

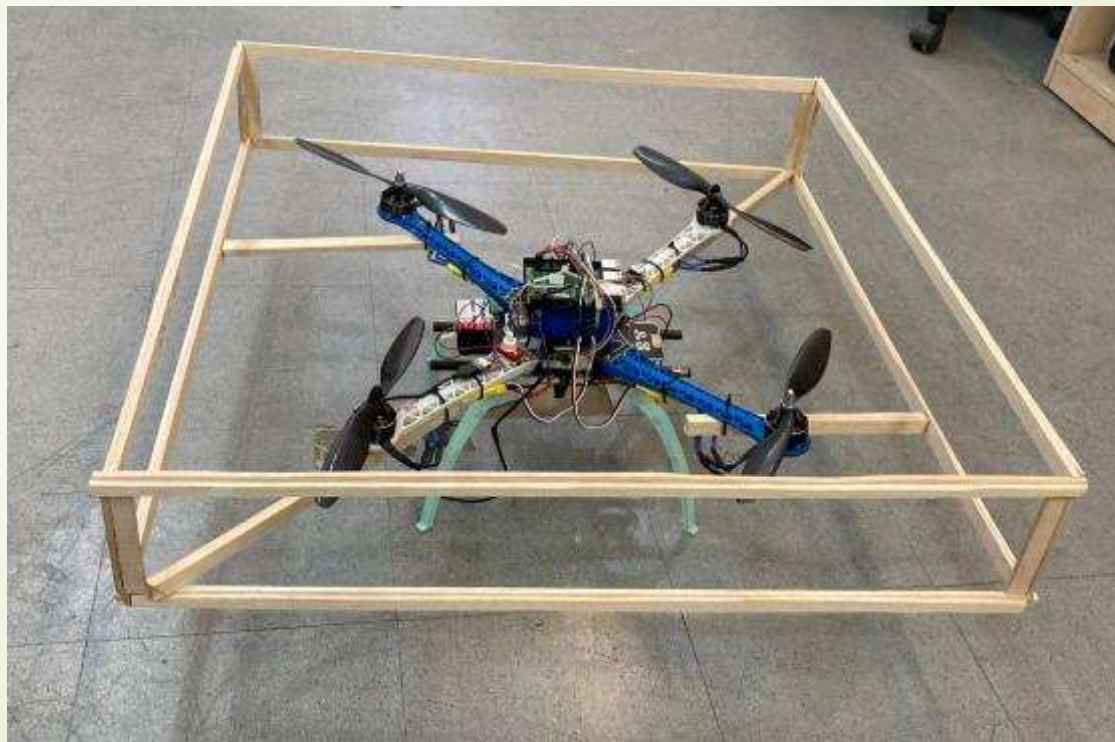
# طراحی، ساخت و کنترل سیستم چهارپره

استاد راهنما: دکتر فرخی

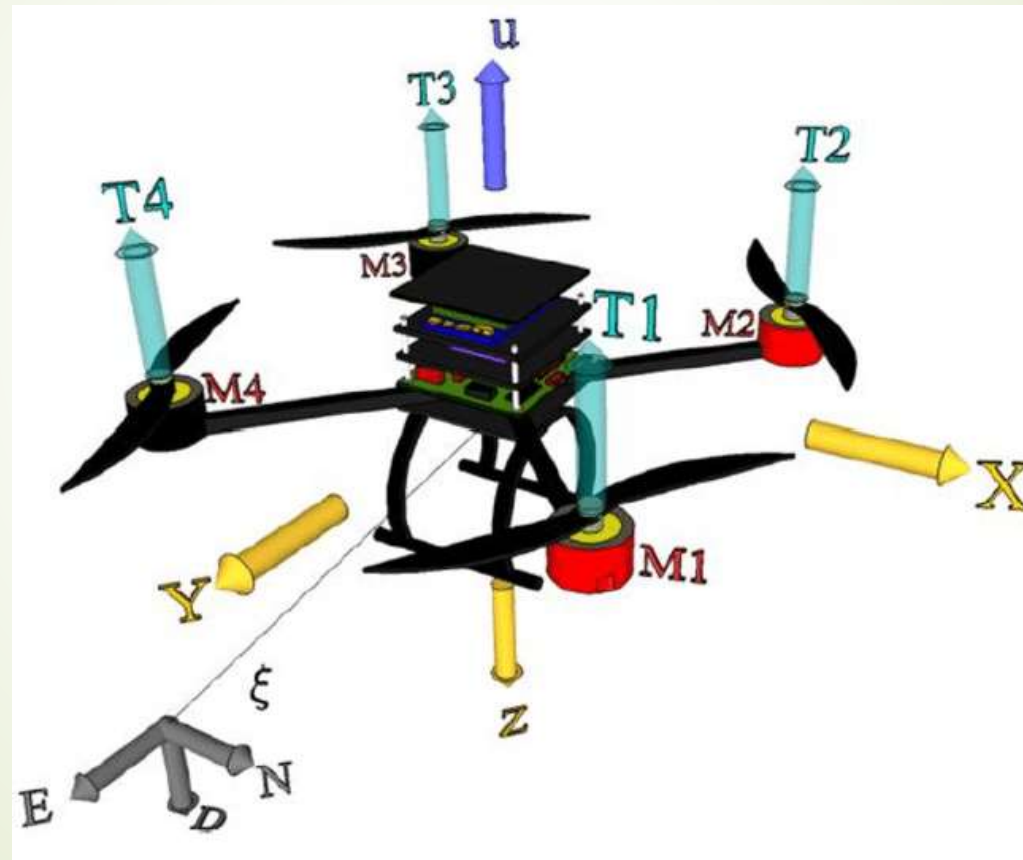
نگار احسانی

پوریا مرتضی آقا

## چهارپره چیست؟



- نحوه بلند شدن چهارپره
- نحوه ایجاد فرامین کنترلی در چهارپره



# روش‌های کنترلی

- **PID-Classic**: این روش به دلیل عدم احتیاج به پارامترهای خاص مدل و سادگی کنترل‌کننده مناسبی است.
- **LQR**: مزیت این روش این است که میتواند سامانه را در محدوده مجاز طراحی قرار دهد و چون مربوط به نظریه خطی است میتوان کنترل بهینه حلقه بسته را پیاده کرد.
- **SMC**: مزیت این روش پاسخ سریع و مقاوم در برابر عدم قطعیت و اغتشاشات خارجی است و سازگار با سامانه غیرخطی میباشد و پیاده سازی ساده ای دارد.
- **کنترل تطبیقی**: به طور اتوماتیک پارامترها را تنظیم و تولید میکند.
- **روش‌های هوشمند**: همانند روش‌های کنترل فازی و کنترل‌کننده عصبی.

# قطعات مورد نیاز

## بدنه



جنس: فایبرگلس

وزن: ۴۰۴ گرم

حداکثر قطر: ۰.۵ متر

## موتور



نوع: موتور براشلس EMAX

وزن: ۶۰ گرم



## برد رزبری پای

نوع: رزبری پای 3b+

وزن: ۴۲ گرم



## باتری

نوع: لیتیوم پلیمر ۴ سلول Tattu

ولتاژ: ۱۴.۸ ولت

ظرفیت: ۳۷۰۰ میلی آمپر ساعت

ظرفیت دشارژ پیوسته: ۴۵C

کانکتور: XT60

وزن: ۳۴۷ گرم



## کارانداز

نوع: Sky ESC

جریان پیوسته: ۳۰ آمپر

ولتاژ خروجی: ۵.۶ تا ۱۶.۸ ولت

وزن: ۲۵ گرم



## ملخ

جنس: فیبرکربن

طول: ۱۰ اینچ

وزن: ۲۸ گرم



## سنسور فاصله سنج

نوع: سنسور آلتراسونیک

مسافت قابل سنجش: ۲ تا ۴۵۰ سانتی متر

دقت: ۳ سانتی متر



## سنسور زاویه سنج

نوع: سنسور MPU 9250

خروجی: دیجیتال برای سه محور در بازه قابل برنامه

ریزی  $\pm 250$ ،  $\pm 500$ ،  $\pm 1000$  و  $\pm 2000$  درجه بر ثانیه

نمونه گیری داده ها: به صورت ۱۶ بیتی





## بدست آوردن معادلات حرکت چهارپره:

ماتریس دوران حول سه محور به صورت روبرو است.

$$S_k \triangleq \sin \theta_k$$

$$C_k \triangleq \cos \theta_k$$

$$YPR(\theta) = \begin{bmatrix} C_2 C_3 & S_1 S_2 C_3 + C_1 S_3 & C_1 S_2 C_3 - S_1 S_3 \\ -C_2 S_3 & S_1 S_2 S_3 - C_1 C_3 & C_1 S_2 S_3 + S_1 C_3 \\ S_2 & -S_1 C_2 & C_1 C_2 \end{bmatrix}$$

$$\ddot{\theta} I_{xx} = (-F_1 - F_2 + F_3 + F_4)l$$

$$\ddot{\varphi} I_{yy} = (-F_1 + F_2 + F_3 - F_4)l$$

$$\ddot{\psi} I_{zz} = (\tau_{m1} - \tau_{m2} + \tau_{m3} - \tau_{m4})$$

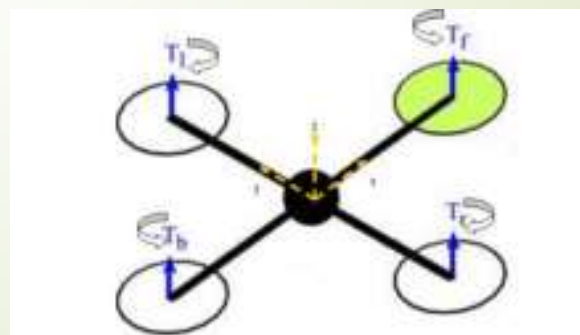
$$\ddot{x} = \frac{1}{m} \sum_1^4 F_i [\sin \varphi \sin \psi + \cos \varphi \cos \psi \sin \theta]$$

$$\ddot{y} = \frac{1}{m} \sum_1^4 F_i [\sin \psi \sin \theta \cos \varphi - \cos \psi \sin \varphi]$$

$$\ddot{z} = \frac{1}{m} \sum_1^4 F_i [\cos \varphi \cos \theta] - g$$

با اثر دادن ماتریس دوران روی معادلات مکان

معادلات به شکل روبرو بدست می آیند.



# معادلات فضای حالت چهارپره و خطی سازی آن:

معادلات فضای حالت سیستم به شکل زیر است:

$$\dot{X} = \begin{cases} \ddot{\phi} = \dot{\theta}\dot{\psi}\left(\frac{I_{xx} - I_{zz}}{I_{xx}}\right) + \dot{\theta}\left(\frac{J}{I_{xx}}\right)\Omega + \frac{1}{I_{xx}}U_2 \\ \ddot{\theta} = \dot{\phi}\dot{\psi}\left(\frac{I_{zz} - I_{xx}}{I_{yy}}\right) - \dot{\phi}\left(\frac{J}{I_{yy}}\right)\Omega + \frac{1}{I_{yy}}U_3 \\ \ddot{\psi} = \dot{\theta}\dot{\phi}\left(\frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}}\right) + \frac{1}{I_{zz}}U_4 \\ \ddot{Z} = g - (\cos\phi\cos\theta)\frac{1}{m}U_1 \\ \ddot{x} = (\cos\phi\sin\theta\cos\psi + \sin\phi\sin\psi)\frac{1}{m}U_1 \\ \ddot{y} = (\cos\phi\sin\theta\sin\psi - \sin\phi\cos\psi)\frac{1}{m}U_1 \end{cases}$$

به طوری که:

$$U_1 = b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2)$$

$$U_2 = b(-\Omega_2^2 + \Omega_4^2)$$

$$U_3 = b(\Omega_1^2 + \Omega_3^2)$$

$$U_4 = d(-\Omega_1^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2)$$

برای خطی سازی نقاط تعادل به شکل زیر در نظر گرفتیم.

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta = \phi = \psi = \dot{\theta} = \dot{\phi} = \dot{\psi} = \ddot{\theta} = \ddot{\phi} = \ddot{\psi} = 0 \\ \dot{x} = \ddot{x} = \dot{y} = \ddot{y} = \dot{z} = \ddot{z} = 0 \\ V_h = V_1 = V_2 = V_3 = V_4 \\ \Omega = \Omega_h \\ \dot{\Omega} = \ddot{\Omega} = 0 \end{array} \right\}$$

# معادلات فضای حالت سیستم خطی:

زوايا

①

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{I_x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{I_y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{I_z} \end{bmatrix}}_B \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix}$$

مکان

②

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \\ \dot{x}_9 \\ \dot{x}_{10} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} x_7 \\ x_8 \\ x_9 \\ x_{10} \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ a & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & a \end{bmatrix}}_B \begin{bmatrix} U_x \\ U_y \end{bmatrix}$$

$$a = (1/m)U_1.$$

ارتفاع

③

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{11} \\ \dot{x}_{12} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} x_{11} \\ x_{12} \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}}_B [U_z]$$

$$\begin{cases} u_x = \cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi \\ u_y = \cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi \\ u_z = g - (\cos \phi \cos \theta) \frac{1}{m} U_1 \end{cases}$$

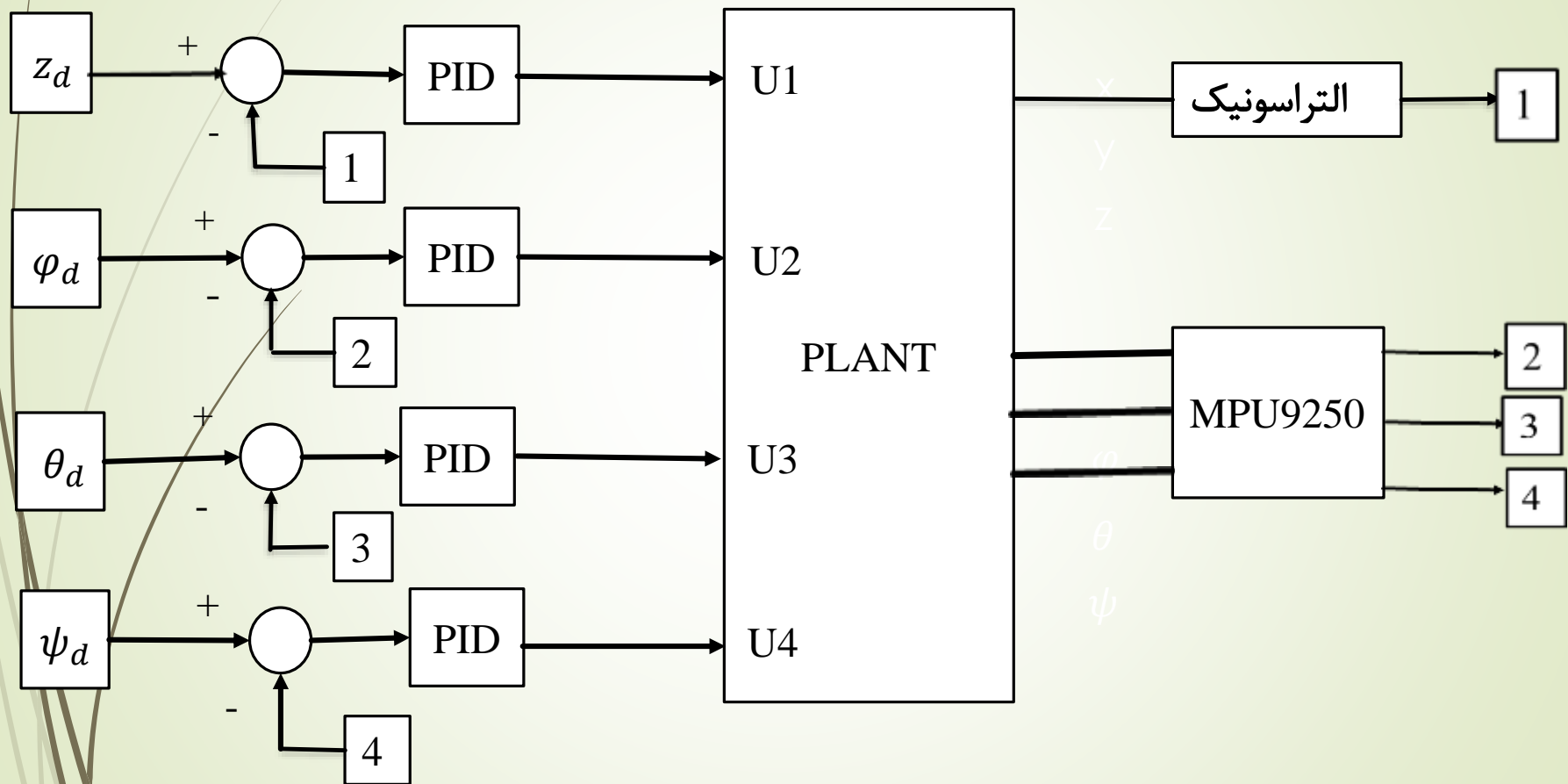


# کنترل



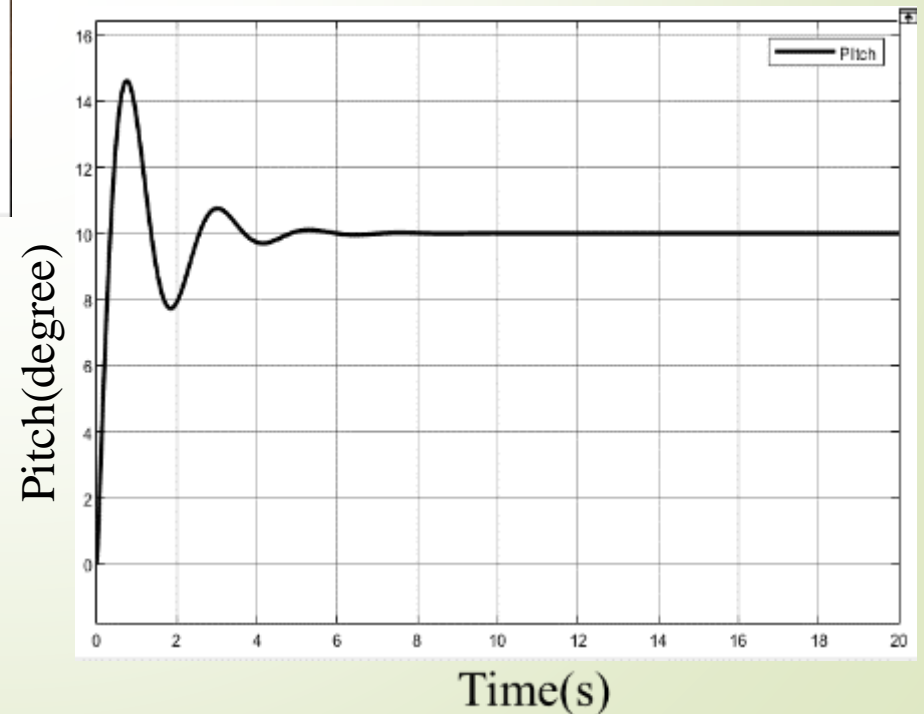
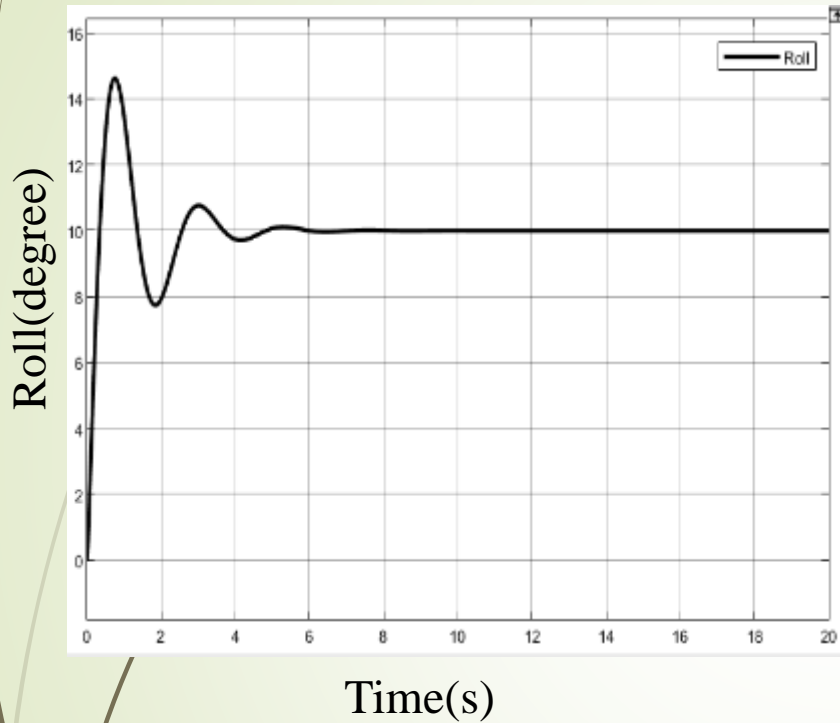
# کنترل زاویه و ارتفاع

بلوک دیاگرام:

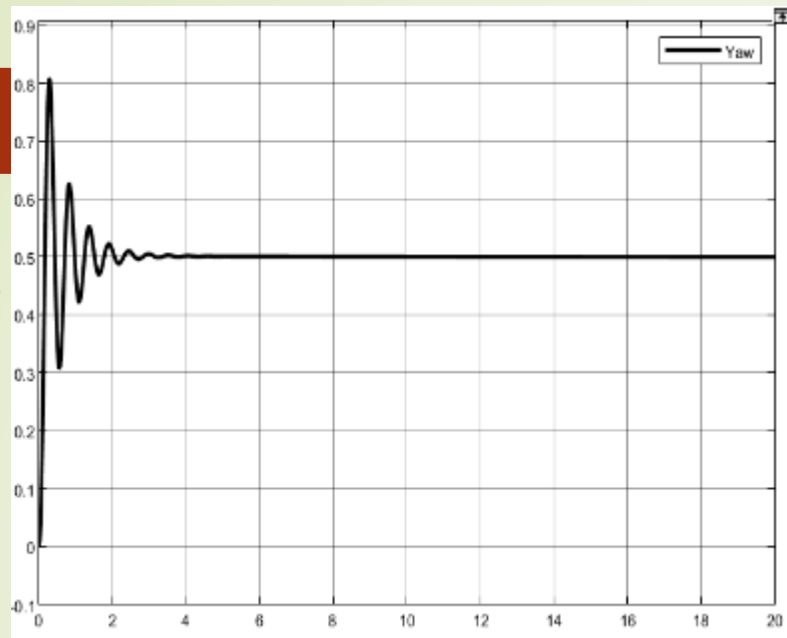


# طراحی کنترل کننده به روش زیگلر-نیکلز

## نتایج شبیه سازی

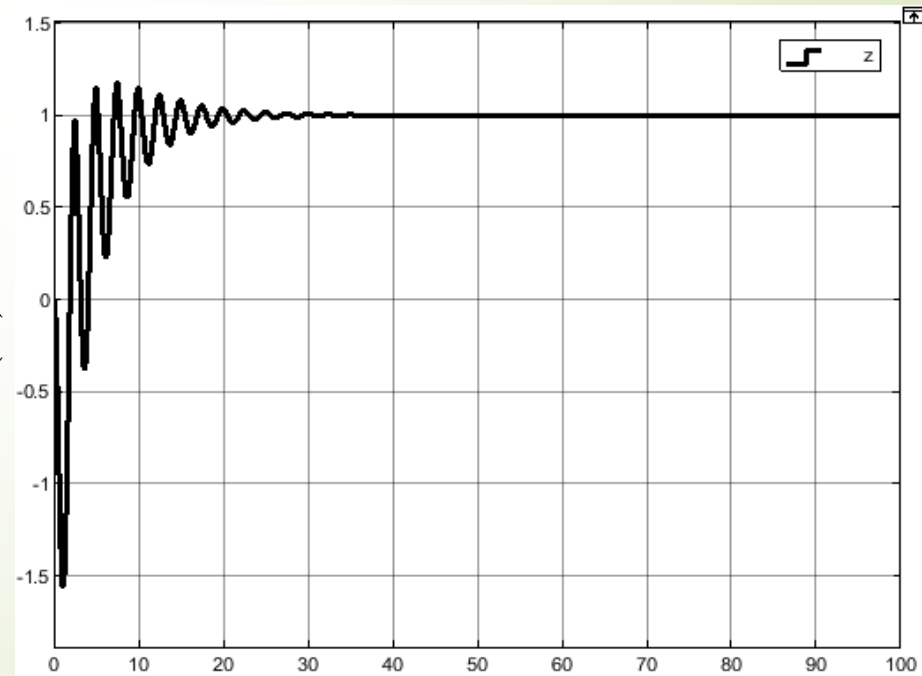


Yaw(degree)



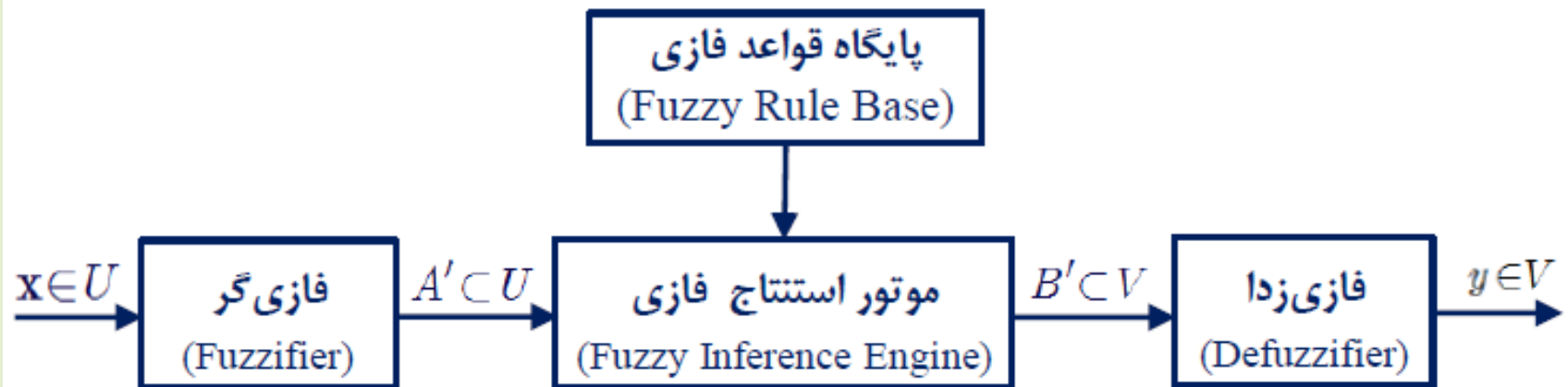
Time(s)

z(m)



Time(s)

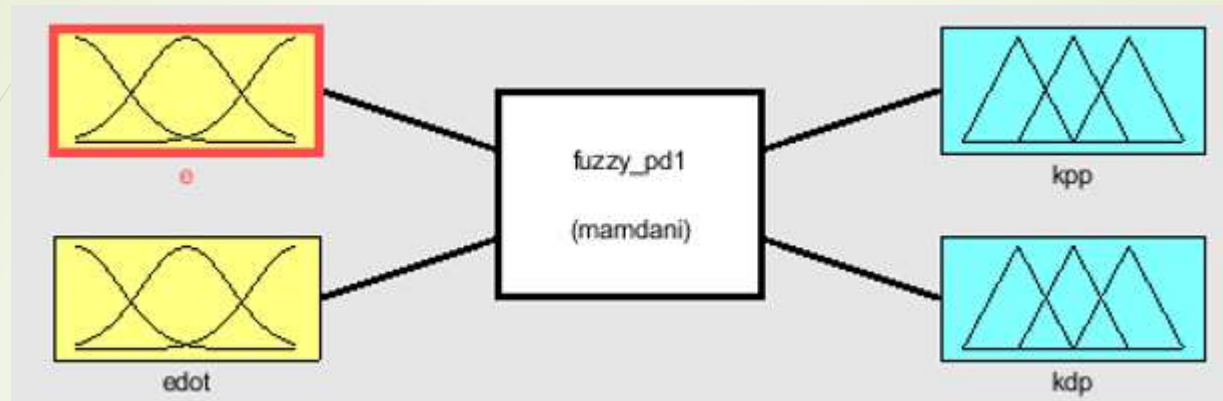
# سیستم فازی



نمودار بلوکی (Block Diagram) سیستم فازی

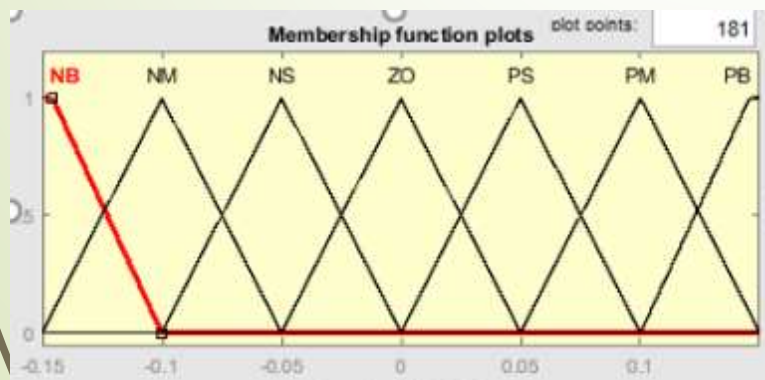
# طراحی کنترل کننده PD فازی برای زوایا

سیستم فازی:

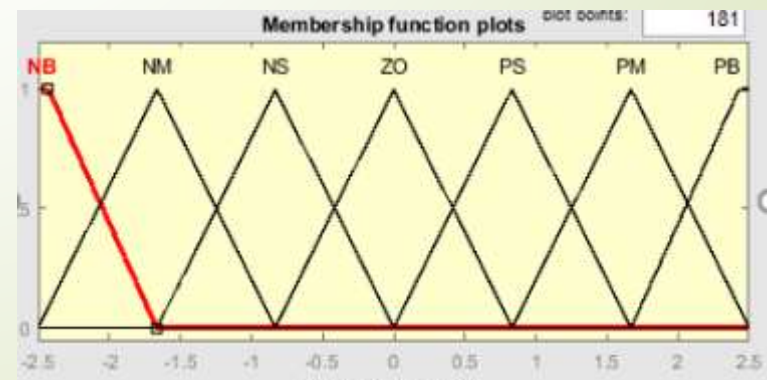


سیستم فازی با فازی گر تکین، موتور استنتاج ضرب، فازی زدای میانگین مرکز و توابع عضویت مثلثی، سیستم فازی استفاده شده است.

تابع عضویت خطا:

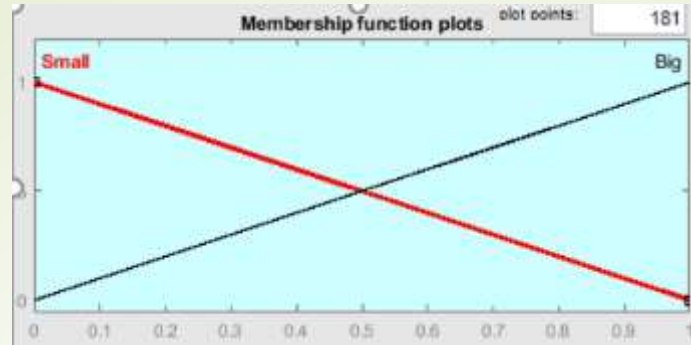


تابع عضویت مشتق خطا:





تابع عضویت  $kd'$ ,  $kp'$ :



جدول قواعد فازی:

مشتق خطا

	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	S	S	S	S	S	S	S
NM	B	B	S	S	S	B	B
NS	B	B	B	S	B	B	B
ZO	B	B	B	B	B	B	B
PS	B	B	B	S	B	B	B
PM	B	B	S	S	S	B	B
PB	S	S	S	S	S	S	S

جدول قواعد اگر-آنگاه فازی برای تنظیم  $kd'$

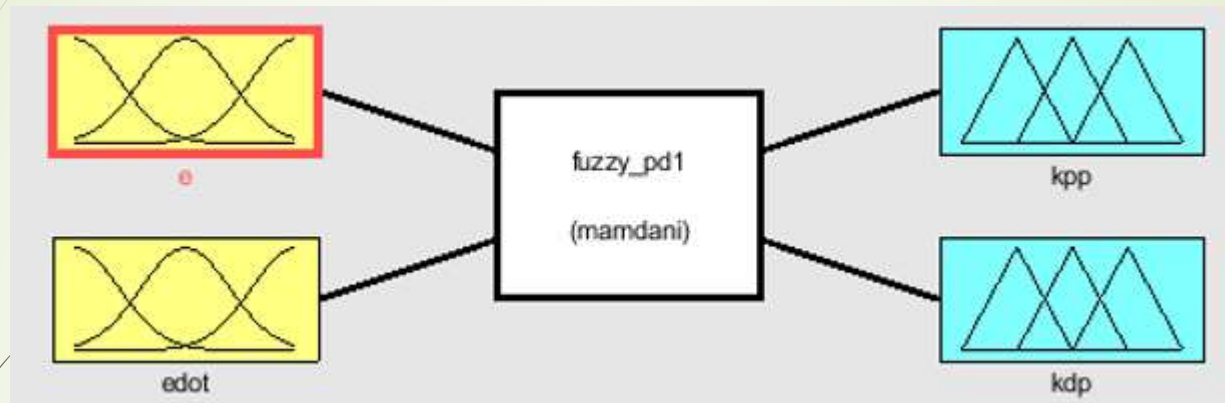
مشتق خطا

	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	B	B	B	B	B	B	B
NM	S	S	B	B	B	S	S
NS	S	S	S	B	S	S	S
ZO	S	S	S	S	S	S	S
PS	S	B	B	S	B	B	B
PM	S	S	B	B	B	S	S
PB	S	B	B	B	B	B	B

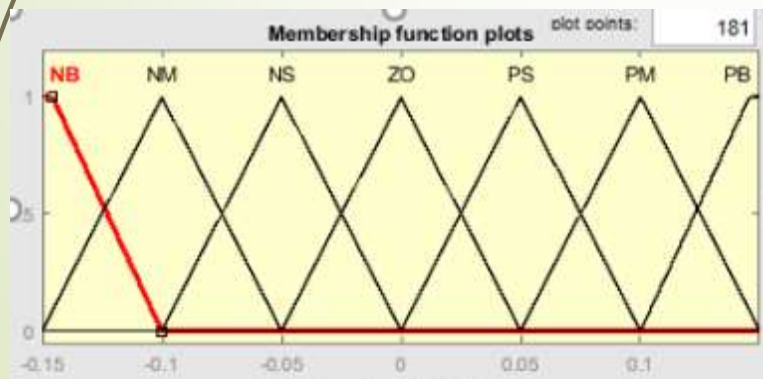
جدول قواعد اگر-آنگاه فازی برای تنظیم  $kp'$

# طراحی کنترل کننده PID فازی برای ارتفاع

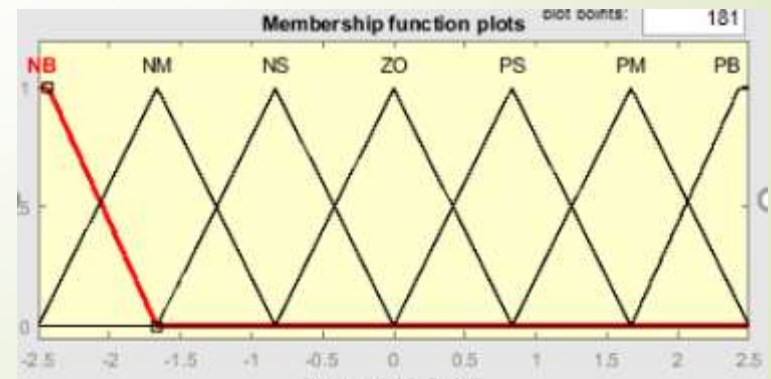
سیستم فازی:

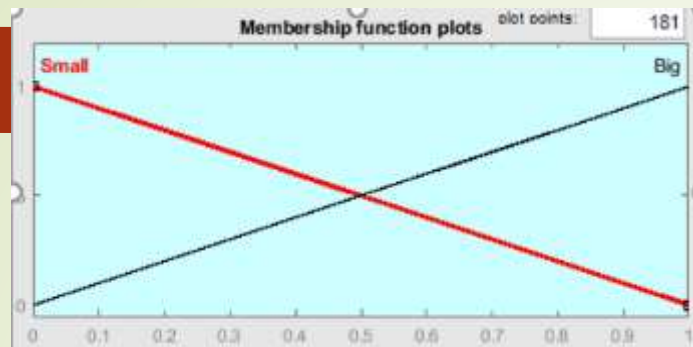


تابع عضویت خطا:

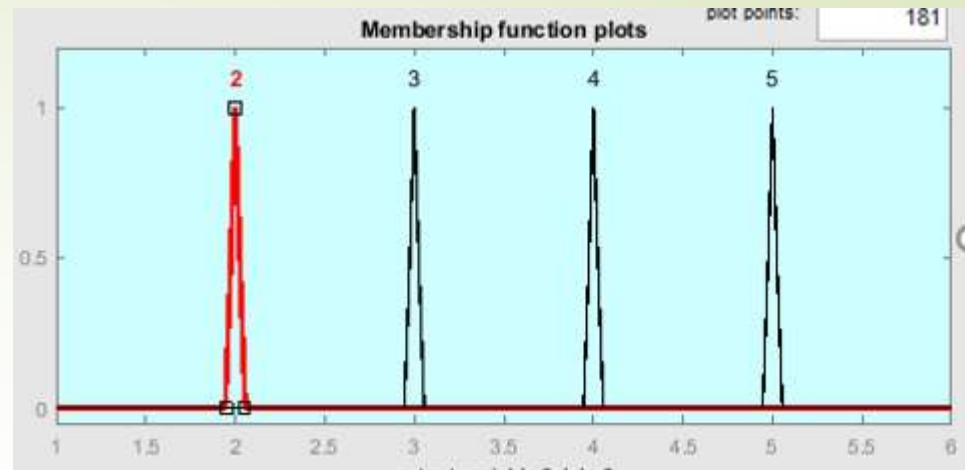


تابع عضویت مشتق خطا:





تابع عضویت 'kd', 'kp':



تابع عضویت  $\alpha$ :

مشتق خطا

خطا

	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	2	2	2	2	2	2	2
NM	3	3	2	2	2	3	3
NS	4	3	3	2	3	3	4
ZO	5	4	3	3	3	4	5
PS	4	3	3	2	3	3	4
PM	3	3	2	2	2	3	3
PB	2	2	2	2	2	2	2

جدول قواعد اگر-آنگاه فازی برای تنظیم  $\alpha$

جداول قواعد فازی:

# جداول قواعد فازی:

## مشتق خطا

	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	B	B	B	B	B	B	B
NM	S	S	B	B	B	S	S
NS	S	S	S	B	S	S	S
ZO	S	S	S	S	S	S	S
PS	S	B	B	S	B	B	B
PM	S	S	B	B	B	S	S
PB	S	B	B	B	B	B	B

جدول قواعد اگر-آنگاه فازی برای تنظیم 'kp

## مشتق خطا

	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	S	S	S	S	S	S	S
NM	B	B	S	S	S	B	B
NS	B	B	B	S	B	B	B
ZO	B	B	B	B	B	B	B
PS	B	B	B	S	B	B	B
PM	B	B	S	S	S	B	B
PB	S	S	S	S	S	S	S

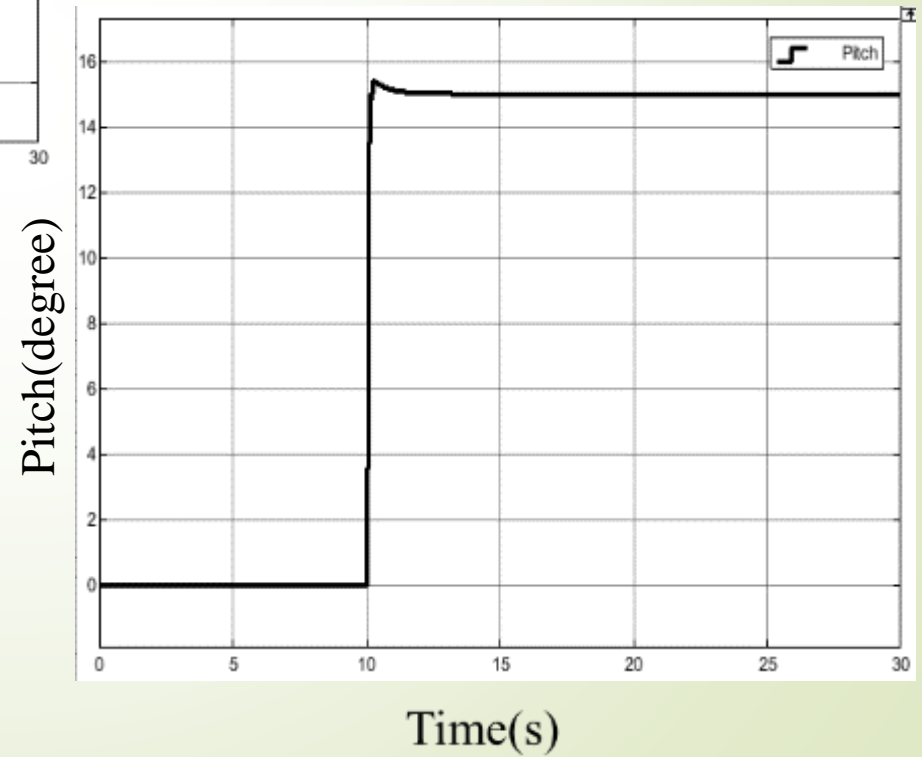
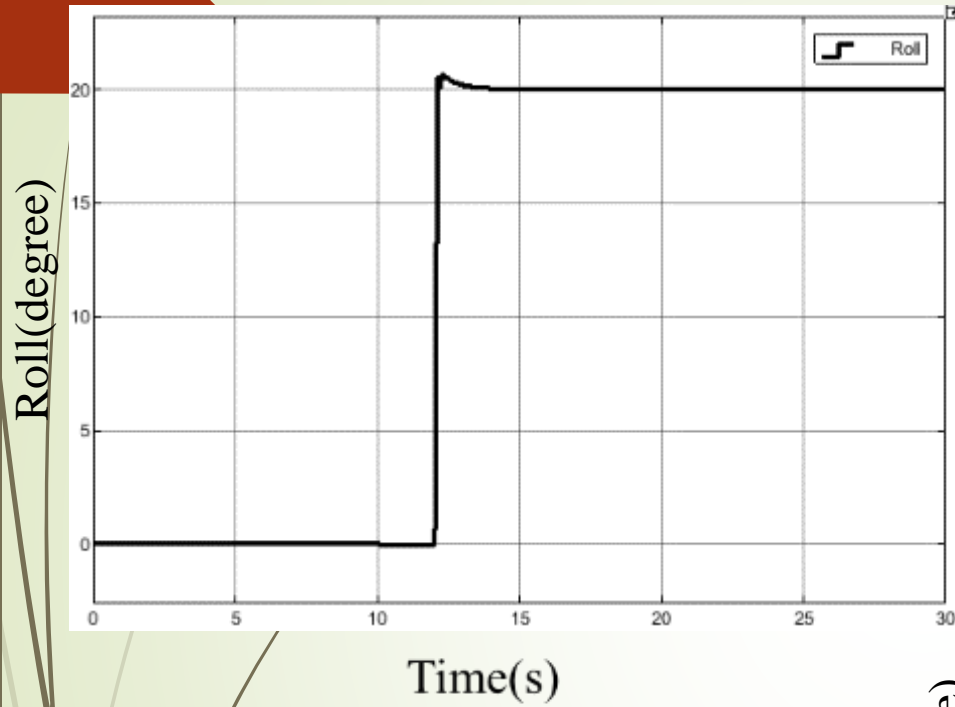
جدول قواعد اگر-آنگاه فازی برای تنظیم 'kd

$$K'_p = \frac{K_p - K_{p \min}}{K_{p \max} - K_{p \min}}$$

$$K'_d = \frac{K_d - K_{d \min}}{K_{d \max} - K_{d \min}}$$

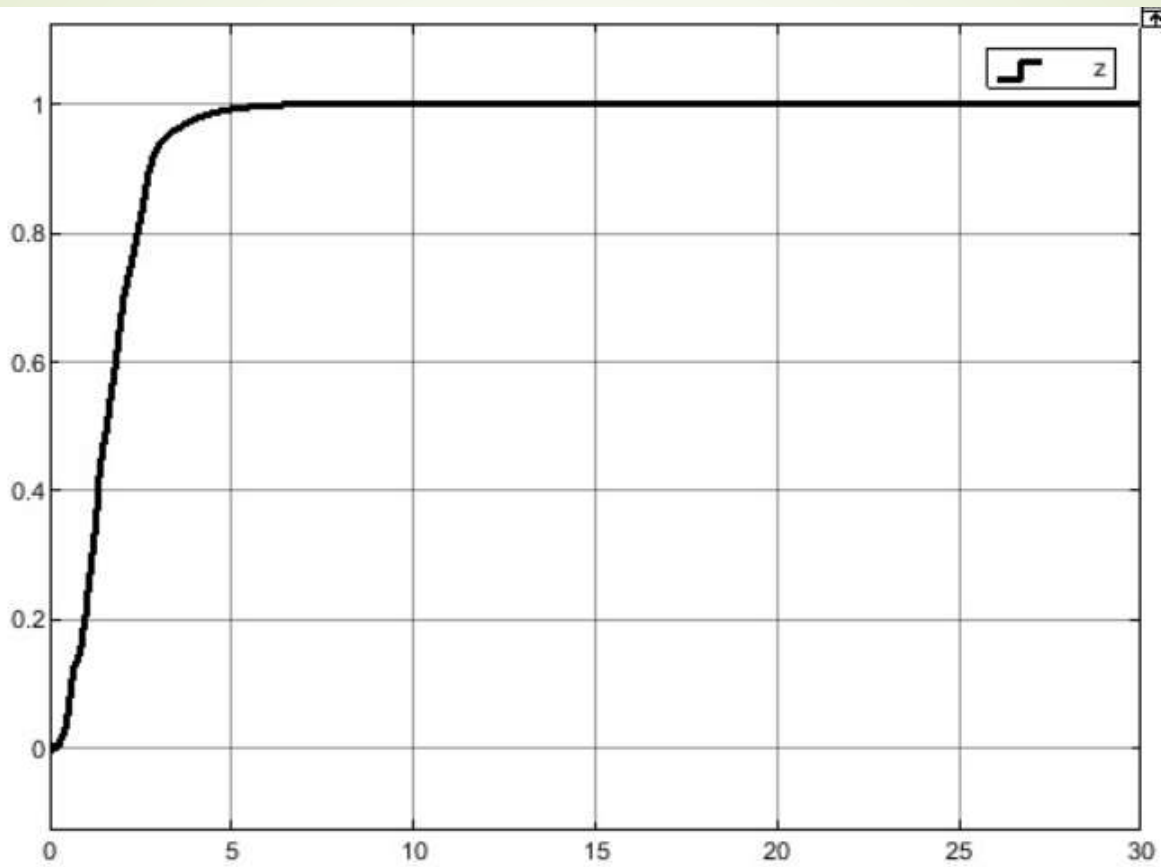
$$\alpha = \frac{K_p^2}{K_i K_d}$$

# نتایج شبیه سازی





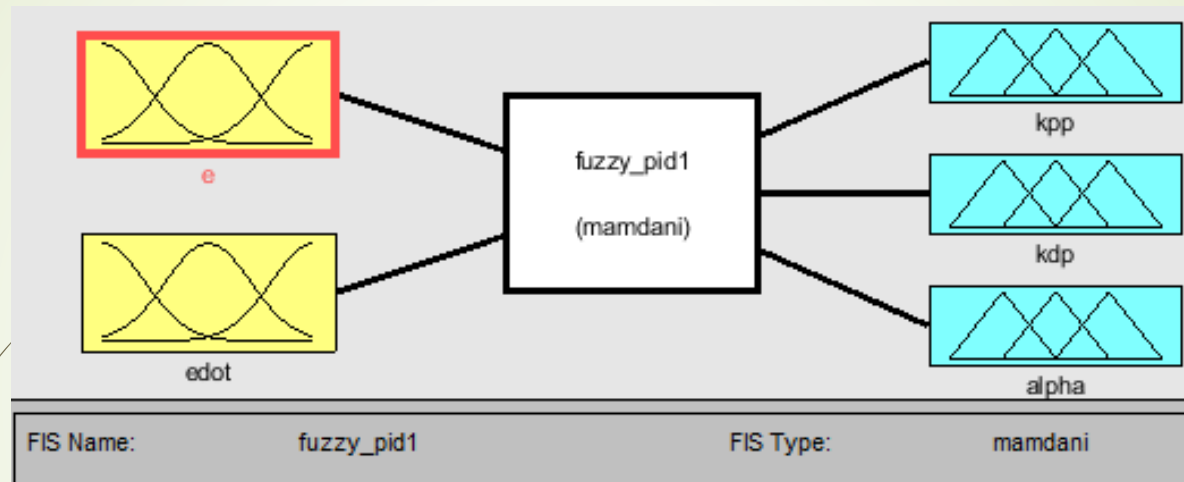
$z(m)$



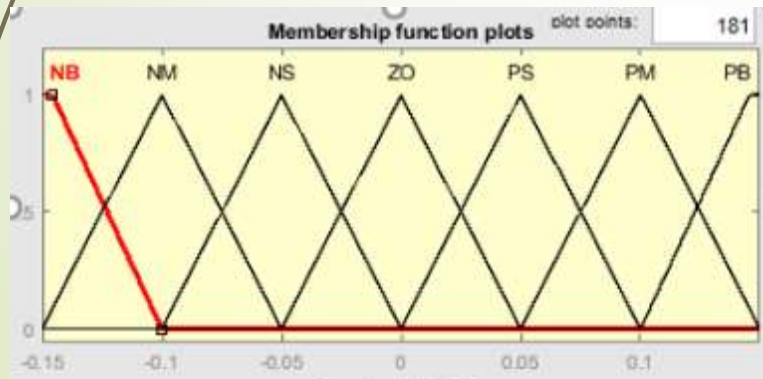
Time(s)

# طراحی کنترل کننده PID فازی برای زاویه

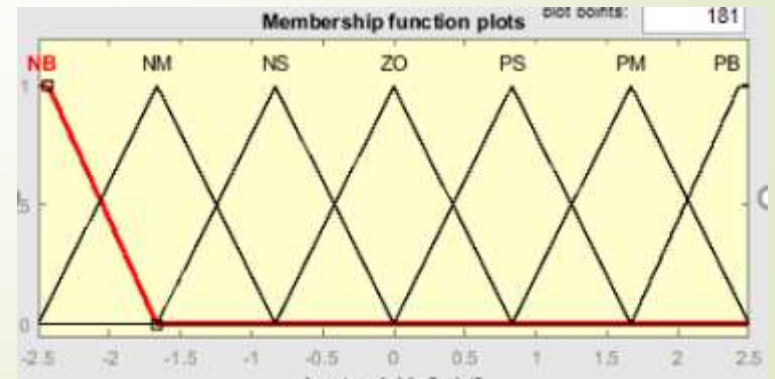
سیستم فازی:

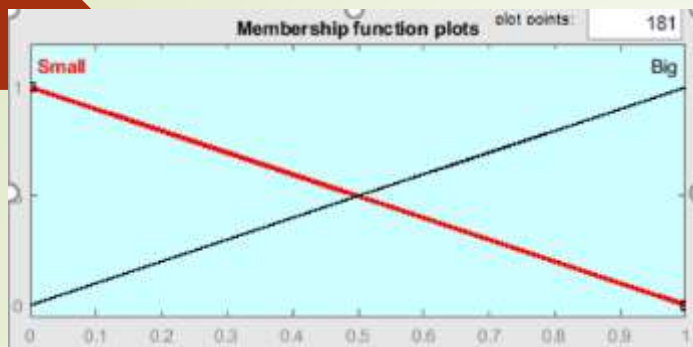


تابع عضویت خطا:

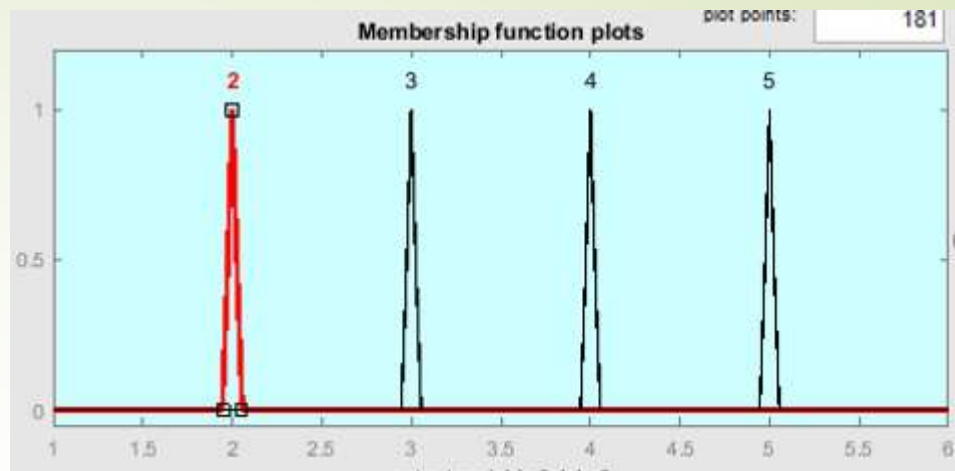


تابع عضویت مشتق خطا:





تابع عضویت  $k_p', k_d'$ :



تابع عضویت  $\alpha$ :

مشتق خطا

جدول قواعد فازی:

خطا

	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	2	2	2	2	2	2	2
NM	3	3	2	2	2	3	3
NS	4	3	3	2	3	3	4
ZO	5	4	3	3	3	4	5
PS	4	3	3	2	3	3	4
PM	3	3	2	2	2	3	3
PB	2	2	2	2	2	2	2

جدول قواعد اگر-آنگاه فازی برای تنظیم  $\alpha$

## مشتق خطا

	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	B	B	B	B	B	B	B
NM	S	S	B	B	B	S	S
NS	S	S	S	B	S	S	S
ZO	S	S	S	S	S	S	S
PS	S	B	B	S	B	B	B
PM	S	S	B	B	B	S	S
PB	S	B	B	B	B	B	B

جدول قواعد اگر-آنگاه فازی برای تنظیم 'kp

## مشتق خطا

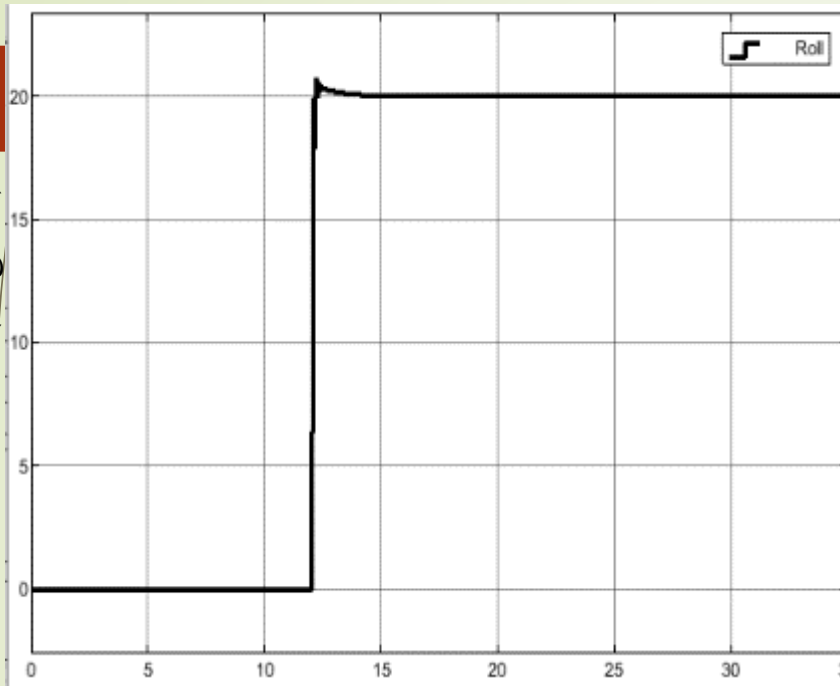
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	S	S	S	S	S	S	S
NM	B	B	S	S	S	B	B
NS	B	B	B	S	B	B	B
ZO	B	B	B	B	B	B	B
PS	B	B	B	S	B	B	B
PM	B	B	S	S	S	B	B
PB	S	S	S	S	S	S	S

جدول قواعد اگر-آنگاه فازی برای تنظیم 'kd

سیستم فازی با فازی گر تکین، موتور استنتاج ضرب، فازی زدای میانگین مرکز و توابع عضویت مثلثی، سیستم فازی استفاده شده است.

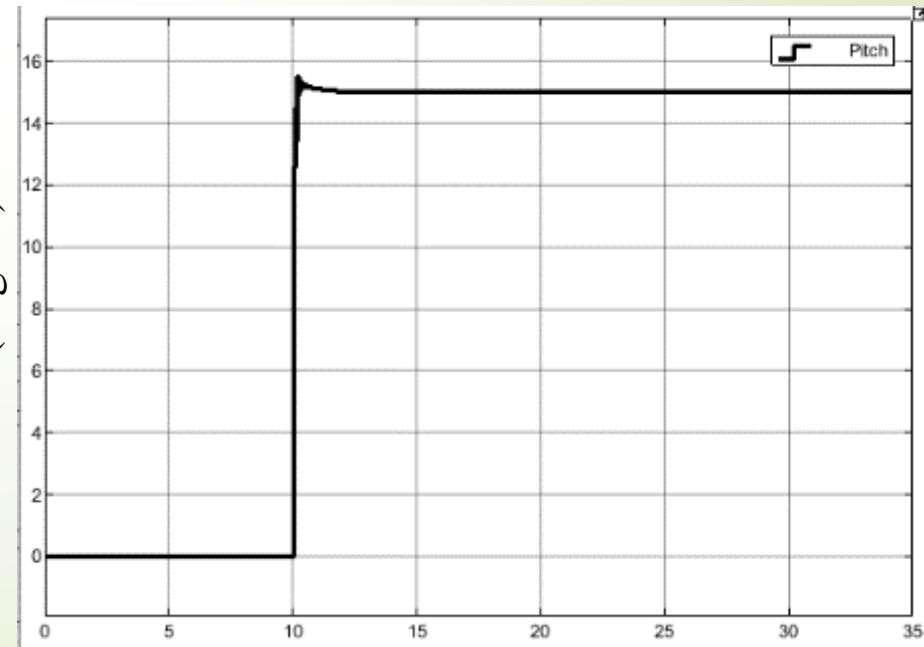
# نتایج شبیه سازی

Roll(degree)



Time(s)

Pitch(degree)

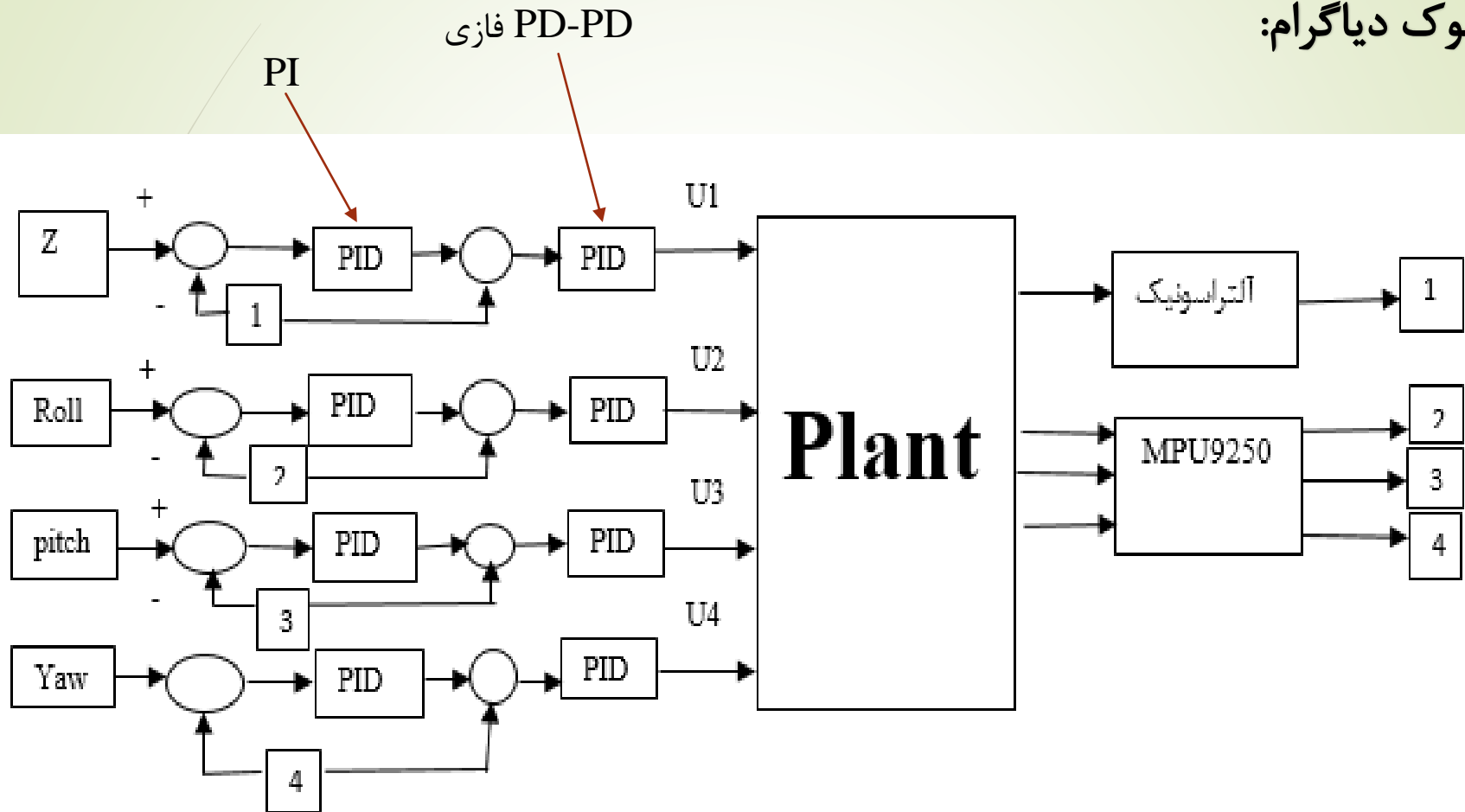


Time(s)



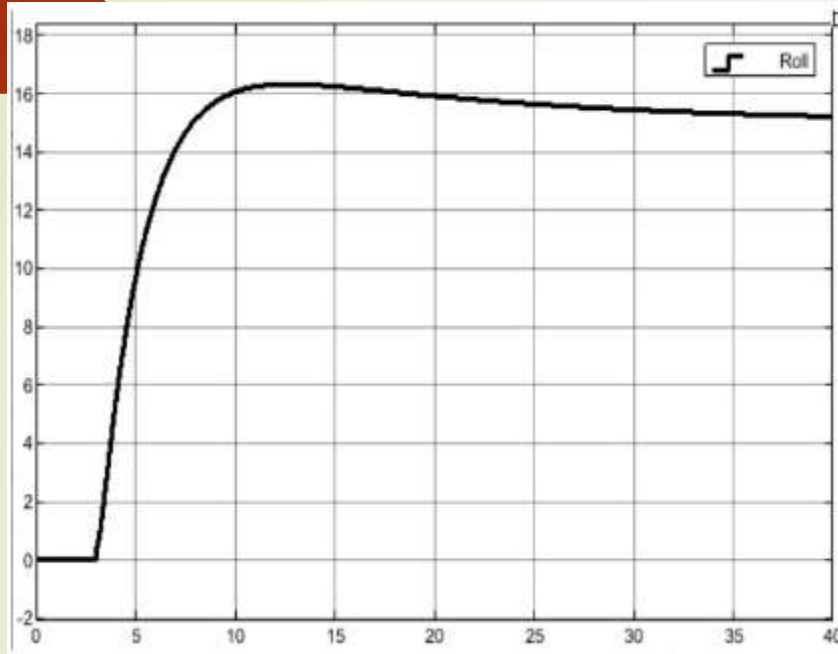
# روش آبشاری برای زوایا

بلوک دیاگرام:



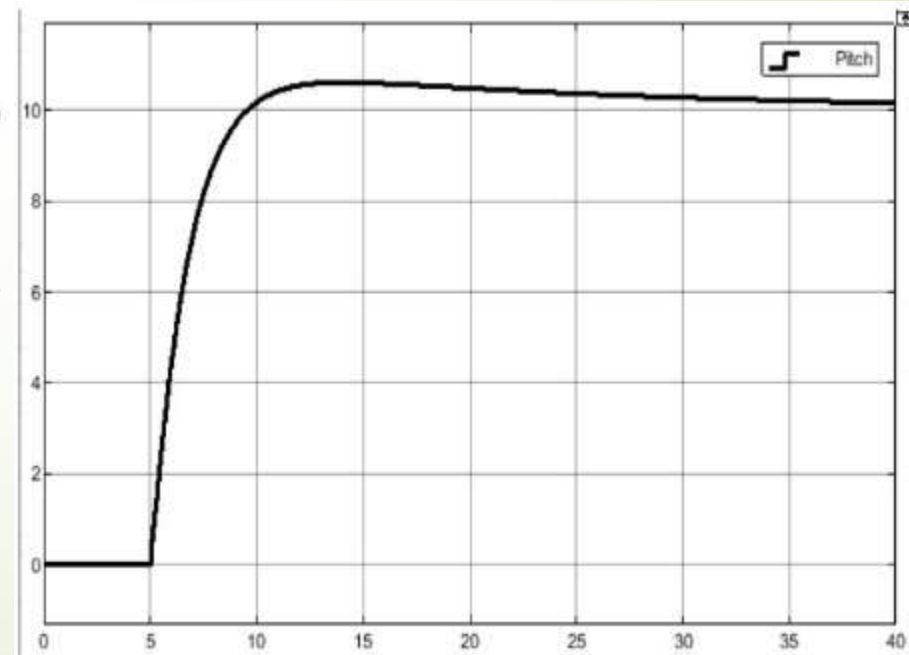
# نتایج شبیه سازی با کنترل کننده PD

Roll(degree)



Time(s)

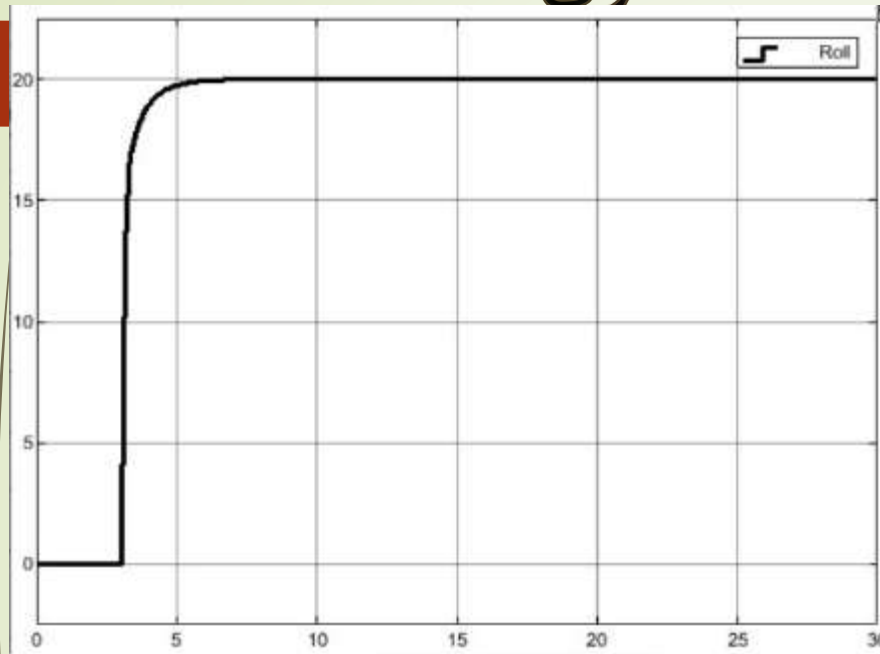
Pitch(degree)



Time(s)

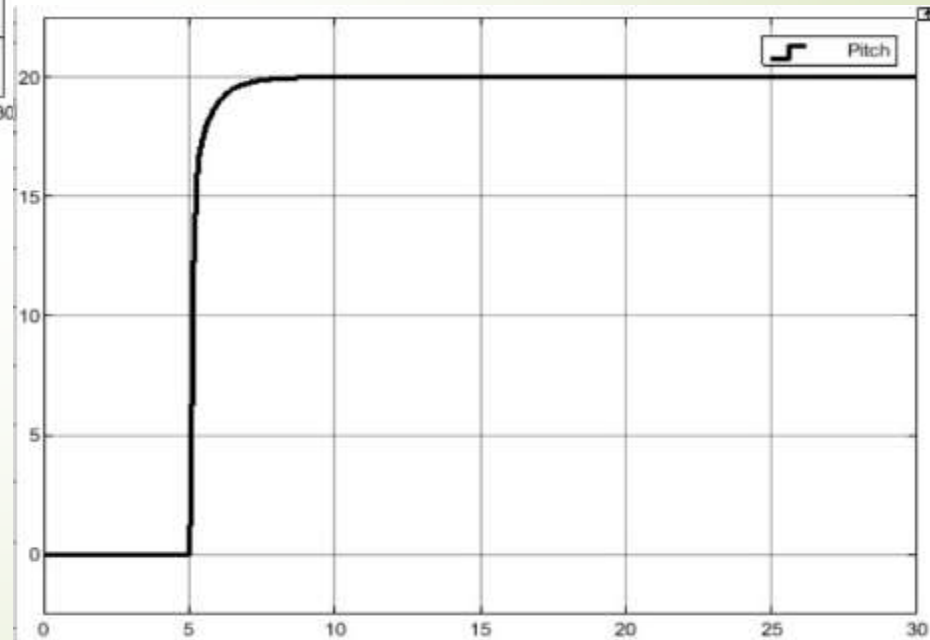
# نتایج شبیه سازی باکنترل کننده PD فازی

Roll(degree)



Time(s)

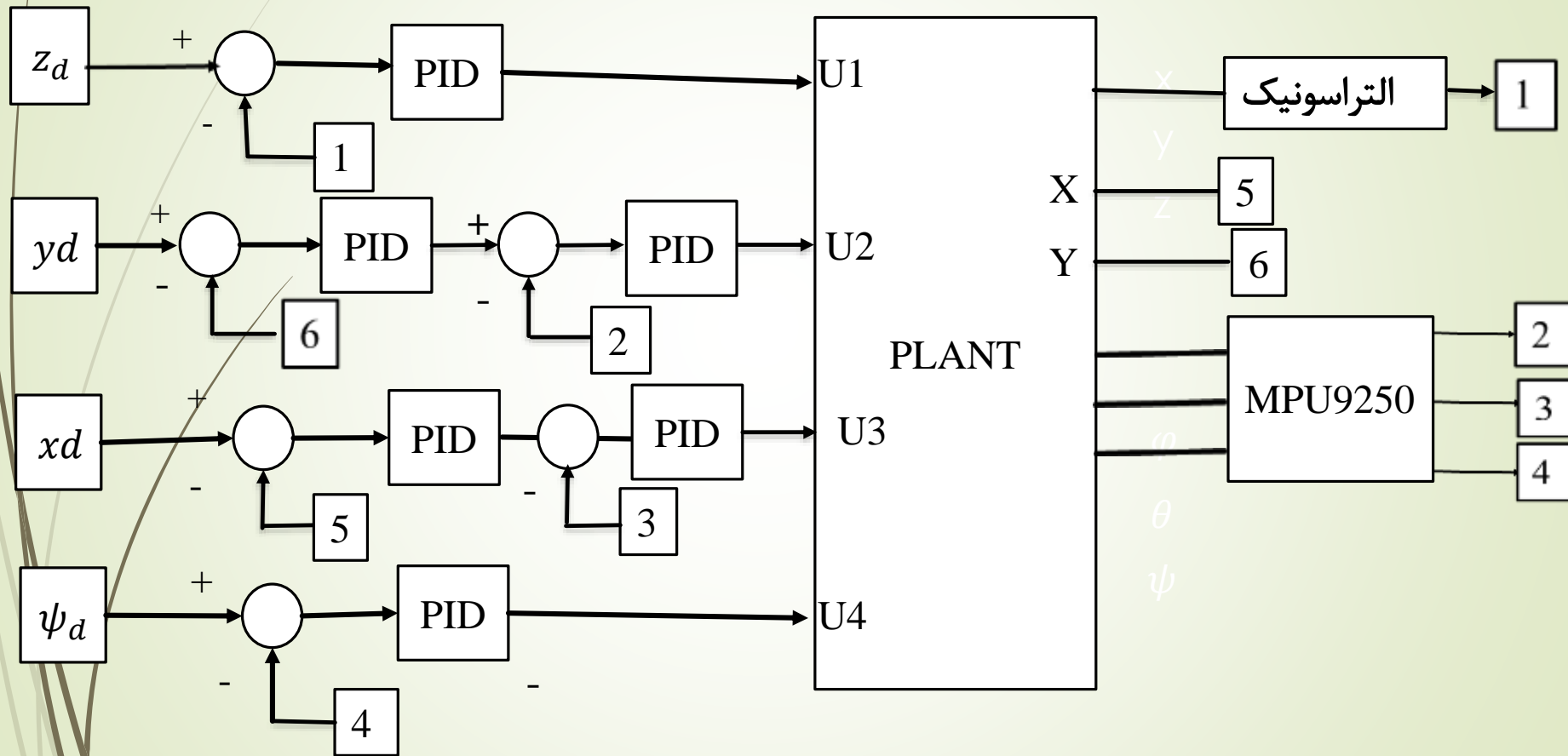
Pitch(degree)



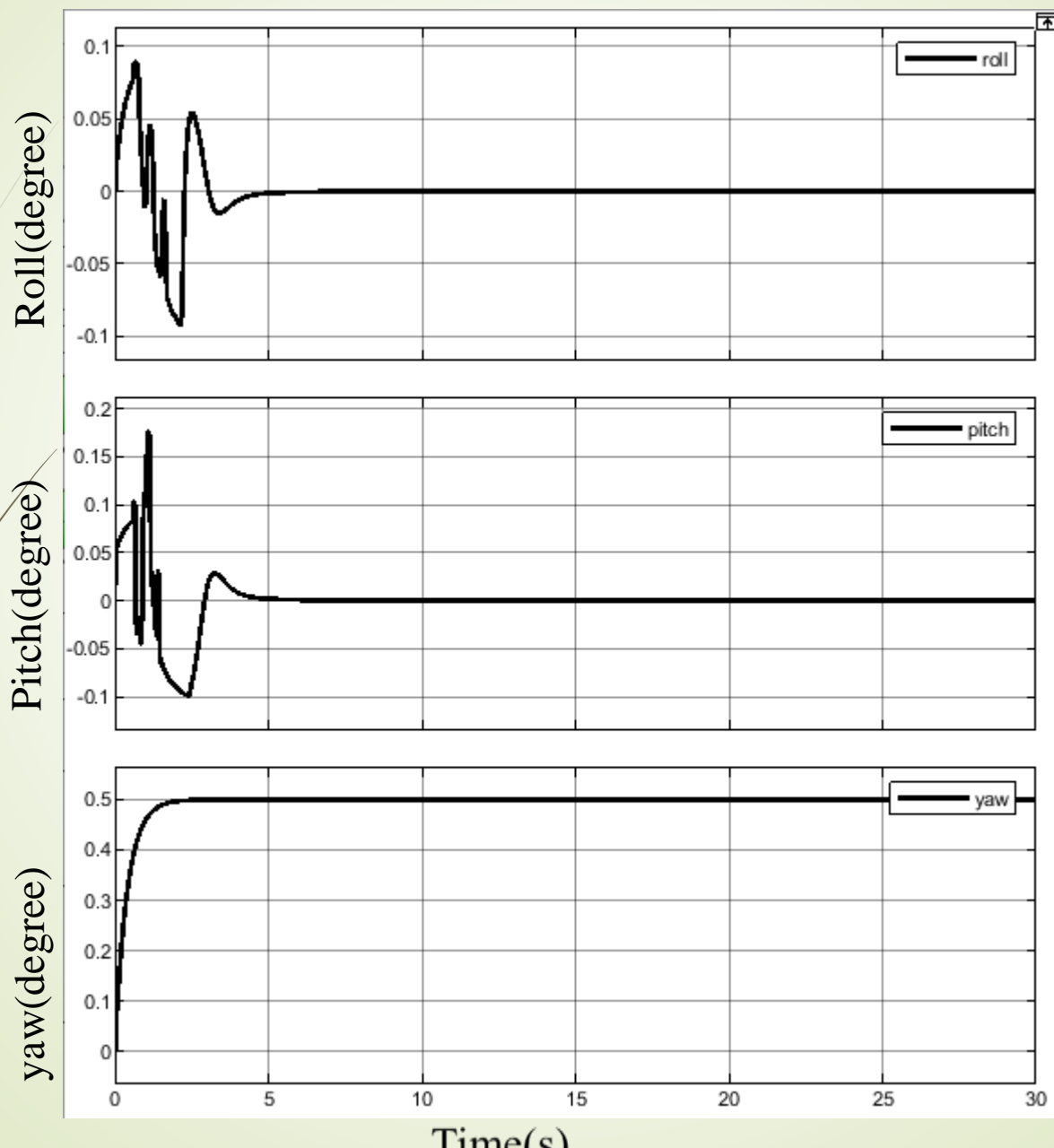
Time(s)

# کنترل موقعیت

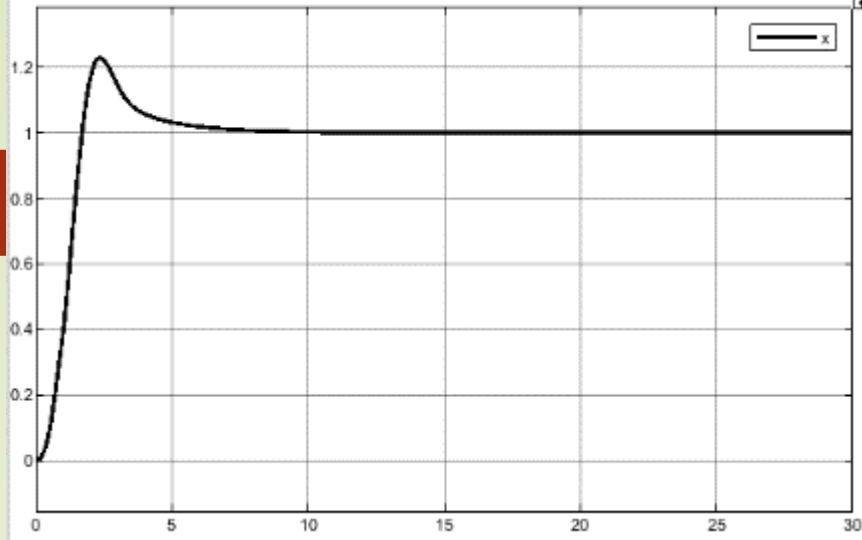
بلوک دیاگرام:



# نتایج شبیه سازی

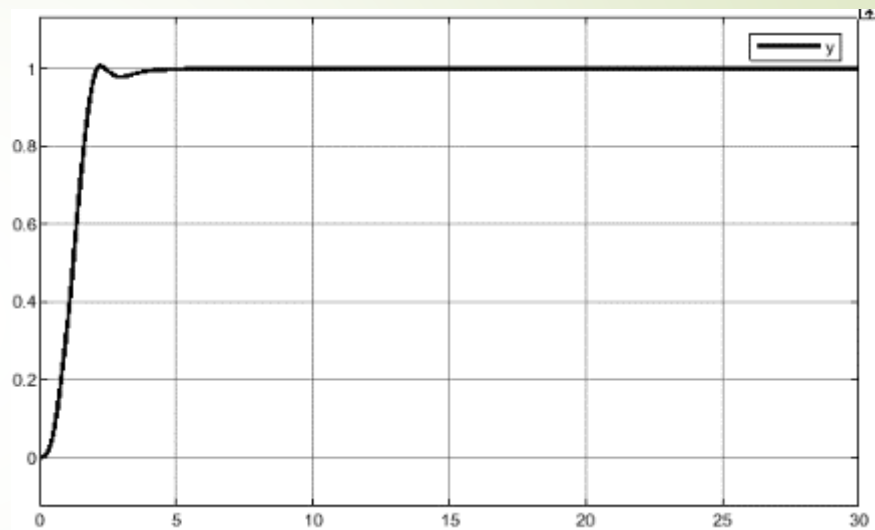


$X(\text{meter})$



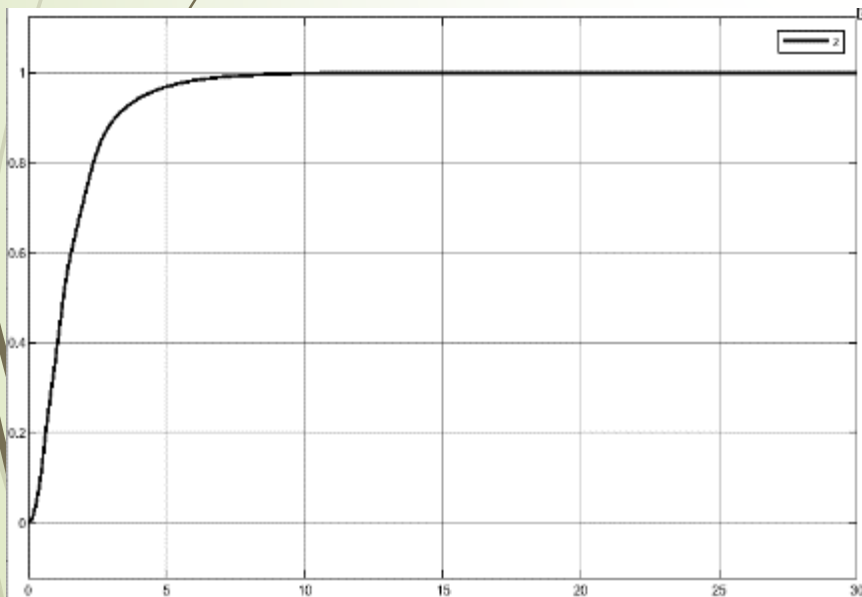
Time(s)

$Y(\text{meter})$



Time(s)

$Z(\text{meter})$



Time(s)





سنسور

روش‌های  
استفاده شده  
برای بدست  
آوردن بهتر  
داده‌ها از  
سنسور:

میانگین پنجره ای

فیلتر کامپلیمنتی

$$Angle = \alpha \times gyroscope\_angle + (1 - \alpha) \times accelerometer$$

نتیجه خوبی نمی‌دهد.

فیلتر کالمن

# اندازه‌گیری زاویه با ژيروسکوپ

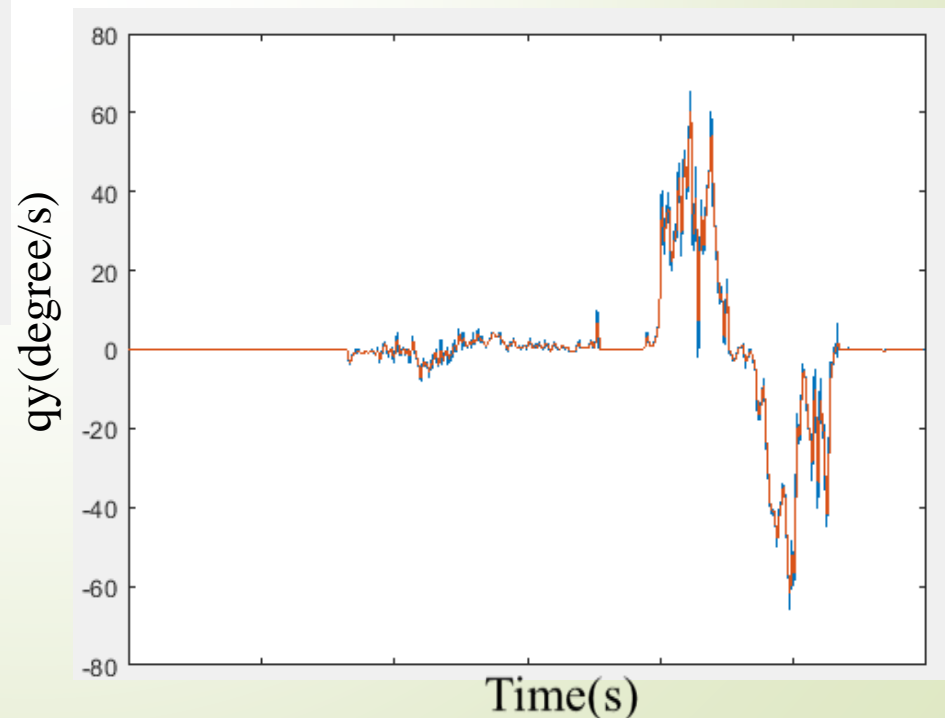
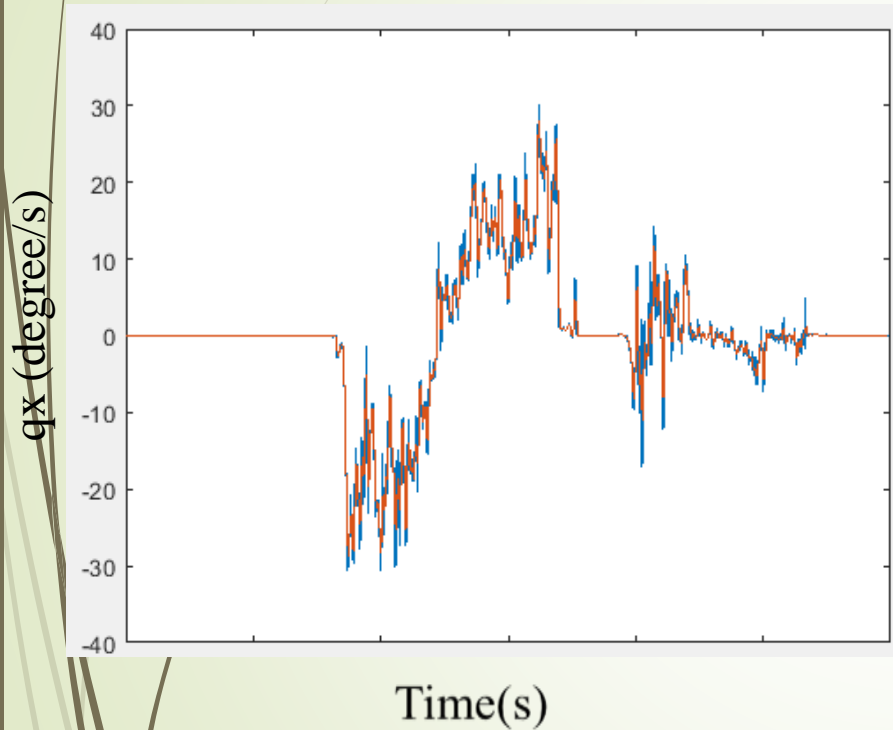
استفاده از روش میانگین پنجره ای برای فیلتر کردن نویز:

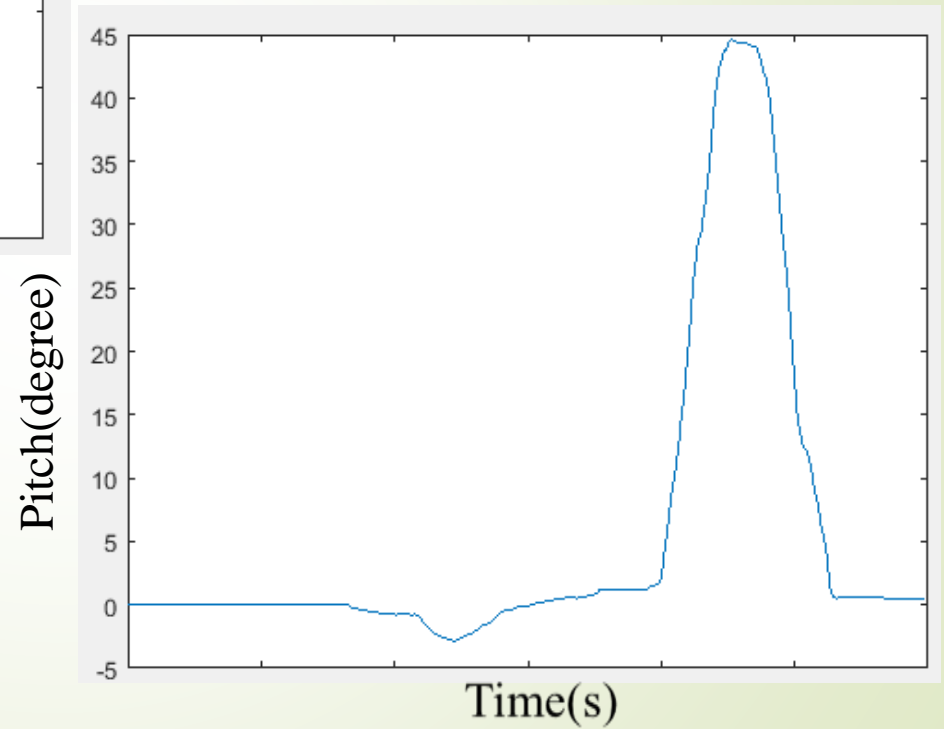
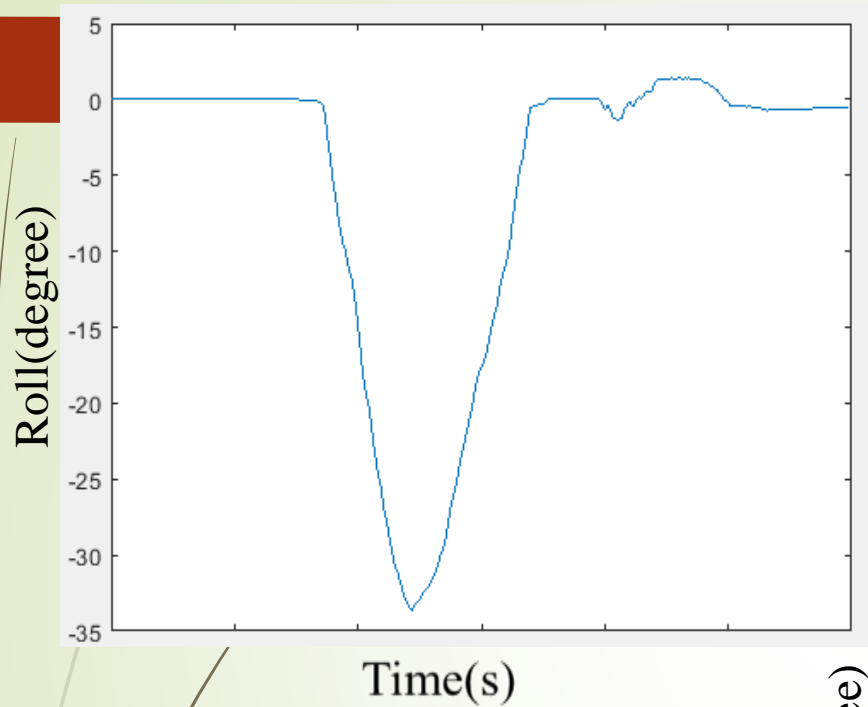
هنگامی که سنسور در حال چرخش است:

تغییر roll و pitch

زمان: ۱۷ ثانیه

اندازه پنجره: ۵۰



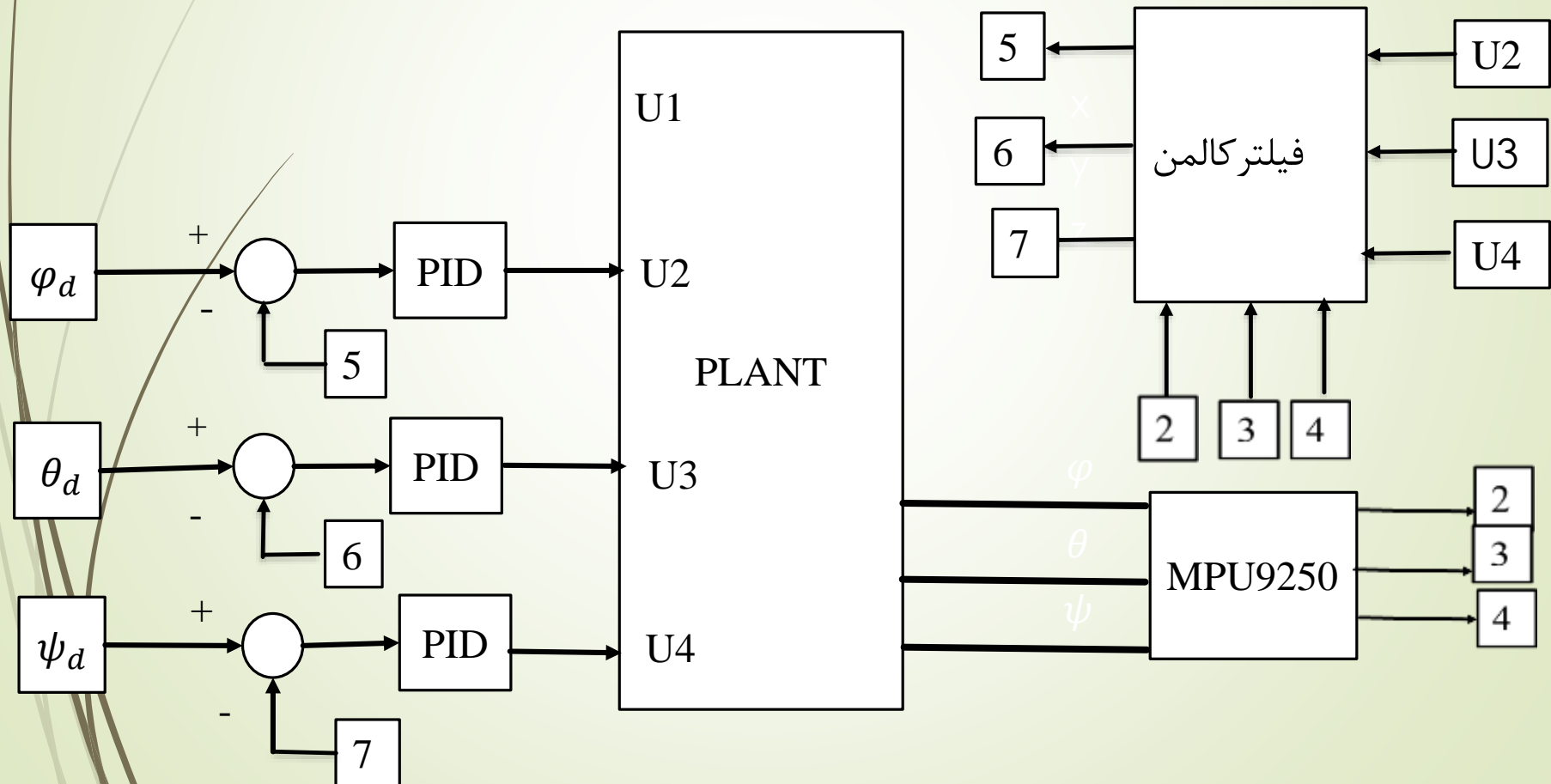


با روشن شدن موتورها به دلیل ایجاد شدن نویز شدید زوایا بهم می‌ریزند و داده‌های غلط بدست می‌آید!!

## راه حل: فیلتر کالمن

فیلتر کالمن یک فیلتر بازگشتی بهینه یا یک تخمینگر است که حالت یک سیستم دینامیکی را از اندازه گیری های نویزی برآورد کند.

### بلوک دیاگرام:



# مدل ژيروسکوپ:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & dt \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$Q = 0.00001$$

$$\begin{bmatrix} x_{k+1} \\ x_{k+1} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} x_k \\ \dot{x}_k \end{bmatrix} \quad y = C \begin{bmatrix} x_k \\ \dot{x}_k \end{bmatrix}$$

$$R = 10000000$$

## معادلات:

$$\begin{cases} \underline{x}_k = A_{k-1} \underline{x}_{k-1} + B_{k-1} \underline{u}_{k-1} + \underline{w}_{k-1} \longrightarrow \text{عدم قطعیت در مدل} \\ \underline{z}_k = H_k \underline{x}_k + \underline{v}_k \longrightarrow \text{نویز اندازه گیری} \end{cases}$$

### مرحله پیش بینی

$$\begin{aligned} \hat{\underline{x}}_k^- &= A_{k-1} \hat{\underline{x}}_{k-1} + B_{k-1} \underline{u}_{k-1} \\ P_k^- &= A_{k-1} P_{k-1} A_{k-1}^T + Q_{k-1} \end{aligned}$$

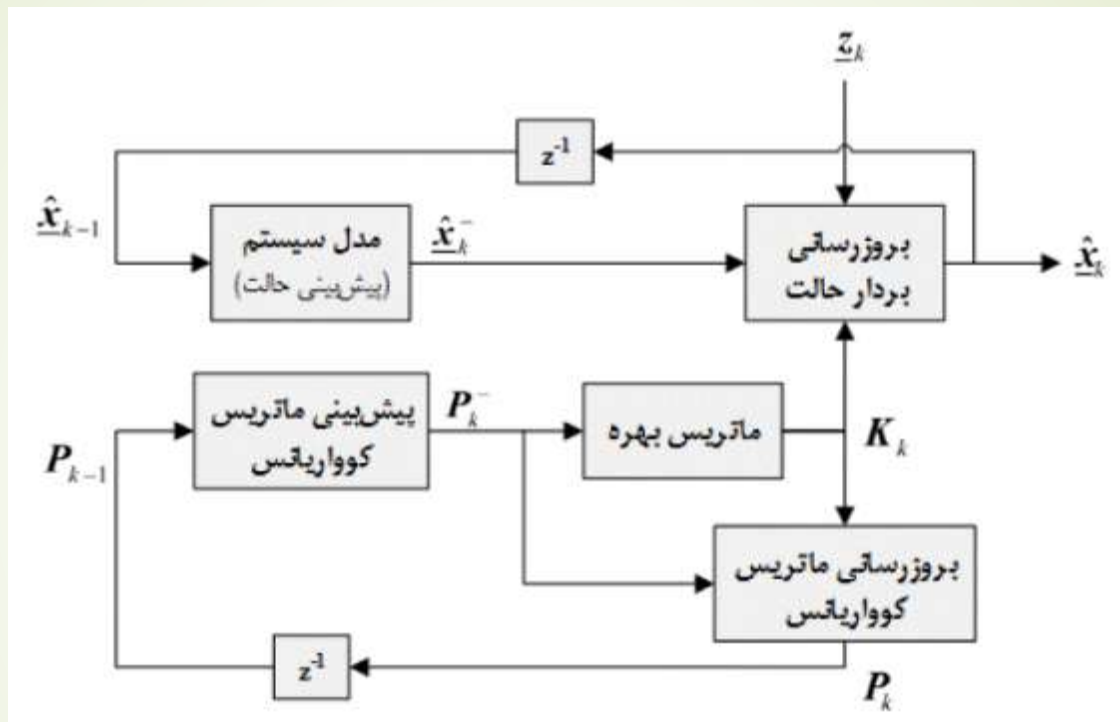
$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R_k)^{-1}$$

### مرحله بروزرسانی

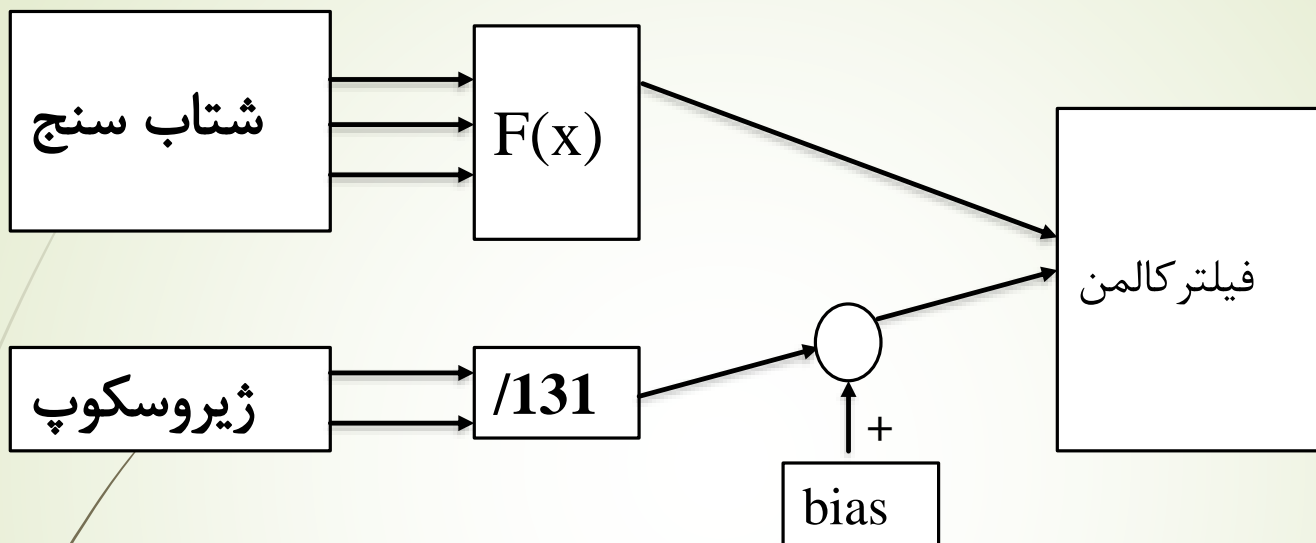
$$\begin{aligned} \hat{\underline{x}}_k &= \hat{\underline{x}}_k^- + K_k (\underline{z}_k - H_k \hat{\underline{x}}_k^-) \\ P_k &= (I - K_k H_k) P_k^- \end{aligned}$$



# بلوک دیاگرام:



## بلوک دیاگرام برای اجرای فیلتر کالمن بر روی سنسور MPU:



$$roll = \tan^{-1}\left(\frac{a_y}{\sqrt{a_x^2 + a_z^2}}\right) * \frac{180}{\pi}$$

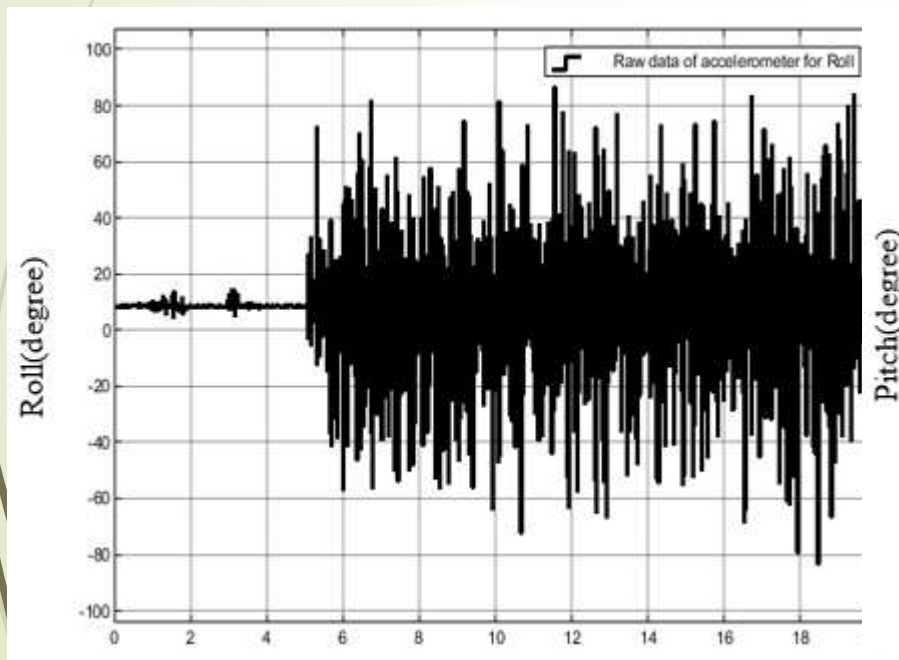
$$pitch = \tan^{-1}\left(\frac{-a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}}\right) * \frac{180}{\pi}$$

## فیلتر کالمن بر روی سنسور MPU:

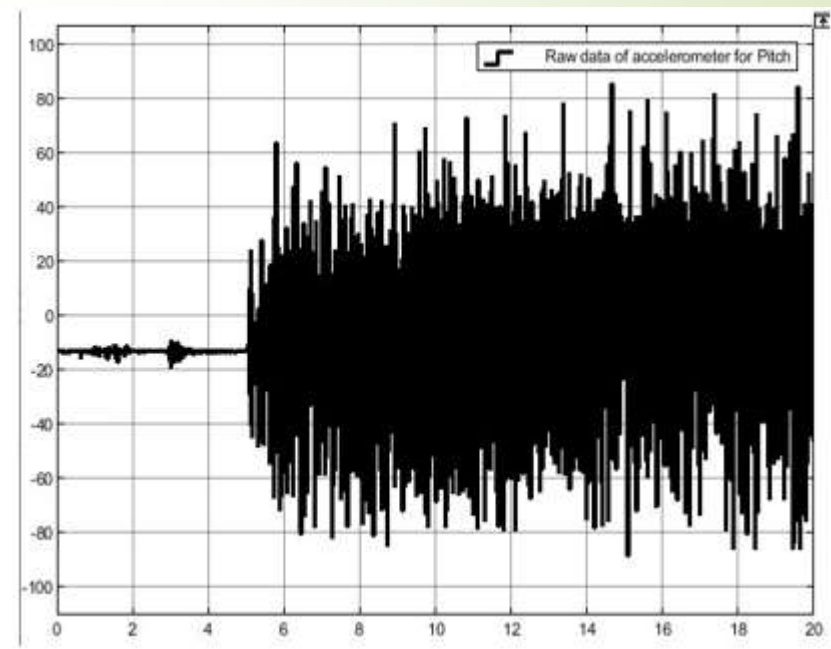
$dt * \text{خروجی ژيروسکوپ} + \text{زاویه پیچ/رول قبلی} = \text{زاویه پیچ/رول}$

$(\text{زاویه پیچ/رول} - \text{خروجی شتابسنج}) \text{ بهره کالمن} + \text{زاویه پیچ/رول} = \text{تخمین جدید}$

داده‌های خام شتاب سنج:

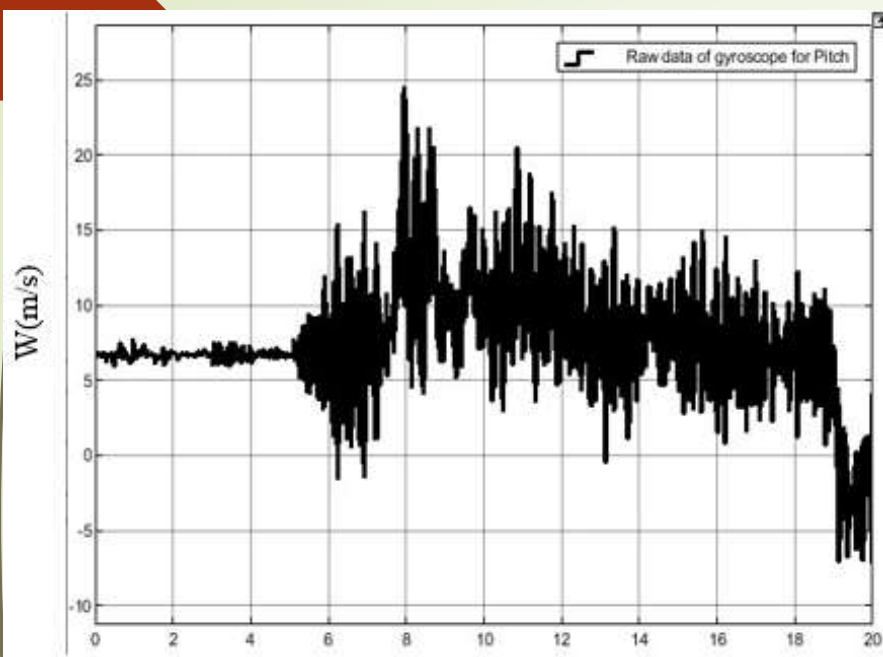


Time(s)

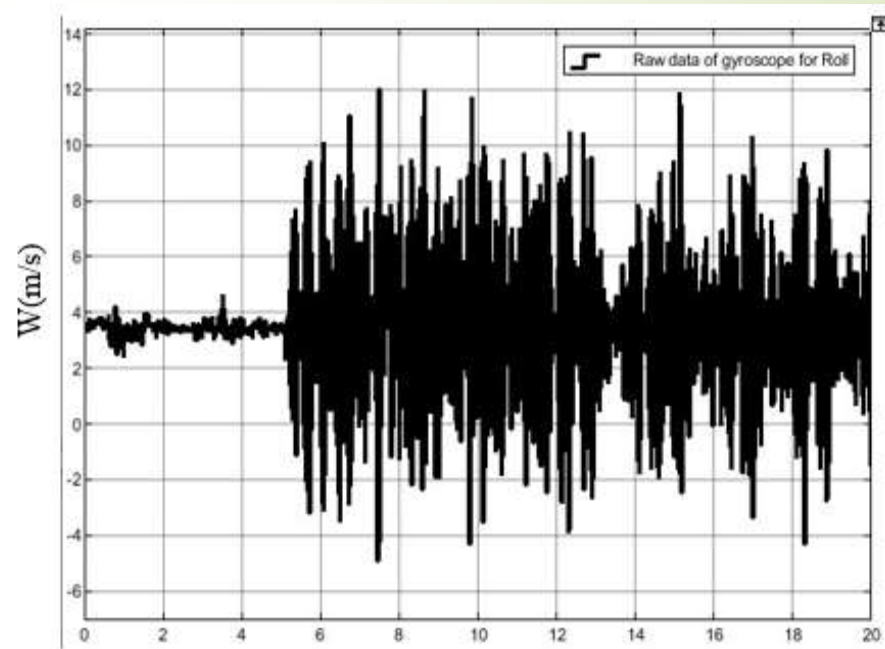


Time(s)

## داده‌های خام ژيروسکوپ:

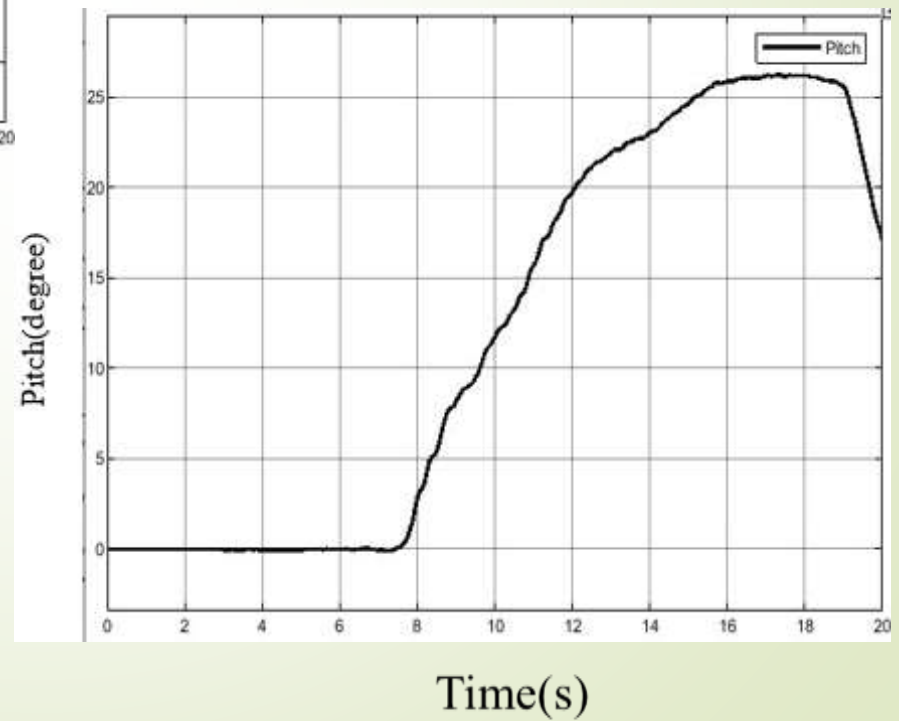
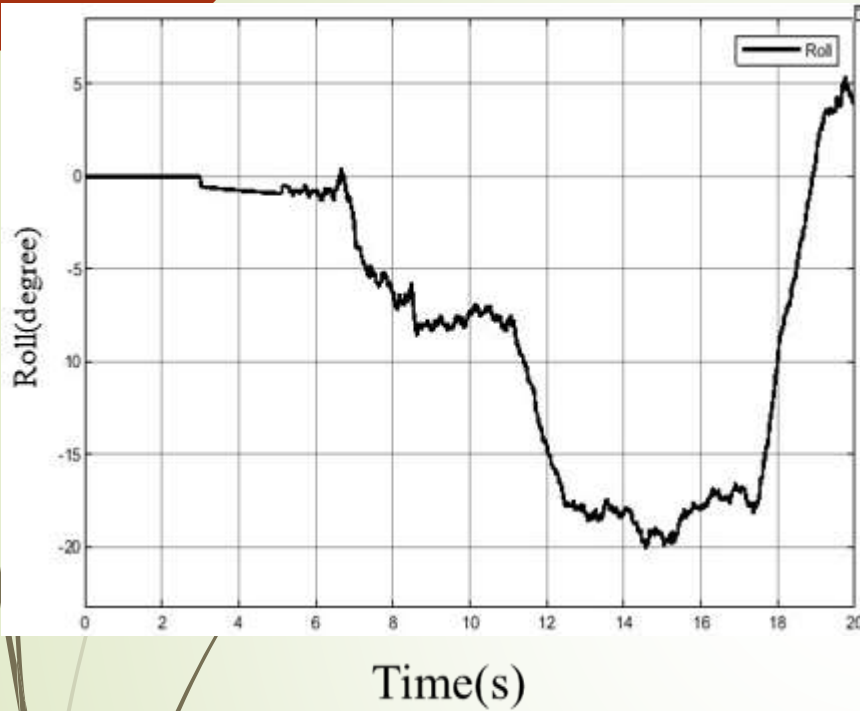


Time(s)

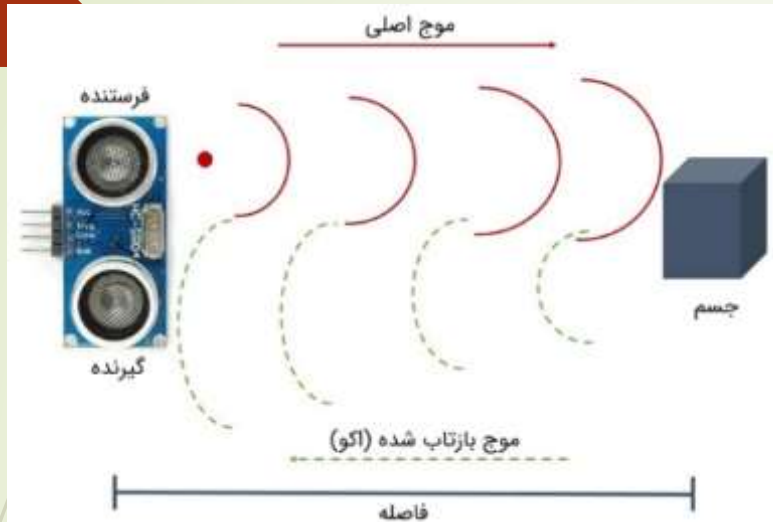


Time(s)

داده‌های پس از اعمال فیلتر کالمن:

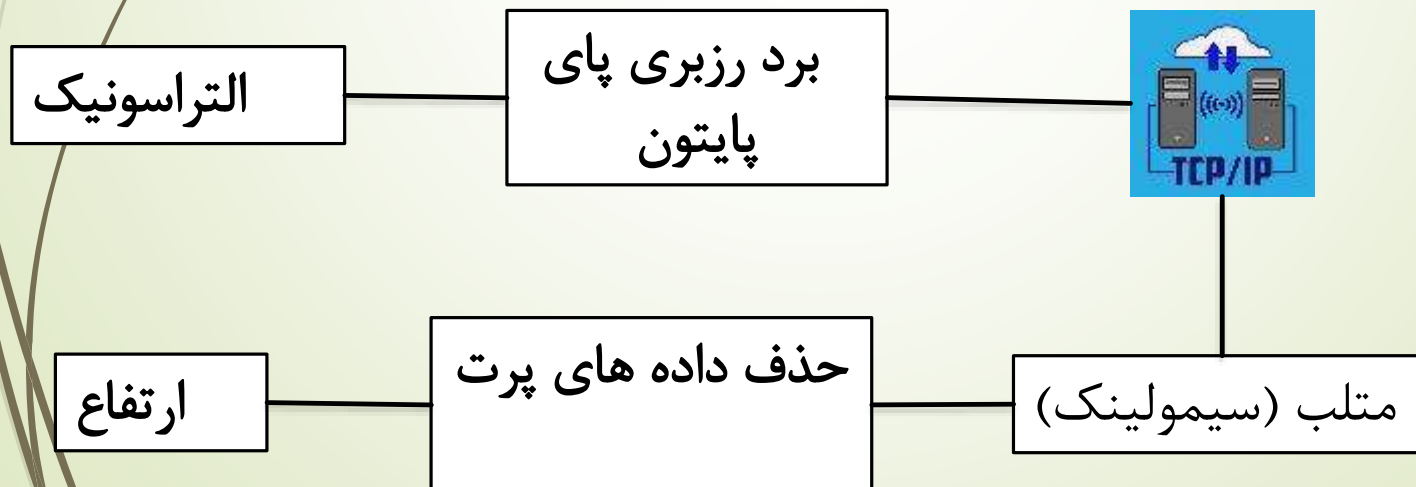


# اندازه‌گیری ارتفاع با آلتراسونیک

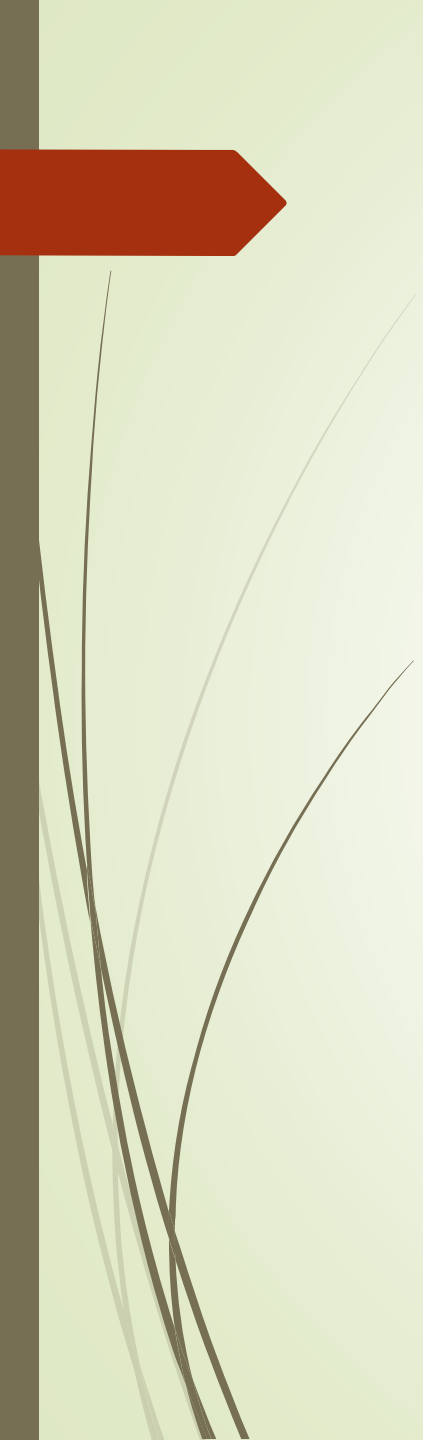


$$x = \frac{1}{2} V t$$

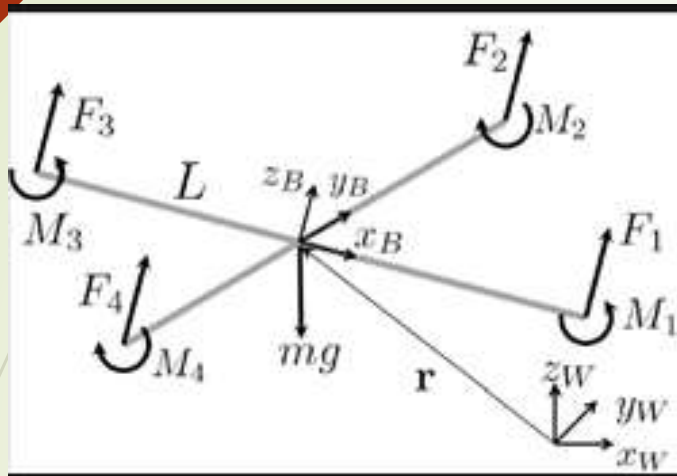
نحوه گرفتن داده‌ها از آلتراسونیک با رزبری پای و استفاده در متلب:







# نتایج عملی



$$PWM1 = U1 + U2 + U3$$

$U1 \rightarrow$  Throttle

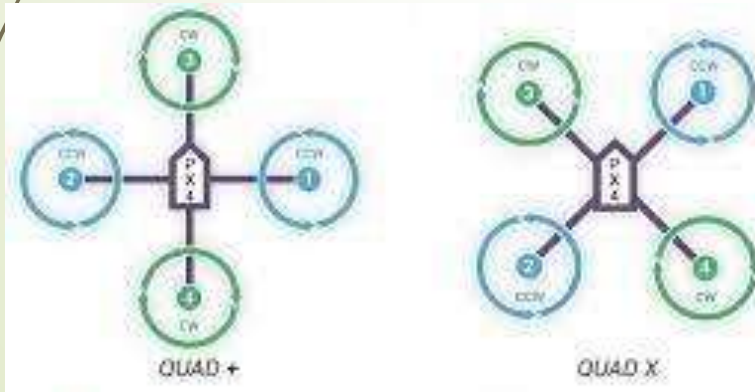
$$PWM2 = U1 + U2 - U3$$

$U2 \rightarrow$  Roll

$$PWM3 = U1 - U2 - U3$$

$U3 \rightarrow$  Pitch

$$PWM4 = U1 - U2 + U3$$



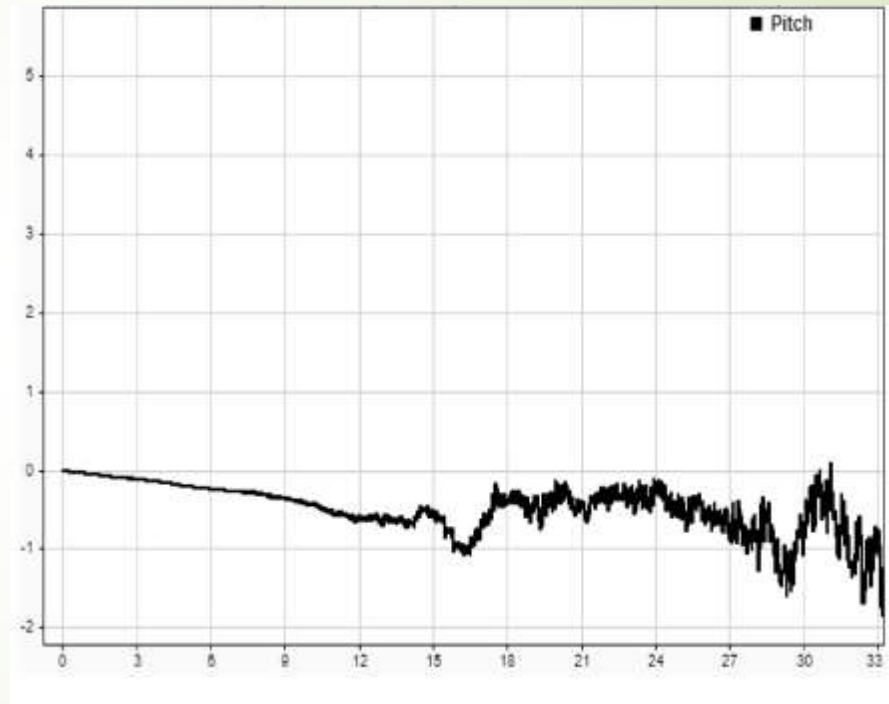
# کنترل زوایا با کنترل کننده PD فازي:

Roll (degree)



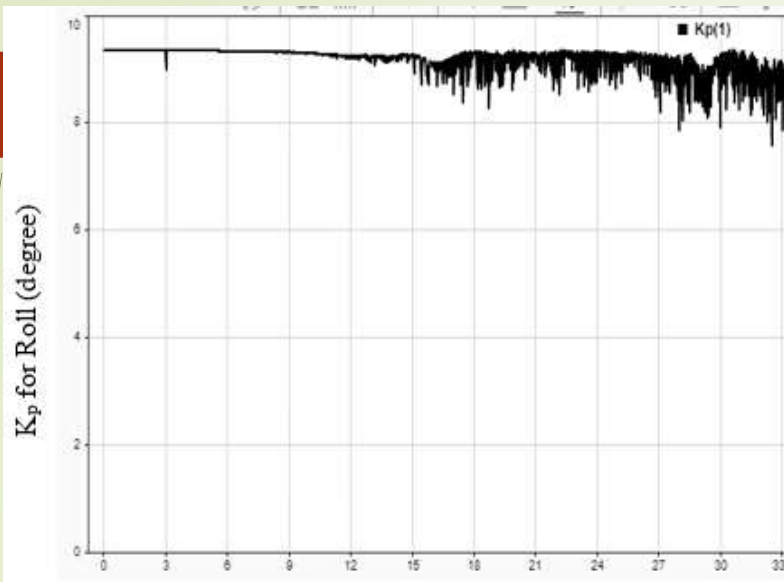
Time(s)

Pitch (degree)

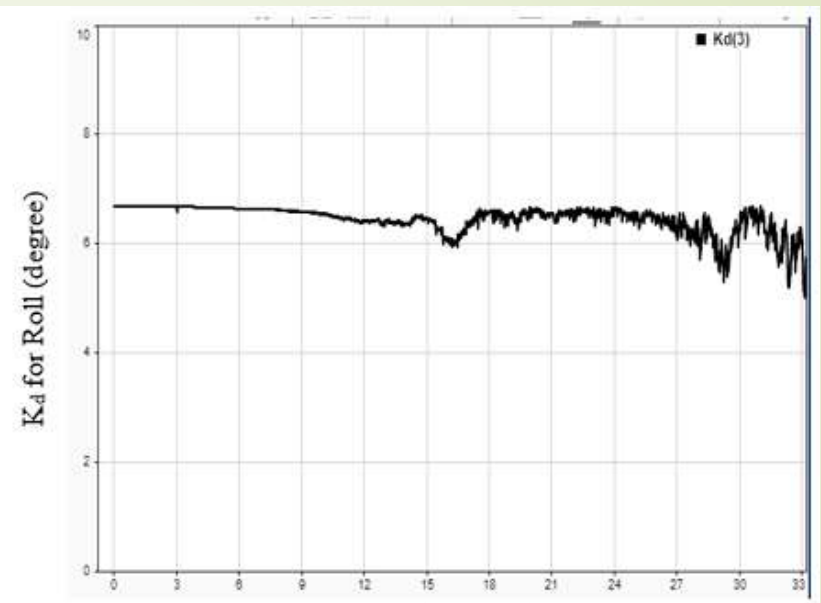


Time(s)

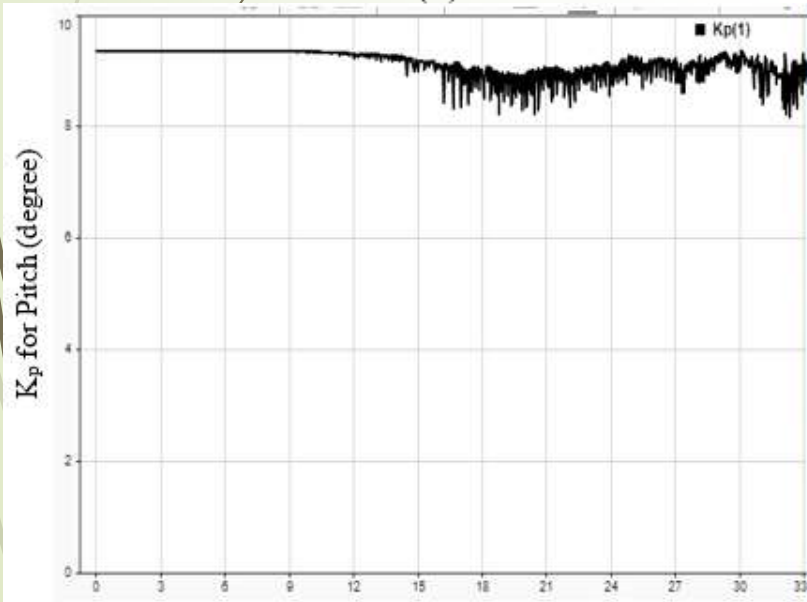
# ضرایب کنترل کننده:



Time(s)



Time(s)

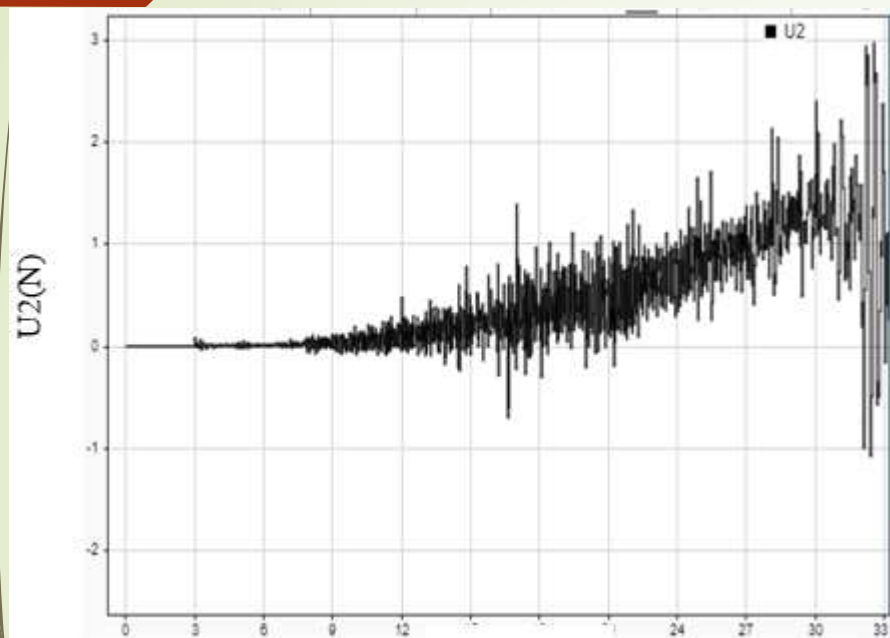


Time(s)

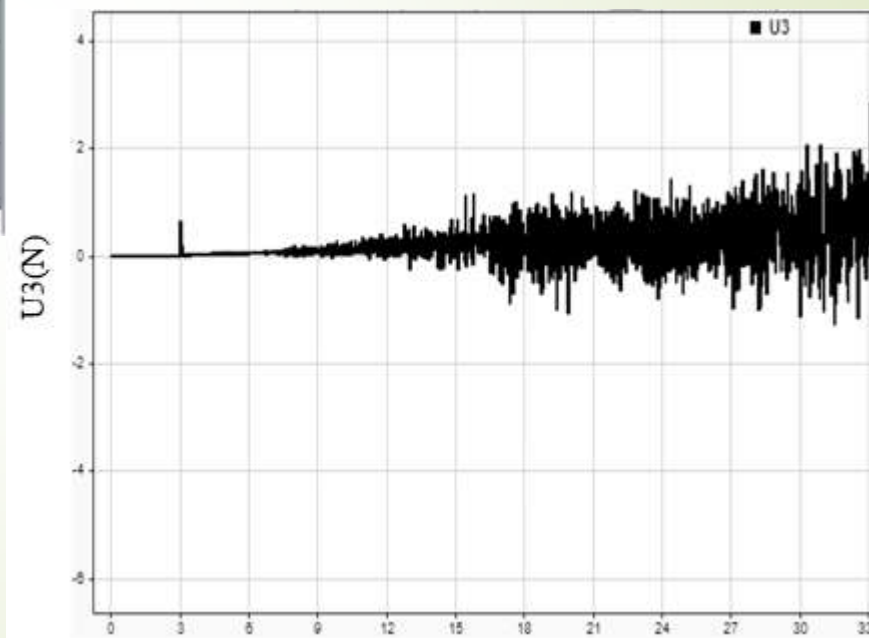


Time(s)

## سیگنال‌های کنترلی:



Time(s)

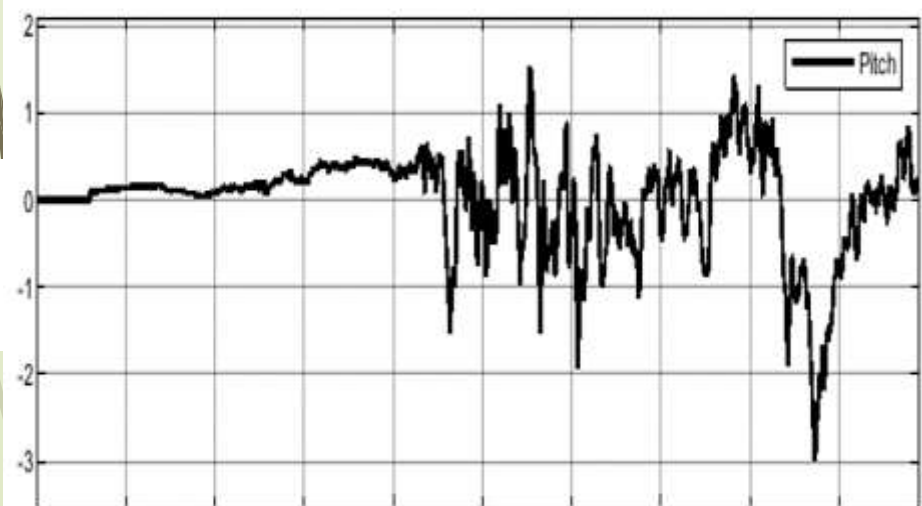
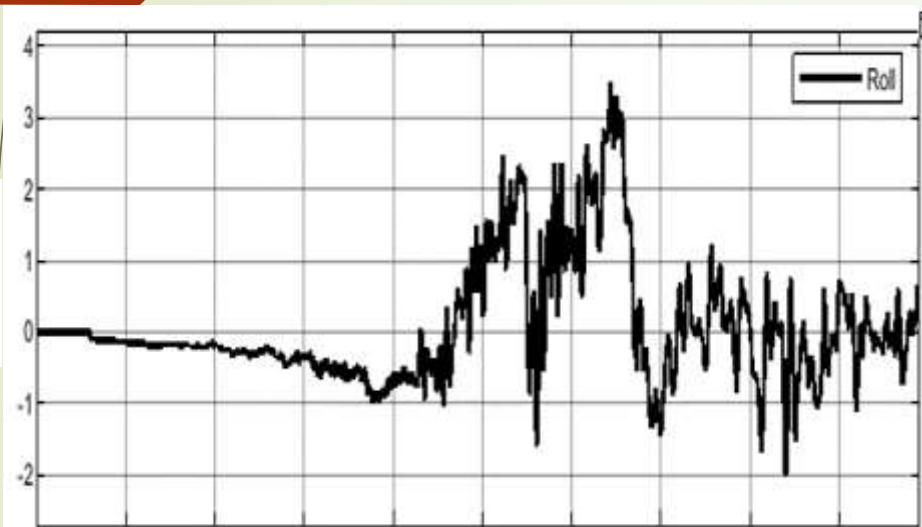


Time(s)

# کنترل زوایا با کنترل کننده PD فازی و کنترل ارتفاع با کنترل کننده PID فازی:

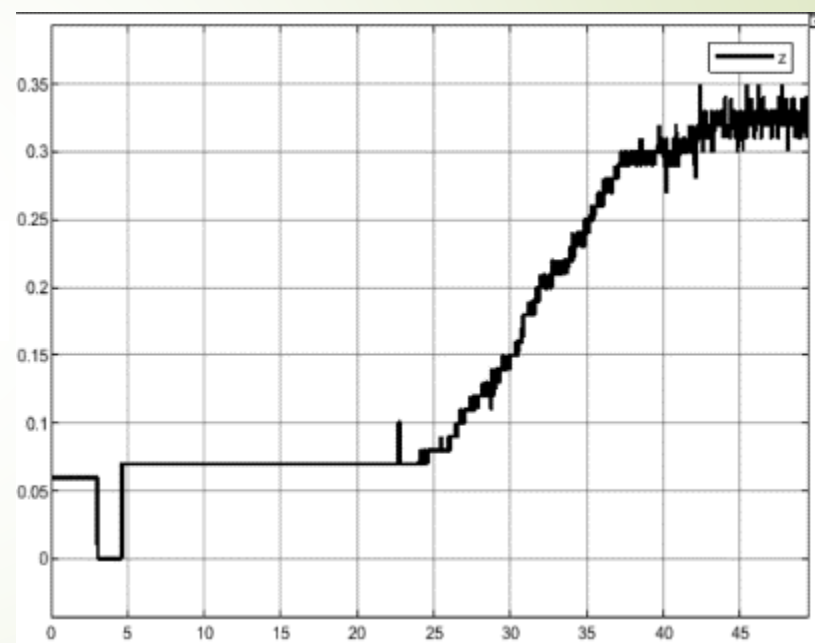
Roll (degree)

Pitch (degree)



Time(s)

Z(m)

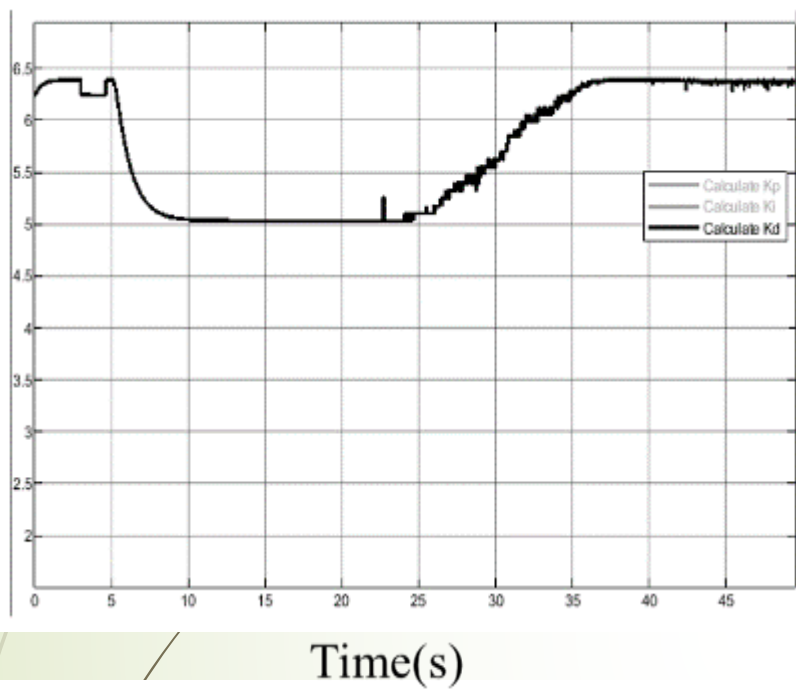


Time(s)

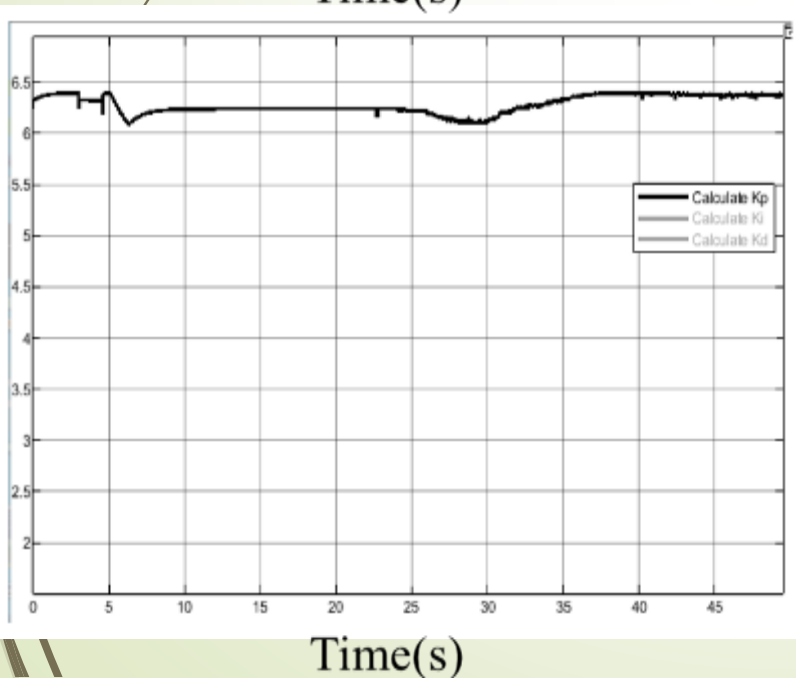


## ضرایب کنترل کننده ارتفاع:

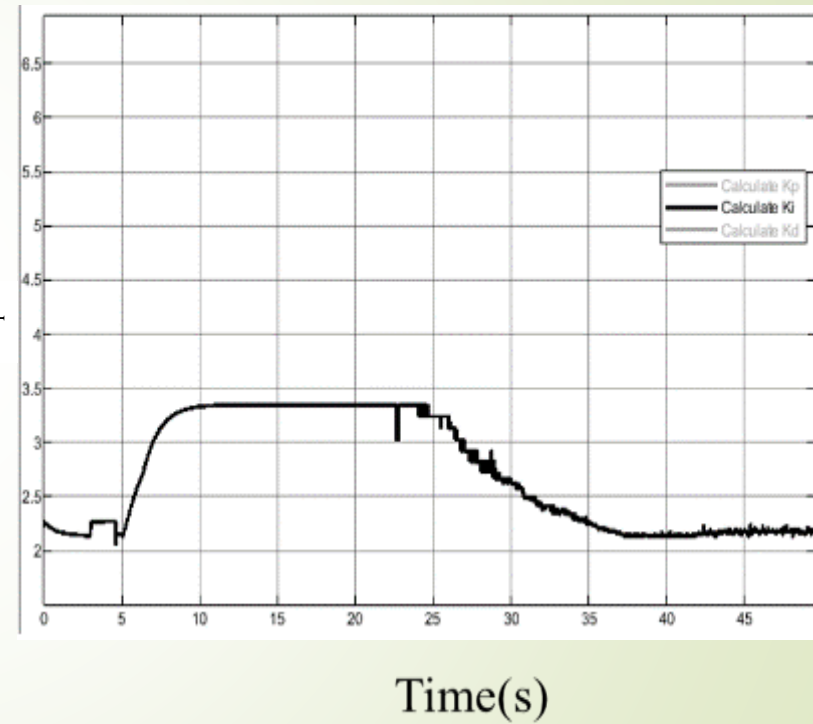
$K_d$



$K_p$

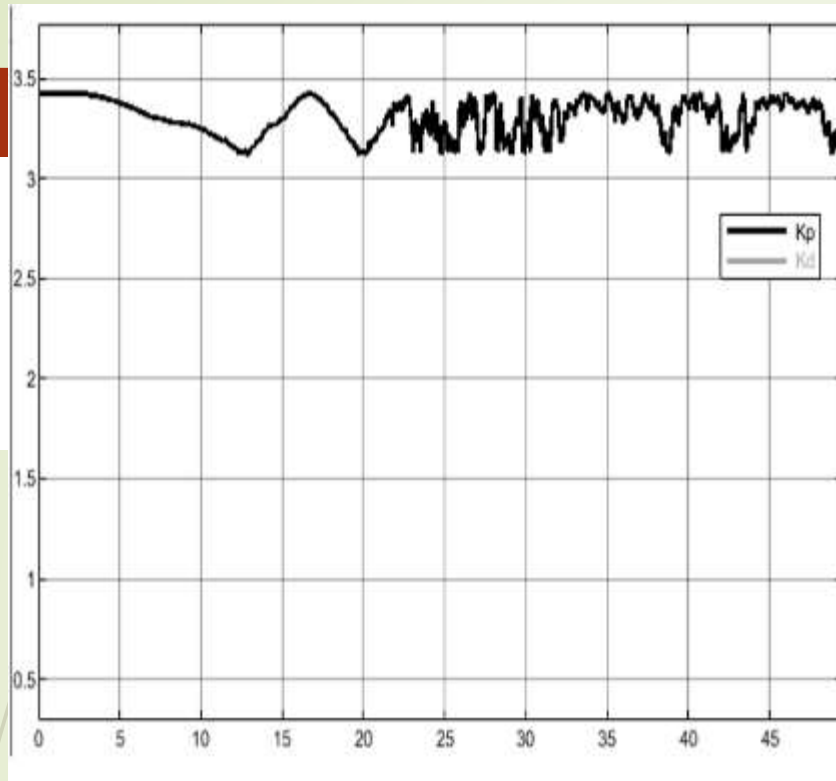


$K_i$



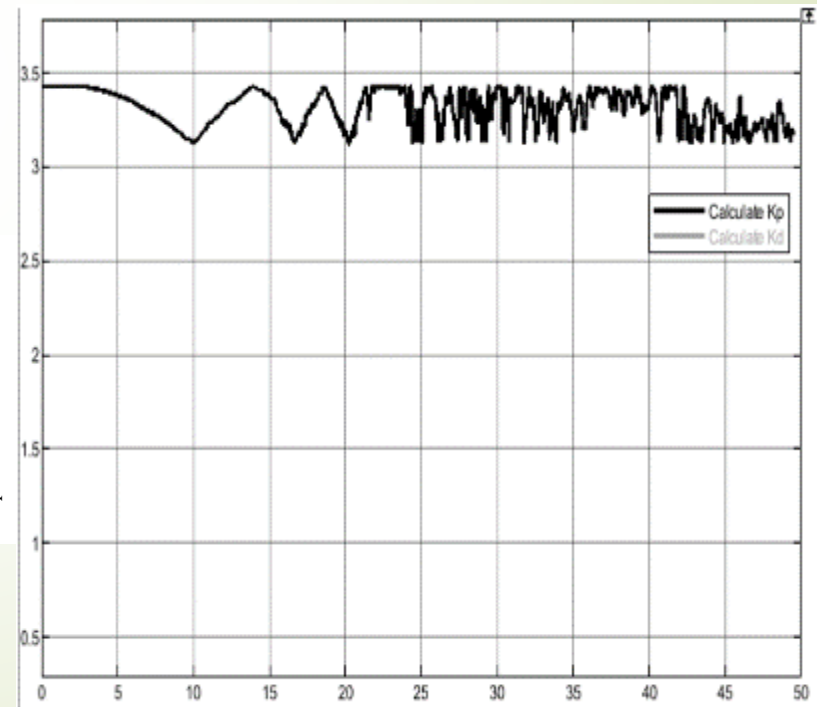
# ضرایب کنترل کننده زوایا:

$K_p$  for roll (degree)



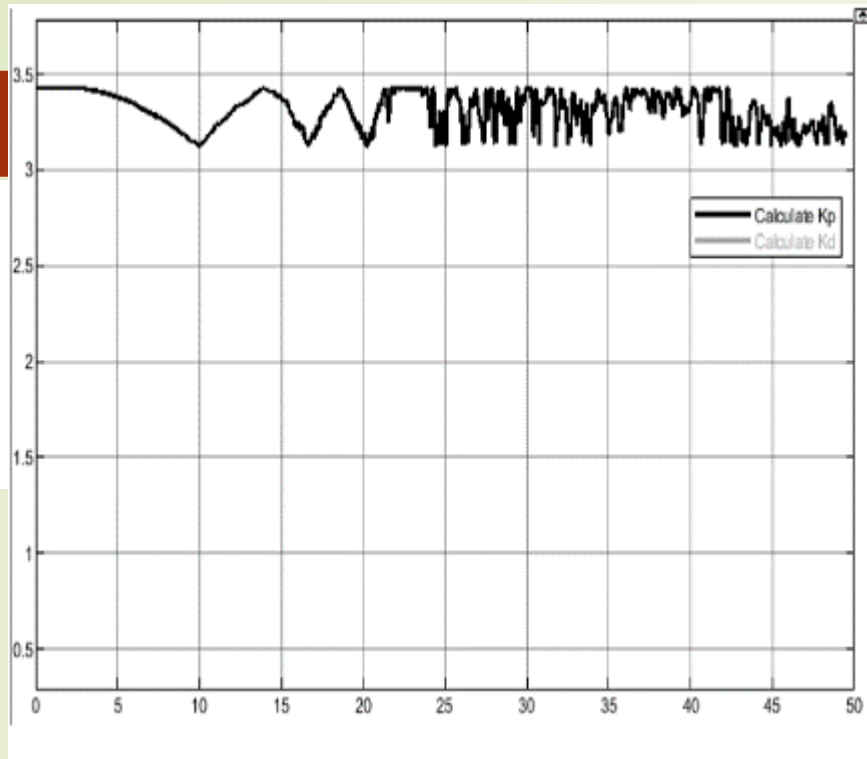
Time(s)

$K_p$  for pitch (degree)



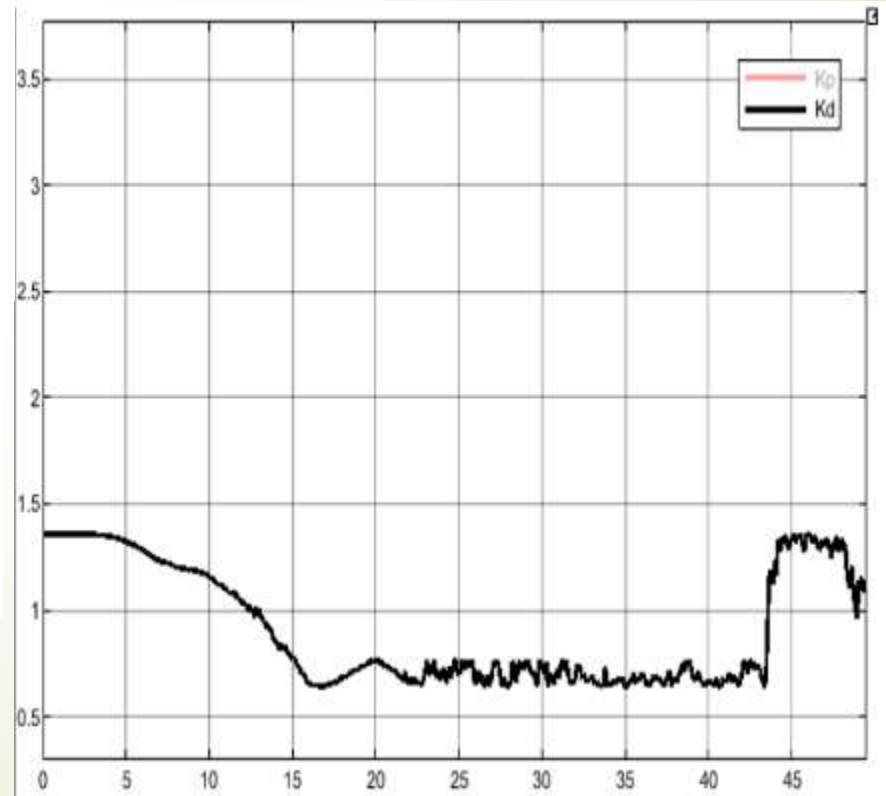
Time(s)

$K_p$  for pitch (degree)



Time(s)

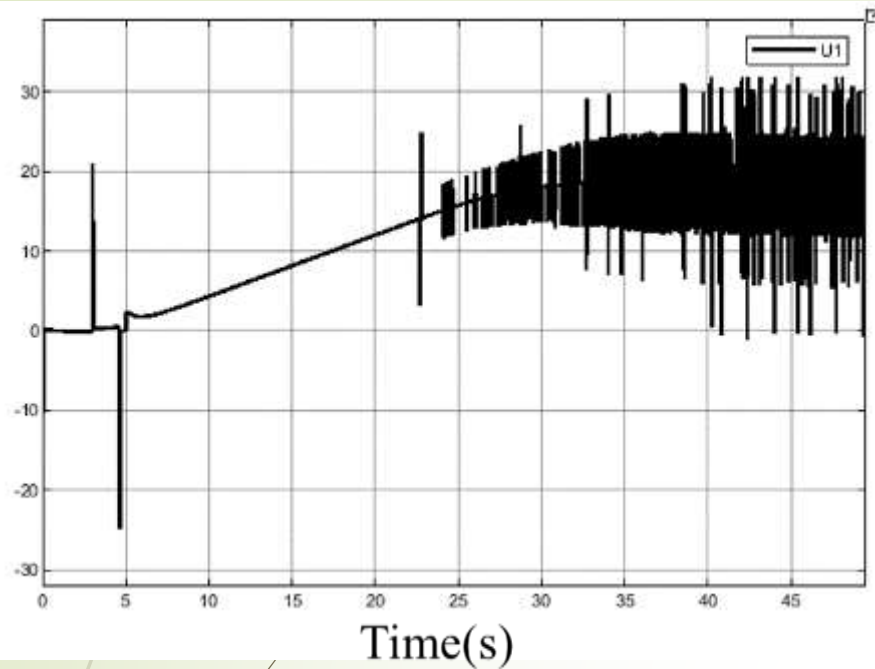
$K_d$  for pitch (degree)



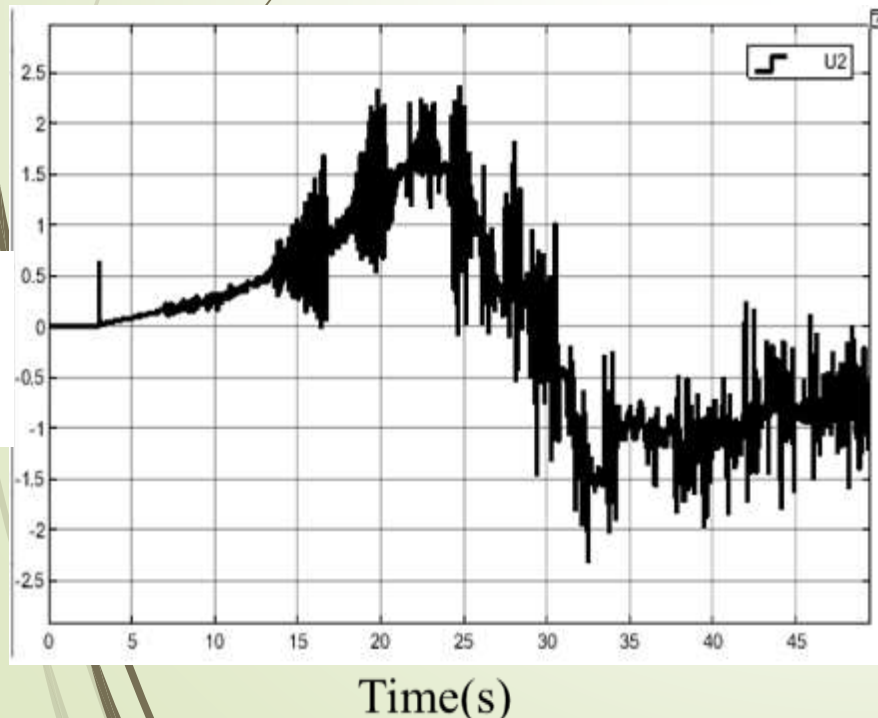
Time(s)

# سیگنال‌های کنترلی:

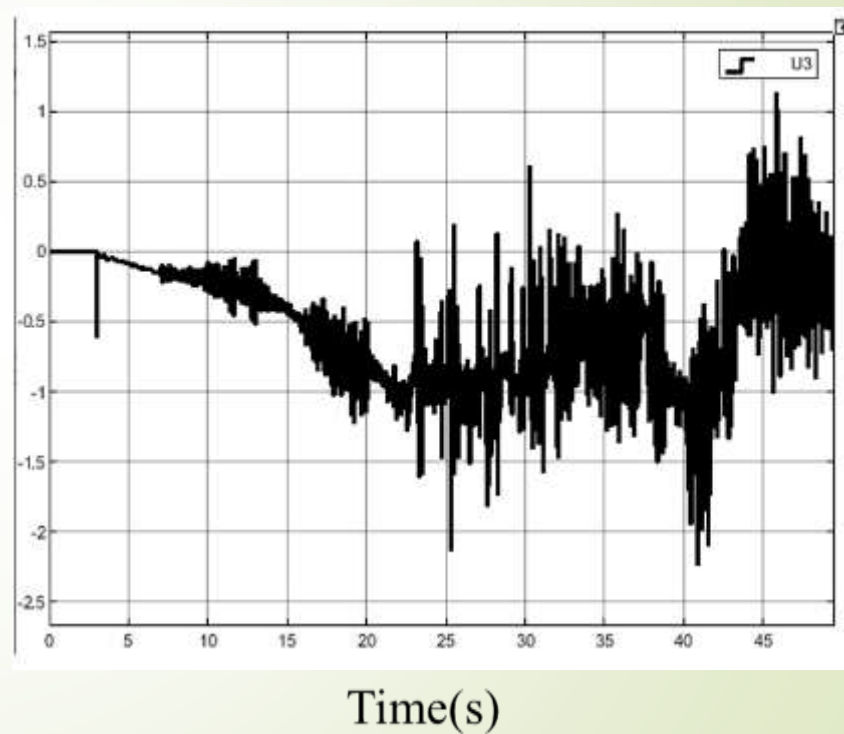
U1(N)



U2(N)

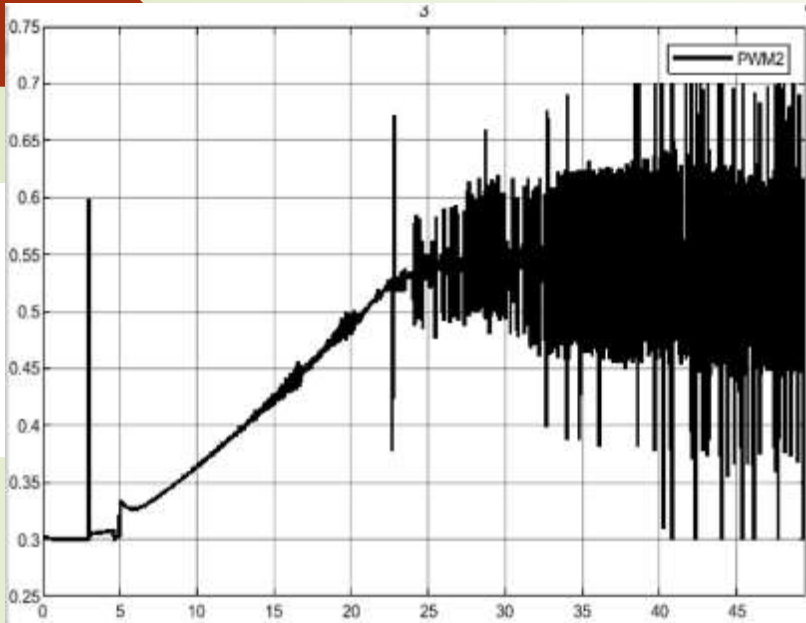


U3(N)

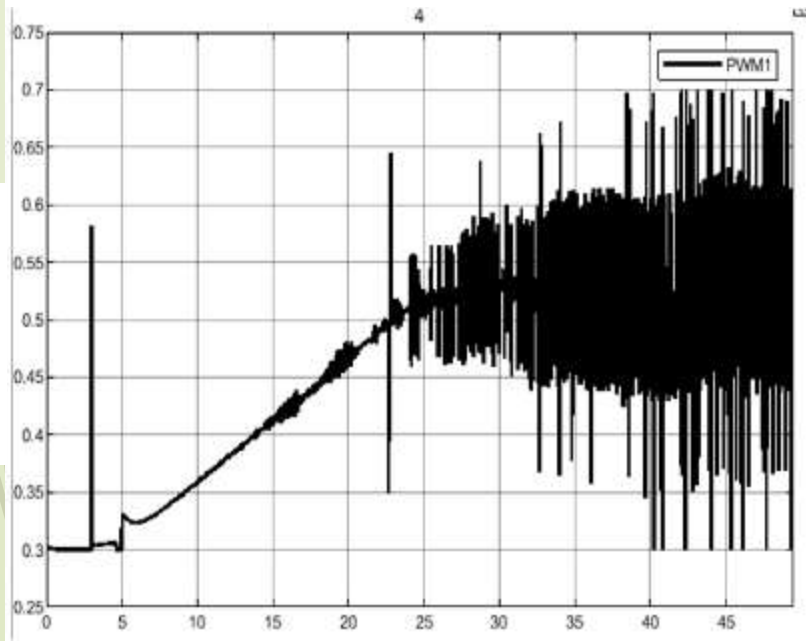


# سیگنال‌های مدولاسیون پهنای پالس:

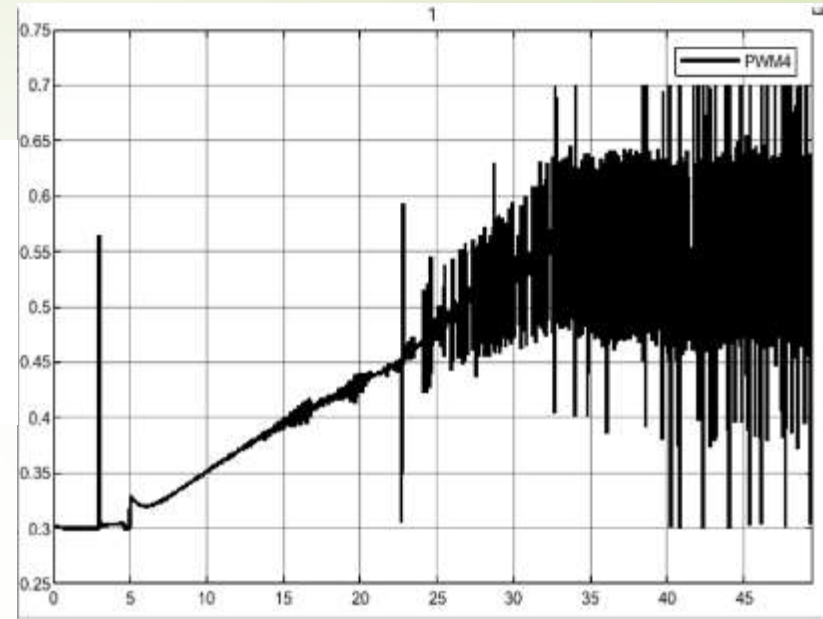
PWM motor2 (%)



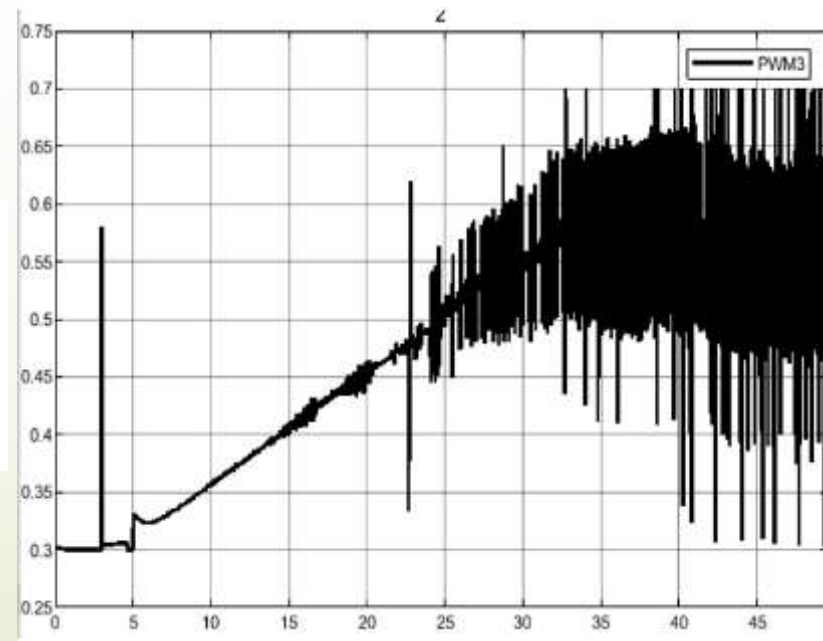
PWM motor1 (%)



PWM motor4 (%)

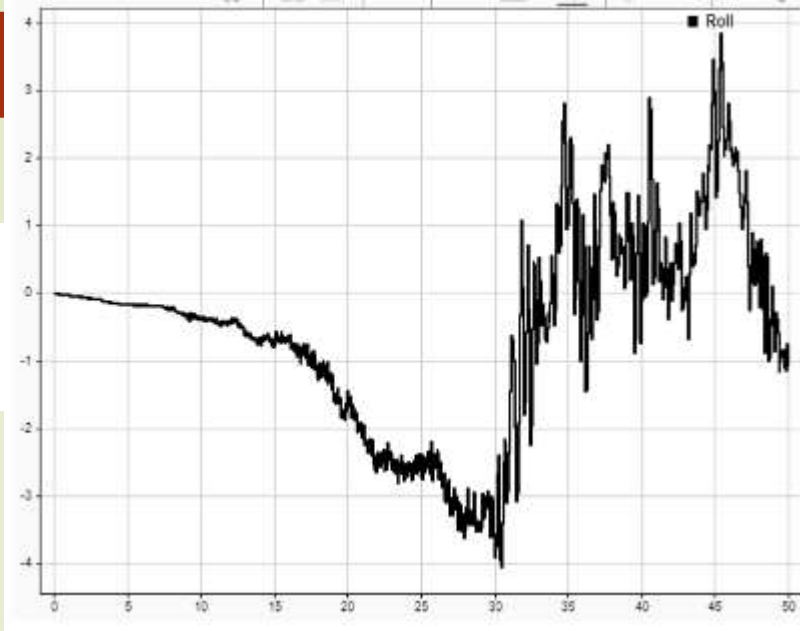


PWM motor3 (%)

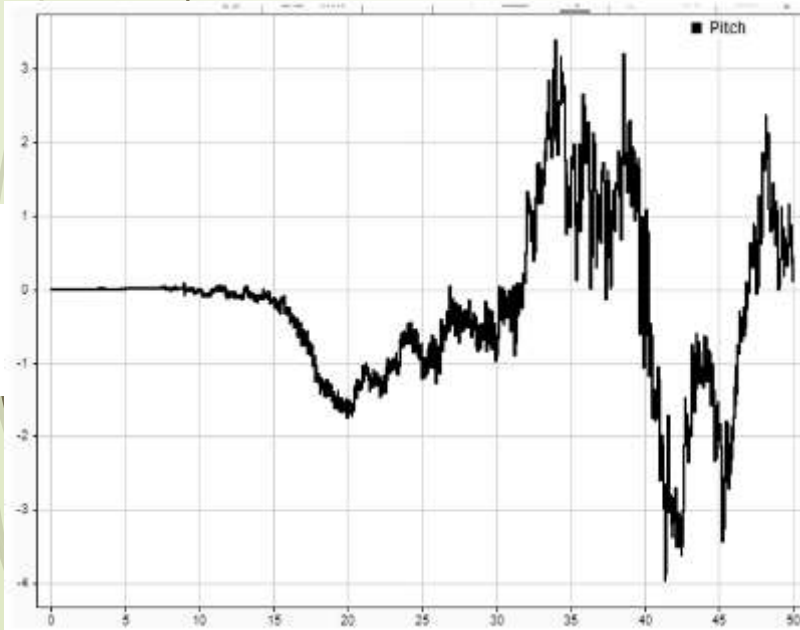


# کنترل زوایا با کنترل کننده PID فازی و ارتفاع با کنترل کننده PID فازی:

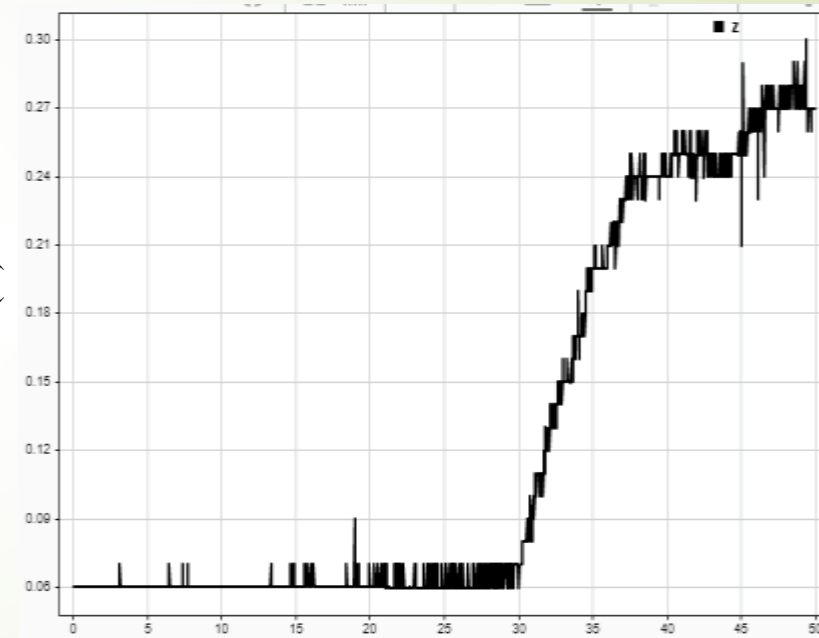
Roll (degree)



Pitch(degree)

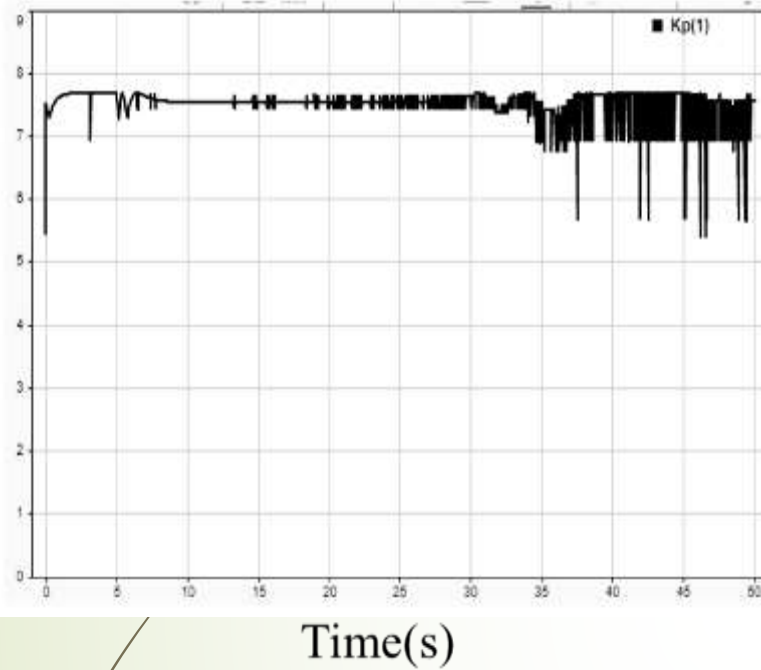


Z(m)

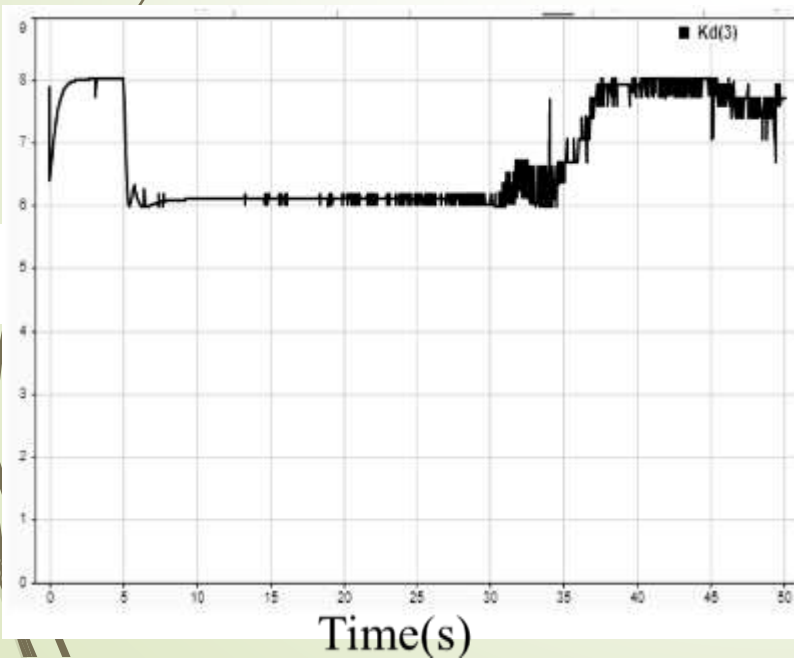


# ضرایب کنترل کننده ارتفاع:

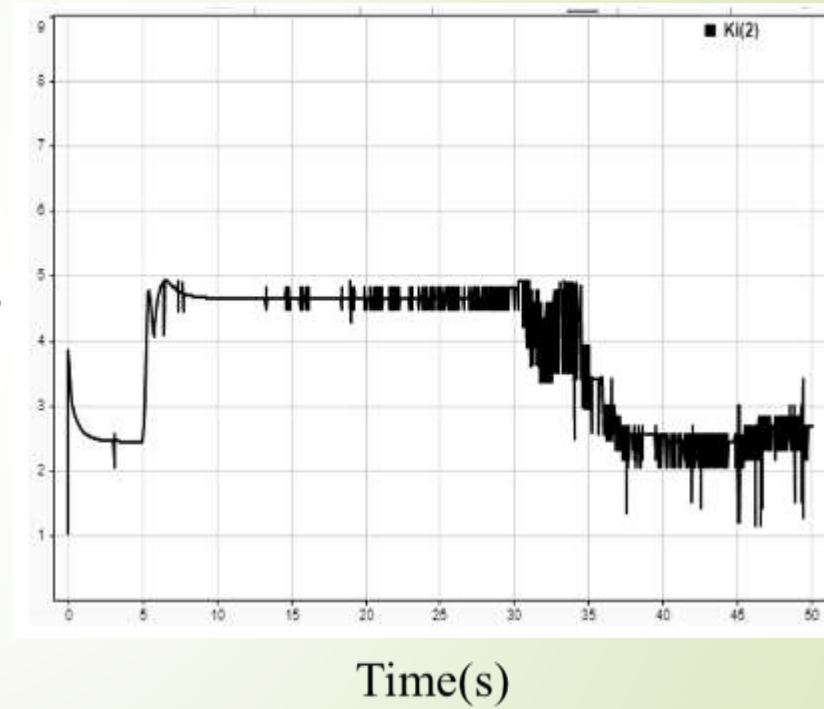
$K_p$



$K_d$



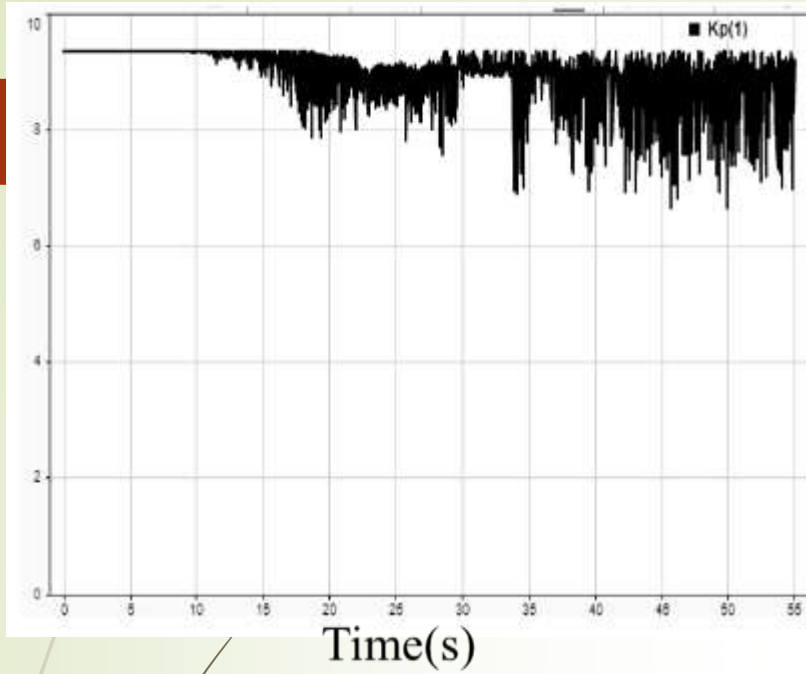
$K_i$



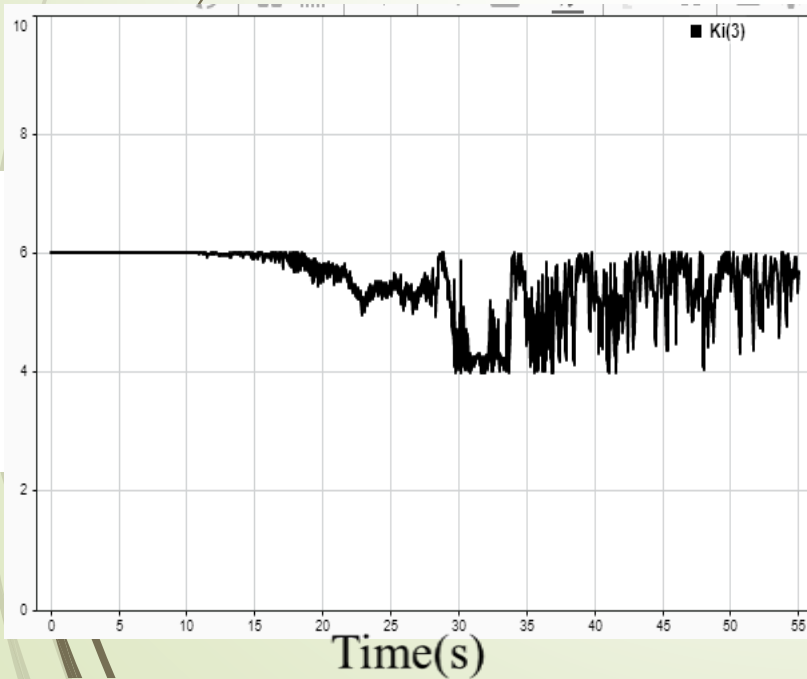


# ضرایب کنترل کننده زوایا:

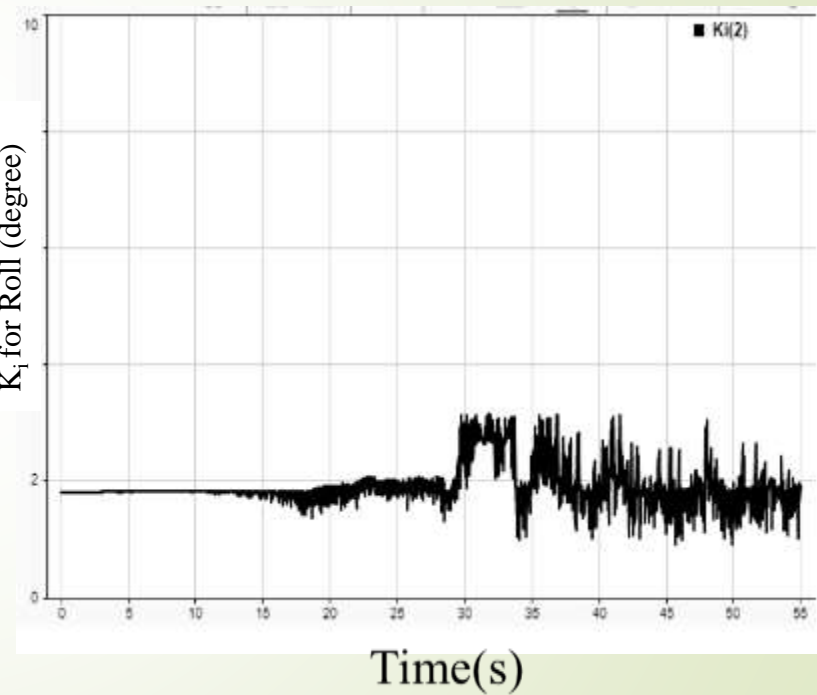
$K_p$  for roll (degree)



$K_d$  for roll (degree)

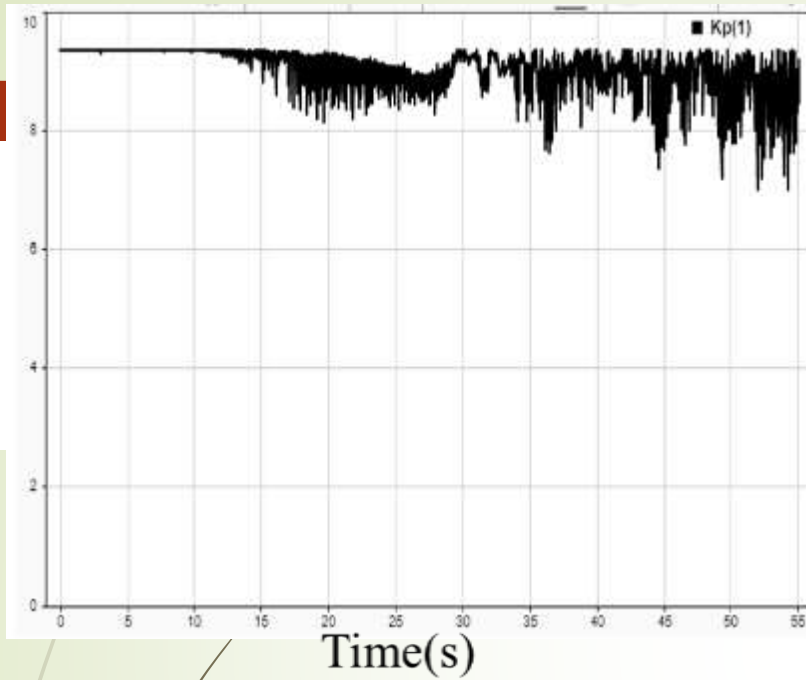


$K_i$  for Roll (degree)

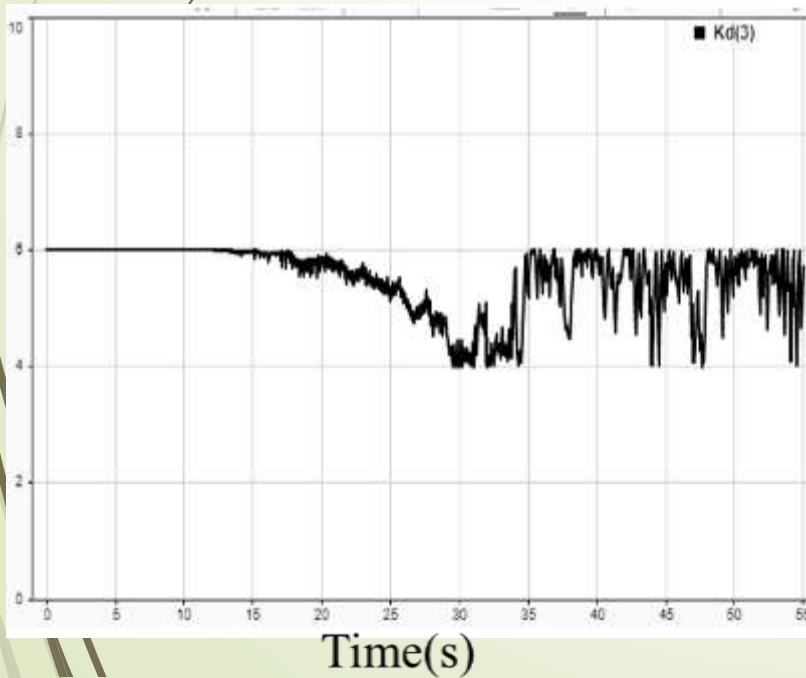


# ضرایب کنترل کننده زوایا:

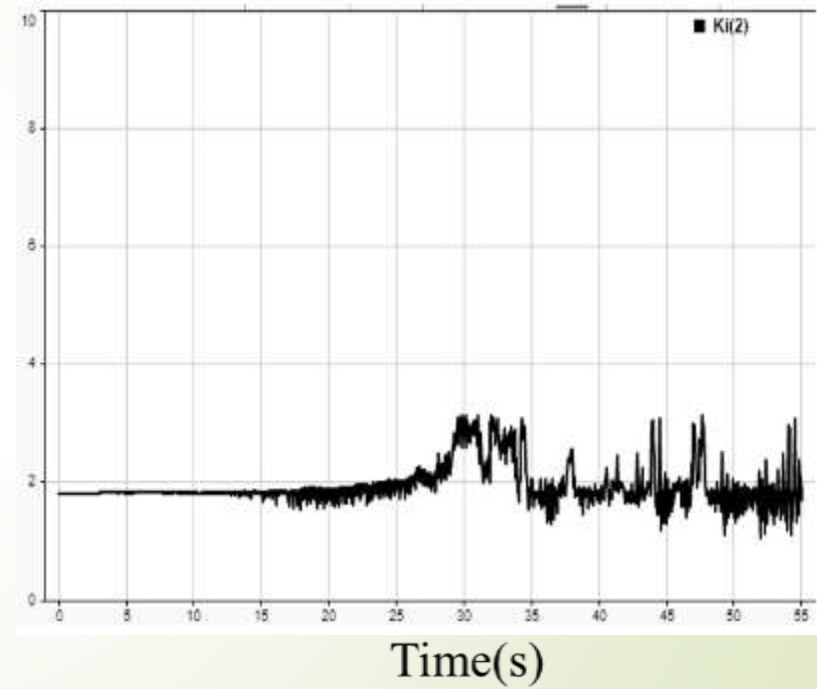
$K_p$  for pitch (degree)



$K_d$  for pitch (degree)

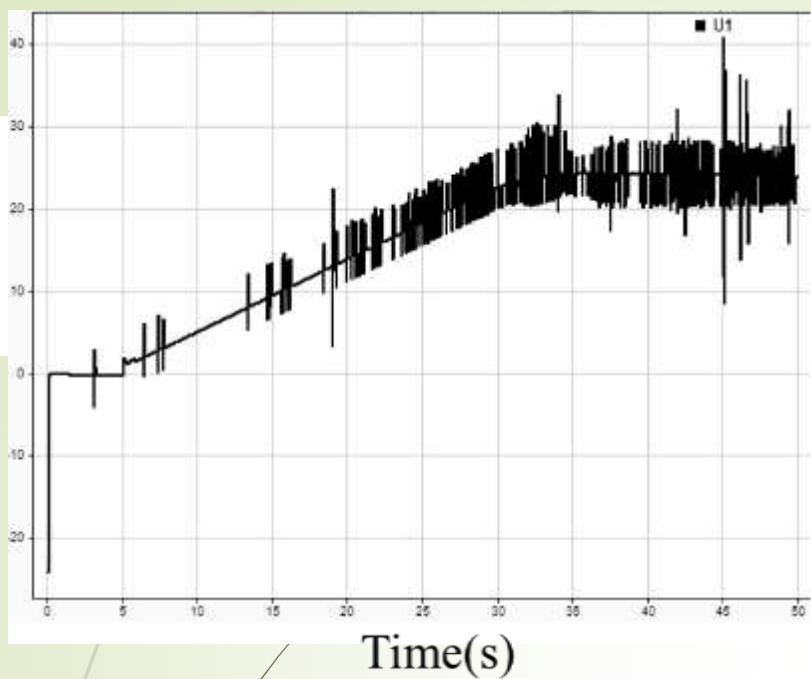


$K_i$  for pitch (degree)

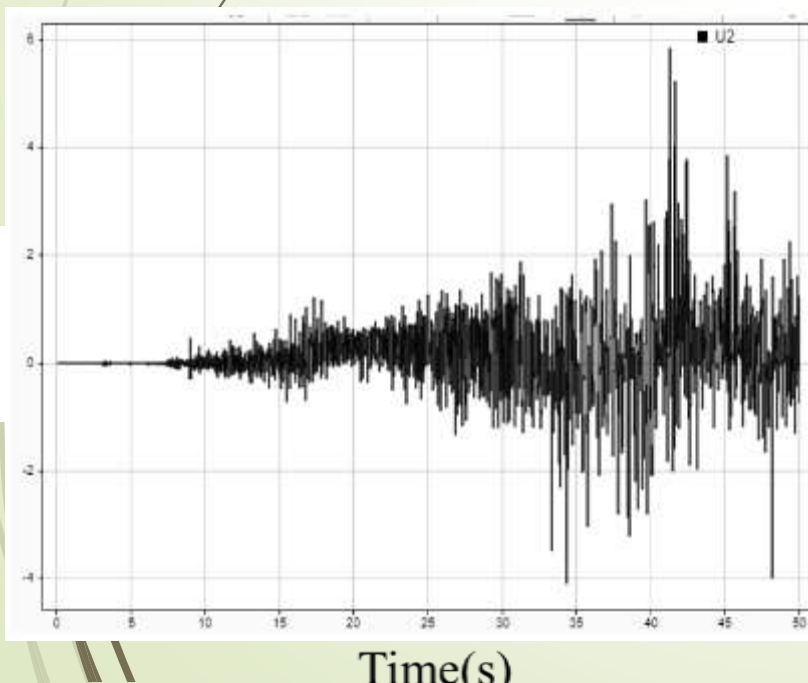


# سیگنال‌های کنترلی:

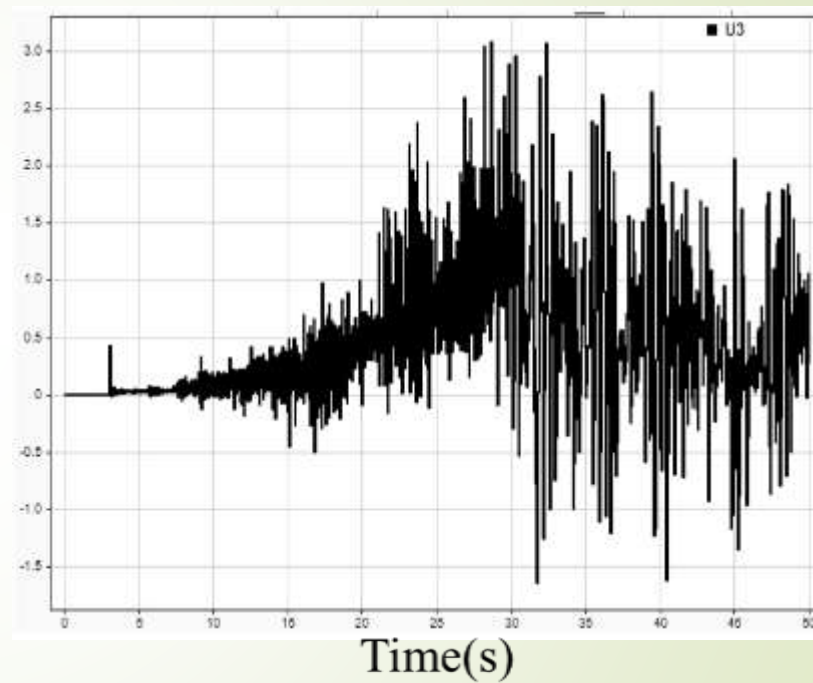
U1(N)



U2(N)

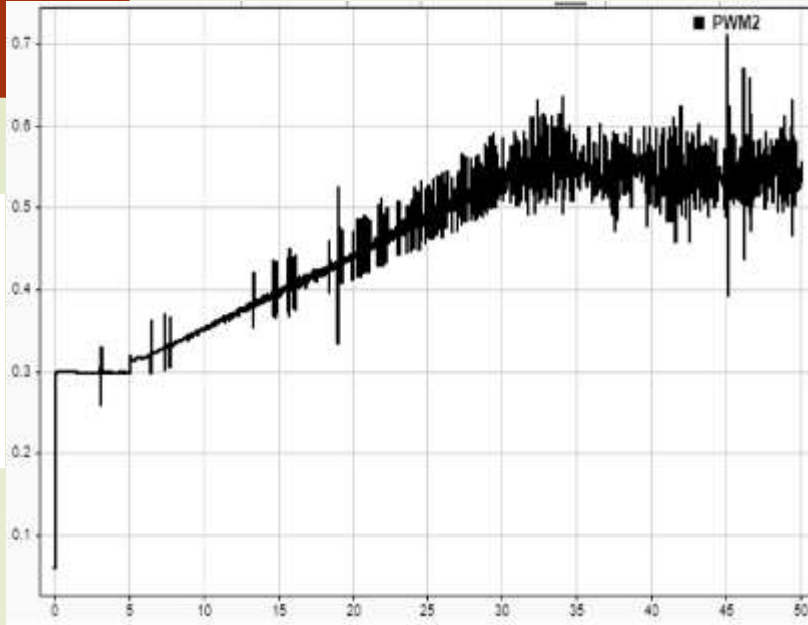


U3(N)

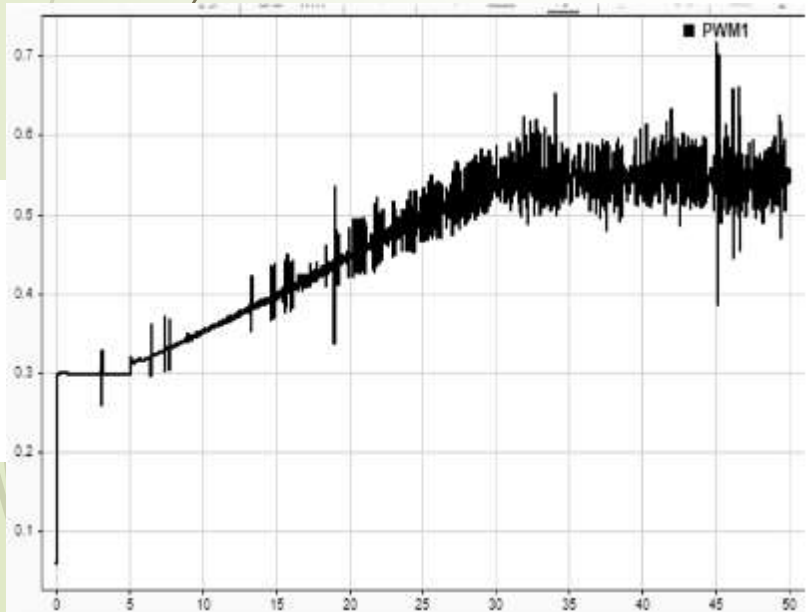


# سیگنال‌های مدولاسیون پهنای پالس:

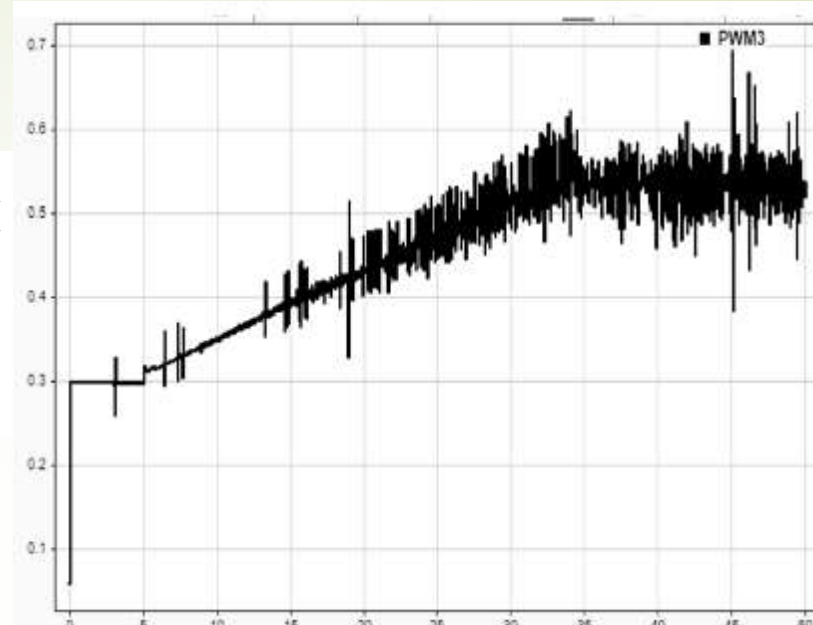
PWM motor2 (%)



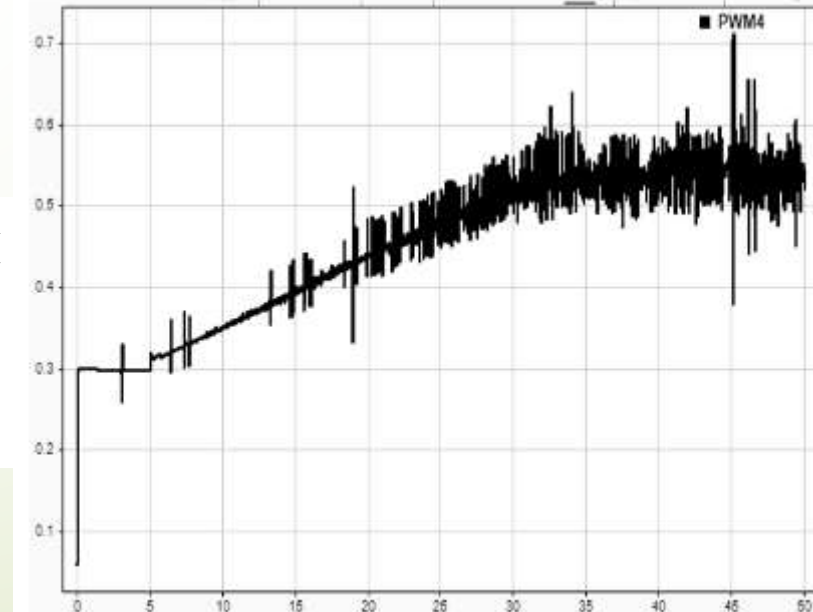
PWM motor1 (%)



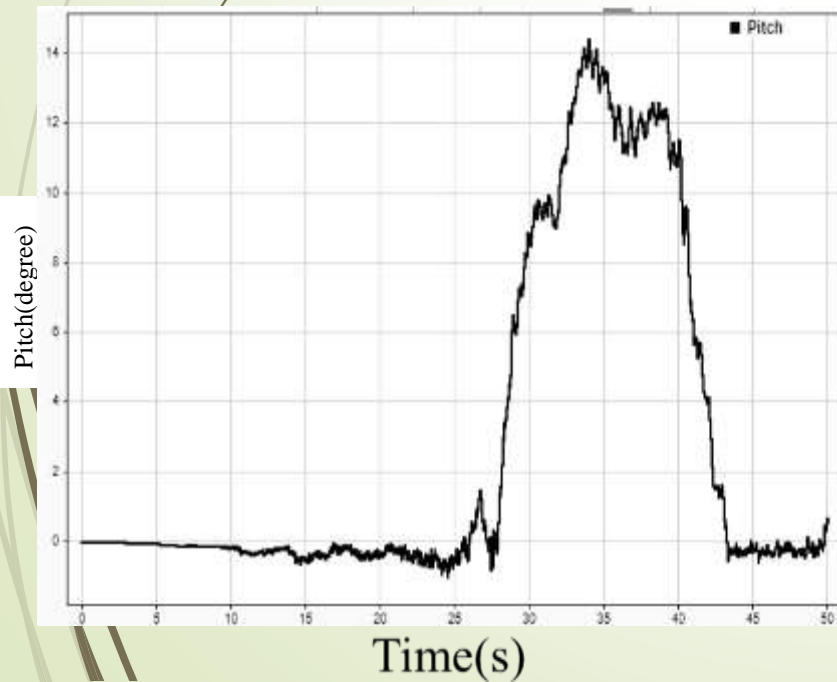
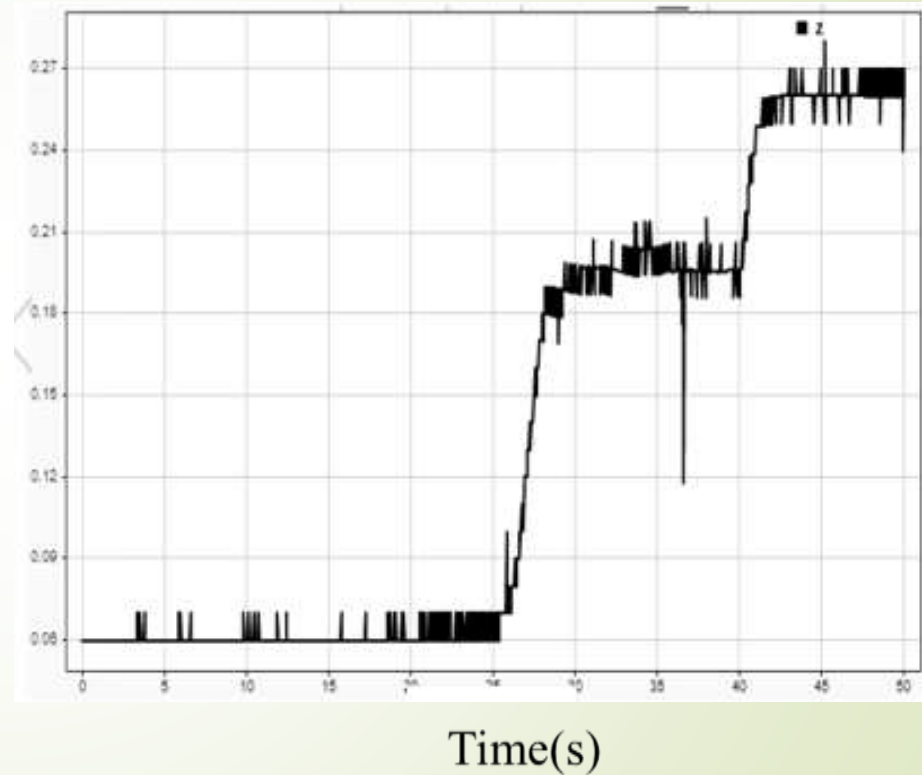
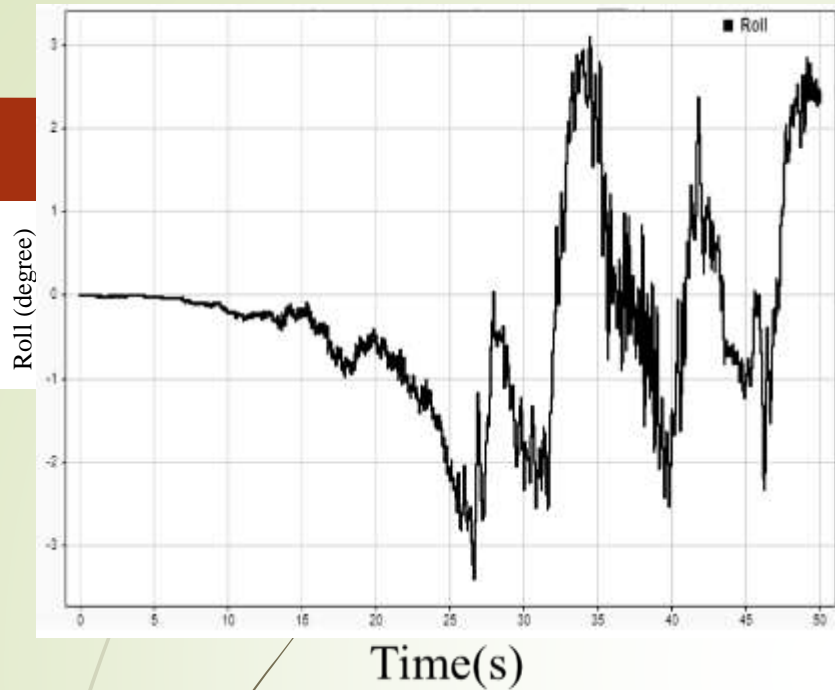
PWM motor4(%)



PWM motor3(%)

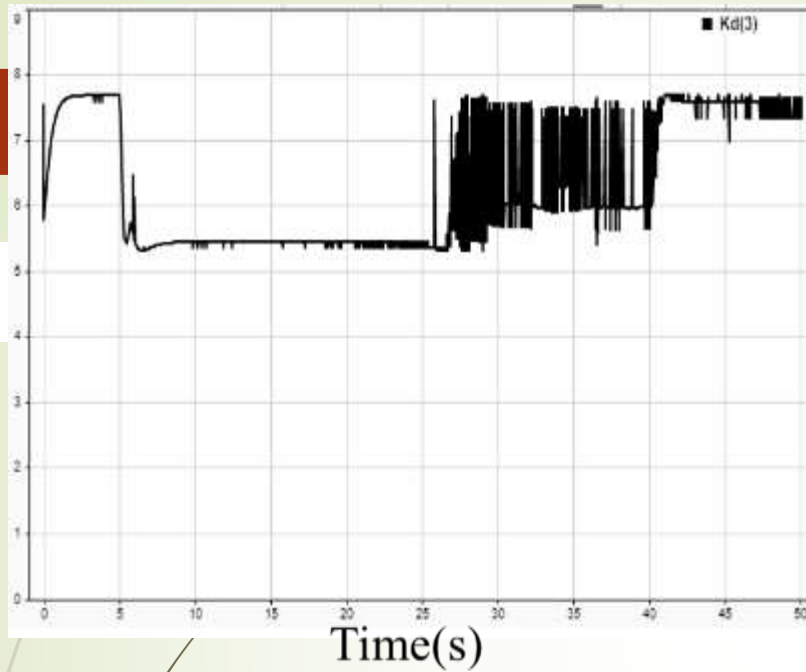


کنترل زوایا با کنترل کننده PID  
فازی و ارتفاع با PID فازی همراه با  
مقدار مرجع برای زاویه پیچ:

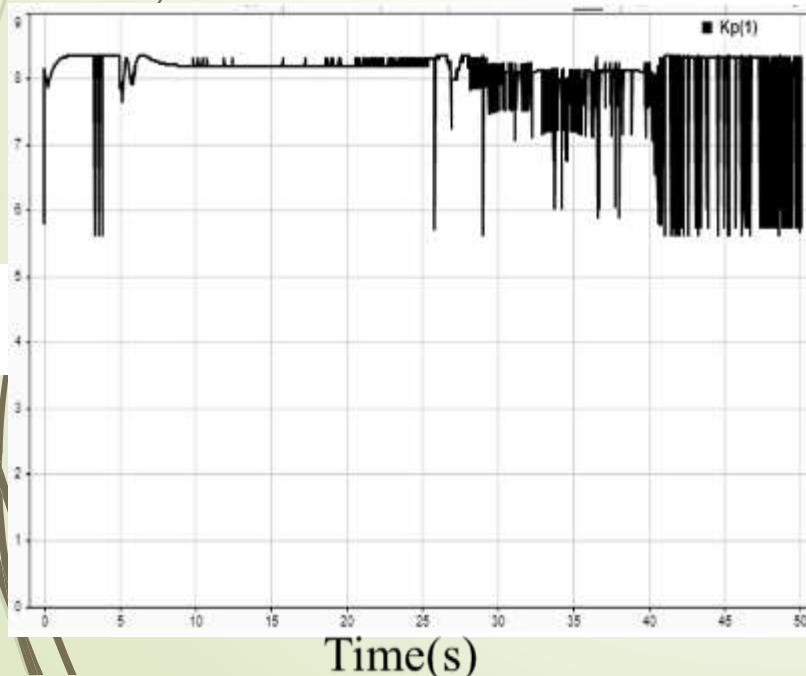


# ضرایب کنترل کننده ارتفاع:

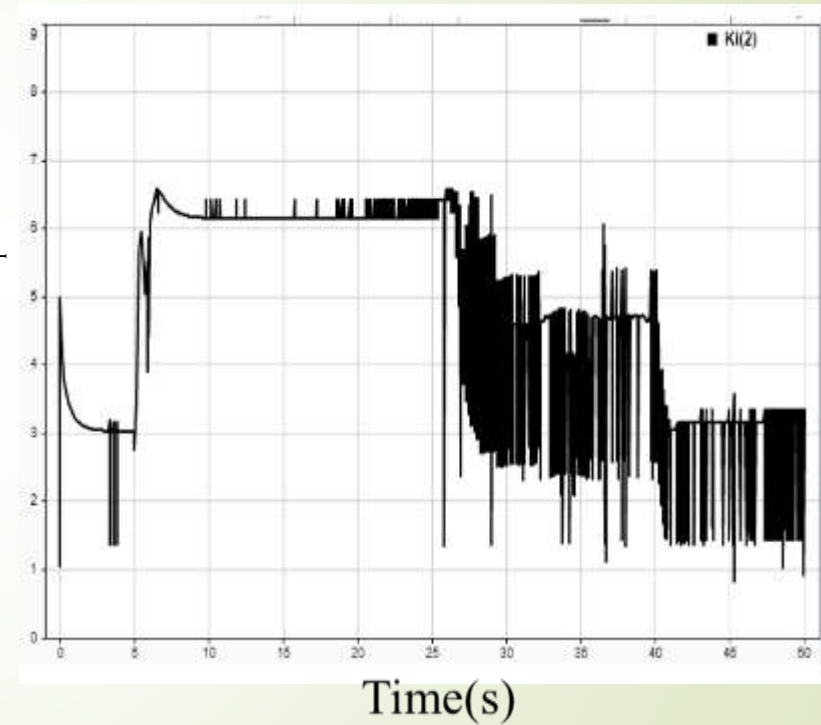
$K_d$



$K_p$

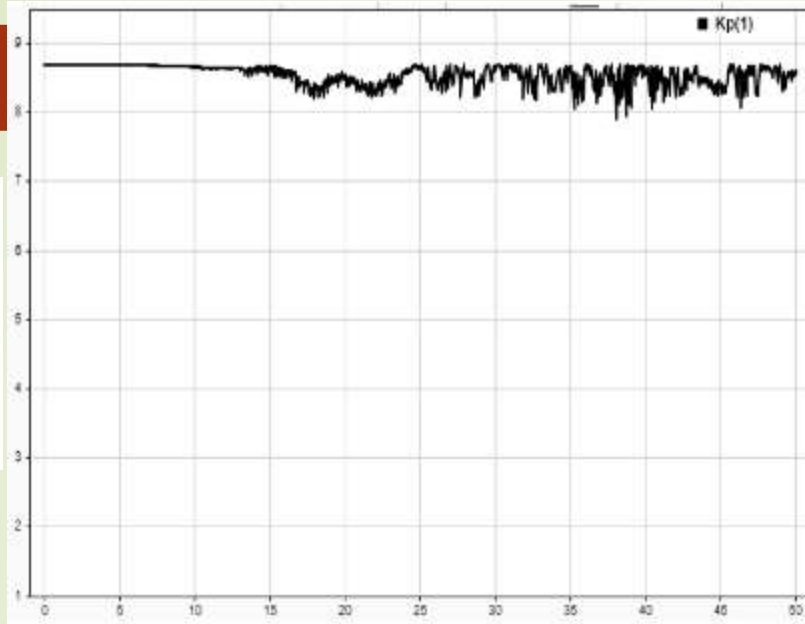


$K_i$

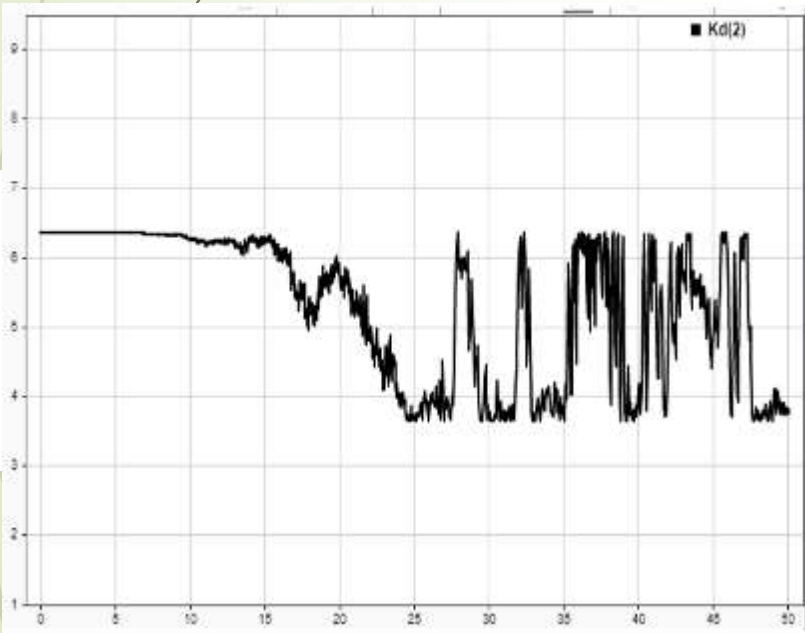


# ضرایب کنترل کننده زوایا:

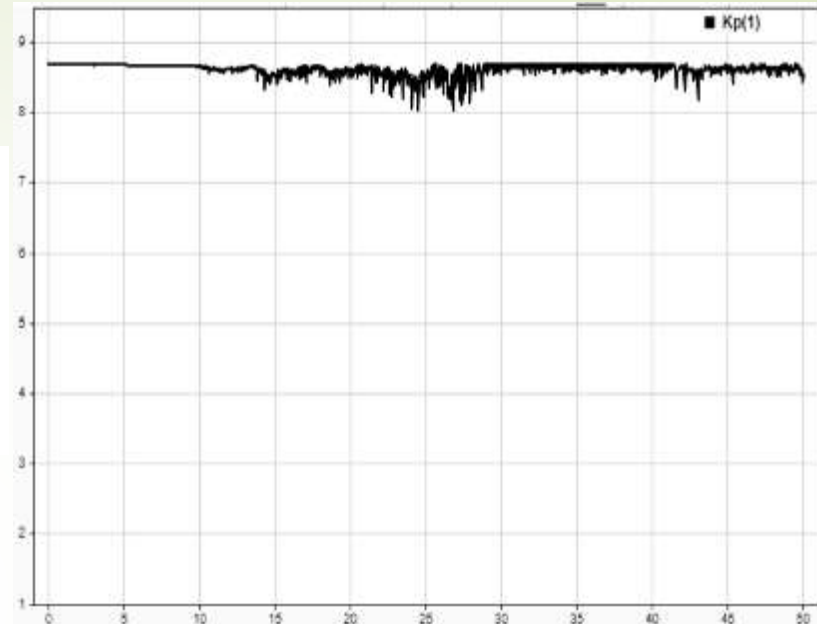
$K_p$  for roll (degree)



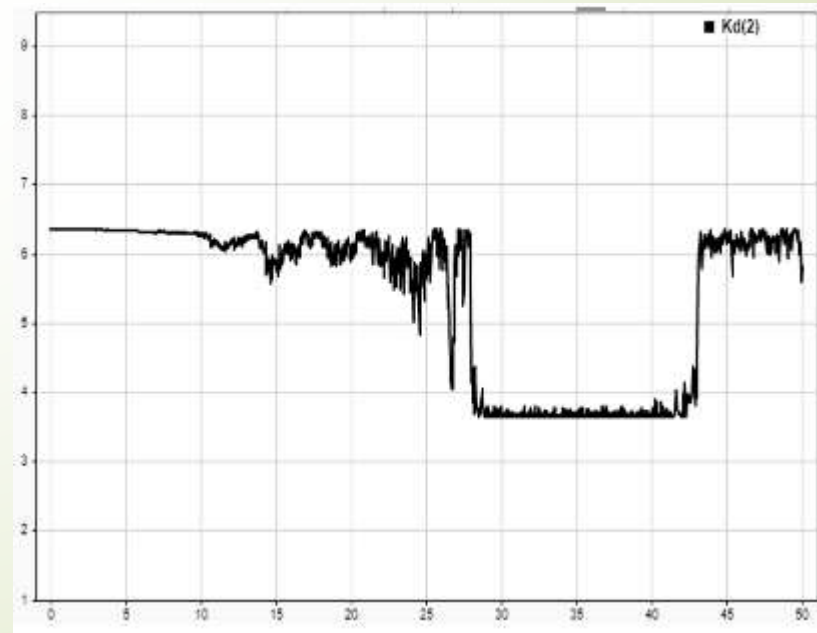
$K_d$  for roll (degree)



$K_p$  for pitch (degree)



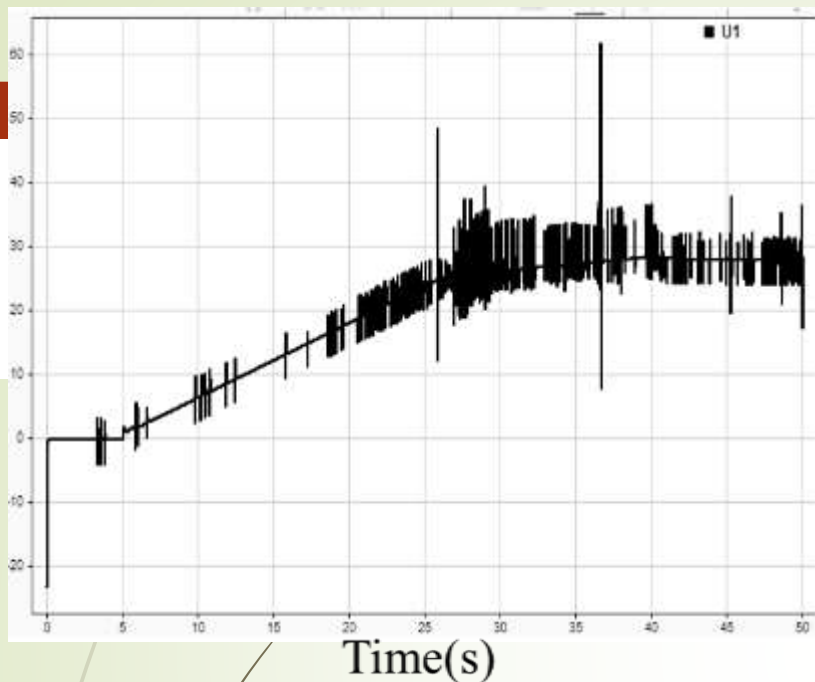
$K_d$  for pitch (degree)



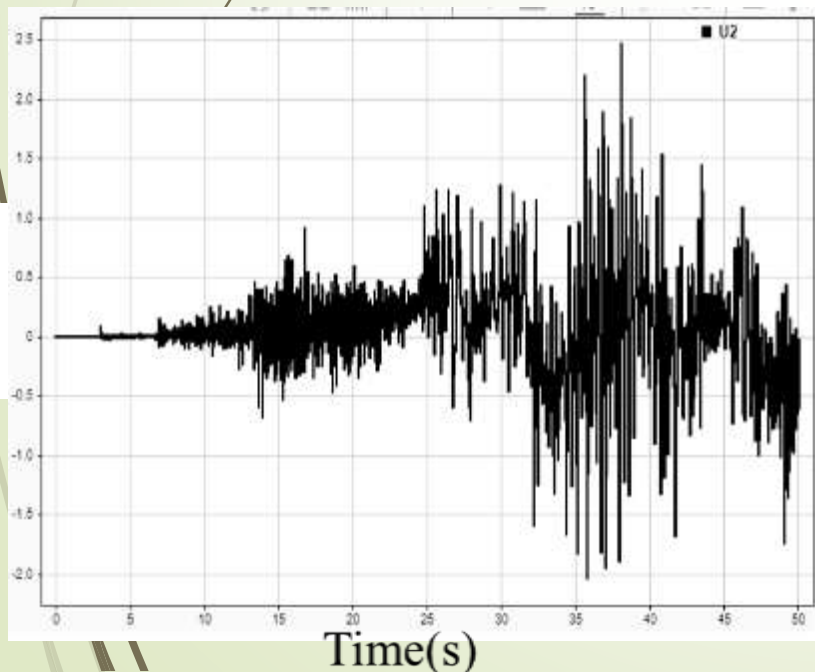


# سیگنال‌های کنترلی:

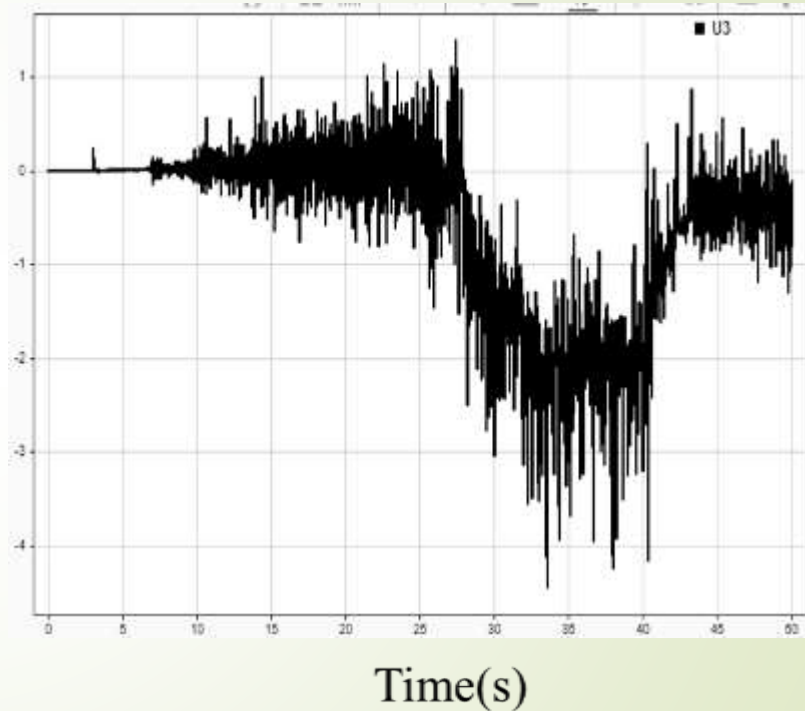
$U1(N)$



$U2(N)$

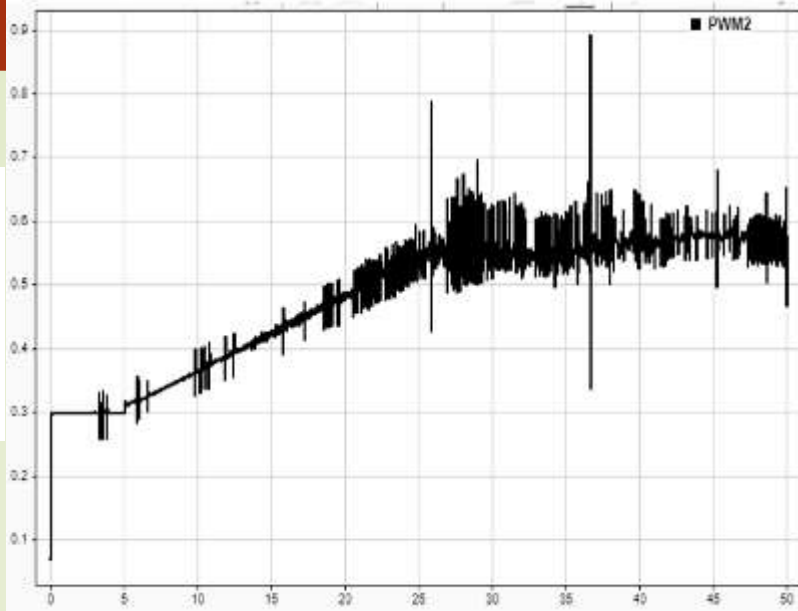


$U3(N)$

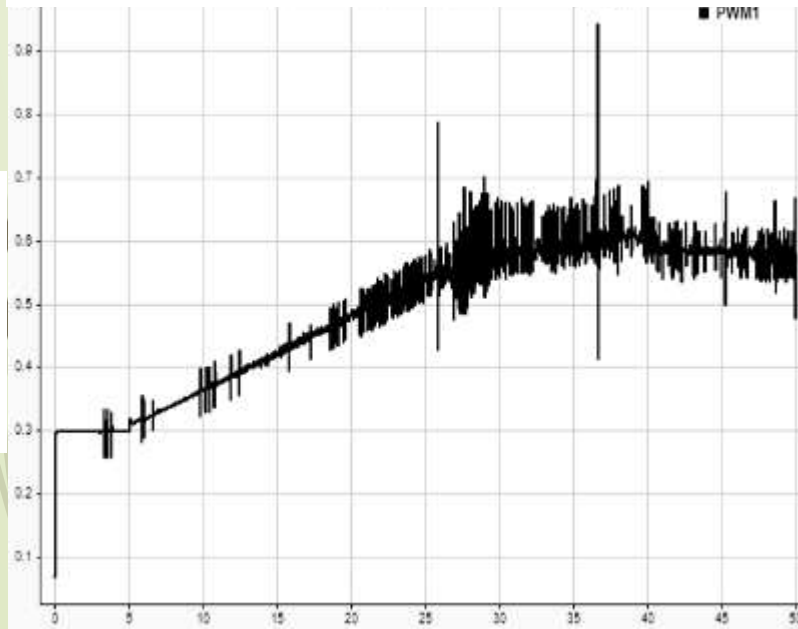


# سیگنال‌های مدولاسیون پهنای پالس:

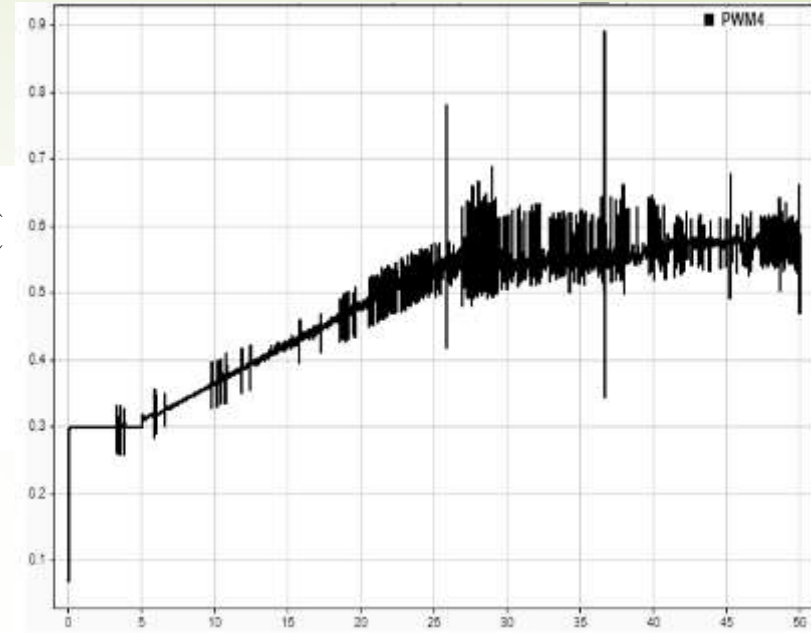
PWM motor2 (%)



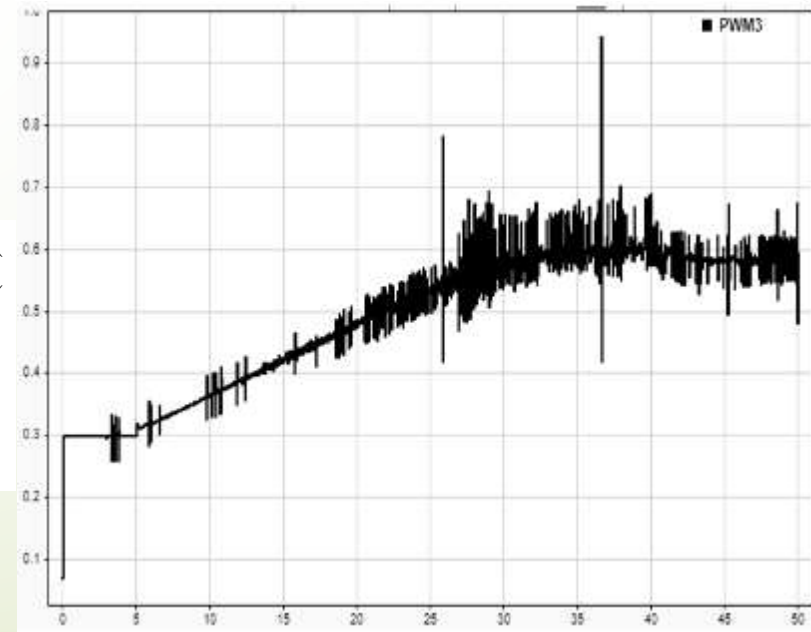
PWM motor1 (%)



PWM motor4(%)



PWM motor3(%)





با تشکر