



ترجمه و تأليف:  
دکتر حمید رضا تقی راد



پیشگفتار

PID

PID

PID

PLC

PID

PLC

PLC

STEP 5

PID

۳۴	فهرست پیشگفتار
۴۱	فهرست
۴۸	فصل اول: اتوماسیون توسط سیستم‌های نیوماتیک
۵۵	۱- مقدمه
۶۲	۲- اجزاء سیستم نیوماتیک
	۳- کنترل وضعیت جکهای نیوماتیک
	۴- کنترل حرکت ترتیبی چند جک نیوماتیک
	۵- مدارهای موازی
	۶- جمع بندی
	مسائل
	مراجع
	فصل دوم: کنترل کننده های منطقی برنامه پذیر PLC
۲-۱	۱- مقدمه
۲-۲	۲- سخت افزار PLC
۲-۳	۳- برنامه نویسی PLC
۲-۴	۴- مثالهای برنامه نویسی
	OR " " AND " "
	AR
	D-OFF
	D-OFF
۲-۵	۵- مثالهای کاربردی
	ON/OFF
ج	ج
۵	۵
۶	۶
۷	۷
۸	۸
۹	۹
۱۰	۱۰
۱۱	۱۱
۱۲	۱۲
۱۳	۱۳
۱۴	۱۴
۱۵	۱۵
۱۶	۱۶
۱۷	۱۷
۱۸	۱۸
۱۹	۱۹
۲۰	۲۰
۲۱	۲۱
۲۲	۲۲
۲۳	۲۳
۲۴	۲۴
۲۵	۲۵
۲۶	۲۶
۲۷	۲۷
۲۸	۲۸
۲۹	۲۹
۳۰	۳۰

۱۴۵	..... ۳-۵- مدلسازی فرآیندهای حرارتی
	..... Conduction
	..... Convection
	.....
	.....
۱۵۲	..... ۳-۶- جمع بندی
۱۵۳	..... مسائل
۱۶۹	..... مراجع
۱۷۲	..... ۳-۷- فصل چهارم: روش‌های شناسائی فرآیند
۱۷۲	..... ۴-۱- مقدمه
۱۷۳	..... ۴-۲- مدل‌های دینامیکی
۱۷۵	..... ۴-۳- روش‌های پاسخ پله
	.....
	.....
	.....
	.....
۱۸۵	..... ۴-۴- روش‌های پاسخ فرکانسی
	..... Z.N.
	.....
۱۸۹	..... ۴-۵- روش‌های شناسایی پارامتریک
	..... L.S.
	..... L.S.
	..... (
	..... (

---

---

۲۵۸	فارسی - انگلیسی
۲۶۴	انگلیسی - فارسی
۲۷۰	فهرست راهنمای

---

---

۱۹۴	۴- خلاصه و جمع بندی
۱۹۶	مسائل
۱۹۹	مراجع
۲۰۲	فصل پنجم: طراحی، تنظیم و پیاده سازی کنترل کننده <i>PID</i>
۲۰۲	۱- تعاریف و مفاهیم
	..... PID
۲۰۷	۲- در چه فرآیندهایی کنترل کننده <i>PID</i> کافی است؟
۲۰۸	۳- پیاده سازی کنترل کننده ها
۲۲۷	۴- طراحی کنترل کننده <i>PID</i>
	..... Ziegler-Nichols
۲۴۶	۵- جمع شوندگی انتگرال گیر
۲۵۰	۶- کنترل سیستمهای با تأخیر
۲۵۳	مسائل
۲۵۶	مراجع
۲۵۸	واژه نامه

## **فصل اول**

**اتوماسیون توسط  
سیستمهای نیوماتیک**

---

---

## فصل اول: اتوماسیون توسط سیستم‌های نیوماتیک

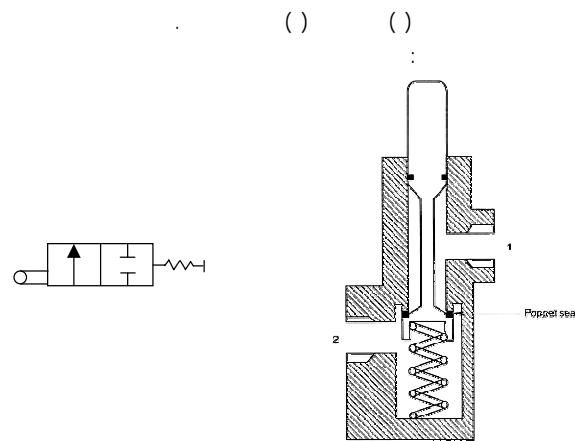
۱-۱- مقدمه

(Pneumos) (Pneumatic)

۲-۱- اجزاء سیستم نیوماتیک

۱-۲-۱- انواع شیرهای نیوماتیک

(directional valve)



شکل ۲-۱ شیر کنترل وضعیت  $2 \times 2$  و شماتیک نمایش آن در مدارهای نیوماتیک

ب) شیر ۳×۲ (سه ورودی - خروجی، دو وضعیتی)

(Puppet) (Spool)  
( ) ( ) Spool (N.C.)

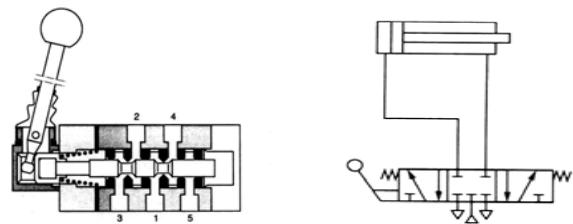
پ) شیر کنترل وضعیت  $4 \times 3$  یا  $4 \times 2$

( )  
( ) ( ) ( ) ( ) . ( ) ( ) ( )

الف) شیر ۲×۲ (دو در دو به معنای دو پورت ورودی-خروجی و دو وضعیتی)

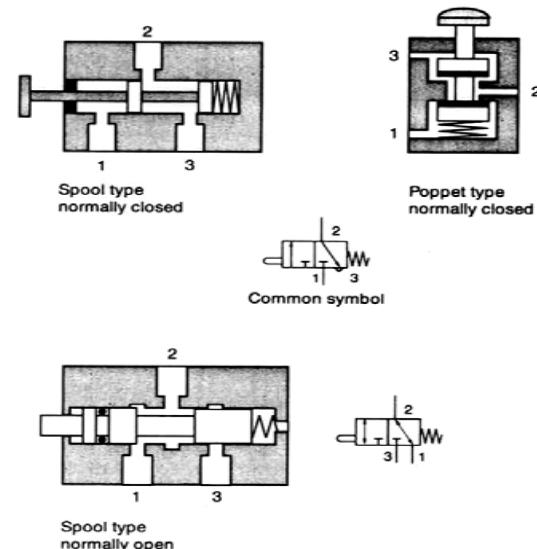
ت) شیر کنترل وضعیت  $5 \times 2$  یا  $5 \times 3$

( )

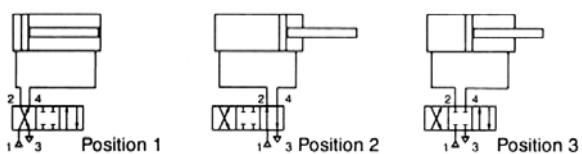


شکل ۱-۴ یک نوع شیر کنترل وضعیت  $5 \times 3$  و نحوه نمایش سمبلیک آن در نقشه های نیوماتیکی

۲-۱-۲- نحوه فعال سازی شیرهای کنترلی

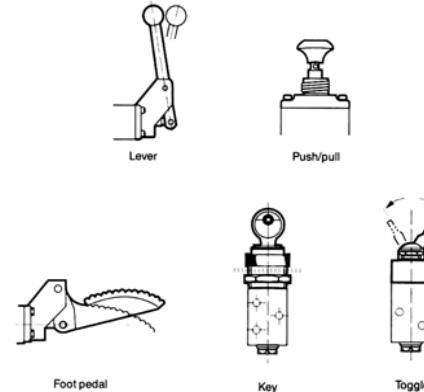


شکل ۱-۳ شیر کنترل وضعیت  $2 \times 2$



شکل ۱-۳ یک نوع شیر کنترل وضعیت  $4 \times 3$  و نحوه نمایش سمبلیک آن در نقشه های نیوماتیک

الف) تحریک دستی



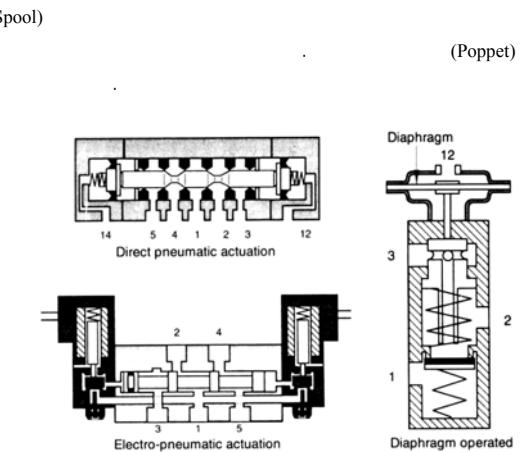
شکل ۱-۵ انواع متدھای تحریک دستی شیرهای کنترلی

ب) تحریک مکانیکی



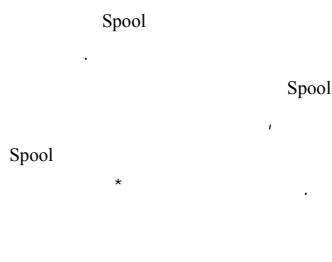
شکل ۱-۶ انواع متدھای تحریک مکانیکی شیرهای کنترلی

پ) تحریک نیوماتیکی یا پیلوت



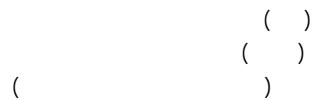
شکل ۱-۷ انواع متدھای تحریک نیوماتیکی یا پیلوت شیرهای کنترل

ت) تحریک الکتریکی

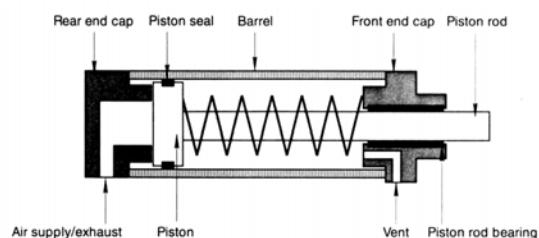


شکل ۱-۸ اجزای شیرهای کنترلی

۱-۲-۳- عملگرهای نیوماتیکی

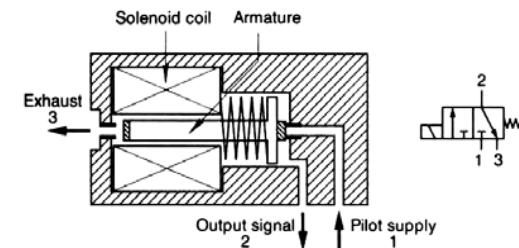


الف) جکهای یک محوره - یک طرفه



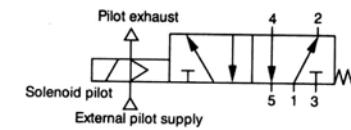
شکل ۱-۱۰ یک نوع جک یک محوره - یک جهت

ب) جکهای دیافراگمی یک طرفه

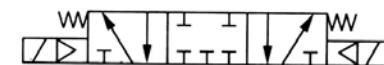


شکل ۱-۸ یک نوع شیر  $3 \times 2$  که از تحریک الکترو-نیوماتیک استفاده می کند

Spool



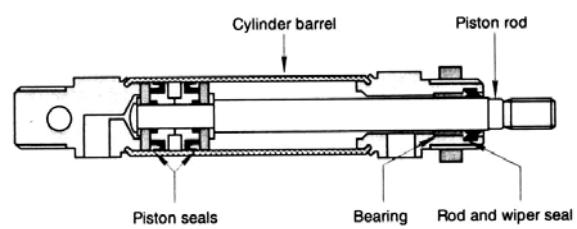
(a)



(b)

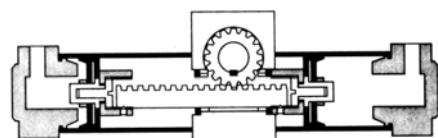
شکل ۱-۹ نمایش مداری شیرهای تحریک شونده الکترو-نیوماتیکی

ت) جکهای دو طرفه

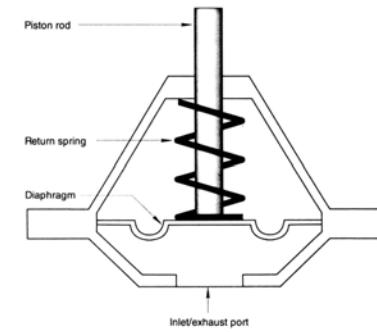


شکل ۱-۱۳ یک نوع عملگر جک دو طرفه

ث) محرکهای نیم دورانی (مولدهای گشتاور)

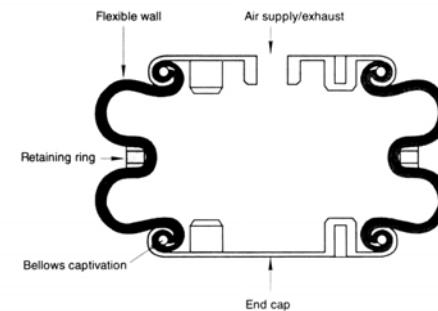
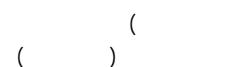


شکل ۱-۱۴ یک نوع محرک نیمه دورانی یا مولد گشتاور



شکل ۱-۱۱ یک نوع جک دیافراگمی یک طرف

(پ) بالشتک هوائی (Air Bellows)



شکل ۱-۱۲ یک نوع عملگر بالشتک هوائی

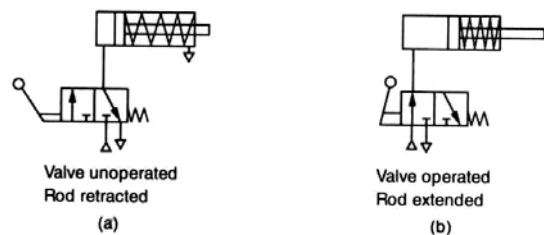
Type	Displacement motors			
Characteristic	Radial piston motor	Linked piston motor	Vane motor	Gear motor
				
Max. operating pressure (bar)	10	8	8	10
Rated power (kW)	1.5 to 30	1 to 6	0.1 to 18	0.5 to 5
Max. speed (rpm)	6000	5000	30000	15000
Specific air consumption (l/kJ)	15 to 23	20 to 25	20 to 50	30 to 50
Lubrication	Sump and/or with compressed air	Sump and/or with compressed air	Compressed air	Compressed air

شکل ۱-۱۶ جدول مقایسه موتورهای نیوماتیک

### ۱-۳- کنترل وضعیت جکهای نیوماتیک

#### ۱-۳-۱- کنترل حرکت یک جک یک طرفه

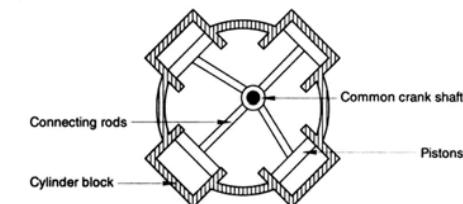
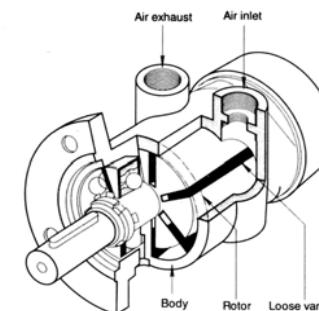
(N.C) \*

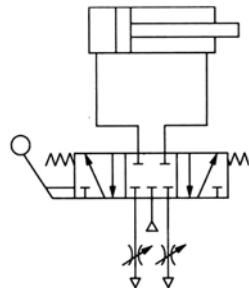


شکل ۱-۱۷ کنترل حرکت یک جک یک طرفه

### ج) محرکهای دورانی

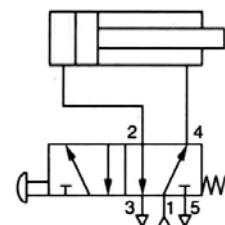
(Vane Motor)



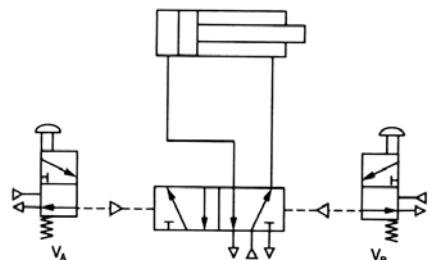


شکل ۱-۱۹- کنترل حرکت یک جک دوطرفه با شیر ۳×۳

۱-۳-۲- کنترل حرکت یک جک دوطرفه



شکل ۱-۱۸- کنترل حرکت یک جک دو طرفه توسط شیر ۳×۲



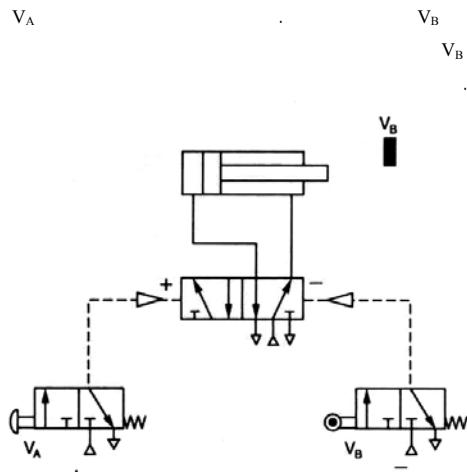
شکل ۱-۲۰- عملکرد یک جک دوطرفه توسط شیرهای کنترل و فرمان پیلوت

۱-۳-۳- کنترل شیر با استفاده از فشار پیلوت

V<sub>B</sub>  
V<sub>B</sub>

V<sub>B</sub>

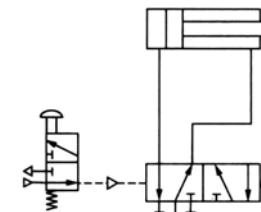
V<sub>B</sub>



شکل ۱-۲۲-۲ عملکرد یک جک دوطرفه

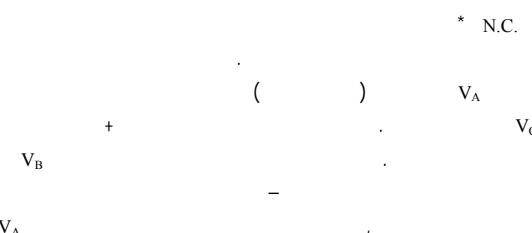
( ) V<sub>A</sub>  
V<sub>B</sub>  
V<sub>A</sub>, V<sub>B</sub>

Trapped Signal



شکل ۱-۲۱-۱ عملکرد یک جک دوطرفه توسط یک شیر کنترل فرمان پیلوت

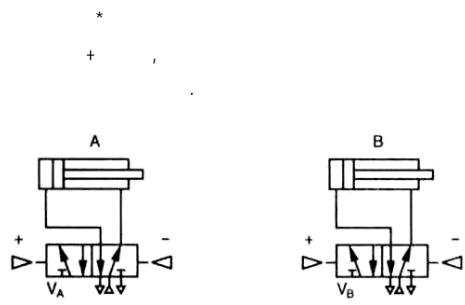
۱-۳-۴- کنترل اتوماتیک عملیات



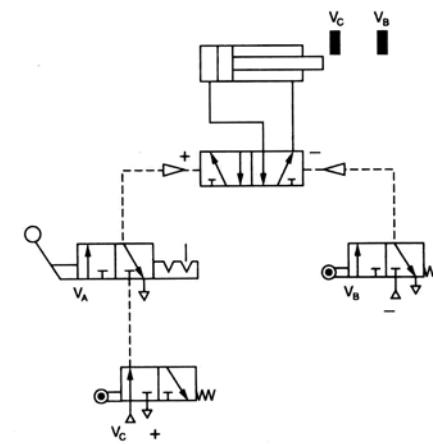
PLC

(Pneumatic Trip valve)

A+B+A-B-repeat

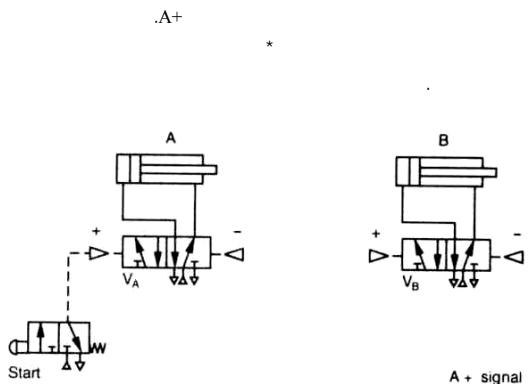


شکل ۱-۲۴ مرحله اول، انتخاب شیرهای اصلی

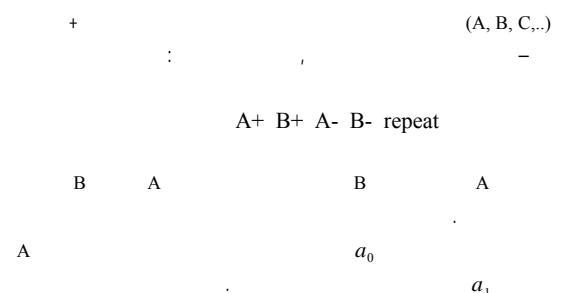


شکل ۱-۲۳ عملکرد اتوماتیک یک جک دوطرفه توسط دو شیر فرمان

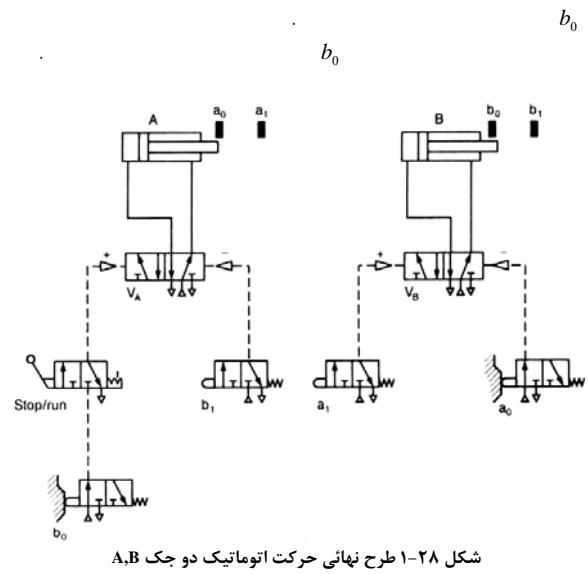
۴-۱- کنترل حرکت ترتیبی چند جک نیوماتیک



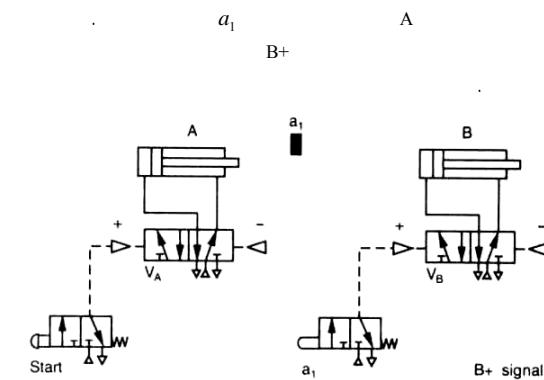
شکل ۱-۲۵ مرحله دوم، طراحی حرکت اول



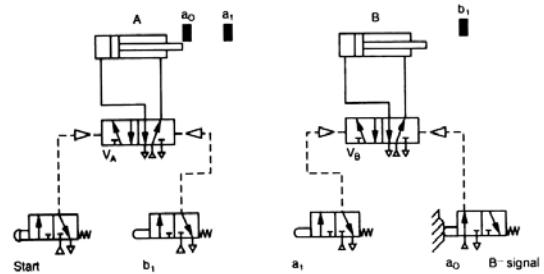
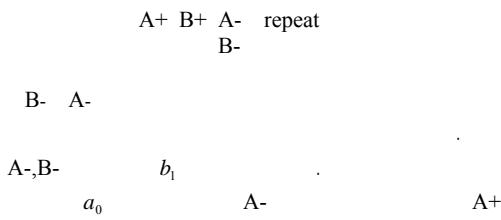
۱-۴-۱- حرکت ترتیبی دو جک



شکل ۱-۲۸ طرح نهائی حرکت اتوماتیک دو جک A,B



شکل ۱-۲۶ مرحله سوم استفاده از شیر پیلوت a<sub>1</sub> در حرکت B+



شکل ۱-۲۷ اجرای مرحله چهارم قرارگیری a<sub>0</sub>, b<sub>1</sub> در مسیر مدار فرمان

۱-۵-۱- طراحی مدار موازی

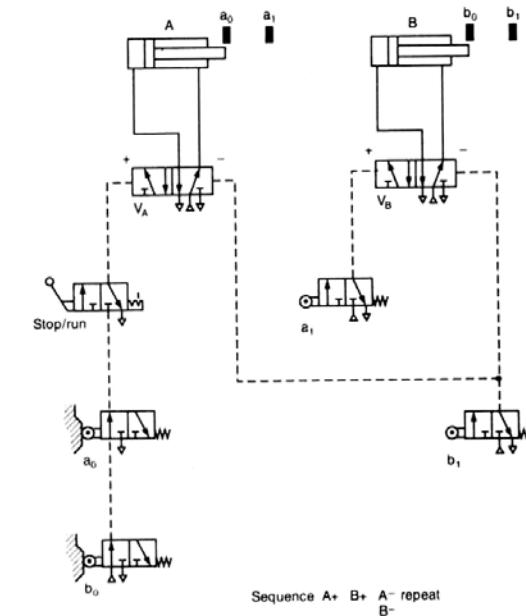
A+ B+ A- B- repeat

A+ B+ /B- A-  
GI GII

$A+B+$  |  $A-C+D+$  |  $D-C-B-$   
I II III

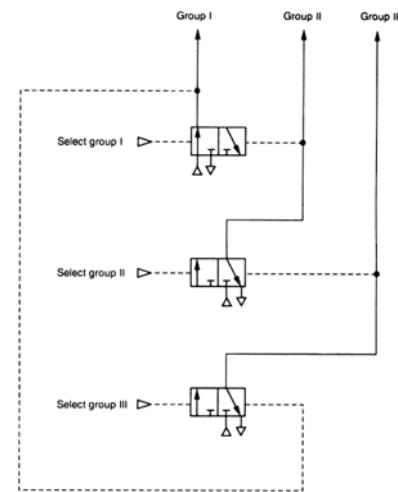
$A+B+$  |  $A-C+D+$  |  $D-C-B-$   
I II I

GII GI

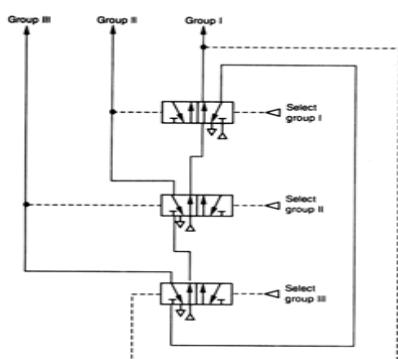


شکل ۱-۲۹ ۱ طرح سیستم نیوماتیک لازم جهت ایجاد دو حرکت همزمان در یک سیکل

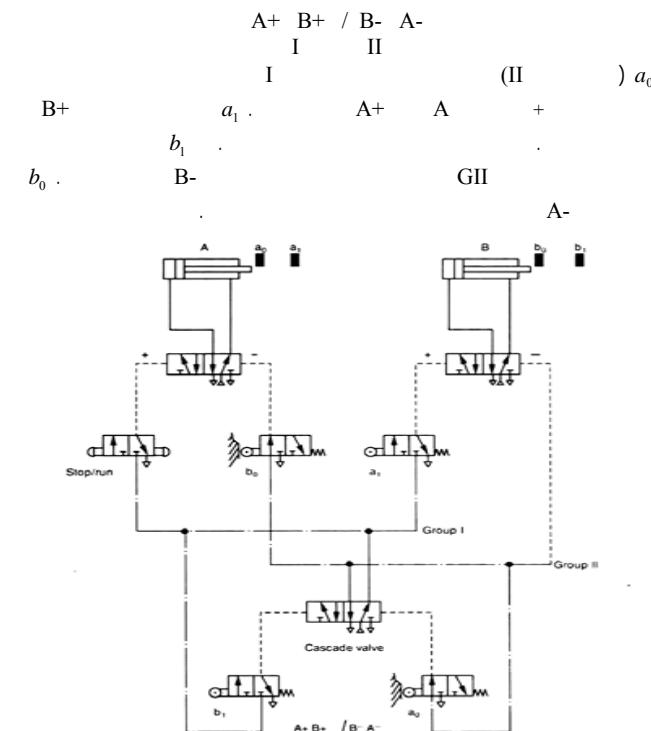
۱-۵- مدارهای موازی



شکل ۱-۳۱ استفاده از سه شیر ۳×۲ برای ایجاد سه خط موازی



شکل ۱-۳۱-۱ استفاده از سه عدد شیر ۵×۲ برای ایجاد سه خط موازی

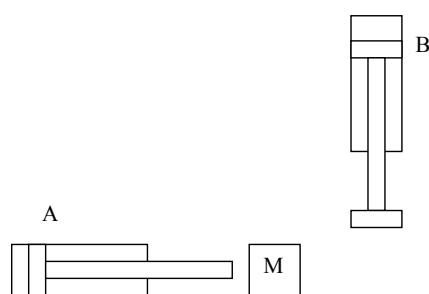
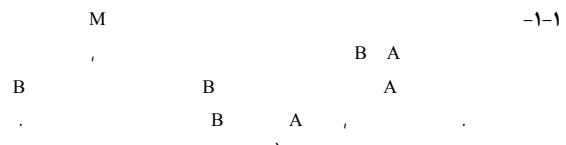


شکل ۱-۳۰ مدار موازی جهت ایجاد ترتیب حرکتی A+B+B-A-

۱-۵-۲- ترتیب طراحی شیرهای مدار موازی

GII, GI  
GIII, GII, GI

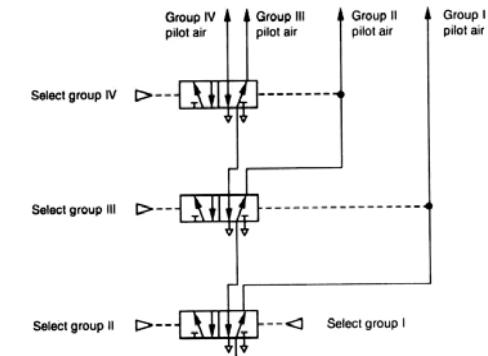
## مسائل



-1-2



A+ B+ C+ A- B- C- Repeat



شکل ۱-۳۲- استفاده از سه عدد شیر ۵×۲ برای ایجاد چهار خط موازی

۱-۶- جمع بندی

---

---

## مراجع

- [1] Barber, Antony, *Pneumatic handbook*, 8th ed. Elsevier Science, 1997.
- [2] Bolton, W, *Pneumatic and hydraulic system*, Butterworth Heinemann, 1997.
- [3] Fleischer, Henry, *Manual of pneumatic systems optimization*, McGraw-Hill, 1995.
- [4] Goodman, Robert B., *A primer on pneumatic valves and controls*, Krieger Pub., 1997.
- [5] Hehn, Anton H., *Fluid power troubleshooting*, 2nd ed, Marcel Dekker, 1995.
- [6] Majumdar, S. R., *Pneumatic systems : principles and maintenance*, McGraw-Hill, 1996
- [7] Mills, David, *Pneumatic conveying systems : design, selection, operation and troubleshooting with particular reference to pulverized fuel ash*, Trans Tech Publications, 2001
- [8] Paterson, E. B., *Pneumatics in industry: System design and vibration isolation*, McGraw-Hill, 1984.
- [9] Peterson, E.B., *Pneumatics in Industry: system design and vibration isolation*, McGraw-Hill, 1984.
- [9] Pinches, Michael J. and Brian J. Callear. *Power pneumatics*, Prentice Hall, 1997.
- [10] Yeaple, Franklin D., *Fluid power design handbook*, 3rd ed., Marcel Dekker, 1996

(Trapped Signal)

MG-20 : -1-¶  
C B,A  
B+ A+ B- C+ C- Repeat  
A- Cascade -1-¤  
Start/Stop  
A ) ON/OFF ( : -1-¤  
A, B, C, D  
A + B + A - C + C - D - D + repeat  
B - :  
B-,C- start/stop (Cascade)

## فصل دوم

کنترل کننده های  
منطقی برنامه پذیر (PLC)

---

---

## فصل دوم: کنترل کننده های منطقی برنامه پذیر PLC

PLC

PLC

Siemens

PLC

STEP5

-۱-۲- مقدمه

۱-۱-۲- اصول PLC

PLC

PLC

PLC

PLC

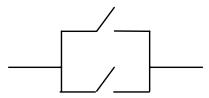
PLC

---

---



A	B	$A \cdot B$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1



A	B	$A + B$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

#### A) Commutative Laws

$$A + B = B + A$$

$$A \cdot B = B \cdot A$$

#### B) Associated Laws

$$A + (B + C) = (A + B) + C$$

$$A \cdot (B \cdot C) = (A \cdot B) \cdot C$$

#### C) Distributive Laws

$$A \cdot (B + C) = A \cdot B + A \cdot C$$

$$A + (B \cdot C) = (A + B) \cdot (A + C)$$

#### D) Absorption Laws

$$A \cdot (A + B) = A$$

$$A + (A \cdot B) = A$$

#### E) Involution

$$\overline{\overline{A}} = A$$

---

---

PLC

OFF	:	ON	:
Shut	:	Open	:
False	:	True	:

(Proximity switch Limit switch)

(OFF)

(ON)

(Boolean)

**A=1****A=0**

A

(AND)

(N.C.)

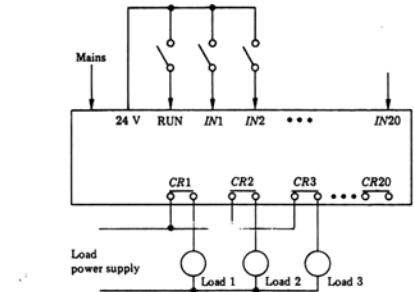
(N.O.)

 $\bar{A}$ 

(OR)

(OR) " " (AND) " "

A	$\bar{A}$
1	0
0	1



شکل ۱-۲: نمایش شماتیک کلی PLC

F) Inversion Laws (De Morgan's Theorem)

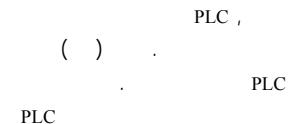
$$\overline{(A + B)} = \overline{A} \cdot \overline{B}$$

$$\overline{(A \cdot B)} = \overline{A} + \overline{B}$$

$\overline{A + B}$  NOR  $\overline{A \cdot B}$

NAND

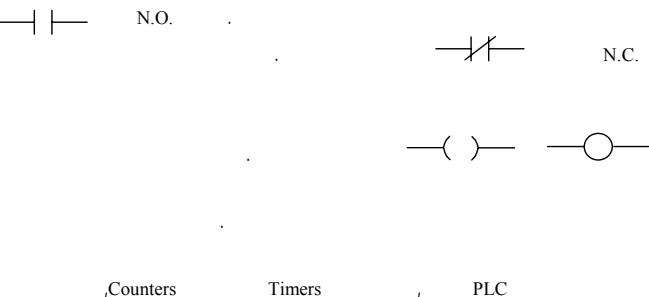
۲-۱-۲- شماتیک کلی



N.C N.O PLC PLC PLC

PLC PLC PLC

IN5 PLC PLC  
CR7 ( ) (Control Relay 7)



Statement List (STL)

STL

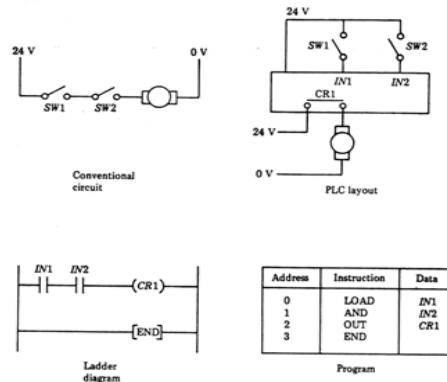
PLC

STL

۲-۱-۳- نمایش منطق به صورت نرده‌بازی

PLC

PLC



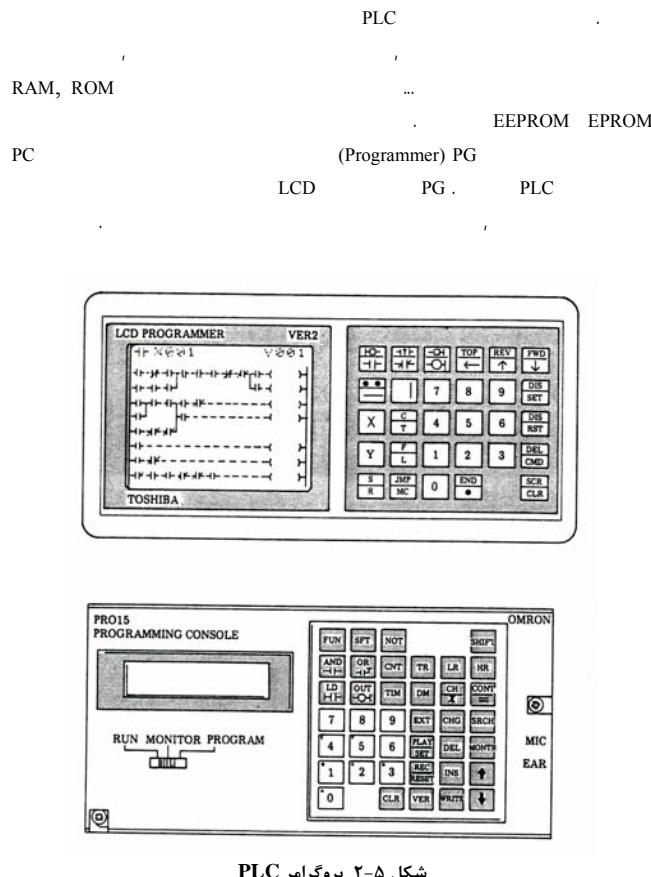
شکل ۲-۲ پیاده سازی مدار سری توسط PLC

	Load (LD)
	Load Not (LDN)
" "	AND
" "	AND NOT
" "	OR
" "	OR NOT
	OUT

STL

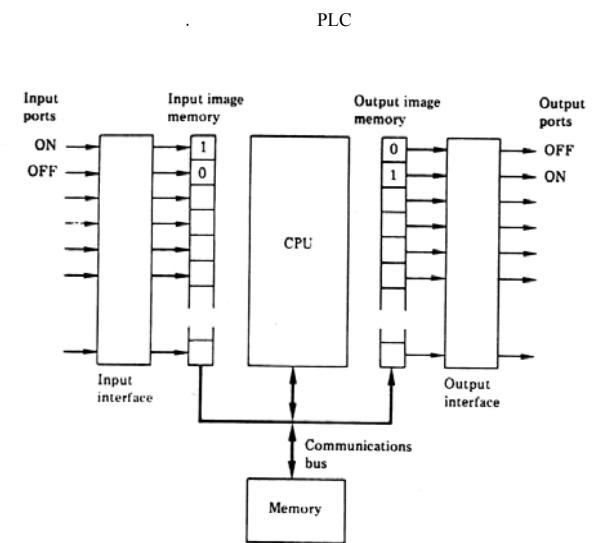


شکل ۳-۲ پیاده سازی مدار موازی توسط PLC



۲-۲ سخت افزار PLC

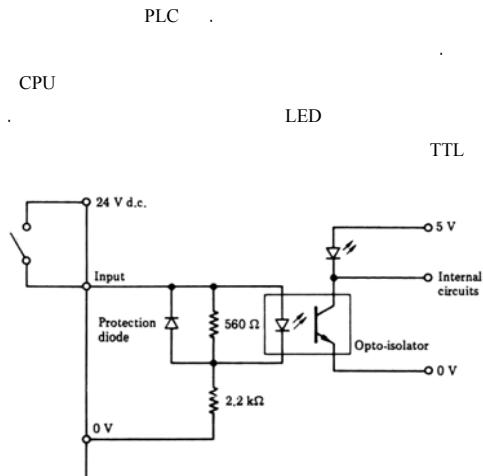
۲-۲-۱ مقدمه



۲-۴ سخت افزار PLC



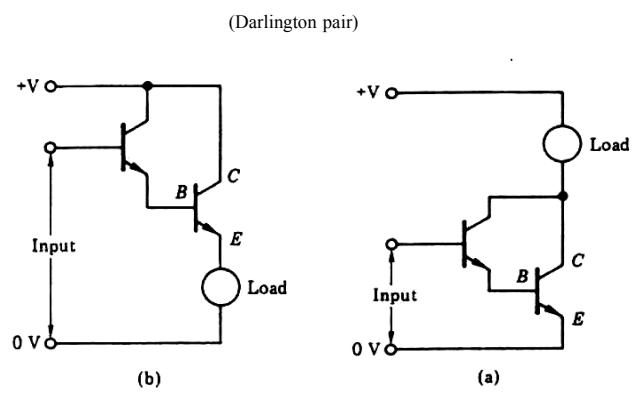
۲-۲-۲- ورودیهای دیجیتال ایزوله نوری



شکل ۲-۶ مدار واسط ایزولاتور نوری

۲-۲-۳- رله های خروجی



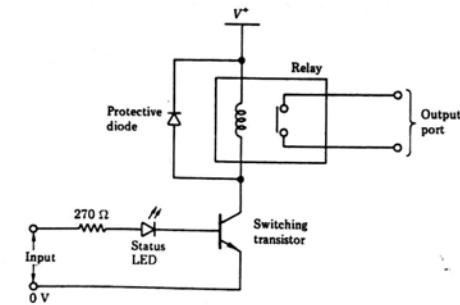


## شکل ۲-۹ طبقهٔ خروجی دارلینگتون

(b)

(a)

## ۵-۲-۲- خروجی ترایاک Triac



شکل ۷-۲ طبقه خروجی رله در PLC

## ۴-۲-۲- خروجیهای ترانزیستوری

AC

(ZCC)

شکل ۲-۸ سوئیچ ترانزیستوری NPN

**۲-۳- برنامه نویسی PLC**

**۱-۲-۳- برنامه نویسی نردنی - معرفی المانهای اصلی برنامه نویسی**

PLC

PLC

STL

PLC

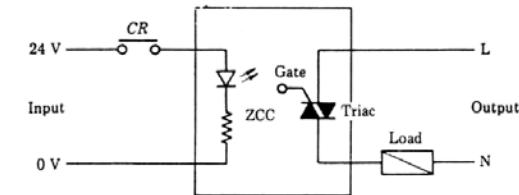
	IN
	CR
	AR
	T
	C

جدول ۲-۱ نمادهای مورد استفاده عمومی در برنامه نویسی نردنی

**(الف) خروجی‌های متعدد**

CR1,CR2,CR3

( ) IN1,IN2,IN3



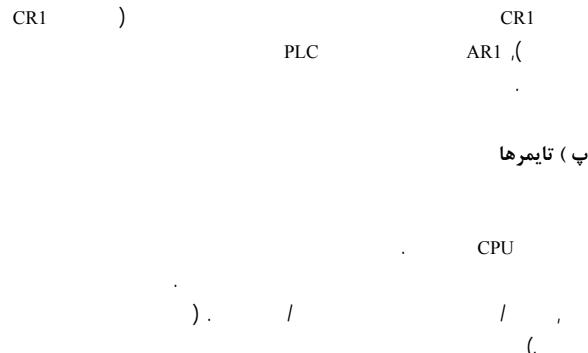
شکل ۲-۱۰ طبقه خروجی ترایاک

**۶-۲-۲- پورتهای آنالوگ**

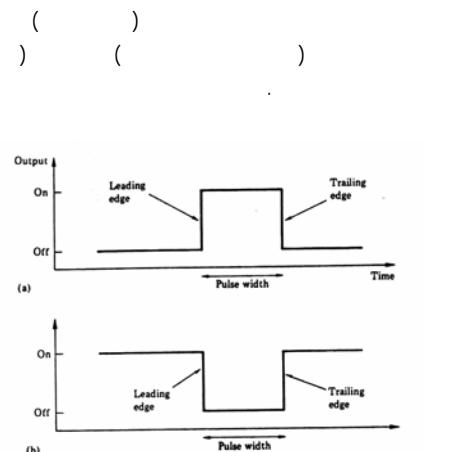
LVDT  
A/D  
PLC

A/D

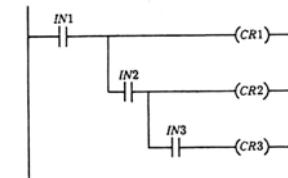
PLC



پ) تایمرهای پالسی



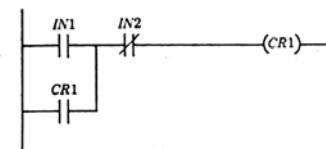
شکل ۲-۱۴ دو نوع مختلف از تایمرهای پالسی (a) جهت مثبت (b) جهت منفی



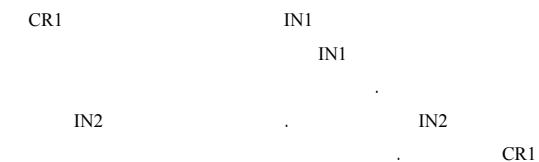
شکل ۲-۱۰ خروجیهای متعدد

ب) لچ کردن کنتاکت ورودی (Latching)

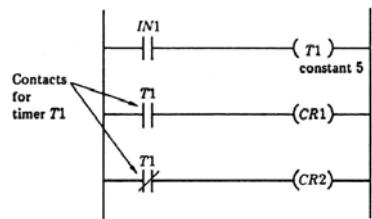
(Push-button)



شکل ۲-۱۱ مدار لچ

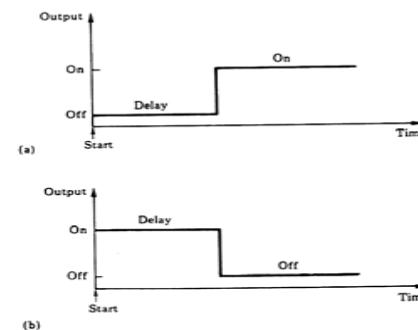


Delay ON, Default



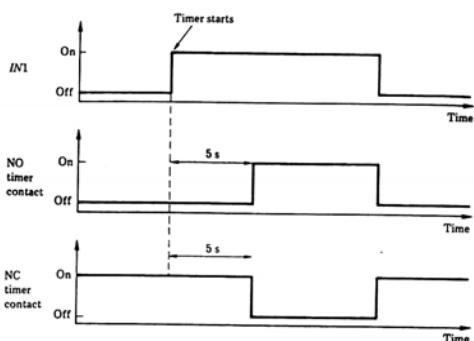
شکل ۲-۱۶ مدار تایمر در دیاگرام نزدیکی

پ ۲) تایمروشن ساز با تأخیر (Delay On)

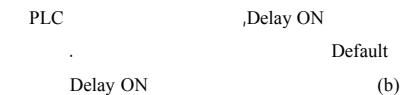


شکل ۲-۱۵ تایمراهی روشن ساز با تأخیر و خاموش شونده با تأخیر

پ ۳) تایم خاموش شونده با تأخیر (Delay OFF)

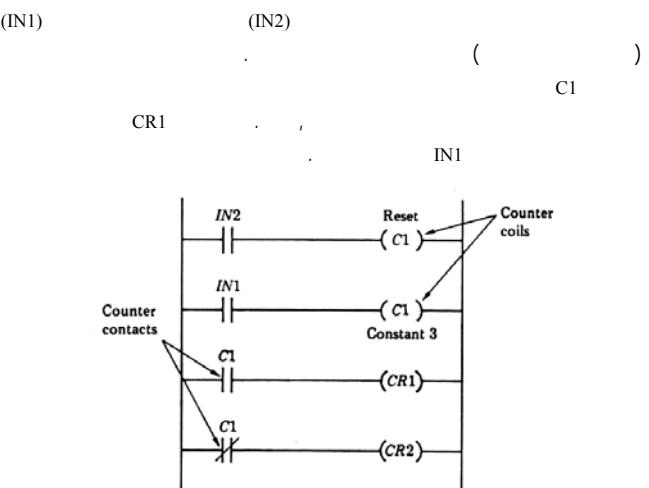


شکل ۲-۱۷ دیاگرام زمانی روشن و خاموش شدن خروجیهای تایم



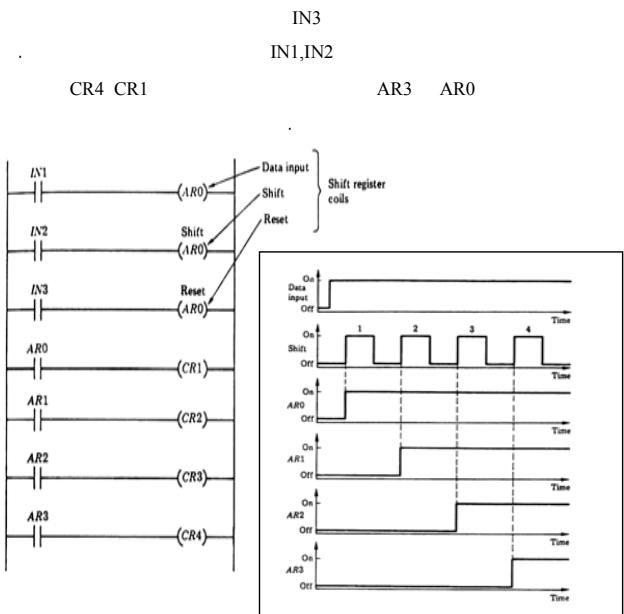
پ ۴) تایم سیکلی

ت) شمارنده ها



شکل ۲-۱۸ مدار شمارنده نردنی

ث) شیفت رجیستر

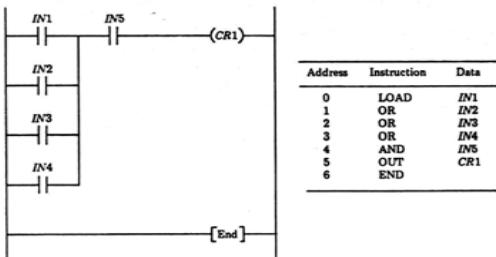
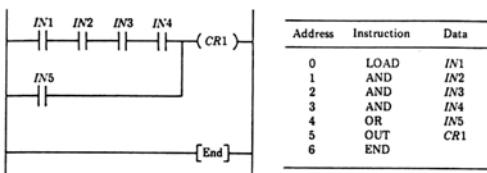


شکل ۲-۱۹ مدار شیفت رجیستر و نحوه روشن شدن رجیستر

ج) زیر برنامه ها و پرس در برنامه

### ۲-۴-۲- جمع کردن چندین "AND" و "OR" یا

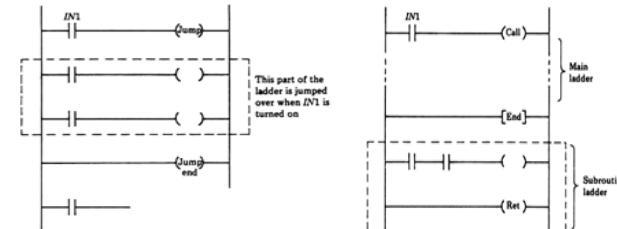
" ) " " IN4 IN1  
CR1  
" ) " " IN5



شکل ۲-۲۲ جمع کردن چند منطقی "AND" و "OR"

### ۲-۴-۳- جمع کردن یک بلوک منطقی

(Function Block)



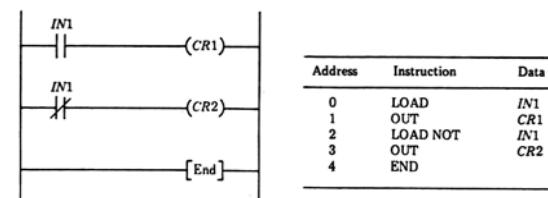
شکل ۲-۲۱ نمایش برنامه های پرش و زیر برنامه ها

### ۲-۴ مثالهای برنامه نویسی

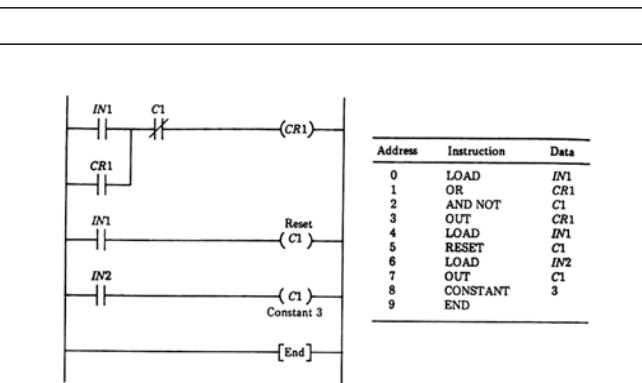
STL

### ۲-۴-۱- روشن و خاموش کردن دو خروجی با یک کلید

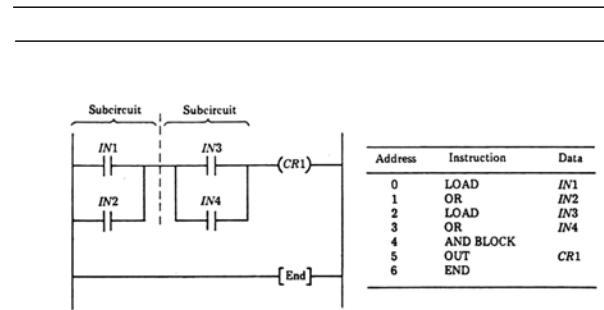
IN1 CR2 CR1  
CR1 IN1  
ST1 .  
CR2 CR1



شکل ۲-۲۱ روشن و خاموش کردن دو خروجی با یک کلید

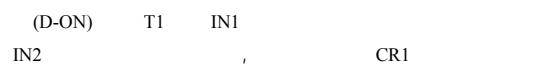


شکل ۲-۲۵ قطع کردن مدار لج توسط شمارنده

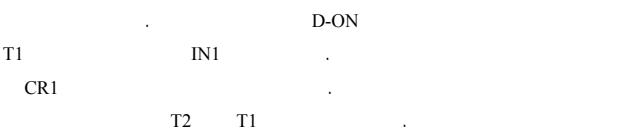


شکل ۲-۲۳ جمع کردن یک بلوک منطقی

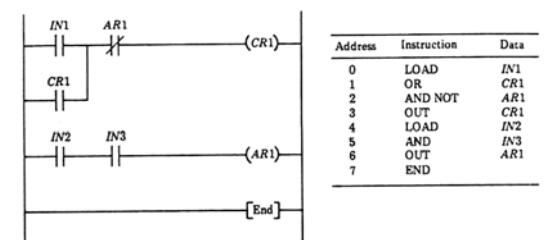
۲-۴-۴-قطع کردن مدار لج توسط خروجی غیر واقعی AR



شکل ۲-۲۶ خاموش شدن تحریک یک تایمر توسط ورودی IN2

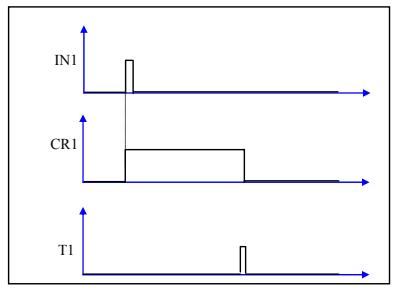


۲-۴-۷-ایجاد یک پالس توسط دو تایم



شکل ۲-۲۴ قطع کردن مدار لج توسط AR

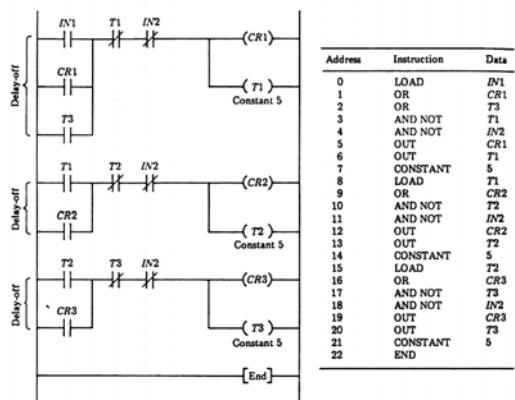
۲-۴-۵-قطع کردن مدار لج توسط شمارنده



شکل ۲-۲۹ زمانبندی روشن شدن CR1 در ساخت تایمر D-OFF

۲-۴-۹ روشن کردن ترتیبی خروجیها توسط تایمر

CR1,CR2,CR3



شکل ۲-۳۰ روشن کردن ترتیبی خروجیها توسط تایمر D-OFF

IN1

T1

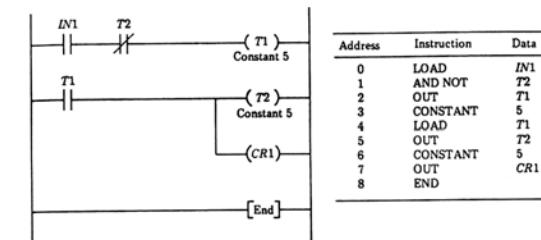
T1

CR1

T2

T1 ,T2

T1

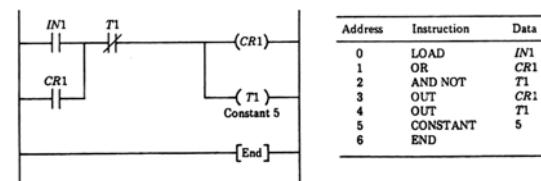


شکل ۲-۲۷ ایجاد یک پالس توسط دو تایمر

۲-۴-۸ تایمر D-OFF

D-Off

D-On



شکل ۲-۲۸ تایمر D-OFF

T1

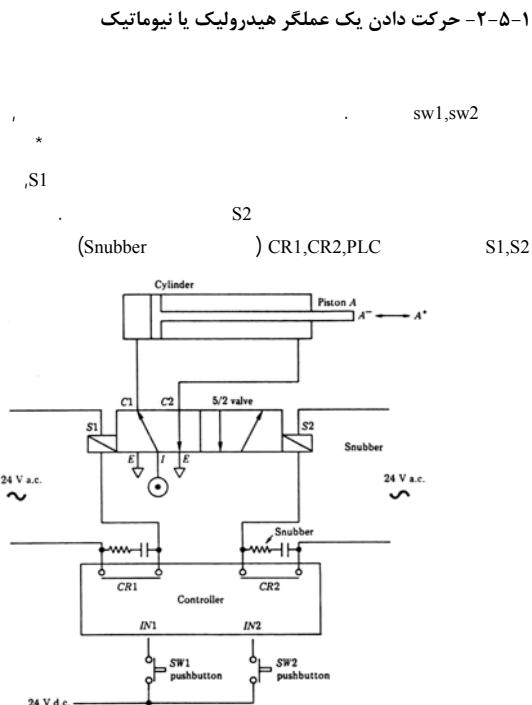
CR1

,IN1

CR2

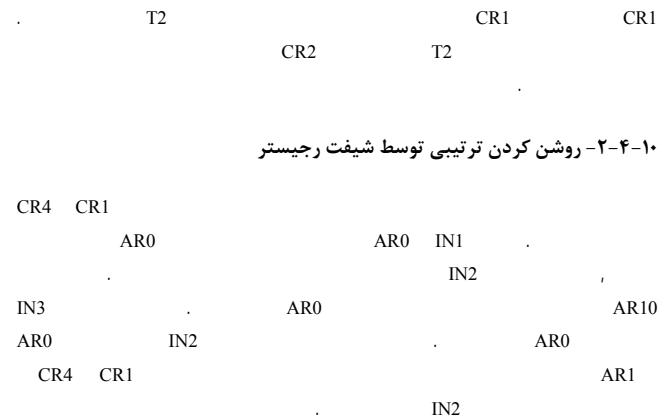
## ۲-۵- مثالهای کاربردی

PLC

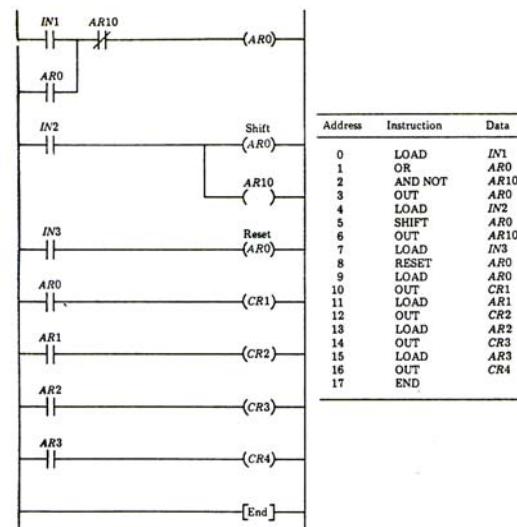


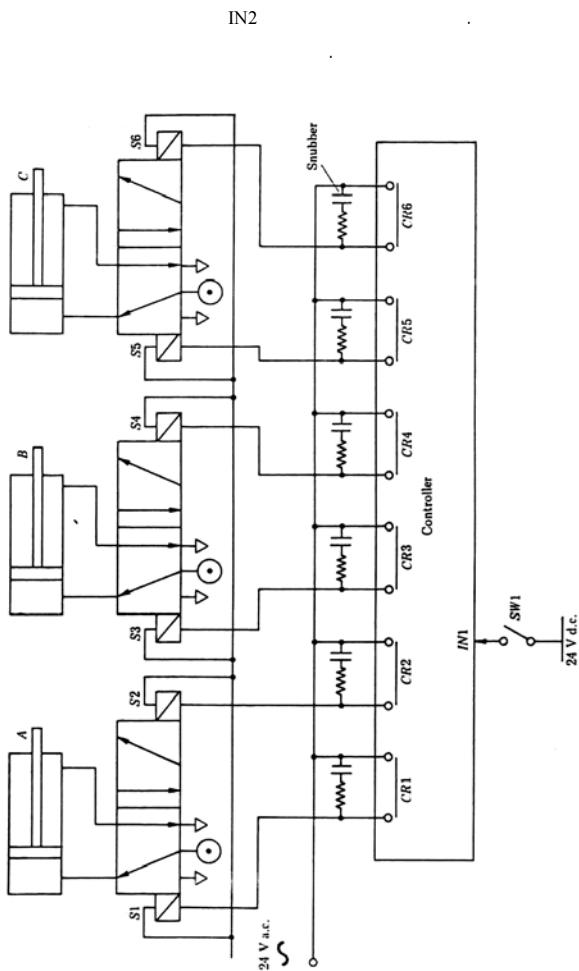
شکل ۲-۳۲ سخت افزار الکترو هیدرولیکی برای حرکت پیستون در دو جهت

## ۲-۴- روشن کردن ترتیبی توسط شیفت رجیستر

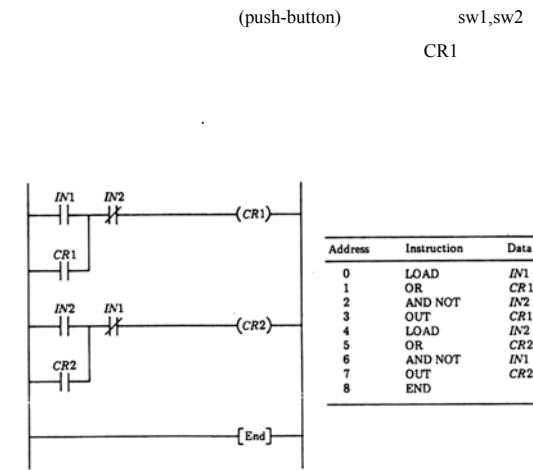


شکل ۲-۳۱ روشن کردن ترتیبی توسط شیفت رجیستر





شکل ۲-۳۴ سخت افزار الکتروهیدرولیکی سه جک هیدرولیک



شکل ۲-۳۳ برنامه کنترلی حرکت پیستون

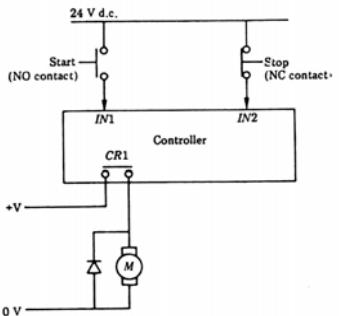
۲-۵-۲- حرکت ترتیبی اتوماتیک سه جک هیدرولیکی - نیوماتیکی

A,B,C

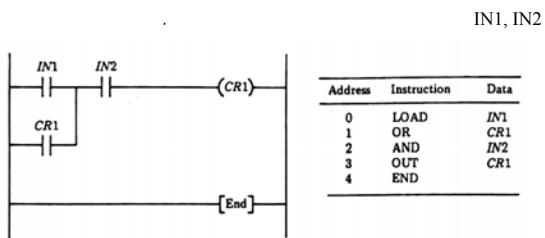
A+ A- B+ B- C+ C- repeat

IN1 sw1

D-ON D-OFF ( )

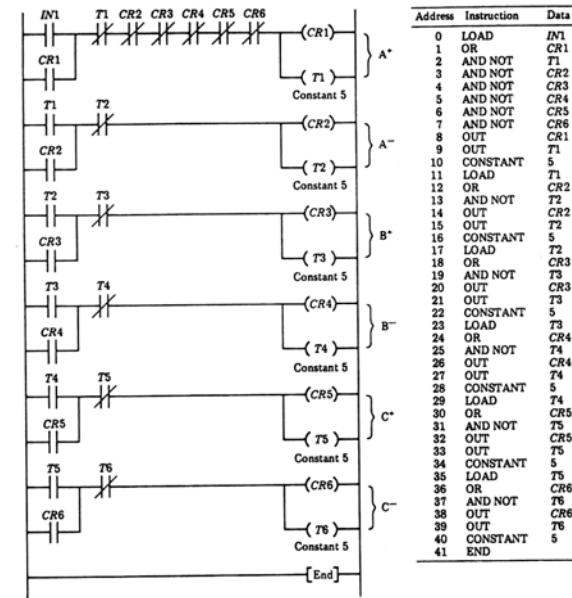


شکل ۲-۳۶ سخت افزار کنترل حرکت موتور



شکل ۲-۳۷ برنامه کنترلی و حرکت موتور

۲-۵-۴- کنترل دما به صورت ON/OFF



شکل ۲-۳۸ برنامه کنترلی حرکت ترتیبی سه جک هیدرولیک

۲-۵-۳- روشن و خاموش کردن یک موتور الکتریکی

START

STOP

PLC

PLC

N.C.

STOP

N.O.

START

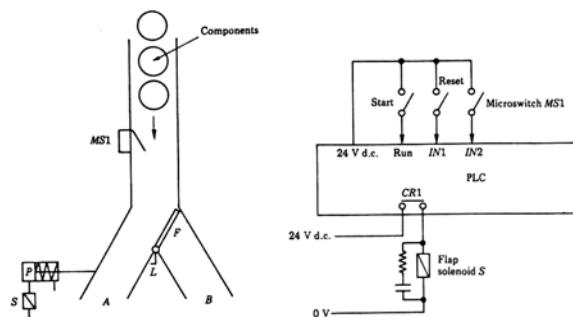
## ۲-۶- مثالهای صنعتی

PLC

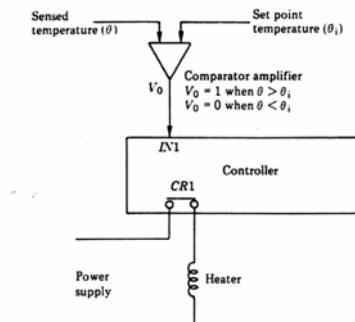
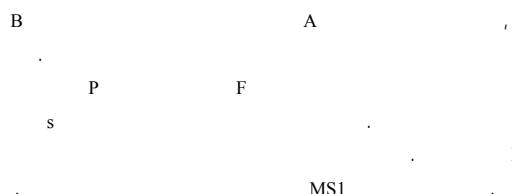
PLC

## ۲-۶-۱ شمارش و دسته بندی

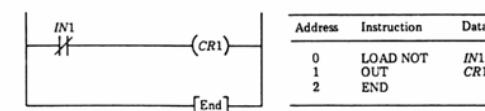
PLC



شکل ۲-۴۱ شماتیک و سخت افزار دستگاه شمارش و دسته بندی

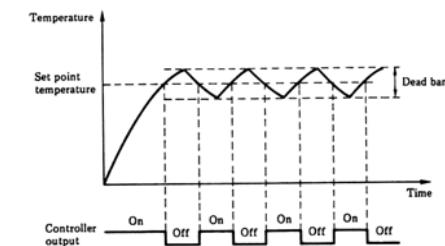


شکل ۲-۳۸ سخت افزار کنترل دما



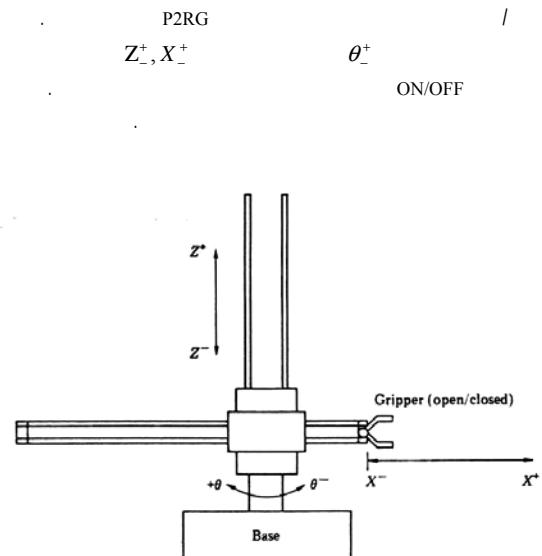
شکل ۲-۳۹ برنامه کنترل دما

ON/OFF



شکل ۲-۴۰ پاسخ کنترل دمایی

٢-٦-٢- روبات جابجا کنندة مخصوص



شكل ٢-٤٣ روبات جابجا کنندة قطعات

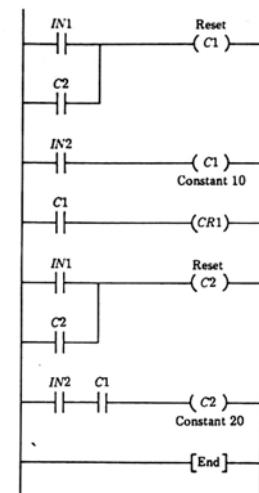
PLC                           $\theta^-, X^-$

$X^+ \rightarrow G \text{ closed} \rightarrow \theta^+ \rightarrow G \text{ open} \rightarrow X^- \rightarrow \theta^- \rightarrow \text{repeat}$

PLC

(Proximity switch)

PLC



Address	Instruction	Data
0	LOAD	IN1
1	OR	C2
2	RESET	C1
3	LOAD	IN2
4	OUT	C1
5	CONSTANT	10
6	LOAD	C1
7	OUT	CR1
8	LOAD	IN1
9	OR	C2
10	RESET	C2
11	LOAD	IN2
12	AND	C1
13	OUT	C2
14	CONSTANT	20
15	END	

شكل ٢-٤٢ برنامه نزدیکی دستگاه شمارش و دسته بندی

IN2                          MS1 .

CR1

C2

C2 MS1

F

C1

F

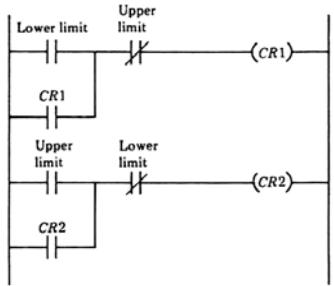
CR1

C1,C2

IN1

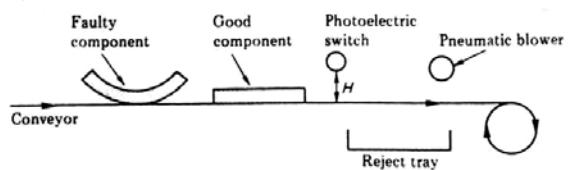
CR1	X <sup>+</sup>	CR3	Z <sup>+</sup>	CR5	θ <sup>+</sup>	CR7	G closed
CR2	X	CR4	Z	CR6	θ <sup>-</sup>	CR8	G open

جدول ۲-۲ اتصال الکتریکی شیرهای سلونوئید به PLC



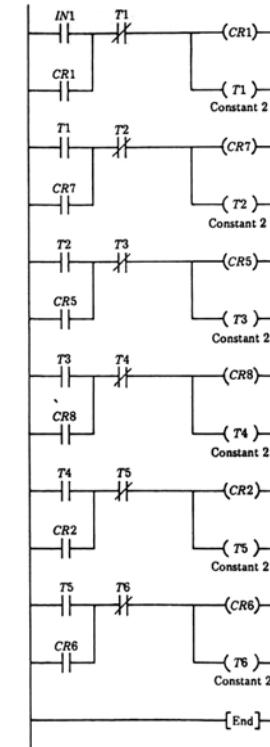
شکل ۲-۴۵ استفاده از میکروسوئیچ جهت کنترل حرکت X

۲-۶-۳ - سیستم جداسازی ضایعات



شکل ۲-۴۶ سیستم جداسازی ضایعات

D-OFF

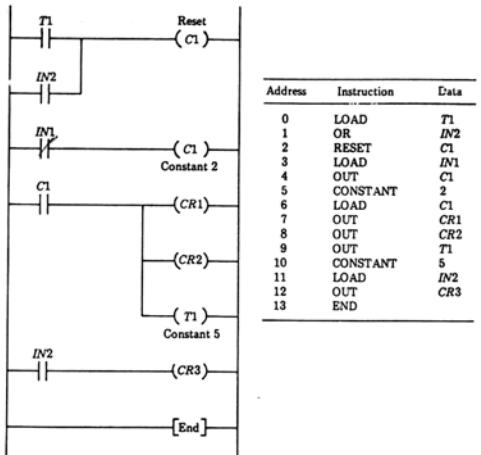


Address	Instruction	Data
0	LOAD	IN1
1	OR	CR1
2	AND NOT	T1
3	OUT	CR1
4	OUT	T1
5	CONSTANT	2
6	LOAD	T1
7	OR	CR7
8	AND NOT	T2
9	OUT	CR7
10	OUT	T2
11	CONSTANT	2
12	LOAD	T2
13	OR	CR5
14	AND NOT	T3
15	OUT	CR5
16	OUT	T3
17	CONSTANT	2
18	LOAD	T3
19	OR	CR8
20	AND NOT	T4
21	OUT	CR8
22	OUT	T4
23	CONSTANT	2
24	LOAD	T4
25	OR	CR2
26	AND NOT	T5
27	OUT	CR2
28	OUT	T5
29	CONSTANT	2
30	LOAD	T5
31	OR	CR6
32	AND NOT	T6
33	OUT	CR6
34	OUT	T6
35	CONSTANT	2
36	END	

شکل ۲-۴۴ برنامه کنترل حرکت روبات جابجا کننده قطعات

H

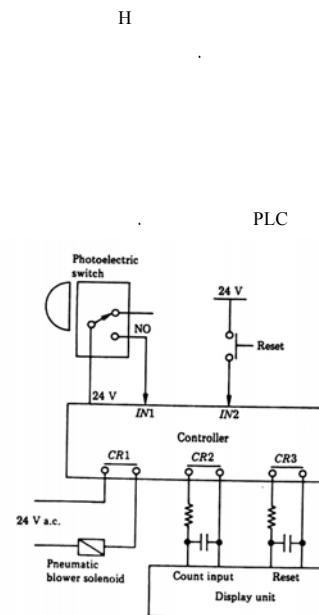
H



Address	Instruction	Data
0	LOAD	T1
1	OR	IN2
2	RESET	C1
3	LOAD	IN1
4	OUT	C1
5	CONSTANT	2
6	LOAD	C1
7	OUT	CR1
8	OUT	CR2
9	OUT	T1
10	CONSTANT	5
11	LOAD	IN2
12	OUT	CR3
13	END	

شکل ۲-۴۸ دیاگرام کنترل سیستم جداسازی ضایعات

#### ۲-۶-۴- سیستم کنترل خط تولید اتوماتیک



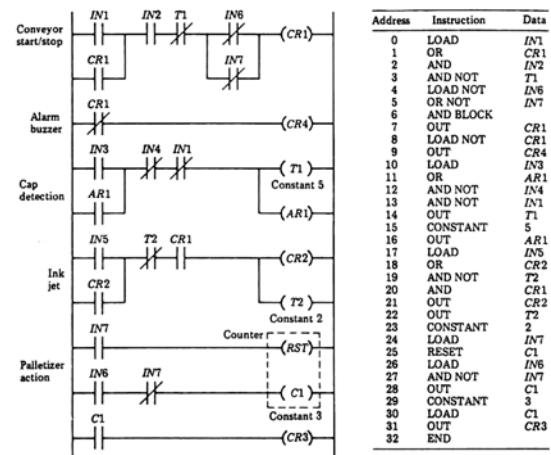
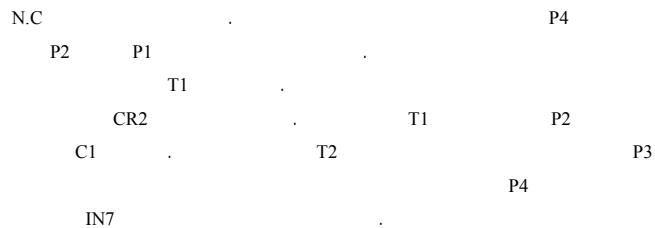
شکل ۲-۴۷ اتصالات الکتریکی سیستم جداسازی ضایعات

P3

P1,P2

P4

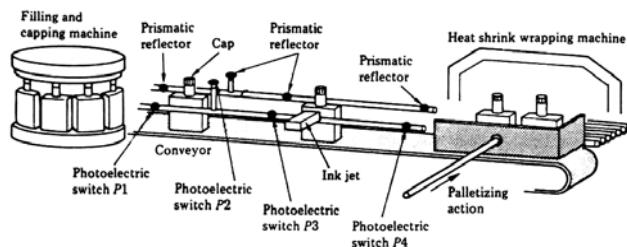
CR2  
C1 . ( )  
T1 CR1,CR2  
C1  
IN2



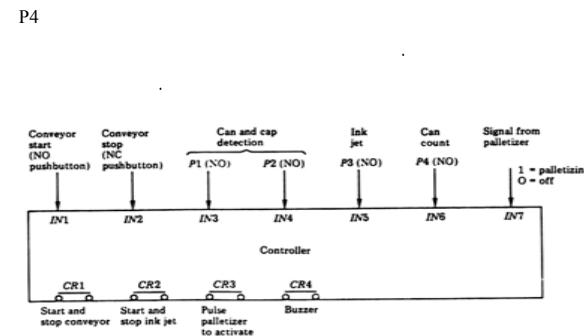
شكل ٢-٥١ برنامج كنترل خط توليد اتوماتيك

PLC

Siemens STEP5



شكل ٢-٤٩ خط توليد اتوماتيك

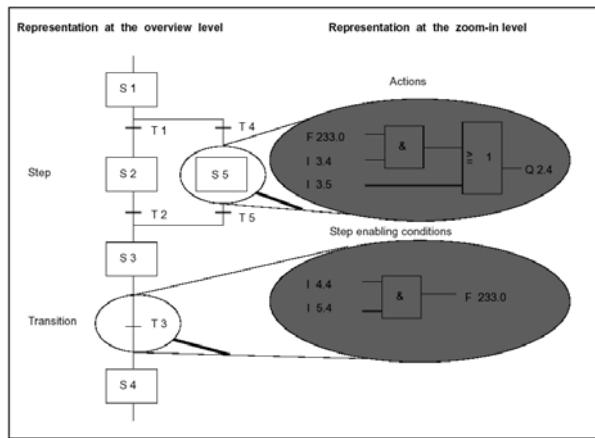


شكل ٢-٥٠ اتصالات الكتروني PLC

PLC

(T1 ) .

Stop



شکل ۵-۵۳ مثالی از برنامه GRAPH

۱-۷-۲- ساختار برنامه نویسی

(Structured)

### (Linear)

## Step5

PL  
(Segment)

## OB1 (Organization Block 1)

PLC

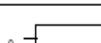
(

### (Subroutine)

#### **۷-۲- مقدمه ای پر برنامه نویسی STEP5**

PLC

( )

STL	CSF	LAD
<pre>A I 0.0 AN I 0.1 = Q 1.0</pre>		

شکل ۲-۵۲ مقایسه سه روش CSF، STL و LAD

S5

PLC

### GRAPH 5

## Flow Char

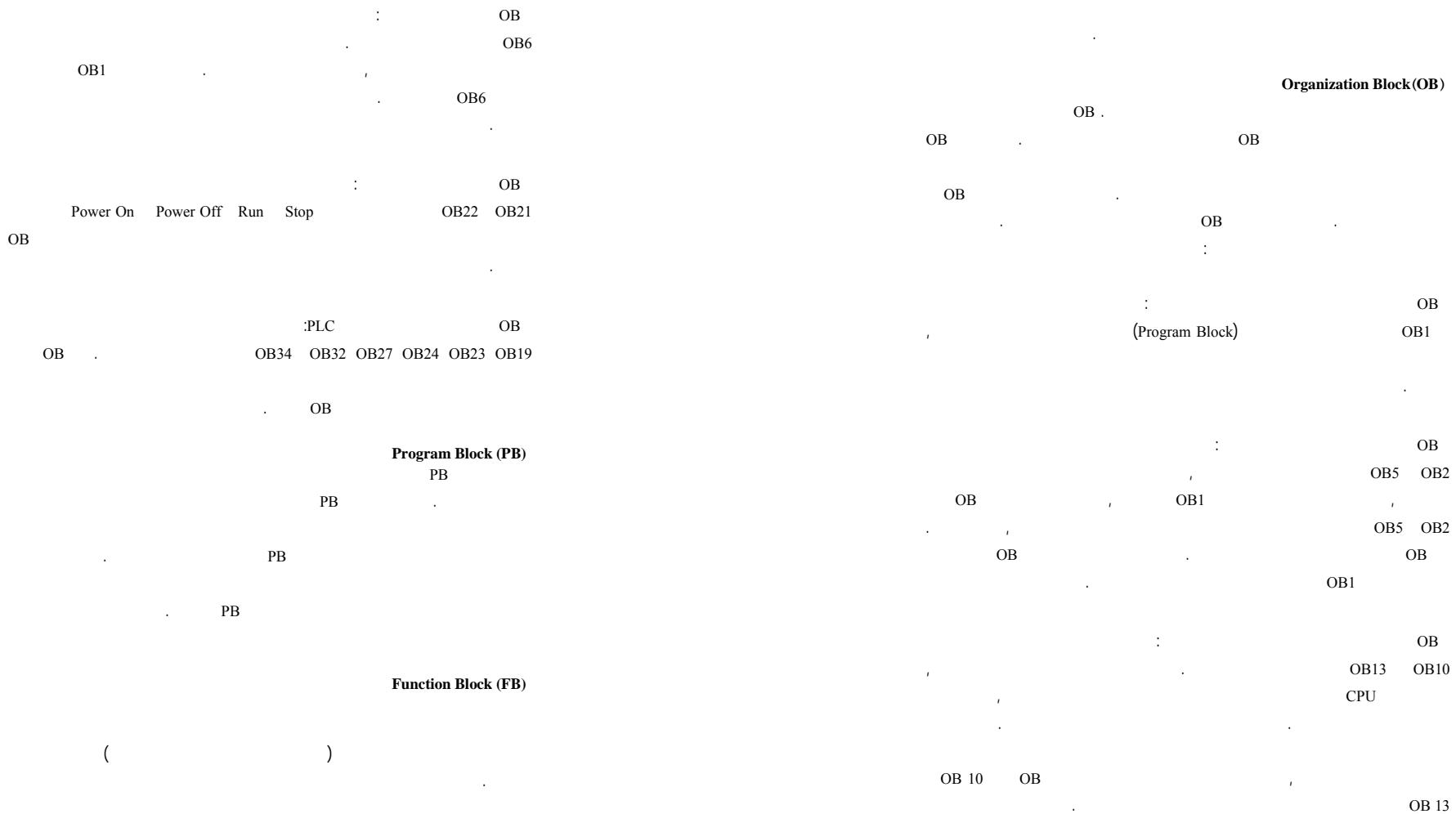
### Transition Step

Transition

## Step

### S0 S1 GRAPH 5

انواع بلوک‌های مورد استفاده در برنامه نویسی ساختار یافته



	16	:KM
		:KH
999.3	0.0	:KT
-32768	+32768	:KF
255	0	:KY
		:KS
.999	0	:KC

( )

FB  
(Standard FB)

(Assignable FB) (

## Data Block (DB)

).

## Sequence Block (SB)

PB SB

## Step 5

( )	DR		IB
( )	DL	( )	IW
( )	DW		QB
( )	T		QW
( )	C		FB
		( )	FW

## جدول ٤-٢ انواع مختلف عملوندها

### **(Result of Logic Operation) RLO بیت**

PLC  
( )

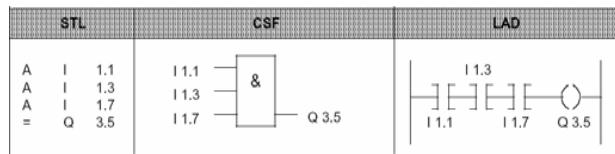
RLO

B	C	T	K	D	F	Q	I

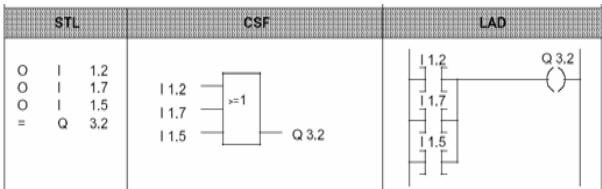
### جدول ۳-۲ نمادهای مورد استفاده برای هر عملوند

### دستور العمل های اصلی

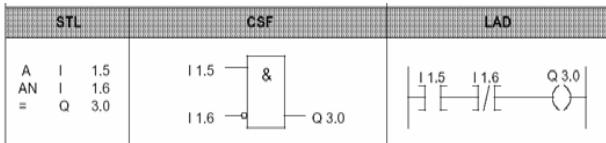
CSF LAD STL



شکل ۲-۵۴ مثالی از دستور AND



شکل ۲-۵۵ مثالی از دستور OR



شکل ۲-۵۶ مثالی از دستور AND NOT

### Step5 - ۲-۷-۲ دستور العمل های زبان

RLO

RLO

Step5

(Basic)

(SB FB PB OB)

(-F)

(+F)

CSF LAD STL

(Supplementary)

Shift

STL

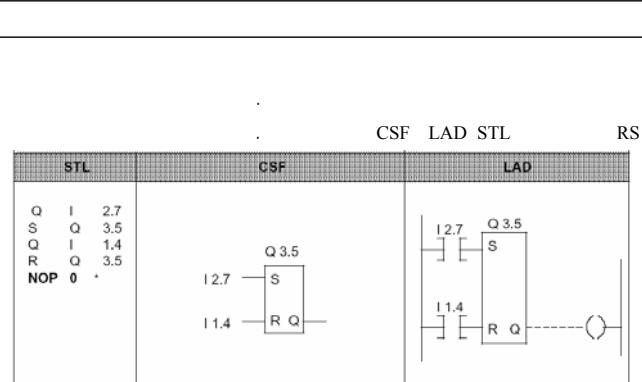
FB

(System)

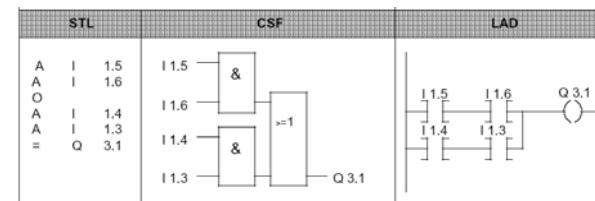
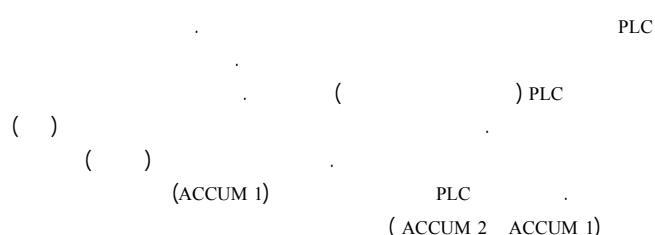
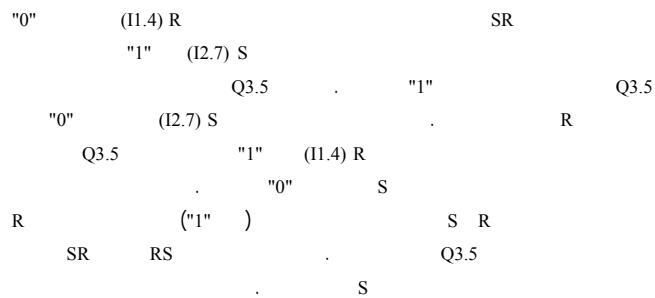
PLC

FB	FB	FB SB PB OB	
STL	STL	CSF LAD STL	

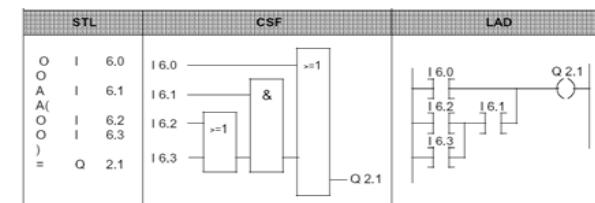
جدول ۵ خصوصیات دستور العمل های اصلی، تکمیلی و سیستم



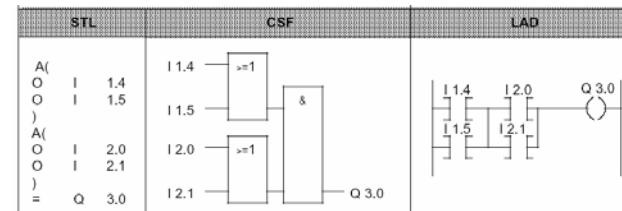
شکل ۲-۶۰ یک فلیپ فلاپ SR



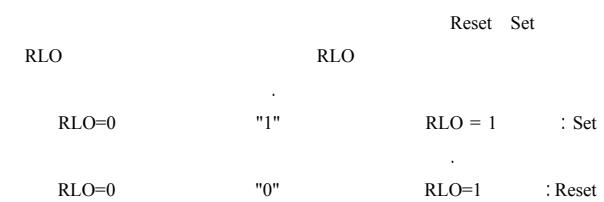
شکل ۲-۵۷ ۲ مثالی از کاربرد AND و OR



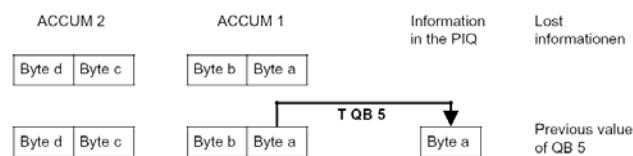
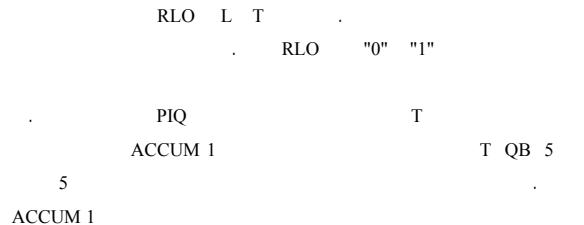
شکل ۲-۵۸ ۲ مثالی از استفاده پرانتز



شکل ۲-۵۹ ۲ مثالی دیگر از کاربرد پرانتز در نوشتن دستورات AND و OR



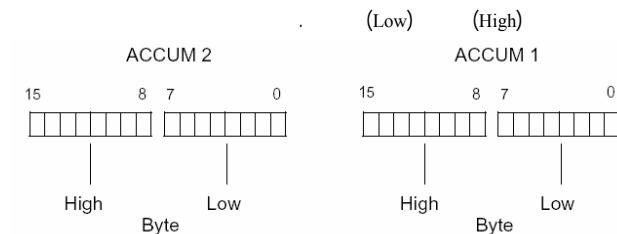
PLC



شکل ۲-۶۳ چگونگی اجرای دستور انتقال از PIQ به ACCUM1

(Pulse Timer)	SP
(Extended Pulse Timer)	SE
(On – Delay Timer )	SD
(Off – Delay Timer)	SF
(Stored On – Delay Timer)	SS
CSF LAD STL	

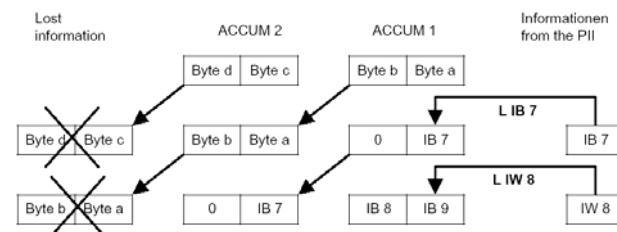
#### – تایمرها – (Timers)



شکل ۲-۶۱ ساختار انبارک ها و بایت های با ارزش بالا (High) و پائین (Low)



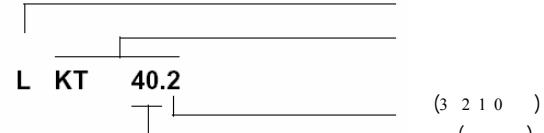
شکل ۲-۶۲ چگونگی اجرای دستور بارگذاری از PLC به انباره ها



(T)

0	0	0.01
0	1	0.1
1	0	1
1	1	10

جدول ۲-۶ ضربیب عدد ثابت تایمر



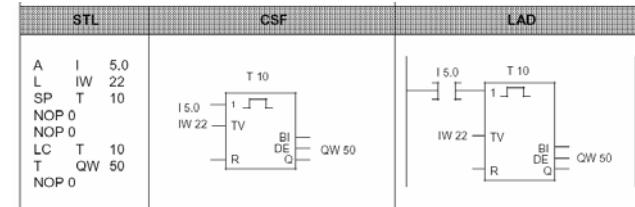
TV

: KT 001.0 → 0.01  
: KT 999.3 → 9990

5 KT

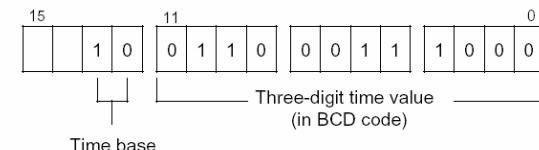
0.05	0 ( 0.01)	5	L KT 5.0
0.5	1 ( 0.1)	5	L KT 5.1
5	2 ( 1)	5	L KT 5.2
50	3 ( 10)	5	L KT 5.3

جدول ۲-۷ مقایسه مقیاس زمانی های مختلف



شکل ۲-۶۴ یک نمونه تایمر

:(Set) S  
(Timer Value) TV  
KT  
BCD  
( ) KT  
(Time Base)  
999 000 BCD

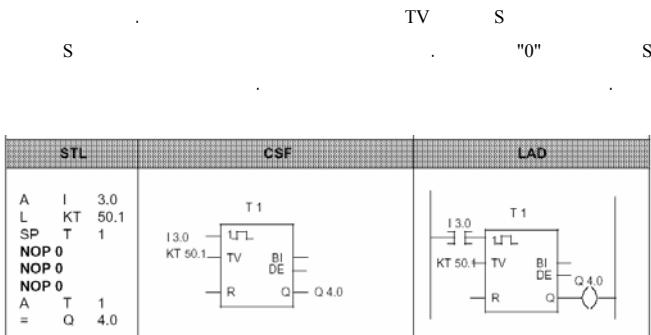


شکل ۲-۶۵ نحوه ذخیره مقدار ثابت تایمر

KT  
999 0  
PLC

S R

تایمیر پله ای (SP)



شکل ۲-۶۶ تایمیر پله ای

L KT...

L KT 400.1	$400 \times 0.1 = 40 \pm 0.1$	0.1
L KT 40.2	$40 \times 1 = 40 \pm 1$	1
L KT 4.3	$4 \times 10 = 40 \pm 10$	10

جدول ۲-۸ حالات مختلف برای بارگذاری زمان ۴۰ ثانیه در تایمیر

(1 0)

(3 2)

:R (Reset) R

( )

TV

:BI

NOP0

BI

:DE

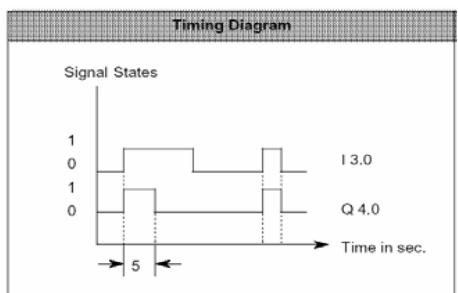
BCD

TV

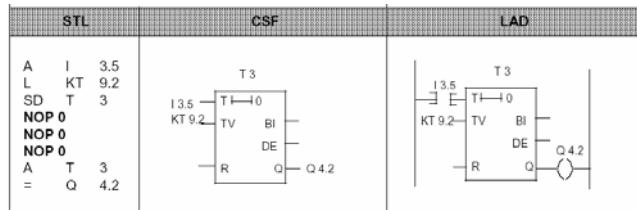
TV

:Q

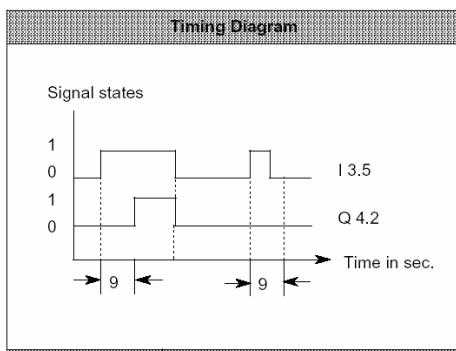
R



شکل ۲-۶۷ شکل موج های تایمیر پله ای

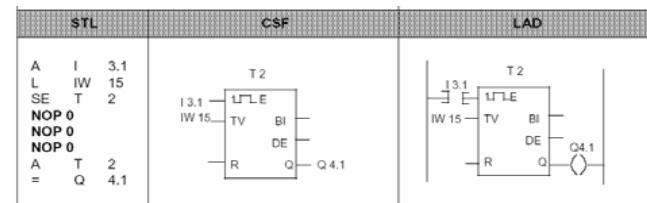
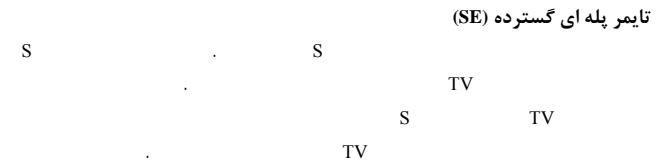


شکل ۲-۷۰ تایمر با در تاخیر در روشن شدن

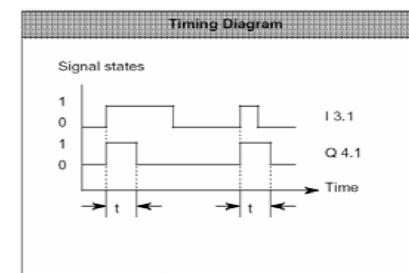


شکل ۲-۷۱ شکل موج تایمر

تایمر با تاخیر در خاموش شدن (SF)



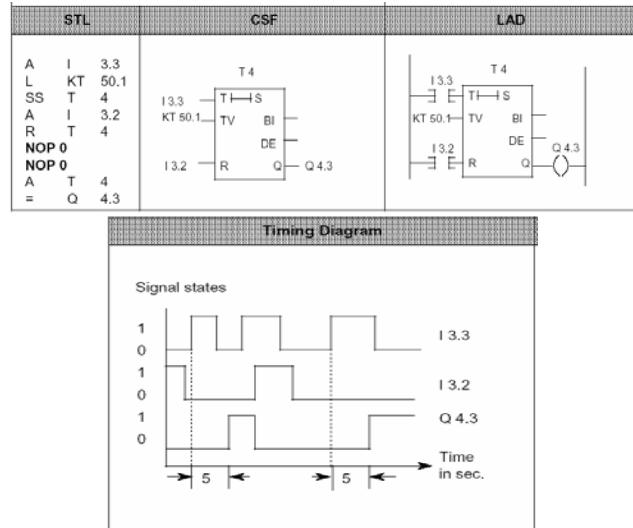
شکل ۲-۶۸ تایمر پله ای گستردگی



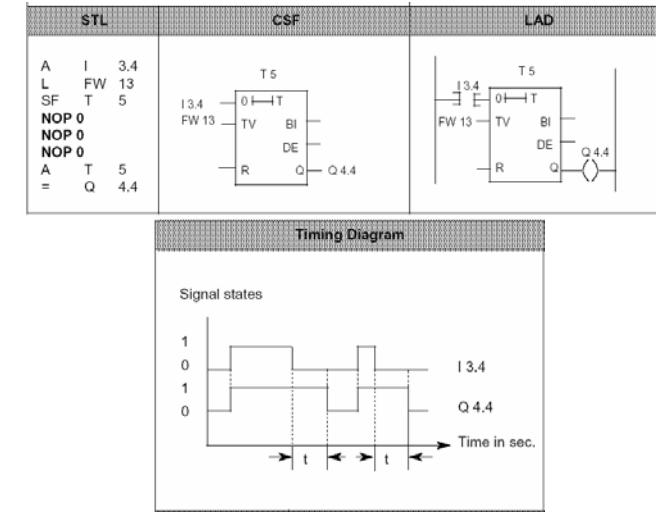
شکل ۲-۶۹ شکل موج تایمر پله ای گستردگی

تایمر با تاخیر در روشن شدن (SD)





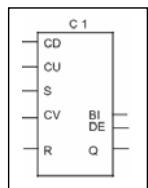
شکل ۲-۷۳ شکل موج تایمر SS



شکل ۲-۷۴ تایمر با تاخیر در خاموش شدن (SF) و شکل موج آن

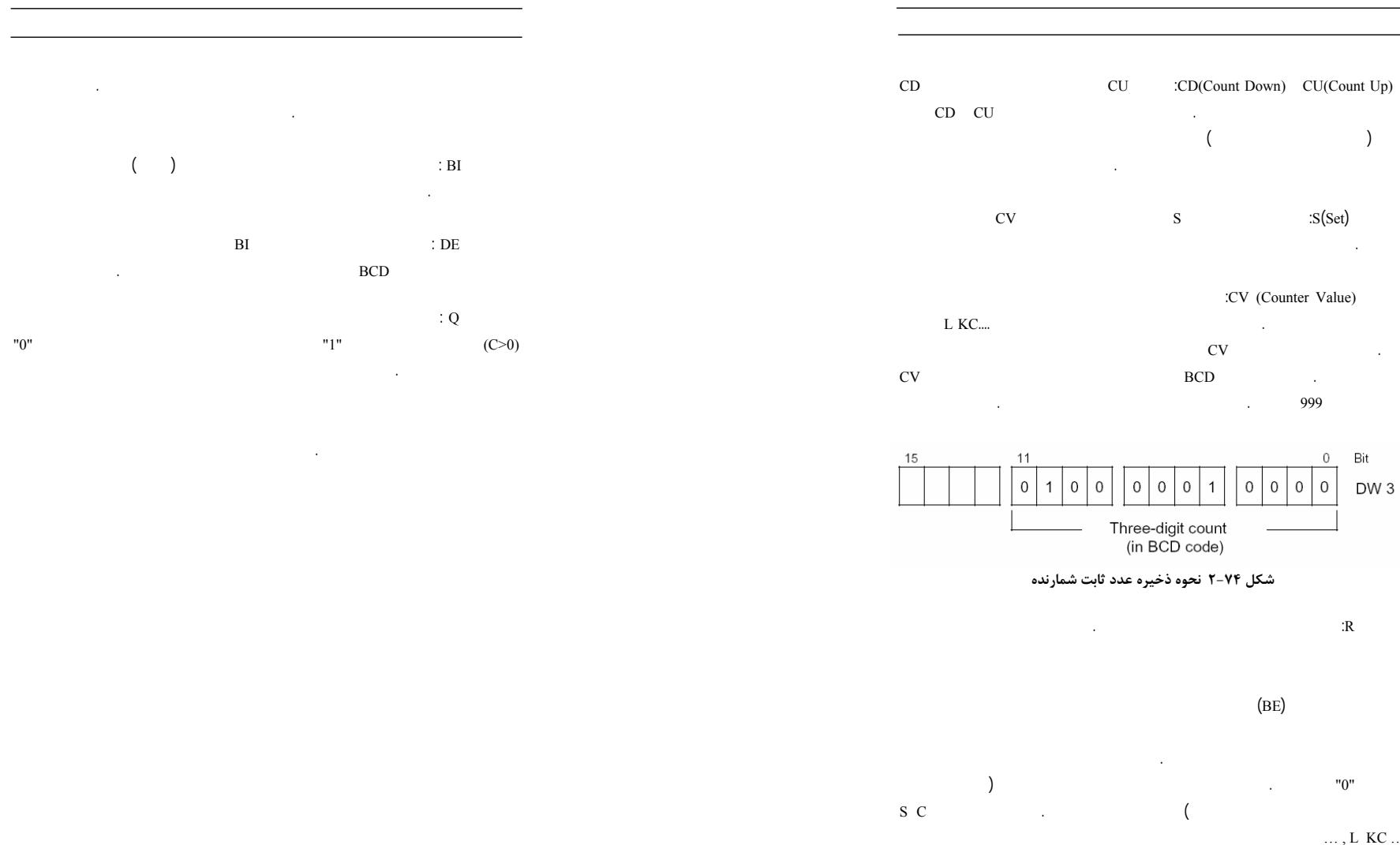
تایمر با تاخیر ماندگار (SS)

شمارنده ها (Counters)



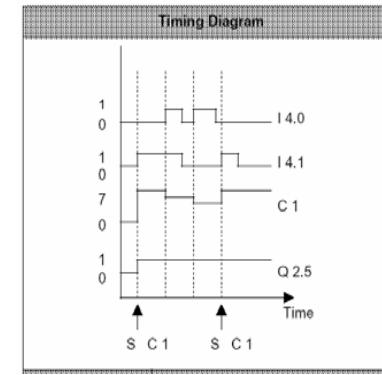
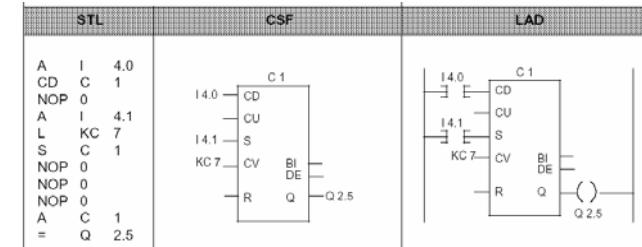
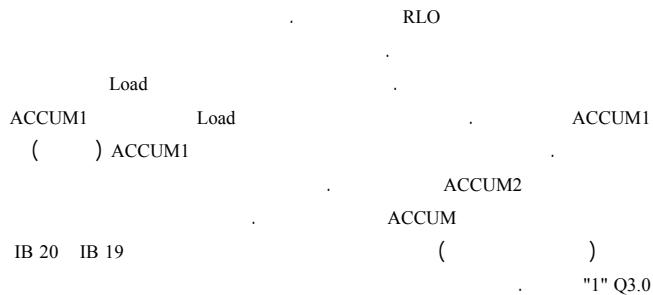
PLC





$!=F$	=	ACCUM : "1" RLO
$><F$	$\neq$	ACCUM : "1" RLO
$>F$	>	ACCUM1 : "1" RLO ACCUM2
$\geq F$	$\geq$	ACCUM1 : "1" RLO ACCUM2
$<F$	<	ACCUM1 : "1" RLO ACCUM2
$\leq F$	$\leq$	ACCUM1 : "1" RLO ACCUM2

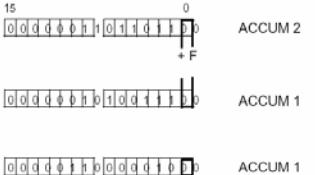
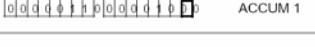
جدول ۲-۹ دستورات مقایسه ای



شکل ۲-۷۵ شکل موج های شمارنده مثال بالا

مقایسه کنندۀ ها (Comparators)

IB KF FY QB

STL		Explanation	
L	C 3		ACCUM 1
L	C 1	ACCUM1	ACCUM2 ACCUM1
+ F		ACCUM1	ACCUM2 ACCUM1
T	QW 12		QW12 ACCUM1
Numeric Example			
876			ACCUM 2
	+	+ F	
668			ACCUM 1
=			
1544			ACCUM 1

شکل ۲-۷۷ کاربرد دستور جمع

دستور های "پرش" (JUMP)

STL		CSF/LAD	
L	IB 19		
L	IB 20		
!=F		C 1 F	
=	Q 3.0	IB 19 — C 1 — F	
		IB 20 — C 2 — Q 3.0	

شکل ۲-۷۶ مثالی در مورد کاربرد دستور مقایسه ای مساوی

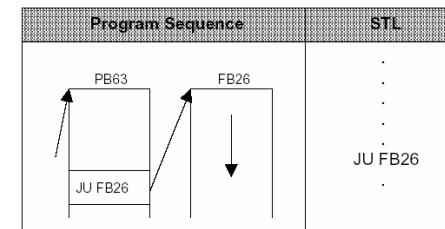
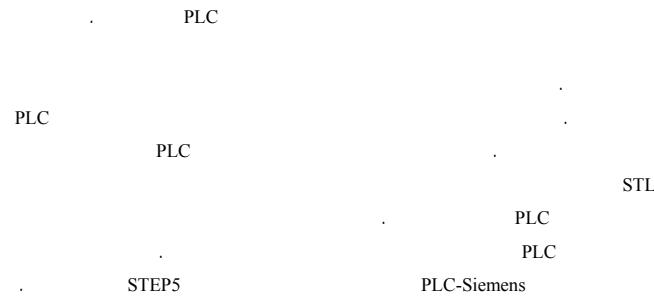
عملیات ریاضی

T L

(+F, -F)

(JU)

۲-۸- جمع بندی

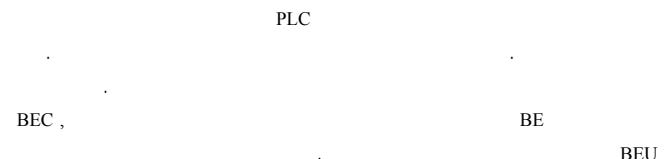


شکل ۲-۷۸ کاربرد دستور **JU**

(JC)

RLO                    JU  
"1"                    RLO

دستورهای اعلام پایان



BE		RLO
BEU		RLO
BEC		"1" RLO

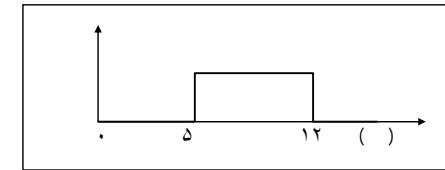
جدول ۲-۱۰ دستورات اعلام پایان

مسائل

-٢-١

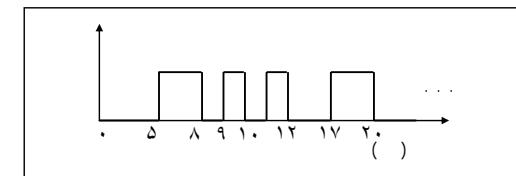
-٢-٢

Delay-On



شكل ٢-٧٩

-٢-٣



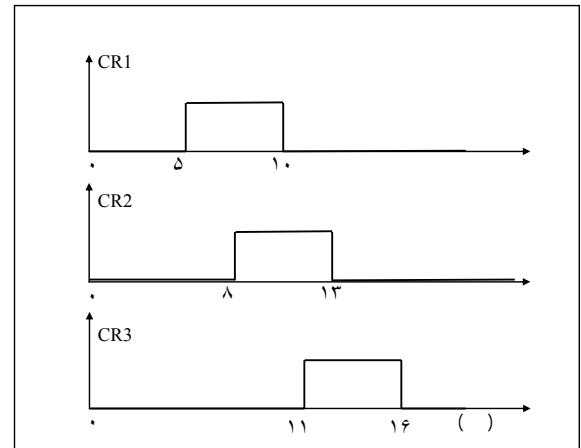
شكل ٢-٨٠

-٢-٤

CR2, CR3

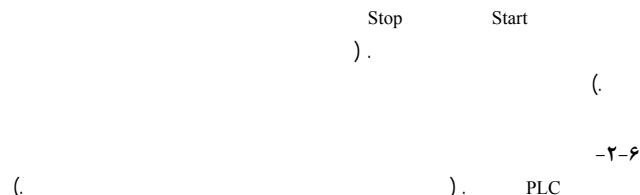
CR1,

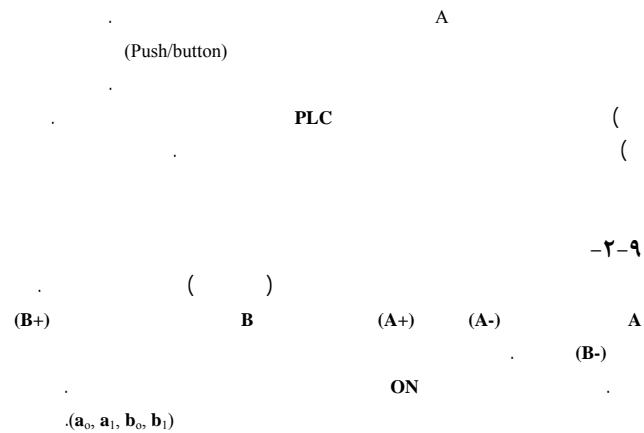
IN2



شكل ٢-٨١

-٢-٥





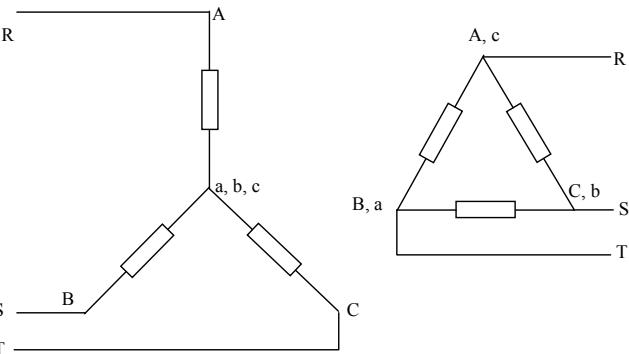
$B_+ \rightarrow A_+ \rightarrow$        $\rightarrow$        $\rightarrow A_- \rightarrow$   
 $B_- \rightarrow$        $\rightarrow$

A+

(Push Button)

(  
B-)  
(  
A+)  
(a<sub>0</sub>)  
(b<sub>1</sub>)

PLC



شکل ۲-۸۱ نمایش اتصال ستاره و مثلث مسئله ۲-۵

-۲-۷

push button  
PLC

A,B

-۲-۸

(Push/button)

Start/Stop

A

A

---

---

## مراجع

- [1] Bateson, Robert, *Introduction to control system technology*, 6<sup>th</sup> ed., Prentice Hall, 1999.
- [2] Brayton R., Programmable Controller-Collections, Chicago, Industrial Text Company, 1989.
- [3] Carter, John W., *Digital designing with programmable logic devices*, Prentice Hall, 1997.
- [4] Crispin Alan J., *Programmable logic controllers and their engineering applications*, McGraw-Hill, 1990.
- [5] Hamblen, James O. and Michael D. Furman, *Rapid prototyping of digital systems*, Kluwer Academic, 2000.
- [6] Kissel T.E., *Understanding and Using Programmable Controllers*, Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 1986.
- [7] Simpson C., *Programmable Logic Controllers*, Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 1994.
- [8] Stenerson J., *Fundamentals of Programmable Logic Controllers, sensors, and communications*, Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 1993.
- [9] Webb, John W. and Ronald A. Reis, *Programmable logic controllers: principles and applications*, 4th ed., Prentice Hall, c1999.
- [10]

---

---

IN8	A+	IN1	
IN9	B-	IN2	
IN10	B+	IN3	a <sub>o</sub>
CR1	A+	IN4	a <sub>l</sub>
CR2	A-	IN5	b <sub>o</sub>
CR3	B+	IN6	b <sub>l</sub>
CR4	B-	IN7	A-

## فصل سوم

مدل‌سازی  
فرآیندهای صنعتی

---

---

### فصل سوم: مدلسازی فرآیندهای صنعتی

۳-۱ - مقدمه

(Gray box)

Simulink Matlab

۱-۳- معادلات حالت

F M



۳-۲- مدلسازی سیستمهای صنعتی

۳-۲-۱- مدلسازی سیستمهای الکترو مکانیک

مثال ۳-۱) سرو موتور DC

DC

$$N = \frac{\omega_m}{\omega} \quad N = \frac{\theta_m}{\theta} \quad ( )$$

$$\frac{1}{N} = \frac{T_m}{T} \quad ( )$$

$$T_m = K_1 \varphi i \quad ( )$$

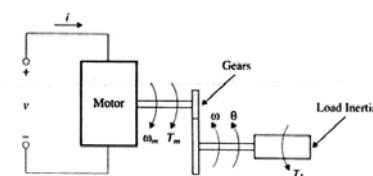
$$T_m = K_m \cdot i \quad ( )$$

$$L \quad R \quad DC$$

(Back EMF)

$$K_2 \varphi \omega_m \quad K_1 = K_2 \quad SI$$

$$V_{EMF} = K_m \cdot \omega_m \quad ( )$$



شکل ۳-۲ سرو موتور DC

$T_L$

v

$$u = \begin{bmatrix} v \\ T_L \end{bmatrix} \quad ( )$$

$$J_m \dot{\omega}_m = T_m - T_e \quad ( )$$

$$T_m \quad J_L \quad T_e \quad ( )$$

$$T_e = T_m - J_m \dot{\omega}_m \quad ( )$$

$$y = \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \end{bmatrix} \quad ( )$$

N

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \\ i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{NK_m}{J_e} \\ 0 & \frac{-NK_m}{L} & \frac{-R}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \\ i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{J_e} \\ \frac{1}{L} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v \\ T_L \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \\ i \end{bmatrix}$$

مشابه سازی -

$$K_m = 0.05 \frac{N.m}{A}, R = 1.2\Omega, L = 0.05H, J_m = 8 \times 10^{-4} Kgm^2, J = 0.02 Kgm^2, N = 12$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 4.438 \\ 0 & -12 & -24 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -7.396 \\ 20 & 0 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

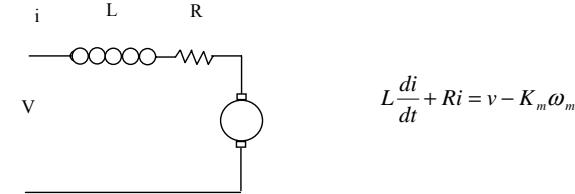
Simulink                    Matlab                    "lsim"

$$\begin{cases} v(t) = 3 \text{ volts, } 0 \leq t < 2 \\ v(t) = -3 \text{ volts, } 2 \leq t \leq 4 \end{cases} \quad T_L = 0$$

$$\begin{aligned} J\dot{\omega} &= NT_e - T_L \\ &= N(T_m - J_m\dot{\omega}_m) - T_L \\ &\vdots \\ \omega_m &= N\omega \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} (J + N^2 J_m)\dot{\omega} &= NT_m - T_L \\ J_e\dot{\omega} &= NT_m - T_L \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} (T_m &= K_m i) \\ \dot{\omega} &= \frac{NK_m}{J_e} i - \frac{T_L}{J_e} \end{aligned} \quad (5)$$



$$L \frac{di}{dt} + Ri = v - K_m \omega_m \quad (6)$$

$$i = -\frac{R}{L}i + \frac{1}{L}v - \frac{NK_m}{L}\omega \quad (7)$$

$$\dot{\theta} = \omega \quad (8)$$

$$V = mgh + \frac{1}{2} Kx^2 + \dots \quad ( )$$

:

$$L = T - V \quad ( )$$

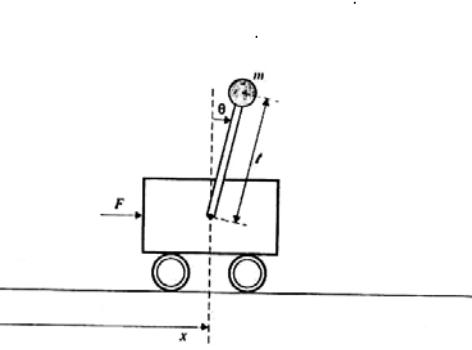
:

$$\boxed{\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i \quad i=1,2,\dots,n} \quad ( )$$

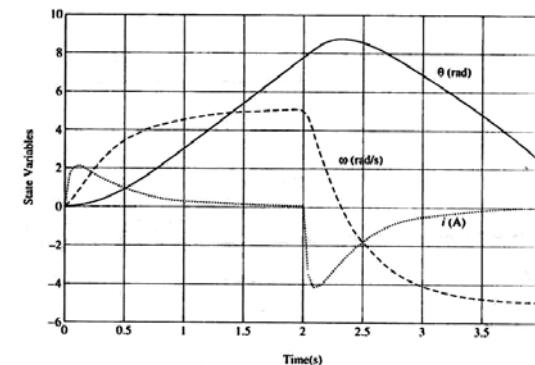
$q_i$

$Q_i$

مثال ۳-۲) پاندول معکوس



شکل ۳-۴ مدلسازی پاندول معکوس توسط روش لگرانژ



شکل ۳-۳ پاسخ های سیستم سرو موتور DC

۳-۲-۳- مدلسازی سیستمهای مکانیکی (روش لگرانژ)

$$(q_i) \\ T(q_i, \dot{q}_i) \\ V(q)$$

$$T = \frac{1}{2} mv^2 + \frac{1}{2} I \omega^2 \quad ( )$$

$$T = \frac{1}{2} v \cdot P + \frac{1}{2} \omega \cdot H \quad ( )$$

H P

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = 0$$

$$\frac{d}{dt} \left( m\ell \dot{x} \cos\theta + m\ell^2 \dot{\theta} \right) - mg\ell \sin\theta = 0 \quad ( )$$

$$\ddot{x} \cos\theta + \ell \ddot{\theta} - g \sin\theta = 0 \quad ( )$$

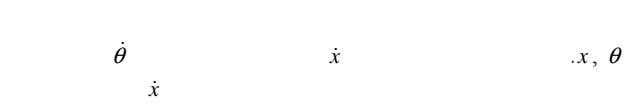
$$\begin{bmatrix} M+m & m\ell \cos\theta \\ \cos\theta & \ell \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F + m\ell\omega^2 \sin\theta \\ g \sin\theta \end{bmatrix} \quad ( )$$

( )  $\dot{\omega}, \dot{v}$

$$\begin{cases} \dot{v} = \frac{F + m\ell\omega^2\sin\theta - mg\sin\theta\cos\theta}{M + m(1-\cos^2\theta)} \\ \dot{\omega} = \frac{-F\cos\theta - m\ell\omega^2\sin\theta\cos\theta + (M+m)g\sin\theta}{\ell[M + m(1-\cos^2\theta)]} \\ \dot{x} = v \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases} \quad ( )$$

$$x(0) = v(0) = \omega(0) = 0, \quad \theta(0) = 0.1, \quad F(t) = 0, \quad 0 \leq t \leq 1$$

## Ode45 Matlab



The diagram illustrates a particle of mass  $m$  at position  $\mathbf{X}_m$  relative to a fixed origin. A horizontal dashed line represents the ground. A vertical dashed line represents a vertical wall. A solid line extends from the origin to the particle, making an angle  $\theta$  with the horizontal. The particle has velocity components  $V_x = \dot{x} + \ell \dot{\theta} \cos \theta$  along the horizontal and  $V_y = -\ell \dot{\theta} \sin \theta$  along the vertical. A circular arrow indicates clockwise rotation.

$$T = \frac{1}{2} M \dot{X}^2 + \frac{1}{2} m (v_x^2 + v_y^2)$$

$$T = \frac{1}{2} M \dot{X}^2 + \frac{1}{2} m [(\dot{x} + \dot{\theta} \ell \cos \theta)^2 + (-\ell \dot{\theta} \sin \theta)^2]$$

$$T = \frac{1}{2}(M+m)\dot{X}^2 + \frac{1}{2}m(\ell\dot{\theta})^2 + m\dot{x}\dot{\theta}\ell\cos\theta$$

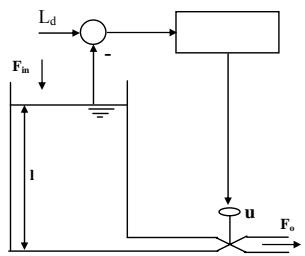
$$V = V_0 + V_0 + m g \ell \cos \theta$$

$$L = \frac{1}{2}(M+m)\dot{x}^2 + \frac{1}{2}m(\ell\dot{\theta})^2 + m\dot{x}\dot{\theta}\ell\cos\theta - 2V_0 - mg\ell\cos\theta$$

$$x \theta \qquad \qquad \theta$$

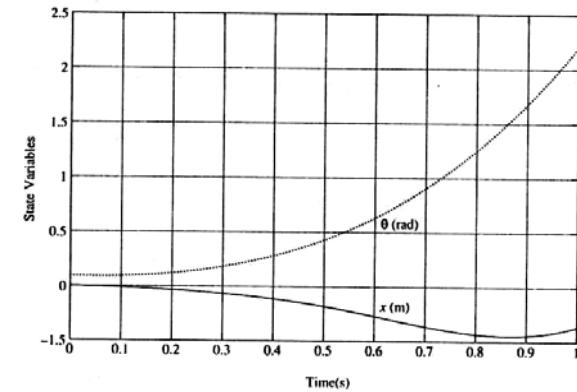
$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}}\right) - \frac{\partial L}{\partial x} &= F \\ \frac{d}{dt}(M\dot{x} + m(\dot{x} + \ell\dot{\theta}\cos\theta)) &= F \end{aligned} \quad ( )$$

$$(M+m)\ddot{x} + m\ell \ddot{\theta} \cos\theta - m\ell \dot{\theta}^2 \sin\theta = F \quad ( )$$



شکل ۳-۷ مدلسازی ارتفاع آب در مخزن رو باز

u  
Fin  
l



شکل ۳-۶ نتایج مشابه سازی سیستم پاندول معکوس

### ۳-۲-۳- مدلسازی سیستمهای هیدرولیکی

$$\Delta V = F_{in} - F_{out} \quad ( )$$

$$F = S \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad ( )$$

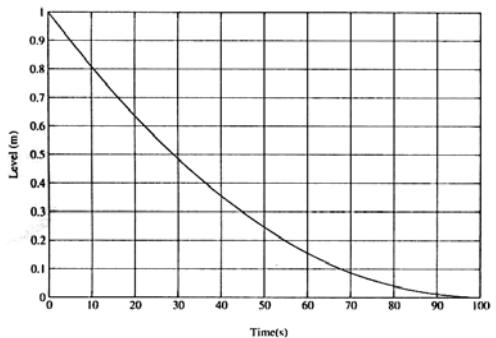
S

مثال ۳-۳) ارتفاع آب در مخزن رو باز

$$F = c u \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}} \quad ( )$$

u

F<sub>in</sub>



شکل ۳-۸ پاسخ مشابه سازی سیستم ارتفاع آب در مخزن رویارز

۳-۳- خطی سازی ریاضی

$$P = P_{\circ} + \rho g \ell \quad (3-1)$$

$$\Delta V = A \frac{d\ell}{dt} = F_{in} - F_{out} \quad (3-2)$$

$$F_{out} = c_l u \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}$$

$$P_{\circ} = P_1 = P_{\circ} + \rho g \ell \quad (3-3)$$

$$\Delta P = P_1 = P_{\circ} = \rho g \ell \quad (3-4)$$

$$F_{out} = c_l u \sqrt{\frac{\rho g \ell}{\rho}} = c_l u \sqrt{\ell} \quad (3-5)$$

$$\frac{d\ell}{dt} = \frac{F_{in}}{A} - \frac{F_{out}}{A} \quad (3-6)$$

$$\boxed{\ell = \frac{F_{in}}{A} - \frac{c_l u}{A} \sqrt{\ell}} \quad (3-7)$$

Matlab (Ode45)

u

$$l(0) = 1m, \quad u(t) = 0.01m \quad F_{in} = 0, \quad 0 < t < 100 \text{ sec}$$

$$x \quad f \quad \frac{\partial f}{\partial x}$$

$$\left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_* = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}_* \quad ( )$$

$$\begin{cases} \Delta \dot{x} = \frac{\partial f}{\partial x}|_* \Delta x + \frac{\partial f}{\partial u}|_* \Delta u \\ \Delta y = \frac{\partial h}{\partial x}|_* \Delta x + \frac{\partial h}{\partial u}|_* \Delta u \end{cases} \quad ( )$$

$$\begin{cases} \Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u \\ \Delta y = C \Delta x + D \Delta u \end{cases} \quad ( )$$

مثال ۱: ارتفاع آب در مخزن روباز

$$\ell = \frac{F_{in}}{A} - \frac{c u \sqrt{\ell}}{A} \quad ( )$$

$$F(\ell, u, F_{in}) = \frac{F_{in}}{A} - \frac{c u \sqrt{\ell}}{A} \quad ( )$$

$$\begin{aligned} & F_{in}^* = F_d & \ell^* = \ell_d \\ 0 = -\frac{C}{A} u^* \sqrt{\ell_d} + \frac{F_d}{A} & \Rightarrow u^* = \frac{F_d}{c \sqrt{\ell_d}} \end{aligned} \quad ( )$$

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u) \\ y &= h(x, u) \end{aligned} \quad ( )$$

$x^*$

$$\begin{aligned} \dot{x} &= 0 \\ f(x^*, u^*) &= 0 \end{aligned} \quad ( )$$

$$\begin{aligned} n & \quad n \\ u^* & \quad x^* \end{aligned} \quad ( )$$

$$\Delta x = x - x^*, \quad \Delta y = y - y^*, \quad \Delta u = u - u^* \quad ( )$$

$$\begin{cases} \Delta x = f(x^* + \Delta x, u^* + \Delta u) \\ \Delta y = h(x^* + \Delta x, u^* + \Delta u) - y^* \end{cases} \quad ( )$$

$u^* \quad x^* \quad f, h$

$$\begin{aligned} f_i(x^* + \Delta x, u^* + \Delta u) &= f_i(x^*, u^*) + \frac{\partial f_i}{\partial x}|_* \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial x_n}|_* \Delta x_n \\ &+ \frac{\partial f_i}{\partial u_1}|_* \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial u_r}|_* \Delta u_r + O(\Delta x)^2 + O(\Delta u)^2 + \dots \end{aligned} \quad ( )$$

$$\left( \quad \Big|_* \right)$$

$$\begin{aligned} & u, x \quad \Delta x, \Delta u \\ f_i(x^* + \Delta x, u^* + \Delta u) &\approx \frac{\partial f_i}{\partial x}|_* \Delta x + \frac{\partial f_i}{\partial u}|_* \Delta u \end{aligned} \quad ( )$$

$$\begin{cases} \Delta \dot{v} = -\frac{mg}{M} \Delta \theta + \frac{\Delta F}{M} \\ \Delta \dot{\omega} = \frac{(M+m)g}{M\ell} \Delta \theta - \frac{\Delta F}{m\ell} \\ \Delta \dot{x} = \Delta v \\ \Delta \dot{\theta} = \Delta \omega \end{cases} \quad (1)$$

نمایش سیستم به صورت تابع تبدیل

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial \ell} &= -\frac{C}{2A} \frac{u}{\sqrt{\ell}} \rightarrow \left. \frac{\partial f}{\partial \ell} \right|_* = -\frac{c}{2A} \frac{F_d}{c\sqrt{\ell_d}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\ell_d}} = -\frac{F}{2A\ell_d} \\ \frac{\partial f}{\partial u} &= -\frac{C}{A} \sqrt{\ell} \rightarrow \left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_* = -\frac{C}{A} \sqrt{\ell_d} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial f}{\partial F_{in}} = \frac{1}{A} \rightarrow \left. \frac{\partial f}{\partial F_{in}} \right|_* = \frac{1}{A} \quad (3)$$

$$\Delta \dot{\ell} = \left( -\frac{F_d}{2A\ell_d} \right) \Delta \ell - \left( \frac{c}{A} \sqrt{\ell_d} \right) \Delta u + \frac{1}{A} \Delta F_{in} \quad (4)$$

مثال ۲: پاندول معکوس

(MIMO )

LTI

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} s x(s) &= A x(s) + B u(s) \\ y(s) &= C x(s) + D u(s) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} x(s) &= (sI - A)^{-1} Bu(s) \\ y(s) &= [C(sI - A)^{-1} B + D] u(s) \end{aligned} \quad (7)$$

$$H(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = C(sI - A)^{-1} B + D \quad (8)$$

مثال: تابع تبدیل سیستم زیر را بدست آورید:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -2 & -3 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \quad D = 0 \quad (9)$$

$$H(s) = C(sI - A)^{-1} B + D$$

$$x^* = \theta^* = 0$$

$\theta$

$$\sin \theta \approx \theta, \cos \theta \approx 1 - \frac{1}{2}\theta^2 \quad (10)$$

$$L = \frac{1}{2} M \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m (\dot{x} + l \dot{\theta})^2 - 2v_0 - mg(l - \frac{1}{2}\theta^2) \quad (11)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i \quad (12)$$

$$\begin{cases} (M+m)\ddot{x} + m\ell\ddot{\theta} = F \\ m\ell\ddot{x} + m\ell^2\ddot{\theta} - mg\ell\theta = 0 \end{cases} \quad (13)$$

$\ddot{x}, \ddot{\theta}$

$$\lambda = \frac{F_d}{2A\ell_d} \quad a = -\frac{c}{A}\sqrt{\ell_d} \quad b = \frac{1}{A}$$

⋮

$$s \Delta\ell + \lambda \Delta\ell = a \Delta u + b \Delta F_{in}$$

⋮

$$H_1(s) = \frac{\Delta\ell(s)}{\Delta u(s)} = \frac{a}{S+\lambda}$$

$$H_2(s) = \frac{\Delta\ell(s)}{\Delta F_{in}(s)} = \frac{b}{S+\lambda}$$

⋮

( )

-۳-۴-۱- کنترل سطح سیال در مخزن

$$( )$$

$\ell_d$

( )

u

$(sI - A)^{-1}$

$$sI - A = \begin{bmatrix} s & -1 \\ 2 & s+3 \end{bmatrix}$$

$$(sI - A)^{-1} = \frac{1}{s(s+3)+2} \begin{bmatrix} s+3 & 1 \\ -2 & s \end{bmatrix} = \frac{1}{(s+1)(s+2)} \begin{bmatrix} s+3 & 1 \\ -2 & s \end{bmatrix}$$

$$H(s) = [1 \quad 0] \frac{1}{(s+1)(s+2)} \begin{bmatrix} s+3 & 1 \\ -2 & s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} + 0$$

$$= \dots = \frac{s+4}{(s+1)(s+2)}$$

**مثال ۲:** سرو موتور DC

DC

$T_L, v$

$\theta$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 4.438 \\ 0 & -12 & -24 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -7.396 \\ 20 & 0 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Matlab      ss2zp      ss2tf

$$\frac{\theta(s)}{v(s)} = \frac{88.76}{s(s+21.526)(s+2.474)}$$

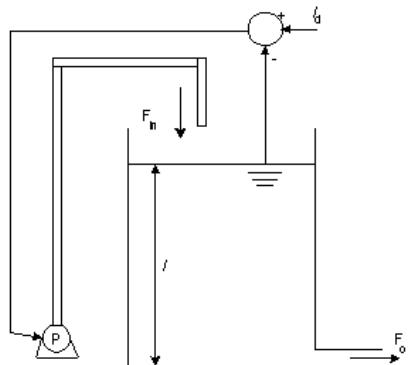
$$\frac{\theta(s)}{T_L(s)} = \frac{-7.396(s+24)}{s(s+21.526)(s+2.474)}$$

**مثال ۳:** ارتفاع آب در مخزن روباز

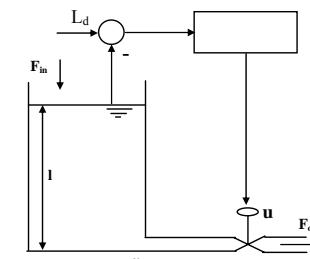
$$\dot{\Delta\ell} = \left(-\frac{F_d}{2A\ell_d}\right) \Delta\ell - \left(\frac{c}{A}\sqrt{\ell_d}\right) \Delta u + \frac{1}{A} \Delta F_{in}$$

$b, a, \lambda$

$$\dot{\Delta\ell} = -\lambda \Delta\ell + a \Delta u + b \Delta F_{in}$$



شکل ۳-۱۱ کنترل ارتفاع آب در مخزن رو باز توسط پمپ



شکل ۳-۹ کنترل ارتفاع آب در مخزن رو باز

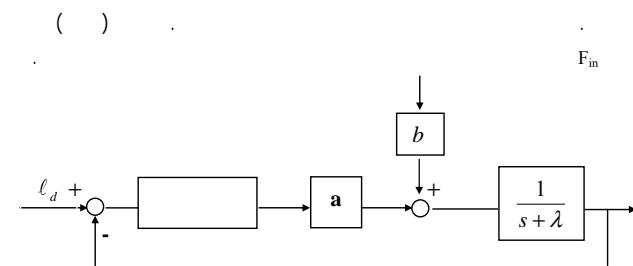
شکل ۳-۴-۲ کنترل سطح مخزن توسط پمپ

$$F_{in} - F_0 = A\dot{\ell}$$

( )

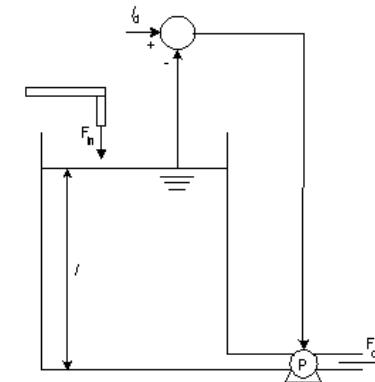
$$\rho g \ell$$

( )

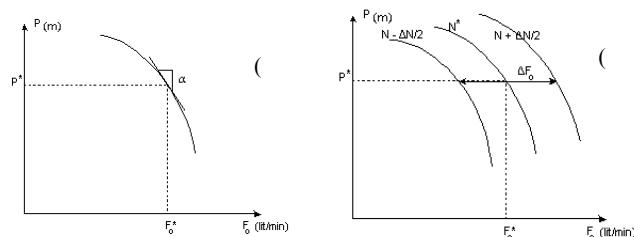


شکل ۳-۱۰ دیاگرام بلوکی کنترل ارتفاع آب در مخزن رو باز

$$\begin{aligned}
 & F_0 = F_0(P, N) \\
 & \Delta F_0 = \frac{\partial F_0}{\partial P} \Big|_{\text{constant}} \Delta P + \frac{\partial F_0}{\partial N} \Big|_{\text{constant}} \Delta N = \alpha \Delta P + \beta \Delta N \\
 & \alpha, \beta \\
 & \ell_d \\
 & \alpha = \rho g \ell_d \\
 & N^* \quad P^* = \rho g \ell_d \\
 & (N^*, P^*) \\
 & \boxed{\alpha = \frac{\partial F_0}{\partial P} \Big|_{P=P^*, N=N^*} = (N^*, P^* \sqrt{2})}
 \end{aligned}$$



شکل ۳-۱۲ کنترل دبی خروجی آب در مخزن روباز توسط پمپ

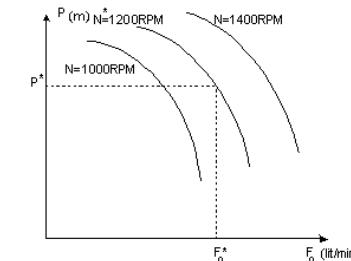


شکل ۳-۱۴ تعیین مقادیر خطی تابع دبی بر حسب متغیرهای فشار و سرعت پمپ

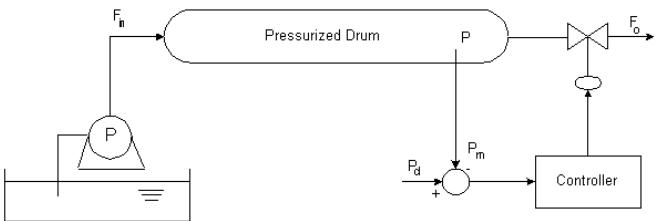
$$\boxed{\beta = \frac{\Delta F_0}{\Delta N} \Big|_{P=P^*=\text{const}}}$$

$$N^* - \frac{\Delta N}{2}, N^* + \frac{\Delta N}{2}$$

(performance specification)



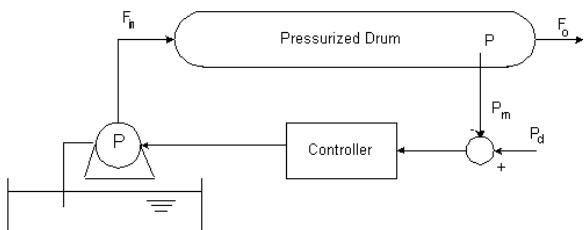
شکل ۳-۱۳ منحنی شاخص عملکرد یک پمپ



شکل ۳-۱۶ کنترل سطح فشار درام توسط تنظیم دبی خروجی

(demand)

(



شکل ۳-۱۷ کنترل سطح فشار درام توسط تنظیم دبی ورودی بوسیله پمپ

- مدلسازی و تحلیل مدل

(

$$\Delta F_{in} - (\alpha \Delta P + \beta \Delta N) = A \Delta \ell \quad ( )$$

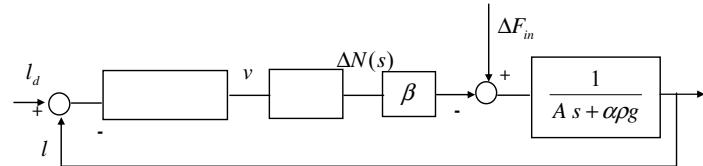
$$\Delta F_{in} - \alpha \rho g \Delta \ell - \beta \Delta N = A \Delta \ell \quad ( )$$

$$(A s + \alpha \rho g) \Delta \ell(s) = \Delta F_{in} - \beta \Delta N(s) \quad ( )$$

$$\Delta \ell(s) = \frac{1}{A s + \alpha \rho g} \Delta F_{in}(s) - \frac{\beta}{A s + \alpha \rho g} \Delta N(s) \quad ( )$$

$\Delta N$

$\Delta F_{in}$



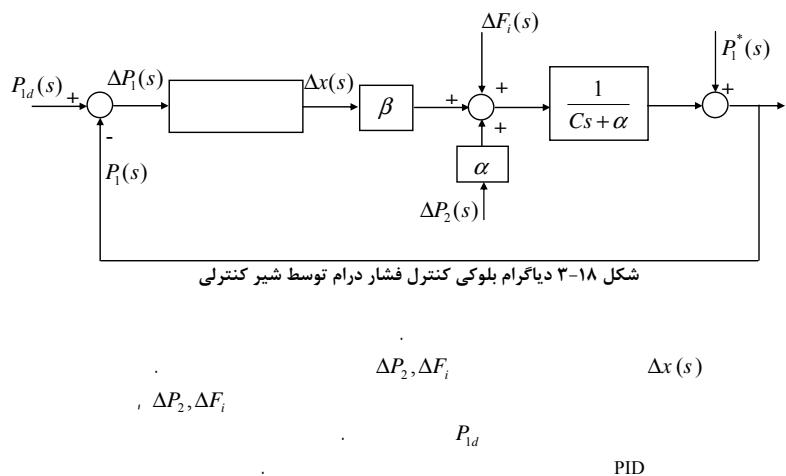
شکل ۳-۱۵ دیاگرام بلوکی کنترل سطح مخزن توسط تنظیم سرعت پمپ

۳-۴-۳- کنترل فشار درام (مخزن بسته)

$$F_i - F_o = C \dot{P}_l \quad ( )$$

(Flow demand)

(



۴-۴-۳- کنترل دبی جریان در خط لوله

$$F_o = \frac{\sqrt{(P_1 - P_2)/\rho}}{R(x)} = \frac{k}{R(x)} \sqrt{P_1 - P_2} \quad (1)$$

R(x)  
spool

$P_1, P_2, R(x)$

$F_o$

$$F_o = F_o(P_1, P_2, R(x)) \quad (2)$$

$$\Delta F_o \equiv \left. \frac{\partial F_o}{\partial P_1} \right|_* \Delta P_1 + \left. \frac{\partial F_o}{\partial P_2} \right|_* \Delta P_2 + \left. \frac{\partial F_o}{\partial R} \right|_* \Delta R \quad (3)$$

$$\Delta F_o \equiv \left. \frac{\partial F_o}{\partial P_1} \right|_* \Delta P_1 + \left. \frac{\partial F_o}{\partial P_2} \right|_* \Delta P_2 + \left. \frac{\partial F_o}{\partial x} \right|_* \Delta x \quad (4)$$

$$\Delta F_o \equiv \alpha \Delta P_1 - \alpha \Delta P_2 + \beta \Delta x \quad (5)$$

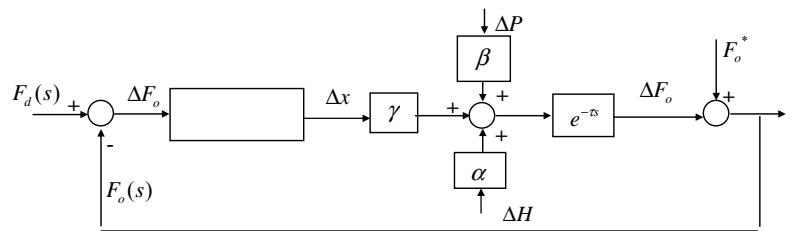
$$\alpha = \frac{k}{R(x^*)} \cdot \frac{1}{2\sqrt{P_1^* - P_2^*}}, \quad \beta = \frac{-k \sqrt{P_1^* - P_2^*}}{R^2(x^*)} \cdot \left. \frac{dR(x)}{dx} \right|_{x=x^*} \quad (6)$$

$\alpha, \beta$

$$\Delta F_i + \alpha(\Delta P_1 - \Delta P_2) + \beta \Delta x = C \Delta \dot{P}_1 \quad (7)$$

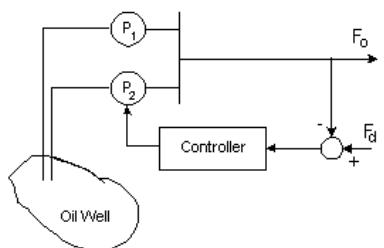
$$(Cs + \alpha)\Delta P_1(s) = \Delta F_i(s) - \alpha \Delta P_2(s) + \beta \Delta x(s) \quad (8)$$

$$\Delta P_1(s) = \frac{1}{Cs + \alpha} \Delta F_i(s) - \frac{\alpha}{Cs + \alpha} \Delta P_2(s) + \frac{\beta}{Cs + \alpha} \Delta x(s) \quad (9)$$

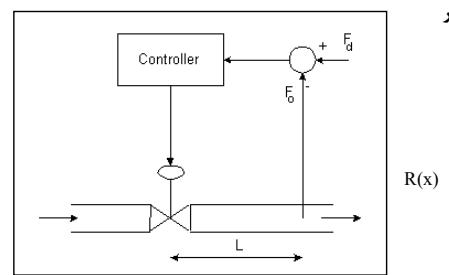


شکل ۳-۲۰ دیاگرام بلوکی کنترل دبی در خط لوله توسط شیر کنترلی

### ب) کنترل دبی توسط پمپ



شکل ۳-۲۱ کنترل دبی خط لوله در مقطع ورود به خط



شكل ٣-١٩ كنترل دبي خط لوله توسط شير كنترلي

$$F_o = \frac{1}{R(x)} \sqrt{2g(\Delta h) + \frac{2\Delta p}{\rho}} \quad ( )$$

$$\Delta F_o \equiv \frac{\partial F_o}{\partial \Delta h} \Big|_{\Delta h} \Delta h + \frac{\partial F_o}{\partial \Delta P} \Big|_{\Delta P} \Delta P + \frac{\partial F_o}{\partial \Delta X} \Big|_{\Delta X} \Delta X \quad ( )$$

$$\Delta F_o = \alpha \Delta h + \beta \Delta P + \gamma \Delta X \quad ( )$$

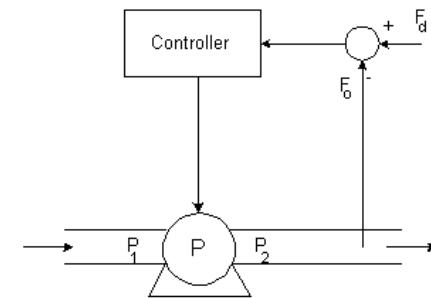
$$\begin{array}{ccccc} & \mathbf{A} & & \mathbf{x(s)} & \\ \tau = L/v & \mathbf{v} & \mathbf{L} & & \mathbf{B} \\ . & & \mathbf{B} & & \end{array}$$

$$G = e^{-\frac{2\pi}{\lambda}} \quad ( )$$

$$q = K\Delta\theta \Rightarrow R_T = \frac{1}{K} = \frac{\Delta\theta}{q} = \frac{\Delta\theta}{C_T} \quad ( )$$

$$C_T = \frac{1}{\Delta\theta} \int q dt = \frac{\Delta Q}{\Delta\theta} = \frac{\Delta Q}{\Delta h} \quad ( )$$

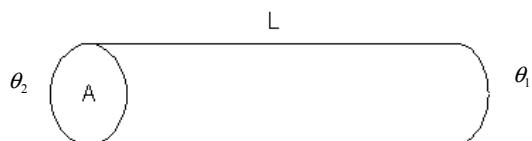
Conduction ۳-۵-۱ هدایت حرارتی



شکل ۳-۲۲ کنترل دبی خط لوله توسط پمپ

$$\Delta h \quad , \Delta P \quad N$$

$$K = \frac{kA}{\ell} \quad ( )$$



شکل ۳-۲۳ مدل یک المان انتقال حرارت

$$R_T = \frac{\ell}{kA} \quad ( )$$

$$\theta_1 - \theta_2 = q \cdot \frac{\ell}{kA} \quad ( )$$

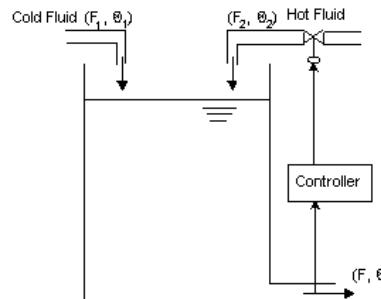
۳-۵ مدلسازی فرآیندهای حرارتی

$$q(J/sec) \quad ( ) \quad \theta(^oC) \quad ( ) \\ ( ) \quad C_T (J/^oC) \quad R_T (^oC sec/J) \quad ( ) \\ K$$

### ۳-۵-۲- انتقال حرارت جابجایی Convection

$F_2, F_1 \quad \theta_2 < \theta_1 \quad \theta_2, \theta_1$

$F \quad \theta$



شکل ۳-۲۴ کنترل دما توسط مخلوط کردن سیالات و کنترل دبی سیال سرد

$$F_2 \\ F_1, F_2 \\ ( \quad F \quad F_1 + F_2 \quad )$$

$$K = \frac{hA}{\ell} \quad ( \quad )$$

$h \quad A \quad \ell$

### ۳-۵-۳- انتقال حرارت تشعشع

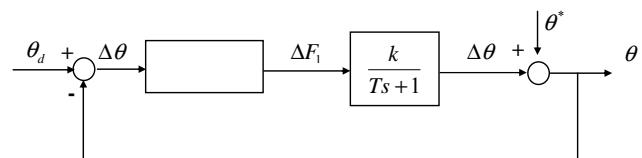
$$q = \epsilon \delta A (\Delta \theta)^4 \quad ( \quad )$$

$\epsilon \quad \text{Stephan-Boltzman} \quad \delta \quad A$

$$\Delta \theta \quad q$$

### ۳-۵-۴- مکانیزم فرآیندهای انتقال حرارت

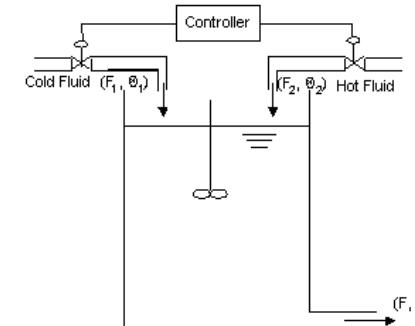
$$\begin{aligned} \gamma_1 \rho_1 \theta_1^* \Delta F_1 + \gamma_2 \rho_2 \theta_2^* \Delta F_2 - \gamma \rho F^* \Delta \theta &= \gamma \rho V \frac{d(\Delta \theta)}{dt} \quad ( ) \\ (\frac{\gamma_1 \rho_1 \theta_1^*}{\gamma \rho F^*}) \Delta F_1 + (\frac{\gamma_2 \rho_2 \theta_2^*}{\gamma \rho F^*}) \Delta F_2 &= \frac{V}{F^*} \Delta \dot{\theta} + \Delta \theta \quad ( ) \\ k_1 \Delta F_1 + k_2 \Delta F_2 &= T \Delta \dot{\theta} + \Delta \theta \quad ( ) \\ k_1 \Delta F_1(s) + k_2 \Delta F_2(s) &= (T s + 1) \Delta \theta \quad ( ) \\ F_1 + F_2 = F = cte \Rightarrow \Delta F_1 + \Delta F_2 &= 0 \quad \Delta F_2(s) = -\Delta F_1(s) \quad ( ) \\ \frac{\Delta \theta}{\Delta F_1(s)} &= \frac{k_1 - k_2}{Ts + 1} = \frac{k}{Ts + 1} \quad ( ) \end{aligned}$$



شکل ۳-۲۶ دیاگرام بلوکی کنترل دما مخلوط کردن دو سیال

ب) تبادل حرارتی توسط رادیاتور

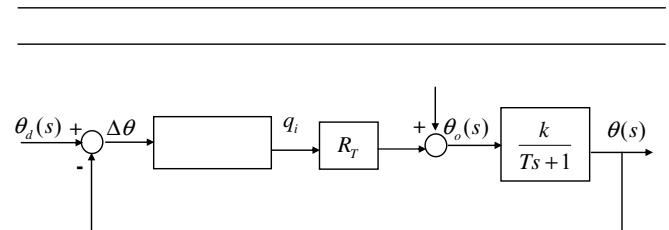
$$\begin{array}{ccccc} \dot{q}_1 & & \theta_0 & & \theta \\ q_o & & C_T & & R_T \\ & & q_o = o, R_T = \infty & & \end{array}$$



شکل ۳-۲۵ کنترل دما توسط مخلوط کردن سیالات و کنترل نسبت ورود سیال سرد و گرم

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{\gamma_1 \rho_1 F_1 \theta_1 + \gamma_2 \rho_2 F_2 \theta_2}{\gamma \rho F}, \quad ( ) \\ (\gamma_1 \rho_1 F_1 \theta_1 + \gamma_2 \rho_2 F_2 \theta_2) - (\gamma \rho F \theta) &= \gamma \rho V \frac{d\theta}{dt} \quad ( ) \\ F = F^* & \quad \theta_1 = \theta_1^*, \theta_2 = \theta_2^* \quad . \\ F_1 = F_1^* + \Delta F_1, \quad F_2 = F_2^* + \Delta F_2, \quad \theta = \theta^* + \Delta \theta & \quad \theta, F_2, F_1 \quad ( ) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \gamma_1 \rho_1 (F_1^* + \Delta F_1) \theta_1^* + \gamma_2 \rho_2 (F_2^* + \Delta F_2) \theta_2^* - \gamma \rho F (\theta^* + \Delta \theta) &= \gamma \rho V \frac{d(\theta^* + \Delta \theta)}{dt} \quad ( ) \end{aligned}$$

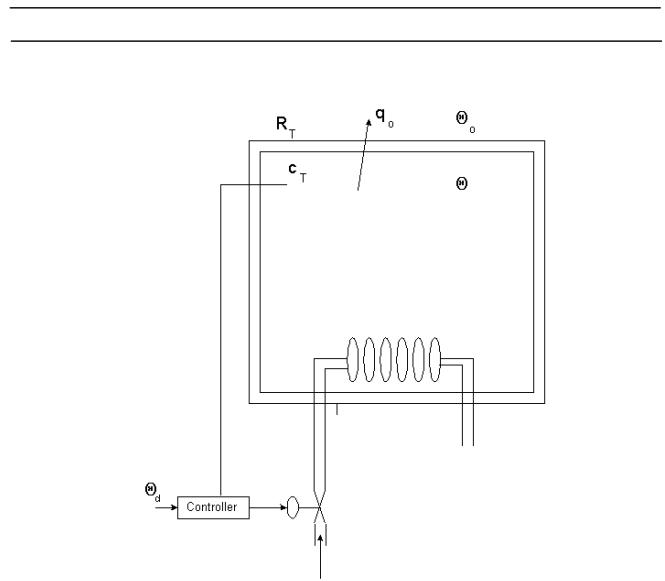


شکل ۳-۲۸ دیاگرام بلوکی کنترل دمای اطاق توسط رادیاتور

$\theta_0$

$q_i$

۳-۶- جمع بندی



شکل ۳-۲۷ کنترل دما اطاق توسط رادیاتور

$$q_i - q_0 = C_T \frac{d\theta}{dt} \quad ( )$$

$$q_0 = \frac{\theta - \theta_0}{R_T} \quad ( )$$

$$\theta(s) = \frac{R_T}{1 + R_T C_T s} q_i(s) + \frac{1}{1 + R_T C_T s} \theta_0(s) \quad ( )$$

٣-٣ سرو موتور DC و هارمونیک درایو

$$k \quad \text{DC}$$

$$K(\theta_1 - \theta_2)$$

مسائل  
٣-١

DC

$$\dot{\Delta} = \Omega \quad \Delta = \theta_1 - \theta_2$$

$$\Delta \quad V$$

$k=500\text{Nm/rad}$

(الف)

(ب)

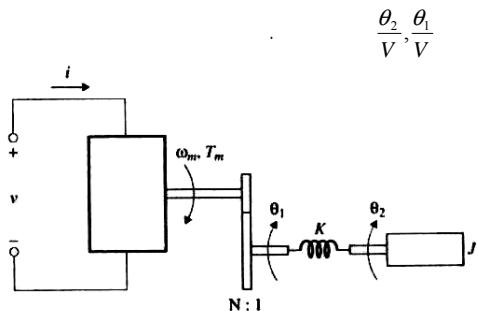
DC

Matlab & Simulink

(پ)

DC

(ت)

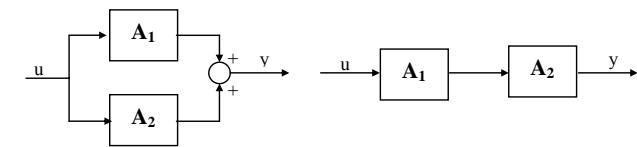


شكل ٣-٣١ سرو موتور DC و هارمونیک درایو

٣-٤ کنترل سرعت غلطک

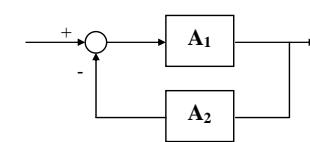
$$A_1 : \begin{cases} \dot{x}_1 = A_1 x_1 + B_1 u_1 \\ y_1 = C_1 x_1 + D_1 u_1 \end{cases} \quad A_2 : \begin{cases} \dot{x}_2 = A_2 x_2 + B_2 u_2 \\ y_2 = C_2 x_2 + D_2 u_2 \end{cases}$$

$$y, u \quad x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$



شكل ٣-٢٩ ترکیب سری و موازی دو سیستم

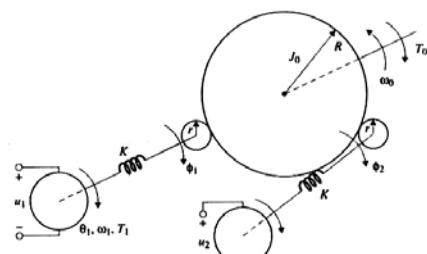
٣-٢



شكل ٣-٣٠ ترکیب فیدبک دو سیستم

DC

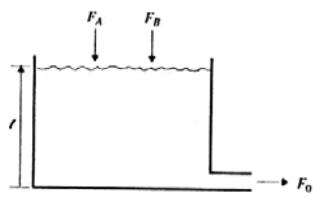
$T_o$



شكل ٣-٣٢ کنترل سرعت غلطک توسط دو موتور

٣-٥ کنترل غلظت و ارتفاع در مخزن

( ) A B,A B



شكل ٣-٣٣ کنترل غلظت و ارتفاع مایع

$$C_A = \frac{V_A}{V_T} \quad A$$

$$C_A F_0 \quad A$$

(الف)

$$\frac{\omega_0}{T_0}, \frac{\omega_0}{u_2}, \frac{\omega_0}{u_1} \quad (\text{س})$$

k J\_m

(الف)

$$\begin{aligned} & T_2, T_1 & \dot{\omega}_2, \dot{\omega}_1 \\ & R/r & \theta_1 - \varphi_1, \theta_2 - \varphi_2 \\ & & r/R \\ & \Delta_1 = \theta_1 - \varphi_1, \Delta_2 = \theta_2 - \varphi_2 \\ & \omega_o, \omega_2, \omega_1 & \dot{\Delta}_2, \dot{\Delta}_1 \\ & & \dot{\varphi}_1 = \dot{\varphi}_2 = \frac{-R}{r} \omega_o \end{aligned}$$

R/r

r/R

\Delta\_1

\Delta\_2

\dot{\Delta}\_1

\dot{\Delta}\_2

\dot{\varphi}\_1

\dot{\varphi}\_2

\omega\_o

\omega\_1

\omega\_2

\theta\_1

\theta\_2

\varphi\_1

\varphi\_2

$$\begin{aligned} & R_a & K_m \\ & T_0, u_2, u_1 & \omega_0, \omega_2, \omega_1, \Delta_2, \Delta_1 \end{aligned}$$

(ب)

$$Km = 6.0 \text{ Nm/A}, Ra = 0.2 \Omega, J_m = 1 kgm^2$$

$$K = 7.5 \times 10^4 \text{ Nm/rad}, J_0 = 10^4 kgm^2, R = 1 \text{ m}, r = 0.07 \text{ m}$$

(ج)

$$\begin{aligned} & \omega_1(0) = \omega_2(0) = 66.68 \text{ rad/s}, \omega_0(0) = 4.67, \Delta_1(0) = \Delta_2(0) = 0 \\ & u1 = u2 = 4v \end{aligned}$$

$$T_0 = 1000 \text{ Nm}$$

$$\frac{\omega_0}{T_0}, \frac{\omega_0}{u_2}, \frac{\omega_0}{u_1}$$

(س)

$$\begin{array}{ccccc}
 & C_1 & & & \\
 k(T_{h_3} - T_{c_1}) & C_1 & H_3 & & \\
 T_{c_1} & Q_{C_1} & & & \\
 \\ 
 F_1, F_2, T_{h_0}, T_{c_0} & & & &
 \end{array}$$

$$V = 0.2 m^3, \rho = 10^3 kg/m^3, C_r = 4180 J/kg^0 c, K = 2 \times 10^5 J/c^\circ \text{ min}$$

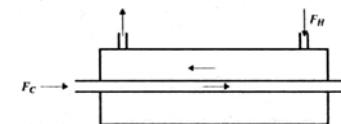
(ب)

$$A = 0.1 m^2 \quad (\text{ب})$$

$$\begin{array}{ll}
 \ell(0) = 0.2m, C_A(0) = 0.5, F_A = F_B = 2 \times 10^{-4} m^3/s, F_0 = 3 \times 10^{-4} m^3/s, 0 \leq t \leq 60s \\
 C_A(0), \ell(0) \quad V_T(0)
 \end{array}$$

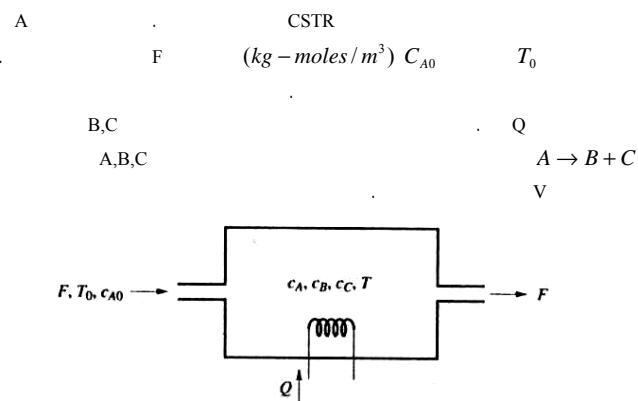
٣-٦ مبدل حراري

$$F_c \quad F_h \quad (\text{ج})$$

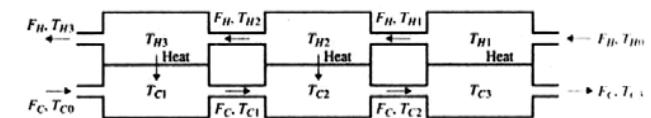


شكل ٣-٤ مبدل حراري با جهت مخالف حركت سیال

٣-٧ راکتور شیمیائی



شكل ٣-٦ راکتور شیمیائی



شكل ٣-٥ تقسیم مبدل حراري به اجزاء محدود

(الف)

$$\begin{array}{l}
 Q_{c_1} = \rho V_{c_1} T_{c_1} \\
 \rho F_c T_{c_1} \quad \rho F_c T_{c_0}
 \end{array}$$

(ب)

$$A = 2.68 \times 10^9 \text{ min}^{-1}, E/R = 7553^0 \text{ k}, \Delta H = 2.07 \times 10^8 \text{ J/kg-moles},$$

$$\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3, C_v = 418 \text{ J/kg}^\circ\text{K}, V = 18 \times 10^{-3} \text{ m}^3, F = 3.6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min},$$

$$C_{A_0} = 3 \text{ kg-moles/m}^3, T_0 = 293^0 \text{ K}$$

$$T_0 = 445^0 \text{ K} \quad (ب)$$

$$Q = -1.2 \times 10^5 \text{ J/min}, C_B(0) = C_c(0) = 0 \quad C_A(0) = 0.05 \text{ kg-moles/m}^3$$

$$0 < t < 10 \quad ( )$$

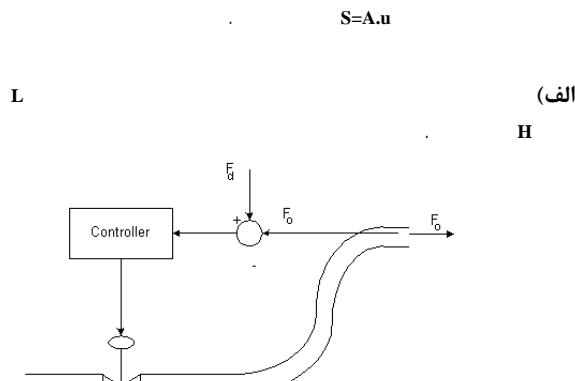
F

$$r (\text{kg-moles/sec})$$

$$\begin{array}{ccccc} & & & C & \\ & & & B & A \\ & & r & & \\ A & C_A & V & . & r = V A C_A e^{-E/RT} \\ & & & R, E, A & T \left( \frac{\text{kg-moles}}{\text{m}^3} \right) \\ & & & & \Delta H \quad \Delta H, r : \end{array}$$

(الف)

۳-۸ کنترل جریان در خط لوله



شكل ۳-۳۷ کنترل جریان در خط لوله

$$N_A(t)$$

$$\begin{array}{ccccccc} A & & & F_{CA_0} \cdot \Delta t & & t & A \\ r \cdot \Delta T & & & & & F_{CA} \cdot \Delta t & \\ & & & N_A(t + \Delta t) & & B, C & A \\ & & & & & t + \Delta t & A \\ & & & & & & N_A(t) \\ & & & & & & N_A \\ C_A & v & & C_A & & C_C C_B & \\ & & & & & & r \Delta T \\ & & & & & & F_{C_C} \Delta T, F_{C_B} \Delta T \\ \Delta T & & & & & & \\ & & & & & & \Delta T \\ & & & & & & H(t) = \rho V C_v T(t) \\ & & & & & & F \rho C_v T \Delta t \\ & & & & & & Q \Delta t \\ & & & & & & r \cdot \Delta H \cdot \Delta t \\ H(t) & & & H(t + \Delta t) & & & \\ \Delta t \rightarrow 0 & & & \Delta T & & & \\ & & & & & & H(t) \end{array}$$

$$C_A = N_A / v$$

$$C_C C_B$$

$$r \Delta T$$

$$F_{C_C} \Delta T, F_{C_B} \Delta T$$

$$\Delta T$$

$$H(t) = \rho V C_v T(t)$$

$$F \rho C_v T \Delta t$$

$$Q \Delta t$$

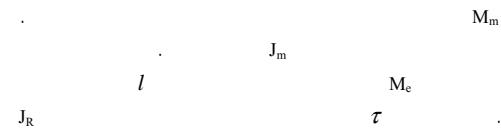
$$r \cdot \Delta H \cdot \Delta t$$

$$H(t + \Delta t)$$

$$\Delta T$$

$$H(t)$$

۳-۱۰ بندباز



شکل ۳-۳۹ مدل دینامیکی یک بند باز

$$M_m = 75\text{kg}, J_m = 3.2\text{kgm}^2, M_e = 2\text{kg}, J_R = 1.5\text{kgm}^2, L = 1.8\text{m}, \ell = 1\text{m}, \omega_b = \dot{\theta}, \omega_p = \dot{\phi}$$

۳-۱۱ کنترل غلظت و ارتفاع در مخزن

$$C_A^*, \ell^*, F_B^*$$

$$F_o^*, F_A^*$$

(

$$A = 4 \times 10^{-2} \text{ m}, C = 0.9$$

$$H = 100\text{m}$$

$$L = 1000\text{m}$$

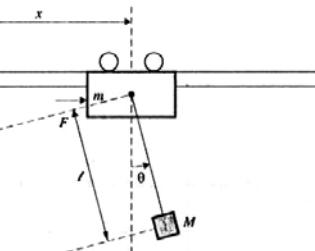
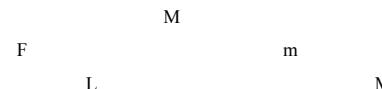
(ب)

$$\rho = 10^3$$

$$L = 1000\text{m} \quad P_0 \quad F(0) = 1\text{m}^3 / \text{s} \quad (ج)$$

$$5 \times 10^{-2} \quad 10^{-2}$$

۳-۹ جرثقیل سقفی



شکل ۳-۳۸ جرثقیل سقفی

$$\ell = 10\text{m}, M = 2000\text{kg}, m = 500\text{kg}$$

$$F = 1000\text{N}$$

٣-١٤ جرثقیل سقفی:

$$( )$$

$$\frac{\theta}{F}, \frac{x}{F}$$

٣-١٥ بندباز:

$$( )$$

$$\frac{\varphi}{\tau}, \frac{\theta}{\tau}$$

٣-١٦ پاندول دوتائی معکوس

m

M

F

$$\ell_1, \ell_2$$

٣-١٢ مبدل حرارتی

$$F_A, F_B, F_o$$

(

$$\ell^* = 0.2m, C_A^* = 0.8, F_B = 5 \times 10^{-5} m^3/s$$

$$\Delta F_A, \Delta F_o, \Delta F_B$$

$$\Delta C_A, \Delta \ell$$

(

$$T_{ho}^*, T_{co}^*, F_A^*, F_c^*$$

(

$$\Delta T_{co}, \Delta T_{ho}, \Delta F_c \quad ( ) \quad \Delta H$$

$$\Delta T_{c3} \quad ( )$$

( )

٣-١٣ راکتور شیمیائی:

$$C_c^*, C_B^*, C_A^*, Q^*$$

$$F^*, T_o^*, T^*, C_{Ao}^*$$

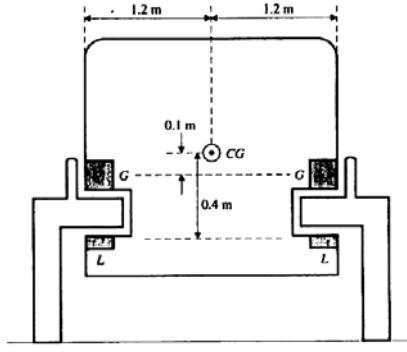
$$F, C_{Ao}, T_o, Q$$

$$C_A = 3 \text{ kg moles/m}^3, T^* = 346^\circ K, F = 3.6 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ min}$$

$$\Delta C_{Ao}, \Delta F$$

$$\Delta Q$$

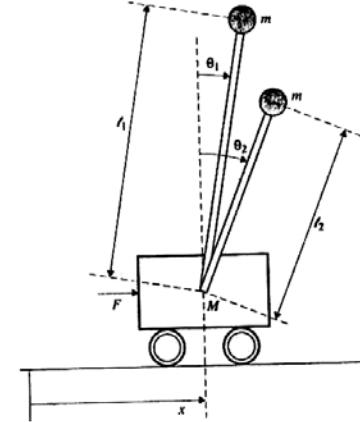
$$\Delta T, \Delta C_A, \Delta C_B, \Delta C_c$$



شکل ۳-۴۱ مقطعی از یک وسیله نقلیه دارای سیستم تعليق مغناطیسی

$$i \frac{k i^2}{S^2} \\ S \\ Z_G(t) \\ F_w \\ \vdots \\ F_v = 0, M = 4000 \text{ kg}$$

$$F_{L1}^*, F_{L2}^* \\ F_v = 0, M = 4000 \text{ kg} \\ i^* \\ 5.4 \times 10^{-3} \frac{i^2}{s^2} \\ S^* = 0.014 \\ S^*, 5000N = F_{G2}^* = F_{G1}^*$$



شکل ۳-۴۰ پاندول دوتائی معکوس

$$\ell_1, \ell_2 \\ \theta_2, \theta_1, \frac{x}{F}, \frac{\ell_1}{F}, \frac{\ell_2}{F} \\ M=m=1 \\ \ell_2 = 1m, \ell_1 = 1.5m$$

Maglev ۳-۱۷

$$\text{km/h} \\ \text{Magnetically } " \\ \text{Levitated} \\ \text{yaw, pitch } (\theta)$$

۳-۱۸

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x, u) \\ y &= h(x, u) \\ y^*(t), u^*(t), x^*(t)\end{aligned}$$

$$\Delta x(t) = x(t) - x^*(t) \quad \Delta u(t) = u(t) - u^*(t) \quad \Delta y(t) = y(t) - y^*(t)$$

$\Delta y, \Delta u, \Delta x$

(

)

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -x_1 - x_2^3 + x_2 u \\ y &= x_1\end{aligned}$$

$$0 \leq t \leq 5$$

$$\begin{aligned}x^*(t) \\ u(t) = \tau, x_2(0) = o, x_1(0) = 1\end{aligned}$$

$$\Delta F_{G2}, \Delta F_{G1}, \Delta F_{L2}, \Delta F_{L1}$$

$$\ddot{\theta}, \ddot{y}, \ddot{z}$$

ZG

F<sub>w</sub>

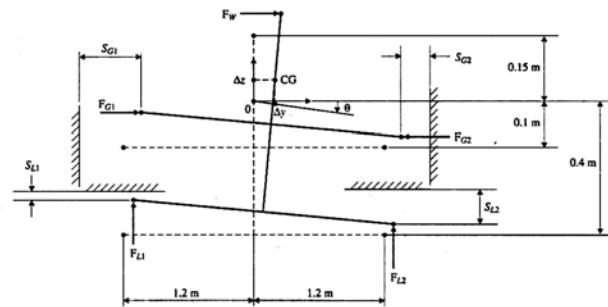
kgm<sup>2</sup>

$$u = i^2$$

$$\Delta F, \Delta S, \Delta u$$

$$(\theta, \Delta y, \Delta z, Z_G)$$

$\Delta s$



شکل ۳-۴۲ دیاگرام فوائل هوانی و نیرو ها - نمایش حالت تعادل با خطوط نقطه چین.

$$\Delta u_{Lc} = \frac{1}{2}(\Delta u_{L1} + \Delta u_{L2}) \quad \Delta u_{Gc} = \frac{1}{2}(\Delta u_{G1} + \Delta u_{G2})$$

$$\Delta u_{LD} = \frac{1}{2}(\Delta u_{L1} - \Delta u_{L2}) \quad \Delta u_{GD} = \frac{1}{2}(\Delta u_{G1} + \Delta u_{G2})$$

$$\Delta \theta, \Delta y, \Delta z$$

## فصل چهارم

روشهای  
شناسائی فرآیند

- [1] Astrom, Karl J. and Hagglund T., *PID Controllers: theory, design, and tuning*, 2<sup>nd</sup> Ed. Instrument Society of America, 1995.
- [2] Belanger Pierre R., *Control Engineering, a modern approach*, Saunders College Publishing, 1995.
- [3] Close C.M. and Fredrick D.K., *Modeling and Analysis of Dynamic System*, Houghton Mifflin, 1993.
- [4] Hagglund T., *Process control in Practice*, Chartwell-Bratt Ltd, U.K., 1991
- [5] Luyben W.L., *Process Modeling, Simulation and Control for Chemical Engineers*, 2<sup>nd</sup> Ed., McGraw-Hill, 1986.
- [6] Marlin, T. E., *Process control: designing processes and control systems for dynamic performance*, McGraw-Hill, 1995
- [7] Seborg D.E., Edgar T.F. and Mellichamp D.A., *Process Dynamics and Control*, Wiley, New York, 1989.
- [8]

## فصل چهارم

روشهای  
شناسائی فرآیند

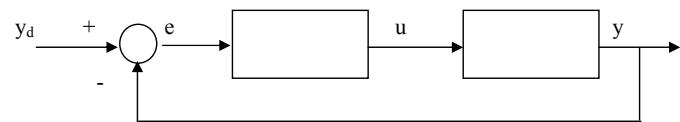
- [1] Astrom, Karl J. and Hagglund T., *PID Controllers: theory, design, and tuning*, 2<sup>nd</sup> Ed. Instrument Society of America, 1995.
- [2] Belanger Pierre R., *Control Engineering, a modern approach*, Saunders College Publishing, 1995.
- [3] Close C.M. and Fredrick D.K., *Modeling and Analysis of Dynamic System*, Houghton Mifflin, 1993.
- [4] Hagglund T., *Process control in Practice*, Chartwell-Bratt Ltd, U.K., 1991
- [5] Luyben W.L., *Process Modeling, Simulation and Control for Chemical Engineers*, 2<sup>nd</sup> Ed., McGraw-Hill, 1986.
- [6] Marlin, T. E., *Process control: designing processes and control systems for dynamic performance*, McGraw-Hill, 1995
- [7] Seborg D.E., Edgar T.F. and Mellichamp D.A., *Process Dynamics and Control*, Wiley, New York, 1989.
- [8]

---

---

#### فصل چهارم: روش‌های شناسائی فرآیند

۴-۱ مقدمه



شکل ۱-۴ دیاگرام بلوکی کنترل فرآیند

PID   PD   PI , P

---

---

$h(t)$

$$h(t) : \quad h(t) = \frac{dS(t)}{dt} \quad S(t) :$$

۴-۲-۲ - پاسخ فرکانسی

۴-۲ - مدل‌های دینامیکی

$$y(t) = h(t) * u(t) \rightarrow y(\omega) = H(\omega) \cdot u(\omega) \quad \text{LTI} \quad (\text{transient})$$

۴-۲-۱ - پاسخ گذرا

( ) LTI  
(Convolution Integral)

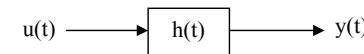
$$H(\omega) = a(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)} \quad ( )$$

$\varphi(\omega)$

$a(\omega)$

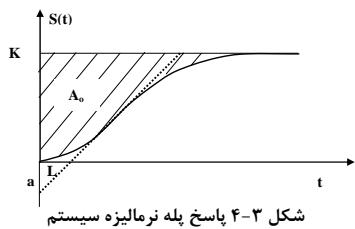
(Bode)

«      »



$$y(t) = u(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(\tau)h(t-\tau)d\tau \quad ( )$$

۴-۳-۱- مدل دو پارامتری یا دو جزئی



(Average resident time)  $T_{ar}$

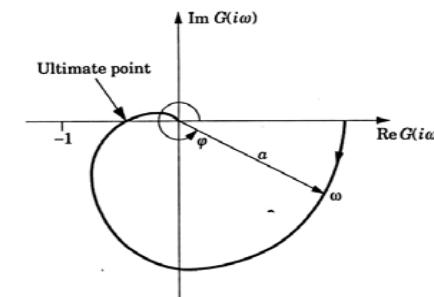
$$T_{ar} = \frac{A_o}{K} \quad ( )$$

$$A_o = \int_0^{\infty} (S(\infty) - S(t)) dt = \int_0^{\infty} (K - S(t)) dt \quad ( )$$

$$G_{2a}(s) = \frac{K}{1 + T_{ar}s} \quad ( )$$

S-shape

$$G_{2b}(s) = \frac{a}{sL} e^{-sL} \quad ( )$$



شکل ۴-۲ دیاگرام نایکویست

Ultimate Point (Z.N.)

روشهای پاسخ پله

۴-۳-۲- مدل‌های سه جزئی

$$G(s) = \frac{K}{1+sT} e^{-sL} \quad ( )$$

deadtime

$$S(t) = K(1 - e^{-(t-L)/T}) \quad ( )$$

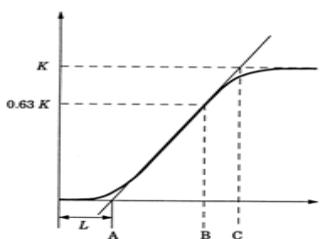
$$T_{ar} = \frac{1}{K} \int_0^{\infty} (S(\infty) - S(t)) dt = L + T \quad ( )$$

$$\tau = \frac{L}{L+T} = \frac{L}{T_{ar}} \quad 0 \leq \tau \leq 1 \quad ( )$$

$\tau$

$\tau \rightarrow 0$

$\tau \rightarrow 1$



شکل ۴-۵- پاسخ پله یک سیستم نمونه جهت تعیین پارامترهای سیستم سه جزئی

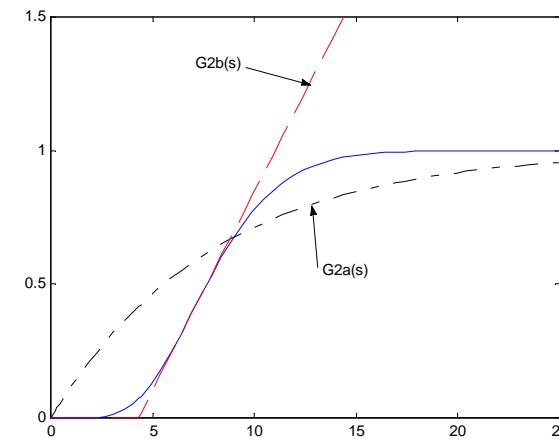
L a K a

$$G(s) = \frac{1}{(s+1)^8} \quad ( )$$

$$G_{2a}(s) = \frac{1}{1+8.0s} \quad T_{ar} \quad K$$

$$G_{2b}(s) = \frac{0.64}{4.3s} e^{-4.3s} \quad G_{2a}$$

$$G_{2b} \quad a$$



شکل ۴-۶- پاسخ پله نرمالیزه سیستم رتبه هشت

$$G_{3b}(s) = \frac{e^{-4.3s}}{1+4.3s} \quad G_{3a}(s) = \frac{e^{-4.3s}}{1+6.7s}$$

0.63K

AC  $T_{ar}$   
0.63K  $T=AB$   
0.63K

نتیجه گیری:

۴-۳-۴- مدل چهار جزئی

$$G(s) = \frac{Ke^{-sL}}{(1+sT_1)(1+sT_2)} \quad ( )$$

L K  
T2 T1  
T2 T1 L K

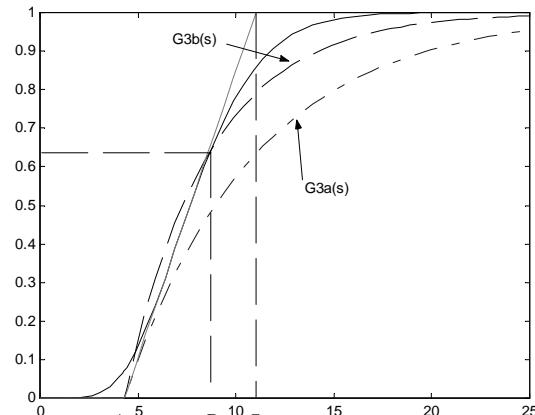
$$S(t) = K \left( 1 + \frac{\left( T_2 e^{-t-L/T_2} - T_1 e^{-t-L/T_1} \right)}{T_1 - T_2} \right) \quad T_1 \neq T_2 \quad ( )$$

T1  
T2  
 $G(s) = \frac{1}{(s+1)^8}$   
0.33K 0.67K  
 $S(6.5)=0.33, S(8.9)=0.67$

مثال:

$$\begin{aligned} & K \quad . \quad C \quad A \\ & \quad . \quad ) \quad . \\ & \quad K \quad L \quad . \quad ( \\ & \quad T_{ar}=L+T \quad T \quad . \quad T_{ar} \\ & \quad . \quad . \quad . \quad . \\ & B \quad ) \quad T_{ar}=B \quad T_{ar}=C \quad . \quad . \quad . \\ & \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \\ & \quad T_{ar}=AB \quad T_{ar}=C \quad . \quad . \quad . \\ & \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \\ & \quad T_{ar}=AC \quad T_{ar}=AB \quad . \quad . \quad . \\ & \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \\ & \quad T \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \end{aligned}$$

$$G(s) = \frac{1}{(s+1)^8}$$



شکل ۶-۴- پاسخ پله سیستم رسته هشت و مدلهای سه جزئی

AC AB

T2 T1

توجه ۲ :

#### ۴-۳-۴- مدل سیستم های انتگرال گیر

S-Shape

$$G(s) = \frac{Ke^{-sL}}{s(1+sT)} \quad ( )$$

: L                    : T                    : K

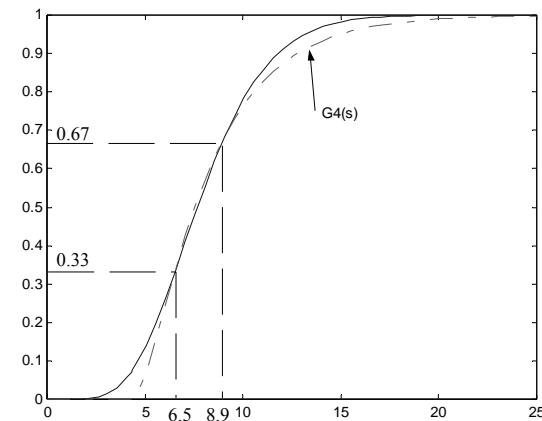
$$S(t) = K \left( t - L - T \left( 1 - e^{-\frac{(t-L)}{T}} \right) \right) \quad ( )$$

T<sub>ar</sub>=L+T                    K  
T, L  
L+T

$$S(L+T) = K \left( L + T - L - T \left( 1 - e^{-\frac{(L+T-L)}{T}} \right) \right) \quad ( )$$

$$= KTe^{-1}$$

$$T = \frac{S(L+T) \cdot e^1}{K} \quad ( )$$



شکل ۴-۷ پاسخ پله سیستم رسته هشت و مدل چهار جزئی

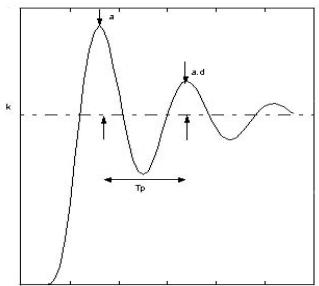
$$0.67 = 1 + \frac{T_2 e^{-(8.9-4.3)/T_2} - T_1 e^{-(8.9-4.3)/T_1}}{T_1 - T_2} \quad ( )$$

$$0.33 = 1 + \frac{T_2 e^{-(6.5-4.3)/T_2} - T_1 e^{-(6.5-4.3)/T_1}}{T_1 - T_2} \quad ( )$$

$$T_1 = 0.93, \quad T_2 = 3.2 \quad ( )$$

$$G(s) = \frac{e^{-4.3s}}{(1+0.93s)(1+3.2s)} \quad ( )$$

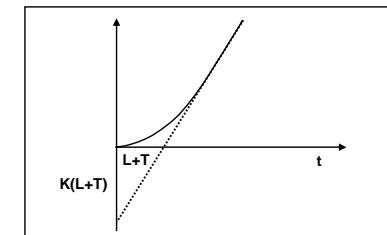
T2 T1                    توجه ۱ :



شکل ۴-۹ پاسخ پله نوسانی یک سیستم

$$\begin{array}{lll} \xi & \omega \\ d & & T_p \\ \hline & K & \\ T_p = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{1-\xi^2}} & d = e^{\frac{-2\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}} & ( ) \\ & & \vdots \\ \omega = \frac{2\pi}{T_p\sqrt{1-\xi^2}} & \xi = \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{2\pi}{\ln d}\right)^2}} & ( ) \\ G(s) = \frac{K\omega^2 e^{-sL}}{s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2} & & L \end{array}$$

جمع بندی:



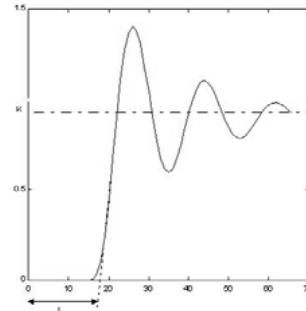
شکل ۴-۸ پاسخ پله سیستم انتگرال گیر

$$\begin{array}{c} \text{S-Shape} \\ ( ) \\ \text{L+T}, K \\ \hline T \end{array}$$

۴-۳-۵ مدل سیستمهای نوسانی

$$G(s) = \frac{K\omega^2}{s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2} \quad ( )$$

$\omega$  :  $K$  :  $\xi$



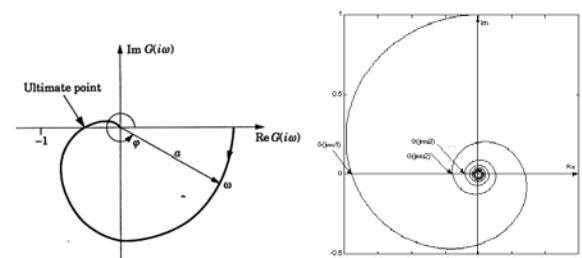
شکل ۴-۱۰ پاسخ پله نوسانی یک سیستم با تاخیر

۴-۴ روش‌های پاسخ فرکانسی

LTI

(Ultimate point)

$G(i\omega_u)$

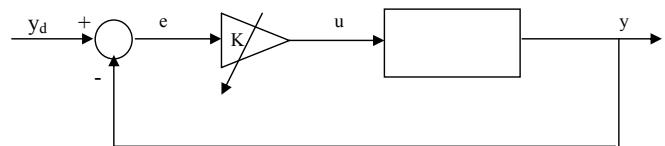


شکل ۴-۱۱ دیاگرام نایکویست و نقطه بحرانی

---

---

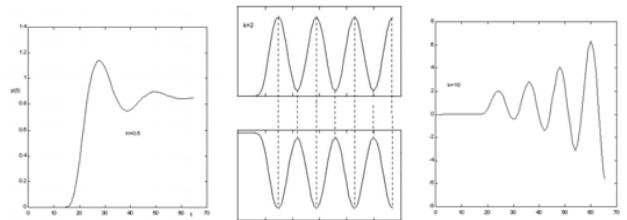
۱-۴-۴- روش پاسخ فرکانسی زیگلر-نیکولز Z.N.



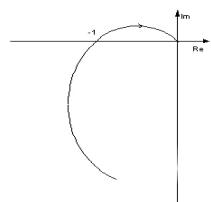
شکل ۱۲-۴ سیستم مدار بسته با کنترل کننده تناصی

Loop )

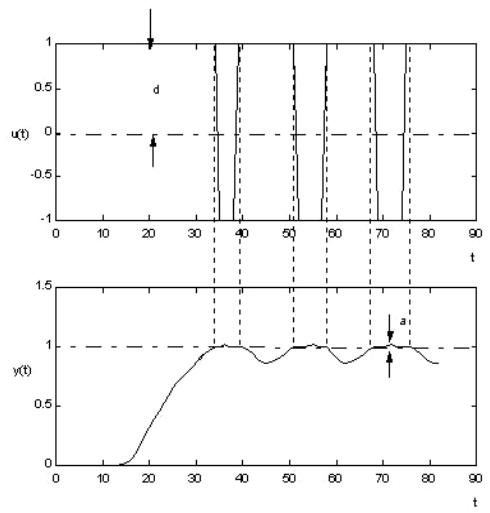
(Gain



شکل ۱۳- پاسخ حلقه بسته سیستم در حالات ناپایداری، مرز ناپایداری و پایداری



$$K_u \cdot G(i\omega_u) = -1$$



شکل ۴-۱۵ شکل ورودی و خروجی فرآیند در روش فیدبک رله

$$G(i\omega_u) = -\frac{\pi a}{4 d}$$

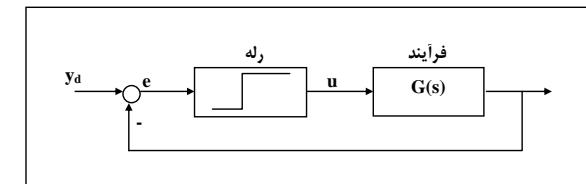
$\omega_u$

توجه:

$$G(i\omega_u) = -\frac{1}{K_u} \quad ( )$$

خلاصه متد:

$$K = \left| \frac{G(i\omega_u)}{G(0)} \right| \quad ( )$$



شکل ۴-۱۶ روش فیدبک رله

Z.N.

$$a = e^{-h/T}$$

$$b_1 = K(1 - e^{-(h-L)/T})$$

$$b_2 = Ke^{-h/T}(e^{L/T} - 1)$$

n)  $n = L$  div  $h$

$$\begin{matrix} & : & ( & h & L \\ y(kh) = ay(kh-h) + b_1 u(kh-nh) + b_2 u(kh-nh-h) & & ( & ) \\ Z & q & & & \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} & : & q \\ q^1 y(kh) = y(kh+h) & & ( & ) \\ q^{-1} y(kh) = y(kh-h) & & & \end{matrix}$$

$$q^n (q-a) y(kh) = (b_1 q + b_2) u(kh)$$

$$\frac{y(kh)}{u(kh)} = \frac{b_1 q + b_2}{q^n (q-a)}$$

$$\begin{matrix} & : & Z \\ H(z) = \frac{y(z)}{u(z)} = \frac{b_1 z + b_2}{z^n (z-a)} & & ( & ) \end{matrix}$$

$$y(kh) + a_1 y(kh-h) + \dots + a_n y(kh-nh) = b_1 u(kh-h) + \dots + b_n u(kh-nh)$$

$$\begin{matrix} & : & q \\ A(q) y(kh) = B(q) u(kh) \rightarrow \begin{cases} A(q) = q^n + a_1 q^{n-1} + \dots + a_n \\ B(q) = b_1 q^{n-1} + b_2 q^{n-2} + \dots + b_n \end{cases} & & ( & ) \\ & : & Z \end{matrix}$$

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b_1 z^{n-1} + b_2 z^{n-2} + \dots + b_n}{z^n + a_1 z^{n-1} + \dots + a_n}$$

$a_i, b_i$

Z.N

(Ultimate Point)  
PID

جمع بندی:

۴-۵- روشهای شناسایی پارامتریک

۴-۵-۱ مدل‌های پارامتریک

A/D

$$G(s) = \frac{Ke^{-sL}}{1+Ts} \quad ) \quad L \leq h \quad h$$

(

$$y(kh) = ay(kh-h) + b_1 u(kh-h) + b_2 u(kh-2h) \quad ( )$$

٢-٥-٤- روش تخمین کمترین مربعات. L.S.

$$Y = \begin{bmatrix} y(h) \\ y(2h) \\ \vdots \\ y(Nh) \end{bmatrix}, \quad \Phi = \begin{bmatrix} \Phi_1^T \\ \Phi_2^T \\ \vdots \\ \Phi_N^T \end{bmatrix}$$

⋮

$$\Phi \cdot \theta = Y$$

Φ                  Φ

N×n                  N

(N>>n)

Least-Squares

$$\{u(kh)\}_{k=1}^N, \quad \{y(kh)\}_{k=1}^N \quad (\quad )$$

$$V(\theta) = \sum_{k=1}^N e^2(kh) \quad (\quad )$$

$$e(kh) = A(q)y(kh) - B(q)u(kh) \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (\quad )$$

$$\theta = (a_1, a_2, \dots, a_n, b_1, b_2, \dots, b_n)^T \quad (\quad )$$

V(θ)                  θ

$$\varphi_k = (-y(kh-h), \dots, -y(kh-nh), u(kh-h), \dots, u(kh-nh))^T \quad (\quad )$$

$$y(kh) = \varphi_k^T \cdot \theta \quad (\quad )$$

$\hat{\theta}$

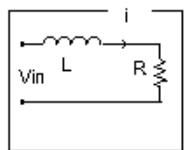
$$\boxed{\Phi^{-I} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \cdot \Phi^T} \quad (\quad )$$

جمع بندی:

$$\begin{cases} y(h) = \varphi_1^T \cdot \theta \\ y(2h) = \varphi_2^T \cdot \theta \\ \vdots \\ y(Nh) = \varphi_N^T \cdot \theta \end{cases} \quad (\quad )$$

θ

۴-۵-۴) مثال(۲) مدل دینامیکی



$$v_{in} = v_L + v_R = L \frac{di}{dt} + Ri \quad ( )$$

RL

L,R

$$Y = \begin{bmatrix} v_{in}^1 \\ v_{in}^2 \\ \vdots \\ v_{in}^N \end{bmatrix}, \quad \Phi = \begin{bmatrix} \frac{di^1}{dt} & i^1 \\ \frac{di^2}{dt} & i^2 \\ \vdots & \vdots \\ \frac{di^N}{dt} & i^N \end{bmatrix}, \quad \theta = [L \ R]^T \quad ( )$$

$$Y = \Phi \cdot \theta \quad ( )$$

L.S. : ( )

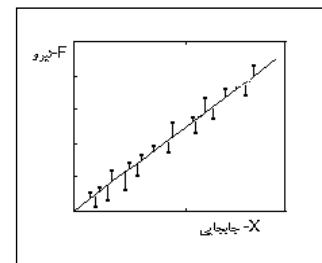
$$\theta = (\Phi^T \Phi)^{-1} \cdot \Phi^T \cdot Y \quad ( )$$

N

۴-۶) خلاصه و جمع بندی

۴-۵-۳) مثال(۱) نمایش گرافیکی روش L.S.

( )



( ) ( )

$$F = K \cdot x \quad ( )$$

N  $\theta = [K]$  ( )

$$Y = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_N \end{bmatrix}, \quad \Phi = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix} \quad ( )$$

$$Y = \Phi \cdot \theta \quad ( )$$

$\theta$  ( )

$$K = \theta = (\Phi^T \Phi)^{-1} \cdot \Phi^T \cdot Y \quad ( )$$

K ( )

---

---

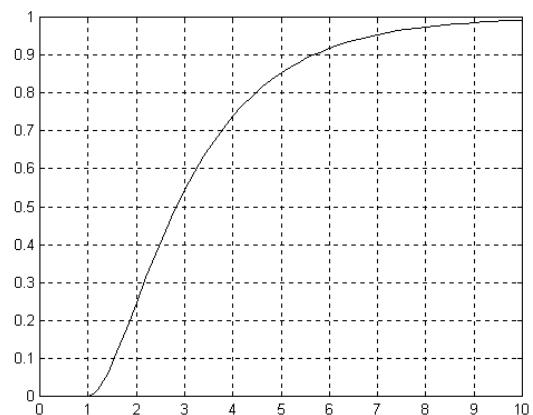
مسائل

$$G(s) = \frac{e^{-s}}{(s+2)(s+3)} \quad -\text{F-1}$$

) .

(

-F-2



-F-3

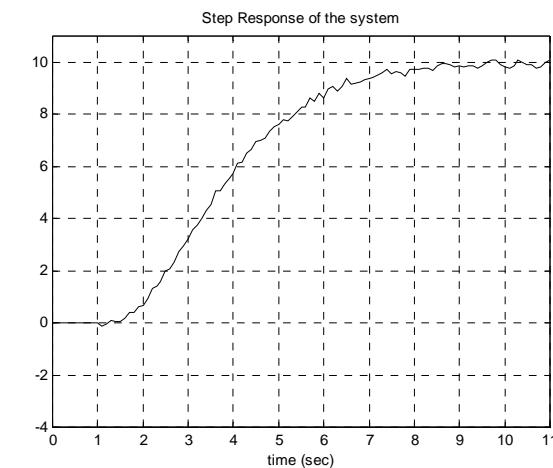
$$J \quad F_d \quad \Phi^{-1} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T$$

K,a  
 $G(s) = \frac{Ke^{-s}}{s+a}$

L.S.  
 PID

$$U = \begin{bmatrix} 0.21 \\ 0.605 \\ 1.01 \\ 1.59 \\ 2.01 \\ 2.05 \end{bmatrix} \rightarrow y = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 5 \\ 10 \end{bmatrix}$$

L.S.



$$S(t) = t - 4 + e^{-(t-3)}$$

-F-F

$$G(s) = \frac{10e^{-s}}{(s+2)^3}$$

-F-D

$$\tau = J \ddot{\theta} + F_d \quad : \quad F_d \quad J \quad \tau$$

$$\ddot{\theta} = [0 \ 1 \ 2 \ 2.5 \ 3]^T \quad \tau = [1 \ 3 \ 5 \ 6 \ 7]^T$$

# فصل پنجم

## طراحی، تنظیم و پیاده سازی

### PID کنترل کنندۀ

- [1] Astrom, Karl J. and Hagglund Tore, *PID Controllers: theory, design, and tuning*, 2<sup>nd</sup> Ed. Instrument Society of America, 1995.
- [2] Coripio A.B., *Tuning of Industrial Control Systems*, Instrument Society of America, 1990.
- [3] Datta, Aniruddha, Ming-Tzu Ho, and Shankar P. Bhattacharyya, *Structure and synthesis of PID controllers*, Springer, 2000.
- [4] Marlin, T. E., *Process control: designing processes and control systems for dynamic performance*, McGraw-Hill, 1995
- [5] McMillan G.K., *Tuning and Control Loop Performance*, 2<sup>nd</sup> Edition, Instrument Society of America, 1983.
- [6] Özbay, Hitay, *Introduction to feedback control theory*, CRC Press, 2000.
- [7] Shinskey F.G., *Process Control Systems: Application, Design and Tuning*, 3<sup>rd</sup> Edition, McGraw-Hill, 1988.
- [8] Tan, Kok Kiong et al., *Advances in PID control*, Springer, 1999
- [9] Wang, Liuping and William R. Cluett, *From plant data to process control : ideas for process identification and PID design*, Taylor & Francis, 2000.
- [10] Yu, Cheng-Ching, *Auto-tuning of PID controllers : relay feedback approach*, Springer, 1999.

# فصل پنجم

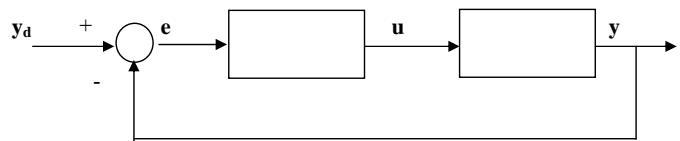
## طراحی، تنظیم و پیاده سازی

### PID کنترل کنندۀ

- [1] Astrom, Karl J. and Hagglund Tore, *PID Controllers: theory, design, and tuning*, 2<sup>nd</sup> Ed. Instrument Society of America, 1995.
- [2] Coripio A.B., *Tuning of Industrial Control Systems*, Instrument Society of America, 1990.
- [3] Datta, Aniruddha, Ming-Tzu Ho, and Shankar P. Bhattacharyya, *Structure and synthesis of PID controllers*, Springer, 2000.
- [4] Marlin, T. E., *Process control: designing processes and control systems for dynamic performance*, McGraw-Hill, 1995
- [5] McMillan G.K., *Tuning and Control Loop Performance*, 2<sup>nd</sup> Edition, Instrument Society of America, 1983.
- [6] Özbay, Hitay, *Introduction to feedback control theory*, CRC Press, 2000.
- [7] Shinskey F.G., *Process Control Systems: Application, Design and Tuning*, 3<sup>rd</sup> Edition, McGraw-Hill, 1988.
- [8] Tan, Kok Kiong et al., *Advances in PID control*, Springer, 1999
- [9] Wang, Liuping and William R. Cluett, *From plant data to process control : ideas for process identification and PID design*, Taylor & Francis, 2000.
- [10] Yu, Cheng-Ching, *Auto-tuning of PID controllers : relay feedback approach*, Springer, 1999.

**فصل پنجم: طراحی، تنظیم و پیاده سازی کنترل کننده PID**

**۱- تعاریف و مفاهیم**



شکل ۱-۵ دیاگرام بلوکی کنترل فرآیند با حلقه فیدبک

$$\begin{array}{ccccccc}
 & & P & & & & \\
 & PD & - & - & & PI & \\
 & PID & & & & & \\
 & & & & & & \\
 & & & & & & \\
 & & & & & & \\
 u(t) = K \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(c) dc + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) & & & & & & \\
 & & ( ) & & & & \\
 & & (e=y_d-y) & & e & & u \\
 & & & & & & \\
 & & K & : P & & & \\
 & & & : D & & & \\
 & & & : I & & & \\
 & & T_d, T_i, K : & PID & & & \\
 & & T_d & & T_i & & K
 \end{array}$$

$$K$$

$$L(s)$$

$$K$$

$$K$$

$$n$$

$$\frac{y}{n} = \frac{L(s)}{1+L(s)}$$

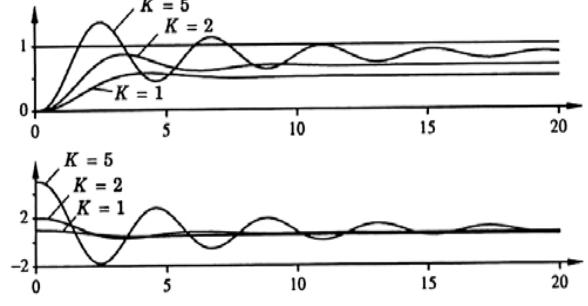
$$L(s)$$

$$K$$

$$%$$

$$K$$

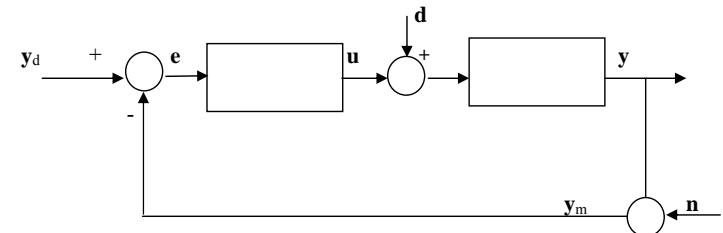
$$K$$



۱-۱-۵- ترم تناوبی کنترل کننده PID

$$u(t) = K e(t) \quad ( )$$

PID



شکل ۲-۵ دیاگرام بلوکی کنترل فرآیند با حلقه فیدبک و حضور نویز و اختشاش

$$y = \frac{G(s)K}{1+G(s)K} y_d + \frac{G(s)}{1+G(s)K} d - \frac{G(s)K}{1+G(s)K} n \quad ( )$$

$G(s)K$  (Loop Gain)

$$y_d \quad y$$

$$\frac{y}{y_d} = \frac{G(s)K}{1+G(s)K} = \frac{L(s)}{1+L(s)} \quad ( )$$

$\frac{L}{1+L}$

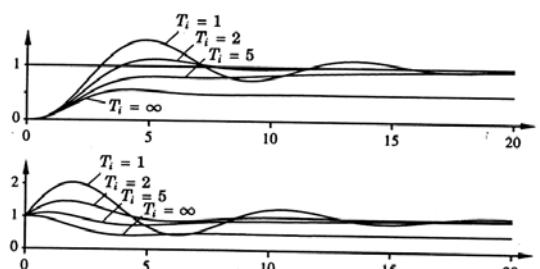
$$\frac{y}{d} = \frac{G(s)}{1+G(s)K} = \frac{G(s)}{1+L(s)} \quad ( )$$

### ۵-۱-۲- ترم انتگرال گیر

(Steady-

state)

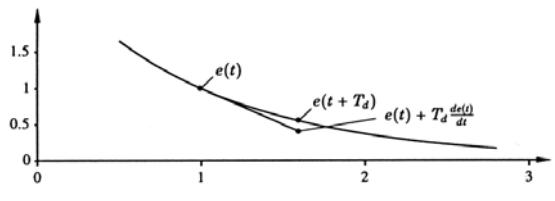
PI



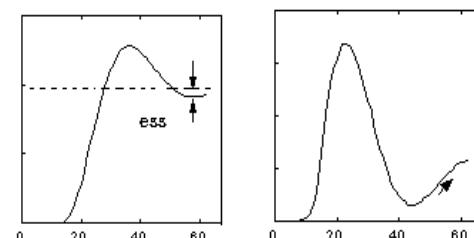
شکل ۵-۵ تأثیر ترم انتگرال گیر در کاهش خطای ماندگار

PI

### ۵-۱-۳- ترم مشتق گیر



شکل ۵-۶ تعبیر ترم مشتق گیر



شکل ۵-۴ تأثیر ترم انتگرال گیر در کاهش خطای ماندگار کنترل کننده PI

%  
 $(T_i = \infty)$   
 $(T_i = \dots)$

 $T_i$ 

$$\frac{de(t)}{dt}$$

$$u(t) = K \left( e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) : \\ e(t + T_d)$$

PI

PID

$$e(t+T_d) \equiv e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt}$$

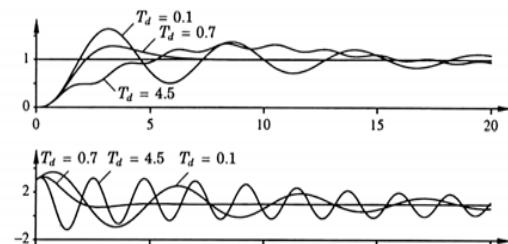
$T_d$   
PD

PD

PID

$T_d$

PID



شکل ۵-۷ تأثیر ترم مشتق گیر در افزایش سرعت سیستم

(Notch filter )

۵-۲-در چه فرآیندهایی کنترل کننده PID کافی است؟

PID

(tracking)

۵-۳-۱-پیاده سازی کنترل کننده ها

۵-۳-۲-کنترل کننده های الکترونیکی

PI

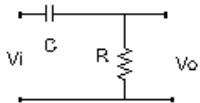
(passive)

PID

PI

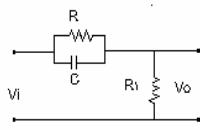
PI

### -کنترل کننده مشتق گیر-



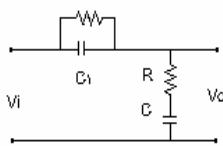
$$\frac{v_o(s)}{v_i(s)} = \frac{RCs}{1+RCs} \xrightarrow{RC \ll 1} \frac{v_o(s)}{v_i(s)} \equiv RCs \quad T_d = RC$$

### -کنترل کننده-



$$\frac{v_o(s)}{v_i(s)} = \frac{R_1(1+RCs)}{R+R_1(1+RC)s} \xrightarrow{R \gg R_1} \frac{v_o(s)}{v_i(s)} \equiv \frac{R_1}{R}(1+RCs)$$

$$\Rightarrow K = \frac{R_1}{R}, \quad T_d = RC, \quad R \gg R_1$$



### -کنترل کننده-

PD,PI

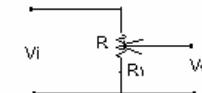
PID

$$\frac{v_o(s)}{v_i(s)} = K \left( 1 + T_d s + \frac{1}{T_i s} \right)$$

$$K = \frac{R}{R_1}, \quad T_d = R_1 C, \quad T_i = R_1 C, \quad R_1 \gg R, \quad R, C \gg 1$$

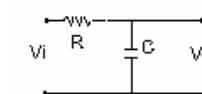
PID

### -کنترل کننده تنااسبی-



$$K(s) = \frac{v_o(s)}{v_i(s)} = \frac{R_1}{R} = K \leq 1$$

### -کنترل کننده انتگرال گیر-

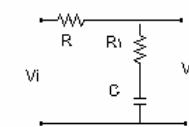


$$\frac{v_o(s)}{v_i(s)} = \frac{1}{1+RCs} \quad RC \gg 1$$

$$\frac{v_o(s)}{v_i(s)} \approx \frac{1}{RCs} \Rightarrow T_i = RC$$

### -کنترل کننده-

PI



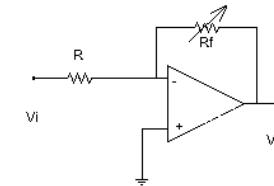
$$\frac{v_o(s)}{v_i(s)} = \frac{1+RCs}{1+(RC+R_1C)s} \xrightarrow{RC+R_1C \ll 1} \frac{R_1}{R+R_1} + \frac{1}{(R+R_1)Cs}$$

$$\Rightarrow K = \frac{R_1}{R+R_1}, \quad \frac{K}{T_i} = \frac{1}{(R+R_1)C}$$

$$K = \frac{R_1}{R} < 1, \quad \frac{K}{T_i} = \frac{1}{RC}, \quad R \gg R_1$$

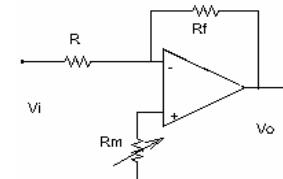
### ۵-۳-۲- کنترل کننده های الکترونیکی

Op-Amp



### کنترل کننده تناسی

$$\frac{v_o(s)}{v_i(s)} = -\frac{R_f}{R}$$



R &lt; Rf

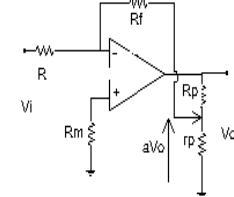
(-1)

(Rf=R)

offset

offset

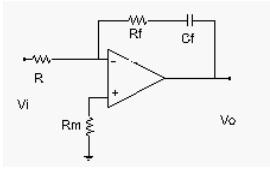
Rm



$$\alpha = \frac{r_p}{R_p + r_p} < 1$$

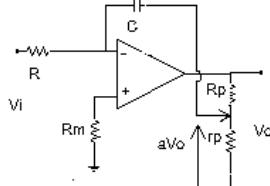
$$\frac{v_o(s)}{v_i(s)} = -\frac{1}{\alpha} \frac{R_f}{R}$$

### کنترل کننده انتگرال گیر



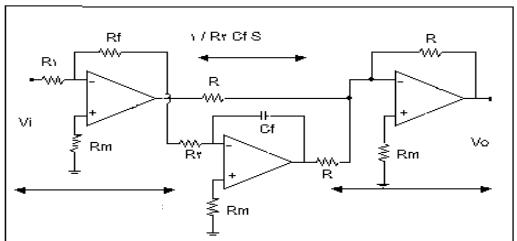
$$\frac{v_o(s)}{v_i(s)} = -\frac{R_f}{R} \left( 1 + \frac{1}{R_f C_f s} \right) = -K \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

$$K = \frac{R_f}{R}, \quad T_i = R_f C_f$$



$$\frac{v_o(s)}{v_i(s)} = -\frac{1}{\alpha R C s}$$

PI



شکل ۵-۸ کنترل کننده ساخت شرکت فیات و زیمنس

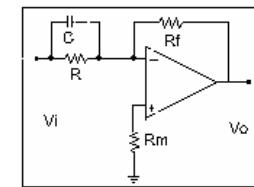
---

---

PID

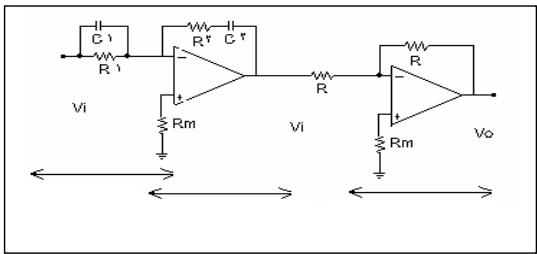
---

- کنترل کننده مشتق گیر



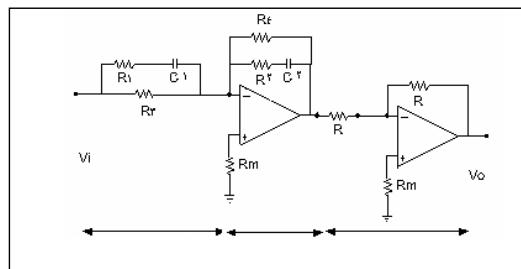
$$\frac{v_o(s)}{v_i(s)} = -\frac{R_f}{R} (1 + RCs) = -K(1 + T_d s)$$

$$K = \frac{R_f}{R}, \quad T_d = RC$$



شكل ٥-٨ کنترل کننده الکترونیکی PID

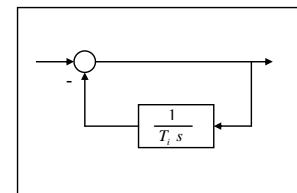
$$\frac{v_o(s)}{v_i(s)} = \frac{R_2}{R_1} \frac{(R_1 C_1 s + 1)(R_2 C_2 s + 1)}{R_2 C_2 s} \quad ( )$$



شكل ٥-٩ کنترل کننده الکترونیکی پیش فاز- پس فاز

$$\frac{v_o(s)}{v_i(s)} = \frac{R_4}{R_3} \frac{[(R_1 + R_3)C_1 s + 1][(R_2 C_2 s + 1)]}{(R_1 C_1 s + 1)[(R_2 + R_4)C_2 s + 1]} \quad ( )$$

٣-٣-٥- کنترل کننده های نیوماتیکی

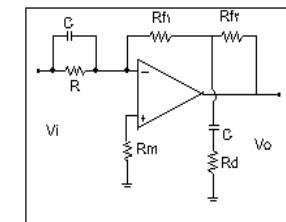


$$\frac{v_o(s)}{v_i(s)} = \frac{1}{1 + \frac{1}{T_i s}} = \frac{T_i s}{1 + T_i s}$$

$$T_i s \ll 1$$

$$\frac{v_o(s)}{v_i(s)} = T_i s$$

PI



PID

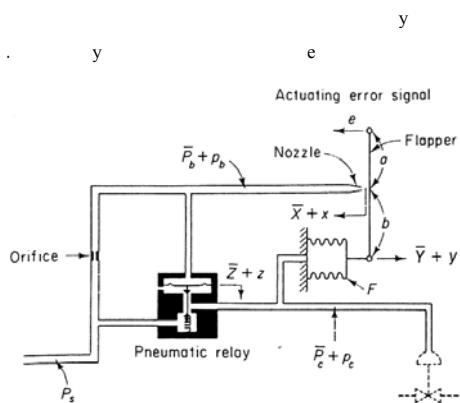
- کنترل کننده PID

PD, PI

PID

$$\begin{array}{c} P_b \\ P_a \leq P_c \leq P_s \\ P_s \end{array}$$

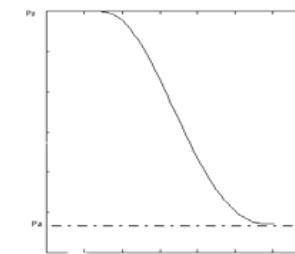
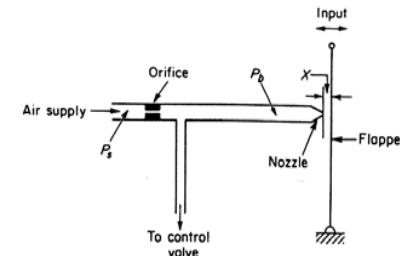
- کنترل کننده تناسبی نیوماتیکی



شکل ۱۰-۵ کنترل کننده تناسبی نیوماتیک

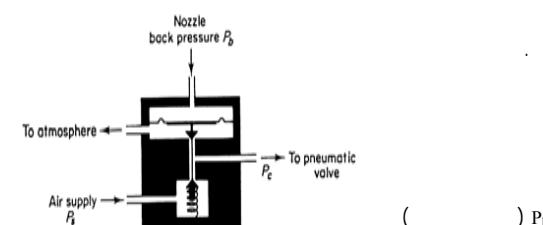
$$\begin{array}{c} y \\ ( ) \\ y \end{array} \quad \begin{array}{c} \text{Bellows} \\ e \end{array} \quad \begin{array}{c} \text{Bellows} \\ P_o \end{array}$$

- تقویت کننده های نیوماتیکی نازل - فلپر (Nozzle - Flapper)

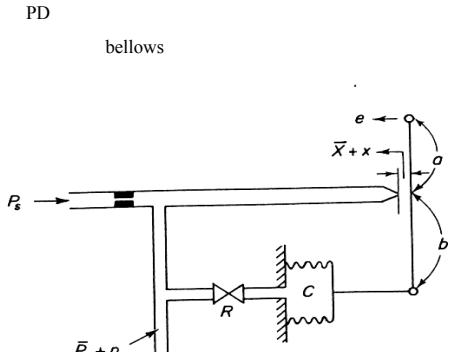


$$\begin{array}{c} P_b \\ P_b = P_s \\ \text{Supply} \\ P_b = P_a \end{array}$$

- رله نیوماتیکی



### - کنترل کننده PD نیوماتیک -



$$P_b = K_1 \cdot x$$

$$P_b = K_2 \cdot z \Rightarrow z = \frac{P_b}{K_2}$$

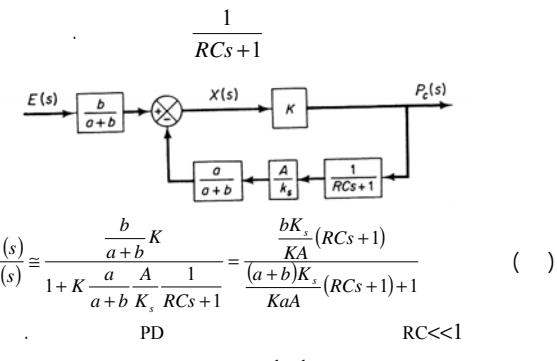
$$P_c = K_3 \cdot z = \frac{K_3}{K_2} P_b = \frac{K_1 K_3}{K_2} x \Rightarrow P_c = K \cdot x$$

$$x = \frac{b}{a+b} e - \frac{a}{a+b} y$$

bellows

$$A \cdot P_c = K_s \cdot y$$

$$x = \frac{b}{a+b} e - \frac{a}{a+b} \frac{A}{K_s} P_c$$



$$\frac{P_c(s)}{E(s)} \equiv \frac{\frac{b}{a+b} K}{1 + K \frac{a}{a+b} \frac{A}{K_s} \frac{1}{RCs+1}} = \frac{\frac{bK}{a+b} (RCs+1)}{\frac{KA}{a+b} K_s (RCs+1) + 1}$$

$\frac{b}{a+b} K$

$\frac{bK}{a+b} (RCs+1)$

$\frac{KA}{a+b} K_s (RCs+1) + 1$

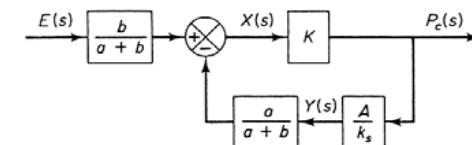
$( )$

$P_c$

bellows R

$e$

y



$$\frac{P}{e} \equiv \frac{\frac{bK}{a+b}}{1 + K \frac{a}{a+b} \frac{A}{K_s}} = K_p$$

$\frac{bK}{a+b}$

$1 + K \frac{a}{a+b} \frac{A}{K_s}$

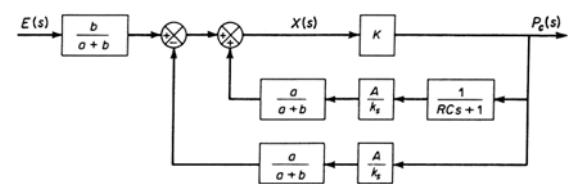
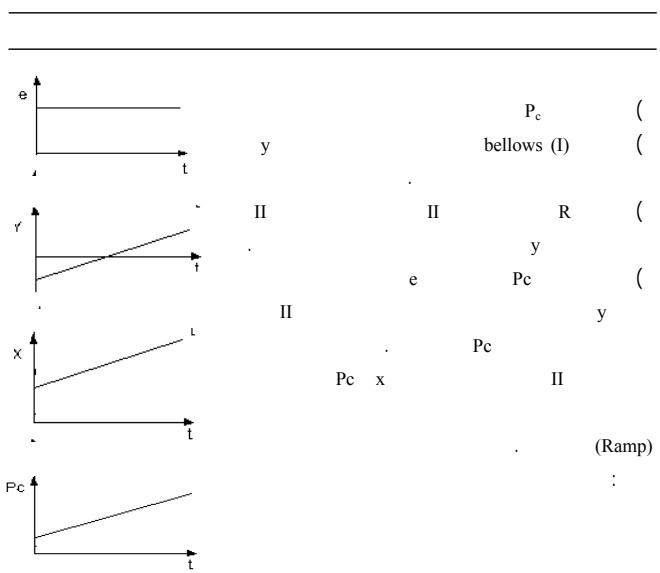
$K_p$

$e$

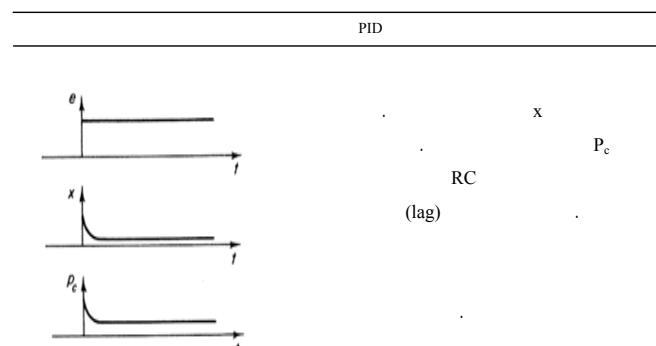
$$P = K_p e$$

a,b : (bellows )  $K_s$   $K_p$

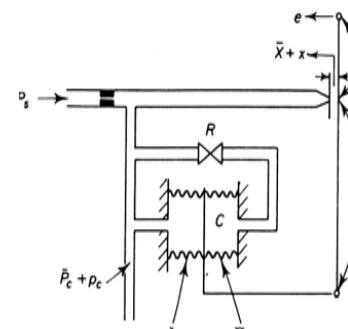
b,a  $K_s$  (Knob)



شکل ۱۳-۵ دیاگرام بلوکی کنترل کننده PI نیوماتیک



- کنترل کننده PI نیوماتیک



شکل ۱۴-۵ کنترل کننده PI نیوماتیک

$$\frac{P_c(s)}{E(s)} \equiv \frac{\frac{Kb}{a+b}}{1 + K \frac{a}{a+b} \frac{A}{K_s} \left( 1 - \frac{1}{RCs+1} \right)} \stackrel{RC \gg 1}{=} \frac{bK_s}{aA} \left( 1 + \frac{1}{RCs} \right)$$

PLC      PID

### ۴-۳-۵- کنترل کننده های میکروپروسسوری

PID

- کنترل کننده تنااسبی:

$$P = K(y_d - y) \Rightarrow P(t_k) = K(y_d(t_k) - y(t_k)) \quad ( )$$

- کنترل کننده انتگرالی:

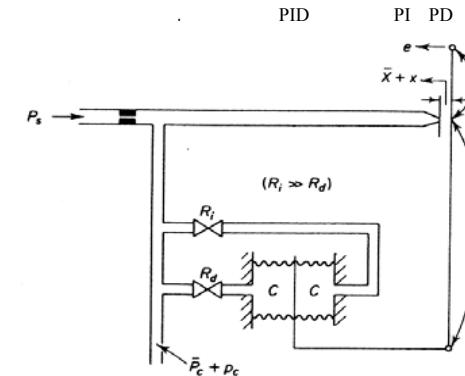
$$I(t) = \frac{K}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \Rightarrow \frac{dI(t)}{dt} = \frac{K}{T_i} e(t) \quad ( )$$

Backward Difference - روش

$$\frac{dI(t)}{dt} \cong \frac{I(t_K) - I(t_{K-1})}{h} = \frac{K}{T_i} e(t_k) \quad ( )$$

$$K = \frac{bK_s}{aA} \quad , \quad T_i = RC \quad ( )$$

- کنترل کننده PID نیوماتیک



شکل ۵-۱۴ کنترل کننده PID نیوماتیک

$$\frac{P_c(s)}{E(s)} \cong \frac{\frac{Kb}{a+b}}{1 + K \frac{a}{a+b} \frac{A}{K_s} \frac{\frac{a+b}{(R_i C - R_d C)s}}{(R_d C s + 1)(R_i C s + 1)}} \quad ( )$$

PID:

$$\frac{P_c(s)}{E(s)} \cong K \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad ( )$$

$$K = \frac{bK_s}{aA} \quad , \quad T_i = R_i C \quad , \quad T_d = R_d C \quad ( )$$

$$\Rightarrow I(t_k) = I(t_{k-1}) + \frac{Kh}{T_i} e(t_k) \quad (1)$$

$$Z \cdot \frac{1}{s}$$

$$s(I) = \frac{1-z^{-1}}{h}(I) \Rightarrow s = \frac{1-z^{-1}}{h} \quad (2)$$

S  
Z

$$B.D. \cdot Z$$

Tustin یا روشن دو خطی -

$$D = KT_d s \quad (1)$$

$$D: \frac{KT_d s}{1 + \frac{T_d}{N}s} \quad (2)$$

1/10  $\quad 8 < N < 20$ 

⋮

$$D + \frac{T_d}{N} Ds = KT_d s E(s) \quad (3)$$

$$D = -\frac{T_d}{N} \frac{dD}{dt} + KT_d \frac{de}{dt} \quad (4)$$

**روشن -**

$$\frac{T_d}{N} \frac{dD}{dt} + D = KT_d \frac{de}{dt}$$

$$\cong \frac{T_d}{N} \frac{D(t_k) - D(t_{k-1})}{h} + D(t_k) = KT_d \frac{e(t_k) - e(t_{k-1})}{h} \quad (5)$$

$$\frac{T_d}{N} \frac{(1-z^{-1})}{h} D + D = KT_d \frac{(1-z^{-1})}{h} e \quad (6)$$

⋮

$$D(t_k) = \frac{T_d}{T_d + Nh} D(t_{k-1}) + \frac{NK T_d}{T_d + Nh} (e(t_k) - e(t_{k-1})) \quad (7)$$

$$I(t_k) = I(t_{k-1}) + \frac{Kh}{T_i} \left( \frac{e(t_k) + e(t_{k-1})}{2} \right) \quad (8)$$

⋮ Z

$$S = \frac{2}{h} \cdot \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \quad (9)$$

$$I(t_k) = I(t_{k-1}) + b_{i1} e(t_k) + b_{i2} e(t_{k-1}) \quad (10)$$

 $b_{ij}$ 

- کنترل کننده مشتق گیر

**Tustin -**

$$s = \frac{2}{h} \cdot \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \quad (11)$$

⋮

$$D(t_k) = \frac{2T_d - Nh}{2T_d + Nh} D(t_{k-1}) + \frac{2KT_d N}{2T_d + Nh} (e(t_k) - e(t_{k-1})) \quad (12)$$

⋮

---



---

H(s)

	<b>B.D</b>	<b>Tustin</b>
$a_0$	$-T_i(T_f + h)$	$2T_i(2T_f + h)$
$a_1$	$-T_i(2T_f + h)$	$-8T_iT_f$
$a_2$	$T_iT_f$	$2T_i(2T_f - h)$
$b_0$	$K(h^2 + (T_i + T_f)h + T_i(T_d + T_f))$	$K(h^2 + 2(T_i + T_f)h + 4T_i(T_d + T_f))$
$b_1$	$-K(2T_i(T_d + T_f) + h(T_i + T_f))$	$K(2h^2 - 8T_i(T_d + T_f)h - 2h(T_i + T_f))$
$b_2$	$K(h^2 + (T_i + T_f)h + T_i(T_d + T_f))$	$K(h^2 + 4T_i(T_i + T_f) + 2h(T_i + T_f))$

جدول ۵-۱ پارامترهای کنترل کننده PID دیجیتال

⋮

$$u(t_K) = \frac{1}{a_0} \{b_0 e(t_K) + b_1 e(t_{K-1}) + b_2 e(t_{K-2}) - a_1 u(t_{K-1}) - a_2 u(t_{K-2})\} \quad (5-1)$$

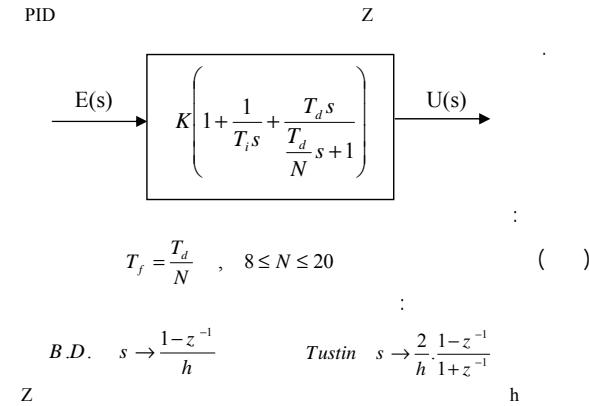
---



---

$$D(t_k) = a_d D(t_{k-1}) + b_d (e(t_k) - e(t_{k-1})) \quad (5-2)$$

جمع بندی:



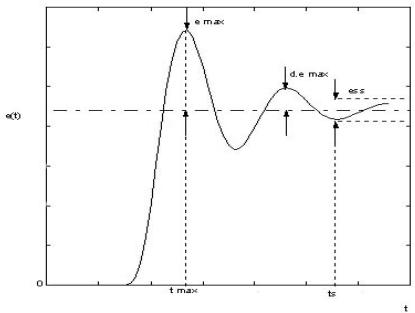
$$H(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K(T_i(T_f + T_d))s^2}{T_i s(T_f s + 1)} \rightarrow \quad (5-5)$$

$$H(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{b_2 z^{-2} + b_1 z^{-1} + b_0}{a_2 z^{-2} + a_1 z^{-1} + a_0}$$

## طراحی کنترل کننده PID-۴

مقدمه-۴-۱

$$e(t) = y_d(t) - y(t) \quad ( )$$



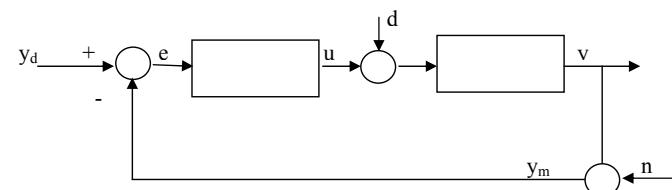
شکل ۵-۱۶ پاسخ پله خطای یک سیستم حلقه

PID

L(s)

( )

$$\begin{aligned}
 & e_{\max} : \\
 & t_{\max} : \\
 & t_s : \\
 & d : \\
 & \vdots \\
 (\text{Integral Absolute Error}) : & IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt : \|e\|_1 \quad ( ) \\
 (\text{Integral Square Error}): & ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt : \|e\|_2 \quad ( ) \\
 (\text{Integral Time Absolute Error}): & ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad ( )
 \end{aligned}$$



شکل ۵-۱۵ دیاگرام بلوکی کنترل حلقه بسته یک فرآیند

$$y(t) = 1 - \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega_o t} \sin(\omega_o t \sqrt{1-\xi^2} + \phi) \quad (1)$$

$$\phi = \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi} \right) \quad (2)$$

PD      PI       $\xi \quad \omega_o$

$$\%O = e^{\frac{-\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}} \times 100 \quad (3)$$

$$d = e^{\frac{-\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}} \quad (4)$$

$$t_{\max} = \frac{\pi}{\omega_o \sqrt{1-\xi^2}} \quad (5)$$

$$t_s \cong \frac{\ln(0.05\sqrt{1-\xi^2})}{\xi\omega_o} \quad (6)$$

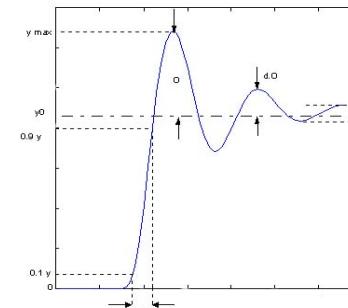
$$t_r = \frac{1}{\omega_o} e^{\phi/\tan\phi} \quad (7)$$

$$(8) \quad \begin{matrix} & \\ \text{PD} & \text{PI} \end{matrix} \quad \begin{matrix} & \\ \xi & \omega_o \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} & \\ \xi=0.2155 & \end{matrix} \quad \begin{matrix} & \\ d=1/4 & \end{matrix} \quad \begin{matrix} & \\ \xi=0.707 & \end{matrix}$$

$\omega_o$

(quarter cycle)       $d=1/4$       50%



شکل ۱۷-۵ تعریف معرفهای خطای پاسخ پله یک سیستم حلقه بسته

$$\% O = \frac{O}{y_o} \times 100 \quad (9)$$

$$\begin{matrix} & \\ 0 & \end{matrix} \quad \begin{matrix} & \\ 5\% & \end{matrix} \quad \begin{matrix} & \\ d & \end{matrix} \quad \begin{matrix} & \\ t_s & \end{matrix}$$

$t_r$  (rise time)

$$0.9y_o \quad 0.1y_o \quad t_r \quad t_s$$

$$\begin{matrix} & \\ \text{PD} & \text{PI} \end{matrix} \quad T(s) = \frac{\omega_o^2}{s^2 + 2\xi\omega_o s + \omega_o^2} \quad (10)$$

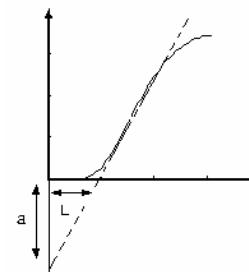
## ۵-۴-۲ روشهای تنظیم زیگلر-نیکولز

Z.N. PID

Z.N.

الف) روش پاسخ پله

$$G(s) = \frac{a}{sL} \quad ( )$$



شکل ۱۸ پاسخ پله یک سیستم انتگرال گیر با تاخیر

 $T_d, T_i, K$ 

PID, PI, P

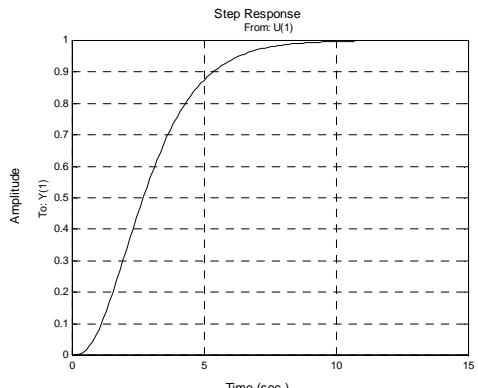
 $T_p$ 

$T_p$	$T_d$	$T_i$	$K$	کنترل کننده
$4L$	0	0	$1/a$	<b>P</b>
$5.7L$	0	$3L$	$0.9/a$	<b>PI</b>
$3.4L$	$L/2$	$2L$	$1.2/a$	<b>PID</b>

جدول ۵-۲ پارامترهای کنترل کننده PID برای سیستم انتگرال گیر با تاخیر

$$G(s) = \frac{1}{(s+1)^3}$$

مثال:



PID

$$L = 0.806$$

$$a = 0.218$$

$$C(S) = K \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad ( )$$

$$K = 5.5, T_i = 1.61, T_d = 0.403$$

ب) روش پاسخ فرکانسی

$$(quarter \ cycle) \quad d = 1/4 \\ 50\% \quad \xi = 0.2155$$

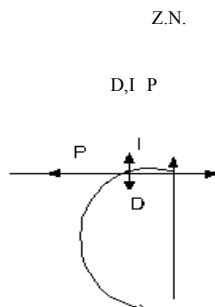
$$K_u \cdot G(\omega_u) = -1 \quad ( )$$

$$T_u = \frac{2\pi}{\omega_u} \text{ (rad/sec)} \quad ( )$$

$K_u$

ج) توضیح نحوه عملکرد روش Z.N. در حوزه فرکانسی

$T_u \quad K_u$



شکل ۵-۱۹ نحوه انتقال نقطه بحرانی توسط کنترل کننده PID

PID

$$G(s) = K \left( 1 + T_d s + \frac{1}{T_i s} \right)$$

$$G(j\omega) = K \left( 1 + j(\omega T_d) - \frac{j}{T_i \omega} \right) \quad ( )$$

$T_p$	$T_d$	$T_i$	$K$	کنترل کننده
$T_u$			$0.5K_u$	P
$1.4T_u$		$0.8T_u$	$0.4K_u$	PI
$0.85T_u$	$0.125T_u$	$0.5T_u$	$0.6K_u$	PID

جدول ۳-۵ پارامترهای کنترل کننده PID با استفاده از روش پاسخ فرکانسی

PI

$T_p$

PID P

$$G(s) = \frac{1}{(s+1)^3}$$

$$K_u = 8 \quad \text{and} \quad T_u = \frac{2\pi}{\sqrt{3}} = 3.63 \quad ( )$$

$$K = 4.8, T_i = 1.81, T_d = 0.44 \quad ( )$$

۳-۴-۵- روش زیگلر-نیکولز تعمیم یافته

$$d = \frac{1}{4}$$

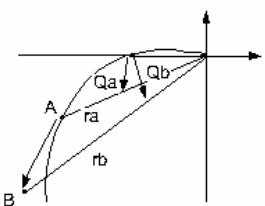
Quarter Cycle

$$G_p(i\omega_0) = r_a e^{i(\pi + \varphi_a)}$$

$$G_p(i\omega_0) = r_b e^{i(\pi + \varphi_b)}$$

$$G_c(i\omega_0) = r e^{i\varphi_c}$$

$$r_b e^{i(\varphi_b + \pi)} = r_a \cdot r_c \cdot e^{i(\pi + \varphi_b + \varphi_c)}$$



شکل ۲۰-۵ نحوه انتقال نقطه بحرانی توسط روش Z.N. تعمیم یافته

$$\begin{cases} rc = \frac{rb}{ra} \\ \varphi_c = \varphi_b - \varphi_a \end{cases} \quad PI$$

$$\begin{cases} K = r_b \cos(\varphi_b - \varphi_a) / r_a \\ T_i = \frac{1}{\omega_0 \tan(\varphi_a - \varphi_b)} \end{cases} \quad ( )$$

Lag

$$\varphi_a > \varphi_b \quad T_i > 0$$

$$T_d, T_i, K$$

PID

$$T_d, T_i$$

PID

$$(K < 1)$$

$$+90^\circ$$

$$(K > 1)$$

$$T_d > 0$$

$$-90^\circ$$

PID

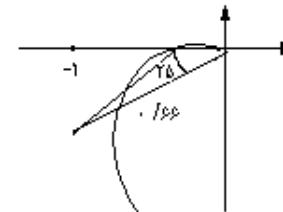
$$K = 0.6K_u, \omega_u T_i = \pi, \omega_u T_d = \pi/4 \quad ( )$$

$$G_c(i\omega_u) = K(1 + i(\omega_u T_d - \frac{1}{\omega_u T_i})) =$$

$$0.6K_u(1 + i(\frac{\pi}{4} - \frac{1}{\pi})) = 0.6K_u(1 + 0.407i) = 0.6622K_u e^{j25^\circ}$$

$$+25^\circ$$

$$0.6622$$



شکل ۲۰-۶ نحوه انتقال نقطه بحرانی توسط روش Z.N.

$$+25^\circ$$

Lag

---

---

PID

---

$$\begin{cases} K = \frac{r_b}{r_a} \cos(\varphi_b - \varphi_a) \\ \omega_o T_d - \frac{1}{\omega_o T_i} = \tan(\varphi_b - \varphi_a) \\ T_d = \alpha T_i \end{cases} \quad (1)$$

$\alpha = 0.25$

r<sub>b</sub>

۴-۴-۵- کارآیی روش زیگلر-نیکولز

Z.N.

(Quarter-Cycle)

Z.N.

)  $\kappa - \tau$

$$\tau = \frac{L}{L+T} = \frac{L}{T_{ar}} \quad \kappa = \left| \frac{G(i\omega_u)}{G(0)} \right| \quad (2)$$

0-1

$\kappa - \tau$

$\kappa < 0.07, \tau < 0.15$  : حالات ۱

PI

PID

$$\begin{cases} K = \frac{r_b}{r_a} \cos(\varphi_b - \varphi_a) \\ Ti = \frac{1}{2\alpha\omega_o} (\tan(\varphi_b - \varphi_a) + \sqrt{4\alpha + \tan^2(\varphi_b - \varphi_a)}) \\ T_d = \alpha T_i \end{cases} \quad (3)$$

A

$$PI: \begin{cases} K = K_u r_b \cos \varphi_b \\ T_i = \frac{-T_u}{2\pi \tan(\varphi_b)} \end{cases} \quad PID: \begin{cases} K = K_u r_b \cos \varphi_b \\ Ti = \frac{T_u}{\pi} \left( \frac{1 + \sin \varphi_b}{\cos \varphi_b} \right) \\ T_d = \frac{\alpha T_u}{\pi} \left( 1 + \frac{\sin \varphi_b}{\cos \varphi_b} \right) \end{cases} \quad (4)$$

$$r_b = 0.6622, \varphi_b = 25^\circ$$

$$\xi > 0.2155$$

$$\text{Pessen } r_b = 0.5, \varphi_b = 20^\circ$$

$$\begin{cases} r_b = 0.41, \varphi_b = 61^\circ \\ r_b = 0.29, \varphi_b = 46^\circ \end{cases} \quad (5)$$

R<sub>b</sub>

PID

جمع بندی:

PID

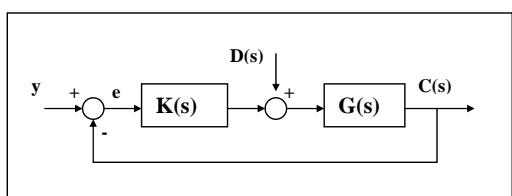
Z.N.

### ۵-۴-۵- سایر روش‌های طراحی

ITAE

IAE ISE

مثال:



شکل ۵-۲۲- دیاگرام بلوکی یک سیستم مدار بسته

PI

$$\frac{K}{1+\tau s}$$

ISE

$$J = \int_0^{\infty} e(t)^2 dt$$

( )

$e(t)$

$T_i$  K

حالت ۲:  $0.07 \leq \kappa < 0.4$ ,  $0.15 < \tau < 0.4$  :  $\kappa \quad \tau$

Z.N

Z.N

PID

Z.N

Set point

حالت ۳:  $\kappa, \tau > 0.4$  :  $\kappa \quad \tau$

$$G(s) = \frac{e^{-5s}}{(s+1)^3}$$

$$K_u = 1.25, T_u = 15.7$$

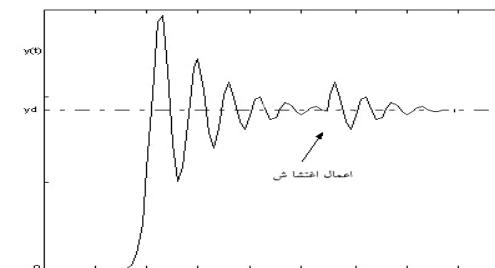
$$K = 0.75, T_i = 7.9, T_d = 2.0$$

$$\tau = 0.68, \kappa \approx 0.8$$

Z.N

$\kappa \quad \tau$

PID



شکل ۵-۲۱- پاسخ پله سیستم مدار بسته با اعمال اغتشاش

:

### - کنترل کننده تناسبی:

b	a	روش
1	1	Z.N.
0.98	0.9	IAE
0.92	1.4	ISE
1.08	0.5	ITAE

جدول ۴-۵ پارامترهای کنترل کننده P با استفاده از روش‌های مختلف برای مدل سه جزئی

$$\begin{aligned} K(s) &= k \\ k &= \frac{1}{K} a(\theta)^{-b} \end{aligned} \quad ( )$$

$\theta, b, a \quad K$

### - کنترل کننده PI

d	c	b	a	روش
1	3.33	1	0.9	Z.N.
0.71	1.65	0.98	0.98	IAE
0.74	2.03	0.96	1.3	ISE
0.68	1.48	0.98	0.86	ITAE

جدول ۵-۵ پارامترهای کنترل کننده PI با استفاده از روش‌های مختلف برای مدل سه جزئی

$$\begin{aligned} \frac{E(s)}{y(s)} &= \frac{1}{1+K(s)G(s)}, \quad y(s) = \frac{1}{s} \\ \Rightarrow E(s) &= \dots = -\frac{T_i}{k} \frac{kK/\tau T_i}{s^2 + (\frac{1+kK}{\tau})s + \frac{kK}{\tau T_i}} \end{aligned} \quad ( )$$

$$e(t) = -\frac{T_i}{k} \frac{e^{-\xi \omega_n t}}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin(\omega_d t + \theta) \quad ( )$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{kK}{\tau T_i}}, \quad \xi = (1+kK) \frac{\sqrt{\tau/K}}{2\sqrt{kK}}, \quad \omega_d = \omega_n \sqrt{1-\xi^2} \quad ( )$$

$$J = \int_0^\infty e^2(t) dt = \int_0^\infty \left( \frac{T_i}{k} \right)^2 \cdot \frac{e^{-2\xi \omega_n t}}{1-\xi^2} \sin^2(\omega_d t + \theta) dt \quad ( )$$

$T_i \quad K$

$$\begin{cases} \frac{\partial J}{\partial k} = 0 \\ \frac{\partial J}{\partial T_i} = 0 \end{cases}$$

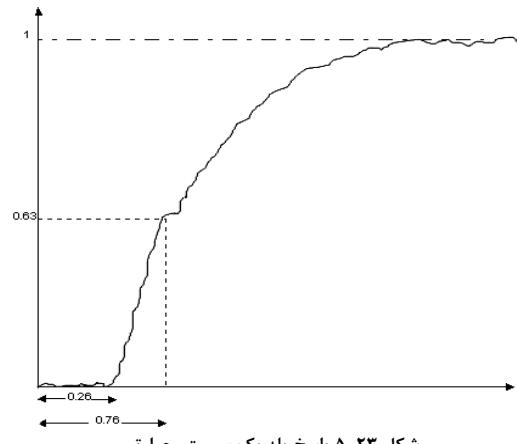
$T_i \quad K$

$$G(S) = \frac{Ke^{-\tau s}}{1+Ts} \quad ( )$$

$\theta$

$$\theta = \frac{\tau}{T} \quad ( )$$

مثال:



$$T = 0.76 - 0.28 = 0.48$$

$$\Rightarrow G(S) = \frac{e^{-0.28t}}{1 + 0.48 s}$$

$$K = 1$$

$$\theta = \frac{c}{T} = \frac{0.28}{0.48} = 0.5834$$

( )

( )

( )

$$K(s) = k(1 + \frac{1}{T_i s})$$

$$k = \frac{a}{k} (\theta)^{-b}$$

$$T_i = T.c.(\theta)^d$$

- کنترل کننده PID

f	e	d	c	b	a	روش
1	0.5	1	2	1	1.2	Z.N.
1.14	0.48	0.75	1.14	0.92	1.4	IAE
1	0.56	0.77	0.92	0.95	1.5	ISE
1	0.38	0.74	1.18	0.95	1.36	ITAE

جدول ۵-۶ پارامترهای کنترل کننده PID با استفاده از روش‌های مختلف برای مدل سه جزئی

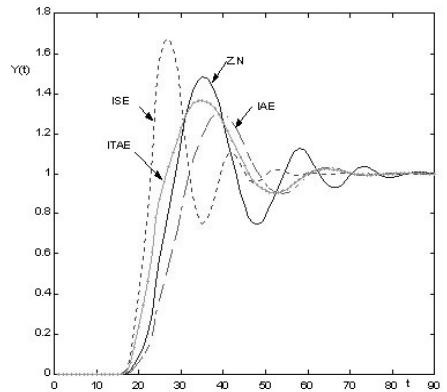
$$K(s) = k(1 + \frac{1}{T_i s} + T_D s)$$

$$k = \frac{1}{K} a(\theta)^{-b}$$

$$T_i = T.c.(\theta)^d$$

$$T_D = T.e.(\theta)^f$$

Z.N.



شکل ۵-۲۴ پاسخ حلقه بسته برای پروسه حرارتی با کنترل کننده های مختلف

5-۵- جمع شوندگی انTEGRAL گیر Integrator Windup

روش	K	T <sub>i</sub>
Z.N	1.543	0.932
IAE	1.662	0.540
ISE	2.181	0.654
ITAE	1.458	0.492

جدول ۵-۷ پارامترهای کنترل کننده PI برای پروسه حرارتی

$$K(S) = k(1 + \frac{1}{T_i s}) \quad ( )$$

spool

جمع بندی:

PID

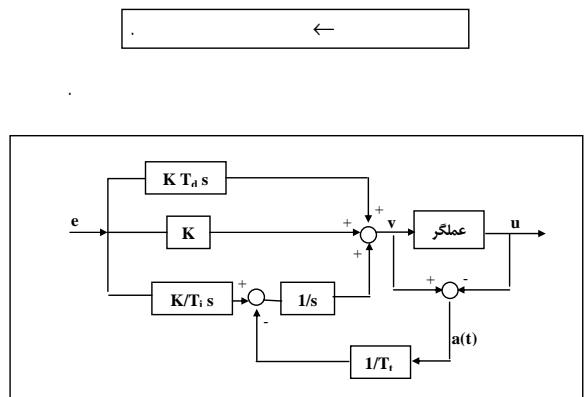
PID

PID

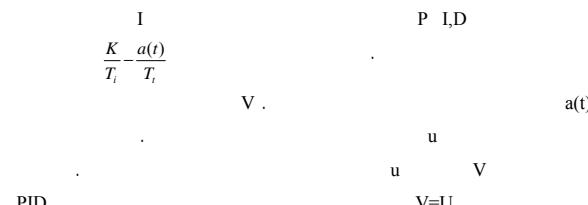
windup

(Anti-windup)

(Reset)



شکل ۵-۲۶ دیاگرام بلوکی اعمال Anti-windup



PID

$$\frac{K}{T_i} - \frac{a(t)}{T_i}$$

$V$

$u$

$a(t)$

$$V = U$$

$$\frac{K}{T_i} - \frac{a(t)}{T_i}$$

$$a(t) > 0$$

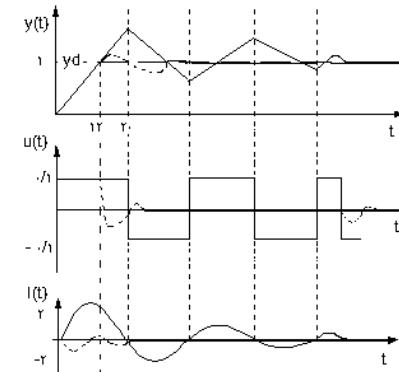
$T_t$

PID

PI

$\pm 0.1$

$I(t)$



شکل ۵-۲۵ پاسخ حلقه بسته سیستم با کنترل کننده PID

به صورت معمولی (خط توپر) و با اعمال Anti-windup

$I(t)$

$I$

$u(t)$

ON-OFF

PI

### ۵-۶- کنترل سیستمهای با تأخیر

$$|e^{-j\omega T}| = 1$$

$$e^{-sT}$$

$$\therefore e^{-j\omega T} = -\omega T :$$

(Pade approximation)

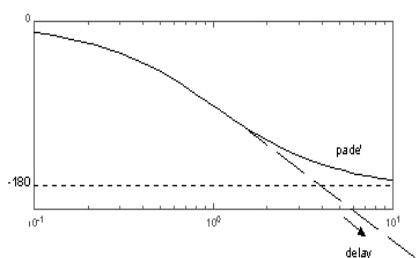
$$e^{-Ts} \approx \frac{-as+1}{+as+1} \quad a > 0$$

$$\frac{-as+1}{as+1} = 1 - 2as + 2a^2 s^2 - 2a^3 s^3 + \dots \quad ( )$$

$$e^{-ST} = 1 - ST + \frac{1}{2}(ST)^2 - \frac{1}{6}(ST)^3 + \dots$$

$$a = T/2$$

$$e^{-Ts} \approx \frac{\left(\frac{-T}{2}\right)s + 1}{\left(\frac{T}{2}\right)s + 1} \quad ( )$$



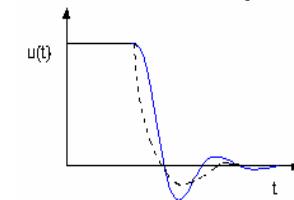
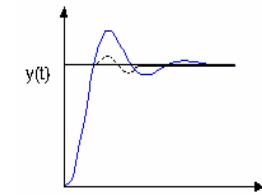
شکل ۵-۲۷ مقایسه دیاگرام فاز تقریب پده

PID

$T_t$

( )

$T_t$



شکل ۵-۲۶ پاسخ حلقه بسته سیستم با تغییر

$T_t$

D,I

$T_t$

$T_i$

$T_d$

$$T_t = \sqrt{T_i T_d} \quad ( )$$

PID

V,U

PI

reset

$T_t$

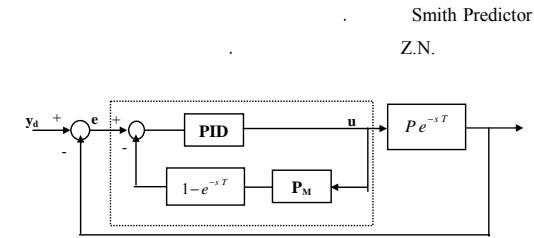
Auto-windup

شکل ۵-۲۷ مقایسه دیاگرام فاز تقریب پده

$$e^{-st}$$

جمع بندی:

T



شکل ۵-۲۸ دیاگرام بلوکی پیاده سازی تخمینگر اسمیت

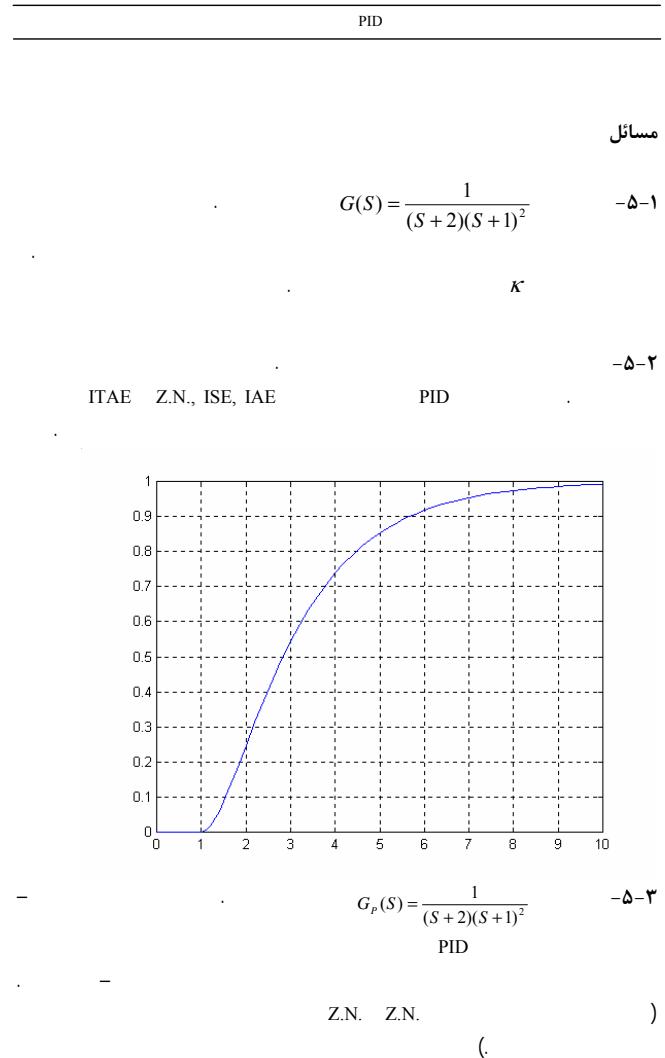
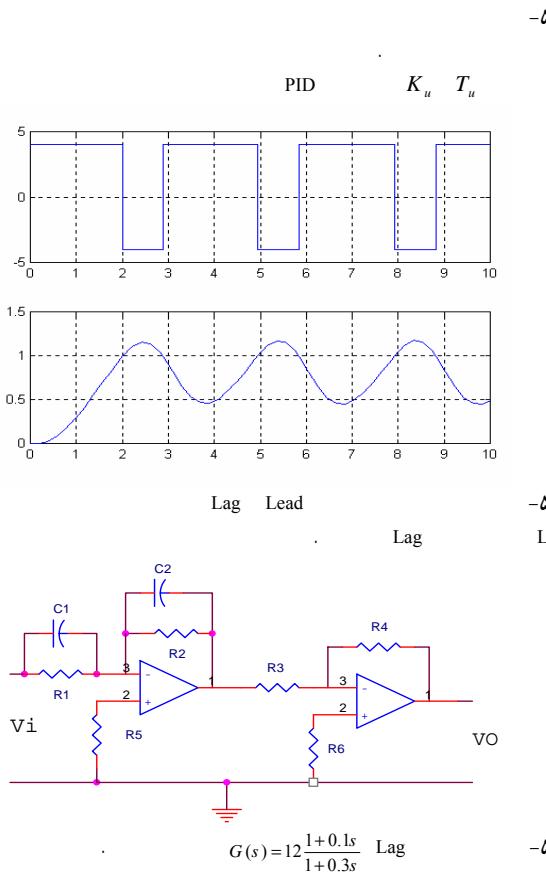
$$\begin{aligned} P_M &= P & P e^{-sT} \\ & & P_M(1 - e^{-sT}) \end{aligned}$$

C(s)

$$\frac{U(s)}{e(s)} = \frac{C(s)}{1 + P_M C(s)(1 - e^{-sT})} \quad ( )$$

$$\frac{y}{yd} = \dots = \frac{CP e^{-sT}}{1 + CP_M - CP_{Me}^{-sT} + CP e^{-sT}} \quad ( )$$

$$If \quad P = P_M \Rightarrow \frac{y}{yd} = \frac{CP}{1 + CP} e^{-sT} \quad ( )$$



---

---

مراجع

- [1] Astrom, Karl J. and Hagglund Tore, *PID Controllers: theory, design, and tuning*, 2<sup>nd</sup> Ed. Instrument Society of America, 1995.
- [2] Belanger Pierre R., *Control Engineering, a modern approach*, Saunders College Publishing, 1995.
- [3] Coripio A.B., *Tuning of Industrial Control Systems*, Instrument Society of America, 1990.
- [4] Datta, Aniruddha, Ming-Tzu Ho, and Shankar P. Bhattacharyya, *Structure and synthesis of PID controllers*, Springer, 2000.
- [5] Marlin, T. E., *Process control: designing processes and control systems for dynamic performance*, McGraw-Hill, 1995
- [6] Hagglund T., *Process control in Practice*, Chartwell-Bratt Ltd, U.K., 1991
- [7] Marlin, T. E., *Process control: designing processes and control systems for dynamic performance*, McGraw-Hill, 1995
- [8] McMillan G.K., *Tuning and Control Loop Performance*, 2<sup>nd</sup> Edition, Instrument Society of America, 1983.
- [9] Özbay, Hitay, *Introduction to feedback control theory*, CRC Press, 2000.
- [10] Shinskey F.G., *Process Control Systems: Application, Design and Tuning*, 3<sup>rd</sup> Edition, McGraw-Hill, 1988.
- [11] Tan, Kok Kiong et al., *Advances in PID control*, Springer, 1999
- [12] Wang, Liuping and William R. Cluett, *From plant data to process control: ideas for process identification and PID design*, Taylor & Francis, 2000.
- [13] Yu, Cheng-Ching, *Auto-tuning of PID controllers: relay feedback approach*, Springer, 1999.
- [14] Seborg D.E., Edgar T.F. and Mellichamp D.A., *Process*

---

---

PID

$$G(s) = \frac{10e^{-s}}{(s+2)^3}$$

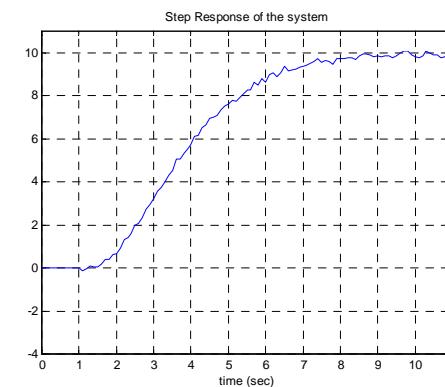
PID

Z.N.

%

%

-Δ-V



ISE Z.N.

ISE

(

(

*Dynamics and Control*, Wiley, New York, 1989.

[15]

### واژه نامه

#### فارسی – انگلیسی

sequence block	Laplace operator
data block	orifice
organization block (OB)	superposition law
acrobat	disturbance
step response	accumulator
impulse response	integral absolute error (IAE)
frequency response	integral time absolute error (ITAE)
transient response	convolution integral
double inverted pendulum	integral squared error (ISE)
inverted pendulum	kinetic energy
internal stability	heat energy
jump	potential energy
thermal process	opto-coupler isolator
turbine pumps	pumping stations
analogue ports	air bellows
transfer function	PLC programming
stored on delay timer	PLC
pulse timer (SP)	statement list (STL)
extended pulse timer	flowchart programming
delay-off timer	ladder programming
delay-on timer	Taylor expansion
cyclic timer	program block (PB)
heat convection	function block (FB)
	assignable function block

Poppet valve	dead time		pipeline	electric actuation
Directional valve	normalized dead time		linearization	pilot actuation
Pneumatic valve	settling time		linearization about trajectory	manual actuation
pneumatic trip valve	average resident time		flow	mechanical actuation
shift register	subroutine		flow demand	pneumatic actuation
anti windup	Jacobian		tracking	least squares estimation
heat capacity	DC servo-motor	DC	Bode diagram	Smith Predictor
insensitivity	Taylor's series		nyquist diagram	triac
linear actuator	pneumatic sensor		ladder diagram	thermocouple
rotary actuator	spool		Bernoulli relation	thermal radiation
semi-rotary actuator	integrating system		heat radiator	Pade approximation
pneumatic actuator	magnetic levitation system		chemical reactor	pneumatic amplifier
operand	time invariant system		linear regression	controller tuning
cyclic operation	oscillating system		electro magnetic relay	describing function
overshoot	electro-mechanical system		control relay	thermal convection
heat transfer process	multi body systems		auxiliary relay	Boolean algebra
thermal process	non-minimum phase		pneumatic relay	heat flow
valve actuation			Hydrostatic relations	grey box
flip-flop	trapped signal		pick and place robot	black box
relay feedback	computer simulation		Pessen method	gearbox
thermodynamics first law	continuity condition		Backward difference method	two port cylinder
Euler law	counting and batching		Ziegler-Nichols tuning method	Pneumatic cylinder
De Morgan law	binary counter		Tustin method	single port cylinder
Newton's second law	counter		Ziegler Nichols method	single acting cylinder
calibration	parametric identification		modified Z.N.	Integral windup
push button	process identification			stability margin
optimal control	error slope			simultaneous motion
pilot control	solenoid valve		delay time	output
sequential motion control	Spool valve		rising time	transistor output
			timer	automatic production line

back-emf voltage	harmonic drive	four parameter model	floe control
integrated	thermal conduction	two parameter model	temperature control
	input	three parameter model	drum speed control
		process modeling	delayed system control
		dynamic models	electronic controller
		discrete model	electric controller
		filtered differentiation	integral controller
		incremental equations	proportional controller
		state equation	PID controller
		differential equation	derivative controller
		Lagrange equations	Programmable Logic Controller
		comparator	
		moment of inertia	microprocessor controller
		effective moment of inertia	pneumatic controller
		valve specification	DC motor motion control
		permanent magnet DC motor	strain gauge
		radial-piston motor	operation automatic control
		vane motor	disturbance torque
		pneumatic motor	Lagrangian
		torque producer	heat exchanger
		nozzle-flapper	generalized coordinates
		blending tank	state variables
		decay ratio	rugged
		quarter cycle	drum ( )
		equilibrium point	open tank
		ultimate point	two-phase flow
		noise	liquid blending
		Pneumatic	Cascade circuit

---

---

### انگلیسی - فارسی

continuity condition	accumulator
control relay	acrobat
controller tuning	air bellows
convolution integral	analogue ports
counter	anti windup
counting and batching	assignable function block
cyclic operation	automatic production line
cyclic timer	auxiliary relay
data block	average resident time
DC motor motion control	back-emf voltage
DC servo-motor	DC
De Morgan law	Backward difference method
dead time	(BD)
decay ratio	Bernoulli relation
delay time	binary counter
delayed system control	black box
delay-off timer	blending tank
	Bode diagram
delay-on timer	Boolean algebra
derivative controller	calibration
describing function	Cascade circuit
differential equation	chemical reactor
Directional valve	comparator
discrete model	computer simulation
disturbance	concentration control

opto-coupler isolator	Lagrange equations	harmonic drive	disturbance torque
organization block (OB)	Lagrangian	headline crane	double inverted pendulum
orifice	Laplace operator	heat capacity	drum ( )
oscillating system	least squares estimation	heat convection	drum speed control
output	linear actuator	heat energy	dynamic models
overshoot	linear regression	heat exchanger	effective moment of inertia
Pade approximation	linearization	heat flow	electric actuation
parametric identification	linearization about trajectory	heat radiator	electric controller
permanent magnet DC motor	liquid blending	heat transfer process	electro magnetic relay
pick and place robot	magnetic levitation system	Hydrostatic relations	electro-mechanical system
PID controller	manual actuation	impulse response	electronic controller
pilot actuation	mechanical actuation	incremental equations	equilibrium point
pilot control	microprocessor controller	input	error slope
pipeline	modified Z.N.	insensitivity	Euler law
PLC programming	<b>PLC</b>	integral absolute error (IAE)	extended pulse timer
PLC schematic	<b>PLC</b>	integral controller	filtered differentiation
Pneumatic		integral squared error (ISE)	flip-flop
pneumatic actuation		integral time absolute error (ITAE)	floe control
pneumatic actuator		Integral windup	flow
pneumatic amplifier		integrated	flow demand
pneumatic controller		integrating system	flowchart programming
Pneumatic cylinder		internal stability	four parameter model
pneumatic motor		inverted pendulum	frequency response
pneumatic relay		Jacobian	function block (FB)
pneumatic sensor		jump	gearbox
pneumatic trip valve		kinetic energy	generalized coordinates
Pneumatic valve		ladder diagram	gray box
	Optimal control	ladder programming	

---

---

ultimate point  
valve actuation  
valve specification  
vane motor  
Ziegler Nichols method  
Ziegler-Nichols tuning method

trapped signal  
triac  
turbine pumps  
Tustin method  
two parameter model  
two port cylinder  
two-phase flow

---

---

Spool valve  
stability margin  
state equation  
state variables  
statement list (STL)  
step response  
stored on delay timer  
strain gauge  
subroutine  
superposition law  
Taylor expansion  
Taylor's series  
temperature control  
thermal conduction  
thermal convection  
thermal process  
thermal process  
thermal radiation  
thermocouple  
thermodynamics first law  
three parameter model  
time invariant system  
timer  
torque producer  
tracking  
transfer function  
transient response  
transistor output

Poppet valve  
potential energy  
process identification  
process modeling  
program block (PB)  
Programmable Logic Controller  
proportional controller  
pulse timer  
pulse timer (SP)  
pumping stations  
push button  
Quarter cycle  
radial-piston motor  
relay feedback  
rising time  
rotary actuator  
rugged  
semi-rotary actuator  
sequence block  
sequential motion control  
settling time  
shift register  
simultaneous motion  
single port cylinder  
single rod cylinder  
Smith Predictor  
solenoid valve  
spool

---

---

## فهرست راهنمای

۱۷۲	۱۵۰
۱۷۲	۱۲۵-۱۲۶-۱۴۲
۱۷۲	۱۷۱
۱۹۵	۲۰۴
۱۲۲-۱۳۰	۸۶
۲۰۶-۲۲۶	۲۲۷-۲۴۰-۲۴۱
۳۵-۱۰۲	۲۲۸-۲۴۰-۲۴۱
۲۲۲	۱۷۴
۱۷۴	۲۲۷-۲۳۸- ۲۴۰-۲۴۱
۱۹۹	۱۲۰
۴۷	۱۴۷
۱۳۱	۱۲۱
۹۵	۴۳
۵۰	۱۴۴
۹۲	۱۲-۲۱۴-۲۱۶
۹۳	۴۸
۵۰	۷۷
۵۱	۴۱
۵۱	۴۸
۱۴۸	۲۰۴
۹	۸۰
۸	۸۰
۷	۸۱
۷	۸۱
۱۹۰	۷۹
۲۵۰	۱۶۱-۱۶۴
۴۷	۱۷۴
۴۷	

PLC

226	PID	168
148		115
2-9-226		147
11		116
11		12+
11		2-7
11		16
82		113
1A-19		115
227		27
1F8		68
1FF		43
V		2V-52-95
28		188
1A6		164
148		2-5
117		9
27		4
114		4
192		2
49		2 *
239		4 *
15		5 *
19		6 *
63		5 *
62		6 *
1F2-1F3		2
58		17
69		53
		248-247

PLC

28		148
1F2		249
1F8		213
10A-1FF		2-1
19+		187
FF		1F8
F1-F3		27
FT		151-154
21F		1FF
124		113
V+		113
238	Pessen	117
222-222	(BD)	11
23+		2
222-224		11
1A5		11
225		2F5
1F3		2-3
228		23
28		115
1V6		45
1V9		74
227-228		1F2-1F3
1V5		127
5F		157
129		139
116-132	DC	139
129		2-5-226
1V		173
1A1		173-223

115	२०२
117	१८३
	१८५

1FV		1AF
2F		2F9
1VA		1AD-1E3
1V3		2-9
1VV		2-9-211-219
1Z3		2-9-213-22-
1V1		223
1FF		21+
1V1		2-7
1V1		2-7-2-8-211-
19-		222
222		2-1-2-2-2-8-
222		21-2F-222
129		2-1
115		
115		2-8-2-9-212-
12-		21V-223
99		2F
116		221
118		214
1F-1F1		20
117		1F
1F		2V
1F		1V
1F		116
1F		121
1F		29
21F		1AF-1E3
1F9		121
227		115
22-223227		128
177		12F-12-122
1V3		( )