



Sharif University of Technology
Civil Engineering Department

M.Sc. thesis
Earthquake Engineering

**Numerical evaluation for optimal design of number
and positions of controllers in 2D frames under
earthquake and wind loadings using different active
control algorithms**

By:

Zabihollah Mehdipour Picha

Supervisor:

Dr. Ali Bakhshi

Abstract:

Structures which are designed in accordance with previously used design codes are usually weak to sustain dynamic loading and therefore they shall be rehabilitated. One approach for rehabilitation is to use active control. In this study, active tendon is used as a structural device control. Various arrangements of controllers can be used to limit the response of the structure but it is desired to find an arrangement at which the cost of the placement will be minimized. The aim of this thesis is to find the best placement of active tendons on a frame such that the placement satisfies two general restrictions; namely structural response and control forces. Genetic algorithm is applied to the 2D frames in order to optimize the controllers. Four control Algorithms including Classic, Instantaneous, modal and pole assignment in optimal manner are considered for linear behavior and Classic algorithm is used for nonlinear behavior. Effect of time delay is considered in the linear control algorithms. Two dynamic loadings consisting of earthquake and wind loadings are applied to the frames. Earthquake loadings include from seven records which are scaled in accordance with INBC code (2800) and the wind loading is produced in accordance with ASCE7-05 and Davenport density spectrum. Two three-bay-eight-story frames are used to consider linear and nonlinear behavior.

Results show that under defined restrictions, for a special frame, special dynamic loading, special control algorithm and both linear and nonlinear behavior without calculations and with acceptable precision, the optimal number and placement of controllers can be guessed. The results also show that non-shear frame could be analyzed as the shear frame with negligible error in the final results and the time of computation greatly reduced. Also if the permissible control force is less than saturation limit, instantaneous algorithm will have the best results and therefore nonlinear frames have more control cost than linear; however the structural cost should be considered for estimating the overall cost.

Keywords: Optimization, genetic algorithm, active tendon, active control, 2D frame



دانشگاه صنعتی شریف
دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد
گرایش زلزله

بررسی عددی بهینه‌سازی تعداد و مکان کنترلر در قاب دو بعدی
تحت بار زلزله و باد توسط الگوریتم‌های مختلف کنترل فعال

نگارش: ذبیح‌الله مهدی‌پور پیچا

استاد راهنما: دکتر علی بخشی

مهر ۱۳۹۱

تقدیر و تشکر

اینک که به لطف و یاری خداوند متعال، این پژوهش به پایان رسیده است، وظیفه خود می‌دانم صمیمانه‌ترین سپاس‌ها را تقدیم عزیزانی نمایم که موفقیت این پایان‌نامه مرهون راهنمایی‌ها و حمایت‌های آنان است، بویژه استاد گرانقدرم جناب آقای دکتر بخشی که انجام این پروژه میسر نمی‌شد، جزء با مساعدت، همفکری و راهنمایی‌های ارزشمند ایشان که علی‌رغم مشکلات زیادی که داشتند، همواره با روحیه‌ای امیدبخش، حلال مسائل بوده‌اند. شایسته است که از صمیم قلب از زحمات بیشائبه ایشان قدردانی نمایم. همچنین آن را تقدیم می‌کنم به پدر و مادرم که همواره راهنمای من در مسیر زندگی هستند.

چکیده

بدیهی است که سازه طراحی شده در حالت عادی جوابگوی بارهای دینامیکی از قبیل زلزله یا باد نمی‌باشند و این سازه باید به طریقی کنترل شود. یکی از راه‌های کنترل سازه استفاده از ابزار کنترلی فعال است. در این پژوهش از کابل فعال استفاده شده است. در ضمن چینش‌های متفاوت از این ابزارهای کنترلی در سازه پاسخ‌های متفاوتی را ایجاد می‌کند که جستجو برای یافتن بهترین چینش منجر به کاهش هزینه کنترلی می‌گردد. این پژوهش به یافتن کمترین تعداد و بهترین چینش از کابل فعال که ضمن رعایت محدودیت در پاسخ سازه (معمولا بیشینه جابجایی نسبی) و نیروی کنترل، کمترین پاسخ را در سازه ایجاد کند، می‌پردازد. برای بهینه‌سازی که بر روی قاب دوبعدی انجام می‌شود، از الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود. برای تعیین نیروی کنترل ایجاد شده در کابل فعال و تاثیر این نیرو بر پاسخ سازه از چهار الگوریتم کنترلی کلاسیک، آنی، مودال، جایابی قطب‌ها بصورت بهینه برای سازه با رفتار خطی و از الگوریتم کلاسیک برای رفتار غیرخطی سازه استفاده شده است. اثر تاخیر زمانی در نیروی کنترل هم در الگوریتم‌های اشاره شده در حالت خطی لحاظ گردیده است. از دو نوع بارگذاری زلزله که مجموعه‌ای از هفت رکورد است و بر طبق آیین‌نامه ۲۸۰۰ مقیاس گردیده‌اند، و بار باد که با استفاده از ASCE7-05 و نیز طیف چگالی داون پورت تولید شده، استفاده شده است. از دو مدل سازه که هر دو قابی دوبعدی با هشت طبقه و سه دهانه می‌باشند، برای بررسی رفتار خطی (از دو منظر برشی و غیربرشی) و غیرخطی سازه استفاده شده است. سعی شده است بصورت مجزا اثر هر پارامتر از جمله نوع الگوریتم کنترلی، تابع هدف و قیود مسئله بهینه‌سازی، نوع بار دینامیکی و شدت آن، نوع قاب و میزان تاخیر زمانی در تعداد و مکان بهینه کنترلر بررسی گردد.

نتایج نشان می‌دهد که می‌توان برای یک قاب مشخص، مقادیر مجاز مشخصی از پاسخ سازه و نیروی کنترل، نوع و شدت مشخصی از بارگذاری و حتی برای یک الگوریتم کنترلی خاص و فرض میزان تاخیر زمانی مشخص در نیروی کنترل، تعداد و مکان بهینه کنترلر را برای هر دو رفتار خطی (برشی و غیربرشی) و غیرخطی بدون انجام محاسبات و با دقت قابل قبول پیش‌بینی کرد. همچنین نتایج نشان می‌دهد می‌توان با اغماض از خطای ایجاد شده در نتیجه نهایی، قاب را برشی فرض کرده و زمان محاسبات را بشدت کاهش داد. اگر نیروی کنترل مجاز از حد اشباع الگوریتم‌های کنترل کمتر باشد، الگوریتم آنی بهترین نتیجه را می‌دهد و هزینه کنترلی سازه غیرخطی بیشتر از سازه خطی است اما در برآورد هزینه کلی باید به هزینه ساخت خود سازه نیز توجه شود.

کلمات کلیدی: بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک، کابل فعال، کنترل فعال، قاب ساختمانی

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل ۱: کلیات.....
۱-۱	۱-۱ مقدمه.....
۲	۲-۱ مروری بر کارهای دیگران.....
۲	۱-۲-۱ الگوریتم‌های کنترل.....
۵	۲-۲-۱ بهینه‌سازی تعداد و مکان کنترل‌در قاب.....
۸	۳-۱ اهداف پژوهش.....
۹	۴-۱ مروری بر فصول پژوهش.....
۱۱	فصل ۲: بهینه‌سازی.....
۱۱	۱-۲ مقدمه.....
۱۲	۲-۲ طبقه‌بندی روشهای بهینه‌سازی.....
۱۴	۳-۲ الگوریتم ژنتیک.....
۱۴	۱-۳-۲ مزیت‌های الگوریتم ژنتیک نسبت به سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی.....
۱۵	۲-۳-۲ کلمات کلیدی در الگوریتم ژنتیک.....
۱۶	۳-۳-۲ الگوریتم ژنتیک دودویی.....
۲۳	فصل ۳: کنترل فعال.....
۲۳	۱-۳ الگوریتم‌های کنترل.....
۲۳	۱-۱-۳ مقدمه.....

۲۴	..... ۲-۱-۳ الگوریتم کنترل بهینه خطی کلاسیک
۲۶	..... ۳-۱-۳ الگوریتم کنترل آنی بهینه
۲۷	..... ۴-۱-۳ الگوریتم فضای مودال بهینه
۳۰	..... ۵-۱-۳ الگوریتم جابجایی بهینه قطبها
۳۳	..... ۲-۳ ماتریس‌های سازه‌ای
۳۳	..... ۱-۲-۳ قاب برشی
۳۴	..... ۲-۲-۳ قاب غیربرشی
۳۵	..... ۳-۲-۳ ماتریس میرایی
۳۶	..... ۴-۲-۳ ماتریس مکان کنترلر
۳۶	..... ۳-۳ سازه با رفتار غیرخطی
۳۷	..... ۴-۳ اثر تاخیر زمانی
۳۷	..... ۱-۴-۳ مقدمه
۳۸	..... ۲-۴-۳ روش انتگرال‌گیری
۴۰	..... ۳-۴-۳ بسط تیلور
۴۲	..... فصل ۴: مباحث آیین‌نامه‌ای
۴۲	..... ۱-۴ بارگذاری خارجی
۴۲	..... ۱-۱-۴ بار زلزله
۴۶	..... ۲-۱-۴ بارگذاری باد
۴۸	..... ۲-۴ اعمال بار دینامیکی و محدودیت‌های طراحی
۵۰	..... فصل ۵: صحت‌سنجی
۵۰	..... ۱-۵ صحت‌سنجی الگوریتم‌های کنترل فعال
۵۰	..... ۱-۱-۵ صحت‌سنجی الگوریتم کلاسیک
۵۳	..... ۲-۱-۵ صحت‌سنجی الگوریتم آنی

۵۵	.....	۳-۱-۵	صحت‌سنجی الگوریتم مودال
۵۷	.....	۴-۱-۵	صحت‌سنجی الگوریتم جاینشانی قطب‌ها
۶۱	.....	۵-۱-۵	مثال کلی

۶۲	۲-۵	صحت‌سنجی الگوریتم ژنتیک
----	-------	-----	-------------------------

فصل ۶: مدل‌سازی و نتایج..... ۶۵

۶۵	۱-۶	مدل‌سازی
----	-------	-----	----------

۶۵	۱-۱-۶	مدل سازه‌ای
----	-------	-------	-------------

۶۸	۲-۱-۶	رکورد زلزله
----	-------	-------	-------------

۷۳	۳-۱-۶	رکورد باد
----	-------	-------	-----------

۷۵	۴-۱-۶	روند بهینه‌سازی مکان و تعداد کنترلر
----	-------	-------	-------------------------------------

۲-۶ نتایج..... ۸۴

۸۴	۱-۲-۶	بررسی کلی
----	-------	-------	-----------

۱۰۳	۲-۲-۶	تاثیر تابع هدف و قیود مختلف
-----	-------	-------	-----------------------------

۱۰۷	۳-۲-۶	تاثیر الگوریتم‌های مختلف کنترلی
-----	-------	-------	---------------------------------

۱۱۰	۴-۲-۶	تاثیر تاخیر زمانی
-----	-------	-------	-------------------

۱۱۲	۵-۲-۶	تاثیر رکورد
-----	-------	-------	-------------

۱۱۴	۶-۲-۶	تاثیر سازه
-----	-------	-------	------------

فصل ۷: نتیجه‌گیری و پیشنهادات..... ۱۱۶

۱۱۶	۱-۷	نتیجه‌گیری
-----	-------	-----	------------

۱۱۸	۲-۷	پیشنهادات
-----	-------	-----	-----------

۱۲۰		منابع و مراجع
-----	-------	--	---------------

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱: مراحل انجام فرآیند بهینه‌سازی مکان و تعداد کنترلر (مطالعه N.Zhang و همکارانش).....	۶
شکل ۱-۲: شکل سمت راست بیانگر تابع محدب و شکل سمت چپ بیانگر تابع غیرمحدب.....	۱۲
شکل ۲-۲: ساختار الگوریتم ژنتیک دودویی.....	۱۶
شکل ۳-۲: ترویج یک نقطه‌ای.....	۲۱
شکل ۴-۲: جهش بر روی بیت ششم.....	۲۲
شکل ۱-۵: تاریخچه زمانی زلزله El Centro (شتاب (m/se^2) بر حسب زمان (s)) و مقیاس شده به 0.4g.....	۵۱
شکل ۲-۵: تاریخچه زمانی رکورد مصنوعی (شتاب (g) بر حسب زمان (s)).....	۵۲
شکل ۳-۵: تاریخچه زمانی زلزله El Centro (شتاب (m/se^2) بر حسب زمان (s)) و مقیاس شده به 0.12g.....	۵۴
شکل ۴-۵: تاریخچه زمانی رکورد مصنوعی (شتاب (g) بر حسب زمان (s)) و مقیاس شده به 0.18g.....	۵۶
شکل ۵-۵: از بالا به پایین به ترتیب ماتریس سیستم اصلاح شده (A)، ماتریس Q و قطب‌های حلقه بسته سیستم تا پایان مرحله ۱.....	۵۸
شکل ۶-۵: از بالا به پایین به ترتیب ماتریس سیستم اصلاح شده (A)، ماتریس Q و قطب‌های حلقه بسته سیستم تا پایان مرحله ۲.....	۵۸
شکل ۷-۵: از بالا به پایین به ترتیب ماتریس سیستم اصلاح شده (A)، ماتریس Q و قطب‌های حلقه بسته سیستم تا پایان مرحله ۳.....	۵۹
شکل ۸-۵: تاریخچه زمانی زلزله Loma Prieta (شتاب (g) بر حسب زمان (s)) و مقیاس شده به 1g.....	۶۰
شکل ۹-۵: تاریخچه زمانی زلزله Northridge (شتاب (g) بر حسب زمان (s)) و مقیاس شده به 0.3g.....	۶۱
شکل ۱۰-۵: تاریخچه زمانی Hector Mine (شتاب (m/se^2) بر حسب زمان (s)) و مقیاس شده به 0.22g.....	۶۳
شکل ۱۱-۵: سمت چپ: مکان بهینه ۴ کنترلر و سمت راست: نمودار تغییرات تابع هدف.....	۶۴
شکل ۱۲-۵: سمت چپ: مکان بهینه ۳ کنترلر و سمت راست: نمودار تغییرات تابع هدف.....	۶۵
شکل ۱-۶: مدل رفتاری برای سازه تعریف شده در جدول ۱-۶.....	۶۶
شکل ۲-۶: قاب دو بعد مدل شده در نرم‌افزار ETABS (سمت راست) به همراه مقاطع بکار رفته	

- در تیر و ستون آن (سمت چپ) ۶۷
- شکل ۳-۶: مشخصات جرم و سختی طبقات قاب شکل ۲-۶ با فرض رفتار برشی ۶۷
- شکل ۴-۶: تاریخچه زمانی هفت زلزله مختلف (شتاب (g) بر حسب زمان (s)) و مقیاس شده به 1g ۷۰
- شکل ۵-۶: منحنی طیف شتاب هفت رکورد رسم شده در شکل ۴-۶ (شتاب (g) بر حسب پریود (s)) ۷۱
- شکل ۶-۶: طیف میانگین هفت طیف رسم شده در شکل ۵-۶ (منحنی قرمز رنگ) ۷۲
- شکل ۷-۶: طیف طرح استاندارد و طیف میانگین مقیاس شده برای تحلیل خطی ۷۲
- شکل ۸-۶: طیف طرح استاندارد و طیف میانگین مقیاس شده برای تحلیل غیرخطی ۷۳
- شکل ۹-۶: تاریخچه زمانی رکورد باد تولید شده (سرعت (m/s) بر حسب زمان (s)) ۷۴
- شکل ۱۰-۶: ساختار الگوریتم کلاسیک خطی ۷۵
- شکل ۱۱-۶: ساختار الگوریتم آنی خطی ۷۶
- شکل ۱۲-۶: ساختار الگوریتم مودال ۷۶
- شکل ۱۳-۶: ساختار الگوریتم جایابی قطبها ۷۷
- شکل ۱۴-۶: ساختار الگوریتمهای مختلف کنترلی با در نظر گرفتن اثر تاخیر زمانی (روش انتگرال گیری) ۷۸
- شکل ۱۵-۶: ساختار الگوریتم کلاسیک غیرخطی ۷۹
- شکل ۱۶-۶: ساختار الگوریتم ژنتیک بکار رفته در این مطالعه ۸۰
- شکل ۱۷-۶: ساختار کلی برای محاسبه تابع هدف در این مطالعه ۸۳
- شکل ۱۸-۶: مکان بهینه کنترلرها (سمت چپ) و تغییرات تابع هدف (سمت راست) برای حالت (۱۷) ۹۳
- شکل ۱۹-۶: مکان بهینه کنترلرها (سمت چپ) و تغییرات تابع هدف (سمت راست) برای حالت (۱۸) ۹۳
- شکل ۲۰-۶: مکان بهینه کنترلرها (سمت چپ) و تغییرات تابع هدف (سمت راست) برای حالت (۱۹) ۹۴
- شکل ۲۱-۶: مکان بهینه کنترلرها (سمت چپ) و تغییرات تابع هدف (سمت راست) برای حالت (۲۰) ۹۵
- شکل ۲۲-۶: مکان بهینه کنترلرها (سمت چپ) و تغییرات تابع هدف (سمت راست) برای حالت (۲۱) ۹۵
- شکل ۲۳-۶: مکان بهینه کنترلرها (سمت چپ) و تغییرات تابع هدف (سمت راست) برای حالت (۲۲) ۹۶
- شکل ۲۴-۶: مکان بهینه کنترلرها (سمت چپ) و تغییرات تابع هدف (سمت راست) برای حالت (۲۳) ۹۷
- شکل ۲۵-۶: مکان بهینه کنترلرها (سمت چپ) و تغییرات تابع هدف (سمت راست) برای حالت (۲۴) ۹۷
- شکل ۲۶-۶: مکان بهینه کنترلرها (سمت چپ) و تغییرات تابع هدف (سمت راست) برای حالت (۲۵) ۹۸
- شکل ۲۷-۶: مکان بهینه کنترلرها (سمت چپ) و تغییرات تابع هدف (سمت راست) برای حالت (۲۶) ۹۹

شکل ۶-۲۸: مکان بهینه کنترلرها (سمت چپ) و تغییرات تابع هدف (سمت راست) برای حالت (۲۷).....۱۰۰

شکل ۶-۲۹: مکان بهینه کنترلرها (سمت چپ) و تغییرات تابع هدف (سمت راست) برای حالت (۲۸).....۱۰۰

شکل ۶-۳۰: تغییرات تعداد کنترلر بهینه نسبت به ضرایب اعمالی در رکورد زلزله مقیاس شده.....۱۰۸

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۵۰	جدول ۵-۱: مشخصات مدل ارائه شده توسط Rofooei و همکارش
۵۱	جدول ۵-۲: بیشینه تغییر مکان نسبی در هر طبقه (Cm) برای سازه کنترل نشده و کنترل شده با در نظر گرفتن تاخیر زمانی (ارائه شده در مطالعه Cai و همکارانش)
۵۱	جدول ۵-۳: بیشینه تغییر مکان نسبی در هر طبقه (Cm) برای سازه کنترل نشده و کنترل شده با در نظر گرفتن تاخیر زمانی (نتیجه شبیه‌سازی)
۵۲	جدول ۵-۴: مشخصات مدل ارائه شده توسط Yang و همکارانش
۵۳	جدول ۵-۵: بیشینه تغییر مکان نسبی و شتاب مطلق در هر طبقه برای سازه کنترل نشده و کنترل شده (ارائه شده در مطالعه جغتایی و محبی)
۵۳	جدول ۵-۶: بیشینه تغییر مکان نسبی و شتاب مطلق در هر طبقه برای سازه کنترل نشده و کنترل شده (نتیجه شبیه‌سازی)
۵۳	جدول ۵-۷: مشخصات مدل ارائه شده توسط Yang و همکارانش
۵۴	جدول ۵-۸: بیشینه تغییر مکان نسبی در هر طبقه (Cm) برای سازه کنترل نشده و چهار حالت مختلف کنترل شده (ارائه شده در مطالعه CAI و همکارانش)
۵۴	جدول ۵-۹: بیشینه تغییر مکان نسبی در هر طبقه (Cm) برای سازه کنترل نشده و چهار حالت مختلف کنترل شده (نتیجه شبیه‌سازی)
۵۵	جدول ۵-۱۰: مشخصات مدل ارائه شده توسط J.Q.Fang و همکارانش
۵۶	جدول ۵-۱۱: فرکانس مودهای مختلف سازه تعریف شده در جدول ۵-۱۰
۶۰	جدول ۵-۱۲: قطب‌های حلقه بسته برای دو الگوریتم کلاسیک و جایابی قطب‌ها و دو حالت مختلف نیروی کنترل
۶۰	جدول ۵-۱۳: جایابی بیشینه نسبی هر طبقه برای دو الگوریتم کلاسیک و جایابی قطب‌ها و برای دو حالت مختلف نیروی کنترل
۶۱	جدول ۵-۱۴: مشخصات زلزله Northridge
۶۱	جدول ۵-۱۵: مشخصات مدل ارائه شده توسط Yang و همکارانش

- جدول ۵-۱۶: مقادیر جابجایی و نیروی کنترل برای ۴ الگوریتم کنترلی مختلف و با در نظرگیری تاخیر زمانی ۶۲
- جدول ۵-۱۷: مشخصات مدل ارائه شده توسط Li و همکارانش ۶۲
- جدول ۵-۱۸: مکان بهینه قرارگیری ۴ کنترلر در قاب مفروض با جستجوی همه حالات ممکن ۶۳
- جدول ۵-۱۹: مکان بهینه قرارگیری ۳ کنترلر در قاب مفروض با جستجوی همه حالات ممکن ۶۴
- جدول ۶-۱: مشخصات مدل ارائه شده توسط Yang (۱۹۸۸) ۶۶
- جدول ۶-۲: مشخصات هفت رکورد زلزله ۶۸
- جدول ۶-۳: تعیین طول موثر رکوردها ۷۳
- جدول ۶-۴: فرضیات موردنیاز برای تولید رکورد باد برگرفته از ASCE7-05 ۷۴
- جدول ۶-۵: توزیع کنترلر در طبقات برای حالت (۱) ۸۵
- جدول ۶-۶: مقادیر بیشینه پاسخ سازه و نیروی کنترل برای حالت (۱) ۸۵
- جدول ۶-۷: توزیع کنترلر در طبقات برای حالت (۲) ۸۵
- جدول ۶-۸: مقادیر بیشینه پاسخ سازه و نیروی کنترل برای حالت (۲) ۸۶
- جدول ۶-۹: توزیع کنترلر در طبقات برای حالت (۳) ۸۶
- جدول ۶-۱۰: مقادیر بیشینه پاسخ سازه و نیروی کنترل برای حالت (۳) ۸۶
- جدول ۶-۱۱: توزیع کنترلر در طبقات برای حالت (۴) ۸۶
- جدول ۶-۱۲: مقادیر بیشینه پاسخ سازه و نیروی کنترل برای حالت (۴) ۸۷
- جدول ۶-۱۳: توزیع کنترلر در طبقات برای حالت (۵) ۸۸
- جدول ۶-۱۴: مقادیر بیشینه پاسخ سازه و نیروی کنترل برای حالت (۵) ۸۸
- جدول ۶-۱۵: توزیع کنترلر در طبقات برای حالت (۶) ۸۸
- جدول ۶-۱۶: مقادیر بیشینه پاسخ سازه و نیروی کنترل برای حالت (۶) ۸۸
- جدول ۶-۱۷: توزیع کنترلر در طبقات برای حالت (۷) ۸۹
- جدول ۶-۱۸: مقادیر بیشینه پاسخ سازه و نیروی کنترل برای حالت (۷) ۸۹
- جدول ۶-۱۹: توزیع کنترلر در طبقات برای حالت (۸) ۸۹
- جدول ۶-۲۰: مقادیر بیشینه پاسخ سازه و نیروی کنترل برای حالت (۸) ۸۹
- جدول ۶-۲۱: توزیع کنترلر در طبقات برای حالت (۹) ۹۰
- جدول ۶-۲۲: مقادیر بیشینه پاسخ سازه و نیروی کنترل برای حالت (۹) ۹۰

- جدول ۶-۲۳: توزیع کنترلر در طبقات برای حالت (۱۰)..... ۹۰
- جدول ۶-۲۴: توزیع کنترلر در طبقات برای حالت (۱۱)..... ۹۱
- جدول ۶-۲۵: توزیع کنترلر در طبقات برای حالت (۱۲)..... ۹۱
- جدول ۶-۲۶: توزیع کنترلر در طبقات برای حالت (۱۳)..... ۹۱
- جدول ۶-۲۷: مقادیر بیشینه پاسخ سازه و نیروی کنترل برای حالت (۱۳)..... ۹۱
- جدول ۶-۲۸: توزیع کنترلر در طبقات برای حالت (۱۴)..... ۹۲
- جدول ۶-۲۹: توزیع کنترلر در طبقات برای حالت (۱۵)..... ۹۲
- جدول ۶-۳۰: توزیع کنترلر در طبقات برای حالت (۱۶)..... ۹۲
- جدول ۶-۳۱: مقادیر بیشینه پاسخ سازه و نیروی کنترل برای حالت (۱۷)..... ۹۳
- جدول ۶-۳۲: مقادیر بیشینه پاسخ سازه و نیروی کنترل برای حالت (۱۸)..... ۹۳
- جدول ۶-۳۳: مقادیر بیشینه پاسخ سازه و نیروی کنترل برای حالت (۱۹)..... ۹۴
- جدول ۶-۳۴: مقادیر بیشینه پاسخ سازه و نیروی کنترل برای حالت (۲۰)..... ۹۵
- جدول ۶-۳۵: مقادیر بیشینه پاسخ سازه و نیروی کنترل برای حالت (۲۳)..... ۹۷
- جدول ۶-۳۶: مقادیر بیشینه پاسخ سازه و نیروی کنترل برای حالت (۲۴)..... ۹۸
- جدول ۶-۳۷: مقادیر بیشینه پاسخ سازه و نیروی کنترل برای حالت (۲۵)..... ۹۸
- جدول ۶-۳۸: مقادیر بیشینه پاسخ سازه و نیروی کنترل برای حالت (۲۶)..... ۹۹
- جدول ۶-۳۹: توزیع کنترلر در طبقات برای حالت (۲۹)..... ۱۰۱
- جدول ۶-۴۰: مقادیر بیشینه پاسخ سازه و نیروی کنترل برای حالت (۲۹)..... ۱۰۱
- جدول ۶-۴۱: چینش بهینه کنترلر با فرض تعداد مختلف کنترلر برای حالت (۲۹)..... ۱۰۱
- جدول ۶-۴۲: توزیع کنترلر در طبقات برای تعداد مختلف و برای حالت (۱)..... ۱۰۳
- جدول ۶-۴۳: توزیع کنترلر در طبقات برای تعداد مختلف و برای حالت (۲)..... ۱۰۴
- جدول ۶-۴۴: توزیع کنترلر در طبقات برای تعداد مختلف و برای حالت (۳)..... ۱۰۵
- جدول ۶-۴۵: توزیع کنترلر در طبقات برای مقدار نیروی کنترل مجاز مختلف..... ۱۰۶
- جدول ۶-۴۶: توزیع کنترلر در طبقات برای ضرایب و الگوریتم‌های مختلف کنترلی..... ۱۰۷
- جدول ۶-۴۷: توزیع کنترلر در طبقات برای تعداد معین کنترلر و الگوریتم‌های مختلف..... ۱۰۸
- جدول ۶-۴۸: توزیع کنترلر در طبقات برای تاخیر زمانی مختلف..... ۱۱۰

- جدول ۶-۴۹: توزیع کنترلر در طبقات برای تعداد خاصی از کنترلر و تاخیر زمانی مشخص..... ۱۱۱
- جدول ۶-۵۰: توزیع کنترلر در طبقات برای ضرایب مختلف..... ۱۱۲
- جدول ۶-۵۱: توزیع کنترلر در طبقات برای رکوردهای مختلف و ۵ کنترلر در قاب..... ۱۱۳
- جدول ۶-۵۲: توزیع کنترلر در طبقات برای رکوردهای مختلف و ۱۰ کنترلر در قاب..... ۱۱۴
- جدول ۶-۵۳: توزیع کنترلر در طبقات برای تعداد کنترلر مختلف و برای قاب (۱)..... ۱۱۵
- جدول ۶-۵۴: توزیع کنترلر در طبقات برای تعداد کنترلر مختلف و برای قاب (۲)..... ۱۱۵

فصل ۱: کلیات

۱-۱ مقدمه

اساس پیدایش مبحث کنترل فعال^۱ در مهندسی عمران به کاهش خسارت سازه‌ای و حفظ خدمت‌پذیری ضمن پذیرش محدودیت طراحی و اجرا در برابر تحریکات تکیه‌گاهی متفاوت زلزله یا باد می‌باشد.

وجود ملاحظاتی از قبیل هزینه ایجاد و نگهداری از تاسیسات یا ساختمان و توان مورد نیاز برای ایجاد سیستم کنترل سازه‌ای باعث گردیده تا رویکردی تازه به مسائل بهینه‌سازی باز شود.

در مسائل بهینه‌سازی به مواردی از قبیل مکان و تعداد کنترلرها و نیروی کنترل توجه می‌شود، ضمن اینکه می‌توان قیود دیگر طراحی مانند جابجایی و یا شتاب و غیره را هم با توجه به نوع پروژه وارد معادلات نمود. از ویژگی‌های این مسائل بهینه‌سازی می‌توان به زمان گسسته بودن طبیعت محیط کنترل، گسسته بودن تعداد و مکان قرارگیری کنترلرها و یا حسگرها، توانمندی و کارایی متفاوت سیستم‌های متنوع کنترل، غیرخطی بودن سیستم‌های کنترل و سیستم سازه‌ای و چند سطحه بودن اشاره کرد که بصورت سلسله‌وار این مسائل به سرانجام می‌رسد.

عدم رعایت محدودیت جابجایی و شتاب بترتیب باعث کاهش ایمنی و نیز کاهش خدمت‌پذیری و احساس

¹ Active Control

راحتی می‌شوند و از این رو در مسائل بهینه‌سازی به آن توجه می‌شود و باید اشاره شود که هدف کنترل بیشتر کاهش شتاب است تا کاهش جابجایی نسبی طبقات.

نوع کنترلر نیز خود می‌تواند یک مسئله جداگانه بحساب آید که از انواع آن می‌توان به کابل فعال^۱، میراگر جرمی تحریک شده فعال^۲، مواد هوشمند^۳ و غیره اشاره نمود [1].

۲-۱ مروری بر کارهای دیگران

۱-۲-۱ الگوریتم‌های کنترل

هدف اصلی در کنترل بهینه، کمینه کردن شاخص انرژی می‌باشد که بصورت ترکیبی از پاسخ سیستم و نیروی کنترل ایجاد شده در سیستم است. الگوریتم‌های مختلف کنترل از روش‌های متفاوتی برای رسیدن به این هدف استفاده می‌کنند. از جمله این الگوریتم‌ها می‌توان به کنترل کلاسیک^۴، کنترل آنی^۵، کنترل مودال^۶ و غیره اشاره نمود. اخیراً بیشتر مطالعات بر روی چند الگوریتم جدیدتر از قبیل شبکه عصبی^۷ و یا کنترل هوشمند^۸ و غیره انجام گردیده است.

در مطالعه‌ای که توسط J.Q.Fang و همکارانش انجام شده است، کارایی الگوریتم مودال و تاثیر نیروی کنترل در مودهای بالاتر بررسی شده است و نیز برای جلوگیری از تاثیر نیروی کنترل در مودهای بالاتر در الگوریتم مودال، الگوریتم مودال اصلاح شده^۹ معرفی شده است [2].

¹ Active tendon

² ATMD

³ Smart material

⁴ Classic Algorithm

⁵ Instantaneous Algorithm

⁶ Modal Algorithm

⁷ Neural network

⁸ Intelligent Control

⁹ Modified Modal algorithm

در زمینه الگوریتم جاینشانی بهینه قطبها¹ مطالعات زیادی صورت گرفته است. بعنوان مثال می توان به مطالعه S.M.Bardan و همکارش اشاره کرد. در این مطالعه ابتدا قطب حلقه باز² سیستم را با استفاده از بردار ویژه ماتریس سیستم تفکیک کرده و سپس با توجه به حقیقی و یا مختلط مزدوج بودن قطبها، قطبهای بصورت جداگانه به قطبهای مقصد انتقال می یابد. در انتقال قطب مختلط مزدوج ابتدا مقدار حقیقی قطب انتقال می یافت و سپس با حل دو معادله غیرخطی، مقدار موهومی انتقال می یابد [3].

Vladimir Kucera و همکارش نیز به بررسی الگوریتم جاینشانی بهینه قطبها پرداخته اند. در این مطالعه نیز انتقال مقادیر حقیقی و موهومی قطبها تفکیک شده است و در انتقال مقادیر مختلط مزدوج از حل معادله غیرخطی استفاده شده است [4].

در زمینه الگوریتم جاینشانی قطبها همچنین می توان به مطالعه انجام شده توسط Abdul-Razzaqsarar و همکارانش اشاره کرد. در این مطالعه هم انتقال قطبهای حقیقی و مختلط مزدوج تفکیک شده است و برای انتقال قطبهای مختلط مزدوج نیاز به حل مسئله بهینه سازی غیرخطی مقید می باشد [5].

جغتیایی و محیی به بررسی کنترل سازه غیرخطی پرداختند. در این مطالعه برای بدست آوردن ماتریس وزنی³ Q از بهینه سازی استفاده شده است. تابع هدف در مسئله بهینه سازی نیروی کنترل است که باید بیشینه گردد و قید این مسئله محدودیت جابجایی نسبی بیشینه از مقدار مجازش می باشد. این مسئله بهینه سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک⁴ انجام شده است. بعد از بدست آوردن ماتریس Q ، نیروی کنترل که به پاسخ سازه و ماتریس Q وابسته است در معادله حرکت قرار گرفته و در نهایت این معادله با استفاده از روش نیومارک⁵ حل شده است [6].

¹ Poles assignment

² Open loop

³ Weighted Matrix

⁴ Genetic Algorithm

⁵ Newmark

در زمینه اثر تاخیر زمانی¹ بر سیستم‌های سازه هم مطالعات فراوانی انجام شده است. به عنوان مثال می‌توان به مطالعه Guoping Cai و همکارش و اشاره کرد. در این مطالعه ابتدا با استفاده از تغییر متغیر معادله حالت اولیه که به نیروی کنترل در زمان‌های گذشته وابسته بود، شکل استاندارد دی به خود می‌گیرد و حال این معادله را می‌توان به راحتی حل نمود و این متغیر جدید را بدست آورد. پس از تعیین این متغیر جدید و حل یک انتگرال بصورت عددی که به اثر تاخیر زمانی هم وابسته است، متغیر حالت اولیه و در نتیجه پاسخ سازه بدست می‌آید. در این مطالعه اثر تاخیر زمانی بر الگوریتم کلاسیک خطی² بررسی شده است [7].

در مطالعه دیگری که توسط Guoping Cai و همکارش انجام شده، با همان رویکرد اشاره شده در مطالعه دیگرش (تاثیر تاخیر زمانی بر الگوریتم کلاسیک) مسئله تاخیر زمانی در سیستم نگاه شده است اما الگوریتم کنترلی مورد بررسی، الگوریتم آنی بوده که برای حل عددی این الگوریتم برای معادله حالت استاندارد شده از روش رونگ کوتا³ مرتبه چهار استفاده شده است [8].

همچنین در مقاله علمی که توسط A.K.Agrawal و همکارش به چاپ رسیده، روش‌های مختلف جبران اثر تاخیر زمانی بر روی سیستم‌های سازه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است که می‌توان به روش انتقال فازی، روش بازگشتی، حالت افزوده⁴، روش کنترل‌پذیری بر پایه رویت‌پذیری، روش Smith، روش تقریبی Pade اشاره نمود که با ارائه مثالی، اثر این روش‌ها با هم مقایسه شده است [9].

همچنین A. K. Agrawal و همکارش در مطالعه‌ای، ضمن بررسی اثر تاخیر زمانی در سیستم‌های چند درجه آزادی بصورت تقریبی و روش دقیق (روش فضای فازی)، با ارائه روشی میزان تاخیر زمانی بحرانی در سیستم‌های یک درجه آزادی تعیین شده است [10].

¹ Time Delay

² LQR

³ Runge Kutta

⁴ State-augmented

۱-۲-۲ بهینه‌سازی تعداد و مکان کنترلر^۱ در قاب

این مسئله در چند مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است. تفاوت عمده این مطالعات شامل تفاوت در نوع روش بهینه‌سازی، متغیر، تابع هدف و قیود بکاررفته در بهینه‌سازی، نوع الگوریتم کنترل فعال، نوع سازه بکار گرفته شده و نوع بارگذاری می‌باشد.

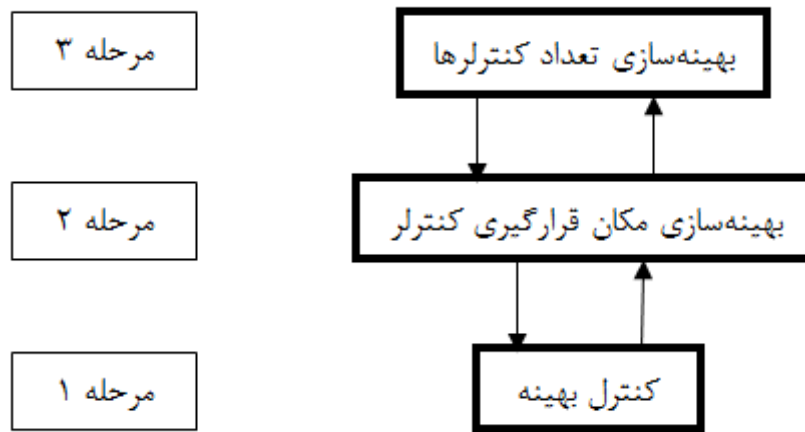
در مطالعه انجام گرفته توسط A.Rama Mohan Rao و همکارش از الگوریتم MSGNS که تلفیقی از دو الگوریتم EA (مثلا الگوریتم ژنتیک) و SA (سرد شدن تدریجی) است، برای بهینه‌سازی استفاده شده است [1]. در این مطالعه از چهار تابع هدف بیشینه جابجایی افقی، بیشینه جابجایی نسبی افقی، بیشینه شتاب مطلق افقی و متوسط نیروی کنترل بصورت مجزا استفاده شده است.

با توجه به چهار تابع هدف تعریف شده، از چهار فرمولاسیون مختلف برای بیان مسئله بهینه‌سازی استفاده شده که برای هر حالت از قیدهای مختلفی برای بهینه‌سازی استفاده شده است.

متغیر مسئله همان مکان کنترلرها می‌باشد. در حقیقت به تعداد تعداد طبقه ضربدر تعداد دهانه قاب متغیر فرض شده است. سازه مورد بررسی از نوع برشی و بارگذاری از نوع زلزله فرض شده و در ضمن از الگوریتم LQR به عنوان الگوریتم کنترل فعال استفاده شده است.

در مطالعه دیگر که توسط N.Zhang و همکارانش انجام شده، از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. در حقیقت این مسئله بهینه‌سازی در سه سطح انجام شده است و تابع هدف و قیودها در هر یک از این سطوح با دیگر سطوح متمایز شده است [11]. این سه مرحله در شکل ۱-۱ نشان داده شده است.

¹ Controller



شکل ۱-۱ مراحل انجام فرآیند بهینه‌سازی مکان و تعداد کنترلر (مطالعه N.Zhang و همکارانش)

شکل اجرایی این سه مرحله بدین صورت است که ابتدا یک مقدار مشخصی از کنترلر (N_0) را در نظر گرفته می‌شود. حال با این تعداد مشخص مراحل (۱) و (۲) برای تعیین مکان بهینه‌ای از کنترلر که محدودیت جابجایی مجاز را رعایت کند، انجام می‌شود. انجام این دو مرحله با استفاده از الگوریتم ژنتیک صورت می‌پذیرد. اگر مکان بهینه‌ای یافت نشد میزان کنترلر را به N_1 افزایش می‌یابد و مراحل (۱) و (۲) را با این تعداد انجام می‌شود. اگر به ازای N_0 کنترلر مکان بهینه تعیین شد در مرحله بعد میزان کنترلر را به N_2 کاهش می‌یابد و تا میزانی این کاهش صورت می‌پذیرد که به ازای یک واحد کمتر کنترلر از آخرین مقداری که به مکان بهینه دسترسی پیدا شد، مکان بهینه‌ای یافت نشود.

در این مطالعه نوع سازه برشی فرض شده که تحت بار زلزله واقع می‌شود.

در مطالعه دیگری که در همین رابطه توسط Franklin Y.cheng و همکارش انجام شده، تابع هدف برای دو نوع کنترلر Jet thrusters و کابل فعال بترتیب در روابط (۱-۱) و (۲-۱) ارائه شده است.

$$\rho_1 = \max \sqrt{\sum_{j=1}^n [\varphi_j(X)Y_j(t)]^2} \quad X \in [0,1] \quad (1-1)$$

$$\rho_2 = \max_{X \in [0,1]} \sqrt{\sum_{j=1}^n \left[\frac{\Delta[\varphi_j(X)]}{\Delta X} Y_j(t) \right]^2} \quad (2-1)$$

ρ_1 و ρ_2 به ترتیب برای دو حالت کنترلر لز نوع ۱ و ۲ می‌باشد. X درصدی از ارتفاع ساختمان است. n بیانگر تعداد مودهاست. $\varphi_j(X)$ و $Y_j(t)$ به ترتیب بیانگر شکل مودی و پاسخ بیشینه برای مود j است. همچنین $\Delta[\varphi_j(X)]$ بیانگر تفاضل مقدار مود j به ازای دو مکان X_1 و X_2 است و ΔX تفاضل این دو مکان است. در این مطالعه پیشنهاد شده است که به جای استفاده از شاخص‌های بیان شده در روابط (۱-۱) و (۲-۱) از شاخص‌های انرژی و پاسخ که بترتیب در روابط (۳-۱) و (۴-۱) تعریف می‌شود نیز می‌توان استفاده کرد:

$$J_E = \int_0^{t_f} \{u(t)\}^T \{u(t)\} dt \quad (3-1)$$

$$J_R = \int_0^{t_f} \{z(t)\}^T \{z(t)\} dt \quad (4-1)$$

بطوریکه t_f زمان نهایی است و J_E و J_R به ترتیب بیانگر شاخص‌های انرژی و پاسخ هستند که هدف این دو شاخص به ترتیب کمینه کردن نیروی کنترل و پاسخ سازه می‌باشد.

در این مطالعه از الگوریتم مودال استفاده شده و سازه برشی بکار رفته تحت بار زلزله واقع می‌شود [12]. در مطالعه‌ای که توسط Y.L.Yang و همکارانش انجام شده از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی کنترلر در ساختمان استفاده شده است. تابع هدف این مسئله مقدار پاسخ بیشینه (جابجایی مطلق طبقات و یا جابجایی نسبی بین دو طبقه) و متغیر این مسئله شامل همه مکان‌هایی است که مستعد جابجایی کنترلر باشد و مقدار این متغیر تنها شامل دو حالت صفر و یک می‌باشد [13].

در این مطالعه از الگوریتم LQR استفاده شده و سازه برشی بکار رفته تحت بار زلزله واقع شده است.

در دیگر مطالعه‌ای انجام شده در این زمینه توسط امینی و همکارش که هدف آن همانند دیگر مطالعات

مطرح شده، بهینه‌کردن نیروی کنترل و مکان و تعداد کنترلر است، این مسئله بهینه‌سازی را به دو مرحله تبدیل نموده و از دو تابع هدف متفاوت برای هر مرحله آن استفاده کرده است. در مرحله اول هدف کمینه‌کردن نیروی کنترل با رعایت محدودیت بیشینه جابجایی، سرعت و شتاب مطلق سازه است. در مرحله دوم هدف تعیین مکان و تعداد بهینه‌ای از کنترلر است تا علاوه بر رعایت محدودیت جابجایی سازه، نیروی کنترل نیز از حد مجاز فراتر نرود. با توجه به اهمیت جابجایی نسبی طبقات، این پارامتر به عنوان تابع هدف در این مرحله انتخاب شده است.

در این مطالعه از الگوریتم شبکه عصبی برای حل این مسئله بهینه‌سازی استفاده شده است و بهینه‌سازی بر روی سازه برشی تحت بارگذاری زلزله انجام شده است [14].

همچنین Q.S.Li و همکارانش اثر بهینه‌سازی تعداد و مکان کنترلر و نیروی کنترل را بر سازه برشی تحت رکورد باد بررسی کرده‌اند. نوع روش بهینه‌سازی، متغیر طراحی، تابع هدف و قید بکار رفته بر گرفته از مطالعه N.Zhang و همکارانش می‌باشد که پیشتر به آن اشاره شد [15].

۱-۳ اهداف پژوهش

همانطور که در قسمت قبل تشریح شد، در اکثر مطالعات قبلی که در این زمینه (بهینه‌سازی مکان و تعداد کنترلر در قاب دو بعدی) انجام شده، فقط از یک الگوریتم کنترلی که اثر تاخیر زمانی در نیروی کنترل آن لحاظ نشده است، استفاده شده است. در ضمن در آن مطالعات رفتار سازه خطی فرض شده و سازه از دیدگاه برشی مورد استفاده قرار گرفته است و همچنین از یک سری تابع هدف و قیود خاص برای انجان بهینه‌سازی استفاده شده است. اما در این پژوهش این مسئله با رویکردهای متفاوتی حل شده است. که این رویکردها عبارت است از:

- رفتار خطی یا غیرخطی اعضای سازه

- استفاده از الگوریتم‌های کنترلی مختلف شامل الگوریتم‌های کلاسیک (LQR)، آنی، مودال و جابجایی قطب‌ها در حالت بهینه
 - بررسی رفتار قاب از لحاظ برشی یا غیربرشی
 - استفاده از تابع هدف و قیود مختلف
 - استفاده از دو نوع بارگذاری زلزله و باد و نیز بررسی تاثیر شدت و نوع بار زلزله بر پاسخ نهایی
- الگوریتم بهینه‌سازی مورد استفاده در پژوهش، ژنتیک می‌باشد. نوع الگوریتم ژنتیک، گسسته و یا دودویی است. در تمام حالت‌های بهینه‌سازی از یک نوع کنترلر خاص (کابل فعال) استفاده می‌شود.

۱-۴ مروری بر فصول پژوهش

در طی انجام این پایان‌نامه سعی شده است که فقط به ذکر نکات مربوط به موضوع پژوهش پرداخته شود و تا حد ممکن سعی گردیده از مطلب اضافی و یا اثبات روابط پرهیز شود.

در فصل دوم ابتدا شرح مختصر از کلیات بهینه‌سازی و روش‌های موجود داده شده و سپس الگوریتم ژنتیک گسسته تشریح می‌گردد.

فصل سوم در ۴ بخش به تشریح کنترل فعال می‌پردازد. بخش اول به تشریح چهار الگوریتم مورد استفاده در پژوهش (کلاسیک، آنی، مودال و جابجایی قطب‌ها) در حالت‌های بهینه و با فرض رفتار خطی اعضای سازه‌ای می‌پردازد. بخش دوم ماتریس‌های مختلف بکار رفته در معادله حرکت و یا معادله حالت شامل ماتریس جرم، سختی، میرایی و ماتریس مکان کنترلر را بررسی می‌کند. بخش سوم به بررسی الگوریتم کلاسیک با فرض رفتار غیرخطی اعضای سازه می‌پردازد. در آخرین بخش اثر تاخیر زمانی بوجود آمده در سیستم‌های کنترلی و نحوه تاثیر این اثر بر الگوریتم‌های کنترل و نحوه جبران این اثر بر الگوریتم‌ها تشریح می‌گردد. برای جبران این اثر از دو روش انتگرال‌گیری و بسط تیلور استفاده می‌گردد.

فصل چهارم راجع به مباحث آیین‌نامه‌ای است که در دو بخش ارائه می‌گردد که بخش اول راجع به نحوه انتخاب و مقیاس رکوردها برای دو حالت سازه با رفتار خطی و سازه با رفتار غیرخطی و نیز نحوه تولید بار باد به دو صورت استاتیکی و دینامیکی بر مبنای آیین‌نامه می‌پردازد و در بخش دوم نحوه اعمال این بارها بر سازه و نیز محدودیت پاسخ‌های آیین‌نامه‌ای برای بارهای زلزله و باد تشریح می‌گردد.

در فصل پنجم راجع به صحت‌سنجی می‌باشد که در بخش‌های مختلف به صحت‌سنجی الگوریتم‌ها بکار رفته در پژوهش برای دو حالت سازه با رفتار خطی و سازه با رفتار غیرخطی، اثر تاخیر زمانی بر پاسخ سیستم و بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک می‌پردازد.

در فصل ششم ابتدا نحوه مدل‌سازی فرضیات بکار رفته در نرم‌افزار (Matlab) برای الگوریتم‌های مختلف کنترلی و نحوه بهینه‌سازی و نوع سازه‌های بکار رفته برای انجام فرآیند بهینه‌سازی و نیز چگونگی تولید رکوردهای زلزله و باد تشریح می‌گردد و سپس در بخش دوم نتایج تحت رویکردهای مختلفی که در قسمت اهداف پژوهش بیان گردید، ارائه می‌گردد.

در فصل هفتم ابتدا نتایج بدست آمده از فصل ششم تحلیل می‌گردد و سپس پیشنهاداتی برای پژوهش‌های آتی که بصورت جامع‌تر و کاربردی‌تر به این مسئله بهینه‌سازی نگریسته شود، ارائه می‌گردد.

فصل ۲: بهینه‌سازی

۲-۱ مقدمه

بهینه‌سازی به تحلیل مسائلی می‌پردازد که در آنها حداقل یا حداکثر کردن یک یا چند تابع حقیقی اهمیت داشته باشد. در بسیاری از مسائل بهینه‌سازی تنها یک جواب بهینه وجود دارد و برای برخی از مسائل چند جواب بهینه یافت می‌شود، مانند یافتن صفرهای یک تابع چندریشه‌ای.

هر مسئله بهینه‌سازی دارای سه بخش اصلی تابع هدف، محدودیت‌ها و متغیرهای تصمیم‌گیری می‌باشد.

بهینه‌سازی به دنبال حداقل و یا حداکثر نمودن یک تابع حقیقی (تابع هدف) از طریق جستجوی سیستماتیک مقادیر متغیرهای حقیقی یا صحیح (متغیرهای تصمیم‌گیری) از یک مجموعه مجاز (فضای امکان‌پذیر که با توجه به محدودیت‌ها تعریف می‌شود) است.

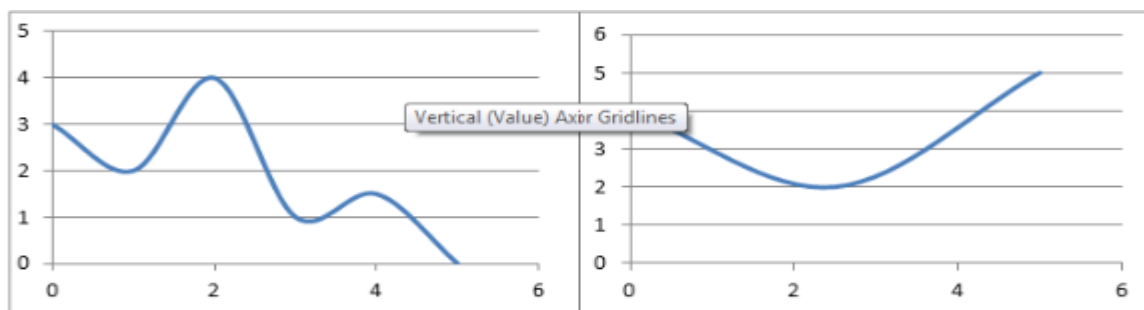
مجموعه کل گزینه‌های امکان‌پذیر، فضای تصمیم را تشکیل می‌دهد. در بسیاری از مسائل فضای تصمیم‌گیری نقاط محدودی دارد. در این حالت، مسئله تصمیم‌گیری یک مسئله گسسته است. در حالتی که فضای تصمیم‌گیری نقاط نامحدودی داشته باشد، مسئله بهینه‌سازی، یک مسئله پیوسته محسوب می‌شود.

کلیه مسائل بهینه‌سازی با محدودیت‌هایی مواجه هستند که ناشی از محدودیت‌های منابع مالی و فن‌آوری

قابل استفاده و یا محدودیت‌های فیزیکی، اجتماعی و زیست‌محیطی هستند. این موارد، محدودیت‌های^۱ مسئله محسوب می‌شوند که مرزهای فضای تصمیم را تشکیل می‌دهند.

در فرآیند تصمیم‌گیری، کمی نمودن میزان مناسب بودن گزینه‌ها نیازمند معیار و یا معیارهایی می‌باشد. در صورتی که تنها یک معیار مورد توجه قرار گیرد، بهینه‌سازی تک معیاره است و اگر تصمیم‌گیری بر اساس چندین معیار صورت گیرد، بهینه‌سازی چندمعیاره می‌باشد که معمولاً اثر ترکیبی آنها در قالب یک تابع ریاضی کمی می‌شود که تابع هدف^۲ و یا تابع ارزیابی نامیده می‌شود.

بطور کلی، زمانی که فضای امکان‌پذیر و یا تابع هدف شرط تحدب را ارضا ننمایند، مسئله ممکن است دارای تعداد زیادی نقاط حداقل و یا حداکثر محلی باشد. اما توابع محدب فقط یک حداقل (و یا حداکثر) می‌باشند. بسیاری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی، در حل مسائل غیرمحدب، قادر به تشخیص نقاط بهینه محلی از بهینه عمومی نیستند. دو شکل زیر به ترتیب اشکال محدب و غیر محدب می‌باشند.



شکل ۲-۱: شکل سمت راست بیانگر تابع محدب و شکل سمت چپ بیانگر تابع غیرمحدب

۲-۲ طبقه‌بندی روش‌های بهینه‌سازی

روش‌های عددی که در آنها، در یک زمان تنها یک نقطه مورد جستجو قرار می‌گیرد. هر چند که پیاده سازی این روش‌ها ساده است، ممکن است تعداد نقاطی که مورد جستجوی مستقیم قرار می‌دهند، بسیار زیاد باشد و به همین دلیل این روش‌ها راندمان کمی در جستجوی فضای مجاز تصمیم نسبت به سایر

¹ Constraints

² Goal Function

روش‌های مورد بحث در این بخش دارند [16].

روش‌های ریاضی که در آنها فضای جستجو به شکل یک تابع چند بعدی پیوسته در نظر گرفته شده و با استفاده از مشتق‌گیری از تابع مورد نظر، مقدار بهینه مشخص می‌شود. روش‌های غیرمستقیم از این اصل که مقدار مشتق تابع در نقاط اکسترمم برابر صفر است، استفاده می‌کنند.

روش‌های جستجوی تصادفی هدایت شده یا روش‌های اکتشافی از اطلاعات کسب شده در روش منتخب جستجو به عنوان راهنمایی برای انتخاب احتمالی نقطه یا نقاط مناسب بعدی، استفاده می‌کنند این روش‌ها قابلیت حل مسئله پیچیده بسیاری را دارند و به همین دلیل نسبت به هر دو دسته روش‌های عددی و ریاضی دارای مزیت‌های خاصی هستند.

یکی از انواع روش جستجو تصادفی هدایت شده، روش‌های تکاملی می‌باشد. این روش‌ها براساس تئوری تکامل انتخاب طبیعی داروین پایه‌گذاری شده‌اند. در این روش‌ها، یک جمعیت از طریق انتخاب اعضای بهتر و کنار گذاشتن اعضای پست‌تر در طی فرآیند تولید مثل و تکامل، بهبود می‌یابد. هر نقطه در فضای جستجو توسط یک بردار از مقادیر واقعی نشان داده می‌شود. در استراتژی‌های تکاملی اولیه، نقطه بعدی جستجو با اضافه نمودن اغتشاشات تصادفی گوسی به نقطه کنونی بدست می‌آید. نقطه جدید مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، اگر نقطه جدید قابلیت بهبود تابع برازش را داشته باشد، ادامه جستجو بر اساس مقدار جدید خواهد بود، در غیر این صورت، الگوریتم جستجوی خود را بر اساس مقدار قبلی ادامه خواهد داد. معمولاً اغتشاشات بگونه‌ای تنظیم خواهد شد که به طور متوسط درصدی (مثلاً ۲۰٪) از نقاط جدید قابل قبول باشد. این الگوریتم‌ها در سه دسته بزرگ الگوریتم‌های ژنتیک، برنامه‌ریزی تکاملی و استراتژی‌های تکاملی طبقه‌بندی می‌شوند. در ادامه مطالب الگوریتم ژنتیک تشریح می‌گردد.

۲-۳ الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک، یک روش جستجو و بهینه‌سازی بر اساس اصول تکامل طبیعی است. این روش در دسته الگوریتم‌های بهینه‌سازی که قادر به یافتن جواب بهینه عمومی و یا جواب‌هایی که نزدیک به آنها هستند، قرار دارد. الگوریتم ژنتیک اجازه می‌دهد یک جمعیت متشکل از تعداد زیادی افراد که تحت قوانین انتخاب ویژه‌ای تشکیل شده‌اند، در طی فرآیند تکامل تابع برازش را بهینه نماید [16].

۲-۳-۱ مزیت‌های الگوریتم ژنتیک نسبت به سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی

- قابلیت بهینه‌سازی در فضای پیوسته یا گسسته را دارد.
- نیازی به اطلاعاتی در مورد مشتق تابع ندارد.
- قابلیت کار با تعداد زیادی متغیر تصمیم را دارد.
- بهینه‌سازی توابع بسیار پیچیده را می‌توان با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام داد.
- امکان استفاده از مقادیر کدگذاری شده متغیرها به جای استفاده از خود آنها را فراهم می‌کند.
- با داده‌های تولید شده عددی، تجربی یا توابع تحلیلی کار می‌کند.
- از قوانین احتمالی در هدایت فرآیند جستجو به جای قوانین قطعی استفاده می‌کند.

الگوریتم ژنتیک با ایجاد یک جمعیت اولیه از کروموزوم‌ها شروع می‌شود. به عبارت دیگر کروموزوم‌ها، رشته‌هایی از مقادیر پیشنهادی برای متغیرهای تصمیم مسئله هستند و هر یک نمایانگر یک پاسخ محتمل برای مسئله هستند. در مرحله بعد، این کروموزوم‌ها با توجه بهینه‌سازی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند و کروموزوم‌هایی که پاسخ‌های بهتری برای مسئله موردنظر محسوب می‌شوند، شانس بیشتری برای تولید مجدد جواب‌های مسئله پیدا می‌کنند. فرموله کردن تابع ارزیابی کروموزوم‌ها به نحوی که بر سرعت همگرایی محاسبات به سمت جواب بهینه عمومی کمک کند، حائز اهمیت زیادی است. چرا که در الگوریتم ژنتیک برای هر کروموزوم بایستی مقدار تابع ارزیابی محاسبه شود و چون معمولاً در بسیاری از

مسائل تعداد قابل ملاحظه‌ای کروموزوم‌ها وجود دارد، زمان بر بودن محاسبه تابع ارزیابی می‌تواند عملاً استفاده از الگوریتم ژنتیک را در برخی مسائل به لحاظ کاربردی غیرممکن کند. این الگوریتم قادر به یافتن جواب‌های بهینه در بسیاری از مواردی است که روش‌های بهینه‌سازی سنتی ناتوان می‌مانند. مثلاً برای توابعی که تعداد زیادی نقاط بهینه محلی (موضعی) دارند، روش‌های مبتنی بر اصول ریاضی قادر به حل مسئله نبوده و به زمان زیادی برای یافتن نقاط بهینه نیاز دارند اما الگوریتم ژنتیک قادر به حل اینگونه مسائل است. البته الگوریتم ژنتیک همواره الگوریتم خوبی نیست. مثلاً برای توابع مقعر، روش‌های سنتی در مدت زمان کوتاهی به جواب بهینه می‌رسد اما الگوریتم ژنتیک برای چنین توابعی زمانبر است.

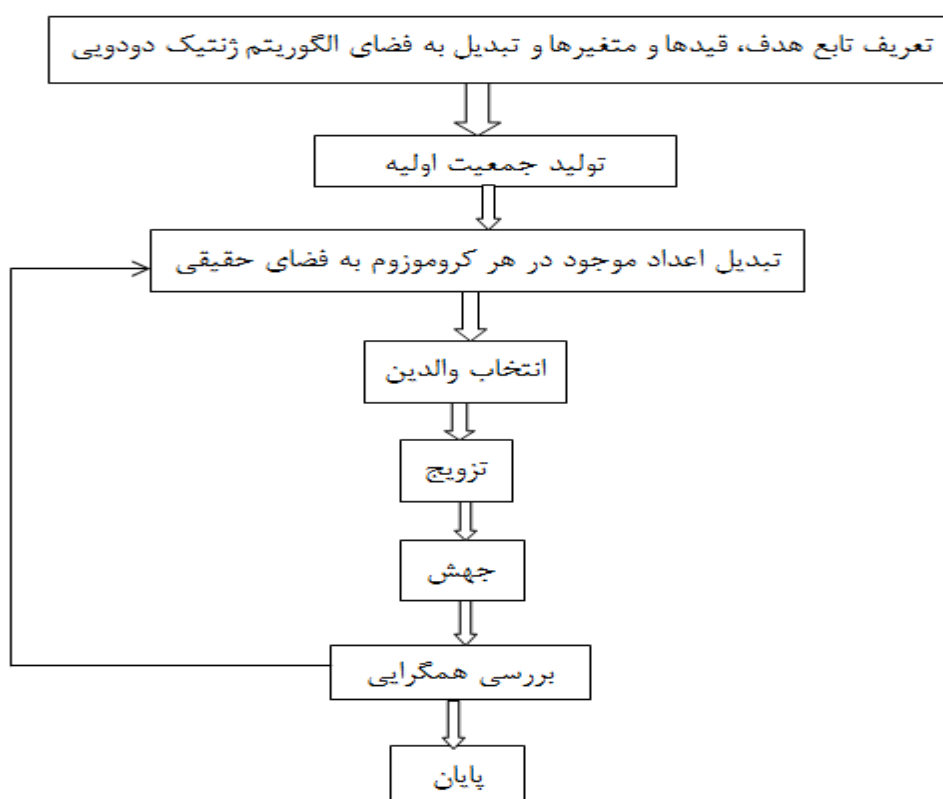
۲-۳-۲ کلمات کلیدی در الگوریتم ژنتیک

- ژنوتیپ (Genotype): نمایش متغیرهای یک مسئله در شکل یک رشته
- کروموزوم (Chromosome): یک رشته کدگذاری شده از متغیرها (دودویی، حقیقی و ...)
- فرد (Individual): یک یا بیشتر کروموزوم با مقدار برازش مربوطه
- ژن (Gene): نسخه کدگذاری شده یک متغیر
- آلل (Allele): مقداری که برای یک ژن می‌تواند فرض شود.
- مکان هندسی (Locus): موقعیتی که ژن در کروموزوم اشغال می‌کند.
- برازش (Fitness): مقدار کمی که نمایشگر کیفیت یک کروموزوم در یک مجموعه از جواب‌های مسئله است.
- جمعیت (Population): یک مجموعه از کروموزوم‌ها با مقادیر آماری مربوطه
- انتخاب (Selection): عملگری برای انتخاب یک کروموزوم از جمعیت به عنوان والد به منظور بازتولید
- تزیویج (Crossover): عملگری برای ادغام ژنوتیپ دو والد انتخاب شده برای تولید فرزندان جدید
- جهش (Mutation): عملگری که به طور ناگهانی یک یا چند آلل ژنوتیپ را تغییر می‌دهد.

الگوریتم ژنتیک را می‌توان به دو بخش الگوریتم ژنتیک دودویی^۱ (گسسته) و الگوریتم ژنتیک پیوسته^۲ تقسیم کرد. با توجه به اینکه در مطالعه بهینه‌سازی تعریف شده در این پایان نامه از الگوریتم ژنتیک دودویی استفاده شده است، بنابراین از تشریح الگوریتم ژنتیک پیوسته به دلیل ازدیاد مطالب خودداری می‌گردد.

۲-۳-۳ الگوریتم ژنتیک دودویی

نمودار جریان الگوریتم ژنتیک دودویی بصورت زیر است :



شکل ۲-۲: ساختار الگوریتم ژنتیک دودویی

در ادامه هر بخش از این الگوریتم که در شکل ۲-۲ قابل مشاهده است تشریح می‌گردد.

¹ Binary Genetic Algorithm

² Continuous Genetic Algorithm

۲-۳-۳-۱ انتخاب متغیرهای تصمیم و تابع هدف

روش الگوریتم ژنتیک با مشخص نمودن مجموعه‌ای از کروموزوم‌ها که هر کدام زنجیره‌ای از ژن‌های بهم پیوسته است و هر ژن نمایشگر یک متغیر تصمیم‌گیری از مسئله است، شروع می‌شود. فرض کنید مسئله‌ای دارای N متغیر بصورت p_1, p_2, \dots, p_N باشد. در این صورت هر کروموزوم بصورت رابطه (۱-۲) بیان می‌شود.

$$\text{کروموزوم} = [p_1, p_2, \dots, p_N] \quad (1-2)$$

هر کروموزوم دارای یک مقدار برازش است که با محاسبه مقدار تابع f (تابع برازش)، این مقدار بصورت رابطه (۲-۲) بدست می‌آید.

$$\text{برازش} = f(\text{کروموزوم}) = f[p_1, p_2, \dots, p_N] \quad (2-2)$$

انتخاب اولیه جمعیت بصورت دودویی می‌باشد. فرض می‌شود که بتوان هر ژن موجود در کروموزوم را در N_{bit} بیت بیان کرد. هر بیت شامل صفر یا یک است. با تعریف این تعداد بیت برای متغیر موردنظر، اعداد بین ۰ تا $2^{N_{bit}} - 1$ را می‌توان بصورت گسسته‌سازی شده در قالب $2^{N_{bit}}$ عدد با کد دودویی نمایش داد. به عبارت دیگر، بدین ترتیب با انتخاب تعداد N_{bit} بیت، فرض می‌شود تعداد $2^{N_{bit}}$ عدد، دقت کافی برای یافتن پاسخ بهینه در بازه عددی ذکر شده را فراهم می‌کند.

۲-۳-۳-۲ از کد خارج نمودن متغیرها

هنگام از کد خارج نمودن هر متغیر (محاسبه مقدار حقیقی متغیر از روی مقدار کد شده) به منظور ارزیابی و تعیین برازش آن، ابتدا باید مقداری به نام مقدار کمی شده متغیر (p_{quant}) را با استفاده از رابطه (۳-۲) محاسبه شود.

$$p_{quant} = \sum_{m=1}^{N_{bits}} \{gene[m]2^{-m}\} + 2^{-(N_{bit}+1)} \quad (3-2)$$

که $gene[m]$ مقدار عددی بیت m ام از رشته دودویی نشان دهنده متغیر موردنظر است. سپس مقدار متغیر در فضای استاندارد (مبنای ۱۰) از رابطه (۴-۲) بدست می آید.

$$q_n = p_{low} + (p_{up} - p_{low}) * p_{quant} \quad (4-2)$$

بطوریکه $[p_{low}, p_{up}]$ بیانگر بازه مجاز متغیر است. دقت محاسبات (e) از رابطه (۵-۲) بدست می آید.

$$e = \frac{1}{2^{N_{bits}}} * (p_{up} - p_{low}) \quad (5-2)$$

برای دقت معینی از محاسبات، تعداد بیت‌ها از رابطه (۶-۲) قابل محاسبه است.

$$N_{bits} = \log_2\left(\frac{p_{up} - p_{low}}{e}\right) \quad (6-2)$$

۲-۳-۳-۳ جمعیت

جمعیت دارای N_{pop} کروموزوم است و بنابراین می تواند با یک ماتریس $(N_{pop}, N_{Bits} \times N_{var})$ که با اعداد صفر و یک به طور تصادفی پر شده‌اند، نمایش داده شود.

$$pop = round[rand(N_{pop}, N_{Bits} \times N_{var})] \quad (7-2)$$

که تابع $rand(N_{pop}, N_{Bits} \times N_{var})$ یک ماتریس با تعداد ستون $N_{Bits} \times N_{var}$ و تعداد سطر N_{pop} از اعداد تصادفی بین صفر و یک تولید می کند. تابع $round$ اعداد را به نزدیک‌ترین مقدار صحیح که در این مورد صفر یا یک می باشد، گرد می کند. هر ردیف در ماتریس جمعیت یک کروموزوم را نشان می دهد.

۲-۳-۳-۴ انتخاب طبیعی

" بقای بهترین کروموزوم " اساس بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک را تشکیل می دهد. ابتدا تعداد

N_{pop} هزینه به ترتیب از کمترین هزینه به بیشترین هزینه مرتب می‌شوند. سپس بهترین کروموزوم‌ها برای ادامه فرآیند تکامل، انتخاب و بقیه حذف می‌شوند. این تعداد نگه داشته شده برای نسل بعد (N_{keep}) برابر است با:

$$N_{keep} = X_{rate} \times N_{pop} \quad (۸-۲)$$

X_{rate} نرخ انتخاب طبیعی می‌باشد که اغلب برابر ۰.۵ در نظر گرفته می‌شود. روش‌های زیادی در زمینه انتخاب موجود می‌باشد، برای جلوگیری از ازدیاد مطالب به بیان تنها یک روش بسنده می‌شود.

• روش انتخاب تصادفی وزنی

در این روش، احتمالی که برای هر یک از کروموزوم‌ها در نظر گرفته می‌شود با هزینه آن نسبت معکوس دارد. کروموزومی که دارای کمترین هزینه است دارای بیشترین احتمال انتخاب است و به کروموزومی که دارای بیشترین هزینه باشد، کمترین احتمال انتخاب تعلق می‌گیرد. یک عدد تصادفی وظیفه انتخاب یک کروموزوم از بین مجموعه کروموزوم‌های وزن‌دار را عهده‌دار است. این نوع انتخاب اغلب به عنوان روش انتخاب چرخ رولت وزنی نامیده می‌شود. در این مورد دو روش وجود دارد که در اینجا روش وزن‌دهی بر اساس هزینه تشریح می‌گردد.

▪ وزن‌دهی بر اساس هزینه: در این روش، احتمال انتخاب هر کروموزوم بر مبنای هزینه آن محاسبه می‌شود نه بر اساس رتبه آن کروموزوم در جمعیت. هزینه نرمال شده هر کروموزوم بر طبق رابطه (۹-۲) با کسر کمترین هزینه متناظر با کروموزوم برتر در مجموعه کروموزوم‌های حذف شده از مجموعه کروموزوم‌های والد ($C_{N_{keep}+1}$) از هزینه کروموزوم‌های والد (C_n) بدست می‌آید.

$$C_n = C_n - C_{N_{keep}+1} \quad (۹-۲)$$

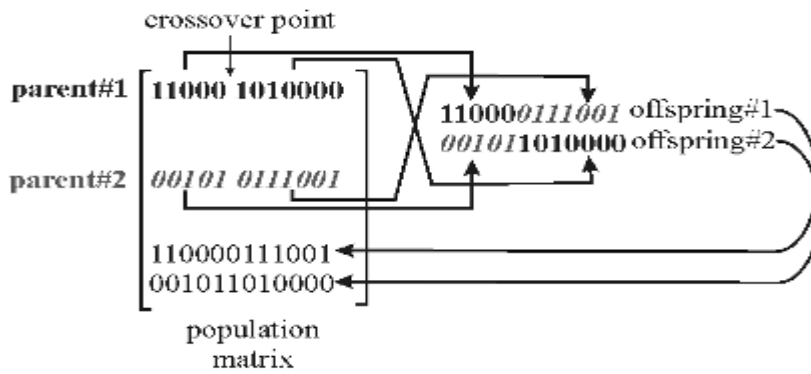
کسر $c_{N_{keep}+1}$ تضمین می‌کند که تمام هزینه‌های نرمال شده دارای مقادیر منفی باشند. مقدار P_n از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$P_n = \left| \frac{C_n}{\sum_m^{N_{keep}} C_m} \right| \quad (10-2)$$

۲-۳-۳-۵ تزویج

عملگر تزویج امکان ترکیب مشخصات دو کروموزوم را برای تولید جواب‌های جدید فراهم می‌کند. برای این منظور، دو کروموزوم از مجموعه N_{keep} برای تولید فرزندان انتخاب می‌شوند. تزویج کروموزوم‌ها تا زمانی انجام می‌گیرد که تعداد $N_{pop} - N_{keep}$ از کروموزوم‌ها کنار گذاشته شده‌اند، توسط فرزندان جدید جایگزین شوند.

رایج‌ترین شکل تزویج، تزویج یک نقطه‌ای است. برای انجام تزویج یک نقطه‌ای نقطه‌هایی به طور احتمالی از بین $l - 1$ (که در آن l طول کروموزوم است) نقطه موجود بین بیت‌های هر کروموزوم انتخاب می‌شود. که معمولاً این احتمال بصورت یکنواخت در نظر گرفته می‌شود. پس از تعیین محل تزویج، هر یک از والدین دو قسمت می‌شوند، یک بخش باقیمانده و بخش دیگر کسر نامیده می‌شوند. عمل تبادل بدین گونه صورت می‌گیرد که بخش باقیمانده یکی با کسر دیگری ترکیب می‌شود که در نتیجه این کار، دو جواب جدید بدست می‌آید. البته می‌توان محل تزویج را برای هر جفت فرزندی که قرار است تولید شود، با یک عدد تصادفی تولید کرد. چگونگی انجام تزویج یک نقطه‌ای در شکل ۲-۳ آمده است.



شکل ۲-۳ تزویج یک نقطه‌ای

۲-۳-۳-۶ جهش

اعمال جهش به هنگام حرکت از جمعیت حاضر به جمعیت جدید باعث می‌شود که میزان تنوع در جمعیت جدید بالا رود و این تنوع اساس تکامل و پیشرفت در رسیدن به جواب نهایی است. رویه کار بدین صورت است که بر اساس احتمال (نرخ) جهش، μ ، یکی از بیت‌ها انتخاب می‌شود و مقدار آن تغییر داده می‌شود. انتخاب بیت مورنظر برای اعمال جهش بدین صورت است که برای هر بیت یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت تولید می‌شود. چنانچه عدد تصادفی تولید شده برای یک بیت، از احتمال جهش μ کمتر باشد، جهش بر روی آن بیت اعمال می‌شود.

اعمال عملگرهایی نظیر جهش تضمین می‌کند که الگوریتم ژنتیک به جواب بهینه عمومی یا جواب‌های نزدیک به آن برسد. زیرا با اعمال این عملگر، نقاط اطراف کروموزوم‌های جمعیت نیز در مجموعه فضای جستجو قرار خواهند گرفت و در واقع یک جستجوی همسایگی انجام گرفته و فضای جستجو را جهت رسیدن به بهینه مطلق توسعه می‌دهد. مقدار احتمال جهش معمولاً بسیار کمتر از یک انتخاب می‌شود، زیرا مقدار بزرگ آن باعث می‌شود تا فرآیند جهش بر روی اکثر ژن‌ها انجام شود و زمان همگرایی روش، به علت افزایش احتمال تخریب جواب‌های مناسب حاصل شده تا آن مرحله، طولانی شود.

این فرآیند به جمعیت اولیه ویژگی‌هایی را می‌دهد که ممکن است در کروموزوم‌های جمعیت وجود نداشته باشند. همچنین این فرآیند از همگرایی سریع الگوریتم ژنتیک در بهینه‌های محلی، قبل از آنکه تمام

سطوح هزینه را جستجو نماید، ممانعت می کند. جهش یک نقطه‌ای در الگوریتم ژنتیک دودویی، عدد یک را به صفر و عدد صفر را به یک تبدیل می کند که شکل ۴-۲ فرآیند جهش را بر روی بیت ششم از یک کروموزوم نشان می دهد. افزایش تعداد جهش، آزادی الگوریتم را برای جستجو در فضای امکان پذیر افزایش می دهد. فرآیند جهش بر روی کروموزوم‌های نسل آخر انجام نمی شود.

$$00101100000001 \Rightarrow 00101000000001$$

شکل ۴-۲ جهش بر روی بیت ششم

بعد از اینکه عمل جهش انجام گرفت، هزینه‌های مربوط به کروموزوم‌های والد، فرزندان و کروموزوم‌های جهش یافته محاسبه می شود و فرآیندهای شرح داده شده تا رسیده به همگرایی، تکرار می گردد.

۲-۳-۳-۷ همگرایی

معیار توقف یا همگرایی می تواند یکی از معیارها یا ترکیبی از موارد زیر باشد:

- عدم بهبود بهترین جواب در طی چندین نسل
- عدم بهبود بهترین جواب طی تعداد نسل معین
- عدم بهبود بهترین جواب در طی مدت زمان معین.

زمانی که تمام کروموزوم‌ها و هزینه آنها یکسان شوند، الگوریتم بایستی متوقف شود.

فصل ۳: کنترل فعال

۱-۳ الگوریتم‌های کنترل

۱-۱-۳ مقدمه

در زمینه کنترل فعال سازه‌ها الگوریتم‌های زیادی ارائه شده است که برخی از آنها از تئوری کنترل مدرن برداشت شده است و برخی دیگر برای صرفاً کنترل سازه‌های عمرانی ارائه شده‌اند.

معادله حرکت سیستم با n درجه آزادی در رابطه زیر آمده است [17]:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = F_{dyn}(t) + Du(t) \quad x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \quad (1-3)$$

x بردار جابجایی و M ، C و K به ترتیب ماتریس جرم و میرایی و سختی بوده که دارای ابعاد $n \times n$ می‌باشند. F_{dyn} نیروی دینامیکی وارد بر سازه، $u(t)$ نیروی کنترل ایجاد شده در کنترلر و D ماتریس مکان کنترلر می‌باشند که بیانگر محل قرارگیری کنترلر در سازه می‌باشد و دارای ابعاد $n \times m$ (تعداد تعداد کنترلر می‌باشند).

اگر از کنترل حلقه باز- بسته استفاده شود در اینصورت نیروی کنترل به طور خطی وابسته به $x(t)$ و $\dot{x}(t)$ و $F_{dyn}(t)$ می‌باشد که رابطه (۲-۳) این وابستگی را نشان می‌دهد.

$$u(t) = K_1 x(t) + C_1 \dot{x}(t) + E_1 F_{dyn}(t) \quad (2-3)$$

با جایگذاری رابطه (۲-۳) در (۱-۳) داریم:

$$M\ddot{x}(t) + (C - DC_1)\dot{x}(t) + (K - DK_1)x(t) = (I + DE_1)F_{dyn}(t) \quad (3-3)$$

بنابراین از رابطه (۳-۳) مشاهده می‌شود که نیروی کنترل موجب اصلاح پارامترهای سازه‌ای (میرایی و سختی) و نیز کاهش نیروی دینامیکی وارد بر سیستم می‌شود. تعیین ماتریس‌های C_1 و K_1 و E_1 به نوع الگوریتم کنترلی بستگی دارد. در بیشتر مواقع بهتر است تا پارامترهای سازه‌ای بهبود یابند تا اینکه تاثیر بارگذاری خارجی را کاهش یابد.

نمایش معادله حرکت (۱-۳) در فضای حالت^۱ بصورت زیر بیان می‌شود:

$$\dot{z}(t) = Az(t) + Bu(t) + H(t) \quad z(0) = z_0 \quad (4-3)$$

$$z(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}, \quad H(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}F_{dyn}(t) \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}D \end{bmatrix}$$

$z(t)$ متغیر حالت بوده و دارای بعد $2n * 1$ می‌باشد. ماتریس‌های A ، B و H به ترتیب دارای ابعاد $2n * 2n$ ، $2n * r$ و $2n * m$ می‌باشند. در ادامه چند الگوریتم کنترل معرفی می‌شود.

۳-۱-۲ الگوریتم کنترل بهینه خطی کلاسیک

در این الگوریتم نیروی کنترل به نحوی تعیین می‌شود که شاخص عملکرد که برای کاربردهای سازه‌ای بصورت رابطه (۵-۳) تعریف می‌شود تحت قید معادله (۴-۳)، نسبت به نیروی کنترل کمینه گردد [18].

$$J = \int_{t_0}^{t_f} [z^T(t)Qz(t) + u^T(t)Ru(t)]dt \quad (5-3)$$

معمولاً زمان t_0 برابر با صفر و بازه $[0, t_f]$ معمولاً بزرگتر از زمان اعمال نیروی دینامیکی بر سازه فرض

¹ State Space

می‌شود. Q ماتریس مثبت نیمه‌قطعی که دارای بعد $2n \times 2n$ و R ماتریس مثبت قطعی دارای بعد $m \times m$ می‌باشند. با تغییر این دو ماتریس می‌توان به سطح دلخواهی از پاسخ سازه و نیروی کنترل رسید.

بعد از انجام فرآیند بهینه‌سازی معادلات (۶-۳) و (۷-۳) حاصل می‌گردد، که این معادلات با توجه به نوع فرضی که از متغیر λ خواهد شد، نتایج متفاوتی می‌دهد.

$$\dot{\lambda}^T = -A^T \lambda - 2Qz \quad \lambda^T(t_f) = 0 \quad (۶-۳)$$

$$u = -0.5R^{-1}B^T \lambda \quad (۷-۳)$$

یک نوع از فرض متغیر λ بدین صورت می‌باشد که این متغیر به متغیر حالت وابسته می‌باشد. این نوع فرض منجر به حالتی از الگوریتم کلاسیک می‌گردد که به اصطلاح به "کنترل حلقه بسته"^۱ معروف می‌باشد. در این حالت متغیر λ نسبتی خطی از متغیر حالت فرض می‌گردد.

$$\lambda(t) = P(t)z(t) \quad (۸-۳)$$

با جایگذاری رابطه (۸-۳) در روابط (۷-۳) و (۶-۳) و فرض صفربودن $F_{dyn}(t)$ و ثابت بودن ماتریس $P(t)$ ، این ماتریس از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$PA - 0.5PBR^{-1}B^T P + A^T P + 2Q = 0 \quad (۹-۳)$$

این معادله به معادله ریکاتی^۲ و ماتریس P به ماتریس ریکاتی معروف می‌باشد. با جایگذاری رابطه (۸-۳) در (۷-۳)، قانون کنترل بهینه خطی بصورت رابطه (۱۰-۳) بدست می‌آید:

$$u(t) = G(t)z(t) = -0.5R^{-1}B^T Pz(t) \quad (۱۰-۳)$$

^۱ Close loop Control

^۲ Riccati equation

$$G = -0.5R^{-1}B^T P \quad (۱۱-۳)$$

که G ماتریس بهره می‌باشد. حال می‌توان معادله حالت (۳-۴) را بصورت ساده شده زیر بیان کرد:

$$\dot{z}(t) = (A + BG)z(t) + H(t) \quad z(0) = z_0 \quad (۱۲-۳)$$

مشاهده می‌شود که تاثیر کنترل حلقه بسته در اصلاح مشخصات سازه می‌باشد. یعنی ماتریس A به ماتریس $A + BG$ تغییر می‌یابد. معادله (۳-۱۲) یک معادله دیفرانسیل مرتبه اول خطی و با ضرایب ثابت می‌باشد و می‌توان آن را با روش‌های عددی حل نمود. بعد از بدست آوردن متغیر حالت، از رابطه (۳-۱۰) نیروی کنترل بدست می‌آید.

۳-۱-۳ الگوریتم کنترل آنی بهینه

الگوریتم کلاسیک با توجه به تقریب‌هایی که به آن اشاره شد جواب دقیق بهینه را نمی‌دهد. با توجه به اینکه در هر لحظه خاص از نیروی دینامیکی فقط مقدار این نیرو در همان لحظه معین می‌باشد، بنابراین می‌توان از الگوریتمی استفاده کرد که مسئله بهینه‌سازی را برای هر لحظه مشخص بصورت مجزا انجام دهد. الگوریتم کنترل آنی این قابلیت را داراست. شاخص عملکرد بر زمان مشخص t بصورت زیر است [17]:

$$J(t) = z^T(t)Qz(t) + u^T(t)Ru(t) \quad (۱۳-۳)$$

برای هر لحظه مسئله بهینه‌سازی را با تابع هدف تعریف شده در رابطه (۳-۱۳) و قید معادله حرکتی که در ادامه بدست می‌آید و یا وجود قیود اضافی انجام می‌شود. در این الگوریتم فرض بر آن است که ماتریس A دارای مقادیر ویژه متمایز باشد. با انتقال معادله حالت (۳-۴) به فضای مودی با استفاده از تبدیل متغیر حالت حقیقی به فضای مودی و حل این معادله حالت جدید با روش‌های عددی مختلفی مانند سیمپسون [17] و یا رونگ کوتا [8]، معادله حرکت نهایی در رابطه (۳-۱۴) ارائه می‌شود.

$$z(t) = Td(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2} [Bu(t) + H(t)] \quad (14-3)$$

$$d(t - \Delta t) = e^{\Lambda \Delta t} T^{-1} \left\{ z(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2} [Bu(t - \Delta t) + H(t - \Delta t)] \right\} \quad (15-3)$$

$$\Lambda = T^{-1}AT \quad (16-3)$$

T ماتریس مودی بوده و دارای بعد $2n \times 2n$ است. ستون‌های این ماتریس شامل بردارهای ویژه ماتریس A است و ماتریس Λ قطری بوده و اعضای روی قطر آن مقادیر ویژه ماتریس A می‌باشند.

در معادلات بالا $e^{\Lambda \Delta t}$ ماتریسی قطری بوده که عنصر روی i امین قطر آن برابر $e^{\lambda_i \Delta t}$ می‌باشد. $d(t - \Delta t)$ شامل تمام مشخصات دینامیکی در لحظه $t - \Delta t$ است.

حال با تابع هدف بیان شده در رابطه (۱۳-۳) و قید حرکت (۱۴-۳)، مسئله بهینه‌سازی پیاده می‌شود که با فرض اینکه الگوریتم کنترل حلقه بسته باشد (ضریب لاگرانژ به متغیر حالت وابسته باشد) متغیر حالت و نیروی کنترل از روابط (۱۷-۳) و (۱۸-۳) بدست می‌آید.

$$z(t) = \left[I + \frac{\Delta t^2}{4} BR^{-1}B^TQ \right]^{-1} \left[Td(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2} H(t) \right] \quad (17-3)$$

$$u(t) = -\frac{\Delta t}{2} R^{-1}B^TQz(t) \quad (18-3)$$

با مقایسه روابط (۱۸-۳) و (۱۰-۳) این نتیجه حاصل می‌شود که در الگوریتم آنی بهینه ماتریس $\Delta t Q$ نقش ماتریس ریکاتی در الگوریتم کلاسیک بهینه را ایفا می‌کند و نیز در این الگوریتم مشاهده می‌شود که دیگر نیازی به حل معادله ریکاتی نیست که خود مزیتی محسوب می‌شود. ضمناً در این الگوریتم انتخاب ماتریس Q بایستی با دقت کافی همراه باشد.

۳-۱-۴ الگوریتم فضای مودال بهینه

در سازه‌هایی که از درجه آزادی بالایی برخوردار است، استفاده از دو الگوریتم اشاره شده از نظر

محاسباتی هزینه بر می باشد. برای چنین سازه‌ها نیاز به الگوریتمی است که فقط چند مود اول و تاثیرگذار را کنترل نماید. الگوریتم مودال بهینه قادر به انجام چنین کاری می باشد. این الگوریتم در حقیقت تلفیقی از الگوریتم کلاسیک بهینه و تجزیه مودی درجات آزادی سازه می باشد.

متغیر موجود در رابطه (۱-۳)، توسط رابطه زیر وارد فضای مودی می شود [2]:

$$x(t) = \phi q(t) \quad (۱۹-۳)$$

Φ ماتریس مودال و q بردار جابجایی مودال است. با اعمال رابطه (۱۹-۳) در رابطه (۱-۳) معادله حرکت بصورت رابطه (۲۰-۳) تغییر می یابد.

$$\ddot{q}(t) + \text{diag}(2\xi_j \omega_j) \dot{q}(t) + \text{diag}(\omega_j^2) q(t) = V(t) + W(t) \quad (۲۰-۳)$$

$$\text{diag}(2\xi_j \omega_j) = M^{*-1} C^* \quad , \quad \text{diag}(\omega_j^2) = M^{*-1} K^* \quad (۲۱-۳)$$

$$M^* = \phi^T M \phi = \text{diag}(m_j^*) \quad , \quad C^* = \phi^T C \phi = \text{diag}(c_j^*) \quad (۲۲-۳)$$

$$K^* = \phi^T K \phi = \text{diag}(k_j^*) \quad , \quad V(t) = M^{*-1} \phi^T D u(t) = L u(t) \quad (۲۳-۳)$$

$$W(t) = M^{*-1} \phi^T F_{dyn}(t) = N F_{dyn}(t) \quad , \quad L = M^{*-1} \phi^T D \quad (۲۴-۳)$$

$$N = M^{*-1} \phi^T I \quad (۲۵-۳)$$

برای کاربردهای عملی معمولاً r مود اول مورد بررسی قرار می گیرد. بنابراین برای این r مود، معادله (۲۰-۳) بصورت رابطه (۲۶-۳) تغییر می کند.

$$\ddot{q}_c(t) + \text{diag}(2\xi_{jc} \omega_{jc}) \dot{q}_c(t) + \text{diag}(\omega_{jc}^2) q_c(t) = V_c(t) + W_c(t) \quad (۲۶-۳)$$

$$j = 1, 2, \dots, r$$

$$V_c(t) = L_c u(t) \quad , \quad W_c(t) = N_c F_{dyn}(t) \quad L_c = L_{r \times m} \quad , \quad N_c = N_{r \times n} \quad (27-3)$$

متغیر q_c بردار جابجایی برای r مود اول می باشد که معمولاً از نظر ابعاد بسیار کوچکتر از q است. حال الگوریتم کلاسیک بهینه بر روی معادله حرکت (۳-۲۶) پیاده می شود. معادله حالت و ماتریس های اشاره شده در رابطه (۳-۶) برای این معادله حرکت در روابط (۳-۲۸) و (۳-۳۰) ارائه می شود.

$$\dot{z}_c(t) = Az_c(t) + Bu(t) + H(t) \quad z_c(0) = z_{c0} \quad (28-3)$$

$$z_c(t) = \begin{bmatrix} q_c(t) \\ \dot{q}_c(t) \end{bmatrix} \quad , \quad A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -diag(\omega_{jc}^2) & -diag(2\xi_{jc}\omega_{jc}) \end{bmatrix} \quad (29-3)$$

$$H = \begin{bmatrix} 0 \\ N_c \end{bmatrix} \quad , \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ L_c \end{bmatrix} \quad (30-3)$$

حال به همان ترتیبی که در الگوریتم کلاسیک به آن اشاره شده می توان z_c و نیروی کنترل را بدست آورد. این نیروی کنترل که از فرآیند بالا بدست می آید فقط پاسخ مودهای مودنظر را کاهش می دهد و اثر این نیرو برای مودهای بالاتر مانند بارگذاری خارجی می باشد. این اثر در بعضی از مواقع مثبت بوده و باعث کاهش مودهای بالاتر می گردد و در بعضی مواقع اثر منفی روی مودهای بالاتر دارد و باید این اثر را در پاسخ کلی سازه لحاظ شود. مانند سازه های انعطاف پذیر که باید اثر نیروی کنترل در مودهای بالاتر بررسی شود. معادله حرکت برای این مودهای کنترل نشده بصورت رابطه (۳-۳۱) است.

$$\ddot{q}_u(t) + diag(2\xi_{ju}\omega_{jc})\dot{q}_u(t) + diag(\omega_{ju}^2)q_u(t) = f_u(t) \quad (31-3)$$

$$j = r + 1, r + 2, \dots, n$$

$$f_u(t) = V_u(t) + W_u(t) \quad V_u(t) = L_u u(t) \quad , \quad W_u(t) = N_u F_{dyn}(t) \quad (32-3)$$

$$L_u = L_{(n-r) \times m} \quad , \quad N_u = N_{(n-r) \times n} \quad (33-3)$$

متغیر q_u بردار جابجایی مودهای کنترل نشده است. $f_u(t)$ بیانگر بارگذاری خارجی بر روی مودهای

کنترل نشده است. بعد از بدست آوردن q_c و q_u بطور جداگانه، بردار جابجایی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$x(t) = \phi \begin{bmatrix} q_c \\ q_u \end{bmatrix} \quad (34-3)$$

۳-۱-۵ الگوریتم جانشانی بهینه قطب‌ها

یکی از روش‌های تعیین ماتریس وزنی یک سیستم خطی، انتقال قطب‌های سیستم حلقه باز به مکان‌های از قبل تعیین شده می‌باشد. این روش قابلیت انتقال قطب‌های حقیقی و مختلط را برای سیستم‌های پیوسته دارد. شکل کلی قطب‌های حلقه باز سیستم سازه‌ای بصورت رابطه زیر است [17]:

$$\lambda_i = \xi_i \omega_i \pm j \omega_i \sqrt{1 - \xi_i^2} \quad ; \quad j = \sqrt{-1} \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, 2n \quad (35-3)$$

هدف کلی در روش جانشانی قطب‌ها بدین صورت است که این قطب‌ها به مکان‌هایی از قبل تعیین شده انتقال یابد. فرآیند کلی بدین صورت است که ابتدا کل سیستم به فضای مودی تبدیل شده و سپس قطب‌های هر مود بصورت مجزا و با استفاده از روش‌های مختلف به مکان‌های دلخواه انتقال می‌یابد.

با استفاده از تبدیل زیر بردار حالت وارد فضای مودی می‌شود [5]:

$$z_r(t) = T_r^T z(t) \quad T^T \in R^{r \times n} \quad , \quad z_r(t) \in R^r \quad , \quad r < n \quad (36-3)$$

T ماتریس متشکل از بردارهای ویژه ماتریس A است. و T_r ستونی از T مربوط به مود r ام می‌باشد. با استفاده از رابطه (۳۶-۳) و اعمال به روابط (۳-۴) و (۳-۱۰)، شکل تغییر یافته معادله حالت و قانون کنترل بهینه خطی بصورت روابط زیر می‌باشد:

$$\dot{z}_r(t) = A_r z_r(t) + B_r u(t) \quad (37-3)$$

$$u(t) = G_r z_r(t) \quad (38-3)$$

$$T_r^T A = A_r T_r^T, \quad B_r = T_r^T B, \quad G = G_r T_r^T \quad (39-3)$$

شاخص عملکرد سیستم گسسته در فضای جدید مودی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$J_r = \int_{t_0}^{t_f} [z_r^T(t) Q z_r(t) + u^T(t) u(t)] dt \quad (40-3)$$

$$Q = T_r Q_r T_r^T \quad (41-3)$$

بعد از تعریف معادلات در فضای جدید، روند انتقال هر قطب در فضای مودی تشریح می‌شود. این فرآیند برای قطب‌های حقیقی و مختلط مزدوج تفاوت بسیاری دارد.

۳-۱-۵-۱ انتقال یک قطب حقیقی به مکان دلخواه

هدف انتقال مقدار ویژه حقیقی λ به مکان μ است. در این حالت معادله (۳۷-۳) بصورت زیر بازسازی می‌شود [5]:

$$\dot{z}_r(t) = \lambda z_r(t) + B_r u(t) \quad (42-3)$$

رابطه مقدار ویژه سیستم اولیه (λ) و سیستم ثانویه (μ) بدون بیان اثبات، بصورت زیر می‌باشد:

$$\mu = \lambda - B_r B_r^T P \quad \rightarrow \quad P = \frac{(\lambda - \mu)}{B_r B_r^T} \quad (43-3)$$

و ماتریس حالت وزنی سیستم از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$Q_r = -2\lambda P + P B_r B_r^T P \quad (44-3)$$

۳-۱-۵-۲ انتقال قطب‌های مختلط مزدوج به مکان‌های دلخواه

در این حالت می‌توان یک زوج مختلط مزدوج را به زوج مختلط مزدوج دیگری تبدیل کرد، و یا می‌توان یک زوج از مقادیر ویژه حقیقی را به زوج مختلط مزدوج یا زوج حقیقی دیگری تبدیل نمود.

روابط (۳-۳۶) تا (۳-۴۱) در اینجا برقرار می‌باشند با این تفاوت که ماتریس T_r مربوط به دو ستونی از T می‌شود که مقادیر ویژه این دو ستون باید انتقال یابد. ماتریس‌های A_r و B_r بصورت زیر می‌باشند:

$$A_r = \begin{bmatrix} \alpha & \beta \\ -\beta & \eta \end{bmatrix} \quad B_r = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \quad (۳-۴۵)$$

در این پژوهش برای انتقال قطب‌های مختلط مزدوج از الگوریتم بروگان^۱ استفاده شده که این الگوریتم در ادامه تشریح می‌شود [17]:

همانطور که قبلاً بیان شد μ مقادیر ویژه اولیه می‌باشد که دارای فرم کلی زیر است:

$$\mu = [\alpha + i\beta ; \alpha - i\beta] \quad (۳-۴۶)$$

سپس ماتریسی بصورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\phi = (\mu * I_2 - A_r)^{-1} * B_r \quad (۳-۴۷)$$

حال می‌توان ماتریس بهره را از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$G_r = \phi^{-1} \quad (۳-۴۸)$$

اگر هدف انتقال چند مقدار ویژه باشد، به ازای هر مقدار ویژه حقیقی (و یا هر زوج مختلط مزدوج) یک ماتریس بهره با استفاده از روابط بیان شده بدست می‌آید و سپس با استفاده (۳-۳۹) ماتریس بهره کلی برای هر انتقال بدست می‌آید و سپس مجموع همه ماتریس‌های بهره کلی بدست آمده پس از هر انتقال به عنوان ماتریس بهره نهایی G_{ult} نتیجه می‌شود. این ماتریس بهره همه قطب‌ها را به مکان‌های موردنظر انتقال می‌دهد که با داشتن آن معادله حالت به فرم زیر در می‌آید:

$$\dot{z}(t) = (A + BG_{ult})z(t) + H(t) \quad z(0) = z_0 \quad (۳-۴۹)$$

¹ Brogan

۳-۲ ماتریس‌های سازه‌ای

۳-۲-۱ قاب برشی

همانطور که قبلاً بیان شد معادله حاکم بر سیستم n درجه آزادی تحت نیروی کنترل بصورت زیر است:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = F_{dyn}(t) + Du(t) \quad (۵۰-۳)$$

قاب‌هایی که تیرهای آن از سختی کافی برخوردارند بطوریکه بتوان از دوران اتصالات تیر به ستون چشم‌پوشی کرد، را قاب برشی می‌نامند. برای تحلیل دینامیکی چنین قاب‌هایی کفایت که برای هر طبقه، فقط یک درجه آزادی از نوع جابجایی اختصاص یابد. به این ترتیب قاب برشی با n طبقه، n درجه آزادی دارد. شکل کلی ماتریس‌های جرم و سختی برای قاب برشی بصورت روابط زیر است [18]:

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & m_n \end{bmatrix} \quad (۵۱-۳)$$

$$K = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & \dots & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & k_n \end{bmatrix} \quad (۵۲-۳)$$

m_i و k_i به ترتیب جرم و سختی طبقه i ام می‌باشد. جرم هر طبقه برابر مجموع جرم تیرها و بارهای زنده و مرده آن طبقه و نصف ستون‌های وارد بر آن طبقه می‌باشد. سختی هر طبقه نیز از مجموع سختی ستون‌های آن طبقه بدست می‌آید. سختی ستون نیز از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$k_i = \sum_{j=1}^{noc} \frac{12EI_j}{h_i^3} \quad (۵۳-۳)$$

noc برابر تعداد ستون‌ها، E مدول الاستیسیته، h_i ارتفاع طبقه i و I_j ممان اینرسی ستون j است.

همانطور که در ماتریس‌های جرم و سختی مشاهده می‌شود، برای قاب برشی، این ماتریس‌ها دارای

چیدمان مشخصی هستند، یعنی ماتریس جرم قطری و ماتریس سختی سه قطری می‌باشد.

۳-۲-۲ قاب غیربرشی

در بعضی از قاب‌ها سختی تیرها به اندازه‌ای نیست که بتوان از دوران اتصالات تیر به ستون چشم‌پوشی کرد. با فرض رفتار برشی در این قاب‌ها، نتایج آنالیز دینامیکی چنین قابی نسبت به رفتار واقعی قاب با خطای قابل ملاحظه‌ای همراه می‌باشد. این قاب‌ها از نوع غیربرشی می‌باشند و برای آنالیز چنین قابی باید از تحلیل ماتریسی قاب بهره برد. در چنین تحلیلی، هر اتصال و یا گره در قاب شامل سه درجه آزادی (دو تا جابجایی و یک دورانی) می‌باشد. ابتدا باید ماتریس جرم و سختی برای هر عضو از چنین قابی را تشکیل داد و سپس در یک ماتریس جرم و سختی کلی، همه ریز ماتریس‌ها مربوط به هر عضو در ماتریس کلی وارد می‌شوند. ماتریس جرم و سختی در چنین حالتی برای هر عضو از قاب در مختصات محلی از روابط زیر بدست می‌آید [18]:

$$K_i = \begin{bmatrix} A_i E / L_i & 0 & 0 & -A_i E / L_i & 0 & 0 \\ 0 & 12 E I_i / L_i^3 & 6 E I_i / L_i^2 & 0 & -12 E I_i / L_i^3 & 6 E I_i / L_i^2 \\ 0 & 6 E I_i / L_i^2 & 4 E I_i / L_i & 0 & -6 E I_i / L_i^2 & 2 E I_i / L_i \\ -A_i E / L_i & 0 & 0 & A_i E / L_i & 0 & 0 \\ 0 & -12 E I_i / L_i^3 & -6 E I_i / L_i^2 & 0 & 12 E I_i / L_i^3 & -6 E I_i / L_i^2 \\ 0 & 6 E I_i / L_i^2 & 2 E I_i / L_i & 0 & -6 E I_i / L_i^2 & 4 E I_i / L_i \end{bmatrix} \quad (54-3)$$

$$M_i = \frac{\bar{m}_i L_i}{210} \begin{bmatrix} 70 & 0 & 0 & 35 & 0 & 0 \\ 0 & 78 & 11 L_i & 0 & 27 & -6.5 L_i \\ 0 & 11 L_i & 2 L_i^2 & 0 & 6.5 L_i & -1.5 L_i^2 \\ 35 & 0 & 0 & 70 & 0 & 0 \\ 0 & 27 & 6.5 L_i & 0 & 78 & -11 L_i \\ 0 & -6.5 L_i & -1.5 L_i^2 & 0 & -11 L_i & 2 L_i^2 \end{bmatrix} \quad (55-3)$$

بطوریکه A_i ، L_i و I_i به ترتیب سطح مقطع، طول، ممان اینرسی و جرم بر واحد طول از عضو i است. ماتریس‌های بیان شده در (۵۴-۳) و (۵۵-۳) در مختصات محلی عضو می‌باشند. برای بیان این ماتریس‌ها در مختصات کلی نیاز با استفاده از روابط (۵۶-۳) است [19]:

$$M_{i(G)} = T_i' M_i T_i \quad K_{i(G)} = T_i' K_i T_i \quad (56-3)$$

$M_{i(G)}$ و $K_{i(G)}$ به ترتیب ماتریس‌های جرم و سختی در مختصات کلی از عضو i است. و T_i ماتریس تبدیل از مختصات محلی به مختصات کلی برای عضو i است که بصورت زیر می‌باشد:

$$T_i = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & \sin(\theta_i) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos(\theta_i) & \sin(\theta_i) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (57-3)$$

θ_i بیانگر زاویه عضو i با افق است. حال می‌توان از ماتریس‌های $M_{i(G)}$ و $K_{i(G)}$ برای تشکیل ماتریس جرم و سختی کلی سیستم استفاده کرد.

۳-۲-۳ ماتریس میرایی

برخلاف ماتریس جرم و سختی، عناصر ماتریس میرایی را نمی‌توان بصورت روابط مشخصی از مشخصات هندسی و مکانیکی اعضای تیر و ستون بیان نمود و تشکیل این ماتریس نیازمند انجام آزمایش بر روی سازه‌های مشابه است. اما می‌توان این ماتریس را از دو ماتریس جرم و سختی و برای نسبت میرایی مشخص تعیین نمود. بر طبق روش ریلی^۱ ماتریس میرایی را می‌توان از رابطه زیر تعیین نمود [18]:

$$C = a_0 M + a_1 K \quad (58-3)$$

با انتقال این معادله به فضای مودی و فرض نمودن دو نسبت میرایی برای دو مود دلخواه m و n ، ضرایب a_0 و a_1 بصورت زیر بدست می‌آیند:

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} = 2 \frac{\omega_n \omega_m}{\omega_n^2 - \omega_m^2} \begin{bmatrix} \omega_n & -\omega_m \\ -1/\omega_n & 1/\omega_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_m \\ \xi_n \end{bmatrix} \quad (59-3)$$

با فرض برابری نسبت میرایی این دو مود، ضرایب فوق بصورت رابطه (۶۰-۳) محاسبه می‌شوند:

¹ Rayleigh

$$\xi_m = \xi_n \equiv \xi \quad \rightarrow \quad \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} = \frac{2\xi}{\omega_n + \omega_m} \begin{bmatrix} \omega_n \omega_m \\ 1 \end{bmatrix} \quad (60-3)$$

با محاسبه این ضرایب از روابط بالا، می توان ماتریس میرایی را از رابطه (3-58) تعیین نمود. معمولاً m مود پایه فرض می شود و n را یکی از مودهای بالا در نظر می گیرند.

۳-۲-۴ ماتریس مکان^۱ کنترلر

برای انواع مختلف کنترلر این ماتریس شکل ظاهری متفاوتی را دارد. با توجه به استفاده کنترلر از نوع کابل فعال در این پژوهش، فقط برای این حالت، این ماتریس معرفی می شود. شکل کلی این ماتریس برای حالتی که یک کنترلر در قاب برشی موجود است، بصورت زیر می باشد:

$$D = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ -1 \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad \&\& \quad D = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (61-3)$$

به عبارتی اگر کنترلر در طبقه اول نباشد شکل ماتریس مکان بصورت سمت چپ می شود. در این حالت سطر i ام ماتریس برابر ۱ و سطر $(i-1)$ ام آن برابر -1 می باشد. و اگر کنترلر در طبقه اول باشد، فقط سطر اول ماتریس برابر یک شده و بقیه درآیه ها صفر می باشند (ماتریس سمت راست). اگر بیش از یک کنترلر در سازه موجود باشد، با ازای هر کنترلر یک ستون مانند روابط (3-61) به ستون قبلی این ماتریس اضافه می شود.

۳-۳ سازه با رفتار غیر خطی

بدیهی است که هر سازه شکل پذیری تحت تاثیر نیروی خارجی بزرگی دچار جابجایی بزرگ شده و این جابجایی در بعضی مواقع بسیار بیشتر از جابجایی تسلیم می باشد. در حقیقت سازه وارد ناحیه غیرخطی

¹ Location Matrix

می‌شود. در این ناحیه شیب نمودار نیرو-جابجایی ثابت نمی‌باشد. الگوریتم‌های کنترلی بیان شده در محدوده سازه‌های با رفتار خطی صادق است اما بسیاری از آنها برای سازه‌های غیرخطی بسط داده شده‌اند. در ادامه الگوریتم کلاسیک غیرخطی تشریح می‌شود:

با توجه به اینکه در سازه‌های غیرخطی، در هر لحظه زمانی سختی (و یا میرایی) سازه تغییر می‌کند بنابراین ماتریس سختی و (و یا میرایی) در هر لحظه تغییر می‌کند بنابراین در هر لحظه باید معادله ریکاتی حل شود. بنابراین برای لحظه i ام روابط بصورت زیر می‌باشد [6]:

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}D \end{bmatrix} ; H(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}F_{dyn}(t) \end{bmatrix} ; A_i = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K_i & -M^{-1}C_i \end{bmatrix} \quad (۶۲-۳)$$

$$P_i A_i - 0.5P_i B R^{-1} B^T P_i + A_i^T P_i + 2Q = 0 \quad (۶۳-۳)$$

$$G_i = -0.5R^{-1} B^T P_i \quad (۶۴-۳)$$

$$\Delta z(t_{i+1}) = e^{A_i + B G_i} \Delta z(t_i) + (A_i + B G_i)^{-1} (e^{A_i + B G_i} - I_{2N}) H[F_{dyn}(t_{i+1}) - F_{dyn}(t_i)] \quad (۶۵-۳)$$

$$z(t_{i+1}) = z(t_i) + \Delta z(t_{i+1}) \quad (۶۶-۳)$$

$$u(t_{i+1}) = G_i z(t_{i+1}) \quad (۶۷-۳)$$

رابطه (۶۳-۳) بیانگر معادله ریکاتی می‌باشد. رابطه (۶۷-۳) به نوعی بیانگر رابطه (۳-۱۰) می‌باشد.

۳-۴ اثر تاخیر زمانی

۳-۴-۱ مقدمه

یکی از مشکلات عملی که بر روش‌های کنترل ممکن است بوجود آید اثر تاخیر زمانی در سیستم‌های

کنترل است که ممکن است در هر یک از مراحل زیر بوجود آید [7]:

- استفاده از داده‌های سنسورهایی که در مکان‌های مختلف از سیستم کنترلی قرار گرفته‌اند.
- فیلتر و پردازش داده‌های سنسور برای محاسبه نیروی کنترل مورد نیاز و انتقال نیروی کنترل به کنترلرها
- تولید نیروی کنترل مورد نیاز توسط کنترلرها

در نتیجه این اثر، نیروی کنترل غیرهمگامی بر سازه وارد می‌شود که موجب کاهش کارایی و پایداری سیستم کنترلی می‌شود. مطالعات زیادی در رشته‌های مختلف برای جبران این اثر انجام شده است. در یکی از این روش‌ها ابتدا کنترلر با فرض بر اینکه هیچ تاخیر زمانی در سیستم وجود ندارد طراحی شده و سپس ماتریس بهره با گذشت زمان اصلاح می‌گردد. البته این روش برای تاخیر زمانی کم جوابگو می‌باشد. روش دیگر در کنترل ارتعاشات این است که کنترلر را به طور مستقیم از حل گسسته معادله سیستم با تاخیر زمانی طراحی می‌کنند. در ادامه دو روش جبران تاخیر زمانی به طور جامع تشریح می‌شود. این روش برای سیستم‌های خطی شامل اثر تاخیر زمانی در سیستم معادلات حرکت پیوسته بکار می‌رود.

۳-۴-۲ روش انتگرال‌گیری

معادله حرکت سیستم با n درجه آزادی و با تاخیر زمانی به میزان λ بصورت زیر می‌باشد [7]:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = F_{dyn}(t) + Du(t - \lambda) \quad , \quad x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \quad (۶۸-۳)$$

سایر پارامترهای رابطه بالا در رابطه (۳-۱) تشریح شده است. نمایش معادله حرکت (۳-۶۸) در فضای حالت بصورت زیر است:

$$\dot{z}(t) = Az(t) + Bu(t - \lambda) + H(t) \quad (۶۹-۳)$$

متغیرهای موجود در معادله حالت (۳-۶۹) هم در رابطه (۳-۴) بیان شده است. با استفاده از تبدیل

(۷۰-۳) معادله حالت (۶۹-۳) به فرم استاندارد معادله دیفرانسیل مرتبه اول بدون وجود اثر تاخیر زمانی تبدیل می‌شود:

$$Y(t) = z(t) + \int_{-\lambda}^0 e^{-A(\eta+\lambda)} Bu(t+\eta) d\eta \quad (۷۰-۳)$$

فرم استاندارد شده معادله حرکت بصورت زیر می‌باشد:

$$\dot{Y}(t) = AY(t) + B(A)u(t) + H(t) \quad (۷۱-۳)$$

$$B(A) = e^{-A\lambda} B \quad (۷۲-۳)$$

واضح است که سیستم کنترلی تعریف شده در معادله (۷۰-۳) پایدار و کنترل پذیر است اگر معادله (۶۹-۳) پایدار و کنترل پذیر باشد. حال می‌توان با استفاده الگوریتم‌های مختلف کنترل (کلاسیک، آنی و ...) سیستم کنترلی بیان شده در معادله (۷۱-۳) را حل نموده و نیروی کنترل $u(t)$ و پاسخ سازه $Y(t)$ را بدست آورد. برای کسب متغیر حالت واقعی $z(t)$ نیاز به حل انتگرال زیر می‌باشد:

$$Z_0(t) = \int_{-\lambda}^0 e^{-A(\eta+\lambda)} Bu(t+\eta) d\eta \quad (۷۳-۳)$$

تأخیر زمانی (λ) را بصورت زیر می‌توان بیان نمود:

$$\lambda = l\bar{T} - \mathcal{L} \quad 0 \leq \mathcal{L} < \bar{T} \quad (۷۴-۳)$$

بیانگر \bar{T} اختلاف بازه زمانی و l نسبت صحیحی از تأخیر زمانی به \bar{T} می‌باشد. روش کنترلی برای سیستم‌های با تأخیر زمانی فقط برای حالتی جوابگو می‌باشد که $\mathcal{L} = 0$.

وقتی از روش رونگ کوتا برای حل معادله دینامیکی (۷۳-۳) استفاده می‌شود اختلاف گام زمانی برای انتگرال مزبور باید نزدیک به \bar{T} باشد. برای حل انتگرال بین هر دو گام زمانی نیروی کنترل ثابت در نظر گرفته می‌شود.

$$u(t) = u(k\bar{T}) \quad k\bar{T} \leq t < (k+1)\bar{T} \quad (75-3)$$

بدون بیان اثبات، انتگرال بیان شده در رابطه (73-3) از رابطه (77-3) و با استفاده از توابع کمکی ارائه شده در رابطه (76-3) بدست می‌آید.

$$F(\xi) = e^{A\xi} \quad G(\xi) = \int_0^\xi e^{-A\theta} d\theta \quad (76-3)$$

$$Z_0(t) = G(\bar{T})u(t - l\bar{T}) + F(-\bar{T})G(\bar{T})u(t - (l-1)\bar{T}) \quad (77-3)$$

$$+ F(-2\bar{T})G(\bar{T})u(t - (l-2)\bar{T}) + \dots + F(-(l-1)\bar{T})G(\bar{T})u(t - \bar{T})$$

همانطور که از رابطه بالا پیداست، برای محاسبه انتگرال در هر گام زمانی از نیروی کنترل در l گام قبلی استفاده می‌شود. انتگرال $G(\xi)$ را می‌توان بصورت زیر محاسبه کرد:

$$G(\xi) = \int_0^\xi e^{-A\theta} d\theta = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(-A)^{i-1} \xi^i}{i!} \quad (78-3)$$

۳-۴-۳ بسط تیلور^۱

بسط نیروی کنترل $u(t)$ را می‌توان با فرض در نظر گرفتن سه جمله اول بصورت زیر بدست آورد [17]:

$$u(t) = u(t - \lambda) + \lambda \dot{u}(t - \lambda) + \frac{\lambda^2}{2} * \ddot{u}(t - \lambda) \quad (79-3)$$

با استفاده از رابطه (79-3) و (69-3) می‌توان به معادله حالت استاندارد (4-3) دست یافت. متغیر حالت و ماتریس‌های سیستم، مکان کنترلر و بارگذاری برای این معادله حالت در روابط (80-3) و (81-3) ارائه شده است.

¹ Taylor Expantion

$$z(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \\ u(t - \lambda) \\ \dot{u}(t - \lambda) \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0_n & I_n & 0_{n*m} & 0_{n*m} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C & M^{-1}D & 0_{n*m} \\ 0_{m*n} & 0_{m*n} & 0_m & I_m \\ 0_{m*n} & 0_{m*n} & -2/\lambda^2 I_m & -2/\lambda I_m \end{bmatrix} \quad (۸۰-۳)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0_{n*m} \\ 0_{n*m} \\ 0_m \\ 2 \\ \lambda^2 I_m \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} 0_{n*1} \\ M^{-1}F_{dyn}(t) \\ 0_{m*1} \\ 0_{m*1} \end{bmatrix} \quad (۸۱-۳)$$

شرایط اولیه اضافی برای این معادله حالت اصلاح شده نیز عبارتند از:

$$z_3(t) = z_4(t) = 0 \quad t \leq \lambda \quad (۸۲-۳)$$

فصل ۴: مباحث آیین‌نامه‌ای

۴-۱ بارگذاری خارجی

در این بخش نحوه تولید رکورد زلزله و باد بر مبنای آیین‌نامه و نحوه اعمال این بارها بر سازه تشریح می‌گردد.

۴-۱-۱ بار زلزله

۴-۱-۱-۱ معیارهای انتخاب رکورد زلزله

شتاب‌نگاشت‌هایی که در تعیین اثر حرکت زمین مورد استفاده قرار می‌گیرند باید تا حد امکان نمایانگر حرکت واقعی زمین در محل احداث بنا، در هنگام وقوع زلزله، باشند. برای نیل به این هدف لازم است حداقل سه زوج شتاب‌نگاشت متعلق به مولفه‌های افقی سه زلزله مختلف ثبت شده که دارای ویژگی‌های زیر باشند، انتخاب شوند [20]:

- بزرگی زلزله: زلزله با بزرگی بالاتر از طول رکورد بالاتری برخوردار است و میزان انرژی آزاد شده درگسل بیشتر می‌باشد این زلزله‌ها موجب خسارت عمده در سازه می‌شود. در مقابل زلزله‌هایی با بزرگی کمتر از ۶.۵ موجب خسارت کمی به سازه (خسارت بر اجزای غیرسازه‌ای) می‌شود.
- نوع گسل: اغلب گسل‌ها از نوع معکوس و امتداد لغزند و انواع دیگر گسل‌ها محدودند.

- نوع خاک: اکثر زمین لغزش‌ها بر روی خاک‌های نوع C، D، E و F رخ می‌دهد و موارد کمی از زلزله بر روی خاک نوع B یافت می‌شود.
- فاصله از گسل: معمولاً عدد ۱۰ کیلومتر به عنوان مرز بین زلزله نزدیک به گسل و دور از گسل انتخاب می‌شود. اما برای نواحی نزدیک و گسل و سطح خطر MCE چندین اندازه متفاوتی در آیین‌نامه ASCE7-05 موجود است. معنی دقیق فاصله در PEER تعریف گردیده است.
- تعداد رکوردها برای هر زلزله
- بیشینه حرکت زمین (PGA یا PGV): محدودیت بیشینه شتاب زمین بزرگ‌تر از 0.2g و یا بیشینه سرعت زمین بزرگ‌تر از 15cm/s دلخواه می‌باشند و به نوعی بیانگر آستانه‌ای از خسارت سازه می‌باشد.
- قابلیت دستگاه ثبت رکورد زمین‌لرزه: بعضی از ابزارهای ثبت رکورد زمین‌لرزه، خصوصاً مدل‌های قدیمی‌تر توانایی ثبت رکوردهای با محتوای فرکانسی حداقل ۴ ثانیه را ندارند. در حالیکه چنین رکوردهایی برای سازه‌های بلند که پی‌ریز مد غالب آن از ۴ ثانیه بیشتر است، معتبر می‌باشد.
- مکان قرارگیری دستگاه ثبت رکورد: اگر دستگاه ثبت رکورد در درون ساختمان بلند (طبقه همکف) قرار گیرد، به دلیل اندرکنش سازه و خاک و پی، بر رکورد واقعی تاثیر می‌گذارد. به همین دلیل برای جلوگیری از چنین تاثیرگذاری، باید این ابزارها در محیط آزاد و یا در کف ساختمان‌های کوتاه واقع شود.

در مورد مدت زمان زمین‌لرزه، آیین‌نامه ۲۸۰۰ مورد زیر را توصیه می‌کند [21]:

- مدت زمان حرکت شدید زمین در شتاب‌نگاشت‌ها حداقل برابر با ۱۰ ثانیه یا سه برابر زمان تناوب اصلی سازه، هر کدام بیشتر است، باشد. مدت زمان حرکت شدید شتاب‌نگاشت‌ها را می‌توان از روش‌های معتبر مانند روش توزیع تجمعی انرژی، تعیین کرد.

در مواردی که سه زوج شتاب‌نگاشت ثبت شده با مشخصات مورد نظر در دسترس نباشند، می‌توان به جای

آنها از زوج‌های مناسب شتاب‌نگاشت‌های شبیه‌سازی شده مصنوعی استفاده کرد.

۴-۱-۱-۲ نحوه مقیاس رکوردهای انتخابی

آیین نامه ۲۸۰۰ روش زیر را برای مقیاس زوج شتاب‌نگاشت‌ها توصیه می‌کند [21]:

الف - کلیه شتاب‌نگاشت‌ها باید به مقدار حداکثر خود مقیاس شوند. یعنی حداکثر شتاب همه آنها برابر با شتاب ثقل g گردد.

ب - طیف پاسخ شتاب هر یک از زوج شتاب‌نگاشت‌های مقیاس شده با منظور کردن نسبت میرایی ۵ درصد تعیین شود.

پ - طیف‌های پاسخ هر زوج شتاب‌نگاشت با استفاده از روش جذر مجموع مربعات با یکدیگر ترکیب شده و یک طیف ترکیبی واحد برای هر زوج ساخته شود.

ت - طیف‌های پاسخ ترکیبی سه زوج شتاب‌نگاشت، متوسط‌گیری شده و در محدوده زمان‌های تناوب $0.2T$ و $1.5T$ با طیف طرح مقایسه می‌شود. ضریب مقیاس آن چنان باید تعیین شود که در این محدوده مقادیر متوسط‌ها در هیچ حالت کمتر از ۱.۴ برابر مقدار نظیر آن در طیف استاندارد نباشد. T زمان تناوب اصلی سازه است.

ث - ضریب مقیاس تعیین شده، باید در شتاب‌نگاشت‌های مقیاس شده در بند (الف) ضرب شود و در تحلیل دینامیکی مورد استفاده قرار گیرد.

نکته قابل ذکر در اینجا این است که برای سازه با رفتار خطی اعضای آن، منظور از طیف طرح همان طیف طرح استاندارد آیین‌نامه ۲۸۰۰ می‌باشد که از حاصل ضرب مقادیر بازتاب ساختمان (B) در پارامترهای: نسبت شتاب مبنای (A)، ضریب اهمیت (I) و عکس ضریب رفتار ($1/R$) بدست می‌آید. مقادیر A ، B ، I و R ضرایب آیین‌نامه‌ای هستند که در جداول آیین‌نامه ۲۸۰۰ مقادیرشان برای حالت‌های مختلف ذکر شده است. در تعیین این طیف نسبت میرایی ۵ درصد در نظر گرفته شده است. اما برای سازه

با رفتار غیرخطی اعضای آن، میزان ضریب رفتار بکار رفته در طیف طرح استاندارد برابر یک لحاظ می‌گردد.

۴-۱-۱-۳ مدت دوام^۱ حرکت زمین

شاید رکوردهای خام بدست آمده از شتاب‌سنج‌ها شامل مقادیر تحریک ناچیز زیادی باشد که در عمل تاثیر این تحریک‌ها بر سازه ناچیز باشد. برای جلوگیری از افزایش زمان تحلیل و با قبول خطای ناچیز قابل پیش‌بینی برای پاسخ سازه، می‌توان قسمت‌های ناچیز از رکورد خام را حذف نمود. این عمل به روش‌های مختلفی قابل انجام است اما بدلیل استفاده این پژوهش از روش جذر متوسط مجذورات شتاب^۲، این روش در ادامه تشریح می‌گردد. در این روش از تعریف زیر برای تعیین طول مدت حرکت قوی زمین استفاده می‌شود:

$$RMSA(t) = \sqrt{\frac{\int_0^t \ddot{x}_g(\tau)^2 d\tau}{t}} = \sqrt{\frac{E(t)}{t}} \quad (1-4)$$

این روش به این صورت است که زمانی که از آن پس مقدار $RMSA$ همواره نزولی باقی می‌ماند (مشتق آن همواره منفی بماند) بعنوان t_2 در نظر گرفته می‌شود. سپس با معکوس کردن رکورد زلزله (عوض کردن آغاز و انتهای رکورد زلزله) مجدداً زمانی که از آن پس مشتق $RMSA$ همواره منفی می‌ماند، بعنوان t_1 فرض شده و نهایتاً با محاسبه $t'_1 = T - t_1$ مدت زمان حرکت قوی زمین برابر با $\Delta t = t_2 - t'_1$ خواهد بود.

در این روش سعی بر آن بوده است که به نوعی روند انتقال انرژی در طول مدت زلزله دیده شود. (روند انتقال انرژی با زمان). این روش هم برای ابتدای رکورد و هم برای انتهای آن باید اجرا شود.

¹ Duration

² RMSA

۴-۱-۲ بارگذاری باد

برای تعیین اثر ناشی از باد باید فرض شود که باد بصورت افقی و در هر یک از امتدادها، به ساختمان اثر می‌نماید. در طراحی کافی است اثر باد در دو امتداد عمود بر هم، ترجیحاً در امتداد محورهای اصلی ساختمان، و به طور غیر هم‌زمان بررسی شود [22]:

۴-۱-۲-۱ اعمال استاتیکی بار باد

نیروی استاتیکی تعریف شده برای بار باد در مبحث ۶ مقررات ملی ساختمان بصورت رابطه زیر تعریف می‌شود [22]:

$$F = p \cdot A \quad (۲-۴)$$

بطوریکه p فشار و یا مکش ناشی از باد می‌باشد که در ادامه تشریح می‌گردد و A مساحتی از ساختمان است که فشار و یا مکش p بر آن وارد می‌شود.

فشار و یا مکش ناشی از باد بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$p = C_e C_q q \quad (۳-۴)$$

C_e ضریب اثر تغییر سرعت است که شامل آثاری از قبیل ارتفاع تراز مورد نظر در ساختمان که فشار باد برای آن محاسبه می‌شود، موقعیت ساختمان به لحاظ تراکم ساختمان‌ها و درختان موجود در ناحیه و اوج باد که معرف تغییرات لحظه‌ای سرعت باد است، می‌باشد. این ضریب با توجه به تقسیم‌بندی ساختمان در داخل و یا خارج شهر مقادیر متفاوتی دارد.

C_q ضریب شکل می‌باشد که با توجه به نوع سازه باربر، میزان ارتفاع آن و نوع قرارگیری سازه در مقابل باد، دارای مقادیر متفاوتی می‌باشد و q فشار مبنای باد می‌باشد و از رابطه (۴-۴) تعیین می‌گردد:

$$q = 0.005V^2 \quad (4-4)$$

V سرعت مبنای باد به کیلومتر بر ساعت و q بر حسب دکانیوتن بر متر مربع می‌باشد.

۴-۲-۱-۲ اعمال دینامیکی بار باد

روشی که برای اعمال بار دینامیکی باد ارائه می‌شود تنها نوسان سازه در جهت وزش باد را مورد بررسی قرار می‌دهد و از سایر نوسانات، از جمله نوسان سازه در جهت عمود بر وزش باد، صرف نظر می‌کند. نوسانات ذکر شده معمولاً اثر چندانی بر بار ناشی از باد ندارند ولی در بعضی سازه‌ها ممکن است حائز اهمیت باشند [22].

بنابر پیشنهاد Q.S.Li و همکارانش، نیروی دینامیکی باد در ارتفاع y از سطح زمین و در لحظه t از رابطه زیر بدست می‌آید [15]:

$$F(y, t) = Y(y)v(t) \quad (5-4)$$

که $v(t)$ سرعت دینامیکی باد در ارتفاع ۱۰ متر از سطح زمین است و $Y(y)$ از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Y(y) = \rho \mu_s \mu_z D(y) \bar{V}_{10} \quad (6-4)$$

ρ چگالی هوا بر حسب (KN/m^3) است. μ_s همان ضریب شکل بیان شده در بخش قبل (C_q) است. $Y(y)$ مساحتی از سازه در ارتفاع y است که در جهت باد قرار می‌گیرد. \bar{V}_{10} متوسط سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری است و μ_z همان ضریب اثر تغییر سرعت (C_e) است می‌باشد که در قسمت قبل به آن اشاره شده است. سرعت دینامیکی باد در ارتفاع ۱۰ متر نیز از طیف چگالی بر حسب فرکانس (ω) و با استفاده از تبدیل معکوس فوریه بدست می‌آید. در این پژوهش از طیف چگالی داون پورت^۱ استفاده می‌شود که

¹ Davenport

بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$S_v(\omega) = 4K\bar{V}_{10}^2 \frac{x^2}{\omega(1+x^2)} \quad ; \quad x = \frac{600\omega}{\pi\bar{V}_{10}} \quad (7-4)$$

K عددی ثابت است که به سختی زمین وابسته می‌باشد. واحد ω رادیان بر ثانیه و واحد \bar{V}_{10} متر بر ثانیه می‌باشد. همانطور که در صفحه پیش ذکر شد، سرعت دینامیکی باد از تبدیل معکوس فوریه طیف چگالی بدست می‌آید. در مطالعه‌ای که توسط A.Kawaguchi و همکارانش انجام شده، رابطه زیر برای حل عددی تبدیل معکوس فوریه طیف چگالی پیشنهاد شده است [23].

$$v(t) = \sum_{j=1}^L [2 * S(n_j)\Delta n/T]^{.5} \cos(2\pi n_j t + \phi_{jt}) \quad ; \quad L = (n_u - n_o) / \Delta n \quad (8-4)$$

بطوریکه L بیانگر تعداد بازه فرکانسی در محدوده فرکانسی $(n_u - n_o)$ و n_j مقدار فرکانس در مرکز هر بازه است. ϕ_{jt} عددی تصادفی بین صفر و 2π بوده و $S(n_j)$ مقدار طیف چگالی برای فرکانس n_j است.

۲-۴ اعمال بار دینامیکی و محدودیت‌های طراحی

همانطور که در رابطه (۱-۳) ذکر شد نیروی دینامیکی در سمت راست معادله حرکت و با کمیت $F_{dyn}(t)$ تعریف شده است که برای بار زلزله این نیرو بصورت زیر می‌باشد:

$$F_{dyn}(t) = E\dot{x}_g \quad (9-4)$$

بطوریکه E ماتریسی است که بیانگر مکان‌هایی از سازه است که بار زلزله بر آن وارد می‌شود و \dot{x}_g رکورد شتاب زلزله است. برای بار باد $F_{dyn}(t)$ همان $F(y, t)$ است که در بخش بار باد ذکر شد.

بعد از اعمال بار دینامیکی زلزله و باد که بر مبنای آیین‌نامه تولید گردید. این رکوردها به سازه اعمال شده و پاسخ‌های بدست آمده با مقادیر مجاز آیین‌نامه مقایسه می‌شوند. برای بار زلزله نحوه پاسخ‌گیری به

این صورت است که ابتدا هر زوج شتاب‌نگاشت عنوان شده در دو جهت عمود بر یکدیگر، در امتدادهای اصلی سازه، به آن اثر داده می‌شوند و بازتاب‌های سازه بصورت تابعی از زمان تعیین می‌شوند. بازتاب نهایی سازه در هر لحظه زمانی برابر با حداکثر بازتاب‌های بدست آمده از تحلیل با سه زوج شتاب‌نگاشت موردنظر است. در این روش تحلیل، می‌توان به جای سه زوج شتاب‌نگاشت، هفت زوج شتاب‌نگاشت (که واجد شرایط باشند) را به کار گرفت و مقدار متوسط بازتاب‌های بدست آمده از آن‌ها را بعنوان بازتاب نهایی تلقی کرد. در این روش تحلیل، رفتار سازه را می‌توان خطی و یا غیرخطی در نظر گرفت. مقدار متوسط بیشینه تغییر مکان نسبی طبقات با مقادیر مجاز آیین‌نامه‌ای مقایسه می‌شود که برای زلزله طرح و سازه با رفتار غیرخطی این مقادیر مجاز بصورت روابط (۱۰-۴) یا (۱۱-۴) تعیین می‌گردد.

برای ساختمان‌های با زمان تناوب اصلی کم تر از ۰.۷ ثانیه:

$$\Delta_M \leq 0.025 * He \quad (10-4)$$

برای ساختمان‌های با زمان تناوب اصلی بیشتر از ۰.۷ ثانیه:

$$\Delta_M \leq 0.02 * He \quad (11-4)$$

بطوریکه He ارتفاع کل ساختمان است. برای زلزله طرح و سازه بار رفتار خطی این مقادیر مجاز اشاره شده (۱۰-۴) و (۱۱-۴) بر $0.7R$ تقسیم می‌شوند. برای زلزله سطح بهره‌برداری و سازه بار رفتار خطی، تغییر مکان جانبی نسبی در زلزله سطح بهره‌برداری در هر طبقه نباید از 0.005 ارتفاع آن طبقه بیشتر باشد [21].

برای بارگذاری باد جابجایی بیشینه هر طبقه باید از 0.005 برابر ارتفاع آن طبقه از سطح زمین کمتر باشد و در ضمن بیشینه تغییر مکان نسبی طبقات باید از 0.005 برابر ارتفاع طبقات کمتر باشد [22].

فصل ۵: صحت‌سنجی

در این فصل، قسمتی از نتایج کسب شده از مدل‌سازی با کارهای قبلی انجام شده در این زمینه مقایسه می‌شود تا از نتایج بدست آمده در فصل بعدی اطمینان حاصل شود.

۱-۵ صحت‌سنجی الگوریتم‌های کنترل فعال

۱-۱-۵ صحت‌سنجی الگوریتم کلاسیک

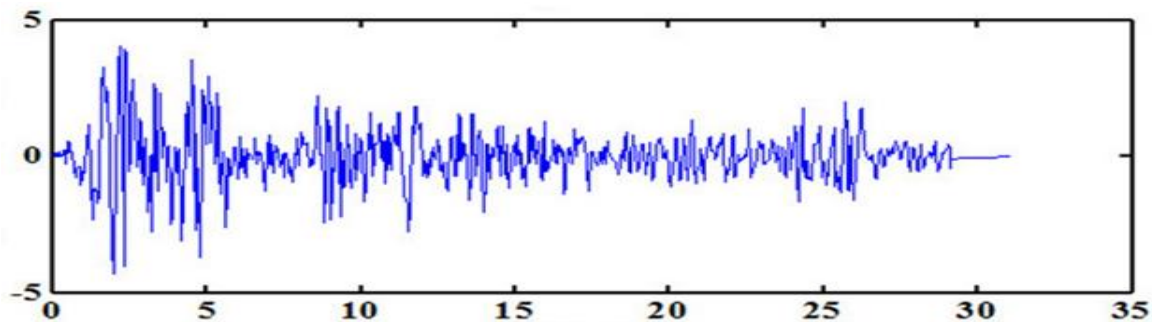
۱-۱-۱-۵ رفتار خطی سازه

مدل سازه‌ای (Rofooei & Tajbakhsh, 1993) قابی شش طبقه برشی می‌باشد که مشخصات جرم، سختی و میرایی آن در جدول ۱-۵ ارائه می‌شود [24].

جدول ۱-۵: مشخصات مدل ارائه شده توسط Rofooei و همکارش

طبقه	1	2	3	4	5	6
جرم (kg)	6800	5897	5897	5897	5897	5897
سختی خطی (KN/m)	1200	33732	29093	28621	24954	19054
میرایی (KN.s/m)	2.4	67.464	58.186	57.242	49.908	38.108

با توجه به اینکه رکورد بکار رفته در مطالعه، یک رکورد محلی بوده و دسترسی به آن میسر نبوده، بنابراین برای مدل‌سازی از رکورد El Centro که به $g \cdot 0.4$ مقیاس شده، استفاده گردیده است.



شکل ۱-۵: تاریخچه زمانی زلزله El Centro (شتاب (m/Se2) بر حسب زمان (s) و مقیاس شده به 0.4g

کلیه درآیةهای ماتریس Q به جز دو درآیة برابر صفر می‌باشند. این دو درآیة بصورت زیر می‌باشند:

$$Q(1,1) = 170000, \quad Q(7,7) = 17 * 10^6$$

در قاب فقط از یک کنترلر استفاده شده که این کنترلر در طبقه اول قرار گرفته است. با توجه به وجود یک کنترلر، ماتریس R اسکالر می‌باشد و مقدار این عدد برابر ۰.۰۱۵ فرض می‌گردد. در ضمن در قسمتی اثر تاخیر زمانی لحاظ شده است. جدول ۲-۵ و جدول ۳-۵ به ترتیب نتایج مطالعه انجام گرفته و نتایج شبیه‌سازی را ارائه می‌دهد و میزان تغییر مکان نسبی طبقات را نشان می‌دهد.

جدول ۲-۵: بیشینه تغییر مکان نسبی در هر طبقه (cm) برای سازه کنترل نشده و کنترل شده با در نظر گرفتن تاخیر زمانی

(ارائه شده در مطالعه Cai و همکارانش)

طبقه	time delay=0			time delay=0.1 s		time delay=0.3 s	
	no Control	LQR (Umax=18.54KN)	LQR (Umax=18.71KN)	LQR (Umax=18.71KN)	LQR (Umax=20.42KN)	LQR (Umax=20.42KN)	LQR (Umax=20.42KN)
1	18.96	10.38	11.09	11.09	13.7	13.7	13.7
2	0.56	0.31	0.34	0.34	0.43	0.43	0.43
3	0.52	0.29	0.32	0.32	0.4	0.4	0.4
4	0.4	0.22	0.25	0.25	0.31	0.31	0.31
5	0.31	0.17	0.19	0.19	0.24	0.24	0.24
6	0.2	0.12	0.13	0.13	0.16	0.16	0.16

جدول ۳-۵: بیشینه تغییر مکان نسبی در هر طبقه (cm) برای سازه کنترل نشده و کنترل شده با در نظر گرفتن تاخیر زمانی

(نتیجه شبیه‌سازی)

طبقه	time delay=0			time delay=0.1 s		time delay=0.3 s	
	no Control	LQR (Umax=18.54KN)	LQR (Umax=18.71KN)	LQR (Umax=18.71KN)	LQR (Umax=20.42KN)	LQR (Umax=20.42KN)	LQR (Umax=20.42KN)
1	18.96	10.38	11.09	11.09	13.7	13.7	13.7
2	0.56	0.31	0.34	0.34	0.43	0.43	0.43
3	0.52	0.29	0.32	0.32	0.4	0.4	0.4
4	0.4	0.22	0.25	0.25	0.31	0.31	0.31
5	0.31	0.17	0.19	0.19	0.24	0.24	0.24
6	0.2	0.12	0.13	0.13	0.16	0.16	0.16

1	18.86130244	10.90351771	11.90333425	14.13637096
2	0.554243556	0.32583623	0.356678505	0.317422545
3	0.520952719	0.304023613	0.353160788	0.767236938
4	0.40171049	0.23955927	0.253482523	0.35099485
5	0.31031748	0.190260171	0.222150891	0.809215927
6	0.204815459	0.128145618	0.143634313	0.113858015

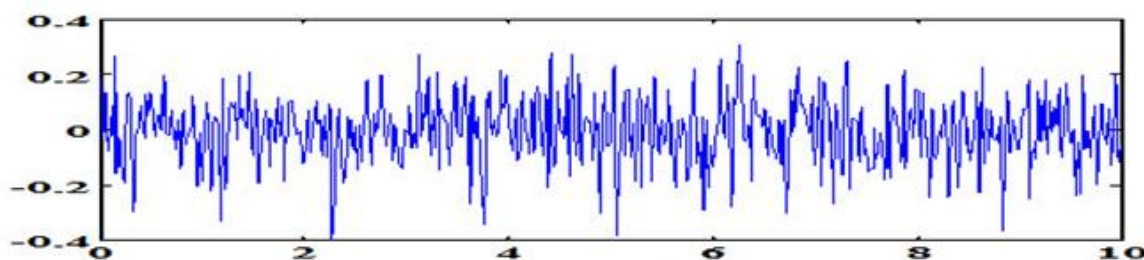
۵-۱-۱-۲ رفتار غیرخطی سازه

مدل سازه‌ای قاب برشی هشت طبقه (Yang et al,1988) می‌باشد. مشخصات جرم، سختی و میرایی آن در جدول ۴-۵ ارائه شده است و جابجایی نسبی آستانه غیرخطی سازه برابر 2.4 cm است [17].

جدول ۴-۵: مشخصات مدل ارائه شده توسط Yang و همکارانش

طبقه	1	2	3	4	5	6	7	8
جرم (ton)	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
سختی خطی (10e5KN/m)	3.404	3.404	3.404	3.404	3.404	3.404	3.404	3.404
سختی غیرخطی (10e4KN/m)	3.404	3.404	3.404	3.404	3.404	3.404	3.404	3.404
میرایی (KN.s/m)	734.3	734.3	734.3	734.3	734.3	734.3	734.3	734.3

تحریک تکیه‌گاهی بعنوان موج سفید می‌باشد که به شتاب $g \cdot 0.4$ مقیاس شده است. تاریخچه زمانی این تحریک در شکل ۲-۵ آمده است.



شکل ۲-۵: تاریخچه زمانی رکورد مصنوعی (شتاب g) بر حسب زمان (s)

در این مطالعه فرض شده که در همه طبقات از کنترلر استفاده شده است. جدول ۵-۵ و جدول ۶-۵ مقادیر جابجایی نسبی و شتاب مطلق طبقات برای حالت کنترل نشده و کنترل شده بترتیب برای مطالعه انجام شده و نتیجه شبیه‌سازی ارائه می‌کنند.

جدول ۵-۵: بیشینه تغییر مکان نسبی و شتاب مطلق در هر طبقه برای سازه کنترل نشده و کنترل شده (ارائه شده در مطالعه جفتایی و محبی)

طبقه	1	2	3	4	5	6	7	8
جابجایی نسبی - کنترل نشده (cm)	4.75	3.52	2.47	2.21	1.78	1.46	1.12	0.65
جابجایی نسبی - کنترل شده (cm)	3.6	2.54	2.36	1.96	1.64	1.32	1.01	0.58
شتاب مطلق - کنترل نشده (cm/s ²)	573	724	815	852	859	908	911	951
شتاب مطلق - کنترل شده (cm/s ²)	638	681	755	820	856	916	892	912
نیروی کنترل بیشینه ایجاد شده (KN)	13.4	21.7	28.9	34.7	38.2	40.9	42.9	45.5

جدول ۵-۶: بیشینه تغییر مکان نسبی و شتاب مطلق در هر طبقه برای سازه کنترل نشده و کنترل شده (نتیجه شبیه سازی)

طبقه	1	2	3	4	5	6	7	8
جابجایی نسبی - کنترل نشده (cm)	4.07	3.65	3.12	2.9	2.63	2.28	1.68	0.88
جابجایی نسبی - کنترل شده (cm)	3.2	2.91	2.47	2.15	1.95	1.66	1.24	0.71
شتاب مطلق - کنترل نشده (cm/s ²)	573	591	645	699	619	611	744	832
شتاب مطلق - کنترل شده (cm/s ²)	624	653	646	555	528	621	750	893
نیروی کنترل بیشینه ایجاد شده (KN)	44.7	42.7	40.3	36.7	32.02	27.3	20.03	10.6

سعی شده است که برای شبیه سازی هر چه بهتر مدل تهیه شده با قاب مطالعه شده، میزان نیروی کنترل بیشینه در هر دو مورد یکسان شود. تفاوت های مشاهده شده در دو جدول ۵-۵ و ۶-۵ ناشی از یکسان نبودن رکوردهای اعمال شده بر سازه است.

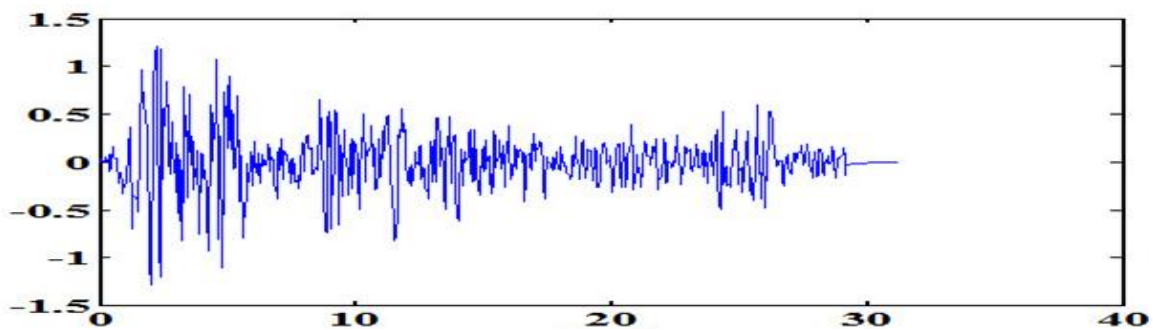
۵-۱-۲ صحت سنجی الگوریتم آنی

مدل سازه ای (Yang et al, 1995) قابی برشی سه طبقه می باشد که مشخصات جرم، سختی و میرایی آن در جدول ۵-۷ ارائه شده است [25].

جدول ۵-۷: مشخصات مدل ارائه شده توسط Yang و همکارانش

طبقه	1	2	3
جرم (kg)	1000	1000	1000
سختی خطی (KN/m)	980	980	980

در اینجا نیز به علت عدم دسترسی به رکورد اصلی بکار رفته در مطالعه، از رکورد El Centro که به $0.12g$ مقیاس شده، استفاده گردیده است.



شکل ۵-۳: تاریخچه زمانی زلزله El Centro (شتاب (m/Se2) بر حسب زمان (s) و مقیاس شده به $0.12g$

برای تحلیل از دو نوع ماتریس Q و R استفاده شده است. برای هر دو حالت کلیه درآیه‌های ماتریس Q به جز دو درآیه برابر صفر می‌باشند. تفاوت این دو در سطر چهارم آن‌هاست. این دو ماتریس بصورت زیر می‌باشند:

$$Q(4,:) = [10^3, 10^3, 10, 10, 1, 1] \quad R = 10^{-9}$$

$$Q(4,:) = [10^5, 10^4, 10^3, 0, 0, 0] \quad R = 1.5 * 10^{-7}$$

در بررسی اول، حالت بدون اثر تاخیر زمانی (حالت ۱) و حالت وجود تاخیر زمانی 0.1 ثانیه (حالت ۲) و در بررسی دوم، حالت بدون اثر تاخیر زمانی (حالت ۳) و حالت وجود تاخیر زمانی 0.3 ثانیه (حالت ۴) مطالعه شده است. نتایج مطالعه انجام شده و نتایج شبیه‌سازی در جداول ۵-۸ و ۵-۹ آمده است. علت عدم تطابق پاسخ‌های دو جدول ۵-۸ و ۵-۹، عدم تطابق رکوردهای اعمالی می‌باشد.

جدول ۵-۸: بیشینه تغییر مکان نسبی در هر طبقه (cm) برای سازه کنترل نشده و چهار حالت مختلف کنترل شده (ارائه شده در مطالعه Cai و همکارانش)

طبقه	بدون کنترل	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳	حالت ۴
1	1.37	0.45	0.7	0.59	0.88
2	1.04	0.53	0.41	0.59	0.58

3	0.61	0.32	0.25	0.35	0.33
---	------	------	------	------	------

جدول ۵-۹: بیشینه تغییر مکان نسبی در هر طبقه (cm) برای سازه کنترل نشده و چهار حالت مختلف کنترل شده (نتیجه شبیه سازی)

طبقه	بدون کنترل	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳	حالت ۴
1	1.3246	0.9115	0.9572	1.0496	1.1944
2	1.0517	0.8895	0.7265	0.9472	0.8669
3	0.622	0.5587	0.3984	0.5892	0.4795

۵-۱-۳ صحت سنجی الگوریتم مودال

مدل سازه‌ای قابی برشی شش طبقه (J.Q.Fang, 2002) می‌باشد که مشخصات جرم، سختی و میرایی آن بصورت زیر است [2]:

جدول ۵-۱۰: مشخصات مدل ارائه شده توسط J.Q.Fang و همکارانش

طبقه	1	2	3	4	5	6
جرم (10e5*kg)	3.456	3.456	3.456	3.456	3.456	3.456
سختی خطی (10e5*KN/m)	3.405	3.405	3.405	3.405	3.405	3.405
شماره مود	1	2	3	4	5	6
نسبت میرایی (درصد)	1	1.5	2	2.5	3	3.5

تحریک تکیه گاهی بعنوان موج سفید دامنه محدود گوسی با محدوده فرکانسی ۱۰ هرتز و شدت $0.0159 m^2/s^3$ در نظر گرفته می‌شود. تاریخچه زمانی تحریک تکیه گاهی توسط رابطه زیر تولید می‌شود:

$$f(t) = \sum_{k=1}^N a_k \cos(\omega_k t + \phi_k) \quad (1-5)$$

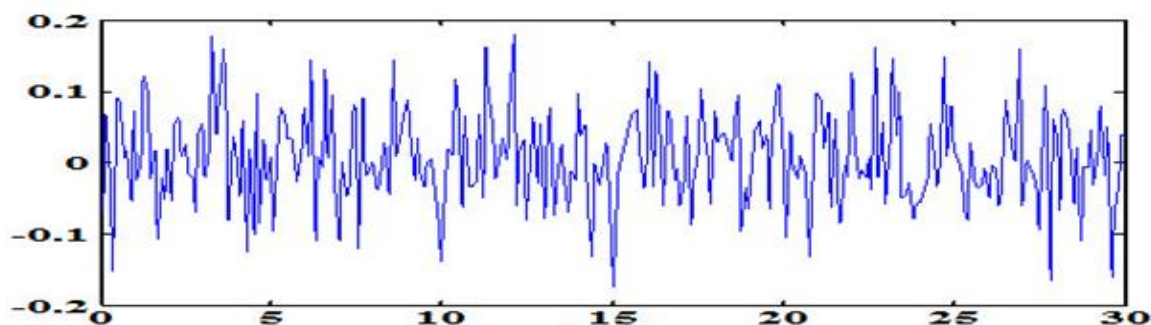
بطوریکه N تعداد بازه فرکانسی است و ω_k برابر مقدار زیر است:

$$\omega_k = \omega_l + \left(k_i + \frac{1}{2}\right) \Delta\omega ; \quad \Delta\omega = \frac{\omega_u - \omega_l}{N} ; \quad k = (1, 2, \dots, N) \quad (2-5)$$

ϕ_k زاویه فاز تصادفی بین $(0, 2\pi)$ و a_k متغیر گوسی غیروابسته و تصادفی در بازه $(0, \sigma_k^2)$ است که σ_k^2 بصورت رابطه (3-5) است:

$$\sigma_k^2 = 4S_0\Delta\omega \quad (3-5)$$

با انتخاب بازه فرکانسی معادل 0.1 Hz و بازه زمانی برابر 0.1 s و ضریب مقیاس برابر 0.18 g، این رکورد در 30 s بصورت شکل زیر می‌باشد:



شکل ۴-۵: تاریخچه زمانی رکورد مصنوعی (شتاب (g) بر حسب زمان (s)) و مقیاس شده به 0.18g

با توجه به مشخصات جرم و سختی بیان شده برای سازه، فرکانس‌های سازه بصورت جدول زیر است:

جدول ۵-۱۱: فرکانس مدهای مختلف سازه تعریف شده در جدول ۵-۱۰

مود	1	2	3	4	5	6
فرکانس (HZ)	7.567	22.2611	35.6615	46.9894	55.5864	60.953

و ماتریس‌های Q و R عبارتند از:

$$Q = \begin{bmatrix} 57.2 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, R = 2$$

ماتریس بهره بدست آمده با در نظر گرفتن مود اول در مطالعه قبلی بصورت زیر بدست آمده است:

$$V_{c1} = -0.2517q_1 - 0.8606\dot{q}_1, \quad G = [-0.2517, -0.8606]$$

با استفاده از مدل سازی فرضیات اشاره شده در نرم افزار Matlab، مقدار ضرایب β و γ و ماتریس بهره بصورت زیر بدست می آید:

$$p_2 = 0.4989, \beta = 5.6827 > 0, \gamma = 0.0044 > 0$$

$$g_1 = 0.2495, g_2 = 0.8596, G = -[0.2495; 0.8596]$$

علت اختلاف ماتریس بهره مدل سازی شده و ماتریس بهره اصلی در خطای گرد کردن می باشد.

۴-۱-۵ صحت سنجی الگوریتم جابجایی قطبها

برای تایید نتایج این الگوریتم، دو مثال ارائه می گردد.

مثال اول: در این نمونه یک سیستم با معادله حالت (۴-۵) ارائه می گردد و سپس با استفاده از روابط بیان شده در فصل (۳) قطبهای این سیستم به مکانهای مشخص انتقال می یابد [3].

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} -1.5 & 3 & .5 & 2.5 & -2 \\ 0 & -1 & 3 & -3.5 & .5 \\ -1 & 0 & -2.5 & 0 & 1 \\ -1 & 3 & -1.5 & 2 & -2 \\ -1 & 3 & -1.5 & 2.5 & -2.5 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 1 \\ 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} u(t) \quad (۴-۵)$$

قطب های سیستم حلقه باز بالا بصورت زیر است:

$$\lambda_{1,2} = -1 \pm 3i; \lambda_{3,4} = -1.5 \pm i; \lambda_5 = -0.5$$

هدف انتقال قطبهای بالا به مکانهای زیر است:

$$\mu_{1,2} = -2 \pm 2i; \mu_3 = -3; \mu_4 = -4; \mu_5 = -2$$

بعبارتی در سه مرحله این انتقال صورت می پذیرد. در اشکال ۵-۵، ۶-۵ و ۷-۵ ماتریس سیستم اصلاح شده، ماتریس Q و مقادیر ویژه سیستم اصلاح شده برای این سه مرحله نمایش داده می شود.

مرحله ۱- انتقال قطب $\lambda_{1,2} = -1 \pm 3i$ به $\mu_{1,2} = -2 \pm 2i$:


```

system modified system
-2.8571 + 0.0000i   3.0000           -0.3506           2.5000 - 0.0000i   -0.6429 - 0.0000i
-0.7857 + 0.0000i  -1.0000 - 0.0000i   2.0649 + 0.0000i  -3.5000 - 0.0000i   1.2857 - 0.0000i
-3.1429 - 0.0000i   0.0000 + 0.0000i  -4.2857           0.0000 + 0.0000i   3.1429 + 0.0000i
-1.7857 + 0.0000i   3.0000 - 0.0000i  -2.4351 + 0.0000i  2.0000 - 0.0000i  -1.2143 - 0.0000i
-3.1429 - 0.0000i   3.0000 + 0.0000i  -3.2857           2.5000 + 0.0000i  -0.3571 + 0.0000i

```

```

weigh matrix
-2.4740 + 0.0000i   0.0000 + 0.0000i  -0.1396 - 0.0000i   0.0000           2.4740
0.0000 - 0.0000i   -0.0000           0.0000           -0.0000 + 0.0000i  -0.0000 + 0.0000i
-3.0227 - 0.0000i   0.0000 + 0.0000i  -1.4578 - 0.0000i   0.0000 - 0.0000i   3.0227 + 0.0000i
0.0000 - 0.0000i   -0.0000           0.0000           -0.0000 + 0.0000i  -0.0000 + 0.0000i
2.4740 - 0.0000i   -0.0000           0.1396           -0.0000 + 0.0000i  -2.4740 + 0.0000i

```

Close loop poles

```

-1.0000 - 3.0000i
-2.0000 - 2.0000i
-0.5000 + 0.0000i
-1.0000 + 3.0000i
-2.0000 + 2.0000i

```

شکل ۵-۵: از بالا به پایین به ترتیب ماتریس سیستم اصلاح شده (A)، ماتریس Q و قطب‌های حلقه بسته سیستم تا پایان مرحله ۱

مرحله ۲- انتقال قطب $\lambda_{3,4} = -1.5 \pm i$ به $\mu_4 = -4$; $\mu_3 = -3$:

```

system modified system
-1.4086 + 0.0675i   5.7883 + 0.1154i  -1.5124 + 0.1306i   7.2394 + 0.0358i  -4.8797 - 0.1829i
-1.5035 - 0.0115i  -1.9145 + 0.1447i  -3.3451 - 2.1296i   0.1422 + 2.1029i   2.9180 - 0.1332i
-2.4121 + 0.0559i   1.8738 + 0.2601i  -10.8574 - 1.9990i   8.3816 + 2.1387i   0.5383 - 0.3161i
-2.5035 - 0.0115i   2.0855 + 0.1447i  -7.8451 - 2.1296i   5.6422 + 2.1029i   0.4180 - 0.1332i
-2.4121 + 0.0559i   4.8738 + 0.2601i  -9.8574 - 1.9990i  10.8816 + 2.1387i  -2.9617 - 0.3161i

```

```

weigh matrix
-8.4689 - 4.5900i  -15.1573 - 8.2712i  -7.8693 - 3.5436i  -13.0349 - 7.7865i  23.6262 +12.8611i
-14.1769 - 7.9200i  -25.2874 -14.2415i  -14.2724 - 6.5046i  -20.7202 -13.0453i  39.4643 +22.1614i
-20.4300 - 8.0435i  -37.6637 -14.8847i  -4.8997 - 1.2116i  -45.5402 -18.6478i  58.0937 +22.9282i
-0.4637 - 3.2829i   0.2701 - 5.5254i  -14.5265 - 7.5370i  13.3936 - 0.5626i   0.1936 + 8.8083i
22.6459 +12.5099i  40.4446 +22.5126i  22.1417 +10.0482i  33.7551 +20.8318i  -63.0905 -35.0225i

```

Close loop poles

```

-2.0000 + 2.0000i
-2.0000 - 2.0000i
-0.5000 - 0.0000i
-4.0000 - 0.0000i
-3.0000 + 0.0000i

```

شکل ۵-۶: از بالا به پایین به ترتیب ماتریس سیستم اصلاح شده (A)، ماتریس Q و قطب‌های حلقه بسته سیستم تا پایان مرحله ۲

مرحله ۳- انتقال قطب $\lambda_5 = -0.5$ به $\mu_5 = -2$:

```

system modified system
-1.1638 + 0.3545i  4.9138 - 1.0034i  -1.2224 + 1.2697i  8.6055 + 0.8628i  -6.1375 - 1.6090i
-1.1124 - 0.0185i  -3.3861 + 0.1080i  -2.2421 - 1.6115i  1.7041 + 1.5538i  0.9478 - 0.0654i
-1.7762 + 0.3360i  -0.4723 - 0.8953i  -9.4644 - 0.3418i  11.3095 + 2.4166i  -2.6897 - 1.6745i
-2.1124 - 0.0185i  0.6139 + 0.1080i  -6.7421 - 1.6115i  7.2041 + 1.5538i  -1.5522 - 0.0654i
-1.7762 + 0.3360i  2.5277 - 0.8953i  -8.4644 - 0.3418i  13.8095 + 2.4166i  -6.1897 - 1.6745i

```

```

weigh matrix
0.4922          -1.8508 - 0.0791i  1.3762 + 0.6765i  1.9774 - 0.6559i  -2.4804 + 0.0411i
-1.8508 + 0.0791i  6.9725          -5.2838 - 2.3226i  -7.3303 + 2.7843i  9.3207 - 0.5535i
1.3762 - 0.6765i  -5.2838 + 2.3226i  4.7778          4.6275 - 4.5518i  -6.8789 + 3.5243i
1.9774 + 0.6559i  -7.3303 - 2.7843i  4.6275 + 4.5518i  8.8183 - 0.0000i  -10.0201 - 3.1401i
-2.4804 - 0.0411i  9.3207 + 0.5535i  -6.8789 - 3.5243i  -10.0201 + 3.1401i  12.5038

```

Close loop poles

```

-2.0000 - 2.0000i
-2.0000 + 2.0000i
-4.0000 + 0.0000i
-2.0000 + 0.0000i
-3.0000 - 0.0000i

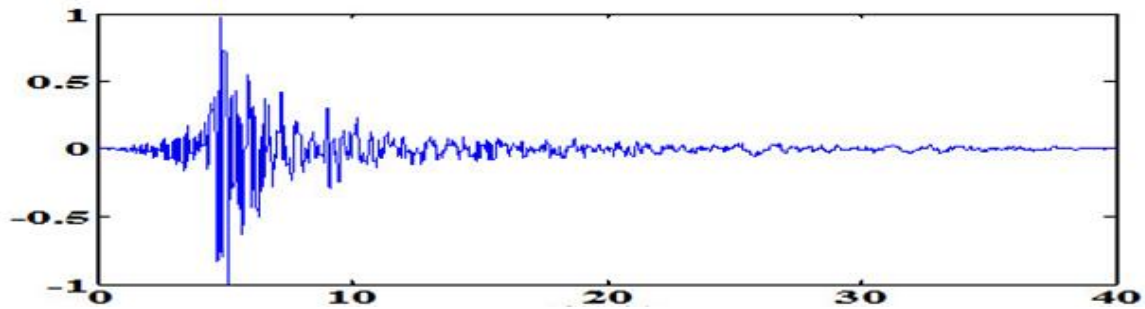
```

شکل ۵-۷: از بالا به پایین به ترتیب ماتریس سیستم اصلاح شده (A)، ماتریس Q و قطب‌های حلقه بسته سیستم تا پایان مرحله ۳

مشاهده می‌گردد که در مرحله سوم همه قطب‌ها به مکان‌های موردنظر انتقال می‌یابند. ماتریس نهایی سیستم همان ماتریس اصلاح شده سیستم در مرحله ۳ است. در حقیقت این ماتریس اصلاح شده سیستم همان نقش ماتریس $A + BG$ در الگوریتم کلاسیک را ایفا می‌کند. ماتریس وزنی Q هم از مجموع ماتریس وزنی در سه مرحله بدست می‌آید.

مثال دوم: هدف از این مثال اثبات مثال اثبات بهینگی الگوریتم جاینشانی قطب‌هاست. با فرض صحت الگوریتم کلاسیک، در این مثال با استفاده از ماتریس Q و R مشخص، پاسخ سازه و قطب حلقه بسته سیستم توسط این الگوریتم بدست می‌آید و سپس توسط الگوریتم جایابی قطب‌ها، قطب حلقه باز سیستم به این قطب‌های حلقه بسته انتقال می‌یابد و در نهایت پاسخ این دو الگوریتم بازای قطب‌های یکسان مقایسه می‌گردد.

مدل سازه‌ای همان قاب هشت طبقه ارائه شده در بخش (۵-۱-۱-۲) می‌باشد که در اینجا برای تحلیل خطی مدنظر می‌باشد. رکورد اعمالی بر این مدل، زلزله Loma Prieta (ایستگاه Gilroy Array، ۱۹۸۹) می‌باشد و به 1g مقیاس شده است. این رکورد در شکل ۵-۸ نشان داده شده است.



شکل ۵-۸: تاریخچه زمانی زلزله Loma Prieta (شتاب (g) بر حسب زمان (s)) و مقیاس شده به 1g

فرض می‌شود در هر طبقه یک کنترلر قرار گیرد. ماتریس Q و R بصورت زیر فرض می‌شود:

$$Q_1 = 10^{10} * I_{16} \quad ; \quad Q_2 = 10^{11} * I_{16} \quad ; \quad R = 0.1 * I_8$$

در جدول ۵-۱۲ قطب‌های حلقه بسته و در جدول ۵-۱۳ میزان جابجایی بیشینه نسبی هر طبقه برای دو الگوریتم کلاسیک و جایابی قطب‌ها و برای دو حالت مختلف از ماتریس Q، ارائه می‌شود.

جدول ۵-۱۲: قطب‌های حلقه بسته برای دو الگوریتم کلاسیک و جایابی قطب‌ها و دو حالت مختلف نیروی کنترل

کلاسیک (1)		جایابی قطب‌ها (2)		کلاسیک (2)		جایابی قطب‌ها (2)	
-10.303	+81.2431i	-10.303	+81.2431i	-13.250	+80.8106i	-13.25	-80.8106i
-10.303	-81.2431i	-10.303	-81.2431i	-13.250	-80.8106i	-13.250	+80.8106i
-6.3429	+61.7602i	-6.3429	+61.7602i	-9.8062	+61.1963i	-9.8062	-61.1963i
-6.3429	-61.7602i	-5.3673	+55.1748i	-9.8062	-61.1963i	-9.4326	-54.6811i
-5.3673	+55.1748i	-6.3429	-61.7602i	-9.4326	+54.6811i	-9.8062	+61.1963i
-5.3673	-55.1748i	-5.3673	-55.1748i	-9.4326	-54.6811i	-9.4326	+54.6811i
-3.9822	+44.4311i	-3.9822	+44.4311i	-8.2806	+43.7198i	-8.2806	-43.7198i
-3.9822	-44.4311i	-3.1947	+37.6666i	-8.2806	-43.7198i	-7.2701	-37.1922i
-3.1947	+37.6666i	-1.9951	+27.7163i	-7.2701	+37.1922i	-4.7093	-27.3704i
-3.1947	-37.6666i	-1.2179	+17.8506i	-7.2701	-37.1922i	-8.2806	+43.7198i
-1.9951	+27.7163i	-3.9822	-44.4311i	-4.7093	+27.3704i	-7.2701	+37.1922i
-1.9951	-27.7163i	-3.1947	-37.6666i	-4.7093	-27.3704i	-3.1403	-17.6348i
-1.2179	+17.8506i	-1.9951	-27.7163i	-3.1403	+17.6348i	-4.7093	+27.3704i
-1.2179	-17.8506i	-0.4796	+ 6.9735i	-3.1403	-17.6348i	-1.0955	- 6.9096i
-0.4796	+ 6.9735i	-1.2179	-17.8506i	-1.0955	+ 6.9096i	-3.1403	+17.6348i
-0.4796	- 6.9735i	-0.4796	- 6.9735i	-1.0955	- 6.9096i	-1.0955	+ 6.9096i

جدول ۵-۱۳: جابجایی بیشینه نسبی هر طبقه برای دو الگوریتم کلاسیک و جایابی قطب‌ها و برای دو حالت مختلف نیروی کنترل

طبقه	1	2	3	4	5	6	7	8
------	---	---	---	---	---	---	---	---

بدون کنترل	2.34	2.14	1.8	3.88	3.95	3.26	5.01	3.12
الگوریتم کلاسیک (۱)	1.96	1.83	1.62	3.37	3.36	2.78	4.51	2.76
الگوریتم جانشانی قطب ها (۱)	1.96	1.84	1.62	3.37	3.36	2.78	4.50	2.76
الگوریتم کلاسیک (۲)	1.51	1.36	1.17	2.24	2.12	2.02	3.10	1.75
الگوریتم جانشانی قطب ها (۲)	1.56	1.40	1.19	2.27	2.14	2.03	2.94	1.63

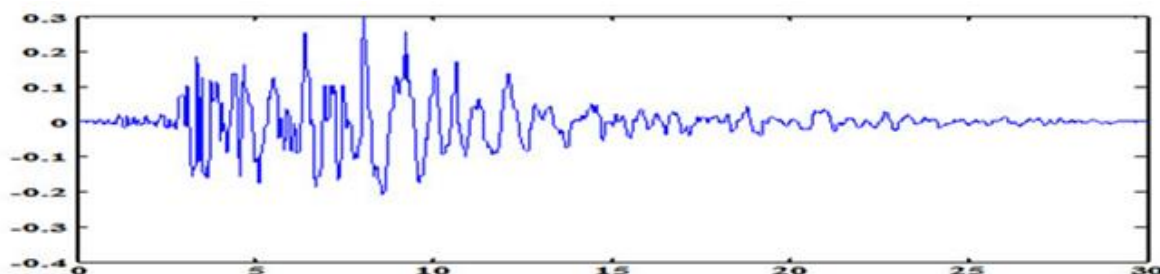
۵-۱-۵ مثال کلی

با توجه به اینکه صحت الگوریتم‌ها در بخش‌های قبل مورد بررسی قرار گرفت، اکنون در قالب یک مثال کلی نتایج این ۴ الگوریتم مورد بررسی مجدد قرار می‌گیرد. برای این کار از رکورد Northridge استفاده می‌شود که مشخصات این رکورد در جدول ۵-۱۴ ارائه شده است.

جدول ۵-۱۴: مشخصات زلزله Northridge

Earthquake	Station	Record/Component
Northridge 1994/01/17 12:31	90013 Beverly Hills - 14145 Mulhol	NORTHR/MUL009

تاریخچه زمانی این رکورد در شکل ۵-۹ و مشخصات سازه در جدول ۵-۱۵ ارائه شده است.



شکل ۵-۹: تاریخچه زمانی زلزله Northridge (شتاب (g) بر حسب زمان (s)) و مقیاس شده به 0.3g

جدول ۵-۱۵: مشخصات مدل ارائه شده توسط Yang و همکارانش

طبقه	1	2	3	4	5	6	7	8
جرم (ton)	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
سختی (KN/m*10e5)	3.4	3.26	2.85	2.69	2.43	2.07	1.69	1.37
میرایی (KN.s/m)	490	467	410	386	348	298	243	196

مقدار نیروی کنترل مجاز برابر ۲۵۰۰ کیلونیوتن فرض شده است. پاسخ بیشینه سازه برای چهار الگوریتم

کنترلی مختلف بدست آمده است که در جدول ۵-۱۶ ارائه می‌شود.

جدول ۵-۱۶: مقادیر جابجایی و نیروی کنترل برای ۴ الگوریتم کنترلی مختلف و با در نظرگیری تاخیر زمانی

	بدون تاخیر زمانی		با تاخیر زمانی ۰.۱ ثانیه	
	جابجایی (cm)	جابجایی (cm)	نیروی کنترل (KN)	نیروی کنترل (KN)
بدون کنترل	۴۲.۱۶۴۴	-	۰	۰
کلاسیک	۱۷.۶۸۰۸	۲۸.۵۳۱۷	۲۵۰۰	۲۵۰۰
آنی	۱۸.۲۱۳۶	۲۸.۷۶۹۷	۲۵۰۰	۲۵۰۰
جاینشانی قطبها	۱۸.۳۹۴۶	۳۰.۵۸۶۸	۲۵۰۰	۲۵۰۰
مودال	۱۷.۸۹۳۵	۲۸.۴۷۹۶	۲۵۰۰	۲۵۰۰

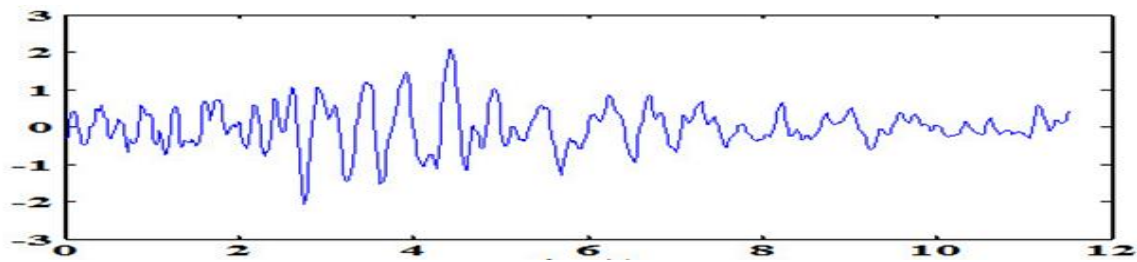
۲-۵ صحت‌سنجی الگوریتم ژنتیک

برای بررسی کارایی الگوریتم ژنتیک، مسئله بهینه‌سازی مکان و تعداد کنترلر بر روی یک قاب ۱۶ طبقه برشی که مشخصات آن در جدول ۵-۱۷ آمده است و از مطالعه Q.S Li و همکارانش استخراج شده [14]، پیاده شده است.

جدول ۵-۱۷: مشخصات مدل ارائه شده توسط Li و همکارانش

طبقه	جرم (ton)	سختی ($10e8 \cdot N/m$)	میرایی (kNs/m)
1	672.3	2.56	27
2 تا 13	568.4	2.56	27
14 تا 16	55.9	1.74	27

رکورد اعمالی به سازه Hector Mine می‌باشد که به 0.22g مقیاس شده است و بصورت زیر می‌باشد:



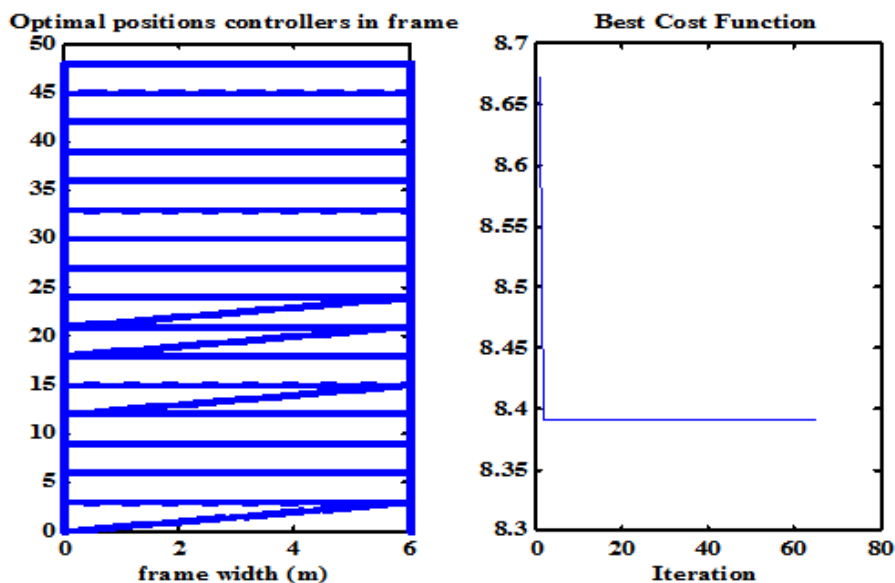
شکل ۵-۱۰: تاریخچه زمانی Hector Mine (شتاب (m/Se2) بر حسب زمان (s) و مقیاس شده به 0.22g

این مسئله توسط دو الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک و الگوریتمی که کلیه فضای ممکن را جستجو می‌کند انجام شده است. تابع هدف جابجایی مطلق بیشینه در کل قاب می‌باشد.

اگر تصمیم بر استفاده از ۴ کنترلر باشد و هدف تعیین بهترین مکان قرارگیری این کنترلرها باشد، نتایج بهینه‌سازی الگوریتم دوم در جدول ۵-۱۸ آمده است. این نتایج ۱۰ تا از بهترین حالت‌های قرارگیری کنترلرها را نشان می‌دهد. نتیجه الگوریتم ژنتیک هم برای استفاده از ۴ کنترلر در جدول ۵-۱۱ نشان داده شده است.

جدول ۵-۱۸: مکان بهینه قرارگیری ۴ کنترلر در قاب مفروض با جستجوی همه حالات ممکن

شماره	مکان کنترلر ۱	مکان کنترلر ۲	مکان کنترلر ۳	مکان کنترلر ۴	جابجایی بیشینه (cm)
1	1	5	7	8	8.3903
2	1	5	7	9	8.5012
3	1	5	7	10	8.51
4	1	5	6	8	8.5211
5	4	5	6	7	8.5249
6	1	5	6	9	8.5828
7	4	5	6	8	8.5929
8	4	5	6	10	8.6082
9	4	5	6	9	8.6115
10	1	5	8	10	8.6336



شکل ۵-۱۱: سمت چپ: مکان بهینه ۴ کنترلر و سمت راست: نمودار تغییرات تابع هدف

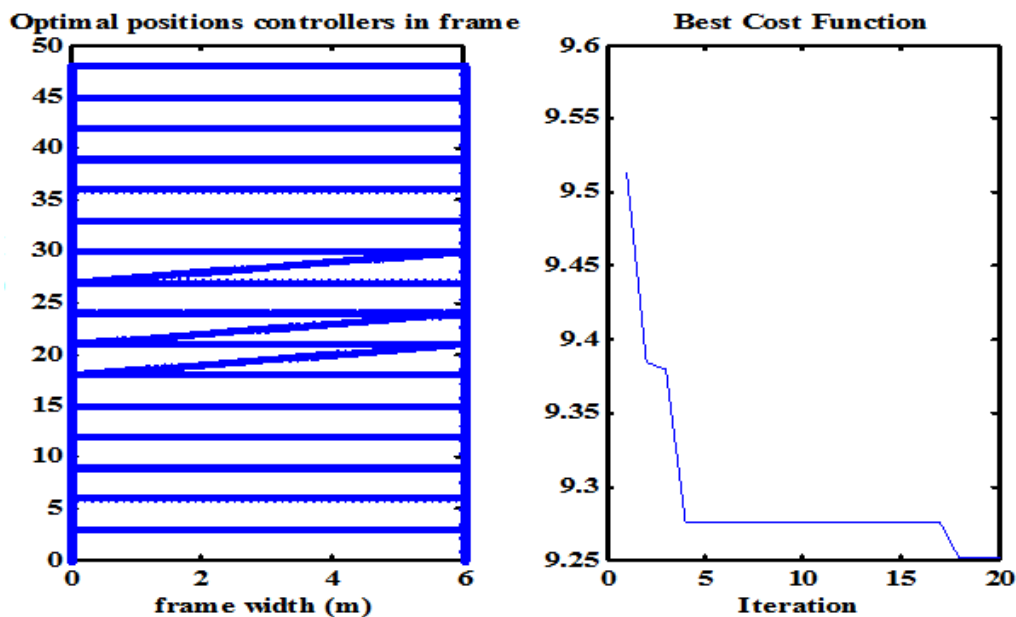
مشاهده می‌شود که در شکل ۵-۱۱ در نمودار سمت چپ همان جواب بهینه الگوریتم قبلی بدست آمده است. نمودار سمت راست هم روند تغییرات بهترین تابع هدف در هر مرحله است.

در صورت استفاده از ۳ کنترلر، ۱۰ تا از بهترین جواب‌های الگوریتم بهینه‌سازی دوم بصورت زیر است:

جدول ۵-۱۹: مکان بهینه قرارگیری ۳ کنترلر در قاب مفروض با جستجوی همه حالات ممکن

شماره	مکان کنترلر ۱	مکان کنترلر ۲	مکان کنترلر ۳	جابجایی بیشینه (cm)
1	7	8	10	9.251318955
2	6	7	10	9.275833746
3	1	5	7	9.278901968
4	4	5	6	9.339282962
5	7	8	11	9.340060665
6	4	5	10	9.379928161
7	6	7	11	9.384573121
8	7	8	9	9.41407528
9	6	7	9	9.419660187
10	7	9	10	9.427870535

و برای این ۳ کنترلر در قاب، نتایج بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک در شکل ۵-۱۲ ارائه شده است.



شکل ۵-۱۲: سمت چپ: مکان بهینه ۳ کنترلر و سمت راست: نمودار تغییرات تابع هدف

باز هم مشاهده می‌گردد که نتایج الگوریتم ژنتیک با الگوریتم دوم یکسان است.

فصل ۶: مدل‌سازی و نتایج

۱-۶ مدل‌سازی

۱-۱-۶ مدل‌سازی

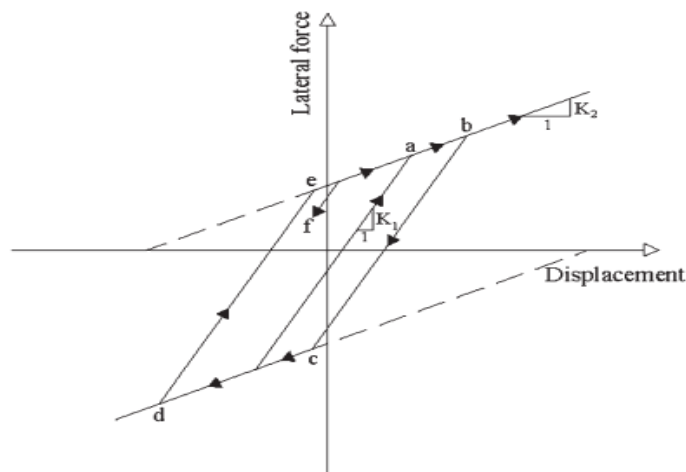
برای انجام فرآیند بهینه‌سازی از دو مدل‌سازی استفاده شده است:

- مدل اول، مدلی از قابی برشی هشت طبقه (Yang,1988) است که مشخصات جرم، سختی و میرایی برای این مدل در جدول ۱-۶ ارائه شده است.

جدول ۱-۶: مشخصات مدل ارائه شده توسط Yang (۱۹۸۸)

طبقه	1	2	3	4	5	6	7	8
جرم (ton)	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
سختی خطی (10e5KN/m)	3.404	3.404	3.404	3.404	3.404	3.404	3.404	3.404
سختی غیرخطی (10e4KN/m)	3.404	3.404	3.404	3.404	3.404	3.404	3.404	3.404
میرایی (KN.s/m)	734.3	734.3	734.3	734.3	734.3	734.3	734.3	734.3

مدل رفتاری (تغییرات نیروی سختی بر حسب جابجایی نسبی) این سازه در شکل ۱-۶ رسم شده است. در این شکل K_1 و K_2 بترتیب سختی خطی و غیرخطی سازه می‌باشند. از این مدل سازه‌ای برای بهینه‌سازی مکان و تعداد کنترلر در قاب برشی با رفتار غیرخطی استفاده می‌شود. میزان تغییر مکان نسبی مجاز با فرض ارتفاع ۳ متر برای طبقات برابر ۶ سانتی‌متر می‌باشد.



شکل ۱-۶: مدل رفتاری برای سازه تعریف شده در جدول ۱-۶

- مدل دوم قاب دو بعدی است که در نرم‌افزار ETABS مدل شده است. شکل کلی و نوع مقاطع اعضای این قاب در شکل ۲-۶ رسم شده است.

C3	Box 25x25x1.5
C2	Box 30x30x1.5
C1	Box 35x35x2
B1	IPE300
B2	IPE270
B3	IPE240

	B3	B3	B3
C3	B3 C3	B3 C3	B3 C3
C3	B2 C3	B2 C3	B2 C3
C2	B2 C2	B2 C2	B2 C2
C2	B2 C2	B2 C2	B2 C2
C2	B1 C2	B1 C2	B1 C2
C1	B1 C1	B1 C1	B1 C1
C1	B1 C1	B1 C1	B1 C1
C1	C1	C1	C1

شکل ۶-۲: قاب دو بعد مدل شده در نرم افزار **Etabs** (سمت راست) به همراه مقاطع بکار رفته در تیر و ستون آن (سمت چپ)

این قاب از نوع قاب خمشی ویژه بوده و در طراحی این قاب از فرضیات زیر استفاده شده است:

- محل قرارگیری ساختمان، تهران با خاک نوع ۳ می باشد.
- ارتفاع کلیه طبقات برابر ۳ متر و دهانه قاب برابر ۶ متر است.
- بار مرده و زنده طبقات بترتیب برابر با ۶۰۰ و ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمربع و بار مرده و زنده بام بترتیب برابر ۶۵۰ و ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمربع می باشد.

این مدل از دو دیدگاه مورد بررسی قرار گرفته است: در نگاه اول این قاب برشی فرض شده و جرم، سختی و میرایی (با فرض استفاده از میرایی رایلی و برای نسبت میرایی ۵ درصد) بصورت زیر است:

شکل ۶-۳: مشخصات جرم و سختی طبقات قاب شکل ۶-۲ با فرض رفتار برشی

طبقه	1	2	3	4	5	6	7	8
جرم (ton)	105.97	105.97	105.51	104.93	104.79	104.65	104.55	87.65
سختی خطی (10e5KN/m)	2.136	2.136	2.136	2.136	2.136	2.136	2.136	2.136

ماتریس جرم و سختی با استفاده از روابط بیان شده برای قاب های برشی در فصل سوم بدست می آید و

ماتریس میرایی نیز به روش رایلی و از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$C = 0.5585M + 0.0029K \quad (۱-۶)$$

این مدل برای بررسی رفتار غیربرشی هم استفاده می‌شود. با استفاده از روابط بیان شده در فصل سوم برای قاب‌های غیربرشی، ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی تشکیل می‌شود. بنابراین از این قاب برای مسئله بهینه‌سازی مکان و تعداد کنترلر در قاب برشی و غیربرشی و با رفتار خطی استفاده می‌شود. میزان تغییر مکان نسبی مجاز برای این سازه برابر ۰.۸۵۷ سانتی‌متر می‌باشد.

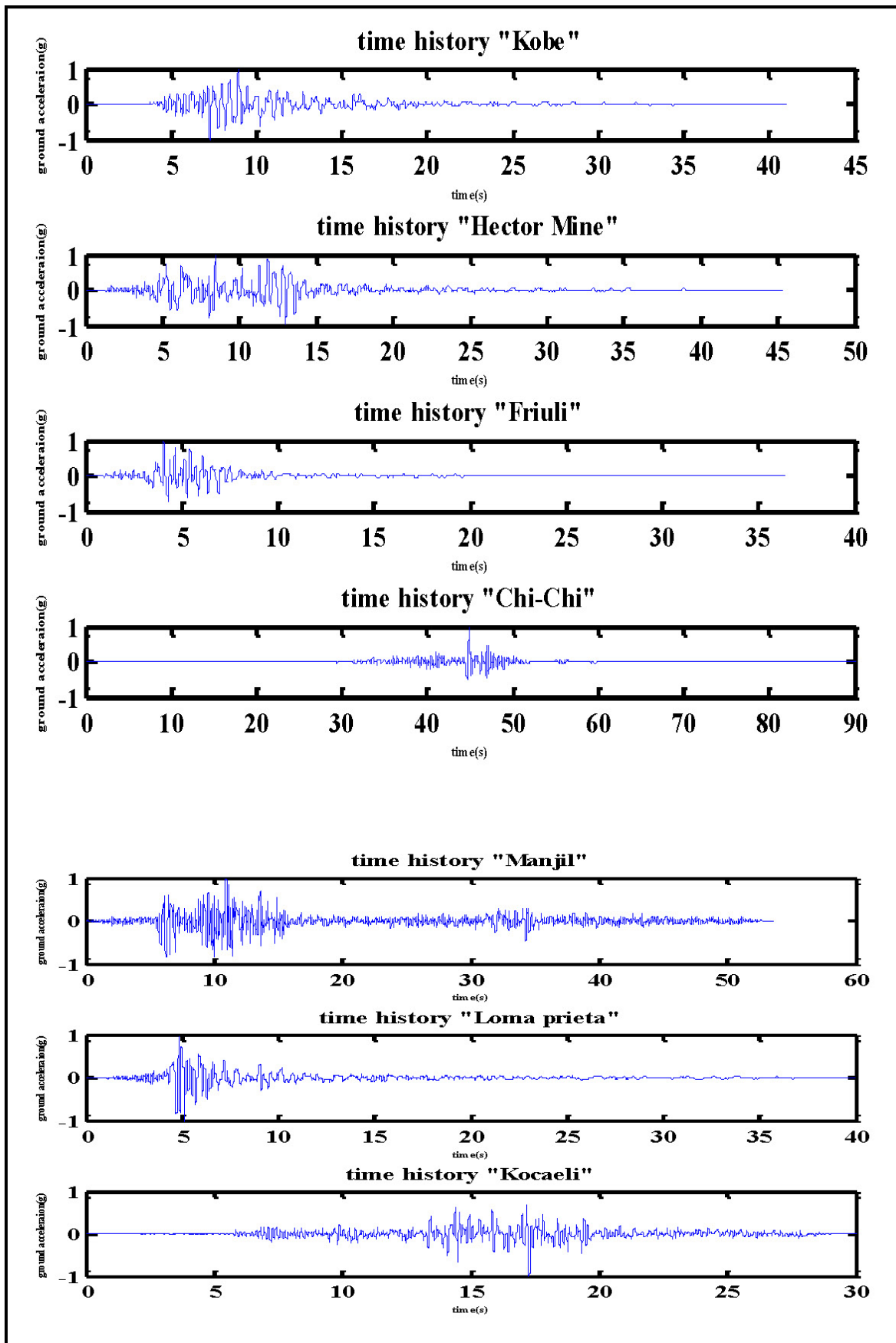
۶-۱-۲ رکورد زلزله

مشخصات هفت رکورد زلزله در جدول ۶-۲ ارائه شده است. و این رکوردها بر طبق آیین‌نامه ۲۸۰۰ که در بخش ۴-۱-۱ مفاهیم آن ذکر شد، مقیاس می‌گردند. با توجه به اینکه سازه مورد بررسی دو بعدی است مولفه‌ای از رکورد انتخاب می‌گردد که پاسخ بیشتری در سازه وارد نماید. بعد از انتخاب این هفت مولفه، این رکوردها به 1g مقیاس می‌شود که تاریخچه زمانی مقیاس شده این رکوردها در شکل ۶-۴ آمده است. سپس منحنی طیف شتاب هر کدام از رکوردها رسم می‌شود که این منحنی‌ها در شکل ۶-۵ آمده است. سپس از این هفت طیف باید میانگین گرفته شود که این طیف میانگین بصورت برجسته در شکل ۶-۶ رسم شده است. با توجه به اینکه نوع سازه‌ای که در محدوده رفتار خطی از آن استفاده می‌شود و دارای پریود ۰.۸۹۹ ثانیه است (قاب دوم) و با توجه به آیین‌نامه ۲۸۰۰، برای بازه بین ۰.۱۸ تا ۱.۳۵ ثانیه و برای تحلیل خطی باید نمودار میانگین طیف رکوردها بالاتر از طیف طرح استاندارد آیین‌نامه (ABI/R) باشد. برای رسیدن به چنین هدفی باید میانگین طیف رکوردها در ۰.۲۱۷۲ ضرب شود. طیف میانگین مقیاس شده و طیف طرح استاندارد آیین‌نامه در شکل ۶-۷ رسم شده‌اند.

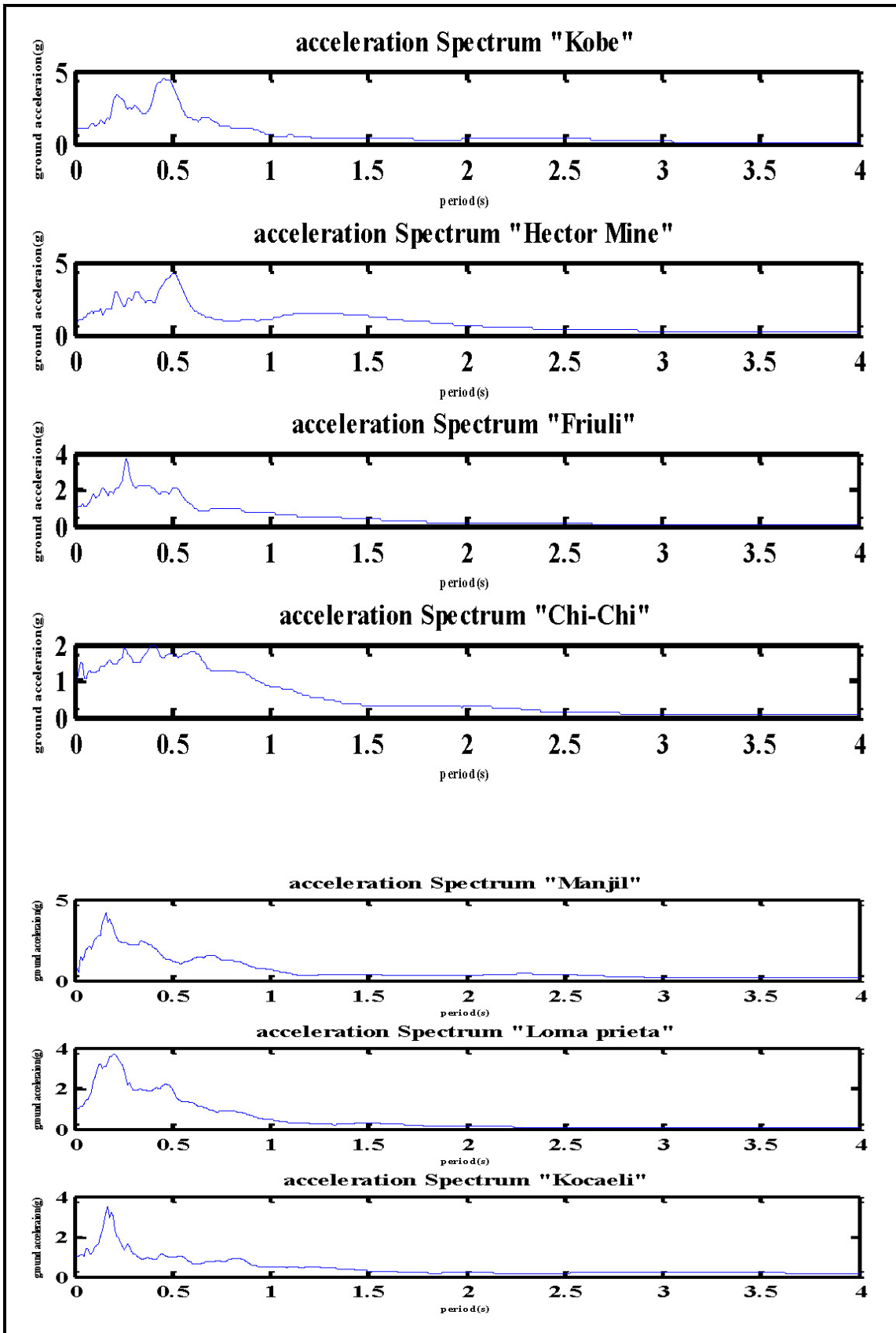
جدول ۶-۲: مشخصات هفت رکورد زلزله

موسسه ثبت رکورد	نام	نام رکورد	سال وقوع	بزرگی	شماره رکورد
SCSN	Hector	Hector Mine	1999	7.1	1

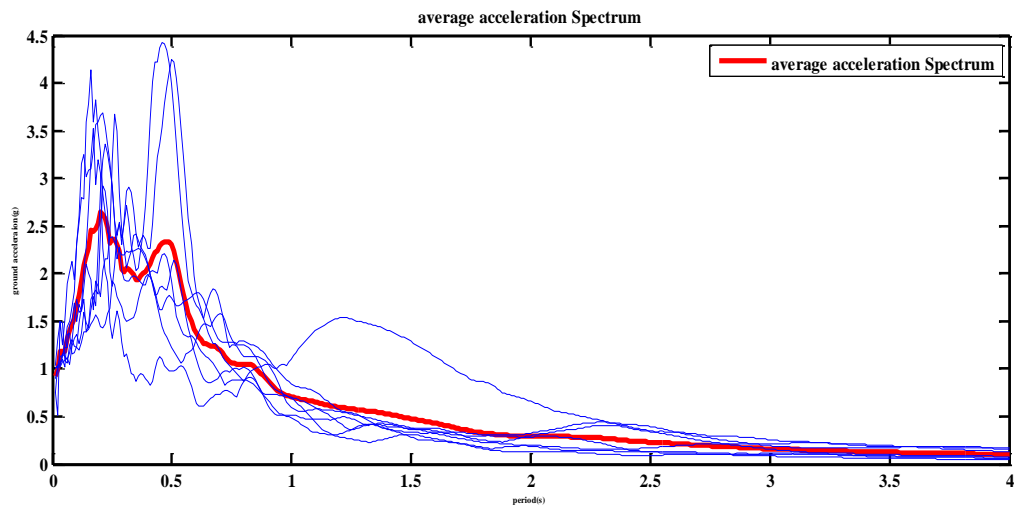
2	6.9	1995	Kobe, Japan	Nishi-Akashi	CUE
3	7.5	1999	Kocaeli, Turke	Arcelik	KOERI
4	6.9	1989	Loma Prieta	Gilroy Array	CDMG
5	7.4	1990	Manjil, Iran	Abbar	BHRC
6	7.6	1999	Chi-Chi, Taiwan	TCU045	CWB
7	6.5	1976	Friuli, Italy	Tolmezzo	--



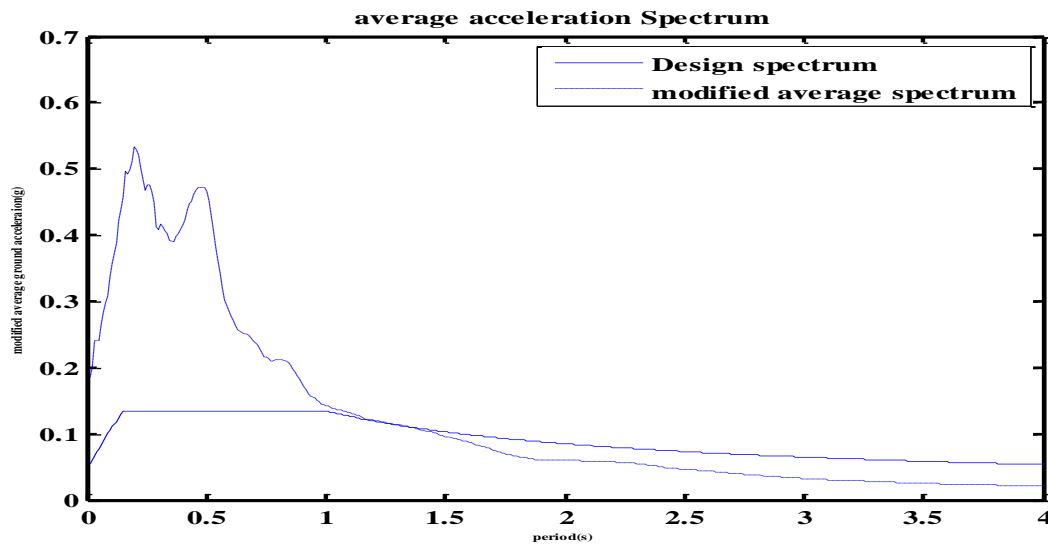
شکل ۶-۴: تاریخچه زمانی هفت زلزله مختلف (شتاب (g) بر حسب زمان (s)) و مقیاس شده به 1g



شکل ۶-۵: منحنی طیف شتاب هفت رکورد رسم شده در شکل ۶-۴ (شتاب (g) بر حسب پریود (s))

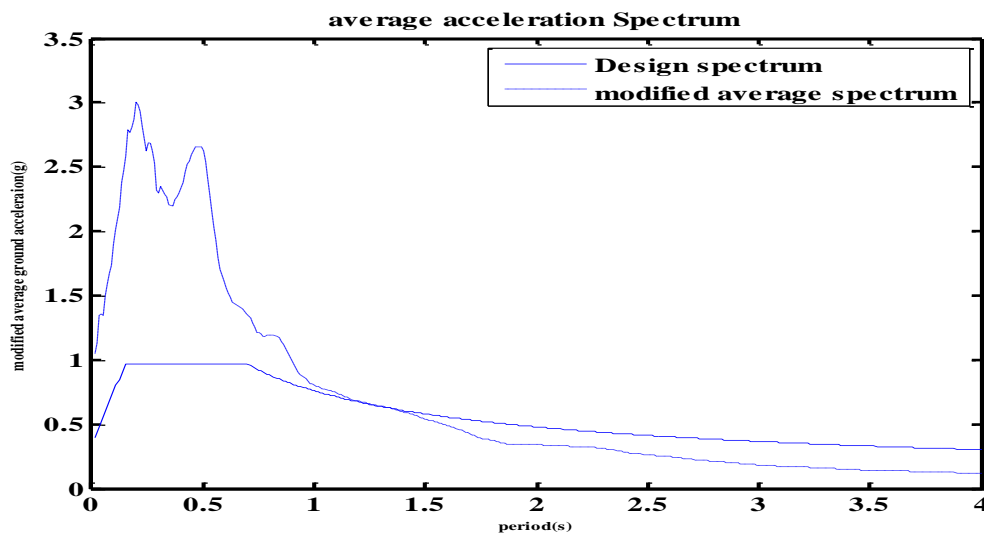


شکل ۶-۶: طیف میانگین هفت طیف رسم شده در شکل ۵-۶ (منحنی قرمز رنگ)



شکل ۶-۷: طیف طرح استاندارد و طیف میانگین مقیاس شده برای تحلیل خطی

برای تحلیل غیرخطی باید نمودار میانگین طیف رکوردها بالاتر از طیف طرح آیین‌نامه (ABI) با فرض $R=1$ باشد. برای رسیدن به چنین هدفی باید میانگین طیف رکوردها در 1.1367 ضرب شود. این طیف میانگین اصلاح شده و طیف طرح آیین‌نامه در شکل ۶-۸ رسم شده‌اند.



شکل ۶-۸: طیف طرح استاندارد و طیف میانگین مقیاس شده برای تحلیل غیرخطی

بعد از تعیین عدد مقیاس، باید همه رکوردهایی که به 1g مقیاس شده‌اند را در عدد مقیاس ضرب کرد. در ضمن با استفاده از روش RMSA مدت دوام موثر رکوردها تعیین می‌شود. در جدول ۶-۳ مدت دوام هر یک از رکوردهای اولیه نشان داده شده است.

جدول ۶-۳: تعیین طول موثر رکوردها

رکورد زلزله	Kocaeli	Loma Prieta	Manjil	Chi-Chi	Friuli	Hector Mine	Kobe
بازه زمانی (ثانیه)	0.01	0.01	0.005	0.005	0.02	0.005	0.005
طول اولیه رکورد (ثانیه)	40.96	45.31	36.35	90	53.52	39.945	30
زمان اولیه اصلاح شده (ثانیه)	4.54	3.3	1.765	33.27	5.46	3.065	6.79
زمان نهایی اصلاح شده (ثانیه)	16.07	14.3	7.525	50.43	43.36	10.195	23.07
بازه زمانی اصلاح شده (ثانیه)	11.53	11	5.76	17.16	37.9	7.13	16.27

در نتیجه برای تحلیل باید رکوردهای ارائه شده در شکل ۶-۴ را ابتدا با توجه به نوع تحلیل خطی یا غیرخطی در ضریب مقیاس مربوطه ضرب کرد و سپس می‌توان برای تسریع در محاسبات بازه اصلاح شده رکوردها را با توجه به جدول ۶-۳ در نظر گرفت و بر سازه اعمال نمود.

۶-۱-۳ رکورد باد

فرضیات اولیه مورد استفاده برای تولید رکورد باد از آیین نامه ASCE7-05 استخراج شده است. این

فرضیات در جدول ۴-۶ ارائه شده است.

جدول ۴-۶: فرضیات موردنیاز برای تولید رکورد باد برگرفته از ASCE7-05

منطقه مورد مطالعه	ضریب فشار باد	چگالی هوا	فرکانس اولیه	فرکانس نهایی
B	1.3	1.226 (kg/m ³)	0.6507(rad/s)	4 (rad/s)
بازه فرکانسی	سرعت مبنای باد	مدت دوام وزش باد	بازه زمانی	طول زبری
4096 (rad/s)	76 (m/s)	60 (s)	0.1 (s)	0.0012 (m)

آیین‌نامه برای بدست آوردن سرعت متوسط باد در ارتفاع ۱۰ متر، رابطه (۲-۶) را پیشنهاد نموده است.

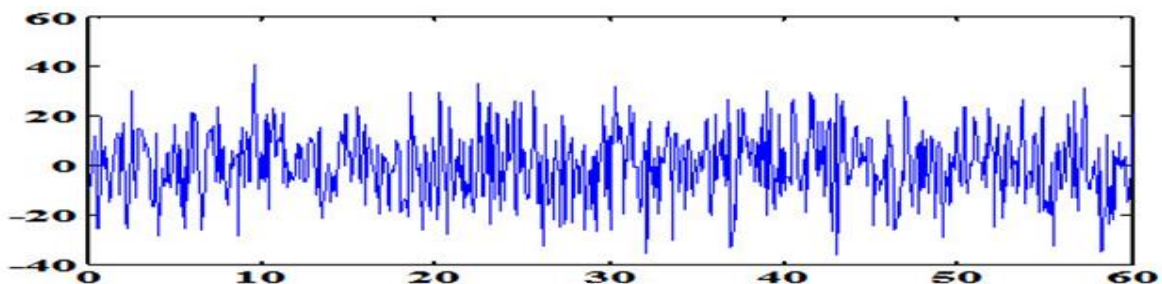
$$\bar{V}_{10} = \bar{a}(0.1H_{equ})^{\bar{b}} * V \quad (۲-۶)$$

بطوریکه \bar{a} و \bar{b} ضرایب آیین‌نامه‌ای هستند که با توجه به نوع منطقه مورد مطالعه بترتیب برابر با ۰.۲۵ و ۰.۴۵ می‌باشند و H_{equ} ارتفاع معادل سازه که معمولاً برابر ۰.۶ ارتفاع کل سازه در نظر گرفته می‌شود و V سرعت متوسط باد می‌باشد. با این فرض‌ها و با استفاده از رابطه (۲-۶)، سرعت متوسط باد در ارتفاع ۱۰ متر برابر با ۳۷.۴۶ متر بر ثانیه می‌گردد.

طیف چگالی داون‌پورت با توجه به رابطه (۷-۴) و ضرایب داده شده بصورت رابطه (۳-۶) خلاصه می‌شود.

$$S_v(\omega) = 132.4805 \frac{\omega^2}{\omega(1 + 25.9878\omega^2)} \quad (۳-۶)$$

حال با استفاده از رابطه (۸-۴) رکورد باد در حوزه زمانی تولید می‌شود. تاریخچه زمانی این رکورد در شکل ۹-۶ ارائه شده است.

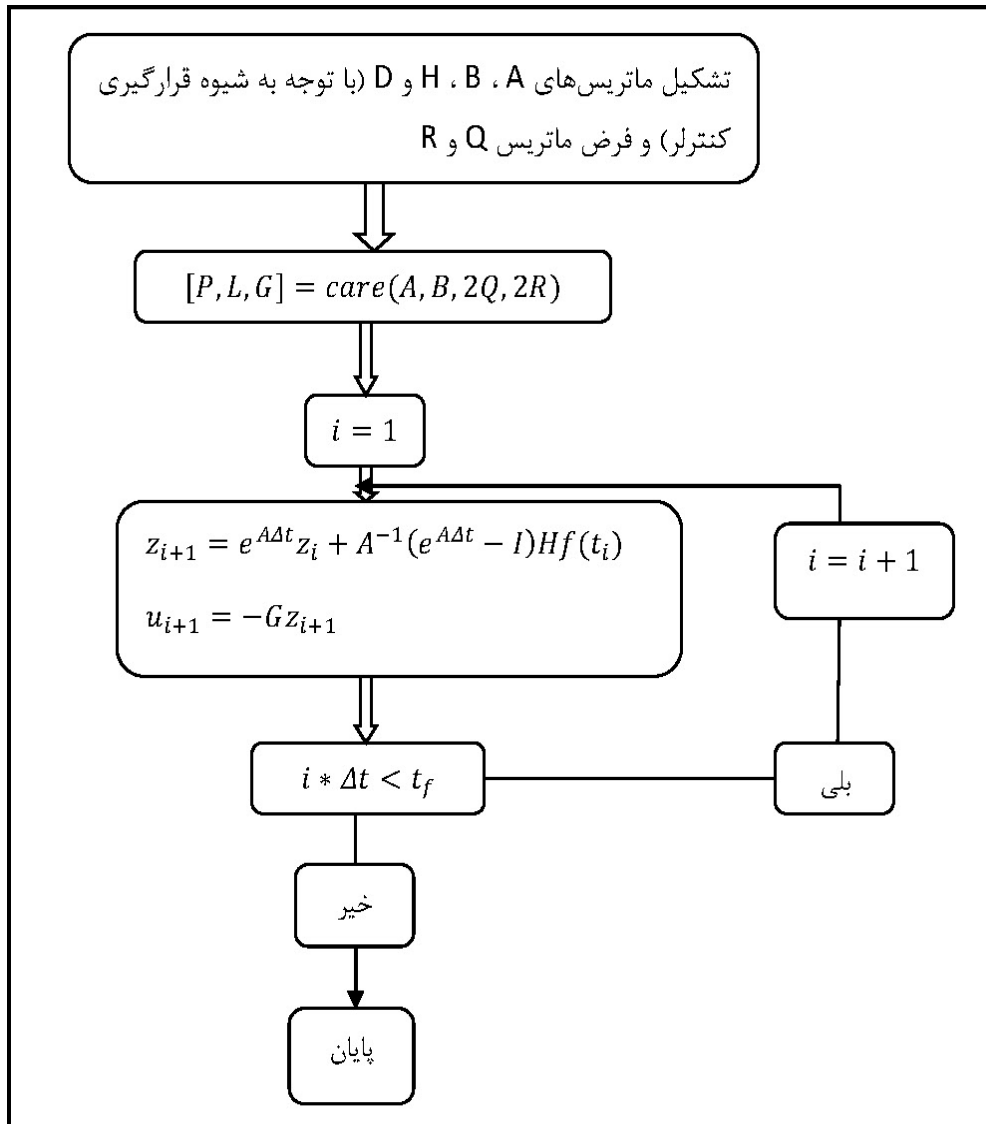


شکل ۹-۶: تاریخچه زمانی رکورد باد تولید شده (سرعت (m/s) بر حسب زمان (s))

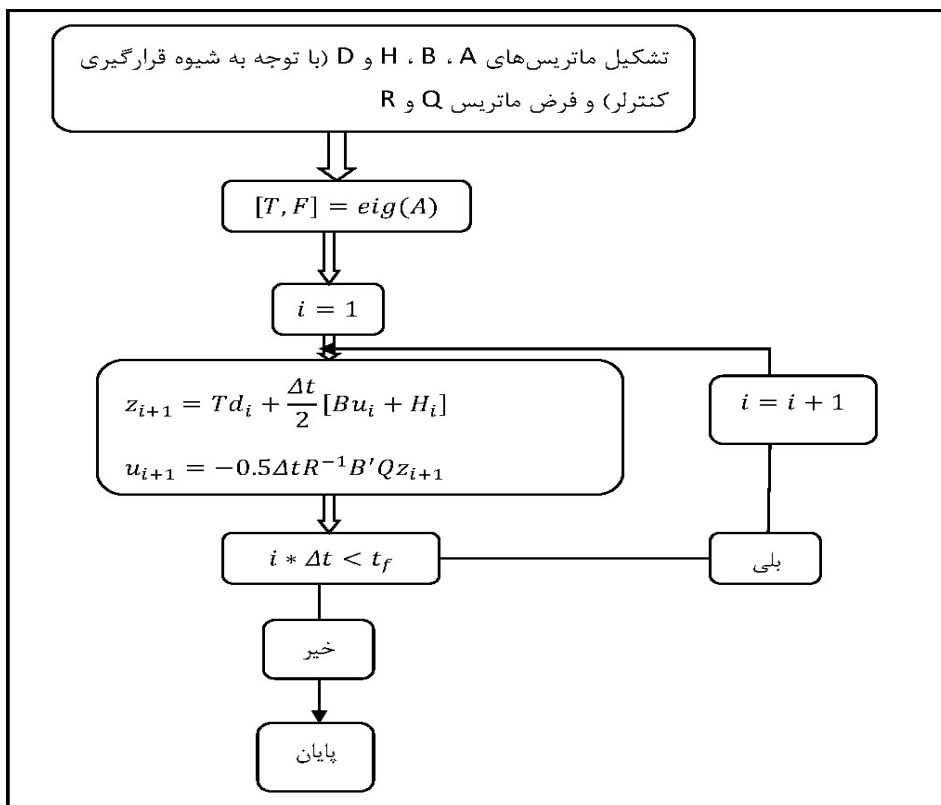
۴-۱-۶ روند بهینه‌سازی مکان و تعداد کنترلر

۱-۴-۱-۶ ساختار الگوریتم‌های مختلف کنترل فعال

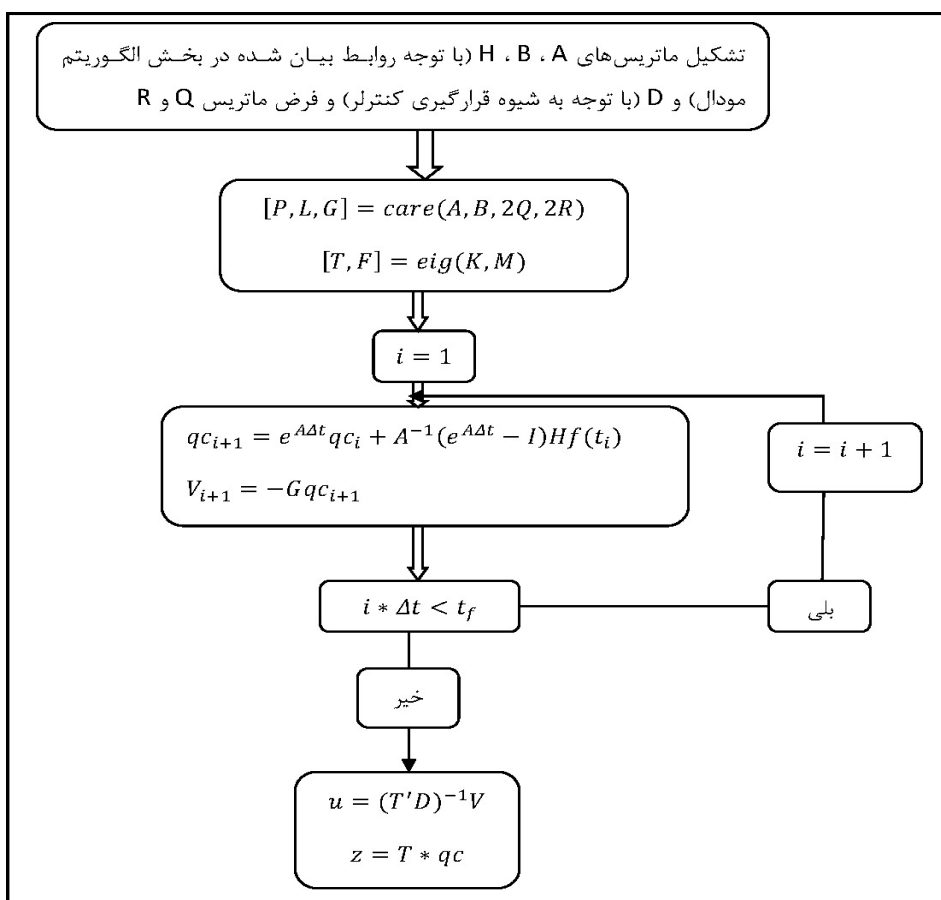
ساختار الگوریتم‌های کلاسیک، آنی، مودال و جاینشانی قطب‌ها در حالت خطی بترتیب در اشکال ۱۰-۶ تا ۱۳-۶ ارائه شده است. این الگوریتم‌ها برای هر دو دیدگاه قاب برشی و غیربرشی کاربرد دارند. تنها تفاوت این دو حالت در ماتریس‌های M ، K ، C می‌باشد. در این الگوریتم‌ها را می‌توان هم برای بارگذاری زلزله و هم برای بارگذاری باد بکار گرفت که تفاوت این دو بارگذاری در ماتریس H و نوع رکورد آشکار می‌گردد.



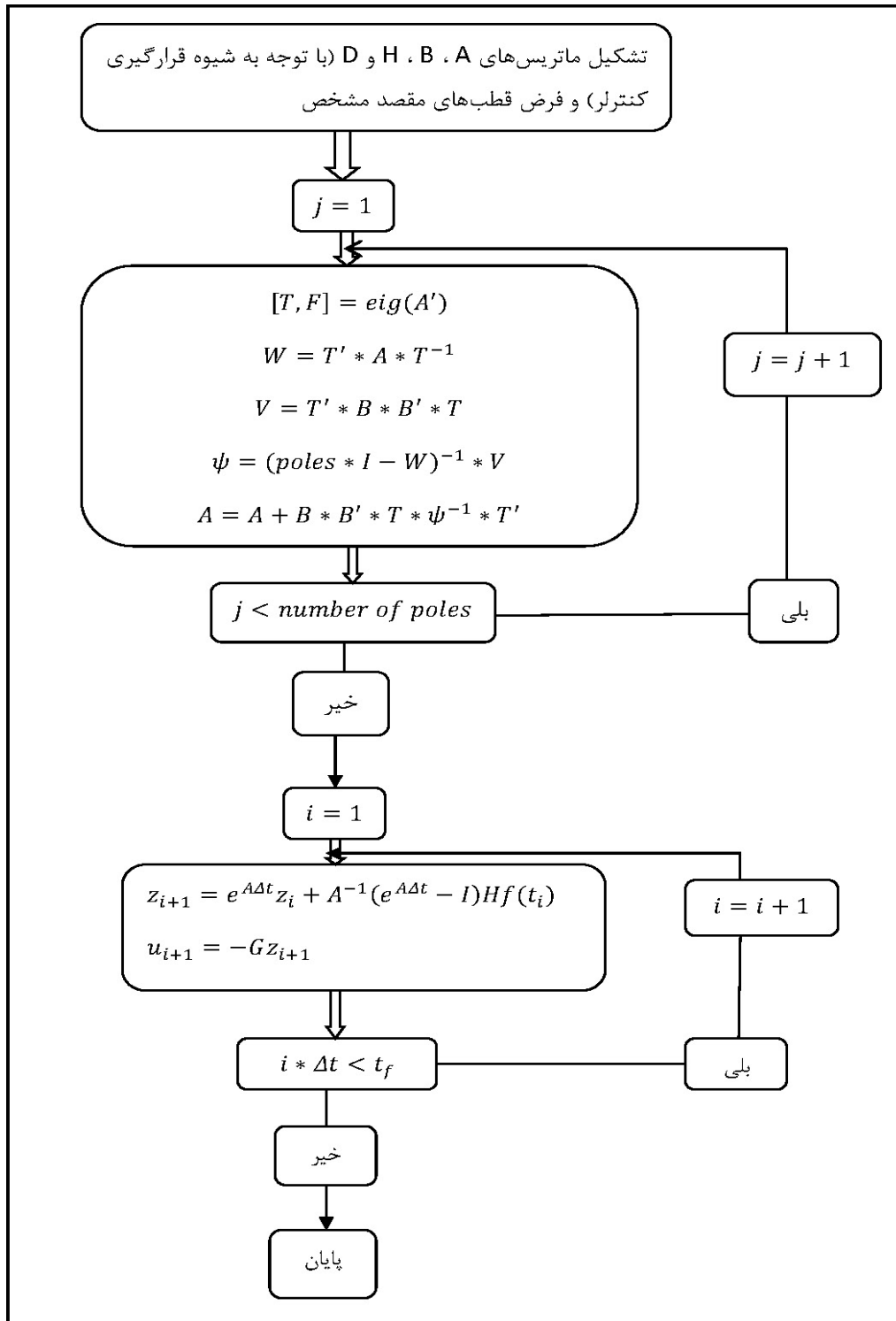
شکل ۱۰-۶: ساختار الگوریتم کلاسیک خطی



شکل ۶-۱۱: ساختار الگوریتم آنی خطی

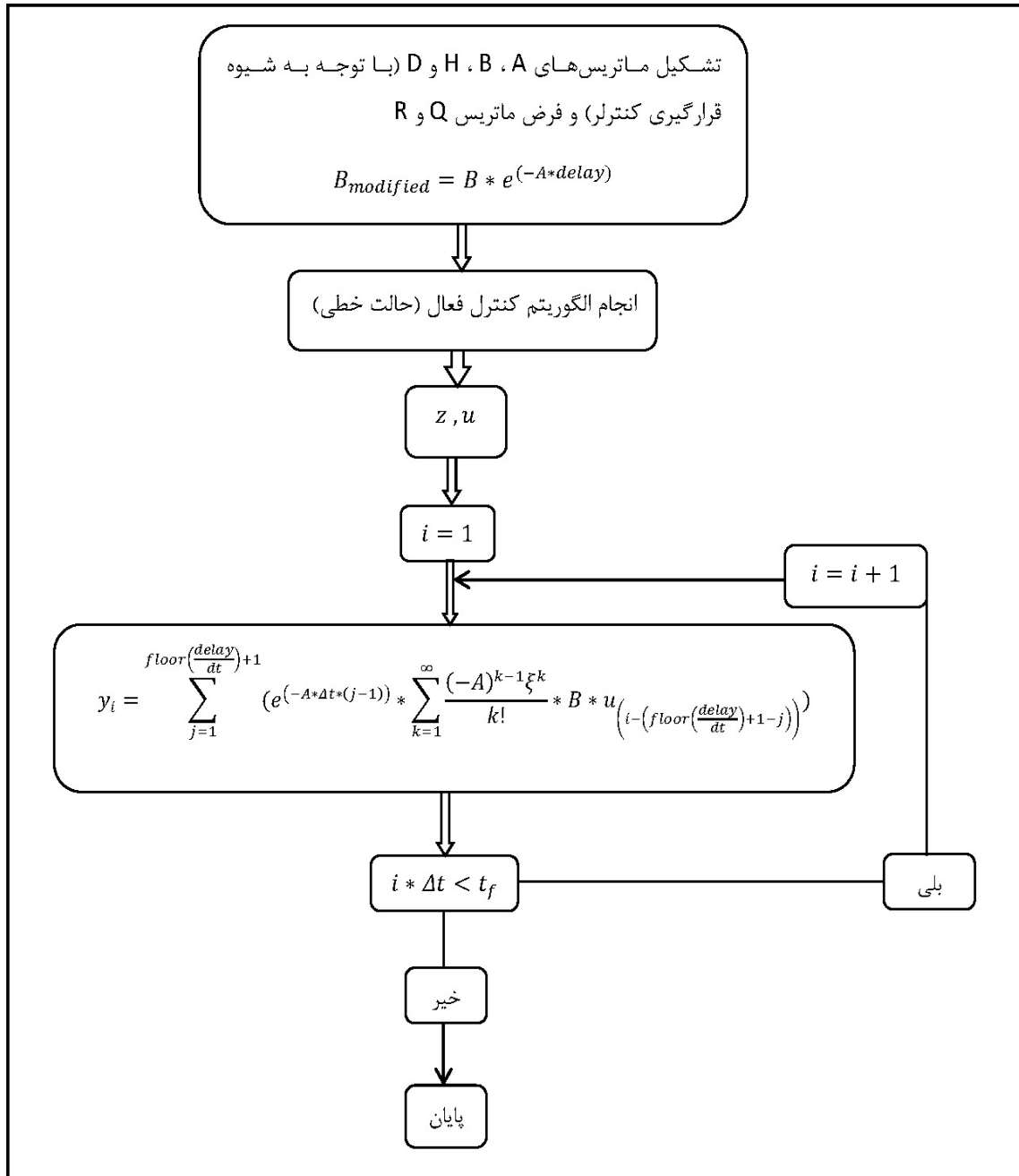


شکل ۶-۱۲: ساختار الگوریتم مودال



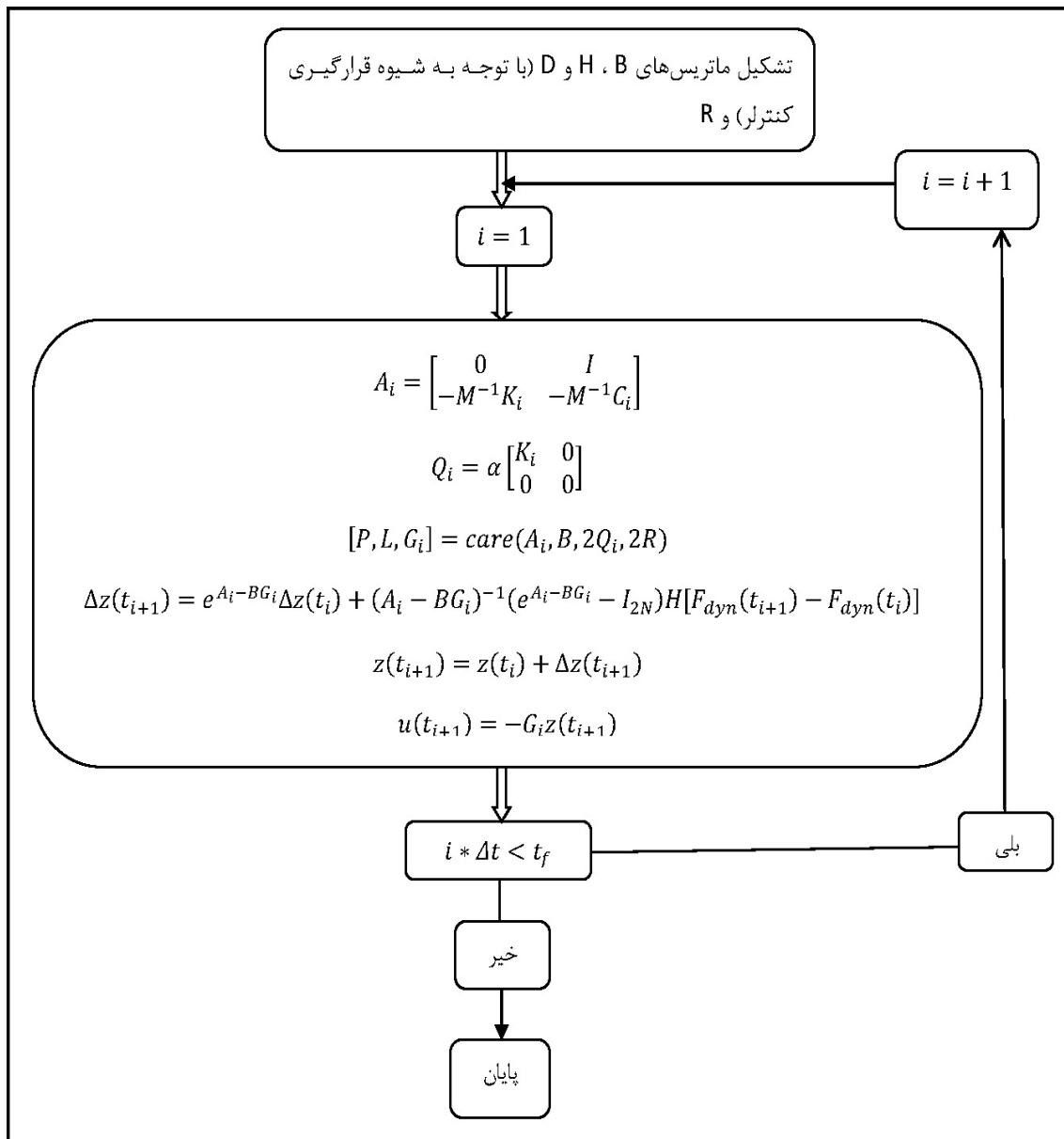
شکل ۶-۱۳: ساختار الگوریتم جایابی قطب‌ها

ساختار کلی برای در نظر گرفتن اثر تاخیر زمانی با استفاده از روش انتگرال گیری در شکل ۱۴-۶ نشان داده شده است. اگر از روش بسط تیلور برای جبران تاخیر زمانی استفاده شود، شکل ظاهری این الگوریتم مانند شکل ظاهری الگوریتم های کنترل فعال در حالت خطی می باشد. با این تفاوت که ماتریس های A ، B ، H و Q دچار تغییرات ظاهری می شوند که در بخش ۳-۴-۳ این ماتریس ها تعریف شده اند.



شکل ۱۴-۶: ساختار الگوریتم های مختلف کنترلی با در نظر گرفتن اثر تاخیر زمانی (روش انتگرال گیری)

شکل ۶-۱۵ ساختار الگوریتم کلاسیک را برای سازه غیرخطی نشان می‌دهد.

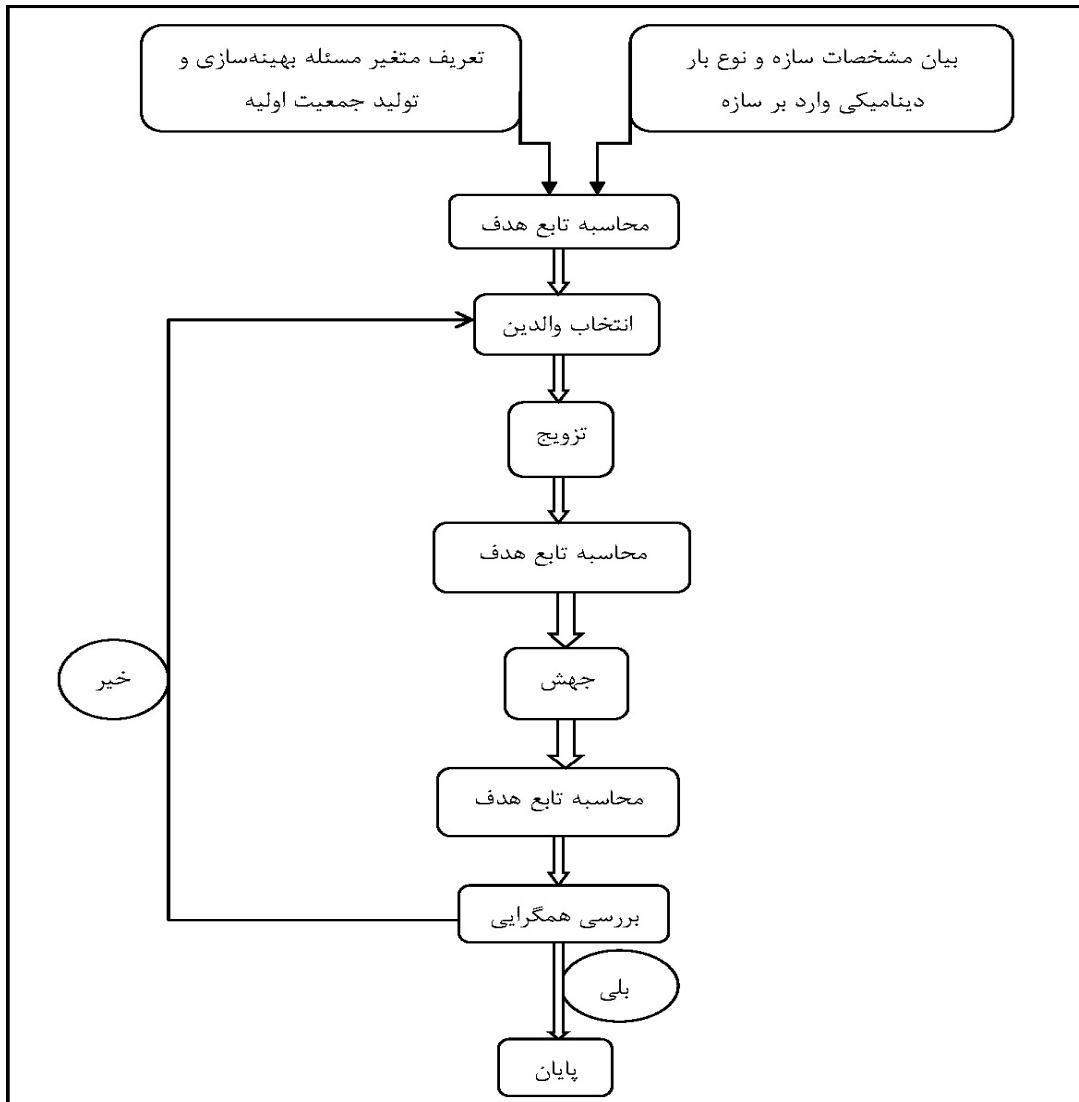


شکل ۶-۱۵: ساختار الگوریتم کلاسیک غیرخطی

۶-۱-۴-۲ ساختار الگوریتم ژنتیک

همانطور که قبلاً نیز اشاره شد در این پژوهش از الگوریتم ژنتیک گسسته استفاده شده است. در شکل

۶-۱۶ ساختار الگوریتم ژنتیک بکار رفته در این پژوهش نشان داده شده است.



شکل ۶-۱۶: ساختار الگوریتم ژنتیک بکار رفته در این مطالعه

تعداد متغیر مسئله بیانگر تعداد کلیه مکان‌هایی است که احتمال قرار گرفتن کنترلر در آن وجود دارد. برای سازه برشی تعداد متغیر برابر تعداد طبقات و میزان متغیر بصورت گسسته از صفر تا تعداد دهانه قاب تغییر می‌کند و برای سازه غیربرشی تعداد متغیر برابر حاصل ضرب تعداد دهانه قاب ضربدر تعداد طبقات و میزان این متغیر صفر یا یک می‌باشد. برای تبدیل متغیرها به فضای گسسته، برای سازه برشی و غیربرشی بترتیب دو و یک بیت برای هر متغیر در نظر گرفته شده است.

روابط کلی برای انجام فرآیند بهینه‌سازی که با توجه به بارگذاری زلزله و باد تفاوت دارد، بترتیب در روابط (۴-۶) و (۵-۶) ارائه شده است.

$$\begin{aligned} \text{Goal function} &= \text{controller} + Coe_1 * drift_{max} & (4-6) \\ \min \quad g_1 &= drift_{max} - drift_{all} \leq 0 & Coe_1 \ll 1 \\ g_2 &= (Con.f)_{max} - (Con.f)_{all} \leq 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Goal function} &= \text{controller} + Coe_1 * drift_{max} & (5-6) \\ \min \quad g_1 &= drift_{max} - drift_{all} \leq 0 & Coe_1 \ll 1 \\ g_2 &= (Con.f)_{max} - (Con.f)_{all} \leq 0 \\ g_{2+i} &= (Dis_i)_{max} \leq 0.005height_i \quad i = 1, 2, \dots, N \end{aligned}$$

controller بیانگر تعداد کنترلر بکار گرفته شده، Coe_1 ضریبی که از یک کوچکتر است. $drift_{max}$ و $drift_{all}$ بترتیب جابجایی نسبی بیشینه و مجاز و $(Con.f)_{max}$ و $(Con.f)_{all}$ بترتیب نیروی کنترل بیشینه و مجاز در همه کنترلرها و $(Dis_i)_{max}$ و تغییر مکان مطلق جانبی بیشینه طبقه i و $height_i$ ارتفاع طبقه i است. مقدار نیروی کنترل مجاز برابر ۲۵۰۰ کیلونیوتن فرض می‌گردد.

برای مدل‌سازی، قید جابجایی نسبی و جابجایی مطلق بیشینه توسط ضرایب جریمه به تابع هدف اضافه می‌شوند و مسئله بهینه‌سازی نامقید را مقید می‌سازند. شکل تغییر یافته این روابط برای بارگذاری زلزله و باد به ترتیب در روابط (۶-۶) و (۷-۶) بیان شده است.

$$\begin{aligned} \min \quad \text{Goal function} &= \text{controller} + Coe_1 * drift_{max} + Coe_2 * \max\{g_1, 0\} & (6-6) \\ g_2 &= (Con.f)_{max} - (Con.f)_{all} \leq 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Goal function} &= \{\text{controller} + Coe_1 * drift_{max} + & (7-6) \\ \min \quad & + Coe_2 * \max\{g_1, 0\} + Coe_3 * \sum_{i=1}^N \max(g_{2+i}, 0)\} \\ g_2 &= (Con.f)_{max} - (Con.f)_{all} \leq 0 \end{aligned}$$

Coe_2 و Coe_3 ، ضرایب جریمه می‌باشند که در این پژوهش 10000 فرض شده‌اند. در قسمت‌هایی از نتایج که در بخش بعدی ارائه می‌شود، تاثیر تغییر تابع هدف و قیود بررسی می‌شود. در آن قسمت، پارامترهای دیگری همچون شتاب و جابجایی مطلق بیشینه در کل قاب در معادله (۴-۶) وارد می‌گردد.

جمعیت برای قاب برشی برابر ۸۰ و برای قاب غیربرشی برابر ۱۴۴ در نظر گرفته شده است. روابط (۸-۶) و

(۹-۶) تولید جمعیت را بترتیب برای سازه برشی و غیربرشی ارائه می‌کند.

$$pop = floor((N_{bay} + 1) * rand(N_{pop}, N_{story})) \quad (8-6)$$

$$pop = floor(2 * rand(N_{pop}, N_{story} * N_{bay})) \quad (9-6)$$

در این روابط، N_{bay} بیانگر تعداد دهانه، N_{pop} جمعیت کروموزومها و N_{story} تعداد طبقات می‌باشند. تعداد کنترلر در هر جمعیت از مجموع درآیه‌های آن جمعیت بدست می‌آید. دستور $floor$ قسمت صحیح اعداد را در نظر می‌گیرد. برای از کد خارج نمودن متغیرها از رابطه (۳-۲) استفاده شده است.

در این پژوهش روش‌های استفاده شده برای انجام فرآیندهای انتخاب والدین، تزویج، جهش و همگرایی از روش‌های ارائه شده در فصل دوم برداشت شده است.

۳-۴-۱-۶ محاسبه تابع هدف

ساختار کلی برای محاسبه تابع هدف در شکل ۶-۱۷ ارائه شده است. بر طبق این شکل برای محاسبه تابع هدف برای هر ترتیبی از قرارگیری کنترلر، ابتدا با توجه به متغیر مسئله که بیانگر مکان کنترلر است، ماتریس D تشکیل می‌شود و سپس با استفاده از الگوریتم‌های کنترل فعال بهینه پاسخ سازه و نیروی کنترل با توجه به نوع قرارگیری کنترلر بدست می‌آید. برای محدود کردن نیروی کنترل در الگوریتم‌های کلاسیک، آنی و مودال از میزان مجاز، ماتریس وزنی R ثابت فرض شده و ماتریس Q تغییر داده می‌شود ولی در الگوریتم جاینشانی قطب‌ها تغییرات بر روی مقادیر حقیقی قطب‌های حلقه باز سیستم صورت می‌پذیرد. ماتریس Q اولیه برای سه الگوریتم کلاسیک، آنی و مودال بصورت زیر انتخاب می‌گردد:

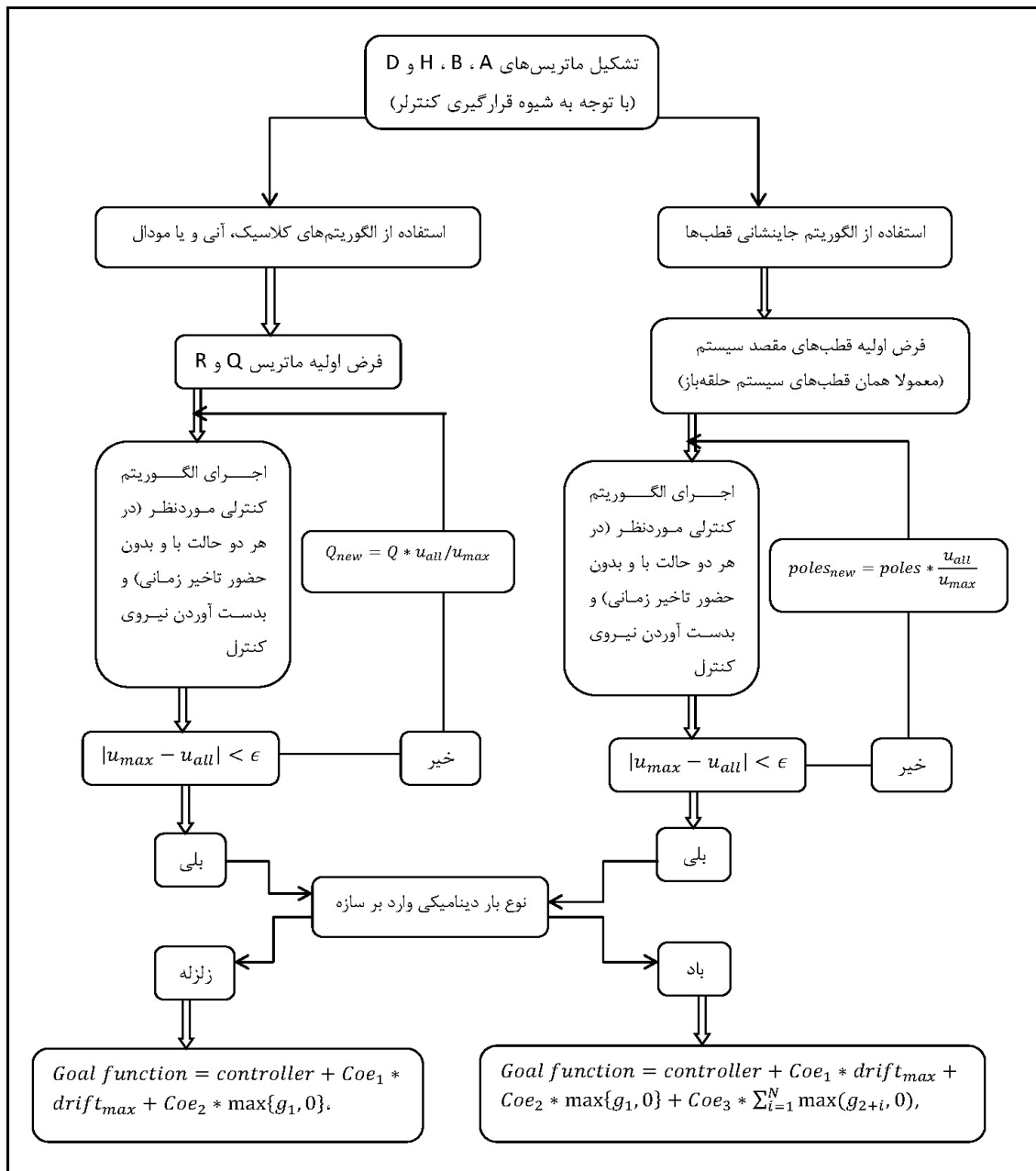
$$\text{Classic algorithm : } Q_0 = c_0 I_{2N}$$

$$\text{instantaneous algorithm : } Q_0 = c_0 I_{2N} \quad \text{or} \quad Q_0 = \begin{bmatrix} K & 0_N \\ 0_N & M \end{bmatrix} \quad (10-6)$$

$$\text{Modal algorithm : } Q_0 = c_0 I_2$$

c_0 ضریبی ثابت است که در ابتدا فرض می‌شود. قطب‌های اولیه برای الگوریتم جاینشانی قطب‌ها همان

قطب‌های حلقه باز سیستم است.



شکل ۶-۱۷: ساختار کلی برای محاسبه تابع هدف در این مطالعه

ماتریس وزنی R برای الگوریتم‌های کلاسیک و آنی ماتریس همانی و برای الگوریتم مودال عدد یک فرض شده است. برای محدود کردن نیروی کنترل، باید ضریبی یافت شود که با ضرب کردن در ماتریس وزنی Q_0 اولیه، مقدار بیشینه نیروی کنترل در همه کنترلرها را به مقدار مجازش برساند. برای این کار یک بازه بصورت (a, b) تعریف می‌گردد که a برابر صفر و b عددی بزرگ فرض می‌شود. سپس سه عدد در وسط

این بازه بصورتی انتخاب می‌گردد که بازه را به چهار قسمت مساوی تقسیم کند و برای دو a ، b و سه عددی میانی، که در ماتریس وزنی Q_0 اولیه ضرب می‌شوند، الگوریتم کنترل بهینه اجرا می‌گردد و نیروی کنترل بدست می‌آید. مرحله بعد انتخاب زیر بازه‌ای است که مقدار نیروی کنترل متناظر ضریب ابتدایی این زیر بازه از نیروی کنترل کمتر و مقدار نیروی کنترل متناظر ضریب انتهایی این زیر بازه از نیروی کنترل بیشتر باشد و بعد از یافتن چنین زیر بازه‌ای، بازه جدید (a, b) که همان ضرایب ابتدایی و انتهایی زیر بازه انتخاب شده است، تعیین می‌گردد. این فرآیند تا زمانی ادامه می‌یابد که اختلاف نیروی کنترل از مقدار مجازش به مقدار قابل قبولی برسد (یا a و b به میزان کافی بهم نزدیک شوند). برای الگوریتم جاینشانی قطب‌ها، برای شروع a برابر یک و b عدد نه چندان بزرگی فرض می‌شود و این ضریب در قسمت حقیقی مقدار ویژه سیستم حلقه باز ضرب می‌شود و قسمت موهومی مقدار ویژه سیستم حلقه باز تغییری نمی‌کند.

پس از اجرای الگوریتم کنترل و رعایت محدودیت نیروی کنترل، تابع هدف با استفاده از روابط (۶-۶) یا (۷-۶) محاسبه می‌شود.

۲-۶ نتایج

در این قسمت نتایج فرآیند بهینه‌سازی از دیدگاه‌های مختلفی که در قسمت اهداف پژوهش هم بیان گردید مورد بررسی قرار می‌گیرد. هدف از این نوع بررسی این است که در نهایت بتوان طرح کلی از چینش بهینه را بدون انجام فرآیند بهینه‌سازی پیش‌بینی کرد.

۱-۲-۶ بررسی کلی

در این قسمت نتایج فرآیند بهینه‌سازی برای الگوریتم‌های مختلف کنترل و برای سازه با رفتار خطی و غیرخطی و از دو منظر برشی و غیر برشی و برای دو نوع بارگذاری زلزله و باد و با در نظر گرفتن اثر تاخیر

زمانی ارائه می‌شود. این نتایج برای یک تابع هدف و قید مشخص موجود در رابطه (۶-۶)، ارائه می‌شود. برای تحلیل خطی از سازه (۲) و برای تحلیل غیرخطی از سازه (۱) اشاره شده در بخش مدل سازه‌ای، استفاده شده است. در ضمن برای جبران اثر تاخیر زمانی برای سازه برشی از روش انتگرال‌گیری و برای سازه غیربرشی از روش بسط تیلور استفاده شده است. مقدار تغییر مکان نسبی مجاز برای این بخش برابر ۰.۸۵۸ سانتی متر می‌باشد.

۱. سازه خطی و برشی، بارگذاری زلزله، الگوریتم کلاسیک، بدون تاخیر زمانی

جدول ۵-۶: توزیع کنترلر در طبقات برای حالت (۱)

طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵	طبقه ۶	طبقه ۷	طبقه ۸
1	0	0	1	0	1	0	0

جدول ۶-۶: مقادیر بیشینه پاسخ سازه و نیروی کنترل برای حالت (۱)

شماره رکورد	1	2	3	4	5	6	7	میانگین
نسبت بیشینه جابجایی نسبی به مقدار مجاز	1.17	0.99	0.87	1.05	0.70	0.88	0.49	0.88
بیشینه شتاب طبقات (cm/s ²)	251.۷	283.۵	230.۱	207.۹	268.۹	303.۰	266.۲	258.۸
بیشینه نیروی کنترل (KN)	2211.۴	2062.۲	1628.7	2244.۱	1662.1	1908.۴	1120.1	1833.۹

۲. سازه خطی و برشی، بارگذاری زلزله، الگوریتم آنی، بدون تاخیر زمانی

جدول ۷-۶: توزیع کنترلر در طبقات برای حالت (۲)

طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵	طبقه ۶	طبقه ۷	طبقه ۸
.	0	0	1	۱	.	۱	0

جدول ۶-۸: مقادیر بیشینه پاسخ سازه و نیروی کنترل برای حالت (۲)

شماره رکورد	1	2	3	4	5	6	7	میانگین
نسبت بیشینه جابجایی نسبی به مقدار مجاز	1.01	0.82	0.72	0.99	0.88	0.63	0.58	0.80
بیشینه شتاب طبقات (cm/s ²)	499.۱	512.۴	385.۱	471.۳	339.۷	351.۴	341.۹	414.۴
بیشینه نیروی کنترل (KN)	636.۶	554.۹	475.۸	702.۰	679.۵	405.۷	38۱.۰	54۸.۰

۳. سازه خطی و برشی، بارگذاری زلزله، الگوریتم مودال، بدون تاخیر زمانی

جدول ۶-۹: توزیع کنترلر در طبقات برای حالت (۳)

طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵	طبقه ۶	طبقه ۷	طبقه ۸
۰	۱	0	1	0	۰	0	0

جدول ۶-۱۰: مقادیر بیشینه پاسخ سازه و نیروی کنترل برای حالت (۳)

شماره رکورد	1	2	3	4	5	6	7	میانگین
نسبت بیشینه جابجایی نسبی به مقدار مجاز	1.0۸	1.۳	0.8	1.۲۲	0.۸۸	0.۸۵	0.۶۲	0.۹۴
بیشینه شتاب طبقات (cm/s ²)	428.۶	778.6	724.6	569.۳	1529.7	926.1	775.۹	818.9
بیشینه نیروی کنترل (KN)	2499	2328	2045	217۲	195۹	191۶	142۶	2049

۴. سازه خطی و برشی، بارگذاری زلزله، الگوریتم جابجایی قطبها، بدون تاخیر زمانی

جدول ۶-۱۱: توزیع کنترلر در طبقات برای حالت (۴)

طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵	طبقه ۶	طبقه ۷	طبقه ۸
۰	0	۱	۰	۱	۰	0	0

جدول ۶-۱۲: مقادیر بیشینه پاسخ سازه و نیروی کنترل برای حالت (۴)

شماره رکورد	1	2	3	4	5	6	7	میانگین
نسبت بیشینه جابجایی نسبی به مقدار مجاز	1.09	1.00	0.87	1.05	0.76	0.64	0.52	0.85
بیشینه شتاب طبقات (cm/s ²)	415.5	383.3	261.0	363.1	318.3	340.5	280.6	337.4
بیشینه نیروی کنترل (KN)	1962.6	1903.0	1783.4	2026.5	1567.5	1610.4	1195.9	1721.3

با توجه به چهار حالت بیان شده، می‌توان دریافت از نظر تعداد کنترلر بهینه، بین الگوریتم‌های مختلف تفاوتی اندکی وجود دارد و دیگر اینکه برای همه الگوریتم‌ها توزیع کنترلر بیشتر در ارتفاع صورت می‌پذیرد (تا در طبقه خاص) و نیز با توجه به محدودیت جابجایی بیشینه نسبی، اغلب توزیع کنترلرها در طبقات میانی است ولی شاید مکان بهینه کنترلر برای این الگوریتم‌ها تفاوت داشته باشند.

با توجه به حد نیروی کنترل، در بعضی الگوریتم‌ها حد اشباع نیروی کنترل از این مقدار مجاز کمتر است (مانند الگوریتم آنی) و در این الگوریتم‌ها محدودیت نیروی کنترل بخودی خود برقرار می‌ماند. اما باید دقت کرد که الگوریتم آنی با نیروی کنترل بسیار کمتر از سایر الگوریتم‌ها، تعداد بهینه کنترلر برابری با سایر الگوریتم‌ها دارد. بنابراین هزینه نهایی (شامل هزینه تعداد کنترلر و نیروی کنترل بیشینه) برای الگوریتم آنی کمتر می‌باشد.

از منظر شتاب بیشینه که از پارامترهای مهم در طراحی سازه بوده ولی در تحلیل‌های بالا سقفی برای آن در نظر گرفته نشده، تحت الگوریتم کلاسیک شتاب بیشینه کمتری در سازه ایجاد می‌گردد ولی تحت الگوریتم مودال بیشترین شتاب در سازه ایجاد می‌گردد.

۵. سازه خطی و برشی، بارگذاری زلزله، الگوریتم کلاسیک، با تاخیر زمانی ۰.۱ ثانیه

جدول ۶-۱۳: توزیع کنترلر در طبقات برای حالت (۵)

طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵	طبقه ۶	طبقه ۷	طبقه ۸
۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰

جدول ۶-۱۴: مقادیر بیشینه پاسخ سازه و نیروی کنترل برای حالت (۵)

شماره رکورد	1	2	3	4	5	6	7	میانگین
نسبت بیشینه جابجایی نسبی به مقدار مجاز	1.08	1.05	0.65	0.90	0.97	0.82	0.84	0.90
بیشینه شتاب طبقات (cm/s ²)	385.۸	341.2	304.۵	257.۵	297.۴	290.۷	263.۸	305.۸
بیشینه نیروی کنترل (KN)	948.۳	979.۸	637.۸	918.۶	588.9	632.9	418.۳	732.۱

۶. سازه خطی و برشی، بارگذاری زلزله، الگوریتم آنی، با تاخیر زمانی ۰.۱ ثانیه

جدول ۶-۱۵: توزیع کنترلر در طبقات برای حالت (۶)

طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵	طبقه ۶	طبقه ۷	طبقه ۸
۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱

جدول ۶-۱۶: مقادیر بیشینه پاسخ سازه و نیروی کنترل برای حالت (۶)

شماره رکورد	1	2	3	4	5	6	7	میانگین
نسبت بیشینه جابجایی نسبی به مقدار مجاز	1.24	1.04	0.83	1.02	1.16	0.87	0.66	0.97
بیشینه شتاب طبقات (cm/s ²)	534.98	335.75	276.61	293.26	382.93	314.77	233.30	338.80
نیروی کنترل (KN)	784.83	686.70	576.21	808.14	858.01	493.58	516.07	674.79

۷. سازه خطی و برشی، بارگذاری زلزله، الگوریتم مودال، با تاخیر زمانی ۰.۱ ثانیه

جدول ۶-۱۷: توزیع کنترلر در طبقات برای حالت (۷)

طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵	طبقه ۶	طبقه ۷	طبقه ۸
.	0	0	1	۱	1	۱	.

جدول ۶-۱۸: مقادیر بیشینه پاسخ سازه و نیروی کنترل برای حالت (۷)

شماره رکورد	1	2	3	4	5	6	7	میانگین
نسبت بیشینه جابجایی نسبی به مقدار مجاز	1.19	1.09	0.97	0.89	0.95	0.92	0.73	0.96
بیشینه شتاب طبقات (cm/s ²)	389.33	310.3	321.68	252.5	301.61	309.04	241.88	303.78
نیروی کنترل (KN)	852.29	830.38	569.75	848.09	504.8	596.86	377.98	654.31

۸. سازه خطی و برشی، بارگذاری زلزله، الگوریتم جابجایی قطبها و تاخیر زمانی ۰.۱ ثانیه

جدول ۶-۱۹: توزیع کنترلر در طبقات برای حالت (۸)

طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵	طبقه ۶	طبقه ۷	طبقه ۸
.	0	0	1	۱	1	۱	0

جدول ۶-۲۰: مقادیر بیشینه پاسخ سازه و نیروی کنترل برای حالت (۸)

شماره رکورد	1	2	3	4	5	6	7	میانگین
نسبت بیشینه جابجایی نسبی به مقدار مجاز	0.75	1.15	0.81	0.87	0.95	1.12	0.87	0.93
بیشینه شتاب طبقات (cm/s ²)	475.51	352.25	399.25	294.86	375.63	319.92	259.39	353.83

نیروی کنترل (KN)	785.72	821.33	534.60	811.68	525.92	611.23	400.31	641.54
---------------------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

از حالت‌های ۵ تا ۸ می‌توان دریافت که در همه الگوریتم‌ها، تاخیر زمانی موجب افزایش تعداد کنترلر بهینه می‌گردد. در این حالات نیز توزیع کنترلر در ارتفاع صورت می‌پذیرد و مشاهده می‌شود که مکان بهینه کنترلرها در همه الگوریتم‌ها از طبقات میانی بسمت طبقات بالایی می‌باشد.

جداول برای این حالات نشان می‌دهد که افزایش تاخیر زمانی بجزء الگوریتم آنی که حد اشباع افزایش ناچیزی دارد، در سایر الگوریتم‌ها میزان حد اشباع به میزان قابل ملاحظه کاهش می‌یابد و عملاً محدودیت نیروی کنترل در مورد این الگوریتم‌ها بدون انجام فرآیند تشریح شده در ۶-۱-۴-۳ برقرار می‌مانند. در ضمن وجود تاخیر زمانی ۰.۱ ثانیه بجزء الگوریتم مودال که شتاب بیشینه به میزان قابل ملاحظه کاهش می‌یابد، در سایر الگوریتم‌ها تغییرات شتاب بیشینه ناچیز بوده است.

۹. سازه خطی و برشی، بارگذاری باد، الگوریتم کلاسیک، بدون تاخیر زمانی

جدول ۶-۲۱: توزیع کنترلر در طبقات برای حالت (۹)

طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵	طبقه ۶	طبقه ۷	طبقه ۸
1	۱	۱	۰	0	۰	0	0

جدول ۶-۲۲: مقادیر بیشینه پاسخ سازه و نیروی کنترل برای حالت (۹)

بیشینه جابجایی نسبی (cm)	1.4339
بیشینه جابجایی طبقات (cm)	7.4183
بیشینه شتاب طبقات (cm/s ²)	661.8575
نیروی کنترل (KN)	2.50E+03

۱۰. سازه خطی و برشی، بارگذاری باد، الگوریتم آنی، بدون تاخیر زمانی

جدول ۶-۲۳: توزیع کنترلر در طبقات برای حالت (۱۰)

طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵	طبقه ۶	طبقه ۷	طبقه ۸
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

0	۱	1	۱	1	۱	0
---	---	---	---	---	---	---

۱۱. سازه خطی و برشی، بارگذاری باد، الگوریتم مودال، بدون تاخیر زمانی

جدول ۶-۲۴: توزیع کنترلر در طبقات برای حالت (۱۱)

طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵	طبقه ۶	طبقه ۷	طبقه ۸
1	۱	۱	۰	0	۰	0	0

۱۲. سازه خطی و برشی، بارگذاری باد، الگوریتم جاینشانی قطب‌ها، بدون تاخیر زمانی

جدول ۶-۲۵: توزیع کنترلر در طبقات برای حالت (۱۲)

طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵	طبقه ۶	طبقه ۷	طبقه ۸
۰	۱	0	1	0	۰	۱	0

۱۳. سازه خطی و برشی، بارگذاری باد، الگوریتم کلاسیک، با تاخیر زمانی ۰.۱ ثانیه

جدول ۶-۲۶: توزیع کنترلر در طبقات برای حالت (۱۳)

طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵	طبقه ۶	طبقه ۷	طبقه ۸
1	0	۱	1	۱	1	۱	۱

جدول ۶-۲۷: مقادیر بیشینه پاسخ سازه و نیروی کنترل برای حالت (۱۳)

بیشینه جابجایی نسبی (cm)	1.4718
بیشینه جابجایی طبقات (cm)	7.724
بیشینه شتاب طبقات (cm/s ²)	863.3802
نیروی کنترل (KN)	1.97E+03

۱۴. سازه خطی و برشی، بارگذاری باد، الگوریتم آنی، با تاخیر زمانی ۰.۰۵ ثانیه

جدول ۶-۲۸: توزیع کنترلر در طبقات برای حالت (۱۴)

طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵	طبقه ۶	طبقه ۷	طبقه ۸
1	۱	۱	1	۱	1	۱	۱

۱۵. سازه خطی و برشی، بارگذاری باد، الگوریتم مودال، با تاخیر زمانی ۰.۱ ثانیه

جدول ۶-۲۹: توزیع کنترلر در طبقات برای حالت (۱۵)

طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵	طبقه ۶	طبقه ۷	طبقه ۸
۰	۱	۱	۰	0	1	۱	0

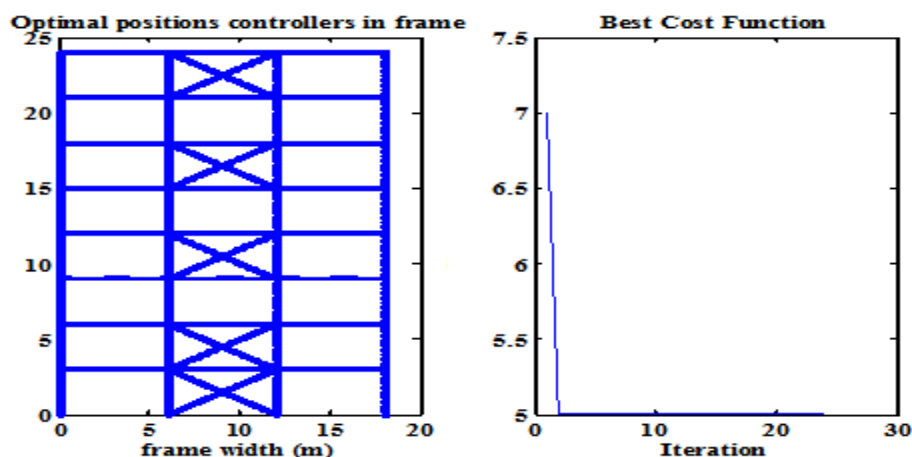
۱۶. سازه خطی و برشی، بارگذاری باد، الگوریتم جابجایی قطبها، با تاخیر زمانی ۰.۱ ثانیه

جدول ۶-۳۰: توزیع کنترلر در طبقات برای حالت (۱۶)

طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵	طبقه ۶	طبقه ۷	طبقه ۸
1	۱	۱	1	۱	1	۱	۱

هر دو بارگذاری زلزله و باد بر طبق آیین‌نامه مقیاس و تولید شده‌اند (با توجه به فرضیات بیان شده). اما نتایج حالات ۹ تا ۱۶ نشان می‌دهد که در بعضی مناطق، بارگذاری باد می‌تواند بسیار بحرانی‌تر از بار زلزله باشد و طبعا در چنین مواردی هزینه کنترل سازه در مقابل نیروی باد بیشتر از نیروی زلزله است که این امر را می‌توان از مقایسه تعداد کنترلر برای این دو بارگذاری هم متوجه شد. اما در سایر موارد از جمله توزیع کنترلر و تغییر شتاب بیشینه در هر الگوریتم، تاثیر تاخیر زمانی بر تعداد و مکان بهینه کنترلر و نیروی کنترل و ... تفاوتی بین دو بارگذاری باد و زلزله مشاهده نگردید.

۱۷. سازه خطی و غیربرشی، بارگذاری زلزله، الگوریتم کلاسیک، بدون تاخیر زمانی

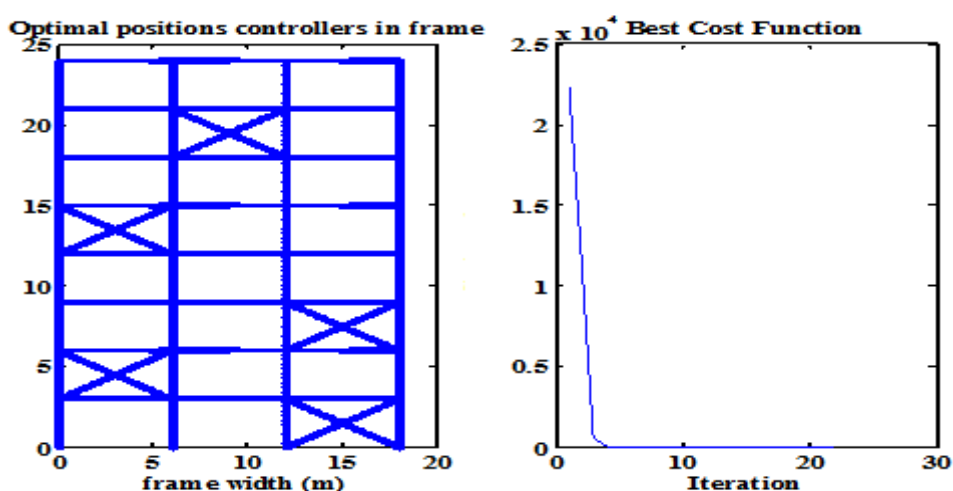


شکل ۱۸-۶: مکان بهینه کنترلرها (سمت چپ) و تغییرات تابع هدف (سمت راست) برای حالت (۱۷)

جدول ۳۱-۶: مقادیر بیشینه پاسخ سازه و نیروی کنترل برای حالت (۱۷)

شماره رکورد	1	2	3	4	5	6	7	میانگین
نسبت بیشینه جابجایی نسبی به مقدار مجاز	0.75	1.15	0.81	0.87	0.95	1.12	0.87	0.93
بیشینه شتاب طبقات (cm/s ²)	325.5	301.1	274.7	248.2	346.9	373.4	340.3	315.7
بیشینه نیروی کنترل (KN)	2357.5	1702.6	1409.0	1951.8	1223.0	1552.7	1140.0	1620.5

۱۸. سازه خطی و غیربرشی، بارگذاری زلزله، الگوریتم آنی، بدون تاخیر زمانی



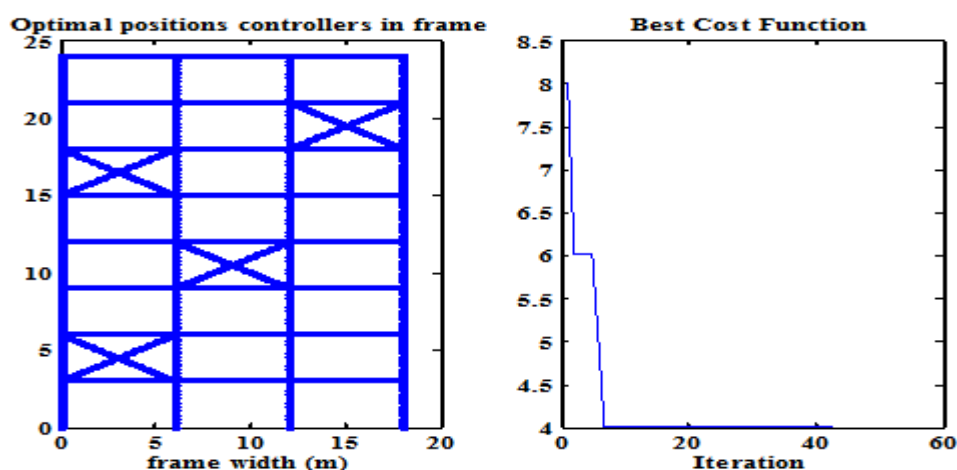
شکل ۱۹-۶: مکان بهینه کنترلرها (سمت چپ) و تغییرات تابع هدف (سمت راست) برای حالت (۱۸)

جدول ۳۲-۶: مقادیر بیشینه پاسخ سازه و نیروی کنترل برای حالت (۱۸)

شماره رکورد	1	2	3	4	5	6	7	میانگین
-------------	---	---	---	---	---	---	---	---------

نسبت بیشینه جابجایی نسبی به مقدار مجاز	0.75	1.15	0.81	0.87	0.95	1.12	0.87	0.93
بیشینه شتاب طبقات (cm/s ²)	930.56	809.17	536.67	820.71	553.93	731.75	460.48	691.89
نیروی کنترل (KN)	788.72	1091.55	712.49	765.01	635.63	526.38	435.39	707.88

۱۹. سازه خطی و غیربرشی، بارگذاری زلزله، الگوریتم مودال، بدون تاخیر زمانی

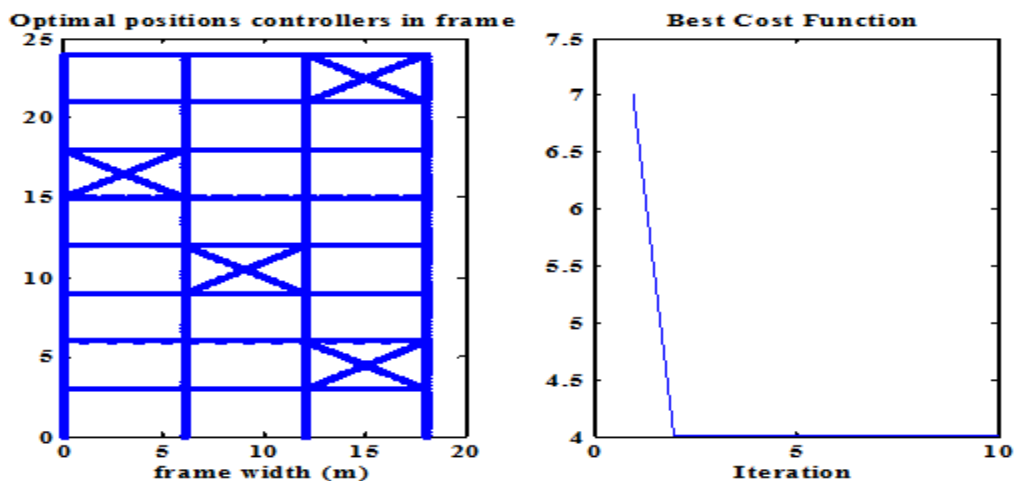


شکل ۱۹-۲۰: مکان بهینه کنترلرها (سمت چپ) و تغییرات تابع هدف (سمت راست) برای حالت (۱۹)

جدول ۳۳-۶: مقادیر بیشینه پاسخ سازه و نیروی کنترل برای حالت (۱۹)

شماره رکورد	1	2	3	4	5	6	7	میانگین
نسبت بیشینه جابجایی نسبی به مقدار مجاز	0.75	1.15	0.81	0.87	0.95	1.12	0.87	0.93
بیشینه شتاب طبقات (cm/s ²)	361.88	313.46	289.02	225.36	343.97	410.74	315.50	322.85
نیروی کنترل (KN)	2492.42	1931.51	1486.09	2184.12	1447.60	1811.06	1341.12	1813.42

۲۰. سازه خطی و غیربرشی، بارگذاری باد، الگوریتم کلاسیک، بدون تاخیر زمانی

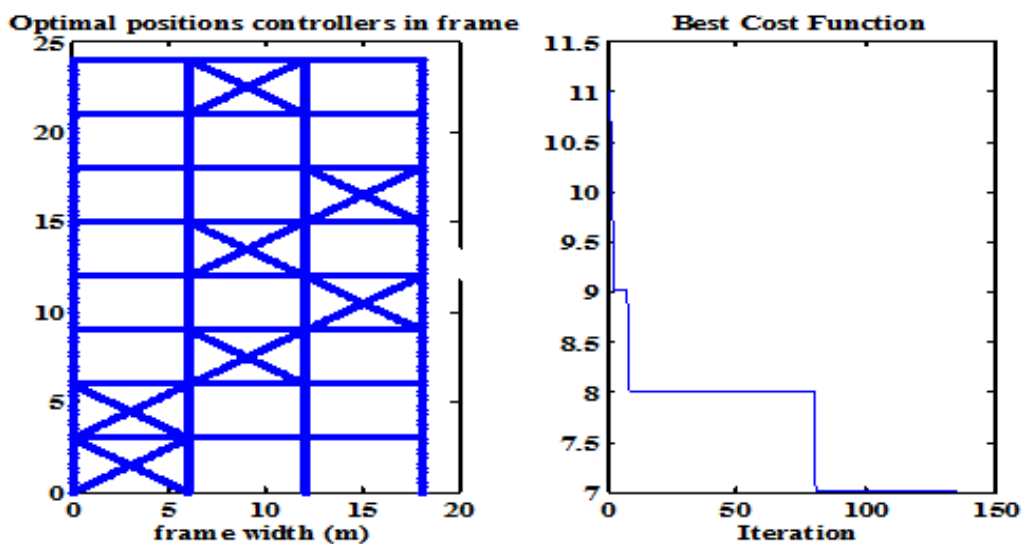


شکل ۶-۲۱: مکان بهینه کنترلرها (سمت چپ) و تغییرات تابع هدف (سمت راست) برای حالت (۲۰)

جدول ۶-۳۴: مقادیر بیشینه پاسخ سازه و نیروی کنترل برای حالت (۲۰)

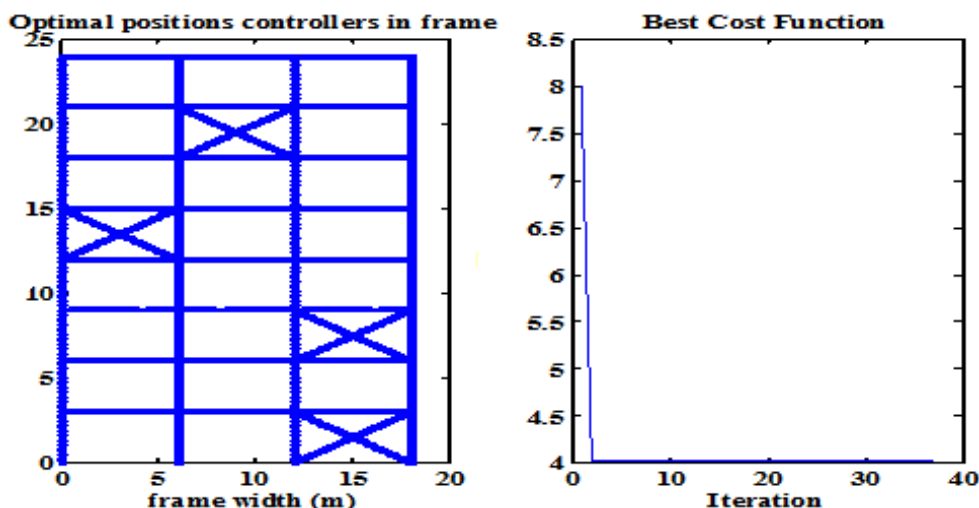
بیشینه جابجایی نسبی (cm)	1.2902
بیشینه جابجایی طبقات (cm)	5.6931
بیشینه شتاب طبقات (cm/s ²)	443.5024
نیروی کنترل (KN)	2.49E+03

۲۱. سازه خطی و غیربرشی، بارگذاری باد، الگوریتم آنی، بدون تاخیر زمانی



شکل ۶-۲۲: مکان بهینه کنترلرها (سمت چپ) و تغییرات تابع هدف (سمت راست) برای حالت (۲۱)

۲۲. سازه خطی و غیربرشی، بارگذاری باد، الگوریتم مودال، بدون تاخیر زمانی

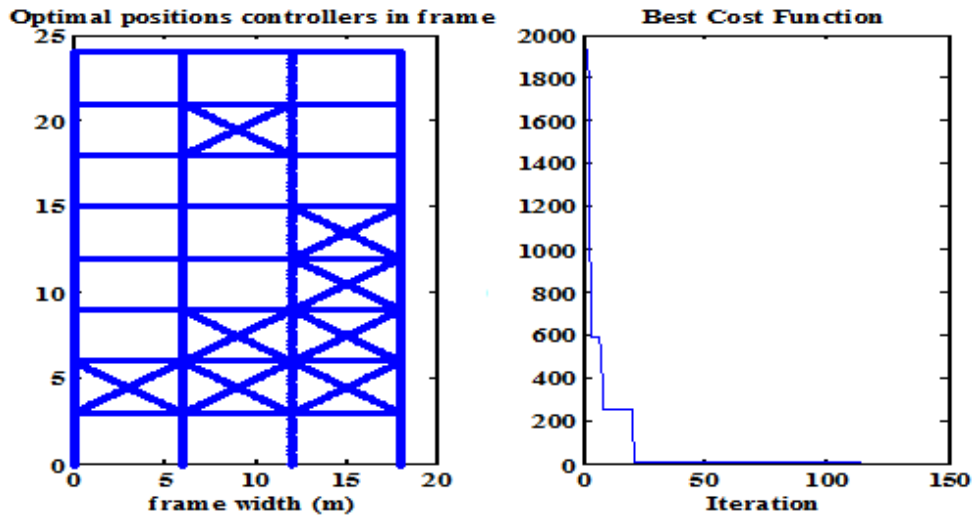


شکل ۶-۲۳: مکان بهینه کنترلرها (سمت چپ) و تغییرات تابع هدف (سمت راست) برای حالت (۲۲)

در حالات ۱۷ تا ۲۲ که نتایج را برای سازه غیربرشی ارائه می‌دهد، مشاهده می‌شود که در همه الگوریتم‌ها توزیع کنترلر در ارتفاع صورت می‌پذیرد (همانند سازه برشی) و این توزیع در ناحیه خاص از ارتفاع (مثلا طبقات میانی) نبوده بلکه در کل ارتفاع توزیع تقریباً یکنواختی داشته است. از نظر تعداد کنترلر بهینه نتایج الگوریتم‌ها تقریباً برابر می‌باشد (برای بارگذاری مربوطه). البته مقایسه بیشتر الگوریتم از لحاظ تعداد در بخش‌های بعدی ذکر می‌گردد. با توجه به اینکه در سازه غیر برشی بر خلاف حالت برشی، تیرها صلب فرض نشده و سختی کلی سازه نسبت به حالت برشی کمتر است و در نتیجه تعداد کنترلر بهینه بیشتری می‌طلبد اما با توجه به هزینه محاسباتی بالا و تفاوت کم بین حالت برشی و غیر برشی، می‌توان با پذیرش خطا اندک، سازه را برشی فرض کرد.

حد اشباع نیروی کنترل در الگوریتم آنی بسیار پایین‌تر از حد مجاز نیروی کنترل است و شتاب بیشینه در این الگوریتم بیشتر از شتاب بیشینه الگوریتم کلاسیک و مودال است به عبارتی اگر حد مجاز نیروی کنترل برابر حد اشباع نیروی کنترل الگوریتم آنی قرار گیرد و اگر جابجایی نسبی بیشینه ملاک طراحی قرار گیرد (همانند این بخش)، الگوریتم آنی نتیجه بهتری ارائه می‌دهد و اگر محدودیت شتاب بیشینه هم به قیود مسئله اضافه گردد، نتایج سه الگوریتم کلاسیک، مودال و آنی مشابه می‌گردد.

۲۳. سازه خطی و غیربرشی، بارگذاری زلزله، الگوریتم کلاسیک، با تاخیر زمانی ۰.۱ ثانیه

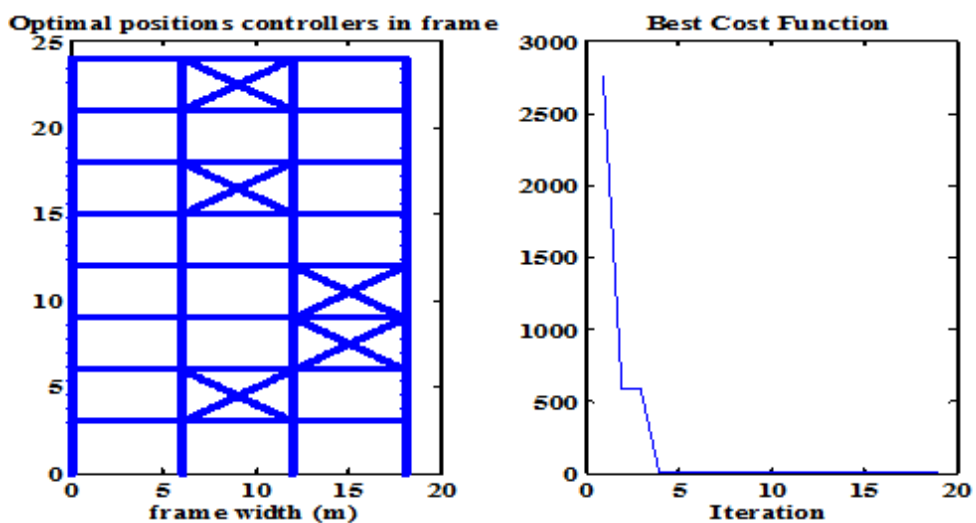


شکل ۲۳-۶: مکان بهینه کنترلرها (سمت چپ) و تغییرات تابع هدف (سمت راست) برای حالت (۲۳)

جدول ۳۵-۶: مقادیر بیشینه پاسخ سازه و نیروی کنترل برای حالت (۲۳)

شماره رکورد	1	2	3	4	5	6	7	میانگین
نسبت بیشینه جابجایی نسبی به مقدار مجاز	0.93	1.58	0.82	1.01	1.11	0.76	0.80	1.00
بیشینه شتاب طبقات (cm/s ²)	361.۹	313.۵	289.۰	225.۴	34۴.۰	410.۷	315.۵	322.۸
بیشینه نیروی کنترل (KN)	2492.4	1931.5	1486.۱	2184.1	1447.6	1811.۱	1341.1	1813.۴

۲۴. سازه خطی و غیربرشی، بارگذاری زلزله، الگوریتم آنی، با تاخیر زمانی ۰.۱ ثانیه

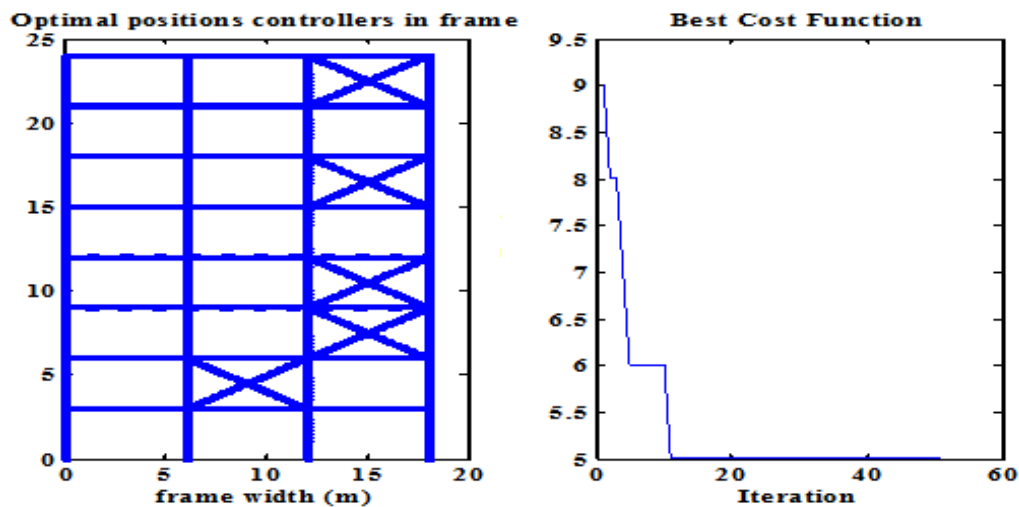


شکل ۲۴-۶: مکان بهینه کنترلرها (سمت چپ) و تغییرات تابع هدف (سمت راست) برای حالت (۲۴)

جدول ۶-۳۶: مقادیر بیشینه پاسخ سازه و نیروی کنترل برای حالت (۲۴)

شماره رکورد	1	2	3	4	5	6	7	میانگین
نسبت بیشینه جابجایی نسبی به مقدار مجاز	1.05	1.63	0.77	1.09	1.00	0.75	0.69	1.00
بیشینه شتاب طبقات (cm/s ²)	269.61	259.30	211.73	256.74	187.90	229.26	202.20	230.96
بیشینه نیروی کنترل (KN)	805.71	754.66	597.56	749.99	513.89	607.88	376.72	629.49

۲۵. سازه خطی و غیربرشی، بارگذاری زلزله، الگوریتم مودال، با تاخیر زمانی ۰.۱ ثانیه



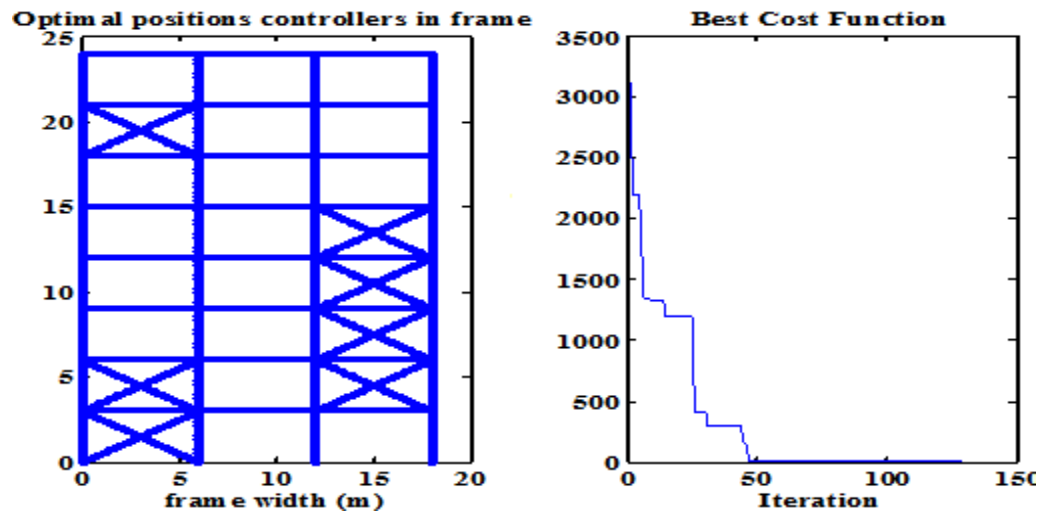
شکل ۶-۲۶: مکان بهینه کنترلرها (سمت چپ) و تغییرات تابع هدف (سمت راست) برای حالت (۲۵)

جدول ۶-۳۷: مقادیر بیشینه پاسخ سازه و نیروی کنترل برای حالت (۲۵)

شماره رکورد	1	2	3	4	5	6	7	میانگین
نسبت بیشینه جابجایی نسبی به مقدار مجاز	0.97	1.47	0.73	1.13	0.90	0.64	0.60	0.92
بیشینه شتاب طبقات (cm/s ²)	324.17	330.14	243.62	259.57	228.95	271.55	210.19	266.89

بیشینه نیروی کنترل (KN)	748.15	1447.27	1250.12	664.84	1198.62	1449.62	858.45	1088.15
----------------------------	--------	---------	---------	--------	---------	---------	--------	---------

۲۶. سازه خطی و غیربرشی، بارگذاری باد، الگوریتم کلاسیک، با تاخیر زمانی ۰.۱ ثانیه

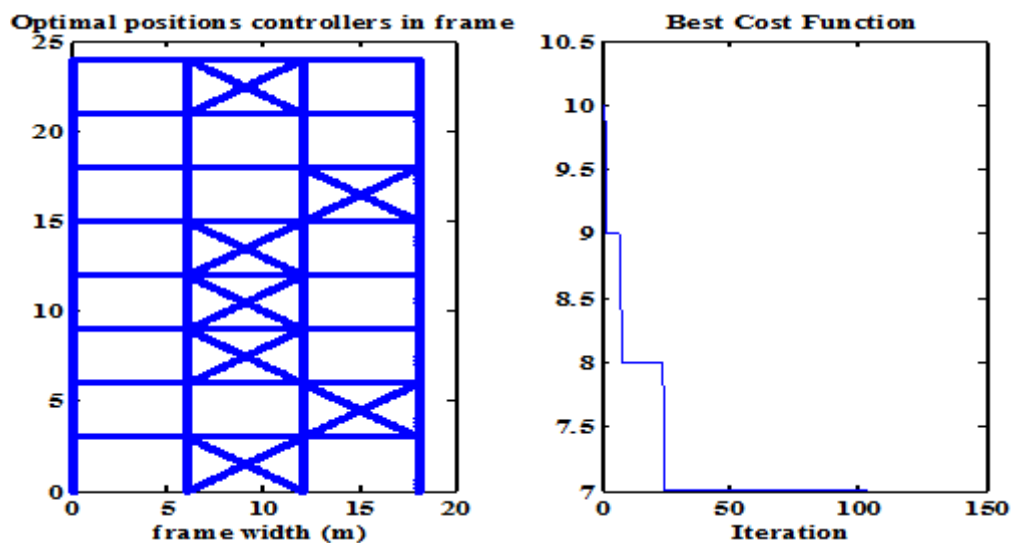


شکل ۶-۲۷: مکان بهینه کنترلرها (سمت چپ) و تغییرات تابع هدف (سمت راست) برای حالت (۲۶)

جدول ۶-۳۸: مقادیر بیشینه پاسخ سازه و نیروی کنترل برای حالت (۲۶)

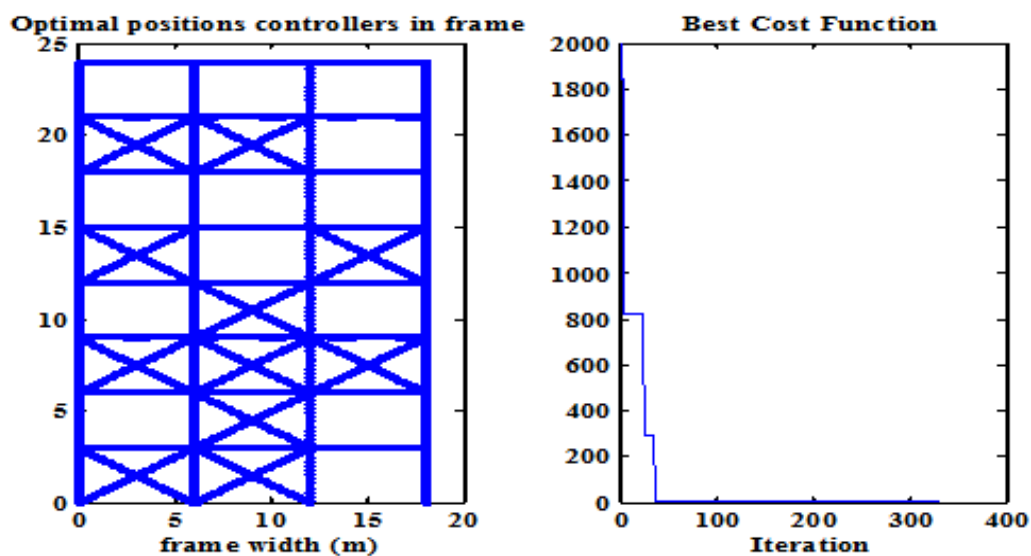
بیشینه جابجایی نسبی (cm)	1.4932
بیشینه جابجایی طبقات (cm)	7.6187
بیشینه شتاب طبقات (cm/s ²)	4.83E+02
نیروی کنترل (KN)	2.07E+03

۲۷. سازه خطی و غیربرشی، بارگذاری باد، الگوریتم آنی، با تاخیر زمانی ۰.۱ ثانیه



شکل ۶-۲۸: مکان بهینه کنترلرها (سمت چپ) و تغییرات تابع هدف (سمت راست) برای حالت (۲۷)

۲۸. سازه خطی و غیربرشی، بارگذاری باد، الگوریتم مودال، با تاخیر زمانی ۰.۱ ثانیه



شکل ۶-۲۹: مکان بهینه کنترلرها (سمت چپ) و تغییرات تابع هدف (سمت راست) برای حالت (۲۸)

همان توضیحاتی که برای سازه برشی و بدون تاخیر زمانی در مورد تاثیر تاخیر زمانی بر چینش و تعداد کنترلر بهینه در هر الگوریتم و تغییرات بیشینه نیروی کنترل پس از لحاظ تاخیر زمانی، در صفحات گذشته ارائه شد در حالات ۲۳ تا ۲۸ که برای سازه غیربرشی و فرض وجود اثر تاخیر زمانی در نیروی کنترل است، هم صحیح است اما همانطور که پیشتر بیان گردید تعداد کنترلر بهینه برای حالت غیربرشی بیشتر از حالت برشی است.

در حالت ۲۴ مشاهده می‌شود که بیشینه شتاب مطلق در الگوریتم آنی نسبت به حالت ۱۸ که اثر تاخیر زمانی منظور نگردید، کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته و به مقدار شتاب بیشینه در الگوریتم‌های کلاسیک و آنی بسیار نزدیک شده است. بنابراین اگر حد مجاز نیروی کنترل برابر حد اشباع نیروی کنترل در الگوریتم آنی قرار گیرد، الگوریتم آنی نتیجه به مراتب بهتری نسبت به الگوریتم‌های کلاسیک و مودال ارائه می‌دهد.

۲۹. سازه غیرخطی و برشی، بارگذاری زلزله، الگوریتم کلاسیک، بدون تاخیر زمانی

جدول ۶-۳۹: توزیع کنترل در طبقات برای حالت (۲۹)

طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵	طبقه ۶	طبقه ۷	طبقه ۸
1	۱	۱	1	0	.	0	0

جدول ۶-۴۰: مقادیر بیشینه پاسخ سازه و نیروی کنترل برای حالت (۲۹)

شماره رکورد	1	2	3	4	5	6	7	میانگین
نسبت بیشینه جابجایی نسبی به مقدار مجاز	1.39	1.83	0.52	1.54	0.59	0.35	0.43	0.95
بیشینه شتاب طبقات (cm/s ²)	961.52	1155.3	1557.7	1706.8	421	1951.3	1545.1	1327.3
بیشینه نیروی کنترل (KN)	2262۸	2879۰	1182۵	2074۳	1430۵	1046۸	1141۷	1716۸

جدول ۶-۴۱: چینش بهینه کنترل با فرض تعداد مختلف کنترلر برای حالت (۲۹)

تعداد کنترلرها	بهترین طبقه
1	1
2	1 2
3	1 2 3
4	1 2 3 4

از جدول ۶-۴۰ مشاهده می‌شود که بیشینه نیروی کنترل بسیار بیشتر از حالت خطی است و این بزرگی

نیروی کنترل حتی برای تعداد کنترلرهای بیشتر از تعداد بهینه هم مشاهده گردید. اگرچه بر طبق آیین‌نامه در حالت غیر خطی سازه دارای شدت نیروی زلزله بزرگتر از حالت خطی است (بدلیل عدم تاثیر ضریب رفتار در طیف طراحی استاندارد)، اما میزان محدودیت جابجایی نسبی هم بیشتر از حالت خطی است (R برابر). بنابراین آنچه که باعث بروز چنین نیروی کنترل زیادی (در مقایسه با رفتار خطی) می‌شود شدت نیرو و محدودیت جابجایی نمی‌باشد. در حقیقت علت این است که اگر جابجایی بیشینه نسبی سازه خطی بخواهد از حالت کنترل‌نشده وارد حوزه قابل قبول بدست آمده از آیین‌نامه بشود نیاز به نیروی کنترلی مشخصی دارد که با کمک سازه‌ای که سختی‌اش K است، بتواند محدودیت پاسخ را برقرار کند اما در حالت غیرخطی و در بعضی زمان‌ها سازه وارد حوزه غیرخطی شده و سختی به مقدار زیادی کاهش پیدا می‌کند (مثلا 0.1K) و در نتیجه این سازه نیاز به نیروی کنترل بسیار بیشتری (نسبت به حالت خطی) دارد تا بتواند محدودیت پاسخ را برآورده سازد.

همچنین از جدول ۶-۴۰ مشاهده می‌شود که میزان شتاب بیشینه نسبت به حالت خطی بزرگتر است. دلیل این امر این است که در حالت غیرخطی بیشینه نیروی برشی هر طبقه (برابر با حاصل ضرب سختی خطی سازه در جابجایی نسبی آستانه‌ای که بعد از آن سازه وارد حوزه غیرخطی می‌گردد بعلاوه مقدار کم نیروی برشی در حوزه غیرخطی) بزرگتر از بیشینه نیروی برشی خطی (برابر با حاصل ضرب سختی خطی سازه در جابجایی نسبی مجاز کسب شده از آیین‌نامه) است و از آنجاییکه شتاب نماینده نیرو (و یا برش) در پاسخ است پس میزان شتاب بیشینه غیرخطی بیشتر از حالت خطی می‌باشد.

جدول ۶-۴۱ چینه‌بندی بهینه را برای یک تا چهار کنترلر نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد در حالت غیرخطی چینه‌بندی کنترلر ضمن توزیع در ارتفاع، از طبقات پایین شروع به پرشدن می‌کند. شاید از لحاظ تعداد کنترلر در حالت خطی و غیرخطی و بر طبق آیین‌نامه تفاوتی اندک باشد (با در نظر گرفتن جدول ۶-۵) ولی بسبب نیروی بسیار بیشتر حالت غیرخطی، هزینه کنترلی حالت غیرخطی بیش از خطی است از طرفی هزینه طراحی استاتیکی سازه غیرخطی نسبت به سازه خطی کمتر است و بنابراین راجع به

هزینه نهایی طراحی و کنترل سازه برای دو حالت خطی و غیرخطی نمی‌توان قضاوت کرد و به نوعی کمینه کردن هزینه نهایی (شامل هزینه طراحی استاتیکی و هزینه کنترل سازه) برای یک سازه‌ای که میزان غیرخطی بودن آن متغیر است یک مسئله بهینه‌سازی دیگری بحساب می‌آید.

۲-۲-۶ تاثیر تابع هدف و قیود مختلف

در این قسمت نتایج فرآیند بهینه‌سازی برای تابع هدف و قیود مختلف و برای الگوریتم کلاسیک در حالت خطی و بدون در نظر گرفتن اثر تاخیر زمانی و برای سازه برشی ارائه می‌شود. نوع رکورد اعمالی، همان هفت رکورد زلزله می‌باشد و از سازه (۲) استفاده شده است.

۱. تابع هدف فقط شامل جابجایی نسبی بیشینه می‌باشد و تعداد کنترلر نیز محدود می‌گردد. در

این صورت معادله بهینه‌سازی بصورت زیر می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Goal function} &= \text{drift}_{\max} \\ \min \quad g_1 &= (\text{Con. } f)_{\max} - (\text{Con. } f)_{\text{all}} \leq 0 \\ g_2 &= \text{controller} - N_c = 0 \end{aligned} \quad (11-6)$$

نیروی کنترل مجاز برابر (KN) ۱۰۰۰ فرض شده است و N_c برابر با تعداد مجاز کنترلر می‌باشد. در این قسمت این معادله برای N_c بین ۱ تا ۱۸ حل می‌شود. نتایج نهایی بهینه‌سازی برای این ۱۸ حالت در جدول زیر ارائه می‌گردد. اعداد موجود در این جدول تعداد کنترلر در هر طبقه را برای تعداد مشخصی از کنترلر نشان می‌دهد.

جدول ۴۲-۶: توزیع کنترلر در طبقات برای تعداد کنترلر مختلف و برای حالت (۱)

تعداد کنترلر مجاز	طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵	طبقه ۶	طبقه ۷	طبقه ۸
1	0	0	0	0	0	1	0	0
2	1	0	1	0	0	0	0	0
3	1	0	2	0	0	0	0	0
4	1	0	1	1	1	0	0	0
5	1	0	1	1	1	1	0	0
6	1	1	1	1	1	0	1	0

7	1	1	1	1	1	1	1	0
8	2	1	1	1	1	1	1	0
9	2	1	1	1	1	1	1	1
10	2	2	1	1	1	1	1	1
11	2	2	2	1	1	1	1	1
12	2	2	2	2	1	1	1	1
13	3	2	2	2	1	1	1	1
14	3	2	2	2	1	1	1	2
15	3	2	2	2	1	1	1	3
16	3	2	2	2	1	1	2	3
17	3	2	2	2	1	3	1	3
18	3	2	2	2	1	2	3	3

از جدول بالا ملاحظه می‌گردد زمانی که تابع هدف تغییر مکان جانبی نسبی مطلق باشد، با افزایش تعداد کنترلر، ابتدا کنترلرها در طبقات پایین قرار می‌گیرد (یک کنترلر در هر طبقه) و سپس با افزایش تعداد کنترلر، کنترلر در طبقات بالاتر هم قرار می‌گیرند و زمانی که در هر طبقه یک کنترلر قرار گرفته، دوباره همین روند برای دهانه دیگر تکرار می‌گردد. البته برای تعداد کنترلر زیاد، بعد از اینکه یک دهانه کاملاً پر شد، مشاهده گردید که برای دهانه‌های دیگر توزیع کنترلر از طبقه اول و آخر به سمت طبقه مرکز بوده است.

۲. تابع هدف فقط شامل شتاب مطلق بیشینه می‌باشد و تعداد کنترلر نیز محدود می‌گردد. در این صورت معادله بهینه‌سازی بصورت زیر می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Goal function} &= \text{acceleration}_{\max} \\ \min \quad g_1 &= (\text{Con. } f)_{\max} - (\text{Con. } f)_{\text{all}} \leq 0 \\ g_2 &= \text{controller} - N_c = 0 \end{aligned} \quad (12-6)$$

با فرض همان مقدار نیروی کنترل مجاز ۱۰۰۰ کیلونیوتن، در اینجا هم نتیجه بهینه برای ۱۸ تعداد کنترلر مجاز در جدول ۶-۴۳ ارائه می‌گردد.

جدول ۶-۴۳: توزیع کنترلر در طبقات برای تعداد کنترلر مختلف و برای حالت (۲)

تعداد کنترلر مجاز	طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵	طبقه ۶	طبقه ۷	طبقه ۸
1	0	0	0	0	0	0	1	0
2	0	0	0	1	0	0	1	0

3	0	1	0	1	0	0	1	0
4	0	1	1	1	0	1	0	0
5	0	1	1	1	1	0	1	0
6	1	1	1	1	0	1	0	1
7	1	1	1	1	1	1	1	0
8	1	1	1	1	1	1	1	1
9	2	1	1	1	1	1	1	1
10	2	2	1	1	1	1	1	1
11	2	2	2	1	1	1	1	1
12	2	2	2	2	1	1	1	1
13	2	2	2	2	2	1	1	1
14	2	2	2	2	2	2	1	1
15	3	2	2	2	2	2	1	1
16	3	3	2	2	2	2	1	1
17	3	3	2	2	2	2	2	1
18	3	3	2	2	2	2	2	2

۳. تابع هدف فقط شامل جابجایی جانبی مطلق بیشینه می‌باشد و تعداد کنترلر نیز محدود می‌گردد.

در این صورت معادله بهینه‌سازی بصورت زیر می‌شود:

$$\begin{aligned} \min \quad & \text{Goal function} = \text{Displacement}_{max} \\ & g_1 = (\text{Con. } f)_{max} - (\text{Con. } f)_{all} \leq 0 \\ & g_2 = \text{controller} - N_c = 0 \end{aligned} \quad (13-6)$$

با همان فرضیات قبلی، جدول ۴۴-۶ نتایج را برای معادله (۱۳-۶) ارائه می‌کند.

جدول ۴۴-۶: توزیع کنترلر در طبقات برای تعداد کنترلر مختلف و برای حالت (۳)

تعداد کنترلر مجاز	طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵	طبقه ۶	طبقه ۷	طبقه ۸
1	0	0	0	0	0	0	1	0
2	0	0	0	0	0	0	2	0
3	0	0	0	2	0	0	1	0
4	1	0	0	2	0	0	1	0
5	1	1	0	2	0	0	1	0
6	1	1	1	1	1	0	1	0
7	2	1	1	1	1	0	1	0
8	2	1	1	1	1	1	1	0
9	2	2	1	1	1	1	1	0
10	2	2	1	1	1	1	1	1
11	2	2	2	1	1	1	1	1
12	2	2	2	2	1	1	1	1
13	2	2	2	2	2	1	1	1

14	2	2	2	2	2	2	1	1
15	3	2	2	2	2	2	1	1
16	3	3	2	2	2	2	1	1
17	3	3	2	2	2	2	2	1
18	3	3	3	2	2	2	2	1

اما جداول ۴۳-۶ و ۴۴-۶ که بترتیب برای حالاتی است که تابع هدف شتاب مطلق بیشینه و جابجایی مطلق بیشینه باشد نشان می‌دهد که اولاً متغیرهای نام برده شده رفتار بسیار نزدیکی بهم دارند (بخصوص برای تعداد بالای کنترلر) و ثانیاً روال کلی برای قرارگیری کنترلر در هر دو مورد بدین صورت است که ابتدا برای یک دهانه خاص کنترلرها از طبقه اول تا طبقه آخر شروع به پر شدن می‌کنند و بعد از اتمام یک دهانه، این روند برای دهانه دیگر تکرار می‌گردد.

۴. در این حالت رابطه (۶-۶) برقرار بوده و مقدار نیروی کنترل مجاز تغییر می‌کند. نتایج برای سازه (۲) در حالت برشی و فرض استفاده از الگوریتم کلاسیک خطی و بدون تاخیر زمانی استخراج شده و در جدول ۴۵-۶ ارائه می‌گردد.

جدول ۴۵-۶: توزیع کنترلر در طبقات برای مقدار نیروی کنترل مجاز مختلف

نیروی کنترل مجاز (10e5*N)	طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵	طبقه ۶	طبقه ۷	طبقه ۸	مجموع کنترلر
2	3	3	3	3	3	3	2	0	20
3	2	3	1	2	3	1	0	0	12
4	2	2	1	2	2	1	0	0	10
5	1	1	1	1	2	1	1	0	8
6	2	1	2	1	1	0	0	0	7
7	1	2	1	1	1	0	0	0	6
8	1	1	1	1	1	0	0	0	5
9	1	1	0	1	1	1	0	0	5
10	1	0	1	1	1	1	0	0	5
20	0	1	0	1	1	1	0	0	4

طبیعتاً هر چه نیروی کنترل مجاز بیشتر شود تعداد کنترلر هم کمتر می‌گردد. این رفتار در جدول ۴۵-۶ هم مشاهده شد. چپینس کنترلر نیز با تغییرات سقف مجاز نیروی کنترل تغییرات چندانی نداشته است و همان الگوی بیان شده در حالات ۱، ۲ و ۳ مشاهده گردیده است.

۳-۲-۶ تاثیر الگوریتم‌های مختلف کنترلی

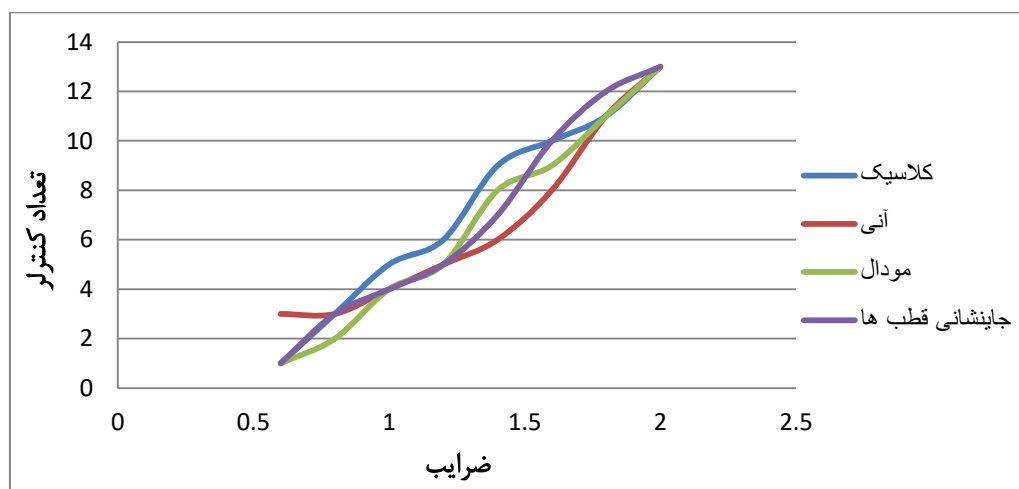
در این قسمت تاثیر الگوریتم‌های مختلف کنترلی فعال بر تعداد و مکان بهینه کنترلی بررسی می‌گردد. این بررسی از دو منظر تعداد و چینش بهینه انجام می‌پذیرد. در نگاه اول شدت رکورد زلزله اعمال تغییر می‌یابد و بازای هر رکورد چینش بهینه الگوریتم‌ها تعیین می‌گردد. برای این منظور از فرضیات بخش ۱-۲-۶ استفاده می‌شود و رکورد زلزله مقیاس شده در ضرایب ۰.۶، ۰.۸، ۱، ۱.۲، ۱.۴، ۱.۶، ۱.۸ و ۲ ضرب می‌گردد. نتایج برای این حالت در جدول ۴۶-۶ ارائه شده است.

جدول ۴۶-۶: توزیع کنترلی در طبقات برای ضرایب و الگوریتم‌های مختلف کنترلی

الگوریتم	ضریب	شماره طبقه								تعداد کل
		1	2	3	4	5	6	7	8	
کلاسیک	0.6	1	0	0	0	0	0	0	0	1
	0.8	1	1	1	0	0	0	0	0	3
	1	1	0	1	1	1	1	0	0	5
	1.2	1	1	1	1	1	1	0	0	6
	1.4	2	1	2	1	1	1	1	0	9
	1.6	2	2	1	2	1	1	1	0	10
	1.8	2	2	2	2	1	1	1	0	11
2	2	3	2	2	2	1	1	0	13	
آنی	0.6	0	0	0	1	1	0	1	0	3
	0.8	0	0	0	1	1	0	1	0	3
	1	0	0	0	1	1	1	1	0	4
	1.2	1	0	0	1	1	1	1	0	5
	1.4	1	1	1	1	1	0	1	0	6
	1.6	2	1	0	2	1	1	1	0	8
	1.8	2	2	2	2	1	1	1	0	11
2	3	2	1	3	2	1	1	0	13	
مودال	0.6	0	0	0	1	0	0	0	0	1
	0.8	1	0	0	1	0	0	0	0	2
	1	0	1	0	1	1	0	1	0	4
	1.2	1	1	0	1	1	0	1	0	5
	1.4	2	1	1	1	1	1	1	0	8
	1.6	1	2	1	2	1	1	1	0	9
	1.8	2	2	2	2	1	1	1	0	11
2	2	3	2	2	2	1	1	0	13	
جایابی قطب‌ها	0.6	1	0	0	0	0	0	0	0	1
	0.8	1	0	0	1	0	0	1	0	3
	1	0	0	1	1	1	0	1	0	4

	1.2	1	1	0	1	1	0	1	0	5
	1.4	1	1	1	1	1	1	1	0	7
	1.6	2	1	1	2	1	1	1	1	10
	1.8	2	2	2	2	1	1	1	1	12
	2	2	2	2	2	2	1	1	1	13

ستون آخر در جدول ۶-۴۶ تعداد کنترلر بهینه را نشان می‌دهد. تغییرات تعداد کنترلر برای الگوریتم‌های مختلف برحسب ضرایب مختلف در شکل ۶-۳۰ نشان داده شده است.



شکل ۶-۳۰: تغییرات تعداد کنترلر بهینه نسبت به ضرایب اعمالی در رکورد زلزله مقیاس شده

از این شکل مشخص است که الگوریتم آنی نتایج بهتری می‌دهد و بعد از این الگوریتم، الگوریتم‌های مودال و جایبانی قطب‌ها که نتایج نزدیک بهم دارند قرار دارند و الگوریتم کلاسیک در اکثر موارد بدترین نتیجه را می‌دهد و چپش بهینه برای هر ضریب به همان ترتیب بیان شده در قسمت اول از بخش ۶-۲-۲ است.

در بررسی دیگر، چپش بهینه الگوریتم‌های مختلف بازای تعداد مشخصی از کنترلر و تحت رکورد زلزله مقیاس شده تعیین می‌شود. فرضیات موجود در قسمت اول از بخش ۶-۲-۲ در اینجا هم حاکم می‌باشد. جدول ۶-۴۷ نتایج را برای این بررسی نشان می‌دهد.

جدول ۶-۴۷: توزیع کنترلر در طبقات برای تعداد معین کنترلر و الگوریتم‌های مختلف

شماره طبقه

الگوریتم	تعداد کنترلر	1	2	3	4	5	6	7	8
کلاسیک	3	0	1	0	1	0	0	1	0
	6	1	1	1	1	0	1	0	1
	9	2	1	1	1	1	1	1	1
	12	2	2	2	2	1	1	1	1
	15	3	2	2	2	2	2	1	1
	18	3	3	2	2	2	2	2	2
آنی	3	0	0	0	1	1	0	1	0
	6	1	1	0	1	1	1	1	0
	9	2	1	1	1	1	1	1	1
	12	2	2	2	2	1	1	1	1
	15	3	2	3	3	1	1	1	1
	18	3	2	3	2	3	2	2	1
مودال	3	1	1	0	1	0	0	0	0
	6	1	1	0	1	1	1	1	0
	9	1	2	2	1	1	1	1	0
	12	2	2	2	1	1	1	1	2
	15	2	2	3	2	2	2	1	1
	18	2	2	3	2	2	2	3	2
جایابی قطب ها	3	0	1	0	1	0	1	0	0
	6	2	1	0	1	1	0	1	0
	9	2	1	1	1	1	1	1	1
	12	2	2	2	2	1	1	1	1
	15	3	3	3	2	1	1	1	1
	18	3	3	3	3	1	1	1	3

از جدول ۶-۴۷ می‌توان دریافت که چینش بهینه چندان به الگوریتم کنترلی وابسته نیست، خصوصاً برای زمانی که تعداد کنترلر بیش از ۶ عدد باشد نتایج چهار الگوریتم مورد بحث بسیار بهم نزدیک است.

در این پژوهش برای سازه برشی و برای الگوریتم جایابی قطب‌ها، الگوی انتقال قطب‌های حلقه باز سیستم به مقصد به این صورت بوده است که مقادیر موهومی قطب‌ها ثابت نگه داشته شده و مقادیر حقیقی بقدری تغییر می‌یافتند که محدودیت نیروی کنترل برقرار شود و اگر در الگوریتم کلاسیک، دو ماتریس وزنی Q و R قطبی فرض شده و سپس دو ماتریس بنحوی تغییر یابند (یکی از دو ماتریس ثابت فرض می‌شود) که محدودیت نیروی کنترل برقرار شود در این صورت در این الگوریتم مقادیر موهومی قطب‌های حلقه باز سیستم تغییر اندکی یافته و تغییرات اصلی بر روی مقادیر حقیقی بوده است. بنابراین

0.03	1	1	0	1	1	1	0	0	5
0.04	0	1	1	1	1	1	1	0	6
0.05	0	1	0	1	1	1	1	0	5
0.06	0	1	0	1	1	1	1	0	5
0.07	1	0	0	1	1	1	1	0	5
0.08	1	1	1	1	1	1	1	0	7
0.09	1	0	0	1	1	1	1	0	5
0.1	1	1	1	1	1	1	1	0	7
0.11	0	1	1	1	1	1	1	0	6
0.12	1	2	1	1	1	1	1	0	8
0.13	2	2	2	2	2	1	1	0	12
0.14	2	2	2	2	2	2	1	1	14
0.15	3	3	3	2	2	2	1	2	18
0.16	3	3	3	3	2	2	2	1	19
0.17	3	3	3	3	3	2	2	1	20

جدول بالا نشان می‌دهد که افزایش تاخیر زمانی بطور کلی موجب افزایش تعداد کنترلر بهینه می‌گردد هر چند در این جدول موارد استثنائی هم مشاهده شده است و ترتیب چینش کنترلرها برای یک تاخیر زمانی مشخص همانند حالت بدون تاخیر زمانی است (توزیع در ارتفاع و پرشدن از طبقات پایین‌تر).

برای بررسی تاثیر تاخیر زمانی بازای تعداد مشخصی کنترلر در چینش بهینه کنترلر، برای چند تاخیر زمانی مشخص و برای تعداد معینی از کنترلر فرآیند بهینه‌سازی با استفاده از رابطه (۶-۱۱) انجام شده است. سایر فرضیات همانند فرضیات بالا است. جدول ۶-۴۹ نتایج بهینه‌سازی را برای این حالت نشان می‌دهد.

جدول ۶-۴۹: توزیع کنترلر در طبقات برای تعداد خاصی از کنترلر و تاخیر زمانی مشخص

تعداد کل	طبقه ۸	طبقه ۷	طبقه ۶	طبقه ۵	طبقه ۴	طبقه ۳	طبقه ۲	طبقه ۱	تأخیر زمانی (ثانیه)
3	0	0	1	0	1	0	1	0	۰.۰۵
6	0	1	1	1	1	0	1	1	۰.۰۵

۰.۰۵	2	2	1	1	1	1	1	0	9
۰.۰۵	2	2	2	2	1	1	1	1	12
۰.۱	0	0	0	1	1	0	1	0	3
۰.۱	0	0	1	2	1	1	1	0	6
۰.۱	1	1	2	1	2	1	1	0	9
۰.۱	1	3	2	1	2	1	1	1	12
۰.۱۵	0	0	0	0	1	2	0	0	3
0.۱۵	0	0	1	1	1	1	1	1	6
۰.۱۵	2	0	1	2	1	1	1	1	9
۰.۱۵	2	2	2	2	2	1	1	0	12
۰.۲	0	0	0	1	1	1	0	0	3
۰.۲	0	0	1	1	2	1	1	0	6
۰.۲	0	0	1	3	3	1	1	0	9
۰.۲	1	3	2	1	2	1	1	1	12

از جدول ۴۹-۶ می‌توان دریافت که افزایش تاخیر زمانی موجب انتقال کنترلرها بسمت طبقات بالاتر می‌گردد ضمن اینکه همچنان توزیع کنترلر در ارتفاع نسبت به توزیع در طبقه الویت دارد.

۵-۲-۶ تاثیر رکورد

در این قسمت تاثیر شدت و نوع رکورد بر پاسخ بهینه نهایی بررسی می‌شود. در این قسمت نیز فرض بر استفاده از الگوریتم کلاسیک در حالت خطی و بدون در نظر گرفتن اثر تاخیر زمانی و برای سازه برشی ارائه می‌باشد. نیروی کنترل مجاز (KN) ۱۰۰۰ فرض شده است.

برای بررسی تاثیر شدت رکورد بر قاب (۲)، رکورد زلزله‌ای که در بخش ۶-۱-۲ مقیاس شده بود، در ضرایب متفاوتی ضرب می‌شود و تاثیر آن بر پاسخ سازه بررسی می‌گردد. رابطه مورد نیاز برای انجام بهینه‌سازی همان رابطه (۶-۶) و محدودیت قید همان مقدار معرفی شده در بخش ۶-۱-۴ می‌باشد. جدول ۵۰-۶ مکان کنترلرهای بهینه را برای ضرایب مختلفی که در رکورد ضرب می‌شود ارائه می‌دهد:

جدول ۵۰-۶: توزیع کنترلر در طبقات برای ضرایب مختلف

تعداد کل	طبقه ۸	طبقه ۷	طبقه ۶	طبقه ۵	طبقه ۴	طبقه ۳	طبقه ۲	طبقه ۱	ضریب
----------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	------

0.6	1	0	0	0	0	0	0	0	۱
0.7	1	0	1	0	0	0	0	0	۲
0.8	1	1	1	0	0	0	0	0	۳
0.9	1	0	0	1	1	1	0	0	۴
1	1	0	1	1	1	1	0	0	۵
1.1	1	0	1	1	1	1	0	0	۵
1.2	1	1	1	1	1	1	0	0	۶
1.3	2	0	2	1	1	1	0	0	۷
1.4	2	1	2	1	1	1	1	0	۹
1.5	2	2	1	2	1	1	1	0	۱۰
1.6	2	2	1	2	1	1	1	0	۱۰
1.7	2	2	1	2	1	1	1	0	۱۰
1.8	2	2	2	2	1	1	1	0	۱۱
1.9	2	2	2	2	2	1	1	0	۱۲
2	2	3	2	2	2	1	1	0	۱۳

از جدول ۶-۵۰ مشاهده می‌گردد که با افزایش ضریب ضمن افزایش تعداد کنترلر، چینش بهینه از طبقه اول و برای یک دهانه شروع به پرشدن می‌کند و سپس دهانه دیگر پر می‌شود. به عبارتی توزیع در ارتفاع نسبت به توزیع در طبقه در الویت است.

برای بررسی تنوع رکورد در چینش بهینه کنترلر، هفت رکورد زلزله مقیاس شده به یک مقدار برابر، بصورت مجزا بر قاب شماره (۲) اعمال می‌گردد. از رابطه (۶-۱۱) برای انجام فرآیند بهینه‌سازی استفاده شده است. و برای دو تعداد کنترلر مجاز ۵ و ۱۰، نتایج استخراج شده و در جداول (۶-۵۱) و (۶-۵۲) ارائه می‌شود.

جدول ۶-۵۱: توزیع کنترلر در طبقات برای رکوردهای مختلف و ۵ کنترلر در قاب

شماره رکورد	طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵	طبقه ۶	طبقه ۷	طبقه ۸
-------------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

1	1	1	0	1	1	1	0	0
2	1	1	0	1	1	1	0	0
3	1	1	0	1	1	1	0	0
4	1	0	0	1	2	0	1	0
5	1	1	0	1	1	1	0	0
6	1	1	0	1	1	1	0	0
7	1	1	0	1	1	1	0	0

جدول ۶-۵۲: توزیع کنترلر در طبقات برای رکوردهای مختلف و ۱۰ کنترلر در قاب

شماره رکورد	طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵	طبقه ۶	طبقه ۷	طبقه ۸
1	2	2	1	2	1	1	1	0
2	2	1	3	1	1	1	1	0
3	2	1	1	1	2	2	1	0
4	2	2	1	2	1	1	1	0
5	2	2	1	1	1	1	1	1
6	2	2	1	1	1	2	1	0
7	2	2	1	1	1	1	1	1

جدول ۶-۵۱ و ۶-۵۲ نشان می‌دهد که با فرض تعداد کنترلر مشخص، رکوردهای مختلف مقیاس شده بر طبق آیین‌نامه تاثیر بسیار ناچیزی بر چینش بهینه کنترلر دارد و مشاهده می‌گردد که برای چند رکورد نتایج کاملاً یکسان می‌باشد. شاید این شباهت در پاسخ در محدوده آن تعداد رکوردی که از یک معیار (آیین‌نامه) مشخص مقیاس می‌گردند، واقع شوند و با این نتایج به هیچ وجه نمی‌توان یک قضاوت کلی از عدم تاثیر محتوای فرکانسی و مدت دوام وقوع زمین‌لرزه ارائه داد.

۶-۲-۶ تاثیر سازه

در این قسمت تاثیر تغییر نوع سازه برای چینش بهینه کنترلر بررسی می‌شود. برای این منظور از دو قابی که در قسمت ۶-۱-۱ معرفی شده، استفاده شده است. در اینجا نیز فرض بر استفاده از الگوریتم کلاسیک در حالت خطی و بدون در نظر گرفتن اثر تاخیر زمانی بوده و سازه‌ها برشی فرض می‌گردند. فرآیند بهینه‌سازی طبق رابطه (۶-۱۱) و برای ۵ مقدار متفاوت از کنترلر مجاز (۲، ۵، ۸، ۱۱ و ۱۴) انجام می‌گیرد. نتایج بدست آمده برای این قسمت در جداول (۶-۵۳) و (۶-۵۴) که بترتیب برای دو سازه (۱) و (۲) می‌باشد، ارائه شده است.

جدول ۶-۵۳: توزیع کنترلر در طبقات برای تعداد کنترلر مختلف و برای قاب (۱)

تعداد کنترلر مجاز	طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵	طبقه ۶	طبقه ۷	طبقه ۸
2	2	0	0	0	0	0	0	0
5	1	1	1	1	0	0	1	0
8	1	1	2	1	1	1	1	0
11	2	2	2	2	1	1	1	0
14	3	3	2	2	2	1	1	0

جدول ۶-۵۴: توزیع کنترلر در طبقات برای تعداد کنترلر مختلف و برای قاب (۲)

تعداد کنترلر مجاز	طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵	طبقه ۶	طبقه ۷	طبقه ۸
2	1	0	1	0	0	1	0	0
5	1	0	1	1	1	1	0	0
8	2	1	1	1	1	1	1	0
11	2	2	2	1	1	1	1	1
14	3	2	2	2	1	1	1	2

طبیعتاً سازه‌های مختلف تعداد کنترلر متفاوتی را برای رعایت محدودیت‌ها می‌طلبند و در حقیقت مکان بهینه کنترلر به جرم، میرایی و سختی طبقات وابسته است. جداول ۶-۵۳ و ۶-۵۴ نشان می‌دهد که برای تعداد مشخصی از کنترلر، دو سازه با رفتار متفاوت چینی بسیار مشابهی از کنترلر را ارائه می‌دهد که دلیل این موضوع شاید برابری سختی و جرم در کلیه طبقات برای این سازه مذکور باشد.

فصل ۷: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در فصل ششم نتایج بهینه‌سازی به همراه توضیحات لازم ارائه شده است. در این فصل ابتدا ضمن بیان نتایج نهایی از چینش بهینه تعداد و مکان کنترلر، پیشنهاداتی برای پژوهش‌های آتی ارائه می‌گردد.

۷-۱ نتیجه‌گیری

- تاثیر الگوریتم‌های مختلف کنترلی

هم برای سازه برشی و هم غیربرشی و برای همه الگوریتم‌ها توزیع کنترلر بیشتر در ارتفاع صورت می‌پذیرد (تا در طبقه خاص) و سپس بعد از تکمیل یک دهانه، دهانه دیگر شروع به پر شدن می‌کند. از مقایسه نتایج تحلیل‌های سازه برشی و غیر برشی و برای الگوریتم‌های مختلف این نتیجه حاصل می‌شود که سازه غیربرشی تعداد کنترلر بهینه بیشتری را نسبت به حالت برشی طلب می‌کند زیرا در حالت برشی با فرض صلبیت تیرها، سازه سخت‌تر فرض می‌شود و در نتیجه تعداد کمتری کنترلر برای رعایت محدودیت در پاسخ نیاز دارد بنابراین با توجه به اختلاف کم تعداد کنترلر برای سازه برشی و غیر برشی و چینش مشابه و از طرفی با توجه به هزینه محاسباتی بسیار بیشتر فرآیند بهینه‌سازی بر روی سازه غیربرشی (به دلیل افزایش تعداد درجات آزادی)، می‌توان با تقریب قابل قبول فرآیند بهینه‌سازی را بر روی سازه برشی پیدا نمود.

اگر نیروی کنترل مجاز از حد اشباع الگوریتم‌های مورد بحث در این پژوهش کمتر باشد، الگوریتم آنی تعداد کنترلر بهینه کمتری ارائه می‌دهد و بعد از این الگوریتم، الگوریتم‌های مودال و جایابی قطب‌ها که نتایج نزدیک بهم دارند قرار دارند و الگوریتم کلاسیک در اکثر موارد بدترین نتیجه را می‌دهد. اما چینش

بهینه چندان به الگوریتم کنترلی وابسته نیست، خصوصاً برای زمانی که تعداد کنترلر بیش از ۶ عدد باشد نتایج چهار الگوریتم مورد بحث بسیار بهم نزدیک است.

شاید از نظر تعداد بهینه کنترلر بین دو حالت سازه خطی و غیرخطی تفاوتی مشاهده نشود اما بیشینه نیروی کنترل در حالت غیرخطی بسیار بیشتر از حالت خطی است که در نتیجه هزینه کنترلی برای حالت غیر خطی بیشتر از حالت خطی می‌شود. از طرفی هزینه طراحی استاتیکی سازه غیرخطی نسبت به سازه خطی کمتر است و بنابراین راجع به هزینه نهایی طراحی و کنترل سازه برای دو حالت خطی و غیرخطی نمی‌توان قضاوت کرد. از نظر چینش بهینه برای تحلیل غیرخطی، تمایل پرشدن کنترلر از طبقه اول به سمت طبقه آخر می‌باشد (توزیع در ارتفاع) که این رفتار مانند حالت رفتار خطی است.

بنابراین با توجه به توضیحات ارائه شده، می‌توان در عمل برای تعیین تعداد و مکان بهینه کنترلر، تحلیل را بر روی قاب برشی انجام داد و از الگوریتم آنی نیز بهره گرفت (سازه خطی و یا غیرخطی).

- تاثیر تابع هدف و قیود مختلف

زمانی که تابع هدف تغییرمکان جانبی نسبی مطلق باشد، با افزایش تعداد کنترلر، ابتدا در یک دهانه مشخص کنترلرها از طبقه اول تا طبقه آخر شروع به پرشدن می‌کنند و بعد از اتمام یک دهانه، این روند برای دهانه دیگر اجرا می‌گردد. البته برای تعداد کنترلر زیاد، بعد از اینکه یک دهانه کاملاً پر شد، مشاهده گردید که برای دهانه‌های دیگر توزیع کنترلر از طبقه اول و آخر به سمت طبقه مرکز بوده است. اما اگر شتاب مطلق بیشینه و جابجایی مطلق بیشینه تابع هدف باشند نتایج مشابه می‌باشد و ترتیب پرشدن دهانه به دهانه و از طبقه اول به آخر می‌باشد. چینش کنترلر نیز با تغییرات سقف مجاز نیروی کنترل تغییرات چندان ناداشته است و همان الگوی بیان شده مشاهده گردیده است.

- تاخیر زمانی

طبیعتاً افزایش تاخیر زمانی بطور کلی موجب افزایش تعداد کنترلر بهینه می‌گردد و در ضمن مشاهده

گردید که افزایش تاخیر زمانی موجب انتقال کنترلرها بسمت طبقات بالاتر می‌گردد ضمن اینکه همچنان توزیع کنترلر در ارتفاع نسبت به توزیع در طبقه الویت دارد.

- تاثیر رکورد

با افزایش ضریب رکورد زلزله مقیاس شده ضمن افزایش تعداد کنترلر، چینش بهینه از طبقه اول و برای یک دهانه شروع به پرشدن می‌کند و سپس دهانه دیگر پر می‌شود. به عبارتی توزیع در ارتفاع نسبت به توزیع در طبقه در الویت است. رکوردهای مختلفی که بر طبق آیین‌نامه مشخصی مقیاس شده‌اند، تاثیر بسیار ناچیزی بر چینش بهینه دارد و مشاهده شد که برای چند رکورد نتایج کاملا یکسان می‌باشد. ولی در حالت کلی دو رکورد با محتوای فرکانسی و بازه زمانی متفاوت (مانند زلزله و باد) لزوماً چینش یکسانی ندارند هرچند شاید تحت مفروضات خاص در تولید رکورد باد نتایج این دو نوع رکورد مشابه شود.

۲-۷ پیشنهادات

- هدف اصلی از این پژوهش کنترل سازه با استفاده از کنترلر ضمن کمینه کردن هزینه اجرا بود. اما شاید بتوان ابزار کنترلی (فعال یا غیرفعال) دیگری یافت که ضمن رعایت محدودیت‌ها، از هزینه کمتری هم برخوردار باشد. بنابراین بدون یک بررسی جامع در دیگر ابزارهای کنترلی و برآورد هزینه طراحی و اجرای هر مورد بصورت جداگانه، استفاده از کابل فعال که در این پژوهش از آن استفاده شده است توصیه نمی‌شود.
- در تمام مراحل این پژوهش فرض بر این بوده که اعضای سازه مورد استفاده مشخص می‌باشند و تنها پارامترهای مجهول تعداد و مکان کنترلر بوده است. اما بعنوان یک بررسی جامع می‌توان فرض نمود که حتی اعضای سازه نیز متغیر می‌باشد. طبیعتاً حل این مسئله از یک طرف طرح بهینه‌تری ارائه می‌کند و از طرفی هزینه محاسباتی بالاتری می‌طلبد.
- الگوریتم ژنتیک با تمام مزیت‌هایش در سادگی فهم و اجرا، در پاره‌ای موارد به خاطر طبیعت

تصادفی حاکم بر آن زمان بر می‌باشد. اما شاید بتوان مسئله یافتن تعداد و مکان بهینه کنترلر را که طبیعتی گسسته و پیچیده دارد، با استفاده از روشهای ریاضی و پایه‌ای بهینه‌سازی که مبتنی بر مشتق می‌باشند، حل نمود. موفقیت در این زمینه موجب کاهش بسیار زمان تحلیل می‌شود.

- بجای بررسی تحلیلی این مسئله بهینه‌سازی با استفاده از روش‌های ریاضی بهینه‌سازی، شاید بتوان با استفاده از روش آنالیز ابعادی رابطه‌ای برای تعیین تعداد و مکان بهینه کنترلر ارائه کرد. بدین صورت که مثلاً برای بررسی تاثیر سختی سازه، دیگر پارامترهای موثر ثابت فرض شده و تحت مقادیر متعددی از سختی، تحلیل عددی انجام گرفته تا بتوان رابطه‌ای برای بیان تغییرات تعداد کنترلر بر حسب سختی تعیین نمود. برای دیگر پارامترها نیز این فرآیند تکرار شود و در نهایت تاثیر همه این پارامترها را در یک رابطه جمع‌آوری کرد. قابل ذکر است که این روش مستلزم انجام تعداد زیادی از تحلیل عددی می‌باشد.

منابع و مراجع

- [1] A. Rama Mohan Rao and K. Sivasubramanian, "Optimal placement of actuators for active vibration control of seismic excited tall buildings using a multiple start guided neighbourhood search (MSGNS) algorithm," *Sound and Vibration*, vol. 311, no. 1-2, pp. 133-159, Mar. 2008.
- [2] J. Q. Fang, Q. S. Li, and A. P. Jeary, "Modified independent modal space control of m.d.o.f. systems," *Sound and Vibration*, vol. 261, no. 3, pp. 421-441, Mar. 2003.
- [3] S. M. Badran and M. A. Choudhry, "Design of an optimal controller with prescribed eigenvalues for power system," *Proceeding of the Twenty-Fifth Southeastern Symposium on System Theory*, May 1993, pp. 140-144.
- [4] V. Kucera and I. Cigler, "Optimal Control Systems with Prescribed Eigenvalues," *Proceedings of the 4th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing, ISCCSP 2010, Limassol, Cyprus, March 2010*, pp. 1-6.
- [5] S. A. Abdul-Razzaqsarar and E. S. Mahmoudesa, "Optimal Pole Placement with Prescribed Eigenvalues for Continuous Systems," *Franklin Institute*, vol. 330, no. 5, pp. 985-994, Sep. 1993.
- [6] A. Joghataie and M. Mohebbi, "Optimal control of nonlinear frames by Newmark and distributed genetic algorithms," *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, vol. 21, no. 2, pp. 77-95, Feb. 2012.
- [7] G. Cai and J. Huang, "An optimal control method for linear systems with time delay," *Computers and Structures*, vol. 81, no. 15, pp. 1539-1546, Jul. 2003.
- [8] G. Cai and J. Huang, "Instantaneous optimal method for vibration control of linear sampled-data systems with time delay in control," *Sound and Vibration*, vol. 262, no. 5, p. 1057-1071, May 2003.
- [9] A. K. Agrawal and J. N. Yang, "Compensation of time-delay for control of civil engineering structures," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol.

29, no. 1, pp. 37-62, Jan. 2000.

- [10] J. N. Agrawal and J. N. Yang, "Effect of fixed time delay on stability and performance of actively controlled civil engineering structures," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 26, no. 11, pp. 1169-1185, Nov. 1997.
- [11] Q. S. Li, D. K. Liu, J. Tang, N. Zhang, and C. M. Tam, "Combinatorial optimal design of number and positions of actuators in actively controlled structures using genetic algorithms," *Sound and Vibration*, vol. 270, no. 4-5, pp. 611-624, Mar. 2004.
- [12] C. P. Pantelides and F. Y. Cheng, "Optimal placement of controllers for seismic structures," *Engineering Structures*, vol. 12, no. 4, pp. 254-262, Oct. 1990.
- [13] D. K. Liu, Y. L. Yang, and Q. S. Li, "Optimum positioning of actuators in tall buildings using genetic algorithm," *Computers and Structures*, vol. 81, no. 32, p. 2823-2827, Dec. 2003.
- [14] F. Amini and M. R. Tavassoli, "Optimal structural active control force, number and placement of controllers," *Engineering Structures*, vol. 27, no. 9, p. 1306-1316, Aug. 2005.
- [15] Q. S. Li, D. K. Liu, J. Q. Fang, and C. M. Tam, "Multi-level optimal design of buildings with active control under winds using genetic algorithms," *Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 86, no. 1, pp. 65-86, May 2000.
- [۱۶] ب. زهرایی و م. حسینی، الگوریتم ژنتیک و بهینه سازی مهندسی، تهران، ایران، انتشارات گوتنبرگ، ۱۳۸۸.
- [17] T. T. Soong, *Active Structural Control : Theory and Practice*. New York, USA: Jon Wiley and Sons, 1990.
- [18] R. W. Clough and J. Penzien, *Dynamics of structures*, 3rd ed. University Ave, Berkeley USA: Computers & Structures, Inc, 1995.
- [19] O. C. Zienkiewicz and R. L. Taylor, *The Finite Element Method, Volume 1*, 5th ed.

Liancre house, Jordan Hill, Oxford, USA: Butterworth-Heinemann, 2000.

[20] FEMA P695: Quantification of Building Seismic Performance Factors. Redwood City, California, USA: Federal Emergency Management Agency, June 2009.

[۲۱] امیر عشیری و مجید موسی‌نژاد، طراحی ساختمانها در برابر زلزله (استاندارد ملی ایران ۲۸۰۰)، ویرایش سوم، تهران، ایران، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۸۴.

[۲۲] مقررات ملی ساختمان-مبحث ششم (بارهای وارد بر ساختمان)، ایران، دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، ۱۳۸۰.

[23] A. Kawaguchi, A. Teramura, and K. Omote, "Time history response of a tall building with a tuned mass damper under wind force," *Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 43, no. 1-3, pp. 1949-1960, 1992.

[24] F. Rofooei and I. Tajbakhsh, "Optimal control of structures with acceleration, velocity, and displacement feedback," *Engineering Mechanics*, vol. 119, no. 10, pp. 1993-2010, 1993.

[25] J. N. Yang, J. C. Wu, and A. K. Agrawal, "Sliding mode control for seismically excited linear structures," *Engineering Mechanics*, vol. 121, no. 12, p. 1386-1390, 1995.

[26] A. Kawaguchi, A. Teramura, and K. Omote, "Time history response of a tall building with a tuned mass damper under wind force," *Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 43, no. 1-3, pp. 1949-1960, 1992.

Abstract:

Structures which are designed in accordance with previously used design codes are usually weak to sustain dynamic loading and therefore they shall be rehabilitated. One approach for rehabilitation is to use active control. In this study, active tendon is used as a structural device control. Various arrangements of controllers can be used to limit the response of the structure but it is desired to find an arrangement at which the cost of the placement will be minimized. The aim of this thesis is to find the best placement of active tendons on a frame such that the placement satisfies two general restrictions; namely structural response and control forces. Genetic algorithm is applied to the 2D frames in order to optimize the controllers. Four control Algorithms including Classic, Instantaneous, modal and pole assignment in optimal manner are considered for linear behavior and Classic algorithm is used for nonlinear behavior. Effect of time delay is considered in the linear control algorithms. Two dynamic loadings consisting of earthquake and wind loadings are applied to the frames. Earthquake loadings include from seven records which are scaled in accordance with INBC code (2800) and the wind loading is produced in accordance with ASCE7-05 and Davenport density spectrum. Two three-bay-eight-story frames are used to consider linear and nonlinear behavior.

Results show that under defined restrictions, for a special frame, special dynamic loading, special control algorithm and both linear and nonlinear behavior without calculations and with acceptable precision, the optimal number and placement of controllers can be guessed. The results also show that non-shear frame could be analyzed as the shear frame with negligible error in the final results and the time of computation greatly reduced. Also if the permissible control force is less than saturation limit, instantaneous algorithm will have the best results and therefore nonlinear frames have more control cost than linear; however the structural cost should be considered for estimating the overall cost.

Keywords: Optimization, genetic algorithm, active tendon, active control, 2D frame



Sharif University of Technology
Civil Engineering Department

M.Sc. thesis
Earthquake Engineering

**Numerical evaluation for optimal design of number
and positions of controllers in 2D frames under
earthquake and wind loadings using different active
control algorithms**

By:

Zabihollah Mehdipour Picha

Supervisor:

Dr. Ali Bakhshi