

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ



دانشگاه اصفهان  
دانشکده فنی و مهندسی  
گروه برق

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق گرایش کنترل

**کنترل دینامیکی و سینماتیکی ربات های صنعتی با دینامیک و سینماتیک های  
نامشخص به روش حذف اغتشاش فعال (ADRC)**

استاد راهنما:  
دکتر مهدی ادیبی

پژوهشگر:  
امیر سالکی

مهرماه 1392

کلیه حقوق مادی و معنوی مترتب بر دست‌آوردهای مطالعات،  
ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از پژوهش موضوع این پایان‌نامه متعلق  
به دانشگاه اصفهان است. دانشجو موظف به رعایت آئین‌نامه و  
منشور اخلاق در پژوهش برای ارائه و یا چاپ مطالب مستخرج از  
پایان‌نامه خود می‌باشد.



دانشگاه اصفهان  
دانشکده فنی و مهندسی  
گروه برق

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق گرایش کنترل  
آقای امیر سالکی تحت عنوان

**کنترل دینامیکی و سینماتیکی ربات های صنعتی با دینامیک و سینماتیک های  
نامشخص به روش حذف اغتشاش فعال (ADRC)**

در تاریخ 92/7/20 توسط هیئت داوران زیر و با درجه بسیار خوب به تصویب نهایی رسید.

- 1- استاد راهنمای پایان نامه دکتر مهدی ادریسی با مرتبه علمی استادیار امضا
- 2- استاد داور داخل گروه دکتر حمیدرضا کوفیگر با مرتبه علمی استادیار امضا
- 3- استاد داور خارج از گروه دکتر کمال جمشیدی با مرتبه علمی دانشیار امضا

امضای مدیر گروه

## چکیده

شاید اولین و پایه‌ای‌ترین سوالی که در علم کنترل برای طراحان مطرح می‌شود این است: به منظور کنترل کردن یک فرآیند یا یک سیستم چه چیزی لازم است درباره آن بدانیم؟ و آیا برای یک سیستم فیزیکی که قرار است کنترل شود، می‌توان دینامیک‌های داخلی و اغتشاشات خارجی را بصورت زمان واقعی از روی داده‌های ورودی و خروجی‌اش تخمین زد؟ پاسخ مثبت می‌تواند کاربرد زیادی در طراحی سیستم‌های کنترل داشته باشد، زیرا به معنی آن است که دیگر به مدل دقیق ریاضی سیستم احتیاجی نیست. «با ADRC شاید نیازی به داشتن چیزی بیشتر از ورودی و خروجی‌ها، یعنی آنچه که قابل اندازه‌گیری است، نباشد». این ادعای جذابی است که در 15 سال اخیر مطرح شده است و با توجه به موارد متعدد کاربردهای عملی موفقیت آمیز آن، در حال ایجاد تحولی نوین در تئوری کنترل است.

امروزه با توجه به استفاده وسیع و گسترده از ربات‌های صنعتی و بازوهای ماهر در صنایع گوناگون، لزوم انجام پژوهش‌های مختلف در رابطه با روش‌های مختلف کنترل آنها بر هیچکس پوشیده نیست. اما محاسبات پیچیده و لزوم تسلط کافی به ملاحظات مکانیکی و دینامیکی ربات، همیشه یکی از مشکلات اساسی طراحان و مهندسان در طراحی کنترل‌کننده برای ربات بوده است. در این پژوهش از ویژگیهای منحصر بفرد ADRC برای کنترل ربات‌های صنعتی استفاده شده است. ردیابی مسیر مطلوب توسط مجری نهایی در بازوهای ماهر، دنبال کردن مسیر مطلوب در ربات‌های متحرک، تخمین مناسب اغتشاش و حذف اثر آن از جمله نتایج مطلوبی است که با استفاده از شبیه سازی‌های انجام شده بدست آمده است. مقاومت این روش در برابر تغییر پارامترهای مدل ربات نیز مورد بررسی قرار گرفته است. این بررسی‌ها هم بر روی بازوهای ماهر و هم بر روی ربات‌های متحرک خودکار انجام گرفته است. همچنین به منظور بدست آوردن یک سیگنال کنترل قابل تحقق از لحاظ فیزیکی، تغییری در ساختار اولیه ADRC ایجاد شده است. در نتیجه با توجه مزایای این روش در مقایسه با سایر روش‌های کنترلی مثل عدم نیاز به مدل ریاضی دقیق سیستم، می‌توان آن را جایگزین مناسبی برای روش‌های کنترلی موجود، در نسل‌های آینده ربات‌های صنعتی دانست.

**کلیدواژه‌ها:** کنترل حذف اغتشاش فعال ADRC، رویتگر حالت، رویتگر حالت توسعه یافته، دینامیک نامعین، اغتشاش خارجی.

## فهرست مطالب

عنوان	صفحه
چکیده .....	ج
فهرست شکل ها .....	ذ
فهرست جدول ها .....	ص
<b>فصل اول: مقدمه‌ای بر روش‌های کنترل کلاسیک و بررسی لزوم نیاز به تغییر روش</b>	
1-1- نیاز به یک سیستم کنترل، و کنترل فیدبک .....	1
2-1- روش‌های طراحی کنترل‌کننده متداول .....	2
1-2-1- روش کنترل مدرن (MCP) Modern Control Paradigm .....	2
2-2-1- روش طراحی تجربی مبتنی بر خطا (EDP) .....	3
3-1- محدودیت‌های روش‌های طراحی کنترل تئوری .....	5
1-3-1- محدودیت‌های کنترل مدرن .....	6
2-3-1- محدودیت‌های روش طراحی مبتنی بر خطا .....	7
4-1- نیاز به تغییر روش .....	8
5-1- ADRC چیست؟ .....	9
6-1- هدف از انجام این پژوهش .....	10
<b>فصل دوم: ساختار ADRC و برخی از کاربردهای عملی آن</b>	
1-2- مقدمه .....	12
2-2- مروری تاریخی بر ایده حذف اغتشاش فعال .....	13
3-2- ساختار ADRC .....	15
1-3-2- رویکرد حالت توسعه یافته (ESO) .....	15
2-3-2- قانون کنترل .....	17
4-2- ADRC خطی (LADRC) .....	18
1-4-2- قانون کنترل برای LADRC .....	20
5-2- استفاده از ADRC وقتی که قسمتی از سیستم معلوم است .....	20
6-2- مروری بر مستندات اثبات پایداری ADRC .....	21

21	2-6-1- تحلیل در حوزه‌ی زمان
22	2-6-2- تحلیل در حوزه‌ی فرکانس
22	7-2- اعمال ADRC به سیستم‌های چند متغیره
22	8-2- کاربردهای عملی ADRC
24	9-2- اعمال ADRC به یک مسئله نمونه

### فصل سوم : استفاده از روش ADRC برای کنترل ربات‌های صنعتی

33	3-1- مقدمه
34	3-2- شیوه‌ی معمول کنترل ربات‌های صنعتی
35	3-3- استفاده از روش ADRC برای کنترل ربات‌های صنعتی
37	3-4- پیاده‌سازی ADRC روی ربات صنعتی دو رابطی
38	3-4-1- ADRC غیرخطی
38	3-4-2- شبیه‌سازی ADRC غیرخطی برای ربات دو رابطی
46	3-4-3- بررسی مقاومت کنترل‌کننده‌ی ADRC در برابر تغییرات پارامترهای مدل
60	4-4-3- ADRC خطی (LADRC)
61	4-4-5- شبیه‌سازی LADRC برای ربات دو رابطی
66	3-4-6- LADRC اصلاح شده برای تولید گشتاور راه اندازی مناسب
5-3	کنترل دینامیکی موقعیت مجری نهایی ربات پیوما 560 با دینامیک نامشخص به
73	روش دفع اغتشاش فعال
74	3-5-1- ADRC غیرخطی
75	3-5-2- شبیه‌سازی ADRC غیرخطی برای پیوما 560
81	3-6- بکارگیری روش کنترل حذف اغتشاش فعال برای مدل زیردریایی خودکار
81	3-6-1- آشنایی با مدل زیردریایی
83	3-6-2- محرک‌ها و مکانیزم‌های تولید‌کننده حرکت و چرخش زیردریایی
84	3-6-3- زیر سیستم‌های کنترل در زیردریایی‌ها
85	3-6-4- اعمال روش ADRC برای کنترل زیردریایی

صفحه

عنوان

فصل چهارم: نتیجه گیری

107	..... نتیجه گیری	1-4
108	..... کارهای آینده	2-4
109	..... منابع	
116	..... <b>LADRC</b> پایداری و همگرایی و تحلیل	



## فهرست شکل‌ها

شکل		صفحه
(1-1)	یک سیستم کنترل فیدبک .....	1
(2-1)	توپولوژی کنترل PID .....	4
(1-2)	نمودار تابع fal برحسب خطا ( e ) .....	17
(2-2)	ساختار ADRC .....	18
(3-2)	مدل موتور معرفی شده در نرم‌افزار MATLAB .....	25
(4-2)	کنترل پیش‌خور موتور DC .....	25
(5-2)	پاسخ پله موتور DC به روش کنترل پیش‌خور در حضور اغتشاش .....	26
(6-2)	کنترل فیدبک .....	26
(7-2)	پاسخ پله روش کنترلی فیدبک در حضور اغتشاش، و مقایسه آن با روش پیش‌خور .....	27
(8-2)	کنترل LQR برای موتور DC .....	27
(9-2)	مقایسه سه روش کنترلی با یکدیگر .....	28
(10-2)	دیگرام کنترلی روش ADRC برای کنترل موتور DC .....	29
(11-2)	پاسخ پله و حذف اغتشاش توسط ADRC .....	30
(12-2)	مقایسه روش‌های مختلف کنترل سرعت موتور در حضور اغتشاش .....	30
(13-2)	سیگنال کنترل تولید شده توسط ADRC .....	31
(14-2)	سیگنال کنترل تولید شده توسط روش فیدبک .....	31
(1-3)	ربات صنعتی 2 درجه آزادی .....	37
(2-3)	شبیه‌سازی ADRC غیرخطی برای ربات دو رابطی در محیط SIMULINK .....	39
(3-3)	ردیابی ورودی مطلوب $X_d$ توسط مجری نهایی .....	40
(4-3)	ردیابی ورودی مطلوب $Y_d$ توسط مجری نهایی .....	40
(5-3)	خطای ردیابی $X_d$ .....	41
(6-3)	متغیر مفصلی اول ربات و ردیابی مسیر مطلوب .....	42
(7-3)	متغیر مفصلی دوم ربات و ردیابی مسیر مطلوب .....	42
(8-3)	خطای ردیابی متغیر مفصلی دوم .....	43
(9-3)	شکل مقایسه‌ای متغیر مفصلی اول ربات .....	44
(10-3)	شکل مقایسه‌ای متغیر مفصلی دوم ربات .....	44
(11-3)	سیگنال اندازه‌گیری شده‌ی نویزی اعمال شده به ADRC .....	45
(12-3)	خروجی واقعی و خروجی مطلوب در حالت اندازه‌گیری نویزی .....	45
(13-3)	ردیابی خروجی مطلوب با وجود اغتشاش وارد شده در ثانیه 12 به مدت یک ثانیه .....	46

- (14-3) خطای ردیابی خروجی مطلوب با وجود اغتشاش وارد شده در ثانیه 12 به مدت یک ثانیه ..... 47
- (15-3) ردیابی  $X_d$  توسط مجری نهایی با تغییر وزن رابط اول ..... 47
- (16-3) ردیابی  $Y_d$  توسط مجری نهایی با تغییر وزن رابط اول ..... 48
- (17-3) متغیر مفصلی اول ربات و ردیابی مسیر مطلوب با تغییر وزن رابط اول ..... 48
- (18-3) متغیر مفصلی دوم ربات و ردیابی مسیر مطلوب با تغییر وزن رابط اول ..... 49
- (19-3) ردیابی  $X_d$  توسط مجری نهایی با تغییر وزن رابط دوم ..... 50
- (20-3) ردیابی  $Y_d$  توسط مجری نهایی با تغییر وزن رابط دوم ..... 50
- (21-3) متغیر مفصلی اول ربات و ردیابی مسیر مطلوب با تغییر وزن رابط دوم ..... 51
- (22-3) متغیر مفصلی دوم ربات و ردیابی مسیر مطلوب با تغییر وزن رابط دوم ..... 51
- (23-3) ردیابی  $X_d$  توسط مجری نهایی با تغییر وزن همزمان رابط‌های اول و دوم ..... 52
- (24-3) ردیابی  $Y_d$  توسط مجری نهایی با تغییر وزن همزمان رابط‌های اول و دوم ..... 52
- (25-3) متغیر مفصلی اول ربات و ردیابی مسیر مطلوب با تغییر وزن همزمان رابط‌های اول و دوم ..... 53
- (26-3) متغیر مفصلی دوم ربات و ردیابی مسیر مطلوب با تغییر وزن همزمان رابط‌های اول و دوم ..... 53
- (27-3) ردیابی  $X_d$  توسط مجری نهایی با تغییر ممان اینرسی رابط اول ..... 54
- (28-3) ردیابی  $Y_d$  توسط مجری نهایی با تغییر ممان اینرسی رابط اول ..... 55
- (29-3) متغیر مفصلی اول ربات و ردیابی مسیر مطلوب با تغییر ممان اینرسی رابط اول ..... 55
- (30-3) متغیر مفصلی دوم ربات و ردیابی مسیر مطلوب با تغییر ممان اینرسی رابط اول ..... 56
- (31-3) ردیابی  $X_d$  توسط مجری نهایی با تغییر ممان اینرسی رابط دوم ..... 56
- (32-3) ردیابی  $Y_d$  توسط مجری نهایی با تغییر ممان اینرسی رابط دوم ..... 57
- (33-3) متغیر مفصلی اول ربات و ردیابی مسیر مطلوب با تغییر ممان اینرسی رابط دوم ..... 57
- (34-3) متغیر مفصلی دوم ربات و ردیابی مسیر مطلوب با تغییر ممان اینرسی رابط دوم ..... 58
- (35-3) ردیابی  $X_d$  توسط مجری نهایی با تغییر همزمان ممان اینرسی رابط‌های اول و دوم ..... 58
- (36-3) ردیابی  $Y_d$  توسط مجری نهایی با تغییر همزمان ممان اینرسی رابط‌های اول و دوم ..... 59
- (37-3) متغیر مفصلی اول ربات و ردیابی مسیر مطلوب با تغییر همزمان ممان اینرسی رابط‌های اول و دوم ..... 59
- (38-3) متغیر مفصلی دوم ربات و ردیابی مسیر مطلوب با تغییر همزمان ممان اینرسی رابط‌های اول و دوم ..... 60
- (39-3) شبیه سازی LADRC برای ربات دو رابطی در محیط SIMULINK ..... 62

- (40-3) ردیابی ورودی مطلوب  $x_d$  توسط مجری نهایی برای LADRC ..... 62
- (41-3) ردیابی ورودی مطلوب  $y_d$  توسط مجری نهایی برای LADRC ..... 63
- (42-3) متغیر مفصلی اول ربات و ردیابی مسیر مطلوب برای LADRC ..... 63
- (43-3) متغیر مفصلی دوم ربات و ردیابی مسیر مطلوب برای LADRC ..... 64
- (44-3) خطای ردیابی  $x_d$  برای LADRC ..... 64
- (45-3) خطای ردیابی  $y_d$  برای LADRC ..... 65
- (46-3) خطای ردیابی متغیر مفصلی اول برای LADRC ..... 65
- (47-3) خطای ردیابی متغیر مفصلی دوم برای LADRC ..... 66
- (48-3) گشتاور تولید شده برای مفصل اول ربات ..... 67
- (49-3) گشتاور ایجاد شده برای مفصل دوم ربات ..... 67
- (50-3) ردیابی ورودی مطلوب  $x_d$  توسط مجری نهایی برای LADRC اصلاح شده ..... 68
- (51-3) ردیابی ورودی مطلوب  $y_d$  توسط مجری نهایی برای LADRC اصلاح شده ..... 69
- (52-3) متغیر مفصلی اول ربات و ردیابی مسیر مطلوب برای LADRC اصلاح شده ..... 69
- (53-3) متغیر مفصلی دوم ربات و ردیابی مسیر مطلوب برای LADRC اصلاح شده ..... 70
- (54-3) خطای ردیابی  $x_d$  توسط مجری نهایی برای LADRC اصلاح شده ..... 70
- (55-3) خطای ردیابی  $y_d$  توسط مجری نهایی برای LADRC اصلاح شده ..... 71
- (56-3) خطای ردیابی متغیر مفصلی اول برای LADRC اصلاح شده ..... 71
- (57-3) خطای ردیابی متغیر مفصلی دوم برای LADRC اصلاح شده ..... 72
- (58-3) گشتاور تولید شده برای مفصل اول ربات ..... 72
- (59-3) گشتاور تولید شده برای مفصل دوم ربات ..... 73
- (60-3) ربات صنعتی پیوما 560 ..... 74
- (61-3) شبیه سازی ADRC غیر خطی برای پیوما 560 در محیط SIMULINK ..... 76
- (62-3) ردیابی ورودی مطلوب  $\theta_1$  توسط متغیر مفصلی اول ..... 77
- (63-3) ردیابی ورودی مطلوب  $\theta_3$  توسط متغیر مفصلی سوم ..... 77
- (64-3) خطای ردیابی متغیر مفصلی سوم ..... 78
- (65-3) شکل مقایسه ای متغیر مفصلی اول ربات ..... 78
- (66-3) سیگنال اندازه گیری شده ی نویزی اعمال شده به ADRC ..... 79
- (67-3) خروجی واقعی و خروجی مطلوب متغیر مفصلی اول در حالت اندازه گیری نویزی ..... 79
- (68-3) ردیابی ورودی مطلوب  $\theta_1$  با وجود اغتشاش وارد شده در ثانیه 2 ..... 80
- (69-3) خطای ردیابی ورودی مطلوب متغیر مفصلی اول با وجود اغتشاش وارد شده در ثانیه 2 ..... 80
- (70-3) متغیرهای حرکت برای شناورهای دریایی ..... 82

83	(71-3) مکانیزم سکان در هواپیما
84	(72-3) مکانیزم stern planes در هواپیما
84	(73-3) مکانیزم bow plnes در هواپیما
86	(74-3) اعمال روش ADRC برای کنترل زیردریایی در محیط SIMULINK
87	(75-3) نمودار X مرجع و مسیر X خروجی
87	(76-3) نمودار Z مرجع و مسیر Z خروجی
88	(77-3) نمودار زاویه pitch مرجع و خروجی pitch واقعی
88	(78-3) خطای ردیابی متغیر X
89	(79-3) خطای ردیابی متغیر Z
89	(80-3) خطای ردیابی متغیر $\theta$
90	(81-3) مسیر کلی حرکت در صفحه XZ
90	(82-3) سیگنال کنترلی تولید شده توسط کنترل کننده
91	(83-3) سیگنال کنترلی مرجع
92	(84-3) نمودار X مرجع و مسیر X خروجی
93	(85-3) نمودار Z مرجع و مسیر Z خروجی
93	(86-3) نمودار زاویه pitch مرجع و زاویه pitch واقعی
94	(87-3) خطای تعقیب متغیر X
94	(88-3) خطای تعقیب متغیر Z
95	(89-3) خطای تعقیب متغیر $\theta$
95	(90-3) مسیر حرکت زیردریایی در صفحه XZ
96	(91-3) مقایسه سیگنال کنترل تولیدی توسط ADRC و سیگنال کنترلی مرجع
97	(92-3) متغیر مرجع X و متغیر خروجی X
98	(93-3) متغیر مرجع Z و متغیر خروجی Z
98	(94-3) زاویه مرجع pitch و متغیر خروجی pitch
99	(95-3) خطای متغیر X
99	(96-3) خطای متغیر $\theta$
100	(97-3) مسیر حرکت زیر دریایی در صفحه XZ
100	(98-3) مقایسه سیگنال کنترلی زاویه Elevator مرجع و سیگنال کنترلی تولید شده
101	توسط ADRC
101	(99-3) مقایسه سرعت مرجع پروانه‌ی اصلی و سیگنال سرعت تولید شده توسط ADRC
103	(100-3) متغیر مرجع X و متغیر خروجی X

## شکل

## صفحه

103	.....	(101-3) متغیر مرجع $y$ و متغیر خروجی $y$
104	.....	(102-3) زاویه مرجع $yaw$ و متغیر خروجی $yaw$
104	.....	(103-3) خطای متغیر $x$
105	.....	(104-3) خطای متغیر $y$
105	.....	(105-3) خطای متغیر $\psi$
106	.....	(106-3) مسیر حرکت زیر دریایی در صفحه $xy$

## فهرست جدول‌ها

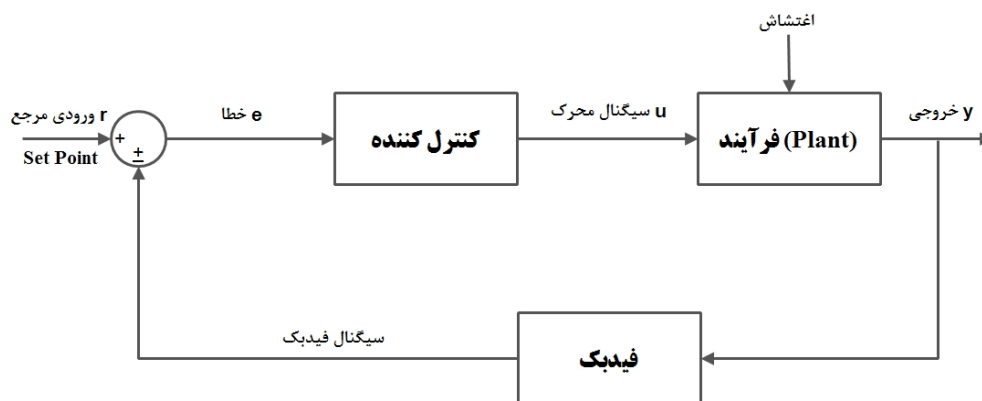
صفحه	جدول
37 .....	(1-3) پارامترهای ربات صنعتی 2 درجه آزادی.....
82 .....	(2-3) متغیرهای مختلف در 6 جهت حرکت برای زیردریایی .....

## فصل اول

مقدمه‌ای بر روش‌های کنترل کلاسیک و بررسی لزوم نیاز به تغییر روش

### 1-1 نیاز به یک سیستم کنترل، و کنترل فیدبک

تئوری کنترل یک عرصه تحقیقاتی بسیار گسترده است که در تمامی زمینه‌های مهندسی ورود پیدا کرده و می‌توان آن را به عنوان اولین دست آورد تکنیکی انقلاب صنعتی در نظر گرفت. مهمترین اصل تئوری کنترل (که در شکل 1-1 نیز نشان داده شده است)، اصلاح رفتار یک سیستم برای رسیدن به یک عملکرد مطلوب، بدون دخالت انسان است. هدف یک کنترل‌کننده حداقل کردن اختلاف بین خروجی واقعی سیستم  $y$  و ورودی مرجع  $r$  در سریعترین زمان ممکن است. شکل 1-1 بیان‌کننده ساختار کلی کنترل فیدبک است.



شکل 1-1: یک سیستم کنترل فیدبک

علم کنترل و به ویژه کنترل فیدبک نقش عمده‌ای در پیشبرد انقلاب صنعتی داشته است. امروزه، از کارخانجات گرفته تا اکتشافات فضایی، تصور یک سیستم مهندسی که مکانیزم کنترل فیدبک این چنینی نداشته باشد، بسیار مشکل است.

مفهوم، تئوری و کاربردهای کنترل فیدبک موضوع بسیار جذابی هم برای تئوریسین‌ها و هم برای تکنسین‌ها و مهندسان عملی کنترل بوده است. مقالات و مستندات علمی کنونی در زمینه کنترل فیدبک، حاصل تحقیقات بیش از 7 دهه است. هدف کنترل فیدبک، یک فرآیند فیزیکی است که فرض می‌شود یک رابطه علی- معلولی بین ورودی و خروجی آن برقرار است. در یک سیستم کنترل فیدبک، متغیر ورودی به گونه‌ای توسط کنترل-کننده تنظیم می‌شود که خروجی به شکل مطلوب تغییر کند. توجه به این نکته لازم است که در عمل، قانون کنترل، یعنی معادلاتی که چگونگی عملکرد کنترل‌کننده را تشریح می‌کنند، معمولاً به صورت تجربی تعیین می‌شوند [1]. اما تئوری کنترل مدرن برای استفاده و بکارگیری شیوه‌های مختلف خود به یک مدل ریاضی از سیستم فیزیکی نیاز دارد، و این آغاز مشکلات و پیچیدگی‌ها در این حوزه است.

## 2-1 روش‌های طراحی کنترل‌کننده متداول

با توجه به آنچه در منابع مختلف به آن اشاره شده است، از یک منظر روش‌های اصلی طراحی کنترل‌کننده را می‌توان به دو دسته عمده تقسیم نمود [2, 3]:

1- روش کنترل مدرن<sup>1</sup> (MCP)

2- روش طراحی تجربی مبتنی بر خطا<sup>2</sup> (EDP)

در ادامه، به تشریح هر کدام از روش‌های فوق پرداخته خواهد شد.

### 1-2-1 روش کنترل مدرن (MCP)

معادله زیر، معادله‌ی حرکت یک سیستم الکترومکانیکی است که بر اساس قانون حرکت نیوتن نوشته شده است:

$$\ddot{y} = f(y, \dot{y}, w, t) + bu \quad (1-1)$$

که در آن  $y$  موقعیت خروجی،  $b$  یک ثابت،  $u$  نیروی ورودی که عموماً توسط یک موتور الکتریکی تولید می‌شود، و  $w$  یک نیروی ورودی ناشناخته خارجی (که به نام اغتشاش خارجی شناخته می‌شود) است، و  $f(y, \dot{y}, w, t)$  نشان دهنده ترکیب اثرات دینامیک‌های داخلی و اغتشاشات خارجی، بر روی شتاب سیستم است.

در این طراحی مبتنی بر مدل فرض می‌شود که دینامیک‌های مطلوب حلقه بسته به صورت زیر است:

$$\dot{y} = g(y, \dot{y}) \quad (2-1)$$

در این صورت مراحل طراحی کنترل فیدبک به صورت زیر خواهد بود:

ابتدا باید یک تقریب ریاضی معادل معمولاً خطی و تغییرناپذیر با زمان و بدون اغتشاش از  $f(y, \dot{y}, w, t)$  یافت. برای این منظور از روش‌های مختلف خطی سازی و فرضیات مربوط به حذف اغتشاش استفاده می‌شود:



$$\bar{f}(y, \dot{y}) \approx f(y, \dot{y}, w, t) \quad (3-1)$$

این مراحل در طی فرآیند «مدل سازی» انجام می پذیرد. در گام بعد با توجه به روابط (2-1) و (3-1)، و ترکیب آنها با رابطه‌ی (1-1) قانون کنترل به صورت زیر بدست می آید:

$$u = \frac{-\bar{f}(y, \dot{y}) + g(y, \dot{y})}{b} \quad (4-1)$$

این رابطه باید هدف مطلوب را محقق سازد، که البته به واسطه فرض‌ها و تقریب‌های انجام گرفته ممکن است زیاد دقیق نباشد.

لذا مراحل کنترل مدرن را می توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- 1) ابتدا سیستم فیزیکی دقیقاً در یک مدل ریاضی تشریح می شود .
- 2) اهداف طراحی با یک مدل ریاضی دیگر بیان می شود. یعنی یا به فرمت معادلات دیفرانسیلی مشابه (2-1) و یا بعنوان یک تابع هزینه که قرار است مینیمم گردد طراحی می شود.
- 3) یک قانون کنترل به گونه‌ای که اهداف را محقق سازد ساخته می شود.
- 4) در نهایت پایداری سیستم کنترل اثبات می شود.

در این روش فرض کلیدی آن است که تابع تحلیلی  $\bar{f}(y, \dot{y})$  در تحقق فیزیکی به میزان کافی به  $f(y, \dot{y}, w, t)$  نزدیک باشد. اما در سیستم‌های صنعتی دنیای واقعی، بویژه سیستم‌های کنترل حرکت صنعتی مانند آنچه که در (1-1) تشریح شده است،  $f(y, \dot{y}, w, t)$  که بیان کننده دینامیک کلی سیستم است عموماً غیر خطی و متغیر با زمان است. در حقیقت هنگامی که رهیافت‌های مبتنی بر مدل در عمل مورد استفاده قرار می گیرند، اغلب مشاهده می شود که مهندسين بیشتر زمان خود را در بخش «مدل سازی» صرف می کنند نه در بخش طراحی کنترل. این امر شاید اصلی ترین دلیلی است که منجر به مطرح شدن این پرسش شده است که تئوری کنترل مدرن بیشتر در مورد مدل سازی است و کمتر وارد مقوله‌ی کنترل می شود. وابستگی روش کنترل مدرن به مدل ریاضی فرآیند، منجر به پیشرفت تحقیقات در زمینه‌هایی چون روش‌های کنترل تطبیقی، روش‌های مقاوم و تخمین گر/رویتگر اغتشاش شد.

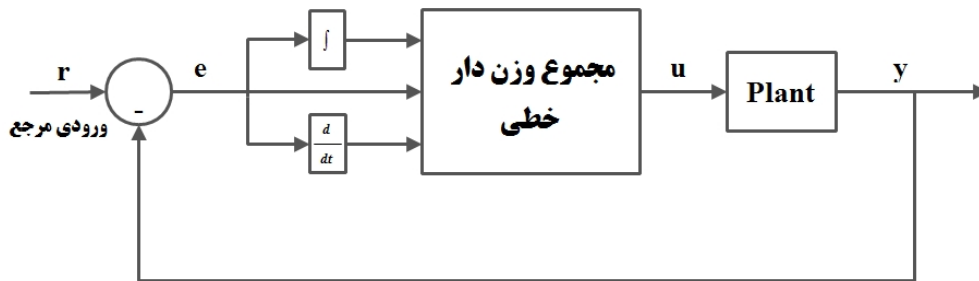
### 2-2-1 روش طراحی تجربی مبتنی بر خطا (EDP)

این مفهوم توسط مهندسان تجربی در کنترل صنعتی پایه ریزی شد. اساس این روش رسیدن به قانون کنترلی است که خطای بین متغیر واقعی فرآیند و سیگنال مرجع را حداقل نماید. بعبارت دیگر مهندسان در این روش طراحی، مبنای بر ردیابی خطا و اصلاح آن قرار دادند. فرض کنید  $r$  مسیر مطلوب برای خروجی است. مسئله طراحی کنترل به این صورت است که قانون کنترل بگونه‌ای ساخته شود که خطای ردیابی  $e = r - y$  تا حد امکان کوچک گردد. در نتیجه از آنجا که هدف کنترل از بین بردن خطا و یا دست کم، حداقل کردن خطا به میزان ممکن است، عملکرد کنترل باید بر اساس رفتار آن باشد. لذا قانون کنترل با بررسی خطای فعلی، مجموع مقادیر گذشته‌ی خطا، و پیش بینی روند تغییرات خطا در آینده‌ی نزدیک البته با ضرایب وزنی خاص برای هر ترم بدست می آید. یعنی قانون کنترل به صورت زیر است:

$$u = k_p e + k_I \int e + k_D \dot{e} \quad (5-1)$$

و عملکرد مطلوب با تنظیمات دستی پارامترهای  $k_P, k_I, k_D$  بدست می‌آید. رابطه‌ی فوق معرف کنترل کننده مشهور<sup>1</sup> PID است.

پیدایش و پیشرفت گسترده قانون کنترل PID، به بازه زمانی 1920-1940، در پاسخ به تقاضای صنایع اتوماتیک بویژه پس از جنگ جهانی دوم باز می‌گردد، و نقش آن در رشد انفجاری و سریع صنایع پس از جنگ غیر قابل انکار است. ماینورسکی<sup>2</sup>، کنترل کننده PID را در سال 1922 ارائه کرد [4]. در سال 1942 زیگلر و نیکولز<sup>3</sup> مجموعه‌ای از روش‌های تنظیم PID را ارائه کردند که تاکنون نیز مورد استفاده قرار گرفته است [5]. امروزه نیز هنوز تقاضا برای استفاده از PID در بخش‌های مختلف همه صنایع بالاست. به نظر می‌رسد که PID بیشتر از هر تکنولوژی دیگری بواسطه‌ی مزایایش در عرصه صنعت دوام آورده است، و هنوز هم انتخاب اول در بیش از 90% کاربردهای کنترل صنعتی کنونی است. حتی زمانی که اطلاعات کمی در مورد دینامیک-های فرآیند در دسترس باشد، می‌توان PID را بکار گرفت. توپولوژی کنترل PID در شکل 1-2 نشان داده شده است.



شکل 1-2: توپولوژی کنترل PID

برای از دست ندادن سادگی از معادله‌ی سیستم مرتبه دوم نمونه‌ی زیر به منظور تشریح روند طراحی PID استفاده خواهد شد [6]:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = a_1 x_1 + a_2 x_2 + bu \\ y = x_1 \end{cases} \quad (6-1)$$

با توجه به شکل 1-2 و با فرض:

$$e = r - y = r - x_1 = e_1, \dot{e}_1 = -\dot{x}_1 = e_2, \ddot{e}_1 = -\ddot{x}_1$$

دینامیک‌های خطا به صورت زیر است:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 \\ \dot{e}_2 = a_1 e_1 + a_2 e_2 - a_1 r - bu \end{cases} \quad (7-1)$$

<sup>1</sup>Proportionally-Integrally-Derivative

<sup>2</sup>N.Minorsky

<sup>3</sup>J. Ziegler and N. Nichols

با تعریف:

$$e_0 = \int e$$

خواهیم داشت:

$$\dot{e}_0 = e = e_1$$

و رابطه‌ی (5-1) به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$u = k_0 e_0 + k_1 e_1 + k_2 e_2 \quad (8-1)$$

با توجه به رابطه‌ی (7-1) می‌توان معادلات دینامیک خطا را به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\begin{cases} \dot{e}_0 = e_1 \\ \dot{e}_1 = e_2 \\ \dot{e}_2 = -bk_0 \left( e_0 + \frac{a_1}{bk_0} r \right) + (a_1 - bk_1)e_1 + (a_2 - bk_2)e_2 \end{cases} \quad (9-1)$$

که با توجه به شرایط پایداری روث-هرویتز، پایدار مجانبی است اگر:

$$\begin{cases} bk_0 > 0, (bk_1 - a_1) > 0, (bk_2 - a_2) > 0 \\ (bk_1 - a_1)(bk_2 - a_2) > bk_0 \end{cases} \quad (10-1)$$

با انتخاب مناسب ضرایب  $k_1, k_2, k_3$  هدف مطلوب طراحی که همان  $x_1 \rightarrow r$  یا  $e_1 = e = r - x_1 \rightarrow 0$  است، حاصل می‌شود. اگر مدل ریاضی سیستم در دسترس باشد، ضرایب PID را می‌توان به صورت تحلیلی بدست آورد و اگر مدل نباشد، برای داشتن ویژگی‌های مطلوب ضرایب به روش سعی و خطا محاسبه می‌شوند. اگر چه این راحتی، و سادگی تنظیمات یکی از دلایل اصلی محبوبیت PID است، اما همین موارد از جمله محدودیت‌های اساسی آن نیز هست، که این موضوع در ضعف عملکرد این سیستم کنترل در برآورده کردن خواسته‌های متنوعی که دنیای صنعتی امروز از آن انتظار دارد، کاملاً مشهود است. حال سوال این است که چه چیزی را می‌توان جایگزین این مکانیزم کنترل بسیار موفق نمود که در عین نگه داشتن تمامی مزایا، محدودیت‌های آن را نداشته باشد؟ پاسخ این سوال در درک ما از ویژگی‌های PID و همچنین چالش‌های پیش رو، نهفته است. چنین درکی است که ما را به سمت پیشنهادهای برای بهبود چارچوب PID، و شاید یک نوآوری جدید در جهت یافتن نسل جدیدی از راه حل‌های کنترلی هدایت می‌کند.

### 3-1 محدودیت‌های روش‌های طراحی کنترل تئوری

فاصله‌ی بین تئوری و عمل در علم کنترل، یک بحث سابقه دار میان دو طیف مهندسیین آکادمیک و مهندسیین تجربی و عملی بوده است [1]. اما دلیل این فاصله چیست؟ به منظور رسیدن به یک پاسخ مناسب، در این بخش به بررسی محدودیت‌ها و چالش‌هایی می‌پردازیم که روش‌های طراحی ارائه شده در بخش قبل با آنها مواجه است.

### 1-3-1 محدودیت‌های کنترل مدرن

تئوری کنترل کلاسیک، بویژه روش پاسخ فرکانسی دید بسیار مفیدی از چگونگی و چرایی عملکرد سیستم کنترل فیدبک، و چگونگی بهبود و ارتقای آن به مهندسان کنترل می‌دهد. تئوری کنترل مدرن از فیلتر کالمن تا کنترل  $H_\infty$ ، در 40 سال اخیر پیشرفت قابل ملاحظه‌ای در زمینه ریاضیات تئوری کنترل نشان داده است. اما سطح ریاضیاتی که برای درک آن مورد نیاز است، فرض‌های خطی بودن و تغییرناپذیری با زمان، و وابستگی به مدل ریاضی سیستم‌های فیزیکی، برخی از فاکتورهایی است که استفاده از آن توسط متخصصین و تکنیسین‌های کنترل را محدود ساخته است.

در طی پیشرفت تئوری کنترل مدرن این مسئله مورد توجه قرار گرفت که دنیای واقعی بسیار پیچیده است و مدل‌های ریاضی که برای تشریح دینامیک کامل سیستم‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، غیر دقیق هستند. و این ناشی از این حقیقت است که سیستم‌های دنیای واقعی غیرخطی هستند و به شدت تحت تاثیر نویزهای محیطی قرار دارند. و این زمینه ساز بروز عرصه «مدل‌سازی و شناسایی سیستم‌ها» شد. محققان تمرکز خود را بیش از پیش بر مدل‌سازی قرار داده و راه‌حل‌ها و پاسخ‌های متنوعی را برای این مسئله ارائه کردند که می‌توان آنها را در مستندات مختلف مشاهده کرد. اغتشاشات و عدم قطعیت‌های شدید محیطی مانعی بزرگ در استفاده از روش‌های ریاضی کلاسیک کنترل مدرن است، که نیاز به دقت قابل قبولی برای مدل دارد. کنترل مدرن برای مقابله با این ناشناخته‌ها از ابزار زیر کمک گرفت [۳،۷]:

(1) کنترل مقاوم: یک روش کنترل که نیاز به یک سری اطلاعات اولیه در مورد دینامیک‌های سیستم و حدود عدم قطعیت‌ها دارد. این روش که بر اساس راه حل کنترل بهینه است، سیستم را بصورت LTI با دینامیک‌های شناخته شده فرض می‌کند و محدوده‌ی روی نامعینی‌ها را درحوزه فرکانس، معلوم در نظر می‌گیرد. در این روش قانون کنترل تغییر نمی‌کند.

(2) کنترل تطبیقی: یک روش کنترل که به اطلاعات اولیه در مورد دینامیک‌های سیستم و حدود عدم قطعیت‌ها نیاز ندارد. در این روش برای مقابله با ناشناخته‌ها و تغییرات در دینامیک‌های سیستم، بهره‌های کنترل‌کننده با استفاده از یک قانون تطبیق خاص تنظیم می‌شود، و این قانون در طی فرآیند کنترل خود را بروز رسانی می‌کند.

برای رسیدن به نتیجه مطلوب‌تر از ترکیب این دو روش به نام کنترل مقاوم تطبیقی نیز استفاده شده است. در این میان پیشرفت‌های قابل توجهی نیز در زمینه برنامه نویسی پویا توسط بلمن<sup>1</sup>، اصل پونتر یاگین توسط پونتریاگین<sup>2</sup> و تئوری سیستم خطی توسط کالمن<sup>3</sup> انجام شد. در نتیجه تئوری کنترل که با نام «کنترل اتوماتیک» آغاز شده بود، به تدریج شروع به حرکت به سمت فاز جدیدی تحت نام «تئوری سیستم‌ها» نمود.

اما مشکل همچنان پا برجا بود. در کنترل مدرن فرض بر این است که می‌توان از مدل ریاضی سیستم برای تشریح موثر دینامیک‌های سیستم استفاده کرد. لذا قوانین کنترل از این زیربنای ریاضی قابل استنتاج است. عملکرد و دقت کنترل‌کننده طراحی شده، به مدل ریاضی که سیستم را تشریح می‌کند بستگی دارد. لذا با وجود پیشرفت‌هایی که بواسطه این روش‌ها حاصل شد، کنترل مقاوم و تطبیقی به عنوان راه حل‌هایی برای مسئله‌ی حذف اغتشاشات و مقابله با نامعینی‌ها، هنوز هم زیاد از منبع اصلیشان که همان تئوری کنترل

<sup>1</sup>Richard E. Bellmann

<sup>2</sup>Lev S. Pontryagin

<sup>3</sup>Rudolf E. Kalman