۱۳۰۷
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی عمران

**پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران - سازه**

# بررسی روش محاسبه طیف شتاب طبقات و تاثیر بهینه سازی ساختمان‌های در بر دارنده تجهیزات حساس به شتاب بر آن

استاد راهنما:

**جناب دکتر رضا کرمی محمدی**

محقق:

**محمد محمدی**

8800484

زمستان 90

به پاس تعبیر عظیم و انسانی شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگی،

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این

سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است، به پاس قلب های

بزرگشان که فریادرس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به

شجاعت می گراید و به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز

فروکش نمی کند

این تلاشم را به پدر و مادر عزیزم تقدیم می کنم

از استاد ارجمندم جناب دکتر کرمی محمدی کمال تشکر را دارم چرا که بدون زحمات بی‌دریغ و راهنمایی‌های روشنگرانه ایشان، انجام این پایان‌نامه برایم غیرممکن بود.

## چکیده :

در این مطالعه با استفاده از مدل برشی اصلاح شده‌ای از قاب‌های خمشی و مهاربندی هم محور و برون محور 3 تا 7 طبقه تحت اثر 15 رکورد زلزله حوزه دور و 15 رکورد زلزله حوزه نزدیک، اثر پارامترهای مختلف نظیر رفتار غیرارتجاعی سازه، پریود عضو غیرسازه‌ای و سازه، نوع سیستم سازه‌ای، زلزله حوزه نزدیک و شدت زلزله بر بیشینه شتاب وارد بر اجزای غیر سازه‌ای در طبقات سازه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که روابط آیین‌نامه یوروکد برای ملاحظه دقیق‌تر اثر محل قرارگیری عضو غیرسازه‌ای و نیز رفتار غیر ارتجاعی سازه نیاز به اصلاحاتی دارد. بر اساس این نتایج، روابط ساده‌ای برای محاسبه دقیق‌تر شتاب بیشینه وارد بر عناصر غیر سازه‌ای پیشنهاد گردید. در این مطالعه همچنین اثر شدت زلزله و زلزله حوزه نزدیک بر بیشینه شتاب طبقات نشان داده شد. در آیین‌نامه‌های معتبر ساختمانی معمولاً روابطی که برای محاسبه نیروی وارد بر اجزای غیرسازه‌ای ارائه می‌شود، بصورت ضریبی از بیشینه شتاب زمین بیان می‌شود. نتایج این تحقیق منجر به ارائه روشی شده است که برطبق آن شتاب وارد بر عناصر غیرسازه‌ای براساس طیف شتاب زمین محاسبه می‌شود. به این ترتیب اثر محتوای فرکانسی زلزله طرح نیز در محاسبه شتاب لحاظ خواهد شد.

## فهرست مطالب


1 – مروری بر ادبیات فنی ..... 6

1- 1 مقدمه ..... 7

1- 2 دسته‌بندی اجزای غیرسازه‌ای ..... 8

1- 3 اهمیت اجزای غیرسازه‌ای ..... 10

1- 3- 1 تلفات انسانی و آسیب‌های جانی ..... 10

1- 3- 2 خسارات مالی ..... 11

1- 3- 3 از بین رفتن قابلیت سرویس‌دهی پس از وقوع زمین‌لرزه ..... 11

1- 4 موارد تاثیرگذار بر پاسخ اجزای غیرسازه‌ای ..... 12

1- 5 معرفی روش‌های تحلیل اجزای غیرسازه‌ای ..... 13

1- 5- 1 انواع تحلیل برای محاسبه پاسخ عضو غیرسازه‌ای ..... 13

1- 6 مطالعات انجام شده ..... 18

1- 7 آیین‌نامه‌های ساختمانی معتبر جهان ..... 37

1- 7- 1 انجمن سازه‌های کالیفرنیا SEAOC Blue Book 1996 و UBC 94 .... 39

1- 7- 2 آیین‌نامه UBC 97 ..... 40

1- 7- 3 آیین‌نامه نیوزلند ..... 42

1- 7- 4 آیین‌نامه کانادا ..... 43

1- 7- 5 آیین‌نامه‌های یوروکد و ایتالیا ..... 44

1- 7- 6 آیین‌نامه‌های NEHRP, IBC, ASCE ..... 47

1- 7- 7 آیین‌نامه زلزله ایران 2800 ..... 48

1- 7- 8 نشریه 360 ..... 49

2 – اهداف و روش کار ..... 52

2- 1 اهداف تحقیق و روش کار ..... 53

2- 2 معرفی مدل‌ها ..... 60
2- 3 خصوصیات رکورد زلزله‌های مورد استفاده ..... 62
2- 3- 1 همپایه سازی رکوردها ..... 64
2 -4 نحوه آنالیز ..... 66
2- 4- 1 آنالیز استاتیکی معادل ..... 66
2- 4- 2 آنالیز پوش-اور ..... 67
2- 4- 3 تحلیل تاریخچه زمانی ..... 68
2- 5 صحت سنجی مدل‌ها و آنالیزها ..... 71
3 – بیشینه شتاب طبقه ..... 79
3- 1 اثر پریود عضو غیرسازه‌ای (طیف شتاب طبقه)- سازه الاستیک ..... 80
3- 2 اثر محل عضو غیرسازه‌های در سازه بر بیشینه شتاب وارد بر آن(سازه الاستیک) . 83
3- 2- 1 ماکزیمم شتاب طبقه ..... 83
3- 2- 2 طیف شتاب طبقه ..... 85
3- 3 اثر میزان رفتار غیرخطی سازه اصلی ..... 88
3- 3- 1 بیشینه شتاب طبقه ..... 88
3- 3- 2 طیف شتاب طبقه ..... 89
3- 4 اثر پریود سازه اولیه بر پاسخ اجزای غیرسازه‌ای ..... 92
3- 4- 1 بیشینه شتاب طبقه ..... 93
3- 4- 2 طیف شتاب طبقه ..... 94
3- 5 اثر نوع سیستم مقاوم جانبی ..... 95
3- 5- 1 بیشینه شتاب طبقه ..... 95
3- 5- 2 طیف شتاب طبقه ..... 96
3- 6 اثر فاصله سازه تا محل گسل ..... 98
3- 6- 1 بیشینه شتاب طبقه ..... 98

3- 6- 2 طیف شتاب طبقه.....100
3- 7اثر شدت زلزله.....102
3- 7- 1 بیشینه شتاب طبقه .....103
3- 8نرمال‌سازی بیشینه شتاب طبقه غیرارتجاعی به ماکزیمم شتاب طبقه سازه ارتجاعی .104
3- 8- 1 اثر محل قرارگیری عضو غیرسازه‌ای در سازه بر بیشینه شتاب وارد بر آن.....105
3- 8- 2 اثر میزان رفتار غیرخطی سازه اصلی .....106
3- 8- 3 اثر پریود سازه اولیه بر پاسخ اجزای غیرسازه‌ای.....107
3- 8- 4 اثر فاصله سازه تا محل گسل.....108
3- 8- 5 اثر نوع سیستم مقاوم جانبی .....109
3- 8- 6 اثر شدت زلزله .....110
4 – ضریب تشدید.....112
4- 1اثر محل قرارگیری عضو غیرسازه‌ای در سازه.....113
4- 2اثر پریود سازه اصلی .....116
4- 3اثر میزان رفتار غیرخطی سازه اصلی .....119
4- 4اثر فاصله سازه تا محل گسل.....122
4- 5اثر نوع سیستم مقاوم جانبی .....125
4- 6مقایسه مقادیر ضریب تشدید با نتایج مطالعات پیشین .....127
4- 7مقایسه نتایج ضریب تشدید با مقادیر پیشنهادی آیین‌نامه یوروکد 8.....130
5 – ضریب افزایش پاسخ .....132
5- 1اثر محل قرارگیری عضو غیرسازه‌ای در سازه.....134
5- 2اثر پریود سازه اصلی .....135
5- 3اثر فاصله سازه تا محل گسل.....138
5- 4اثر میزان رفتار غیرخطی سازه اصلی .....140
5- 5اثر نوع سیستم مقاوم جانبی .....141

5- 6 مقایسه نتایج با مطالعات دیگر ..... 142
6 – اثر بهینه‌سازی ..... 144
6- 1 نحوه بهینه‌سازی ..... 145
6- 2 مقایسه نتایج قاب بهینه‌سازی شده و قاب اولیه ..... 147
6- 2- 1 بیشینه شتاب طبقه ..... 147
6- 2- 2 طیف شتاب طبقه..... 150
7 – ضریب افزایش طیفی ..... 154
7- 1 بیشینه شتاب طبقه نرمال‌سازی شده با بیشینه شتاب زمین ..... 155
7- 1- 1 اثر محل قرارگیری عضو غیرسازه‌ای در سازه بر بیشینه شتاب وارد بر آن..... 155
7- 1- 2 اثر میزان رفتار غیرخطی سازه اصلی ..... 158
7- 1- 3 اثر پریود سازه اولیه بر پاسخ اجزای غیرسازه‌ای..... 160
7- 1- 4 اثر نوع سیستم مقاوم جانبی ..... 162
7- 1- 5 اثر فاصله سازه تا محل گسل ..... 163
7- 1- 6 اثر شدت زلزله ..... 165
7- 2 نسبت طیف شتاب طبقه به طیف شتاب زمین ..... 167
7- 2- 1 اثر محل قرارگیری عضو غیرسازه‌ای در سازه بر بیشینه شتاب وارد بر آن..... 169
7- 2- 2 اثر میزان رفتار غیرخطی سازه اصلی ..... 173
7- 2- 3 اثر پریود سازه اولیه بر پاسخ اجزای غیرسازه‌ای..... 175
7- 2- 4 اثر نوع سیستم مقاوم جانبی ..... 176
7- 2- 5 اثر فاصله سازه تا محل گسل ..... 177
7- 3 مقایسه نتایج با روابط آیین‌نامه ..... 180
7- 3- 1 مقایسه مقادیر ضریب افزایش طیفی با مقادیر آیین‌نامه‌ها ..... 181
7- 3- 2 مقایسه مقادیر $PFA_e/PGA$ با مقادیر آیین‌نامه‌ها..... 183
7- 4 مقایسه نتایج با مطالعات دیگر ..... 184

8 -روشهای پیشنهادی.....186
8- 1اصلاح روابط آیین‌نامه یوروکد 8.....187
8- 1- 1 جمع‌بندی مطالعات بر روی پارامتر ضریب افزایش ($PFA_e/PGA$ = ) .....189
8- 1- 2 جمع‌بندی مطالب ضریب تاثیر رفتار غیرارتجاعی α ($\alpha=PFA_p/PFA_e$) ....192
8- 1- 3 جمع‌بندی مطالب ضریب تشدید ارتجاعی $\beta_e$ ($\beta_e=FRS_e/PFA_e$).....194
8- 1- 4 جمع‌بندی مطالب ضریب تشدید غیرارتجاعی $\beta_p$ ($\beta_p=FRS_p/PFA_p$) .....198
8- 1- 5 جمع‌بندی و نتیجه گیری.....200
8- 2روش جدید .....201
8- 2- 1 ضریب افزایش طیفی ارتجاعی .....202
8- 2- 2 ضریب افزایش طیفی غیر ارتجاعی .....206
9 – جمع‌بندی و نتیجه‌گیری.....208
10 – مراجع .....212

# 1– مروری بر ادبیات فنی

## 1 - 1 مقدمه

به طور کلی یک سازه از دو قسمت کلی تشکیل شده است:

1) اجزای سازه‌ای[1] :

اجزای سازه‌ای به بخش‌هایی از ساختمان گفته می‌شود که در مقابل نیروهای ثقلی، زلزله، باد و دیگر انواع بارها مقاومت می‌کنند و شامل ستون‌ها، دیوار برشی‌ها، بادبندها، انواع سقفها (طاق های ضربی، دالها، سقف های تیرچه و بلوک، ورقها و عرشه‌های فلزی و مرکب)، تیرهای اصلی و فرعی، بادبندها، دیوارهای باربر و پی‌ها (تکی، نواری گسترده و شمعی) هستند. برای ساختمان‌هایی‌که به روش اصولی ساخته می‌شوند، جزئیات اجزای سازه‌ای معمولاً توسط مهندسان سازه تحلیل و طراحی می‌شود.

2) اجزای غیرسازه‌ای[2]:

مواردی بجز موارد بالا که در سازه وجود دارند و از آن‌ها به منظور کاربری سازه‌ای استفاده نمی-کنند اجزای غیرسازه‌ای گفته می‌شود. نمونه‌هایی از این اجزا عبارتند از: پنجره‌ها، سقف‌های کاذب، میزها و لوازم اداری، کمدها، کتابخانه‌ها، کشوها، رایانه‌ها، تجهیزات حرارتی و برودتی، مبلمان‌ها، لوسترها، لوله‌ها، موتورهای الکترونیکی و مکانیکی، مخازن، آنتن‌ها و دکل‌ها، تابلوها و ...

این اجزا به نام‌های قطعات الحاقی، سیستم ثانویه[3]، اجزای متصل به سازه، اجزای معماری و مکانیکی، اجزای ثانویه سازه، اجزای غیرباربر و ... نیز شناخته می‌شوند. سازه‌ای که اجزا در آن قرار گرفته

---

[1] - structural component

[2] - nonstructural component

[3] - secondary system

یا به آن متصل می‌شوند نیز با عناوین سیستم اولیه[1]، سازه تکیه‌گاه[2]، سازه پایه و سازه اصلی شناخته می‌شود. اجزای غیرسازه‌ای معمولا دارای مقاومت، سختی و میرایی کمی می‌باشند. این خصیصه باعث می‌شود که وقتی آن‌ها تحت تاثیر نیروهای شدید زلزله قرار گیرند مقاومت کمی در مقابل آن داشته باشند. همچنین به هنگام شکست، باعث صدمات جانی و مالی زیادی شوند. به هنگام تخریب سازه نیز بخش عمده‌ای از هزینه‌های اعمال شده را شامل می‌شوند. خساراتی که اجزای غیرسازه‌ای مسبب آن هستند اعم از جانی، مالی و خسارات ناشی از سرویس‌دهی سازه پس از زلزله، با یک هزینه بسیار کم قابل پیشگیری می‌باشند. به عنوان مثال یک عضو غیرسازه‌ای با وزن 2.5 تن را در حالی که نیروی وارد شده به آن 3 برابر وزنش است، می‌توان با یک میلگرد فولادی $\Phi 20$ مهار کرد.

## 1 - 2 دسته‌بندی اجزای غیرسازه‌ای

به طور کلی اجزای غیر سازه‌ای به سه دسته تقسیم‌بندی می‌شوند:

1. اجزای معماری مانند خرپشته، آسانسر، راه‌پله، پارتیشن‌ها و دیوارهای داخلی، نرده‌ها، جان‌پناه‌ها، فرودگاه‌های هلیکوپتر، تابلوها، سیستم های روشنایی آویزان از سقف و ...
2. وسایل مکانیکی و الکتریکی مانند مخزن‌ها (بخصوص مخازن حاوی مواد سمی)، سیستم‌های لوله‌کشی، داکت‌ها، پله‌برقی‌ها، دودکش‌ها، آنتن‌ها، جرثقیل‌ها، رادار و وسایل ردیابی، کامپیوتر و سرورهای ذخیره اطلاعات بانک‌ها و موسسات بزرگ، تابلوهای کنترل، ترانسفورماتورها و دستگاه‌های تولید برق، کلیدهای بزرگ برقی، سیستم‌های آتشنشانی، دیگ‌های بخار و تحت فشار، هواکش‌ها، یخچال‌ها، برج‌های خنک‌کننده، توربین‌ها، ژنراتورها، موتورها و ...

[1] - primary system

[2] - supporting structure

3. وسایل داخلی سازه مانند کمد، میز، قفسه، کتابخانه، فایل‌ها، جالباسی‌ها، وسایل تزئینی و هر وسیله و اثاث معمولی که در ساختمان‌های اداری و انبارها یافت می‌شود.

امروزه اجزای غیر سازه‌ای به دو دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شوند:

- اجزای حساس به تغییرمکان
- اجزای حساس به شتاب

در آیین‌نامه NEHRP 91 نیز اجزا را به دو دسته تقسیم می‌کند:

❖ اجزای صلب و متصل شده با اتصالات صلب.

❖ اجزای انعطاف‌پذیر متصل شده با اتصالات انعطاف‌پذیر.

**شکل 1-1: نمونه‌هایی از خرابی اجزای غیر سازه‌ای در زلزله. [25, 23]**

## 1 - 3 اهمیت اجزای غیرسازه‌ای

اهمیت توجه به طراحی اجزای غیرسازه‌ای بر همگان زمانی آشکار شد که در زلزله ویتیر نروز[1] سال 1987 سقوط پنل پیش‌ساخته باعث مرگ یک دانش‌آموز در آستانه خروج از پارکینگ و رهایی یافتن از خطر زلزله و ساختمان در حال ریزش شد.(شکل 1-2)[39] این واقعه دردناک، اذهان عمومی را به نقش عناصر غیرسازه‌ای در امنیت جانی انسان‌ها و همچنین هزینه بالای جبران آن، جلب کرد.

### 1 - 3 - 1 تلفات انسانی و آسیب‌های جانی

اولین نوع خطر، جراحت یا کشته شدن افراد در اثر آسیب‌دیدگی و یا سقوط اجزای غیرسازه‌ای است. حتی اجسام به ظاهر بی خطر نیز در صورت سقوط ناگهانی می‌توانند خطرناک و کشنده باشند.

حدود % 50 از کل زخمی‌ها و 3% از کل کشته‌ها در زلزله 1999 کوکائیلی[2] در کشور ترکیه ( 17480 نفر کشته و 43953 نفر زخمی گزارش شده است)، در اثر خسارات مستقیم ناشی از اجزای غیرسازه‌ای مانند واژگون شدن قفسه‌های کتاب و تجهیزات الکتریکی، شکستن شیشه‌ها و تخریب دیوارهای میان‌قاب گزارش شده است. [67] در زلزله 1994 نورتریج[3] در یکی از مناطق آموزشی شهر لسانجلس آمریکا، بیش از 170 ساختمان آموزشی خسارت دیدند که اکثر آنها مربوط به اجزای غیرسازه-ای بوده است.

---

[1] - Whittier Narrows

[2] - Kocaeli

[3] - Northridge

### 1- 3- 2 خسارات مالی

حدودا 70% تا 85% هزینه‌های ساختمان را اجزای غیرسازه‌ای تشکیل می‌دهند. این میزان در ساختمان‌های خاص مانند بیمارستان‌ها یا نیروگاه‌های هسته‌ای و برق‌آبی به بیش از چندین برابر هزینه-های ساختمانی نیز افزایش می‌یابد. این بدان معناست که بخش عمده هزینه‌های یک ساختمان را اجزای غیرسازه‌ای تشکیل می‌دهند.[39]

به عنوان مثال، در زلزله نیسکوالی[1] خسارت ناشی از اجزای غیرسازه‌ای حدود 2 میلیارد دلار تخمین زده شده است.[3] وقوع زمین‌لرزه سال 1383 بلده-کجور ( در فاصله حدود 70 کیلومتری شهر تهران ) خساراتی را به بعضی ساختمان های شهر تهران وارد کرد که عمده آنها ناشی از آسیب دیدگی اجزای غیرسازه‌ای بود. مثلاً یکی از شرکت‌های بیمه حدود 320 میلیون ریال خسارت مالی در 55 مورد از ساختمان‌های تحت پوشش خود را گزارش کرد.[67]

### 1- 3- 3 از بین رفتن قابلیت سرویس‌دهی پس از وقوع زمین‌لرزه

یکی از موارد مهم در برخی ساختمان‌ها قابلیت سرویس‌دهی این سازه‌ها در شرایط بحران و پس از وقوع زلزله است. این ساختمان‌ها وظیفه کاهش تلفات انسانی (مانند بیمارستان‌ها)، امدادرسانی (مانند فرودگاه‌ها و مراکز آتش‌نشانی و سازمان‌های مدیریت بحران شهری)، اطلاع‌رسانی (مانند مراکز مخابراتی و تلویزیونی) و برقراری امنیت (مانند مراکز نظامی و انتظامی و زندان‌ها) را پس از زلزله بر عهده دارند و برای این منظور طراحی می‌شوند.

زلزله 1382 شهرستان بم باعث وارد آمدن آسیب به تجهیزات مکانیکی و برقی ترمینال فرودگاه بم، به ویژه برج کنترل فرودگاه شد. این آسیب ها وقفه چند ساعته ای در کار فرودگاه ایجاد کرد.[67]

---

[1] - Nisqually 2001

**شکل 1-2: تصویر سمت چپ تخریب پنجره یک مدرسه در زلزله مکزیکوسیتی 1973 را نشان می‌دهد و تصویر سمت راست پنل پیش‌ساخته‌ای که سقوط آن منجر به مرگ یک دانش‌آموز در زلزله لسانجلس– کالیفرنیا 1987 شد.[23]**

**شکل 1-3: ریزش دیوار در حالی که اسکلت سازه هنوز سالم و قادر به تحمل بار است. نورسریج-کالیفرنیا 1994[23].**

## 1 - 4 موارد تاثیرگذار بر پاسخ اجزای غیرسازه‌ای

مواردی که بر پاسخ اجزای غیرسازه‌ای تاثیرگذار هستند عبارتند از :

1) پاسخ یک عضو غیرسازه‌ای وابسته به پاسخ سازه‌ای است که به آن متصل می‌باشد.
2) پاسخ یک عضو غیرسازه‌ای وابسته به مکان آن در سازه است.

3) حرکت عناصر غیرسازه‌ای ممکن است بر حرکت سازه اصلی تاثیر گذارد بنابراین در بعضی موارد نمی‌توان رفتار یک عضو غیرسازه‌ای را بدون دانستن مشخصات دینامیکی مجموعه سازه و عضو غیرسازه‌ای پیش‌بینی کرد.
4) نوع و تعداد نقاط اتصال عضو به سازه.
5) هندسه، شکل و نحوه توزیع جرم عضو غیرسازه‌ای در نوع حرکت آن موثر است.
6) سطح اهمیت عضو غیرسازه‌ای نیروی طراحی را تعیین می‌کند.
7) نوع خاک محل سازه بر نحوه عملکرد زلزله روی سازه و عضو غیرسازه‌ای تاثیرگذار است.
8) فاصله سازه تا محل گسل می‌تواند نیز می‌تواند نوع حساسیت اعضا را تغییر دهد.

## 1- 5 معرفی روش‌های تحلیل اجزای غیرسازه‌ای

محاسبه نیروهای وارد بر سیستم‌های ثانویه را می‌توان به طور کلی به دو دسته با اندرکنش و بدون اندرکنش تقسیم‌بندی کرد. ثابت شده است که پاسخ سیستم‌های غیرسازه‌ای با جرم اندک نسبت به سازه اولیه را می‌توان بدون در نظر گرفتن اندرکنش عضو غیرسازه‌ای بر سازه محاسبه نمود در حالی که برای اجزای غیرسازه‌ای با جرم قابل ملاحظه، در نظر نگرفتن اندرکنش منجر به ایجاد خطا در پاسخ‌ها می‌شود. [35] در صورتی می‌توان از اثر عضو غیرسازه‌ای بر سازه صرفنظر کرد که وزن عضو غیرسازه‌ای از 10% وزن کل سازه و 20% وزن طبقه بیشتر نباشد. البته برخی منابع نیز مقادیر 1% و 0.1% وزن کل سازه را برای صرفنظر از اندرکنش عضو بر سازه در نظر گرفته‌اند.[5,56] صرفنظر کردن از اثر متقابل عضو بر سازه منجر به نتایج محافظ‌کارانه می‌شود.[39]

### 1- 5- 1 انواع تحلیل برای محاسبه پاسخ عضو غیرسازه‌ای

به طور کلی پاسخ اجزای غیرسازه‌ای را می‌توان به سه صورت محاسبه نمود.

1) روش سیستم ترکیبی (تحلیل سازه اولیه و ثانویه به صورت هم‌زمان).
2) روش طیف پاسخ طبقه (تحلیل سازه اولیه و ثانویه به صورت مجزا).
3) روش‌های تقریبی.

هرکدام از این روش‌ها محاسن و معایب مخصوص به خود را دارند که در ادامه به صورت مشروح به آن‌ها می‌پردازیم.

### 1 - 5 - 1 - 1 روش سیستم اولیه - ثانویه ترکیبی[1]

در زمانی که جرم‌های سیستم ثانویه غیر قابل صرفنظر باشند و روی پاسخ سازه اولیه اثر گذارند استفاده از روش سیستم ترکیبی پیشنهاد می‌شود تا خطاهای محاسباتی را کاهش دهد. در این روش، عضو ثانویه به همراه سیستم اولیه در مدل آورده شده و سپس تحلیل انجام می‌گیرد. برای این منظور هر دو روش آنالیز مودی و تحلیل تاریخچه زمانی را می‌توان مورد استفاده قرار داد.

مزایای استفاده از سیستم ترکیبی:

1) تشدید عضو غیرسازه‌ای در نظر گرفته می‌شود.
2) اثر متقابل حرکت عضو غیرسازه‌ای بر سازه اصلی (سازه تکیه‌گاه) در نظر گرفته می‌شود.
3) میرایی عضو غیرسازه‌ای در مدل‌سازی لحاظ می‌شود.
4) تاثیر اتصال عضو غیرسازه‌ای از چند نقطه به طبقه و سازه در نظر گرفته می‌شود.

پیچیدگی این روش زمانی مشخص می‌شود که یک روند طولانی مرحله به مرحله باید برای هر طبقه از سازه و هر نقطه از طبقه تکرار شود و خروجی این تحلیل‌ها برای بررسی عضو غیرسازه‌ای به کار

[1] - combined primary-secondary system (ps-system)

برده شود. همچنین هزینه و زمانی که برای این روش نیازمند است بسیار زیاد می‌باشد. همانطور که انتظار می‌رود جواب این روش دقیق‌تر از روش‌های دیگر محاسبه نیروی وارد بر عضو غیرسازه‌ای است. یک روش برای کم کردن پیچیدگی‌های محاسباتی روش سیستم ترکیبی آن است که یک سازه به چند سازه پایه تبدیل و جداگانه بررسی شود. برای حل سازه‌های مجزا شده از روش اجزای محدود یا روش‌های عددی مناسب استفاده می‌گردد.[60]

برای تحلیل سیستم های اولیه و ثانویه می‌توان از روش‌های تحلیل تاریخچه زمانی، تحلیل طیفی، ارتعاشات تصادفی و یا روش استاتیکی معادل که در برخی آیین‌نامه‌ها آورده شده است استفاده کرد. مطالعات پارامتریک نشان می‌دهد که تعداد مودهای لازم برای تحلیل سیستم ثانویه در تحلیل طیفی برابر است با تعداد مودهای سیستم اولیه که فرکانس آن‌ها کمتر از فرکانس سیستم ثانویه می‌باشد.[35]

دلایل پیچیده بودن بررسی رفتار سیستم‌های ترکیبی عبارتند از:

1) درجات آزادی زیاد این سیستم‌ها
2) اختلاف ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی
3) تشدید عضو ثانویه
4) نحوه و تعداد نقاط اتصال عضو به سازه

### 1 - 5 - 1 - 2 روش طیف پاسخ طبقه[1]

معمولا طراحی تاسیسات و سیستم‌های الکترونیکی به عهده شرکت سازنده سپرده می‌شد. علت این کار نداشتن اطلاعات کافی در مورد عضو غیرسازه‌ای و قطعات تشکیل دهنده آن از سوی طراح سازه می-

[1] - Floor Response Spectra