

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

دانشگاه یزد  
دانشکده فنی و مهندسی  
گروه مهندسی عمران

پایان نامه  
برای دریافت درجه کارشناسی ارشد  
مهندسی عمران – سازه

## کنترل فعال سازه‌ها با سختی متغیر

استاد راهنما:  
دکتر حسینعلی رحیمی بُندرآبادی

استاد مشاور:  
دکتر منصور رفیعیان

پژوهش و نگارش:  
حمیدرضا اوجی

تقدیم به پدرم و مادرم

و همه کسانی که نگران تندرستی انسان‌ها هستند.

## تشکر و قدر دانی

بسیاری از اساتید و دوستان به صورت مستقیم و یا غیر مستقیم اینجانب را در این پژوهش یاری نمودند. بر خود لازم می‌دانم که از همه ایشان به خصوص آقایان دکتر حسینعلی رحیمی و دکتر منصور رفیعیان که بی کمک ایشان به ثمر رساندن این تحقیق ممکن نبود کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم. از آقای دکتر امیر لطف‌آور عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی شیراز که به خصوص در بخش طراحی کنترل فازی اینجانب را یاری نمودند و نیز از دوست عزیز آقای مهندس احسان دهقان صمیمانه سپاسگذارم.

در نهایت بر خود لازم می‌دانم از استاد آگاه و دلسوز جناب مهندس غلامحسین هوشمند سروسرستانی که همواره در راستای تعلیم و تربیت مهندسین و انتقال دیدگاههای مهندسی به ایشان نهایت تلاش را نموده‌اند سپاسگذاری کنم و سلامت و موفقیت همیشگی را برای ایشان از خداوند بزرگ خواستار باشم.

## چکیده:

آئین‌نامه های جدید ساختمانی بر روی نظریه سطح عملکرد متمرکز شده‌اند که در آن جابجایی یکی از معیارهای طراحی‌ست. از دیگر سو، انواع تکنیک‌های کنترلی اعم از غیرفعال، نیمه فعال، فعال و یا ترکیبی به صورت گسترده برای کاهش پاسخ جابجایی سازه‌ها در حین زمین‌لرزه‌های شدید بکار گرفته شده است. در این پایان‌نامه سازه مجهز شده با قطعات سختی متغیر فعال مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین رفتار سازه مجهز شده با قطعات کنترلی مشابه مانند میراگر سختی نیمه‌فعال قابل بازنشانی و یا سختی متغیر پیوسته مورد ارزیابی قرار گرفته است. در کنار آن قطعه-ای جدید نیز بنام میراگر محرک نیمه‌فعال نیز معرفی خواهد گردید. این قطعه می‌تواند انرژی منتقل شده به سازه از زمین‌لرزه را جذب نموده، از این انرژی مانند یک محرک استفاده نماید و همچنین هر بخش دلخواه از آن را از سیستم خارج نماید. برای تشریح نتایج حاصل از بکارگیری قطعه شبیه‌سازی های عددی انجام شده است. زمین‌لرزه‌های مختلفی به عنوان بارگذاری خارجی بکار گرفته شده‌است. پاسخ سازه‌های که با این قطعه مجهز شده‌اند با آنهایی که با دیگر قطعات کنترلی مجهز شده‌اند مقایسه می‌گردد. این قطعه از انواع نیمه‌فعال است برای فعالیت به انرژی کمی نیاز دارد؛ بنابراین می‌تواند به طور گسترده‌ای برای کنترل سازه‌ها مورد استفاده قرار بگیرد. تفاوت اصلی در این قطعه در مقایسه با سایر قطعات مشابه نوع استفاده از انرژی منتقل شده به سازه می‌باشد.

## فهرست مطالب

۱	فصل اول : مقدمه
۱	۱-۱- پیشگفتار
۲	۲-۱- مفاهیم کنترل
۷	۳-۱- کنترل کننده های PID
۷	۴-۱- پایداری سیستم
۹	فصل دوم : دستاورد های کنترلی در مهندسی عمران
۹	۱-۲- پیشگفتار
۹	۲-۲- کنترل غیر فعال سازهها
۱۰	۱-۲-۲- سیستم های اتلاف انرژی
۱۵	۲-۲-۲- سیستم های تغییر دهنده فرکانس
۱۹	۳-۲- کنترل فعال سازهها
۲۵	۱-۳-۲- کنترل بهوسیله کشهای فعال
۲۶	۲-۳-۲- کنترل بهوسیله سیستم میراگر جرمی فعال AMD
۲۸	۴-۲- کنترل نیمه فعال
۲۹	۱-۴-۲- سیستم میراگر نیمه فعال
۳۳	۲-۴-۲- میراگرهای کنترل پذیر سیالاتی نیمه فعال
۳۷	۳-۴-۲- قطعات نیمه فعال با سختی متغیر SAIVS
۳۸	۴-۴-۲- میراگرهای اصطکاکی تغییرپذیر
۳۸	۵-۲- سیستمهای ترکیبی
۳۹	۱-۵-۲- سیستمهای میراگر ترکیبی جرمی HMD

۴۴	فصل سوم : منطق فازی
۴۴	۱-۳- پیشگفتار
۴۵	۲-۳- کنترل فازی
۴۷	۳-۳- توضیحات بیشتر و مثال
۵۳	فصل چهارم: سازه با سختی متغیر
۵۳	۱-۴- پیشگفتار
۵۴	۲-۴- معرفی قطعه SSASD و بکارگیری آن در سیستمهای یک درجه آزادی
۵۹	۳-۴- معرفی قطعه SAIVS و بکارگیری آن در سیستمهای یک درجه آزادی
۷۳	۴-۴- معرفی قطعه RSASD و بکارگیری آن در سیستمهای یک درجه آزادی
۷۶	۵-۴- معرفی قطعه SADA و بکارگیری آن در سیستمهای یک درجه آزادی
۸۱	۶-۴- جمع بندی
۸۲	۷-۴- سیستمهای چند درجه آزادی
	۱-۷-۴- معادله حرکت و قانون کنترل برای سیستمهای چند درجه آزادی
۸۴	مجهاز به SSASD
۸۵	۲-۷-۴- قانون کنترل برای سیستمهای چند درجه آزادی مجهاز به RSASD
۸۶	۳-۷-۴- قانون کنترل برای سیستمهای چند درجه آزادی مجهاز به SADA
۸۶	۴-۷-۴- معرفی کنترلر فازی برای سیستم مجهاز به SADA
۸۹	۵-۷-۴- معرفی مدل چند درجه آزادی برای آنالیز عددی
۱۰۱	۶-۷-۴- توضیحات تکمیلی
۱۰۱	۷-۷-۴- بررسی و تفسیر نتایج
۱۰۳	فصل پنجم : نتیجهگیری و پیشنهادات
۱۰۵	مراجع

## فهرست شکلها

- شکل ۱-۱- نمودار جعبه‌های از سیستم کنترلی حلقه باز ۳
- شکل ۲-۱- نمودار جعبه‌های سیستم کنترلی حلقه بسته ۴
- شکل ۳-۱- سیستم یک درجه آزادی ۵
- شکل ۴-۱- سیستم حلقه بسته ۷
- شکل ۱-۲- طرح شماتیک سازه با میراگر انرژی غیر فعال ۱۰
- شکل ۲-۲- الف: اتصال LSB ب: میراگر اصطکاکی مهاربندی ضربدری ۱۱
- شکل ۳-۲- ساختار میراگر ویسکوالاستیک ۱۲
- شکل ۴-۲- مراحل طراحی میراگر ویسکوالاستیک ۱۳
- شکل ۵-۲- مثالی از میراگر ADAS ۱۴
- شکل ۶-۲- نحوه استقرار میراگرهای ADAS در یک قاب ۱۴
- شکل ۷-۲- الف: میراگر سیال تالور ب: میراگر فنر الاستومتر ۱۵
- شکل ۸-۲- میراگرهای پایه ای منفرد و چندگانه ۱۶
- شکل ۹-۲- نحوه کاربرد میراگرهای پایه‌ای ۱۶
- شکل ۱۰-۲- طرح مخزن ضد غلطان ۱۷
- شکل ۱۱-۲- میراگر جرمی ۱۸
- شکل ۱۲-۲- یک نمونه TMD بکار گرفته شده در ساختمان ۱۹
- شکل ۱۳-۲- طرح شماتیک سیستم دارای کنترل فعال ۲۳
- شکل ۱۴-۲- سازه مجهز شده به کشهای فعال ۲۶
- شکل ۱۵-۲- یک نمونه کش فعال ۲۶
- شکل ۱۶-۲- ساختمان کیوباشی سیوا و سیستم AMD ۲۷



- شکل ۲-۱۸- طرح شماتیک سازه با کنترل نیمه فعال ۲۸
- شکل ۲-۱۹: شیر با روزنه متغیر ۲۹
- شکل ۲-۲۰: مقایسه ماکزیمم تنشها به علت عبور کامیونهای سنگین ۳۰
- شکل ۲-۲۱: اولین کاربرد تمام مقیاس کنترل سازه در آمریکا ۳۰
- شکل ۲-۲۲: شکل بندی سیستم AVS ۳۱
- شکل ۲-۲۳- ساختمان کازیمما شیزوکا و میراگرهای نیمه فعال هیدرولیکی ۳۲
- شکل ۲-۲۴ - ماکزیمم پاسخ تحت زلزله های السنترو ، موج های تفت و هاجینو با حداکثر سرعت ۵۰ سانتیمتر بر ثانیه و موج تاکای فرضی در سازه تحت کنترل با AVS ۳۲
- شکل ۲-۲۵ - ماکزیمم پاسخ تحت زلزله های السنترو ، موج های تفت و هاجینو با حداکثر سرعت ۵۰ سانتیمتر بر ثانیه و موج تاکای فرضی در سازه بدون کنترل ۳۲
- شکل ۲-۲۶: طرح شماتیک میراگر با سیال کنترل پذیر ۳۴
- شکل ۲-۲۷- میراگر سیالاتی MR ۳۵
- شکل ۲-۲۸- آزمایش میراگر MR با ظرفیت ۲۰ تن در دانشگاه نوتر دم ۳۶
- شکل ۲-۲۹: نمودار حلقه های نیرو- جابهجایی میراگر MR به ازاء میدان مغناطیسی صفر تا ماکزیمم ۳۶
- شکل ۲-۳۰- سیستم SAIVS-TMD , قطعه SAIVS ۳۸
- شکل ۲-۳۱- طرح شماتیک سازه با کنترل ترکیبی ۳۹
- شکل ۲-۳۲- ساختمان آی ان تی ایی اس در سین داگایا ژاپن ۴۰
- شکل ۲-۳۳-: پلان سیستم HMD ۴۰
- شکل ۲-۳۴- تاریخچه پاسخ (۲۳ مارس ۱۹۹۳) ۴۱
- شکل ۲-۳۵- پاسخ طیف فوریه (۲۳ مارس ۱۹۹۳) ۴۱
- شکل ۲-۳۶- سیستم HMD به کار گرفته شده در برج یوکوهاما ۴۲

- شکل ۲-۳۷ برج یوکوهاما در ژاپن ۴۲
- شکل ۲-۳۸- طرح شماتیک سیستم DUOX ۴۳
- شکل ۳-۱- بکار گیری کنترلر فازی در سیستم ۴۵
- شکل ۳-۲- روش استنتاجی ماکزیمم- مینیمم و روش مرکز سطح برای استخراج نتیجه نهایی ۴۹
- شکل ۳-۳- توابع شکل ورودی ها و خروجی برای یک توربین بخار ۵۰
- شکل ۳-۴- مثالی از نتیجه گیری از قوانین ۵۱
- شکل ۳-۵- استخراج نتیجه نهایی ۵۲
- شکل ۴-۱- نمایی از قطعه SSASD ۵۵
- شکل ۴-۲- پاسخ شتاب سازه مجهز شده به SSASD (خط پر) و سازه بدون کنترل و با حداقل سختی (خط چین) ۵۷
- شکل ۴-۳- پاسخ جابجایی سازه مجهز شده به SSASD (خط پر) و سازه بدون کنترل و با حداقل سختی (خط چین) ۵۷
- شکل ۴-۴- پاسخ شتاب سازه‌ی بدون کنترل و با سختی حداکثر در تمام لحظات ۵۸
- شکل ۴-۵- پاسخ جابجایی سازه بدون کنترل و با سختی حداکثر در تمام لحظات ۵۸
- شکل ۴-۶- طرح کلی قطعه SAIVS ۶۰
- شکل ۴-۷- منحنی هیستریزس حاصل از رفتار سازه یک درجه آزادی مجهز شده با SIAVS تحت بار گذاری هارمونیک سینوسی با فرکانس ۱ Hz و دامنه تحریک ۰/۲۵ in ۶۱
- شکل ۴-۸- منحنی هیستریزس حاصل از رفتار سازه یک درجه آزادی مجهز شده با SIAVS تحت بار گذاری هارمونیک سینوسی با فرکانس ۲ Hz و دامنه تحریک ۰/۶۳۵ cm ۶۱
- شکل ۴-۹- شتابنگاشت زمین لرزه طبس ۶۴
- شکل ۴-۱۰- شتابنگاشت زمین لرزه السنترو مؤلفه شمال - جنوب ۶۴

- شکل ۴-۱۱- نمودار تاریخچه زمانی جابجایی تحت زمینلرزه طبس برای سازه بدون کنترل  
( با سختی ماکزیمم) ۶۵
- شکل ۴-۱۲- نمودار تاریخچه زمانی انرژی ورودی به سیستم تحت زمینلرزه طبس  
برای سازهی بدون کنترل (با سختی ماکزیمم) ۶۵
- شکل ۴-۱۳- نمودار تاریخچه زمانی جابجایی سیستم تحت زمین لرزه طبس  
برای سازهی مجهز به SAIVS حالت الف . ۶۶
- شکل ۴-۱۴- نمودار تاریخچه زمانی انرژی ورودی به سیستم تحت زمین لرزه  
طبس برای سازهی مجهز به SAIVS حالت الف. ۶۶
- شکل ۴-۱۵- نمودار تاریخچه زمانی جابجایی سیستم تحت زمین لرزه طبس برای سازهی  
مجهز به SAIVS حالت ب . ۶۷
- شکل ۴-۱۶- نمودار تاریخچه انرژی ورودی به سیستم تحت زمین لرزه طبس برای سازهی  
مجهز به SAIVS حالت ب . ۶۷
- شکل ۴-۱۷- نمودار تاریخچه زمانی جابجایی سیستم تحت زمین لرزه طبس برای سازهی  
مجهز به SSASD ۶۸
- شکل ۴-۱۸- نمودار تاریخچه انرژی ورودی به سیستم تحت زمین لرزه طبس برای سازهی  
مجهز به SSASD ۶۸
- شکل ۴-۱۹- نمودار تاریخچه زمانی جابجایی سیستم تحت زمین لرزه السنترو برای سازهی  
بدون کنترل (با سختی ماکزیمم) ۶۹
- شکل ۴-۲۰- نمودار تاریخچه انرژی ورودی به سیستم تحت زمین لرزه السنترو برای سازهی  
بدون کنترل (با سختی ماکزیمم) ۶۹
- شکل ۴-۲۱- نمودار تاریخچه زمانی جابجایی سیستم تحت زمین لرزه السنترو برای سازهی  
مجهز به SAIVS حالت الف . ۷۰

- شکل ۴-۲۲- نمودار تاریخچه زمانی انرژی ورودی به سیستم تحت زمین لرزه السنترو برای  
سازهی مجهز به SAIVS حالت الف . ۷۰
- شکل ۴-۲۳- نمودار تاریخچه زمانی جابهجایی سیستم تحت زمین لرزه السنترو برای سازهی  
مجهز به SAIVS حالت ب . ۷۱
- شکل ۴-۲۴- نمودار تاریخچه زمانی انرژی ورودی به سیستم تحت زمین لرزه السنترو برای  
سازهی مجهز به SAIVS حالت ب . ۷۱
- شکل ۴-۲۵- نمودار تاریخچه زمانی جابهجایی سیستم تحت زمین لرزه السنترو برای سازهی  
مجهز به SSASD. ۷۲
- شکل ۴-۲۶- نمودار تاریخچه زمانی انرژی ورودی به سیستم تحت زمین لرزه السنترو برای  
سازهی مجهز به SSASD. ۷۲
- شکل ۴-۲۷- نمودار تاریخچه زمانی جابهجایی سیستم تحت زمین لرزه طبس برای سازهی  
مجهز به RSASD ۷۴
- شکل ۴-۲۸- نمودار تاریخچه زمانی انرژی ورودی به سیستم تحت زمین لرزه طبس برای  
سازهی مجهز به RSASD ۷۵
- شکل ۴-۲۹- نمودار تاریخچه زمانی جابهجایی سیستم تحت زمین لرزه السنترو برای سازهی  
مجهز به RSASD ۷۵
- شکل ۴-۳۰- نمودار تاریخچه زمانی انرژی ورودی به سیستم تحت زمین لرزه السنترو برای  
سازهی مجهز به RSASD ۷۶
- شکل ۴-۳۱- نمایی از قطعه پیشنهادی SADA ۷۷
- شکل ۴-۳۲- نمودار تاریخچه زمانی جابهجایی سیستم تحت زمین لرزه طبس برای سازهی  
مجهز به SADA ۷۹

- شکل ۴-۳۳- نمودار تاریخچه زمانی انرژی ورودی به سیستم تحت زمین لرزه طیس برای  
 ۸۰ سازهی مجهز به SADA
- شکل ۴-۳۴- نمودار تاریخچه زمانی جابهجایی سیستم تحت زمین لرزه السنترو برای سازهی  
 ۸۰ مجهز به SADA
- شکل ۴-۳۵- نمودار تاریخچه زمانی انرژی ورودی به سیستم تحت زمین لرزه السنترو برای  
 ۸۱ سازهی مجهز به SADA
- شکل ۴-۳۶- شکل توابع عضویت برای ورودی فازی (الف) جابهجایی نسبی طبقات  
 ۸۸ (ب) جابهجایی مطلق ذخیره شده در مهاربند
- شکل ۴-۳۷- شکل تابع عضویت برای خروجی کنترلر فازی  
 ۸۸
- شکل ۴-۳۸- سازه سه طبقه کنترل شده  
 ۸۹
- شکل ۴-۳۹- سطح فازی کنترل  
 ۹۰
- شکل ۴-۴۰- نمودار تاریخچه زمانی جابهجاییهای طبقه اول تحت زمین لرزه Chi Chi  
 در (الف) سازهی بدون کنترل (خط چین) و سازهی با کنترل غیر فعال (خط پر). (ب)  
 ۹۲ سازهی مجهز به SSASD.
- شکل ۴-۴۱- نمودار تاریخچه زمانی جابهجاییهای طبقه اول تحت زمین لرزه Chi Chi  
 در (الف) سازهی مجهز به RSASD. (ب). سازهی مجهز به SADA .  
 ۹۳
- شکل ۴-۴۲- نمودار تاریخچه زمانی قدر مطلق جابهجاییها در مهاربند متصل به (الف)  
 ۹۴ RSASD (ب) SADA تحت زمینلرزه Chi Chi.
- شکل ۴-۴۳- نمودار تاریخچه زمانی جابهجاییهای طبقه اول تحت زمین لرزه طیس در (الف)  
 سازهی بدون کنترل (خط چین) و سازهی با کنترل غیر فعال (خط پُر) (ب)  
 ۹۵ سازهی مجهز به SSASD.

- شکل ۴-۴۴- نمودار تاریخچه زمانی جابه‌جاییهای طبقه اول تحت زمین لرزه طبس (الف)
- ۹۶ سازه‌ی مجهز به RSASD. و (ب). سازه‌ی مجهز به SADA .
- شکل ۴-۴۵- نمودار تاریخچه زمانی قدر مطلق جابه‌جاییها در مهاربند متصل به (الف)
- ۹۷ RSASD. (ب). SADA تحت زمینلرزه طبس .
- شکل ۴-۴۶- نمودار تاریخچه زمانی جابه‌جاییهای طبقه اول تحت زمینلرزه نورتریج
- در (الف) سازه‌ی بدون کنترل (خط چین) و سازه‌ی با کنترل غیر فعال ( خط پُر) (ب)
- ۹۸ سازه‌ی مجهز به SSASD.
- شکل ۴-۴۷- نمودار تاریخچه زمانی جابه‌جاییهای طبقه اول تحت زمین لرزه نورتریج (الف)
- ۹۹ سازه‌ی مجهز به RSASD (ب) سازه‌ی مجهز به SADA .
- شکل ۴-۴۸- نمودار تاریخچه زمانی قدر مطلق جابه‌جاییها در مهاربند متصل به (الف)
- ۱۰۰ RSASD . (ب) SADA تحت زمینلرزه نورتریج .
- ۱۰۱ شکل ۴-۴۹- فلوجارت کلی برای حل مسئله سازه‌ی تحت کنترل

## فهرست جداول

- جدول ۱-۲ فهرستی از کاربردهای عملی کنترل فعال در ساختمانها ۲۱
- جدول ۲-۲- فهرستی از کاربردهای عملی کنترل فعال در پل ها ۲۲
- جدول ۱-۴- قواعد فازی برای کنترل SADA ۸۸
- جدول ۲-۴- ماکزیمم پاسخهای جابهجایی نسبی و شتاب مطلق طبقات مختلف یک سازه سه طبقه تحت زمین لرزه های مختلف . ۹۱

## فصل اول : پیشگفتار و مفاهیم کنترل

### ۱-۱- پیشگفتار

بهسازی لرزه‌ای سازه‌ها در برابر زمین لرزه و بادهای شدید از جمله سرفصل‌های چالش برانگیز در مهندسی عمران به شمار می‌رود. پیشنهاد روش‌های جدید مقاوم سازی لرزه‌ای و بحث در مورد میزان تأثیر هرکدام و نیز بررسی کاربردی بودن هرکدام از روش‌های پیشنهادی چند دهه است که پژوهش‌گران مهندسی عمران را به خود مشغول کرده است. موضوعات مطرح شده از طرفی با مهندسی عمران و از طرف دیگر با طیف وسیعی از علوم کاربردی از قبیل مکانیک، رایانه و غیره در ارتباط‌اند که خود باعث تبادل اطلاعات بین بخش‌های وسیعی از پژوهش‌های نوین است.

ایران با توجه به واقع شدن بر روی کمربند زمین لرزه آلپ- هیمالیا، یکی از مناطق زمین لرزه‌خیز دنیاست. با توجه به شواهد آماری از حدود هفتاد سال پیش تاکنون، به طور میانگین هر ده سال یک بار زمین لرزه‌ی ویران‌کننده‌ای بخشی از این سرزمین پهناور را به کلی ویران کرده است که از زمین لرزه پنجم دی ماه هزار و سیصد و هشتاد و پنج در بم می‌توان به عنوان آخرین آن نام برد که در آن بیش از سی هزار نفر کشته شده‌اند. تخریب تقریباً کامل شهر، نیز ارگ دو هزار و پانصد ساله بم از دیگر آثار آن بوده است و این در حالی است که خسارات روان شناسی اجتماعی و تبعات پس از آن هنوز لحاظ نشده است. بنابراین لزوم تحقیق و پژوهش در این راستا و البته در کنار آن کاربردی کردن روش‌های حاصل شده در تجربیات روزمره مهندسی واضح و مبرهن است.



## ۱-۲- مفاهیم کنترل

مبحث کنترل جایگاه خاصی در تکنولوژی و صنعت دارد. کنترل در بسیاری سیستم‌های مکانیکی از قبیل فضا پیماها، روبات‌ها و. یا فرایندهای صنعتی مانند کنترل فشار و دما و غیره نقش اساسی به عهده دارد. اخیراً نیز کنترل سازه‌های عمرانی در لحظات بارگذاری‌های شدید خارجی همچون زمین‌لرزه و یا بادهای شدید از جمله عناوینی هستند که به سرفصل‌های مهندسی کنترل اضافه شده است.

برای درک بهتر رفتار سازه‌های تحت کنترل در مهندسی عمران و یا مدل‌سازی احتمالی، آشنایی با مفاهیم علم کنترل کاملاً ضروری به نظر می‌رسد. هر چند که محققین می‌بایست حتماً این مفاهیم را در منابع مربوطه پیگیری کنند اما در این فصل اشاره گذرا به برخی از مفاهیم پایه-ای علم کنترل خواهد شد.

عمده مطالب این فصل از مرجع [۱] ذکر گردیده‌اند.

- **متغیر کنترل شده و متغیر تأثیرگذار:** کمیتی که اندازه‌گیری و کنترل می‌شود متغیر کنترل شده و کمیتی که تغییر داده می‌شود تا بر روی کمیت تحت کنترل تأثیر بگذارد را متغیر تأثیرگذار می‌گویند.
- **دستگاه<sup>۲</sup>:** هر جسم فیزیکی تحت کنترل را دستگاه می‌نامند.
- **فرایند<sup>۳</sup>:** عملی که از یک سری کارهای کنترل شده برای نیل به هدفی مشخص صورت می‌گیرد اصطلاحاً فرایند نامیده می‌شود.
- **اغتشاش<sup>۴</sup>:** عاملی است که سبب تغییر شدید خروجی شود. چنانچه این اغتشاش در داخل سیستم تولید شود آن را داخلی در غیر این صورت آن را خارجی می‌نامیم. به عنوان مثال زمین لرزه اغتشاش خارجی برای یک سیستم سازه‌ای است.

---

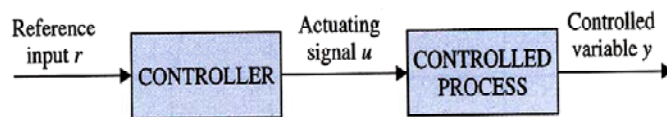
<sup>1</sup> Controlled variable & effective variable

<sup>2</sup> Plant

<sup>3</sup> Process

<sup>4</sup> Disturbance

- کنترل با فیدبک<sup>۱</sup>: عملی است که می‌کوشد اختلاف بین خروجی سیستم و ورودی مرجع را علی‌رغم وجود اغتشاش کم کند.
- کنترل حلقه بسته و کنترل حلقه باز<sup>۲</sup>: سیستم‌هایی که در آنها سیگنال خروجی با سیگنال ورودی مقایسه نمی‌شود را سیستم‌های کنترل حلقه باز می‌نامند. شکل (۱-۱) چنین سیستمی را نشان می‌دهد. در سیستم‌های حلقه باز به ازای هر ورودی به سیستم کاری ثابت انجام می‌شود. این سیستم را بهتر است تنها در مواردی استفاده کرد که ورودی از قبل مشخص بوده و اغتشاش نیز وجود نداشته باشد. برای مثال چراغ راهنمایی را می‌توان یک سیستم کنترل شده با حلقه باز در نظر گرفت زیرا زمان‌های تنظیم شده برای عملکرد آن به حجم ترافیک بستگی ندارد و در واقع از قبل برنامه ریزی شده و ثابت است و یا یک ماشین لباسشویی که برای دو نوع لباس عملیات مشخص و از پیش تعریف شده-ای را انجام می‌دهد.

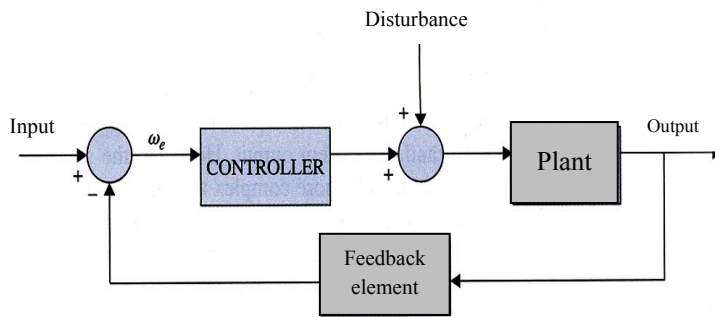


شکل ۱-۱- نمودار جعبه‌ای سیستم کنترلی حلقه باز

در سیستم‌های کنترل حلقه بسته یا سیستم‌های فیدبک‌دار، تفاضل سیگنال ورودی و سیگنال فیدبک شده به منظور کاهش خطا و آوردن خروجی به مقدار مطلوب اندازه‌گیری می‌شود. شکل (۲-۱) نمودار جعبه‌ای این سیستم را نشان می‌دهد. سیگنال فیدبک شده می‌تواند از نوع خروجی یا تابعی از آن باشد اما در هر صورت قبل از مقایسه با ورودی باید هم نوع و هم بعد با ورودی شود.

<sup>۱</sup>Feedback control

<sup>۲</sup>Close loop and Open loop



شکل ۱-۲- نمودار جعبه‌ای سیستم کنترلی حلقه بسته

گاورنر جیمز وات برای کنترل سرعت ماشین‌های بخار در قرن هیجدهم، اولین کار برجسته در مهندسی کنترل به حساب می‌آید. تمام تحقیقات بر روی نظریه کنترل انجام شده توسط محققین مختلف از جمله مینورسکی<sup>۱</sup> و نایکوئیست<sup>۲</sup> و دیگران تا اوایل دهه ۱۹۵۰ محدود به سیستم‌های یک ورودی - یک خروجی بوده‌اند. علاوه بر آن هرچند سیستم‌های مذکور خواسته‌های عملکردی را به طور کم و بیش مطلوبی به انجام می‌رساندند اما در حالت کلی بهینه نبودند. به این محدوده از موضوع کنترل، کنترل کلاسیک گفته می‌شد. روابط به دست آمده در کنترل کلاسیک توانایی کافی برای تحلیل سیستم‌های چند ورودی و چند خروجی را در آن زمان نداشتند.

به همین دلیل و دلایل دیگر و برای پاسخ‌گویی به برخی نیازها، نظریه کنترل مدرن که در حوزه زمان و با استفاده از متغیرهای فضای حالت سیستم‌ها را مدل ریاضی می‌کرد، پایه‌گذاری شد. هرچند نظریه کنترل کلاسیک که بر اساس مدل‌سازی سیستم‌ها در حوزه لاپلاس ارائه شده بود، توسط محققان برای پاسخ‌گویی به نیازهای مطرح شده توسعه داده شد.

برای انجام هر نوع عملیات طراحی یا تحلیل و ارائه‌ی یک سیستم کنترلی، ابتدا می‌بایست مدل ریاضی سیستم استخراج گردد. از آنجا که معادله ریاضی سیستم‌ها اغلب معادلات دیفرانسیل خطی هستند (و یا قابل خطی‌سازی است) می‌توان از تبدیل لاپلاس برای حل آنها بهره برد. در نظریه کنترل کلاسیک برای بررسی روابط بین ورودی و خروجی عناصر مختلف، از توابعی موسوم

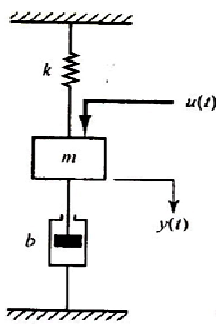
<sup>1</sup> Minorsky

<sup>2</sup> Nyquist

به **توابع تبدیل** استفاده می‌گردد. طبق تعریف، تابع تبدیل عبارتست از نسبت تبدیل لاپلاس خروجی به تبدیل لاپلاس ورودی به شرط صفر بودن تمام شرایط اولیه.

در نظریه کنترل کلاسیک به سیستم یک ورودی و یک خروجی اصطلاحاً SISO<sup>1</sup> گفته می‌شود. پس از دسترسی محققین به رایانه و نیز مطرح شدن سیستم‌های پیچیده‌تر کنترلی، تحلیل سیستم‌های چند ورودی و چند خروجی یا اصطلاحاً MIMO<sup>2</sup> آغاز گردید. نظریه‌ی کنترل نوین با تکیه بر مفهوم فضای حالت به بررسی سیستم‌های چند ورودی چند خروجی می‌پردازد. فضای حالت معادلات دیفرانسیلی مراتب بالاتر را به مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیلی مرتبه اول تبدیل می‌کند و در این حالت به معادلات دیفرانسیل ماتریسی مرتبه اول حاصل، معادله فضای حالت می‌گویند.

فرض کنید یک سیستم یک درجه آزادی طبق شکل (۳-۱) در دست باشد.



شکل ۳-۱- سیستم یک درجه آزادی

معادله حرکت این سیستم، طبق قانون دوم نیوتن برابر است با :

$$m\ddot{y} + b\dot{y} + ky = u \quad (1-1)$$

اگر متغیرهای حالت را به شکل زیر تعریف شوند:

<sup>1</sup> Single-input Single-output

<sup>2</sup> Multiple-input Multiple-output