد نیاز را به‌طور آنی فراهم آورد، هم چنین مربی ورزشی نمی‌تواند از ورزشکاران انتظار داشته باشد که تمامی روز را بدون وقفه به انجام تمرینات بگذرانند و یا اینکه عکس‌العملهای خارق‌العاده‌ای از خود نشان دهند. تمامی این موارد محدودیتهای کنترل را شامل می‌شود و ماهیت این محدودیتها ممکن است به گونه‌ای باشند که دسترسی به کلیه اهداف تعیین شده را به طور سریع امکان پذیر نسازد. برای رسیدن به یک کارخانه مطلوب یا تیم ورزشی نمونه با مشخصه‌های عملکرد داده شده، مدیر کارخانه و یا مربی ورزشی ممکن است که ماهها و یا حتی سالها وقت لازم داشته باشد. هم چنین ممکن است که برآورده کردن کلیه مشخصات عملکرد نیز امکان پذیر نباشد که در اینصورت باید با بازنگری در اهداف سیستم، آنها را به اهدافی قابل دسترسی تغییر داد.

برای کنترل کننده (مدیر کارخانه یا مربی ورزشی) یا طراح سیستم کنترل (مهندس کنترل) بسیار مهم است که بتواند دنباله حوادث را پس از اعمال یکسری برنامه‌ها و دستورات پیش‌بینی کند. با این پیش‌بینی او قادر خواهد بود که دستورات خود را تعدیل کند و یا برنامه کلی سیستم را در جهت مطلوب تغییر دهد.این پیش‌بینی با در دست داشتن یک مدل از سیستم که نشان دهنده رفتار آن است، امکان پذیر است. مدلی که مدیر کارخانه از کارخانه خود دارد ممکن است شامل قابلیت مدیران و کارگران، ظرفیت و کیفیت تولید ماشین آلات

کارخانه و ... باشد. مدلی که مربی ورزشی استفاده می‌کند ممکن است شامل آب و هوا و شرایط محیطی برگزاری مسابقه، توانایی افراد تیم خود و تیم مقابل با بررسی بازیهای قبلی آنها و ... باشد. دقت کنید که ممکن است مدلسازی در این موارد ارادی نباشد لیکن کنترل کننده قطعاً به این چنین چارچوبی برای طراحی و برنامه‌ریزی نیاز داشته و آنرا حداقل در ذهن خویش خواهد ساخت.

سه استراتژی اساسی اعمال کنترل. سه استراتژی اساسی اعمال کنترل که کلیه روشهای کنترلی به نحوی جزء یکی از آنها هستند، عبارتند از: *کنترل حلقه ـ باز*[1]، *کنترل پیش‌خور*[2] و *کنترل فیدبک*[3] یا پس‌خور.

کنترل حلقه ـ باز. اگر هدف تعیین شده برای یک مدیر کارخانه بهینه کردن سطح تولید کارخانه تحت نظر او باشد، بر اساس عملکرد گذشته کارخانه و مدلی که از آن در دسترس دارد، یک برنامه معین برای عملیات کارخانه جهت رسیدن به هدف مشخص شده، تعیین می‌کند. این برنامه به صورت دستورات کنترلی به سیستم تحت کنترل (کارخانه و اجزاء آن) اعمال می‌گردد. موفقیت این استراتژی به دقت و صحت مدل و اطلاعات موجود در رابطه با عملکرد سیستم بستگی دارد و کنترل کننده فرض می‌کند که عوامل خارجی اثر چندانی بر عملکرد سیستم ندارند و هیچگونه بررسی در حین عمل از رفتار سیستم به عمل نمی‌آورد. اساس این استراتژی در شکل ۱ـ۱ نشان داده شده است.



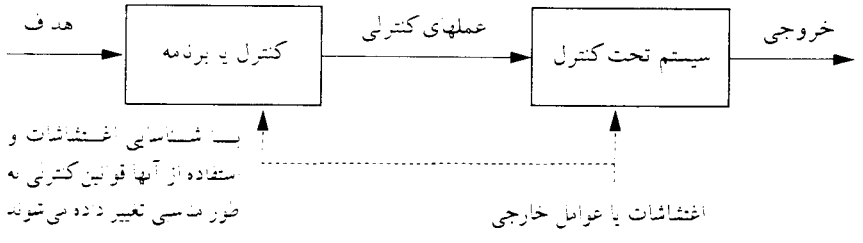
شکل ۱ـ۱ کنترل حلقه ـ باز

استراتژی کنترل که در آن خروجی هیچ نقشی بروی عمل کنترل ندارد، سیستم **کنترل حلقه ـ باز** نامیده می‌شود. به عبارت دیگر، در کنترل حلقه ـ باز خروجی سیستم (تولید کارخانه، بازی

1- Open-loop control
2- Feedforward control
3- Feedback control

بازیگران و نتیجه آن) برای مقایسه با اهداف و مشخصه‌های مطلوب عملکرد داده شده به کار گرفته نمی‌شود.

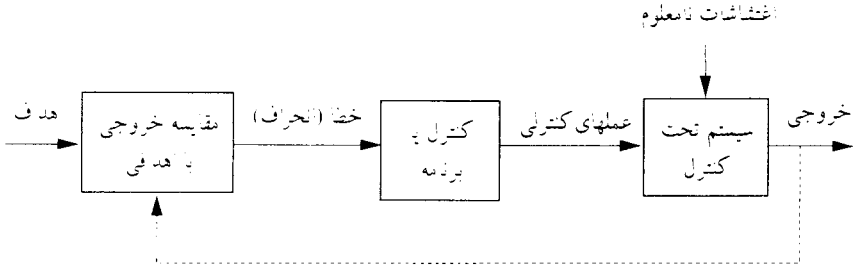
کنترل پیش‌خور. بدیهی است اگر عوامل خارجی بر سیستم تحت کنترل اثر قابل توجهی داشته باشد، نادیده گرفتن آنها توسط کنترل کننده، به اختلال در عملکرد سیستم منجر می‌گردد. ممکن است در شرایط خاصی، بتوانیم این عوامل خارجی را از بین برده و یا آنها را تضعیف کنیم، در غیر اینصورت برای اجتناب از اختلال در عملکرد سیستم، باید استراتژی کنترل را عوض کنیم. در واقع با تغییر و بهبود مدل، اثر این عوامل خارجی یا اغتشاشات را پیش‌بینی می‌کنیم و با در نظر گرفتن آنها قوانین کنترلی را مجدداً بررسی می‌نماییم. در این بررسیها، فرامین کنترل به گونه‌ای طراحی خواهند شد تا اثر این اغتشاشات را به حداقل برسانند. به این چنین استراتژی کنترلی که در آن عوامل خارجی در نظر گرفته شده، و اعمال کنترلی برای مقابله با آنها طراحی می‌شوند، *کنترل پیش خور* گفته می‌شود. شکل ۱-۲ نحوه عملیات در استراتژی کنترل پیش‌خور را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲ کنترل پیش‌خور

کنترل فیدبک یا کنترل حلقه ـ بسته. کنترل پیش‌خور تنها در صورتی یک استراتژی کنترل کننده عملی است که اغتشاشات کم و یا معینی وجود داشته باشد و بتوان آنها را براحتی اندازه گرفت. لیکن اگر تعداد اغتشاشات بسیار زیاد و یا اینکه زمان وقوع و ماهیت آنها نامعلوم باشد، آنگاه از استراتژی کنترل پیش‌خور نمی‌توان استفاده کرد. در این حالت از استراتژی سوم کنترل استفاده می‌شود. در این استراتژی با مشاهده خروجی، انحراف رفتار کلی سیستم از رفتار مطلوب (مشخصه‌های عملکرد تعیین شده یا اهداف سیستم) را در نظر گرفته برای اصلاح این انحراف عمل می‌نماییم. اساس این استراتژی در شکل ۱-۳ نشان داده شده

است. دقت کنید که در اینجا نیز اغتشاشات خارجی وجود دارند و بر رفتار سیستم اثر می‌گذارند. اگر خروجی سیستم با مشخصه‌ها و اهداف تعیین شده مطابقت نداشته باشد، خطایی بوجود می‌آید و این خطا یا انحراف به سیستم کنترل اعمال می‌گردد و سیستم کنترل با توجه به خطا، فرمان کنترلی مناسبی را صادر می‌کند. همانطور که در شکل ۱-۳ مشاهده می‌گردد در این سیستم کنترل خروجی سیستم اندازه‌گیری شده و توسط یک مقایسه کننده با اهداف سیستم یا مشخصه‌های عملکرد تعیین شده مقایسه می‌گردد. خطای ایجاد شده از این مقایسه به سیستم کنترل برای صدور فرامین کنترلی مناسب، اعمال می‌گردد. به عنوان مثال، مدیر کارخانه می‌تواند دائماً مقدار تولید را اندازه‌گرفته و با میزان مطلوب مقایسه نماید و در صورتیکه بیشتر و یا کمتر از میزان مطلوب باشد، بر اساس آن دستورات لازم را جهت تصحیح خطای ایجاد شده صادر نماید.



شکل ۱-۳ کنترل فیدبک یا حلقه ـ بسته

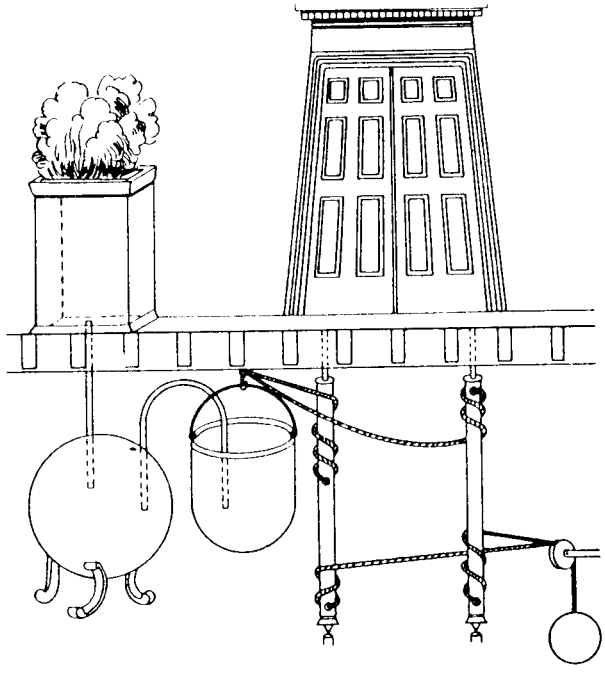
عبارت *کنترل فیدبک* برای توصیف این استراتژی به کار گرفته می‌شود. درکنترل فیدبک فرامین کنترلی اعمال شده به سیستم براساس مقدار و میزان خطای موجود در پاسخ سیستم محاسبه می‌شوند. بدین معنی که پس از مشاهده و اندازه‌گیری خروجی سیستم، این خروجی با مقدار مطلوب آن مقایسه می‌گردد و اختلاف به سیستم کنترل ارایه می‌شود. به جای عبارت کنترل فیدبک از عبارت *کنترل حلقه ـ بسته*[1] نیز استفاده می‌شود. (عبارت حلقه ـ بسته در مقابل عبارت حلقه ـ باز بکار گرفته می‌شود.)

1- Closed-loop control

توجه کنید که در استراتژی کنترل حلقه ـ بسته (برخلاف کنترل حلقه ـ باز و پیش‌خور)، اطلاع از یک مدل کاملاً دقیق از سیستم الزامی نیست. زیرا خطاهای ایجاد شده در خروجی سیستم تحت کنترل بدلیل اطلاعات ناکافی از مدل سیستم، با تصحیح کنترل کننده کاهش پیدا می‌کنند (همانند مواقعیکه سیستم تحت اغتشاش قرار گیرد).

۱-۲ تاریخچه مختصر کنترل اتوماتیک

در رابطه با اولین سیستم کنترل اتوماتیک و یا طراح آن اطلاع دقیقی در دست نیست و در واقع با کندوکاو در زوایای تاریخ علم نمی‌توان شخص یا اشخاصی را پیدا کرد که بتوان پیدایش اولین سیستم کنترل را منسوب به آنها دانست. لیکن آنچه که مسلم است، اولین مثالهای عملی از سیستم‌های کنترل به سالهای قبل از میلاد مسیح برمی‌گردد. به عنوان نمونه یکی از اولین سیستم‌های کنترل حلقه ـ باز، برای باز کردن دربهای یک معبد بوده است. این سیستم کنترل بازکردن اتوماتیک درب، در شکل ۱-۴ نشان داده شده است. ورودی به سیستم همانطور که از

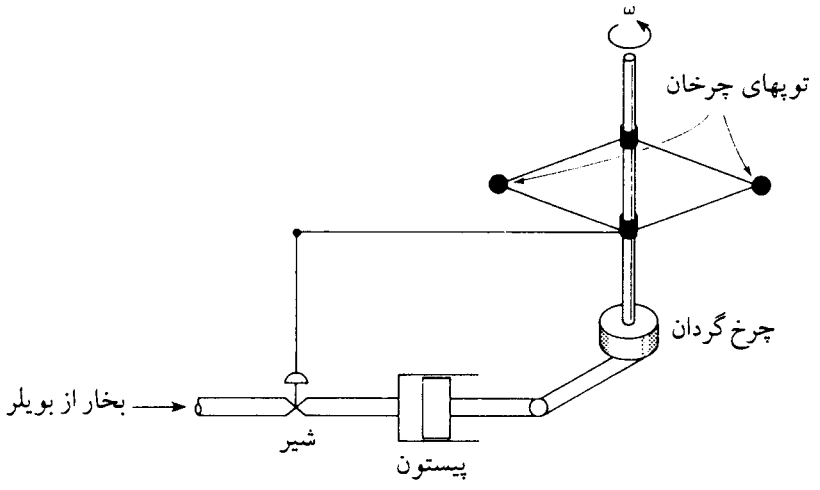


شکل ۱ـ۴ اولین سیستم کنترل برای بازکردن دربهای معبد

شکل ۱-۴ مشاهده می‌شود، روشن کردن آتشی بروی محراب بوده است. با گرم شدن هوای زیر آتش، هوای به حرکت درآمده آب را از مخزن به داخل سطلی هدایت می‌کرده است. با سنگین شدن سطل و حرکت آن به طرف پایین، توسط طنابهایی که به اهرم‌هایی وصل شده‌بودند، وزنه طرف مقابل به سمت بالا به حرکت درمی‌آمده است. به همین ترتیب می‌توان با خاموش کردن آتش، دربهای معبد را بست. با کم کردن آتش و سردتر شدن هوای داخل مخزن، فشار هوا کاهش پیدا می‌کند و آب از سطل به داخل مخزن منتقل می‌شود. بنابراین، سطل سبکتر شده و با سنگین‌تر بودن وزنه مخالف به سمت پایین حرکت می‌کند، که خود باعث بسته‌شدن دربها می‌گردد. به نظر می‌رسد که با پایین آمدن حاکم معبد و حرکت به سوی دربها، این دربها به طور خودکار (با سیستم کنترلی بدور از چشم حاضران) باز و بسته می‌شدند و لذا برای آنان تجلی از قدرت خدایانشان بوده است!

در بین سالهای ۱۷۶۷ تا ۱۷۸۸ (تاریخ دقیق آن معلوم نیست)، جیمز وات اولین سیستم کنترل اتوماتیک (بدون دخالت بشر) را برای کنترل سرعت اختراع کرد. این سیستم را گاورنر توپ گردان[1] جیمز وات[2] می‌نامند. گاورنر توپ گردان جیمزوات در شکل ۱-۵ نشان داده شده است. هدف این سیستم کنترل، ثابت نگه‌داشتن سرعت چرخش است. ایده کلی این سیستم کنترل بدین ترتیب است که با چرخش توپهای گردان، مقدار ورودی بخار به سیستم توسط شیر نشان داده شده در شکل ۱-۵ تعیین می‌گردد. در واقع هر چه این توپها سریعتر بچرخند، بخار کمتری وارد سیستم می‌گردد. همچنین و به طور همزمان نرخ فشار بخار به روی پیستون و چرخ گردان سرعت چرخش توپها را تعیین می‌کند. یکی از اشکالات فراوان این سیستم نوسانات سرعت چرخشی آن حول یک مقدار نامی سرعت است. در حدود سالهای ۱۸۶۸ ماکسول[3] با پایه‌ریزی یک چارچوب نظری برای تحلیل سیستم، توانست با بکارگیری نظریه معادلات دیفرانسیل پایداری سیستم گاورنر جیمزوات را بررسی و دلایل نوسانات داخل سیستم را بر حسب عبارات ریاضی بخوبی بیان دارد. بدنبال مطالعات ماکسول یک مهندس روسی به نام ویشنگرادسکی[4] پاسخ دقیقتری را برای پایداری یک گاورنر توپ گردان درجه سوم ارایه کرد. از اولین کاربردهای تئوریهای توسعه یافته کنترل

1- Flyball governer
2- James watt
3- Maxwell
4. Wischnegradsky



شکل ۱ـ۵ گاورنر توپ گردان جیمزوات

می‌توان از بکارگیری آنها برای مطالعه هدایت اتوماتیک کشتی توسط مینورسکی [1] در سال ۱۹۲۲ نامبرد.

دهه‌های ۱۹۲۰ و ۱۹۳۰ شاهد توسعه چشمگیر در زمینه کنترل اتوماتیک بوده است. این پیشرفتها بطور عمده در سایهٔ ارتباط دادن علوم مخابرات و الکترونیک با کنترل اتوماتیک حاصل گردید. از افراد شاخص این زمانها می‌توان از هوی‌ساید [2] در دهه ۱۹۲۰ و نایکوئیست [3] در دهه ۱۹۳۰ نامبرد. هوی ساید توانست با ادامه مطالعات تئوری یک قرن پیش لاپلاس و فوریه، ابزار ریاضی مناسب را برای مطالعه سیستم‌های مخابراتی توسعه دهد و واحد بسیار مهم لگاریتمی را برای اهداف مهندسی بکار گیرد. نایکوئیست نیز که یک فیزیکدان به شمار می‌آمد، پس از مطالعات فراوان در رابطه با پدیدهٔ نویز به مسأله پایداری در آمپلی فایرهای تکرار کننده [4] پرداخت و موفق شد که با استفاده از نظریه آنالیز مختلط، یکی از معتبرترین روشهای بررسی پایداری را پایه‌گذاری کند.

1- Minorsky
2- Heaviside
3- Nyquist
4- Repeater

در سال ۱۹۳۴، هیزن[1] مقاله‌ای تحت عنوان "نظریه سرومکانیزم‌ها" در مجله *انستیتوی فرانکلین* انتشار داد و این اولین استفاده از لغت سرومکانیزم[2] بود که بعدها برای توصیف بسیاری از سیستم‌های کنترل فیدبک بکار گرفته شد. می‌توان گفت که مقاله هیزن آغازی برای مطالعه بسیار جدی در این زمینه جدید مهندسی بود. لغت سرومکانیزم از دو لغت خدمتکار (یا برده) و مکانیزم مشتق شده است و لذا سرومکانیزم یک مکانیزم برده مانند را تقی می‌کند.

جنگ دوم جهانی زمینهٔ بسیار مناسب را برای پیشرفتهای آینده در زمینه مهندسی کنترل اتوماتیک آماده کرد. در این دوران با صرف هزینه‌های بسیار زیاد بر روی پروژه‌های نظامی مانند ردیابی آتن، کنترل توپ ضد هواپیما و اتوپایلوت‌های پیشرفته برای هواپیماهای جنگی به شکوفایی مهندسی کنترل کمک بسیار زیادی شد. زیرا در این پروژه‌ها، سیستم کنترل طراحی شده می‌بایست سرعت و دقت را به عنوان دو مشخصه عملکرد پاسخ، به خوبی برآورده سازد. البته در بین سالهای ۱۹۴۰ تا ۱۹۴۵ بسیاری از پیشرفتهای چشمگیر بدست آمده در زمینه کنترل اتوماتیک بدلیل ماهیت نظامی تحقیقات انجام شده محرمانه تلقی می‌شدند و در دسترس عموم محققین در این زمینه قرار نمی‌گرفتند. در سالهای بعد از جنگ و برداشتن مقررات امنیتی دوران جنگ، حجم وسیعی از اطلاعات در اختیار دانشمندان این رشته قرار گرفت و دستاوردهای بسیار زیادی نیز در این زمینه بدست آمد. از سال ۱۹۴۵ تاکنون در کمی بیش از نیم قرن، صدها کتاب و هزاران مقاله و گزارشهای فنی در این زمینه نوشته شده است. همچنین سیستم‌های کنترل به بسیاری از سیستم‌های صنعتی با ماهیتها و کاربردهای فوق‌العاده متفاوت با موفقیت اعمال گردیده‌اند.

تا قبل از سالهای دهه ۱۹۶۰ (سالهای ۱۹۳۵ تا اواخر ۱۹۵۰) روشهای اصلی در تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل، روشهای پاسخ فرکانسی مانند بود[3] و روشهای تبدیل لاپلاس همراه با روش مکان ریشه توسط ایوانز[4] بودند. در سالهای ۱۹۶۰ به بعد با پیشرفتهای حاصله در پروژه آپولو و مسافرت به کره ماه، روشهای مدرن فضای حالت که توسط کالمن[5]، باسی[6] و چند نفر دیگر معرفی گردیده بودند، با موفقیت در چندین پروژه، به کار گرفته شدند. این تاریخ تولد کنترل مدرن[7] را رقم می‌زند. با توسعه سریع در طراحی و ساخت کامپیوترهای بزرگ، بسیاری

1- Hazen
2- Servomechanism
3- Bode
4- Evans
5- Kalman
6- Bucy
7- Modern control

از محاسبات که تا آن زمان انجام آنها غیرممکن به نظر می‌رسید، با این کامپیوترها بسادگی انجام داده می‌شدند. در این دهه روشها و الگوریتمهای پیچیده و مشکل بهینه‌سازی به کمک همین کامپیوترها پیشرفت شایانی نمودند.

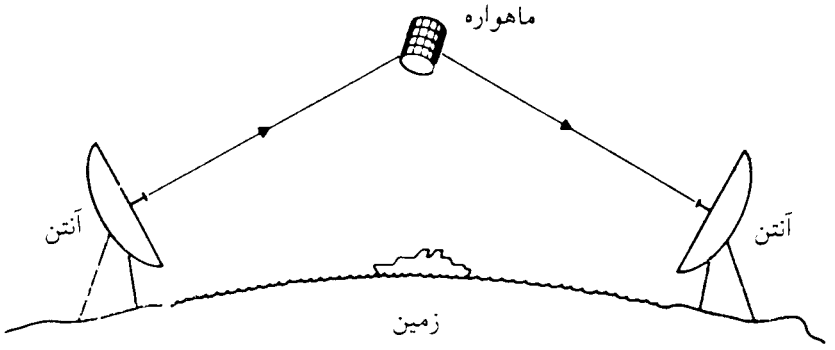
دهه ۱۹۷۰ شاهد پیشرفتهای بیشتری در زمینه کامپیوتر با معرفی میکروپروسسورها بود. توسط میکروپروسسورها اعمال تکنیک‌های بسیار پیچیده کنترلی به سادگی و ارزانی امکان‌پذیر گشت. *کنترل دیجیتال*[1] و *سیستم‌های کنترل دیجیتال مستقیم*[2] در این دوران رونق فراوانی پیدا کردند. دهه‌های ۱۹۷۰ به بعد، شاهد پیشرفتهای بسیار زیادی در زمینه نظریه سیستم‌های کنترل چند متغیره[3]، *کنترل تطبیقی*[4]، *کنترل مقاوم*[5]، *کنترل هوشمند*[6] و غیره نیز بوده است.

۱-۳ چند مثال عملی از سیستم‌های کنترل

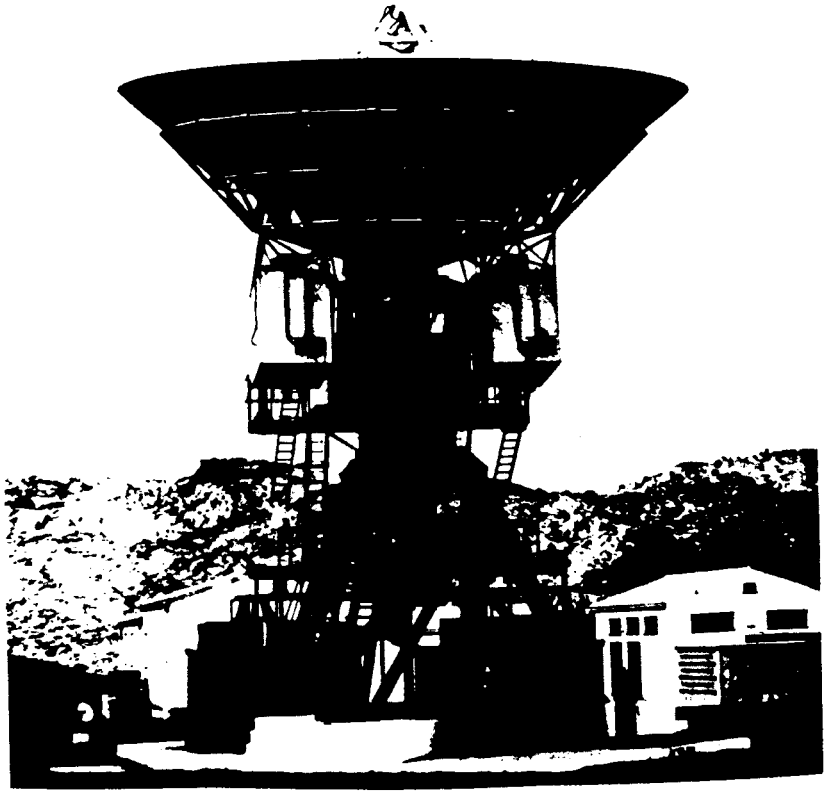
در این بخش چند مثال عملی از کاربرد سیستم‌های کنترل در قسمتهای مختلف صنعت ارایه می‌شود.

آنتن‌های ردیاب. در صنعت مخابرات آنتن‌هایی وجود دارند که توسط یک ماهواره با هم در ارتباط می‌باشند. داده‌های مختلف، همانطور که در شکل ۱-۶ نشان داده شده است، از یک آنتن فرستاده شده و توسط آنتن دیگری دریافت می‌گردند. ماهواره سیگنالی را که حاوی داده‌ها است از یک آنتن دریافت کرده و آن را به آنتن دیگری که در نقطهٔ دیگری روی زمین قرار دارد ارسال می‌کند. برای برقراری و تداوم این ارتباط رادیویی، دو آنتن مستقر بروی زمین همواره باید به سمت قمر مصنوعی قرار گرفته باشند و برای این کار بکارگیری یک سیستم کنترل مؤثر الزامی است. مسأله کنترل در این حالت حرکت دادن دقیق آنتن به طرف جهت و زاویه مناسب است. شکل ۱-۷ یک آنتن ماهواره مخابراتی را نشان می‌دهد. حرکتهای چرخشی این آنتن به طرف بالا یا پایین یا چرخش حول محور عمود بر زمین است. برای

1- Digital control
2- Direct digital control
3- Multivariable control
4- Adaptive control
5- Robust control
6- Intelligent control

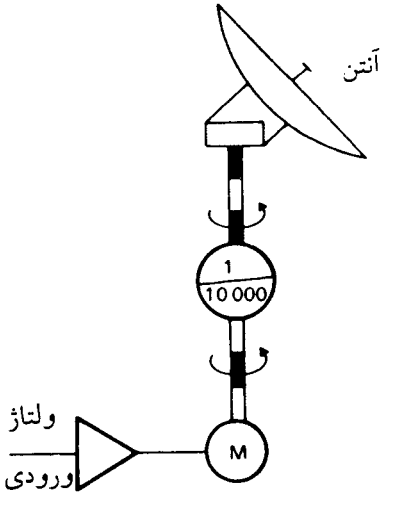


شکل ۱ـ۶ ارتباط دو آنتن برای ارسال و دریافت داده توسط یک ماهواره.



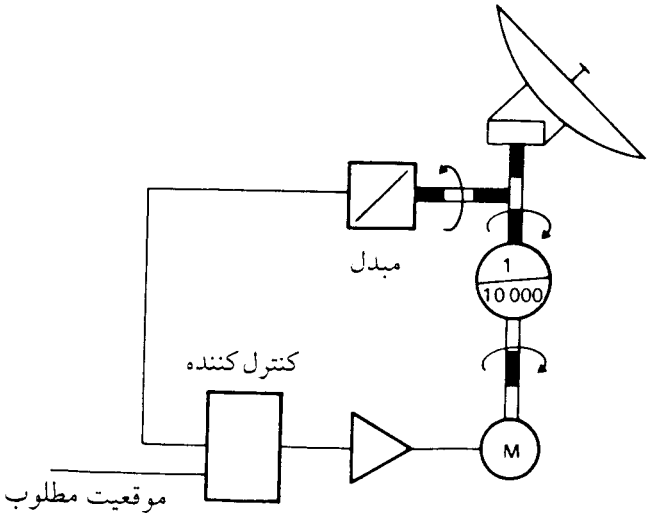
شکل ۱ـ۷ یک آنتن ماهواره مخابراتی

هر کدام از این دو حرکت یک سیستم کنترل وجود دارد. سیستم‌های کنترل موجود در آنتن بسیار شبیه به هم عمل می‌کنند و لذا در اینجا تنها به بررسی یکی از این سیستم‌ها می‌پردازیم. محرک، یا وسیله‌ای که آنتن را می‌چرخاند یک موتور الکتریکی است که در شکل ۱-۸ با یک دایره که در وسط آن حرف M نوشته شده نشان داده شده است. شفت موتور با یک خط راه‌راه نشان داده شده است و پیکان روی آن جهت حرکت چرخش را نشان می‌دهد. شفت موتور یک جعبه دنده که به صورت دایره دوّم رسم شده است را به حرکت در می‌آورد. نسبت دنده ۱۰۰۰۰ به ۱ بر روی آن نشان داده شده است. شفت بعد از جعبه دنده، باعث چرخش آنتن می‌شود. قدرت محرکه موتور از یک تقویت‌کننده قدرت الکتریکی تأمین می‌شود که با یک مثلث نشان داده شده است. ولتاژ اعمال شده به ورودی تقویت‌کننده قدرت باعث چرخش آنتن حول محور افقی می‌شود. بدیهی است که آنتن باید در برابر تغییرات ایجاد شده توسط جریان باد همواره به سمت ماهواره نشانه رود و از اینرو کنترل حلقه ـ باز برای این سیستم مناسب نیست. یک سیستم کنترل حلقه ـ بسته برای کنترل موقعیت چرخشی آنتن در شکل ۱-۹ نشان داده شده است. یک مبدل موقعیت بر روی آنتن برای اندازه‌گیری موقعیت خروجی θ_o که جهت افقی آنتن بوده، سوار شده است. مبدل موقعیت چرخشی با یک بلوک مربعی در



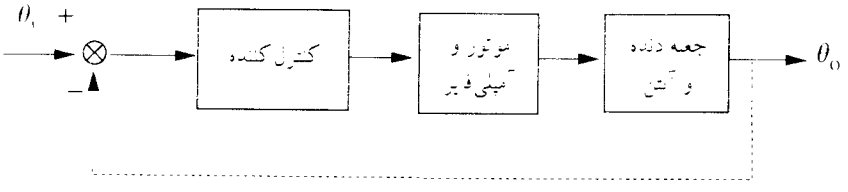
شکل ۱-۸ دیاگرام سیستم محرک آنتن

سمت چپ شفت محرک آنتن نشان داده شده است. سیستم کنترل نیز در شکل ۱-۹ آورده شده است.



شکل ۱-۹ سیستم حلقه ـ بسته آنتن

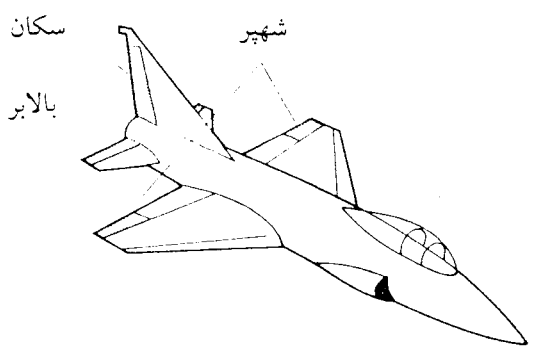
خروجی مبدل، ولتاژی متناسب با زاویه افقی θ_0 است. ولتاژ به بلوک کنترل پس از مقایسه با زاویه مطلوب θ_0 ارسال می‌گردد. در صورتیکه خطای موقعیت بین θ_0 و θ_i وجود داشته باشد، یک ولتاژ خطا متناسب با تفاضل $(\theta_i-\theta_0)$ توسط یک مقایسه کننده تولید می‌گردد. براساس این ولتاژ خطا، فرامین کنترلی از سیستم کنترل ارسال می‌گردد که با ایجاد گشتاوری برای کاهش خطا، آنتن را در جهت مناسب به چرخش درمی‌آورد. دیاگرام بلوکی سیستم کنترل موقعیت آنتن در شکل ۱-۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱-۱۰ دیاگرام بلوکی سیستم کنترل ردیاب موقعیت.

کنترل پرواز هواپیما. شکل ۱-۱۱ یک هواپیما و سطوح کنترلی[1] آن را نشان می‌دهد. سطوح کنترل یک هواپیما همانطور که در شکل ۱-۱۱ نشان داده شده‌اند، عبارتند از *بالابر*[2]، شهپر[3] و سکان[4]. این سطوح نیروها و ممانهای لازم را جهت بحرکت در آوردن هواپیما در جهتهای مورد نظر خلبان، فراهم می‌کنند. در واقع بالابر حرکت فراز[5] (حرکت به طرف بالا یا پایین در طول محور افقی هواپیما)، شهپر حرکت چرخشی و سکان حرکت به طرف زاویه راست و یا چپ هواپیما را تولید می‌کند. کنترل چهارمی که در این نوع هواپیماها بکار گرفته می‌شود، تغییر در پیشرانه[6] است که از موتورهای هواپیما بدست می‌آید. بدیهی است که برای کنترل پرواز یک هواپیما، کلّیه این امکانات کنترلی بکار گرفته می‌شوند و در جنگنده‌های پیشرفته‌تر سطوح کنترلی دیگری نیز به آنها افزوده شده‌اند. پرواز دقیق و مطمئن یک هواپیما بستگی کامل به دقت و کارایی سیستم کنترل آن دارد و در صورت از کار افتادن یک یا چند ابزار کنترلی، پرواز هواپیما بسیار مشکل و خطرناک خواهد بود.

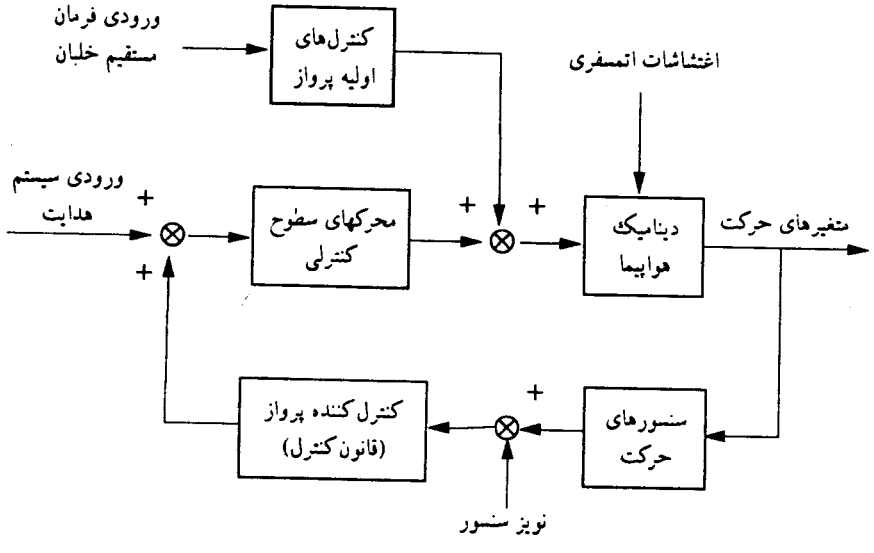
علاوه بر سطوح کنترلی که برای هدایت هواپیما از آنها استفاده می‌شود، کلیه هواپیماها سنسورهای حرکتی دارند که مقیاسی از تغییرات در متغیرهای حرکت که در اثر عوامل مختلفی ایجاد می‌شوند را فراهم می‌آورند. سیگنال‌های این سنسورها توسط یک واحد نمایش در



شکل ۱-۱۱ هواپیما با سطوح کنترلی آن

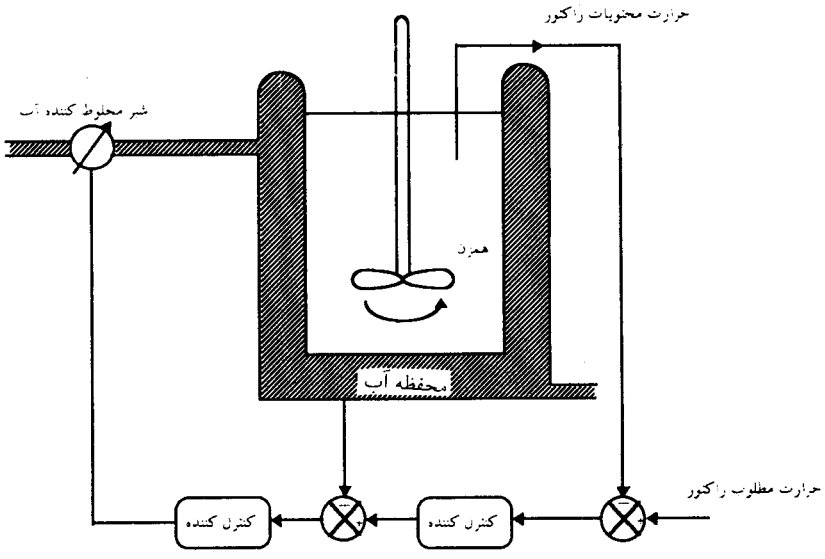
1- Control surfaces
2- Elevator
3- Aileron
4- Rudder
5- Pitch
6- Thrust

اختیار خلبان گذاشته شده است و از طرف دیگر به سیستم کنترل پرواز فیدبک می‌شوند.ساختار کلی یک سیستم کنترل پرواز در شکل ۱-۱۲ نشان داده شده است. هدف کنترل کننده، مقایسه حرکت دستور داده شده (حرکت مورد نظر خلبان) با حرکت اندازه‌گیری شده است. در صورت بروز خطا، دستور کنترلی لازم توسط کنترل کننده برای تصحیح خطای ایجاد شده صادر می‌گردد. فرامین کنترلی با ارسال سیگنال‌های فرمان به محرکها، باعث انحرافاتی در سطوح کنترلی شده که خود موجب اعمال نیرو یا ممان کنترلی مناسب می‌شوند. لذا با تولید این نیرو یا ممان کنترلی، هواپیما بر مسیر صحیح و مطلوب حرکتی قرار خواهد گرفت. مسأله مورد بررسی در این کتاب علاوه‌بر تحلیل سیستم، طراحی کنترل کنندهٔ نشان داده شده در شکل ۱-۱۲ می‌باشد.



شکل ۱-۱۲ ساختار کلی یک سیستم کنترل پرواز

کنترل درجه حرارت یک راکتور حفاظ‌دار. شکل ۱-۱۳ یک راکتور را نمایش می‌دهد که برای کنترل درجه حرارت محتویات آن، از یک پوشش محتوی آب گرم استفاده می‌شود. اگرچه با اندازه‌گیری درجه حرارت داخل راکتور و پس خوراندن مستقیم آن می‌توان با



شکل ۱-۱۳ کنترل درجه حرارت راکتور

یک کنترل کننده، شیر آب گرم ورودی به حفاظ دربرگرفته راکتور را کنترل کرد، لیکن با اعمال دو حلقهٔ کنترل به صورت نشان داده شده در شکل ۱-۱۳ می‌توان در عمل کنترل بهتری بدست آورد. درجه حرارت حفاظ پوششی راکتور در یک حلقهٔ داخلی کنترل می‌شود. مقدار مطلوب درجه حرارت این محفظه، خروجی کنترل کننده اوّل می‌باشد. ورودی کنترل کننده اوّل نیز خطای ایجاد شده از مقایسهٔ درجهٔ حرارت مطلوب راکتور و درجهٔ حرارت محتویات آن می‌باشد. برای مؤثر بودن سیستم کنترلی ارایه شده، پاسخ محفظهٔ دربرگیرنده راکتور در مقایسه با پاسخ محتویات راکتور به تغییرات و تنظیم‌های کنترلی، باید بسیار سریعتر باشد. با تنظیم کنترل کننده دوّم هرگونه خطای ایجاد شده بین درجه حرارت محفظه و درجه حرارت مطلوب آن به سرعت با اجرای فرامین کنترلی مناسب توسط شیر کنترلی باکم و زیادکردن ورودی آب گرم به درون محفظه از بین خواهد رفت. وظیفه کنترل کننده اول نیز صفرکردن خطای ایجاد شده بین درجهٔ حرارت مطلوب و درجهٔ حرارت راکتور از طریق تعیین یک ورودی مطلوب برای کنترل کننده دوّم است.

۱-۴ تعاریف

در این بخش برخی از تعاریف و اصطلاحات را که در مطالعهٔ سیستم‌های کنترل به آنها برخورد خواهیم داشت، جهت مراجعه سریع خواننده ارایه می‌کنیم (شکل ۱-۱۴ را ببینید).

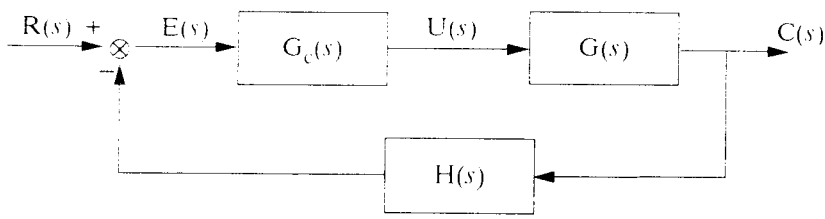
سیستم. مجموعه‌ای از عناصر است که با هم عمل می‌کنند تا کار معینی را انجام دهند به طوریکه انجام این کار توسط هیچکدام از عناصر به تنهایی امکان‌پذیر نباشد. سیستم تحت کنترل $G(s)$ را *دستگاه*[1] یا *فرایند*[2] نامیده و در این کتاب با عنوان سیستم، نامیده شده است.

ورودی مرجع. ورودی مرجع $R(s)$ که *نقطه نشانده*[3] یا خروجی *مطلوب*[4] نیز نامیده می‌شود، نشان دهندهٔ پاسخ مطلوب سیستم است. به عبارت دیگر هدف یا مشخصهٔ عملکرد مطلوب سیستم موقعی برآورده می‌گردد که خروجی سیستم به این مقدار برسد.

خروجی سیستم. خروجی سیستم $C(s)$ که *خروجی کنترل شده*[5] نیز نامیده می‌شود، سیگنالی است که از سیستم تحت کنترل بدست می‌آید و مایل به اندازه‌گیری و کنترل آن می‌باشیم. خروجی در حقیقت پاسخ واقعی سیستم در هر واحد زمانی است.

خطای سیستم. سیگنال خطای $E(s)$، تفاوت بین خروجی مطلوب سیستم (ورودی مرجع) و خروجی واقعی آن است. در شکل ۱-۱۴، $E(s)$ برای $H(s)=1$ تعریف می‌شود.

کنترل کننده. کنترل کننده $G_c(s)$ عنصری است که برای تعیین سیگنال کنترلی مناسب جهت اعمال به سیستم بکار گرفته می‌شود.



شکل ۱-۱۴ یک سیستم کنترل

1- Plant
2- Process
3- Set-point
4- Desired output
5- Controlled output

عنصر فیدبک. عنصری است که در مسیر خروجی به مقایسه کننده قرار می‌گیرد. اگر $H(s)=1$ باشد، سیستم را حلقه ـ بسته با فیدبک واحد می‌نامند. اگر $H(s)\neq 1$ باشد، سیستم حلقه ـ بسته با فیدبک غیرواحد خواهد بود. در این حالت خطای سیستم تفاضل ورودی مرجع و خروجی واقعی سیستم است و نه تفاضل خروجی عنصر فیدبک و ورودی مرجع.

ورودی کنترل. ورودی کنترل $U(s)$ که *عمل کنترلی*[1] یا *سیگنال کنترلی*[2] نیز نامیده می‌شود، خروجی سیستم کنترل و ورودی اعمال شده به سیستم تحت کنترل است.

مسیر پیشرو. مسیر از سیگنال خطا $E(s)$ تا خروجی $C(s)$ را مسیر پیشرو می‌نامند و $G_c(s)$ و $G(s)$ را شامل می‌گردد.

مسیر فیدبک. مسیریی از خروجی است که از $H(s)$ عبور می‌کند.

اغتشاش یا نویز. سیگنال *اغتشاش*[3] یا نویز، یک سیگنال ورودی به سیستم است که در هر نقطه‌ای بجز ورودی مرجع می‌تواند وارد سیستم گردد و اثر نامعینی بر روی عملکرد طبیعی سیستم بگذارد.

سیستم خطی و سیستم غیر خطی. سیستم *خطی* سیستمی است که اصل جمع آثار[4] در آن صادق باشد. اصل جمع آثار بیان می‌دارد که خروجی یک سیستم خطی $y(t)$ ناشی از ورودیهای مختلف مانند $x_1(t), x_2(t), \ldots, x_n(t)$ که همزمان عمل می‌کنند، برابر با مجموع پاسخها بر اثر عمل کردن هر ورودی به تنهایی است. به عبارت دیگر اگر $y_i(t)$ پاسخ ناشی شده از $x_i(t)$ باشد، آنگاه

$$y(t) = \sum_{i=1}^{n} y_i(t)$$

سیستمی را غیر خطی[5] گویند که اصل جمع آثار در آن صادق نیست. تقریباً اکثریت سیستم‌ها بجز سیستم‌های ساده، در عمل غیر خطی هستند. لیکن این سیستم‌ها را عموماً می‌توان در حول یک نقطه کار معین خطی کرد و از مدل خطی شده برای تحلیل و طراحی سیستم در گسترهٔ خطی استفاده نمود.

1- Control action
2- Control signal
3- Disturbance signal
4- Superposition principle
5- Nonlinear

سیستم تغییر ناپذیر با زمان و تغییر پذیر با زمان. سیستم تغییر ناپذیر با زمان[1] سیستمی است که در آن پارامترها و مشخصه‌های سیستم با زمان تغییر پیدا نمی‌کنند و حال آنکه در سیستم تغییر پذیر با زمان[2]، پارامترها و مشخصه‌های سیستم با زمان تغییر پیدا می‌کنند.

سیستم زمان ـ پیوسته و سیستم زمان ـ گسسته. سیستم زمان ـ پیوسته[3] سیستمی است که در آن سیگنال‌ها، تابع پیوسته‌ای از زمان می‌باشند. سیستم زمان ـ گسسته[4] سیستمی است که در آن سیگنال‌ها به صورت گسسته، پالسی ظاهر شده و به عبارت دیگر سیگنال‌ها بر خلاف حالت پیوسته تنها در لحظه‌های مختلف زمانی مقدار پیدا می‌کنند.

سرومکانیزم. به آن از دسته سیستم‌های مکانیکی اطلاق می‌شود که در آنها خطای حالت ـ ماندگار برای یک سیگنال ثابت ورودی صفر است. به عبارت دیگر در سیستم‌های سرو[5] حالت دنبال روندگی ورودی مرجع توسط خروجی وجود دارد. در این سیستم‌ها خروجی الزاماً باید ورودی مرجع را دنبال کند.

رگلاتور.[6] به سیستم‌هایی اطلاق می‌شود که در آنها خروجی حالت ـ ماندگار برای سیگنال ثابت، مقداری ثابت دارد. در این سیستم‌ها حالت دنبال روندگی در پاسخ سیستم وجود ندارد.

سیستم کنترل حلقه ـ باز. سیستمی که در آن خروجی اثری بر روی سیگنال ورودی ندارد.

سیستم کنترل حلقه ـ بسته. سیستمی است که در آن خروجی به گونه‌ای بر ورودی اثر می‌گذارد که خروجی در مقداری مطلوب باقی بماند.

در این کتاب تنها سیستم‌های خطی، تغییر ناپذیر با زمان و زمان ـ پیوسته در نظر گرفته خواهند شد.

مسایل

۱-۱- در یک نانوایی مشخصهٔ عملکرد مطلوب سیستم میزان برشتگی نان است. ورودی به سیستم که توسط یک شیر کنترل می‌شود، نرخ گازوییل وارد شده به منبع تولید

1- Time invariant
2- Time varying
3- Continuous-time
4- Discrete-time
5- Servo
6- Regulator

حرارت برای گرم کردن تنور است. دو نوع سیستم کنترل حلقه ـ باز و حلقه ـ بسته برای سیستم کنترل نانوایی را توسط نانوا توضیح دهید.

۱-۲- کدامیک از بندهای (الف) تا (و) برای کنترل حلقه ـ باز، کنترل حلقه ـ بسته و کنترل پیش خور الزامی است؟

(الف) یک مدل برای تعیین اثرات اعمال کنترل.

(ب) یک مدل برای تعیین اثرات عوامل خارجی.

(ج) یک هدف.

(د) اندازه‌گیری اثرات عوامل خارجی.

(ه) اندازه‌گیری اثر کنترل.

(و) مقایسه بین هدف و اثر کنترل.

۱-۳- از یک ترموستات برای کنترل درجه حرارت آب گرم یک مخزن استفاده می‌شود. اگر آب را از موقعیکه سرد است گرم کنند، با استفاده از رسم درجه حرارت آب بر حسب زمان، اساس عملکرد چنین وسیله‌ای را توضیح دهید. چرا از یک سیستم ساده حلقه ـ باز به جای این سیستم استفاده نمی‌شود؟

۱-۴- کنترل سیگنال‌های ترافیک را در چهارراه به دو روش حلقه ـ باز و حلقه ـ بسته توضیح دهید.

۱-۵- یک سیستم کنترل دست ربات را با رسم شکلهای مناسب توضیح دهید.

۱-۶- در یک سیستم کنترل سطح مایع، چه مشکلاتی ممکن است با استفاده از کنترل حلقه ـ باز رخ دهد؟ آیا می‌توان این مشکلات را با بکارگیری یک روش حلقه ـ بسته بر طرف کرد.

۱-۷- اساس کار سیستم کنترل آسانسورها را توضیح دهید.

۱-۸- به سیستمی که چند ورودی و چند خروجی داشته باشد، سیستم چند متغیره گویند. یک سیستم عملی را مثال بزنید که تعداد ورودی و خروجیهای آن از یک بیشتر است.

مراجع فصل اول

[1-1] Bennett, S., ***A history of control engineering 1800-1930***, Peter peregrinus Ltd, 1986.

[1-2] Bode, H. W., *Feedback - The history of an idea*, in selected papers on mathematical trends in control theory, Dover, New York, pp 106-123, 1964.

[1-3] Maskrey, R. H. and Thayer, W. J., *A brief history of electrohydraulic servomechanisms*, ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and control, pp 110-116, 1978.

[1-4] Mayr, O., ***Origins of feedback control***, MIT press, Cambridge, Mass., 1971.

[1-5] Singh, M., ***Encyclopedia of systems and control***, Pergamon press, 1987.

[1-6] IEEE Standard dictionary of Electrical and Electronics terms, Wiley - Interscience, New York, 1972.

[1-7] Black, H.S., *Inverting the negative feedback amplifier*, IEEE Spectrum, pp 55-60, 1977.

[1-8] Hazen, H. L., *Theory of servomechanisms*, J. Franklin Institute, 218, pp 543-580, 1934

[1-9] Maxwell, J. C., *On governors*, Proceedings of the Royal Society (London), 16, pp 270-283, 1868.

[1-10] Minorsky, N., *Control prolems*, J. Franklin Institute., 232, p. 451, 1941.

کتاب شناسی

در اکثر کتابهای مهندسی کنترل مقدمه‌ای در رابطه با مفاهیم کنترل، تعاریف و تاریخچه کنترل وجود دارد. مرجع [1] تعاریف و اصطلاحات مهندسی کنترل را برحسب استاندارد IEEE ارایه کرده است. در مراجع [1] تا [5] می‌توان مثالهای عملی از سیستم‌های کنترل را پیدا کرد. مرجع [11] مثالهای عملی از کنترل در مهندسی پزشکی دارد. واحد (1) از مرجع [24] مقدمه‌ای جامع بر مهندسی کنترل است. مراجع [1-1] تا [1-4]در رابطه با تاریخچه مهندسی کنترل فوق‌العاده سودمند می‌باشند. مرجع [1-5] دایرةالمعارفی از کلیه مباحث کنترلی تا سال ۱۹۸۷ است که در رابطه با مقدمه‌ای بر کنترل و تاریخچه آن بسیار جامع است. مرجع [1-6] کتاب لغت استاندارد IEEE در مهندسی برق و الکترونیک است. مراجع [1-7] الی [1-10] نیز تنها چند نمونه از نمونه‌های زیاد مقالات کلاسیک و پایه در نظریه کنترل اتوماتیک محسوب می‌شوند.