بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی

کنترل فرآیند صنعتی

ولفگانگ آلتمن

ترجمه

دکتر سید زین‌العابدین موسوی

(استادیار دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی)

مهندس نعمت‌اله غفاری جزی

سر شناسنامه	:	آلتمان، ولمگانگ، Altmann, Wolfgang
عنوان و نام پدید آور	:	کنترل فرآیند صنعتی [کتاب]/ ولمگانگ آلتمان؛ ترجمه سیدزین العابدین موسوی، نعمت اله غفاری جزی
مشخصات نشر	:	تهران؛ دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی،1391.
مشخصات ظاهری	:	330 ص.: مصور، جدول، نمودار.
شابک	:	978-600-6594-08-8
وضعیت فهرست نویسی	:	فیپا.
یادداشت	:	عنوان‌اصلی: Practical process control for enginee and techniclans
یادداشت	:	واژه‌نامه.
موضوع	:	کنترل فرآیندها
موضوع	:	مهندسی تولید
شناسنامه افزوده	:	موسوی، سیدزین‌العابدین، 1333-، مترجم
شناسنامه افزوده	:	غفاری جزی، نعمت اله، 1356-، مترجم
شناسنامه افزوده	:	دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی.
رده بندی کنگره	:	TS156/8/17ک9 1391
رده بندی دیویی	:	620/00115
شماره کتابشناسی ملی	:	3037734

دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی

عنوان	:	کنترل فرآیند صنعتی
گردآوری و تألیف	:	دکتر سیدزین العابدین موسوی (استادیار دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی)، مهندس نعمت‌اله غفاری جزی
ویراستار علمی	:	دکتر پرویز امیری (استادیار دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی)
ویراستار ادبی	:	عباس مرادی
نوبت چاپ	:	اول- پاییز 1392
انتشارات	:	دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی
لیتوگرافی	:	نگین سبز
چاپ	:	برهان
طراح جلد	:	مهندس نعمت‌اله غفاری جزی
ناظر چاپ	:	محمد معتمدی نژاد
حروفچین و صفحه آرا	:	نیره فیروزی
شمارگان	:	1000 جلد
قیمت	:	18.500تومان
شابک	:	978-600-6594-08-8 ISBN: 978-600-6594-08-8

کلیهٔ حقوق این اثر برای مؤلفین و دانشگاه تربیت دبیر شهیدرجائی محفوظ است.

نشانی: تهران، لویزان – کد پستی 15811-16788 – صندوق پستی 163 – 16785 – تلفن: (2632) 9 – 22970060، 22970070. نمابر: 22970003، پست الکترونیکی: Publish@srttu.edu، وب سایت: http://Publish.srttu.edu

بسم اللّه الرحمن الرحیم

پیشگفتار

فارغ‌التحصیلان رشته‌های مهندسی، هنگام برخورد با مسایل واقعی کنترل در صنعت به‌رغم درک مناسب از مفاهم ریاضی در مهندسی کنترل، غالباً درک قابل قبولی از واقعت‌های کاربردی ندارند. این مشکل گرچه همگانی است، اما در کشور عزیزمان شاید حادتر نیز باشد. به زعم پدیدآورندگان این اثر، انتظار کاستن در شکاف بین درک نظری و به‌کارگیری مفاهیم عملی را باید داشت.

بدین سبب اصول فرآیندهای صنعتی و مسایل مرتبط با آنها حتی‌الامکان با مبانی ساده ریاضی ارایه گردیده است و در این راستا مفاهیم ریاضی پیشرفته مهندسی کمتر به کار رفته و تنها به دانستن مفاهیم ریاضی پایه مهندسی اکتفا گردیده است. البته محاسبات پیچیده را در الگوریتم های کامپیوتری مفروض دانسته و تنها به‌کارگیری این الگوریتم‌ها و حداکثر تعدیل اندک آن الگوریتم‌ها مورد توجه می‌باشد. به لحاظ تاریخی شاید بهره‌گیری از چرخ طیار جیمزوات در تنظیم سرعت ماشین بخار را بدون محاسبات ریاضی پیچیده در سال 1775 میلادی نخستین کاربرد صنعتی کنترل دانست. این چرخ طیار حدود یک قرن بعد توسط ماکسول به صورت ریاضی مدل گردیده و به کمک مدل ریاضی مذکور نحوه کار این رگولاتور به خوبی تجزیه و تحلیل گردید. در موارد مشابه می‌توان ملاحظه کرد که در غالب موارد، عمل و کاربردی در مهندسی کنترل از درک تجزیه و تحلیل دقیق پیش افتاده است.

اولین نظریه کنترل در اوایل دهه چهارم قرن بیستم توسط افراد مختلفی از جمله نایکوسیت ارایه شد. این شاخه مهندسی امروزه آن چنان گسترده گردیده که در سرمایه‌گذاری‌های صنعتی امروزه، یکی از مولفه‌های هزینه‌ای به حساب می‌آید. یک مساله پایه در مهندسی کنترل تجزیه و تحلیل و پیاده‌کردن نتایج حاصل از مدل‌های دقیق ریاضی در واقعیت‌های صنعتی است که هرگز مدل دقیقی از آنها در دسترس نمی‌باشد.

کنترل فرآیند دارای مزایای شاخص است. از این مزایا در مرحله نخست بایست قیمت تمام‌شده را به حساب آورد. زیرا می‌تواند به سودآوری بیشتر و توفیقات اقتصادی منجر گردد. مزیت دیگر

مهندسی کنترل آن است که قدرت انعطاف سیستم را افزایش داده همچنین کاهش تعمیر و نگهداری و کارکرد ایمن را در فضای تولید تضمین می‌نماید و افزایش کمی و کیفی محصول را به دنبال دارد. بدیهی است برخورداری از هر یک از این مزایا به میزان به کارگیری مهندسی کنترل در فرآیندهای صنعتی بستگی دارد. حتی هنگامی که سیستم به صورت پایدار، ایمن و در نهایت با کیفیت قابل قبول کنترل می‌گردد. هنوز از کنترل بهینه می‌توان انتظارهایی از قبیل کاهش انرژی مصرفی و باز هم بیشترین منافع را از تولید داشت.

پرواضح است که انتظار از این کتاب به عنوان کتاب کمکی برای دانشجویان رشته کنترل و دیگر رشته‌ها، به خصوص در جهت درک مفاهیم ملموس‌تری از کنترل فرآیند به صورت گسترده را باید در نظر داشت. یعنی پرکردن دره عمیق بین نظریه‌ها و واقعیت کنترل فرآیند نیز از اهم اهداف این اثر می‌باشد. در این صورت انتظار برداشت مفاهیم نظری در تقسیم‌بندی-های متداول مهندسی کنترل را نبایستی به هیچ روی در این کتاب دنبال نمود. پرواضح است که کتاب پیشرو نمی‌تواند خالی از کمی، کاستی و اشتباه باشد. لذا از تمامی کسانی که کاستی-های این کتاب را همراه با پیشنهاد بهبود و ویرایش آن، به مترجمین و گردآورندگان کتاب یادآوری نمایند، پیشاپیش نهایت سپاسگذاری را خواهیم داشت.

1) smoussavi@srttu.edu
2) nghaffari88@gmail.com

فهرست

عنوان	شماره صفحه
فصل 1 - معرفی	
1-1 اهداف	1
1-2 مقدمه	1
1-3 تعاریف و اصطلاحات پایه در کنترل فرآیند	2
1-4 مدل‌سازی فرایند	3
1-5 دینامیک فرایند و ثابتهای زمانی	7
1-6 مدهای عملکرد سیستم‌های کنترل فرآیند	18
1-7 کنترل کننده حلقه بسته و محاسبات بهره فرآیند	20
1-8 مدهای کنترل تناسبی، انتگرالی و مشتقی	22
1-9 معرفی کنترل متوالی	23
فصل2 - اندازه‌گیری فرآیند و ترانسدیوسرها	
2-1 اهداف	25
2-2 تعریف ترانسدیوسر و سنسور	25
2-3 فهرست متغیرهای اندازه‌گیری معمول	26
2-4 خصوصیات مشترک ترانسدیوسرها	26
2-5 دینامیک‌های سنسور	29
2-6 انتخاب ادوات حسگر	29
2-7 سنسورهای دمایی	30
2-8 انتقال دهنده‌های فشار	38
2-9 جریان‌سنج‌ها	48
2-10 مبدل های سطح	58
2-11 طیف مدل‌های کاربری در ترانسدیوسرهای اندازه‌گیری	61
2-12 ملاحظات مربوط به ترانسدیوسرها	62
2-13 ملاحظات و ملاک‌های انتخاب	66
2-14 معرفی مبدل هوشمند	69

فصل3 - مبانی شیرهای کنترلی و عملگرها	
1-3 اهداف	71
2-3 اصلی‌ترین شیرهای کنترل فرایند	71
3-3 بهره، مشخصات، اعوجاج و گستره‌پذیری شیرهای کنترل	89
4-3 عملگر شیرهای کنترل	94
5-3 وضعیت‌سازهای شیر کنترل	99
6-3 انتخاب اندازه شیر	101
فصل4 - مبانی سیستم‌های کنترل	
1-4 اهداف	103
2-4 کنترل قطع- وصل	103
3-4 کنترل مدوله	104
4-4 کنترل حلقه‌باز	104
5-4 کنترل حلقه‌بسته	107
6-4 فرآیندهای با زمان مرده	110
7-4 پاسخ‌های فرآیند	112
8-4 ناحیه مرده	114
فصل5 - پایداری و روش‌های کنترل حلقه‌های بسته	
1-5 اهداف	115
2-5 فرایند صنعتی در عمل	115
3-5 رفتار دینامیکی گرماساز	116
4-5 اغتشاشات اصلی گرماساز	117
5-5 پایداری	117
6-5 کنترل تناسبی	118
7-5 کنترل انتگرالی	122
8-5 کنترل مشتقی	125
9-5 مدهای تناسبی، انتگرالی و مشتقی	128
10-5 ISA در مقابل Allen Bradley	130
11-5 روابط P، I و D و عکس‌العمل‌های مرتبط	130
12-5 کاربرد مدهای مختلف کنترل فرایند	130
13-5 خروجی‌های کنترل کننده PID مرسوم	132

فصل6 - اصول کنترل دیجیتال

1-6 اهداف	133
2-6 دیجیتال در مقابل آنالوگ	133
3-6 عملکرد حلقه‌های کنترل دیجیتال	134
4-6 آشنایی با توابع در حوزه فرکانس	134
5-6 لزوم کنترل دیجیتال	137
6-6 محاسبات اسکن شده	138
7-6 کنترل تناسبی	140
8-6 کنترل انتگرالی	140
9-6 کنترل مشتقی	141
10-6 تابع پیش‌فاز به عنوان کنترل مشتقی	142
11-6 مثالی از کنترل افزایشی (**Siemens S5-100V**)	143

فصل7 - کنترل‌کننده‌های PID واقعی و ایده‌آل

1-7 اهداف	145
2-7 مقایسه بین کنترل کننده‌های واقعی و ایده‌آل	145
3-7 توصیف کنترل کننده PID ایده‌آل یا بدون تاثیر	145
4-7 کنترل کننده PID واقعی (تاثیرگذار)	147
5-7 تابع پیش فاز- کنترل مشتقی همراه با فیلتر	147
6-7 عمل مشتقی و اثرات نویز	148
7-7 مثالی از الگوریتم‌های PID کنترل کننده‌های KENT K90	149

فصل8 - تنظیم کنترل‌کننده‌های PID در سیستم‌های کنترل حلقه‌باز و حلقه‌بسته

1-8 اهداف	151
2-8 اهداف تنظیم	151
3-8 روش منحنی عکس‌العمل (زیگلر- نیکولز)	153
4-8 روش اول تنظیم حلقه باز زیگلر- نیکولز	155
5-8 روش دوم حلقه باز زیگلر- نیکولز با استفاده از POI	158
6-8 روش ثابت زمانی حلقه (LTC)	159
7-8 مشکلات پس‌ماند که ممکن است در تنظیم حلقه باز رخ دهد	162
8-8 روش سیکل پیوسته (زیگلر- نیکولز)	162
9-8 روش تنظیم سیکل میرا	165

10-8 قواعد تنظیم برای راه اندازی بدون فراجهش (پِسِن) 170
11-8روش تنظیم پسن برای راه‌اندازی با فراجهش 171
12-8 خلاصه‌ای از مهم‌ترین الگوریتم‌های تنظیم حلقه‌بسته 171
13-8 معادلات PID: بهره‌های وابسته و مستقل 172

فصل9 - مدهای خروجی کنترل‌کننده، معادلات عملکردی و کنترل متوالی

1-9 اهداف 177
2-9 خروجی کنترل کننده 177
3-9 خروجی چندگانه کنترل کننده 178
4-9 حدود خروجی اشباع و غیراشباع 180
5-9 کنترل متوالی 181
6-9 مقداردهی اولیه یک سیستم متوالی 183
7-9 معادلات مرتبط با اشکال مختلف کنترل‌کننده 184
8-9 ملاحظات کاربردی در استفاده از انواع معادلات 188
9-9 تنظیم حلقه کنترل متوالی 189
10-9 کنترل متوالی با ثانویه‌های چندگانه 190

فصل10 - مفاهیم و کاربردهای کنترل پیش‌خورد

1-10 اهداف 193
2-10کاربرد و تعریف کنترل پیش‌خورد 193
3-10 کنترل پیش‌خورد دستی 194
4-10 کنترل پیش‌خورد خودکار 194
5-10 مثال‌هایی از کنترل‌کننده‌های پیش‌خورد 195
6-10 انطباق زمانی کنترل‌کننده پیش‌خورد 195

فصل11 - کنترل ترکیبی پس‌خورد و پیش‌خورد

1-11 اهداف 199
2-11 مفهوم کنترل پیش‌خورد 199
3-11 مفهوم کنترل پس‌خورد 200
4-11 ترکیب کنترل پیش‌خورد- پس‌خورد 200
5-11 جمع کننده پس‌خورد- پیش‌خورد 201
6-11 مقداردهی اولیه در سیستم کنترل ترکیبی پس‌خورد- پیش‌خورد 201
7-11 جنبه‌های تنظیم 201

فصل12 - زمان مرده طولانی در کنترل حلقه‌بسته و پیش‌بینی‌کننده اسمیت

12-1 اهداف 203
12-2 زمان مرده فرآیند 203
12-3 مثالی از زمان مرده در فرآیند 204
12-4 مدل پیش‌بینی‌کننده اسمیت 206
12-5 پیش‌بینی‌کننده اسمیت در کاربرد تئوری 207
12-6 پیش‌بینی‌کننده اسمیت در واقعیت 208
12-7 تمرینی در مورد جبران‌سازی زمان مرده 208

فصل13 - مبانی منطق فازی و شبکه‌های عصبی

13-1 اهداف 211
13-2 معرفی منطق فازی 211
13-3 منطق فازی چیست؟ 212
13-4 منطق فازی چه کاری انجام می‌دهد؟ 213
13-5 قوانین منطق فازی 213
13-6 مثالی از منطق فازی که از پنج قانون و تکه فازی استفاده می‌کند 215
13-7 پاشنه آشیل (Achilles heel) منطق فازی 217
13-8 شبکه‌های عصبی 217
13-9 شبکه پس‌انتشار عصبی 219
13-10 آموزش یک شبکه عصبی 222
13-11 قدم‌های بعدی 223

فصل14 - کنترل هوشمند خودتنظیم و کنترل فرایند آماری

14-1 اهداف 225
14-2 کنترل‌کننده‌های خودتنظیم 225
14-3 کنترلر برنامه‌ریزی‌کننده بهره 227
14-4 شرایط پیاده‌سازی کنترل‌کننده‌های خودتنظیم 227
14-5 کنترل فرایند آماری (SPC) 228
14-6 دو روش برای بهبود یک فرایند تولید 230
14-7 اخذ اطلاعات مورد نیاز برای SPC 230
14-8 محاسبه حدود کنترل 235
14-9 منطق حاکم بر نمودارهای کنترل 238

پیوست الف تعدادی از تبدیلات لاپلاس 241
پیوست ب تئوری‌های تبدیل نمودارهای بلوکی 244
تمرین1 حلقه کنترل جریان- مثال پایه‌ای 247
تمرین2 کنترل تناسبی (P)- نمودار جریان 251
تمرین3 کنترل انتگرالی (I)- کنترل جریان 254
تمرین4 کنترل تناسبی و انتگرالی (PI) -کنترل جریان 257
تمرین5 معرفی کنترل مشتقی (D) 260
تمرین6 معرفی عملی جنبه‌های پایداری 264
تمرین7 روش حلقه باز- تمرین تنظیم 271
تمرین8 روش حلقه بسته- تمرین تنظیم 276
تمرین9 حدود خروجی اشباع و غیراشباع 281
تمرین10 عمل مشتقی ایده‌آل- PID ایده‌آل 285
تمرین11 کنترل متوالی 289
تمرین12 کنترل متوالی با یک اولیه و دو ثانویه 294
تمرین13 کنترل پس‌خورد و پیش‌خورد ادغام شده 299
تمرین14 جبران‌سازی زمان مرده و کنترل پس‌خورد 302
تمرین15 هشدار مقادیر بدون تغییر 308
واژگان 311

فــصل 1

مــعــرفــی

1 - 1 اهداف

در نتیجه مطالعه این فصل، دانشجو باید قادر باشد تا:

- سه نوع متفاوت فرآیند را توصیف نماید.
- مفهوم ثابت زمانی را درک نماید.
- معانی اصطلاحات متغیر فرآیند، نقطه تنظیم و خروجی را بیان کند.
- مفاهیم سیستم‌های مرتبه اول و مرتبه دوم را شرح نماید.
- حالات مختلف عملکرد یک سیستم کنترل را فهرست نماید.

1 - 2 مقدمه

برای موفقیت در زمینه کنترل فرآیند، طراح در ابتدا باید درک کامل و روشنی از فرآیندی که کنترل می‌گردد، داشته باشد. در این کتاب قصد نداریم تا به صورت عمیق درگیر مهندسی فرآیند یا شیمی گردیم، به‌همین خاطر نیاز خواهیم داشت تا روشی را در جهت ساده‌سازی نمایش فرآیند مورد کنترل پیدا کنیم. این کار غالباً با اتخاذ تکنیک مدل‌سازی نمودار بلوکی از فرآیند صورت می‌پذیرد.

همه فرآیندها به‌طور مشترک دارای تعدادی مشخصه پایه بوده که در صورت تشخیص آنها، کار طراحی یک کنترل‌کننده مناسب به مسیری درست و اصولی خواهد انجامید. روش کار به این صورت است که یاد بگیریم یک مدل ریاضی حدالامکان دقیقی از فرآیند ساخته و از این مدل جهت پی‌بردن به نوع عمل کنترلی مورد نیاز استفاده شده، تا فرآیند در شرایط مطلوب عمل نماید. لذا موضوع را با بررسی اجزاء یا عناصر دینامیکی با اهمیت‌تر که در بیشتر فرآیندها مشترک هستند، شروع می‌کنیم. این موضوعی است که در چند بخش بعدی این فصل به آن پرداخته شده است و در خاتمه نیز به ترسیم نمودار بلوکی برای یک فرآیند ساده می‌پردازیم؛

برای مثال گفته شده است "سیستمی دارای بهره بالا و تأخیر دینامیکی مرتبه اول است"، صرف‌نظر از اینکه فرآیند در حال ساخت چه چیز است یا محصول نهایی آن چیست باید بتوانیم یک نمودار بلوکی از فرآیند ترسیم نماییم.

از این نتایج تحلیلی، می‌توان انتخاب دقیقی از نوع ترانسدیوسر اندازه‌گیری داشت. این موضوعی است که در فصل دوم به آن پرداخته شده است. همین‌طور، انتخاب عنصر کنترل نهایی می‌تواند به‌طور صحیح صورت پذیرد. این موضوع نیز در فصل سوم مورد بحث قرار گرفته است. فصول 4 تا 14 کتاب، به همه جنبه‌های دیگر کنترل عملی فرآیند واقعی اختصاص یافته‌اند، یعنی کنترل‌کننده(ها)، توابع، عمل‌ها و عکس‌العمل‌ها، ترکیب توابع و مدهای متفاوت عملکرد سیستم. در جهت معرفی کنترل‌کننده، بخش‌های نهایی این فصل نیز مشتمل بر تعاریف پایه اصطلاحات مربوط به کنترل‌کننده و انواع حالات کنترل خواهند بود.

1 - 3 تعاریف و اصطلاحات پایه در کنترل فرآیند

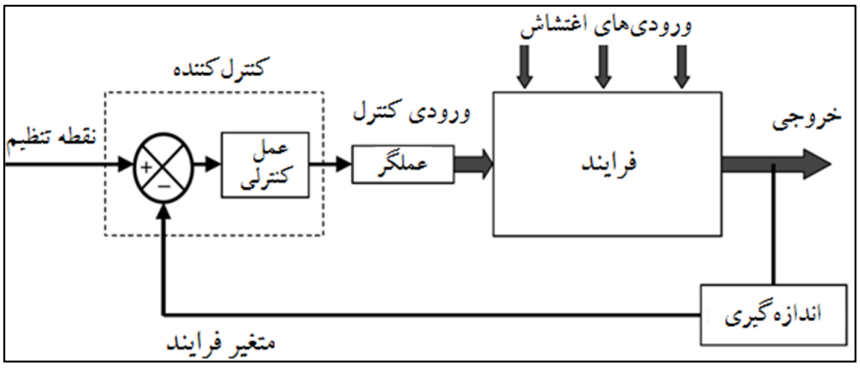
بیشتر سیستم‌های کنترل فرآیند پایه از یک حلقه کنترل تشکیل شده‌اند که مطابق شکل 1-1 دارای چهار جزء اصلی می‌باشد:

1- اندازه‌گیری از وضعیت یا شرایط فرآیند

2- کنترل‌کننده‌ای که عملی را با مقایسه این مقدار اندازه گرفته‌شده و مقدار از پیش‌تنظیم شده یا مقدار مطلوب (نقطه تنظیم) محاسبه می‌نماید.

3- یک سیگنال خروجی که از محاسبات کنترل‌کننده نتیجه شده و از طریق چند عملگر، جهت پردازش فرآیند استفاده می‌شود.

4- خود فرآیند به این سیگنال عکس‌العمل نشان داده و وضعیت یا حالت خود را تغییر می‌دهد.



شکل 1-1 نمودار بلوکی نمایش دهنده اجزاء یک حلقه کنترل فرآیند

همان‌طور که در فصل‌های 2 و 3 مشاهده خواهد شد، مهمترین سیگنال‌های مورد استفاده در کنترل فرآیند عبارتند از:

1- متغیر فرآیند یا PV

2- متغیر دست‌کاری شده یا MV

در کنترل فرآیند صنعتی، متغیر PV که توسط وسیله‌ای در فیلد اندازه گرفته می‌شود، به عنوان ورودی یک کنترل‌کننده اتوماتیک که عملی بر اساس مقدار آن انجام می‌پذیرد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در روش دیگر، متغیرPV می‌تواند به عنوان ورودی یک نمایشگر داده‌ها باشد، به این منظور که کاربر بتواند از صفحه نمایش آن جهت تنظیم فرآیند از طریق کنترل و نظارت دستی استفاده نماید. متغیری که تغییر داده می‌شود تا کنترلی بر متغیر PV داشته باشد، متغیر دستکاری شده یا MV نامیده می‌شود. برای مثال اگر ما جهت کنترل مقدار جریان خاصی وضعیت شیر را تغییر دهیم، وضعیت شیر متغیر MV است و جریان اندازه گرفته شده، متغیر PV خواهد بود.

در مورد یک کنترل‌کننده اتوماتیک ساده، سیگنال خروجی کنترل‌کننده (OP)، متغیر MV را تحریک می‌نماید. در سیستم‌های کنترل اتوماتیک پیچیده‌تر، سیگنال خروجی کنترل‌کننده ممکن است باعث تحریک مقادیر هدف یا مرجع برای کنترل‌کننده‌های دیگر گردد. مقدار ایده-آل برای PV معمولاً مقدار هدف نامیده می‌شود با این‌حال در مورد کنترل اتوماتیک، غالباً از اصطلاح نقطه تنظیم (SP) استفاده می‌گردد.

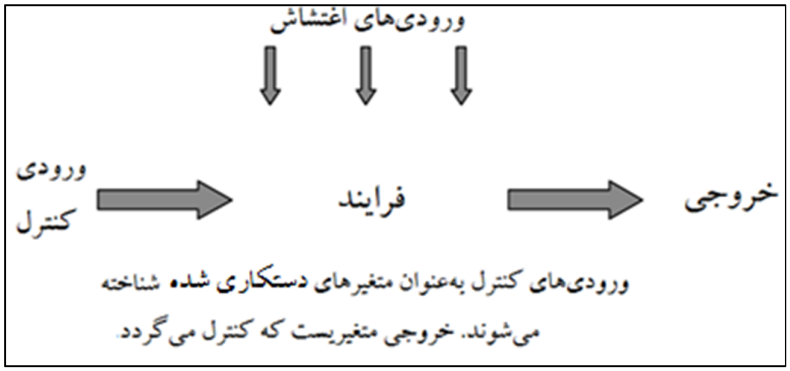
1 - 4 مدل‌سازی فرآیند

جهت اجرای مؤثر کار کنترل فرآیند، لازم است بدانیم چطور ورودی کنترلی که در نظر گرفته-ایم، در خروجی فرآیند تأثیر خواهد داشت. با تغییر شرایط ورودی، باید از پرسش‌های زیر آگاهی داشته باشیم:

- مقدار خروجی افزایش می‌یابد یا افت می‌نماید؟
- چه پاسخی دریافت خواهیم نمود؟
- چه مدت طول می‌کشد تا خروجی تغییر کند؟
- منحنی یا مسیر پاسخ به چه صورت است؟

پاسخ به این سؤالات با ایجاد یک مدل ریاضی که ارتباط بین ورودی و خروجی فرآیند مورد بحث را برقرار می‌کند، به بهترین وجه داده می‌شود. طراح‌های کنترل فرآیند از تکنیک بسیار مفید مدل‌سازی نمودار بلوکی در نمایش فرآیند و سیستم کنترلی آن استفاده می‌نمایند. اصولی که باید قادر باشیم تا به اکثر وضعیت‌های حلقه کنترل عملی به کار بندیم در پایین داده

شده است. فرآیند کنترل توسط یک بلوک ورودی/خروجی مطابق شکل 1-2 نمایش داده شده است.



شکل 1-2 نمودار بلوکی پایه برای فرآیند تحت کنترل

در شکل 1-2، سیگنال کنترل‌کننده‌ای را مشاهده می‌کنیم که روی ورودی فرآیند عمل نموده و به‌عنوان متغیر MV شناخته می‌شود. تلاش ما بر این است که خروجی فرآیند را با تغییر مقدار ورودی به یک مقدار خاص یا SP هدایت نماییم. خروجی همچنین ممکن است تحت تأثیر شرایط دیگر درون فرآیند یا عوامل خارجی مانند تغییر در فشارهای تغذیه و یا کیفیت مواد مورد استفاده در فرآیند قرار بگیرد. از این تأثیرات تحت عنوان ورودی‌های اغتشاش صحبت می‌شود و عمل کنترلی ما در جهت غلبه بر این تأثیرات به بهترین وجه ممکن خواهد بود.

مهمترین کار یک طراح کنترل فرآیند، حفظ متغیر فرآیند تحت کنترل در مقدار هدف یا تغییر آن، از طریق جبران‌سازی اغتشاشاتی که ممکن است از ورودی‌های دیگر رخ دهد، جهت دست‌یابی به نیازهای تولیدی می‌باشد. به طور مثال، اگر شما بخواهید سطح آب درون یک مخزن را در ارتفاع ثابتی نگه‌دارید، در صورتی‌که آب درون مخزن به‌طور پیوسته در حال مصرف‌شدن است، شما باید مقدار جریان ورودی را به‌منظور ثابت نگه داشتن سطح آب، تغییر دهید.

ارزش مدل‌سازی از یک فرآیند موقعی است که آن مدل بتواند چگونگی واکنش خروجی را به عمل‌های ورودی به خوبی نشان دهد. این کار با داشتن یک مدل ریاضی که مبتنی بر قوانین فیزیکی و شیمیایی مؤثر بر فرآیند است، صورت می‌پذیرد.

برای مثال، در شکل 1-3 یک مخزن روباز با سطح مقطع A نشان داده شده است که توسط جریان آب ورودی Q_1 که می‌تواند کنترل یا تغییر داده شود، تغذیه می‌گردد. جریان خروجی

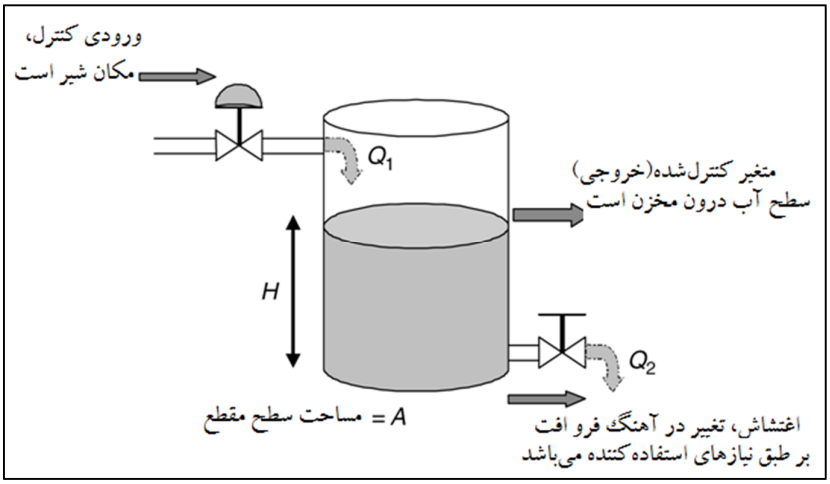
مخزن که با Q_2 نمایش داده می‌شود، از یک شیر با مقاومت R عبور می‌یابد. سطح آب یا فشار ارتفاعی مخزن با H نمایش داده شده است. هنگامی‌که H افزایش می‌یابد Q_2 نیز متعاقباً افزایش یافته و زمانی‌که Q_2 برابر Q_1 گردد سطح مایع به حالت پایا یا دائمی می‌رسد. نمودار بلوکی این فرآیند در شکل 1-4 ترسیم گردیده است.

توجه نمایید که نمودار به سادگی جریان متغیرها را به درون بلوک‌های کارکردی و نقاط جمع نشان داده است، به‌همین خاطر می‌توانیم متغیرهای ورودی و خروجی هر بلوک را به راحتی تشخیص دهیم. از این مدل انتظار می‌رود تا چگونگی تغییر H را با تنظیم جریان ورودی Q_1، مادامی‌که شیر جریان ورودی در جای ثابتی نگه داشته شود، بیان نماید. معادلات مربوط به این مدل به صورت زیر نوشته می‌شود:

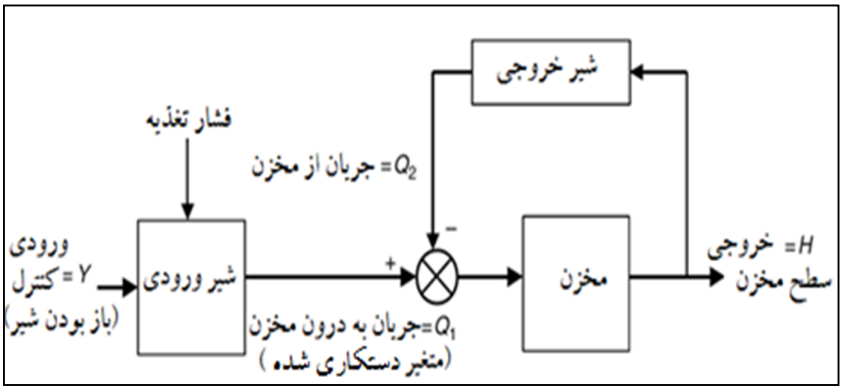
$$\frac{dH}{dt} = \frac{Q_1 - Q_2}{A} \quad \text{و} \quad Q_2 = \frac{H}{R}$$

معادله اول بیان می‌دارد که آهنگ تغییر سطح متناسب با اختلاف بین جریان ورودی و جریان خروجی تقسیم بر مساحت سطح مقطع مخزن است و معادله دوم بیان‌کننده آن است که جریان خروجی متناسب با فشار ارتفاعی تقسیم بر مقاومت جریان R افزایش می‌یابد.

توجه: ذکر این نکته ضروری است که برای شرایط جریان متلاطم در لوله خروجی و شیر، مقاومت مؤثر (R) در برابر جریان متناسب با ریشه مربع افت فشار تغییر می‌یابد بنابراین R حاصلضرب یک عدد ثابت x در H خواهد بود. این شرایط باعث ایجاد یک عنصر غیرخطی در مدل شده که وضعیت پیچیده‌تری را بوجود خواهد آورد. اما در مدل‌سازی کنترل فرآیند، معمول بر این است که عناصر غیرخطی را موقعی‌که در حال مطالعه فرآیند دینامیکی حول سطح محدودی از اغتشاش هستیم، ساده‌سازی نماییم. بنابراین برای محدوده باریکی از سطح، می‌توان R را یک مقدار ثابت در نظر گرفت. مهم است که این تقریب را همواره در خاطر داشته باشیم چرا که در بسیاری از کاربردها زمانی‌که تنظیمات حلقه در شرایطی دور از نقطه کار اصلی صورت گیرد، این تقریب منجر به بروز مشکلاتی می‌گردد.



شکل 1-3 مثالی از یک مخزن آب با جریان ورودی کنترل شده



شکل 1-4 نمودار بلوکی اولیه از یک مخزن آب

رابطه ورودی/خروجی فرآیند با جانشین‌نمودن Q_2 در معادله دیفرانسیل خطی به دست می‌آید:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{Q_1}{A} - \frac{H}{RA}$$

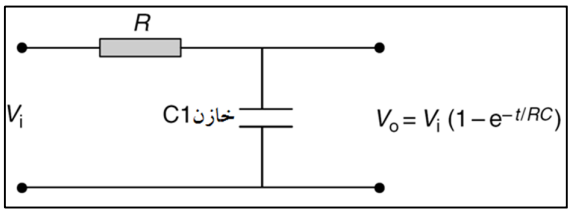
با یک مرتب‌سازی، رابطه به فرم استاندارد زیر درخواهد آمد:

$$(RA)\left(\frac{dH}{dt}\right) + H = RQ_1$$

با حل معادله دیفرانسیل بر حسب H ، به رابطه زیر می‌رسیم:

$$H = RQ_1\left(1 - e^{-t/RA}\right)$$

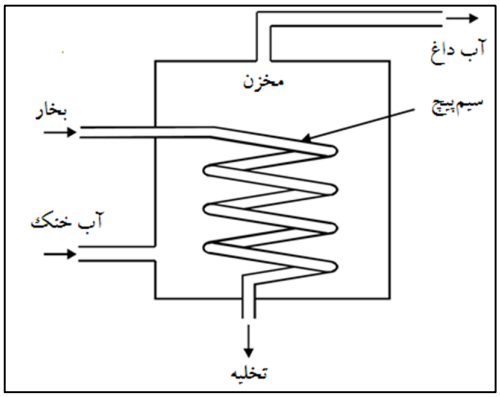
با استفاده از فرمول بالا می‌توان نشان داد که اگر یک تغییر پله‌ای ΔQ_1 در جریان سیستم رخ دهد، سطح آب به اندازه $\Delta Q_1 R$، به همراه یک افزایش نمایی برحسب زمان، افزایش خواهد یافت. این نتیجه، ویژگی فرآیند دینامیکی مرتبه اول بوده که در خیلی از فرآیندهای فیزیکی بطور معمول دیده می‌شود. به این فرآیندها اغلب، فرآیندهای ظرفیتی و مقاومتی گفته می‌شود و شامل مواردی نظیر شارژکردن یک خازن از طریق یک مدار مقاومتی (مطابق شکل 1-5) و گرم کردن یک مخزن آب داغ (مطابق شکل 1-6) می‌گردد.



شکل 1-5 مدار حاوی مقاومت و خازن با پاسخ مرتبه اول

1 - 5 دینامیک‌های فرآیند و ثابت‌های زمانی

مقاومت، خازن و لختی شاید مهم‌ترین تأثیر را در فرآیندهای صنعتی مرتبط با انتقال حرارت، انتقال جرم و جریان سیال دارند. مشخصات اصلی سیستم‌های مرتبه اول و دوم در پایین به-صورت خلاصه آورده شده است. از این مشخصه‌ها جهت به دست‌آوردن ثابت‌زمانی و پاسخ بسیاری از فرآیندها مانند سیستم‌های مکانیکی و الکتریکی استفاده می‌گردد. به‌ویژه متذکر می‌گردیم که اکثر وسایل اندازه‌گیری فرآیند دارای مقدار مشخصی تأخیر دینامیکی بوده که باید در هر کاربرد سیستم کنترل به دلیل آنکه فاکتور مهمی در پاسخ و در تنظیمات حلقه کنترلی محسوب می‌گردد، شناسایی شود.



شکل 1-6 تأثیرات مقاومتی و ظرفیتی در یک آب گرم‌کن

1 - 5 - 1 مشخصات دینامیکی فرآیندهای مرتبه اول

شکل کلی مدل فرآیندی، برای سیستم‌های تأخیری مرتبه اول به‌صورت معادله دیفرانسیلی خطی مرتبه اول می‌باشد:

$$T\frac{dc(t)}{dt} + c(t) = K_P m(t)$$

که در آن

T = ثابت زمانی پاسخ فرآیند

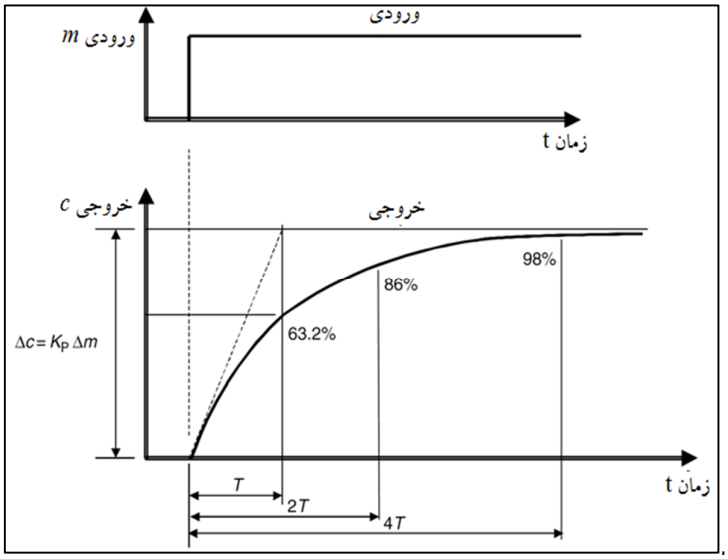
K_P = بهره حالت دائمی فرآیند (تغییر ورودی/ تغییر خروجی)

t = زمان

$c(t)$ = پاسخ خروجی فرآیند

$m(t)$ = پاسخ ورودی فرآیند

مطابق شکل 1-7، خروجی یک فرآیند مرتبه اول با تغییر پله‌ای در ورودی، به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد



شکل 1-7 پاسخ مرتبه اول

نکته مهم این است که T ثابت زمانی سیستم بوده و بنا به تعریف مدت زمانی است که طول می‌کشد تا خروجی به 63/2٪ مقدار نهایی خود، پس از اینکه یک تغییر پله‌ای به سیستم اعمال گردید، برسد. بعد از 4 ثابت زمانی، پاسخ خروجی به 98٪ مقدار نهایی خود می‌رسد که در این مقدار ثابت خواهد ماند.

$$K_P = \frac{\text{تغییر حالت دائمی خروجی}}{\text{تغییر در ورودی}} \text{ بهره حالت دائمی سیستم}$$

آهنگ اولیه افزایش خروجی به اندازه $\frac{K_P}{T}$ خواهد بود.

کاربرد در یک نمونه مخزن

با اعمال ابعاد مخزن به منحنی پاسخ شکل 1-7، می‌توان زمانی را پیش‌بینی نمود که سطح مخزن مثال نشان داده شده در شکل 1-3 نیاز خواهد داشت تا پس از یک تغییر پله‌ای کوچک حول سطح هدف H، به حالت دائمی برسد. برای مثال فرض کنید مخزن دارای سطح مقطع $2m^2$ بوده و موقعی‌که آهنگ جریان خروجی $5\,m^3/h$ است، سطح آب مخزن در ارتفاع H=2m قرار دارد. ثابت مقاومت R در این مثال :

$$\frac{H}{Q} = \frac{2m}{5\,m^3/h} = 0/4\,h/m^2$$

در این‌صورت ثابت زمانی AR =0/8 h خواهد بود. بهره فرآیند جهت تغییر در Q_1، به میزان R خواهد بود. بنابراین اگر یک تغییر اصلاحی کوچکی در Q_1 و به میزان $0/1m^3/h$ اعمال نماییم، میزان تغییر حاصله در سطح $RQ_1 = 1 \times 0/4 = 0/4\,m$ خواهد شد و زمان لازم برای رسیدن به 98٪ آن تغییر، 3/2h طول خواهد کشید.

1 - 5 - 2 فرآیند مقاومتی

حال که رفتار یک فرآیند مرتبه اول را مشاهده کردیم، در موقعیتی هستیم که می‌توانیم متغیرهایی که ممکن است در یک فرآیند پیدا گردند، با هم‌ارزنمودن فرآیندهای نوع مقاومتی، ظرفیتی و لختی، مورد بررسی قرار دهیم. اگر فرآیندی دارای ذخیره انرژی یا ظرفیت خیلی کوچکی باشد، پاسخ خروجی به تغییری در ورودی به‌صورت آنی و متناسب با بهره آن مرحله خواهد بود. به‌عنوان نمونه، اگر از یک شیر کنترل خطی مطابق شکل1-3 جهت تغییر در جریان ورودی مخزن استفاده شود، جریان خروجی سریعاً به یک مقدار بالاتر با تأخیر قابل چشم‌پوشی صعود خواهد کرد.

1 - 5 - 3 فرآیندهای نوع ظرفیتی

اغلب فرآیندها، به‌گونه‌ای از قابلیت ظرفیت یا ذخیره‌سازی مواد (گاز، مایع یا جامد) یا انرژی(گرمایی، شیمیایی و...) برخوردارند. آن بخش‌هایی از فرآیند با توانایی ذخیره‌سازی ماده یا

انرژی اصطلاحاً ظرفیت گفته می‌شود و بوسیله انرژی ذخیره‌شده به شکل انرژی پتانسیل به‌عنوان مثال انرژی الکتریکی، گرمای هیدروستاتیک سیالات، انرژی فشاری و انرژی گرمایی مشخص می‌گردند.

ظرفیت مخازن ذخیره گاز یا مایع بر حسب واحدهای مساحت بیان می‌گردند. این فرآیندها در شکل 1-8 نمایش داده شده‌اند. ظرفیت گازی یک مخزن، ثابت بوده و قابل قیاس با ظرفیت الکتریکی است. ظرفیت مایع برابر با مساحت سطح مقطع مخزن در صفحه مایع می‌باشد، که اگر سطح مقطع ثابت باشد، ظرفیت نیز به ازاء هر ارتفاعی ثابت خواهد بود.

با استفاده از شکل 1-8، فرض می‌کنیم شرایط حالت دائمی بر سیستم حاکم باشد یعنی جریان ورودی به درون مخزن با جریان خروجی از طریق یک سوراخ یا منفذ یا شیر با مقاومت جریانی R هماهنگ باشد. اگر مقدار جریان ورودی به میزان جزئی ΔV تغییر کند، جریان خروجی به علت افزایش فشار، افزایش پیدا کرده تا زمانی‌که به شرایط دائمی جدید برسد. به‌ازاء تغییرات کوچک، R را می‌توان ثابت فرض کرد. در این‌صورت پاسخ‌های فشار و جریان خروجی از منحنی تأخیر مرتبه اول مطابق شکل 1-7 پیروی نموده و توسط معادله $\Delta P = R\Delta V\left(1 - \mathrm{e}^{-t/RC}\right)$ و با ثابت‌زمانی RC داده خواهد شد. روشن است که این پاسخ دینامیکی از قوانین مشابهی که در مورد مثال مخزن مایع شکل 1-3 و مدار الکتریکی شکل 1-5 بیان شد، پیروی می‌کند.

عنصر یک فرآیند ظرفیتی خالص می‌تواند به‌وسیله مخزنی با تنها یک اتصال جریان ورودی مطابق شکل 1-9 نمایش داده شود. در چنین فرآیندی، آهنگی که در آن سطح مایع افزایش می‌یابد متناسب با عکس ظرفیت بوده و مخزن نهایتاً سرریز خواهد نمود. برای یک مخزن در ابتدا خالی با جریان ورودی ثابت، سطح c از حاصلضرب آهنگ جریان ورودی m و دوره تناوب شارژ نمودن t تقسیم بر ظرفیت مخزن C به‌دست می‌آید.

1 - 5 - 4 فرآیندهای نوع لختی

اثرات لختی معمولا حاصل حرکت مواد ذخیره‌ساز یا تلف‌کننده انرژی جنبشی بوده و اغلب در سیستم‌های مکانیکی حاوی اجزاء متحرک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. همچنین این اثرات در مورد بعضی از سیستم‌های جریان سیال که در آن سرعت سیال افزایش یا کاهش داده می‌شود نیز مهم هستند. یک مثال بسیار رایج از سیستم تأخیر مرتبه اول، حاصل از تجمع انرژی جنبشی، هنگامی است که سرعت یک جسم دوار نیاز به تغییر داشته یا زمانی‌که سرعت یک وسیله موتوری با افزایش قدرت موتور آن همچنان افزایش یافته تا موقعی‌که نیروی مقاومت هوا و غلتش متناسب با افزایش توان ورودی گردد.