



دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده برق - گروه مکترونیک

درس کنترل مبتنی بر پیش بینی مدل دوره کارشناسی ارشد

رشته مهندسی مکترونیک

عنوان

گزارش پروژه ی درس کنترل مبتنی بر پیش بینی
مدل (MPC)

نگارش

علیرضا امیری

بهمن ۱۴۰۳



فهرست مطالب

| | | |
|----|---|--------|
| ۱ | مقدمه | فصل ۱: |
| ۱ | مقدمه‌ای بر موتورهای صفحه‌ای مبتنی بر شناوری مغناطیسی | ۱.۱ |
| ۳ | مروری بر مطالعات انجام شده | فصل ۲: |
| ۳ | مقدمه | ۱.۲ |
| ۳ | معماری دستگاه‌های MLPM | ۲.۲ |
| ۴ | آهنرباهای متحرک و سیم‌پیچ‌های ثابت | ۱.۲.۲ |
| ۵ | طراحی کنترلر | ۳.۲ |
| ۵ | کنترلر PID | ۱.۳.۲ |
| ۶ | کنترلر مبتنی بر پیش‌بینی مدل MPC | ۲.۳.۲ |
| ۷ | کنترلر مبتنی بر هوش مصنوعی | ۳.۳.۲ |
| ۹ | روش شناسی | فصل ۳: |
| ۹ | مدل سیستم | ۱.۳ |
| ۹ | مدل سیستم متحرک | ۱.۱.۳ |
| ۱۳ | مدل سیستم ثابت | ۲.۱.۳ |
| ۱۸ | پیاده‌سازی محاسبات ماتریس حالت | ۳.۱.۳ |
| ۲۲ | پیاده‌سازی محاسبات Γ | ۴.۱.۳ |
| ۲۷ | طراحی کنترلر | ۲.۳ |
| ۲۸ | پاسخ سیستم حلقه باز | ۱.۲.۳ |

| | | |
|----|-------------------------------|--------|
| ۲۹ | پیاده سازی کنترلر PID | ۲.۲.۳ |
| ۳۲ | پیاده سازی کنترلر $LinearMPC$ | ۳.۲.۳ |
| ۳۷ | پیاده سازی کنترلر $TubeMPC$ | ۴.۲.۳ |
| ۴۰ | مقایسه نتایج | ۳.۳ |
| ۴۷ | نتیجه گیری | فصل ۴: |
| ۴۸ | کارهای آینده | ۱.۴ |
| ۴۹ | بحث و نتیجه گیری | فصل ۵: |
| ۵۱ | کتاب نامه | |

فصل ۱

مقدمه

در این فصل، ابتدا مقدمه‌ای درباره‌ی ساختارهای موتورهای صفحه‌ای مبتنی بر شناوری مغناطیسی معرفی شده و با توجه به ویژگی‌های منحصربه‌فرد این فناوری، کاربردهای آن در سایر صنایع نیز مورد بحث قرار می‌گیرد.

۱.۱ مقدمه‌ای بر موتورهای صفحه‌ای مبتنی بر شناوری مغناطیسی

شناوری مغناطیسی به معنای اعمال نیروهای مغناطیسی به اجسام به‌گونه‌ای است که این نیروها بتوانند بر نیروی جاذبه غلبه کرده و جسم را بدون تماس فیزیکی و به‌صورت پایدار در هوا معلق نگه دارند. این نیرو می‌تواند به دو شکل جاذبه یا دافعه اعمال شود. در حالت جاذبه، نیروی مغناطیسی از بالا به جسم وارد شده و نیروی گرانش زمین را خنثی می‌کند، درحالی که در حالت دافعه، نیرو از پایین به جسم وارد شده و آن را به سمت بالا دفع می‌کند. در صورتی که جسم فقط دارای خاصیت رسانایی باشد، تنها امکان جذب شدن وجود دارد، اما اگر جسم از مواد مغناطیسی مانند آهنرباهای دائمی یا الکتریکی ساخته شود، می‌تواند هم جذب و هم دفع شود. کنترل نیروهای مغناطیسی معمولاً با استفاده از آهنرباهای الکتریکی انجام می‌شود، به‌طوری که عبور جریان الکتریکی از سیم‌پیچ‌ها میدان مغناطیسی ایجاد کرده و تنظیم این جریان‌ها باعث تغییر در شدت میدان و نیروی وارده به جسم می‌شود. از این طریق، می‌توان با کنترل دقیق جریان، جسم را به‌طور پایدار در حالت معلق نگه داشت.

در کاربردهای صنعتی، به‌دلیل نیاز به بازدهی بالاتر در تبدیل انرژی مغناطیسی به نیرو، از آرایه‌های خاصی از

آهنرباهای دائمی به نام آرایه هالباخ^۱ استفاده می‌شود. این آرایه‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که میدان مغناطیسی را به طور متمرکز در یک سمت تقویت کنند و در نتیجه، نیروی مغناطیسی بیشتری به جسم وارد شود. ساختارهای آرایه هالباخ یک بعدی و دوبعدی در تحقیقات پیشین به طور گسترده بررسی و استفاده شده‌اند. برای پیاده‌سازی موفق یک سیستم شناوری مغناطیسی، عوامل متعددی باید در نظر گرفته شوند که شامل طراحی و بهینه‌سازی ساختار مکانیکی سیستم، پیاده‌سازی کنترلرهای دقیق برای تنظیم نیروهای مغناطیسی، و همچنین مدل‌سازی دینامیکی یا شناسایی رفتار سیستم برای کنترل بهتر آن است. این عوامل به طور مستقیم بر کارایی و پایداری سیستم تأثیر می‌گذارند و باید به دقت مورد بررسی و تنظیم قرار گیرند.

¹Halbach array

فصل ۲

مروری بر مطالعات انجام شده

۱.۲ مقدمه

در این فصل، پژوهش‌های پیشین در زمینه‌ی موتورهای صفحه‌ای مبتنی بر شناوری مغناطیسی (MLPM) با تمرکز بر ویژگی‌های اساسی آنان که به طور کلی در بخش‌های زیر دسته‌بندی شده‌اند، مورد بررسی قرار می‌گیرند. **طراحی کنترلر:** معرفی روش‌های کنترل کلاسیک و مدرن برای این سیستم‌ها و چگونگی بهبود پایداری و دقت حرکت.

در بخش‌های بعد، پژوهش‌های انجام‌شده بر اساس این ویژگی‌ها ارزیابی شده و مزایا و معایب هر روش مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲.۲ معماری دستگاه‌های MLPM

سیستم‌های شناوری مغناطیسی به دلیل ماهیت ناپایدارشان بدون استفاده از حلقه‌های کنترلی نمی‌توانند پایداری لازم را فراهم کنند. به همین دلیل، در تمامی ساختارهای پیشنهادی، از سیم‌پیچ‌های الکتریکی برای تولید میدان مغناطیسی با شدت کنترل شده استفاده می‌شود. این سیم‌پیچ‌ها وظیفه دارند تا موقعیت جسم معلق را پایدار کرده و آن را در حالت مطلوب نگه دارند.

در طراحی موتورهای صفحه‌ای، که از دو بخش ثابت^۱ و متحرک^۲ تشکیل شده‌اند، امکان تغییر در طراحی و محل قرارگیری آهنرباهای الکتریکی و دائمی وجود دارد. نیروی مغناطیسی وارد بر بخش متحرک می‌تواند به صورت جاذبه‌ای از بالا یا دافعه‌ای از پایین اعمال شود. با این حال، در موتورهای صفحه‌ای به دلیل لزوم کم بودن فاصله میان سیم‌پیچ‌ها و اجسام معلق، اعمال نیروی جاذبه‌ای از بالا امکان‌پذیر نیست. به همین دلیل، در تمامی طراحی‌ها، نیروی مغناطیسی دافعه‌ای از سمت پایین به بخش متحرک وارد می‌شود که امکان جابه‌جایی اجسامی که بر روی آنها قرار می‌گیرند را فراهم می‌کند.

با توجه به این موارد، طراحی‌های متفاوتی برای ساخت دستگاه‌های MLPM ارائه می‌شود که در ادامه بررسی یک مورد از آنان خواهیم پرداخت.

۱.۲.۲ آهنرباهای متحرک و سیم‌پیچ‌های ثابت

معماری که برای طراحی دستگاه‌های MLPM ارائه شده است، شامل قرار دادن سیم‌پیچ‌ها در بخش استاتور و استفاده از آهنرباهای دائمی در بخش متحرک می‌باشد. این ساختار نوین که در بسیاری از پژوهش‌ها مورد استفاده قرار گرفته، مشکلات معماری‌های پیشین مانند محدودیت جابه‌جایی متحرک ناشی از اتصالات فیزیکی و چالش‌های خنک‌کاری سیم‌پیچ‌ها را برطرف کرده و منجر به بهبود عملکرد کلی سیستم شده است.

در پژوهش [۱] استاتوری با چینش سیم‌پیچ‌ها مطابق با الگوی شاه‌ماهی^۳ طراحی و پیاده‌سازی شده است. این طراحی امکان اعمال نیروی مغناطیسی به دو آهنربای دیسکی تعبیه‌شده در بخش متحرک را فراهم کرده است که دقتی در حدود ۱ درجه در زوایای حرکت و ۱ میلی‌متر در موقعیت متحرک به دست آورده است [۱]. در ادامه این پژوهش، ساختاری جدید برای بخش متحرک ارائه شده که شامل ۶ آهنربای دیسکی با چینش کروی و فواصل ثابت می‌باشد. این طراحی توانسته است چرخش آزادانه متحرک را حول سه محور ممکن سازد [۲]. همچنین در پژوهش [۳] نیز از این چینش سیم‌پیچ‌ها استفاده شده و مطابق با شبیه‌سازی‌های ارائه شده، مزیت آنان در ایجاد میدان مغناطیسی یکنواخت‌تر در نواحی کناری سیم‌پیچ‌ها نمایش داده شده است.

¹Stator ²Mover ³Herringbone pattern

۳.۲ طراحی کنترلر

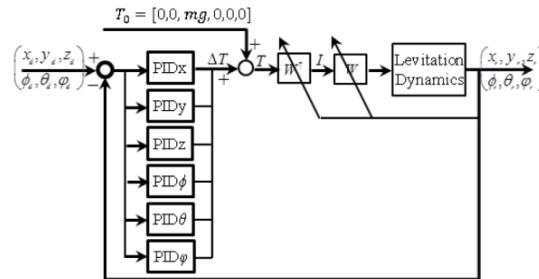
همان طور که پیش تر اشاره شد، سیستم های شناوری مغناطیسی ذاتاً ناپایدار هستند و برای دستیابی به پایداری، به کنترلی با عملکرد دقیق و خطای کم نیاز است. در پژوهش های مختلف، از کنترلرهای گوناگونی برای این سیستم ها بهره گرفته شده است؛ از جمله کنترلرهای کلاسیک نظیر، PID کنترلرهای مدرن مانند کنترل مبتنی بر پیش بینی مدل (MPC) و همچنین مدل های مبتنی بر هوش مصنوعی نظیر شبکه های بازگشتی. GRU. در این بخش، به بررسی این کنترلرها و مقایسه عملکرد آنها خواهیم پرداخت.

۱.۳.۲ کنترلر PID

کنترل تناسبی-انتگرالی-مشتقی (PID) به عنوان یکی از پرکاربردترین و موثرترین کنترلرهای کلاسیک در سیستم های دینامیکی، گزینه ای مناسب برای کنترل سیستم های MLPM محسوب می شود. این کنترلر به دلیل سادگی در پیاده سازی، تنظیم دقیق و توانایی تنظیم خروجی سیستم بر اساس خطاهای ورودی، به طور گسترده در سیستم های مختلف استفاده شده است. برای کنترل سیستم های MLPM به ازای هر درجه آزادی یک کنترلر PID طراحی و پیاده سازی می شود تا بتواند جریان الکتریکی سیم پیچ ها را تنظیم کرده و میدان مغناطیسی لازم برای ایجاد و حفظ موقعیت متحرک را تأمین کند.

در پژوهش های متعددی از کنترلر PID برای سیستم های MLPM بهره گرفته شده است. به عنوان مثال، در [۲، ۴] از کنترلرهای PID ساده برای کنترل جریان سیم پیچ ها استفاده شده که وظیفه تنظیم میدان مغناطیسی و در نتیجه، کنترل موقعیت جسم متحرک را بر عهده دارند. علاوه بر این، در پژوهش [۵]، از دو کنترلر PID در یک ساختار دوگانه استفاده شده است. کنترلر اول برای جابه جایی های بلند و در مسافت های طولانی به کار رفته و جریان سیم پیچ های اصلی را تنظیم می کند، در حالی که کنترلر دوم برای حرکات دقیق کوتاه برد طراحی شده و کنترل جریان سیم پیچ های ثانویه را بر عهده دارد. این روش باعث بهینه سازی کنترل دقیق و بهبود دقت در حرکات کوتاه برد و جابه جایی های سریع می شود. همچنین در سیستم، MagTable برای کنترل دقیق موقعیت آهنرباهای دائمی، از شش کنترلر PID به صورت همزمان استفاده شده است تا نیروی متوازن برای پایداری سازی موقعیت متحرک در چندین جهت فراهم شود [۶]. این نوع طراحی و استفاده از کنترلرهای PID نشان می دهد که علی رغم محدودیت های موجود در کنترلرهای کلاسیک، این روش همچنان در بسیاری از سیستم های مغناطیسی

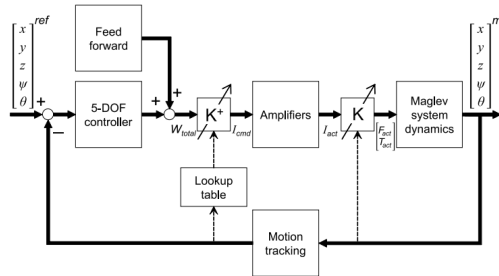
پیچیده مانند MLPM کارایی بالایی دارد.



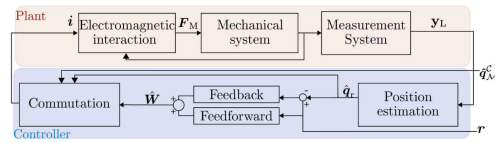
شکل ۱.۲: کنترلر PID با ۶ درجه آزادی [۶]

۲.۳.۲ کنترلر مبتنی بر پیش‌بینی مدل MPC

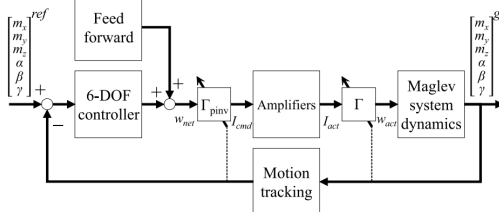
برای کنترل سیستم‌های MLPM اگر مدل سیستم به روش‌های تحلیلی و یا عددی به دست آمده و تخمین زده شده باشد، می‌توان از این مدل‌ها برای طراحی کنترلرهای پیشرفته‌تر با هدف پیش‌بینی رفتار سیستم و استفاده از آن به صورت پیش‌خور در حلقه‌ی کنترلی استفاده کرد. روش‌های تخمین مدل این سیستم‌ها در بخش‌های بعد مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این بخش، کنترلرهای ارائه شده در پژوهش‌های دیگر ارائه می‌شود. به دست آوردن معادلات دینامیکی سیستم و استفاده از آنها در پیش‌بینی روشی تحلیلی است که در [۷] استفاده شده است و مدل کنترلی متشکل از بلوک‌های پس‌خور و پیش‌خور برای کنترل موقعیت آهنربا طراحی شده است. همچنین در [۳] از یک جدول جستجو برای تعیین رفتار سیستم در نقاط مختلف فضا استفاده شده است که این جدول به عنوان پیش‌خور به مدل کنترلی داده می‌شود. در ادامه‌ی این پژوهش، با استفاده از روش‌های شناسایی سیستم، مدلی تقریبی برای رفتار سیستم در نظر گرفته شده است و با استفاده از این مدل برای پیش‌بینی رفتار سیستم مدل MPC پیاده‌سازی شده است. پژوهش [۸] با تمرکز بر ارائه‌ی یک مدل پیش‌بین، با استفاده از معادلات دینامیکی سیستم و همچنین روش پیش‌بینی حالت بی‌تاخیر، رفتار آینده‌ی سیستم را محاسبه می‌کند.



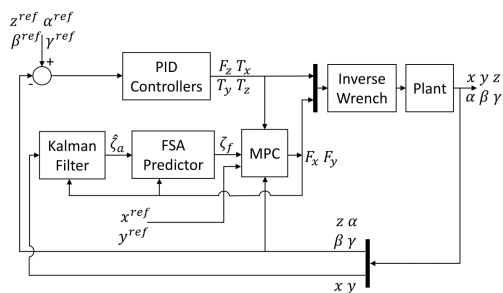
[۳] (ب)



[۷] (ت)



[۹] (د)



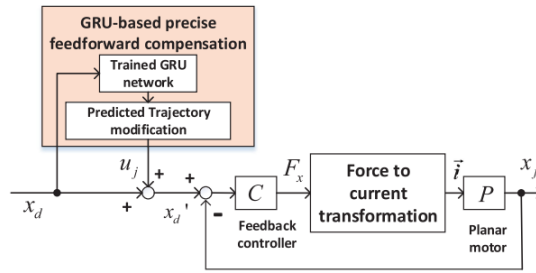
[۹] (ج)

شکل ۲.۲: کنترلر MPC

۳.۳.۲ کنترلر مبتنی بر هوش مصنوعی

یکی از روش‌های نوین برای پیش‌بینی رفتار سیستم‌های پیچیده مانند، MLPM استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی به‌ویژه شبکه‌های عصبی بازگشتی (RNN) است. این مدل‌ها با یادگیری دینامیک سیستم و ارتباط بین ورودی‌ها و خروجی‌ها، می‌توانند به‌طور مؤثری رفتار سیستم را در شرایط مختلف پیش‌بینی کنند. در این راستا، پژوهش [۹] از یک مدل بازگشتی GRU^۱ استفاده کرده است. این مدل بر اساس داده‌های جمع‌آوری‌شده از عملکرد دستگاه MLPM آموزش دیده و توانسته است با دقت بالا تغییرات دینامیکی سیستم و پاسخ آن به ورودی‌های گوناگون را پیش‌بینی کند. استفاده از GRU به دلیل توانایی آن در مدل‌سازی وابستگی‌های زمانی و در نظر گرفتن اطلاعات قبلی برای پیش‌بینی‌های دقیق‌تر، رویکردی مناسب در این پژوهش بوده است. (شکل ۳.۲)

^۱Gated Recurrent Unit



شکل ۳.۲: کنترلر پیش خور GRU [۹]

فصل ۳

روش شناسی

۱.۳ مدل سیستم

همان طور که در بخش های پیشین توضیح داده شد، ساختار سیستم $MLPM$ از دو بخش متحرک و ثابت تشکیل می شود که بخش مترحک حاوی آرایهی هالباخ بوده و بخش ثابت، سیم پیچ ها را شامل می شود. برای مدل سازی این سیستم، لازم است در نظر داشته باشیم که هدف نهایی از طراحی این سیستم کنترل دقیق موقعیت و جهت گیری بخش متحرک است. بنابراین، از این پس منظور از Plant سیستم پیشنهاد شده، تنها بخش متحرک آن است و سیم پیچ ها به عنوان عملگر شناخته می شوند که به صورت مجزا درباره ی آن توضیح داده خواهد شد. در بخش اول از این قسمت، به توضیح مدل بخش متحرک سیستم خواهیم پرداخت.

۱.۱.۳ مدل سیستم متحرک

در این سیستم، به دلیل وجود نداشتن نیروهای اتلافی از جمله اصطکاک و با صرف نظر از مقاومت هوا، می توان سیستم را به عنوان یک جسم ساده و با در نظر گرفتن جرم و ممان های اینرسی آن مدل کرد. بنابراین، روابط دینامیکی زیر برای این سیستم برقرار خواهد بود:

$$m\ddot{P}_x = F_x, \quad m\ddot{P}_y = F_y, \quad m\ddot{P}_z = F_z \quad (۱.۳)$$

$$I_{xx}\ddot{\alpha} = T_x, \quad I_{yy}\ddot{\beta} = T_y, \quad I_{zz}\ddot{\gamma} = T_z \quad (۲.۳)$$

در نتیجه، با محاسبه ی ماتریس های حالت برای این سیستم به صورت زیر خواهیم داشت:

$$\dot{x} = Ax + Bu + g \quad (۳.۳)$$

$$y = Cx + Du \quad (۴.۳)$$

(5.3)

(۶.۳)

(۷.۳)

$$C = I_{12}, \quad D = 0.12 \times 6 \quad (8.3)$$

پارامترهای مورد استفاده در سیستم پیشنهاد شده دارای مقادیر زیر است:

$$m = 6.6 \text{ kg}, \quad g = 9.81 \text{ m/s}^2 \quad (9.3)$$

$$I_{xx} = 0.059 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, \quad I_{yy} = 0.059 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, \quad I_{zz} = 0.12 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (10.3)$$

۲.۱.۳ مدل سیستم ثابت

عملگر سیستم که متشکل از ۱۶ سیم پیچ که در آرایه ای ۴ در ۴ چیده شده اند می باشد، وظیفه ی اعمال نیرو و گشتاور تعیین شده توسط کنترلر را به متحرک بر عهده دارد. در صورتی که جریان الکتریکی گذرنده از هر سیم پیچ مشخص باشد، می توان نیرو و گشتاور برآیند وارد بر متحرک را محاسبه کرد. البته به دلیل تعدد پارامتر ها و محدودیت های شبیه سازی، در این قسمت با استفاده از روش های تحلیلی، معادلاتی بر اساس داده های به دست آمده برای سیستم مورد نظر شناسایی شده است که در ادامه به شرح آنها خواهیم پرداخت.

۱. موقعیت سیم پیچ ها در دستگاه مختصات مرجع:

اولین مولفه ای که در این سیستم تعریف می شود، محل قرار گیری هر یک از سیم پیچ ها می باشد. در این مرحله، با در نظر گرفتن ابعاد سیم پیچ ها برابر با τ و تعداد سطر و ستون آرایه، محل قرار گیری مرکز هر یک مشخص می شود.

$$n_{\text{rows}} = 4, \quad n_{\text{cols}} = 4 \quad (11.3)$$

$$x_{\text{center},j} = (j - 1) \cdot \tau - \frac{(n_{\text{cols}} - 1) \cdot \tau}{2}, \quad j = 1, \dots, n_{\text{cols}} \quad (12.3)$$

$$y_{\text{center},i} = (i - 1) \cdot \tau - \frac{(n_{\text{rows}} - 1) \cdot \tau}{2}, \quad i = 1, \dots, n_{\text{rows}} \quad (13.3)$$

$$z_{\text{center}} = 0 \quad (14.3)$$

در نهایت، موقعیت تمام سیم پیچ ها در سه راستای x ، y و z در یک ماتریس ذخیره برای استفاده در مراحل بعد ذخیره می شود.

$$\text{positions} = \begin{bmatrix} x_{\text{center},1}, y_{\text{center},1}, z_{\text{center}} \\ x_{\text{center},2}, y_{\text{center},1}, z_{\text{center}} \\ \vdots \\ x_{\text{center},n_{\text{cols}}}, y_{\text{center},n_{\text{rows}}}, z_{\text{center}} \end{bmatrix} \quad (15.3)$$

۲. موقعیت سیم پیچ ها در دستگاه مختصات متحرک:

برای محاسبه نیرو و گشتاور، نیاز به دانستن فاصله ی دقیق سیم پیچ مورد بررسی تا موقعیت متحرک وجود دارد. بنابراین، با اندازه گیری مختصات متحرک و استفاده از موقعیت های تعیین شده هر سیم پیچ، می توان بردار فاصله این دو را در دستگاه مختصات مبدا به دست آورد.

$$\mathbf{c}^m = R \begin{bmatrix} x_{\text{coil}} - x_m \\ y_{\text{coil}} - y_m \\ z_{\text{coil}} - z_m \end{bmatrix} \quad (16.3)$$

که در آن R ماتریس دوران تبدیل مختصات متحرک به دستگاه مختصات مبدا می باشد:

$$R = R_z^T R_y^T R_x^T \quad (17.3)$$

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_{\text{rotation}}) & -\sin(\alpha_{\text{rotation}}) \\ 0 & \sin(\alpha_{\text{rotation}}) & \cos(\alpha_{\text{rotation}}) \end{bmatrix} \quad (۱۸.۳)$$

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos(\beta_{\text{rotation}}) & 0 & \sin(\beta_{\text{rotation}}) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta_{\text{rotation}}) & 0 & \cos(\beta_{\text{rotation}}) \end{bmatrix} \quad (۱۹.۳)$$

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos(\gamma_{\text{rotation}}) & -\sin(\gamma_{\text{rotation}}) & 0 \\ \sin(\gamma_{\text{rotation}}) & \cos(\gamma_{\text{rotation}}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۲۰.۳)$$

۳. محاسبه نیرو:

با در اختیار داشتن c^m ، می توان بر اساس رابطه شناسایی شده به صورت زیر نیروی برآیند ناشی از جریان های الکتریکی I را محاسبه کرد.

$$F_x = K_x \cos(\eta_x) \sin(\eta_x) \quad (۲۱.۳)$$

$$F_y = K_y \sin(\eta_x) \cos(\eta_y) \quad (۲۲.۳)$$

$$F_z = K_z \sin(\eta_x) \sin(\eta_y) \quad (۲۳.۳)$$

که پارامتر های استفاده شده در این رابطه به صورت زیر است:

$$\eta_x = \frac{\pi}{\tau} \cdot c_{\text{ا}}^m, \quad \eta_y = \frac{\pi}{\tau} \cdot c_{\text{ب}}^m \quad (۲۴.۳)$$

$$K_x = \alpha_x e^{\beta_k \cdot c_r^m}, \quad K_y = \alpha_y e^{\beta_k \cdot c_r^m}, \quad K_z = \alpha_z e^{\beta_k \cdot c_r^m} \quad (۲۵.۳)$$

۴. محاسبه گشتاور:

محاسبه ی گشتاور ناشی از هر سیم پیچ با استفاده از نیروهای محاسبه شده انجام می شود. با این تفاوت که علاوه بر آن، نیاز به محاسبه ی طول بازوی موثر نیز هست و با توجه به آنکه در این سیستم، بازوی فیزیکی وجود ندارد، لازم است طی محاسباتی این مقادیر محاسبه شوند. بنابراین خواهیم داشت:

$$r_{\text{eff},x1} = c_1^m - m_1 \tan(nc_1^m + \frac{\pi}{2}) \quad (۲۶.۳)$$

$$r_{\text{eff},x2} = c_1^m - m_2 \tan(nc_1^m + \frac{\pi}{2}) \quad (۲۷.۳)$$

$$r_{\text{eff},y1} = c_2^m - m_1 \tan(nc_2^m + \frac{\pi}{2}) \quad (۲۸.۳)$$

$$r_{\text{eff},y2} = c_2^m - m_2 \tan(nc_2^m + \frac{\pi}{2}) \quad (۲۹.۳)$$

$$r_{\text{eff},z1} = -c_3^m - \alpha_{rz} \quad (۳۰.۳)$$

$$r_{\text{eff},z2} = -c_3^m - \alpha_{rz} \quad (۳۱.۳)$$

که در آن:

$$m_1 = \alpha_{m1} \cdot c_3^m + \beta_{m1} \quad (۳۲.۳)$$

$$m_2 = \alpha_{m2} \cdot c_3^m + \beta_{m2} \quad (۳۳.۳)$$

و

$$n = \frac{\pi}{\tau} \quad (۳۴.۳)$$

آنگاه، مقادیر گشتاور به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$T_x = r_{\text{eff},y} F_z - r_{\text{eff},z} F_y \quad (35.3)$$

$$T_y = -r_{\text{eff},x} F_z + r_{\text{eff},z} F_x \quad (36.3)$$

$$T_z = r_{\text{eff},x} F_y - r_{\text{eff},y} F_x \quad (37.3)$$

۵. ماتریس Γ

در نهایت، پس از محاسبه ی روابط نیرو و گشتاور، می توان آنها را در یک ماتریس با نماد Γ تعریف کرد که این ماتریس شامل تمام اطلاعات لازم برای محاسبه ی نیرو و گشتاور ناشی از گذر جریان در هر یک از سیم پیچ ها می باشد. این ماتریس به صورت زیر تعریف می شود:

$$\mathbf{\Gamma} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} \quad (38.3)$$

و با در اختیار داشتن این ماتریس، مقدار پیچش^۱ ناشی از آن از ضرب ماتریسی زیر به دست می آید.

$$w_{mnet} = [w_{m1}, w_{m2}, \dots, w_{mn}] [I_1, I_2, \dots, I_n]^T = \Gamma(\vec{c}_m) I, \quad (39.3)$$

در صورتی که بخواهیم با در اختیار داشتن مقدار پیچش مورد نیاز، جریان های سیم پیچ ها را محاسبه کنیم، می توان از وارون ماتریس Γ استفاده کرد. اما با توجه به ابعاد نامتقارن این ماتریس و برای مصرف

حداقلی انرژی، برای محاسبه ی وارون از روش وارون مورس-پنروز استفاده می شود

$$I = \Gamma^T (\Gamma \Gamma^T)^{-1} w_{mnet}. \quad (40.3)$$

پارامترهای استفاده شده برای این سیستم در جدول زیر نمایش داده شده اند:

| Value | Parameter |
|---------|---------------|
| ۰/۰۵۰۸ | τ |
| -۸۷/۱۴ | β_k |
| ۳/۹۰۲۱ | α_x |
| ۳/۹۰۲۱ | α_y |
| ۵/۵۲۰۹ | α_z |
| -۰/۰۷۱۵ | α_{m1} |
| -۰/۱۰۴۶ | α_{m2} |
| -۰/۱۲۳ | β_{m1} |
| -۰/۰۲۰۳ | β_{m2} |
| -۰/۰۱۴۶ | α_{rz} |
| ۴ | n_{rows} |
| ۴ | n_{cols} |
| ۰/۰۱ | dT |
| ۶/۶ | $Mass$ |

جدول ۱.۳: جدول پارامترها

۳.۱.۳ پیاده سازی محاسبات ماتریس حالت

برای پیاده سازی ماتریس حالت، از کد متلب زیر استفاده شده است:

```

۱ function [xdot, y] = System_SS_Model(u, x)
۲ % Parameters
۳ m = 6.6;           % Mass (kg)
۴ g = 9.81;          % Gravitational acceleration (m/s^2)
۵
۶ % Moment of Inertia
۷ Ixx = 0.059;        % Moment of inertia around x-axis
۸ Iyy = 0.059;        % Moment of inertia around y-axis
۹ Izz = 0.12;         % Moment of inertia around z-axis
۱۰
۱۱ % State vector x = [Px, Vx, Py, Vy, Pz, Vz, , _x, , _y, , _z]
۱۲ % Input vector u = [Fx, Fy, Fz, Tx, Ty, Tz]
۱۳
۱۴ % State-Space Matrix (continuous time)
۱۵ A = zeros(12, 12);
۱۶ % Position-velocity couplings
۱۷ A(1,2) = 1; % Px dot = Vx
۱۸ A(3,4) = 1; % Py dot = Vy
۱۹ A(5,6) = 1; % Pz dot = Vz
۲۰ A(7,8) = 1; % dot = _x
۲۱ A(9,10) = 1; % dot = _y
۲۲ A(11,12) = 1;% dot = _z
۲۳
۲۴ % Input Matrix (continuous time)
۲۵ B = zeros(12, 6);

```

```

۲۶ % Force to acceleration conversion
۲۷ B(2,1) = 1/m;    % Fx -> ax
۲۸ B(4,2) = 1/m;    % Fy -> ay
۲۹ B(6,3) = 1/m;    % Fz -> az
۳۰ % Torque to angular acceleration conversion
۳۱ B(8,4) = 1/Ixx;  % Tx -> _ddot
۳۲ B(10,5) = 1/Iyy; % Ty -> _ddot
۳۳ B(12,6) = 1/Izz; % Tz -> _ddot
۳۴
۳۵ % Gravitational effect (constant acceleration in z direction)
۳۶ gravity = zeros(12,1);
۳۷ gravity(6) = -g;  % Acceleration in z direction
۳۸
۳۹ % State derivative (continuous time)
۴۰ xdot = A * x + B * u + gravity;
۴۱
۴۲ % Output equation (we'll output all states)
۴۳ y = x;
۴۴ end

```

برای اعتبارسنجی سیستم ارائه شده در این بخش، با اعمال ورودی صفر به سیستم، رفتار آن را مشاهده می کنیم. انتظار می رود تا جسم مطابق روابط سقوط آزاد، در راستای Z پایین برود. همچنین، مقادیر محاسبه شده برای سرعت و موقعیت جسم در این راستا طبق روابط زیر به دست می آیند و انتظار می رود تا در پاسخ سیستم نیز مشاهده شود.

$$P_z(t) = P_{z_0} + V_{z_0}t - \frac{1}{2}gt^2 \quad (41.3)$$

با در نظر گرفتن سرعت و موقعیت اولیه ی صفر خواهیم داشت:

$$P_z(1) = -\frac{1}{2}(9.81)(1)^2 = -4.905\text{m} \quad (42.3)$$

همچنین در محاسبات سرعت خواهیم داشت:

$$V_z(t) = V_{z0} - gt \quad (43.3)$$

$$V_z(1) = -(9.81)(1) = -9.81\text{m/s} \quad (44.3)$$

با بررسی شبیه سازی پاسخ سیستم خواهیم داشت:



شکل ۱.۳: اعتبارسنجی مدل سیستم متحرک

۴.۱.۳ پیاده سازی محاسبات Γ

برای اجرای محاسبات توضیح داده شده در بخش قبل، با استفاده از کد متلب زیر، تابعی برای محاسبه ی ماتریس Γ ایجاد می شود:

```

۱      % Define symbolic variables
۲      syms Cxm Cym Czm tau beta_k alpha_x alpha_y alpha_z pi
۳      syms x_m y_m z_m alpha_rotation_m beta_rotation_m
        ↪ gamma_rotation_m % Added rotation angles
۴      syms alpha_m1 alpha_m2 beta_m1 beta_m2 alpha_rz
۵
۶      % Step 1: Generate fixed positions of coils in global
        ↪ coordinates
۷      tau = sym('tau');
۸
۹      n_rows = 4;
۱۰     n_cols = 4;
۱۱     positions = sym(zeros(n_rows * n_cols, 3));
۱۲     row_idx = 0;
۱۳     for i = 1:n_rows
۱۴     for j = 1:n_cols
۱۵     row_idx = row_idx + 1;
۱۶     x_center = (j - 1) * tau - ((n_cols - 1) * tau / 2);
۱۷     y_center = (i - 1) * tau - ((n_rows - 1) * tau / 2);
۱۸     z_center = 0;
۱۹     positions(row_idx, :) = [x_center, y_center, z_center];

```

```

۲۰         end
۲۱     end
۲۲
۲۳     positions_func = matlabFunction(positions, 'File',
    ↪     'generateCoilPositions1', ...
۲۴     'Vars', tau);
۲۵
۲۶     % Step 2: Define rotation matrices
۲۷     Rx = [1, 0, 0;
۲۸     0, cos(alpha_rotation_m), -sin(alpha_rotation_m);
۲۹     0, sin(alpha_rotation_m), cos(alpha_rotation_m)];
۳۰
۳۱     Ry = [cos(beta_rotation_m), 0, sin(beta_rotation_m);
۳۲     0, 1, 0;
۳۳     -sin(beta_rotation_m), 0, cos(beta_rotation_m)];
۳۴
۳۵     Rz = [cos(gamma_rotation_m), -sin(gamma_rotation_m), 0;
۳۶     sin(gamma_rotation_m), cos(gamma_rotation_m), 0;
۳۷     0, 0, 1];
۳۸
۳۹     % Calculate complete rotation matrix (transpose of RxRyRz)
۴۰     R = transpose(Rz) * transpose(Ry) * transpose(Rx);
۴۱
۴۲     % Calculate Gamma matrix with force and torque
۴۳     num_coils = size(positions, 1);

```

```

۴۴     Gamma = sym(zeros(6, num_coils));
۴۵     n = pi / tau;
۴۶
۴۷     for i = 1:num_coils
۴۸         % Coil position in global coordinates
۴۹         coil_pos_g = positions(i, :);
۵۰
۵۱         % Calculate position difference and apply rotation
۵۲         pos_diff = [coil_pos_g(1) - x_m;
۵۳                     coil_pos_g(2) - y_m;
۵۴                     coil_pos_g(3) - z_m];
۵۵
۵۶         % Apply rotation matrix to get cm
۵۷         cm = R * pos_diff;
۵۸
۵۹         % Calculate eta_x and eta_y for this coil
۶۰         eta_x = pi * cm(1) / tau;
۶۱         eta_y = pi * cm(2) / tau;
۶۲
۶۳         % Calculate Kx, Ky, and Kz for this coil
۶۴         Kx = alpha_x * exp(beta_k * cm(3));
۶۵         Ky = alpha_y * exp(beta_k * cm(3));
۶۶         Kz = alpha_z * exp(beta_k * cm(3));
۶۷
۶۸         % Calculate force terms

```

```

۶۹      Fx_term = Kx * cos(eta_x) * sin(eta_y);
۷۰      Fy_term = Ky * sin(eta_x) * cos(eta_y);
۷۱      Fz_term = Kz * sin(eta_x) * sin(eta_y);
۷۲
۷۳      % Calculate m1 and m2
۷۴      m1 = alpha_m1 * cm(3) + beta_m1;
۷۵      m2 = alpha_m2 * cm(3) + beta_m2;
۷۶
۷۷      % Calculate effective radius terms
۷۸      r_eff_x1 = cm(1) - m1 * tan(n * cm(1) + pi/2);
۷۹      r_eff_x2 = cm(1) - m2 * tan(n * cm(1) + pi/2);
۸۰      r_eff_y1 = cm(2) - m1 * tan(n * cm(1) + pi/2);
۸۱      r_eff_y2 = cm(2) - m2 * tan(n * cm(1) + pi/2);
۸۲      r_eff_z1 = -cm(3) - alpha_rz;
۸۳      r_eff_z2 = -cm(3) - alpha_rz;
۸۴
۸۵      % Calculate torque terms
۸۶      T_x_term = r_eff_y1 * Fz_term - r_eff_z1 * Fy_term;
۸۷      T_y_term = -r_eff_x1 * Fz_term + r_eff_z2 * Fx_term;
۸۸      T_z_term = r_eff_x2 * Fy_term - r_eff_y2 * Fx_term;
۸۹
۹۰      % Combine force and torque terms in gamma_i
۹۱      gamma_i = [Fx_term; Fy_term; Fz_term; T_x_term; T_y_term;
    ↪      T_z_term];
۹۲

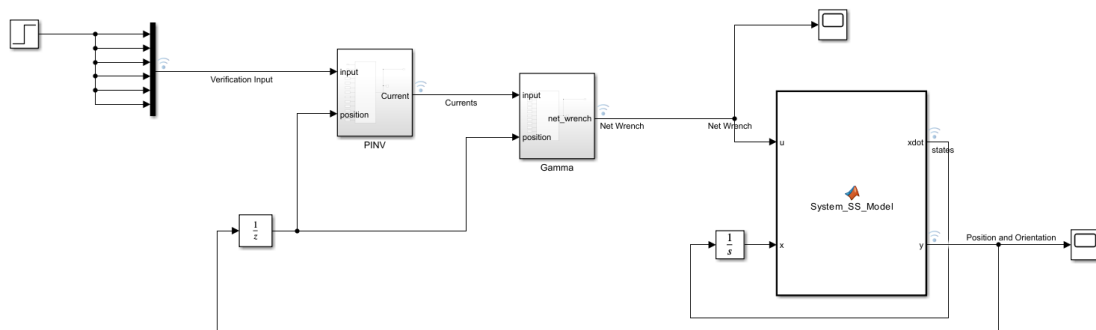
```

```

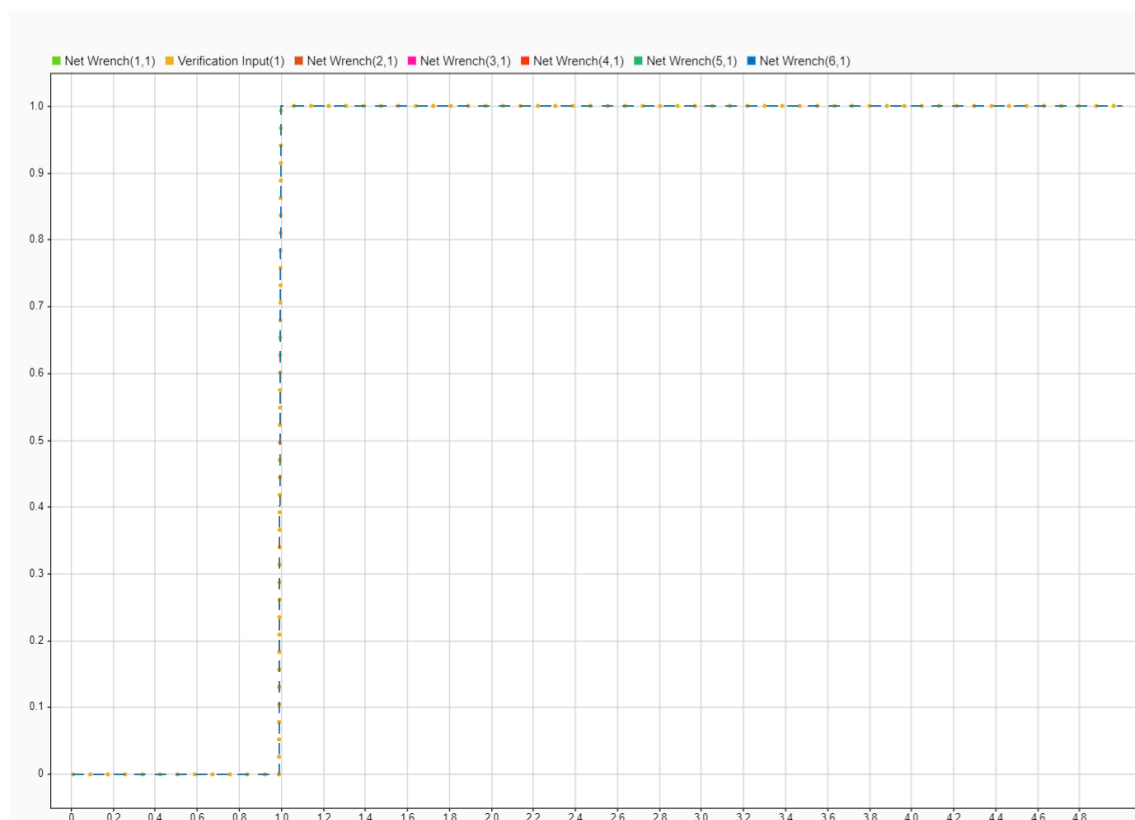
۹۳      % Add gamma_i as a column in the Gamma matrix
۹۴      Gamma(:, i) = gamma_i;
۹۵      end
۹۶
۹۷      % Create MATLAB function with updated variables including
      ↪ rotation angles
۹۸      matlabFunction(Gamma, 'File', 'computeFullGammawithTorqueR4',
      ↪ 'Vars', {x_m, y_m, z_m, ...
۹۹              alpha_rotation_m, beta_rotation_m, gamma_rotation_m,
      ↪ tau, beta_k, ...
۱۰۰              alpha_x, alpha_y, alpha_z, alpha_m1, alpha_m2,
      ↪ beta_m1, beta_m2, alpha_rz, pi});

```

برای اعتبار سنجی سیستم در این بخش با در نظر گرفتن ماتریس های گاما و وارون آن، انتظار آن می رود که ورودی های وارد شده به ماتریس وارون گاما که در سیستم عملیاتی توسط کنترلر تولید می شوند، پس از خروج از ماتریس گاما دقیقاً مقادیری برابر با ورودی داشته باشند. با بررسی این مورد در سیستم زیر خواهیم داشت:



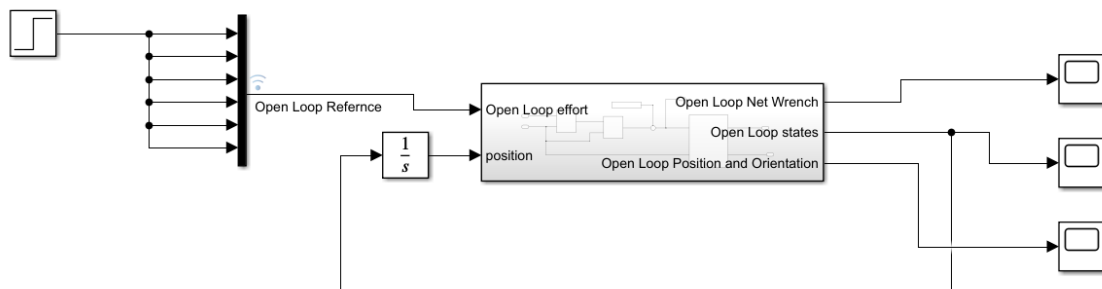
شکل ۲.۳: دیاگرام سیستم اعتبار سنجی سیم پیچ ها



شکل ۳.۳: اعتبار سنجی سیستم سیم پیچ ها

۲.۳ طراحی کنترلر

با مشخص شدن مدل سیستم، می توان آن را در محیط سیمولینک پیاده سازی کرد. برای این منظور، با قرار دادن بلوک های مناسب و اتصال آنها، این سیستم به صورت زیر مشخص می شود.



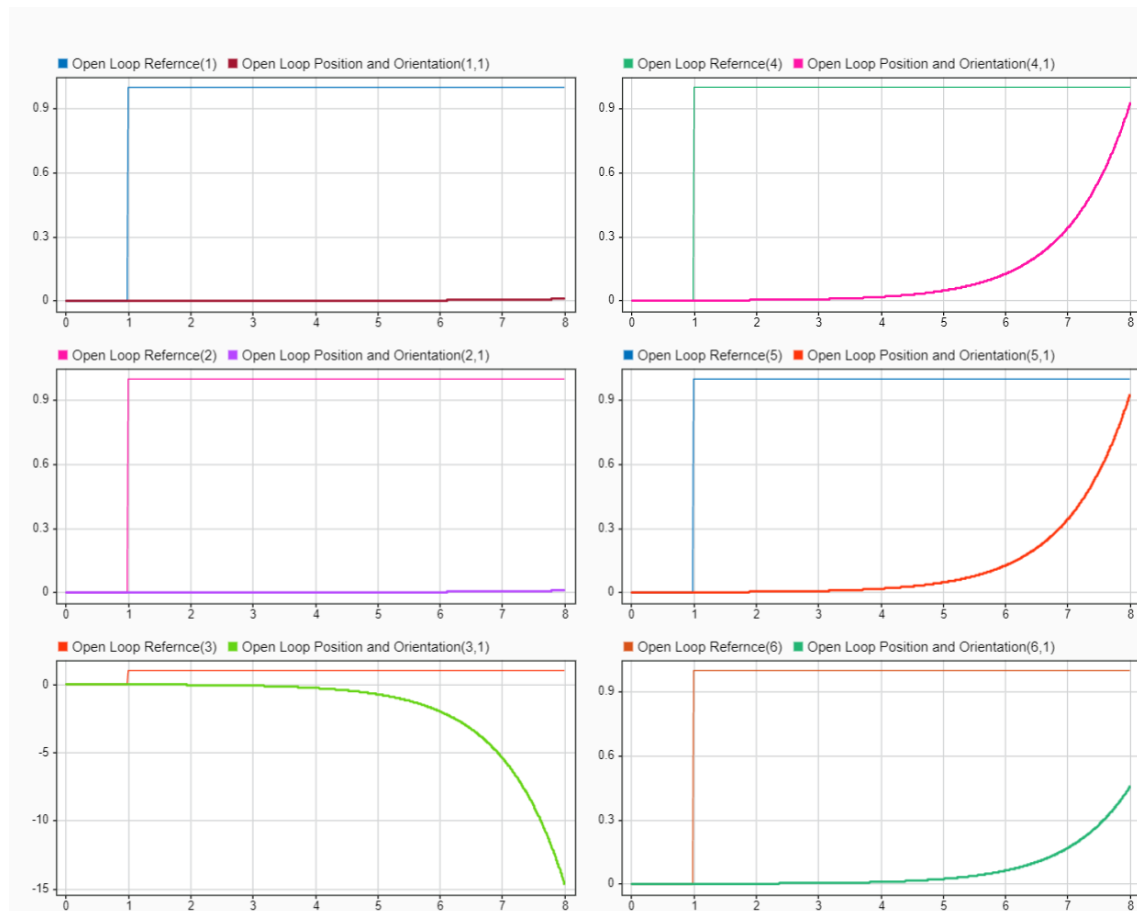
شکل ۴.۳: مدل سیستم

همانطور که در این تصویر نمایش داده شده است، زیر سیستم های مربوط به متحرک، محاسبه ی ماتریس گاما و وارون آن و معادلات دینامیکی متحرک سیستم طراحی شده اند. علاوه بر این، شایان ذکر است که با در نظر گرفتن نیروی گرانش وارد بر متحرک، مقدار این نیرو به صورت اغتشاش و مجزا از ساختار کنترلی طبق رابطه ی زیر محاسبه شده و در راستای محور Z به سیستم وارد شده است.

در ادامه ی این فصل، به بررسی پاسخ های این سیستم و طراحی کنترلر های مناسب برای آن خواهیم پرداخت.

۱.۲.۳ پاسخ سیستم حلقه باز

با اعمال ورودی پله واحد برای موقعیت ها و جهت گیری ها، پاسخ سیستم به صورت زیر به دست می آید:

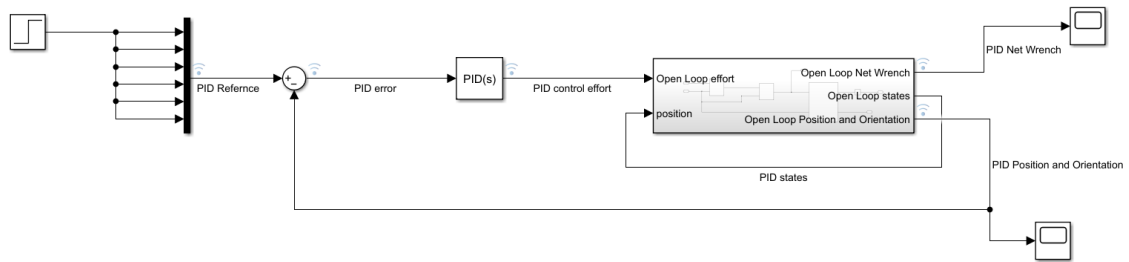


شکل ۵.۳: پاسخ حلقه باز سیستم

مشاهده می شود که در کنترل موقعیت و جهتگیری، سیستم به صورت ذاتی پایدار نیست و نیاز به پیاده سازی کنترلر دارد. علاوه بر این، خصوصا در راستای محور Z برای جلوگیری از فرو افتادن متحرک، نیاز به کنترل بیشتری است. بنابراین، در گام بعد یک کنترلر PID برای این سیستم طراحی می شود و پاسخ آن بررسی می شود.

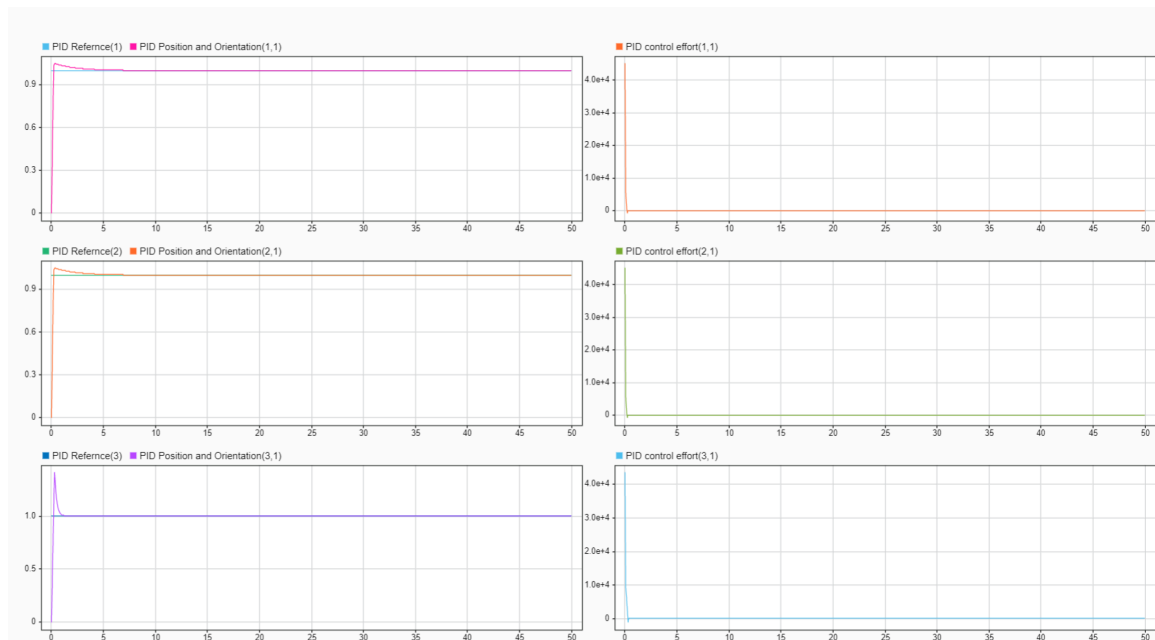
۲.۲.۳ پیاده سازی کنترلر PID

با تشکیل حلقه ی فیدبک و قرار دادن کنترلر PID در سیستم، ساختار آن به صورت زیر تشکیل می شود.



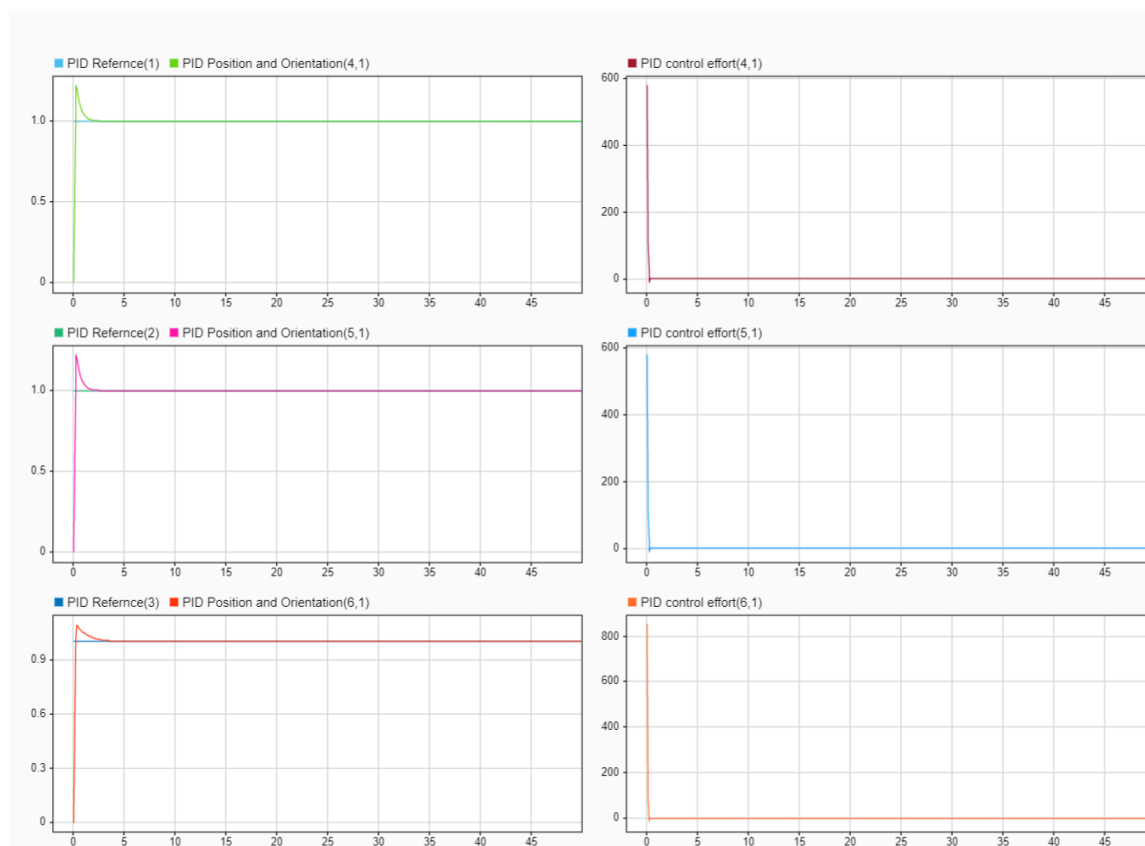
شکل ۶.۳: دیاگرام سیستم با کنترلر PID

با تنظیم ضرایب PID چند متغیره برای هر معیار، در نهایت پاسخ پله ی سیستم در کنار تلاش کنترلی آن به صورت زیر به دست می آید:



شکل ۷.۳: پاسخ پله و تلاش کنترلی برای کنترل موقعیت

در اینجا نیز مشاهده می شود که پاسخ به دست آمده در راستای محور Z همچنان تفاوت هایی با سایر محور ها دارد که ناشی از اعمال جاذبه به آن است. اما با قرار دادن بهره های کنترلی بالاتر برای این محور، زمان رسیدن به پاسخ مناسب تری به دست آورده است.



شکل ۸.۳: پاسخ پله و تلاش کنترلی برای کنترل جهت گیری

ضرایب PID به کار رفته در این سیستم در جدول زیر نمایش داده شده اند.

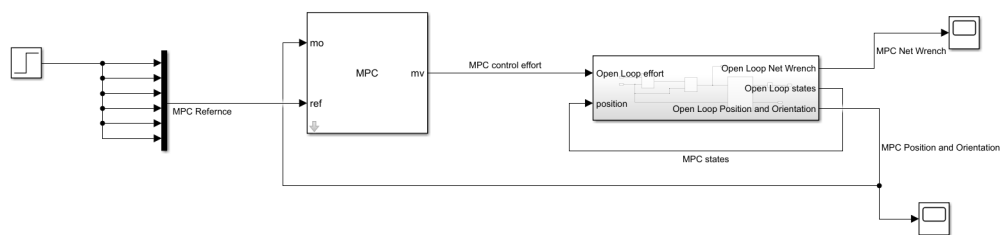
| Gain D | Gain I | Gain P | Axis |
|--------|--------|--------|----------|
| ۳۵۰ | ۴۸۰۰ | ۱۰۰۰۰ | x |
| ۳۵۰ | ۴۸۰۰ | ۱۰۰۰۰ | y |
| ۳۲۵ | ۳۰۰۰۰ | ۱۳۰۰۰ | z |
| ۴ | ۴۰۰ | ۱۸۰ | α |
| ۴ | ۴۰۰ | ۱۸۰ | β |
| ۶٫۵ | ۱۸۰ | ۲۰۰ | γ |

جدول ۲.۳: ضرایب کنترلر PID

$$N = 100$$

۳.۲.۳ پیاده سازی کنترلر $LinearMPC$

در بخش بعد، با جایگذاری یک کنترلر MPC به جای PID و اتصال سیگنال های مربوط به آن، ساختار سیستم به صورت زیر به دست می آید.



شکل ۹.۳: دیاگرام کنترلر $LinearMPC$

در ادامه به طراحی کنترلر MPC می پردازیم. برای این کار، در ابتدا تنظیمات تعداد ورودی و خروجی کنترلر و افق پیش بین آن را تنظیم می کنیم.

Block Parameters: MPC Controller

MPC (mask) (link)

The MPC Controller block lets you design and simulate a model predictive controller defined in the Model Predictive Control Toolbox.

Parameters

MPC Controller Design

Initial Controller State Review

Block Options

General Online Features Default Conditions Others

Controller Information

Sample time Prediction Horizon

Plant Input Signal Sizes

Number of manipulated variables

Number of unmeasured disturbances

Plant Output Signal Sizes

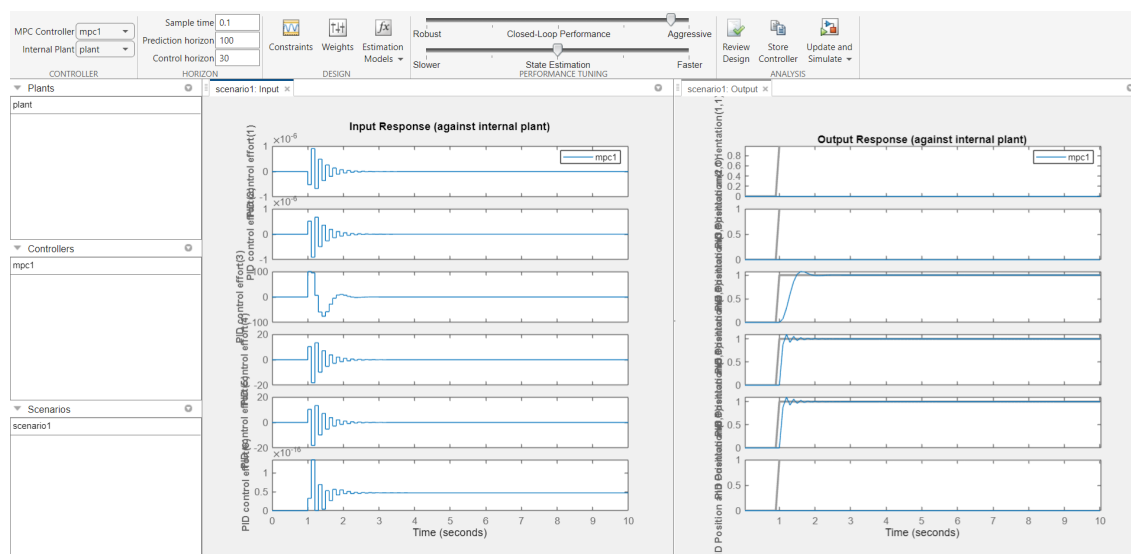
Number of measured outputs

Number of unmeasured outputs

OK Cancel Help Apply

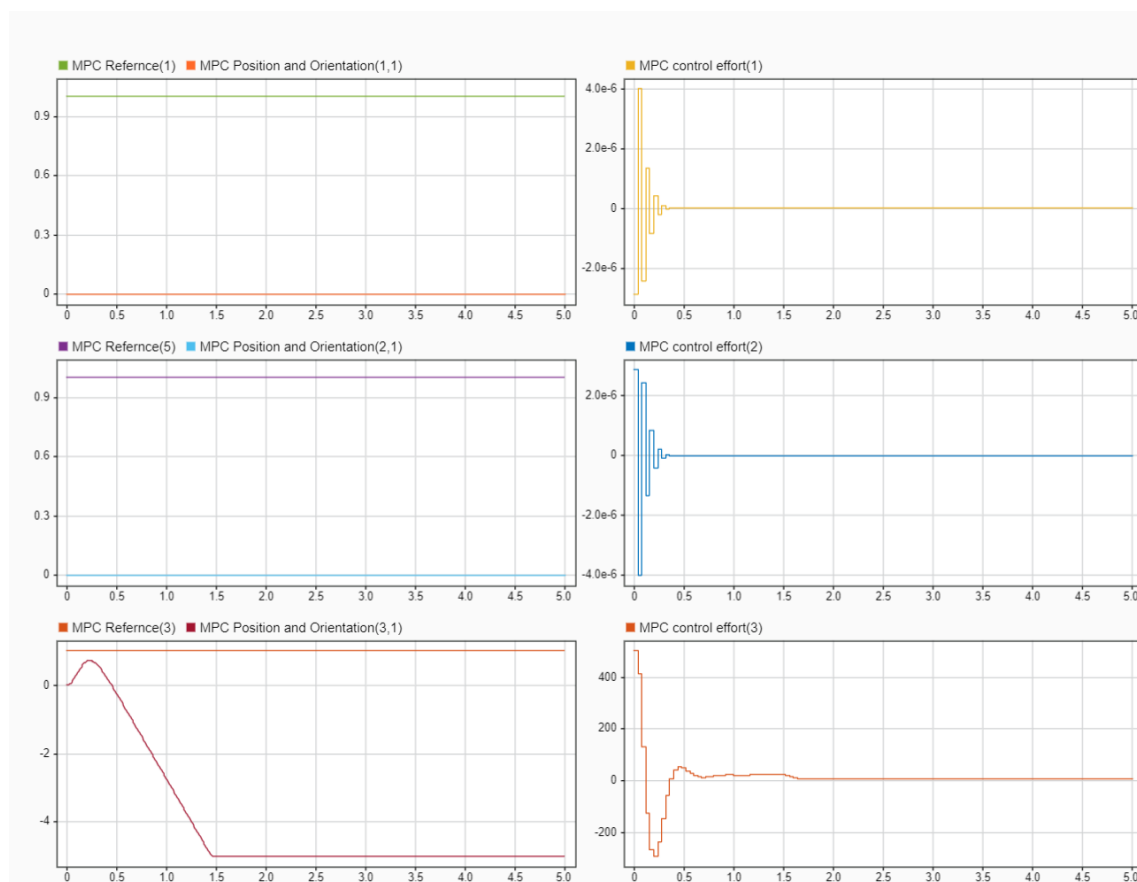
شکل ۱۰.۳: تنظیمات MPC

در ادامه با استفاده از جعبه ابزار کنترلر پیش بین، کنترلر را طراحی می کنیم. با تنظیم افق پیش بین بر مقدار ۱۰۰ و افق کنترلی بر مقدار ۳۰ مطابق تصویر زیر می توانیم پاسخ های سیستم کنترل شده را مشاهده کنیم.

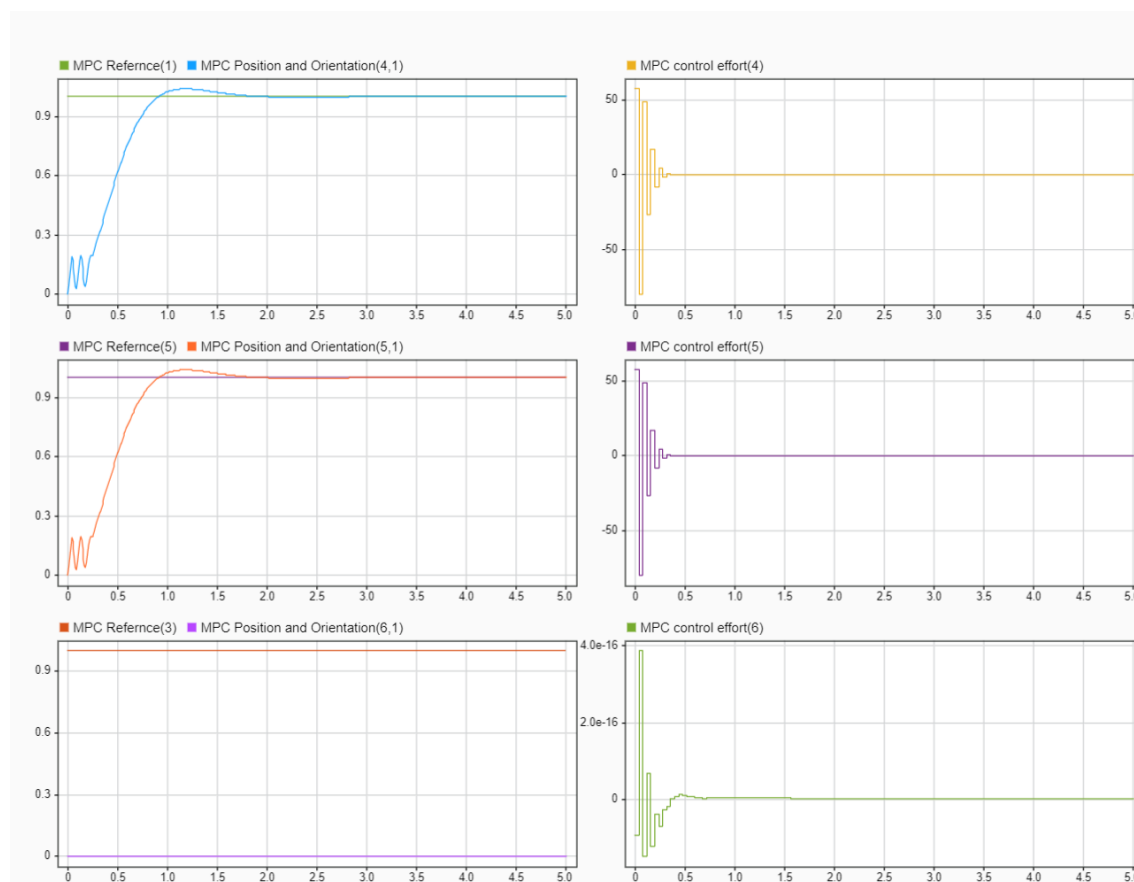


شکل ۱۱.۳: طراحی کنترلر MPC

همانطور که در تصویر بالا مشاهده می شود، این کنترلر موقعیت عمودی و جهت گیری حول محور های افقی سیستم را می تواند به خوبی کنترل کند، اما برای سه حالت دیگر قادر به ایجاد فرمان های کنترلی مناسب نیست. با در نظر داشتن این مورد برای این کنترلر، پاسخ آن را مشاهده می کنیم.



شکل ۱۲.۳: پاسخ کنترلر $LMPC$ برای کنترل موقعیت

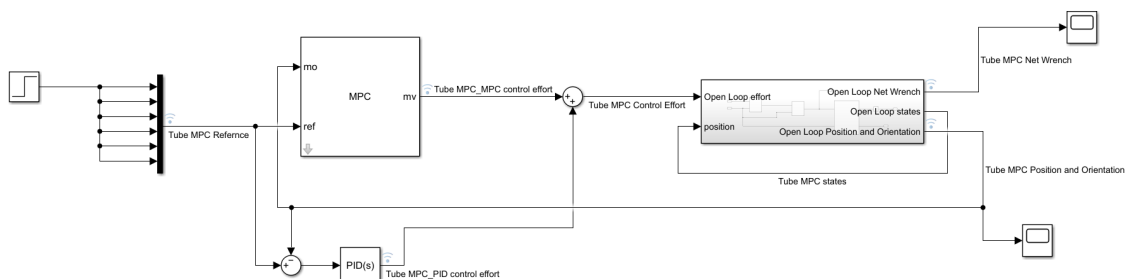


شکل ۱۳.۳: پاسخ کنترلر $LMPC$ برای کنترل جهت گیری

همان طور که در تصاویر بالا مشاهده می شود، این کنترلر به جز در تعیین جهت گیری و زاویه ی سیستم حول محور های دوران x و y قادر به کنترل سیستم نیست. علاوه بر این، علی رغم پاسخ های مشاهده شده در تنظیم سیستم برای کنترل موقعیت در راستای z ، علی رغم وجود تلاش کنترلی به دلیل ماهیت غیرخطی سیستم شناوری مغناطیسی در ارتفاع های مختلف، قادر به کنترل سیستم نمی باشد. در اینجا لازم به یادآوری است که معادلات دینامیکی شناسایی شده برای سیستم در ارتفاع ۱۵ میلی متری تعیین شده است و بنابراین تنها با در نظر گرفتن مدل سیستم، نمی توان موقعیت ارتفاع آن را کنترل کرد.

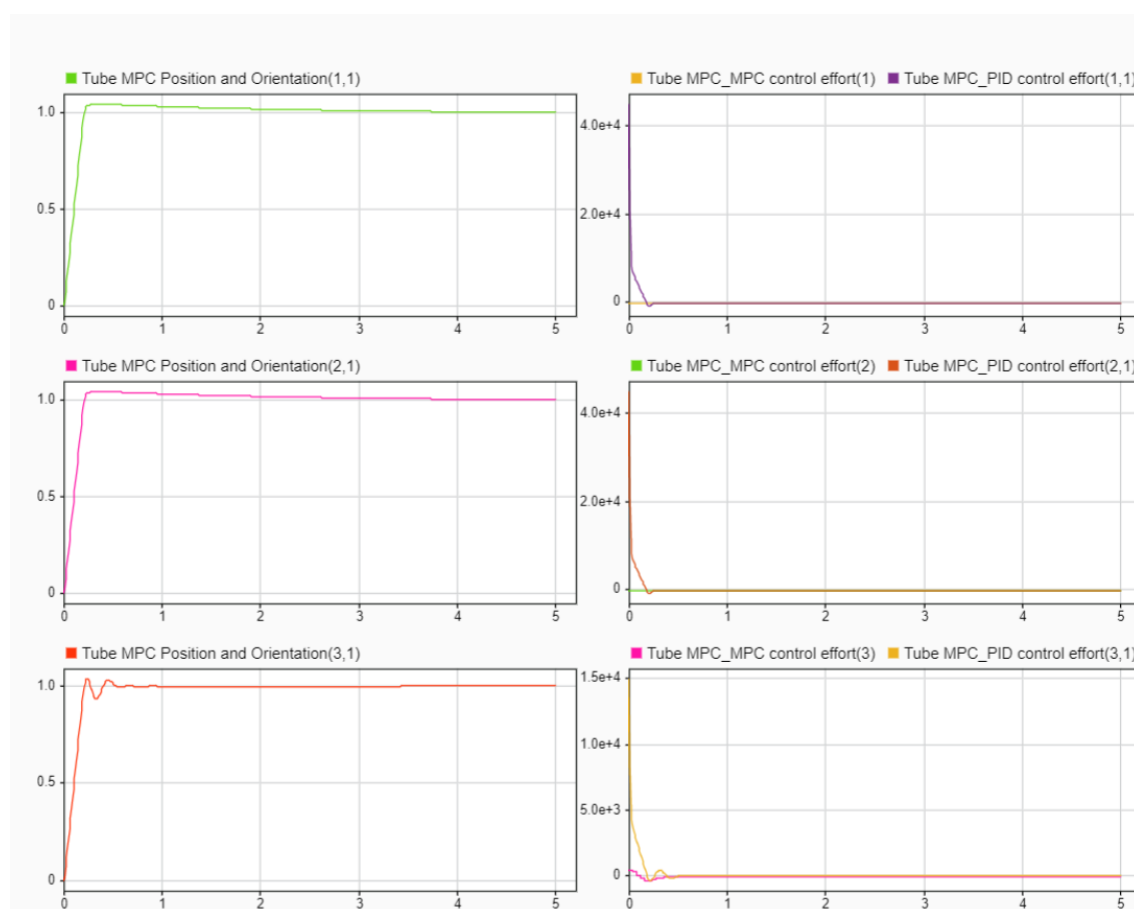
۴.۲.۳ پیاده سازی کنترلر $TubeMPC$

با توجه به عملکرد کنترلر LMPC و PID در این بخش به طراحی کنترلر $TubeMPC$ خواهیک پرداخت. با در نظر داشتن عملکرد کنترلر LMPC برای موقعیت ها و جهت گیری ها، می توان نتیجه گرفت که استفاده از کنترلر PID برای کنترل مد هایی که MPC قادر به کنترل آنها نبود می تواند راهکار مناسبی باشد. علاوه بر این، برای کاهش زمان پاسخ در مد های کنترل شده نیز، استفاده از PID کمک کننده است. بنابراین، ساختار کنترلی این سیستم به صورت زیر تشکیل می شود.

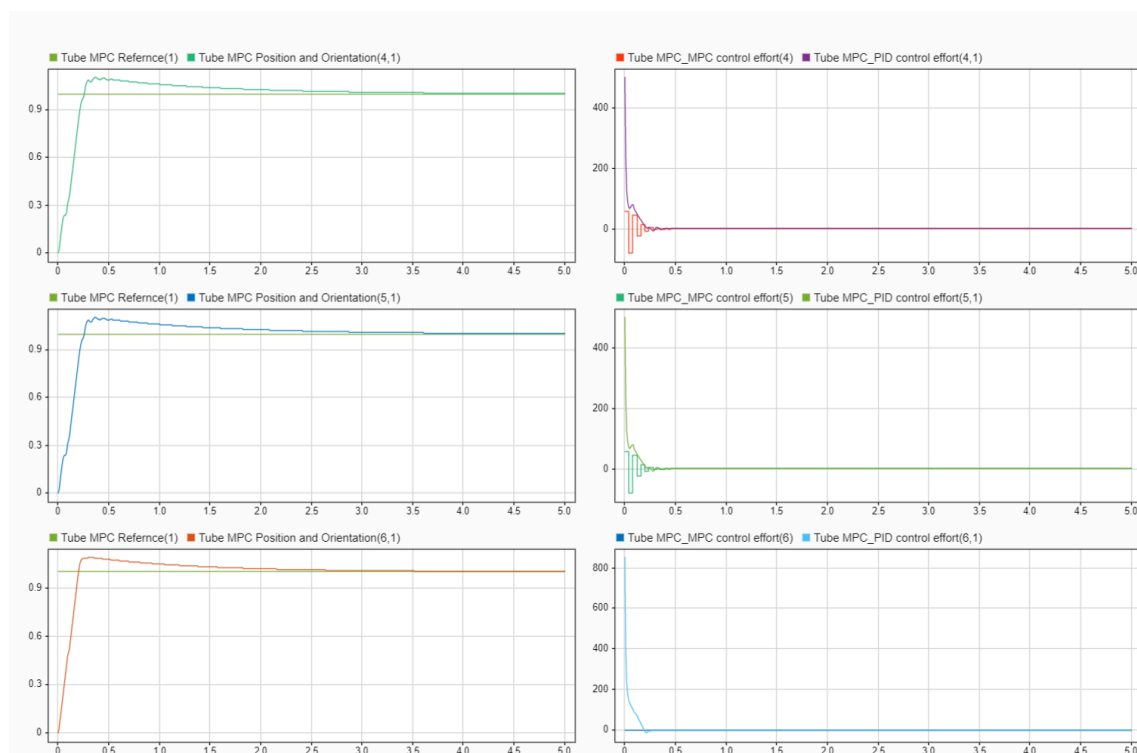


شکل ۱۴.۳: دیاگرام کنترلر TMPC

پاسخ سیستم به ورودی پله به صورت زیر خواهد بود.



شکل ۱۵.۳: پاسخ کنترلر TMPC به ورودی پله برای کنترل موقعیت



شکل ۱۶.۳: پاسخ کنترلر TMPC به ورودی پله برای کنترل جهت گیری

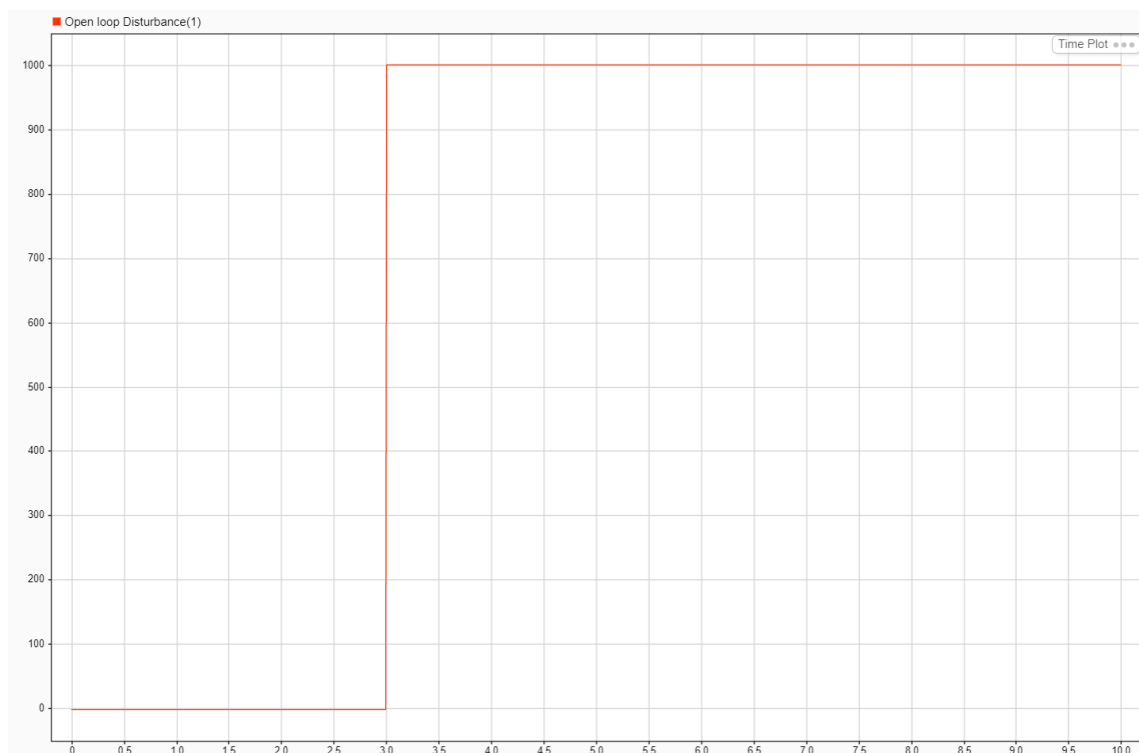
ضرایب کنترلر PID مورد استفاده در این بخش به صورت زیر است:

| Gain D | Gain I | Gain P | Axis |
|--------|--------|--------|----------|
| ۳۵۰ | ۴۸۰۰ | ۱۰۰۰۰ | x |
| ۳۵۰ | ۴۸۰۰ | ۱۰۰۰۰ | y |
| ۱۰۰ | ۵۰۰ | ۵۰۰۰ | z |
| ۴ | ۸۰ | ۱۰۰ | α |
| ۴ | ۸۰ | ۱۰۰ | β |
| ۶/۵ | ۱۸۰ | ۲۰۰ | γ |

جدول ۳.۳: ضرایب کنترلر PID در TMPC

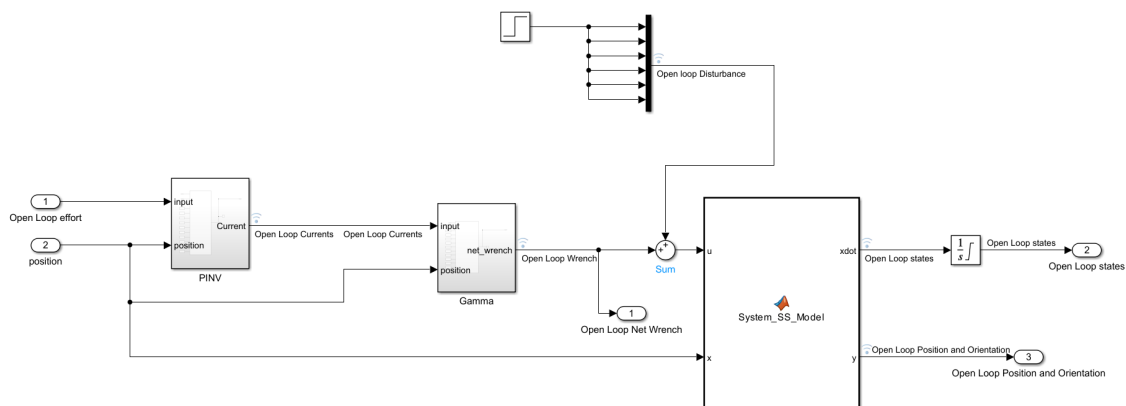
۳.۳ مقایسه نتایج

با بررسی های انجام شده بر سیستم MLPM و اعتبارسنجی مدل آن که به تفصیل در بخش اول از این فصل انجام شد، می توان عملکرد کنترلر های مختلف را بر روی این سیستم بررسی و مقایسه کرد. در بخش قبل، ساختار کنترلر های LMPC PID و TMPC شرح داده شده و پاسخ پله ی آنها به ورودی پله مشاهده شد. اما برای بررسی دقیق تر، در این بخش مقادیر نویز و اغتشاش نیز به سیستم اعمال شده و پاسخ هر یک از حالت های مورد اندازه گیری سیستم را به وسیله کنترلر های مختلف بررسی می کنیم. در گام اول، مقدار در زمان ۳ ثانیه به هر یک از حالت های سیستم اعمال می شود.



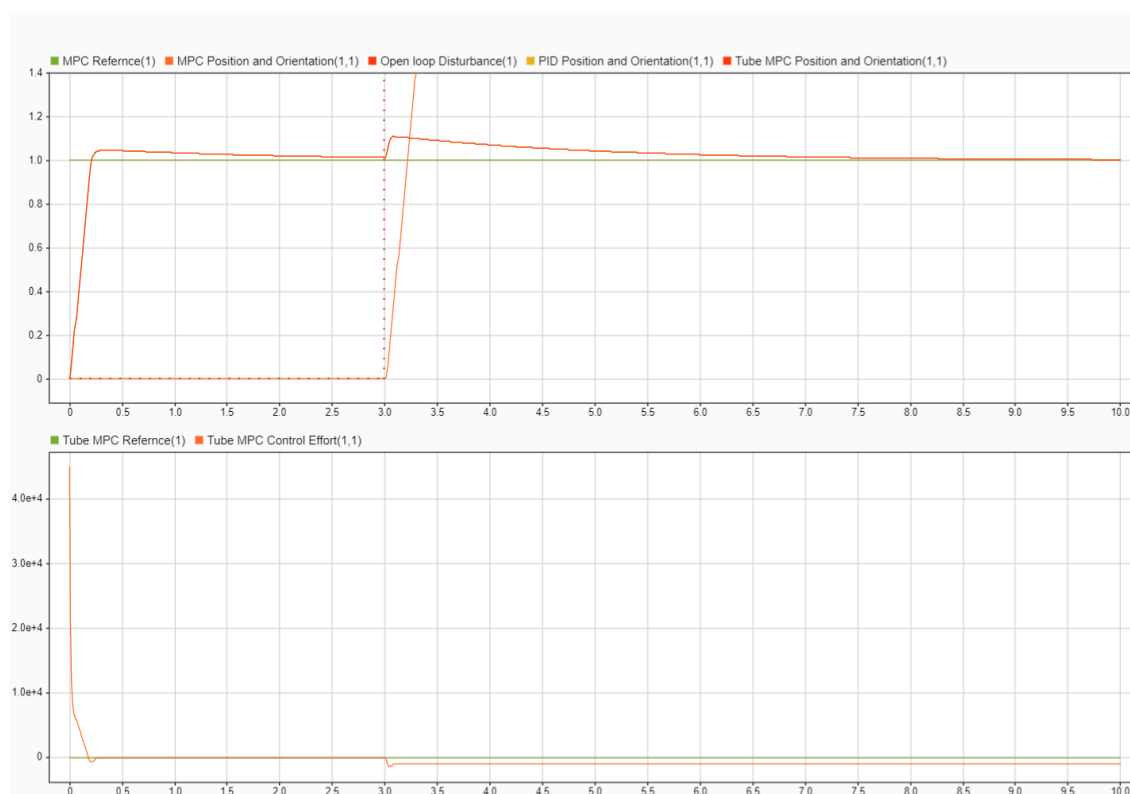
شکل ۱۷.۳: نمودار اغتشاش

این اغتشاش به طور مستقیم به متحرک وارد می شود. بنابراین، مدل سیستم به صورت زیر تغییر پیدا می کند.



شکل ۱۸.۳: دیاگرام سیستم با اغتشاش

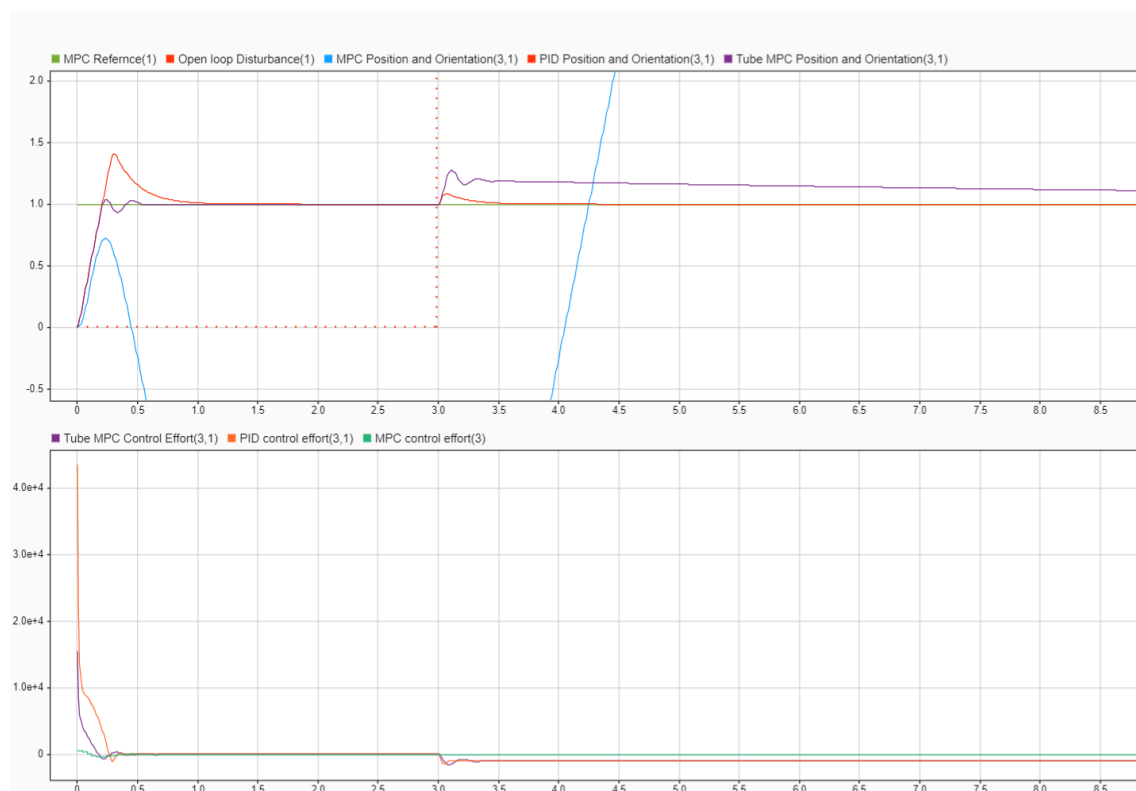
با اعمال ورودی پله، پاسخ های حالت های سیستم به صورت زیر به دست می آیند.



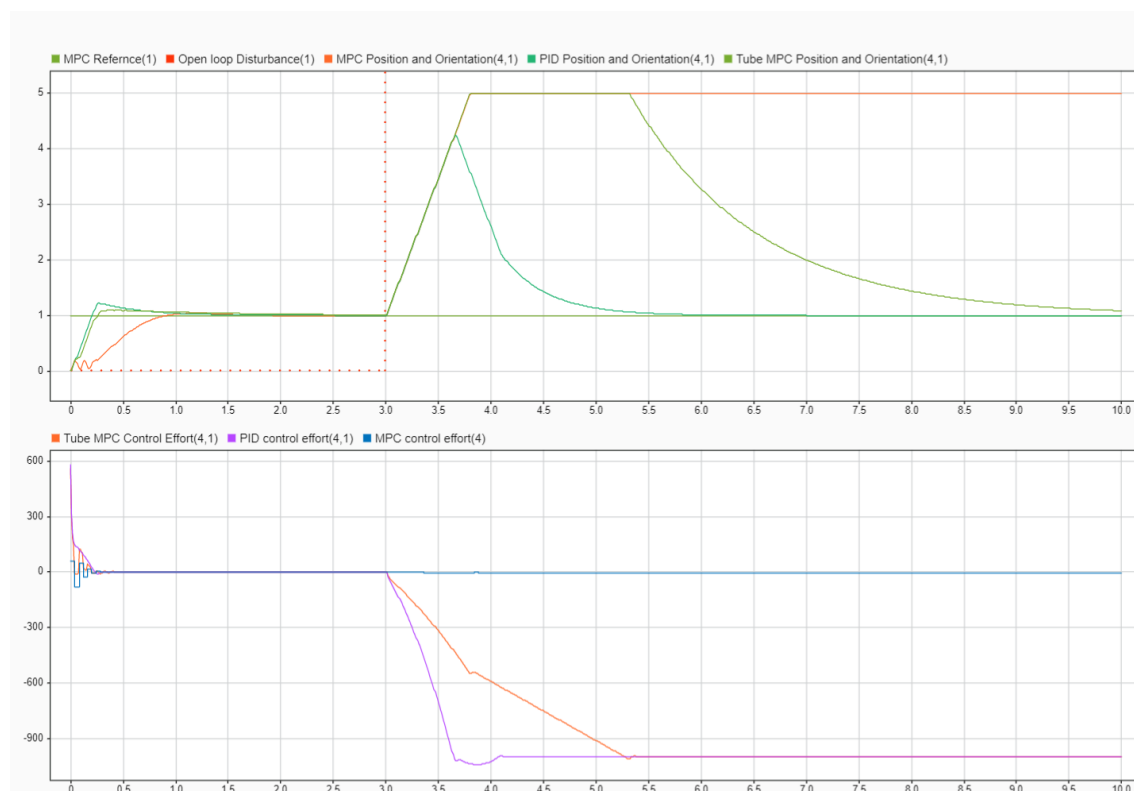
شکل ۱۹.۳: پاسخ حالت اول به همراه اغتشاش



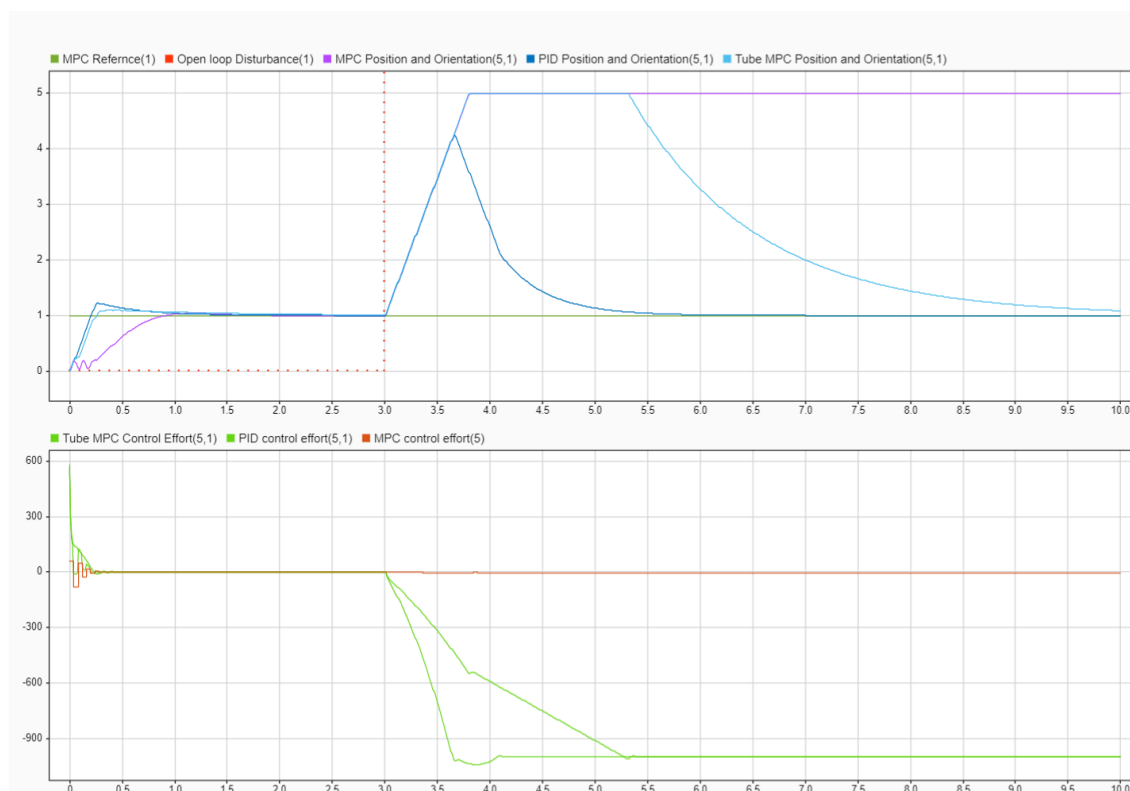
شکل ۲۰.۳: پاسخ حالت دوم به همراه اغتشاش



شکل ۲۱.۳: پاسخ حالت سوم به همراه اغتشاش



شکل ۲۲.۳: پاسخ حالت چهارم به همراه اغتشاش



شکل ۲۳.۳: پاسخ حالت پنجم به همراه اغتشاش



شکل ۲۴.۳: پاسخ حالت ششم به همراه اغتشاش

فصل ۴

نتیجه گیری

با شناسایی و اعتبارسنجی مدل سیستم و پیاده سازی کنترلر های کلاسیک نظیر PID و کنترلر های مبتنی بر پیش بینی مدل نظیر *LinearMPC* و *TubeMPC* در بخش های پیشین، توانستیم درک درستی از رفتار سیستم به دست آورده و نحوه ی پاسخ ددهی آن را در شرایط مختلف بررسی کنیم. همانطور که مشاهده شد، کنترلر PID با ضرایب بالا، می تواند سیستم را به خوبی کنترل کند، اگرچه این امر مستلزم توانایی سیستم در پشتیبانی از فرمان های کنترلی زیاد است. در غیر این صورت، پاسخ مطلوب سیستم حاصل نمی شود. علاوه بر این، با استفاده از کنترلر MPC خطی، مشاهده کردیم که جز در مواردی مانند کنترل جهت متحرم در صفحه، کنترلر سایر حالت های سیستم به سختی انجام می گیرد. مشاهده شد که کنترل ارتفاع سیستم از خاصیتی غیرخطی برخوردار است که تنها به وسیله ی کنترلر های بدون اتکا بر مدل سیستم قابل ردگیری است و کنترلر MPC که مدل سیستم را در اختیار دارد، در عمل قادر به کنترل این حالت نیست. با افزودن کنترلر PID به کنترلر MPC، مشاهده شد که سیستم می تواند با تلاش کنترلی کمتری نسبت به PID حالت ها را کنترل کند. اگرچه، برای حالت هایی که MPC قادر به کنترل آنها نبود ضرایب PID تغییری نکرده اند و در سایر موارد به طور قابل توجهی کاهش یافته اند. در نهایت، با اعمال نیرو و گشتاور اغتشاش به سیستم مشاهده شد که کنترلر های شامل المان PID توانستند به خوبی رفتار سیستم را کنترل کنند، اگرچه حساسیت سیستم به گشتاور های اغتشاشی بسیار بیشتر از حساسیت آن به نیروهای اغتشاشی است و پاسخ سیستم به مقدار قابل توجهی از مقدار رفرنس خارج می شود. با این حال، این اغتشاش در شبیه سازی منجر به ناپایداری سیستم نشده است.

۱.۴ کارهای آینده

با اتمام این پژوهش، مدل صحیح و معتبری از سیستم به دست آمده است که می تواند مورد پژوهش های بیشتری در زمینه های بهینه سازی کنترلر های کلاسیک، پیاده سازی کنترلر های مدرن و یا مبتنی بر هوش مصنوعی قرار گیرد. علاوه بر این، به منظور شباهت هر چه بیشتر این مدل با سیستم واقعی، می توان محدودیت های فیزیکی که در واقعیت محدودکننده عملکرد سیستم هستند را در طراحی مدل لحاظ کرد. در نهایت، با در اختیار داشتن سیستم فیزیکی و واقعی از سیستم مورد بررسی در این پژوهش، می توان پس از تعیین پارامتر های مورد استفاده مطابق با سیستم واقعی و اعتبارسنجی رفتار سیستم، به صورت عملیاتی سیستم را کنترل کرد.

فصل ۵

بحث و نتیجه‌گیری

این گزارش به صورت جامع به بررسی طراحی و ساخت موتورهای مسطح مبتنی بر شناوری مغناطیسی (MLPM) پرداخته و جنبه‌های مختلف این سیستم‌ها شامل معماری، طراحی آهنرباهای دائمی، سیستم‌های کنترلی و روش‌های مدل‌سازی را مورد تحلیل قرار داده است. هدف اصلی این تحلیل‌ها، شناسایی بهترین روش‌ها و ارائه راهکارهایی برای بهبود عملکرد این دستگاه‌ها بر اساس پژوهش‌های پیشین بوده است. در معماری دستگاه، بررسی‌ها نشان داد که استفاده از سیم‌پیچ‌های متحرک و آهنرباهای ثابت به دلیل محدودیت‌های ذاتی مانند مشکلات مرتبط با اتصالات الکتریکی و خنک‌کاری سیم‌پیچ‌ها، راهکاری با کارایی کمتر محسوب می‌شود. در مقابل، استفاده از سیم‌پیچ‌های ثابت و آهنرباهای دائمی متحرک، به دلیل حذف محدودیت‌های فوق و بهبود عملکرد حرکتی بخش متحرک، به عنوان معماری بهینه و مناسب‌تر برای کاربردهای MLPM معرفی شد. در طراحی آهنرباهای دائمی، مقایسه بین آهنرباهای دیسکی و آرایه‌های هالباخ نشان داد که آرایه‌های هالباخ به‌ویژه در چینش‌های یک‌بعدی و دوبعدی، عملکرد بهتری از نظر تقویت میدان مغناطیسی دارند. این آرایه‌ها، از طریق خنثی کردن میدان در یک سمت و تقویت آن در سمت دیگر، قادر به تولید میدان مغناطیسی قوی‌تری هستند که امکان کنترل دقیق‌تر نیروها و جابه‌جایی‌ها را فراهم می‌آورد. آهنرباهای دیسکی هرچند از نظر طراحی ساده‌تر هستند، اما به دلیل ناپایداری و غیر یکنواختی میدان مغناطیسی، کارایی کمتری در سیستم‌های MLPM دارند. آرایه‌های دوبعدی هالباخ، هرچند مزیت‌های بسیاری در تقویت میدان مغناطیسی دارند، با چالش‌هایی همچون ایجاد نوسانات بیشتر در میدان همراه هستند که باید با استفاده از طراحی دقیق‌تر مدیریت شود. در حوزه کنترلرها، کنترلرهای کلاسیک نظیر PID به دلیل سادگی و کارایی اثبات‌شده، همچنان به عنوان گزینه‌ای

مناسب برای سیستم‌های MLPM مطرح هستند. با این حال، نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که در صورتی که اطلاعات دینامیکی سیستم در دسترس باشد، کنترلرهای مبتنی بر مدل پیش‌بینی (MPC) و یا کنترلرهای مبتنی بر هوش مصنوعی همچون GRU، به دلیل توانایی پیش‌بینی رفتار سیستم و اعمال کنترل دقیق‌تر، از عملکرد بهتری برخوردارند. این روش‌های پیشرفته می‌توانند پایداری سیستم را افزایش داده و خطاهای ناشی از کنترل را کاهش دهند، به‌ویژه در کاربردهایی که نیاز به دقت بالا دارند.

کتاب نامه

- [1] Berkelman, Peter and Dzadovsky, Michael. Magnetic levitation over large translation and rotation ranges in all directions. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 18(1):44–52, 2013.
- [2] Miyasaka, Muneaki and Berkelman, Peter. Magnetic levitation with unlimited omnidirectional rotation range. *Mechatronics*, 24(3):252–264, 2014.
- [3] Trakarnchaiyo, Chanuphon, Wang, Yang, and Khamesee, Mir Behrad. Design of a compact planar magnetic levitation system with wrench–current decoupling enhancement. *Applied Sciences*, 13(4):2370, 2023.
- [4] Zhu, Haiyue, Pang, Chee Khiang, and Teo, Tat Joo. Analysis and control of a 6 dof maglev positioning system with characteristics of end-effects and eddy current damping. *Mechatronics*, 47:183–194, 2017.
- [5] Zhu, Haiyue, Teo, Tat Joo, and Pang, Chee Khiang. Magnetically levitated parallel actuated dual-stage (maglev-pad) system for six-axis precision positioning. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 24(4):1829–1838, 2019.
- [6] Zhang, Xiaodong, Trakarnchaiyo, Chanuphon, Zhang, Heng, and Khamesee, Mir Behrad. Magtable: A tabletop system for 6-dof large range and completely contactless operation using magnetic levitation. *Mechatronics*, 77, 2021.
- [7] Proimadis, Ioannis, Custers, Coen HHM, Tóth, Roland, Jansen, JW, Butler, Hans, Lomonova, Elena, and Van den Hof, Paul MJ. Active deformation control for a magnetically levitated planar motor mover. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 58(1):242–249, 2021.
- [8] Xu, Zhenchuan, Wang, Yang, Wang, Jie, and Khamesee, Mir Behrad. Predictor-based model predictive control for maglev planar motor with a 2d halbach array mover. *Control Engineering Practice*, 141:105731, 2023.

- [9] Ou, Tiansheng, Hu, Chuxiong, Zhu, Yu, Zhang, Ming, and Zhu, Limin. Intelligent feedforward compensation motion control of maglev planar motor with precise reference modification prediction. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(9):7768–7777, 2020.