



نظریه‌ی سیستم‌های کنترل اتوماتیک

دکتر فرید بیات

عضو هیئت علمی دانشکده زنگنه



دانشگاه زنجان

سرشناسه	بیات، فرهاد، ۱۳۶۰
عنوان و نام پدیدآور	نظریه سیستم‌های کنترل اتوماتیک / تألیف فرهاد بیات
مشخصات نشر	زنجان: دانشگاه زنجان، ۱۳۹۶
مشخصات ظاهری	۴۲۴: مصور، جدول، نمودار
شابک	۹۷۸-۹۶۴-۸۸۸۵-۹۰-۳
وضعیت فهرست‌نویسی	فیبا
موضوع	مهندسی سیستم‌ها --
موضوع	مهندسی کنترل
شناسه‌ی افزوده	دانشگاه زنجان
رده‌بندی کنگره	۱۳۹۶ عن ۹/ب TJ۲۱۳
رده‌بندی دیوئی	۶۲۹/۸۳
شماره‌ی کتاب‌شناسی ملی	۴۸۲۶۰۳



دانشگاه زنجان

نام کتاب	نظریه‌ی سیستم‌های کنترل اتوماتیک
تألیف	دکتر فرهاد بیات
ویراستار	دکتر محمد ابراهیم پور
صفحه‌آرایی	لیلا احدی
سال انتشار	۱۳۹۶
نوبت انتشار	نخست
شمارگان	۱۱۰۰
قیمت	۲۷۵۰۰ تومان
ناشر	انتشارات دانشگاه زنجان
نشانی	زنجان، کیلومتر ۵ جاده تبریز، دانشگاه زنجان، انتشارات دانشگاه زنجان
تلفن	۰۲۴-۳۳۰۵۲۶۴۱

پیشگفتار

«کنترل» به معنی تحت اختیار درآوردن است. در این کتاب، مقصود از کنترل اتوماتیک یک سیستم دینامیکی عبارت است از تحت اختیار درآوردن رفتار و عملکرد آن سیستم بدون دخالت انسان. بر این اساس، نظریه سیستم‌های کنترل اتوماتیک به بیان اصول، قوانین و روش‌های تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل اتوماتیک می‌پردازد.

بسیاری معتقد هستند که نظریه کنترل اتوماتیک در اوایل قرن ۱۸ همزمان با توسعه ماشین‌های بخار و اختراع سیستم‌گاورنر توسط جیمز وات شروع و پس از آن به سرعت توسعه پیدا کرد. امروزه بواسطه پیشرفت‌های شگرف در حوزه‌های مختلف علوم و تکنولوژی و نیاز مبرم به افزایش سرعت، دقت و کارایی در انجام کارها، دامنه کاربرد نظریه سیستم‌های کنترل اتوماتیک منحصر به مهندسين کنترل نبوده. این علم به عنوان یکی از مهم‌ترین شاخه‌های علوم بین رشته‌ای در مهندسی و ریاضیات به حساب می‌آید. برای مثال کاربردهای بسیاری را می‌توان در صنایع خودروسازی، دریانوردی، فضاءنوردی و هوانوردی، صنایع پالایشگاهی، کشاورزی، پزشکی و حتی علوم اقتصادی و مدیریتی مشاهده نمود. همین امر باعث شده است که نظریه سیستم‌های کنترل اتوماتیک نه تنها به عنوان چندین واحد درس اصلی در دیپارتمان‌های مهندسی برق و کامپیوتر تدریس شود بلکه در سایر شاخه‌های دانشگاهی مانند مهندسی مکانیک، هوافضا، مهندسی شیمی، مهندسی سازه و نیز اقتصاد تدریس شود.

کتاب حاضر مطابق با سرفصل‌های مصوب وزارت علوم، تحقیقات و

فناوری برای درس سیستم‌های کنترل خطی در مقطع کارشناسی تألیف شده و می‌تواند به عنوان یک مرجع مناسب و کامل برای دانشجویان این مقطع استفاده شود. از سوی دیگر، با توجه به اینکه کتاب حاضر تمام مباحث مقدماتی تا پیشرفته در حوزه سیستم‌های کنترل خطی کلاسیک را پوشش می‌دهد لذا می‌تواند به عنوان مرجعی مناسب برای مهندسين، محققين و دانشجویان مقاطع کارشناسی ارشد و دکترا در رشته‌های مختلف مورد استفاده واقع شود.

این کتاب ثمره سال‌ها تدریس مداوم اینجانب در دانشگاه بوده و برگرفته از تجربیات حاصل از بازخوردهای کمی و کیفی دانشجویان رشته‌های مختلف در فراگیری این درس بوده است. بر این اساس، سعی شده است مفاهیم اولیه تا روش‌های پیشرفته کنترلی به گونه‌ای سهل الوصول بیان شوند که تجربه حداکثر فراگیری در دانشجویان شود. از نگاه بسیاری از دانشجویان، یکی از اشکالات اساسی در اغلب مراجع بین المللی موجود در این زمینه، حجیم بودن و تفصیل‌های بیش از حد مباحث در آن‌ها است که این امر بهره‌گیری از آن‌ها را برای دانشجویانی که در ابتدای راه فراگیری این درس هستند و در زمان بر می‌سازد. بنابراین، در کتاب حاضر تلاش زیادی برای رفع این مسأله صرف شده است، گونه‌ای که تمام مباحث بدون کم و کاست و به صورتی کاملاً خلاصه و موجز به خواننده منتقل شود. همچنین، به منظور ارتقاء سطح یادگیری و آشنایی خواننده با ابزارهای روزآمد، اغلب مثال‌های حل شده در این کتاب توسط نرم‌افزار MATLAB شبیه‌سازی شده و کدهای مربوطه در وب‌گاه مولف به نشانی www.znu.ac.ir/members/bayat_fahad قابل دسترسی می‌باشند.

با توجه به اینکه فراگیری نظریه سیستم‌های کنترل نیازمند آشنایی اولیه با اصول حاکم بر سیستم‌های دینامیکی می‌باشد، لذا توصیه می‌شود خواننده پیش از پرداختن به مطالعه این کتاب حداقل یکی از دروس معادلات دیفرانسیل، ریاضیات مهندسی و آشنایی با سیستم‌های دینامیکی را گذرانده باشد. مطالب ارائه شده در این کتاب در هشت فصل دسته‌بندی شده است. در فصل اول کتاب، به بیان مفاهیم اولیه و آشنایی با سیستم‌های کنترل اتوماتیک و پسخردانی پرداخته شده است. همچنین تاریخچه‌ای مختصر از روند پیدایش و توسعه این شاخه از علم ارائه و مثال‌هایی واقعی از سیستم‌های کنترل حلقه بسته ارائه شده است. در فصل دوم، به بررسی روش‌های مدل‌سازی سیستم‌های دینامیکی خطی و تغییرناپذیر با زمان پرداخته شده است. در این خصوص، به اختصار اصول مدل‌سازی دسته‌ای از سیستم‌های الکتریکی، مکانیکی و سیالاتی مورد توجه قرار گرفته است. روش مدل‌سازی تابع تبدیل بعنوان یک روش استاندارد در این بخش ارائه و الگوریتمی

جهت تعیین تابع تبدیل شبکه‌های پسخوردی گسترده بیان شده است (روش میسون). در فصل سوم، مشخصات و ویژگی‌های سیستم‌های کنترل پسخوردی مانند مزایای شبکه‌های پسخوردی، انواع اهداف کنترلی، محدودیت‌های طراحی و مفهوم حساسیت بیان شده‌اند. در فصل چهارم، روش محاسبه پاسخ حوزه زمان سیستم‌های دینامیکی خطی و تغییرناپذیر بازمان بیان شده است. به صورت خاص، پاسخ زمانی سیستم‌های دینامیکی مرتبه اول و دوم به عنوان مهمترین و پرکاربردترین دسته از سیستم‌ها مورد توجه قرار گرفته و مشخصات اساسی پاسخ این سیستم‌ها استخراج شده‌اند. مفهوم کاهش مرتبه سیستم‌های مرتبه بالا به سیستم‌های مرتبه پایین در این بخش ارائه شده است. با تقسیم پاسخ زمانی به دو بخش پاسخ گذرا و پاسخ حالت ماندگار در این فصل به بیان ویژگی‌های هر یک از این بخش‌ها پرداخته شده است. همچنین، مفاهیم صفر و قطب و مفهوم پایداری سیستم حلقه بسته بر اساس محل قرارگیری قطب و نیز روش تحلیل پایداری راث-هرویتز در این فصل ارائه شده است. در فصل پنجم، یکی از مهمترین روش‌های تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل حلقه بسته تحت عنوان رویکرد مکان هندسی ارائه شده است. ابتدا روش رسم مکان هندسی قطب‌های حلقه بسته بیان شده و سپس با معرفی انواع جبران‌سازها (پیش‌فاز، پس‌فاز و پس‌فاز-پیش‌فاز) به بیان روش‌های طراحی نیز، جبران‌سازها با رویکرد مکان هندسی پرداخته شده است. در فصل ششم، رویکرد دیگری تحت عنوان پاسخ فرکانسی مطرح و با ارائه انواع روش‌های رسم پاسخ فرکانسی (نمودار قطبی یا نایکویست، نمودار بode، پی‌اچ‌اچ یا لگاریتمی و نمودار نیکولز)، به بیان الگوریتم طراحی جبران‌سازهای مختلف با استفاده از رویکرد پاسخ فرکانسی پرداخته شده است. در فصل هفتم، کلاس بسیار مهمی از کنترل‌کننده‌های صنعتی با نام کنترل‌کننده‌های تناسبی-انتگرالی-مشتقی (PID) معرفی و اصول طراحی و تنظیم این کنترل‌کننده بیان شده‌اند. نهایتاً در فصل هشتم، به ارائه یکی از رویکردهای نوین کنترل سیستم‌های دینامیکی در حوزه زمان پرداخته شده است. در این فصل ابتدا روش مدل‌سازی فضای حالت بجای مدل تابع تبدیل بیان شده است. سپس، ساختار کنترل‌کننده فیدبک حالت و روش طراحی بهره فیدبک حالت برای دستیابی به اهداف کنترلی بیان شده است. همچنین، مفهوم مشاهده‌گر حالت برای تخمین حالت‌های سیستم در شرایطی که امکان اندازه‌گیری حالت‌ها وجود ندارد، و نیز روش طراحی آن بیان شده است.

برخود لازم می‌دانم از خانواده عزیزم، دانشجویان پرتلاش دانشگاه زنجان، همکاران محترم و تمام عزیزانی که به هر نحوی در ایجاد این اثر نقشی داشته‌اند تقدیر و تشکر نمایم.

به عنوان سخن آخر، باور دارم عاری از ایراد بودن مختص ذات پروردگار متعال است و یقیناً

تألیف این کتاب نیز از این قاعده مستثنی نیست. از همین روی باکمال احترام پذیرای هرگونه نقد و اشکال احتمالی از سوی خوانندگان محترم در خصوص نگارش این کتاب هستیم. همچنین امیدوارم با مطالعه کتاب حاضر خواننده قادر باشد به صورت تقریباً کامل تمام مفاهیم مربوط به سیستم‌های کنترل خطی را درک نموده و ویژگی‌های مربوط به هر یک از روش‌های تحلیل و طراحی را تشخیص داده و در نهایت بتواند در عمل آن‌ها را به کار بندد.

فرهاد بیات

عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان

اردیبهشت ماه ۱۳۹۶ شمسی

www.ketab.ir

فهرست

عنوان	صفحه
پیشگفتار.....	۳
فصل اول: آشنایی با سیستم های کنترل	
مقدمه (تاریخچه).....	۱۳
مبانی و تعاریف.....	۱۶
مثال هایی از سیستم های کنترل پسخوردی.....	۲۰
پیوسته های تبدیل لاپلاس.....	۲۴
مسائل.....	۳۲
فصل دوم: مدل سازی سیستم های دینامیکی	
مقدمه.....	۳۷
مدل تابع تبدیل.....	۳۸
مدل سازی سیستم های الکتریکی.....	۴۰
مدل سازی سیستم های مکانیکی.....	۴۵
مدل سازی سیستم های سیالاتی.....	۵۵
نمایش بلوکی سیستم های کنترل.....	۶۰
روش میسون.....	۶۸
مسائل.....	۷۷
فصل سوم: مشخصات سیستم های کنترل پسخوردی	
مقدمه.....	۸۵
مشخصات سیستم های کنترل پسخوردی.....	۸۵
اهداف کنترلی و محدودیت های طراحی.....	۸۷
مفهوم حساسیت و تأثیر پسخورد بر آن.....	۹۰
مسائل.....	۹۵
فصل چهارم: پاسخ زمانی سیستم های دینامیکی	
مقدمه.....	۹۹
پاسخ زمانی.....	۹۹
پاسخ زمانی سیستم های مرتبه اول.....	۱۰۲
پاسخ زمانی سیستم های مرتبه دوم.....	۱۰۷

ویژگی‌های اساسی پاسخ‌گذاری سیستم مرتبه دو استاندارد.....	۱۲۰
ارتباط میان محل قطب‌های سیستم و مشخصات پاسخ گذرا.....	۱۳۳
پاسخ سیستم‌های مرتبه بالا و کاهش مرتبه سیستم‌ها.....	۱۳۷
اثر اضافه کردن صفر بر پاسخ سیستم مرتبه دو.....	۱۴۲
پاسخ حالت ماندگار سیستم‌ها (خطای ماندگار).....	۱۴۷
پایداری سیستم‌های کنترل.....	۱۵۵
معیار پایداری راش - هرویتز.....	۱۵۶
تحلیل پایداری نسبی.....	۱۶۷
مسائل.....	۱۷۱

فصل پنجم: تحلیل طراحی سیستم‌های کنترل با رویکرد مکان هندسی

مقدمه.....	۱۷۷
روش ترسیم مکان هندسی ریشه.....	۱۷۸
پیچیدگی‌های رسم مکان هندسی ریشه‌ها.....	۲۰۲
ساختارهای استاندارد دیگر در رسم مکان هندسی ریشه‌ها.....	۲۱۳
اثر اضافه کردن صفر و قطب بر مکان هندسی ریشه‌ها.....	۲۲۲
تحلیل پایداری با استفاده از روش مکان هندسی ریشه‌ها.....	۲۲۷
طراحی کنترل‌کننده با استفاده از روش مکان هندسی ریشه.....	۲۳۱
طراحی جبران‌ساز پیش‌فاز با رویکرد مکان هندسی ریشه‌ها.....	۲۳۳
طراحی جبران‌ساز پس‌فاز با رویکرد مکان هندسی ریشه‌ها.....	۲۵۱
پیاده‌سازی عملی جبران‌سازهای پیش‌فاز و پس‌فاز.....	۲۶۲
طراحی جبران‌ساز پس‌فاز-پیش‌فاز با رویکرد مکان هندسی ریشه‌ها.....	۲۶۳
مسائل.....	۲۷۵

فصل ششم: تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل با رویکرد پاسخ فرکانسی

مقدمه.....	۲۸۵
پاسخ حالت دائمی سینوسی.....	۲۸۶
رسم نمودار قطبی.....	۲۸۷
محک پایداری نایکوئیست.....	۲۹۷
رسم نمودار نایکوئیست برای سیستم‌هایی با صفر/قطب روی محور موهومی.....	۳۱۰
معیارهای پایداری نسبی (حاشیه بهره و حاشیه فاز).....	۳۱۴

۳۱۸	رسم نمودار بودی یا لگاریتمی
۳۳۳	تفاوت نمودار بودی سیستم‌های مینیم‌فاز و غیر مینیم‌فاز
۳۴۳	تأثیر تأخیر انتقالی بر نمودار بودی
۳۴۷	رسم نمودار نیکولز
۳۴۸	طراحی کنترل کننده با استفاده از روش پاسخ فرکانسی
۳۵۰	طراحی جبران ساز پیش فاز با رویکرد پاسخ فرکانسی
۳۵۱	طراحی جبران ساز پس فاز با رویکرد پاسخ فرکانسی
۳۶۴	طراحی جبران ساز پس فاز-پیش فاز با رویکرد پاسخ فرکانسی
۳۷۱	نکاتی در خصوص طراحی سازها
۳۷۲	مسائل

فصل هفتم: اصول کنترل کننده های PID

۳۷۹	مقدمه
379	اجزاء کنترل کننده PID
۳۸۱	عملکرد کنترل تناسبی (P)
۳۸۵	عملکرد کنترل تناسبی-انتگرالی (PI)
390	قواعد زیگلر-نیکولز برای تنظیم پارامترهای کنترل کننده PID
۴۰۲	مسائل

فصل هشتم: تحلیل و طراحی سیستم های کنترل در فضای حالت

۴۰۹	مقدمه
۴۱۷	ارتباط معادلات فضای حالت و تابع تبدیل
۴۱۹	حل معادلات حالت و مفهوم ماتریس انتقال حالت
۴۲۳	طراحی کنترل کننده پسخورد حالت
۴۳۶	مشاهده گر حالت
۴۳۸	طراحی مشاهده گر حالت
۴۴۱	اصل همزادی
۴۵۴	مسائل
۴۵۷	منابع
۴۵۹	فهرست واژگان