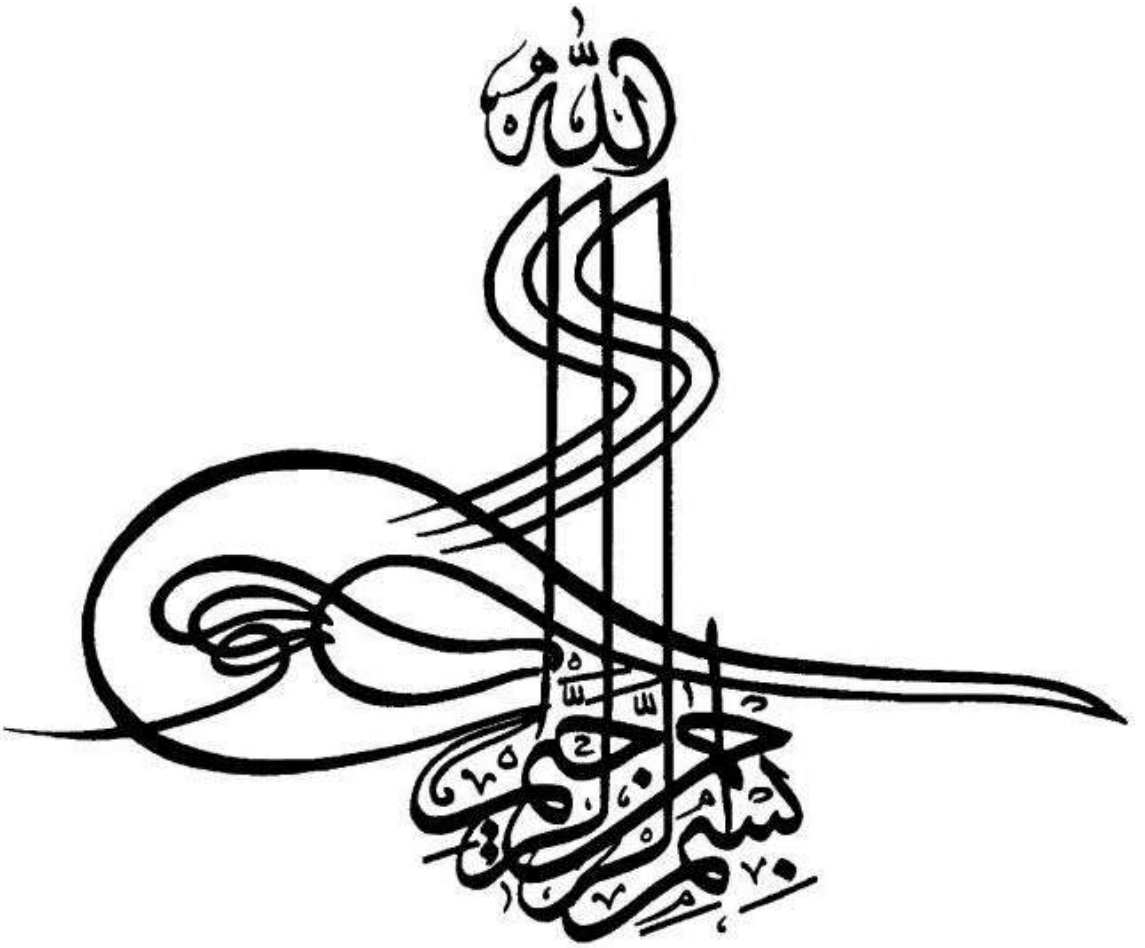

الله
بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی عمران

گروه سازه

شیوه نوین برای کنترل فعال نوسانهای سازه های هوشمند باچندین حسگر و عملگر

(تعیین مشخصات بهینه حسگرها و عملگرها)

دانشجو : بابک کریم پور

استاد راهنما :

دکتر علی کیهانی

استاد مشاور:

دکتر جواد علامتیان

رساله جهت اخذ درجه دکتری

آبان ماه ۱۳۹۳

شیوه نوین برای کنترل فعال نوسانهای سازه های هوشمند باچندین حسگر و عملگر

(تعیین مشخصات بهینه حسگرها و عملگرها)

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده :عمران و معماری

گروه :عمران (سازه)

رساله دکتری بابک کریم پور

تحت عنوان: شیوه نوین برای کنترل فعال نوسانهای سازه های هوشمند باچندین حسگر و عملگر

در تاریخ ..... توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک دکتری مورد ارزیابی و با درجه ..... مورد پذیرش قرار گرفت.

اساتید راهنما	امضاء	اساتید مشاور	امضاء
نام و نام خانوادگی :علی کیهانی		نام و نام خانوادگی :جواد علامتیان	
نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :	
اساتید داور	**امضاء**	**نماینده تحصیلات تکمیلی**	**امضاء**
نام و نام خانوادگی :رامین امینی		نام و نام خانوادگی :	
نام و نام خانوادگی : علی کلات جاری			
نام و نام خانوادگی :محسن گرامی			
نام و نام خانوادگی :			

تشکر و قدردانی

تقدیر و تشکر بیکران از استاد ارجمندم **جناب آقای دکتر کیهانی** را وظیفه قطعی خود می دانم که با راهنمائی ها و ارشادات لازم و همچنین تشویق اینجانب شرایط را در تکمیل مناسب تحقیق مساعد نمودند. همچنین می بایست از ارشادات و زحمات بیکران **جناب آقای دکتر علامتیان** که در کلیه مراحل انجام این تحقیق من را یاری نمودند قدردانی نمایم.همچنین لازم است کمال تشکر خود را از اساتید ارجمندم:

جناب آقای دکتر فیاض رحیم زاده (دانشگاه صنعتی شریف)

جناب آقای دکتر مهدی زهرائی(دانشگاه تهران)

جناب آقای دکتر قربانی (دانشگاه تهران)

که با نظرات ارزشمند و سازنده خود مرا در تکمیل این رساله تحقیقاتی یاری نموده اند ، ابراز دارم.

اقرارنامه و واگذاری حقوق

دانشجو تأیید می نماید که مطالب مندرج دراین رساله نتیجه تحقیقات خودش می باشد و در صورت استفاده از نتایج دیگران مرجع آن را ذکر نموده است.

کلیه حقوق مادی مترتب از نتایج مطالعات ، آزمایشات و نو آوری ناشی از تحقیق موضوع این رساله متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد .

۱۳۹۳

چکیده

همواره یکی از معایب الگوریتم های موجود کنترل فعال سازه ها وجود پیچیدگی و روابط صرف ریاضی فراوان در آنها می باشد. در این تحقیق روش نوینی برای پایش فعال نوسانهای سازه ها ارائه گردیده است. رابطه سازی این فرایند بر پایه اصول دینامیک سازه ها می باشد و در آن نوسانهای سازه، با چندین عملگر و حسگر پایش می شود. در اینجا، نیروی هر عملگر به صورت نیروی معادل میرایی لزج پنداشته شده و نیروهای عملگرها به گونه ای محاسبه شده اند که تعداد بیشتری از میرایی مودهای نوسان پایین سازه بحرانی شوند. با این کار، نیروهای عملگرها در یک فرایند ریاضی ساده به دست می آید. ضمن آنکه موقعیت مناسب حسگرها و عملگرها نیز با توجه به اهمیت مودهای اول نوسان و درایه های ماتریس شکل نوسان پیشنهاد می گردد. کارایی روش پیشنهادی با بررسی تغییرات تغییر مکان، بیشینه انرژی جنبشی سازه و مجموع مقادیر تغییر مکانهای نسبی طبقات در حالت های مختلف پایش فعال سازه تحت بارگذاری های مختلف (بارهای هارمونیک، تحریک زلزله و بارهای انفجاری) بررسی گردیده است. نتایج عددی نشان می دهند، شیوه پایش فعال پیشنهادی عملکرد مناسبی در کاهش نوسانهای سازه دارد. همچنین بر اساس نمودارهای تاریخچه زمانی نیروی عملگر و نیروی زلزله ، می توان پی برد مقادیر نیروی عملگر حاصله در روش پیشنهادی دارای مقادیر عملی و قابل تامین نسبت به نیروی زلزله و همچنین وزن طبقات می باشد. مبحث عدم قطعیت و تاثیر آن در الگوریتم پیشنهادی نیز مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه نتایج حاصل از روش پیشنهادی با نتایج روشهای معمول کنترل فعال سازه ها همانند روش LQR نشان از توانایی و کارایی مناسب روش پیشنهادی در عین سادگی آن دارد.

کلمات کلیدی:کنترل فعال- سازه هوشمند- روش نوین- حسگر- عملگر- دینامیک سازه

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه و کلیات ۱۶

۱-۱مقدمه ۱۶

۱-۲تعریف مساله و ضرورت انجام تحقیق..... ۲۰

۱-۳ اهداف تحقیق..... ۲۱

۱-۴-نوآوری تحقیق..... ۲۱

۱-۵-دستاوردهای مورد انتظار..... ۲۱

۱-۶ ارتباط موضوع تحقیق با مطالعات پیشین ۲۲

۱-۷تجهیزات مورد استفاده در تحقیق ۲۳

۱-۸-فرضیه ها و فرضیات تحقیق ۲۳

۱-۹ مراحل انجام تحقیق ۲۴

۱-۱۰-ساختار تحقیق ۲۵

فصل دوم : مطالعات پیشین ۲۸

۲-۱ مبانی دینامیک سازه ها(مورد استفاده در طرح پیشنهادی)..... ۲۸

۲-۲-انواع سیستمهای کنترل در سازه های هوشمند..... ۲۸

۲-۳ انواع تئوری های کنترل فعال سازه ها..... ۲۹

۲-۴ مدل سازی اجزای محدود سازه های هوشمند..... ۴۹

۲-۵ مواد پیزو الکتریک در کنترل ارتعاشات..... ۵۴

۲-۶ تعیین موقعیت حسگرها و عملگرها در کنترل فعال سازه ها..... ۵۹

۲-۶-۱استفاده از الگوریتم ژنتیک جهت بهینه یابی موقعیت حسگرها و عملگرها.....

۲-۶-۲استفاده ازرابطه سازی اجزای محدودجهت بهینه یابی موقعیت حسگرها و عملگرها.....

۲-۶-۳تعیین موقعیت حسگرها بر اساس ماتریس اطلاعات فیشر(Fisher information matrix)..

فصل سوم : روش جدید پیشنهادی ۷۲

۳-۱مبانی روش جدید پیشنهادی ۷۲

۳-۲- ارزیابی تحلیلی شیوه پایش پیشنهادی ۷۹

۳-۳-ارزیابی تعداد حسگرها..... ۸۱

۳-۴-مزایای روش پیشنهادی..... ۸۳

فصل چهارم :ارزیابی عددی روش پیشنهادی ۸۵

۴-۱ ارزیابی عددی تحت بار هارمونیک..... ۸۵

۴-۲-ارزیابی عددی تحت بار انفجاری ۹۲

۴-۳ ارزیابی عددی تحت بار زلزله..... ۹۶

۴-۴ مقایسه روش کنترل پیشنهادی با روش متداول LQR..... ۱۰۱

فصل پنجم : بررسی عدم قطعیت و پایداری سازه در روش پیشنهادی..... ۱۰۹

۵-۱ مقدمه..... ۱۰۹

۵-۲ تعاریف مباحث عدم قطعیت ۱۱۰

۵-۳ بررسی عدم قطعیت در روش پیشنهادی..... ۱۱۰

۵-۴ ارزیابی حساسیت ۱۱۳

۵-۵ بررسی پایداری در روش پیشنهادی..... ۱۱۴

فصل ششم : جمع بندی و نتیجه گیری ۱۱۶

پیوستها..... ۱۲۰

فهرست اشکال

شکل ۱-۱: مباحث مختلف در قلمرو سازه های هوشمند

شکل۱-۲: تصویر نمادین مراحل کنترل فعال سازه ها

شکل۱-۳ :فلوچارت مراحل تحقیق

شکل ۲-۱: یک سیستم دو درجه آزادی با اعمال نیرو به یک درجه

شکل ۲-۲:تغییر مکان درجه آزادی اول در حالتهای مختلف کنترل

شکل ۲-۳:تغییر مکان درجه آزادی دوم در حالتهای مختلف کنترل

شکل ۲-۴ : فرایند کنترل لرزه ای سازه های هوشمند پیزوالکتریک

شکل ۲-۵: نمونه آزمایشگاهی از عملکرد حسگرها و عملگرها

شکل ۲-۶ : استفاده از مواد پیزو الکتریک در کنترل فعال ارتعاشات سازه های قابی(حالت اول)

شکل ۲-۷: استفاده از مواد پیزو الکتریک در کنترل فعال ارتعاشات سازه های قابی(حالت دوم)

شکل ۲-۸ :مقایسه نیروی برشی معادل حاصله در حالت های ۱و۲ جهت قرارگیری عملگرها طی مقادیر مختلف بازوی لنگر

شکل ۳-۱ :الگوریتم اجرایی روش پیشنهادی

شکل ۴-۱:ساختمان ۵ طبقه برشی مورد استفاده در ارزیابی عددی روش

شکل ۴-۲ : تغییرات مقادیر تغییر مکان بر حسب زمان در دو حالت بدون سیستم کنترل واستفاده از سیستم کنترل با الگوریتم پیشنهادی

شکل۴-۳ : نمودار تغییرات نیروی عملگر بر حسب زمان در حالت استفاده از الگوریتم پیشنهادی

شکل ۴-۴: مقایسه تغییرات تغییرمکان طبقه پنجم بر اساس زمان را در دو حالت بدون استفاده از سیستم کنترل و حالت استفاده از یک عملگر و یک حسگر

شکل ۴-۵: مقایسه تغییرات تغییرمکان طبقه چهارم بر اساس زمان را در دو حالت بدون استفاده از سیستم کنترل و حالت استفاده از یک عملگر و یک حسگر

شکل ۴-۶: نمودار تغییرات تغییر مکان طبقه پنجم در سه حالت کنترل

شکل ۴-۷: تغییرات نیروی عملگر در الگوریتم پیشنهادی بااستفاده از یک عملگر و یک حسگر در مقایسه با نیروی زلزله نسبت به زمان در طبقه پنجم

شکل ۴-۸: تاریخچه زمانی تغییرات شتاب طبقه پنجم در دو حالت بدون کنترل

شکل۴-۹ : مقایسه نیروی عملگر در حالت استفاده از الگوریتم پیشنهادی با یک عملگر و یک حسگر و روش LQR

شکل ۴-۱۰: مقایسه نیروی عملگر در حالت استفاده از الگوریتم پیشنهادی با سه عملگر و سه حسگر و روش LQR

شکل۴-۱۱ : مقادیر تغییرمکان طبقه پنج را در سه حالت کنترل

شکل ۴-۱۲: مقایسه تغییرمکان طبقه پنج در سه حالت کنترل

فهرست جداول

جدول ۱-۱ : الگوریتم های متداول کنترل فعال سازه ها

جدول ۲-۱ : پروسه انتخاب موقعیت بهینه عملگر و حسگر در سازه دو درجه آزادی

جدول ۴-۱: اولویت های نصب حسگرها و عملگرها در سازه ۵ درجه آزادی

جدول ۴-۲: حالت های مختلف پایش فعال سازه پنج طبقه

جدول ۴-۳: جدول مقایسه بیشینه تغییر مکان در حالت های مختلف بر اساس الگوریتم پیشنهادی

جدول ۴-۴ :مقایسه بیشینه تغییرات انرژی جنبشی سازه در بازه زمانی تحلیل دینامیکی در حالت های مختلف

جدول ۴-۵: بیشینه مجموع تغییر مکانهای نسبی طبقات در حالت های مختلف پایش سازه

جدول ۴-۶: بیشینه شتاب طبقه فوقانی در حالت های مختلف پایش سازه تحت بار هارمونیک

جدول ۴-۷ مقایسه بیشینه تغییر مکان طبقات در حالت های مختلف کنترل تحت بار انفجاری

جدول ۴-۸:مقایسه بیشینه تغییرات انرژی جنبشی سازه تحت بار انفجاری در حالت های مختلف کنترل

جدول ۴-۹: بیشینه مجموع تغییر مکانهای نسبی طبقات در حالت های مختلف کنترل سازه تحت بار انفجاری

جدول ۴-۱۰ : مقایسه بیشینه تغییر مکان طبقات در حالت های مختلف پایش بر اساس الگوریتم پیشنهادی(cm)

جدول ۵-۱: جرمهای تصادفی تولید شده در حالت های مختلف

جدول ۵-۲: بررسی تاثیر عدم قطعیت

فهرست علائم و اختصارات

m_j	جرم درجه آزادی j ام
$\ddot{v}_j$	شتاب در درجه آزادی j ام
f_{Dj}	نیروی میرایی در درجه آزادی j ام
f_{sj}	نیروی سختی در درجه آزادی j ام
$P_j(t)$	نیروی خارجی اعمال شده در درجه آزادی j ام
k_{j1}	سختی درجه آزادی j ام در مود اول
c_{j2}	میرایی درجه آزادی j ام در مود دوم
	فرکانس طبیعی مود i ام
ζ	نسبت میرایی
C_c	میرایی بحرانی
$[\overline{K}]$	سختی معادل
	شتاب مودال مود اول
$\dot{Z}_1$	سرعت مودال مود اول
Φ_{K1}	درایه سطر k ام ستون اول ماتریس شکل نوسان
f_k^a	نیروی عملگر در درجه آزادی k ام
$\{\Phi_1\}$	مود اول ماتریس شکل نوسان
C^*_1	میرایی معادل مود اول
M_a	لنگر متمرکز پای ستون در مدل اجرای کنترل فعال
F_p	نیروی ورقهای پیزو الکتریک در مدل اجرای کنترل فعال
F_a	نیروی معادل عملگر
$[\Psi]$	شکل نوسان در فضای حالت
w_1	تابع وزن
w_2	تابع وزن
Ω_a	شاخص قابلیت کنترل عملگرها
Ω_s	شاخص قابلیت کنترل عملگرها
$\dot{Z}_i$	سرعت مودال مود i ام
	سرعت در درجه آزادی N ام

D	ماتریس موقعیت نیروهای کنترل
E	ماتریس موقعیت تحریک خارجی
L	ماتریس ضرایب لاگرانژین
Q	ماتریس وزنی مربوط به تغییر مکانها
R	ماتریس وزنی مربوط به نیروی کنترل
F_m	نیروی تحریک خارجی
F_c	نیروی کنترل

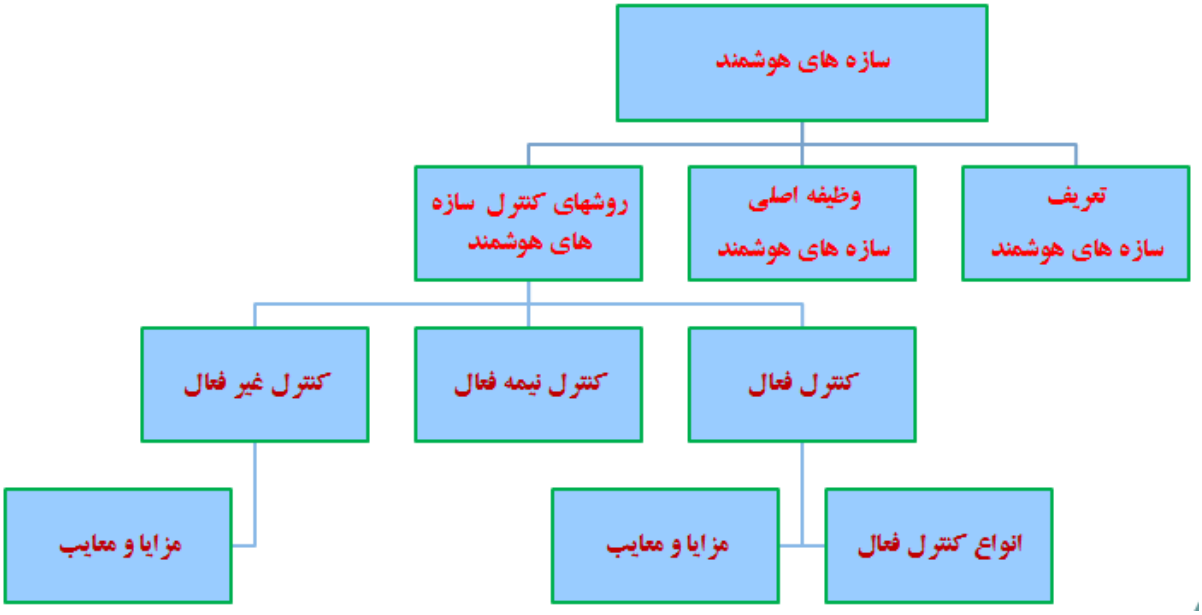
فصل اول

مقدمه و کلیات

فصل اول : مقدمه و کلیات

۱-۱مقدمه

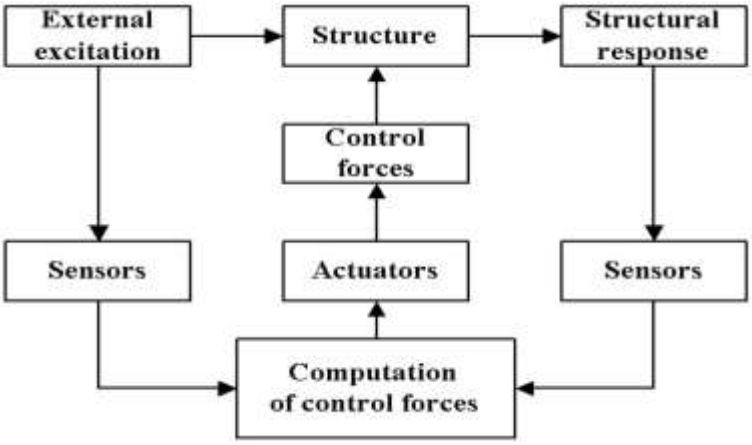
سازه هوشمند به سازه ای گویند که شبیه انسان قادر است بیاموزد و خود را در برابر تحریک خارجی حفظ نماید. سازه های هوشمند ترکیبی از مواد و مصالح با چند وظیفه،حسگرها (ابزار برداشت وضعیت ارتعاشی سازه) و عملگرها (ابزار اعمال نیرو بر سازه) و همچنین کنترل مناسب برای دستیابی به عملکرد مناسب سازه تحت اثر شرایط محیطی متفاوت می باشد. وظیفه اصلی سازه های هوشمند استفاده از حسگرها و عملگرها جهت همراستا کردن ویژگیهای سازه (همانند میرایی ،سختی و....)برای پاسخ مناسب در برابر نیروهای خارجی می باشد. مسائل مربوط به سازه های هوشمند معمولا در قلمرو مجموعه ای از رشته ها شامل علم مواد، مکانیک کاربردی(لرزش، الاستیسیته و..)،الکترونیک(عملگر، حسگر،کنترل)، بیو مکانیک و سازه می باشد. امروزه حفظ عملکرد سازه در برابر حوادث طبیعی نظیر زلزله از دغدغه های مهم مهندسین هستند. لذا در سالهای اخیر تحقیقات زیادی در خصوص کنترل سازه ها صورت گرفته است. روشهای مختلف کنترل سازه ها شامل روشهای کنترل فعال ، نیمه فعال وغیر فعال سازه ها می باشند. [۱۰]



شکل ۱-۱: مباحث مختلف در قلمرو سازه های هوشمند

موضوع مطالعه در این رساله عبارت از تعیین مشخصات حسگرها و عملگرها (موقعیت و مقدار نیرو) در کنترل فعال سازه های هوشمند بر اساس روش پیشنهادی جدید می باشد. سیستم های کنترل غیر فعال سازه ها، بدلیل ساده بودن،کم هزینه بودن و عدم نیاز به انرژی خارجی کاربرد بیشتری پیدا کرده اند. اما با توجه به ثابت بودن خصوصیات سازه ای این سیستم ها قابلیت تغییر و هماهنگی با شرایط (مخصوصا در زمان زلزله) را ندارند. از طرف دیگر این سازه ها تنها برای تحریک های خاصی که طراحی شده اند کاربرد دارند و برای انواع دیگر تحریک کارائی زیادی ندارند. در کنترل غیر فعال سازه ها انرژی از سیستم خارج می شود. سیستم های جدا ساز پی،میراگرهای ویسکوالاستیک ،قطعات افزایش دهنده سختی و میرایی و میراگرجرمی تنظیم شده(TMD) بخشی از روشهای کنترل غیرفعال سازه ها هستند. در سیستم های کنترل نیمه فعال،محدودیتهای روش کنترل غیرفعال وجود ندارد. در این سیستم ها ضریب میرایی و یا سختی وسیله کنترلی متناسب با نیروی وارد بر سازه در هر لحظه تغییر کرده و ارتعاشات سازه کاهش می یابد. برخی از انواع عملی این سیستم ها عبارتند از میراگرهای جرمی تنظیم شده نیمه فعال و کنترل کننده های مهاربندی نیمه فعال. از سوی دیگر،پدیده هایی همانند لرزه ها و تکانهای شدید می توانند برای سازه مضر واقع شوند و اثرات و

زیانهای آنها می تواند برروی سازه زیاد باشد . در دهه اخیر کنترل کننده های فعال سازه برای مقابله با چنین نیروهایی بسیار مورد توجه قرار گرفته اند. این سیستم ها پاسخ بهتری در برابر تحریکهای مختلف از خود نشان می دهند. کاربرد این سیستم ها از سال ۱۹۸۹ آغاز شد. ضمن آنکه این سیستم ها دارای معایبی همچون پیچیده بودن،حجم بالای محاسبات و عدم قطعیت پارامترها نیز می باشند. در این سیستم ها عملگرها توسط منبع انرژی خارجی برای تولید نیرو تغذیه می شوند. شکل زیر تصویر نمادین مراحل کنترل فعال سازه ها را نشان می دهد.



شکل۱-۲: تصویر نمادین مراحل کنترل فعال سازه ها[۱۰]

بر اساس استراتژی مورد نظر کنترل فعال به سه صورت امکان پذیر می باشد:

۱-سیستم کنترل فعال حلقه باز:وقتی حلقه سمت چپ شکل ۱-۲ قابل استفاده است.

۲- سیستم کنترل فعال حلقه بسته :وقتی حلقه سمت راست شکل ۱-۲ قابل استفاده است.

۳- سیستم کنترل فعال حلقه باز- بسته :وقتی هر دو حلقه شکل ۱-۲ قابل استفاده است.

الگوریتم های متداول در کنترل فعال سازه ها به همراه مبانی هر روش در جدول ۱-۱ درج شده اند.

جدول۱-۱ : الگوریتم های متداول کنترل فعال سازه ها

نام روش	مبانی روش
پایش بهینه خطی[۹۲]	کمینه کردن شاخص عملکرد
انتساب قطب[۳]	کمینه کردن شاخص عملکرد
فضای مودال مستقل [۵۲]	کمینه کردن نیروی پایش مودال
پایش بهینه آنی [۹۳]	تعیین نیروی پایش با کمینه کردن تابع عملکرد در هر لحظه از زمان
پایش حالت کران دار[۶۱]	حفظ پاسخ در محدوده مجاز
پایش غیر خطی[۹۱]	کمینه کردن تابع عملکرد مرتبه بالا
پایش بازخورد کلی شده[۹۵]	نیروی پایش تابعی از تغییر مکان سازه ای،سرعت و شتاب
پایش مود لغزشی (SMC) [۹۶]	تولید سطح لغزش شامل ترکیب خطی از عاملهای حالت
جبران تاخیر زمانی[۱]	وارد کردن اثر تاخیر زمانی بین اندازه گیری پاسخ و عملکرد پایش
شبکه عصبی و منطق فازی[۸۶]	پایگاه داده و پایگاه قواعد
استفاده از الگوریتم ژنتیک[۱۰]	الگوریتم ژنتیک

سامانه های کنترل نیمه فعال از سامانه های غیر فعال اصلاح شده جهت تنظیم ویژگیهای مکانیکی منشا می گیرند.بطور مثال ابزار اتلاف انرژی مکمل از این جمله سامانه ها می باشند. ویژگیهای مکانیکی این سامانه ها ممکن است بر پایه بازخورد از پاسخ اندازه گیری شده و یا تحریک تنظیم گردند. همانند سامانه های کنترل فعال، در سامانه های نیمه فعال نیز کنترل کننده ضمن اندازه گیری بازخورد،سیگنالهای دستوری برای ابزار کنترل نیمه فعال را تولید می کند. همچنین در سامانه های نیمه فعال، همانند سامانه های غیر فعال، نیروهای کنترل به عنوان نتیجه ای از حرکت سازه حاصل شده و بر اساس تنظیم مناسب خصوصیات مکانیکی سامانه کنترل عمل می نماید .

۱-۲تعریف مساله و ضرورت انجام تحقیق

هدف اصلی در این تحقیق شیوه نوین برای کنترل فعال نوسانهای سازه های هوشمند باچندین حسگر و عملگر و تعیین ویژگیهای حسگرها و عملگرها(نیروی لحظه ای عملگرها و موقعیت عملگرها و حسگرها) با توجه به روابط و نگره های دینامیک سازه ها و ریاضیات می باشد. در مورد ضرورت موضوع می توان گفت در سازه های هوشمند عملکرد حسگرها و عملگرها در تنظیم ویژگیهای سازه ای از قبیل سختی،میرائی و...جهت پاسخ مناسب به عوامل خارجی از طرف سازه از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در این میان عملکرد مناسب حسگرها و عملگرها منوط به تعیین دقیق موقعیت و نیروی اعمالی به سازه از طرف عملگرها می باشد. این تحقیق به بررسی یک روش جدید و ساده جهت تعیین دقیق موقعیت و نیروی لحظه ای اعمالی به سازه از طرف عملگرها و موقعیت بهینه حسگرها در شرایطی که در سازه از چندین حسگر و عملگر استفاده شده است، می پردازد.