



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:

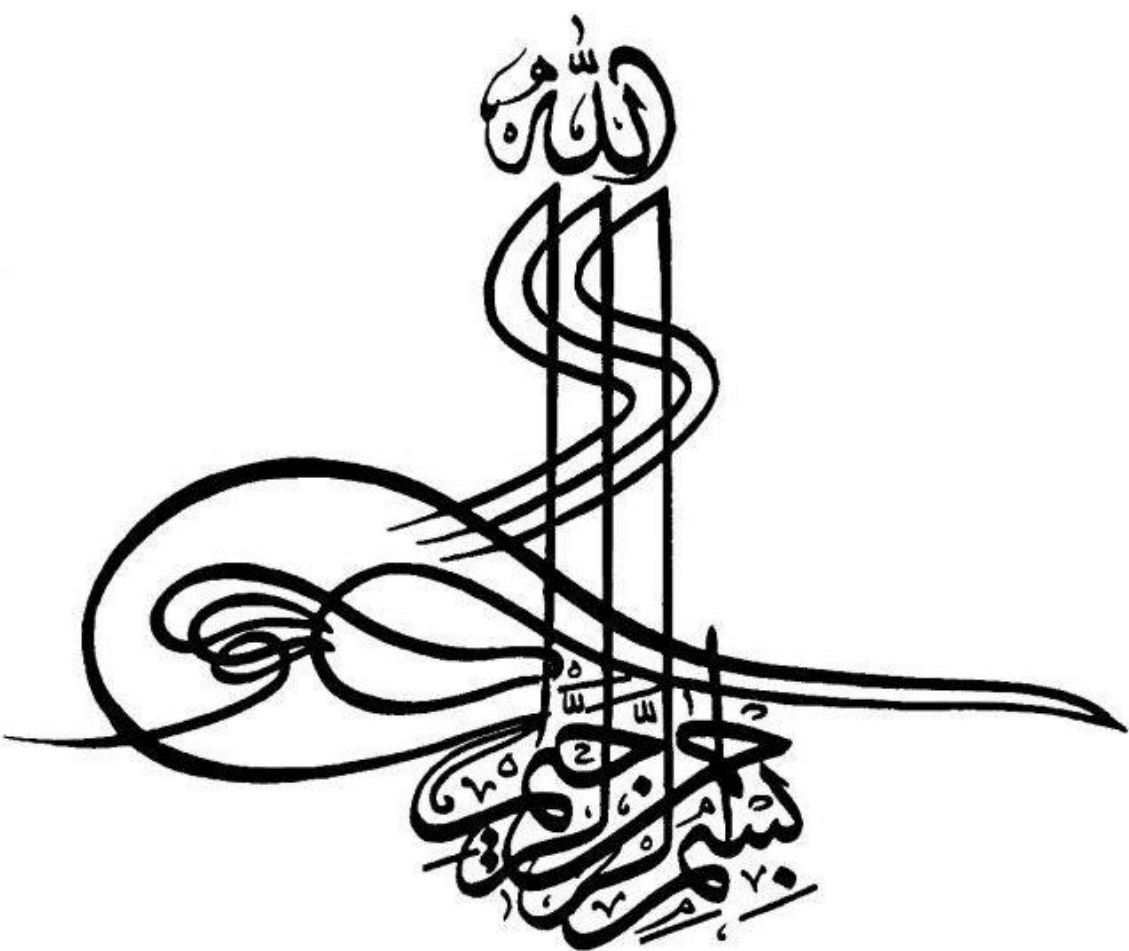
دکتر علی کیهانی

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.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی :جواد علامتیان		نام و نام خانوادگی :علی کیهانی
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :رامین امینی
			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 راهنمایی 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 در این 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 نوآوری 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 موده های 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 موده های 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
۱-۱ مقدمه	۱۶
۲-۱ تعریف مساله و ضرورت انجام تحقیق	۲۰
۳-۱ اهداف تحقیق	۲۱
۴-۱ نوآوری تحقیق	۲۱
۵-۱ دستاوردهای مورد انتظار	۲۱
۶-۱ ارتباط موضوع تحقیق با مطالعات پیشین	۲۲
۷-۱ تجهیزات مورد استفاده در تحقیق	۲۳
۸-۱ فرضیه ها و فرضیات تحقیق	۲۳
۹-۱ مراحل انجام تحقیق	۲۴
۱۰-۱ ساختار تحقیق	۲۵
فصل دوم : مطالعات پیشین	۲۸
۱-۲ مبانی دینامیک سازه ها (مورد استفاده در طرح پیشنهادی)	۲۸
۲-۲ انواع سیستمهای کنترل در سازه های هوشمند	۲۸
۳-۲ انواع تئوری های کنترل فعال سازه ها	۲۹
۴-۲ مدل سازی اجزای محدود سازه های هوشمند	۴۹
۵-۲ مواد پیزو الکتریک در کنترل ارتعاشات	۵۴
۶-۲ تعیین موقعیت حسگرها و عملگرها در کنترل فعال سازه ها	۵۹
۶-۲-۱ استفاده از الگوریتم ژنتیک جهت بهینه یابی موقعیت حسگرها و عملگرها	
۶-۲-۲ استفاده از رابطه سازی اجزای محدود جهت بهینه یابی موقعیت حسگرها و عملگرها	

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

فصل سوم : روش جدید پیشنهادی ۷۲

۱-۳ مبانی روش جدید پیشنهادی ۷۲

۲-۳-۱ ارزیابی تحلیلی شیوه پایش پیشنهادی ۷۹

۳-۳-۱ ارزیابی تعداد حسگرها ۸۱

۳-۴-۱ مزایای روش پیشنهادی ۸۳

فصل چهارم : ارزیابی عددی روش پیشنهادی ۸۵

۱-۴ ارزیابی عددی تحت بار هارمونیک ۸۵

۲-۴-۱ ارزیابی عددی تحت بار انفجاری ۹۲

۳-۴-۱ 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

۱-۵ مقدمه ۱۰۹

۲-۵ تعاریف مباحث عدم قطعیت ۱۱۰

۳-۵ بررسی عدم قطعیت در روش پیشنهادی ۱۱۰

۴-۵ 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
- شکل ۱-۲: تصویر نمادین مراحل کنترل فعال سازه ها
- شکل ۱-۳: فلوچارت مراحل تحقیق
- شکل ۱-۲: یک سیستم دو درجه آزادی با اعمال نیرو به یک درجه
- شکل ۲-۲: تغییر مکان درجه آزادی اول در حالت های مختلف کنترل
- شکل ۳-۲: تغییر مکان درجه آزادی دوم در حالت های مختلف کنترل
- شکل ۴-۲: فرایند کنترل لرزه ای سازه های هوشمند پیزوالکتریک
- شکل ۵-۲: نمونه آزمایشگاهی از عملکرد حسگرها و عملگرها
- شکل ۶-۲: استفاده از مواد پیزوالکتریک در کنترل فعال ارتعاشات سازه های قابی (حالت اول)
- شکل ۷-۲: استفاده از مواد پیزوالکتریک در کنترل فعال ارتعاشات سازه های قابی (حالت دوم)
- شکل ۸-۲: مقایسه نیروی برشی معادل حاصله در حالت های ۱ و ۲ جهت قرارگیری عملگرها طی مقادیر مختلف بازوی لنگر
- شکل ۱-۳: الگوریتم اجرایی روش پیشنهادی
- شکل ۱-۴: ساختمان ۵ طبقه برشی مورد استفاده در ارزیابی عددی روش
- شکل ۲-۴: تغییرات مقادیر تغییر مکان بر حسب زمان در دو حالت بدون سیستم کنترل و استفاده از سیستم کنترل با الگوریتم پیشنهادی
- شکل ۳-۴: نمودار تغییرات نیروی عملگر بر حسب زمان در حالت استفاده از الگوریتم پیشنهادی
- شکل ۴-۴: مقایسه تغییرات تغییر مکان 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 با استفاده 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

شکل ۴-۹: 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

شکل ۴-۱۱: 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 ۱-۲: پروسه انتخاب موقعیت بهینه عملگر و حسگر در سازه دو درجه آزادی
- جدول ۱-۴: اولویت های نصب حسگرها و عملگرها در سازه ۵ درجه آزادی
- جدول ۲-۴: حالت های مختلف پایش فعال سازه پنج طبقه
- جدول ۳-۴: 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 ۵-۴: بیشینه مجموع تغییر مکانهای نسبی طبقات در حالت های مختلف پایش سازه
- جدول ۶-۴: بیشینه شتاب طبقه فوقانی در حالت های مختلف پایش سازه تحت بار هارمونیک
- جدول ۷-۴: مقایسه بیشینه تغییر مکان طبقات در حالت های مختلف کنترل تحت بار انفجاری
- جدول ۸-۴: مقایسه بیشینه تغییرات انرژی جنبشی سازه تحت بار انفجاری در حالت های مختلف کنترل
- جدول ۹-۴: بیشینه مجموع تغییر مکانهای نسبی طبقات در حالت های مختلف کنترل سازه تحت بار انفجاری
- جدول ۱۰-۴: مقایسه بیشینه تغییر مکان طبقات در حالت های مختلف پایش بر اساس الگوریتم پیشنهادی (cm)
- جدول ۱-۵: جرمهای تصادفی تولید شده در حالت های مختلف
- جدول ۲-۵: بررسی تاثیر عدم قطعیت
- جدول ۱-۶: مقایسه درصدی بین حالت های مختلف پایش تحت اثر بار هارمونیک

فهرست علائم و اختصارات

m_j	جرم درجه آزادی j ام
$\dot{v}_j$	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
ω_i	فرکانس طبیعی مود i ام
ζ	نسبت میرایی
C_c	میرایی بحرانی
$[\bar{K}]$	سختی معادل
$\ddot{Z}_1$	شتاب مودال مود اول
$\dot{Z}_1$	سرعت مودال مود اول
Φ_{KI}	درایه سطر k ام ستون اول ماتریس شکل نوسان
f_k^a	نیروی عملگر در درجه آزادی k ام
$\{\Phi_I\}$	مود اول ماتریس شکل نوسان
C^*_I	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	$\dot{D}_N$
ماتریس موقعیت نیروهای کنترل	D
ماتریس موقعیت تحریک خارجی	E
ماتریس ضرایب لاگرانژین	L
ماتریس وزنی مربوط به تغییر مکانها	Q
ماتریس وزنی مربوط به نیروی کنترل	R
نیروی تحریک خارجی	F_m
نیروی کنترل	F_c

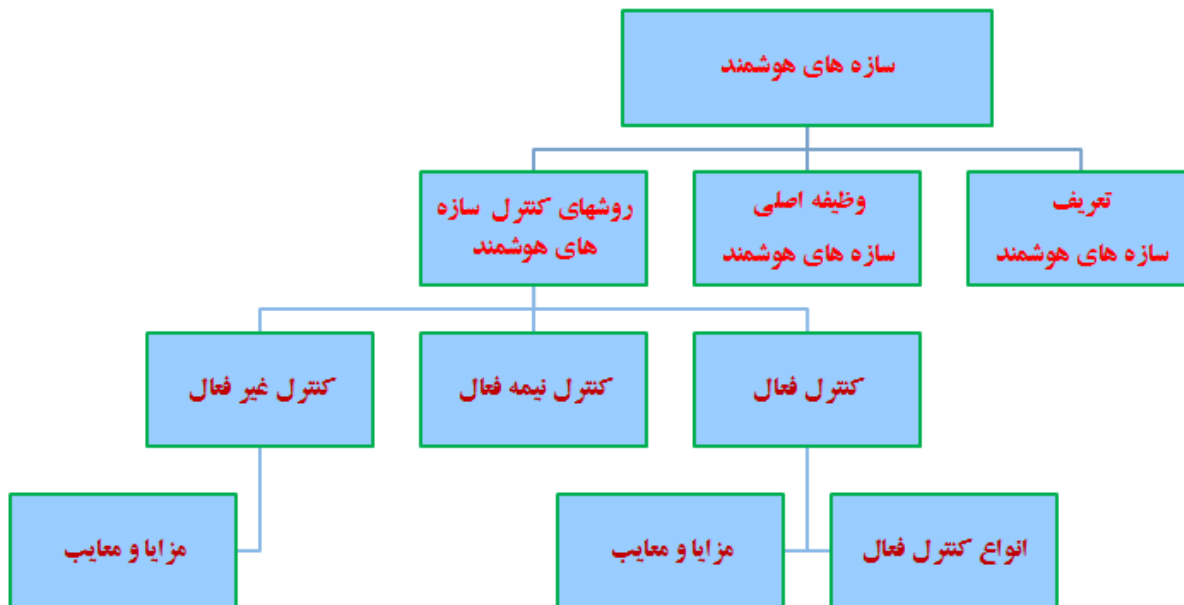
فصل اول

مقدمه و کلیات

فصل اول : مقدمه و کلیات

۱-۱ مقدمه

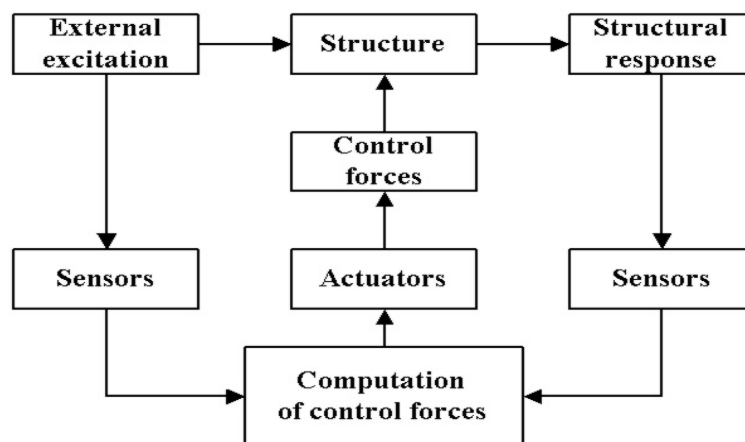
سازه هوشمند به سازه ای گویند که شبیه انسان قادر است بیاموزد و خود را در برابر تحریک خارجی حفظ نماید. سازه های هوشمند ترکیبی از مواد و مصالح با چند وظیفه، حسگرها (ابزار برداشت وضعیت ارتعاشی سازه) و عملگرها (ابزار اعمال نیرو بر سازه) و همچنین کنترل مناسب برای دستیابی به عملکرد مناسب سازه تحت اثر شرایط محیطی متفاوت می باشد. وظیفه اصلی سازه های هوشمند استفاده از حسگرها و عملگرها جهت همراهی کردن ویژگیهای سازه (همانند میرایی، سختی و...) برای پاسخ مناسب در برابر نیروهای خارجی می باشد. مسائل مربوط به سازه های هوشمند معمولاً 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 مهندسين 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 و غیر 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 کارایی 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 میراگر جرمی تنظیم شده (TMD) بخشی از روشهای کنترل غیر فعال سازه ها هستند. در سیستم های کنترل نیمه فعال، محدودیتهای روش کنترل غیر فعال 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 بر روی سازه زیاد باشد . در دهه اخیر کنترل کننده های فعال سازه برای مقابله با چنین نیروهای 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.



شکل ۱-۲: 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.

جدول ۱-۱: 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 ائتلاف 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 .

۱-۲ تعریف 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، میرایی 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.

۱-۳-هدف تحقیق

هدف از این تحقیق ارائه پیشنهاد یک الگوریتم جدید در کنترل فعال نوسانات سازه در برابر بارهای مختلف بر پایه استفاده از اصول دینامیک سازه ها و استفاده از تئوری میرایی بحرانی مطابق یک روش ساده و قابل درک برای متخصصین و مهندسين رشته عمران می باشد. این هدف شامل تعیین مقادیر مناسب نیروی عملگر و موقعیت مناسب عملگرها و حسگرها می باشد.

۱-۴-نوآوری تحقیق

تا کنون الگوریتمهای متفاوتی در کنترل فعال سازه ها پیشنهاد گردیده است که عموماً بر مبنای محاسبات پیچیده ریاضی استوار بوده و بصورت کلی برای کنترل سیستمهای مختلف (نه بصورت خاص برای سازه های قابی ساختمانی) بیان گردیده است. روش ارائه شده در این تحقیق بر پایه علم دینامیک سازه ها ، بصورت کامل سازگار با سازه های قابی ساختمانی و قابل درک و کنترل توسط متخصصین شاخه مهندسی عمران می باشد.

۱-۵-دستاوردهای مورد انتظار

دستاوردهای مورد انتظار دراین تحقیق عبارتند از:

الف- دستیابی به روابط ریاضی و دینامیکی سازه برای حالت استفاده از چندین عملگر و چندین حسگر ، یافتن روابط نیروهای لحظه ای مناسب عملگرها و نیز نحوه یافتن موقعیت مناسب حسگر و عملگرها با روش ساده و جدید پیشنهادی .

ب- تهیه برنامه رایانه ای کامل ترکیبی تعیین نیرو و موقعیت بهینه عملگرها و حسگرها .

پ- ارزیابی روش های تحلیل غیر خطی دینامیکی در ادغام با روش پیشنهادی.

ت- ارزیابی تحلیلی روش پیشنهادی .

ث-ارزیابی عددی روش پیشنهادی با حل چند مثال عددی بررسی نتایج حاصله در زمینه :

- مقایسه پارامترهایی همچون حداکثر تغییر مکان و زمان ایجاد بیشینه تغییر مکان سازه در حالت

های مختلف کنترل فعال سازه (با توجه به موقعیت و تعداد حسگرها و عملگرها)

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

کنترل فعال سازه

-بررسی نحوه تغییر بیشینه مجموع تغییر مکانهای نسبی طبقات سازه در بازه زمانی تحلیل دینامیکی

در حالت های مختلف کنترل فعال سازه

ج-بررسی روش پیشنهادی تحت بارگذاری های هارمونیک ، انفجاری و بار زلزله.

چ-بررسی مبحث عدم قطعیت در روش پیشنهادی .

ح-بررسی کلی پایداری سازه تحت الگوریتم پیشنهادی.

۱-۶ ارتباط موضوع تحقیق با مطالعات پیشین

روشهای پیشین در بهینه یابی موقعیت و مقدار نیروی عملگرها در کنترل فعال سازه های هوشمند الگوریتم های پیچیده و مشکلی همچون الگوریتم ژنتیک، روش فازی و.... بوده که دارای پیچیدگیهای خاص می باشند. در روش پیشنهادی ضمن استفاده از روابط و نگره های بنیادی یک الگوریتم ساده و قابل برنامه نویسی پیشنهاد گردیده است. در آخرین پژوهش در مورد استفاده از نگره های دینامیک سازه ها در بهینه یابی موقعیت و مقدار نیروی عملگرها در کنترل فعال سازه های هوشمند توسط علامتیان و رضائی پزند [۳۶] کنترل فعال نوسانهای سازه با در نظر گرفتن تنها یک حسگر و یک عملگر و لحاظ نمودن تنها مود اول انجام شده است . این فرایند دارای محدودیت هایی است که از آن جمله می توان به کارایی پائین آن در سازه های با درجه های آزادی زیاد ، عدم بررسی تعداد حسگر و

عملگر در فرایند ، عدم بررسی عدم قطعیت در فرایند و عدم ارزیابی روش در بارهای لرزه ای اشاره کرد. در این مطالعه این کاستی ها برطرف می شود .

۷-۱-تجهیزات مورد استفاده در تحقیق

در این تحقیق جهت برنامه نویسی رایانه ای از نرم افزار متلب استفاده می گردد.

۸-۱-فرضیه ها و فرضیات تحقیق

فرضیات انتخابی در این تحقیق به شرح زیر می باشند:

الف-تعیین فرکانس های ارتعاشی بر اساس حالت نامیرا برای حالت کلی .

ب-از اثر اغتشاش در حسگرها چشم پوشی می شود .

پ-فرض می شود پاسخ دریافتی از حسگرها برابر پاسخ های گامهای زمانی در تحلیل دینامیکی به روش نیومارک باشد.

ت-عدم بررسی موارد اجرایی در کنترل سازه ها (بررسی تنها الگوریتم محاسباتی)

ث-در نظر نگرفتن تاخیر زمانی.

ضمن آنکه فرضیه ها در انجام رساله پیش رو به شرح زیر می باشد:

الف-در نظر گرفتن میرایی معادل موده های اول با میرایی بحرانی می تواند باعث کمینه شدن ارتعاشات و میرا شدن سریع پاسخها گردد.

ب-با بالا رفتن تعداد حسگرها انتظار می رود کنترل فعال سازه مناسب تر گردد.

پ-انتظار می رود هماهنگی و سازگاری بین نتایج روش پیشنهادی با سایر روشهای مرسوم در کنترل فعال سازه ها وجود داشته باشد.

۹-۱- مراحل مختلف انجام تحقیق

مراحل مختلف انجام این تحقیق به شرح زیر می باشد.

۱-تهیه و تنظیم پروپوزال و برگزاری جلسه دفاع از موضوع پیشنهادی.

۲-مطالعه پژوهشهای پیشین در زمینه سازه های هوشمند و الگوریتم های مختلف کنترل فعال سازه ها.

۳- بررسی پژوهشهای انجام شده قبلی در زمینه نحوه تعیین موقعیت و نیروی حسگرها و عملگرها و تشخیص نقاط ضعف و قدرت آنها.

۴-ارزیابی نگره دینامیک سازه ها در فرایندهای کنترل سازه ها .

۵-طراحی و گسترش شیوه جدید برای پایش نوسانهای سازه ها بر مبنای استفاده از چندین عملگر و حسگر (شامل تدوین روابط ریاضی و دینامیکی جهت یافتن نیروهای بهینه عملگرها).

۶-جایابی موقعیت بهینه حسگرها و عملگرها بر اساس شیوه های پیشنهادی .

۷-تهیه الگوریتم روش پیشنهادی و نوشتن برنامه های رایانه ای مرتبط .

۸-کنترل نوسانهای سازه با استفاده از روش پیشنهادی و تهیه نتایج تحت بارگذاری های متفاوت

(بارهای هارمونیک-بار انفجاری-بار زلزله).

۹-مقایسه پارامترهایی همچون حداکثر تغییر مکان ،حداکثر انرژی جنبشی و حداکثر میزان تغییرمکان نسبی در حالت های مختلف قرارگیری حسگرها و عملگرها و تعداد مختلف آنها و ارزیابی میزان تاثیر روش پیشنهادی در کاهش مقادیر تغییر مکان با رسم نمودارهای تاریخچه زمانی و مقایسه مقادیر حداکثر پارامترهای کلیدی

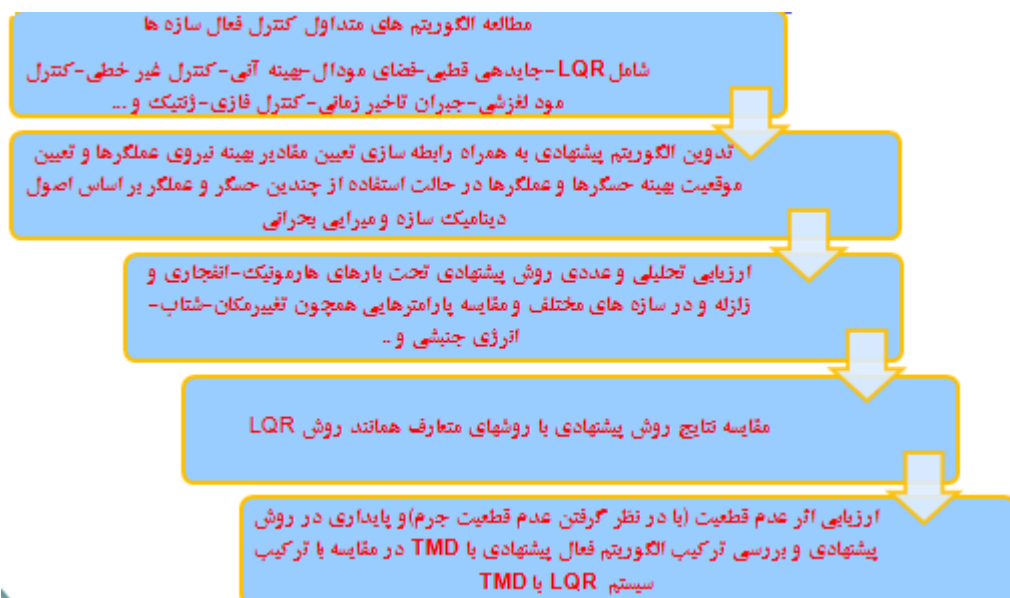
۱۰-مقایسه نتایج روش پیشنهادی با روشهای معمول و متداول کنترل فعال سازه ها

۱۱- بررسی کلی پایداری سازه تحت الگوریتم پیشنهادی

۱۲- بررسی اثر عدم قطعیت در پروسه پیشنهادی

۱۳- جمع بندی کلی و نتیجه گیری

ضمن آنکه فلوجارت مراحل اصلی تحقیق بصورت شکل ۱-۳ می باشد:



شكل ١-٣: فلوچارت مراحل اصلی تحقیق

۱-۱۰-ساختار تحقيق

ساختار تحقیق مشتمل بر شش فصل کلی می باشد. فصل اول شامل کلیات موضوع، تعریف مساله، دستاوردها و مراحل انجام کار است. مطالعات پیشین در زمینه مطالب مرتبط با موضوع رساله در فصل دو گردآوری گردیده است. در فصل سوم مبانی، کلیات و مراحل مختلف روش جدید پیشنهادی بررسی شده است. ضمن آنکه صحت سنجی روش پیشنهادی در غالب ارزیابی عددی آن تحت بارهای مختلف در فصل چهارم بیان گردیده است. فصل پنجم نیز به بررسی عدم قطعیت و

پایداری در روش نوین پیشنهادی می پردازد. در نهایت جمع بندی و نتیجه گیری موضوع در فصل
ششم آمده است.

فصل دوم

مطالعات پیشین

فصل دوم: مطالعات پیشین

در این فصل مبانی دینامیک سازه ها که در کنترل فعال سازه ها مورد استفاده قرار می گیرند، به همراه انواع استراتژی ها و تئوری های کنترل سازه ها بررسی می گردند. ضمن آنکه روشهای پیشین تعیین موقعیت حسگرها و عملگرها در کنترل سازه ها بیان خواهد شد.

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

مبانی دینامیک سازه ها که در این تحقیق مورد استفاده قرار می گیرد عبارتند از: معادلات تعادل دینامیکی، خاصیت تعامد، انواع میرایی، انواع مختلف میرایی، پاسخ دستگاه به بار هارمونیک، انفجاری و حرکت پی، معادله حرکت در مختصات مودی، میرایی رایلی و برنامه های عددی تحلیل دینامیکی که در پیوست یک گردآوری گردیده است.

۲-۲ سیستمهای کنترل در سازه های هوشمند

طی سالهای اخیر طراحی سازه بر اساس حرکت ، به عنوان روش نوینی در برابر روشهای سنتی طراحی سازه ها مطرح گردیده است. در طراحی سازه ها بر اساس حرکت روشهای مختلف کنترل حرکت سازه بکار گرفته می شود. کنترل حرکت سازه شاخه جدیدی از مهندسی می باشد که مرتبط با محدوده گسترده ای از مسائل مربوط به حرکت سازه ای مانند تعیین ضوابط حرکت ، استفاده از ذخیره انرژی، اتلاف انرژی و قطعات جذب کننده انرژی برای کنترل حرکت تولید شده بوسیله بارهای طراحی است. یکی از مباحث مهم در کنترل سازه ها ، آرایش بهینه مکانیزم های کنترل حرکت می باشد.

بدلیل سادگی، هزینه کم و عدم نیاز به انرژی خارجی ، سامانه های کنترل غیر فعال سازه ها، دارای کاربرد های فراوانی می باشند. با وجود این، ثابت بودن ویژگیهای پایش باعث می شود این سامانه ها قابلیت تغییر و هماهنگی با شرایط سازه به ویژه در زمان زلزله را نداشته باشند. از سوی دیگر این

سامانه ها تنها برای تحریک های خاصی که طراحی شده اند به کار می روند. باید دانست در کنترل غیر فعال سازه ها انرژی از سامانه خارج می شود. میراگرهای جرمی (TMD) یک نمونه از سامانه های کنترل غیر فعال می باشند [۲الی۵].

به دلیل محدودیت های اشاره شده، در دهه اخیر پایشگرهای فعال سازه برای مقابله با نیروی زلزله بسیار مورد توجه می باشد. این سامانه ها پاسخ بهتری در برابر تحریکهای مختلف از خود نشان می دهند. کاربرد این سامانه ها از سال ۱۹۸۹ آغاز گردید. باید دانست، پیچیدگی، حجم بالای محاسبات و عدم قطعیت عاملها از کاستی های سامانه های فعال می باشند. در این سامانه ها عملگرها توسط منبع انرژی خارجی برای تولید نیرو تغذیه می شوند. در سازه های هوشمند عملکرد مناسب حسگرها و عملگرها وابسته به تعیین دقیق موقعیت و نیروی اعمالی به سازه از طرف عملگرها می باشد. سامانه های کنترل نیمه فعال از سامانه های غیر فعال اصلاح شده برای تنظیم ویژگیهای مکانیکی ناشی می شوند. به عنوان نمونه، ابزار اتلاف انرژی مکمل از این گونه سامانه ها می باشند. ویژگیهای مکانیکی این سامانه ها بر پایه بازخورد از پاسخ اندازه گیری شده و یا تحریک تنظیم می شوند. همانند سامانه های کنترل فعال، در سامانه های نیمه فعال نیز پایشگر ضمن اندازه گیری بازخورد، فرمانهایی برای ابزار پایش نیمه فعال تولید می کند. همچنین در سامانه های نیمه فعال، همانند سامانه های غیر فعال، نیروهای پایش به عنوان نتیجه ای از حرکت سازه می باشند و بر اساس تنظیم مناسب ویژگیهای مکانیکی سامانه پایش نیمه فعال به دست می آیند [۷].

۲-۳ انواع تئوری های کنترل فعال سازه ای

دلایل گرایش محققین به کنترل فعال سازه های مختلف شامل موارد زیر است:

۱- کاهش ارتعاش سازه های انعطاف پذیر در برابر بارهای مختلف

۲- مقاوم سازی سازه ها در برابر بارهای دینامیکی

۳- حفاظت از تجهیزات حیاتی که کاربرد آنها پس از زلزله با اهمیت می باشد

بر اساس مطالعات soong [۷۳] اولین مطالعات در خصوص کنترل فعال سازه ها در دهه ۱۹۶۰ انجام گردید در آن دوران از تاندوم های پیش تنیده برای کنترل و پایدار سازی سازه های بلند استفاده نمودند.

در زمینه حرکت سازه ها در سال ۱۹۶۸ توسط zuk [۹۹] تحقیقاتی مطرح گردید. همچنین Nordell [۵۵] در سال ۱۹۶۹ نوعی از سیستم کنترل فعال را پیشنهاد داد که در آن در صورت اعمال بارهای فوق العاده بر سازه مقاومت سازه توسط افزودن برخی اعضای مقاوم افزایش می یابد.

اما مفهوم کنترل فعال سازه مطابق الگوریتم ها و مفاهیم فعلی از سال ۱۹۷۲ توسط J.T.P.Yao [۳۹] بیان گردید. در تحقیقات بعدی همواره در درجات آزادی تعدادی حسگر در نظر گرفته شده که تغییر مکان، سرعت و شتاب رادر گامهای زمانی مختلف اندازه گیری نموده و توسط الگوریتم های کنترلی موجود روابطی بین پاسخ های سازه و نیروهای کنترلی پیشنهاد گردیده است. این ارتباط توسط ماتریسی به نام ماتریس بهره کنترلی بیان می گردد. در ادامه معمول ترین الگوریتم های کنترل فعال سازه ها بررسی می گردد.

۲-۳-۱ کنترل بهینه خطی (Linear Optimal Control)

معمول ترین الگوریتم کنترل بر پایه کنترل بهینه خطی می باشد. در این روش از کمینه کردن شاخص عملکرد J که مطابق رابطه زیر بیان می شود استفاده می گردد. [۷۴]

$$J = \int_0^{t_f} [z^T(t)Qz(t) + u^T(t)Ru(t)]dt \quad 1-2$$

در رابطه بالا Q و R به ماتریس های وزنی اشاره دارند. ضمن آنکه t_f دوره زمانی اعمال نیروی کنترل می باشد. پس از کمینه کردن شاخص عملکرد، تابع بردار نیروی کنترل مطابق زیر بدست می آید. [۷۴]

$$u(t) = -\frac{1}{2} R^{-1} B^T P(t) z(t) = Gz(t) \quad 2-2$$

در رابطه فوق G همان ماتریس بهره می باشد. پروسه کمینه سازی تحریک خارجی را در نظر نمی گیرد. لذا الگوریتم کنترل به درستی بهینه نمی باشد. مطالعات زیادی در خصوص کنترل بهینه خطی صورت گرفته است که از آن جمله می توان به موارد زیر اشاره نمود:

Yang(1975), Abdel-Rohman and Leipholz (1983), Chang and Soong (1980), Chung (1988), Soong (1992) and Sarbjeet and Datta (1998).

روش های کنترل بازخوردی وضعیت، کنترل بازخوردی تغییر مکان و کنترل بازخوردی شتاب هر سه زیر مجموعه کنترل بهینه خطی هستند. در کنترل بازخوردی وضعیت لازم است برای تمام درجات آزادی بردارهای تغییر مکان و سرعت معلوم باشند. سپس با ضرب نمودن ماتریس بهره که نیروهای کنترلی را به متغیرهای اندازه گیری شده سیستم وابسته می کند در بردار وضعیت، نیروهای کنترلی حاصل می گردد. با توجه به اینکه اندازه گیری تغییر مکان و سرعت در تمام درجات آزادی بسیار مشکل می باشد لذا روشهای کنترل بازخوردی تغییر مکان و کنترل بازخوردی شتاب بیشتر مورد مطالعه قرار گرفته است. این روشها به ترتیب نیازمند محاسبه تغییر مکان و شتاب در درجات آزادی هستند.

الف- کنترل بازخوردی وضعیت

معادله تعادل دینامیکی سازه با درجات آزادی متعدد به صورت رابطه زیر بیان می گردد.

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = Du(t) + Ef(t) \quad ۳-۲$$

در رابطه بالا بردار x تغییر مکان عمومی شده و ماتریس های M ، C و K ماتریس های جرم، میرایی و سختی می باشند. بردار $f(t)$ بیان کننده تحریک خارجی بدلیل حرکت زمین ، D ماتریس موقعیت نیروهای کنترل و E ماتریس موقعیت تحریک خارجی است . $u(t)$ بردار نیروی کنترل بوده که دارای رابطه تقریبی زیر می باشد. [۷۴]

$$u(t) = K_1 x(t) + C_1 \dot{x}(t) + E_1 f(t) \quad ۴-۲$$

با ترکیب دو رابطه فوق داریم: [۷۴]

$$M\ddot{x}(t) + (C - DC_1)\dot{x}(t) + (K - DK_1)x(t) = (E + DE_1)f(t) \quad ۵-۲$$

مطابق رابطه بالا می توان گفت کنترل سازه ای از نظر ریاضی مقادیر میرایی، سختی و تحریک خارجی را اصلاح می کند. استخراج ماتریس های C_1 ، K_1 و E_1 بستگی به الگوریتم کنترل انتخاب شده دارد. به گونه ای که این الگوریتم ها هر یک دارای توابع هدفی می باشند (این توابع پاسخ سازه را کاهش می دهند) که با مینیمم کردن آنها ماتریس های مذکور بدست می آیند. حل مسائل کنترل و بررسی الگوریتم های کنترل با نوشتن معادله حرکت در فضای حالت امکان پذیر می باشد. [۷۴]

$$\dot{z}(t) = Az(t) + Bu(t) + Hf(t) \quad ۶-۲$$

ضرایب در معادلات بالا مطابق زیر تعریف می گردد.

۷-۲

$$z(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix}_{2n \times 1} \quad A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}_{2n \times 2n}$$

۸-۲

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}D \end{bmatrix}_{2n \times m}, H = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}E \end{bmatrix}_{2n \times r}$$

در معادلات n بیانگر تعداد درجات آزادی سیستم و m نمایانگر تعداد عملگرست.

r نیز بیان کننده درجات آزادی متاثر از بار خارجی می باشد.

در روش کنترل بازخوردی وضعیت ، کنترل بوسیله اندازه گیری پاسخ سیستم و محاسبه نیروی

کنترلی (بصورت تابعی از آن) صورت پذیرفته و ورودی کنترل بصورت زیر بیان می گردد.

$$u(t) = -G.Z(t) \quad 9-2$$

ماتریس G ماتریس بهره کنترلی می باشد که نیروهای کنترلی را به متغیرهای اندازه گیری شده

سیستم وابسته می کند. نکته اساسی در تمامی الگوریتمهای کنترلی که باعث بهینه شدن سیستم

کنترل می گردد، محاسبه ماتریس بهره می باشد. در تئوری کنترل بهینه، هدف یافتن بردار کنترلی

$u(t)$ به نحوی است که شاخص عملکرد J که بصورت زیر بیان می گردد کمینه شود: [۷۴]

$$J = \int_0^{t_f} [z^T(t)Qz(t) + u^T(t)Ru(t)]dt \quad 10-2$$

در رابطه بالا Q ، ماتریس وزنی مثبت نیمه معین از مرتبه $2n \times 2n$ و R ماتریس وزنی مثبت معین از

مرتبه $m \times m$ است که توسط سعی و خطا بدست می آید (n نمایانگر درجات آزادی سیستم و m

بیانگر تعداد عملگر سیستم است). برای بدست آوردن نیروهای کنترلی به ترتیب زیر عمل می گردد.

در ابتدا همیلتون سیستم بدست می آید.

$$H = 1/2(Z^T QZ + u^T Ru) + \lambda^T (AZ + Bu) \quad 11-2$$

با استفاده از روابط کنترل بهینه داریم:

$$\begin{aligned}\dot{\lambda} &= -\frac{\partial H}{\partial Z} = -QZ - A^T \lambda \\ \frac{\partial H}{\partial Z} &= Ru + B^T \lambda = 0\end{aligned}\quad ۱۲-۲$$

بنابر این ورودی کنترلی بصورت زیر می باشد.

$$u = -R^{-1} B^T \lambda \quad ۱۳-۲$$

سپس با محاسبه λ نیروهای کنترلی محاسبه می گردند. برای محاسبه این پارامتر آن را بصورت ضربی از بردار وضعیت تعریف می کنند.

$$\lambda = S.Z(t) \quad ۱۴-۲$$

لذا داریم:

$$U(t) = -G.Z(t) \quad ۱۵-۲$$

$$G = R^{-1} B^T S \quad ۱۶-۲$$

ماتریس S ماتریس مثبت معینی است که بنام ماتریس ریکاتی معروف می باشد. با جایگزینی معادلات فوق در معادله همیلتون سیستم ، معادله ریکاتی بصورت زیر بدست می آید.

$$SA + A^T S - SBR^{-1}B^T S + Q = 0 \quad ۱۷-۲$$

برای حل معادله ریکاتی روشهای متفاوتی بیان گردیده است.

در روش پوتر می توان ماتریسهای G, S را بدست آورد و سپس در هر بازه زمانی با محاسبه بردار وضعیت، نیروهای کنترلی را از معادله $u(t) = -G \cdot Z(t)$ بدست آورده و بر سازه اعمال می کنند.

ب- کنترل بازخوردی تغییرمکان

در این روش با مشخص بودن تغییرمکانهای سیستم و با استفاده از یک مشاهده گر دینامیکی می توان نیروهای کنترلی را محاسبه نمود. بر پایه این روش یک مدل ریاضی پایه ریزی می گردد که تنها از خروجی های بدست آمده از حسگرها استفاده می گردد. بردار خروجی سیستم به صورت زیر قابل دسترسی است.

$$y = C_0 Z(t) \quad 18-2$$

ماتریس C_0 نشان می دهد که کدامیک از اعضای بردار وضعیت قابل دسترسی هستند. مطابق الگوریتم کنترل ، معادله مشاهده گر دینامیکی را می توان بصورت زیر نوشت: [۷۴]

$$\dot{\hat{Z}}(t) = A\hat{Z}(t) + Bu(t) + L(y(t) - \hat{y}(t)) + Hf(t) \quad 19-2$$

$$\hat{y} = C_0 \hat{Z}(t) \quad 20-2$$

در این رابطه L ، ماتریس بهره مشاهده گر می باشد که باید محاسبه گردد. بخش اول و دوم معادله فوق معادله سیستم تخمین زده شده و بخش سوم مدل ریاضی سیستم را بوسیله یک بازخورد خطی از اختلاف بین خروجی اندازه گیری شده $y(t)$ و خروجی محاسبه شده تصحیح می کند که هر دوی این پارامترها در دسترس می باشند. با تشکیل تفاضل رابطه فوق با رابطه فضای وضعیت که در ابتدا بیان گردید داریم: [۷۴]

$$\dot{Z}(t) - \dot{\hat{Z}}(t) = AZ(t) - A\hat{Z}(t) - L(y(t) - \hat{y}(t)) = (A - LC)(Z - \hat{Z}) \quad 21-2$$

با لحاظ نمودن اختلاف بین سیستم مشاهده گر و سیستم اصلی و جایگزینی آن در معادله بالا رابطه زیر که یک معادله خطی مرتبه اول است بدست می آید.

$$er = z - \hat{z} \quad 22-2$$

$$\dot{er} = (A - LC)er \quad 23-2$$

$$er(t) = e^{(A-LC)t} er(0)$$

لذا تابع خطا وابسته به زمان خواهد بود. برای پایداری سیستم باید در حالت پاسخ ماندگار ، مقدار خطا به سمت صفر میل کند. لذا شرط پایداری حلقه بسته مشاهده گر را می توان بصورت زیر بیان نمود:

$$\lambda_i(A - LC) < 0 \quad 24-2$$

در این رابطه λ_i ، مقادیر ویژه ماتریس A-LC است. با توجه به اینکه ماتریسهای A و C معین هستند، لذا لازم است تنها ماتریس L بدست آید. L به گونه ای محاسبه می گردد که سیستم حلقه بسته A-LC پایدار بماند. با توجه به اینکه مقادیر ویژه یک ماتریس با مقادیر ویژه ترانزفاده همان ماتریس یکسان است داریم:

$$\lambda_i(A - LC) = \lambda_i(A^T - C^T L^T) \quad 25-2$$

اکنون می توان بهره مشاهده گر را بوسیله حلقه بسته AT-CT LT همانند یک سیستم حلقه بسته ساده بدست آورد. اکنون با محاسبه $\hat{Z}(t)$ از معادلات قبلی و جایگذاری آن در معادله ذیل بردارهای نیروهای کنترلی بدست می آید. [۷۴]

$$u(t) = -G.\hat{Z}(t) \quad 26-2$$

ج-کنترل بازخوردی شتاب

ایده اصلی در این روش همان الگوریتم کنترل بهینه خطی و کمینه کردن شاخص عملکرد می باشد. در این حالت بردار خروجی دارای رابطه خطی با بردار وضعیت می باشد. لذا داریم:

$$y(t) = DZ(t) \quad 27-2$$

$$D = [-M^{-1}K - M^{-1}]$$

در رابطه بالا D ماتریس ضریب خروجی و بردار $y(t)$ خروجی های اندازه گیری شده است. این خروجی ها در اینجا پاسخ شتاب سیستم می باشد. لذا رابطه نهایی روش قبل بصورت زیر نوشته می شود:

$$\ddot{x}_a(t) = DZ(t) \quad 28-2$$

اکنون هدف این است که نیروهای کنترلی مستقیماً از حاصلضرب خروجی های اندازه گیری شده در یک ماتریس بهره بدست آیند. لذا داریم:

$$u(t) = G.\ddot{x}_a(t) \quad 29-2$$

در روش بیان شده توسط چانگ و همکاران [۶۵-۱] برای محاسبه ماتریس بهره روابط زیر مورد استفاده قرار گرفت:

$$(A + BGD)^T H + H(A + BGD) + (Q + d^T G^T RGD) = 0$$

$$Z_0 + L(A + BGD)^T + (A + BGD)L = \quad 30-2$$

$$B^T H L d^T + R G d L d^T = 0$$

که در آن L ماتریس ضرایب لاگرانژین است. با حدس اولیه برای ماتریس G و با استفاده از روابط بالا مقادیر ماتریس L و H حاصل می گردند. با قرار دادن این مقادیر در رابطه اصلی معادله کنترلی در فضای وضعیت ، مقدار اصلاح شده ماتریس G حاصل می گردد. این مراحل تا همگرا شدن ماتریس بهره ادامه می یابد. با استفاده از ماتریس G حاصل شده، مقدار بردار نیروی کنترلی در هر لحظه را می توان با استفاده از رابطه $\ddot{x}_a(t) = DZ(t)$ بدست آورد.

۲-۳-۲- تکنیک انتساب قطب

با استفاده از رابطه نهائی بدست آمده در روش اول می توان نوشت:

$$\ddot{z}(t) = (A + BG)z(t) + Hf(t) \quad ۳۱-۲$$

نسبت های میرائی مودال و فرکانس ها بدست آمده از ماتریس اصلاح شده $(A + BG)$ خصوصیات دینامیکی سیستم را فراهم می کند. ماتریس G (ماتریس بهره) می توانند بدین گونه انتخاب شوند که مقادیر ویژه ماتریس اصلاح شده بصورت مجموعه ای از اعداد که توسط طراح تعیین شده اند در نظر گرفته می شوند. عموماً مقادیر ویژه اولین مودهای پائین بررسی می شوند. لذا این برنامه کنترل برای سازه هایی موثر و مفید هستند که دارای مودهای پائین اول غالب هستند. این برنامه کنترل بهینه نمی باشد اما مطلوب و امکان پذیر است. درمورد این روش مطالعات کمی صورت پذیرفته است که برخی از آنها عبارتند از:

Abdel-Rohman and Leipholz (1978), Martin and Soong (1976), and Abdel-Rohman and Nayfeh (1987)

۳-۳-۲-روش کنترل فضای مودال مستقل (Independent Modal Space Control)

در این روش معادله فضای حالت درمختصات مودال نوشته می شود. این کار با تعریف نیروی کنترل مودال $u_j(t)$ و بار مودال $f_i(t)$ صورت می گیرد. با استفاده از تابع عملکرد مودال (J_j) از رابطه زیر تابع عملکرد کلی بدست می آید.

$$J = \sum J_j \quad ۳۲-۲$$

سپس این تابع برای یافتن نیروی کنترل مودال کمینه می شود. موارد زیر شامل برخی مطالعات در خصوص این روش می باشند.

Meirovitch and Oz, 1980; Meirovitch and Baruh, 1983; Meirovitch and Ghosh, 1987

۳-۳-۴-روش کنترل بهینه آنی (Instantaneous Optimal Control)

در این روش تحریک خارجی تا زمان جاری در الگوریتم کنترل بهبود یافته با استفاده از تابع عملکرد وابسته به زمان $J(t)$ بکار می رود. نیروی کنترل بهینه با کمینه کردن تابع $J(t)$ در هر لحظه ای از زمان بدست می آید. فرمول مساله بر اساس نوشتن معادله بردار حالت $z(t)$ برحسب بردار حالت و تحریک در گام زمانی قبلی می باشد. تابع عملکرد $J(t)$ با قید داده شده بوسیله بیان بردار حالت $Z(t)$ بر حسب گام زمانی Δt بیان می شود. برخی از مطالعات انجام شده در مورد این روش عبارتند از:

Abdel- Rohman and Leipholz (1979), and Yang et al. (1987). The minimization of the cost function is carried out over the time interval.

معادله حرکت یک سازه n درجه آزادی کنترل شده بصورت زیر می باشد.

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = Du(t) + Ef(t) \quad ۳۳-۲$$

برای سهولت بررسی مساله می توان از فضای حالت استفاده نمود.

$$\dot{z}(t) = Az(t) + Bu(t) + Hf(t), z(0) = z_0 \quad 34-2$$

که در آن

$$z(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix}_{2n \times 1}, A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}_{2n \times 2n} \quad 35-2$$

ماتریس A بیانگر خصوصیات فیزیکی سیستم می باشد. همچنین:

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}D \end{bmatrix}_{2n \times m}, H = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}E \end{bmatrix}_{2n \times r} \quad 36-2$$

در این روابط ماتریس موقعیت D به ابعاد $m \times n$ و ماتریس E به ابعاد $r \times n$ به ترتیب معرف ماتریس مربوط به محل قرارگیری کنترلرها و تحریک خارجی در فضای فیزیکی می باشند. در ماتریس A ماتریسهای O و I به ترتیب معرف ماتریس تهی و ماتریس واحد می باشند. در محاسبه نیروی کنترل با استفاده از الگوریتم بهینه آنی از رابطه زیر استفاده می شود.

$$u(t) = -\frac{\Delta t}{2} R^{-1} B^T Q z(t) \quad 37-2$$

در رابطه فوق R یک ماتریس مثبت قطعی و Q یک ماتریس مثبت نیمه قطعی می باشند. در یک سیستم چند درجه آزادی داریم:

$$M \cdot \Delta \ddot{Y} + C \cdot \Delta \dot{Y} + K \cdot \Delta Y = H \cdot \Delta U + F \cdot \Delta \ddot{X} \quad 38-2$$

در فضای حالت داریم:

$$\dot{Z}(t) = A \cdot Z(t) + B \cdot U(t) + W \cdot \ddot{X}(t) \quad 39-2$$

$$[A] = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1} * K & -M^{-1} * C \end{bmatrix}, [B] = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1} * H \end{bmatrix}, [W] = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1} * F \end{bmatrix} \quad 40-2$$

کنترل بهینه در واقع محاسبه بردار U به نحوی است که شاخص عملکرد (J) کمینه شود.

$$J = \int_0^{tf} \{ \dot{Z}(t) \cdot Q \cdot Z(t) + \dot{U}(t) \cdot R \cdot U(t) \} dt \quad 41-2$$

در این رابطه Q ماتریس وزنی مربوط به تغییر مکانها و R ماتریس وزنی مربوط به نیروی کنترل است. برای کمینه کردن شاخص J با قید محدود کننده مطرح شده، قیود را با J ترکیب و با استفاده از اصل همیلتون و انتگرال گیری جز به جز نیروی کنترل بصورت زیر بدست می آید.

$$U(t) = -\frac{1}{2} R^{-1} B^T P(t) Z(t) \quad 42-2$$

که در این رابطه $P(t)$ ماتریس ریکاتی نامیده شده و از رابطه زیر بدست می آید.

$$P \cdot A - \frac{1}{2} P \cdot B \cdot R^{-1} \cdot B^T \cdot P + A^T \cdot P + 2Q = 0 \quad 43-2$$

لذا خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \dot{Z}(t) &= (A + B \cdot G) \cdot Z(t) + W \cdot \ddot{X}(t) \\ G &= -\frac{1}{2} R^{-1} \cdot B^T \cdot P \end{aligned} \quad 44-2$$

با حل نمودن معادله فوق و محاسبه $Z(t)$ و جایگزینی آن در رابطه $u(t)$ نیروی کنترل محاسبه می شود. این نیرو بر حسب زمان متغیر می باشد.

۲-۳-۵- کنترل حالت کران دار (Bounded State Control)

در این روش نیروی کنترل برای حفظ پاسخ در محدوده مجاز اعمال می شود. ایده پایه کنترل پالس ، اعمال یک سلسله پالسهای نیرو برای تولید پاسخهایی که بوسیله یک بار پیوسته با طبیعت اختیاری تولید شده اند می باشد. این پاسخها همراه باتخریب تدریجی پاسخ سازه در ارتباط با رزنانس است. اندازه های پالس بوسیله کمینه کردن تابع هزینه تعیین می گردد. حداقل کردن تابع هزینه در فضای پالس داخلی انجام می شود. در این برنامه یک کنترل پیوسته از متغیرهای حالت سیستم مورد نیاز است. مزایای این روش قابلیت اجرای آن برای سازه های غیر الاستیک و خاصیت ذخیره انرژی آن می باشد. برخی از محققین که در این مورد مطالعه نمودند عبارتند از:

Abdel-Rohman et al. (1993), Udwadia and Tabai (1981a, 1981b), Masri et al. (1981a, 1981b), Prucz et al. (1985), and by Reinhorn et al. (1987).

۲-۳-۶- کنترل غیر خطی

در این روش یک تابع عملکرد مرتبه بالا بدین ترتیب کمینه می شود که نیروی کنترل، به یک تابع غیر خطی از متغیر حالت تبدیل می گردد. ایده اصلی در این روش بدست آوردن یک پاسخ کنترل بهتر با نیروی کنترل نسبی کمتر می باشد. WU و همکاران در سال ۱۹۹۵ [۹۱] یک استراتژی کنترل غیر خطی با بکارگیری معادله ریکاتی را توسعه دادند. نیروی کنترل در فرم مناسب با بکارگیری یک پارامتر فید بک غیر خطی وزن دار بیان می شود. با صفر قراردادن این پارامتر نیروی کنترل برابر همان مساله LQR بدست می آید. سایر مطالعات در خصوص کنترل فعال غیر خطی عبارتند از:

Shefer and Beakwell (1987), Suhardijo et al. (1992a), and Wu et al. (1995)

۲-۳-۷- کنترل بازخورد عمومی شده (Generalized Feed-Back)

در این برنامه کنترل معادلات دینامیک عملگر نیز وارد می گردند. به عنوان نتیجه شتاب مطلق نیز غیر از تغییر مکان و سرعت ،فید بک دیگر خواهد شد. بنابراین نیروی کنترل تابعی خواهد شد از تغییر مکان سازه ای، سرعت و شتاب . مطالعات در خصوص کنترل فعال با فیدبک شتاب شامل موارد زیر است.

Yang et al. (1991, 1994), Suhardjo et al. (1992b), Spencer et al. (1993), Rofooei and Tadjbakhsh (1993), Dyke et al. (1996a), and by Suneja and Datta (1998).

۲-۳-۸- کنترل مود لغزشی (sliding mode control(SMC))

این روش اولین بار توسط اتکین در سال ۱۹۷۸ بنا شد [۸۹]. در این روش یک سطح لغزشی تولید می گردد که شامل ترکیب خطی از پارامترهای حالت می باشد. سطح لغزشی عبارتست از پاسخی از سازه که حرکت سازه روی این سطح پایدار است. این مولفه با کمینه کردن تابع عملکرد LQR و بنابراین نیاز به حل معادله ریکاتی (Riccati) بدست می آید. سیستم های کنترل طوری طراحی می شوند که پاسخ را روی سطح لغزشی هدایت کنند. این مورد توسط معیار پایداری Liapunov انجام می شود. از این شرایط نیروی کنترل بدست می آید. روش اصلاحی در کنترل مود لغزشی بوسیله طراحی یک سیستم کنترل می باشد که نیروی کنترل را بر اساس سیستم بازخورد خطی و بردار حالت بازخورد غیر خطی بیان می نماید. بازخورد غیر خطی برای بررسی موارد غیر قطعی بوجود آمده از تحریک در نظر گرفته می شود . هدف اصلی در این خصوص ساختن استراتژی کنترل قوی در مقابل

انواع موارد غیر قطعی در سیستم است. برخی از مطالعات در خصوص کنترل مود لغزشی شامل موارد زیر می باشد:

Yang et al. (1994), Singh and Matheu (1997), Adhikari and Yamaguchi (1997), and by Sarbjeet and Datta (2000).

۲-۳-۹-روش جبران تاخیر زمانی (Time Delay Compensation)

این الگوریتم کنترل بر اساس اثر آنی می باشد. در حالت کلی فرض گردیده است که هیچ تاخیر زمانی بین اندازه گیری پاسخ و عملکرد کنترل وجود ندارد. در حقیقت این موضوع هرگز دست یافتنی نمی باشد و همواره یک تاخیر زمانی وجود دارد. اثر تاخیر زمانی اگر بدرستی وارد نشود باعث ناپایداری سیستم میشود. اهمیت جبران تاخیر زمانی در کنترل سازه ای توسط محققان زیر بررسی و نظراتی پیشنهاد گردیده که شامل در نظر گرفتن تغییر مکان فاز در پارامترهای حالت اندازه گیری شده در فضای مودال و غیره می باشند.

McGreevy et al.(1988), Hammerstrom and Gros(1980); Abdel-Rohman(1985); Soliman and Roy(1992).Abdel-Rohman (1985, 1987, 1993), Jun-Ping and Kelly (1991), Jun-Ping and Deh-Shiu (1988), Yang et al. (1990), and by Chung et al. (1995).

۲-۳-۱۰-کنترل فعال با استفاده از شبکه عصبی و منطق فازی

(Active Control Using Neural Network and Fuzzy Logic)

این روشها بصورت قطعی و بهینه پاسخ سازه ای را کنترل نمی کنند، اما از نظر کاربردی در مقایسه با سایر روشها مناسب بوده و تطبیق پذیر نیز می باشند. استفاده از تئوری فازی در کنترل فعال و نیمه فعال سازه ها دارای مزایایی از قبیل کارایی آن در رفتار غیرخطی سازه ها و همچنین ساده بودن آن

هستند. در کنترل فازی معادله حرکت سیستم کنترل معمولاً با استفاده از نرم افزار متلب و جعبه ابزار فازی آن حل می شود. در روش فازی بازخورد می تواند فقط سرعت، سرعت و تغییر مکان و یا سرعت به همراه تغییر مکان و شتاب باشد. کنترل فازی گرچه یک کنترل بهینه نمی باشد اما در مقایسه با تئوری های کنترل کلاسیک دارای انعطاف پذیری بیشتری می باشد. برخی از مطالعات در خصوص استفاده از منطق فازی در کنترل فعال و نیمه فعال سازه ها عبارتند از:

Symans and Kelly (1999), Battaini et al. (1998), Tani et al. (1998), Kurata et al. (1999).

کنترل فازی در سازه ها بر مبنای پایگاه داده و پایگاه قواعد است. مجموعه این دو پایگاه، پایگاه دانش سیستم را تشکیل می دهد. پایگاه دانش بر اساس تجارب قبلی و همچنین هوش مصنوعی ایجاد می گردد. پس از اینکه متغیرهای ورودی فازی شدند با استفاده از استنتاج فازی و پایگاه قواعد زیر متغیر خروجی بصورت فازی تعیین و سپس با یک روش مناسب (همانند روش مرکز ثقل) دی فازی می شوند. در کنترل فازی سازه ها خروجی این قسمت نیروی کنترلی است که به عملگرها اعمال می گردد. در این سیستم حسگرها پاسخ سازه را دریافت کرده و به پایگاه داده میفرستند (این عمل در هر گام زمانی انجام می گردد).

در روش استفاده از شبکه های عصبی، هنگامی که سازه تحت اثر زلزله ناشناخته آینده قرار گیرد عصب ها نیروهای کنترل را جهت کاهش پاسخ سازه تولید می کنند. مطالعات زیر بخشی از مطالعات در زمینه مورد نظر است:

(Ghaboussi and Joghataei, 1995; Chen et al., 1995; Bani-Hani and Ghaboussi, 1998; Rao and Datta, 1998).

رائو و داتا در سال ۱۹۹۸ [۶۰] یک برنامه کنترل توسط شبکه عصبی تکی برای کاهش پاسخ در کنترل مود تکی قابهای ساختمانی ارائه دادند. این برنامه کنترل اثرات تاخیر زمانی را نیز در شبکه عصبی در نظر می گیرد. این نگره بعدها در خصوص پاسخ چند موده قابهای ساختمانی نیز گسترش

یافت. روش مذکور ابتدا پاسخ مودال سازه را حدس می زند و سپس نیروی کنترل مورد نیاز جهت اعمال به سازه را محاسبه می کند. در این روش بهینه یابی نیروهای کنترل و تعداد کنترل گرها، می تواند به صورت یک مسأله بهینه سازی ریاضی مطرح شود که با استفاده از روشهای عددی بهینه یابی قابل حل خواهد بود. بهینه یابی نیروهای کنترل و تعداد کنترل گرها با استفاده از چنین روشی نیازمند عملیات وقت گیر سعی و خطا، تا رسیدن به جواب نهایی است. با استفاده از نتایج بدست آمده یک شبکه عصبی مصنوعی آموزش داده می شود، بطوریکه با استفاده از این شبکه و با داشتن خصوصیات فیزیکی سازه و ویژگیهای تحریک لرزه ای، تعداد و موقعیت بهینه کنترل گرها در کوتاه ترین زمان و بدون نیاز به انجام سعی و خطا به دست آورده می شود. همچنین در جهت کاهش حجم محاسبات و زمان رسیدن به جواب، از کنترل مودال سازه می توان بهره گرفت. با در نظر داشتن این نکته که قسمت عمده از پاسخ سازه مربوط به ارتعاش آن در مود اول می باشد، با کنترل سازه در این مود، بهینه یابی نیروهای کنترل و تعداد کنترل گرها، با سرعت بیشتری انجام می گیرد.

۲-۳-۱۱- کنترل فعال سازه با استفاده از الگوریتم ژنتیک

در سالهای اخیر استفاده از الگوریتم های ژنتیک، با موفقیت های چشمگیری همراه بوده و محققان برای بکار بردن این الگوریتم نوین برای مسائل بهینه سازی علاقه بسیاری نشان می دهند. روش ژنتیک، یک جستجوی اتفاقی است که توانایی فراوانی در حل مسائل مختلف دارد. در اکثر موارد الگوریتم ژنتیک موجب بهبود کارایی سیستم های کنترل سازه گشته اند و این موضوع با تامل در نتایج آزمایشهای انجام شده بخوبی روشن میشود.

۲-۳-۱۲- کنترل فعال سازه ها با سختی متغیر توسط الگوریتم ژنتیک

بکار بردن سازه ها با سختی متغیر بعنوان عملی ترین راه برای کنترل فعال سازه بنظر میرسد . این تغییرسختی در سازه ، با تعبیه بادبندهای ویژه ای که مجهز به موتوری هستند و از سیستم کنترل فرمان می گیرد ، ایجاد میشود . الگوریتم ژنتیک با توجه به نیروی وارده ، سختی بهینه را در جهت کاهش تغییر مکان سازه ، بر آورد و محاسبه می کند . هدف اصلی این است که بواسطه وقوع لرزه ، سیستم های کنترل بتوانند سختی مناسبی را ایجاد کنند که توانایی کاهش مناسب پاسخ سازه در مقابل نیروی وارده را داشته باشد و ایمنی سازه را بخوبی تضمین نماید .

۲-۳-۱۳- روشهای دیگر کنترل سازه ها

برخی از سایر روشهای کنترل سازه ها شامل روشهای کنترل دوگانه، کنترل انطباقی و کنترل اتفاقی می باشند. کنترل دوگانه که ترکیبی از کنترل فعال و غیر فعال هستند، زمانی روش برتر است که کنترل دقیقتر یک یا چند مقدار پاسخ مورد نظر باشد. کنترل کننده انطباقی یک کنترل کننده با پارامترهای تنظیم پذیر می باشد. این روش بطور کلی برای کنترل سازه هایی مورد استفاده قرار می گیرند که پارامترهای آنها ناشناخته یا غیر قطعی هستند. روشهای کنترل انطباقی به دو دسته کلی روشهای مستقیم و غیر مستقیم تقسیم می شوند. در این روش پاسخ کنترل انطباقی از رابطه زیر محاسبه می گردد.

$$\begin{aligned}\dot{X}(t) &= A_s X_s(t) + B_s u_s(t) \\ Y_s(t) &= C_s X_s(t) - \text{observer}\end{aligned}\quad ۴۵-۲$$

کنترل کننده انطباقی بر مبنای پی گیری میزان خطا از رابطه زیر می باشد:

$$e(t) = Y_m(t) - Y_s(t) \quad ۴۶-۲$$

روش کنترل فعال اتفاقی در مواقع زیر می بایست مورد استفاده قرار گیرد.

۱- غیر قطعی ها در طبیعت ذاتی سازه و نیروهای بیرونی وجود داشته باشند

۲- سازه دارای درجات آزادی غیر معین باشد و توسط حسگرها بصورت کامل قابل مشاهده و بررسی نمی باشد

۳- حسگرها همراه با پارازیت باشند.

مطالعات عددی مختلف در خصوص کنترل فعال ساختمانها، در مطالعات پیشین، به نتایج جالبی منتهی گردیده است که می توانند در طراحی و آنالیز یک برنامه کنترل فعال مفید باشند. در ادامه برخی از مهمترین این موارد بصورت خلاصه بیان گردیده است.

۱- مشاهده گردید که چنانچه کنترل کننده در طبقه بالاتر نصب گردید، نیاز به یک نیروی کنترل کوچکتر برای دستیابی به کاهش بزرگ در پاسخ وجود دارد و در حالی که کنترل کننده در طبقه اول نصب گردید نیاز به نیروی کنترل بزرگتر می باشد. [۹۲]

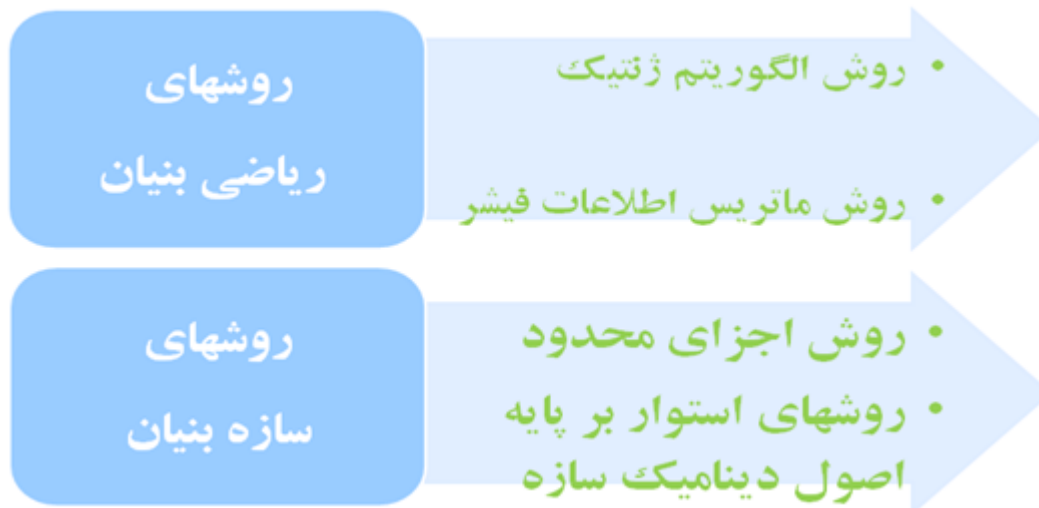
۲- سیستم کنترل بادبندی وقتی به ساختمانی تحت اثر نیروی باد اعمال می شود برای تغییر مکان و شتاب ساختمان موثر تر از سیستم کنترل میراگر جرمی می باشد. [۵]

۳- یانگ در سال ۱۹۸۷ [۹۳] نشان داد که الگوریتم کنترل بهینه آنی موثر تر از کنترل حلقه بسته ریکاتی می باشد. گرچه بهبود قابل بررسی در نتایج در کنترل حلقه بسته ریکاتی در زمانی که بازخورد سرعت- شتاب استفاده شده مشاهده می گردد. [۶۲]

۴- در روش کنترل غیر خطی می توان به کاهش مهمی در شتاب سازه با نیروی کنترلی حتی کمتر از یک درصد وزن سازه دست یافت. [۷۹]

۴-۲ روشهای اصلی تعیین مشخصات عملگرها و حسگرها در کنترل فعال سازه ها

روشهای متداول جهت تعیین مشخصات عملگرها و حسگرها در کنترل فعال سازه به دو گروه اصلی روشهای ریاضی بنیان و روشهای سازه بنیان تقسیم می گردند. در این تحقیق روشهای سازه بنیان مورد بررسی قرار می گیرد. این روشها شامل روش اجزای محدود و روشهای بر پایه اصول مهندسی دینامیک سازه می باشند.



۴-۲-۱ مدل سازی اجزای محدود سازه های هوشمند

فرم اجزای محدود معادله حرکت به صورت زیر بیان می شود.

$$M\ddot{q} + D_d\dot{q} + Kq = \bar{E}f(t) + \bar{B}u(t) \quad ۴۷-۲$$

در رابطه فوق بردار q بردار تغییر مکان عمومی شده و ماتریس های M ، D و K ماتریس های جرم، میرایی و سختی می باشند. بردار بار به دو بخش تقسیم شده که شامل بردار ناشی از بارهای خارجی، $(Ef(t))$ و بردار نیروهای کنترلی $(Bu(t))$ می باشند. بردار $f(t)$ بیان کننده اختلالات خارجی و بردار $Bu(t)$ بردار اثر کنترل کننده بر روی سازه می باشد. ماتریس های E و B نشان دهنده موقعیت نیروها و پارامترهای کنترل در سازه اجزای محدود می باشد. با معرفی مختصات مودال خواهیم داشت:

$$q(t) = \Phi_m z(t) \quad ۴۸-۲$$

در رابطه فوق Φ_m ماتریس مودال بوده و داریم:

$$\Phi_m^T M \Phi_m = I \quad ۴۹-۲$$

$$\Phi_m^T K \Phi_m = \Omega \quad ۵۰-۲$$

$$\Phi_m^T D_d \Phi_m = \Delta \quad ۵۱-۲$$

می توان مدل فضای حالت را برای سیستم مذکور بصورت زیر نوشت:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -\Omega & -\Delta \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ \Phi^T \bar{B} \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ \Phi^T \bar{E} \end{bmatrix} f(t) \quad ۵۲-۲$$

$$x(t) = \begin{bmatrix} z & \dot{z} \end{bmatrix}^T \quad ۵۳-۲$$

مدل فضای حالت می تواند بصورت زیر نیز نوشته شود:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ef(t), \quad y = Cx(t) + Du(t) + Ff(t) \quad ۵۴-۲$$

۲-۴-۲ روشهای استوار بر پایه اصول دینامیک سازه ها

جدیدترین تحقیق در خصوص تعیین مشخصات عملگرها و حسگرها در کنترل فعال سازه ها بر پایه اصول دینامیک سازه ها، از منظر نوین بودن روش و تعیین موقعیت و مقادیر نیروی عملگرها، تحقیق انجام شده توسط علامتیان [۳۶] می باشد. مبانی اصلی این روش ستفاده از نگره های ریاضی و

دینامیک سازه و همچنین در نظر گرفتن عملگر به عنوان یک میراگر اضافی می باشند. روش بیان شده بر اساس استفاده از تنها یک عملگر و یک حسگر استوار بوده است. برای تعیین نیروی بهینه عملگرها در این روش آنها را می توان به عنوان میراگر اضافی در سازه در نظر گرفت. مطابق اصول دینامیک سازه چنانچه یک سیستم در شرایط میرائی بحرانی قرار داشته باشد، ارتعاشات آن سیستم می تواند در کوتاهترین زمان میرا شود. لذا با استفاده از تئوری میرائی بحرانی می توان مقدار نیروی بهینه عملگر و موقعیت بهینه عملگر و حسگر را بدست آورد. در فضای مودال مود اول بیشترین تاثیر را در پاسخ دینامیکی سیستم دارد. لذا برای تعیین مقدار نیروی بهینه عملگرها از این ویژگی استفاده می کنیم که چنانچه نیروی عملگرها به گونه ای اعمال شود که میرائی مود اول سیستم بحرانی شود، نوسانات در کمترین زمان ممکن میرا می گردد. مطابق روش بیان شده، معادله تعادل دینامیکی مود اول ارتعاش با استفاده از یک عملگر و حسگر بصورت زیر می باشد.

$$M_I \ddot{Z}_1 + C_I \dot{Z}_1 + S_I Z_1 + \Phi_{KI} f_k^a = \{\Phi_I\}^T P\{t\} \quad 55-2$$

با در نظر گرفتن نیروی عملگر به عنوان نیروی میرایی اضافی و تعریف میرایی معادل خواهیم داشت:

$$M_I \ddot{Z}_1 + C_I^* \dot{Z}_1 + S_I Z_1 = \{\Phi_I\}^T P\{t\} \quad 56-2$$

که در آن :

$$C_I^* = C_I + (\Phi_{KI} f_k^a) / \dot{Z}_1 \quad 57-2$$

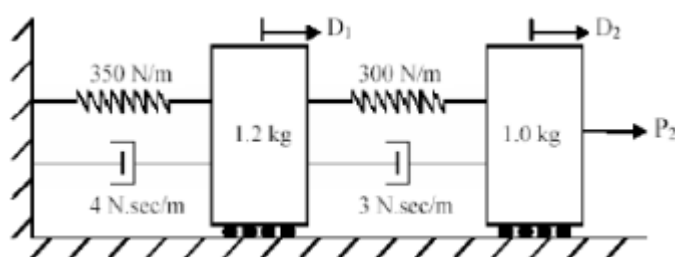
مطابق آنچه قبلا گفته شد برای تعیین نیروی بهینه عملگر می توان میرائی معادل فوق را برابر میرائی بحرانی قرار داد. لذا داریم:

$$C_I^* = 2M_I W_I \quad 58-2$$

با استفاده از روابط فوق مقدار نیروی عملگر بصورت زیر بدست می آید.

$$f_k^a = \{2M_1\omega_1 \dot{Z}_1 - C_1 \dot{Z}_1\} / \varphi_{K1} \quad ۵۹-۲$$

مطابق روش عنوان شده ، در تعیین موقعیت عملگر با استفاده از اصول دینامیک سازه و استفاده از این اصل که مهمترین مود ارتعاشی مود اول بوده و در مود اول نیز بزرگترین درایه ها بیشترین اثر را دارند ، لذا موقعیت عملگر را بیشترین مقدار شکل مود اول تعیین می کنند. در نتیجه عملگر می بایست به درجه آزادی از سیستم متصل گردد که بیشترین مقدار را در بردار شکل مود اول داشته باشند. ضمن آنکه حسگر می بایست در درجه آزادی از سیستم نصب گردد که بیشترین مقدار را در ردیف اول ماتریس شکل مودال معکوس داشته باشد. بر اساس تعریف سرعت مودال در تئوری دینامیک سازه ها سرعت هر درجه آزادی متناسب است با المان متناظر در ردیف اول ماتریس شکل مودال معکوس. مطابق موارد فوق روش مورد استفاده در بهینه یابی مطابق اصول دینامیک سازه ها بوده و نیازی به استفاده از روشهای بهینه یابی همچون الگوریتمهای ژنتیک و غیره نمی باشد . شکل ۱-۲ یک سیستم دو درجه آزادی را نشان می دهد که می تواند بیانگر یک قاب دو طبقه باشد.



شکل ۱-۲: یک سیستم دو درجه آزادی با اعمال نیرو به یک درجه [۳۶]

در مثال فوق مقدار نیروی اعمالی p_2 مطابق رابطه زیر در نظر گرفته شده است. [۳۶]

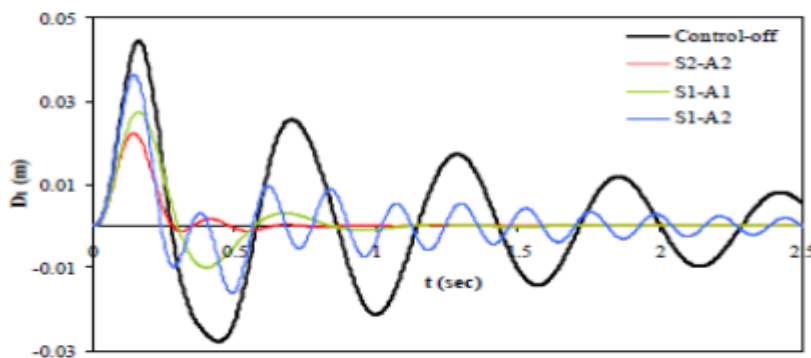
$$p_2 = \begin{cases} \frac{1}{\Delta t} & t = \Delta t \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

در اینجا گام زمانی برابر ۰,۰۰۳۹ در نظر گرفته شده است. ضمن آنکه روش PC-6 با استفاده از شش شتاب قبلی مورد استفاده قرار گرفته است. پروسه انتخاب موقعیت بهینه عملگر و حسگر در جدول ۲-۱ آمده است:

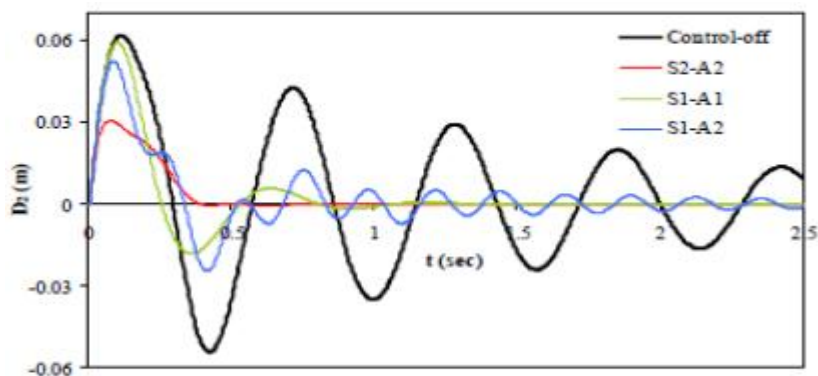
جدول ۲-۱: پروسه انتخاب موقعیت بهینه عملگر و حسگر در سازه دو درجه آزادی [۳۶]

Degree of Freedom	φ_{IL}^{inv}	φ_{kl}	Optimum Control Case
1	0.5831	0.5113	S2-A2
2	0.8167	0.8594	

مطابق جدول فوق و مطالب عنوان شده جهت تعیین موقعیت بهینه عملگر و حسگر درجه آزادی ۲ به عنوان موقعیت بهینه عملگر و حسگر حاصل می گردد. پس از تعیین موقعیت بهینه حسگر و عملگر کنترل لرزه ای فعال به سازه اعمال می گردد. نمودارهای شکل ۲-۲ و ۳-۲ پاسخهای تغییر مکان- زمان برای اولین و دومین درجه آزادی را در حالت های مختلف کنترل (موقعیت های مختلف حسگر و عملگر) نشان می دهند.



شکل ۲-۲: تغییر مکان درجه آزادی اول در حالت های مختلف کنترل [۳۶]



شکل ۲-۳: تغییر مکان درجه آزادی دوم در حالت های مختلف کنترل [۳۶]

نکته مهم در نمودارهای فوق آن است که در حالت بهینه موقعیت حسگر و عملگر (S2-A2) لرزش در حدود ۰,۵ ثانیه میرا می شود. این در حالی است که در زمان استفاده از نرم افزار ANSYS زمان کنترل لرزش حدود ۱,۵ ثانیه می باشد. ضمن آنکه حالت های دیگر موقعیت قرارگیری عملگر و حسگر میزان موثر بودن پروسه کنترل کاهش می یابد.

۲-۵ مواد پیزو الکتریک در کنترل ارتعاشات

در سال ۱۸۸۰ اثر پیزو الکتریک توسط پیر ژاک کوری کشف گردید. ارتباط بین خواص مکانیکی و الکتریکی پیزو الکتریک ها باعث بکارگیری آنها به عنوان حسگر و عملگر در سازه ها شد. به طوری که به عنوان حسگر تغییر شکلهای مکانیکی را می توان با اندازه گیری پتانسیل الکتریکی ایجاد شده در ماده پیزو الکتریک بدست آورد. همچنین در حالت عملگری کرنش یا تغییر شکل سازه می تواند با اعمال پتانسیل الکتریکی مناسب به پیزو الکتریک کنترل گردد. با توجه به عملکرد مواد پیزو الکتریک هم به عنوان حسگر و هم به عنوان عملگر میتوان این مواد را جزمصالح هوشمند دانست. سرامیک های پیزو الکتریک ابزاری ارزان و قابل اعتماد در حسگری و عملگری در سازه ها می باشند. در سال ۱۹۸۵ بیلی و همکاران از مواد پیزو الکتریک به عنوان عملگر جهت کنترل ارتعاشات تیر یک سر گیر دار استفاده نمودند. [۱۲]

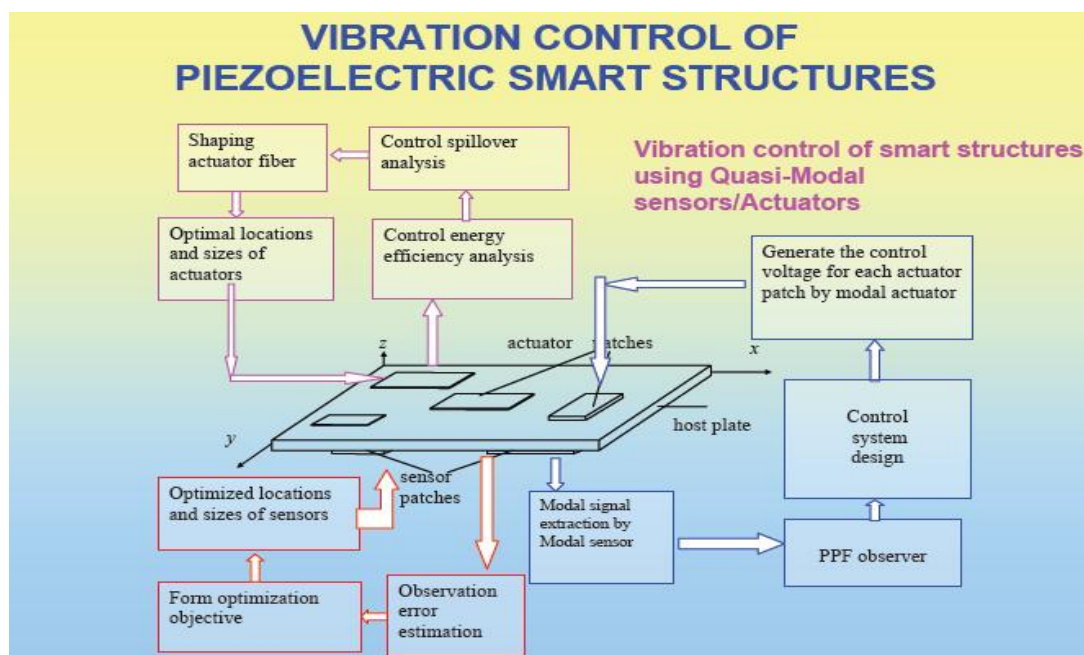
سلامت سنجی سازه ها (SHM) با استفاده از مواد پیزو الکتریک به سه دسته کلی تقسیم می شوند:

۱- آنهایی که بر اساس مقاومت می باشند.

۲- آنهایی که بر اساس امواج هستند.

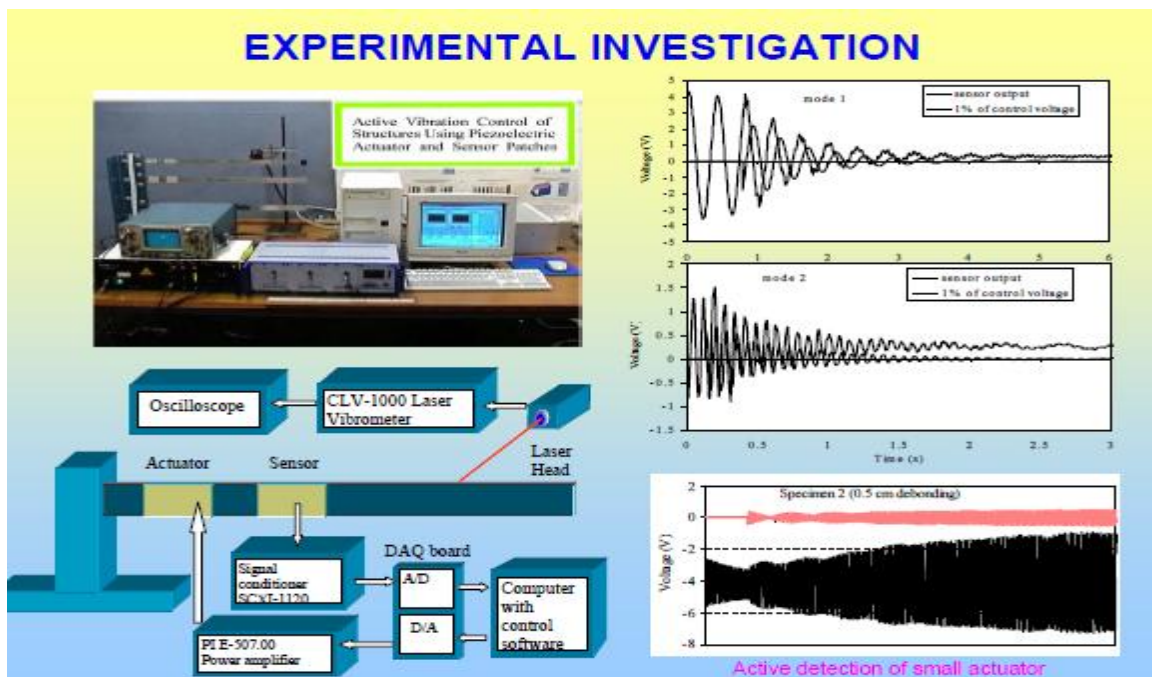
۳- آنهایی که بر اساس کاراکترهای لرزه ای کار می کنند.

تصویرهای ادامه نشان دهنده مراحل و نحوه های مختلف کنترل شکل و لرزش در سازه های هوشمند پیزو الکتریک و مراحل کنترل لرزشی سازه هوشمند با استفاده از حسگر ها و عملگرهای مودال می باشند.



شکل ۲-۴: فرایند کنترل لرزه ای سازه های هوشمند پیزوالکتریک [۱۲]

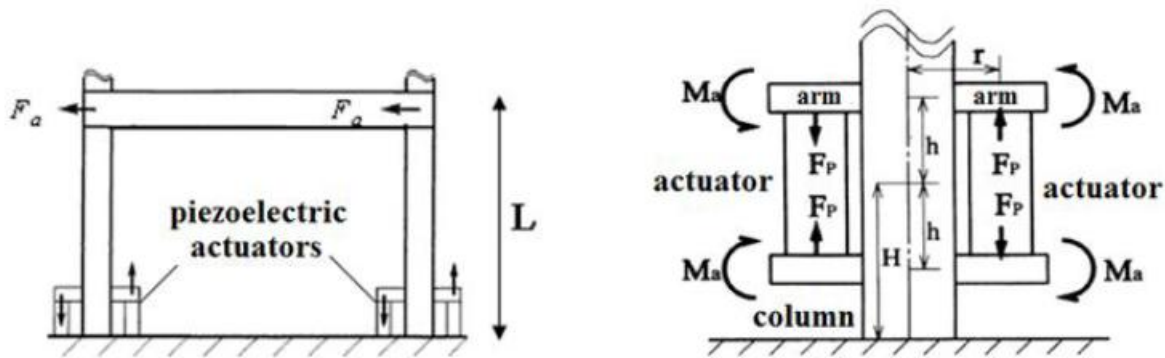
در شکل شماره ۲-۴ سه پروسه مختلف نمایش داده شده اند. اول پروسه تعیین موقعیت و سایز بهینه حسگرها (در زیر سازه)، دوم پروسه تعیین موقعیت و سایز بهینه عملگرها (در بالای سازه) و سوم پروسه طراحی سیستم کنترل و تولید ولتاژهای کنترل (در سمت راست سازه).



شکل ۲-۵: نمونه آزمایشگاهی از عملکرد حسگرها و عملگرها [۱۲]

از بین سرامیک های پیزوالکتریک ، عملگرهای PZT کرنشی تا ۵۰۰ میکرو کرنش و نیرویی تا ۱۰۰ کیلو نیوتن بر اساس ولتاژ الکتریکی اعمال شده می توانند وارد نمایند.

مطابق مطالعات Kamada و همکاران در سال ۱۹۹۸ [۴۰] از مواد پیزو الکتریک در کنترل فعال ارتعاشات سازه های قابی نیز می توان بهره جست. اشکال بعد برخی از شیوه های استفاده از مواد پیزو الکتریک در کنترل فعال سازه های قابی را نشان می دهد. در شکل شماره ۲-۶ عملگرهای پیزوالکتریک در دو طرف پایین ستونهای طبقه اول نصب گردیده است. بر اساس ولتاژ اعمال شده به عملگرها ،لنگرهای متمرکز M_a به پایین ستونها اعمال می گردد.



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

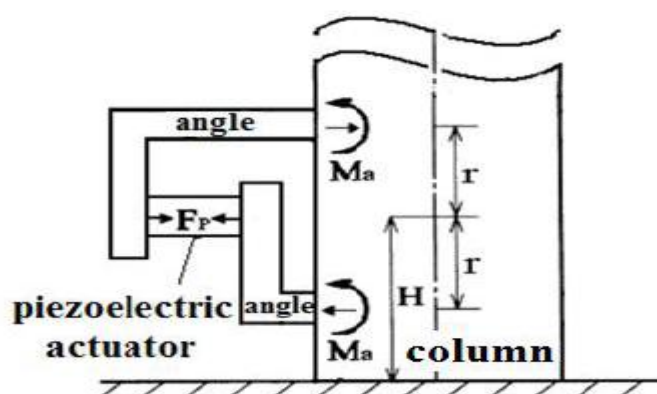
(حالت اول) [۴۰]

در حالت اول نیروی برشی معادل اعمالی به هر طبقه مطابق روابط زیر محاسبه می گردد.

$$M_a = F_p r \quad ۶۰-۲$$

$$F_a = 24hrF_p(L-2H)/L^3 \quad ۶۱-۲$$

در روابط فوق مقادیر F_a ، F_p ، L و H به ترتیب ارتفاع ستون، نیروی تولید شده عملگر و نیروی برشی معادل تولید شده در طبقه اول می باشند. مطابق رابطه فوق اگر عملگر در نزدیکترین فاصله ممکن نسبت به پایه قاب نصب گردد، بهترین نتیجه حاصل می گردد.



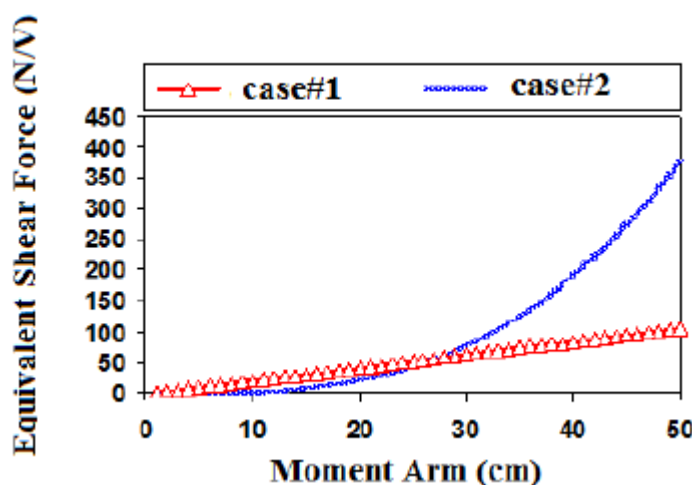
شکل ۷-۲: استفاده از مواد پیزو الکتریک در کنترل فعال ارتعاشات سازه های قابی (حالت دوم) [۴۰]

در شکل دوم عملگرهای پیزوالکتریک بین پروفیل های زاویه دار مطابق شکل در طبقه اول سازه نصب می گردند. در این حالت رابطه بین نیروی عملگرها و نیروی برشی معادل بصورت زیر خواهد بود.

$$F_a = (2r/L)^3 F_p$$

۶۲-۲

مطابق مطالعات Kamada و همکاران در سال ۱۹۹۸ [۴۰] برای بازوی لنگر کمتر از ۲۵ سانتیمتر نیروی اعمالی توسط حالت ۲و۱ تقریباً برابر بوده اما همانگونه که در شکل مشخص است، در زمان استفاده از بازوی لنگر بیشتر حالت دو موثرتر می باشد.



شکل ۲-۸: مقایسه نیروی برشی معادل حاصله در حالت های ۲و۱ جهت قرارگیری عملگرها طی مقادیر مختلف بازوی لنگر [۴۰]

مراحل کنترل فعال با استفاده از عملگرهای پیزو الکتریک به شرح زیر است:

۱-مدل کردن و آنالیز سازه پیزوالکتریک: سیستم های سازه ای پیزو الکتریک می توانند بصورت سیستم های جرم متمرکز و یا سیستم های گسترده باشند که از نظر ریاضی با معادلات متفاوت بیان می گردند. گرچه روشهای آنالیز و مدل کردن سازه های پیزو الکتریک بخوبی توسعه یافته اند اما در کنترل لرزه ای فعال بدلیل نیاز به مدل های فضای حالت در طی طراحی همواره نیاز به کلیه مطالعات وجود دارد. روشهای آنالیزی برای مدل سازی توسط جی و همکاران در سالهای ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ برای تیرهای پیزوالکتریک یک سر گیردار توسعه یافت. ضمن آنکه فو و ژانگ در سال ۲۰۰۹ موارد فوق را در مورد میکرو پلیت ها به انجام رسانید. در سیستم های سازه ای پیچیده مدل سازی بر اساس

روشهای آنالیزی می تواند بسیار پیچیده باشد. در این سیستم ها روشهای عددی مانند روش اجزای محدود مناسبتر می باشند.

۲- کاهش درجات مدل: تعداد درجات آزادی زیاد مدل اجزای محدود سازه توسط تکنیک های این گام کاهش می یابد. از جمله روشهای کاهش مدل، روش روش تجزیه مقدار منفرد می باشد که توسط وانگ (۲۰۰۳) بیان شد. در این روش از حذف مختصات مودال های غیر مهم استفاده گردید.

۳- تعیین موقعیت بهینه حسگر و عملگرها

۴- طراحی کنترل کننده بر اساس تئوری های کنترل مختلف

۵- اجرای سیستم

همچنین استفاده از میراگرهای جرمی فعال (active tuned mass dampers) یا ATMD ها و همچنین بادبندهای فعال (active tendon) یا AT ها از سایر روشهای اجرای سیستم های کنترل فعال در سازه ها می باشند.

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

در کنترل فعال لرزه ای توسط پیزو الکتریک ها تعیین موقعیت عملگرها و حسگرها از اهمیت ویژه ای برخوردار است زیرا تاثیر مستقیم در کارائی سیستم دارد. به عنوان مثال حسگر قادر نخواهد بود مود خاصی را مشاهده نماید مگر آنکه در گره آن مود قرار گیرد. در حالت کنترل چند مودی بهینه یابی موقعیت حسگرها و عملگرها در راستای قابلیت مشاهده سیستم و کنترل آن بسیار مهم می باشد. معادله حرکت سازه قاب ساختمانی با n درجه آزادی و عملگرهای پیزو الکتریک تحت تاثیر تحریک لرزه ای بصورت زیر بیان می شود.

$$[M]\{\ddot{q}\} + [C]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = \{F_m\} + \{F_c\} \quad ۶۳-۲$$

مقادیر F_c و F_m به ترتیب نیروی تحریک خارجی و نیروی کنترل (ناشی از عملگرهای پیزو الکتریک) می باشند. معادله دینامیکی سیستم در فضای حالت بصورت زیر است:

$$\dot{x} = Ax + B_c u + B_p \quad ۶۴-۲$$

$$y = Cx \quad ۶۵-۲$$

که x بردار حالت، u بردار ورودی و y بردار خروجی بوده و همچنین:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} ; \quad x = \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \end{bmatrix}$$

$$B_p = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}F_m \end{bmatrix} \quad B_c = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}F_c \end{bmatrix}$$

کنترل بهینه از طریق بازخورد حالت کامل با یک قانون کنترل تعریف شده بصورت زیر بدست می آید:

$$u = -Kx \quad ۶۶-۲$$

ولتاژ کنترل u متناسب با بردار حالت x می باشد. K در رابطه بالا بیان کننده بهره کنترل می باشد. بنابراین:

$$\dot{x} = (A - B_c K)x + B_p \quad ۶۷-۲$$

لوپس و همکاران در سال ۲۰۰۳ [۶۵] در خصوص استفاده از الگوریتم ژنتیک در بهینه یابی موقعیت عملگرها و حسگرها بررسی نمود. سیمپسون و هانسن در سال ۱۹۹۶ [۷۱] در خصوص بهینه یابی موقعیت PZT بررسی نمود. فوروایا و هافتکادر سال ۱۹۹۳ [۲۵] موقعیت بهینه ۸ عدد عملگر در سازه ای با ۱۵۰۷ موقعیت احتمالی را محاسبه نمود. گبرت و همکاران [۲۶] تکنیکی بر اساس

روشهای کلاسیک جهت تعیین موقعیت عملگر در سازه های هوشمند با بهینه یابی منفصل-پیوسته بیان نمود. بررسی موقعیت حسگرها و عملگرها بوسیله آربل [۱۱] در سال ۱۹۸۱ با استفاده از ایده قابلیت کنترل و قابلیت مشاهده در سیستم انجام شد. لیم در سال ۱۹۹۲ [۶۴] در اساس بهینه یابی خطی چندین قانون بهینه یابی برای موقعیت بهینه حسگرها و عملگرها را بیان نمود. در سال ۱۹۹۴ وانگ [۳۲] از روش اجزای محدود و همچنین یک روش پیشنهادی جهت بهینه یابی در ورق کمپوزیت لاینیت شده با جفت های عملگر و حسگر استفاده نمود.

کانگ و همکاران [۴۲] در خصوص بهینه یابی موقعیت حسگرها و عملگرها در کنترل فعال لرزه ای برای تیر لمینیت مطالعه نمودند. آنها از بیشینه نمودن شاخص میرایی سازه ای استفاده نمودند. همچنین بهینه یابی بر پایه گرادیان نیز توسط کانگ و همکاران [۴۲] برای ورق لمینیت شده انجام شد. کنترل لرزه ای سازه کمپوزیت FRP که حسگرها و عملگرهای پیزو الکتریک به آن متصل گردیده اند، توسط روی وچاکرابورتی در سال ۲۰۰۸ با کمینه کردن تغییر مکان حداکثر و استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام شد.

کیو و همکاران در سال ۲۰۰۷ [۵۹] روشهای توانایی کنترل و مشاهده را برای بهینه یابی موقعیت حسگرها و عملگرهای پیزو الکتریک در لرزش کف طبقات ساختمانها ترکیب نمودند. چن و همکاران در سال ۲۰۰۹ [۱۹] از یک دسته بهینه یاب برای تعیین موقعیت عملگرها در یک ورق استفاده نمود. پادولا و همکاران [۵۷] اهمیت تعیین موقعیت حسگرها و عملگرها را به همراه نتایج تجربی بیان نمود. هان و لی [۳۱] ماتریس قابل کنترل Grammian را ساخت و بردار بیشینه را به عنوان تابع عملکرد در نظر گرفت. ضمن آنکه در این مطالعه الگوریتم ژنتیک برای تعیین موقعیت بهینه حسگر و عملگر استفاده گردید. همچنین صدری و همکاران [۶۷] دو معیار را برای موقعیت بهینه عملگرها بیان نمودند. در این مطالعه الگوریتم ژنتیک نیز جهت تعیین موقعیت دو عملگر پیزو الکتریک در یک ورق ایزوتروپ مورد استفاده قرار گرفت. گائو و همکاران [۲۸] از روش ارزیابی آسیب جهت تعیین

موقعیت حسگرها در سلامت سنجی سازه ها استفاده کردند. دو روش اصلی که در بسیاری از مقالات در خصوص بهینه یابی موقعیت عملگرها و حسگرها بیان می شوند عبارتند از روش الگوریتم ژنتیک و روش رابطه سازی اجزای محدود.

۲-۶-۱۱ استفاده از الگوریتم ژنتیک جهت بهینه یابی موقعیت حسگرها و عملگرها

مطابق برخی تحقیقات الگوریتم ژنتیک جهت بهینه یابی موقعیت حسگرها و عملگرها مورد استفاده قرار گرفته است که از آن جمله می توان به تحقیقات ژانگ و همکاران در سال ۲۰۰۰ [۹۸] اشاره نمود. موقعیت بهینه حسگرها بر اساس مقدار تناسب که شاخص قابلیت کنترل می باشد بررسی می شود. برای حسگر تناسب بصورت زیر بیان می شود.

$$\Omega_s = \left\{ \begin{array}{ll} \prod_{i=1}^{n_s} \sigma_i & \text{observed spillover considered} \\ \prod_{i=1}^{n_s} \sigma_i - \gamma' \sum_{i=1}^{n_s} \sigma_i^R & \text{if } \sum_{i=1}^{n_s} \sigma_i > \gamma' \sum_{i=1}^{n_s} \sigma_i^R \\ \prod_{i=1}^{n_s} \sigma_i - \gamma' \sum_{i=1}^{n_s} \sigma_i^R \times 10^{-2} & \text{otherwise} \end{array} \right\}$$

برای عملگر تناسب بصورت زیر بیان می شود.

$$\Omega_a = \left\{ \begin{array}{ll} \prod_{i=1}^{n_a} \sigma_i & \text{observed spillover considered} \\ \prod_{i=1}^{n_a} \sigma_i - \gamma' \sum_{i=1}^{n_a} \sigma_i^R & \text{if } \sum_{i=1}^{n_a} \sigma_i > \gamma' \sum_{i=1}^{n_a} \sigma_i^R \\ \prod_{i=1}^{n_a} \sigma_i - \gamma' \sum_{i=1}^{n_a} \sigma_i^R \times 10^{-2} & \text{otherwise} \end{array} \right\}$$

در روابط فوق n_s تعداد حسگرها و n_a تعداد عملگرها می باشند .

گامهای زیر استفاده از الگوریتم ژنتیک برای بهینه یابی موقعیت حسگرها و عملگرها را بیان می کنند

۱- کروموزوم های اولیه بصورت اتفاقی از مجموعه ای از جمعیت انتخاب می شوند. (بستگی به تعداد حسگرها و عملگرهای مورد استفاده دارد)

۲- مقدار تناسب برای همه کروموزوم ها ی انتخاب شده (با استفاده از فرمولهای داده شده در بالا) بدست می آیند.

۳- با انجام عملیات مربوط به ژنتیک کروموزوم های والدین تولید می شوند.

۴- برنامه تا تکمیل شرایط ادامه می یابد (تا زمان همگرایی تناسب) . در این گام بهترین مقدار قابلیت کنترل را داریم .

۵- پس از همگرایی بهترین موقعیت حسگرها و عملگرها بدست می آید.

۲-۶-۲ استفاده از رابطه سازی اجزای محدود جهت بهینه یابی موقعیت حسگرها و عملگرها

تغییر شکل ایجاد شده در تیر باعث ایجاد کرنش مطابق رابطه زیر می گردد. این مقدار کرنش است که توسط حسگرها برای تولید ولتاژ استفاده می شود.

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{x'} \\ \varepsilon_{y'} \\ \gamma_{x'y'} \\ \gamma_{x'z'} \\ \gamma_{y'z'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{du'}{dx'} \\ \frac{dv'}{dy'} \\ \frac{dv'}{dx'} + \frac{du'}{dy'} \\ \frac{du'}{dz'} + \frac{dw'}{dx'} \\ \frac{dv'}{dz'} + \frac{dw'}{dy'} \end{bmatrix}$$

$$\{\varepsilon\} = \sum_{k=1}^8 \left[(B_u)_{\varepsilon}^k \right] \{d_k^{\varepsilon}\} = [B_u^{\varepsilon}] \{d^{\varepsilon}\} \quad ۶۸-۱$$

رابطه بین وصله های پیزوالکتریک معکوس و مستقیم توسط روابط زیر بیان شده است .

$$\{D\} = [e]\{\varepsilon\} + [C]/[E] \quad ۶۹-۲$$

$$\{\sigma\} = [C]\{\varepsilon\} - [e]^T \{E\} \quad ۷۰-۲$$

در روابط فوق D بردار تغییر مکان می باشد.

پتانسیل حسگرها توسط رابطه زیر بیان می شود.

$$\{-E_a^e\} = [B_a^e] \{\phi_a^e\} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{h_a} \end{bmatrix} \{\phi_a^e\}$$

$$\{-E_s^e\} = [B_s^e] \{\phi_s^e\} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{h_a} \end{bmatrix} \{\phi_s^e\}$$

اندیس های a و s مربوط به عملگرها و حسگرها می باشند.

$[B_s^e]$ = Electric field gradient of sensor(matrix).

$[B_a^e]$ = Electric field gradient of actuator(matrix)

روابط اجزای محدود شامل جرم و سختی سازه ای بصورت زیر می باشند.

$$[M_{uu}^e] = \int_V \rho [N^T] [N] dV \quad ۷۱-۲$$

$$[K_{uu}^e] = \frac{2}{T} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \sum_{k=1}^N \frac{t_k - t_{k-1}}{2} \int_{-1}^1 [B_u]^T [C] [B_u] |J| d\xi d\eta d\zeta \quad ۷۲-۲$$

ضمن آنکه ماتریس قابلیت تولید بصورت رابطه ۷۳-۲ بیان می شود.

$$[K_{ss}^e] = -\frac{2}{T} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \sum_{k=1}^N \frac{t_k - t_{k-1}}{2} \int_{-1}^1 [B_\phi]^T [\epsilon] [B_\phi] |J| d\xi d\eta d\zeta \quad ۷۳-۲$$

همچنین ماتریس پیزوالکتریک عبارتست از:

$$[K_{us}^e] = \frac{2}{T} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \sum_{k=1}^N \frac{t_k - t_{k-1}}{2} \int_{-1}^1 [B_u]^T [e]^T [B_\phi] |J| d\xi d\eta d\zeta \quad ۷۴-۲$$

معادله اجزای محدود دینامیکی کلی بصورت زیر نوشته می شود.

$$[M_{uu}]\{d''\} + \left[[K_{uu}] - [K_{ua}][K_{aa}]^{-1}[K_{au}] - [K_{us}][K_{ss}]^{-1}[K_{su}] \right] \{d\} = \{F\} - [K_{ua}]\{\phi_a\}$$

$[M_{uu}]$ = Global mass matrix.

$[K_{uu}]$ = Global elastic stiffness matrix.

$[K_{ua}]$ = Global piezoelectric coupling matrix for actuator.

$[K_{us}]$ = Global piezoelectric coupling matrix for sensors.

$[K_{aa}]$ = Global dielectric stiffness matrix for actuator.

$[K_{ss}]$ = Global dielectric stiffness matrix for sensors.

جهت بیان فضای حالت بردار تغییر مکان می تواند بصورت زیر نوشته شود.

$$\{d(t)\} \approx [\Psi] \{\eta(t)\} \quad ۷۵-۲$$

$$[\Psi] = [\Psi_1 \ \Psi_2 \ \Psi_3 \ \Psi_4 \dots \dots \Psi_r] \quad ۷۶-۲$$

معادله دینامیکی وقتی میرائی مودال بررسی می شود بصورت زیر خواهد بود.

$$\{\eta_i(\ddot{t})\} + 2\xi_{di}\omega_i \{\eta_i(t)\} + \omega_i^2 \{\eta_i(t)\} = [\psi]^T \{F\} - [\psi]^T [K_{ua}]\{\phi_a\} \quad ۷۷-۲$$

ξ_{di} is the damping ratio

فرم فضای حالت بصورت زیر خواهد بود.

$$\{\ddot{\eta}_i(t)\} + 2\xi_{di}\omega_i\{\dot{\eta}_i(t)\} + \omega_i^2\{\eta_i(t)\} = [\psi]^T\{F\} - [\psi]^T[K_{ua}]\{\phi_a\} \quad ۷۸-۲$$

$$[A] = \begin{bmatrix} [0] & [1] \\ -\omega_i^2 & 2\xi_{di}\omega_i \end{bmatrix} \quad \text{known as symmetric matrix.}$$

$$[B] = \begin{bmatrix} [0] \\ -[\psi]^T[K_{ua}] \end{bmatrix} \quad \text{known as coupling matrix.}$$

$$[\hat{B}] = \begin{bmatrix} [0] \\ -[\psi]^T[F] \end{bmatrix} \quad \text{known as disturbance matrix.}$$

$[u_d]$ is the disturbance input vector,

$[\phi_a]$ is the control input

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\eta} \\ \ddot{\eta} \end{bmatrix} \quad \text{and} \quad \begin{bmatrix} X \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta \\ \dot{\eta} \end{bmatrix}$$

معادله خروجی حسگر بصورت زیر می باشد.

$$\{y\} = [C_0][X] \quad ۷۹-۲$$

در رابطه بالا $[C_0]$ وابسته به ماتریس مودال $[\Psi]$ و ماتریس $[k_{\phi_w}]$ می باشد

با بیشینه کردن نیروی کنترل نهایی شاخص قابلیت کنترل عملکرد بیان می شود.

$$\{f_c\} = [B]\{\Phi_a\} \quad ۸۰-۲$$

بصورت مشابه قابلیت کنترل برای حسگرها بصورت زیر نوشته می شود.

$$\{f_c\}=[B]\{\Phi_s\} \quad ۸۱-۲$$

$$[B]=[M][S][S^T] \quad ۸۲-۲$$

برای عملگرها داریم :

$$[S]=\begin{pmatrix} \sigma_1 & \cdots & 0 \\ 0 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \cdots & \sigma_{n_s} \\ 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix}$$

بصورت مشابه توانایی کنترل برای حسگرها نیز می تواند بیان شود.

$$[S]=\begin{pmatrix} \sigma_1 & \cdots & 0 \\ 0 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \cdots & \sigma_{n_s} \\ 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix}$$

وانگ [۹۰] شاخص قابلیت کنترل را برای عملگرها بصورت زیر بیان نمود.

$$\Omega=\prod_{i=1}^{n_g}\sigma_i \quad ۸۳-۲$$

ضمن آنکه برای حسگرها نیز داریم:

$$\Omega=\prod_{i=1}^{n_s}\sigma_i \quad ۸۴-۲$$

بنابراین با بیشینه کردن شاخص قابلیت کنترل فوق می توان به مقدارتناسب دست یابیم. با فرمول

سازی چند هدفه ما می توانیم موقعیت های بهینه را برای حالتی که حسگرها و عملگرها با هم کار

می کنند را بیابیم.معادله چند هدفه بصورت زیر بیان می شود.

$$f = w_1 \Omega_a + w_2 \Omega_s \quad ۸۵-۲$$

$$w_1 + w_2 = I \quad ۸۶-۲$$

زیرنویس های a و s اشاره به عملگرها و حسگرها دارند. w_1 و w_2 توابع وزن هستند. مقدار کل تناسب برای سیستم چند هدفه توسط f بیان می شود.

۲-۶-۳ تعیین موقعیت حسگرها بر اساس ماتریس اطلاعات فیشر

(Fisher information matrix)

پادولا و همکاران در سال ۱۹۹۹ [۵۷] از یک روش بر مبنای ماتریس اطلاعات فیشر (FI) جهت تعیین موقعیت حسگرها استفاده نمودند. در این روش از تابع خطا بر پایه سختی $e(p)$ استفاده می شود. ابعاد این ماتریس $nmdof * nsf$ میباشد. nsf تعداد مجموعه نیروهای اعمال شده و $nmdof$ تعداد درجات آزادی می باشد.

$$[e(p)] = [K_{aa}][u_a]^m - [K_{ab}][K_{bb}]^{-1}[K_{ba}][u_a]^m + [K_{ab}][K_{bb}]^{-1}[f_b]^m - [f_a]^m \quad ۸۷-۲$$

در رابطه بالا اندیس m اشاره به اطلاعات اندازه گیری شده و a بیانگر شماره درجه آزادی اندازه گیری شده و b بیانگر درجه آزادی اندازه گیری نشده می باشد. $e(p)$ یک تابع غیر خطی از پارامتر ناشناخته p می باشد. ماتریس حساسیت مطابق رابطه زیر و بر اساس $e(p)$ تعیین می گردد.

$$[S(p)] = \partial\{E(p)\}/\partial\{p\}^T \quad ۸۸-۲$$

تابع هدف اسکالار مطابق زیر تعریف می شود.

$$J(p)=\Sigma E_i^2(p)$$

۸۹-۲

با توجه به رابطه $e(p)$ و با کمینه کردن تابع هدف داریم:

$$[S(p)]^T([S(p)]\{\Delta p\}+E(p))=0$$

۹۰-۲

با حل معادله فوق داریم:

$$\{p\}_{i+1}=\{p\}_i+\{\Delta p\}_i$$

۹۱-۲

با در نظر گرفتن فرضیات ساده سازی داریم:

$$E[(\{\Delta p\}-\{\Delta p\}) (\{\Delta p\}-\{\Delta p\})^T] \geq ([\psi_0^2]^{-1} [A_0])^{-1}$$

۲۹-۲

فصل سوم

روش جدید پیشنهادی

فصل سوم : روش جدید پیشنهادی

۳-۱ مبانی روش جدید پیشنهادی

در روش پیشنهادی فرایند نوینی برای کنترل فعال سازه ها بیان می گردد. بر پایه این فرایند می توان موقعیت حسگرها و عملگرها و نیروی لحظه ای لازم عملگرها را جهت کنترل نواسانات برحسب تابع نیروی وارده به سازه محاسبه نمود. ایده اصلی در این روش استفاده از روابط و معیارهای دینامیک سازه ها جهت تعیین نیروی عملگرها در هر بازه زمانی و نیز موقعیت مناسب حسگرها و عملگرها می باشد. مبانی مورد استفاده در راهکار پیشنهادی بصورت مشخص عبارتند از:

۱- استفاده از روابط و نگره های ریاضی و دینامیک سازه.

۲- در نظر گرفتن عملگرها به عنوان میراگر اضافی در سازه.

۳- رابطه سازی نیروی عملگرها به گونه ای که با توجه به اهمیت و تاثیر مودهای اول، میرایی مودهای اول بحرانی شود.

مطابق قوانین همیلتون رابطه تعادل دینامیکی یک سیستم مطابق زیر می باشد.

$$[M] \{\ddot{D}\} + [C] \{\dot{D}\} + [S] \{D\} = \{p(t)\} \quad ۱-۳$$

در این رابطه ماتریس های جرم، میرایی، سختی و نیروهای خارجی مربوط به گام زمانی Δt می باشند.

اما در سازه های هوشمند، نیروی عملگرها نیز به معادله تعادل وارد می گردد و این معادله تعادل بصورت رابطه ۲-۳ بیان می شود:

$$[M] \{\ddot{D}\} + [C] \{\dot{D}\} + [S] \{D\} + \{f^a\} = \{p(t)\} \quad ۲-۳$$

در رابطه فوق f^a بردار معادل نیروهای عملگرها بوده که به سازه اعمال می شوند. مطابق اصول دینامیک سازه چنانچه یک سیستم در شرایط میرایی بحرانی قرار داشته باشد، ارتعاشات آن سیستم می تواند در کوتاهترین زمان میرا شود. لذا با استفاده از تئوری میرایی بحرانی می توان مقدار نیروی بهینه عملگرها و موقعیت بهینه عملگرها و حسگرها را بدست آورد. برای دستیابی به موارد فوق و استفاده از شرایط میرایی بحرانی، معادله قبلی را در فضای مودال به صورت زیر بیان می کنیم.

$$M_i \ddot{Z}_i + C_i \dot{Z}_i + S_i Z_i + \{\varphi_i\}^T \{f^a\} = \{\varphi_i\}^T P \{t\} \quad ۳-۳$$

دراین رابطه M_i, C_i, S_i به ترتیب مقادارهای جرم، میرایی و سختی مختصه مودال Z_i می باشند. همچنین $\{\varphi_i\}$ بردار شکل مود نوسان Λ_m ارتعاش آزاد سازه و q تعداد درجه های آزادی است. با بالا رفتن شماره مود (i) اثر آن مود در پاسخ دینامیکی سازه کاهش می یابد. بنابراین، مودهای نوسان پایین سهم بیشتری در پاسخ دینامیکی دارند. می توان از این ویژگی برای محاسبه نیروی عملگرها استفاده کرد. به عبارت دیگر در روش پیشنهادی با توجه به مهم بودن مودهای نوسان پایین و بالا بودن سهم آنها در پاسخ دینامیکی، میرایی معادل این مودها را برابر میرایی بحرانی قرار داده و از روابط حاصله مقادیر نیروهای عملگرها بدست می آید.

چنانچه در سازه n عملگر وجود داشته باشد، در هر لحظه لازم است n مجهول شامل نیروهای این عملگرها تعیین شوند. محاسبه این n مجهول نیازمند n معادله خواهد بود. از این رو، بهترین راهکار، تعیین نیروهای n عملگر به گونه ای است که n مود اول نوسان سازه بحرانی گردند. در این حالت، مناسبترین شیوه پایشی در دسترس قرار می گیرد؛ زیرا بحرانی شدن میرایی n مود اول نوسان سبب از بین رفتن نوسانهای سامانه در کوتاه ترین زمان خواهد شد.

پیش از این علامت‌یاب و رضائی پزند از این اصل استفاده کرده اند و پایش فعال نوسانهای سازه را با در نظر گرفتن مود اول به تنهایی انجام داده اند [۳۶]. آنها نیروی عملگر را با بحرانی کردن مود اول تعیین کردند. این فرایند دارای محدودیت هایی است که از آن جمله می توان به در نظر گرفتن تنها یک عملگر در سازه اشاره کرد. این موضوع سبب کاهش کارایی در سازه های با درجه های آزادی زیاد می گردد. در این تحقیق این کاستی برطرف می شود. به بیان دیگر، پایش فعال در نوسانهای سازه با چندین عملگر انجام خواهد شد. برای انجام این کار چندین مود نخست نوسان سازه بررسی شده و رابطه سازی های کلی ارائه می گردد، به گونه ای که طراح می تواند تعداد عملگرها و حسگرها را تغییر دهد. هرچه تعداد عملگرها بیشتر شوند نوسانهای سازه زودتر میرا خواهند شد. در این مطالعه، از Π عملگر استفاده می شود. همچنین برای تعیین موقعیت عملگرها، Π درایه بزرگ مود اول انتخاب می گردند؛ به گونه ای که هر یک از این Π عملگر به یکی از این درجه های آزادی متصل می شوند. با این کار، معادله فضای مودال در حضور Π عملگر بصورت زیر خواهد بود.

$$M_1 \ddot{Z}_1 + C_1 \dot{Z}_1 + S_1 Z_1 + \varphi_{K1} f_k^a + \varphi_{j1} f_j^a + \dots + \varphi_{r1} f_r^a = \{\varphi_1\}^T P\{t\} \quad 4-3$$

$$M_2 \ddot{Z}_2 + C_2 \dot{Z}_2 + S_2 Z_2 + \varphi_{K2} f_k^a + \varphi_{j2} f_j^a + \dots + \varphi_{r2} f_r^a = \{\varphi_2\}^T P\{t\} \quad 5-3$$

$$M_3 \ddot{Z}_3 + C_3 \dot{Z}_3 + S_3 Z_3 + \varphi_{K3} f_k^a + \varphi_{j3} f_j^a + \dots + \varphi_{r3} f_r^a = \{\varphi_3\}^T P\{t\} \quad 6-3$$

$$M_4 \ddot{Z}_4 + C_4 \dot{Z}_4 + S_4 Z_4 + \varphi_{K4} f_k^a + \varphi_{j4} f_j^a + \dots + \varphi_{r4} f_r^a = \{\varphi_4\}^T P\{t\} \quad 7-3$$

در مود i ام خواهیم داشت:

$$M_i \ddot{Z}_i + C_i \dot{Z}_i + S_i Z_i + \varphi_{Ki} f_k^a + \varphi_{ji} f_j^a + \dots + \varphi_{ri} f_r^a = \{\varphi_{ij}\}^T P\{t\} \quad ۸-۳$$

در رابطه بالا، $f_1^a, f_2^a, \dots, f_n^a$ نیروهای عملگر می باشند. همچنین $\varphi_{Ki}, \varphi_{ji}, \dots, \varphi_{ri}$ مربوط به n درایه بزرگ مودهای شکل نوسان هستند که n عملگر به درجه های آزادی متناظر آنها متصل شده اند. اکنون، جمله های وابسته به نیروهای عملگر به صورت الگوی میرایی لزج فرض می گردد. در نتیجه می توان نوشت:

$$M_i \ddot{Z}_i + C_i \dot{Z}_i + S_i Z_i + \{\varphi_{ij}\}^T \{f^a\} = \{\varphi_{ij}\}^T P\{t\} \quad ۹-۳$$

رابطه بالا با تعریف میرایی معادل C_i^* بصورت رابطه ۱۰-۳ تبدیل می گردد.

$$M_i \ddot{Z}_i + C_i^* \dot{Z}_i + S_i Z_i = \{\varphi_{ij}\}^T P\{t\} \quad ۱۰-۳$$

در اینجا C_i^* ، میرایی معادل سازه با n عملگر در مود i ام می باشد و به صورت زیر تعریف می گردد.

$$C_i^* = C_i + \left(\frac{\varphi_{Ki}}{\dot{Z}_i}\right) f_k^a + \left(\frac{\varphi_{ji}}{\dot{Z}_i}\right) f_j^a + \dots + \left(\frac{\varphi_{ri}}{\dot{Z}_i}\right) f_r^a \quad ۱۱-۳$$

$$i=1, 2, \dots, n$$

روشن است، کوتاهترین زمان از بین رفتن نوسانها در شرایطی ایجاد می شود که میرایی های رابطه بالا بحرانی گردند و یا به عبارتی برابر میرایی بحرانی شوند. یعنی:

$$C_i^* = 2M_i \omega_i \quad i=1,2,\dots,n \quad ۱۲-۳$$

در این رابطه ω_i ، $\dot{A}_i$ فرکانس طبیعی سازه می باشد. در حالت استفاده از n عملگر n معادله از رابطه بالا در دسترس قرار می گیرد که با حل این دستگاه n معادله و n مجهول مقدارهای نیروهای عملگر به دست می آیند. همچنین $\dot{Z}_i$ سرعت مختصه مودی i ام می باشد که به موقعیت نصب حسگرها وابسته است. چگونگی تعیین این کمیت در بخش بعدی ارائه می گردد. باید دانست، نیروهای عملگرها از حل دستگاه n معادله n مجهول به دست می آیند. بر این اساس نیروهای عملگرها در هر لحظه تغییر می کنند و مقدار آنها توسط سامانه پایش فعال و از حل دستگاه معادله در دسترس قرار می گیرند.

$$C_1^* = C_1 + (\varphi_{K1}/\dot{Z}_1) f_k^a + (\varphi_{j1}/\dot{Z}_1) f_j^a + \dots + (\varphi_{r1}/\dot{Z}_1) f_r^a = 2M_1 W_1 \quad ۱۳-۳$$

$$C_2^* = C_2 + (\varphi_{K2}/\dot{Z}_2) f_k^a + (\varphi_{j2}/\dot{Z}_2) f_j^a + \dots + (\varphi_{r2}/\dot{Z}_2) f_r^a = 2M_2 W_2 \quad ۱۴-۳$$

$$C_3^* = C_3 + (\varphi_{K3}/\dot{Z}_3) f_k^a + (\varphi_{j3}/\dot{Z}_3) f_j^a + \dots + (\varphi_{r3}/\dot{Z}_3) f_r^a = 2M_3 W_3 \quad ۱۵-۳$$

$$C_i^* = C_i + (\varphi_{Ki}/\dot{Z}_i) f_k^a + (\varphi_{ji}/\dot{Z}_i) f_j^a + \dots + (\varphi_{ri}/\dot{Z}_i) f_r^a = 2M_i W_i \quad ۱۶-۳$$

برای راستی آزمایی روش پایش فعال نوین پیشنهادی از تحلیلهای دینامیکی عددی استفاده می گردد. این کار با تحلیل دینامیکی عددی سامانه پایش شده انجام می پذیرد. در این شیوه، بازه زمانی تحلیل به تعداد محدودی گام زمانی کوچک تقسیم می گردد و در هر گام زمانی از فرایندهای تابع اولیه گیری

زمانی برای دستیابی به پاسخ سازه بهره جویی می شود. در این تحقیق روش نیومارک با شتاب خطی به کار می رود. گامهای تحلیل دینامیکی عددی سامانه پایش شده به صورت زیر اند.

۱- قراردهی $n=0$ و انتخاب گام زمانی تحلیل دینامیکی .

۲- تشکیل ماتریس های جرم، سختی و میرایی سازه.

۳- تعیین موقعیت حسگرها و عملگرها .

۴- محاسبه سرعت های مودی.

۵- حل دستگاه n معادله n مجهول.

۶- محاسبه تغییرمکانهای گام زمانی از روش نیومارک با شتاب خطی.

۷- محاسبه سرعتهای گام زمانی از روش نیومارک با شتاب خطی.

۸-بردار شتاب گام زمانی n ام را با حل دستگاه خطی رابطه زیربدست آورید.

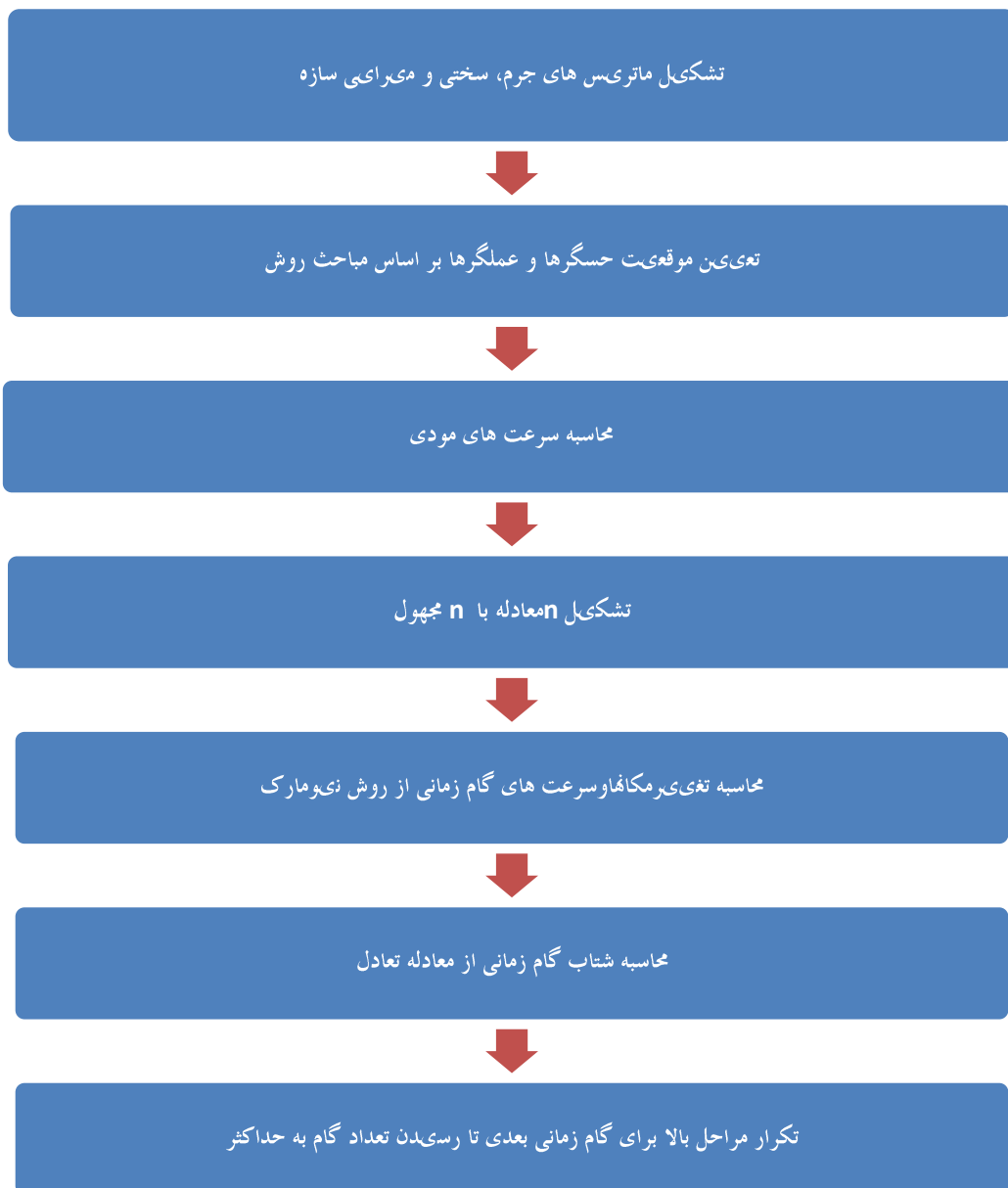
$$[M]^n \{\ddot{D}\}^n = \{p(t^n)\} - [C]^n \{\dot{D}\}^n - [S]^n \{D\}^n - \{f^n\} \quad 17-3$$

۹-به n یکی اضافه کنید.

۱۰- اگر n کمتر از n_{max} باشد تحلیل از گام ۴ دنبال شود.

۱۱- نتایج را چاپ کنید.

باید دانست شیوه تعیین موقعیت حسگرها (گام ۳) و نیز فرایند محاسبه سرعتهای مودی (گام ۴)، در قسمتهای بعدی ارائه می گردد. در ادامه به ارزیابی تحلیلی شیوه پایش پیشنهادی پرداخته می شود. شکل ۳-۱ الگوریتم اجرایی روش پیشنهادی را نشان می دهد.



شکل ۳-۱ : الگوریتم اجرایی روش پیشنهادی

۳-۲-ارزیابی تحلیلی شیوه پایش پیشنهادی

برای ارزیابی فرایند پیشنهادی، حالت‌های استفاده از یک، دو و سه عملگر بررسی می‌شوند. چنانچه در روش پیشنهادی تنها یک عملگر در سازه وجود داشته باشد، آنگاه نیروی عملگر از روابط زیر بدست می‌آید.

$$M_I \dot{Z}_I + C_I \dot{Z}_I + S_I Z_I + \Phi_{KI} f_k^a = \{\Phi_I\}^T P\{t\} \quad ۱۸-۳$$

$$M_I \dot{Z}_I + C_I^* \dot{Z}_I + S_I Z_I = \{\Phi_I\}^T P\{t\} \quad ۱۹-۳$$

$$C_I^* = C_I + (\Phi_{KI} f_k^a) / \dot{Z}_I \quad ۲۰-۳$$

مطابق آنچه قبلاً گفته شد برای تعیین نیروی بهینه عملگر می‌توان میرائی معادل فوق را برابر میرائی بحرانی قرار داد. لذا داریم

$$C_I^* = 2M_I W_I \quad ۲۱-۳$$

$$f_k^a = \{2M_I \omega_1 \dot{Z}_I - C_I \dot{Z}_I\} / \phi_{KI} \quad ۲۲-۳$$

این رابطه با نتیجه ارائه شده توسط پژوهشگران پیشین سازگار می‌باشد [۳۶]. بنابراین شیوه پیشنهادی بسیار کلی‌تر از شیوه‌های موجود است. چنانچه پایش نوسانهای سازه با دو عملگر انجام پذیرد، رابطه بیان شده به دستگاه دو معادله دو مجهول معادله ۲۳-۳ و ۲۴-۳ منجر می‌شود.

$$C_I^* = C_I + \left(\frac{\phi_{k1}}{\dot{Z}_1}\right) f_k^a + \left(\frac{\phi_{j1}}{\dot{Z}_1}\right) f_j^a = 2M_1 \omega_1 \quad ۲۳-۳$$

$$C_2^* = C_2 + \left(\frac{\varphi_{k2}}{\dot{z}_2}\right) f_k^a + \left(\frac{\varphi_{j2}}{\dot{z}_2}\right) f_j^a = 2M_2\omega_2 \quad 24-3$$

در اینجا φ_{j1} و φ_{k1} به ترتیب بزرگترین و پیش بزرگترین درایه های نخستین بردار شکل نوسان φ_{j2} و φ_{k2} نیز مقادیر متناظر در مود دوم می باشند. با حل این دستگاه نیروهای دو عملگر بصورت زیر بدست می آیند.

$$f_k^a = \frac{\{2M_2\omega_2 \dot{z}_2 - C_2 \dot{z}_2 - \frac{\varphi_{j2}}{\varphi_{j1}} \dot{z}_1 (2M_1\omega_1 - C_1)\}}{\{\varphi_{k2} - \frac{\varphi_{j2}}{\varphi_{j1}} \varphi_{k1}\}} \quad 25-3$$

$$f_j^a = 2M_1\omega_1 \frac{\dot{z}_1}{\varphi_{j1}} - C_1 \frac{\dot{z}_1}{\varphi_{j1}} - \varphi_{k1} \frac{f_k^a}{\varphi_{j1}} \quad 26-3$$

به گونه مشابه ، استفاده از سه عملگر در پایش نوسانهای سازه به دستگاه سه معادله، سه مجهول زیر منجر می گردد.

$$C_1^* = C_1 + \left(\frac{\varphi_{k1}}{\dot{z}_1}\right) f_k^a + \left(\frac{\varphi_{j1}}{\dot{z}_1}\right) f_j^a + \left(\frac{\varphi_{l1}}{\dot{z}_1}\right) f_l^a = 2M_1\omega_1 \quad 27-3$$

$$C_2^* = C_2 + \left(\frac{\varphi_{k2}}{\dot{z}_2}\right) f_k^a + \left(\frac{\varphi_{j2}}{\dot{z}_2}\right) f_j^a + \left(\frac{\varphi_{l2}}{\dot{z}_2}\right) f_l^a = 2M_2\omega_2 \quad 28-3$$

در اینجا φ_{li} و φ_{ji} و φ_{ki} که $i=1,2,3$ به ترتیب بزرگترین، پیش بزرگترین و واپیش بزرگترین درایه های i امین بردار شکل نوسان می باشند. با حل این دستگاه نیروهای سه عملگر بدست می آیند.

۳-۳-ارزیابی تعداد حسگرها

در رابطه سازی پیشنهادی، کمیت‌های سرعت های مودی وجود دارند. بر مبنای نگره دینامیک سازه ها، سرعت هر مود نوسان، به سرعت‌های درجه های آزادی سازه وابسته است. ضریب تناسب، درایه های وارون ماتریس شکل نوسان می باشند:

$$\dot{Z}_i = \sum_{j=1}^q \varphi_{ij}^{inv} \dot{D}_j \quad 30-3$$

در اینجا φ_{ij}^{inv} درایه ij از وارون ماتریس شکل نوسان است. برای تعیین سرعت های مودی $(\dot{Z}_i)$ ، لازم است دو عامل تعداد حسگرها و محل نصب حسگرها مشخص گردند. هر چه تعداد حسگرها بیشتر باشد، دقت سرعت‌های مودی نیز بیشتر خواهد شد. به عنوان نمونه، چنانچه m حسگر در سازه وجود داشته باشد، رابطه بالا بصورت زیر نوشته می شود :

$$\dot{Z}_i = \varphi_{iL}^{inv} \dot{D}_L + \varphi_{iM}^{inv} \dot{D}_M + + \varphi_{iN}^{inv} \dot{D}_N \quad 31-3$$

در این رابطه M، L و N... درجه های آزادی می باشند که حسگرها به آنها متصل شده اند (m حسگر). شایان توجه است، تعداد حسگرها را می توان به دلخواه انتخاب کرد. افزایش تعداد حسگرها سبب افزایش دقت سرعت‌های مودی می شود که افزایش دقت نیروهای عملگر را به دنبال خواهد داشت. با این وجود، محدودیت های اجرایی سبب می گردد نتوان تعداد حسگرهای زیادی را به کار برد. در بخش سنجش عددی شیوه پیشنهادی، اثر تعداد حسگرها نیز ارزیابی خواهد شد. از سوی دیگر، محل نصب حسگرها دیگر عاملی است که بر سرعت‌های مودی اثر گذار می باشد. با توجه به رابطه بیان شده قبلی می توان دریافت حسگرها باید در درجه های آزادی نصب شوند که درایه های متناظر این درجه های آزادی در نخستین سطر وارون ماتریس شکل نوسان دارای بیشترین مقادارها باشند. به عنوان

نمونه، در حالت استفاده از یک حسگر، درجه آزادی وابسته به بزرگترین درایه در نخستین سطر وارون ماتریس شکل نوسان به عنوان محل نصب حسگر انتخاب می شود. استفاده از دو حسگر سبب می گردد آنها را در درجه های آزادی متناظر با بزرگترین و پیش بزرگترین درایه ها در سطر اول وارون ماتریس شکل نوسان نصب نمود. به عنوان نمونه، در حالت وجود دو حسگر و دو عملگر می توان سرعت های مودی را از رابطه های زیر یافت.

$$\dot{Z}_1 = \varphi_{1L}^{inv} \dot{D}_L + \varphi_{1M}^{inv} \dot{D}_M \quad 32-3$$

$$\dot{Z}_2 = \varphi_{2L}^{inv} \dot{D}_L + \varphi_{2M}^{inv} \dot{D}_M \quad 33-3$$

در اینجا، درجه های آزادی M و L به ترتیب دارای بزرگترین و پیش بزرگترین درایه ها در نخستین سطر وارون ماتریس شکل نوسان می باشند. به گونه مشابه، می توان محل نصب حسگرهای دیگر را نیز مشخص کرد. در طی مراحل گامهای تحلیل دینامیکی و در محاسبه نیروی عملگر سرعت درجه آزادی L ام ($\dot{D}_L$) برای بار اول صفر در نظر گرفته شده و برای دفعات بعدی عدد برداشت شده توسط حسگر مبنا قرار می گیرد. قابل ذکر است در طی بررسی روش پیشنهادی در چند سیستم به عنوان نمونه، عدد مذکور (سرعت درجه آزادی L ام) بجای برداشت از حسگر از تحلیل دینامیکی بدست می آید. اما در استفاده عملی از پوسه پیشنهادی می توان سرعت لحظه ای را بجای محاسبه از فرایند تحلیل دینامیکی از حسگرها برداشت نمود. با داشتن مقدار نیروی عملگر در هر مرحله تحلیل دینامیکی انجام شده و نتایج آن که شامل بردارهای سرعت و تغییر مکان می باشد بدست می آید. سپس بر مبنای بردار سرعت مقدار بردار سرعت مود L ام (محل پیشنهادی نصب حسگر) و سپس مقدار $\dot{Z}_1$ بدست می آید. بر اساس این مقادیر و رابطه کلی مجدداً مقدار نیروی عملگر محاسبه می شود. سپس با داشتن نیروی عملگر مجدداً تحلیل دینامیکی انجام شده و مراحل فوق تا زمان رسیدن تعداد چرخه ها به مقدار ماکزیمم آن ادامه می یابد. در روش پیشنهادی چنانچه تابع نیروی وارده به

سیستم از قبل مشخص نباشد) همانند یک زلزله نا مشخص) می توان با قرار دادن یک حسگر شتابسنج مقدار نیرو را در هر گام زمانی محاسبه نمود.

۳-۴ مزایای روش پیشنهادی نسبت به سایر روشهای ارائه شده

بطور کلی مزایای روش نوین پیشنهادی در کنترل فعال سازه های هوشمند به شرح زیر می باشد.

۱- بسیاری از روشهای پیشین تنها برای تیر ها یا ورقها مطرح شده و قابل استفاده می باشند

(نه در یک سازه قابی کلی n درجه آزادی).

۲- سادگی روش پیشنهادی با توجه به استفاده تنها از روابط دینامیکی و ریاضی اولیه.

۳- بعضی از روشها تنها موقعیت بهینه حسگرها را بررسی می کنند . در صورتی که در روش

پیشنهادی موقعیت بهینه حسگرها و عملگرها بررسی می گردد.

۴- قابلیت برنامه نویسی روش پیشنهادی.

۵- قابلیت در نظر گرفتن تاخیر زمانی جهت بالا بدن دقت نتایج.

۶- سازگاری بیشتر با سازه های عمرانی و ساختمانها (با توجه به اتکا بر روابط دینامیک سازه

ها)

فصل چهارم

ارزیابی عددی روش پیشنهادی

فصل چهارم : ارزیابی عددی روش پیشنهادی

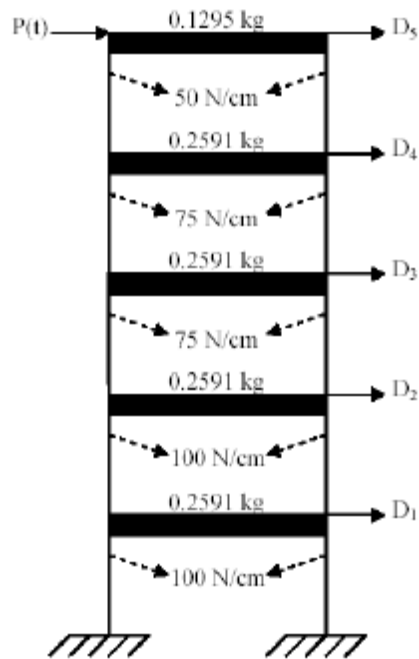
مقدمه:

در این فصل جهت ارزیابی عددی روش پیشنهاد شده و صحت و کارایی آن در کاهش ارتعاشات سازه از حل مثال های عددی استفاده می گردد. در مثالهای عددی بیان شده از بارهای هارمونیک ، بارهای انفجاری و بار زلزله السنترو استفاده گردیده است. پس از حل مثالها توسط برنامه های نوشته شده بوسیله نرم افزار متلب ، پارامترهای کلیدی برای بررسی میزان کارایی روش در حالت های مختلف کنترل (حالت بدون کنترل و حالت های استفاده از تعداد متفاوت حسگر و عملگر در موقعیت های پیشنهادی) مقایسه می گردد. مهمترین پارامتر جهت قضاوت در خصوص کارایی روش پیشنهادی میزان تغییر مکان درجات آزادی مختلف سیستم می باشد. ترسیم نمودارهای تاریخچه زمانی تغییر مکان بر حسب زمان در حالت های مختلف کنترل نشان دهنده تفاوت مقادیر بصورت آشکار خواهد بود. ضمن آنکه پارامترهایی همچون کل انرژی جنبشی سازه و مقادیر تغییر مکان نسبی طبقات نیز از سایر پارامترهای کلیدی جهت بررسی کارایی روش ارائه شده می باشند. نکته قابل توجه اینکه نتایج بدست آمده از بکارگیری روش پیشنهادی در محدوده فرضیات این تحقیق حاصل گردیده است.

۴-۱ ارزیابی تحت بار هارمونیک :

۴-۱-۱ ارزیابی در ساختمان ۵ طبقه

سنجش کارایی شیوه پیشنهادی با پایش نوسانهای یک ساختمان برشی ۵ طبقه مدل که دارای مقادیر فرضی جرم ، سختی و ابعادی بوده و بار هارمونیک $P(t) = 50\sin(10t)$ (نیوتن) به طبقه پنجم آن وارد شده است، انجام می پذیرد [۳۶]. مشخصات سختی و جرمهای این سازه در شکل ۴-۱ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱: ساختمان ۵ طبقه برشی [۳۶]

همچنین این سازه دارای ۵٪ میرایی در مود اول می باشد و دیگر مودهای نوسان آن نامیرا هستند. الگوی میرایی ریلی با دو عامل برای تعیین ماتریس میرایی سازه به کار می رود. نوسانهای این سازه با شیوه پیشنهادی پایش می گردد. در این راه، اثر تعداد حسگرها و عملگرها در کارایی شیوه پیشنهادی بررسی می شود. نخست لازم است مناسبترین درجه های آزادی برای نصب عملگرها و حسگرها تعیین گردند. این کار با توجه به بیشترین درایه های بردار شکل نوسان در مودهای مختلف و نخستین سطر از وارون ماتریس شکل نوسان انجام می پذیرد. اولویتهای نصب حسگرها و عملگرها در جدول ۴-۱ مشخص شده اند. این کار با استفاده از اصول بخشهای پیشین انجام می پذیرد. اولویتهای نصب عملگرها به ترتیب اولویت بر اساس درجه آزادی متناظر با بیشترین درایه شکل مود اول، دوم و ... می باشند. چنانچه درجه آزادی متناظر با بیشترین مولفه بردار شکل هر مود تکراری باشد از ماقبل بیشترین مقدار آن مود و درجه آزادی متناظر با آن استفاده می شود.

جدول ۴-۱: اولویت های نصب حسگرها و عملگرها

اولویت حسگر	اولویت عملگر	درجه آزادی
۵	۴	۱
۴	۲	۲
۲	۳	۳
۱	۵	۴
۳	۱	۵

با استفاده از نتایج جدول فوق، می توان الگوریتمهای مختلف کنترل را با توجه به تعداد عملگرها و حسگرها مطرح کرد. این کار در جدول ۴-۲ انجام شده است.

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

حالت	مشخصه های سامانه کنترل
بدون ابزار کنترل	سازه بدون سامانه پایش
A ₅ -S ₄	سازه دارای یک عملگر (در درجه آزادی ۵) و یک حسگر (در درجه آزادی ۴)
A _{5,2} -S ₄	سازه دارای دو عملگر و یک حسگر
A _{5,2} -S _{4,3}	سازه دارای دو عملگر و دو حسگر
A _{5,2,3} -S ₄	سازه دارای سه عملگر و یک حسگر
A _{5,2,3} -S _{4,3}	سازه دارای سه عملگر و دو حسگر
A _{5,2,3} -S _{4,3,5}	سازه دارای سه عملگر و سه حسگر

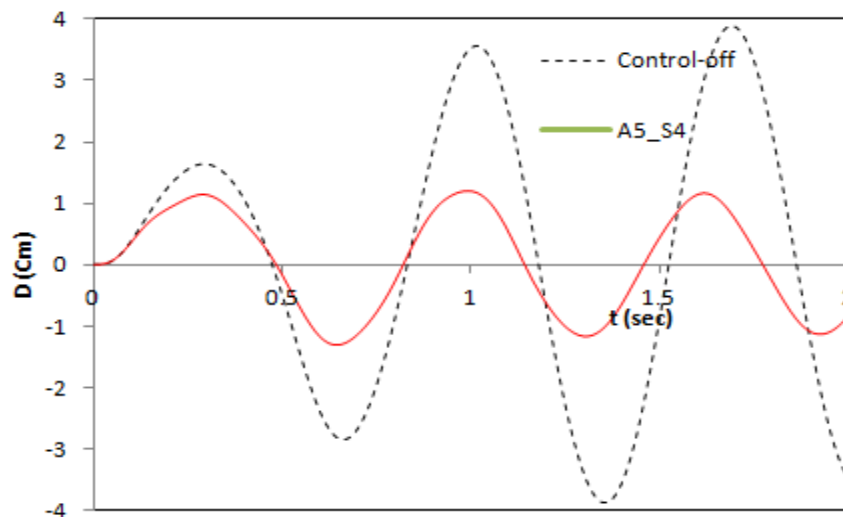
در ارزیابی عددی روش پیشنهادی ۳ عامل در حالت های مختلف کنترل فعال سازه در نظر گرفته می شود. این عامل ها عبارتند از بیشینه تغییر مکان طبقات، بیشینه انرژی جنبشی سازه و مجموع بیشینه تغییر مکانهای نسبی طبقات نسبت به یکدیگر. جدول ۴-۳ بیشینه مقادیرهای تغییر مکان (بر حسب سانتی متر) را در حالت های مختلف کنترل ارائه می کند.

جدول ۳-۴: مقایسه بیشینه تغییر مکان طبقات در حالت های مختلف کنترل بر اساس الگوریتم پیشنهادی (cm)

حالت پایش	طبقه ۴ (cm)	طبقه ۵ (cm)
بدون ابزار کنترل	۳,۹۳۹	۳,۹۱۲
A_5-S_4	۱,۳۰۱	۱,۳۰۵
$A_{5,2}-S_4$	۱,۳۰۱	۱,۳۹۵
$A_{5,2}-S_{4,3}$	۰,۹۱۱	۱,۱۲۷
$A_{5,2,3}-S_4$	۱,۳۱۲	۱,۳۷۰
$A_{5,2,3}-S_{4,3}$	۰,۹۶	۱,۳۳۶
$A_{5,2,3}-S_{4,3,5}$	۰,۷۵۶	۰,۹۸۳

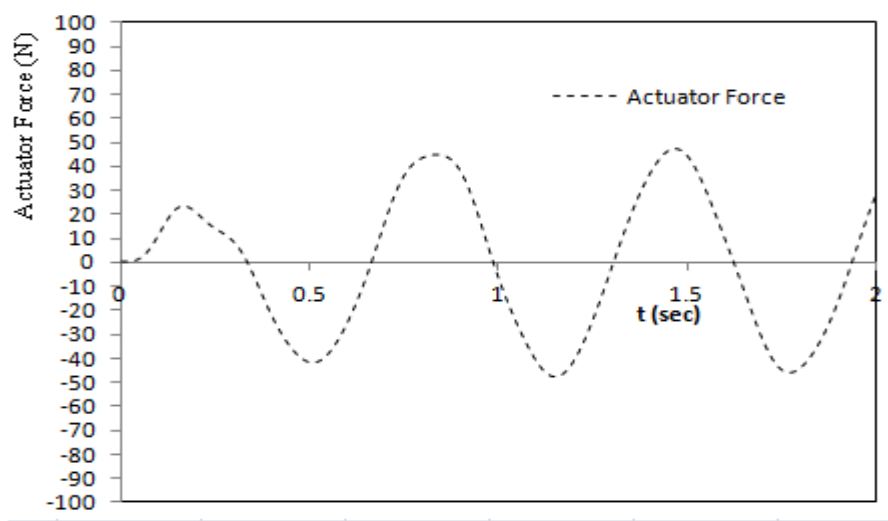
بر اساس نتایج جدول بالا، در حالت استفاده از یک حسگر و یک عملگر تغییر مکان طبقات بالایی حدود ۶۷ درصد کاهش می یابد. ضمن آنکه بر اساس جدول نتایج، در صورت استفاده از سه عملگر و سه حسگر تغییر مکان طبقه های بالایی تا ۸۰ درصد کاهش خواهد یافت. نکته ای در در مقادیر جدول فوق قابل توجه می باشد این است که زیاد شدن تعداد عملگرها در حالتی که تعداد حسگرها ثابت می ماند، تاثیر مطلوبی در کاهش مقادیر حداکثر تغییر مکانها ندارد. این امر می تواند بدلیل این واقعیت باشد که افزایش تعداد عملگر بدون افزایش دقت در شناخت رفتار سازه (زیاد شدن تعداد حسگرها) نمی تواند مفید باشد. به عبارت دیگر چنانچه از تعداد زیادی عملگر با تعداد کمی حسگر در کنترل سازه استفاده شود، زیاد بودن عملگرها تاثیر زیادی در کاهش تغییر مکانها و کنترل نوسانات سازه نخواهد داشت. نمودار ۲-۴ تغییرات مقادیر تغییر مکان بر حسب زمان در دو حالت بدون

سیستم کنترل استفاده از سیستم کنترل با الگوریتم پیشنهادی (استفاده از یک حسگر و یک عملگر را نشان می دهد).



شکل ۴-۲: تغییرات مقادیر تغییر مکان بر حسب زمان در دو حالت بدون سیستم کنترل و استفاده از سیستم کنترل با الگوریتم پیشنهادی (cm)

همچنین شکل ۴-۳ نمودار تغییرات نیروی عملگر بر حسب زمان در حالت استفاده از الگوریتم پیشنهادی (با استفاده از یک عملگر و یک حسگر) را نشان می دهد. این نمودار نشان دهنده حدود تغییرات نیروی عملگر جهت مقایسه با مقادیر امکان پذیر در عمل می باشد.



شکل ۴-۳: نمودار تغییرات نیروی عملگر (N) بر حسب زمان در حالت استفاده از الگوریتم پیشنهادی

عامل دیگری که در ارزیابی عددی روش پیشنهادی مورد استفاده قرار می گیرد، بیشینه انرژی جنبشی سازه در بازه زمانی تحلیل دینامیکی می باشد. جدول ۴-۴ تغییرات بیشینه انرژی جنبشی سازه را در این بازه در حالت های مختلف پایش را نشان می دهد. براین اساس، راهکار پایش پیشنهادی کارایی بسیار مناسبی در کاهش انرژی جنبشی سامانه دارد، به گونه ای که با افزایش تعداد عملگرها انرژی جنبشی سازه کاهش چشم گیری دارد.

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

بیشینه انرژی جنبشی $N.cm^2/S^2$	حالت پایش
۵۴۸/۱۴	بدون ابزار کنترل
۵۴	A_5-S_4
۴۱/۱۹	$A_{5,2}-S_4$
۵۶/۵۱	$A_{5,2,3}-S_4$
۲۹/۹۴	$A_{5,2,3}-S_{4,3}$
۱۵/۷۴	$A_{5,2,3}-S_{4,3,5}$
۱۲/۶۶	$A_{5,2,3}-S_{4,3,5,2}$

همچنین چگونگی تغییر بیشینه مجموع تغییر مکانهای نسبی طبقات سازه در بازه زمانی تحلیل دینامیکی در حالت های مختلف پایش متفاوت می باشد. جدول ۴-۵ این تغییرات را بیان می کند. روشن است، کارایی روش پیشنهادی با افزایش تعداد عملگرها بیشتر می شود.

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

حالت پایش	بیشینه مجموع مقادیر Drift در طبقات (cm)
بدون ابزار کنترل	۲/۶۹
A ₅ -S ₄	۰/۹۱۲
A _{5,2} -S ₄	۰/۸۲۰
A _{5,2,3} -S ₄	۰/۹۹۳
A _{5,2,3} -S _{4,3}	۱/۱۱۸
A _{5,2,3} -S _{4,3,5}	۰/۷۷۷
A _{5,2,3} -S _{4,3,5,2}	۰/۸۵۲

همچنین میزان کارایی روش پیشنهادی در کاهش شتاب طبقات نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۴-۶ نشان دهنده تغییرات شتاب طبقه پنجم در حالت های مختلف کنترل می باشد.

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

حالت پایش	بیشینه شتاب طبقه فوقانی (cm/s ²)
بدون ابزار کنترل	۳۳۸
A ₅ -S ₄	۱۶۴
A _{5,2,3} -S ₄	۱۳۹
A _{5,2,3} -S _{4,3}	۱۲۱
A _{5,2,3} -S _{4,3,5}	۸۸

بر اساس جدول بالا حداکثر شتاب طبقه فوقانی در حالت استفاده از یک حسگر و یک عملگر حدود

۵۰ درصد و در حالت استفاده از سه حسگر و سه عملگر حدود ۷۵ درصد کاهش می یابد.

۲-۴ ارزیابی تحت بار انفجاری :

۱-۲-۴ ارزیابی در ساختمان ۵ طبقه تحت بار انفجاری :

در این بخش سنجش کارایی شیوه پیشنهادی با پایش نوسانهای ساختمان برشی ۵ طبقه قبلی که بار انفجاری $P(t)$ به طبقه پنجم آن وارد شده است، انجام می پذیرد. بار انفجاری وارده بصورت زیر در نظر گرفته شده است.

$$P(t) = \begin{cases} 200t \text{ (N)} & 0 \ll t \ll 0.5 \\ 200(1 - t) \text{ (N)} & 0.5 \ll t \ll 1 \end{cases} \quad ۱-۴$$

مشخصات سازه ۵ طبقه و اولویت های موقعیت نصب حسگرها و عملگرها مطابق روش پیشنهادی در بخش بار هارمونیک ارائه گردید. جدول ۷-۴ بیشینه مقدارهای تغییر مکان را در حالت های مختلف کنترل شامل حالت بدون کنترل و کنترل بر اساس روش پیشنهادی با تعداد متفاوت حسگر و عملگر تحت اثر بار انفجاری ارائه می کند.

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

حالت کنترل	بیشینه تغییر مکان طبقه ۴ (cm)	بیشینه تغییر مکان طبقه ۵ (cm)
بدون ابزار کنترل	۳,۱۳	۴,۱۰
A_5-S_4	۲,۴۵	۳,۱۸
$A_{5,2}-S_{4,3}$	۲,۱۹	۲,۹۲
$A_{5,2,3}-S_{4,3,5}$	۱,۹۸	۲,۷۵

بر اساس نتایج جدول بالا، در حالت استفاده از یک حسگر و یک عملگر تغییر مکان طبقه پنجم حدود ۲۹ درصد کاهش می یابد. ضمن آنکه در صورت استفاده از سه عملگر و در صورت استفاده از سه

عملگر و سه حسگر الگوریتم پیشنهادی بیشینه تغییر مکان طبقه پنجم را تا ۵۰ درصد کاهش می دهد.

عامل دیگری که در ارزیابی عددی روش پیشنهادی مورد استفاده قرار می گیرد، بیشینه انرژی جنبشی سازه در بازه زمانی تحلیل دینامیکی می باشد. جدول ۴-۸ تغییرات بیشینه انرژی جنبشی سازه را در این بازه در حالت های مختلف پایش را نشان می دهد. براین اساس، راهکار پایشی پیشنهادی کارایی بسیار مناسبی در کاهش انرژی جنبشی سامانه دارد، به گونه ای که با افزایش تعداد عملگرها انرژی جنبشی سازه کاهش چشم گیری دارد.

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

بیشینه انرژی جنبشی $N.cm^2/S^2$	حالت کنترل
۷۷/۷۸	بدون ابزار کنترل
۲۱/۹۸	A_5-S_4
۱۸/۴۲	$A_{5,2}-S_{4,3}$
۸/۱۰۵	$A_{5,2,3}-S_{4,3,5}$
۷/۱۹۸	$A_{5,2,3}-S_{4,3,5,2}$
۷/۰۷۷	$A_{5,2,3}-S_{4,3,5,2,1}$

همچنین چگونگی تغییر بیشینه مجموع تغییر مکانهای نسبی طبقات سازه در بازه زمانی تحلیل دینامیکی در حالت های مختلف کنترل متفاوت می باشد. جدول ۴-۹ این تغییرات را بیان می کند. روشن است، کارایی روش پیشنهادی با افزایش تعداد عملگرها بیشتر می شود.

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

حالت کنترل	بیشینه مجموع مقادیر Drift در طبقات (cm)
بدون ابزار کنترل	۳/۴۰
A_5-S_4	۲/۶۶
$A_{5,2}-S_{4,3}$	۲/۵۲
$A_{5,2,3}-S_{4,3}$	۲/۶۳
$A_{5,2,3}-S_{4,3,5}$	۲/۲۶
$A_{5,2,3}-S_{4,3,5,2}$	۲/۲۶

۲-۲-۴ ارزیابی در ساختمان ۱۰ طبقه تحت بار انفجاری :

در این قسمت کارایی شیوه پیشنهادی در ساختمان ده طبقه با مشخصات واقعی که بار انفجاری $P(t)$ مطابق رابطه زیر به طبقه دهم آن وارد شده است، بررسی می گردد. مشخصات ساختمان ده بصورت جدول ۴-۱۰ می باشد.

$$P(t)=\begin{cases} 120000t \text{ (kg)} & 0 \ll t \ll 0.5 \\ 120000(1-t) & 0.5 \ll t \ll 1 \end{cases} \quad ۲-۴$$

جدول ۴-۱۰: مشخصات ساختمان ده طبقه با مشخصات واقعی

DOF	M (Ton)	K (Ton/m)	Mode	ξ	Effective Mass (Ton)	F (Hz)	T (s)
۱	۱۷۹	۶۲۴۷	۱	۰/۰۲	۱۱۰/۸۹	۰/۵	۱/۹۹
۲	۱۷۰	۵۹۲۶	۲	۰	۱۶۳/۰۱	۱/۳۲	۰/۷۵
۳	۱۶۱	۵۶۱۴	۳	۰	۵۷/۱۴	۲/۱۵	۰/۴۶
۴	۱۵۲	۵۳۰۲	۴	۰	۲۶/۷۰	۲/۹۳	۰/۳۴
۵	۱۴۳	۴۹۹۱	۵	۰	۱۴/۰۸	۳/۶۵	۰/۲۷
۶	۱۳۴	۴۶۷۹					
۷	۱۲۵	۴۳۶۷					
۸	۱۱۶	۴۰۵۵					
۹	۱۰۷	۳۷۴۳					
۱۰	۹۸	۳۴۳۴۱					
جمع	۱۳۸۵						

اولویت های موقعیت نصب حسگرها و عملگرها مطابق روش پیشنهادی درسازه ده طبقه بصورت جدول ۴-۱۱ ارائه گردیده است. جدول ۴-۱۲ نیز بیشینه مقدارهای تغییر مکان را در حالت های مختلف کنترل شامل حالت بدون کنترل و کنترل بر اساس روش پیشنهادی بیان می کند.

جدول ۴-۱۱: مشخصات ساختمان ده طبقه با مشخصات واقعی

درجه آزادی	اولویت عملگر	اولویت حسگر
۱	۵	۱۰
۲	۹	۹
۳	۸	۸
۴	۷	۷
۵	۶	۶
۶	۳	۴
۷	۱۰	۲
۸	۴	۱
۹	۲	۳
۱۰	۱	۵

جدول ۴-۱۲: مقایسه بیشینه تغییر مکان طبقات در حالت های مختلف کنترل تحت بار انفجاری (cm)

بیشینه تغییر مکان طبقه ۵ (cm)	حالت کنترل
۰,۳۶	بدون ابزار کنترل
۰,۳۳	A_5-S_4
۰,۲۶	$A_{5,2}-S_{4,3}$

بر اساس اطلاعات جدول ۴-۱۲ با استفاده از روش کنترل فعال پیشنهادی و بکارگیری یک عملگر و یک حسگر حداکثر تغییر مکان طبقه پنجم نسبت به حالت بدون کنترل حدود ۹ درصد کاهش می یابد. این درصد در حالت استفاده از سه عملگر و سه حسگر با بهره جویی از روش کنترل پیشنهادی حدود ۲۸ درصد خواهد بود.

۴-۳ ارزیابی در ساختمان ۵ طبقه تحت بار زلزله السنترو :

۴-۳-۱ مقدمه

در این بخش ارزیابی روش پیشنهادی در برابر بار زلزله مورد مطالعه قرار می گیرد. برای بررسی اثر زلزله در اینجا، زلزله السنترو به سازه پنج درجه آزادی بخش های قبل اعمال می گردد. برای این کار از مقادیر شتابنگاشت زلزله السنترو در برنامه استفاده شده است.

۴-۳-۲ بررسی نتایج روش پیشنهادی

برای بررسی اثر زلزله السنترو در الگوریتم پیشنهادی از شتاب نگاشت زلزله السنترو استفاده شده است. در برنامه Matlab در خصوص نیروی زلزله، ابتدا شتابهای زلزله در برنامه فراخوانی شده و

شتاب مربوط به گام زمانی هر دوره از طریق درون یابی بین شتابهای مربوط به زمانهای نزدیک به زمان هر گام محاسبه می گردد. با استفاده از مقدار شتاب در هر گام زمانی و همچنین ماتریس جرم، بردار بارهای اعمال شده بر سازه در هر گام زمانی بدست آمده و به عنوان نیروهای اعمالی بر سازه همانند موارد قبل لحاظ می گردد.

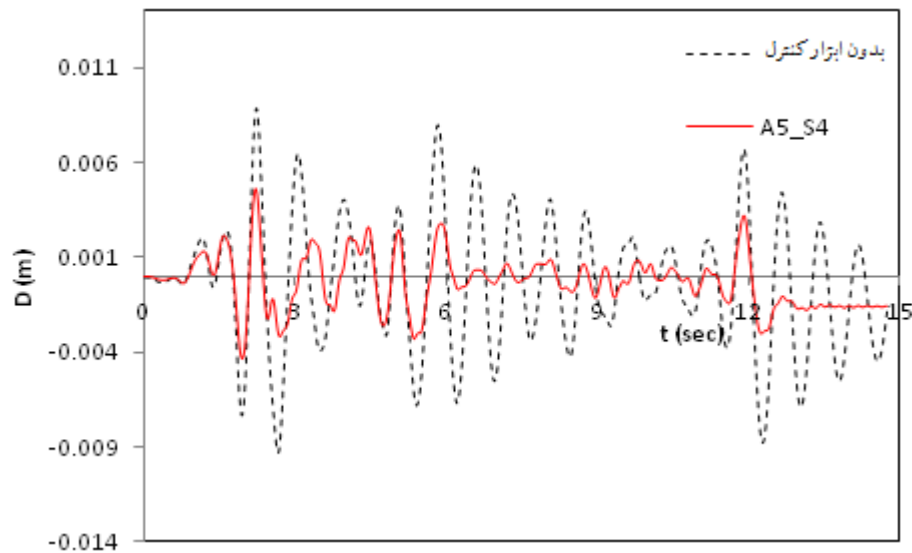
بررسی بالا برای حالت عدم استفاده از سیستم کنترل و همچنین در حالت های استفاده از چندین عملگر و حسگر انجام می گردد. جدول ۴-۱۳ بیشینه مقدارهای تغییر مکان را در حالت های مختلف پایش تحت اثر بار زلزله السنترو برای ساختمان ۵ طبقه عنوان شده در بخش های قبل ارائه می کند.

جدول ۴-۱۳ : مقایسه بیشینه تغییر مکان طبقات در حالت های مختلف پایش بر اساس الگوریتم پیشنهادی (cm)

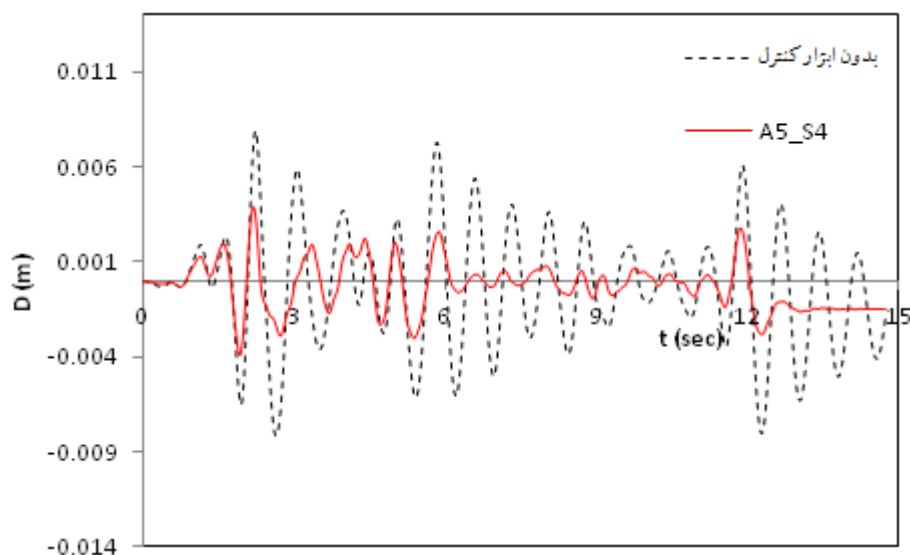
حالت کنترل	طبقه ۴ (cm)	طبقه ۵ (cm)
بدون ابزار کنترل	۸,۱۱	۹,۲
A_5-S_4	۳,۹۴	۴,۶۶
$A_{5,2,3}-S_4$	۳,۹۳	۴,۶۰
$A_{5,2,3}-S_{4,3}$	۳,۱۰۸	۳,۸۷۶
$A_{5,2,3}-S_{4,3,5}$	۲,۴	۲,۴

بر اساس نتایج جدول بالا، در حالت استفاده از یک حسگر و یک عملگر تغییر مکان طبقه پنجم حدود ۵۰ درصد کاهش می یابد. ضمن آنکه در صورت استفاده از سه عملگر و در صورت استفاده از سه عملگر و سه حسگر الگوریتم پیشنهادی بیشینه تغییر مکان طبقه پنجم را تا ۷۴ درصد کاهش می دهد. شکل های ۴-۴ و ۵-۴ نمودار مقایسه تغییرات تغییر مکان در طبقه پنجم و چهارم بر اساس زمان

را در دو حالت بدون استفاده از سیستم کنترل و حالت استفاده از یک عملگر و یک حسگر در سازه ۵ طبقه تحت بار زلزله السنترو نشان می دهد. این اشکال به خوبی بیانگر کارایی روش پیشنهادی در کاهش تغییرمکانهای سازه ناشی از زلزله می باشد.

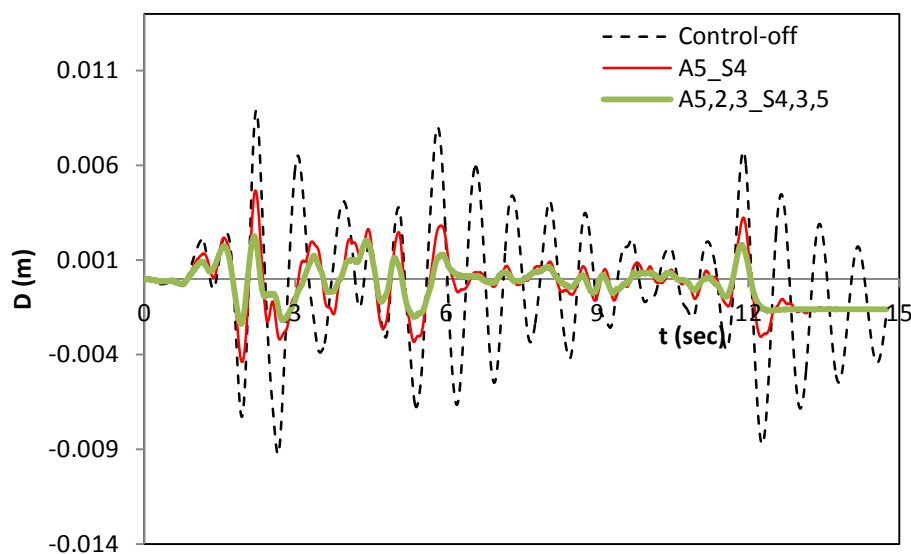


شکل ۴-۴: مقایسه تغییرات تغییرمکان طبقه پنجم بر اساس زمان را در دو حالت بدون استفاده از سیستم کنترل و حالت استفاده از یک عملگر و یک حسگر



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

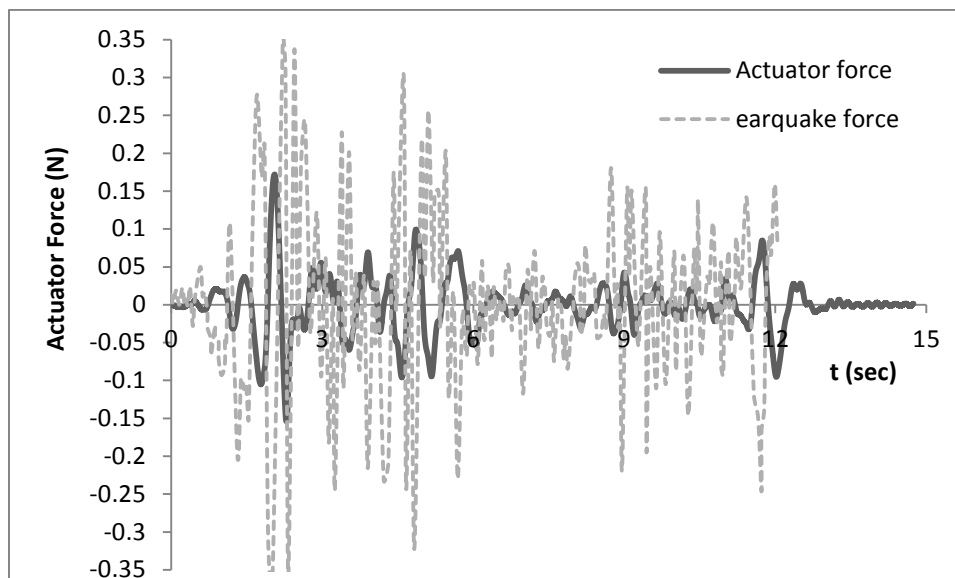
با لحاظ نمودن سه عملگر و سه حسگر شرایط کنترل مناسب تر شده و نمودار تغییرات تغییر مکان طبقه پنجم در سه حالت بدون کنترل، کنترل با یک حسگر و یک عملگر و کنترل با سه حسگر و عملگر بصورت نمودار ۴-۶ خواهد بود.



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

۳-۳-۴ بررسی کمی مقایسه مقادیر نیروی عملگر

یک سیستم کنترل هنگامی کاربردی و قابل استفاده است که مقادیر نیروی عملگرها در مقایسه با نیروی زلزله کمتر از حدود ۵۰ درصد آن باشد. شکل ۴-۷ نمودار تغییرات نیروی عملگر در روش پیشنهادی با استفاده از یک حسگر و عملگر (در طبقه پنجم) برای سازه ۵ درجه آزادی عنوان شده قبلی را در برابر تغییرات نیروی زلزله السنترو نشان می دهد نشان می دهد.



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

۴-۴ مقایسه روش کنترل پیشنهادی با روش متداول LQR

(Linear quadratic regulator method)

معادله حرکت در کلیه روشهای پیشین کنترل فعال سازه دارای ساختار کلی به شکل زیر می باشد.

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = Du(t) + Ef(t) \quad ۲-۴$$

که در آن C, M و K ماتریس های جرم ، میرایی و سختی بوده و $x(t)$ بردار تغییر مکان و $f(t)$ تحریک به سبب حرکت زمین می باشند. ماتریس D نیز موقعیت نیروهای کنترلی است. بردار نیروی کنترل بصورت تقریبی مطابق رابطه زیر بیان می گردد:

$$u(t) = K_1 x(t) + C_1 \dot{x}(t) + E_1 f(t) \quad ۳-۴$$

که K_1, C_1, E_1 ماتریس های بهره بوده و وابسته به کنترل سیستم و متغیر با زمان می باشند. با استفاده از دو رابطه اخیر داریم:

$$M\ddot{x}(t) + (C - DC_1)\dot{x}(t) + (K - DK_1)x(t) = (E + DE_1)f(t) \quad ۴-۴$$

رابطه بالا بیانگر آن است که تحت اثر کنترل سازه میرایی ، سختی و تحریک سازه اصلاح می گردد و بدین ترتیب پاسخ سیستم کنترل می شود.

ماتریس های K_1, C_1, E_1 طوری محاسبه می گردند که پاسخ سازه حذف گردد. گرچه حذف شدن کامل پاسخ ها غیر ممکن می باشد. درجات مختلف کنترل سازه بر اساس درجات این ماتریس ها حاصل می گردند. تعیین این ماتریس ها به الگوریتم خاص انتخاب شده بستگی دارد. الگوریتم های

کنترل بصورت کلی دارای توابع هدف بوده که در این الگوریتمها مینیمم می گردند و در نتیجه ماتریسهای بهره بدست می آید. الگوریتم های کنترل در یافتن ماتریس های بهره یا بردارهای نیروی کنترل متفاوت هستند. حل مسائل کنترل و توسعه الگوریتم های کنترل با نوشتن معادله کنترل حرکت در فضای حالت بدست می آیند:

$$\dot{z}(t)=Az(t)+Bu(t)+Hf(t) \quad 5-4$$

در رابطه بالا $z(t)$ بردار حالت می باشد. اکثر الگوریتم های کنترل معمول بر اساس تئوری کنترل بهینه خطی استوار است . در این الگوریتم اندیس عملکرد J کمینه می گردد:

$$J = \int_0^{t_f} [z^T(t)Qz(t) + u^T(t)Ru(t)]dt \quad 6-4$$

در رابطه بالا Q و R ماتریس های وزنی بوده و t_f دوره زمانی اعمال نیروی کنترل می باشد. مساله کمینه سازی بیان شده نیازمند حل معادله ماتریس ریکاتی بوده که منجر به بردار نیروهای کنترلی می گردد:

$$G=R^{-1}B^TS \quad 7-4$$

$$u(t)=-Gz(t) \quad 8-4$$

ماتریس G به ماتریس بهره معروف می باشد. برخی از معایب روش LQR عبارتند از:

- ۱- در الگوریتم LQR نیاز به نصب حسگرها در تمام درجات آزادی می باشد
- ۲- نتایج کنترل سازه با روش LQR بسیار حساس به انتخاب ماتریس های وزنی می باشد.

۳- روش LQR یک روش کنترل پیچیده می باشد.

برای بررسی عملکرد استراتژی LQR در کاهش پاسخ های سازه تحت بار زلزله ساختمان برشی ۵ طبقه بخش های قبلی بررسی می گردد. جهت کنترل ساختمان ۵ طبقه با روش LQR به مقادیر تغییر مکان و سرعت در تمام طبقات نیاز است. عملاً جهت تامین موارد مذکور می توان از حسگرهای شتاب سنج و همچنین مبدل برای تبدیل مقادیر شتاب به سرعت و تغییر مکان استفاده نمود. در نرم افزار Matlab برای محاسبه ماتریس بهره تابعی بصورت زیر وجود دارد .

$$G=lqr(A,B,Q,r) \quad 9-4$$

که در آن ماتریس A و B بصورت زیر بیان می شود.

$$A = \begin{bmatrix} [0] & [I] \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \quad 10-4$$

$$[B] = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} \quad 11-4$$

ضمن آنکه Q و R ماتریس های وزنی می باشند. در اینجا ماتریس وزن Q یک ماتریس 10×10 بوده که بصورت زیر در نظر گرفته می شود.

$$[Q] = \begin{bmatrix} Q_{11} & 0 \\ 0 & Q_{22} \end{bmatrix} \quad 12-4$$

ماتریس های قطری Q_{11} و Q_{22} دارای درایه های متناسب با تغییر مکان و سرعت می باشند.

هرگونه تغییر در المانهای ماتریس Q منجر به تغییر سطح لغزشی می گردد. این ماتریس بصورت زیر فرض می گردد.

$$Q11 = \text{diag}(1, 1, 1, 1, 0.15)$$

۱۳-۴

$$Q22 = \text{diag}(1, 1, 1, 1, 0.15)$$

۱۴-۴

ماتریس R در حالت استفاده از یک عملگر یک ماتریس 1×1 و یا به عبارتی یک عدد می باشد. این عدد در اینجا ۱،۰ در نظر گرفته می شود. بر اساس مقادیر ذکر شده و استفاده از تابع LQR در نرم افزار Matlab ماتریس بهره بصورت زیر بدست می آید.

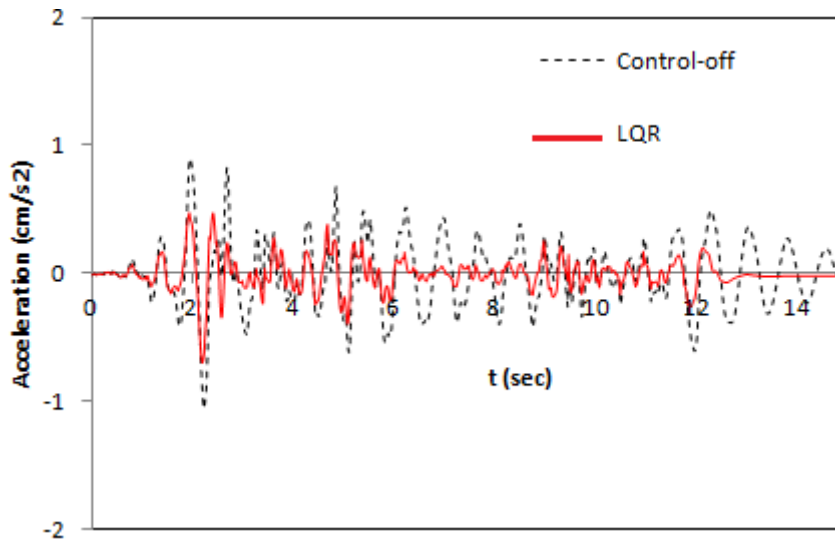
$$[G]=[51.9, 65.8, 81.05, 103.93, 44.34, 0.57, 0.99, 0.996, 0.147, 3.59]$$

جدول ۱۴-۴ نشان دهنده مقادیر حداکثر تغییر مکان طبقات سازه کنترل شده با الگوریتم LQR تحت زلزله السنترو می باشد.

جدول ۱۴-۴ : حداکثر تغییر مکان (cm) طبقات سازه کنترل شده با الگوریتم LQR

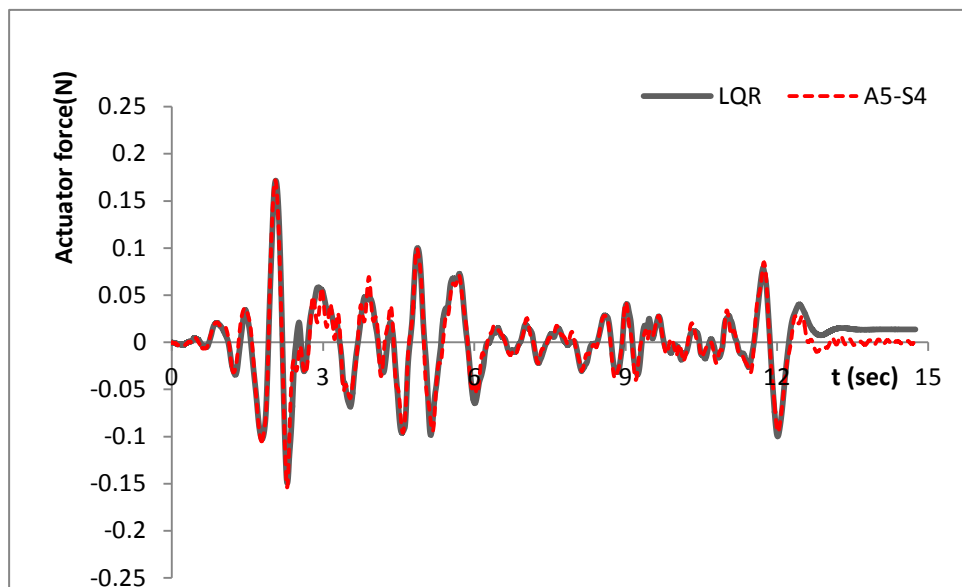
	طبقه ۱ (cm)	طبقه ۲ (cm)	طبقه ۳ (cm)	طبقه ۴ (cm)	طبقه ۵ (cm)
بدون کنترل	۲,۳۹	۴,۵۶	۶,۶۱	۸,۱۱	۹,۲
کنترل با الگوریتم LQR	۱,۲۵	۲,۲۸	۳,۳۹	۴,۱۲	۴,۵۴

شکل ۸-۴ نشان دهنده تاریخچه زمانی تغییرات شتاب طبقه پنجم در دو حالت بدون کنترل و کنترل با الگوریتم LQR می باشد.

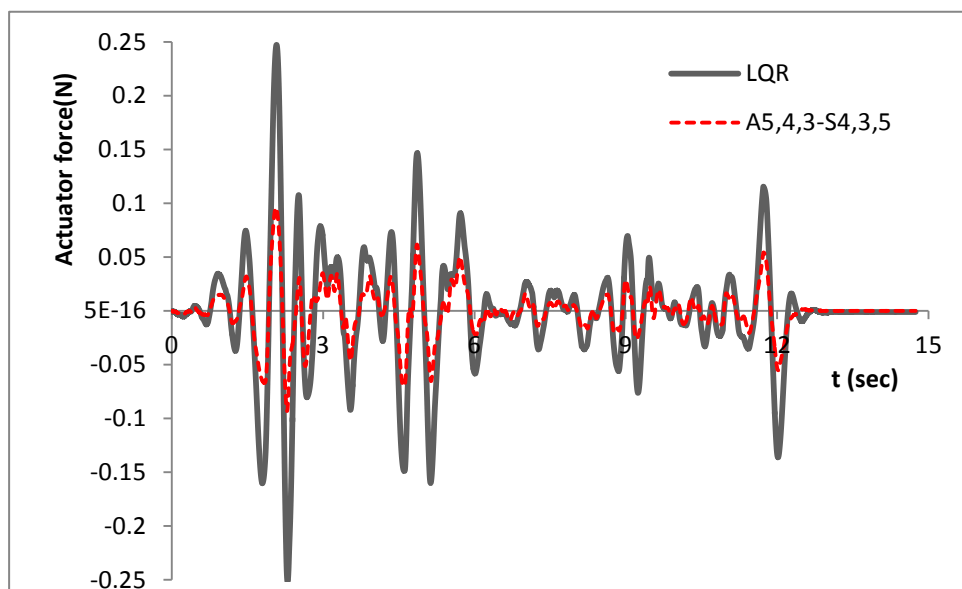


شکل ۴-۸: تاریخچه زمانی تغییرات شتاب طبقه پنجم در دو حالت بدون کنترل

مقایسه جداول مقادیر تغییرمکان حداکثر طبقات در کنترل با روش پیشنهادی با روش الگوریتم LQR نشان دهنده آن است که نتایج روش پیشنهادی در حالت استفاده از یک عملگر و یک حسگر مشابه روش LQR می باشد. در الگوریتم پیشنهادی با استفاده از یک عملگر و یک حسگر مقادیر تغییرمکان و شتاب طبقه پنجم به ترتیب ۴۹ و ۳۵ درصد نسبت به حالت بدون کنترل کاهش می یابد. در حالی که در روش LQR مقادیر مذکور نسبت به حالت بدون کنترل به ترتیب ۵۱ و ۴۰ درصد کاهش خواهند داشت. ضمن آنکه با استفاده از الگوریتم پیشنهادی و استفاده از سه حسگر و سه عملگر در آن ، تغییر مکان حداکثر طبقه پنجم ۷۴ درصد کاهش را نسبت به حالت بدون کنترل خواهد داشت. شکل ۴-۹ مقایسه بین نیروی عملگر در حالت استفاده از الگوریتم LQR با الگوریتم پیشنهادی (حالت یک حسگر و یک عملگر) را نشان می دهد. این شکل بیانگر مشابهت نیروی کنترل در حال استفاده از الگوریتم پیشنهادی به همراه یک حسگر و یک عملگر با روش LQR می باشد. ضمن آنکه مطابق شکل ۴-۹ مقدار نیروی مورد نیاز برای عملگر در حالت استفاده از الگوریتم پیشنهادی با سه عملگر و سه حسگر حدود ۵۰ درصد نیروی مورد نیاز در حالت استفاده از الگوریتم LQR می باشد.



شکل ۴-۹: مقایسه نیروی عملگر (N) در حالت استفاده از الگوریتم پیشنهادی با یک عملگر و یک حسگر و روش LQR

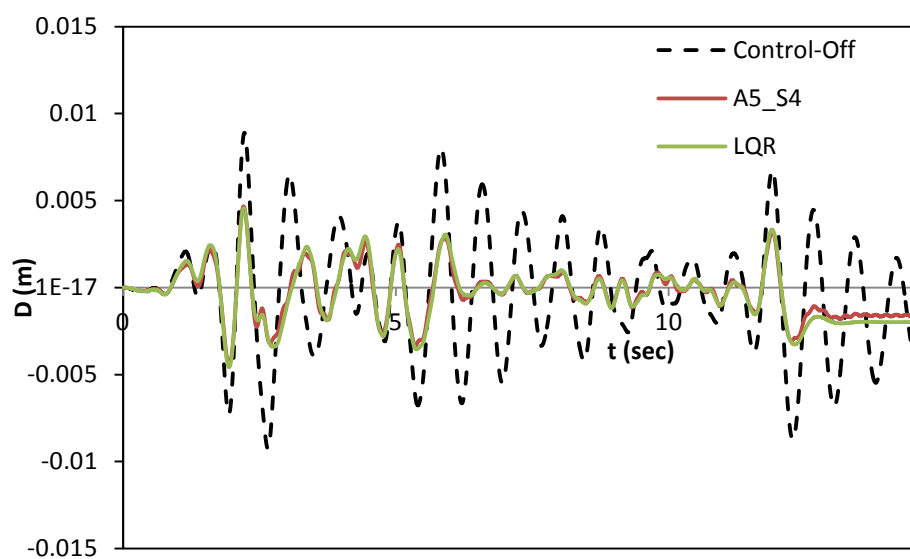


شکل ۴-۱۰: مقایسه نیروی عملگر (N) در حالت استفاده از الگوریتم پیشنهادی با سه عملگر و سه حسگر و روش

LQR

همچنین شکل ۴-۱۱ مقادیر تغییر مکان طبقه پنج را در سه حالت بدون کنترل، الگوریتم پیشنهادی

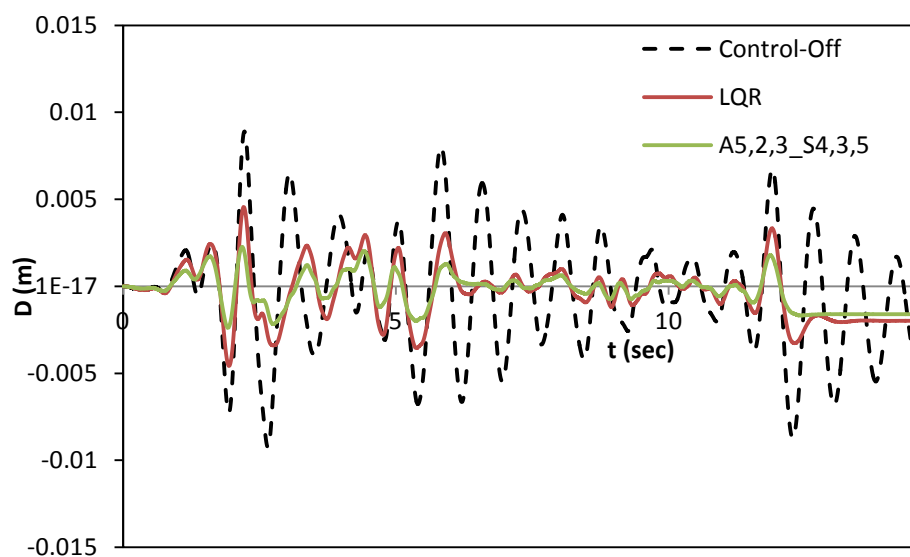
با یک عملگر و یک حسگر و روش LQR نشان می دهد.



شکل ۴-۱۱: مقادیر تغییر مکان طبقه پنج را در سه حالت کنترل

شکل ۴-۱۲ نیز بیان کننده مقایسه تغییر مکان طبقه پنج در سه حالت بدون کنترل، الگوریتم

پیشنهادی با سه حسگر و سه عملگر و الگوریتم LQR می باشد.



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

فصل پنجم

بررسی عدم قطعیت در روش پیشنهادی

فصل پنجم : بررسی عدم قطعیت در روش پیشنهادی

۵-۱ مقدمه:

در مراحل مختلف احداث یک سازه از طرح و محاسبه تا اجرا و بهره برداری و همچنین خرابی تدریجی همواره عدم قطعیت های مختلفی وجود دارد. با توجه به منشا عدم قطعیت آنها به دو نوع طبیعی و انسانی تقسیم می شوند. عدم قطعیت های با منشا طبیعی ناشی از اثر باد، زلزله، برف و یا بار زنده می باشد. تغییر رفتار مکانیکی مواد نیز از این جمله می باشند. عدم قطعیتها با منشا انسانی نظیر تقریبها و ایده آل سازی ناشی از کمبود اطلاعات است. در مرحله ساخت استفاده از مصالح نامرغوب، روشهای ساخت، اتصالات معیوب و در هنگام بهره وری بارگذاری بیش از حد، نگهداری نامناسب و نظیر آن نیز از این جمله می باشند. به دلیل وجود چنین عدم قطعیت هایی بارها و مقاومتها متغیرهای تصادفی هستند. عوامل اصلی در ایجاد کمیتهای تصادفی عبارتند از:

- عامل تغییرات فیزیکی که تغییرات ذاتی بار و مقاومت را نشان می دهد (مانند تغییرات طبیعی باد، زلزله، بار زلزله و خواص مصالح)

- عامل تغییرات آماری بیان کننده عدم قطعیت هایی است که از تخمین مقدار کمیتها بر اساس فضای نمونه محدود و نه گسترده ناشی می شود.

- عامل تغییرات مدلسازی که عدم قطعیت های مربوط به ساده سازی فرضیات و شرایط مرزی ناشناخته را بیان می کند.

۵-۲ تعاریف مباحث عدم قطعیت

۵-۲-۱ تعریف متغیر تصادفی

متغیر تصادفی تابعی است از نقاط فضای نمونه مثل $x(\omega)$ که به هر یک از نقاط فضای نمونه عددی را نسبت میدهد.

۵-۲-۲ تابع جرمی احتمال (PMF)

اگر X فقط مقادیر ممکن $X_1, X_2, X_3, \dots$ (قابل شمارش) را با احتمالهای $P_1, P_2, P_3, \dots$ اختیار

کند، تابع احتمال متغیر تصادفی X به صورت زیر تعریف

میشود.

$$P_X(x) = \text{Prob}\{x = x_i\} = \begin{cases} P_i & x = x_i \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

↑ آرگومان تابع
↓ بیانگر نوع تابعیت

بطور کلی روشن است که $P(x_i)$ ها عددی بین صفر و یک هستند و داریم:

$$\sum_{i=1}^{\infty} P(x_i) = 1$$

۵-۳ بررسی عدم قطعیت در روش پیشنهادی:

در تحلیل و طراحی سازه ها متغیرهای گوناگونی همانند بارهای وارد، ظرفیت اعضا و مشخصه های مواد وجود دارند که عدم قطعیت هر یک از آنها اثر فراوانی در ایمنی سازه دارد. در این بخش جرم طبقات به عنوان متغیرهای تصادفی در نظر گرفته می شوند. برای بررسی عدم قطعیت جرم طبقات در روش پیشنهادی برای هر طبقه دامنه ای از اعداد در نظر می گیریم. در مثال عددی بخش قبل که جرم طبقات اول تا چهارم ۰,۲۵۹۱ کیلوگرم و جرم طبقه پنجم ۰,۱۲۹۵ کیلوگرم بوده است، در دامنه ای در حدود ۱۵٪+ و ۱۵٪- توسط برنامه matlab مجموعه ای از اعداد تصادفی در محدوده مذکور به عنوان جرم ساختمان تولید می شود. در این صورت ترکیب جرم طبقات در هر یک از حالت های در نظر گرفته شده (۳۰ حالت - case1 الی case30) کاملاً تصادفی بوده و هر یک از طبقات ممکن است دارای کاهش یا افزایش نسبت به جرم مبنا باشند. در یکبار اجرای برنامه فوق اعداد تصادفی برای جرم

طبقات در حالت های مختلف تولید گردید. بر اساس جرمهای تولید شده مطابق جدول ۵-۱ حالت های مختلف تحلیل تعریف می شود.

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

نام حالت تحلیل	جرم طبقه ۱ (kg)	جرم طبقه ۲ (kg)	جرم طبقه ۳ (kg)	جرم طبقه ۴ (kg)	جرم طبقه ۵ (kg)
case1	0.284	0.275	0.278	0.278	0.114
case2	0.2907	0.2227	0.24	0.2244	0.1475
case3	0.2301	0.2417	0.2596	0.2615	0.1101
case4	0.2913	0.2238	0.2746	0.2808	0.1402
case5	0.269	0.227	0.289	0.293	0.142
case6	0.227	0.284	0.295	0.230	0.143
case7	0.242	0.274	0.263	0.264	0.113
case8	0.262	0.244	0.231	0.256	0.125
case9	0.295	0.294	0.232	0.221	0.120
case10	0.295	0.222	0.240	0.246	0.141
case11	0.232	0.254	0.285	0.232	0.126
case12	0.296	0.249	0.240	0.282	0.145
case13	0.295	0.279	0.284	0.244	0.117
case14	0.258	0.282	0.239	0.261	0.120
case15	0.282	0.235	0.292	0.233	0.115
case16	0.231	0.258	0.247	0.267	0.115
case17	0.253	0.254	0.235	0.240	0.143
case18	0.291	0.270	0.239	0.271	0.132
case19	0.281	0.275	0.268	0.272	0.131
case20	0.295	0.278	0.257	0.278	0.115
case21	0.271	0.242	0.248	0.255	0.143
case22	0.222	0.273	0.285	0.227	0.134
case23	0.286	0.271	0.266	0.238	0.124
case24	0.292	0.233	0.263	0.291	0.130
case25	0.273	0.229	0.292	0.232	0.125
case26	0.279	0.259	0.242	0.284	0.113
case27	0.278	0.295	0.279	0.262	0.119
case28	0.251	0.247	0.279	0.298	0.115
case29	0.271	0.265	0.249	0.226	0.117
case30	0.233	0.238	0.264	0.255	0.119

جدول ۵-۲ نتایج حاصل از روش پیشنهادی با استفاده از یک حسگر و یک عملگر در حالت های مختلف جرمهای تصادفی در بازه ۱۵ درصدی نسبت به جرمهای مبنا را نشان میدهد. بر اساس نتایج دریافتی، تغییرات افزایشی و کاهش جرم طبقات در بازه ۱۵ درصدی، باعث افزایش تغییرمکان تا

۱۴,۶ درصد و کاهش تا ۱۰ درصد برای طبقه چهارم و افزایش تغییر مکان تا ۱۸ درصد و کاهش تا ۱۴ درصد برای طبقه پنجم می گردد.

جدول ۵-۲: بررسی تاثیر عدم قطعیت جرم طبقات در تغییر مکان طبقات چهارم و پنجم

تغییر مکان حداکثر طبقه ۵ (cm)	تغییر مکان حداکثر طبقه ۴ (cm)	نام حالت تحلیل
۳/۹۱۲	۳/۹۳۹	تحلیل (بدون سامانه کنترل)
۱/۳۰۵	۱/۳۰۱	تحلیل با ۱ عملگر و ۱ حسگر و جرم های اولیه
۱/۳۹	۱/۳۸	case1
۱/۵۴۴	۱/۴۹۱	case2
۱/۲۶۶	۱/۲۷۶	case3
۱/۲۵۱	۱/۲۴۹	case4
۱/۱۹۲	۱/۲۱۶	case5
۱/۳۸۳	۱/۳۶۰	case6
۱/۲۴۸	۱/۲۶۹	case7
۱/۳۳۲	۱/۳۲۱	case8
۱/۴۶۷	۱/۴۵۵	case9
۱/۴۲۷	۱/۳۸۴	case10
۱/۳۹۶	۱/۳۸۶	case11
۱/۲۸۰	۱/۲۶۱	case12
۱/۳۳۴	۱/۳۲۸	case13
۱/۲۸۰	۱/۲۹۶	case14
۱/۳۶۳	۱/۳۳۹	case15
۱/۲۴۵	۱/۲۷۱	case16
۱/۴۴۶	۱/۴۰۸	case17
۱/۲۷۹۶	۱/۲۸۰	case18
۱/۲۴۶	۱/۲۶۰	case19
۱/۲۰۲	۱/۲۲۸	case20

۱/۳۷۷	۱/۳۴۳	case21
۱/۴۱۱	۱/۳۹۳	case22
۱/۳۸۹	۱/۳۷۴	case23
۱/۱۹۲	۱/۲۱۳	case24
۱/۳۸۷	۱/۳۶۴	case25
۱/۱۷۹	۱/۲۱۴	case26
۱/۲۵۷	۱/۲۷۵	case27
۱/۱۲۲	۱/۱۷۰	case28
۱/۴۴۰	۱/۴۲۹	case29
۱/۳۱۰۱	۱/۳۱۰۳	case30

۴-۵ ارزیابی حساسیت

در این بخش حساسیت روش پیشنهادی به از کار افتادگی یک یا تعدادی از عملگرها سنجیده می شود. برای این کار ساختمان برشی ۵ طبقه قبلی در نظر گرفته شده و حالت‌های مختلف ارزیابی به صورت جدول ۳-۵ نام گذاری می گردد.

جدول ۳-۵: علائم اختصاری در بررسی اثر از کار افتادگی عملگرها

حالت	مشخصه های سامانه کنترل
Control off	بدون سیستم کنترل
A_5-S_4	دارای یک عملگر و یک حسگر
$A_{5,2,3}-S_{4,3,5}$	دارای سه عملگر و سه حسگر
$A_{5,2,3}^*-S_{4,3,5}$	دارای سه عملگر (یکی معیوب) و سه حسگر
$A_{5,2,3}^{**}-S_{4,3,5}$	دارای سه عملگر (دو تا معیوب) و سه حسگر

در ادامه میزان مقادیر تغییر مکان حداکثر طبقه ۴ و ۵ در حالت‌های مختلف کنترل (بدون کنترل، بدون از کار افتادگی عملگرها و با از کار افتادگی عملگرها) بررسی و مقایسه می گردد.

جدول ۴-۵: تغییر مکان حداکثر طبقه ۴ و ۵ در حالت‌های مختلف کنترل

تغییر مکان طبقه ۵ (cm)	تغییر مکان طبقه ۴ (cm)	حالت
۳,۹	۳,۹	Control off
۱,۳۰۵	۱,۳۰۱	A_5-S_4
۰,۹۸	۰,۷۶	$A_{5,2,3}-S_{4,3,5}$
۱,۹	۱,۵۵	$A_{5,2,3}^*-S_{4,3,5}$
۱,۵	۰,۹۹	$A_{5,2,3}^{**}-S_{4,3,5}$
۱,۲۳	۱,۳۲	$A_{5,2,3}^{***}-S_{4,3,5}$

۵-۵ بررسی پایداری در روش پیشنهادی

در مورد احتمال ناپایداری سیستم می توان گفت نیروهای عملگرها مانند بار دینامیکی هستند که سبب غیر خطی شدن معادله نوسان می شود. در نتیجه تنها اثر نیروهای کنترلی، غیر خطی کردن معادله نوسان است. باید دانست برای حل این نوسان غیر خطی از روش عددی نیومارک استفاده شده است. در شیوه های عددی پایداری توسط الگوریتم حل در محاسبات لحاظ شده است. به عبارت دیگر پایداری روش پیشنهادی تنها به پایداری روش عددی نیومارک وابسته است. پایداری روش نیومارک در مسائل خطی صحت سنجی شده است و در مسائل غیر خطی با کوچک کردن گام زمانی می توان پایداری را تضمین نمود. در ارزیابی این روش طی مثالهای اجرا شده گام زمانی بسیار کوچک در نظر گرفته شده است.

فصل ششم

جمع بندی و نتیجه گیری

فصل ششم: جمع بندی و نتیجه گیری

۶-۱ جمع بندی

روشهای مختلف کنترل فعال سازه ها تا کنون عمدتاً بر اساس مبانی کنترلی و روابط پیچیده ریاضی استوار بوده و این موضوع باعث گردیده استفاده از آنها در سازه های ساختمانی و قابی توسط متخصصین عمران و سازه با دشواری همراه باشد. روش پیشنهادی جدید بر پایه اصول مهندسی دینامیک سازه ها بنا گردیده است. ضمن آنکه سادگی پروسه از دیگر مزایای این روش می باشد. در روش پیشنهادی عملگرها به عنوان میراگر اضافی در سازه در نظر گرفته می شوند. در این روش جهت تعیین نیروی بهینه عملگرها با توجه به اینکه مطابق اصول دینامیک سازه ها، یک سازه در زمان قرارگیری در حالت میرایی بحرانی در کوتاه ترین زمان دچار میرایی نوسانات خواهد شد، میرایی های مود اول که دارای اهمیت بیشتری هستند برابر میرایی بحرانی قرار می گیرد. همچنین در این رساله روش نوینی جهت یافتن موقعیت مناسب عملگرها و حسگرها پیشنهاد گردیده است. این روش بر پایه روابط و اصول اولیه دینامیک سازه ها می باشد.

جهت تعیین موقعیت مناسب حسگرها در روش پیشنهادی از رابطه سرعت مودی بهره گیری شده است. مطابق این رابطه سرعت هر مود بستگی به سرعت تمام درجات آزادی دارد که ضریب این تناسب وارون ماتریس شکل مود می باشد. لذا با علم به این موضوع و همچنین اهمیت مود اول ، موقعیتهای متناظر با درجات آزادی که بیشترین مقدار را در ردیف اول وارون ماتریس شکل دارند به عنوان موقعیتهای مناسبتر برای نصب حسگرها پیشنهاد می گردند. بدیهی است هرچه تعداد بیشتری حسگر در سازه لحاظ گردد، مقدار سرعتهای مودی محاسبه شده دقیق تر خواهد بود.

ضمن آنکه در این رساله موقعیت مناسب عملگرها در سازه با توجه به اهمیت مودهای اول در ارتعاش سازه و نیز اثر مولفه ها با بیشترین مقادیر بردار شکل نوسان در مودهای اول، در درجات متناظر با بیشترین مقادیر بردارهای مودهای اول ماتریس شکل نوسان در نظر گرفته می شود.

۶-۲ نتیجه گیری

روش پیشنهادی در سازه های قابی تحت بارهای مختلف همانند بارهای انفجاری ، بار زلزله و بار هارمونیک ارزیابی گردیده و مقادیر تغییر مکان حداکثر طبقات در حالت های مختلف کنترل (بدون سیستم کنترل و گزینه های مختلف تعداد و موقعیت حسگرها و عملگرها مطابق روش پیشنهادی) محاسبه گردیده است. نتایج حاصله نشان دهنده کاهش مقادیر تغییر مکان طبقات در روش پیشنهادی دارند. بطوری که در حالت استفاده از سه حسگر و سه عملگر در ساختمان برشی ۵ طبقه تحت بار هارمونیک تغییر مکانهای طبقات فوقانی تا ۸۰ درصد کاهش می یابد. درصد مذکور در زمان اعمال بارهای انفجاری معادل حدود ۵۰ درصد کاهش در تغییر مکان طی استفاده از فرایند پیشنهادی با سه عملگر و سه حسگر بود. ضمن آنکه علاوه بر تغییر مکان طبقات ، میزان انرژی جنبشی سازه و همچنین مجموع تغییر مکانهای نسبی طبقات نیز در حالت استفاده از الگوریتم کنترل پیشنهادی کاهش چشمگیری خواهند داشت.

در خصوص بار زلزله نیز با توجه به اهمیت بارهای لرزه ای، نحوه عملکرد روش پیشنهادی در سازه برشی قبلی تحت تاثیر زلزله السنترو بررسی گردید. براین اساس ، در حالت استفاده از سه عملگر و سه حسگر بیشینه تغییر مکان طبقه های بالایی تا ۷۴ درصد کاهش می یابد. همچنین با توجه به غیر قطعی بودن پارامترهایی همانند جرم در محاسبات دینامیکی ، اثر عدم قطعیت نیز در پروسه پیشنهادی بررسی شد و تاثیر آن در تغییر جابجایی حداکثر طبقات مطالعه گردید. بر این اساس، تغییرات افزایشی و کاهشی جرم طبقات در حدود ۱۵ درصد، باعث افزایش تغییر مکان تا ۱۸ درصد و کاهش تا ۱۴ درصد برای طبقه بالایی سازه می گردد.

ضمن آنکه در این رساله جهت ارزیابی روش پیشنهادی، نتایج حاصل از روش با روش LQR مقایسه گردیده است. مقایسه مذکور نشان دهنده آن است که نتایج روش پیشنهادی در حالت استفاده از یک عملگر و یک حسگر مشابه روش LQR می باشد. در زمان بهره گیری از یک عملگر و یک حسگر در الگوریتم پیشنهادی مقادیر تغییر مکان و شتاب طبقه پنجم به ترتیب ۴۹ و ۳۵ درصد نسبت به حالت بدون کنترل کاهش یافته، در حالی که در روش LQR مقادیر مذکور نسبت به حالت بدون کنترل به ترتیب ۵۱ و ۴۰ درصد کاسته خواهند شد. همچنین با استفاده از الگوریتم پیشنهادی و استفاده از سه حسگر و سه عملگر در آن، تغییر مکان حداکثر طبقه پنجم ۷۴ درصد کاهش را نسبت به حالت بدون کنترل خواهد داشت. مقدار نیروی مورد نیاز نیز برای عملگر در حالت استفاده از الگوریتم پیشنهادی با سه عملگر و سه حسگر حدود ۵۰ درصد نیروی مورد نیاز در حالت استفاده از الگوریتم LQR است.

همانگونه که قبلاً نیز بیان شد، نتایج بدست آمده از بکارگیری روش پیشنهادی در محدوده فرضیات این تحقیق حاصل گردیده است.

۳-۶ پیشنهادات جهت ادامه مطالعه

جهت ادامه مطالعه در خصوص روش نوین پیشنهادی، می توان نسبت به بررسی روش پیشنهادی به عنوان یک الگوریتم ساده در کنترل فعال در سایر سازه ها همانند سازه پلها اقدام نمود. ضمن آنکه در نظر گرفتن اثر تاخیر زمانی و اعمال آن در پروسه پیشنهادی می تواند توسط سایر محققین مطالعه گردد. همچنین بررسی راهکارهای عملی جهت اجرائی نمودن پروسه الگوریتم پیشنهادی منجر به کاربردی نمودن پیشنهاد خواهد گردید.

پیوست ها

پیوست ها:

پیوست شماره یک: مبانی دینامیک سازه ها

پیوست شماره دو : شتاب نگاشت زلزله السنترو

پیوست شماره سه : روشهای تحلیل دینامیکی غیر خطی

پیوست ۱: مبانی دینامیک سازه ها

مبانی دینامیک سازه ها که در روش پیشنهادی مورد استفاده قرار می گیرد به ترتیب زیر تقسیم بندی می گردد.

پ ۱-۱: معادلات تعادل سازه چند درجه آزادی

در یک دستگاه چند درجه آزادی نیروی وارد بر هر جرم m_j در هر لحظه از رابطه زیر بدست می آید.

$$m_j \ddot{v}_j + f_{Dj} + f_{sj} = P_j(t) \quad \text{پ ۱-۱}$$

در این رابطه $\ddot{v}_j$ مشتق دوم تغییر مکان (شتاب) در طبقه j ام و f_{Dj} و f_{sj} به ترتیب نیروی میرایی و نیروی سختی در درجه آزادی j ام و $P_j(t)$ نیروی خارجی وارد شده به سیستم در درجه آزادی j ام می باشند.

با تعریف نیروهای سختی و میرایی بر حسب تغییر مکان ، رابطه فوق بصورت زیر نوشته می شود:

$$m_j \ddot{v}_j + (c_{j1} \dot{v}_1 + c_{j2} \dot{v}_2 + c_{j3} \dot{v}_3 + \dots) + (k_{j1} v_1 + k_{j2} v_2 + k_{j3} v_3 + \dots) = P_j(t) \quad \text{پ ۱-۲}$$

بدین ترتیب برای کلیه جرمها می توان معادلات مشابه ای بصورت زیر نوشت:

$$m_1 \ddot{v}_1 + (c_{11} \dot{v}_1 + c_{12} \dot{v}_2 + c_{13} \dot{v}_3 + \dots) + (k_{11}v_1 + k_{12}v_2 + k_{13}v_3 + \dots) = P_1(t) \quad \text{پ ۱-۳}$$

$$m_2 \ddot{v}_2 + (c_{21} \dot{v}_1 + c_{22} \dot{v}_2 + c_{23} \dot{v}_3 + \dots) + (k_{21}v_1 + k_{22}v_2 + k_{23}v_3 + \dots) = P_2(t) \quad \text{پ ۱-۴}$$

در حالت ارتعاش آزاد دستگاه نامیرا داریم :

$$M\ddot{\bar{v}} + K\bar{v} = 0 \quad \text{پ ۱-۵}$$

اگر فرض شود بتوان تابع $v(x,t)$ را به شکل زیر نشان داد داریم:

$$v(x,t) = \varphi(x)f(t) \quad \text{پ ۱-۶}$$

$$v(x,t) = \varphi(x)Z\sin\omega t \quad \text{پ ۱-۷}$$

و لذا داریم:

$$\bar{v}(t) = \bar{\varphi}z\sin\omega t \quad \text{پ ۱-۸}$$

با جایگزینی در روابط قبلی خواهیم داشت:

$$-\omega^2 M \bar{\varphi} \sin \omega t + k \bar{\varphi} \sin \omega t = 0 \quad \text{پ ۱-۹}$$

برای بدست آوردن جواب غیر صفر باید دترمینال ضرایب معادلات صفر باشد. یعنی:

$$|k - \omega^2 M| = 0 \quad \text{پ ۱-۱۰}$$

این معادله دارای n جواب برای ω است که نظیر مدهای n گانه است.

$$(\omega_1, \varphi_1), (\omega_2, \varphi_2), \dots$$

پ ۱-۲: خاصیت تعامد مدهای ارتعاش

از معادله قبلی n جواب برای ω بدست می آید. برای هر یک از این جوابها داریم:

$$[\bar{k} - \omega_i^2 \bar{M}] = 0 \quad \text{پ ۱-۱۱}$$

و یا :

$$\omega_i^2 \bar{M} \bar{\varphi}_i = k_i \bar{\varphi}_i \quad \text{پ ۱-۱۲}$$

با ضرب یک عامل مشترک در طرفین رابطه، معادله فوق را می توان بصورت زیر نوشت:

$$\omega_i^2 \bar{\varphi}_j^T \bar{M} \bar{\varphi}_i = \bar{\varphi}_j^T k \bar{\varphi}_i \quad \text{پ ۱-۱۳}$$

و به طور مشابه:

پ ۱-۱۴

$$\omega_j^2 \bar{\varphi}_i^T \bar{M} \bar{\varphi}_j = \bar{\varphi}_i^T \bar{k} \bar{\varphi}_j$$

می دانیم که:

پ ۱-۱۵

$$(\bar{A}\bar{B})^T = \bar{B}^T \bar{A}^T$$

پ ۱-۱۶

$$\left[\omega_j^2 \bar{\varphi}_i^T \bar{M} \bar{\varphi}_j \right]^T = \left[\bar{\varphi}_i^T \bar{k} \bar{\varphi}_j \right]^T$$

پ ۱-۱۷

$$\therefore \omega_j^2 \bar{\varphi}_j^T \bar{M}^T \bar{\varphi}_i = \bar{\varphi}_j^T \bar{k}^T \bar{\varphi}_i$$

بدلیل تقارن:

پ ۱-۱۸

$$\bar{k}^T = \bar{k}, \bar{M}^T = \bar{M}$$

پ ۱-۱۹

$$\therefore \omega_j^2 \bar{\varphi}_j^T \bar{M} \bar{\varphi}_i = \bar{\varphi}_j^T \bar{k} \bar{\varphi}_i$$

پ ۱-۳: انواع مختلف میرایی:

معادله ارتعاش دستگاه یک درجه آزادی در حالتی که نیروی خارجی برابر صفر است بصورت زیر می

باشد:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0$$

پ ۱-۲۰

پاسخ کلی این معادله دیفرانسیل بصورت زیر است:

$$x = Ae^{rt} \quad \text{پ ۱-۲۱}$$

$$(mr^2 + cr + k)e^{rt} = 0 \quad \text{پ ۱-۲۲}$$

$$(mr^2 + cr + k) = 0 \quad \text{پ ۱-۲۳}$$

در حالت نامیرا ($c=0$) داریم:

$$r = \pm i \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{پ ۱-۲۴}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{پ ۱-۲۵}$$

می دانیم:

$$e^{i\theta} = i \sin \theta + \cos \theta \quad \text{پ ۱-۲۶}$$

و لذا داریم:

$$x_1 = \cos \omega t + i \sin \omega t \quad \text{پ ۱-۲۷}$$

$$x_2 = \cos \omega t - i \sin \omega t \quad \text{پ ۱-۲۸}$$

هر ترکیب خطی از x_1 و x_2 نیز جواب معادله خواهد بود:

$$x'_1 = \frac{1}{2}(x_1 + x_2) = \cos \omega t \quad \text{پ ۲۹-۱}$$

$$x'_2 = \frac{1}{2}(-ix_1 + ix_2) = \sin \omega t \quad \text{پ ۳۰-۱}$$

پس هر ترکیب خطی از دو پاسخ بالا هم جواب معادله خواهد بود.

$$x = a \sin \omega t + b \cos \omega t \quad \text{پ ۳۱-۱}$$

این رابطه را می توان بصورت زیر نوشت:

$$x = A \cos(\omega t - \varphi) \quad \text{پ ۳۲-۱}$$

در ادامه پارامترهای رابطه بالا از شرایط حدی بدست می آید.

$$x(t=0) = x_0, \dot{x}(t=0) = v \quad \text{پ ۳۳-۱}$$

با در نظر گرفتن مقادیر اولیه سرعت و تغییر مکان ضرایب ثابت بصورت زیر بدست می آیند.

$$b = \frac{v}{\omega}, \quad a = \frac{x_0}{\omega} \quad \text{پ ۳۴-۱}$$

با جایگذاری ضرایب بالا در معادله قبلی داریم :

$$x = \frac{v}{\omega} \sin \omega t + x_0 \cos \omega t \quad \text{پ ۳۵-۱}$$

با ترکیب روابط قبلی داریم :

$$a \sin x + b \cos x = A \cos(x - \varphi) \quad \text{پ ۱-۳۶}$$

رابطه بالا را می توان بصورت زیر نوشت:

$$a \sin x + b \cos x = A [\cos x \cos \varphi + \sin x \sin \varphi] \quad \text{پ ۱-۳۷}$$

با توجه به رابطه بالا می توان گفت:

$$b = A \cos \varphi, a = A \sin \varphi \quad \text{پ ۱-۳۸}$$

$$A = [a^2 + b^2]^{1/2}, \tan \varphi = \frac{a}{b} \quad \text{پ ۱-۳۹}$$

و لذا خواهیم داشت:

$$x = \sqrt{x_0^2 + \left(\frac{v}{\omega}\right)^2} \cos(\omega t - \varphi), \quad \varphi = \tan^{-1} \frac{v}{\omega x_0} \quad \text{پ ۱-۴۰}$$

چنانچه برای یک دستگاه نیروی اصطکاک درونی قائل شویم که با سرعت متناسب است (میرایی لزج) آنگاه داریم:

$$mr^2 + cr + k = 0 \quad \text{پ ۱-۴۱}$$

$$\Delta = (c^2 - 4m.k)^{0.5}$$

نوع حرکت بستگی دارد که Δ حقیقی باشد یا موهومی. اگر موهومی باشد:

$$r = (-c/2m) + i(-(-c/2m)^2 + k/m)^{0.5} \quad \text{پ ۴۲-}$$

$$\omega_D = (k/m + (-c/2m)^2)^{0.5}$$

و لذا مقادیر X_1 و X_2 بصورت زیر بدست می آیند:

$$X_1 := e^{\frac{-c}{2m}t} e^{i\omega_D t} \quad \text{پ ۴۳-}$$

$$X_2 := e^{\frac{-c}{2m}t} e^{-i\omega_D t} \quad \text{پ ۴۴-}$$

در حالت میرایی بحرانی داریم:

$$\Delta = 0 \quad \text{پ ۴۵-}$$

$$C_c^2 - 4mk = 0 \quad \text{پ ۴۶-}$$

و در نتیجه مقدار C_c بصورت زیر بدست می آید:

$$C_c = 2(m.k)^{0.5} \quad \text{پ ۴۷-}$$

$$C_c = 2\omega_0 m \quad \text{پ ۴۸-}$$

اگر میرایی را بصورت درصدی از میرایی بحرانی در نظر بگیریم داریم:

$$C = \zeta C_c \quad \text{پ ۴۹-}$$

$$C=2\zeta\omega_0 m \quad \text{پ ۱-۵۰}$$

با استفاده از رابطه تعادل دینامیکی داریم :

$$\ddot{x} + \frac{c}{m} \dot{x} + \frac{k}{m} x = 0 \quad \text{پ ۱-۵۱}$$

از طرفی از روابط قبلی داریم :

$$\frac{c}{m} = 2\zeta\omega_0 \quad , \quad \frac{k}{m} = \omega_0^2 \quad \text{پ ۱-۵۲}$$

و لذا معادله زیر برقرار خواهد بود:

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_0 \dot{x} + \omega_0^2 x = 0 \quad \text{پ ۱-۵۳}$$

اگر ζ کمتر از یک باشد، داریم :

$$r^2 + 2\zeta\omega_0 r + (\omega_0)^2 := 0 \quad \text{پ ۱-۵۴}$$

$$r := -\zeta \cdot \omega_0 \pm \sqrt{(\zeta \cdot \omega_0)^2 - (\omega_0)^2} \quad \text{پ ۱-۵۵}$$

$$\text{if } \zeta < 1$$

$$r := -\zeta \cdot \omega_0 \pm -i \cdot \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2} \quad \text{پ ۱-۵۶}$$

$$\omega_D := \omega_0 \cdot \sqrt{1 - \zeta^2} \quad \text{پ ۱-۵۷}$$

$$r := -\zeta \cdot \omega_0 \pm -i \cdot \omega_D \quad \text{پ ۱-۵۸}$$

$$x := e^{-\zeta\omega_0 t} (A \cdot \sin\omega_D t + B \cdot \cos\omega_D t) \quad \text{پ ۱-۵۹}$$

$$x(0) := x_0 \quad B := x_0$$

$$v(0) := v_0 \quad (-\zeta \cdot \omega_0)B + A\omega_D := v_0$$

$$A := \frac{v_0 + \zeta \cdot \omega_0 x_0}{\omega_D}$$

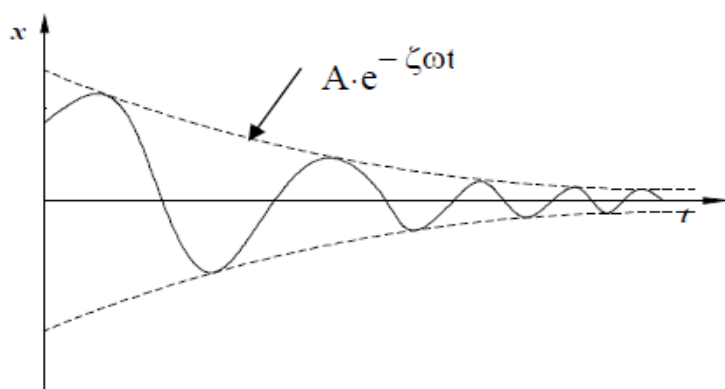
$$x := e^{-\zeta\omega_0 t} \left(\frac{v_0 + \zeta \cdot \omega_0 x_0}{\omega_D} \cdot \sin\omega_D t + x_0 \cdot \cos\omega_D t \right)$$

در نتیجه با استفاده از قضیه مثلثاتی داریم:

$$x := (e^{-\zeta\omega_0 t}) A \cos(\omega_D t - \Phi) \quad \text{پ ۱-۶۰}$$

$$x := e^{-\zeta\omega_0 t} A \cdot \cos(\omega_D t - \Phi) \quad \text{پ ۱-۶۱}$$

$$A := \left[(x_0)^2 + \left(\frac{v_0 + \zeta \cdot \omega_0 x_0}{\omega_D} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \tan\Phi := \frac{v_0 + \zeta \cdot \omega_0 x_0}{\omega_D \cdot x_0} \quad \text{پ ۱-۶۲}$$



شکل ۱: منحنی تغییرات تغییر مکان-زمان (میرایی زیر بحرانی)

همانگونه که ملاحظه می شود هنگامی که ζ کمتر از یک می باشد، حالت ارتعاش نوسانی با دامنه میرا شونده است. بطوریکه دامنه ارتعاش برابر است با:

$$a := A \cdot e^{-\zeta \omega t} \quad \text{پ ۱-۶۳}$$

در عمل میرایی سازه هابسیار کمتر از میرایی بحرانی است. برای سازه های فولادی این نسبت حدود یک درصد می باشد. در این صورت فرکانس های میرا و نامیرا تقریباً برابر هستند:

$$\omega_D = \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2} \quad \text{پ ۱-۶۴}$$

اگر ζ بزرگتر از یک باشد در این صورت معادله حرکت هذلولی است و نوسانی نمی باشد.

اگر ζ برابر یک باشد در این حالت :

$$r^2 + 2 \cdot \zeta \omega r + \omega^2 := 0 \quad \text{پ ۱-۶۵}$$

$$\zeta := 1 \quad r_1 := r_2$$

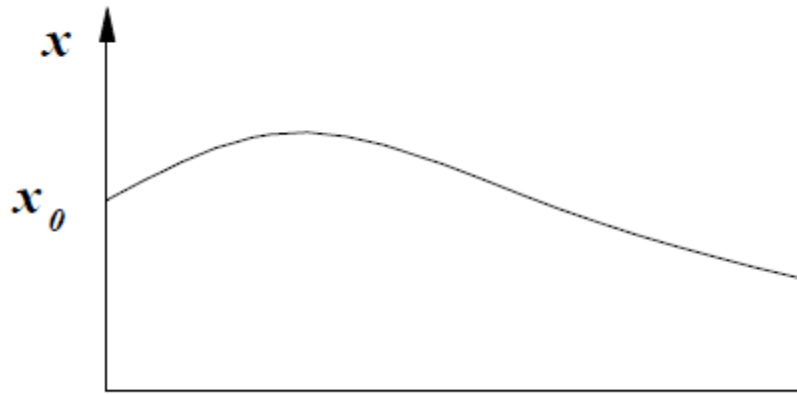
$$r_1 := -\omega_0 \quad x := e^{-\omega t} (A + Bt)$$

$$x(0) := x_0 \quad A := x_0$$

$$v(0) := v_0 \quad -A\omega + B := v_0 \quad B := v_0 + \omega_0 x_0$$

$$x := e^{-\omega t} [x_0 + (v_0 + \omega_0 x_0)t]$$

در این حالت حرکت نوسانی نبوده و فقط یک بار به اوج می رسد و میرا می شود.



شکل ۲: منحنی تغییرات تغییر مکان- زمان (حالت میرایی بحرانی)

در حالت بیش میرا (بزرگتر از یک) داریم:

$$\tau := -\zeta \cdot \omega_0 + \left(\omega_0 \cdot \sqrt{1 - \zeta^2} \right) \quad \text{پ ۱-۶۶}$$

$$\overline{\omega} := \omega_0 \cdot \sqrt{\zeta^2 - 1}$$

$$x := e^{-\zeta \omega_0 t} (A \cdot \sinh \overline{\omega} t + B \cdot \cosh \overline{\omega} t) \quad \text{پ ۱-۶۷}$$

در این حالت هم ارتعاش نوسانی نمی باشد.

پ ۴-۱: پاسخ دستگاه نامیرا به بار هارمونیک :

معادله حرکت دستگاه تحت بار هارمونیک بصورت زیر است:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = P_0 \sin \bar{\omega} t \quad \text{پ ۱-۶۸}$$

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega \dot{x} + \omega^2 x = (P_0/m) \sin \bar{\omega} t \quad \text{پ ۱-۶۹}$$

$$x_h = e^{-\zeta\omega t} (A \sin \omega_D t + B \cos \omega_D t) \quad \text{پ ۱-۷۰}$$

$$x_p = G_1 \sin \bar{\omega} t + G_2 \cos \bar{\omega} t \quad \text{پ ۱-۷۱}$$

در نتیجه داریم:

$$\therefore \left[-G_1 \bar{\omega}^2 - G_2 \bar{\omega} (2\xi\omega) + G_1 \omega^2 \right] \sin \bar{\omega} t = \frac{P_0}{m} \sin \bar{\omega} t \quad \text{پ ۱-۷۲}$$

$$\left[-G_2 \bar{\omega}^2 - G_1 \bar{\omega} (2\xi\omega) + G_2 \omega^2 \right] \cos \bar{\omega} t = 0$$

از متحد ساختن ضرایب:

$$G_1 = \frac{P_0}{k} \cdot \frac{1 - \beta^2}{(1 - \beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2} \quad \text{پ ۷۳-۱}$$

$$G_2 = \frac{P_0}{k} \cdot \frac{-2\xi\beta}{(1 - \beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2}$$

$$x = x_h + x_p = e^{-\xi\omega t} (A \sin \omega_D t + B \cos \omega_D t) + \frac{P_0}{k} \cdot \frac{1}{(1 - \beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2} [(1 - \beta^2) \sin \varpi t - 2\xi\beta \cos \varpi t] \quad \text{پ ۷۴-۱}$$

با نمایش ساده تری می توان نوشت:

$$x = e^{-\xi\omega t} (A \sin \omega_D t + B \cos \omega_D t) + \rho \sin(\varpi t - \varphi) \quad \text{پ ۷۵-۱}$$

$$\beta = \frac{\varpi}{\omega}$$

$$\rho = \delta_s H(\varpi) = \frac{P_0}{k} \cdot \frac{1}{\sqrt{(1 - \beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2}}$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{2\xi\beta}{1 - \beta^2}$$

پ ۵-۱: بررسی اثر ضربه مثلثی (اثر انفجار)

در حالت اعمال اثر بار ضربه ای مثلثی (اثر انفجار) نیروی اعمالی بصورت زیر تابعی از زمان در نظر

گرفته می شود. داریم :

$$P(t) = at + b \quad \text{پ ۷۶-۱}$$

$$m\ddot{X} + KX = at + b \quad \text{پ ۷۷-۱}$$

$$Xp = at + \beta \quad \text{پ ۷۸-۱}$$

$$k(at + \beta) = at + b \quad \text{پ ۷۹-۱}$$

$$X_p = (1/K)(at+b) \quad \text{پ-۱۰}$$

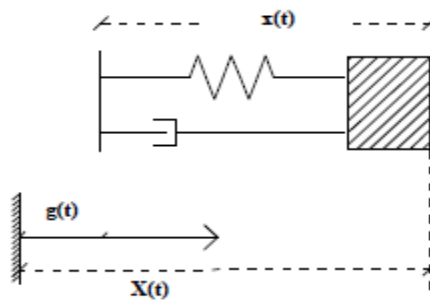
$$X_h = A \sin \omega t + B \cos \omega t \quad \text{پ-۱۱}$$

$$X(t) = X_h + X_p \quad \text{پ-۱۲}$$

با ارضای شرایط اولیه حرکت A و B بدست می آید.

پ ۱-۶: پاسخ دستگاه به حرکت پی:

در این بخش حرکت پی و پاسخ دستگاه به این حرکت بررسی می گردد.



شکل ۳: حرکت پی و پاسخ دستگاه به آن

در پاسخ دستگاه به حرکت پی، تغییر مکان کل، نیروی سختی و نیروی میرایی مطابق رابطه زیر تعریف می شود.

$$X = x + g \quad \text{پ-۱۳}$$

$$f_s = kx \quad \text{پ-۱۴}$$

$$f_D = c\dot{x} \quad \text{پ-۱۵}$$

در این حالت معادله حرکت بصورت زیر خواهد بود.

$$f_s + f_D = m\ddot{x} \quad \text{پ ۱-۱۶}$$

$$-kx - c\dot{x} = m(\ddot{x} + \ddot{g}(t)) \quad \text{پ ۱-۱۷}$$

و لذا خواهیم داشت:

$$f_s + f_D = m\ddot{x} \quad \text{پ ۱-۱۸}$$

$$-c\dot{x} - kx = m(\ddot{x} + \ddot{g}(t)) \quad \text{پ ۱-۱۹}$$

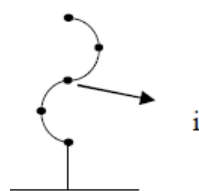
معادله فوق را می توان بصورت زیر ساده نمود.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{g}(t) \quad \text{پ ۱-۹۰}$$

پ ۱-۷: معادلات حرکت در مختصات مودی

در حالت نامیرا و تحت اثر نیروهای خارجی معادله حرکت بصورت زیر خواهد بود.

$$m_i \ddot{v}_i(t) + \underbrace{\sum_{j=1}^n K_{ji} v_j(t)}_{f_s} = P_i(t) \quad \text{پ ۱-۹۱}$$



$$f_s = \sum_{j=1}^n K_{ji} v_j(t)$$

$$f_I = m_i \ddot{v}_i(t)$$

و نمایش ماتریسی دستگاه معادلات حرکت بصورت زیر است.

$$\bar{M} \cdot \ddot{\bar{v}}(t) + \bar{K} \bar{v}(t) = \bar{P}(t) \quad \text{پ ۱-۹۲}$$

دستگاه معادلات فوق از نوع درگیر است و برای جداسازی اثر جابجایی نقاط مختلف از هم از خاصیت تعامد مدهای ارتعاشی نسبت به ماتریس جرم و سختی استفاده می کنیم.

$$(\bar{\phi}_i^T \bar{M}) \bar{\Phi} = \left[\bar{\phi}_i^T \bar{M} \bar{\phi}_1 + \bar{\phi}_i^T \bar{M} \bar{\phi}_2 + \dots + \bar{\phi}_i^T \bar{M} \bar{\phi}_i + \dots \right] \quad \text{پ ۱-۹۳}$$

$$\bar{\phi}_i^T \bar{M} \bar{\phi}_j = 0 \quad i \neq j$$

$$\bar{\phi}_i^T \bar{M} \bar{\Phi} = \bar{\phi}_i^T \bar{M} \bar{\phi}_i$$

$$\bar{\phi}_i^T \bar{K} \bar{\Phi} = \bar{\phi}_i^T \bar{K} \bar{\phi}_i = \omega_i^2 \bar{\phi}_i^T \bar{M} \bar{\phi}_i$$

اگر طرفین رابطه نمایش ماتریسی دستگاه معادلات حرکت را در Φ_i^T ضرب کنیم ، با استفاده از دو رابطه قبلی داریم:

$$\bar{\phi}_i^T \bar{M} \bar{\phi}_i \ddot{y}_i(t) + \omega_i^2 \bar{\phi}_i^T \bar{M} \bar{\phi}_i y_i(t) = \bar{\phi}_i^T \bar{P}(t) \quad \text{پ ۱-۹۴}$$

جرم مود i ام بصورت زیر در نظر گرفته می شود.

$$M_i = \bar{\phi}_i^T \bar{M} \bar{\phi}_i \quad \text{پ ۱-۹۵}$$

همچنین در رابطه زیر $P_i(t)$ نیروی مود i ام می باشد.

$$\ddot{y}_i(t) + \omega_i^2 y_i(t) = \frac{1}{M_i} \underbrace{\bar{\phi}_i^T \bar{P}(t)}_{P_i(t)} = \frac{1}{M_i} P_i(t) \quad \text{پ ۱-۹۶}$$

رابطه بالا دامنه حرکت مود i ام را بر حسب زمان بدست می دهد. با محاسبه $y_i(t)$ داریم:

$$\bar{v}(t) = \bar{\Phi} \cdot \bar{Y}(t) \quad \text{پ ۱-۹۷}$$

اگر ماتریس میرایی متناسب با جرم و سختی باشد داریم:

$$\bar{C} = \alpha \bar{M} + \beta \bar{K} \quad \text{پ ۱-۹۸}$$

می توان ثابت نمود که مودها نسبت به ماتریس میرایی نیز متعامد هستند. لذا داریم:

$$\bar{\phi}_i^T \bar{C} \bar{\Phi} = \bar{\phi}_i^T \bar{C} \bar{\phi}_i \quad \text{پ ۱-۹۹}$$

و طبق تعریف:

$$= (2\xi_i \omega_i) \bar{\phi}_i^T \bar{M} \bar{\phi}_i \quad \text{پ ۱-۱۰۰}$$

پس معادله حرکت مود i ام در حالت با میرایی بصورت زیر خواهد بود:

$$\ddot{y}_i(t) + 2\xi_i \omega_i \dot{y}_i(t) + \omega_i^2 y_i(t) = \frac{P_i(t)}{M_i} \quad \text{پ ۱-۱۰۱}$$

در حالت کلی داریم:

$$\bar{M}\ddot{\bar{v}} + \bar{C}\dot{\bar{v}} + \bar{K}\bar{v} = \bar{P}(t) \quad \text{پ ۱-۱۰۲}$$

بر اساس روابط بیان شده قبلی داریم:

$$\bar{\phi}_i^T \bar{M} \bar{\phi}_j = 0 \quad , \quad \bar{\phi}_i^T \bar{K} \bar{\phi}_j = 0 \quad \text{اگر } i \neq j \quad \text{آنگاه} \quad \text{پ ۱-۱۰۳}$$

همچنین :

$$\bar{\phi}_i^T \bar{M} \bar{\phi}_i = M_i \quad , \quad \bar{\phi}_i^T \bar{K} \bar{\phi}_i = K_i = \omega_i^2 M_i \quad \text{پ ۱-۱۰۴}$$

اکنون اگر فرض شود:

$$\bar{\phi}_i^T \bar{C} \bar{\phi}_j = 0 \quad i \neq j \quad , \quad \bar{\phi}_i^T \bar{C} \bar{\phi}_i = C_i \quad \text{پ ۱-۱۰۵}$$

داریم :

$$\therefore M_i \ddot{y}_i + C_i \dot{y}_i + K_i y_i = P_i(t) \quad , \quad P_i(t) = \bar{\phi}_i^T \bar{P}(t) \quad \text{پ ۱-۱۰۶}$$

پس می توان چنین نوشت:

$$\ddot{y}_i + 2\xi_i \omega_i \dot{y}_i + \omega_i^2 y_i = \frac{1}{M_i} P_i(t) \quad \text{پ ۱-۱۰۷}$$

که در آن

$$\zeta_i = C_i / (2\omega_i M_i) \quad \text{پ ۱-۱۰۸}$$

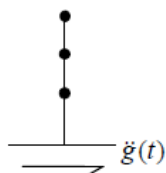
معمولا دستیابی مستقیم به ماتریس استهلاک امکان پذیر نبوده اما می توان ζ_i را با انجام آزمایش و به ارتعاش در آوردن مودهای مختلف تعیین نمود. پاسخ معادله فوق را می توان با انتگرال دوهمامل بدست آورد.

$$y_i(t) = \int_0^t P_i(\tau) \cdot h_i(t - \tau) \cdot d\tau \quad \text{پ ۱-۱۰۹}$$

$$y_i(t) = \int_0^t P_i(\tau) \cdot h_i(t - \tau) \cdot d\tau \quad \text{پ ۱-۱۱۰}$$

$$h_i(t - \tau) = \frac{1}{M_i \omega_{Di}} \sin \omega_{Di}(t - \tau) \cdot e^{-\xi_i \omega_i(t - \tau)} \quad 0 < \xi_i < 1 \quad \text{پ ۱-۱۱۱}$$

در حرکت دستگاه تحت شتاب پی داریم :



$$\bar{P}(t) = -\bar{M} \begin{bmatrix} 1 \\ \dots \\ 1 \end{bmatrix} \ddot{g}(t)$$

پس سمت راست معادله حرکت مود i ام در حالت میرایی بصورت زیر تبدیل خواهد شد.

$$\frac{1}{M_i} \overline{\phi_i}^T \overline{P}(t) = -\frac{L_i}{M_i} \ddot{g}(t) \quad \text{پ ۱-۱۱۲}$$

و در نتیجه معادله مذکور بصورت زیر در می آید.

$$\ddot{y}_i(t) + 2\xi_i \omega_i \dot{y}_i(t) + \omega_i^2 y_i(t) = -(L_i / M_i) \ddot{g}(t) \quad \text{پ ۱-۱۱۳}$$

که در آن

$$L_i = \sum_{j=1}^n m_j \phi_{ji}, \quad M_i = \sum_{j=1}^n m_j \phi_{ji}^2 \quad \text{پ ۱-۱۱۴}$$

پ ۱-۸ : میرایی رایلی (Rayleigh Damping):

مطابق رابطه رایلی ماتریس میرایی بر حسب ماتریس های جرم و سختی بصورت زیر بیان می شود.

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad \text{پ ۱-۱۱۵}$$

ضرایب α و β مقادیر ثابت می باشند. با استفاده از رابطه بالا داریم :

$$[\Phi]^T [C] [\Phi] = \alpha [\Phi]^T [M] [\Phi] + \beta [\Phi]^T [K] [\Phi] \quad \text{پ ۱-۱۱۶}$$

رابطه فوق را می توان بصورت زیر در نظر گرفت:

$$= \alpha \begin{bmatrix} \mathcal{M}_{ii} \end{bmatrix} + \beta \begin{bmatrix} \mathcal{G}_{ii} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{ii} \end{bmatrix} \quad \text{پ ۱-۱۱۷}$$

در رابطه بالا γ_{ii} ضرایب میرایی مودال می باشد.

معادله حرکت را می توان بصورت زیر نوشت:

$$\begin{bmatrix} \mathcal{M}_{ii} \end{bmatrix} \{\ddot{q}\} + \begin{bmatrix} \gamma_{ii} \end{bmatrix} \{\dot{q}\} + \begin{bmatrix} \mathcal{G}_{ii} \end{bmatrix} \{q\} = \{P\} \quad \text{پ ۱-۱۱۸}$$

و یا :

$$\mathcal{M}_{ii}\ddot{q}_i + \gamma_{ii}\dot{q}_i + \mathcal{G}_{ii}q_i = P_i \quad \Rightarrow \quad \ddot{q}_i + \frac{\gamma_{ii}}{\mathcal{M}_{ii}}\dot{q}_i + \frac{\mathcal{G}_{ii}}{\mathcal{M}_{ii}}q_i = \frac{P_i}{\mathcal{M}_{ii}} \quad \text{پ ۱-۱۱۹}$$

با در نظر گرفتن فاکتور میرایی مودال داریم:

$$\frac{\mathcal{G}_{ii}}{\mathcal{M}_{ii}} = \omega_i^2 \quad \frac{\gamma_{ii}}{\mathcal{M}_{ii}} = 2\xi_i\omega_i \quad \xi_i = \text{modal damping factor} \quad \text{پ ۱-۱۲۰}$$

$$\ddot{q}_i + 2\xi_i\omega_i\dot{q}_i + \omega_i^2q_i = f_i \quad \text{پ ۱-۱۲۱}$$

همچنین داریم:

$$\begin{aligned}\frac{\gamma_{ii}}{\mathcal{M}_{ii}} &= 2\xi_i\omega_i \\ &= \frac{1}{\mathcal{M}_{ii}}(\alpha\mathcal{M}_{ii} + \beta\mathfrak{K}_{ii}) \\ &= \alpha + \beta\omega_i^2\end{aligned}\quad \text{پ ۱-۱۲۲}$$

لذا داریم:

$$\begin{aligned}\xi_i &= \frac{1}{2\omega_i}(\alpha + \beta\omega_i^2) \\ \xi_i &= \frac{1}{2}\left(\frac{\alpha}{\omega_i} + \beta\omega_i\right)\end{aligned}\quad \text{پ ۱-۱۲۳}$$

برای دو مود اول داریم :

$$\begin{aligned}\xi_1 &= \frac{1}{2}\left(\frac{\alpha}{\omega_1} + \beta\omega_1\right) \\ \xi_2 &= \frac{1}{2}\left(\frac{\alpha}{\omega_2} + \beta\omega_2\right)\end{aligned}\quad \begin{array}{l}\text{پ ۱-۱۲۴} \\ \text{Solve for } \alpha \text{ and } \beta\end{array}$$

$$\alpha = \frac{2\omega_1\omega_2(\xi_2\omega_1 - \xi_1\omega_2)}{\omega_1^2 - \omega_2^2}\quad \text{پ ۱-۱۲۵}$$

$$\beta = \frac{2(\xi_1\omega_1 - \xi_2\omega_2)}{\omega_1^2 - \omega_2^2}$$

پ ۱-۹: برنامه های عددی تحلیل دینامیکی

در این بخش برنامه های عددی تحلیل خطی و غیر خطی دینامیکی بیان می شود. سه برنامه explicit و چهار برنامه implicit مطابق جدول زیر می باشند:

جدول ۱: برنامه های explicit و implicit در تحلیل دینامیکی

نوع برنامه	انواع برنامه
Explicit	central difference
	two-cycle iteration with trapezoidal rule
	fourth-order Runge-Kutta
	Houbolt
Implicit	Wilson-Theta
	Newmark-Beta
	Park Stiffly stable

در الگوریتم پیشنهادی از روش نیومارک بهره جسته شده است. لذا در ادامه به بررسی این روش و معادلات بکار رفته در روش عددی تحلیل دینامیکی پرداخته می شود.

پ ۱-۱۰: روش عددی نیومارک

روش عددی نیومارک بر این فرض بنا شده است که شتاب بصورت خطی بین دو مقدار از زمان تغییر می‌کند. پارامترهای α و β در این روش مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این روش بیان سرعت و تغییر مکان بصورت زیر خواهد بود:

$$\dot{X}_{t+\Delta t} = \dot{X}_t + [(1-\alpha)\ddot{X}_t + \alpha\ddot{X}_{t+\Delta t}] \Delta t \quad \text{پ ۱-۱۲۶}$$

$$X_{t+\Delta t} = X_t + \dot{X}_t \Delta t + \left[\left(\frac{1}{2} - \beta \right) \ddot{X}_t + \beta \ddot{X}_{t+\Delta t} \right] \Delta t^2 \quad \text{پ ۱-۱۲۷}$$

ضرایب α و β بیان کننده مقدار شتاب وارد شده در معادله های سرعت و تغییر مکان خواهد بود. الگوریتم نیومارک شامل دو مرحله محاسبات اولیه و محاسبات برای هر گام زمانی می باشد. محاسبات اولیه به شرح زیر است:

الف: محاسبات اولیه

۱- تشکیل ماتریس های سختی ، جرم و میرایی

۲- تعیین مقادیر اولیه تغییر مکان، سرعت و شتاب

۳- تعیین گام زمانی و مقادیر α و β و محاسبه ضرایب ثابت از روابط زیر

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{\beta(\Delta t)^2}; a_1 = \frac{\alpha}{\beta\Delta t}; a_2 = \frac{1}{\beta\Delta t}; a_3 = \frac{1}{2\beta} - 1; a_4 = \frac{\alpha}{\beta} - 1; \\ a_5 &= \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{\alpha}{\beta} - 2 \right); a_6 = \Delta t(1-\beta); a_7 = \beta\Delta t \end{aligned} \quad \text{پ ۱-۱۲۸}$$

۴- تشکیل ماتریس سختی موثر

$$[\bar{K}] = [K] + a_0[M] + a_1[C] \quad \text{پ ۱-۱۲۹}$$

۵- تشکیل رابطه زیر

$$[\bar{K}] : [\bar{K}] = [L] [D] [L]^T \quad \text{پ ۱-۱۳۰}$$

ب: محاسبات مربوط به هر گام زمانی بصورت زیر خواهد بود:

۱- محاسبه بردار نیروی موثر در زمان $t + \Delta t$ از رابطه زیر

$$\begin{aligned} \{\bar{F}_{t+\Delta t}\} = & \{F_{t+\Delta t}\} + [M] (a_0\{X_t\} + a_2\{\dot{X}_t\} + a_3\{\ddot{X}_t\}) \\ & + [C] (a_1\{X_t\} + a_4\{\dot{X}_t\} + a_5\{\ddot{X}_t\}) \end{aligned} \quad \text{پ ۱-۱۳۱}$$

۲- حل معادله برای تغییر مکانها در زمان $t + \Delta t$

$$[\bar{K}] \{X_{t+\Delta t}\} = \{\bar{F}_{t+\Delta t}\} \quad \text{پ ۱-۱۳۲}$$

۳- محاسبه بردارهای سرعت و شتاب از روابط زیر در زمان $t + \Delta t$

$$\begin{aligned} \{\ddot{X}_{t+\Delta t}\} = & a_0(\{X_{t+\Delta t}\} - \{X_t\}) - a_2\{\dot{X}_t\} - a_3\{\ddot{X}_t\} \\ \{\dot{X}_{t+\Delta t}\} = & a_1(\{X_{t+\Delta t}\} - \{X_t\}) - a_4\{\dot{X}_t\} - a_5\{\ddot{X}_t\} \end{aligned} \quad \text{پ ۱-۱۳۳}$$

پیوست شماره ۲ : شتاب نگاشت زلزله السنترو

شتاب	زمان	شتاب	زمان	شتاب	زمان	شتاب	زمان	شتاب	زمان
0.0133	10.424	-0.0603	7.794	0.0235	6.013	0.2077	2.652	0.0108	0
0.0386	10.452	-0.0357	7.835	-0.0665	6.085	0.1087	2.708	0.001	0.042
0.1164	10.465	-0.0716	7.877	0.0014	6.132	-0.0325	2.769	0.0159	0.097
-0.0374	10.507	-0.014	7.96	0.0493	6.174	0.1033	2.893	-0.0001	0.161
-0.0572	10.534	-0.0056	7.987	0.0149	6.188	-0.0803	2.976	0.0189	0.221
0.0308	10.645	0.0222	8.001	-0.02	6.1881	0.052	3.068	0.0001	0.263
0.0223	10.701	0.0468	8.07	-0.0381	6.229	-0.1547	3.129	0.0059	0.291
0.0515	10.714	0.026	8.126	0.0207	6.279	0.0065	3.212	-0.0012	0.332
0.0903	10.77	-0.0335	8.1261	-0.0058	6.326	-0.206	3.253	0.02	0.374
-0.0194	10.839	-0.0128	8.195	-0.0603	6.368	0.1927	3.386	-0.0237	0.429
0.0471	10.922	0.0661	8.223	-0.0162	6.382	-0.0937	3.419	0.0076	0.471
-0.0677	10.9221	0.0305	8.278	0.02	6.409	0.1708	3.53	0.0425	0.581
-0.0794	10.964	0.0246	8.334	-0.0176	6.459	-0.0359	3.599	0.0094	0.623
-0.012	10.991	0.0347	8.403	-0.0033	6.478	0.0365	3.668	0.0138	0.665
0.0608	11.074	-0.0369	8.458	0.0043	6.52	-0.0736	3.738	-0.0088	0.72
-0.0269	11.088	-0.0344	8.533	-0.004	6.534	0.0311	3.835	-0.0256	0.7201
-0.0416	11.116	-0.0104	8.596	-0.0099	6.562	-0.1833	3.904	-0.0387	0.789
0.0293	11.207	-0.026	8.638	-0.0017	6.575	0.0227	4.014	-0.0568	0.7891
0.0552	11.2071	0.1534	8.735	-0.017	6.603	-0.0435	4.056	-0.0232	0.872
0.0756	11.227	-0.0028	8.818	0.0373	6.645	0.0216	4.106	-0.0343	0.8721
0.0431	11.268	0.0233	8.86	0.0457	6.686	-0.1972	4.222	-0.0402	0.941
0.0208	11.324	-0.0261	8.882	0.0385	6.714	-0.1762	4.314	-0.0603	0.9411
0.118	11.434	-0.0022	8.915	0.0009	6.728	0.146	4.416	-0.0789	0.997
-0.0999	11.573	-0.1849	8.956	-0.0288	6.769	-0.0047	4.471	-0.0666	1.066
-0.1247	11.656	0.126	9.053	0.0016	6.7691	0.2572	4.618	-0.0381	1.0661
-0.2094	11.725	0.032	9.095	0.0113	6.811	-0.2045	4.665	-0.0429	1.094
-0.1418	11.7251	0.0955	9.123	0.0022	6.852	0.0608	4.756	0.0897	1.168
-0.1163	11.78	0.1246	9.15	0.0092	6.908	-0.2733	4.831	-0.1696	1.315
0	11.808	-0.0328	9.253	-0.0996	6.991	0.1779	4.97	-0.0828	1.384
0.0762	11.877	-0.0451	9.289	0.036	7.074	0.0301	5.039	-0.0828	1.412
0.057	11.919	0.1301	9.427	0.0078	7.121	0.2183	5.108	-0.0945	1.44
0.1354	11.988	-0.1657	9.441	-0.0277	7.143	0.0267	5.199	-0.0885	1.481
0.0673	12.043	0.0419	9.51	0.0026	7.149	0.1252	5.233	-0.108	1.509
0.0865	12.113	-0.0936	9.635	0.0272	7.171	0.129	5.302	-0.128	1.537
		0.0816	9.704	0.0576	7.226	0.1089	5.33	0.1144	1.628
		-0.0881	9.815	-0.0492	7.295	-0.0239	5.343	0.2355	1.703
		0.0064	9.898	0.0297	7.37	0.1723	5.454	0.1428	1.8
		-0.0006	9.939	0.0109	7.406	-0.1021	5.51	0.1777	1.855
		0.0586	9.995	0.0186	7.425	0.0141	5.606	-0.261	1.924
		-0.0713	10.022	-0.0253	7.461	-0.1949	5.69	-0.3194	2.007
		-0.0448	10.05	-0.0347	7.525	-0.0242	5.773	0.2952	2.215
		-0.0221	10.0501	0.0036	7.572	-0.005	5.8	0.2634	2.27
		0.0093	10.105	-0.0628	7.6	-0.0275	5.809	-0.2984	2.32
		0.0024	10.1051	-0.028	7.641	-0.0573	5.869	0.0054	2.395

2.45	0.2865	5.883	-0.0327	7.669	-0.0196	10.188	0.051
2.519	-0.0469	5.925	0.0216	7.691	0.0068	10.272	-0.1243
2.575	0.1516	5.98	0.0108	7.752	-0.0054	10.382	0.0587

پیوست شماره ۳: روشهای تحلیل دینامیکی غیر خطی

جهت تحلیل سیستمهای غیر خطی با استفاده از روشهای مبتنی بر زمان می توان از روشهایی همچون روش تفاضل مرکزی-روشهای مبتنی بر انتگرال گیری مستقیم(روشهای ضمنی)-تکرار با فرمولهای صریح(صریح-ضمنی) و رویه حل رانگ کوتا نام برد.مهمترین روشهای مبتنی بر انتگرال گیری مستقیم عبارتند از روش نیومارک و روش ویلسون.دراین تحقیق جهت آنالیزدینامیکی از روش نیومارک استفاده می کنند.در روش نیومارک با شتاب متوسط داریم:

$$\gamma=1/2, \beta=1/4 \quad \text{پ۴-۱}$$

ضمن آنکه در روش نیومارک با شتاب خطی داریم:

$$\gamma=1/2, \beta=1/6 \quad \text{پ۴-۲}$$

الگوریتم روش عددی نیومارک مطابق زیر است.

۱- شرایط اولیه:

الف: تعیین تغییر مکان و سرعت اولیه در تمام درجات آزادی (V_0 و u_0)

ب:محاسبه شتاب اولیه از رابطه زیر .

$$\{a_0\}=[M]^{-1}(-[C]\{v_0\}-[K]\{u_0\}) \quad \text{پ۴-۳}$$

ج:انتخاب فاصله زمانی (Δt) .

د:محاسبه سختی اصلاح شده.

$$[\hat{K}] = [K] + (\gamma/(\beta\Delta t))[C] + (1/(\beta\Delta t^2))[M] \quad \text{پ ۴-۴}$$

ه: محاسبه ثابت ها

$$A = (1/(\beta\Delta t))[M] + (\gamma/\beta)[C] \quad \text{پ ۴-۵}$$

$$B = (1/(2\beta))[M] + \Delta t(\gamma/(2\beta) - 1)[C] \quad \text{پ ۴-۶}$$

۲- محاسبه در هر گام زمانی .

$$\{\Delta\hat{P}\} = A\mathbf{v}_i + B\mathbf{a}_i \quad (a)$$

$$\Delta\mathbf{u}_i = [\hat{K}]^{-1} \{\Delta\hat{P}\} \quad (b)$$

$$\Delta\mathbf{v}_i = (\gamma/(\beta\Delta t))\Delta\mathbf{u}_i - (\gamma/\beta)\mathbf{v}_i + \Delta t(1 - \gamma/(2\beta))\mathbf{a}_i \quad (c)$$

$$\Delta\mathbf{a}_i = (1/(\beta\Delta t^2))\Delta\mathbf{u}_i - (1/(\beta\Delta t))\mathbf{v}_i - (1/(2\beta))\mathbf{a}_i \quad (d)$$

$$\mathbf{a}_{i+1} = \mathbf{a}_i + \Delta\mathbf{a}_i, \mathbf{v}_{i+1} = \mathbf{v}_i + \Delta\mathbf{v}_i \text{ و } \mathbf{u}_{i+1} = \mathbf{u}_i + \Delta\mathbf{u}_i \quad (e)$$

۳- تکرار مرحله دو برای گام زمانی بعدی با جایگزینی i با i+1

برای استفاده از پروسه پیشنهاد شده باید پروسه کنترل پیشنهادی با روشهای آنالیز دینامیکی ترکیب

گردد. در این تحقیق روش نیومارک با شتاب خطی در این خصوص مورد استفاده قرار می گیرد.

مراجع:

1. Abdel-Rohman, M. (1985). "Structural Control Considering Time-Delay Effect", **Transactions of Canadian Society of Mechanical Engineering**, Vol. 9, pp. 224-227.
2. Abdel-Rohman, M. (1987). "Time-Delay Effects on Actively Damped Systems", **Journal of Engineering Mechanics**, ASCE, Vol. 113, pp. 1709-1719.
3. Abdel-Rohman, M. and Leipholz, H.H.E. (1978). "Active Control of Flexible Structures", **Journal of Structural Division**, ASCE, Vol. 104, No. ST8, pp. 1251-1266.
4. Abdel-Rohman, M. and Leipholz, H.H.E. (1979). "A General Approach to Active Structural Control", **Journal of Engineering Mechanics**, ASCE, Vol. 105, No. EM6, pp. 1007-1023.
5. Abdel-Rohman, M. and Leipholz, H.H.E. (1983). "Active Control of Tall Buildings", **Journal of Structural Engineering**, ASCE, Vol. 109, pp. 628-645.
6. Abdel-Rohman, M. and Nayfeh, A.H. (1987). "Active Control of Nonlinear Oscillation in Bridges", **Journal of Engineering Mechanics**, ASCE, Vol. 113, No. 3, pp. 335-348.
7. Abdel-Rohman, M., Sebakhy, O.A. and Al-Halabi, M. (1993). "Identification and Control of Flexible Civil Structures with Time-Delays", **Computers and Structures**, Vol. 47, No. 6, pp. 977-986.
8. Adhikari, R. and Yamaguchi, H. (1997). "Sliding Mode Control of Buildings with ATMD", **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, Vol. 26, pp. 409-422.
9. Akbay, Z. and Aktan, H.M. (1991). "Actively Regulated Friction Slip Braces", **Proceedings of Sixth Canadian Conference on Earthquake Engineering**, Toronto, Canada, pp. 367-374.
10. Akutagawa, S., Otsuki, M., Kitagawa, Y., "Hybrid control system with optimal fuzzy logic and genetic algorithm for high-rise buildings", **13th World Conference on Earthquake Engineering**, Vancouver, B.C., Canada, 2004
11. Arbel, A., "Controllability measures and actuator placement in oscillatory systems", **International Journal of Control**, Vol. 33, (1981), pp. 565-574.
12. Bailey T, Hubbard J. E. (1985). "Distributed Piezoelectric-Polymer active vibration control of a cantilever beam". **Guidance and control**, Vol. 8, No.5, pp. 605-611.
13. Bani-Hani, K. and Ghaboussi, J. (1998). "Nonlinear Structural Control Using Neural Networks", **Journal of Engineering Mechanics**, Vol. 124, No. 3, pp. 319-327.
14. Battaini, M., Casciati, F. and Faravelli, L. (1998). "Fuzzy Control of Structural Vibration on Active Mass System Driven by Fuzzy Controller", **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, Vol.27, No. 11, pp. 1267-1276.

15. Chang, J.C.H. and Soong, T.T. (1980). "Structural Control Using Active Tuned Mass Damper", **Journal of Engineering Mechanics**, ASCE, Vol. 106, No. EM6, pp. 1091-1098.
16. Chen, H.M., Tsai, K.H., Qi, G.Z., Yang, J.C.S. and Amini, F. (1995). "Neural Networks for Structure Control", **Journal of Computing in Civil Engineering**, Vol. 9, pp. 168-175.
17. Chung, L.L., Reinhorn, A.M. and Soong, T.T. (1988). "Experiments on Active Control of Seismic Structures", **Journal of Engineering Mechanics**, ASCE, Vol. 114, pp. 241-256.
- ISET Journal of Earthquake Technology, March 2003 15*
18. Chung, L.L., Lin, R.C. and Lu, K.H. (1995). "Time-Delay Control of Structures", **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, Vol. 24, pp. 687-701.
19. Dyke, S.J., Spencer Jr., B.F., Quast, P., Sain, M.K., Kaspari Jr., D.C. and Soong, T.T. (1996a). "Acceleration Feedback Control of MDOF Structures", **Journal of Engineering Mechanics**, ASCE, Vol. 120, No. 2, pp. 266-283.
20. Dyke, S.J., Spencer Jr., B.F., Sain, M.K. and Carlson, J.D. (1996b). "Marketing and Control of Magneto-rheological Dampers for Seismic Response Reduction", **Smart Materials and Structures**, Vol. 5, pp. 565-575.
21. Dyke, S.J., Spencer Jr., B.F., Sain, M.K. and Carlson, J.D. (1997) "An Experimental Study of Magneto-rheological Dampers for Seismic Hazard Mitigation", Proceedings of Structures Congress XV, Portland, Oregon, U.S.A., pp. 58-62.
22. Ehtgott, R.C. and Masri, S.F. (1992). "Modeling the Oscillatory Dynamic Behaviour of Electrorheological Materials in Shear", **Smart Materials and Structures**, Vol. 1, No. 4, pp. 275-285.
23. Ehtgott, R.C. and Masri, S.F. (1993). "Structural Control Applications of an Electro-rheological Device", Proceedings of International Workshop on Structural Control, Honolulu, U.S.A., pp. 115-129.
24. Feng, M.Q. (1993). "Application of Hybrid Sliding Isolation System to Buildings", **Journal of Engineering Mechanics**, Vol. 119, No. 10, pp. 90-108.
25. Furuya, H. e Haftka, R. T., "Locating Actuators for Vibration Supression on Space Trusses by Genetic Algorithms", **Structures and Control Optimization**, ASME, pp. 1-11, 1993.
26. Gabbert, U.,Schultz, I. And Weber, C.T., "Actuator Placement in Smart Structures by Discrete-Continuous Optimization",ASME Design Eng. Tech. Conferences, Sept., Sacramento, Ca, USA, 1997.
27. Gao, H., and J.L. Rose, "Ultrasonic Sensor Placement Optimization in Structural Health Monitoring Using Evolutionary Strategy." in proceedings to AIP Conference on Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 820,pp. 1687-93, March 6, 2006.
28. Gao, H., and J.L. Rose, "Sensor placement optimization in structural health monitoring using genetic and evolutionary algorithms." in proceedings of SPIE Smart Structures and Materials, San Diego, CA, February 26,2006.
- 29.Guo, H. Y. Zhang, L. L. and Zhou, J. X., (2004). "Optimal placement of sensors for structural health monitoring using improved genetic algorithms".**Smart Materials and Structure**, Vol. 13, No. 3, pp.528-534
30. Ghaboussi, J. and Joghataie, A. (1995). "Active Control of Structures Using Neural Networks", **Journal of Engineering Mechanics**, ASCE, Vol. 121, pp. 555-567.
- 31.Han Jae-Hung, Rew Keun-Ho, Lee In. (1998) "An experimental study of active vibration control of composite structures with a piezo-ceramic actuator and a piezo-film sensor". **Smart Materials and Structures**, Vol. 6, No. 5, pp. 549-558.

32. Hwang W S, Park H C and Hwang W, Vibration control of laminated plate with piezoelectric sensors/actuators: Finite element formulation and modal analysis, *Advances in vibration control for intelligent structures*, 1, 45-56, 1994.
33. Hammerstrom, L.G. and Gros, K.S. (1980). "Adoption of Optimal Control Theory to Systems with Time-Delays", **International Journal of Control**, Vol. 32, pp. 302-357.
34. He, W.L., Agarwal, A.K. and Mahmood, K. (2001). "Control of Seismically Excited Cable Stayed Bridges Using Resetting Semiactive Stiffness Dampers", *Jour. Bridge Engineering*, ASCE, Vol. 6, pp. 376-384.
35. Housner, G.W., Bergman, L.A., Caughey, T.K., Chassiakos, A.G., Claus, R.O., Masri, S.F., Skelton, R.E., Soong, T.T., Spencer Jr., B.F. and Yao, J.T.P. (1997). "Structural Control: Past, Present and Future", **Journal of Engineering Mechanics**, ASCE, Vol. 123, No. 9, pp. 897-971.
- 36-2. Jangid, R.S and Datta, T.K. (1995). "Seismic Behavior of Base Isolated Building – A State of the Art Review", *Journal of Structures and Buildings*, Proc. Inst. Civil Engrs. (London), Vol. 110, pp. 186-203.
36. J. Alamatian and J. Rezaeepazhand, "A simple approach for determination of actuator and sensor locations in smart structures subjected to the dynamic loads", *IJE Transactions A: Basics*, Vol. 24, No. 4, November 2011, pp. 341-349
37. J.J. Hollkamp, (1994), Multi Modal Passive Vibration Suppression with Piezoelectric Material and Resonant Shunts, 5, (1), 49-57.
38. Jun-Ping, P. and Deh-Shiu, H. (1988). "Optimal Control of Tall buildings", **Journal of Engineering Mechanics**, ASCE, Vol. 114, pp. 973-989.
- 39 J.T.P. Yao, (1972), Concept of structural control. *ASCE J. Stru. Div.* 98, pp. 1567–1574.
40. T. Kamada, T. Fujita, T. Hatayama, T. Arikabe, N. Murai, S. Aizawa, K. Tohyama, Active vibration control of flexural-shear type frame structures with smart structures using piezoelectric actuators, *Smart Mater. Struct* 7 (1998) 479-488.
41. T. Kamada et al.: "Active Vibration Control of Frame Structures with Smart Structure Using Piezoelectric Actuator: 1st Report, Vibration Control by Control of Bending Moment of the Columns," 62-599C, pp. 2577–2584, 1996-07.
42. Kang, Y. K., Park, H. C., and Agrawal, B., "Optimization of Piezoceramic Sensor/Actuator Placement for Vibration Control of Laminated Plates," *AIAA Journal*, Vol. 36, No. 9, pp. 1763–1765.
43. Kelly, J.M. (1986). "A Seismic Base Isolation: A Review and Bibliography", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, pp. 202-216.
44. Kim, J.T., Jung, H.J. and Lee, I.W. (2000). "Optimal Structure Control Using Neural Networks", *Jour. Engg. Mech.*, ASCE, Vol. 126, pp. 201-205.
45. Kurata, U., Kabori, T., Takahashi, M., Niwa, N. and Midorikawa, H. (1999). "Actual Seismic Response Control Building with Semiactive Damper System", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 28, pp. 1427-1447.
46. Martin, C.R. and Soong, T.T. (1976). "Modal Control of Multi-Storey Structures", **Journal of Engg. Mechanics**, ASCE, Vol. 102, pp. 613-623.
47. Masri, S.F., Bekey, G.A. and Caughey, T.K. (1981a). "Optimal Pulse Control of Flexible Structures", *Journal of Applied Mechanics*, ASME, Vol. 48, pp. 619-626.

48. Masri, S.F., Bekey, G.A. and Caughey, T.K. (1981b). "On-line Control of Nonlinear Flexible Structures", **Journal of Applied Mechanics**, ASME, Vol. 49, pp. 871-884.
49. McGreevy, S., Soong, T.T. and Reinhorn, A.M. (1988). "An Experimental Study of Time-Delay Compensation in Active Structural Control", Proceedings of International Conference on Modal Analysis, Orlando, U.S.A., pp. 733-739.16
50. Meirovitch, L. and Baruh, H. (1983). "Robustness of the Independent Modal Space Control Method", Journal of Guid. Contr. Dyn., Vol. 3, pp. 140-150.
51. Meirovitch, L. and Ghosh, D. (1987). "Control of Flutters in Bridges", **Jour. Engg. Mech.**, ASCE, Vol. 113, pp. 720-736.
52. Meirovitch, L. and Oz, H. (1980). "Modal Space Control of Distributed Gyroscopic Systems", Journal of Guid. Contr. Dyn, Vol. 6, pp. 20-25.
- 52-1. Michael D. Symans, , Michael C. Constantinou." Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review", **Engineering Structures** 21 (1999) 469–487
53. Nagarajaiah, S. (1997). "Semi-Active Control of Structures", Proceedings of Structures Congress XV, ASCE, Portland, U.S.A., pp. 1574-1578.
54. Ni, Y.Q., Chen, Y., Ko, J.M. and Cao, D.Q. (2002). "Neuro Control of Cable Vibration Using Semiactive Magneto-rheological Dampers", **Engineering Structures**, Vol. 24, pp. 295-07.
55. Nordel, W.J. (1969). "Active Systems for Elastic Resistant Structures", Tech. Rep. R-611, Naval Civil Engineering Laboratory, Port Hueneme, California, U.S.A..
56. Padula, S.L. Palumbo, D.L. and Kincaid, R.K. (1998). "Optimal sensor/actuator locations for active structural acoustic control". AIAA-98-1865.
57. Padula, S.L. and Kincaid, R.K. 1999. Optimization Strategies for Sensor and Actuator Placement, pp. 1–12, National Aeronautics and Space Administration Langley Research Center, Langley, Virginia 23681.
58. Prucz, Z., Soong, T.T. and Reinhorn, A.M. (1985). "An Analysis of Pulse Control for Simple Mechanical Systems", **Journal of Dynamic Measurements Control**, ASME, Vol. 107, pp. 123-131.
59. Qiu, Z. C., Zhang, X. M., Wu, H. X., +and Zhang, H. H.(2007). Optimal placement and active vibration control for piezoelectric smart flexible cantilever plate. Journal of Sound and Vibration, 301, 521-543.
60. Rao, M.M. and Datta, T.K. (1998). "Use of ANN for Linear Active Control of Structures", Proceedings of Eleventh Symposium on Earthquake Engineering, Vol. II, pp. 705-712.
61. Reinhorn, A.M., Manolis, G.D. and Wen, C.Y. (1987). "Active Control of Inelastic Structures", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 113, No. 3, pp. 315-333.
62. Rofooei, F.R. and Tadjbakhsh, I.G. (1993). "Optimal Control of Structures with Acceleration, Velocity and Displacement Feedback", **Journal of Engineering Mechanics**, ASCE, Vol. 119, No. 10, pp. 1993-2010.
63. Roy, T. and Chakraborty, D.: Optimal vibration control of smart fiber reinforced composite shell structures using improved genetic algorithm, Journal of Sound and Vibration, Vol. 319, No. 1-2, pp. 15-40, 2009.
64. Lim KB. Method for optimal actuator and sensor placement for large flexible structures. Journal Guidance, Control, and Dynamics 1992; 15:49–57.

65. Lopes Jr., V., Steffen Jr., V., and Inman, D. J., "Optimal Placement of Piezoelectric Sensor/Actuator for Smart Structures Vibration Control", In: *Dynamical Systems and Control*, ed. London: Taylor & Francis Books Ltd, 2003.

65(1). L.L. Chung, L.Y. Wu and T.G. Jin, (1998)," Acceleration feedback control of seismic structures",
Engineering structures, Vol. 20, pp 62-74

66. Sack, R.L., Kuo, C., Wu, H.C., Liu, L. and Patten, W.N. (1994). "Seismic Motion Control via Semiactive Hydraulic Actuators", *Proceedings of Fifth U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Chicago, U.S.A., Vol. II, pp. 11-20.

67. Sadri, A.M., Wright, J.R. and Wynne, R.J. 1999. "Modelling and Optimal Placement of Piezoelectric Actuators in Isotropic Plates Using Genetic Algorithms," *Smart Materials and Structures*, 8:490-498.

68. Singh, S. and Datta, T.K. (1998). "Open-Closed Linear Control of Building Frames under Seismic Excitation", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 1, pp. 43-51.

69. Singh, S. and Datta, T.K. (2000). "Nonlinear Sliding Mode Control of Seismic Response of Building Frames", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 126, No. 4, pp. 340-47.

70. Shefer, M. and Beakwell, J.V. (1987). "Estimation and Control with Cubic Nonlinearities", *Journal of Optimization Theory and Applications*, Vol. 53, No. 1, pp. 1-7.

71. Simpson, M. T. e Hansen, C. H., "Use of Genetic Algorithms to Optimize Vibration Actuator Placement for Active Control of Harmonic Interior Noise in a Cylinder with floor structure", *Noise Control Engineering Journal*, pp. 169-184, 1996.

72. Singh, M.P. and Matheu, E.E. (1997). "Active and Semi-Active Control of Structures under Seismic Excitation", **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, Vol. 26, pp. 193-213.

73. Soliman, M.A. and Ray, W.H. (1992). "Optimal Feedback Control for Linear Quadratic System Having Time-Delay", **International Journal of Control**, Vol. 15, pp. 609-615.

74. Soong, T.T. (1988). "State-of-the-Art Review: Active Structure Control in Civil Engineering", *Engineering Structures*, Vol. 10, No. 2, pp. 73-84.

75. Soong, T.T. (1992). "Active Structural Control: Theory and Practice", Longman Scientific and Technical, England, U.K.

76. Soong, T.T. (1996). "Active Control Practice in the U.S.", 11th World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico.

77.. Spencer Jr., B.F., Dykes, S.J., Sain, M.K. and Quast, P. (1993). "Acceleration Feedback Strategies for Aseismic Protection", *Proceedings of American Society Control Conference*, San Francisco, California, U.S.A., pp. 1317-1321.

78 Spencer Jr., B.F., Dyke, S.J., Sain, M.K. and Carlson, J.D. (1996). "Dynamical Model of a Magnetorheological Damper", *Proceedings of Structures Congress XIV*, ASCE, Chicago, U.S.A., Vol. II, pp.361-370.

79. Suhardjo, J., Spencer Jr., B.F. and Sain, M.K. (1992a). "Non-linear Optimal Control of a Duffing System", *International Journal of Non-linear Mechanics*, Vol. 27, No. 2, pp. 157-172.
80. Suhardjo, J., Spencer Jr., B.F. and Kareem, A. (1992b). "Frequency Domain Optimal Control of Wind-Excited Buildings", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 118, No. 12, pp. 2463-2481. **Journal of Earthquake Technology**, March 2003 17
81. Sun, L. and Goto, Y. (1994). "Application of Fuzzy Theory to Variable Dampers for Bridge Vibration Control", *Proceedings of the First World Conference on Structural Control*, Los Angeles, California, U.S.A., pp. 31-40.
82. Suneja, B.P. and Datta, T.K. (1998). "Open-Close Loop Active Control of Articulated Leg Platform", *Jour. Engg. Mech.*, ASCE, Vol. 124, pp. 35-48.
83. Symans, M.D. (1999). "Semiactive Control Systems for Seismic Protection of Structures: A State-of-the-Art Review", *Engineering Structures*, Vol. 21, pp. 469-487.
84. Symans, M.D. and Constantinou, M.C. (1997). "Seismic Testing of a Building Structure with a Semi-Active Fluid Damper Control System", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 26, No. 7, pp. 59-77.
85. Symans, M.D. and Kelly, S.W. (1999). "Fuzzy Logic Control of Bridge Structures Using Intelligent Semi-Active Seismic Isolation Systems", **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, Vol. 28, pp. 37-60.
86. Tani, A., Kawamura, H. and Ryu, S. (1998). "Intelligent Fuzzy Optimal Control of Building Structures", *Engineering Structures*, Vol. 20, pp. 184-192.
87. Udwadia, F.E. and Tabaie, S. (1981a). "Pulse Control of a Single Degree of Freedom System", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 107, pp. 997-1010.
88. Udwadia, F.E. and Tabaie, S. (1981b). "Pulse Control of Structural and Mechanical Systems", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 107, pp. 1011-1028.
89. Utkin, V.I. (1978). "Sliding Modes and Their Application Invariable Structure Systems", *Mir Publishers*, Moscow, U.S.S.R.
90. Q. Wang, C. Wang, (2001), A controllability Index for Optimal Design of Piezoelectric Actuators in Vibration Control of Beam Structures, *Journal of Sound and Vibration* 242, (3):507-518.
91. Wu, Z., Lin, R.C. and Soong, T.T. (1995). "Non-linear Feedback Control for Improved Peak Response Reduction", *Journal of Smart Materials and Structures*, Vol. 4, pp. A140-A147.
92. Yang, J.N. (1975). "Application of Optimal Control Theory to Civil Engineering Structures", *Journal of Engineering Mechanics Division*, ASCE, Vol. 101, No. EM6, pp. 818-838.
93. Yang, J.N., Akbarpour, A. and Ghaemmaghami, P. (1987). "New Optimal Control Algorithms for Structural Control", *Journal of Engineering Mechanics Division*, ASCE, Vol. 113, No. 9, pp. 818-838.
94. Yang, J.N., Akbarpour, A. and Askar, G. (1990). "Effect of Time-Delay on Control of Seismic Excited Buildings", *Journal of Structural Engineering Division*, ASCE, Vol. 116, pp. 2801-2814.
95. Yang, J.N., Li, Z. and Liu, S.C. (1991). "Instantaneous Optimal Control of Structures with Velocity and Acceleration Feedbacks", *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 6, No. 3, pp. 204-211.

96. Yang, J.N., Wu, J.C., Agrawal, A.K. and Li, Z. (1994). "Sliding Mode Control for Seismic-Excited Linear and Non-Linear Civil Engineering Structures", Technical Report NCEER-94-0017.

97. Yang, J.N, Wu, J.C. and Li, Z. (1996). "Control of Seismic Excited Buildings Using Active Variable Stiffness Systems", Engineering Structures, Vol. 18, No. 8, pp. 589-596.

97-1

98.Zhang, H., et al., Float-encoded genetic algorithm technique for integrated optimization of piezoelectric actuator and sensor placement and feedback gains. Smart Materials and Structures, 2000. 9(4): p. 552-557.

99. Zuk, W. (1968). "Kinetic Structures", Civil Engineering, Vol. 39, No. 12, pp. 62-64.

Abstract

Lots of ambiguities and complicated mathematical equations are among the disadvantages of current active control algorithms of structures. New approach is presented for controlling the structural vibrations. The proposed active control method is based on structural dynamics theories in which multi actuators and sensors are utilized. Each actuator force is modeled as an equivalent viscous damper so that several lower vibration modes are damped critically. This subject is achieved by simple mathematical formulation. Besides, the proper location of sensors and actuators are determined based on the importance of the first modes of the vibration and arrays of the shape matrix of the vibration. For numerical verification of proposed method, several criterions such as maximum displacement, maximum kinetic energy, maximum drift, and time history of controlled force and displacement are evaluated in two and five story shear buildings, subjected to the harmonic load, impact force, and the Elcentro base excitation. This study shows that the proposed method has suitable efficiency for reducing structural vibrations. Based on time history of earthquake force and actuator force, the actuator force has reasonable values in comparison with earthquake force and weight of stories. Moreover, the uncertainty effect of different parameters is investigated here. Comparing the results of proposed method with the results of conventional methods of active control of structures such as LQR show that the proposed method has great potential performance while having simplicity.

Keywords: Active Vibration Control, Sensor, Actuator, Smart Structures, Structure Dynamic



Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering

**New Method in Smart Structures Vibrations Active Control With Multi
Actuators and Sensors**

Babak Karimpour

Supervisor(s):

Dr Ali Keyhani

September 2014