

تاسیس ۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی برق

گروه کنترل

پایان نامه دوره کارشناسی

# طراحی و پیاده‌سازی کنترل کننده هوشمند مبتنی بر یادگیری عاطفی مغز برای سیستم کنترل سطح

اساتید راهنما

دکتر علی رضا فاتحی

پروفسور کارو لوکس

دانشجویان

مجتبی مسعودی نژاد

رحمان خورسندی

شماره پایان نامه: ۲۲۲۲

تابستان ۱۳۸۶

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

---

تقدیم به:

پدران سخت کوش

و

مادران فداکارمان

با تشکر فراوان از اساتید راهنمایمان

جناب پروفیسور لوکس و دکتر فاتحی

که در طول این پروژه علاوه بر حمایت بی دریغشان، روش  
مواجهه با مسائل جدید و حل آنها را به ما آموختند و در طی  
مسیر پر پیچ و خم این پروژه همواره یار و یاور ما بودند تا زیر و  
بم این راه به خوبی و درستی طی گردد.

از کمک‌های صمیمانه خانم مهندس شهیدی، آقای مهندس  
شهمیرزادی و آقای مهندس جمالی صمیمانه سپاسگزاری  
می‌نماییم.

ضمناً وظیفه‌ی خود می‌دانیم از تمامی دوستان عزیز که ما را در  
تهیه‌ی این کار تحقیقاتی یاری رساندند، به ویژه در  
آزمایشگاه‌های اتوماسیون پیشرفته، کنترل فرآیند و دیجیتال  
تشکر نماییم.

مجتبی مسعودی‌نژاد

رحمان خورسندی

تهران - تابستان ۱۳۸۶

## اظهارنامه دانشجو

موضوع پایان نامه: طراحی و پیاده سازی کنترل کننده هوشمند مبتنی بر یادگیری عاطفی مغز برای سیستم کنترل سطح  
اساتید راهنما: جناب آقای پروفیسور لوکس، جناب آقای دکتر فاتحی  
دانشجویان: مجتبی مسعودی نژاد، رحمان خورسندی  
شماره دانشجویی: ۸۱۰۲۲۷۳، ۸۱۰۱۴۰۳

اینجانبان، مجتبی مسعودی نژاد و رحمان خورسندی، دانشجویان دوره ی کارشناسی مهندسی برق، گرایش کنترل دانشکده برق دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی، گواهی می نماییم که تحقیقات  
ارایه شده در این پایان نامه توسط شخص اینجانبان انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده  
مورد تایید می باشد، و در موارد استفاده از کار دیگر محققان، به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. به  
علاوه گواهی می نماییم که مطالب مندرج در این پایان نامه تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا  
امتیازی توسط اینجانبان یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان نامه چارچوب  
(فرمت) مصوب دانشگاه را رعایت کرده ایم.

مجتبی مسعودی نژاد  
رحمان خورسندی  
شهریورماه ۱۳۸۶

## حق طبع و نشر مالکیت نتایج

حق چاپ و تکثیر این پایان‌نامه متعلق به نویسندگان آن می‌باشد. هرگونه کپی‌برداری بصورت کل

پایان‌نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده برق دانشگاه صنعتی خواجه نصیر

الدین طوسی مجاز می‌باشد. ضمناً متن این صفحه نیز باید در نسخه تکثیر شده موجود باشد.

کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی می‌باشد و بدون اجازه‌ی

کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.

همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

## چکیده

در این نوشته پس از مرور فرآیند یادگیری عاطفی در مغز و مدل‌های ارائه شده در گذشته، و بررسی اجمالی این نوع یادگیری از دیدگاه مهندسی کنترل و حل مساله کنترل سعی شده تا از مدل کامل برای کنترل چند دستگاه واقعی بهره برده شود.

پس از بررسی مدل‌های موجود که در کارهای گذشته ارائه شده است، بدلیل ضعف‌های موجود در مدل، به ارائه‌ی متممی برای BELBIC می‌پردازیم تا علاوه بر پوشش ضعف‌ها، امکان کاربرد BELBIC در سیستم‌های کنترل واقعی فراهم آید. ضعف مدل‌های مورد استفاده در گذشته، ناپایداری داخلی ضرایب BELBIC بود که برای سیستم‌های صنعتی باعث از کار افتادن کنترل‌کننده بدلیل مشکلات محاسباتی داخلی در دراز مدت می‌شد، در این روش از یک محدود کننده‌ی انتگرالی (IAW) استفاده شده تا از ناپایداری داخلی جلوگیری گردد.

در ادامه به بررسی، شبیه‌سازی و پیاده‌سازی این مدل تکامل یافته به عنوان کنترل‌کننده در چند سیستم عملی پرداخته شده و در نهایت کیفیت عملکرد این کنترل‌کننده مورد بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: هوش مصنوعی، یادگیری عاطفی، سیستم لیمبیک، BELBIC، دستگاه کنترل سطح، دستگاه توپ و صفحه

## فهرست

فصل ۱	۱
مقدمه	۱
۱-۱ تاریخچه	۵
۱-۱-۱ دیدگاه تحلیلی - شناختی	۶
شناخت فیزیولوژیکی	۶
مدل های ریاضی	۶
کاربردهای عملی	۸
۲-۱-۱ دیدگاه آموزش	۹
۲-۱ اهداف	۱۳
۳-۱ آنچه در این پایان نامه به آن پرداخته شده است	۱۳
فصل ۲	۱۶
آشنایی با سیستم عاطفی	۱۶
۱-۲ مقدمه	۱۶
۲-۲ معرفی فرآیند عاطفی	۱۷
۳-۲ ساختار سیستم لیمبیک	۲۴
۴-۲ آمیگدالا	۲۵
۵-۲ اوربیتوفران탈 کورتکس	۲۶
۶-۲ تالاموس	۲۷
۷-۲ قشر احساسی	۲۷
۸-۲ هیپوتالاموس	۲۸
۹-۲ هیپوکمپ	۲۸
۱۰-۲ سایر بخش ها	۲۸
۱۱-۲ جمع بندی	۲۹
فصل ۳	۳۰
مدل ریاضی	۳۰
۱-۳ معرفی (مقدمه)	۳۰
۲-۳ سیستم آمیگدالا - اوربیتوفران탈 کورتکس	۳۰
۳-۳ آمیگدالا	۳۳
۴-۳ اوربیتوفران탈 کورتکس	۳۳
۵-۳ تالاموس	۳۵
۶-۳ اولین تجربه فراگیری	۳۶
۷-۳ دومین تجربه یادگیری	۳۸
فصل ۴	۴۱



۴۱	معرفی دستگاه‌های بکار رفته .....
۴۱	۱-۴ مقدمه .....
۴۲	۱-۴ دستگاه کنترل سطح .....
۴۲	۱-۱-۴ معرفی کلی .....
۴۴	۲-۱-۴ معرفی اجزای سیستم .....
۴۶	۳-۱-۴ نحوه‌ی کنترل .....
۴۶	۴-۱-۴ عملکرد دستگاه کنترل سطح .....
۴۸	۲-۴ دستگاه توپ و صفحه .....
۴۸	۱-۲-۴ مقدمه .....
۴۹	۲-۲-۴ مدل‌سازی .....
۵۱	۳-۲-۴ سنسور موقعیت .....
۵۲	۴-۲-۴ کنترل صفحه .....
۵۳	۵-۲-۴ دینامیک کامل سیستم .....
۵۳	۶-۲-۴ شناسایی پارامترها .....
۵۴	۷-۲-۴ مدل خطی شده‌ی سیستم .....
۵۶	فصل ۵ .....
۵۶	بهبود عملکرد BELBIC .....
۵۶	۱-۵ مقدمه .....
۵۷	۲-۵ شبیه‌سازی بر روی تابع تبدیل خطی .....
۵۸	۳-۵ ساختار داخلی BELBIC .....
۶۱	۴-۵ بررسی سیگنال‌ها و پارامترهای سیستم BELBIC .....
۷۶	۵-۵ پیاده‌سازی BELBIC بر روی دستگاه کنترل سطح .....
۷۸	۶-۵ تحلیل مشکل ناپایداری داخلی و آرایه‌ی راه‌حل .....
۸۰	۷-۵ کاربرد BELBIC بهبود یافته .....
۸۳	۸-۵ تنظیم BELBIC بهبود یافته .....
۸۹	۹-۵ پیاده‌سازی BELBIC بهبود یافته بر سیستم کنترل سطح .....
۹۴	فصل ۶ .....
۹۴	کنترل دستگاه توپ و صفحه .....
۹۴	۱-۶ مقدمه .....
۹۵	۲-۶ شبیه‌سازی بر روی مدل خطی دستگاه توپ و صفحه .....
۹۸	۳-۶ بررسی اثر ضریب آموزش .....
۱۰۲	۴-۶ عملکرد سیستم با ورودی شیب .....
۱۰۴	۵-۶ عملکرد سیستم با ورودی تک پله .....
۱۰۵	۶-۶ عملکرد سیستم با ورودی پله‌های با دامنه‌های متفاوت .....
۱۰۶	۷-۶ عملکرد سیستم با ورودی سینوسی .....
۱۰۸	فصل ۷ .....

۱۰۸.....	نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۱۰۸.....	۱-۷ خلاصه‌ی مطالب
۱۰۹.....	۲-۷ نتیجه‌گیری
۱۱۰.....	۳-۷ رایه‌ی پیشنهاد
۱۱۲.....	منابع
۱۱۸.....	پیوست‌ها



# فصل ۱

## مقدمه

طی سالیان متمادی، روش‌های کلاسیک و متداول کنترل، برای هدایت، راهبری و بدست آوردن عملکرد مطلوب تجهیزات و ابزارهای صنعتی مورد استفاده قرار می‌گرفت و عملکرد مطلوب نیز توسط آن‌ها فراهم می‌آمد. اما طی چند دهه‌ی اخیر انسان به عنوان هوشمندترین موجود روی کره‌ی خاکی با سیستم‌هایی مواجه گردید که از طریق روش‌های متداول امکان درک و تحلیل و کنترل آن‌ها را نداشت. به همین دلیل، مجبور به درک و تحلیل موجودات و سیستم‌های هوشمند شد تا توان کار با چنین موجودات و ابزارهای پیچیده را داشته باشد. از این سیستم‌ها که سرتاسر اطراف ما را فرا گرفته‌اند می‌توان از رفتارهای تعاملی بین حیوانات در یک گله گرفته تا رفتارهای جمعی مورچه‌ها و زنبورها و یا عملکرد یک گیاه در تقابل با دیگر گیاهان و علف‌های هرز موجود، جهت استفاده از منابع خاک را نام برد و یا به دسته‌ای دیگر از سیستم‌ها به صورت عام اشاره کرد که در طی چندین نسل تکامل یافته و یک هدف پیچیده را در طول زمان محقق می‌کنند، همانند تئوری‌های الگوریتم ژنتیک و یا الگوریتم‌های بقای علف هرز در بین گیاهان.

این سیستم‌ها مدت طولانی است که توانسته‌اند با شرایط بسیار متفاوت و متغیر محیطی تعامل کنند و خود را زنده نگه دارند. در طی سالیان اخیر تلاش‌های زیادی برای بدست آوردن مدل‌های ریاضی از چنین سیستم‌هایی صورت گرفته که از جمله نتایج این تلاش‌ها می‌توان به مدل عملکرد تحلیلی مغز (منطق فازی) یا رفتارهای اعصاب مغز موجودات زنده همچون انسان (شبکه عصبی) و ... اشاره نمود.

این سیستم‌ها بدلیل ساختارهای پیچیده‌ی داخلی که دارند دارای این توانایی هستند که عملکرد خود را بر اساس شرایط متغیر محیطی تطبیق دهند؛ می‌توان این قدرت تطبیق را به دو دسته تقسیم نمود؛ اولین دسته آن‌هایی هستند که در طول یک نسل و برای یک موجود و با سرعت نسبتاً زیاد انجام می‌شوند، گروه دوم آن دسته هستند که در طی چندین نسل تکامل می‌یابند. هر یک از این سیستم‌ها برای شرایط و کاربردهای محیطی خاص مفید هستند و در طول مدت زمان طولانی و با یک دید کلی همگی دارای عملکرد مطلوب بوده و در گذر زمان این موضوع را به اثبات نیز رسانده‌اند.

اینگونه سیستم‌ها بدلیل ماهیتی که دارند، توانایی هدایت و یا بهبود عملکرد سیستم مرکزی خود را دارا هستند، و در جهت یادگیری انجام می‌دهند که عملکرد کلی سیستم به سمت تطابق بیشتر با محیط و بدست آوردن نتیجه‌ی بهتر باشد. نقطه‌ی بارز مشترک بین این سیستم‌ها که آن‌ها را از سیستم‌های کلاسیک مجزا می‌کند همین توانایی آن‌ها در یادگیری است. تمامی این سیستم‌ها، هر یک به روش مربوط به خود، به نوعی توانایی یادگیری دارند و خود را با شرایط محیطی تطبیق می‌دهند. برای

یادگیری، روش‌های متنوعی وجود دارد که خود شامل بحثی مفصل است که در حد چنین پروژه‌ی کارشناسی نیست و از حوصله‌ی این بحث و تحقیق خارج است.

یکی از جدیدترین سیستم‌ها که به تازگی مورد توجه محققین قرار گرفته است و برای مدل کردن آن تلاش‌هایی نیز صورت پذیرفته، رفتارهای عاطفی موجودات زنده است. عواطف برای سالیان دراز یک فاکتور منفی برای تصمیم‌گیری صحیح تلقی می‌گردیدند و به همین دلیل با وجود اینکه به اینگونه رفتارها به صورت خاص توسط روانشناسان و فیزیولوژیست‌ها پرداخته شده بود، اما اثر آن در تصمیم‌گیری نفی و یا حتی همانطور که گفته شد یک عامل بازدارنده برای تصمیم‌گیری صحیح فرض می‌گردید. اما طی چند سال اخیر این نوع یادگیری که یادگیری عاطفی مغز نامیده می‌شود مورد توجه قرار گرفته است.

اساس تحلیل این نوع یادگیری شرطی شدن<sup>۱</sup> است که مثال ساده و آشنای آن سگ پاولوف<sup>۲</sup> می‌باشد که به صدای زنگ برای غذا خوردن شرطی شده و پس از مدتی با شنیدن صدای زنگ به تنهایی و بدون وجود غذا، رفتارهای احساسی از خود نشان می‌دهد مشابه آنچه در هنگام دیدن غذا قبل از شرطی شدن از او سر می‌زد.

---

<sup>۱</sup> Conditioning

<sup>۲</sup> Pavlov

تحقیقات جدید نشان می‌دهد که عامل یادگیری عاطفی و رفتارهای عاطفی، نه تنها عامل بازدارنده‌ای برای تصمیم‌گیری صحیح نیستند، بلکه بسیاری از تصمیم‌های سریع موجودات زنده در همین سطح از مغز تولید و صادر می‌گردد و این بخش علاوه بر تولید رفتار، این توانایی را دارد که در هنگام مواجهه با شرایط جدید که دارای مفاهیم ناآشنا برای سیستم است، با استفاده از نشانه‌هایی که از بیرون سیستم دریافت می‌کند و با کمک مفاهیم و نشانه‌هایی که از گذشته در خود دارد، یک مفهوم جدید تولید و رفتار مناسب، متناسب با آن را صادر کند، که این یک مزیت بزرگ این سیستم بر دیگر روش‌های هوشمند است، چرا که اکثر روش‌های هوشمند دارای بازه‌ای محدود از داده‌ها هستند که یادگیری و مفاهیم قابل مواجهه‌شان محدود به آن خواهد بود؛ و محدوده‌ی تطابق آن‌ها با محیط همان بازه‌ای است که طراح برای آن‌ها در نظر می‌گیرد، که این به نوبه‌ی خود از خودکار بودن این سیستم‌ها می‌کاهد.

این سیستم با توجه به توانایی هوشمند بودن، خود به تنهایی، امکان استفاده از آن جهت کنترل کردن را داراست و ضمناً قدرت تطابق بسیار بالای آن، امکان استفاده از آن جهت کاربردهای کنترلی در محیط‌های نوپزی و سیستم‌های دارای اغتشاش را بیشتر می‌کند که احتمال بدست آمدن نتایج عملی کاربردی برای محیط‌های واقعی را بالا می‌برد.

## ۱-۱ تاریخچه

در این فصل سعی داریم تا با مروری بر کارهایی که در گذشته برای رسیدن به شرایط کنونی، انجام شده، علاوه بر درک شرایط فعلی، تا حدودی دریچه‌ای برای آشنایی خواننده به این مبحث، که یکی از جدیدترین زمینه‌ها در حوزه‌ی هوشمند محسوب می‌گردد باز شود.

به تاریخچه‌ی این مبحث از دو دیدگاه نگاه خواهیم نمود، در دیدگاه اول به تاریخچه‌ی تحلیلی شناختی عاطفی می‌پردازیم؛ در این دیدگاه کارهای گذشته را می‌توان در ۳ حوزه تقسیم بندی نمود که در ادامه به شرح زیر مورد بررسی قرار خواهند گرفت:

- کارهایی که به منظور شناخت و درک فیزیولوژیکی و بیولوژیکی انجام پذیرفته است
- کارهایی که در امتداد کارهای فیزیولوژیکی و به منظور بدست آوردن مدل ریاضی - حلقه باز و بسته - صورت گرفته است
- فعالیت‌هایی که در جهت استفاده از مدل‌های ریاضی در کاربردهای عملی انجام گردیده است

در دیدگاه دوم به نوعی به تاریخچه یادگیری پرداخته شده است.



## ۱-۱-۱ دیدگاه تحلیلی - شناختی

### شناخت فیزیولوژیکی

به منظور شناخت و تحلیل رفتارهای موجودات زنده کارهای بسیاری صورت پذیرفته که از مهم‌ترین و اساسی‌ترین آن‌ها می‌توان به تحلیل رفتاری پاولوف [1] که در سال ۱۹۲۷ میلادی منتشر شد، اشاره کرد که یک نقطه‌ی عطف و شروعی برای کارهای تحلیلی در این زمینه محسوب می‌گردد.

پس از کار پاولوف کارهای گسترده‌ای برای تحلیل رفتارشناسی چندین نوع موش، خرگوش‌ها و گونه‌هایی از میمون‌ها و گوریل‌ها خصوصاً در حوزه‌های بویایی و بینایی و درک فضایی صورت گرفت. این تلاش‌ها تا سال‌های انتهای دهه‌ی ۷۰ میلادی ادامه داشته و مقالات بسیاری به منظور تحلیل رفتاری و آسیب‌شناسی موجودات اشاره شده در این حوزه منتشر گردید.

### مدل‌های ریاضی

از سال‌های انتهای دهه‌ی ۷۰ و ابتدای دهه‌ی ۸۰ میلادی با ورود دانشمندان غیر فیزیولوژیست به این حوزه فعالیت‌هایی به منظور بدست آوردن مدلی ریاضی برای تحلیل‌های فیزیولوژیک بدست آمده در سال‌های قبل آغاز گردید. از جمله‌ی بارزترین این کارها می‌توان به فعالیت‌های Rescorla-Wagner [2]، Sutton-Barto [3, 4, 5, 6]، Klopf [7, 8, 9] و در نهایت Balkenius در [10] و کار مشترکش با Moren [11] اشاره کرد، در تمام این کارها سعی شد تا مدل کاملی که توانایی توجیه

تمامی رفتارهای اشاره شده توسط پاولوف در [1] و آزمایش‌های رفتاری متداول را داشته باشند. اما هیچ یک به تنهایی دارای مدلی که بتواند همه‌ی موارد را توجیه کند نبودند تا حدی که Balkenius-Moren در [12] به مقایسه‌ی این روش‌ها و تحلیل نقاط قوت و ضعف و همچنین رفتارهای غیر طبیعی آن‌ها می‌پردازند.

در ادامه این دو نفر که به صورت خاص برای تحلیل دقیق رفتارهای عاطفی فعالیت می‌کنند در [13] یکی از کامل‌ترین مدل‌های موجود تا به حال را ارائه کردند که سعی در تعیین مدلی محاسباتی برای رفتارهای آمیگدالا به عنوان مهم‌ترین بخش سیستم لیمبیک که رفتارهای عاطفی را هدایت می‌کند و همچنین رفتار محاسباتی وابسته به مفاهیم<sup>۱</sup> دارد.

در نهایت Moren طی پایان‌نامه دکتری خود [14] کامل‌ترین مدل موجود در زمان حال را ارائه می‌نماید و تمامی اجزای این سیستم را به دقت تحلیل، بررسی، مدل و پیاده‌سازی می‌نماید. این مدل، علاوه بر شرح و مدل کردن اجزای اصلی سیستم، به بررسی حوادث رخ داده، شکل و تراکم آن‌ها نیز می‌پردازد که باعث ایجاد مفاهیم<sup>۲</sup> می‌گردد و امکان عملکردهای مختلف در محیط‌ها و مفاهیم متفاوت را نیز فراهم می‌آورد.

---

<sup>1</sup> Context Processing

<sup>2</sup> Context

## کاربردهای عملی

بر اساس مدل حلقه باز تحریک شده بر اساس علوم شناختی، برای اولین بار لوکس و شه‌میرزادی کنترل‌کننده‌ی هوشمند مبتنی بر یادگیری عاطفی مغز (BELBIC) را در [15] ارائه کردند تا از مدل ارائه شده توسط Moren به منظور کاربرد کنترلی بهره برده شود. سپس در ادامه‌ی این مسیر استفاده‌های کنترلی از این مدل بیشتر مورد توجه قرار گرفت که از آن جمله می‌توان به از بین بردن نوسانات استاتور [16]، کنترل سرعت یک موتور سنکرون مغناطیس دایم توسط BELBIC در [17] و یا استفاده از BELBIC تکمیل شده برای سیستم گرمایش و سرمایش (HVAC) که یک سیستم چند ورودی، چندخروجی<sup>1</sup> است در [18] اشاره کرد، همچنین در [19] این کنترل‌کننده برای کنترل مدل یک ماشین رختشویی مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر آن در [20] برای کنترل ماشین رختشویی با چندین هدف توسط الگوریتم‌های تکاملی که طراح می‌تواند بین مصرف انرژی و اهداف کنترلی مصالحه کند به کار رفته است. همچنین در [21] این روش کنترل برای سیستم تعلیق اتوماتیک مورد استفاده قرار می‌گیرد و نتایج آن با کنترل‌کننده‌های کلاسیک دیگر مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

---

<sup>1</sup> Multiple Input, Multiple Output (MIMO)

در [22] شرح BELBIC در ساختار الگویی<sup>۱</sup> ارائه شده است. الگو یک مساله را شرح می‌دهد، که به صورت مکرر در محیط اطراف ما اتفاق می‌افتد. سپس هسته‌ی پاسخ برای آن مساله در [23] شرح داده می‌شود.

برای اولین بار، پیاده‌سازی بلادرنگ<sup>۲</sup> BELBIC برای راه‌اندازی یک موتور سنکرون مغناطیس دائم داخلی<sup>۳</sup> در [24] ارائه گردید. ضمناً کنترل‌کننده به صورت موفقیت‌آمیز با استفاده از پردازش‌گر سیگنال دیجیتال<sup>۴</sup> ds1102 برای یک IPMSM آزمایشگاهی ۱hp به صورت بلادرنگ پیاده‌سازی شد. از دیگر پیاده‌سازی‌های عملی BELBIC می‌توان به کنترل یک سرو موتور در [25] اشاره کرد.

## ۱-۱-۲ دیدگاه آموزش

توانایی در یادگیری یکی از اساسی‌ترین نقاط تمایز سیستم‌های هوشمند با سیستم‌های سنتی است [26]. این آموزش به روش‌های مختلف، با ساختارها، پیچیدگی‌ها و سرعت‌های مختلف امکان‌پذیر می‌باشد، اما نکته‌ی مشترک در همه، ایجاد امکان تطبیق پارامترهای سیستم با محیط متغیر در طی فرآیند یادگیری است. علاوه بر این، هر الگوریتم یادگیری نیازمند معیارها و ساختارهایی جهت ارزیابی و تطابق عملکرد سیستم با شرایط محیط است، که یکی از این ساختارهای بر پایه‌ی ارزیابی، راهنمای

<sup>1</sup> Pattern Format

<sup>2</sup> Real Time

<sup>3</sup> Interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM)

<sup>4</sup> Digital Signal Processing (DSP)

عاطفی<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. این روش به ارزیابی اثر ورودی بیرونی بر توانایی سیستم در عملکرد موثر کوتاه مدت و دراز مدت می‌پردازد. استراتژی یادگیری که بر پایه‌ی ارزیابی عاطفی<sup>۲</sup> صورت می‌گیرد، یادگیری عاطفی<sup>۳</sup> نامیده می‌شود. در مغز پستانداران این عمل در بخشی از مغز انجام می‌شود که سیستم لیمبیک<sup>۴</sup> نامیده می‌شود، که یکی از بخش‌های اساسی مغز را تشکیل می‌دهد [27].

در سال‌های اخیر محاسبات هوشمند با محرک بیولوژیکی، برای حل انواع مختلفی از مسائل مورد استفاده قرار گرفته است [29، 30، 31، 32، 33]. محققین در مواجهه با عدم قطعیت‌ها و پیچیدگی‌های مرتبط با شرایط واقعی به طور فزاینده‌ای به محدودیت‌های دیدگاه کلاسیک و توانایی‌های ذاتی غلبه بر این مشکلات توسط دیدگاه هوشمند پی می‌برند [34، 35].

به طور مشابه، با الهام از طبیعت (سیستم‌های بیولوژیکی)، طبیعتاً یک سیستم مصنوعی می‌باید دارای ساختار یادگیری باشد. این موضوع باعث ایجاد مفهوم خودکاری<sup>۵</sup> برای یک سیستم مصنوعی می‌شود که توانایی تطبیق سیستم با شرایط متغیر محیطی را فراهم می‌آورد [14، 36].

به طور خاص تلاش‌های زیادی به منظور ایجاد انعطاف‌پذیری در سیستم‌های کنترل، به تغییر پارامترهای سیستم و اغتشاش‌های محیطی انجام شده، که طراحی‌های عینی آن در سیستم‌های کنترل

---

<sup>1</sup> Emotional Cue

<sup>2</sup> Emotional Evaluation

<sup>3</sup> Emotional Learning

<sup>4</sup> Limbic System

<sup>5</sup> Autonomy

تطبیقی، مقاوم و هوشمند دیده می‌شوند [36, 37, 38, 39]. کنترل یادگیر<sup>۱</sup> شامل تنظیم رفتار کنترل‌کننده جهت بهبود کیفیت کنترل<sup>۲</sup> می‌باشد؛ که با پارامترهایی مشخص<sup>۳</sup> سنجیده می‌شوند. در صورتی که عمل کنترلی که کیفیت عملکرد سیستم را بهبود می‌دهد شناخته شده باشد، روش یادگیری نظارتی<sup>۴</sup> یا روش یادگیری از طریق نمونه‌ها می‌تواند جهت آموزش کنترل‌کننده مورد استفاده قرار گیرد. هرچند، در بسیاری از اعمال کنترلی، دستیابی به اطلاعات آموزش به شکل انجام عمل کنترلی از قبل تعیین شده بسیار مشکل است، که در این شرایط امکان استفاده مستقیم از روش یادگیری نظارتی وجود ندارد [40].

روش‌های سنتی یادگیری همگی بر شکلی از سیگنال مددکار<sup>۵</sup> مبتنی هستند که از بیرون محدوده‌ی سیستم تولید می‌شوند. حتی در روش یادگیری مددکارانه<sup>۶</sup>، که در آن سیگنال مددکار در داخل سیستم ساخته می‌شود، این سیگنال به طور مستقیم به یک مددکار در بیرون سیستم متصل است. در این حالت، به طور معمول می‌توان مساله را به یک مساله‌ی تخصیص اعتبار<sup>۷</sup> ساده کرد، که مددکار مستقیماً به بخش مشخصی از عمل سیستم در هر لحظه متصل است [41, 42].

---

<sup>1</sup> Learning Control

<sup>2</sup> Control Performance

<sup>3</sup> Index of Performance (IP)

<sup>4</sup> Supervised Learning Method

<sup>5</sup> Reinforcement Signal

<sup>6</sup> Reinforcement Learning Method

<sup>7</sup> Credit Assignment

در مسائل واقعی زندگی، مساله بسیار پیچیده‌تر است. حل مساله با تخصیص اعتبار نیز نیازمند یک عامل خارجی جهت تعیین اعتبار می‌باشد، در حالیکه در سطوح بالاتر خودکار بودن این عمل می‌باید در محدوده‌ی خود سیستم اتفاق بیفتد. بنابر این، نقطه نظر جدید این است که هوشمندی از بیرون به سیستم داده نشده و در طول فرآیند یادگیری توسط خود سیستم جمع‌آوری گردد [40, 41, 42].

یک نسخه‌ی یادگیری مددکارانه که بیشتر بر پایه‌ی علوم شناختی بنا شده، به گونه‌ای گسترش یافته که یک نقاد به طور دائم پی‌آمد عمل بر دستگاه را با توجه به عمل کنترلی در هر شرایط و با توجه به اهداف کلی یا کیفیت عملکرد، اندازه‌گیری کرده و یک راهنمای قیاسی مددکار<sup>1</sup> تولید می‌کند؛ که فرآیند یادگیری بلوک کنترل‌کننده را هدایت می‌کند. این نسخه شناختی از سیگنال مددکار، که با نام راهنمای عاطفی نشان داده می‌شود، در حقیقت عملکرد احساسات (عواطف) همچون استرس و ... برای تشخیص شرایط محیطی با توجه به اهداف و کاربردپذیری و برای فراهم آوردن تنظیم مکانیزم انتخاب عمل راهنما است [40, 43].

اگر چه کنترل عاطفی یا انحصاراً نسخه‌ی پیوسته یادگیری مددکارانه با نقاد (کنترل با ارزیاب) نامیده شده، این روش به صورت فزاینده‌ای توسط مهندسين کنترل، طراحان روبات و گسترش دهندگان تصمیمات حمایتی سیستم، مورد استفاده قرار گرفته است [44, 45, 46, 47].

---

<sup>1</sup> Analog Reinforcement Cue

## ۲-۱ اهداف

در این مطالعه با وجوه مختلفی از مدل کردن و استفاده در پیاده‌سازی فرآیند یادگیری سیستم لیمبیک مغز و چالش‌هایی برای کاربرد مهندسی آن مواجه هستیم. که در این پایان‌نامه به بررسی بخش‌های اساسی زیر از بین آن‌ها خواهیم پرداخت:

- شبیه‌سازی ساختارهای موجود بر مدل چند دستگاه
- پیاده‌سازی مدل‌های موجود بر دستگاه‌های واقعی
- یافتن و تحلیل مشکل موجود در مدل‌های فعلی
- ارائه راه‌حل برای رفع مشکل
- شبیه‌سازی و پیاده‌سازی مدل تکمیل شده
- پیاده‌سازی مدل‌های طراحی شده و شبیه‌سازی شده بر روی دستگاه‌های واقعی
- بررسی کیفیت کنترل این سیستم

## ۳-۱ آنچه در این پایان‌نامه به آن پرداخته شده است

این پایان‌نامه در ۷ بخش با موضوعات معرفی، آشنایی با سیستم عاطفی، مدل ریاضی سیستم Limbic، معرفی دستگاه‌ها، کنترل دستگاه کنترل سطح و بهبود عملکرد BELBIC، کنترل دستگاه توپ و صفحه و در نهایت جمع بندی نوشته شده است.



در فصل دوم برای درک ساختار و عملکرد سیستم لیمبیک مغز مفاهیم اساسی بررسی شده در گذشته مرور خواهند شد. این ساختار از دیدگاهی مورد بررسی قرار می‌گیرد که فرآیند عملکرد عاطفی تحلیل شده و قابل توجیه باشد. بخش‌های اساسی سیستم لیمبیک که شامل چهار بخش آمیگدالا، اوربیتوفران‌تال کورتکس، سنسوری کورتکس و تلاموس هستند شرح داده می‌شوند و عملکرد هر یک از این چهار بخش ارایه خواهد شد.

در فصل سوم یک مدل محاسباتی بر پایه‌ی شرح عملکردی که از سیستم در فصل دوم ارائه شد آورده شده است و سعی بر آن خواهد بود تا این مدل توانایی توجیه تمامی عملکردهای سیستم لیمبیک، به منظور کاربردهای مهندسی، خصوصاً مهندسی کنترل را دارا باشد.

برای این مدل، در ابتدا یک مدل محاسباتی برای تک‌تک اجزای سیستم لیمبیک بیان خواهیم نمود؛ سپس مدل کلی ارائه شده بیان و توسط مدل، شبیه‌سازی‌هایی توسط نرم‌افزار Simulink از MATLAB<sup>1</sup> صورت خواهد گرفت. در ادامه یک‌سری آزمایش بررسی اعتبار مدل صورت خواهد پذیرفت تا عملکرد صحیح و دقت مدل مطالعه گردد.

در فصل چهارم به بررسی دستگاه‌هایی که برای بررسی عملکرد BELBIC قرار است تست‌هایی بر روی آن‌ها صورت پذیرد می‌پردازیم، تا آشنایی اولیه و کلی نسبت به آن‌ها حاصل گردد. دستگاه‌هایی که

---

<sup>1</sup> در تمامی مراحل کار از نسخه‌ی MATLAB 2007a و بخش‌های دیگر مرتبط با آن استفاده شده است.

مورد بررسی قرار می‌گیرند، دستگاه توپ و صفحه‌ی CE 151 ساخت شرکت HUMUSOFT و دستگاه کنترل سطح RT 512 ساخت شرکت GUNT هستند.

در فصل پنجم مدل بدست آمده در فصل سوم برای شبیه‌سازی بر روی یک دستگاه واقعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. پس از تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده، از آن برای کنترل دستگاه واقعی بهره می‌بریم. در ادامه، مشکل موجود در پیاده‌سازی بر روی دستگاه و علت بوجود آورنده‌ی آن مورد بررسی قرار گرفته و برای رفع آن راه‌حل ارائه می‌گردد. در پایان راه‌حل موجود بر روی دستگاه کنترل سطح به عنوان نمونه، بررسی و نتایج بدست آمده تحلیل می‌گردند.

در فصل ششم از مدل بهبود یافته‌ی بدست آمده در فصل پنجم برای کنترل دستگاه توپ و صفحه استفاده می‌گردد. در این بخش رفتار سیستم شبیه‌سازی شده و BELBIC بهبود یافته برای کار بر روی مدل خطی‌سازی شده تنظیم می‌گردد و نتایج برای عملکرد ردیابی تک پله و پالس‌های متعدد و با نقاط کار مختلف بدست می‌آیند. ضمناً در این فصل تا حدودی به بررسی اثر ضریب آموزش در عملکرد سیستم پرداخته شده است.

در نهایت در فصل انتهایی پس از ارائه‌ی خلاصه‌ای از مطالب ارائه شده در این تحقیق، به جمع بندی مطالب می‌پردازیم. سپس آخرین بخش، ارائه‌ی پیشنهاداتی برای کارهای بعدی در این حوزه خواهد بود.

## فصل ۲

### آشنایی با سیستم عاطفی

#### ۱-۲ مقدمه

مطالعه‌ی پیش رو نه تنها نیازمند پیش‌زمینه‌ی کنترلی است بلکه نیازمند دانش پایه‌ای سیستم‌های بیوساخت‌شناختی<sup>۱</sup> نیز می‌باشد. بنابر این، این بخش سعی دارد تا خواننده را با برخی مفاهیم اولیه این سیستم‌های بیوساخت‌شناختی که در این مطالعه مورد استفاده قرار می‌گیرند آشنا کند.

در حقیقت، مهم‌ترین حساسیت بر مطالعه‌ی سیستم‌های بیولوژیکی دخیل در فرآیند عاطفی است. همانطور که قبلاً اشاره شد، بخشی از مغز پستانداران که سیستم لیمبیک نامیده می‌شود مسئولیت این هدف را بر عهده دارد. به همین دلیل فرآیند عاطفی در حالت کلی و سیستم لیمبیک به طور خاص در این فصل و فصل بعدی مورد مطالعه قرار خواهند گرفت.

ضمناً چون این موضوع برای اولین بار به صورت فارسی و در این دانشکده در حال ارایه می‌باشد، سعی گردیده تا توضیحات به صورت کامل از منابع منتقل گردد تا امکان استفاده در کارهای بعدی فراهم آید و خوانندگان و محققان آتی از این منظر مدخلی مناسب برای ورود به این بحث در اختیار داشته باشند.

---

<sup>1</sup> Biomorphic

## ۲-۲ معرفی فرآیند عاطفی<sup>۱</sup>

به طور مستدل و قابل دفاع، در موجودات زنده پیچیده، حیاتی‌ترین فاکتور برای زنده ماندن یادگیری است [48]. مطمئناً، تمامی موجودات توانایی تعامل با محیط اطرافشان را دارا هستند، اما موجودات پیچیده عموماً دارای توانایی اضافی برای یادگیری و تطابق با محیطشان می‌باشند. در حقیقت ما بین تطابق طی یک فرآیند توسط چند نسل و یادگیری در یک نسل، در پاسخ به شرایط و ورودی‌های محیطی، تفاوت قایل هستیم. این حقیقت از دو نقطه نظر خاص قابل بررسی است:

- هر قدر هم که یک موجود باهوش باشد تا در یک زمان مشخص با محیطش ارتباط هوشمندانه داشته باشد، باز هم نیازمند برخی توانایی‌های یادگیری است. علت این موضوع نیز تغییر دائمی محیط است. با وجود تغییر در محیط، موجود باید دارای مکانیزم‌های تطبیق و یادگیری با محیط باشد تا بتواند کیفیت عملکرد خود را ثابت نگه دارد
- دلیل دیگر این است که بعضی تطابق‌ها هستند که حیوان باید در مدت زمان کوتاه‌تری نسبت به یک نسل آن‌ها را یاد بگیرد

از طرف دیگر، سیستم یادگیری باید توانایی ارزیابی شرایط محیطی فعلی را دارا باشد. این به سیستم کمک می‌کند تا جهت یادگیری را بررسی کند تا به سمت نیل به اهداف سیستم باشد.

---

<sup>1</sup> Emotional Process

با توجه به این دیدگاه، مجموعه می‌باید کیفیت عملکرد را با توجه به بعضی معیارهای داخلی و خارجی ارزیابی کرده و عملکرد را با توجه به آن‌ها بهبود دهد [8، 49، 50]. این تداوم تجربیات کمک می‌کند تا ساختار بین شرایط محیطی، عملی که انجام می‌پذیرد و تبعات و نتایج عمل جهت برآوردن معیارها، ارتباط برقرار کند. ترتیب رشد ارتباطات و قطع ارتباطات توانایی یادگیری را فراهم می‌آورد، که مجموعه از طریق آن کیفیت عملکرد خود را بهبود می‌بخشد و در حقیقت به رفتار تطبیقی بهتری در طول زمان دست می‌یابد.

در این شکل ارتباط، راهنماهای داخلی که توسط خود ساختار تولید می‌شوند، اکثراً نقشی مهم‌تر از نشانه‌های خارجی دارند، که عموماً این ناشی از ذات مستقل ساختارهای پیچیده است. از این دیدگاه، حالت داخلی سیستم - هم عاطفی و هم شناختی - نقش اساسی در یادگیری ایفا می‌کنند.

هرچند اهمیت عواطف در انسان در فعالیت‌های شناختی - دانشی<sup>1</sup> قبل‌تر توسط فیزیولوژیست‌ها به صورت مکتوب ثبت شده بود، عامل عاطفی به طور تاریخی یک عامل منفی در نظر گرفته می‌شد که مانع تصمیم‌گیری صحیح سیستم می‌شود [51، 52]. اما بعدها برعکس، این آشکار گردید که نه تنها عاطفه یک ویژگی منفی نیست، بلکه یک نیروی مفید و موثر حیاتی برای رفتار هوشمندانه در سیستم‌های طبیعی می‌باشد [43، 53].

---

<sup>1</sup> Cognitive Science Researches

بودن عواطف باعث ایجاد مزایای تکاملی بسیاری است؛ هرچند در تمامی حیوانات وجود ندارد [14].

حال این مساله مطرح می‌گردد که داشتن عاطفه چه مزیتی برای آن موجود دارد؟ "به صورت ساده می‌توان گفت عواطف اطلاعات را برای حیوان کد می‌کند تا بداند چه چیزهایی را دوست دارد (پس بنابراین با آن‌ها تعامل برقرار کند)، و به چه چیزهایی تمایل ندارد (پس از آن‌ها دوری کند)." [14].

تمامی حیوانات دارای یک‌سری رفتارهای فطری هستند، مثل اینکه چه چیزهایی غذایشان محسوب می‌شود، چه حیوانی ممکن است آن‌ها را شکار کند و یا اینکه کدامیک از هم‌نوعان می‌تواند یک جفت مناسب برای آن‌ها باشد، و اینکه در برابر هر یک از شرایط و موجودات دیگر چه رفتاری مناسب است تا از خود نشان دهند. اما این ارتباط ساده میان ورودی و عکس‌العمل به تنهایی برای رفع تمامی مشکلات حیوانات کافی نیست؛ برای نمونه به طور فطری ماهی‌ها می‌دانند که باید از ماهی‌های بزرگ و سریع فرار کنند و این به آن‌ها کمک می‌کند تا از شر کوسه‌ها در امان باشند، اما ماهی‌های تن<sup>۱</sup> هم دارای جثه‌ی بزرگ و سرعت زیاد هستند، هر چند خطر بالقوه‌ای برای ماهی‌های کوچک محسوب نمی‌شوند، به این ترتیب برای اینکه حیوانات بتوانند هم در برابر مشکلات درست عمل کنند و هم یک خطر را که وجود ندارد اشتباهاً خطر محسوب نکنند و در برابر مسائل و موجودات دیگر به صورت بهینه عمل کنند، نیازمند چیزی غیر از رفتارهای فطری هستند.

---

<sup>1</sup> Tuna fish

یک راه‌حل که ممکن است کارساز باشد تکامل است، اما نکته‌ای که مطرح است این است که برخی از مخاطرات برای حیوان همزمان با تکامل خودش تکامل می‌یابند و از روش‌های استتار و فریب جدیدتری بهره می‌برند و ضمناً برخی از خطرات نیز گذرا هستند و امکان تکامل برای مقابله با آن‌ها در گذر زمان وجود ندارد.

بنابر این نیاز به یادگیری اجتناب ناپذیر خواهد بود، توسط یادگیری، حیوان می‌تواند در کسری از ثانیه خود را با محیط اطرافش تطبیق دهد و ضمناً امکان فراموش کردن چیزهای یاد گرفته شده نیز با همان سرعت امکان‌پذیر است و این به حیوان این امکان را می‌دهد تا خود را با شرایط گذرای محیطی و موقعیت‌های خاص نیز وفق دهد.

برای یادگیری نیازمند ارزیابی هستیم تا سیستم یادگیری بر اساس شرایط محیطی و عکس‌العمل سیستم و اثر باقیمانده از یادگیری‌های قبلی، رفتار صحیح مورد نیاز برای یادگیری فعلی را تعیین نماید و تعیین کند که رفتار یاد گرفته شده مفید بوده است یا خیر. برخی از این ارزیابی‌ها به صورت درونی و ذاتی در حیوانات موجود هستند، مثلاً اینکه غذا و جفت خوب هستند و درد و بیماری بد؛ اکثر حیوانات دارای یک رشته‌ی نسبتاً وسیع از چنین ارزیابی‌های فطری هستند که آن‌ها را در طول دوره‌ی زندگی کمک می‌نماید تا رفتارهای صحیح از خود نشان دهند.

در این مرحله با یک مشکل جدید روبرو هستیم، با اینکه بر اساس معیار ارزیابی درونی، حیوان یادگیری خواهد داشت، اما خود معیارهای درونی نیز در طول زمان نیازمند اصلاح و تکمیل هستند، پس ما نیازمند یادگیری جدیدی هستیم که در طول دوره‌ی زندگی حیوان رفتارهای صحیح را به او یاد بدهد. در اینجا است که اهمیت پاسخ‌های عاطفی شرطی شده از دنیای بیرون در گذشته، ارزش خود را نشان می‌دهد. این سیستم دارای این توانایی است که در صورت نیاز با ارتباط دادن عوامل محیطی با داشته‌های درونی، یک مفهوم عاطفی جدید را ایجاد می‌کند، ضمناً این یادگیری می‌تواند در سطوح مختلفی اتفاق بیفتد و یا مساله‌ی یادگرفته شده تنها برای شرایط خاص یا زمانی خاص و یا مشروط به زمان خاص از روز و یا حتی مشروط به ورودی دیگری باشد.

در سیستم‌های مصنوعی ساخته‌ی دست بشر هیچ‌گونه گسترش ارزیابی وجود ندارد، پس سیستم از ابتدا طراحی می‌گردد و تنها مورد استفاده قرار می‌گیرد و تمامی قدرتهای تطبیق با محیط در اینگونه ساخته‌ها می‌باید از ابتدا به شکل واضح و روشن در طراحی سیستم در نظر گرفته شده و در آن جای داده شوند تا در هنگام نیاز به تطابق، از آنها استفاده گردد.

در این بخش برای درک مزیت سیستم‌های عاطفی نیازمند شرح و درک مفهوم خودکاری<sup>۱</sup> هستیم، و اینکه هر موجود یا سیستم دارای چه سطح از خودکاری است. برای درک بهتر این مساله نیازمند دو

---

<sup>1</sup> Autonomous



مفهوم نیازها<sup>۱</sup> و اهداف<sup>۲</sup> در یک سیستم هستیم. " به طور ساده می‌توان خودکاری سیستم را توانایی آن در تولید اهداف سیستم به طور درونی، بر اساس نیازهای سیستم تعریف نمود " [14]. هر چند ممکن است تفاوت بین اهداف و نیازها بسیار کوچک به نظر برسد اما بین این دو، در این دیدگاه تفاوت‌های اساسی وجود دارد، هر چند اهداف، به صورت عملکرد خاص هستند ولی نیازها کوچک‌ترین مجموعه از خواسته‌های عینی سیستم برای موفق زنده ماندن در محیط است. " برای مثال، بین " درخواست برای پیدا کردن غذا/ و "گرسنه بودن" تفاوت فاحش وجود دارد. " [14]

هنگامی که اهداف مشخص شوند سیستم این توانایی را خواهد داشت تا از بین عملکردهای ممکن از پیش تعیین شده، بر اساس اهداف یکی را انتخاب کند. اما اثری که هر یک از این عملکردها بر نتیجه و کیفیت خروجی دارند - و توسط طراح و یا تجربیات قبلی در سیستم موجود هستند - نیز در انتخاب مد نظر قرار می‌گیرد. مشکل دیگر استفاده از مفهوم اهداف این است که، با اینکه سیستم این توانایی را دارد که زیرهدف تعیین کند، اما امکان ساختن یک هدف جدید را دارا نیست، پس طراح مجبور است اهداف را خود تعیین نماید و این موضوع به معنی از دست دادن بخشی از خودکار بودن سیستم است. به همین دلیل ما این امکان را از سیستم نمی‌گیریم و به سیستم اجازه می‌دهیم تا از طریق خواسته‌هایی که در هر شرایط پیش می‌آیند اهداف مناسب را خود تعیین نماید، و با این کار ماکزیمم

---

<sup>1</sup> Needs

<sup>2</sup> Goals

مقدار انعطاف را به سیستم می‌دهیم. عملکرد این روش به این صورت است که نیازها با یک معیار احساسی ارزیابی می‌شوند تا یک مقصود تعیین گردد، که متعاقباً انتخاب عمل را در پی خواهد داشت، اما از آنجا که نیازها بسیار مختصر و جمع‌بندی شده هستند، طراح مجبور است به منظور بدست آوردن خودکاری بیشتر، بخشی از کنترل خود بر روی سیستم را از دست بدهد.

یکی از عملکردهای اولیه‌ی عاطفه، ارزیابی ورودی است. هر گاه یک ورودی محیطی که با یک ورودی عاطفی در گذشته مرتبط شده است، اتفاق می‌افتد، سیستم عاطفی این ورودی را به همان محتوای عاطفی یا چیزی شبیه به آن مرتبط می‌کند.

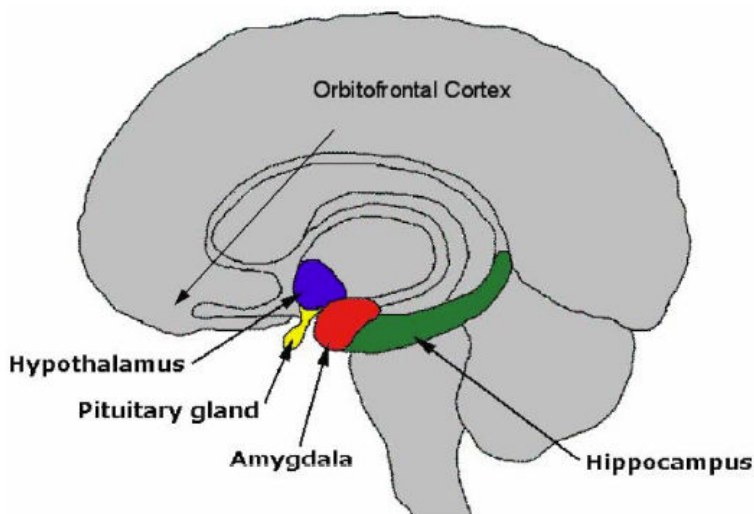
عملکرد دوم سیستم عاطفی تمرکز سیستم بر روی سیگنال‌هایی است که بیشترین کمک را برای رسیدن به اهداف سیستم می‌کنند. بجای صرف منابع بر روی تمامی داده‌های ورودی - که حجم زیادی هم دارند- ارزیابی عاطفی می‌تواند کمک کند تا تمرکز بر روی ورودی‌هایی که می‌توانند در تولید عملکرد صحیح، بیشتر موثر باشند ایجاد شود.

در حوزه‌ی تحقیقات علوم شناختی- دانشی عواطف و سیگنال‌های ناشی از آن، به سیگنال‌های مثبت تا سیگنال‌های منفی دسته‌بندی می‌شوند. عواطف مثبت چیزهای خوشایند جایزه مانند را نشان می‌دهند، برای مثال امید، و در مقابل آن‌هایی هستند که به مثابه‌ی تنبیه تلقی می‌گردند همچون ترس [54]، [55]. در این مطالعه، ما بین سیگنال‌های عاطفی از این دیدگاه تمایزی قایل نمی‌شویم؛ چرا که ما

بدنبال تحقق یک مدل محاسباتی هستیم و مثبت یا منفی بودن سیگنال به طور خودکار در خروجی مدل اعمال می‌شود.

## ۲-۳ ساختار سیستم لیمبیک

در پستانداران، فرآیند عاطفی در بخشی از مغز به نام سیستم لیمبیک صورت می‌پذیرد که از بخش‌های متنوع روی هم قرار گرفته در Cerebral Cortex مغز تشکیل شده است. شکل (۱-۲) یک نمای کلی از بخش‌های اساسی سیستم لیمبیک را نمایش می‌دهد.



شکل (۱-۲) : نمایی از بخش‌های اصلی سیستم لیمبیک [26]

بخش‌های اساسی سیستم لیمبیک که در فرآیند عاطفی موثر هستند: آمیگدالا<sup>۱</sup>، اوربیتوفران‌تال کورتکس<sup>۲</sup>، تالاموس<sup>۱</sup>، سنسوری کورتکس<sup>۲</sup>، هیپوتالاموس<sup>۳</sup>، هیپوکمپ<sup>۴</sup> و ... می‌باشند. در

<sup>۱</sup> Amygdala

<sup>۲</sup> Orbitofrontal Cortex

این بخش، ما سعی خواهیم نمود تا در این قسمت بر عملکرد این بخش‌ها و وظایف هر یک مرور مختصری داشته باشیم.

## ۲-۴ آمیگدالا

بخش موثر اولیه‌ی شرطی شدن سیستم در آمیگدالا صورت می‌گیرد. آمیگدالا یک بخش بادامی شکل زیر قشری است و به شکلی قرار گرفته است که با قشرهای احساسی<sup>۵</sup> و بخش‌های دیگر سیستم لیمبیک در ارتباط باشد [14]. شکل (۲-۲) ارتباط آمیگدالا را با دیگر بخش‌ها به نمایش می‌گذارد. ضمناً این باور وجود دارد که ارتباط بین ورودی و نتیجه‌ی عملیات عاطفی نیز در آمیگدالا صورت می‌پذیرد [56, 57]. در این بخش به ورودی‌های بسیار تحلیل شده در قشر داده‌ای و داده‌های طبقه‌بندی شده در تالاموس مقادیر عاطفی<sup>۶</sup> داده می‌شود. عملاً نقش اساسی آمیگدالا تخصیص مقدار عاطفی به هر ورودی است که هر کدام از این ورودی‌ها با یک سیگنال مددکار اولیه<sup>۷</sup> جفت شده است و همزمان به سیستم وارد می‌شوند.

<sup>1</sup> Thalamus

<sup>2</sup> Sensory Cortex

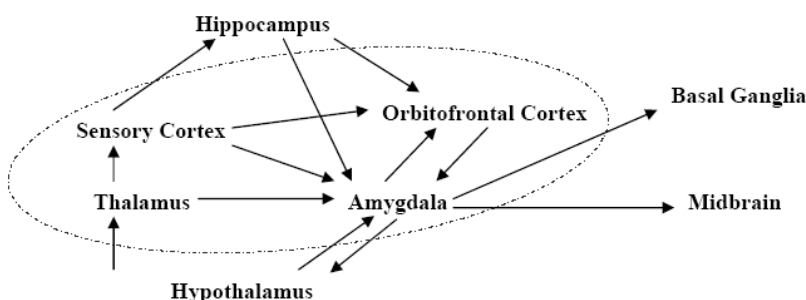
<sup>3</sup> Hypothalamus

<sup>4</sup> Hippocampus

<sup>5</sup> Sensory Cortices

<sup>6</sup> Emotional Value

<sup>7</sup> Primary Reinforcement Signal



شکل (۲-۲): ساختار ارتباط آمیگدالا با دیگر بخش‌های سیستم لیمبیک [26]

## ۲-۵ اوربیتوفران‌تال کورتکس

بخش دیگری از سیستم که به صورت تنگاتنگ با آمیگدالا در ارتباط است، اوربیتوفران‌تال کورتکس می‌باشد. در حالت عادی این بخش، ۳ عملکرد مرتبط با هم را انجام می‌دهد، که حافظه‌ی کاری<sup>۱</sup>، دسته‌های آماده‌سازی<sup>۲</sup> و کنترل بازدارندگی<sup>۳</sup> هستند [58]. دیدگاه به حافظه‌ی کاری از نمایش اتفاقات و اعمال فعلی بدست می‌آید، دقیقاً به همان خوبی که اتفاقی در گذشته افتاده باشد. دسته‌های آماده‌سازی برای آماده کردن دیگر بخش‌ها برای آمادگی در برابر اعمالی است که اتفاق خواهند افتاد. کنترل بازدارندگی، یک سیستم نگهدارنده‌ی انتخابی برای مواقع نامناسب در شرایط جاری سیستم است. به صورت خاص‌تر، اوربیتوفران‌تال کورتکس برای اعمال اثر پاداش یا تنبیه در نظر گرفته شده برای سیستم عمل می‌کند و فرآیند تحریک یادگیری را در آمیگدالا کنترل می‌کند [59].

<sup>1</sup> Working Memory

<sup>2</sup> Preparatory Set

<sup>3</sup> Inhibitory Control

## ۲-۶ تالاموس

تالاموس دارای ساختاری غیر همگن است و در قشر زیرین و در کنار بصل النخاع<sup>۱</sup> قرار گرفته است. وظیفه‌ی اساسی آن ایفای نقش یک ایستگاه بین راهی بین بخش‌های زیر قشری و قشری است. بیشتر داده‌های احساس شده توسط بخش‌های احساسی خارجی توسط بخش‌های مختلف تالاموس به قشرهای احساسی منتقل می‌شوند [60]. به طور خاص‌تر، اعتقاد بر این است که ورودی‌های حسی تالاموس که به آمیگدالا می‌روند همچون سیگنال‌های عادی به صورت ذاتی واسطه‌گری می‌شوند [61]، سیگنالی که از تالاموس به آمیگدالا می‌رود از فرآیندی که در قشر احساسی و بخش‌های دیگر اتفاق می‌افتد عبور نمی‌کند. (آن فرآیندها بر این سیگنال اعمال نمی‌شوند.) در واقع تالاموس یک سیگنال غیر بهینه اما سریع برای آمیگدالا فراهم می‌آورد که در اکثر اوقات این سیگنال یک سیگنال خاص مشخص در بین داده‌های ورودی است [60].

## ۲-۷ قشر احساسی<sup>۲</sup>

قشر احساسی یک بخش در کنار تالاموس است که ورودی‌هایش را از آن می‌گیرد. در حقیقت، اطلاعات بخش‌های حسی به‌طور وسیع در قشر احساسی تحلیل می‌شوند. آمیگدالا و اوربیتوفرانتال کورتکس داده‌های آنالیز شده را از قشر احساسی دریافت می‌کنند [56، 59، 62]. به طور عمومی، این بخش‌ها

<sup>1</sup> Basal Ganglia

<sup>2</sup> Sensory Cortex

مسئول انجام تحلیل‌های ادراکی پیشرفته در پستانداران هستند، هر چند عملکرد واقعی و دقیق آن‌ها هنوز یک حوزه‌ی باز تحقیقاتی محسوب می‌شود و در این حوزه نتایج قطعی موجود نیست.

## ۸-۲ هیپوتالاموس

هیپوتالاموس در زیر تالاموس واقع شده و اعتقاد بر آن است که با بیشتر عملکردهای سیستم غدد درون‌ریز، سیستم خودکار اعصاب و رفتارهای زنده نگهدارنده بدن در ارتباط است [63]. بین بخش‌های مختلفی از آمیگدالا و بخش‌های عقبی هیپوتالاموس ارتباط وجود دارد و همین‌طور با بخش‌های دیگر که به نظر می‌رسد در کنترل انگیزشی بخش‌های مرتبط با هیپوتالاموس درگیر باشند [64].

## ۹-۲ هیپوکمپ

هیپوکمپ یک ساختار پیچیده‌ی پیچ و تاب دار است که در محلی زیرقشری شبیه به آمیگدالا واقع شده است. اعتقاد بر این است که هیپوکمپ مسئول ایجاد نگاشت راهنمای محیطی از روی محیط واقعی است. هیپوکمپ در عملکردهای مختلفی نقش دارد، از جمله: تجسم و مسیریابی فضایی، ایجاد حافظه‌ی دراز مدت و ایجاد نمایش و آرایه‌ی مستدل به قراین و شواهد [65].

## ۱۰-۲ سایر بخش‌ها

علاوه بر بخش‌هایی که مورد بررسی قرار گرفتند، بخش‌های دیگری نیز در سیستم لیمبیک وجود دارند، برای مثال، بخش‌هایی همچون Basal Ganglia، Globus Pallidus، Substantia Nigra،

Periamygdaloid Cortex و Subthalamic Nucleus که هر یک در سیستم نقشی ایفا

می‌کنند. از آنجا که هدف این مطالعه بررسی جزئیات بیولوژیکی سیستم لیمبیک نیست، از شرح جزئی

و دقیق این بخش‌ها صرف نظر می‌گردد.

## ۲-۱۱ جمع‌بندی

در این بخش یک شروع برای تحقیق و پاسخ به اینکه چرا به یک سیستم خودکار نیاز داریم ارائه شد.

در این فصل تئوری یادگیری و اهمیت قدرت تطابق این مکانیزم یادگیری برای تطابق با محیط جهت

زنده ماندن مرور گردید. سپس این موضوع شرح داده شد که هر فرآیند یادگیری نیازمند مکانیزم

ارزیابی است تا شرایط سیستم را بر اساس معیارهای کیفیت تشخیص دهد. در حقیقت، سیستم مکانیزم

ارزیابی را برای ایجاد ارتباط بین گروه‌های زوج مرتبی شرایط - عملکرد مختلف مورد استفاده قرار

می‌دهد.

سپس، با همان روش، ارزیابی و یادگیری عاطفی که پایه‌ای برای تصمیم‌گیری عاطفی در پستانداران

است معرفی گردید. در پستانداران، سیستمی که مسئول انجام محاسبات عاطفی است بخشی از مغز

است که سیستم لیمبیک نامیده می‌شود. سیستم لیمبیک و مکانیزم آن که در فرآیند عاطفی موثر

هستند در ادامه بیشتر شرح داده خواهند شد.

در نهایت، بخش‌های اساسی سیستم لیمبیک شمرده شد و وظیفه‌ی هر یک مختصراً اشاره گردید.



## فصل ۳

### مدل ریاضی

#### ۱-۲ معرفی (مقدمه)

در این فصل، می‌خواهیم یک مدل ریاضی از سیستم Limbic که در فصل قبل به صورت فیزیولوژیک مورد بررسی قرار گرفت را مرور نماییم. تاکید این بخش بر روی کاربرد مدل در سیستم‌های مهندسی، به خصوص سیستم‌های کنترل می‌باشد و بر روی مفاهیم بیولوژیکی تاکید ندارد. مدل اشاره شده مدل کاملی نیست که شامل تمام مولفه‌های سیستم Limbic باشد. در این مدل سعی شده تا مهم‌ترین خصوصیات سیستم Limbic مورد توجه قرار گیرند تا از پیچیدگی بیش از حد مدل اجتناب گردد.

#### ۲-۳ سیستم آمیگدالا – اوربیتوفرانتال کورتکس

قسمت‌های اساسی سیستم عاطفی که در مدل مورد توجه قرار گرفته‌اند، شامل آمیگدالا، اوربیتوفرانتال کورتکس، سنسوری کورتکس و تالاموس می‌باشند. این قسمت‌ها و تعامل آن‌ها با دیگر عناصر سیستم Limbic در شکل (۲-۲) آورده شده است. علاوه بر این، مولفه‌های ذکر شده و به ویژه دو مورد اول که

نقش کلیدی در فرآیندهای احساسی دارند قسمت‌های دیگری نیز وجود دارند که در مدل کردن ریاضی برای کاربردهای کنترلی از آنها صرف‌نظر شده است.

آمیگدالا بخشی از مغز است که مسئولیت پردازش‌های عاطفی را بر عهده دارد و با لایه حسی، غده تالاموس و قشر اوربیتوفران‌تال در ارتباط است.

وظیفه‌ی تالاموس تهیه‌ی یک پاسخ سریع به محرک می‌باشد که ممکن است بهینه نباشد. این قابلیت اکثراً با فرستادن سیگنال دارای بیشترین ارزش از همه سیگنال‌های ورودی به آمیگدالا، ایجاد می‌گردد. وظیفه‌ی اصلی سنسوری کورتکس در سیستم‌های بیولوژیکی تقسیم صحیح و بهینه‌ی سیگنال‌های احساسی ورودی به آمیگدالا و اوربیتوفران‌تال می‌باشد که در این بخش به عنوان تاخیر محاسباتی مدل گردیده است.

ایده اساسی تصمیم‌گیری بر اساس یادگیری عاطفی می‌باشد و خروجی را تولید می‌کند. ورودی‌های احساسی دریافت شده بوسیله‌ی سیستم نشان می‌دهد که در این موقعیت سیستم در حال کسب تجربه است و سیگنال‌های احساسی منعکس کننده‌ی میزان رضایت از عملکرد سیستم هستند.

بر اساس این مکانیزم‌ها، شکل (۱-۳) شماتیک مدل الگوریتم یادگیری احساسی مغز را نشان می‌دهد. مهمترین یادگیری این سیستم بین آمیگدالا و اوربیتوفران‌تال اتفاق می‌افتد که در شکل (۱-۳) با خط‌چین نشان داده شده است.

خروجی کلی سیستم (E) از تفاضل دو بخش یادگیرنده (آمیگدالا) و خنثی‌کننده - یادگیرنده

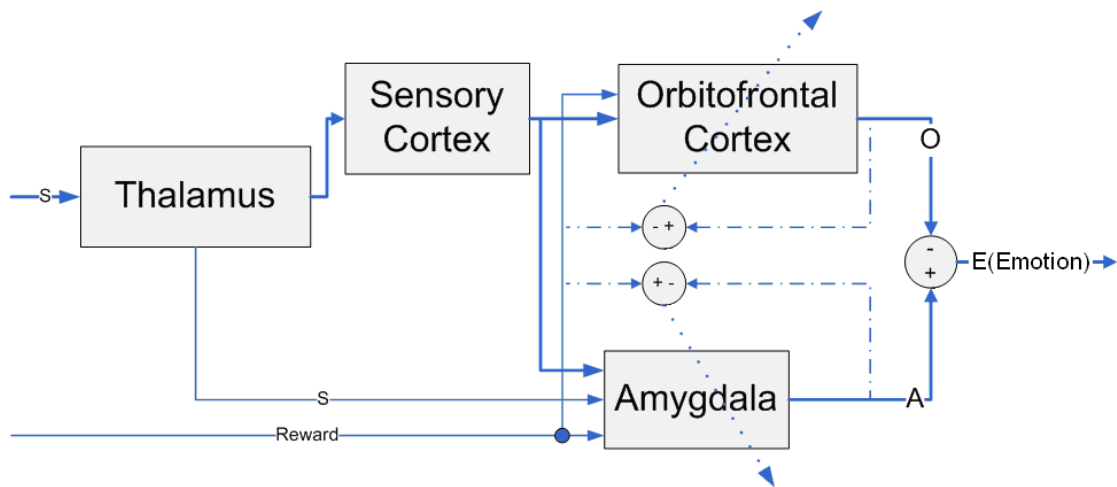
(اوربیتوفرانتال) ایجاد می‌شود که با معادله‌ی (۱-۳) بیان می‌گردد:

$$E = A - O \quad (1-3)$$

$O$  و  $A$  به ترتیب خروجی آمیگدالا و اوربیتوفرانتال هستند. در ادامه به بررسی آمیگدالا و

اوربیتوفرانتال به عنوان دو بخش اساسی این سیستم که در کاربرد کنترلی این سیستم اهمیت فراوان

دارند خواهیم پرداخت.



شکل (۱-۳): ساختار بلوک دیاگرامی سیستم لیمبیک ساده شده

### ۳-۳ آمیگدالا

عملاً آمیگدالا اساسی‌ترین بخش سیستم لیمبیک می‌باشد که وظیفه‌ی اساسی شرطی‌سازی را انجام می‌دهد و ضمناً تنها توانایی یادگیری پدیده‌ها را داراست و امکان فراموش شدن یک موضوع برای این بخش وجود ندارد.

از نظر فیزیکی، آمیگدالا بخش کوچک و بادامی شکلی است که در هر دو نیمکره‌ی مغز وجود دارد و در موقعیتی قرار گرفته است که امکان دریافت سریع و آسان اطلاعات ورودی از تالاموس و بخش‌های حسی ورودی را داراست.

روابط محاسباتی درون آمیگدالا به شرح زیر هستند:

$$A = \sum_i a_i \quad (۲-۳)$$

$$a_i = S_i V_i \quad (۳-۳)$$

$$\Delta V_i = \alpha S_i \text{MAX}(R - A, 0) \quad (۴-۳)$$

که در آن  $V_i$  ها پارامترهای یادگیری و  $a_i$  ها متغیرهای داخلی آمیگدالا هستند. سایر متغیرها در شکل (۱-۳) نشان داده شده‌اند.

### ۴-۳ اوربیتوفران‌تال کورتکس

اوربیتوفران‌تال کورتکس دومین بخش سیستم لیمبیک است که نقش خنثی‌سازی اثر آمیگدالا در مواقع مورد نیاز را بر عهده دارد. عملاً این بخش نقش بازدارنده را بر عهده می‌گیرد.

این قسمت نیز همانند آمیگدالا نیازمند ورودی‌های احساسی و سیگنال عاطفی است تا عملکرد صحیح خود را اجرا نماید. عملکرد اوربیتوفران‌تال کورتکس شبیه به آمیگدالا است و سعی در تطبیق خروجی بر اساس ورودی‌های احساسی و سیگنال عاطفی دارد و ضمناً در مواقع مورد نیاز، سعی می‌کند اثر آمیگدالا را خنثی نماید. به همین دلیل خروجی آمیگدالا نیز در عملکرد آن موثر است. تفاوت این دو بخش در امکان فراموش شدن یک عمل یاد گرفته شده در اوربیتوفران‌تال کورتکس می‌باشد که آمیگدالا این توانایی را ندارد.

روابط زیر عملکرد داخلی اوربیتوفران‌تال کورتکس را شرح می‌دهند:

$$O = \sum_i o_i \quad (5-3)$$

$$o_i = S_i W_i \quad (6-3)$$

$$\Delta W_i = \beta S_i (R - O) \quad (7-3)$$

که در آن  $W_i$  پارامترهای یادگیری و  $o_i$  متغیرهای داخلی هستند.

برای هر ورودی احساسی  $S_i$  که به مدل وارد می‌شود، یک گره آمیگدالا و یک گره اوربیتوفران‌تال متناظر وجود دارد که خروجی‌های آمیگدالا و اوربیتوفران‌تال را تولید می‌کند، این خروجی‌ها با ضرب ورودی‌های آمیگدالا و اوربیتوفران‌تال در ضرایبی تولید می‌گردند.

فرآیند آموزش آمیگدالا و اوربیتوفران‌تال از طریق وزن‌های درونی‌شان انجام می‌پذیرد.

به این نکته باید توجه شود که مدل یادگیری مورد توجه براساس مدل داده شده در مراجع [14، 26] می‌باشد.

بر اساس آنچه در شکل (۳-۱) مشاهده می‌شود، به جز سیگنالی که از تالاموس به آمیگدالا آمده است، آمیگدالا و اوربیتوفران‌تال هر دو مجموعه سیگنال‌های یکسانی دریافت می‌کنند. همچنین اوربیتوفران‌تال یک سیگنال از آمیگدالا نیز به‌طور غیر مستقیم دریافت می‌کند.

ارزیابی محرک و انتخاب عمل به عنوان نتیجه این ارزیابی به طور قابل توجهی از هم جدا هستند. این از بیولوژی قابل استنباط است که وظیفه‌ی آمیگدالا یادگیری بین ورودی احساسی و عاطفی و تاثیر آن‌ها در خروجی می‌باشد.

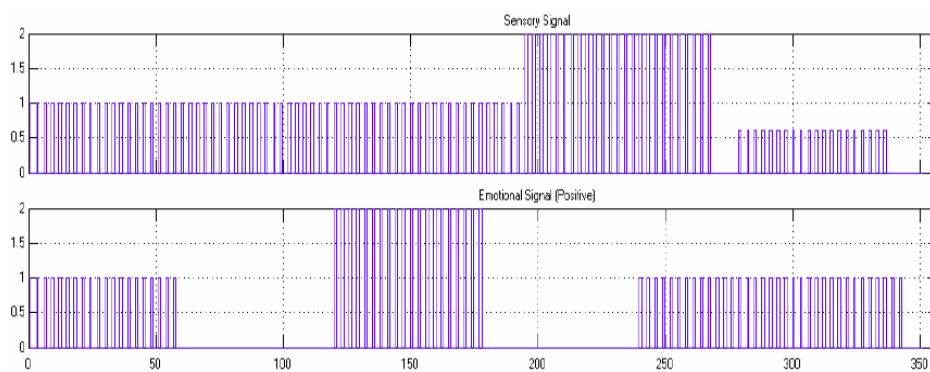
### ۳-۵ تالاموس

در ادامه نیاز داریم تا نقش تالاموس را بدانیم. مسیر میان‌گذری که از تالاموس به آمیگدالا می‌رسد سرعت و تلورانس مدل را بهبود می‌بخشد، به خاطر اینکه زمان مصرف شده برای پردازش سنسوری کورتکس را از بین می‌برد، این حتی هنگامی که قشر احساسی به طور دقیق عمل نمی‌کند، مدل را قادر می‌سازد یک عکس‌العمل سریع از خود نشان دهد (اگر چه بهینه نباشد) که تصمیم مناسب نامیده می‌شود. این سیگنال، اطلاعات زیادی به اندازه چندین ورودی ممکن را دارد. اما دقیقاً این که تالاموس به عنوان یک پردازش‌گر سیگنال و ابزار ارسال چگونه کار می‌کند، هنوز مشخص نیست. در این مدل از تالاموس، بزرگ‌ترین سیگنال ورودی به عنوان سیگنال تالاموس وارد آمیگدالا می‌شود.

### ۳-۶ اولین تجربه فراگیری

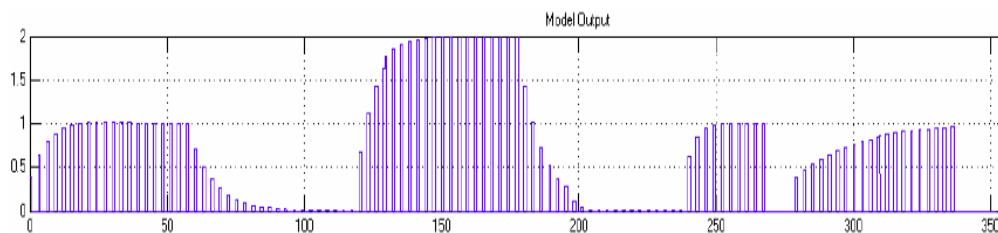
در این تجربه یادگیری یک ورودی احساسی و یک سیگنال عاطفی به سیستم داده می‌شوند که در شکل (۳-۲) نشان داده شده است. در ابتدا به هر دوی ورودی احساسی و سیگنال عاطفی، مقدار یک داده شده است. در مرحله دوم سیگنال عاطفی را حذف می‌کنیم و در مرحله سوم با مقدار ۲ همانند مرتبه‌ی اول آزمایش را تکرار می‌کنیم. سپس در مرحله بعد، ورودی احساسی با مقدار ۲ بدون سیگنال عاطفی به سیستم وارد می‌شود. پس از آن جایی که ورودی احساسی موجود می‌باشد سیگنال عاطفی ۱ می‌گردد. سرانجام، سیگنال عاطفی در مقدار ۱ قرار گرفته و ورودی احساسی با مقدار ۰.۶ جایگزین می‌شود.

خروجی مدل در شکل (۳-۳) دیده می‌شود. مطابق آنچه در شکل دیده می‌شود، مدل هیچ خروجی تولید نمی‌کند مگر این که هر دو سیگنال احساسی و عاطفی مقدار غیر صفر داشته باشند. به علاوه، مقدار ماندگار دنبال شده مقدار سیگنال عاطفی می‌باشد و نه مقدار سیگنال ورودی احساسی.



شکل (۳-۲) : بالا: ورودی احساسی، پایین: ورودی عاطفی برای اولین تجربه‌ی یادگیری [26]

اندازه سیگنال احساسی در تغییر شیبی که مقدار نهایی بدست می‌آید تاثیر گذار است. این واقعیت در دو مرحله پایانی که سیگنال عاطفی مقدار ۱ دارد ولی سیگنال احساسی به ترتیب مقادیر ۲ و ۰.۶ دارد مشاهده می‌گردد. همان‌طور که در شکل (۳-۳) نشان داده شده است، در هر دو مرحله خروجی به مقدار ۱ می‌رسد اما با این تفاوت که در حالت اول سریع‌تر از حالت دوم انجام می‌شود.

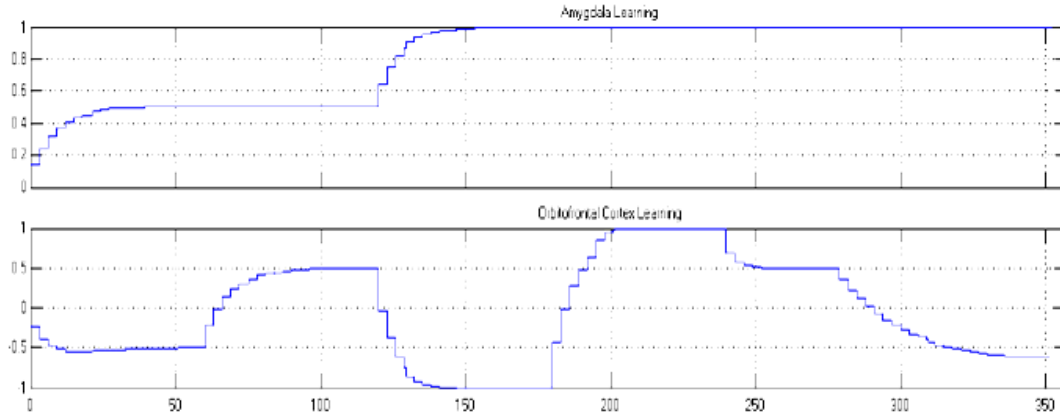


شکل (۳-۳) : خروجی مدل برای آزمایش اولین تجربه‌ی فراگیری [26]

رفتار یادگیرنده آمیگدالا - اوربیتوفرانیتال در بالا و پایین شکل (۳-۴) نشان داده شده است. از آن‌چه گفته شد، آمیگدالا نمی‌تواند هیچ‌گونه یادگیری در حالت معکوس داشته باشد. به عبارت دیگر، آمیگدالا فقط می‌تواند یاد بگیرد و هرگاه اثر یادگیری باید از بین برود، اوربیتوفرانیتال بازدارندگی را افزایش می‌دهد.

شکل (۳-۴) نشان می‌دهد که در این تجربه آمیگدالا تا زمانی که سیگنال عاطفی با مقدار ۱ حضور دارد به نیمی از یادگیری کامل خود می‌رسد. هنگامی که سیگنال عاطفی از ۱ به ۲ می‌رسد آمیگدالا به یادگیری کامل خود می‌رسد. همچنین هرگاه سیگنال عاطفی وجود نداشته باشد و بازدارندگی مورد نیاز باشد اوربیتوفرانیتال افزایش می‌یابد، در حالی که آمیگدالا مقدار قبلی خود را نگه داشته و هیچ یادگیری در هیچ جهتی ندارد.

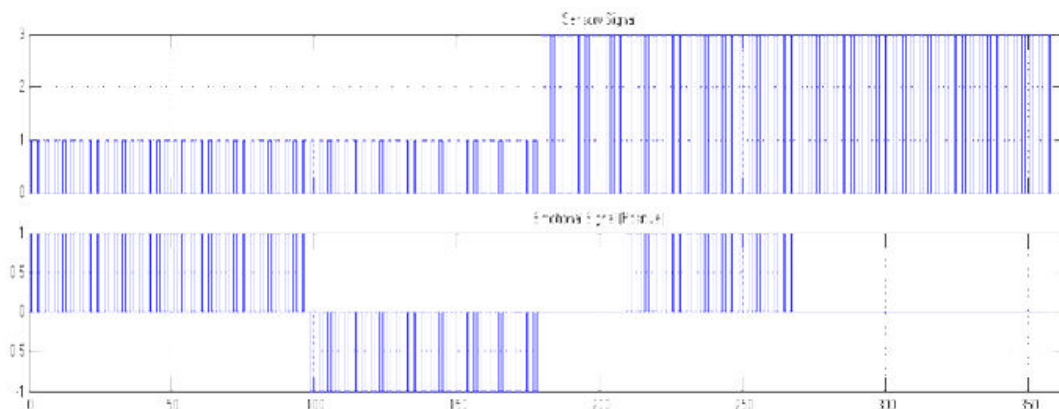




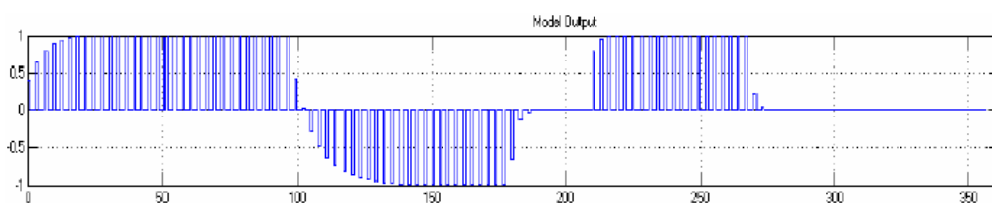
شکل (۳-۴) : بالا: یادگیری آمیگدالا، پایین: یادگیری اوربیتوفرانیتال در طول اولین تجربه‌ی یادگیری [26]

### ۳-۷ دومین تجربه یادگیری

دومین تجربه یادگیری مواقعی مورد توجه قرار می‌گیرد که سیگنال عاطفی مقدار منفی دارد. عواطف منفی در بیولوژی ممکن است به حالت‌های عاطفی شبیه ترس، اضطراب و غیره تعبیر شود. ولی دلیل اصلی برای توجه به رفتار سیستم هنگامی که سیگنال عاطفی مقداری منفی می‌گیرد، نگرانی است که در کاربرد در سیستم‌های کنترل وجود دارد. ورودی احساسی و عاطفی داده شده به این مدل در این آزمایش در شکل (۳-۵) نشان داده شده است. از آن‌چه از شکل (۳-۶) دیده می‌شود، خروجی سیستم مقدار سیگنال عاطفی را دنبال می‌کند و مقدار بیشتر دامنه ورودی احساسی پاسخ را سریع‌تر می‌سازد.

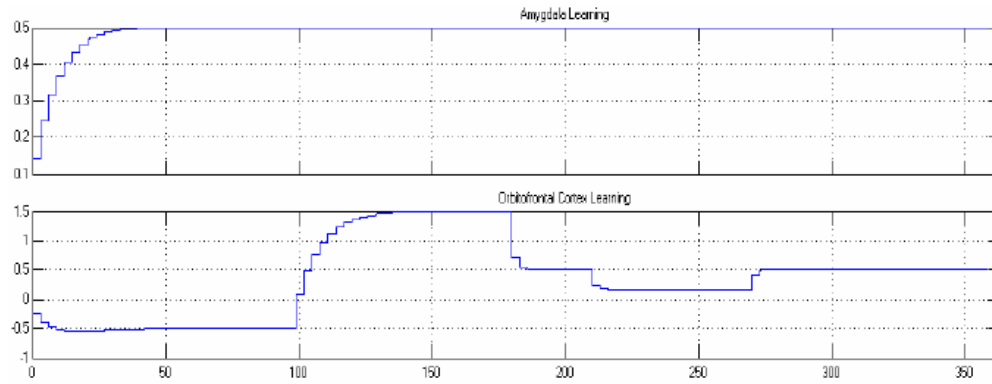


شکل (۳-۵) : سیگنال‌های بالا: ورودی احساسی، پایین: ورودی عاطفی در طول دومین تجربه‌ی یادگیری [26]



شکل (۳-۶) : خروجی مدل در طول دومین تجربه‌ی یادگیری [26]

یادگیری آمیگدالا – اوربیتوفرانتال در شکل (۳-۷) نشان داده شده است. یادگیری آمیگدالا به نصف یادگیری کامل افزایش می‌یابد و هیچ‌گاه تغییر نمی‌کند؛ حتی هنگامی که دامنه سیگنال عاطفی از ۱ به ۱- تغییر می‌کند. در حقیقت مقدار منفی خروجی به علت اثر بازدارندگی زیاد اوربیتوفرانتال اثر محرک آمیگدالا را خنثی می‌کند. مشاهدات بیشتر آزمایش‌ها نشان داد که دامنه خروجی مدل دامنه سیگنال عاطفی را دنبال می‌کند. به عبارت دیگر دامنه سیگنال احساسی در نرخ یادگیری شرکت می‌کند و جایی که دامنه سیگنال احساسی بیشتر است سرعت یادگیری بیشتر می‌شود.



شکل (۷-۳) : بالا: یادگیری آمیگدالا، پایین: یادگیری اوربیتوفرانیتال در طول دومین تجربه‌ی یادگیری [26]

## فصل ۴

### معرفی دستگاه‌های بکار رفته

#### ۴-۱ مقدمه

در این فصل قصد داریم تا با دو دستگاه که در مراحل بعد سعی داریم از کنترل کننده‌ی مورد بررسی در دو فصل قبل برای کنترل آن‌ها استفاده کنیم آشنا شویم. این دستگاه‌ها شامل دستگاه کنترل سطح RT 512 ساخت شرکت GUNT و سیستم توپ و صفحه CE 151 ساخت شرکت HUMUSOFT هستند.

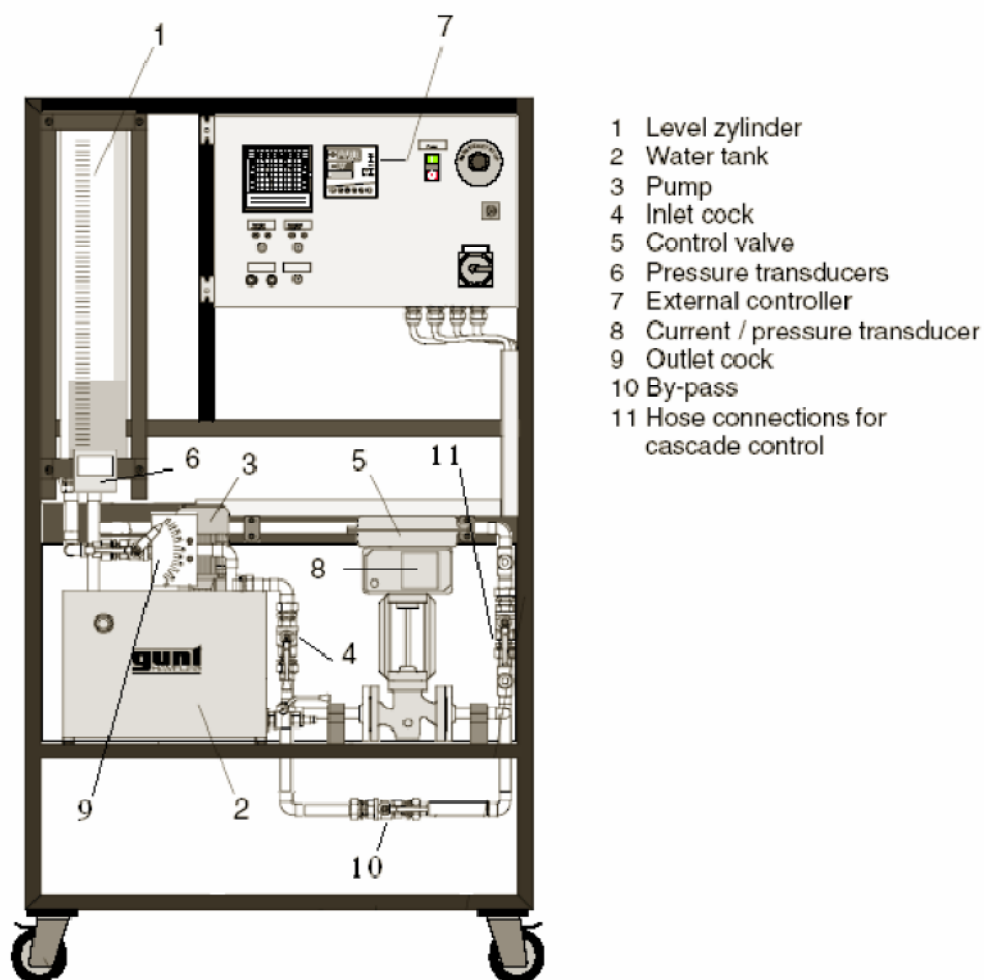
دستگاه کنترل سطح به عنوان یک دستگاه صنعتی نمونه‌ی متداول برای اکثر مهندسين کنترل شناخته شده است، به همین دلیل از این سیستم به عنوان یک نمونه‌ی میانی برای بررسی‌های اولیه و تست سیستم استفاده گردید، فلذا برای آشنایی با این سیستم، در این فصل به کلیاتی از آن خواهیم پرداخت. دستگاه توپ و صفحه یک دستگاه ناپایدار است که از نمونه‌های مناسب برای بررسی‌های کنترلی محسوب می‌گردد و بدلیل ذات ناپایدار و نسبتاً پیچیده‌ای که دارد، سعی شده تا حدودی با استفاده از [75، 71] به مدل‌سازی و آشنایی کلی با آن پردازیم. برای کسب اطلاعات بیشتر در مورد این دستگاه می‌توان به [75، 74، 73، 72، 71] مراجعه نمود.

## ۱-۴ دستگاه کنترل سطح

### ۱-۱-۴ معرفی کلی

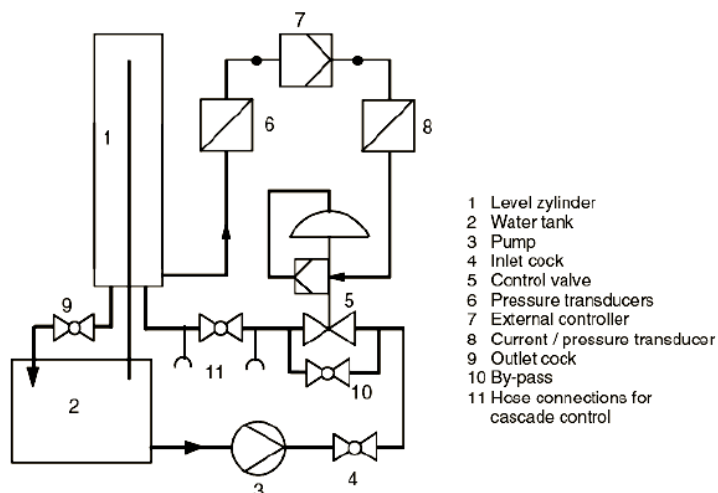
سیستم کنترل سطح آب تانک، موجود در آزمایشگاه کنترل فرآیند دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی یک فرآیند مرسوم در صنعت می‌باشد. شمای کلی سیستم کنترل سطح در شکل (۱-۴) دیده می‌شود. این سیستم آموزشی جهت کنترل سطح آب داخل تانک شیشه‌ای، شیر آب ورودی به تانک را کنترل می‌کند. اجزای این سیستم از نوع صنعتی هستند ولی ابعاد تانک و مسیر لوله‌ها در حد یک مدل آموزشی در آزمایشگاه در نظر گرفته شده‌اند.

شکل (۲-۴) نقشه P&ID این مدل را نشان می‌دهد. پمپ، آب را از مخزن از طریق لوله‌ها و شیر کنترلی به داخل تانک پمپاژ می‌کند. کنترل‌کننده با تنظیم شیر کنترلی، فلوی آب ورودی به مخزن را با توجه به سطح آب اندازه‌گیری شده (به وسیله سنسور فشار کف مخزن) کنترل می‌کند. شیرهای دستی ۱۰ و ۱۱ برای اتصال این مدل به یک مدل آزمایشگاهی دیگر جهت کنترل Cascade، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در حالت عادی شیر شماره ۱۰ (Bypass) کاملاً بسته بوده و شیر ۱۱ کاملاً باز است.



شکل (۴-۱) : شمای ظاهری سیستم کنترل سطح تانک [67]

Process diagram



شکل (۲-۴) ساختار P&ID دستگاه کنترل سطح

### ۲-۱-۴ معرفی اجزای سیستم

اجزای سیستم کنترل سطح را می‌توان بصورت خلاصه به شرح زیر بیان کرد:

**تانک:** این تانک استوانه‌ای با حجم تقریبی ۷ لیتر و قطر ۱۲ سانتی‌متر، به ارتفاع تقریبی ۷۰ سانتی‌متر

است که از ۰-۶۰ سانتی‌متر مدرج شده است (شماره ۱)

**مخزن آب:** مخزن آب با حجم حدود ۴۰ لیتر (شماره ۲)

**پمپ آب:** پمپ الکتریکی ۲۲۰ ولتی با مقادیر نامی ۲۸۰۰ دور بر دقیقه، فشار هد ۱۱ متر (آب) و فلوی

۳۰ لیتر بر دقیقه (شماره ۳)

**شیر دستی ورودی:** یک شیر دستی که می‌توان ورودی را توسط آن قبل از شیر کنترلی تغییر داد.

(شماره ۴)

**شیر کنترلی:** شیر نیوماتیکی متناسب با سیگنال فشار هوای ورودی خود فلوی ورودی تانک را کنترل

می کند (شماره ی ۵)

**سنسور فشار:** سنسور فشار کف مخزن ۰-۱۰۰ میلی بار بالاتر از فشار آزاد را اندازه گیری می کند.

خروجی این سنسور سیگنال جریانی ۴-۲۰ میلی آمپر است (شماره ی ۶)

**واسط کاربری دستی:** یک واسط بین ماشین و انسان<sup>۱</sup> دارای LCD است که مقادیر خروجی و

سیگنال کنترل را نمایش می دهد و می توان به صورت دستی به آن مقدار نیز داد. (شماره ی ۷)

**مبدل جریان الکتریکی به فشار:** مبدل متناسب با جریان الکتریکی ورودی (خروجی کنترل کننده)

فشار هوای خروجی خود را بین ۰.۲-۱ بار تنظیم می کند (جهت اعمال به شیر کنترلی). این مبدل به

یک منبع فشار باد نیاز دارد (شماره ی ۸)

**شیر خروجی:** شیر دستی مدرجی که میزان فلوی خروجی تانک را تغییر می دهد (شماره ی ۹)

**شیر دستی By-pass:** در نقشه P&ID با 10-By-pass مشخص شده و هنگامی که کاملاً باز شیر

کنترلی را از سیستم خارج می کند (شماره ی ۱۰)

---

<sup>۱</sup> Human Machine Interface (HMI)



شیر دستی جهت کنترل **Cascade**: در شکل (۴-۲) با 11-hose connection for cascade

control مشخص شده و برای اتصال دو سیستم کنترل فلو و کنترل سطح استفاده می‌شود (شماره‌ی

(۱۱)

### ۴-۱-۳ نحوه‌ی کنترل

تمامی فرامین به سیستم و اندازه‌گیری‌ها از طریق یک کنترل‌کننده موسوم به jumo صورت می‌پذیرد.

این کنترل‌کننده جهانی (universal) تمامی سیگنال‌های ورودی و خروجی و همچنین تنظیمات

تمامی ادوات دستگاه را بر عهده دارد. علاوه بر این امکان ارتباط با رابط profibus بر روی

کنترل‌کننده تعبیه شده که می‌تواند تمامی سیگنال‌های ورودی و خروجی را با پروتکل خاص (DP)

توسط کامپیوتر انتقال دهد.

### ۴-۱-۴ عملکرد دستگاه کنترل سطح

به طور خلاصه سیستم این گونه کار می‌کند که با زدن دکمه Start پمپ آب، شروع به کار می‌کند و

آب پشت شیر کنترل باقی می‌ماند. در کنترل‌کننده jumo یک مقدار Set Point به آن داده شده و

همچنین دستگاه توسط سنسور فشار که بر روی تانک آب نصب شده، با ارسال سیگنال ۴-۲۰ mA به

کنترل‌کننده، مقدار سطح آب را نشان می‌دهد. در لحظه اول آب در تانک موجود نمی‌باشد، بنابراین

دستگاه توسط مقدار خطایی که دارد و بنا بر فرمان کنترل‌کننده با ضربی که به آن اختصاص داده‌ایم،

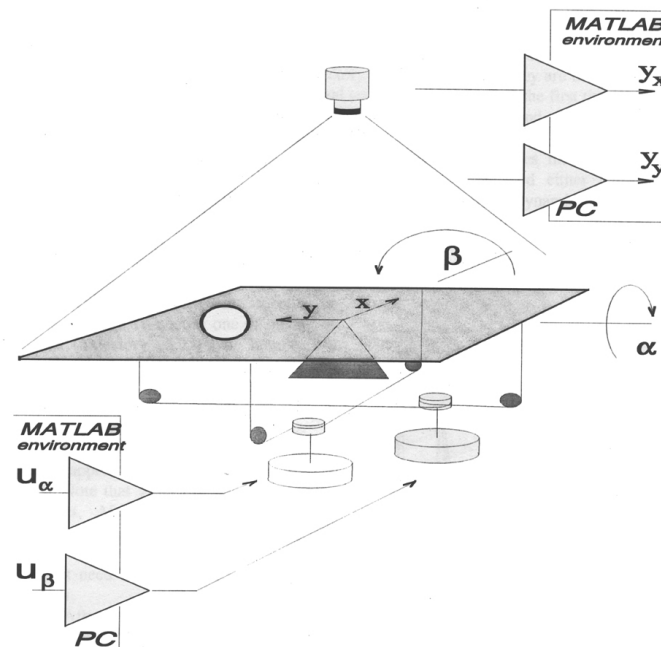
شیر کنترلی بنا به سیگنالی (در این جا شیر کنترلی نیوماتیکی است و بنا به سیگنال  $4-20 \text{ mA}$  که توسط کنترل کننده به آن اعمال می شود باز یا بسته می شود) که به مدار فرمان آن اعمال می شود شروع به باز یا بسته شدن می کند. آب از شیر کنترلی عبور کرده و پس از عبور از لوله، وارد تانک آب می شود و توسط سنسور فشار بنا به وزنی که به آن وارد می شود سطح آب تشخیص داده می شود و این مقدار به کنترل کننده فرستاده شده و توسط کنترل کننده بنا به اختلافی که با مقدار مطلوب دارد، شیر کنترلی را باز یا بسته می کند.

به منظور دستیابی به مدل و توضیحات کامل در مورد این دستگاه می توان به [67، 68، 69، 70] مراجعه نمود.

## ۲-۴ دستگاه توپ و صفحه

### ۱-۲-۴ مقدمه

مدل توپ و صفحه CE 151 محصولی از شرکت Humusoft است که برای بررسی و تمرین بعضی مفاهیم و اصول مقدماتی و پیشرفته مهندسی کنترل طراحی شده است. این مفاهیم شامل مدل کردن دینامیک، شناسایی، آنالیز سیستم و طراحی انواع مختلف کنترل کننده به وسیله روش‌های کلاسیک و مدرن و هوشمند می‌باشد.



شکل (۳-۴): نمایی از سیستم توپ و صفحه CE151 [74]

ساختار شماتیک سیستم CE 151 در شکل (۳-۴) نشان داده شده است. این سیستم را می‌توان به

کامپیوترهای سازگار با IBM XT/AT وصل کرد. [۷۱]

## ۲-۲-۴ مدل سازی

با فرض داشتن پارامترهایی مطابق جدول (۴-۱) و با استفاده از [۷۱، ۷۴، ۷۵] می توان با استفاده از

معادله‌ی اولر- لاگرانژ و مشتق‌گیری‌های لازم به معادلات دیفرانسیل غیر خطی زیر رسید:

$$x : (m + \frac{I_b}{r_b^2}) \ddot{x} - m(\dot{\alpha} \dot{\beta} \dot{y} + \dot{\alpha} \dot{x}^2) + mg \sin \alpha = 0 \quad (۱-۴)$$

$$y : (m + \frac{I_b}{r_b^2}) \ddot{y} - m(\dot{\alpha} \dot{\beta} \dot{y} + \dot{\beta} \dot{x}^2) + mg \sin \beta = 0 \quad (۲-۴)$$

(۳-۴)

$$\alpha : (I_p + I_b + mx^2) \ddot{\alpha} + m(\dot{\beta} \dot{x} \dot{y} + \dot{\beta} \dot{x} \dot{y} + \dot{\beta} \dot{x} \dot{y} + 2\dot{\alpha} \dot{x} \dot{x}) + mgx \cos \alpha = F_\alpha d \cos \alpha \quad (۴-۴)$$

$$\beta : (I_p + I_b + mx^2) \ddot{\beta} + m(\dot{\alpha} \dot{x} \dot{y} + \dot{\alpha} \dot{x} \dot{y} + \dot{\alpha} \dot{x} \dot{y} + 2\dot{\beta} \dot{x} \dot{x}) + mgx \cos \alpha = F_\beta d \cos \beta$$

سپس با ساده‌سازی‌ها و تقریب‌های موجود در [۷۱، ۷۴، ۷۵] می توان به معادلات ساده شده‌ی زیر

دست یافت.

$$\square \quad \ddot{x} = \frac{5}{7} g \sin \alpha \approx K_b \alpha \quad (۵-۴)$$

$$\ddot{y} = \frac{5}{7} g \sin \beta \approx K_b \beta \quad (۶-۴)$$

به منظور کاربرد و پیاده‌سازی و همین‌طور دستیابی به مدلی دقیق و قابل استفاده باید به نکاتی در

مورد سیستم Servo موتور که در [۷۱، ۷۲، ۷۳، ۷۴، ۷۵] به طور کامل بحث شده توجه نمود، چرا که

این راه‌انداز دارای یک رفتار غیرخطی است که می‌تواند پیاده‌سازی را با مشکل روبرو نماید.

ضمناً مدل اشاره شده در این بخش با فرض‌های زیر که در [۷۱] نیز اشاره شده بدست می‌آید.

(۱) در هیچ نقطه‌ای توپ از صفحه جدا نمی‌شود

(۲) لغزش توپ روی صفحه نادیده گرفته می‌شود

(۳) از تمام نیروها و گشتاورهای جزئی صرف نظر می‌شود

جدول (۴-۱): متغیرها، پارامترها و واحدها

پارامتر	شرح پارامتر	واحد
$y, x$	مختصات توپ روی صفحه	متر
$r$	بردار شعاع مرکز توپ (نسبت به مرکز صفحه)	متر
$v$	بردار سرعت مرکز توپ	متر بر ثانیه
$r_b$	شعاع توپ	متر
$\omega$	بردار سرعت زاویه‌ای توپ در حال چرخش	رادیان بر ثانیه
$\Omega$	بردار زاویه‌ای صفحه در حال چرخش	رادیان بر ثانیه
$\beta, \alpha$	زاویه‌ای مربوط به شیب صفحه	رادیان
$I_b$	ممان توپ	کیلوگرم در متر مربع
$I_p$	ممان صفحه	کیلوگرم در متر مربع
$m$	وزن توپ	کیلوگرم

### ۴-۲-۳ سنسور موقعیت

گردآوری تصویر ویدیویی از طریق یک بلوک ورودی ویدیویی از Image Acquisition Toolbox از نرم‌افزار MATLAB صورت می‌پذیرد. برای استفاده می‌باید، دوربین صحیح در بخش پارامترهای بلوک انتخاب شود، به صورت پیش‌فرض دوربین Logitech QuickCam Zoom انتخاب شده است.

هرچند دوربین توان پشتیبانی تا رزولوشن  $640 \times 480$  پیکسل را دارد، اما استفاده از رزولوشن پایین‌تر توصیه می‌شود. مدل‌های Simulink با استفاده از رزولوشن  $160 \times 120$  تست شده‌اند که علاوه بر عملکرد صحیح، مقدار بسیار کمی از توان PC را مورد استفاده قرار می‌دهد.

الگوریتم‌های جستجوی توپ در میان صفحه توسط MEX-function، در کد نوشته شده به زبان C با نام ballsearch.c موجود هستند. با استفاده از پوشش bpsearch.m این برنامه به صورت بلوک شبیه‌سازی Ball Coordinates پیاده‌سازی می‌شود. خروجی این بلوک یک بردار با ۳ درایه می‌باشد. دو درایه‌ی اول، مختصات X و Y توپ بر روی صفحه را می‌دهند. درایه‌ی سوم در صورت درست دیده شدن توپ مقدار یک را بر می‌گرداند. در صورت بروز خطا در شناسایی توپ، مقداری غیر صفر در درایه‌ی سوم دیده خواهد شد. دیده شدن مقدار یک در این درایه به معنی پیدا نشدن توپ بر روی صفحه است، در حالی که ۲ به معنی بیش از حد بزرگ بودن جسم دیده شده است و این جسم توپ

نمی‌باشد. مدل شبیه‌سازی که تنها شامل الگوریتم‌های جستجوی توپ باشد در bp\_position.mdl موجود است.

سیستم بینایی که شامل نرم‌افزار راه‌انداز نیز می‌باشد آنقدر سریع است که می‌توان از دینامیک چنین سنسور هوشمندی صرف‌نظر کرد. ضمناً دوربین موجود که از نوع Logitech® QuickCam® Pro 5000 می‌باشد این توانایی را دارد تا با سرعت ۳۰ تصویر در ثانیه - معادل  $T_s = 0.0333^s$  - را تولید نماید؛ اما این بازه به صورت گسسته قابل تغییر است و تنها می‌توان نمونه‌برداری‌هایی با فرکانس‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ فریم بر ثانیه از آن بدست آورد. [75]

#### ۴-۲-۴ کنترل صفحه

صفحه توسط دو موتور پله‌ای<sup>۱</sup> که به بورد MF 624 ساخت شرکت HUMUSOFT متصل هستند جابجا می‌شود. برای راه‌اندازی دستگاه توپ و صفحه‌ی CE 151 شماره‌ده‌های موجود در بورد MF624 برای تولید توالی پالس‌های مورد نیاز برای حرکت موتورها مورد استفاده قرار می‌گیرند. یک راه‌انداز<sup>۲</sup> خاص با نام mf624st.rtd برای عملکرد در Real Time Toolbox از نرم‌افزار MATLAB مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای کنترل موقعیت صفحه، از کانال‌های خروجی ۵ و ۶

<sup>1</sup> Stepper Motor

<sup>2</sup> Counters

<sup>3</sup> Driver

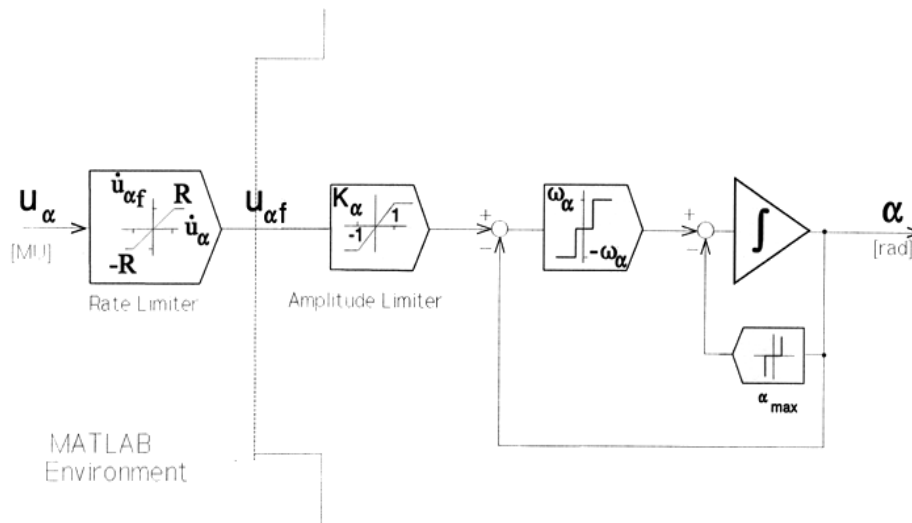
بورد استفاده می‌شود. بازه‌ی  $\pm 300$  پله، شیبی در حدود  $\pm 10^\circ$  را برای صفحه تولید می‌کند. مدلی که

تنها شامل الگوریتم‌های کنترل صفحه باشد در `bp_manual.mdl` موجود می‌باشد [75].

#### ۵-۲-۴ دینامیک کامل سیستم

شکل (۴-۴) دینامیک سیستم توپ و صفحه را طبق آنچه از MATLAB دیده می‌شود، نشان

می‌دهد.



شکل (۴-۴): دیاگرام بلوکی دینامیک کامل سیستم در یک مختصات [75]

#### ۶-۲-۴ شناسایی پارامترها

پارامترهای مربوط به دینامیک سیستم را می‌توان مستقیماً اندازه‌گیری کرد یا از روی توضیحات سیستم

برداشت که به صورت خلاصه در جدول (۲-۴) دیده می‌شوند.



جدول (۴-۲): مشخصات دینامیکی دستگاه CE 151

مقدار	مشخصه
$d_x \times d_y = 0.4 \times 0.4 m^2$	ابعاد صفحه
$I = 0.2 m$	فاصله بین تکیه گاه و لبه صفحه
$\Delta\varphi = 0.9^\circ = 0.0157 rad$	اندازه گام موتور پله‌ای
$d = 0.016 m$	قطر شفت موتور پله‌ای
$f = 1 \div 8191 \text{ step} / s$	فرکانس کنترل موتور پله‌ای (قابل تنظیم به وسیله استفاده کننده)

#### ۴-۲-۷ مدل خطی شده‌ی سیستم

حرکت توپ بر روی صفحه با حل معادلات (۴-۵) و (۴-۶) توصیف می‌شود:

$$x(t) = x(t_0) + K_b \alpha \frac{t^2}{2}$$

$$\dot{x}(t_0) = 0$$

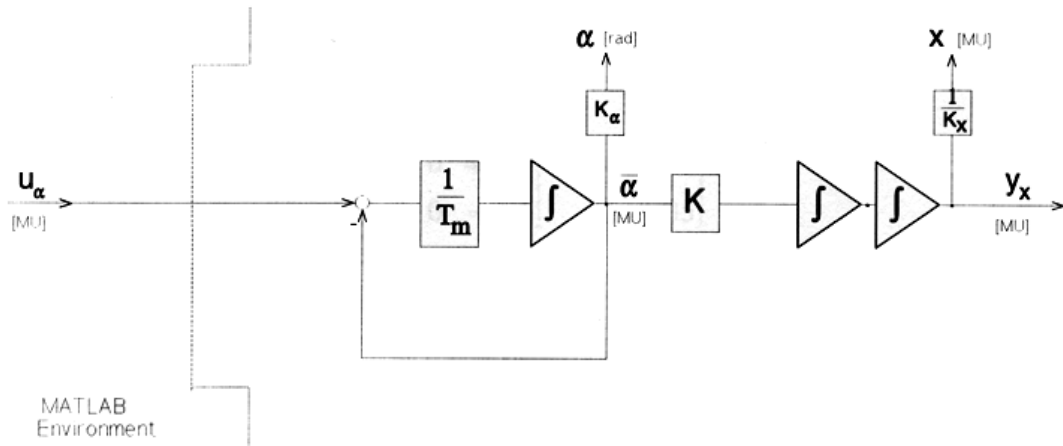
طبق معادله مقدار  $K_b$  برابر ۷ می‌باشد. (برای توپ یکنواخت) با انجام آزمایشات شناسایی مدل خطی

شکل (۴-۵) را با مقادیر زیر می‌توان در نظر گرفت.

$$K = 4.803 \text{ s}^{-2}$$

$$\omega = 1.338 \text{ s}^{-1}$$

$$T_m = 0.187 \text{ s}$$



شکل (۴-۵) : سیستم خطی شده توپ و صفحه شامل سیستم servo [75]

## فصل ۵

### بهبود عملکرد BELBIC

#### ۵-۱ مقدمه

در این فصل قصد داریم تا مدل عاطفی بدست آمده را به حوزه مهندسی کنترل آورده و از این مدل عملاً برای کنترل استفاده نماییم. به همین منظور ابتدا به شبیه‌سازی بر روی یک تابع تبدیل خطی پرداخته و در ادامه به پیاده‌سازی بر روی دستگاه کنترل سطح می‌پردازیم. در هنگام پیاده‌سازی مشکلاتی نمایان می‌شوند که در شبیه‌سازی دیده نشده بودند. به همین منظور به بررسی مجدد BELBIC پرداخته خواهد شد و مشکل ناپایداری داخلی آن آشکار می‌گردد، سپس با توجه به این مشکل سعی در رفع آن نموده و مدل را بهبود می‌دهیم. در ادامه مجدداً به پیاده‌سازی بر روی دستگاه کنترل سطح پرداخته خواهد شد و جواب‌ها مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

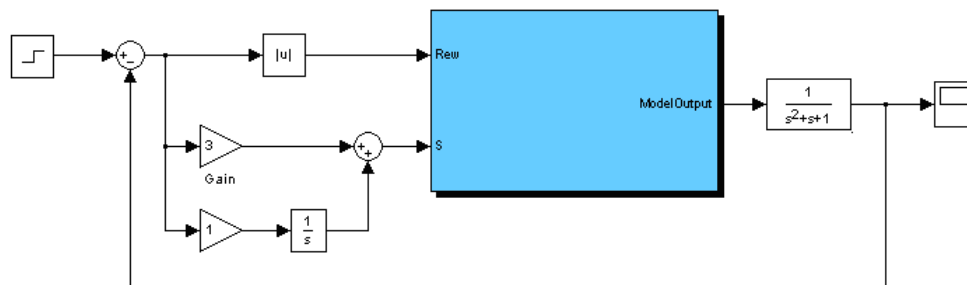
در این فصل نتایج شبیه‌سازی و پیاده‌سازی اولیه آورده نشده و تنها به بررسی مشکل و آرایه‌ی راه‌حل می‌پردازیم.

## ۲-۵ شبیه‌سازی بر روی تابع تبدیل خطی

در این بخش به شبیه‌سازی کنترل عاطفی بر روی سیستمی با تابع تبدیل (۱-۵) می‌پردازیم و با بررسی نتایج، نشان داده می‌شود که به علت بزرگ شدن ضریب  $W$  در اوربیتوفرانتال، ناپایداری داخلی رخ می‌دهد.

$$\frac{1}{s^2 + s + 1} \quad (1-5)$$

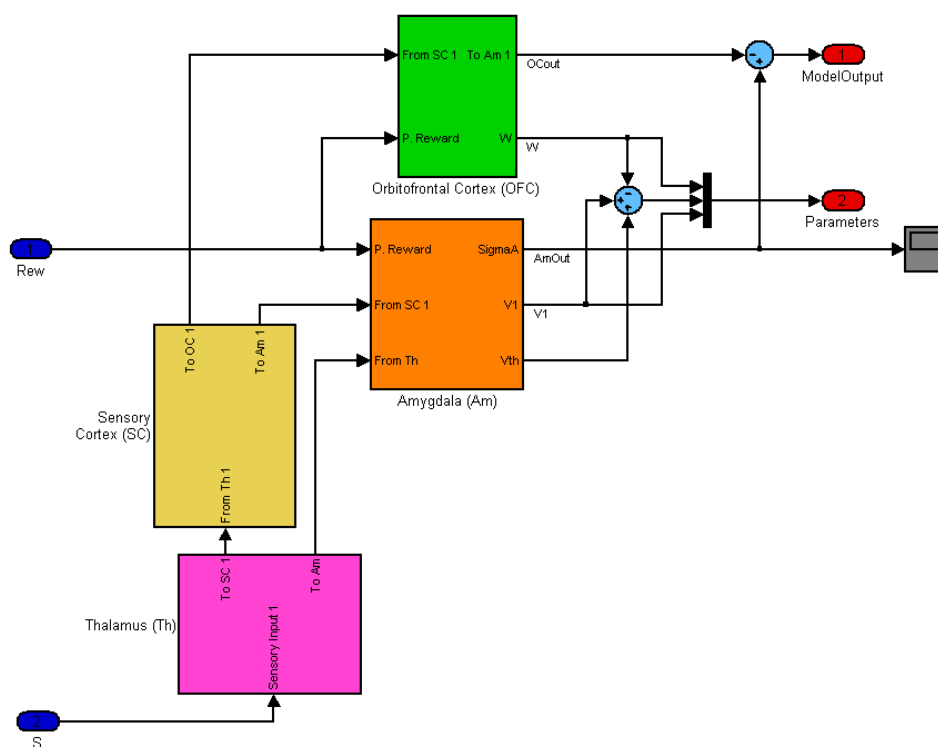
در ساختاری به شکل (۱-۵) سیستم خطی با مدل (۱-۵) توسط BELBIC کنترل می‌شود. در این شبیه‌سازی سیگنال  $Rew$  به صورت قدرمطلق خطا به سیستم اعمال می‌گردد. ورودی عاطفی نیز ضریبی از خطا و انتگرال خطا می‌باشد. ورودی مرجع نیز سیگنال پله می‌باشد. نکته‌ای که باید مورد توجه قرارگیرد این است که هر سیستمی نیازمند سیگنال‌های  $Rew$  و  $S$  متمایز از سیستم‌های دیگر می‌باشد و تعیین این سیگنال‌ها بسیار مهم و اساسی می‌باشد و عملاً تنظیم BELBIC وابسته به انتخاب و تنظیم صحیح این استراتژی کنترلی دارد.



شکل (۱-۵): شمایی از شبیه‌سازی بر روی سیستم (۱-۵) توسط BELBIC

### ۳-۵ ساختار داخلی BELBIC

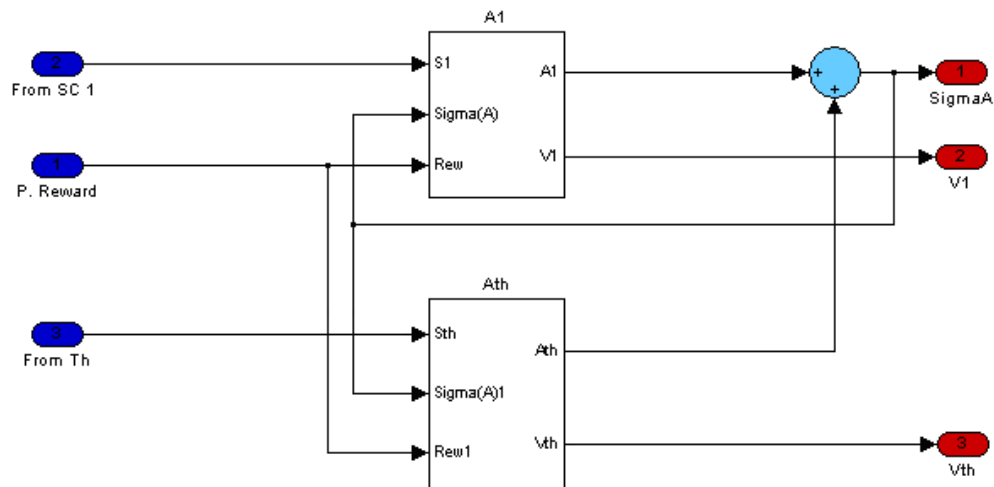
در شکل (۲-۵) ساختار داخلی BELBIC مورد استفاده، آورده شده است. این ساختار شامل قسمت‌های آمیگدالا، اوربیتوفران‌تال کورتکس، سنسوری کورتکس و تالاموس می‌باشد. جزئیات بیشتر هر یک از این قسمت‌ها در ادامه آورده خواهد شد. ورودی‌های BELBIC همان‌طور که انتظار داریم شامل سیگنال احساسی  $S$  و سیگنال عاطفی  $Rew$  می‌باشد.



شکل (۲-۵): ساختار درونی BELBIC مورد استفاده جهت کنترل

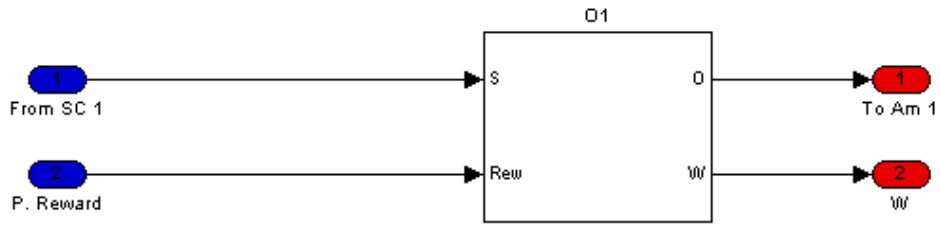
در شکل (۳-۵) ساختار آمیگدالا مشاهده می‌گردد. آمیگدالا شامل دو قسمت بوده که در مدل مورد استفاده در این تحقیق این قسمت‌ها وظیفه یکسانی را انجام می‌دهند و به تبع دارای مدل‌های یکسانی هستند.  $A_1$  به عنوان بخش اول Amygdala سیگنال‌های  $S$ ،  $Rew$  و  $\Sigma A$  را دریافت می‌نماید که

$\sum A$  مجموع خروجی‌های دو قسمت ذکر شده  $A_1$  و  $A_{th}$  می‌باشد.  $A_{th}$  نیز دارای ورودی‌های  $S_{th}$ ،  $Rew$  و  $\sum A$  می‌باشد که  $S_{th}$  از تالاموس دریافت می‌گردد. جمع این دو قسمت از آمیگدالا با نام  $\sum A$  خروجی آمیگدالا را تشکیل می‌دهند. ضرایب  $V_1$  و  $V_{th}$  نیز ضرایب داخلی می‌باشند که طی فرآیند یادگیری تغییر کرده و باعث تطبیق سیستم با محیط و اهداف مطلوب می‌گردند.



شکل (۵-۳): ساختار Amygdala مورد استفاده در فرآیند کنترل

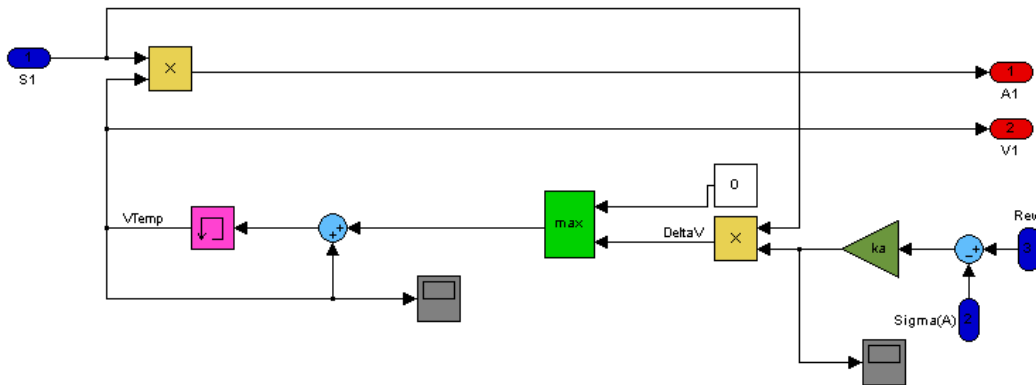
ساختار ورودی-خروجی اوربیتوفرانیتال در شکل (۵-۴) قابل مشاهده است. ورودی‌های اوربیتوفرانیتال سیگنال احساسی  $S$  و سیگنال عاطفی  $Rew$  می‌باشند و خروجی آن  $O$  می‌باشد که نقش بازدارندگی داشته و می‌تواند در مواقع لزوم اثر نامطلوب یادگیری‌های قبلی Amygdala را در خروجی نهایی ( $E$ ) از بین ببرد.  $W$  نیز ضریب داخلی می‌باشد و می‌تواند زیاد و یا کم گردد.



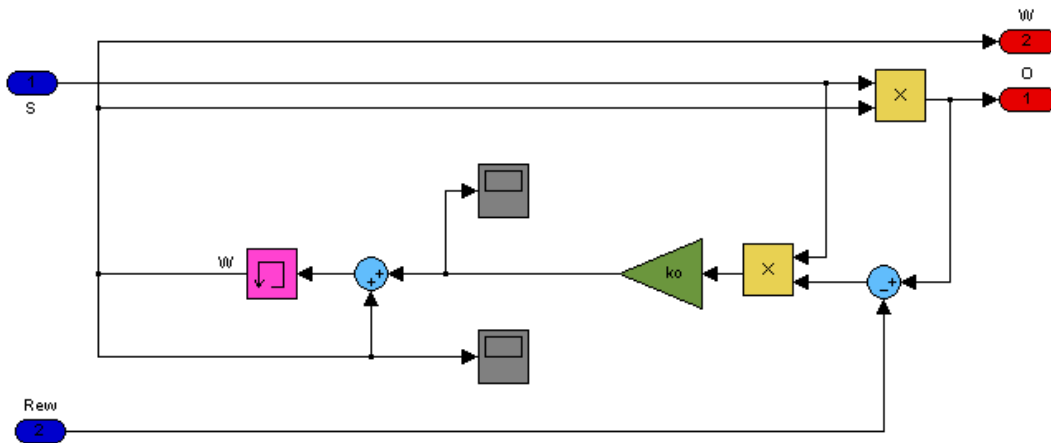
شکل (۴-۵) : ساختار ورودی- خروجی اوربیتوفرانتال

ساختار کامل درونی آمیگدالا و اوربیتوفرانتال به ترتیب در شکل (۵-۵) و شکل (۶-۵) نشان داده شده

است. ساختارهای مورد استفاده بر طبق فرمول‌های ارائه شده در فصل ۳ می‌باشند.



شکل (۵-۵) : ساختار درونی بلوک آمیگدالا

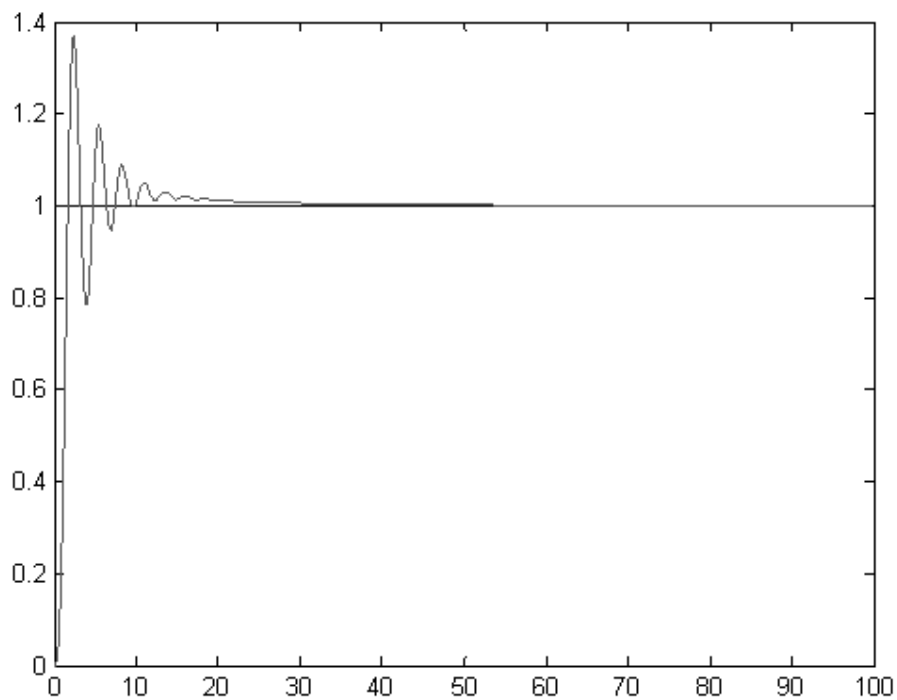


شکل (۶-۵) : ساختار درونی اوربیتوفرانتال

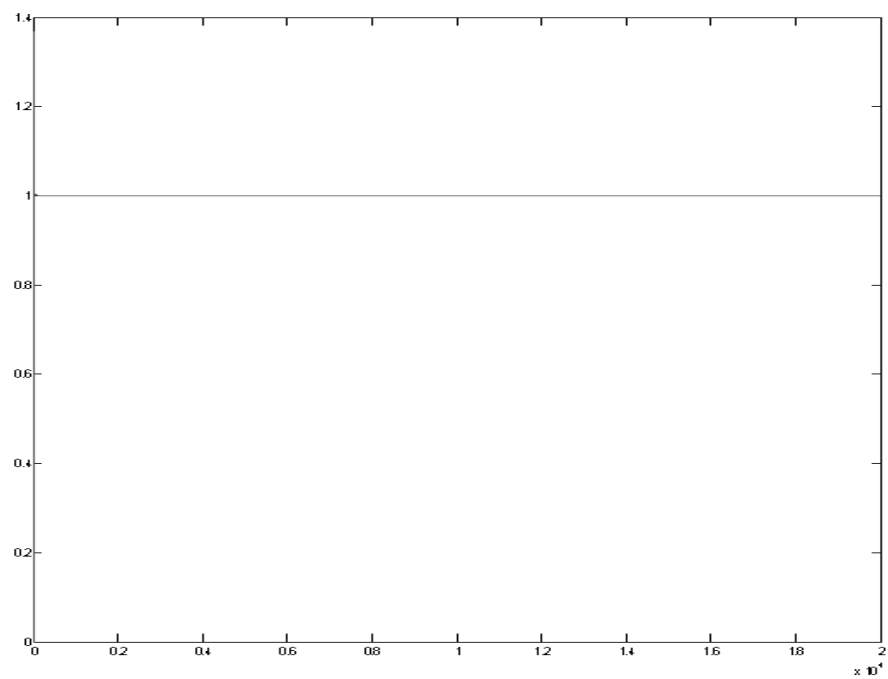
## ۴-۵ بررسی سیگنال‌ها و پارامترهای سیستم BELBIC

حال که ساختار شبیه‌سازی مدل مورد بررسی در فصل‌های دوم و سوم ارائه گردید، سعی در کاربرد کنترلی این ساختار داریم. برای این منظور و با هدف کنترل سیستمی خطی با تابع تبدیل (۵-۱) با ساختار استراتژی کنترلی به شکل (۵-۱) یک ورودی پله به سیستم اعمال می‌کنیم. در شکل (۵-۷) خروجی در ۱۰۰ ثانیه اول (برای این که دقیقاً تغییرات ابتدای آزمایش دیده شود) و در شکل (۵-۸) خروجی سیستم در ۱۰۰۰۰ ثانیه آورده شده است. همان‌طور که در شکل (۵-۷) مشاهده می‌شود، خروجی پس از چندین نوسان به ورودی مرجع رسیده و تقریباً از ثانیه ۴۰ به بعد ثابت می‌گردد. همان‌طور که در شکل (۵-۸) نیز مشاهده می‌شود، خروجی برای مدت زمان طولانی ۱۰۰۰۰ ثانیه در مقدار ۱ ثابت بوده و هیچ گونه تغییری ندارد؛ پس فرآیند کنترلی طراحی شده دارای خطای حالت ماندگار صفر است.



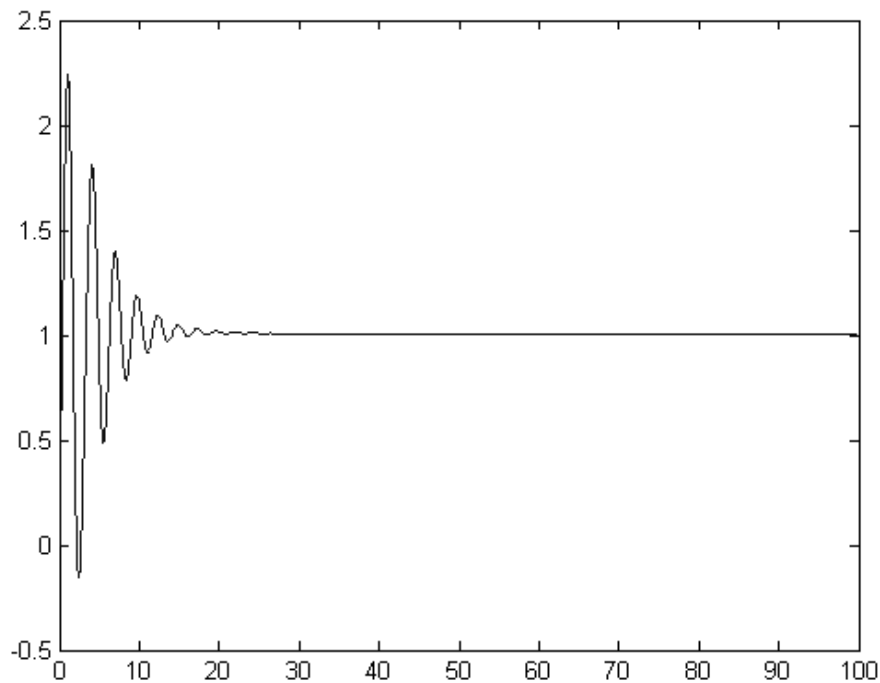


شکل (۵-۷): خروجی سیستم (۵-۱) با کنترل کننده BELBIC در ۱۰۰ ثانیه‌ی اول



شکل (۵-۸): خروجی سیستم (۵-۱) با کنترل کننده BELBIC در زمان‌های طولانی‌تر

سیگنال بعدی که می‌باید مورد توجه قرار گیرد و همواره در عملیات کنترل از اهمیت به‌سزایی برخوردار می‌باشد، سیگنال کنترل  $u$  بوده که در شکل (۵-۹) این سیگنال که همان خروجی کنترل‌کننده BELBIC - که عملاً همچون یک گین غیر خطی تطبیقی عمل کرده است- در بازه‌ی زمانی تا ۱۰۰ ثانیه‌ی ابتدایی قابل مشاهده است، و همان‌طور که از رفتار خروجی شکل (۵-۷) انتظار می‌رود، سیگنال کنترل پس از صفر شدن خطا، ثابت باقی می‌ماند.

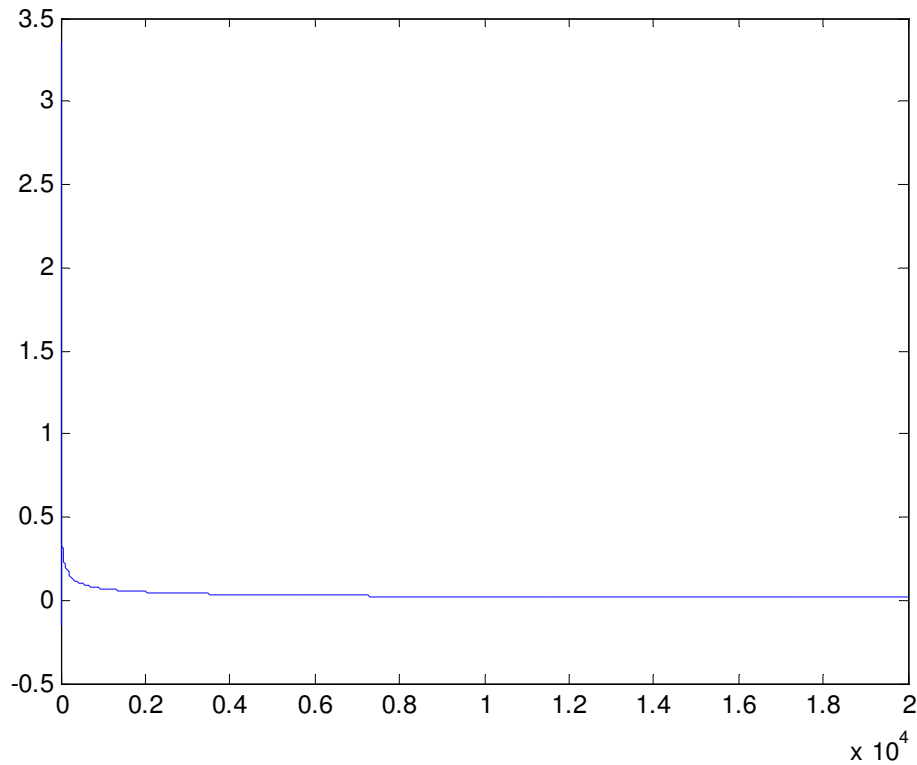


شکل (۵-۹): سیگنال کنترل  $u$  یا خروجی BELBIC

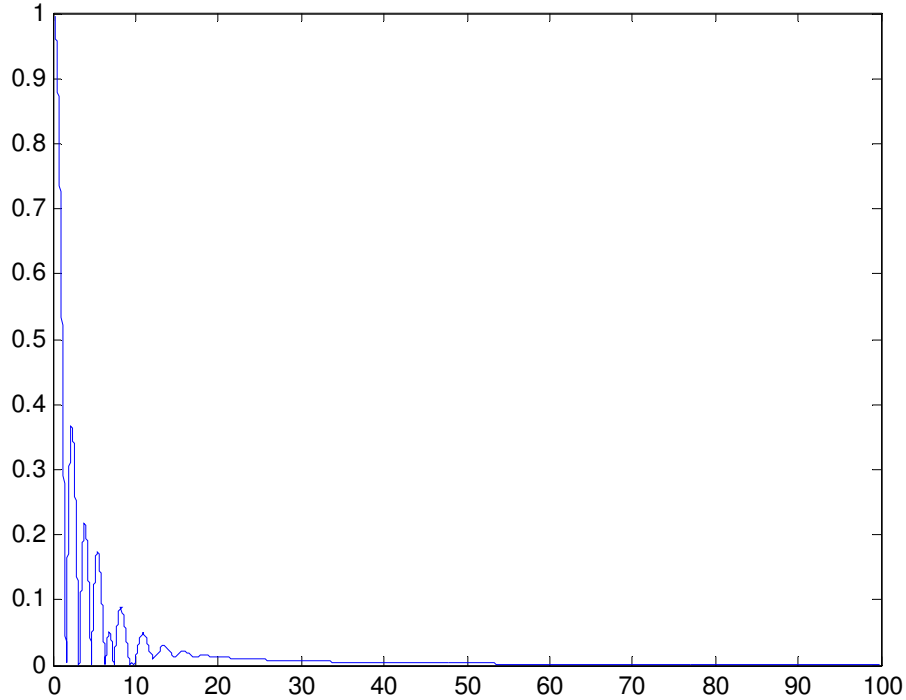
سپس به بررسی دیگر سیگنال‌های موثر در فرآیند کنترل توسط BELBIC می‌پردازیم. سیگنال‌های مهم دیگری که در عملکرد این کنترل‌کننده نقش حیاتی ایفا می‌کنند، دو سیگنال ورودی سیستم

هستند، یعنی سیگنال‌های احساسی  $S$  و عاطفی  $Rew$  هستند. در شکل (۵-۱۱) رفتار سیگنال احساسی و در شکل (۵-۱۰) رفتار سیگنال عاطفی قابل مشاهده‌اند.

همان‌طور که انتظار می‌رفت و در شکل‌ها هم مشاهده می‌شود ورودی احساسی رفتاری نسبتاً نرم حاصل از یک PI دارد که به سمت صفر میل می‌نماید و ورودی عاطفی که تنها تابع خطاست طی یک فرآیند نوسانی-مشابه خروجی- به صفر میل می‌کند.

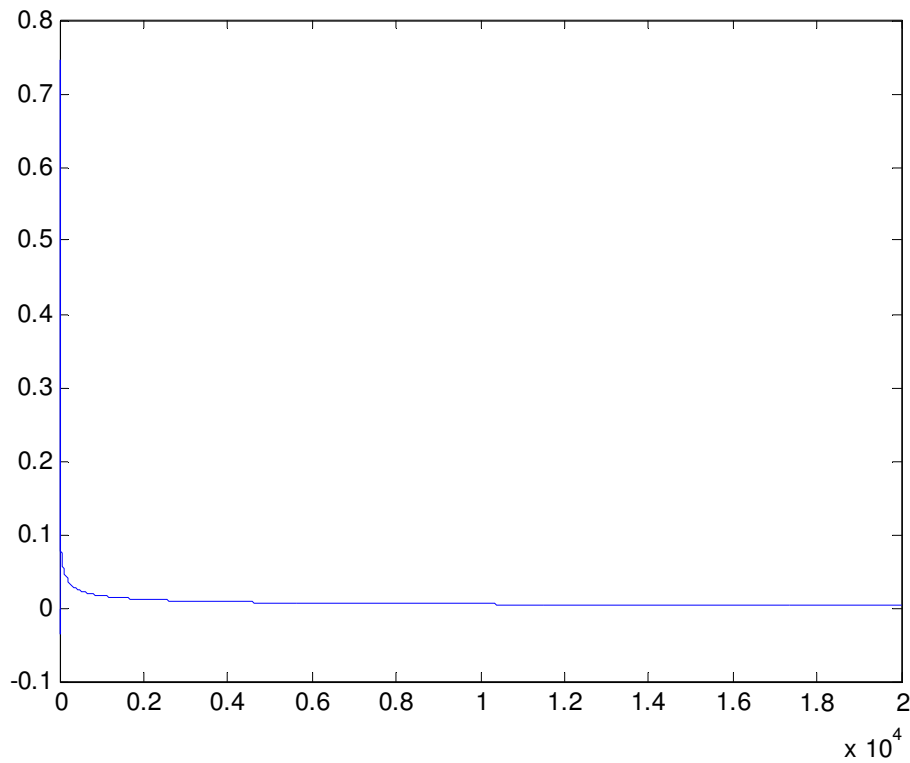


شکل (۵-۱۰): سیگنال احساسی  $S$  طی فرآیند کنترل در ۱۰۰ ثانیه‌ی ابتدایی

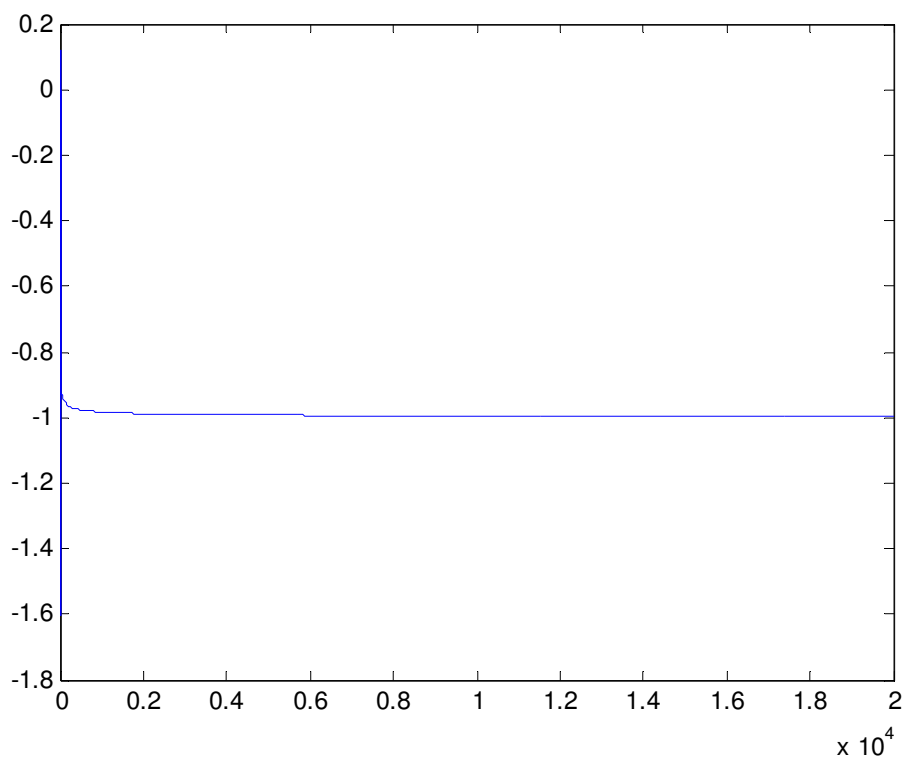


شکل (۵-۱۱): سیگنال عاطفی  $Rew$  طی فرآیند کنترل در ۱۰۰ ثانیه ابتدایی

در ادامه به بررسی درون BELBIC در طی ۱۰۰ ثانیه‌ی ابتدایی فرآیند کنترل پرداخته و سعی خواهیم نمود تا با سیگنال‌ها در داخل آن و رفتار آن‌ها تا حدودی آشنا شویم. اولین سیگنال‌های مورد توجه در این بخش خروجی دو قسمت مهم سیستم یعنی آمیگدالا و اوربیتوفران탈 هستند. رفتار خروجی این دو بخش در شکل (۵-۱۲) برای آمیگدالا و در شکل (۵-۱۳) برای اوربیتوفران탈 قابل مشاهده هستند. مشاهده می‌گردد که این دو سیگنال نیز مقادیر محدودی به خود می‌گیرند.

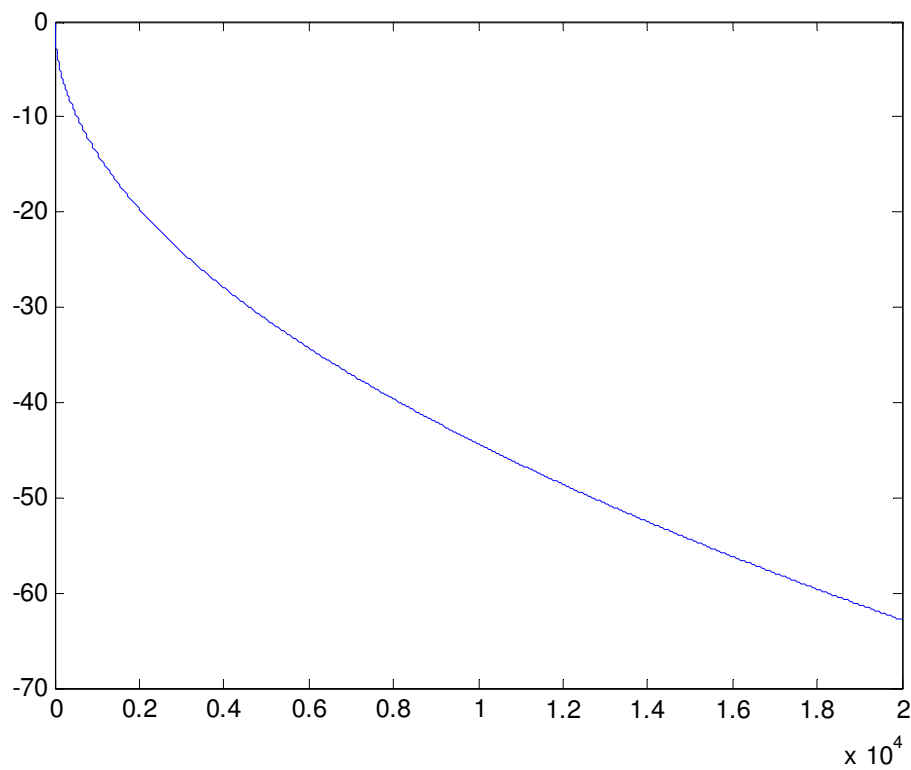


شکل (۵-۱۲) : خروجی آمیگدالا طی فرآیند کنترل

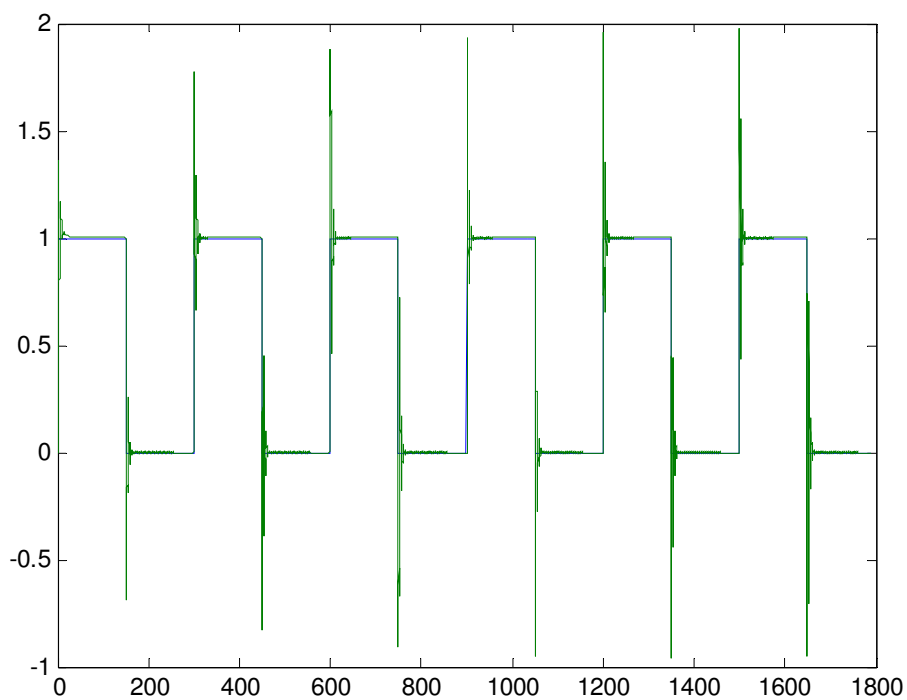


شکل (۵-۱۳) : سیگنال خروجی اوربیتوفورانتال طی فرآیند کنترل

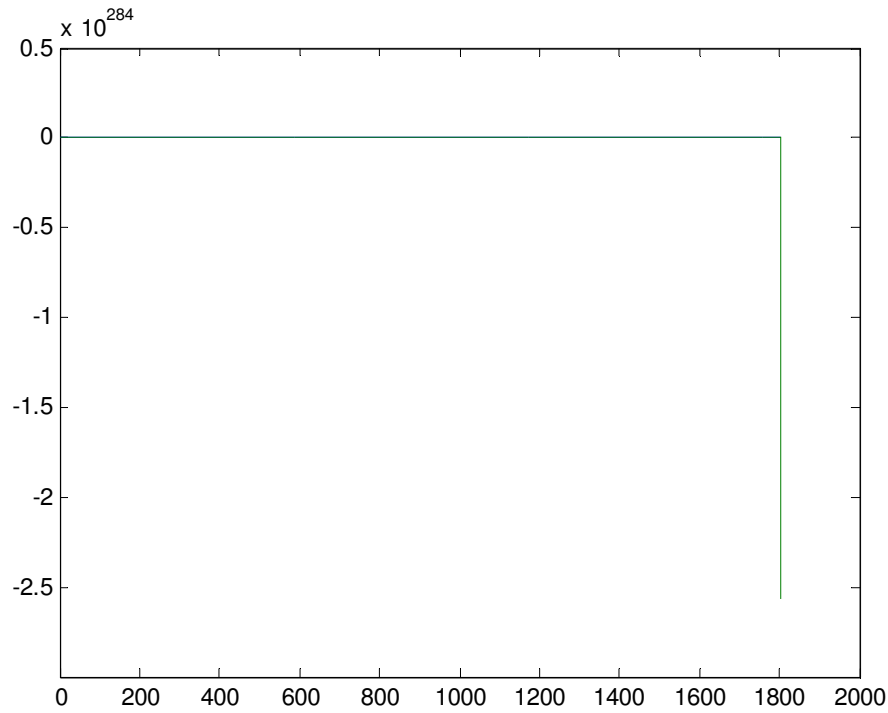
در این مرحله پس از بررسی سیگنال‌های بیرونی BELBIC، به مشاهده‌ی وضعیت پارامترهای داخلی این سیستم خواهیم پرداخت. تغییرات پارامتر  $W$  - ضریب بخش اوربیتوران‌تال - در طی ۱۰۰۰ ثانیه در شکل (۵-۱۴) مشاهده می‌شود. همان‌طور که دیده می‌شود، با وجود اینکه تمامی مقادیر، پارامترها و سیگنال‌های بیرونی سیستم رفتار مناسبی دارند، اما پارامترهای داخلی سیستم رشد بی‌رویه دارند و با افزایش زمان این سیر را ادامه می‌دهند. حال بجای یک پله‌ی ساده از یک قطار پالس (برای نمونه، در این شبیه‌سازی پالس‌هایی با دامنه‌ی ۱ و عرض ۱۵۰ ثانیه) استفاده می‌کنیم. با وجود اینکه رفتار خروجی سیستم همان‌طور که در شکل (۵-۱۵) مشاهده می‌شود، نسبتاً مناسب است، اما همان‌طور که دیده می‌شود در هر پله مقدار جهش در حال افزایش می‌باشد. در صورتی که زمان شبیه‌سازی زیاد شود اثر رشد بی‌رویه پارامترهای داخلی همان‌طور که در شکل (۵-۱۶) دیده می‌شود خود را نشان خواهد داد و خروجی سیستم در زمان‌های طولانی ناپایدار خواهد بود.



شکل (۵-۱۴) : سیگنال  $W$



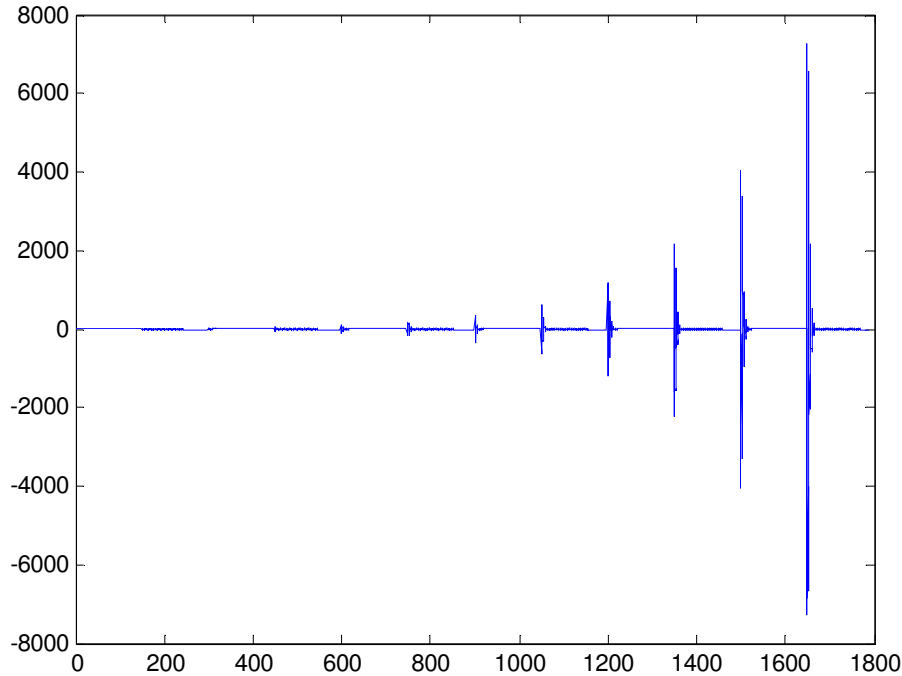
شکل (۵-۱۵) : خروجی سیستم به ورودی پالس‌های متوالی در زمان‌های قبل از ناپایداری



شکل (۵-۱۶): خروجی سیستم به ورودی پالس‌های متوالی پس از ناپایداری

با نگاه به شکل (۵-۱۷) که سیگنال کنترل سیستم را نمایش می‌دهد، می‌توان ناپایداری سیستم را از دیدگاه دیگری نیز مشاهده کرد، چرا که با گذر زمان، با اینکه ارتفاع پالس‌های مرجع ثابت بوده اما در هر پالس جدید (در هر دو جهت بالا و پایین رونده) مقدار سیگنال کنترل تولیدی افزایش می‌یابد و مقدار سیگنال کنترل در لحظات ابتدایی اعمال هر پله در حال سیر به سمت بینهایت است.

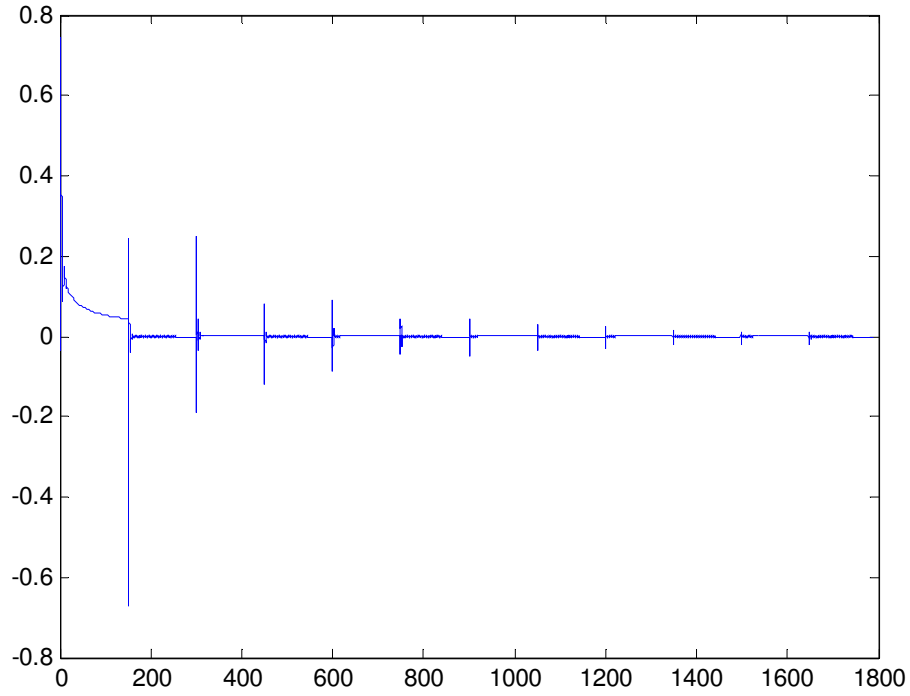




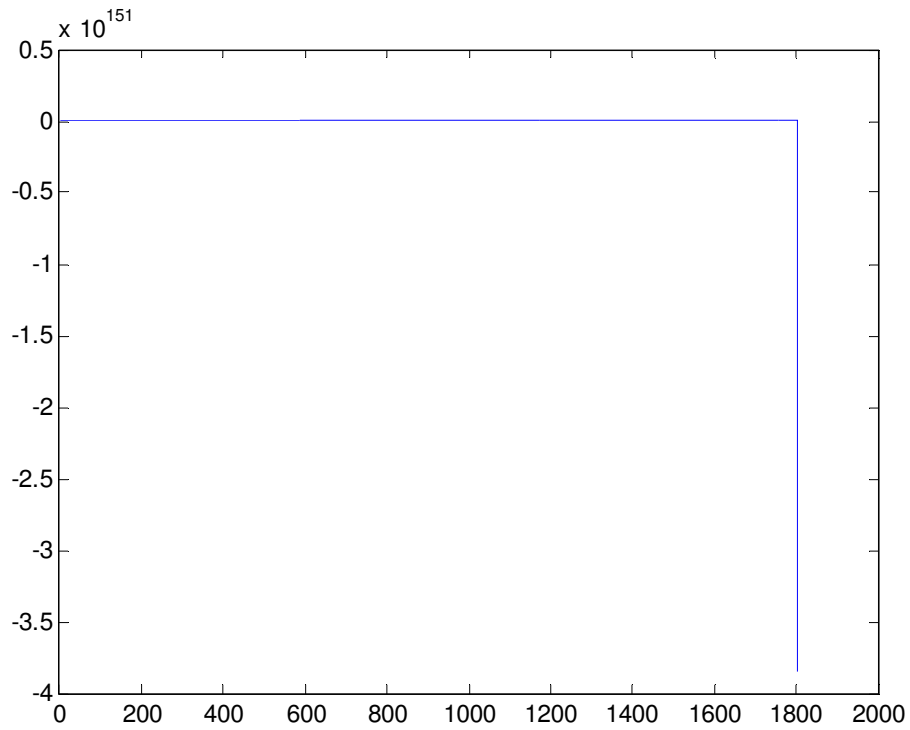
شکل (۵-۱۷) : سیگنال کنترل  $u$  در زمان‌های قبل از ناپایداری

بدلیل ناپایداری داخلی BELBIC انتظار می‌رود کل پارامترهای مرتبط داخل آن نیز ناپایدار باشند. در صورتیکه به صورت محدود به سیگنال خروجی آمیگدالا همانطور که در شکل (۵-۱۸) دیده می‌شود نگاه کنیم به نظر خواهد آمد که این سیگنال ناپایدار نمی‌باشد. اما در صورت افزایش زمان، ناپایداری این پارامتر داخلی سیستم نیز آشکار می‌گردد که در شکل (۵-۱۹) مشاهده می‌شود. علت این پدیده هم این است که خود این پارامتر به خودی خود ناپایدار نیست بلکه بعلت ناپایداری دیگر اجزای داخلی سیستم به سمت ناپایداری حرکت می‌کند.

نکته‌ی قابل توجه دیگری که باید به آن توجه شود این است که سیگنال خروجی آمیگدالا در حدود صفر است و در یک بازه‌ی محدود در اطراف صفر تغییرات جزئی می‌کند.

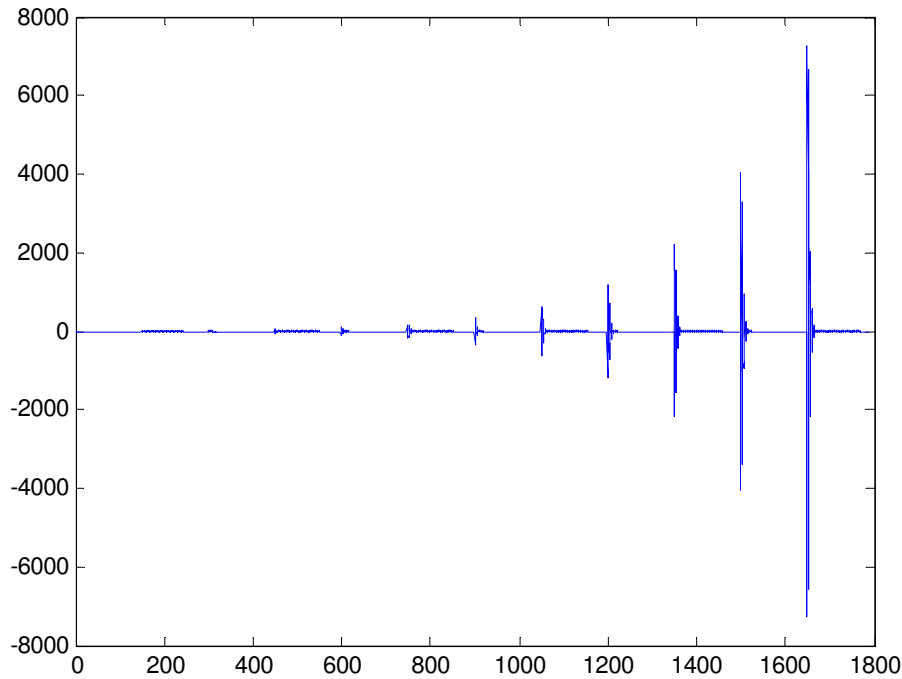


شکل (۵-۱۸): خروجی آمیگدالا قبل از ناپایداری (در زمان محدود)



شکل (۵-۱۹): خروجی آمیگدالا پس از ناپایداری

پارامتر داخلی دیگری که دارای ناپایداری است خروجی اوربیتوفران‌تال می‌باشد که همانطور که در شکل (۲۰-۵) مشاهده می‌گردد، ساختار ناپایداری آن شبیه به ساختار ناپایداری خروجی BELBIC و سیگنال کنترلی  $u$  است که با توجه به اینکه خروجی آمیگدالا نزدیک به صفر است قابل توجیه می‌باشد و شایان ذکر است که بدلیل اینکه این سیگنال با استفاده از  $W$  تولید می‌شود ناپایداری این بخش ذاتی است.

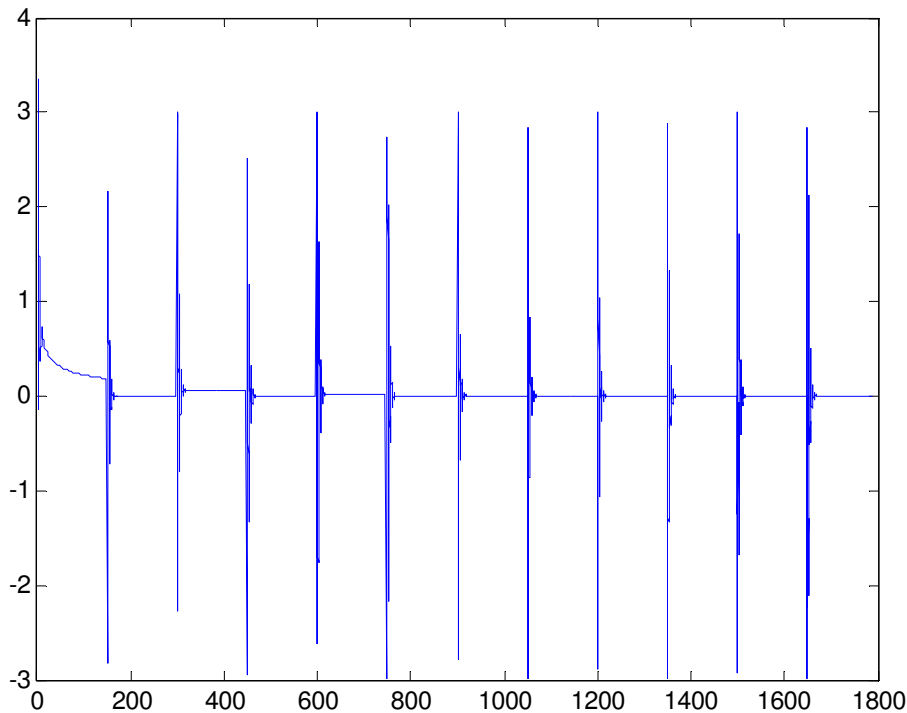


شکل (۲۰-۵) خروجی اوربیتوفران‌تال

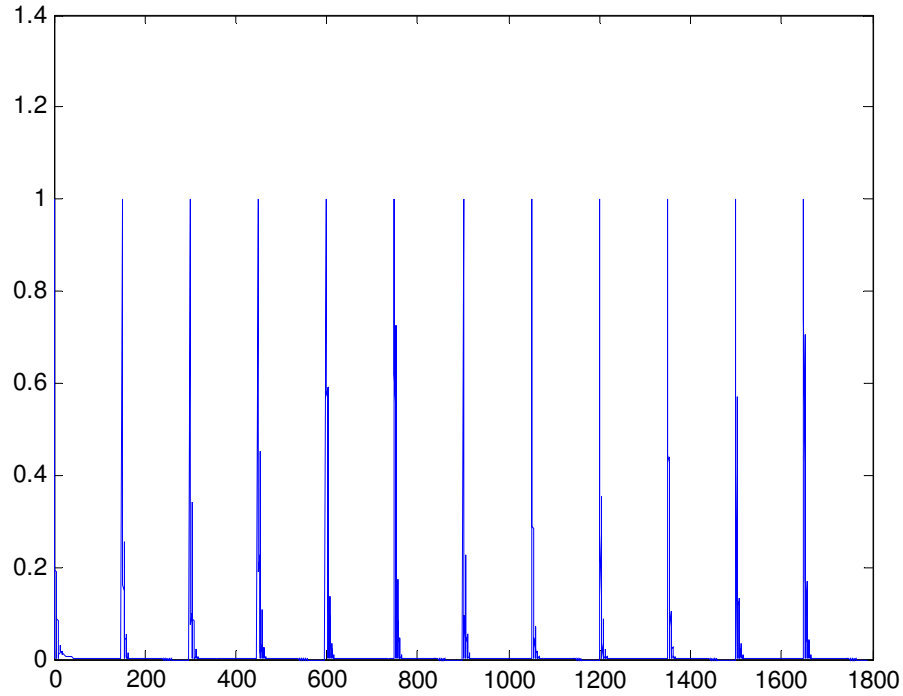
در صورتیکه بخواهیم به بررسی سیگنال‌های بیرونی سیستم برای ورودی پالس‌های متوالی بپردازیم، می‌توان رفتار ورودی احساسی را در شکل (۲۱-۵) و ورودی عاطفی را در شکل (۲۲-۵) مشاهده کرد. همانطور که دیده می‌شود؛ در صورتیکه تنها به بررسی سیگنال‌های بیرونی سیستم همچون این دو

سیگنال پردازیم، رفتار ناپایدار سیستم دیده نخواهد شد. هر چند همان‌طور که در شکل‌های قبلی بررسی شد سیستم به صورت داخلی دچار مشکل ناپایداری است.

نکته‌ی قابل توجه، رفتار مشابه سیستم با حالت تک پله است، چرا که در صورتیکه به بررسی بازه‌ی یک تک پله از بین سری پالس‌ها از شکل (۵-۲۱) پردازیم، دیده می‌شود که بسیار شبیه به شکل (۵-۱۰) می‌باشد و همین‌طور برای ورودی پالس‌های متوالی برای شکل (۵-۲۲) و شکل (۵-۱۱)، البته در مورد شکل (۵-۲۱) باید توجه داشت که پالس اول بسیار شبیه به حالت تک پله است و در پالس‌های بعدی رفتار نسبتاً ثابت شده و بجز در لحظات ابتدایی اعمال پله نزدیک صفر می‌باشد.

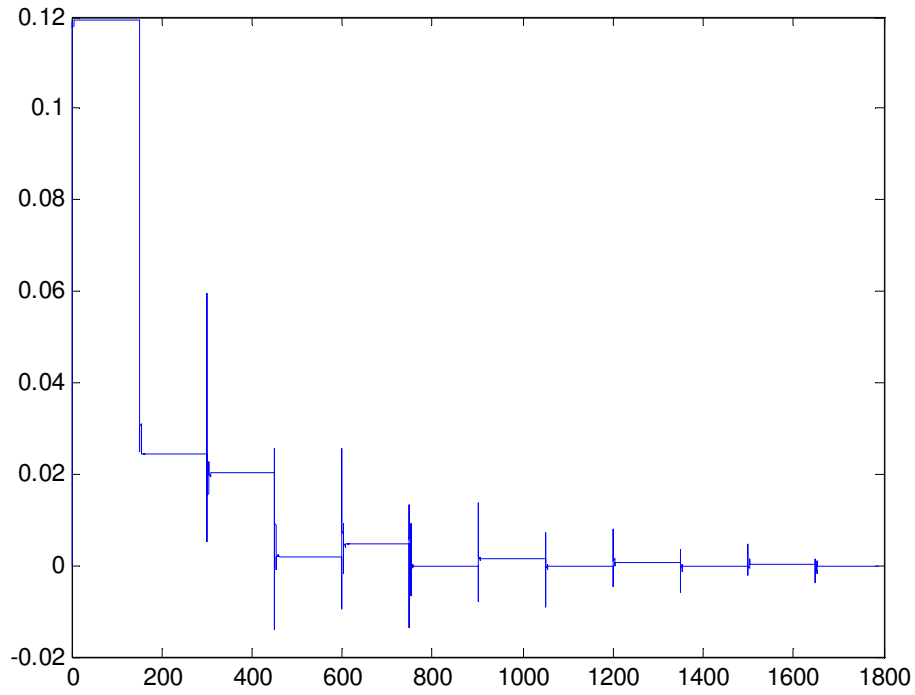


شکل (۵-۲۱): ورودی  $S$  زمان‌های قبل از ناپایداری برای ورودی پالس‌های متوالی

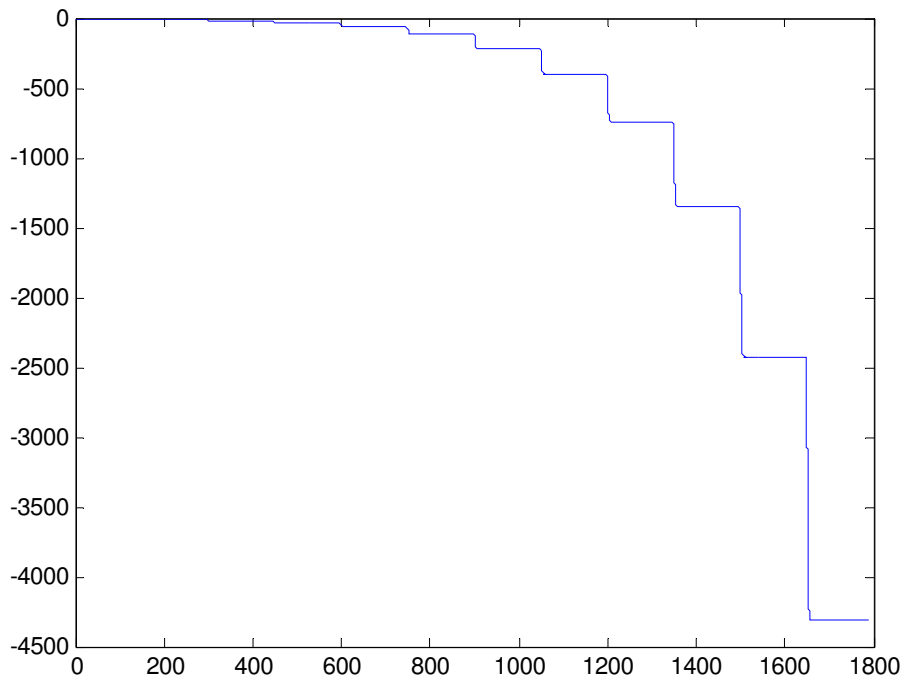


شکل (۵-۲۲): ورودی  $Rew$  زمان‌های قبل از ناپایداری برای ورودی پالس‌های متوالی

در این بخش دو پارامتر داخلی سیستم یعنی  $V$  در شکل (۵-۲۳) و  $W$  در شکل (۵-۲۴) مشاهده می‌شوند، همان‌طور که دیده می‌شود با اعمال هر پله هر دو این مقادیر شروع به حرکت به سمت مقداری جدید می‌کنند و پس از مدتی به مقدار نسبتاً ثابت می‌رسند و با توجه به شکل (۵-۲۳) دیده می‌شود که مقدار  $V$  تقریباً در اطراف صفر ثابت می‌شود اما مقدار  $W$  به صورت تصاعدی در حال رشد است. شکل (۵-۲۴) نیز این مساله را تایید می‌کند و عامل اصلی ناپایداری سیستم می‌شود.



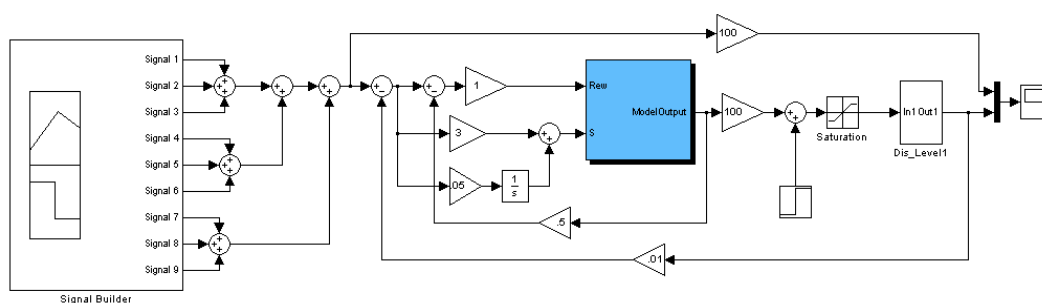
شکل (۵-۲۳): پارامتر  $V$  زمان‌های قبل از ناپایداری برای ورودی پالس‌های متوالی



شکل (۵-۲۴): پارامتر  $W$  زمان‌های قبل از ناپایداری برای ورودی پالس‌های متوالی

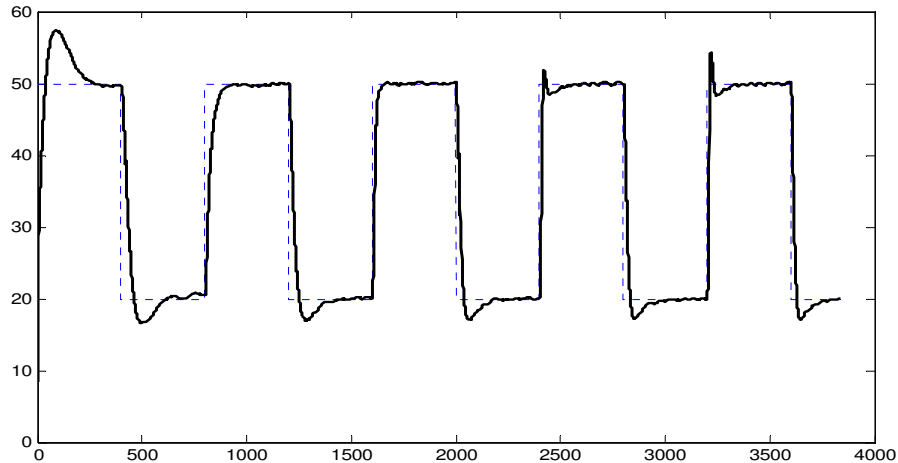
## ۵-۵ پیاده‌سازی BELBIC بر روی دستگاه کنترل سطح

پس از آشکار شدن مشکل ناپایداری داخلی سیستم BELBIC در بخش قبل، در این قسمت سعی داریم تا با پیاده‌سازی عملی ساختار بر سیستم کنترل سطح RT 512 بررسی کنیم که آیا مشکل ناپایداری در پیاده‌سازی نیز بروز خواهد نمود. برای این منظور از ساختاری به شکل (۲۵-۵) استفاده شد که در آن سیگنال عاطفی همانطور که در شکل نیز دیده می‌شود، خود خطا بوده و سیگنال احساسی از یک PI تولید شده و به سیستم BELBIC داده می‌شود.



شکل (۲۵-۵) ساختار کنترل سیستم کنترل سطح با استفاده از BELBIC

با استفاده از این ساختار نتیجه‌ای به شکل (۲۶-۵) بدست آمد، همان‌طور که انتظار می‌رفت و در شکل (۲۶-۵) نیز مشهود است، رفتار در ابتدا به سمت بهتر شدن پیش می‌رود و حتی در پله‌ی سوم جوابی نسبتاً مناسب بدست می‌آید اما بدلیل تداوم آموزش و ناپایداری داخلی رفتار سیستم به سمت خراب شدن پیش رفته و عملکرد نامطلوبی از خود نشان می‌دهد.



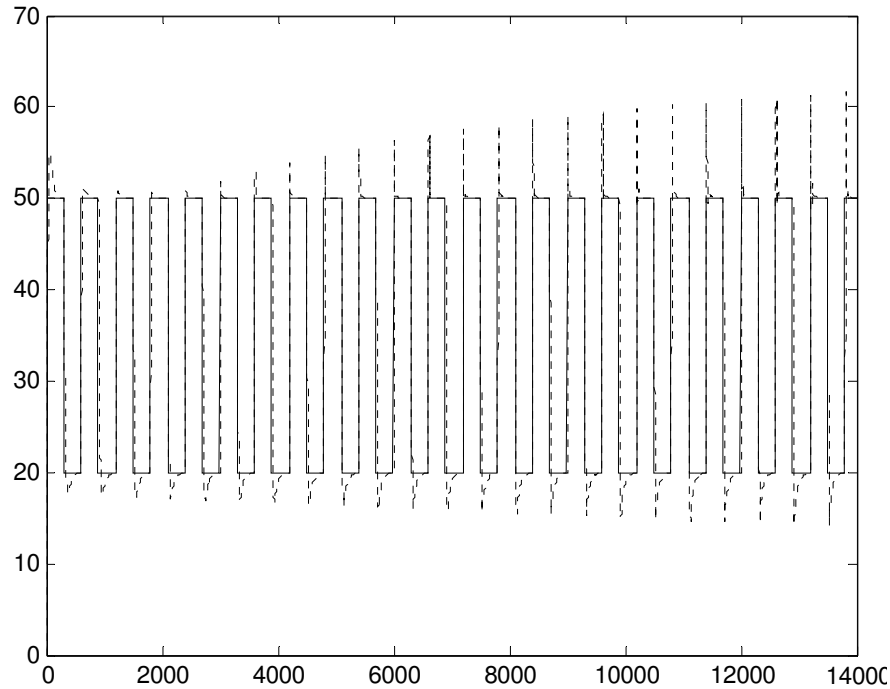
شکل (۵-۲۶): خروجی پیاده سازی BELBIC بر روی دستگاه کنترل سطح

بدلیل وجود مشکل ناپایداری داخلی و وجود خطر به سمت ناپایداری رفتن سیگنال کنترل و به تبع آن ناپایدار شدن خروجی سیستم و اینکه بزرگ شدن بیش از حد سیگنال کنترل و خروجی می تواند برای دستگاه خطرات جدی ایجاد کند، امکان ادامه دادن آزمایش وجود نداشت؛ به همین دلیل بر روی مدل غیرخطی دستگاه کنترل سطح به شبیه سازی پرداختیم تا از عملکرد سیستم اطمینان حاصل شود. نتیجه ی این شبیه سازی در شکل (۵-۲۷) مشاهده می شود.

شبیه سازی با تفاوت های جزئی که در رفتار از خود نشان می دهد اما در کل دارای ساختار نسبتاً یکسانی با حالت واقعی است، یعنی همانند آزمایش واقعی در ابتدا عملکرد بهبود یافته ولی پس از چند پله ی مناسب رفتار ناپایدار ظهور کرده و سیستم به سمت ناپایداری میل می کند.

این رفتار چه در شبیه سازی و چه در آزمایش واقعی ناپایداری داخلی BELBIC را به اثبات می رساند.





شکل (۵-۲۷): خروجی شبیه‌سازی BELBIC بر روی مدل غیر خطی کنترل سطح

## ۵-۶ تحلیل مشکل ناپایداری داخلی و ارزیابی راه‌حل

حال که ناپایداری داخلی سیستم BELBIC با نمونه‌های شبیه‌سازی و پیاده‌سازی واقعی به اثبات رسیده است، می‌باید در مرحله‌ی اول به دنبال علت ایجاد کننده‌ی این مساله گشت و در مرحله‌ی بعد سعی در ارزیابی راه‌حل برای رفع این مشکل نمود. به همین جهت پس از مجموعه‌ای از بررسی‌های دقیق بر روی سیگنال‌های داخلی کنترل‌کننده علت مساله آشکار شد. عامل ایجاد کننده این مساله در دو حافظه‌ای است که مقدار جدید  $V$  و  $W$  یعنی پارامترهای یادگیری آمیگدالا و اوربیتوفران탈 را در خود ذخیره می‌کنند. این عوامل بدلیل داشتن ساختار حافظه‌ای، رفتاری شبیه انتگرال‌گیر از خود به نمایش می‌گذارند و پس از مدت زمانی به سمت بینهایت میل می‌کنند.

با بررسی سیستم‌های کنترل حلقه بسته که در آن‌ها نیز از انتگرال‌گیر استفاده شده است مشخص می‌گردد که مشکل به سمت بینهایت رفتن خروجی انتگرال‌گیر در صورت به اشباع رفتن خروجی کنترل در آن‌ها نیز مشاهده می‌شود [۷۶، ۷۷] که به آن پدیده‌ی پایان‌پذیری انتگرال ( $IW^1$ ) می‌گویند. برای رفع این مشکل در آن سیستم‌ها راه‌حلی که ارائه می‌گردد استفاده از ساختار ضد پایان‌پذیری انتگرال‌گیر ( $IAW^2$ ) می‌باشد که در اینجا نیز سعی می‌کنیم از این روش بهره‌برداری کنیم. در روش IAW اساس کار بر این است که عمق اشباع شدن سیگنال خروجی انتگرال‌گیر از طریق یک بلوک اشباع، بوسیله‌ی محاسبه‌ی تفاضل دو سر این بلوک تشخیص داده می‌شود. علامت‌های سیگنال‌های دو طرف بلوک به گونه‌ای انتخاب می‌شود که عمق اشباع به صورت یک سیگنال منفی ظاهر گردد. یک ضریب بر این سیگنال اعمال می‌شود تا این سیگنال تا حدودی تضعیف گردد تا سرعت جلوگیری از اشباع از طریق آن طبق خواسته‌ی طراح تنظیم شود. سپس این سیگنال با مقدار ورودی به انتگرال‌گیر جمع می‌شود که البته بدلیل علامت منفی که دارد باعث کاهش و نهایتاً صفر شدن مقدار ورودی به انتگرال‌گیر می‌شود. با این کار مقدار عمق اشباع انتگرال‌گیر محدود شده و بسته به مقدار ورودی به انتگرال‌گیر امکان خارج شدن سریع سیستم از اشباع نیز وجود دارد.

---

<sup>1</sup> Integral Windup

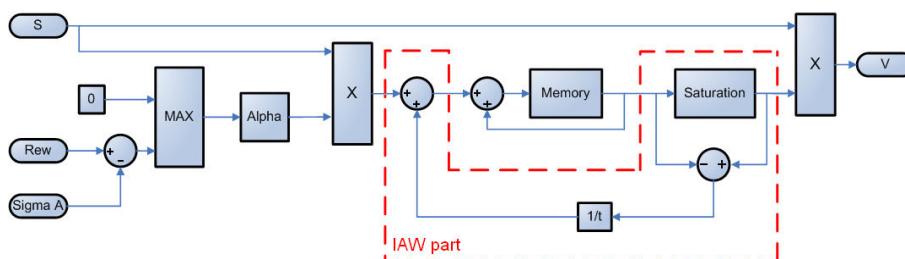
<sup>2</sup> Integral Anti Windup

در درون سیستم BELBIC دو بخش وجود دارد که بدلیل استفاده از انتگرال‌گیر در درون آن‌ها اشباع

پیش می‌آید، به همین منظور بر روی این دو بخش از IAW استفاده می‌کنیم. ساختار سیستم بهبود

یافته آمیگدالا در شکل (۲۸-۵) مشاهده می‌شود. بخش IAW به صورت خط‌چین مجزا شده است.

در مورد اوربیتوفران‌تال نیز از ساختار مشابه ساختار اشاره شده در شکل (۲۸-۵) استفاده شده است.



شکل (۲۸-۵): اعمال روش IAW بر روی آمیگدالا

این سیستم را BELBIC بهبود یافته می‌نامیم و در ساختاری به شکل (۲۹-۵) به منظور کنترل از آن

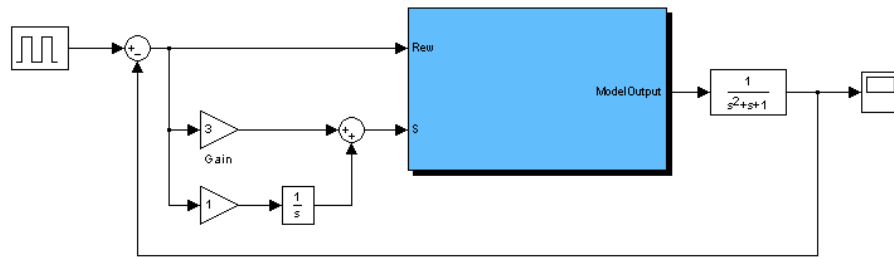
بهره می‌بریم.

## ۷-۵ کاربرد BELBIC بهبود یافته

در صورتیکه شبیه‌سازی به صورت شکل (۲۹-۵) اجرا گردد، نتیجه‌ای به شکل (۳۰-۵) بدست خواهد

آمد. همانطور که مشاهده می‌گردد سیستم دیگر دچار مشکل به سمت ناپایداری رفتن و داشتن

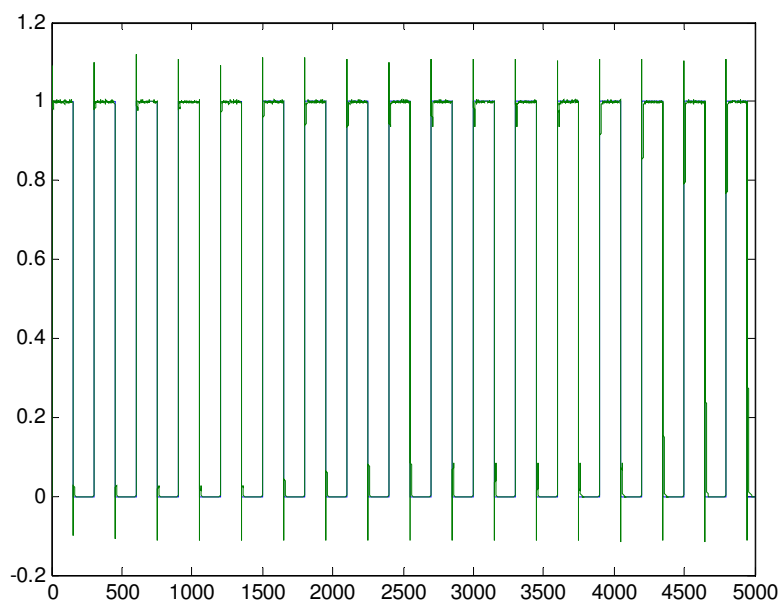
ناپایداری داخلی نیست.



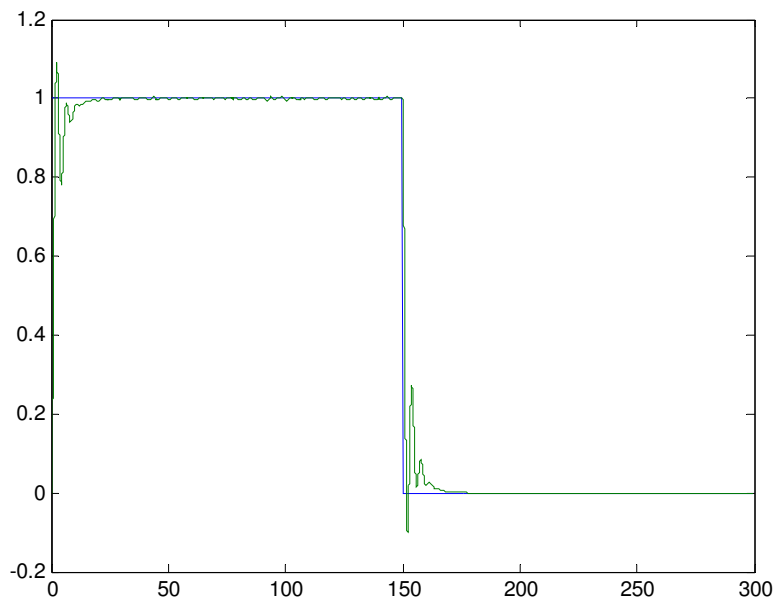
شکل (۵-۲۹) : اعمال BELBIC دارای IAW بر روی تابع خطی

عملاً با استفاده از مدل BELBIC بهبود یافته سیستم در لحظات ابتدایی رفتاری شبیه به گذشته داشته و به سمت بهبود پیش می‌رود و پس از رسیدن به نتایج نسبتاً مطلوب بدلیل اشباع شدن سیستم، عملکرد در همان حالت مطلوب ثابت باقی می‌ماند و از ناپایدار شدن BELBIC، سیگنال کنترل و به تبع آن‌ها خروجی کلی سیستم جلوگیری می‌شود.

در صورتیکه بخواهیم عملکرد ابتدایی سیستم را نیز مشاهده کنیم، رفتار سیستم در دو پله‌ی اول در شکل (۵-۳۱) که لحظات ابتدایی شکل (۵-۳۰) است دیده می‌شود.



شکل (۳۰-۵) : خروجی شبیه‌سازی بر روی تابع خطی توسط BELBIC بهبود یافته



شکل (۳۱-۵) : لحظات ابتدایی شکل (۳۰-۵)

## ۵-۸ تنظیم BELBIC بهبود یافته

حال این سوال مطرح می‌گردد که این کنترل‌کننده چگونه تنظیم می‌گردد و مقادیر حدود اشباع (بالا و پایین) چگونه و بر اساس چه معیاری محاسبه و تنظیم می‌گردند. برای شرح دقیق این مساله الگوریتم تنظیم تمامی ضرایب سیستم جهت کارکرد صحیح BELBIC را شرح می‌دهیم.

به منظور استفاده از BELBIC در ابتدا می‌بایست با استفاده از شناختی که از سیستم تحت کنترل و BELBIC داریم و در برخی موارد با استفاده از سعی و خطا به یک ساختار مناسب جهت تولید سیگنال‌های مورد نیاز برای BELBIC دست یابیم. منظور تولید سیگنال‌های عاطفی و احساسی برای سیستم است.

در مرحله‌ی بعد سعی می‌کنیم تا ضرایب داخلی BELBIC را تنظیم نماییم تا نتایج مناسب از نظر زمانی حاصل آیند. در قدم بعد به تنظیم ضرایب بیرونی و ساختار بیرونی BELBIC می‌پردازیم تا نسبتاً به بهترین عملکرد مورد نیاز قابل دسترسی برسیم.

نکته‌ی قابل توجه در این ۳ بخش این است که طراح می‌باید از ابتدا نیاز خود را از استفاده از BELBIC مشخص کند، برای مثال در صورت نیاز به کنترل فرآیندی از یک قطار پالس، یا در صورت استفاده‌ی حالت ماندگار از یک تک پله و یا برای کاربردهای رباتیکی از ورودی‌های درجه بالاتر استفاده کند و ضرایب را برای آن ورودی خاص تنظیم نماید.

در این مرحله با زیاد کردن ضریب آموزش و افزایش زمان شبیه‌سازی به بررسی طولانی مدت سیستم با امکان ناپایدار شدن می‌پردازیم، طراح با بررسی پاسخ، آن بخش از جواب را که مناسب‌ترین پاسخ مطلوب می‌باشد را انتخاب می‌کند. طراح با بررسی سیگنال‌های داخلی، دو سیگنال  $V$  و  $W$  را بررسی کرده و مقدار آن‌ها را در لحظات مطلوب بدست آورده و در BELBIC بهبود یافته این مقادیر را برای حدود اشباع اعمال می‌کند.

سپس با استفاده از BELBIC بهبود یافته شبیه‌سازی را تکرار می‌کنیم و ابتدا ضرایب داخلی و سپس ضرایب خارجی را مجدداً تنظیم می‌نماییم تا به بهترین پاسخ ممکن دست یابیم. در نهایت می‌توان الگوریتم تنظیم BELBIC را به صورت زیر خلاصه نمود:

۱. تعیین هدف کنترل و نوع ورودی مورد نظر
۲. انتخاب ساختار مناسب جهت تولید سیگنال‌های ورودی BELBIC با استفاده از شناخت از سیستم تحت کنترل، BELBIC و نوع ورودی مورد نظر
۳. تنظیم ضرایب داخلی BELBIC به منظور رسیدن به پارامترهای زمانی نسبتاً مناسب
۴. تنظیم ضرایب خارجی BELBIC تا دسترسی به عملکرد مطلوب خروجی سیستم
۵. افزایش ضریب آموزش و شبیه‌سازی برای زمان طولانی
۶. بدست آوردن زمان پاسخ مطلوب

۷. یافتن مقدار ضرایب  $V$  و  $W$  در هنگامی که زمان پاسخ مطلوب است. این مقادیر به عنوان

حدود اشباع آن‌ها در BELBIC بهبود یافته بکار می‌رود

۸. تکرار مراحل ۳ و ۴ با استفاده از BELBIC بهبود یافته

در ادامه سعی داریم تا مراحل تنظیم BELBIC بهبود یافته را با استفاده از یک مثال شرح دهیم،

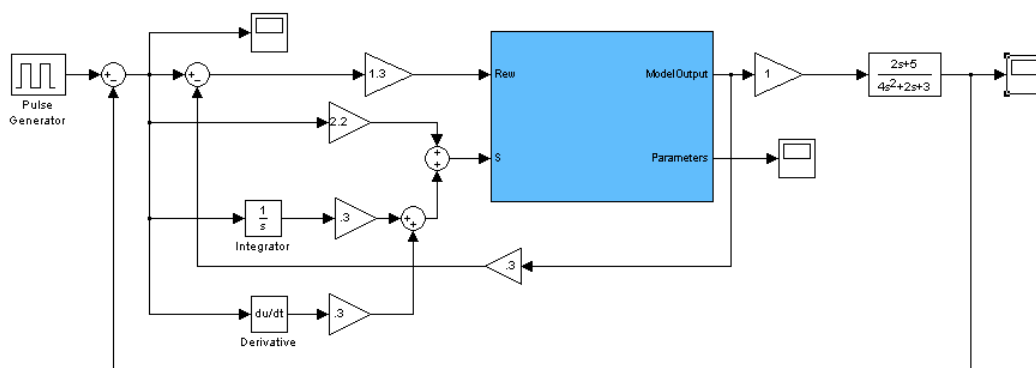
برای این منظور سیستم با معادله‌ی (۲-۵) را در نظر می‌گیریم.

$$G_{(s)} = \frac{2s+5}{4s^2+2s+3} \quad (2-5)$$

هدف خود را پاسخ مطلوب به مجموعه‌ای از پالس‌ها با مقادیر مختلف در نظر می‌گیریم. ساختاری به

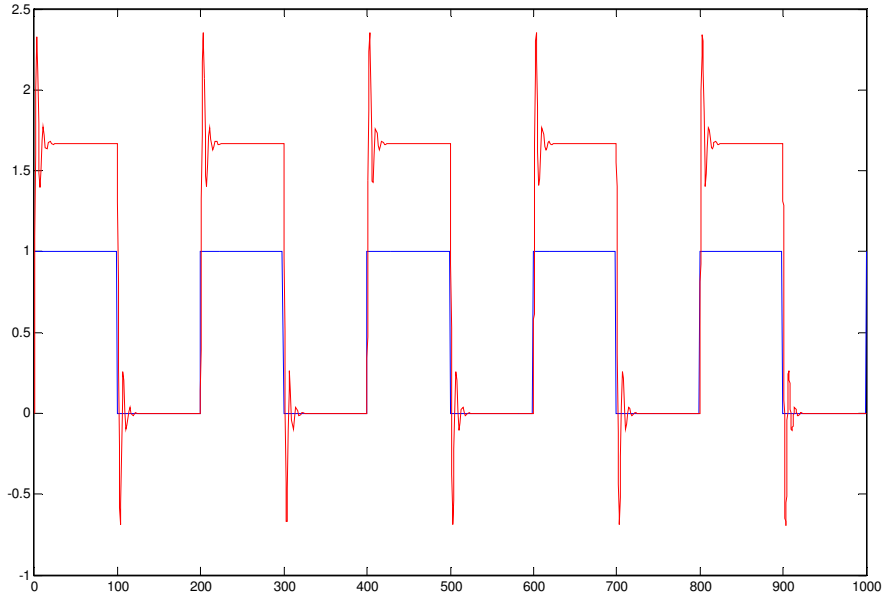
شکل (۳۲-۵) برای کنترل این سیستم انتخاب می‌کنیم و با شبیه سازی به پاسخی به شکل (۳۳-۵)

دست یافتیم.



شکل (۳۲-۵): ساختار مورد استفاده جهت کنترل سیستم (۲-۵) با استفاده از BELBIC

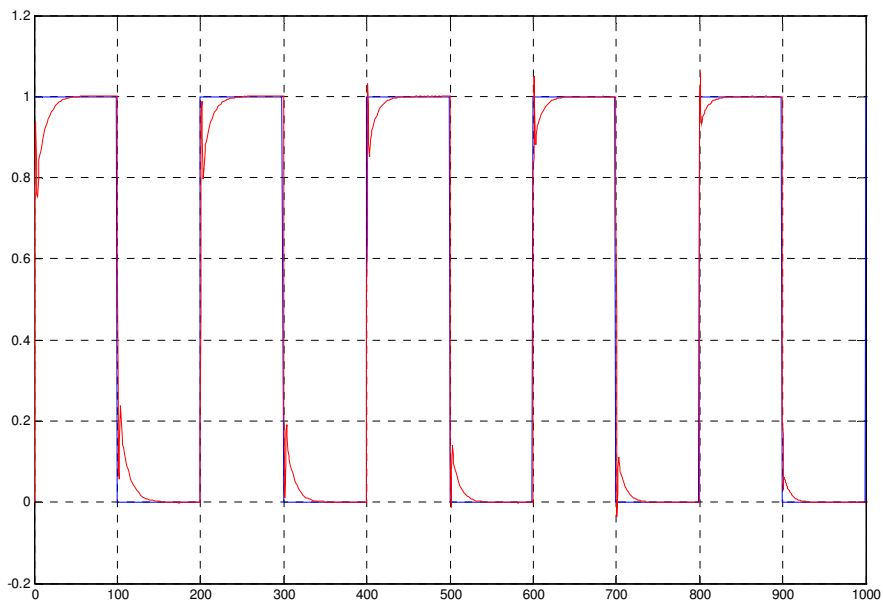




شکل (۳۳-۵) : بالا (قرمز): پاسخ سیستم (۲-۵) با استفاده از ساختار شکل (۳۲-۵) پایین (آبی): ورودی مرجع

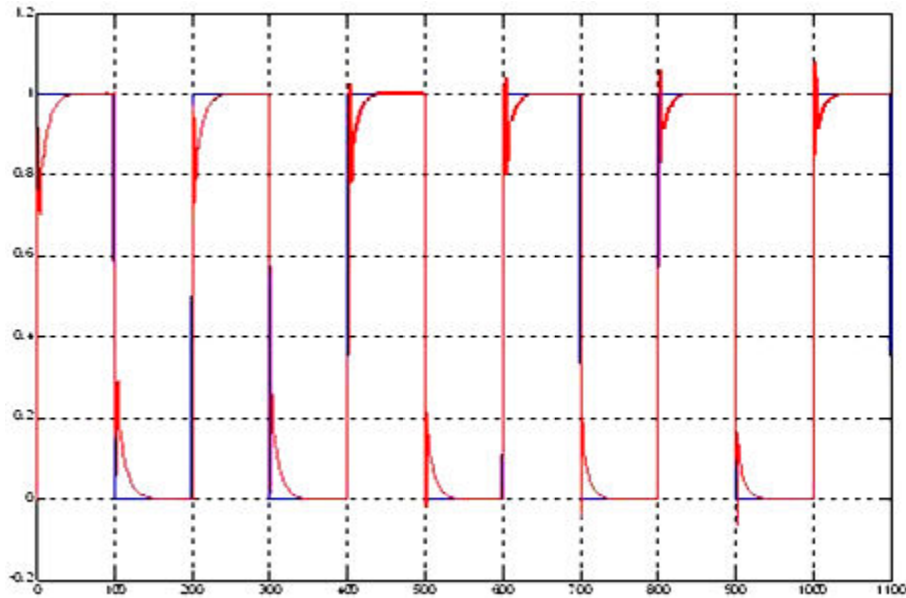
در این مرحله ضرایب داخلی و خارجی سیستم را تنظیم نمودیم و با اجرای مجدد شبیه‌سازی به

خروجی به شکل (۳۴-۵) دست یافتیم.



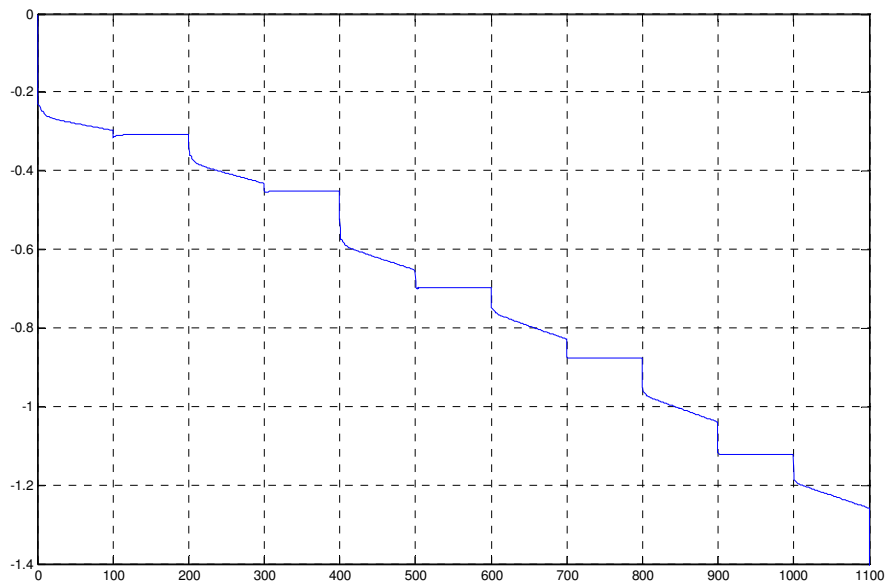
شکل (۳۴-۵) : خروجی سیستم (۲-۵) با استفاده از BELBIC پس از تنظیم ضرایب داخلی و خارجی

حال مرحله‌ی ۵ از مراحل طراحی را برای این سیستم تحقق می‌دهیم. شکل خروجی به صورت شکل (۳۵-۵) می‌باشد و همانطور که دیده می‌شود پاسخ مطلوب در لحظات حدود ۲۵۰ ثانیه بدست آمده است، با توجه به شکل (۳۶-۵) مقدار  $V$  در لحظه‌ی مطلوب ۲۵۰ ثانیه مقدار ۴- می‌باشد و با توجه به شکل (۳۷-۵) مقدار سطح اشباع  $W$  نیز برابر با ۰.۱۵ بدست می‌آید.

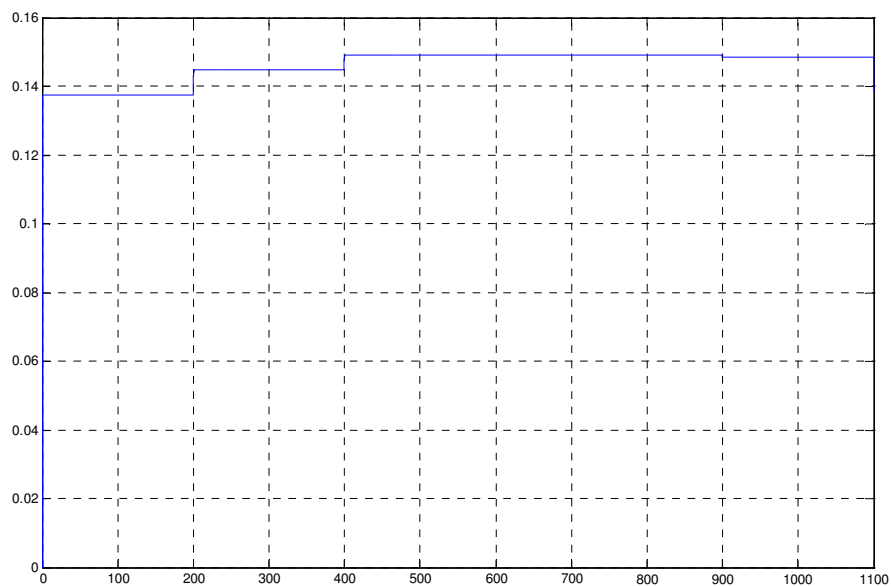


شکل (۳۵-۵): خروجی سیستم (۲-۵) با استفاده از BELBIC برای زمان‌های طولانی به منظور مشاهده‌ی ناپایداری

داخلی سیستم



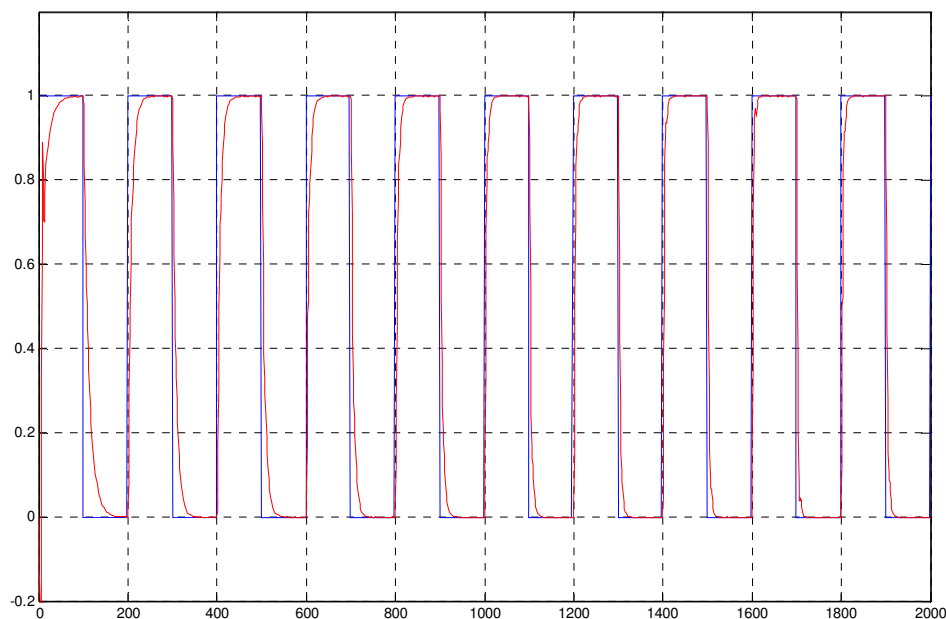
شکل (۳۶-۵) : ضریب داخلی  $V$  برای کنترل سیستم (۲-۵)



شکل (۳۷-۵) : ضریب داخلی  $W$  برای کنترل سیستم (۲-۵)

حال این مقادیر را در سطوح اشباع داخلی BELBIC بهبود یافته اعمال می‌کنیم و پس از تنظیم

مجدد ضرایب، در نهایت به پاسخ مطلوب به شکل (۳۸-۵) دست یافتیم.



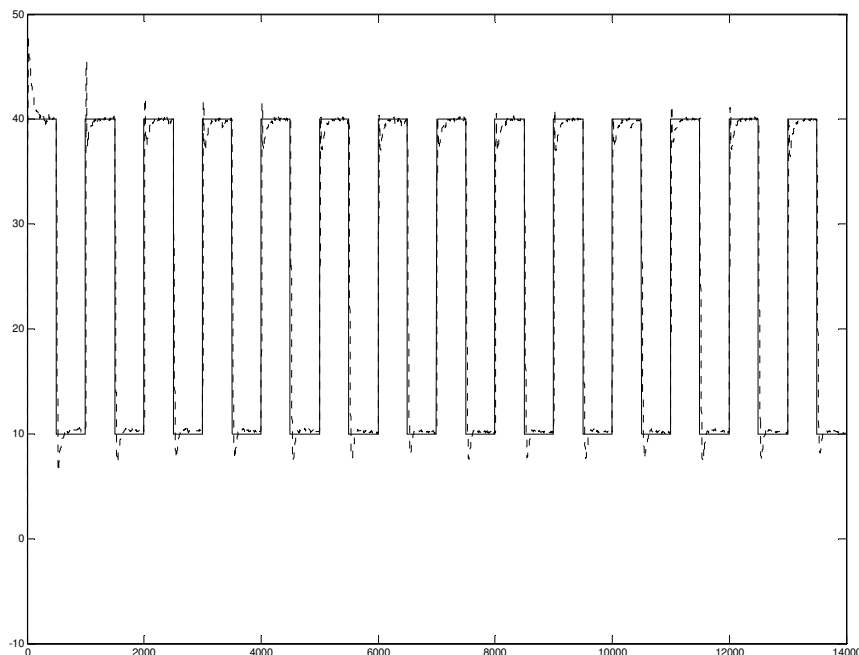
شکل (۳۸-۵) : پاسخ نهایی سیستم (۲-۵) با استفاده از BELBIC بهبود یافته

### ۹-۵ پیاده‌سازی BELBIC بهبود یافته بر سیستم کنترل سطح

با اعمال مراحل تنظیم ذکر شده در بخش قبل بر روی کنترل‌کننده‌ی اعمالی بر دستگاه کنترل سطح

در نهایت پاسخ مطلوب به شکل (۳۹-۵) بدست آمد که همانطور که دیده می‌شود در دراز مدت نیز

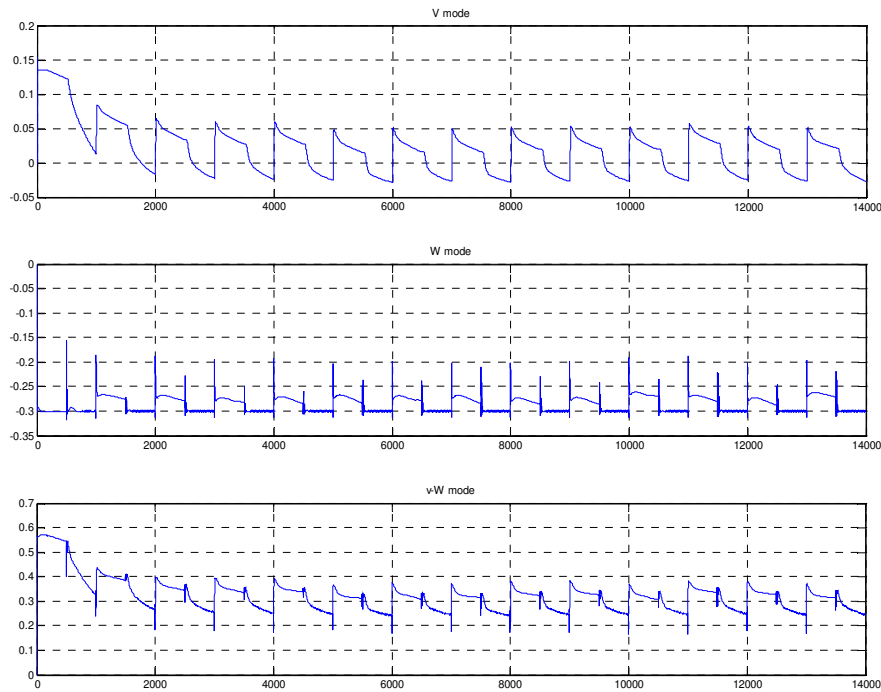
عملکرد نسبتاً ثابت داشته و اثری از ناپایداری نیز در آن دیده نمی‌شود.



شکل (۵-۳۹) : پیاده‌سازی BELBIC بهبود یافته بر روی دستگاه کنترل سطح بدون تنظیم ضرایب

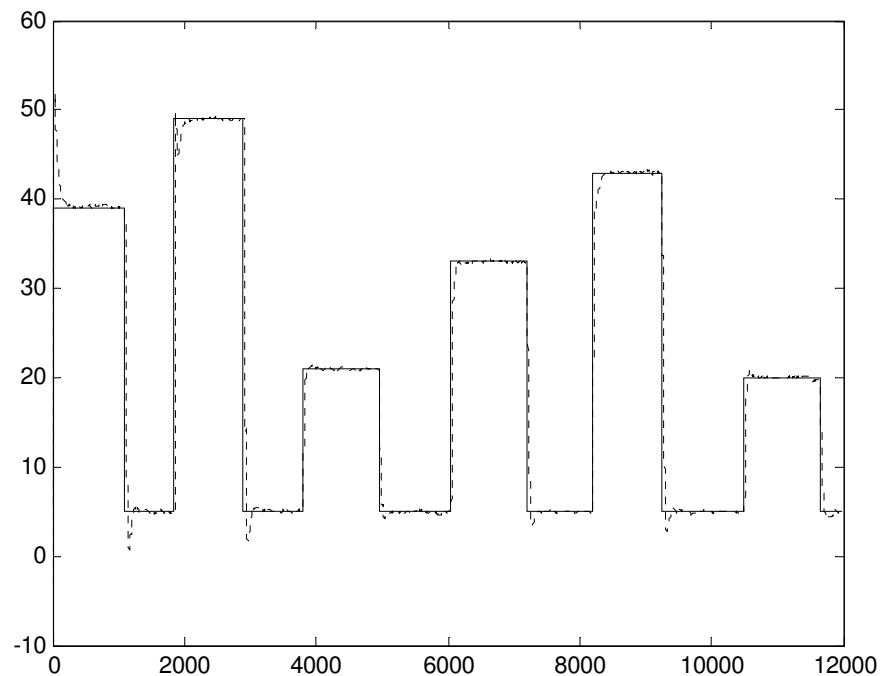
با بررسی سیگنال‌های داخلی BELBIC بهبود یافته که قبلاً دچار ناپایداری می‌شدند و باعث ناپایداری داخلی کل سیستم می‌گشتند، همانطور که در شکل (۵-۴۰) دیده می‌شود، این پارامترها به حدود مشخصی رسیده و دیگر به سمت افزایش یا کاهش بی‌رویه نمی‌روند و عملاً نتیجه‌ی مطلوب از بخش IAW بدست آمده است و لذا این اطمینان حاصل شده است که از BELBIC بهبود یافته می‌توان برای کنترل سیستم‌های واقعی بهره برد.

منحنی سوم شکل (۵-۴۰) نشان می‌دهد که BELBIC عملاً یک بهره‌ی غیرخطی ایجاد کرده است. این بهره با توجه به تغییرات ورودی مرجع نسبت به خروجی سیستم تحت کنترل ابتدا افزایش پیدا می‌کند تا سیستم حلقه بسته سریع‌تر شود. سپس با رسیدن خروجی به حالت ماندگار مقدار بهره نیز کاهش می‌یابد.



شکل (۴۰-۵) الف) پارامتر  $V$ ، ب) پارامتر  $W$ ، ج) گین غیر خطی تطبیقی  $2V - W$

در بخش انتهایی قصد داریم تا پاسخ سیستم را برای مجموعه‌ای از پله‌ها با مقادیر مختلف مورد بررسی قرار دهیم. رفتار سیستم کنترل در نقاط مختلف متفاوت بوده و رفتار کاملاً غیر خطی از خود نشان می‌دهد. به همین منظور ابتدا مراحل طراحی BELBIC بهبود یافته را برای سیستم با همان ساختار مورد استفاده در بخش قبل انجام دادیم و در نهایت پیاده‌سازی صورت گرفت که نتیجه‌ی آن در شکل (۴۱-۵) مشاهده می‌شود که با توجه به ساختار سیستم پاسخ کاملاً مناسب بوده و کنترل‌کننده توانسته بر رفتار غیرخطی سیستم غلبه کند و پاسخی مناسب از آن ارایه کند.

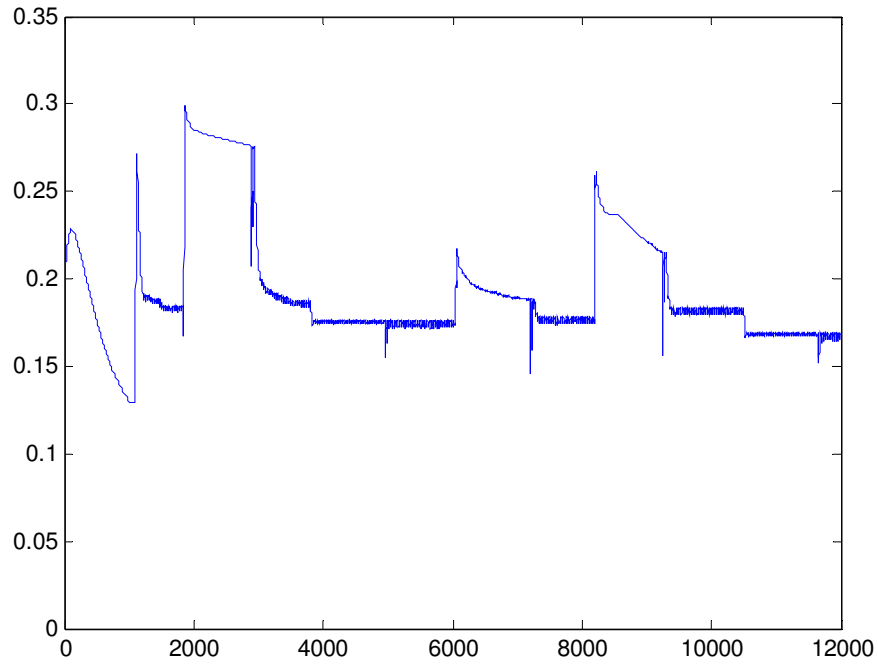


شکل (۴۱-۵) : خروجی پیاده‌سازی کنترل‌کننده بر سیستم کنترل سطح با ضرایب تنظیم شده

با توجه به اینکه BELBIC عملاً یک گین غیرخطی تطبیقی است، تغییرات این پارامتر سیستم را نیز

در پیاده‌سازی عملی بر سیستم کنترل سطح در شکل (۴۲-۵) مشاهده می‌کنیم. همانطور که دیده

می‌شود این گین نیز محدود بوده و به سمت ناپایداری حرکت نمی‌کند.



شکل (۴۲-۵) : گین غیر خطی  $2V - W$  تولید شده توسط BELBIC بهبود یافته



## فصل ۶

### کنترل دستگاه توپ و صفحه

#### ۶-۱ مقدمه

در این فصل قصد داریم تا با استفاده از روش ارایه شده و بهبود یافته در فصل‌های قبل به منظور کنترل یک سیستم واقعی دیگر بهره ببریم. برای این منظور به طراحی و تنظیم BELBIC بهبود یافته برای سیستم توپ و صفحه که در بخش (۴-۲) شرح آن ارایه شد می‌پردازیم تا از رفتار و قابلیت این روش اطمینان حاصل شود.

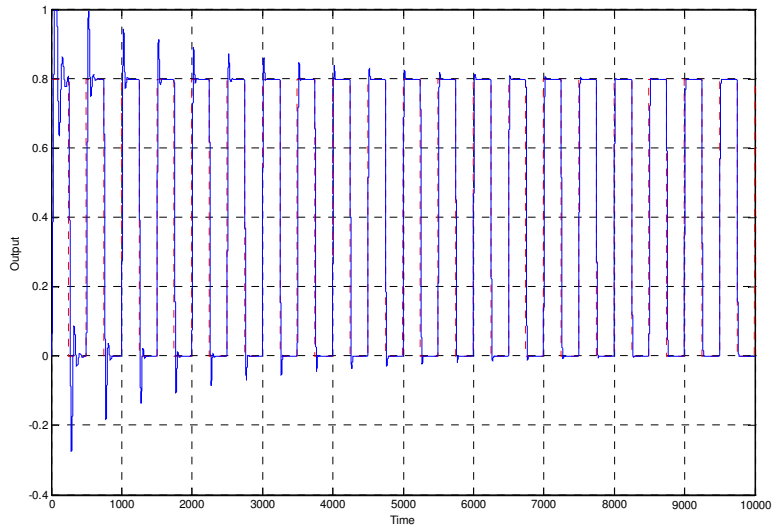
ضمناً در این فصل سعی خواهیم نمود تا از BELBIC بهبود یافته برای کنترل این سیستم با ورودی‌های مختلف استفاده کنیم تا از عملکرد مطلوب این روش برای کاربردهای مختلف کنترلی اطمینان حاصل شود. برای این منظور علاوه بر قطار پالس، ورودی شیب، تک پله، پله‌های با ارتفاع‌های مختلف و ورودی سینوسی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند.

## ۲-۶ شبیه سازی بر روی مدل خطی دستگاه توپ و صفحه

در مرحله‌ی اول سیستم BELBIC بهبود یافته را برای ورودی قطار پالس تنظیم نمودیم که در این تنظیم ضرایب سیستم طبق جدول زیر می‌باشند. با استفاده از این ضرایب پاسخ سیستم به شکل (۱-۶) بدست آمد که با انتظارات تطبیق دارد، هر چند پاسخ در چند پله‌ی اول چندان مناسب نیست اما با مقداری یادگیری عملکرد سیستم رو به بهبود رفته و پاسخ‌های نسبتاً مناسبی حاصل می‌آید.

جدول (۱-۶): مقادیر داخلی BELBIC بهبود یافته‌ی تنظیم شده برای سیستم توپ و صفحه

مقدار پارامتر	شرح پارامتر	نام پارامتر
۰.۰۰۰۱	ضریب آموزش آمیگدالا	$k_a$
۰.۰۰۰۱	ضریب آموزش اوربیتوفران‌تال	$k_o$
۰.۰۰۰۱	ضریب آموزش تلاموس	$k_{th}$
۱۰۰۰	ضریب IAW	$t$
۱	حد بالای اشباع آمیگدالا	$UA$
-۱	حد پایین اشباع آمیگدالا	$DA$
۱	حد بالای اشباع اوربیتوفران‌تال	$UO$
-۱	حد پایین اشباع اوربیتوفران‌تال	$DO$



شکل (۱-۶): پاسخ شبیه‌سازی به ورودی پالس‌های متوالی با ضرایب تنظیم شده

برای اینکه فرآیند بهبود کیفیت پاسخ با استفاده از این سیستم به خوبی دیده شود، بخش‌های ابتدایی

شکل (۱-۶) در شکل (۲-۶) به صورت واضح‌تر آورده شده است؛ همانطور که در این شکل به خوبی

دیده می‌شود BELBIC بهبود یافته به مرور با گذشت زمان رفتار مناسب‌تری از خود به نمایش

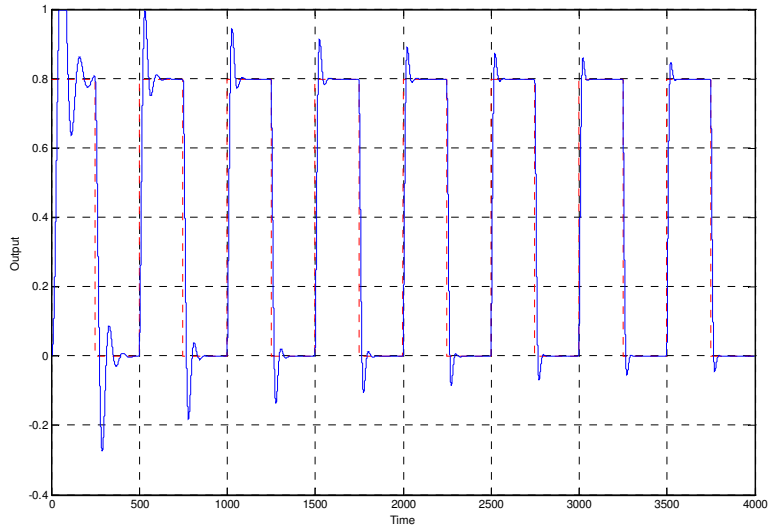
می‌گذارد.

به منظور بررسی عملکرد حالت ماندگار سیستم، رفتار لحظات انتهایی پاسخ با استفاده از BELBIC

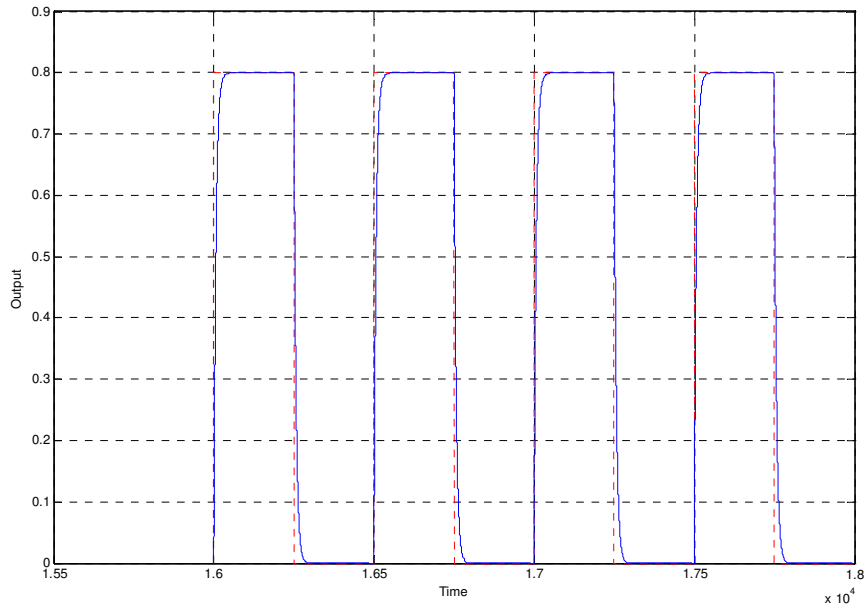
بهبود یافته در شکل (۳-۶) نمایش داده شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود سیستم خطای

حالت ماندگار ندارد و دارای پاسخ نسبتاً سریعی نیز هست که نشان می‌دهد کنترل‌کننده خواسته‌های

طراحی ما را برآورده است.



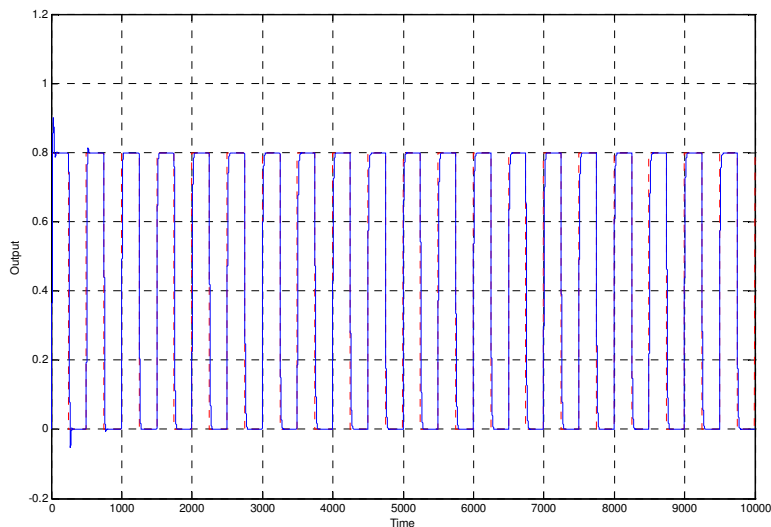
شکل (۲-۶): پاسخ شکل (۱-۶) در لحظات ابتدایی



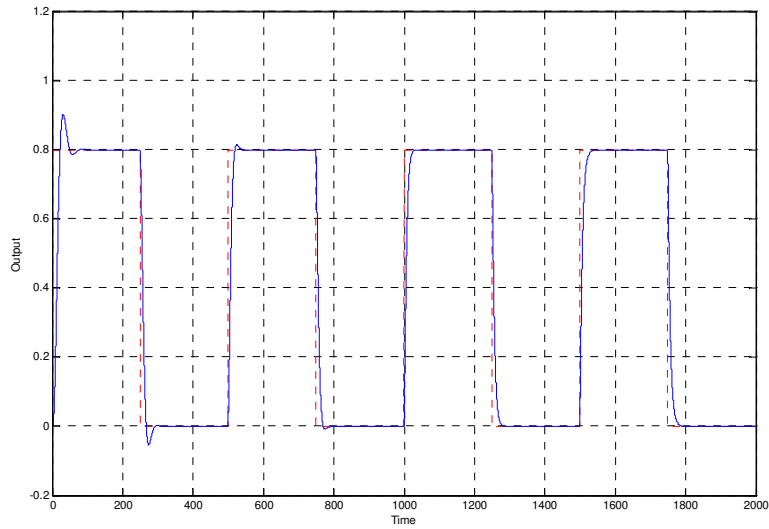
شکل (۳-۶): پاسخ شکل (۱-۶) در لحظات انتهایی

### ۳-۶ بررسی اثر ضریب آموزش

در این قسمت می‌خواهیم اثر پارامتر ضریب آموزش را بر عملکرد بیرونی سیستم بررسی کنیم، برای همین منظور، بدون تغییر اجزای داخلی سیستم تنها اقدام به افزایش ضریب آموزش نمودیم. پاسخ سیستم با ضریب آموزش دو برابر شده در شکل (۴-۶) مشاهده می‌شود و با مقایسه‌ی این شکل با شکل (۱-۶) می‌توان دید که سیستم بسیار سریع‌تر به حالت پایدار خود رسیده است. برای بررسی چند پله‌ی اول پاسخ به منظور درک بهتر سرعت آموزش می‌توان به شکل (۵-۶) که بخش ابتدایی شکل (۴-۶) می‌باشد مراجعه نمود. با مقایسه‌ی شکل (۵-۶) و شکل (۲-۶) این تفاوت به شکل قابل ملاحظه‌ای مشهود می‌باشد.



شکل (۴-۶): پاسخ به پالس‌های متوالی با ضرایب آموزش دو برابر شده

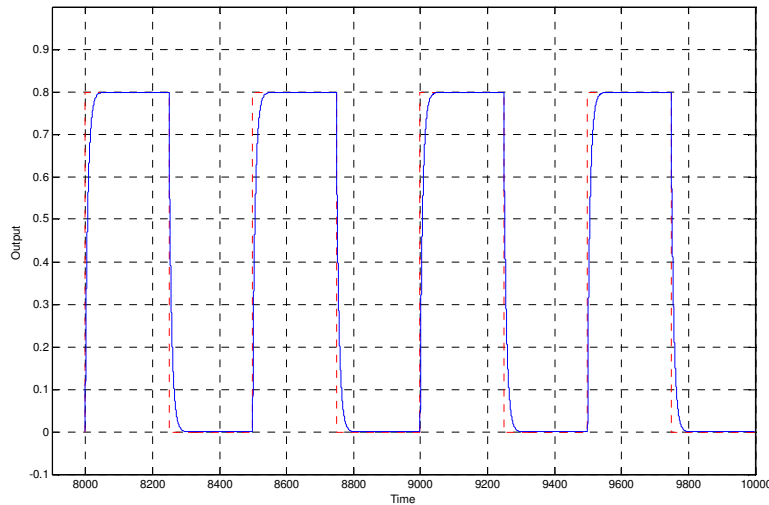


شکل (۵-۶) : پاسخ شکل (۴-۶) در لحظات ابتدایی

پاسخ در لحظات انتهایی شکل (۴-۶) در شکل (۶-۶) مشاهده می‌شود و همانطور که دیده می‌شود و

انتظار نیز می‌رفت پاسخ در لحظات پایانی با تغییر ضریب آموزش تغییر نمی‌کند، چرا که این ضریب

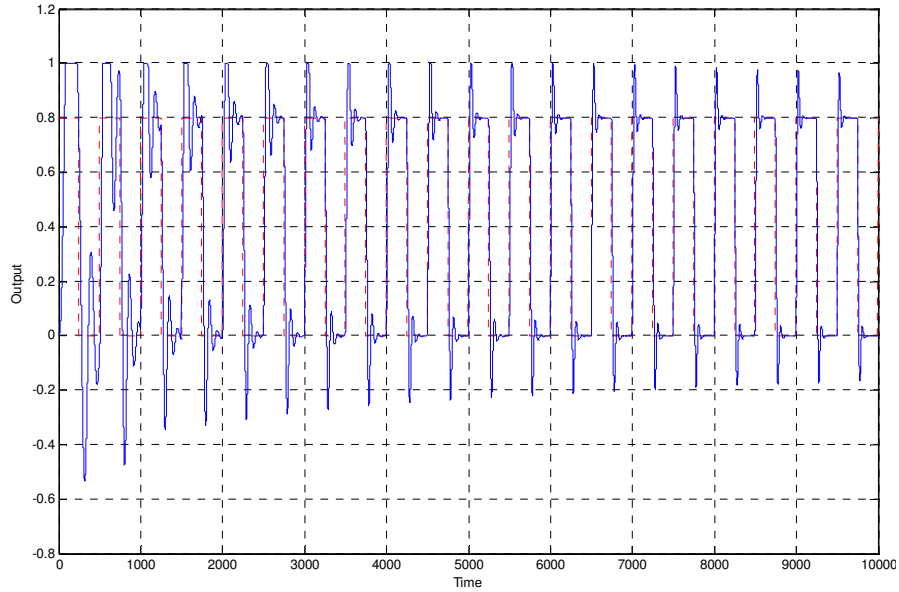
تنها سرعت عملکرد یادگیری را تحت تاثیر قرار می‌دهد.



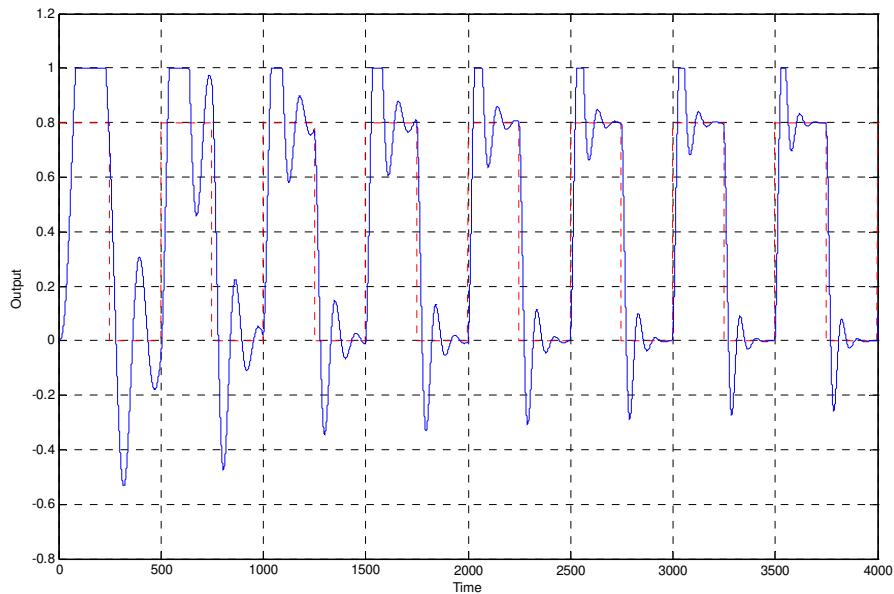
شکل (۶-۶) : پاسخ شکل (۴-۶) در لحظات انتهایی

در مرحله‌ی بعد به بررسی اثر کاهش ضریب آموزش در عملکرد سیستم می‌پردازیم. برای این منظور ضریب آموزش سیستم را از حالت اول که نتیجه‌ی آن در شکل (۶-۱) مشاهده شد نصف کردیم و شبیه‌سازی را تکرار نمودیم، با این شبیه‌سازی به پاسخی به شکل (۶-۷) دست یافتیم که همانطور که دیده می‌شود و انتظار نیز می‌رفت عملکرد سیستم کند شده و در زمان برابر با حالت اول نتوانسته است به جواب مناسبی دست پیدا کند.

در صورتیکه لحظات ابتدایی پاسخ شکل (۶-۷) را همانطور که در شکل (۶-۸) دیده می‌شود مورد بررسی قرار دهیم دیده می‌شود که سیستم بسیار آهسته در حال یادگیری است و نتوانسته عملکرد خود را چندان بهبود دهد. این مساله را می‌توان در مقایسه شکل (۶-۸) با شکل (۶-۲) و یا شکل (۶-۵) به خوبی مشاهده کرد. ضمناً در این پاسخ‌ها بدلیل بودن حد اشباع  $\pm 1$  دیده می‌شود که پاسخ در پیک‌های بالا و پایین دچار برش می‌شود که نامطلوب بودن عملکرد را تشدید می‌کند.



شکل (۶-۷): پاسخ سیستم با ضریب آموزش کاهش یافته



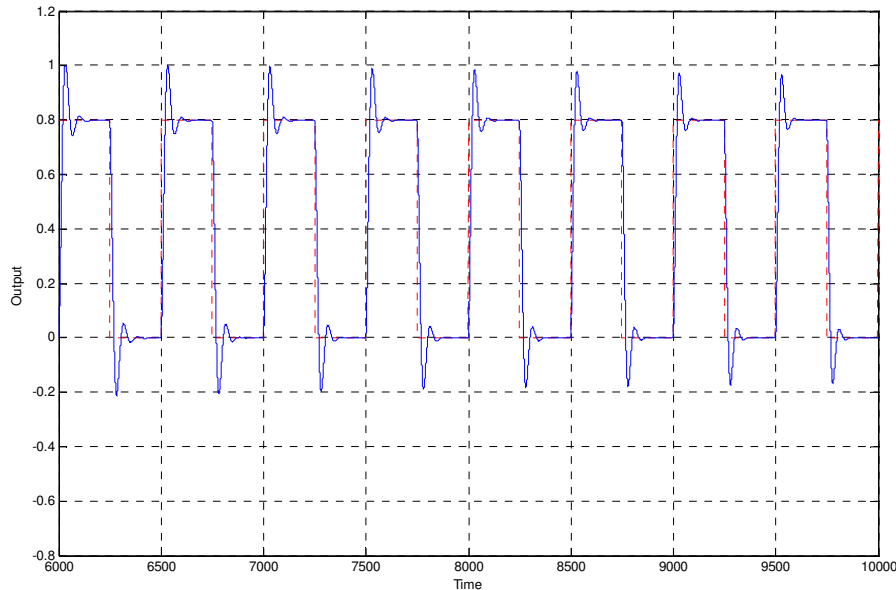
شکل (۶-۸): شکل (۶-۷) در لحظات ابتدایی

با مشاهده‌ی پاسخ در لحظات انتهایی همانطور که در شکل (۶-۹) دیده می‌شود، با اینکه رفتار

یادگیرنده‌ی سیستم سعی در بهبود عملکرد پاسخ داشته و تا حدودی نیز موفق شده است، اما باز هم در



مقایسه با دو حالت سریع‌تر در لحظات پایانی باز هم موفق به کسب نتیجه‌ی چندان مطلوبی نشده است.



شکل (۶-۹) : شکل (۶-۷) در لحظات انتهایی

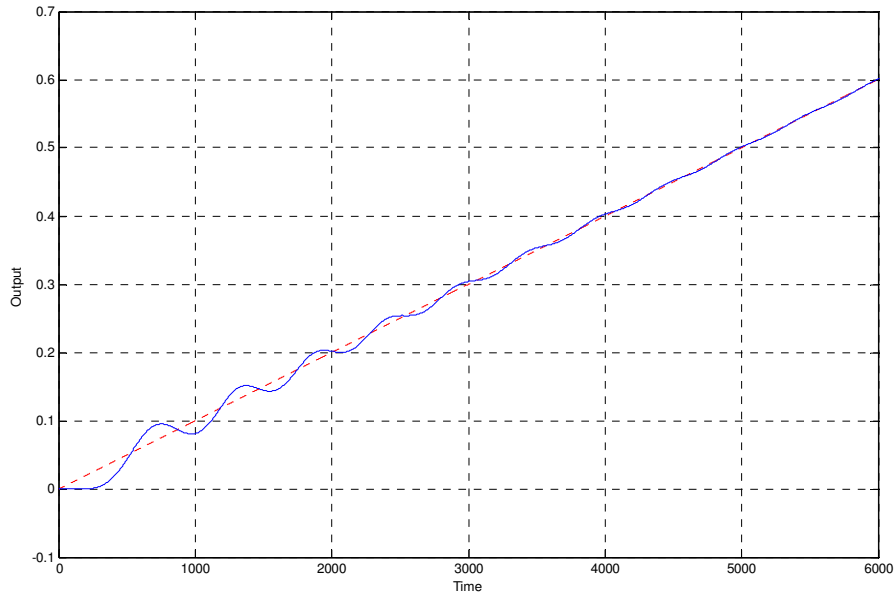
با مقایسه‌ی این ۳ آزمایش می‌توان اثر ضریب یادگیری را در عملکرد سیستم در بدست آوردن پاسخ مطلوب مشاهده کرد که در صورت کوچک بودن زیاد ضریب آموزش، کنترل‌کننده توان تطبیق خود با سیستم را نداشته و یا بسیار کند خواهد بود، به نحوی که عملکرد مطلوب از سیستم بدست نمی‌آید و یا نیازمند گذر زمان بسیار طولانی است.

### ۶-۴ عملکرد سیستم با ورودی شیب

در این قسمت سعی خواهیم نمود تا عملکرد BELBIC را در کنترل سیستم با ورودی شیب مورد بررسی قرار دهیم. به همین منظور ابتدا بدون اینکه ضرایب سیستم را برای این هدف تنظیم نماییم و با

همان ضرایب قبل، به سیستم ورودی شیب اعمال نمودیم که پاسخ آن در شکل (۶-۱۰) قابل مشاهده است. همانطور که دیده می‌شود، با اینکه پاسخ از کیفیت چندان مطلوبی برخوردار نیست اما

BELBIC توانسته است عمل کنترل را انجام دهد.

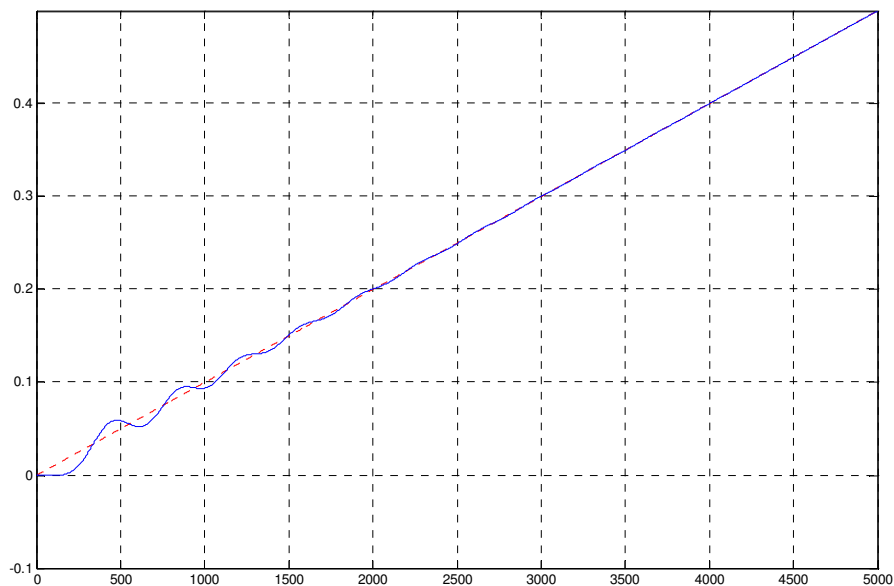


شکل (۶-۱۰): پاسخ به ورودی شیب با ضرایب اولیه (تنظیم نشده)

در ادامه طی فرآیند تنظیم ضرایب - ذکر شده در بخش ۵-۸ - ضرایب سیستم را برای بدست آوردن

کیفیت مطلوب پاسخ تنظیم می‌کنیم و با اجرای شبیه‌سازی به شکل (۶-۱۱) می‌رسیم که علاوه بر

کنترل سیستم، دارای کیفیت مطلوب‌تر خروجی نیز می‌باشد.



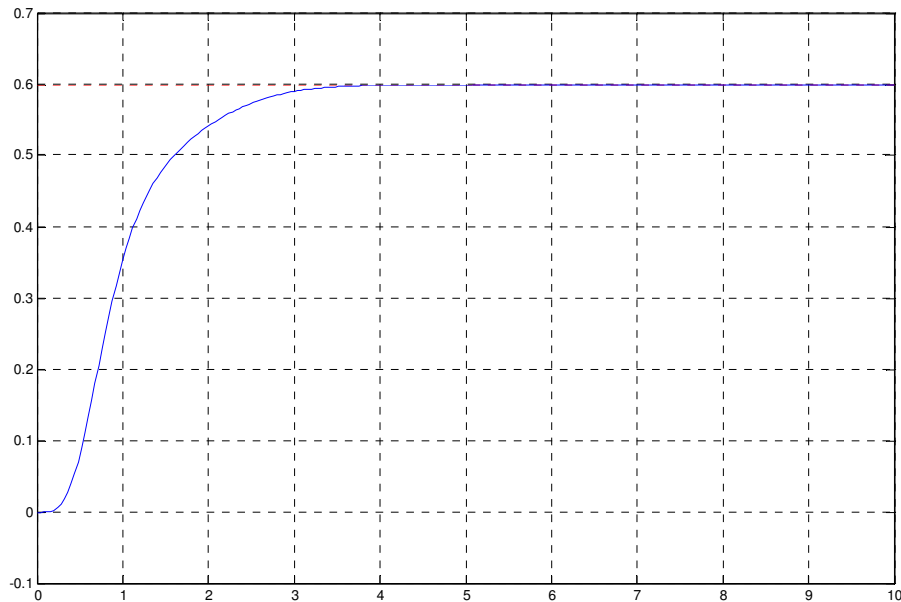
شکل (۶-۱۱): پاسخ به ورودی شیب با ضرایب تنظیم شده

### ۶-۵ عملکرد سیستم با ورودی تک پله

در این بخش به بررسی عملکرد BELBIC به ازای ورودی تک پله می‌پردازیم، برای این منظور یک

ورودی تک پله به سیستم اعمال نموده و ضرایب را تنظیم می‌نماییم که پاسخ نهایی به شکل (۶-۱۲)

بدست آمد.



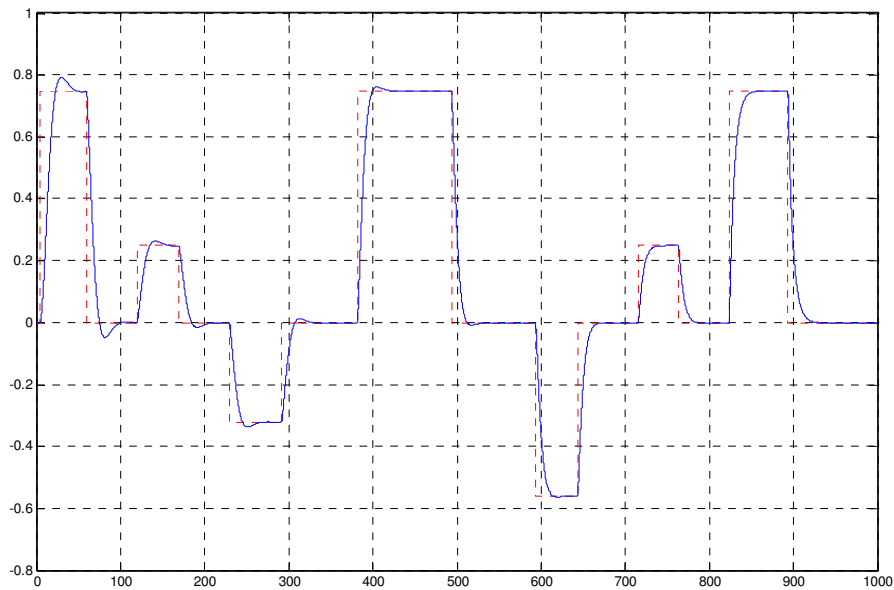
شکل (۶-۱۲): پاسخ به ورودی پله با ضرایب تنظیم شده

بر روی این پاسخ امکان تحلیل مفاهیم آشنای کنترلی وجود دارد. برای مثال خطای حالت ماندگار سیستم صفر بوده و سیستم دارای زمان قرار در حدود ۳ ثانیه و زمان صعود در حدود ۱.۲ ثانیه می‌باشد که کیفیت پاسخ مناسبی برای این سیستم محسوب می‌گردد.

### ۶-۶ عملکرد سیستم با ورودی پله‌های با دامنه‌های متفاوت

این نوع ورودی یکی از مهم‌ترین انواع ورودی برای سیستم‌های فرآیندی محسوب می‌گردد و در صورتیکه عملکرد این بخش مطلوب باشد می‌توان از این سیستم برای فرآیندهای صنعتی استفاده برد و عملاً کاربری واقعی سیستم را در صنعت تضمین می‌نماید.

پس از تنظیم ضرایب سیستم، پاسخ با استفاده از BELBIC بهبود یافته به شکل (۶-۱۳) بدست آمد. همانطور که قابل مشاهده است، در چند پله‌ی اول عملکرد سیستم چندان مطلوب نبوده است اما با گذر زمان کیفیت رو به بهبودی رفته و تقریباً به بهترین حالت ممکن نزدیک می‌شود و علاوه بر کیفیت و توان مناسب سیستم در کنترل، در این شکل روند یادگیری کنترل‌کننده نیز به خوبی قابل مشاهده است.

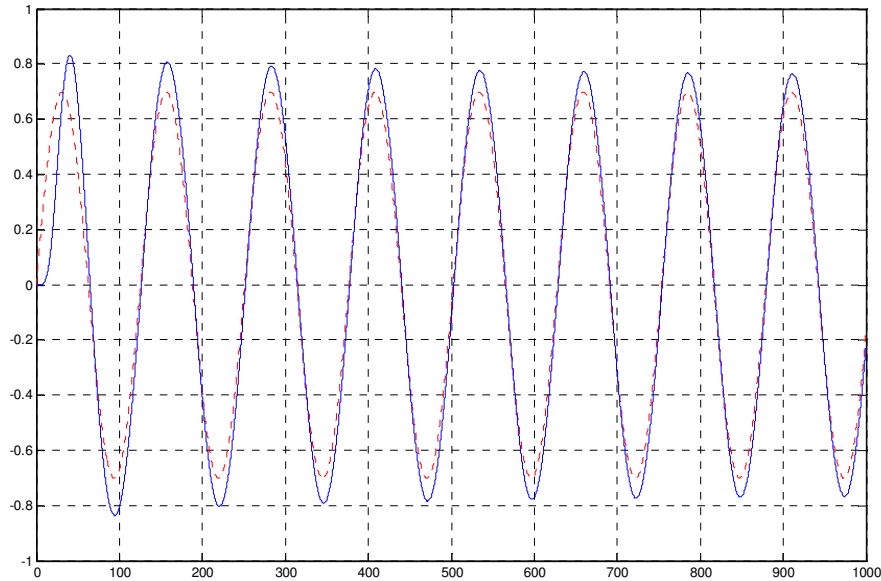


شکل (۶-۱۳) : پاسخ به ورودی پله‌های با دامنه‌های متفاوت

## ۶-۷ عملکرد سیستم با ورودی سینوسی

آخرین نوع ورودی که در این تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد ورودی سینوسی است. با اعمال ورودی سینوسی به سیستمی که برای این منظور طراحی و تنظیم شده است پاسخی به شکل (۶-۱۴) حاصل

آمد که با کمی دقت دیده می‌شود با اینکه سیستم یادگیری را انجام داده و فاز خروجی به حالت مطلوب رسیده است اما دامنه‌ی خروجی در بخش‌های با فاز  $\pm 90^\circ$  دارای خطای حالت ماندگار است.



شکل (۶-۱۴): پاسخ به ورودی مرجع سینوسی

برای درک، تحلیل و حل این مشکل پیشنهاد می‌شود این سیستم و کنترل‌کننده‌ی BELBIC تحلیل فازوری شوند تا علاوه بر درک مفاهیم فازوری BELBIC، راه حل احتمالی رفع مشکل عملکرد به این ورودی نیز بدست آید.

## فصل ۷

### نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این بخش سعی داریم تا به جمع‌بندی کارهای انجام شده در این پروژه‌ی تحقیقاتی بپردازیم. پس از ارایه‌ی خلاصه‌ای از کارهای بیان شده در فصل‌های گذشته، به نتیجه‌گیری از آن‌ها می‌پردازیم و در نهایت پیشنهاداتی را به منظور حرکت در ادامه‌ی این مسیر بیان خواهیم نمود.

#### ۷-۱ خلاصه‌ی مطالب

در این پروژه‌ی تحقیقاتی ابتدا به بیان تاریخچه‌ی مختصر از هوشمندی و هوش عاطفی پرداختیم و به بیان شرح کارهای گذشته در حوزه‌ی BELBIC پرداختیم. در ادامه تا حدودی از نقطه نظر فیزیولوژیکی با سیستم لیمبیک به عنوان بخش اساسی تولیدکننده‌ی رفتارهای عاطفی آشنا شدیم. در فصل سوم مدل ریاضی ارایه شده به منظور تحلیل رفتار سیستم لیمبیک مرور شد و مدل مورد استفاده و آزمایش‌های مرتبط با آن بیان شدند.

در فصل چهارم با دستگاه‌هایی که به منظور بررسی این روش مورد استفاده قرار می‌گیرند آشنایی کلی ایجاد شد.

در بخش بعد که مهم‌ترین بخش از این پروژه می‌باشد، این روش و معادلات آن مورد بررسی قرار گرفتند، سپس با انجام چندین مورد شبیه‌سازی و پیاده‌سازی عملی مشکل موجود در ساختارهای قبلی BELBIC که باعث ناپایداری داخلی سیستم می‌شد آشکار گردید. با استفاده از IAW این مشکل برطرف شده و مورد بررسی بر روی سیستم کنترل سطح مورد استفاده و بررسی قرار گرفت.

در نهایت برای اطمینان از عملکرد این روش برای سیستم‌های مختلف (خصوصاً ناپایدار) و رفتار به ورودی‌های مختلف، در فصل ۶ رفتار سیستم برای ورودی‌های متنوع بر روی سیستم توپ و صفحه مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت.

## ۷-۲ نتیجه‌گیری

مهم‌ترین بخش‌ها و تحلیل‌های صورت پذیرفته در این پروژه، نتایج زیر را در بر داشتند:

**ضعف مدل موجود در گذشته:** مدل موجود ارایه شده با وجود اینکه رفتار سیستم لیمبیک را توصیف نموده و در زمان کوتاه عملکرد نسبتاً مناسب از خود نشان می‌دهد اما در واقع مدل مناسبی برای کاربرد عملی نیست و از مشکل ناپایداری داخلی رنج می‌برد.

**استفاده از IAW:** راه‌حل مناسب جهت رفع مشکل ناپایداری داخلی سیستم، استفاده از ساختار ضد پایان‌پذیری انتگرال‌گیر بود که در این پایان‌نامه و در فصل ۵ مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت.





مدل که باعث ایجاد این مشکل شده باشند می‌رود، به همین منظور بررسی و آرایه‌ی مدل‌های کامل‌تر دور از نظر نیست.

**بررسی ریاضی پایداری سیستم:** با توجه به وجود مشکل ناپایداری داخلی سیستم، با عنایت به موجود بودن معادلات ریاضی سیستم، احتمالاً تحلیل ریاضی پایداری سیستم امکان‌پذیر می‌باشد.

**روش‌های حل مشکل ناپایداری داخلی:** با توجه به وجود عوامل ناپایدار کننده در درون ساختار کنترل‌کننده، استفاده از روش‌هایی که این مشکل را برطرف نمایند مناسب به نظر می‌آید.

**تحلیل فرکانسی (بودی):** بدلیل وجود مشکل در عملکرد این سیستم به ورودی سینوسی تحلیل فازوری این سیستم که رفتار دامنه و فاز این سیستم به عنوان یک فیلتر را بیشتر آشکار کند از منظر مهندسی کنترل مطلوب نظر می‌باشد.

## منابع

1. Pavlov I. P., *Conditioned reflex.*, Oxford University Press, Oxford, 1927.
2. Rescorla R. A. and Wagner A. R., *A theory of Povlovian conditioning: variations in the effectiveness of reinforcement and nonreinforcement.*, In Black, A. H. and Prokasy, W. f., editors, *Classical conditioning II: current research and theory*, pages 5-99. Appleton-Century-Crofts, New York, 1972.
3. Sutton R. S., and Barto A. G., *Toward a modern theory of adaptive networks: expectation and prediction.*, *Psychological Review*, 88(2):135-170, 1981.
4. Sutton R. S. and Barto A. G., *A temporal-difference model of classical conditioning.*, In *Proceeding of the Ninth Annual Conference of the Cognitive Science Society*, pages 355-378, Hillsdale, NJ. Erlbaum, 1987.
5. Sutton R. S. and Barto A. G., *Time-derivative models of Povlovian reinforcement.*, In Gabriel M. and Moore J. editors, *Learning and computational neuroscience: foundation of adaptive networks*, pages 497-538. MIT Press, Cambridge, MA, 1990.
6. Sutton R. S. and Barto A. G., *Reinforcement learning: an introduction.*, MIT Press, Cambridge, MS, 1998.
7. Klopff A. H., *The hedonistic neuron: a theory of memory, learning and interligence.*, Hemisphere, Washington DC, 1982.
8. Klopff A. H., *A neuronal model of classical conditioning.*, *Psychobiology*, 16(2):85-125.
9. Klopff A. H., Morgan J. S., and Weaver S. E., *A hierachical network of control systems that learn: modeling nervous system function during classical and instrumental conditioning.*, *Adaptive Behavior*, 1(3):263-319.
10. Balkenius C., *Natural intelligence in artificial creatures.*, PhD thesis, Lund University Cognitive Studies 37, 1995.
11. Balkenius C. and Moren J., *Dynamics of a classical conditioning model.*, In Boden, M., Nicklasson L. and Ziemke T., editors, *ICANN 98*. Springer-Verlag, Berlin, 1998.
12. Balkenius C. and Moren J., *Computational models of classical conditioning: a comparative study.*, In Pfeifer R., Blumberg B., Meyer J., and Wilson S., editors, *From animals to animats 5: Proceeding of the the 5<sup>th</sup> International Conference on Simulation of Adaptive Behaviour*. MIT Press, Cambridge, MA.
13. Moren J., Balkenius C., *A Computational Model of Emotional Learning in the Amygdala: From animals to animals.*, 6<sup>th</sup> International Conference on the Simulation of Adaptive Behaviour, Cambridge, MIT Press, pp.383-391, 2000.
14. Moren J., *Emotion and Learning.*, PhD thesis, Lund University Cognitive Studies 93, 2002.

15. Lucas C., Shahmirzadi D., Sheikholeslami N., *Introducing BELBIC: Brain Emotional Learning Based Intelligent Controller.*, International Journal of Intelligent Automation and Soft Computing, pages 11- 22, 2004.
16. Lucas C., Shahmirzadi D., Ghafoorifard H., *Eliminating Stator Oscillations through Fin Placement.*, Journal of Engineering Simulation, Volume 3, Number 1, pages 3-7, March 2002.
17. Milasi R. M., Lucas C., and Araabi B. N., *Speed Control of an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Using BELBIC (Brain Emotional Learning Based Intelligent Controller).*, Special Session on Emotional Learning and Decision Fusion in Satisficing Control and Information Processing, Minisymposium on Satisficing, Multiagent, and Cyberlearning Systems, 5th International Symposium on Intelligent Automation and Control, World Automation Congress, WAC 2004, Seville, Spain, June 28- July1, ISAC 116, 2004.
18. Sheikholeslami N., Shahmirzadi D., Semsar E., Lucas C. and Yazdanpanah M. J., *Applying Brain Emotional Learning Algorithm for Multivariable Control of HVAC Systems.*, International Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, 17 (1), pages 35- 46, 2006.
19. Milasi R. M., Lucas C., and Araabi B. N., *Intelligent Modeling and Control of Washing Machine Using Locally Linear Neuro- Fuzzy (LLNF) Modeling and Modified Brain Emotional Learning Based Intelligent Controller (BELBIC).*, Asian Journal of Control, 8 (4), 2005.
20. Milasi R. M., Jamali M. R., and Lucas C., *Intelligent Washing Machine: A Bioinspired and Multi Objective Approach.*, International Journal of Control, Automation, and Systems, vol. 5, no. 4, pages 436-443, August 2007.
21. Pouladzadeh P., Jamali M. R., Lucas C., *Emotional Control of Automotive Suspension System.*, Accepted in Computer Science and Information Technologies (CSIT) Conference, Armenia, 2007.
22. Jamali M. R., Pedram A., Milasy M. R., Lucas C., *Design and Implementation of BELBIC Pattern.*, Proceeding of 14th Iranian Conference on Electrical Engineering, ICEE2006, 2006.
23. Christopher Alexander, *The timeless way of building.*, Oxford University Press, 1979.
24. Milasi R. M., Lucas C., Araabi B. N., Radwan T. S., and Rahman M. A., *Implementation of Emotional Controller for Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive.*, IEEE / IAS 41<sup>st</sup> Annual Meeting: Industry Applications, Tampa, Florida, USA, October 8 - 12, 2006.
25. Shahidi N., Esmaeilzadeh H., Mohammadi Milasi R., and Lucas C., *Implementation of Intelligent Controller Based on Brain Emotional Learning.* Journal of the Faculty of Engineering, Tehran University, Special Issue on Electrical and Industrial Engineering, 39 (4), pages 489- 500, November 2005.
26. Shahmirzadi D., *Computational Modeling of the Brain Limbic System and Its Application in Engineering.*, MSc Thesis at Texas A&D University, 2005.

27. Maren S., *Long-Term Potentiation in the Amygdala: A Mechanism for Emotional Learning and Memory.*, Trends in Neurosciences, 22, No. 12, pages 561-567, 1999.
28. Gustafsson M., Balkenius C., Using semantic web Techniques Validation of Cognitive Models against Neuroscientific Data, Described from Gustafsson's thesis at the Department of Computer science, Lund University.
29. Sipper M. and Tomassini M., *Convergence to Uniformity in A Cellular Automaton via Local Coevolution.*, International Journal of Modern Physics, 8, No. 5, pages 1013-1024, 1997.
30. Lucas C., Shahmirzadi D. and Biglarbegian M., *Co-Evolutionary Approach to Graph-Coloring Problem.*, Technical Journal of Amirkabir University of Technology, 14, 2003.
31. Hofmeyr S. and Forrest S., *Architecture for an Artificial Immune System.*, Journal of Evolutionary Computation, 7, No. 1, pages 45-48, 2000.
32. Chen J., Antipov E., Lemieux B., Cedeno W. and Wood D. H., *DNA Computing Implementing Genetic Algorithms.*, Workshop on Evolution As Computation, Piscataway, New Jersey, pages 39-49, 1999.
33. Fatourehchi M., Lucas C. and Khaki-Sedigh A., *An Agent-Based Approach to Multivariable Control.*, Proceeding of IASTED International Conference on Artificial Intelligence and Applications, Marbella, Spain, pages 376-381, 2001.
34. Parunak H. V. D., *Go to the Ant: Engineering Principles from Natural Multi-Agent Sestems.*, Annuals of Operations Research, 75, pages 69-101, 1997.
35. Smallwood R. D. and Sondik E. J., *The Optimal Control of Partially Observable Markov Processes Over a Finite Horizon.*, Journal of Operational Research, 21, pages 1071-1088, 1973.
36. Narendra K. S. and Annasswamy A. M., *Stable Adaptive Systems.*, Upper Saddlw River, NJ: Prentice Hall, 1989.
37. Bin Y. and Tomizuka M., *Comparative Experiment of Robust and Adaptive Control with New robust adaptive controllers for Robot Manipulators.*, 33<sup>rd</sup> IEEE Conference on Decision and Control, Lake Buena Vista, Florida, pages 1290-1295, 1994.
38. Cai Z. X., *Intelligent Control: Principles, Techniques and Applications.*, River Edge, New Jersey: World Scientific, 1997.
39. Qu Z., *Robust Control of Nonlinear Uncertain Systems.*, New York: Wiley, 1998.
40. Lucas C., Jazbi S. A., Fatourehchi M. and Farshad M., *Cognitive Action Selection with Neurocontrollers.*, Third Irano-Armenian Workshop on Neural Networks, Yerevan, Armenia, 2000.
41. Kaelbling L. P., Littman M. L. and moore A. W., *Reinforcement Learning: A Survey.*, Journal of Artificial Intelligence Research, 4, pages 237-, 1996.
42. Savinov A. A., *An Algorithm for Induction of Possibilities Set-Valued Rules by Finding Prime Disjunctions*, 4<sup>th</sup> On-line World Conference on Soft Computing in Industrial Applications, 1999.

43. Inoue K., Kawabata K. and Kobayashi H., *On a Decision Making with Emotion.*, 5<sup>th</sup> International Workshop on Robot and Human Communication, pages 461-465, 1996.
44. Bay J. S., *Behavior Learning in Large Homogeneous Populations of Robots.*, IASTED International Conference on Artificial Intelligence and Soft Computing, pages 137-140, 1997.
45. Miazaky K., Araki N., Mogi E., Kobayashi T., Shigematsu Y., Ichikawa M. and Matsumoto G., *Brain Learning Control Representation In Nucleus Accumbens.*, 2<sup>nd</sup> International Conference on Knowledge-Based Intelligent Electronic Systems, Adelaide, Australia, pages 21-23, 1998.
46. Balkenius C. and Moren J., *A Computational Model of Emotional Conditioning in Brain.*, Workshop on Grounding Emotions in Adaptive Systems, Zurich, Switzerland, 1998.
47. Fatourechhi M., Lucas C. and Khaki-Sedigh A., *Reducing Control Effort by Means of Emotional Learning.*, Proceeding of 19<sup>th</sup> Iranian Conference on Electrical Engineering, Tehran, Iran, pages 41.1-41.8, 2001.
48. Holland J. H., Holyoak K. J., Nisbett R. E. and Thagard P. R., *Induction: Processes of Inference, Learning and Discovery.*, Cambridge, MA: MIT Press, 1986.
49. Gray J. A., *Elements of a Two-Process Theory of Learning.*, London: Academic Press, 1975.
50. Mowrer O. H., *Learning Theory and Behavior.*, New York: Wiley, 1973.
51. Neese R., *Emotional Disorders in Evolutionary Perspective.*, British Journal of Medical Psychology, 71, pages 397-415, 1998.
52. Greene J. D., Sommerville R. B., Nystrom L. E., Darley J. M. and Cohen J. D., *An fMRI Investigation of Emotional Engagement in Moral Judgments.*, Journal of Science, 293, pages 2105-2108, 2001.
53. Toda M., *The Urge Theory of Emotion and Cognition, Emotion and Urge.*, School of Computer and Cognitive Sciences Technical Report, No. 93-1-01, 1993.
54. LeDoux J. E. and Fellous J. M., *Emotion and Computational Neuroscience.*, Cambridge, MA: MIT Press, 1995.
55. Panksepp J., *Hypothalamic Integration of Behavior.*, New York: Decker, 1981.
56. LeDoux J. E., *In Search of an Emotional System in the Brain: Leaping from Fear to Emotion and Consciousness.*, Cambridge, MA: MIT Press, pages 1049-1061, 1995.
57. Rolls E. T., *The Brain and Emotion.*, Oxford, UK: Oxford University Press, 1999.
58. Fuster J. M., *The Prefrontal Cortex: Anatomy, Physiology, and Neuropsychology of the Frontal Lobe.*, Philadelphia, PAL Lippincott-Raven, 1997.
59. Rolls E. T., *A Theory of Emotion and Consciousness, and Its Application to Understanding the Neural Basis of Emotion.*, Cambridge, MA: MIT Press, pages 1091-1106, 1995.
60. Kelly J. P., *The Neural Basis of Perception and Movement, Principles of Neural Science.*, London, UK: Prentice Hall, pages 283-295, 1991.

61. Ohman A. and Mineka S., *Fears, Phobias, and Preparedness: Toward and Evolved Module of Fear and Fear Learning.*, Journal of Psychological Review, 108, No. 3, pages 483-522, 2001.
62. Amaral D. G., Price J. L., Pitkanen A. and Carmichael S. T., *Anatomical Organization of the Primate Amygdaloid Complex, The Amygdala: Neurobiological Aspects of Emotion, Memory, and Mental Dysfunction.*, New York: Wiley, pages 1-66, 1992.
63. Schachter S., *Some Extraordinary Facts about Obese Humans and Rats.*, American Psychologist, 26, pages 129-144, 1970.
64. Tolman E. C. and Honzik C. H., *Introduction and Removal of Reward and Maze Performance in Rats.*, California: University of California Publications in Psychology, pages 227-272, 1930.
65. O'Keefe J. and Nadel L., *The Hippocampus as a Cognitive Map.*, Oxford, UK, Clarendon Press, 1978.
66. Jamali M. R., Pedram A., Milasy M. R., Lucas C., *Design and Implementation of BELBIC Pattern.*, Proceeding of 14th Iranian Conference on Electrical Engineering, ICEE2006, 2006.
67. G.U.N.T. Gerätebau GmbH, Technical Description of RT512 Process Trainer Level, 2003
۶۸. معقول، پویا، طراحی و پیاده‌سازی کنترل‌کننده‌ی حلقه بسته ترتیبی برای دستگاه چند ورودی چند خروجی سطح-فلو، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی، تهران، ۱۳۸۴
۶۹. کوهی عنبران، یاشار، طراحی کنترل‌کننده مقاوم بر روی سیستم چند متغیره سطح و فلو، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی، تهران، ۱۳۸۵.
70. <http://www.gunt.de/>
۷۱. محمدی تاکامی، سید محسن، بهینه سازی کنترل‌کننده فازی با الگوریتم ژنتیکی برای سیستم توپ و صفحه، پایان نامه کارشناسی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی، تهران، ۱۳۸۱.
۷۲. شعبانی، خدیجه، فاضلی، سیده مریم، هدایت توپ بر روی صفحه‌ی لغزان بدون برخورد با مانع، پایان نامه کارشناسی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی، تهران، ۱۳۸۲.
۷۳. بالو، مریم، شهرابی، زینب، مسیریابی روی خط و کنترل توپ روی دستگاه توپ و صفحه توسط سیستم‌های هوشمند، پایان نامه کارشناسی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی، تهران، ۱۳۸۴.
74. HUMUSOFT, CE 151 Ball & PlateApparatus, User's Manual, 1996
75. HUMUSOFT, CE 151 Ball & PlateApparatus, User's Manual, 2006
۷۶. فاتحی، علی‌رضا، سیستم‌های کنترل فرآیند، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی، تهران، ۱۳۸۶.

77. Astrom K. J. and Haggund T., *PID Controller: Theory, Design, and Tuning.*; 2 ed., The International Society of Measurement & Control, 1995.



## پیوست‌ها