

# بررسی خصوصیات دینامیکی ساختمانهای چند طبقه با استفاده از روش آزمایش ارتعاشی اجباری

موسی محمودی صاحبی  
دانشجوی کارشناسی ارشد

علی اکبر آقا کوچک  
استادیار

گروه عمران دانشکده مهندسی دانشگاه تربیت مدرس

## چکیده

خصوصیات دینامیکی یک ساختمان چند طبقه توسط روش آزمایش ارتعاش اجباری مورد مطالعه قرار گرفته است. این آزمایش با استفاده از یک دستگاه لرزاننده نصب شده بر روی ساختمان و اعمال نیروهای هارمونیک با فرکانس متغیر و رسم منحنیهای تشدید انجام شده است.

با انجام آزمایش در چند مرحله، فرکانسهای طبیعی ارتعاش، شکل مودهای ارتعاشی و مقادیر میرایی مودهای مختلف بدست آمده اند. مدل ساختمان مذکور با استفاده از روش المانهای محدود نیز تحلیل شده و نتایج حاصل با آزمایشات مقایسه گردیده اند که در مجموع موفقیت روش آزمایش را در اندازه گیری تجربی خصوصیات دینامیکی سازه نشان می دهند.

## Evaluation of Dynamic Characteristics of a Multistory Building Using Forced Vibration Tests

A.A. Aghakouchak  
Assistant Prof.

M. Mahmoodi Sahebi  
Graduate Student

Civil. Eng. Dept. Tarbiat Modares Univ.

### Abstract

*Dynamic characteristics of a typical multistory building have been studied using forced vibration tests. The tests have been carried out using a shaker installed on the building applying a harmonic force to it. Resonance curves have been obtained by varying the frequency of the harmonic force. By carrying out the tests in different stages, dynamic characteristics of the building i.e. natural frequencies of vibration, mode shapes and damping values have been determined. Mathematical model of the building using the finite element method has also been analyzed and the results have been compared to the experimental ones. The results show the success of the method in evaluation of these structural characteristics.*

خصوصیات سازه ها و ارزیابی رفتار آنها در مقابل زلزله یک ضرورت انکارناپذیر است. خصوصیات دینامیکی سازه ها که

۱- مقدمه  
امروزه با توجه به اهمیت مسأله زلزله در ایران، بررسی

پیرودهای طبیعی ارتعاش، شکل مودهای ارتعاشی و میزان میرایی از جمله مهمترین آنها هستند. نقش تعیین کننده‌ای در رفتار آنها در مقابل زلزله دارند. تعیین میزان نیروهای وارده بر ساختمان ناشی از زلزله و چگونگی توزیع آنها در سازه با استفاده از طیفهای طراحی از جمله موارد کاربرد خصوصیات مذکور می‌باشند.

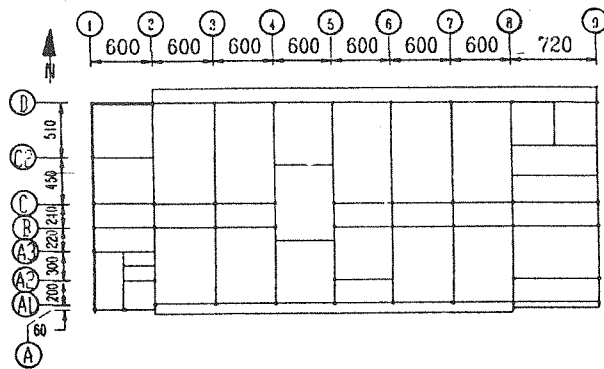
در حال حاضر برای بدست آوردن خصوصیات دینامیکی سازه‌ها در حرفه مهندسی سازه عمدتاً از روابط تجربی و یا مدل‌های ریاضی و نرم‌افزارهای کامپیوتری استفاده می‌شود. لیکن به دلیل وجود فرضیات ساده کننده در روشهای فوق، تقریبهایی وجود دارد و لذا انجام آزمایشات لرزه‌ای بر روی سازه‌های واقعی مطمئن‌ترین روش برای بدست آوردن خصوصیات مذکور بوده و تاکنون روشهای مختلفی در دنیا برای انجام این آزمایشات به کار گرفته شده است. با استفاده از این آزمایشات ضمن بررسی میزان دقت روشهای معمول می‌توان در مورد سازه‌های حیاتی و بسیار مهم نظیر سدها، نیروگاهها و ساختمانهای حساس، ارزیابی رفتار سازه را بر اطلاعات حاصله از این آزمایشات متکی نمود.

در گذشته از روشهای مختلفی برای انجام آزمایشات لرزه‌ای بر روی سازه‌های واقعی استفاده شده است که از آن جمله می‌توان به آزمایشهای ارتعاش آزاد<sup>۱</sup>، ارتعاش محیطی<sup>۲</sup> و ارتعاش اجباری<sup>۳</sup> [۱] اشاره کرد. آزمایش ارتعاش اجباری که اساس آن بر تحریک دینامیکی ساختمان توسط نیروهای اعمالی و ارزیابی عکس‌العمل آن می‌باشد به طرق مختلفی قابل انجام است. دقیق‌ترین این روشها استفاده از نیروهای متناوب هارمونیک با فرکانس متغیر و اندازه‌گیری عکس‌العمل سازه و رسم منحنیهای تشدید می‌باشد. نمونه‌هایی از انجام این آزمایشات بر روی سدها و ساختمانها گزارش شده‌اند [۱، ۲ و ۳]. در پروژه حاضر آزمایشات لرزه‌ای برای اولین بار در کشور بر روی یک ساختمان هفت طبقه فولادی انجام شده است. در بخشهای بعدی این مقاله ابتدا ساختمان مذکور و وسایل و روش انجام آزمایش تشریح شده و نتایج حاصله ارائه می‌گردد. سپس نتایج آزمایش با نتایج حاصل از تحلیل مدل ساختمان که با استفاده از روش المانهای محدود انجام شده است مقایسه می‌گردد.

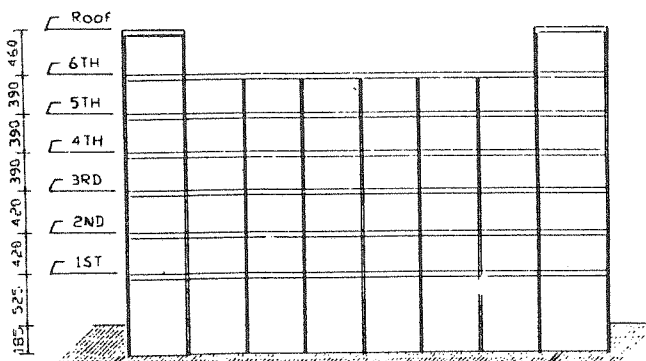
## ۲- شرح ساختمان

ساختمان مورد آزمایش، ساختمان دانشکده مهندسی عمران

دانشگاه صنعتی شریف با ابعاد کلی  $23/10 \times 49/20$  متر در پلان می‌باشد. این ساختمان دارای ۶ طبقه به انضمام دو نیم طبقه در بالای ساختمان بوده و ارتفاع کلی آن از تراز پی  $31/80$  متر و از سطح زمین مجاور حدود ۳۱ متر می‌باشد. شکل (۱) پلان و مقطع شرقی - غربی این ساختمان را نشان می‌دهد. این ساختمان دارای اسکلتی فولادی و قابهای با اتصالات ساده بوده و پایداری ساختمان در مقابل نیروهای جانبی توسط بادبندها تأمین می‌شود. ستونهای ساختمان از جفت مقاطع I شکل با تقوینتهای صفحه‌ای بوده و تیرهای اصلی نیز از مقاطع I شکل و در مورد دهانه‌های بزرگ نیز از خرپا تشکیل شده‌اند. بادبندهای ساختمان عمدتاً به صورت جفت نشبی و یا ناودانی بوده و موقعیت آنها در قابهای ساختمان در طبقات مختلف متغیر می‌باشد. کفها از نوع تیرچه بلوک بوده و تیرچه‌ها عمدتاً در جهت شرقی - غربی ساختمان قرار گرفته‌اند.

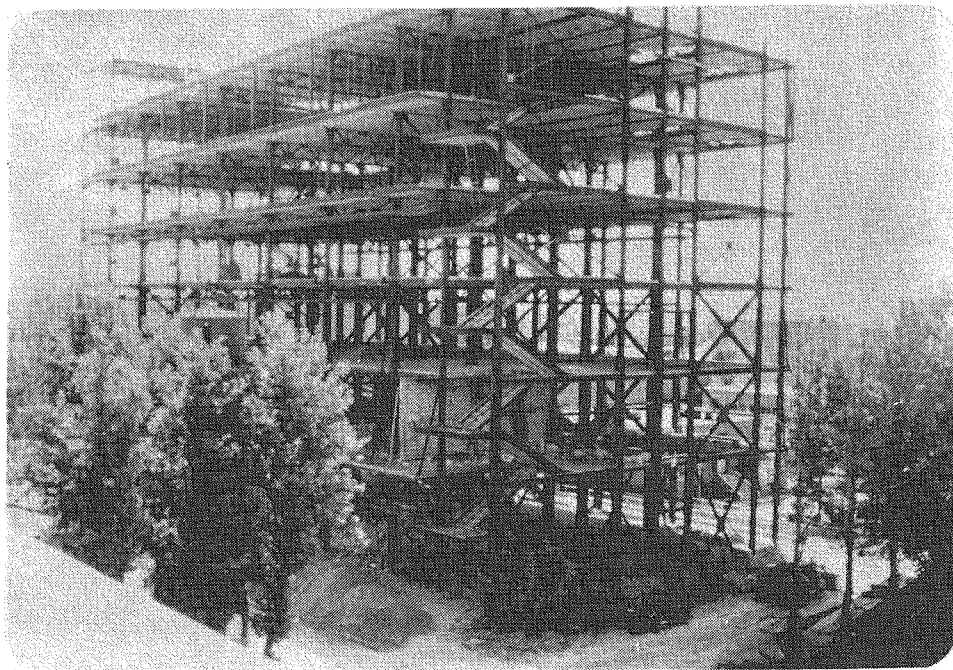


الف - پلان ساختمان



ب - مقطع شرقی - غربی ساختمان

شکل (۱) پلان و مقطع شرقی - غربی ساختمان مورد آزمایش



شکل (۲) تصویر ساختمان در مرحله تکمیل اسکلت و سقفها

که با دوران جرمها حول محور و تنظیم اختلاف فاز دوران محورهای مختلف، نیروهای هارمونیک در یکی از جهات افقی و یا قائم به پایه دستگاه و از آنجا به ساختمان وارد می‌شود. این دستگاه قادر است نیروهای هارمونیک را با فرکانسهای یک الی ۴۰ هر تری تولید نماید. دامنه نیروی هارمونیک تولید شده توسط دستگاه با میزان زاویه بین جرمهای خارج از مرکز و مجذور فرکانس دوران محورها رابطه مستقیم دارد. شکل (۳) تصویری از این دستگاه و جعبه کنترل آن را پس از نصب بر روی ساختمان نشان می‌دهد.

### ۳-۲- وسایل درک و ثبت ارتعاشات

برای درک ارتعاشات ساختمان در این پروژه از شتاب‌سنج<sup>۶</sup> FBA-11 نوع کینمتریکی<sup>۷</sup> استفاده شد. این دستگاه قادر است شتابهای وارده به هر نقطه را در یک جهت خاص درک نموده و توسط سیگنالهای خروجی به دستگاه نمایشگر و یا ثبات منتقل نماید. برای ثبت سیگنالهای خروجی از ثبات<sup>۸</sup> SSR-1 نوع کینمتریکی استفاده شد. ثبات مذکور قادر است سیگنالهای منتقل شده توسط شتاب‌سنج را به صورت همزمان و به

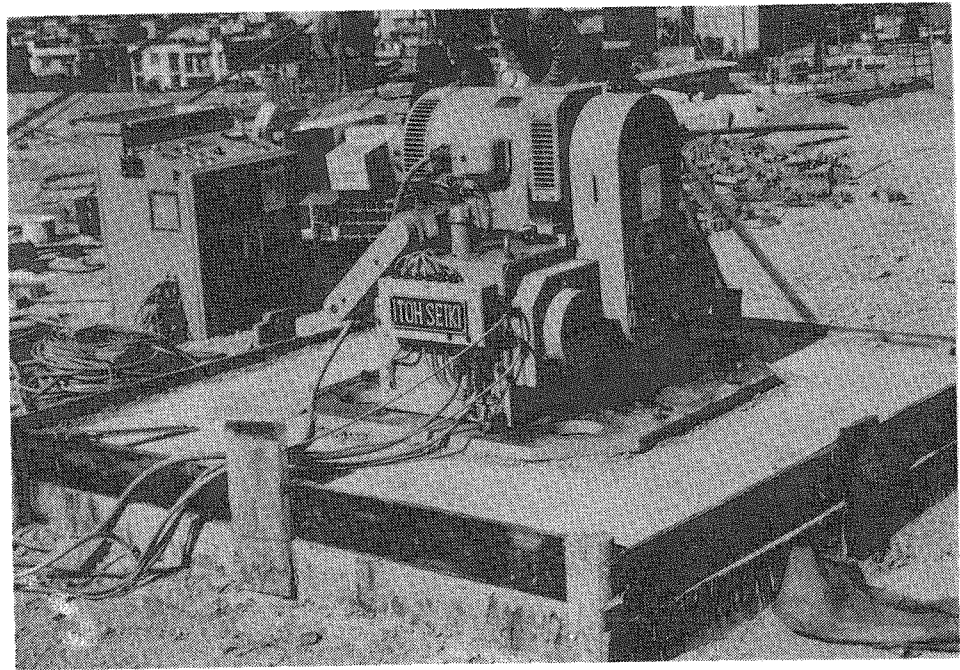
آزمایشات بر روی این ساختمان در زمانی انجام شد که اسکلت و سقفها و بخش کوچکی از دیوارهای جداکننده ساختمان اجرا شده بودند. شکل (۲) تصویری از این ساختمان را زمانی قبل از انجام آزمایشات که فقط اسکلت و کفها اجرا شده بودند نشان می‌دهد.

### ۳-۳- وسایل آزمایش

برای انجام آزمایشات از دستگاههای اعمال نیرو، درک و ثبت و نمایش ارتعاشات ساختمان استفاده شد که در زیر تشریح می‌گردند.

#### ۳-۱- دستگاه اعمال نیرو

این دستگاه که لرزاننده<sup>۴</sup> نام دارد وظیفه اعمال نیرو و تحریک ساختمان در جهت مورد نظر را به عهده دارد. دستگاه لرزاننده مورد استفاده در این آزمایش از نوع EX-250DI مدل ایتوسیکی<sup>۵</sup> بوده که قادر است نیروهای هارمونیک با حداکثر دامنه ۳۰۰۰ کیلوگرم نیرو را به ساختمان وارد نماید. این دستگاه دارای سه محور با جفت جرمهای خارج از مرکز است



شکل (۳) دستگاه لرزاننده و جعبه کنترل آن

لرزاننده بر روی این صفحه نصب گردید. موقعیت دستگاه لرزاننده در تمامی مراحل آزمایشات ثابت بود ولیکن با چرخاندن دستگاه بر روی پایه امکان اعمال نیرو در جهات شمالی - جنوبی و یا شرقی - غربی ساختمان فراهم می‌آمد. آزمایش در پنج مرحله با اهداف خاص به شرح زیر انجام شد.

#### ۱-۴- مرحله مقدماتی

این مرحله آزمایش با هدف کالیبره کردن شتاب‌سنجها صورت گرفت. در این مرحله ۵ شتاب‌سنج مورد استفاده در آزمایش در کنار یکدیگر در حوالی مرکز ساختمان بر روی سقف طبقه ششم قرار گرفته و به صورت همزمان ارتعاشات را اندازه‌گیری کردند. شکل (۴-الف) آرایش شتاب‌سنجها را در این مرحله نشان می‌دهد.

#### ۲-۴- مرحله اول

این مرحله از آزمایش به هدف تعیین فرکانس‌های طبیعی ارتعاش ساختمان انجام گرفت. در این مرحله ۵ شتاب‌سنج مطابق شکل (۴-ب) بر روی سقف طبقه ششم قرار گرفتند و دستگاه

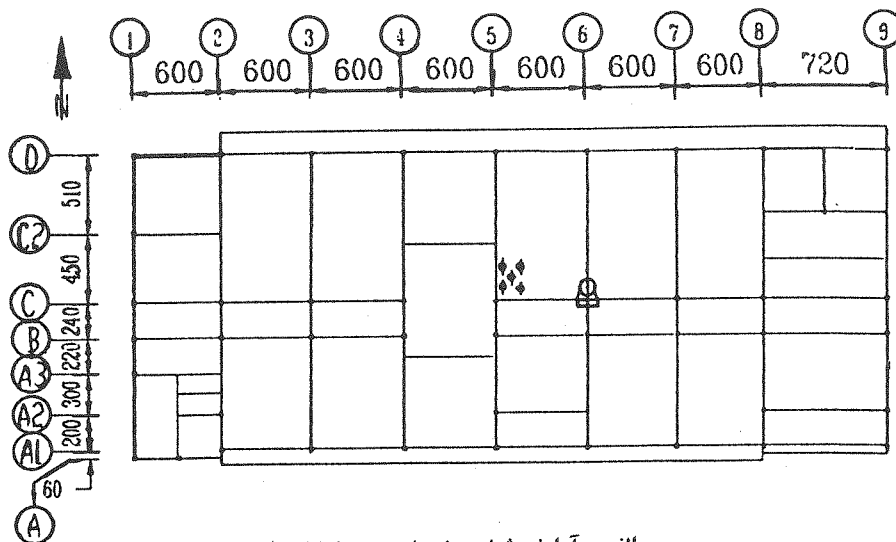
صورت رقمی ثبت نماید. نرخ نمونه‌برداری در این آزمایش ۲۰۰ نمونه در ثانیه بود.

#### ۳-۳- دستگاه نمایش ارتعاشات

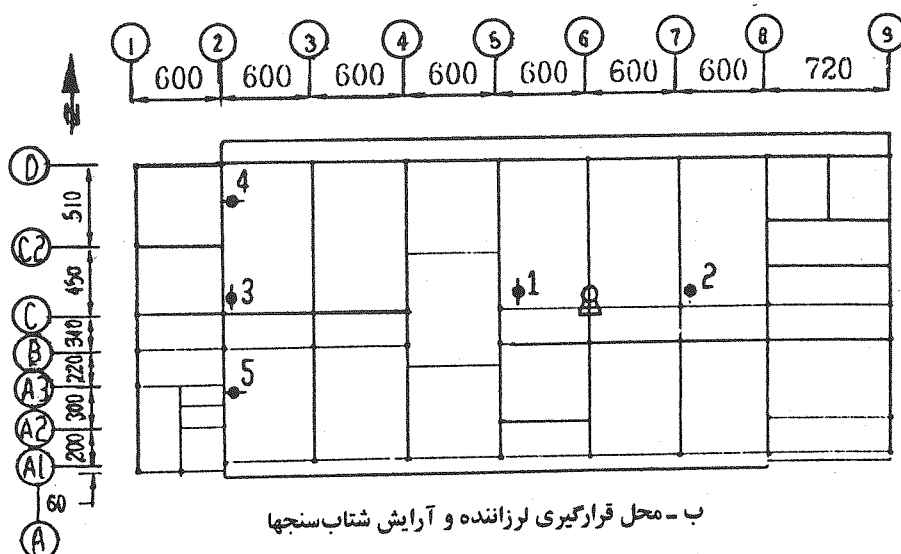
به منظور نمایش ارتعاشات ساختمان و سیگنالهای دریافتی از شتاب‌سنجها از یک کامپیوتر PC486 مجهز به کارت پردازنده سیگنال DP420 استفاده شد. این دستگاه دارای دو کانال ورودی است که با استفاده از آن امکان مشاهده سیگنالهای بار دستگاه لرزاننده و یک شتاب‌سنج Solid State نصب شده بر روی پایه دستگاه فراهم می‌آمد. با استفاده از این دستگاه تشخیص زمان رسیدن ارتعاشات ساختمان به حالت پایدار تسهیل می‌شد.

#### ۴- روش انجام آزمایش

مقدمات انجام آزمایشات از اوایل سال ۱۳۷۱ با حمایت مالی و تجهیزاتی موسسه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله و با همکاری دانشگاه صنعتی شریف فراهم شده و آزمایشات در آبان سال ۱۳۷۱ انجام پذیرفتند. پی دستگاه لرزاننده در موقع ساخت سقف طبقه ششم طراحی و اجرا شده بود. برای انجام آزمایش ابتدا صفحه پایه دستگاه بر روی پی و سپس دستگاه



الف - آرایش شتاب‌سنجها در مرحله کالیبراسیون



ب - محل قرارگیری لرزاننده و آرایش شتاب‌سنجها

شکل (۴) آرایش شتاب‌سنجها بر روی سقف طبقه ششم در مراحل کالیبراسیون اول و دوم

فرکانسهای طبیعی ارتعاش ساختمان انجام شد ولیکن در این مرحله با چرخاندن دستگاه لرزاننده بر روی صفحه پایه، جهت اعمال نیرو و در جهت شرقی - غربی بود. آرایش شتاب‌سنجها در این مرحله مشابه مرحله اول بود و لذا با استفاده از شتابهای حاصل از شتاب‌سنجهای ۴ و ۵ خصوصیات دینامیکی ساختمان برای تغییر فرمهای جانبی جهت شرقی - غربی مورد مطالعه قرار گرفت.

#### ۴-۴- مرحله سوم

این مرحله از آزمایش به منظور تعیین شکل مودهای تغییر فرم جانبی ساختمان در جهت شمالی - جنوبی انجام شد.

لرزاننده در جهت شمال - جنوب به ساختمان اعمال نیرو می‌کرد. فرکانس بار اعمالی در این مرحله از ۰/۵ تا ۱۲ هرتر متغیر بود. با استفاده از مقادیر حاصله از شتاب‌سنجهای ۱ و ۲ به تنهایی و یا با استفاده از مقادیر میانگین آنها خصوصیات دینامیکی ساختمان برای تغییر فرمهای جانبی در جهت شمالی - جنوبی و با استفاده از تفاوت مقادیر حاصله از شتاب‌سنجهای موازی ۱ و ۲ و یا ۴ و ۵ تغییر فرمهای پیشینی ساختمان مورد مطالعه قرار گرفت.

#### ۴-۳- مرحله دوم

آزمایشات این مرحله نیز مشابه مرحله اول جهت تعیین

ساختمان به صورت سینوسی و با فرکانسی تقریباً برابر با فرکانس نیروی اعمالی بدست آمد. اختلاف مابین فرکانس بار اعمالی و فرکانس ارتعاشات حاصل در ساختمان حدود ۰/۰۵ هرتز بود که در حد حساسیت دستگاه لرزاننده قرار داشت. شکل (۶) نمونه‌ای از منحنی شتاب بدست آمده از یکی از آزمایشات و طیف فوریه آن را نشان می‌دهد.

در هر مرحله از آزمایشات با ثابت نگاه داشتن زاویه بین جرمهای غیر بالانس دستگاه لرزاننده، فرکانس بارهای اعمالی در حدود بین ۰/۵ الی ۱۲ هرتز تغییر داده می‌شد و برای هر فرکانس عکس‌العمل ساختمان استنتاج می‌شد. از آنجا که برای یک ارتعاش هارمونیک دامنه تغییرات شتاب متناسب با دامنه تغییرات تغییر مکان و مجذور فرکانس ارتعاش بوده و همچنانکه قبلاً گفته شد به علت مکانیزم خاص دستگاه لرزاننده دامنه نیروهای اعمالی نیز متناسب با مجذور فرکانس بود، با تقسیم خروجی شتاب‌سنجها بر توان چهارم فرکانس منحنی تغییرات دامنه تغییر مکان بر حسب فرکانس برای نیروی هارمونیک با دامنه ثابت برای هر شتاب‌سنج در هر مرحله از آزمایش بدست آمد. شکل (۷) نمونه‌ای از این منحنیها را برای حالتی که جهت اعمال نیرو و اندازه‌گیری شتاب در جهت شمالی - جنوبی بوده است نشان می‌دهد که منحنی تشدید<sup>۹</sup> نامیده می‌شود.

در این منحنی پیک‌هایی مشاهده می‌شوند که براساس تئوریهای دینامیک سازه‌ها [۴] بیانگر پدیده تشدید در ساختمان

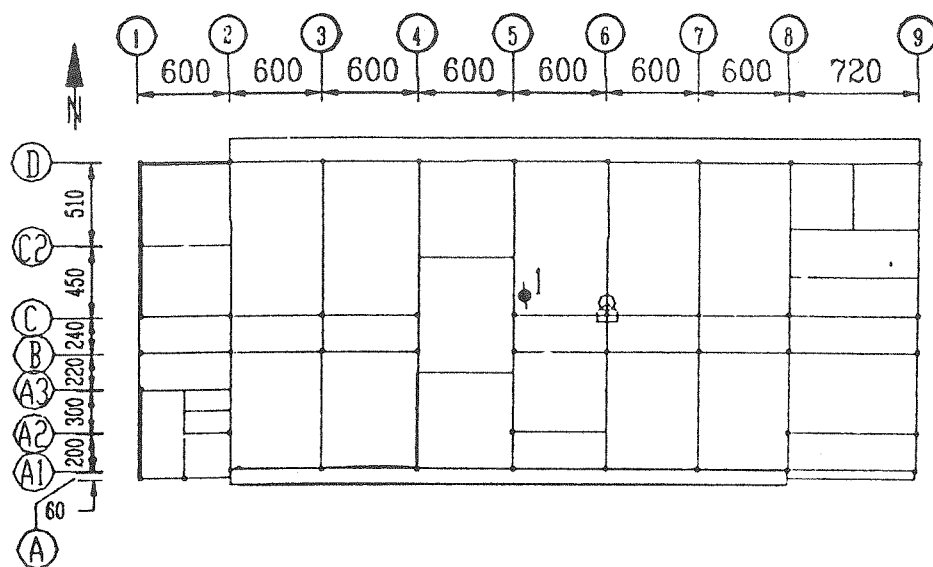
بدین منظور پنج شتاب‌سنج در ۵ طبقه مختلف ساختمان در حوالی مرکز سطح طبقه مطابق شکل (۵) قرار گرفتند. شتاب‌سنجهای مذکور بر روی سقف‌های طبقات ششم، پنجم، سوم، دوم و اول قرار داشتند. در این مرحله جهت اعمال نیرو و اندازه‌گیری شتابها همه در جهت شمالی - جنوبی بوده و با استفاده از نسبت مقادیر حاصله از شتابها و اختلاف فاز بین منحنیهای شتاب طبقات مختلف شکل مودها قابل استنتاج بودند.

#### ۵-۴ مرحله چهارم

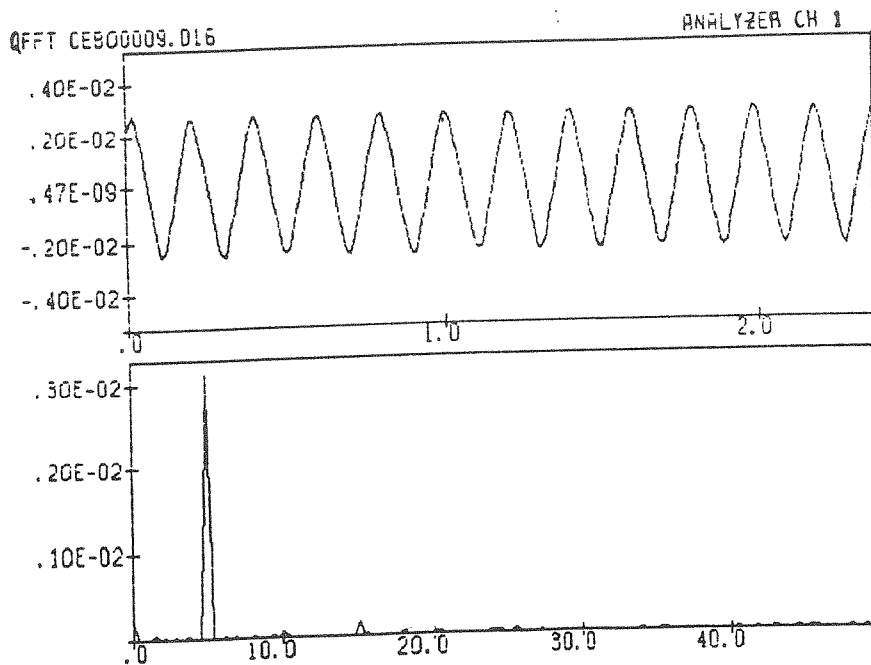
در این مرحله از آزمایشات به منظور تعیین شکل مودهای تغییر فرم‌جانبی ساختمان در جهت شرقی - غربی جهت اعمال نیرو و اندازه‌گیری شتاب به جهت شرقی - غربی تغییر یافته و مشابه مرحله سوم آزمایشات انجام شد.

#### ۵-۵ پردازش داده‌ها

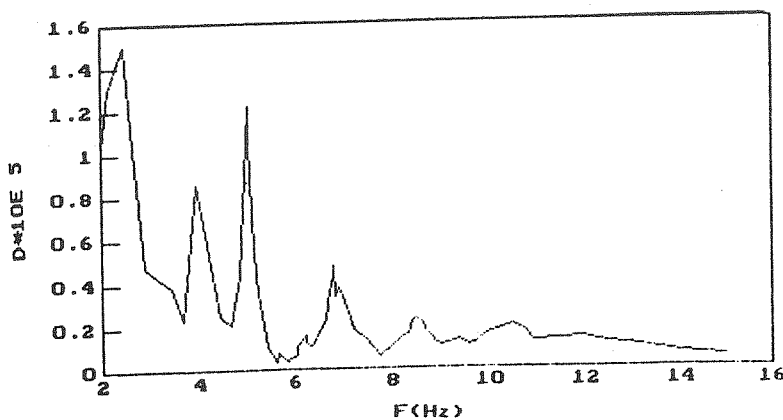
داده‌های آزمایش پس از ثبت بر روی ثبات‌ها، با نرم‌افزارهای مخصوص به کامپیوترهای PC منتقل شده و سپس در هر آزمایش منحنی تغییرات شتاب بر حسب زمان برای هر شتاب‌سنج استخراج گردید. به دلیل اعمال نیرو به صورت سینوسی و با دامنه ثابت به غیر از مواردی که دامنه نیرو بسیار کم بوده و ارتعاشات محیطی ساختمان بر روی عکس‌العمل اثر قابل ملاحظه‌ای داشت، در سایر موارد عکس‌العمل حالت پایدار



شکل (۵) آرایش شتاب‌سنجها بر روی سقف طبقات مختلف ساختمان در مرحله سوم



شکل (۶) منحنی تغییرات شتاب بر حسب زمان و طیف دامنه فوریه آن



شکل (۷) نمونه‌ای از منحنی تشدید ساختمان برای تحریک در جهت شمالی - جنوبی

شتاب سنجها و در فرکانسهای مربوط به مودهای تغییر فرم جانبی بدست آوردن شکل مودهای جانبی ساختمان نسبت دامنه مقادیر متناسب با تغییر مکان طبقات مختلف در فرکانس تشدید مربوطه محاسبه گردیدند. به علت محدودیت تعداد شتاب سنجها و ثباتها امکان اندازه گیری شکل مودهای پیچشی ساختمان در این پروژه فراهم نبود. برای محاسبه مقادیر میرایی از روش پهنای نوار<sup>۱۴</sup> و منحنیهای تشدید بدست آمده از آزمایشات استفاده شد [۴].

و لذا مشخص کننده یکی از فرکانسهای طبیعی ارتعاش می باشند. از آنجا که جهت اعمال نیرو و اندازه گیری شتاب در این حالت شمال - جنوب بوده است هر یک از فرکانسهای مذکور متعلق به یکی از مودهای تغییر فرم جانبی شمالی - جنوبی و یا تغییر فرم پیچش می باشند. برای تفکیک مودهای تغییر فرم جانبی و پیچشی از یکدیگر از جمع و تفریق شتابهای حاصل از شتاب سنجهای طرفین مرکز ساختمان استفاده شد. در فرکانسهایی که مربوط به مودهای پیچشی بود تفاوت مقادیر حاصل از این

## عـنـتـایـج حـاصـل از آزمايشات

با استفاده از نتایج پردازش داده‌های آزمایشات ۶ مود شمالی - جنوبی و ۶ مود شرقی - غربی و ۴ مود پیچشی ساختمان شناسایی گردید. مقادیر فرکانسهای طبیعی ارتعاش مودهای مذکور در جداول (۱) الی (۳) آمده‌اند. شکل مودهای ارتعاشی اول تا چهارم در هر یک از جهات اصلی ساختمان در اشکال (۸) الی (۱۵) آمده‌اند. در این اشکال

به دلیل عدم وجود شتاب‌سنج در طبقه چهارم ساختمان اندازه‌تغییر فرم این طبقه با درون‌یابی مقادیر طبقات بالا و پایین بدست آمده‌اند.

مقادیر بدست آمده در خصوص میرایی مودهای مختلف ارتعاشی بر حسب درصدی از میرایی بحرانی در جداول (۴) الی (۶) آمده‌اند.

جدول (۳) مقادیر فرکانسهای طبیعی ارتعاش برای جهت پیچشی

Mode Number	Measured Hz	Computed Hz
1	1.16	1.33
2	2.53	3.77
3	3.50	5.28
4	5.23	8.01

جدول (۴) مقادیر میرایی ساختمان در جهت شمالی - جنوبی

Mode Number	1	2	3	4	5	6
Damping (Critical %)	9.65	5	3	2.5	2.5	6

جدول (۵) مقادیر میرایی ساختمان در جهت شرقی - غربی

Mode Number	1	2	3	4	5	6
Damping (Critical %)	11	—	6	6	—	4

جدول (۶) مقادیر میرایی ساختمان در جهت پیچشی

Mode Number	1	2	3	4
Damping (Critical %)	5	6	6	4.5

جدول (۱) مقادیر فرکانسهای طبیعی ارتعاش برای جهت شمالی - جنوبی

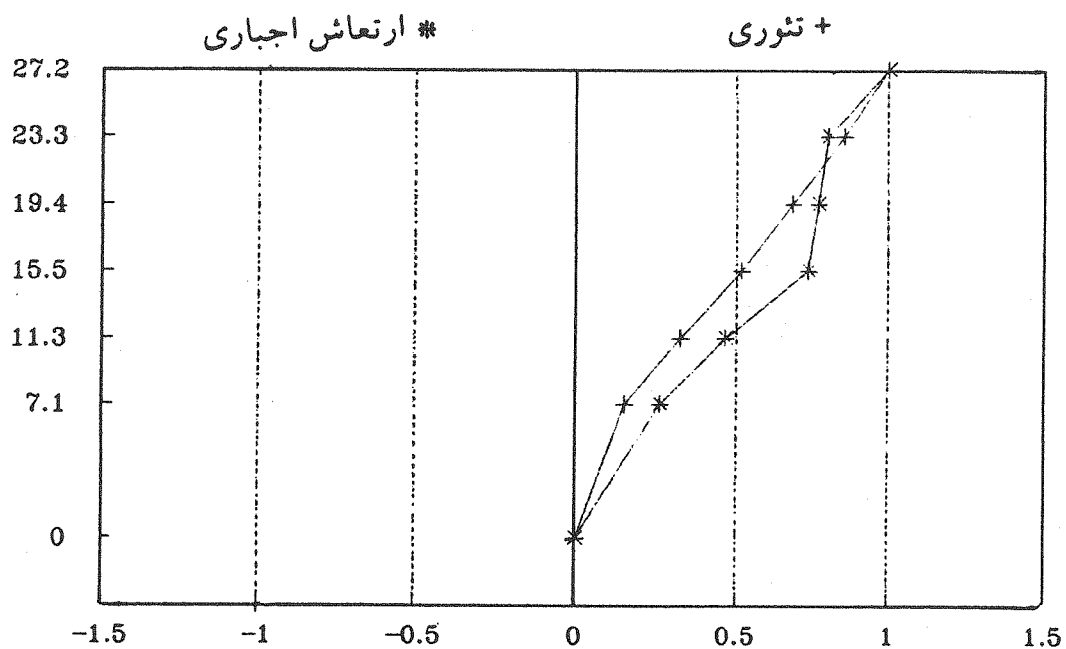
Mode Number	Measured Hz	Computed Hz
1	1.32	1.18
2	3.96	3.25
3	5.04	4.60
4	6.82	6.82
5	8.45	—
6	10.32	—

جدول (۲) مقادیر فرکانسهای طبیعی ارتعاش برای جهت شرقی - غربی

Mode Number	Measured Hz	Computed Hz
1	1.41	1.24
2	4.08	2.94
3	5.04	5.65
4	6.89	6.43
5	8.56	—
6	10.53	—

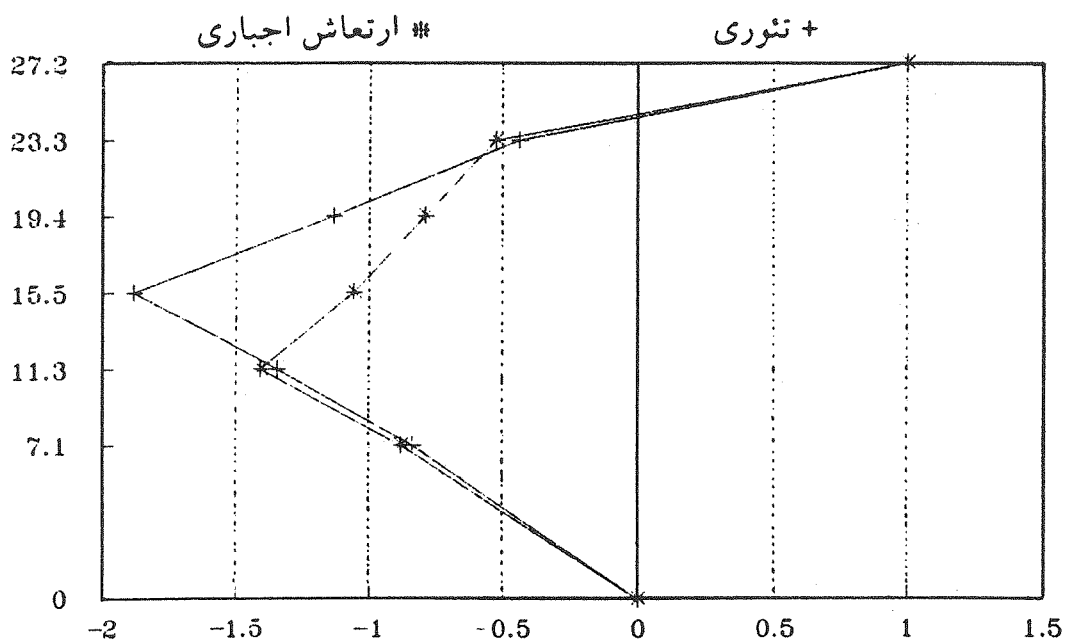


MODE NO.1 (N-S)



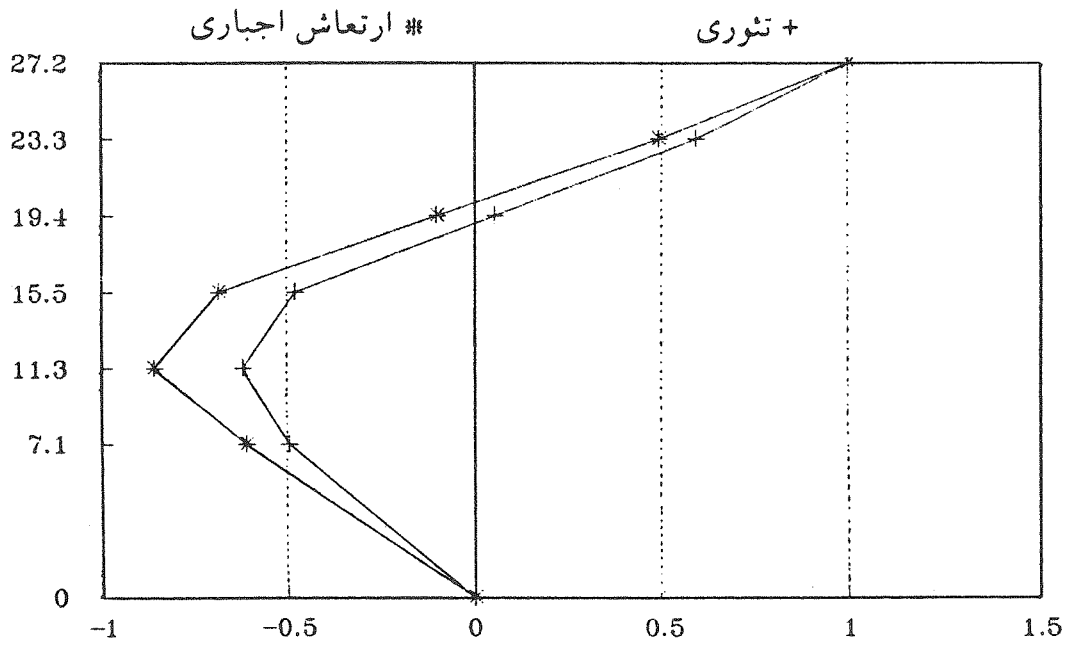
شکل (۸) مود اول ارتعاشی ساختمان در جهت شمالی - جنوبی

MODE NO.2 (N-S)



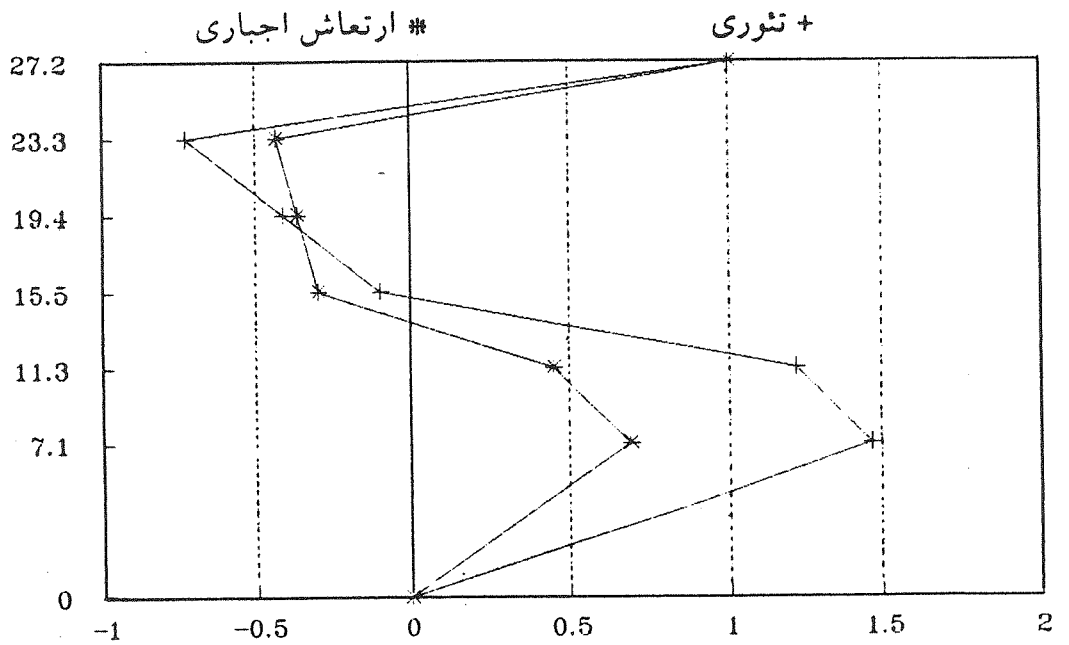
شکل (۹) مود دوم ارتعاشی ساختمان در جهت شمالی - جنوبی

MODE NO.3 (N-S)



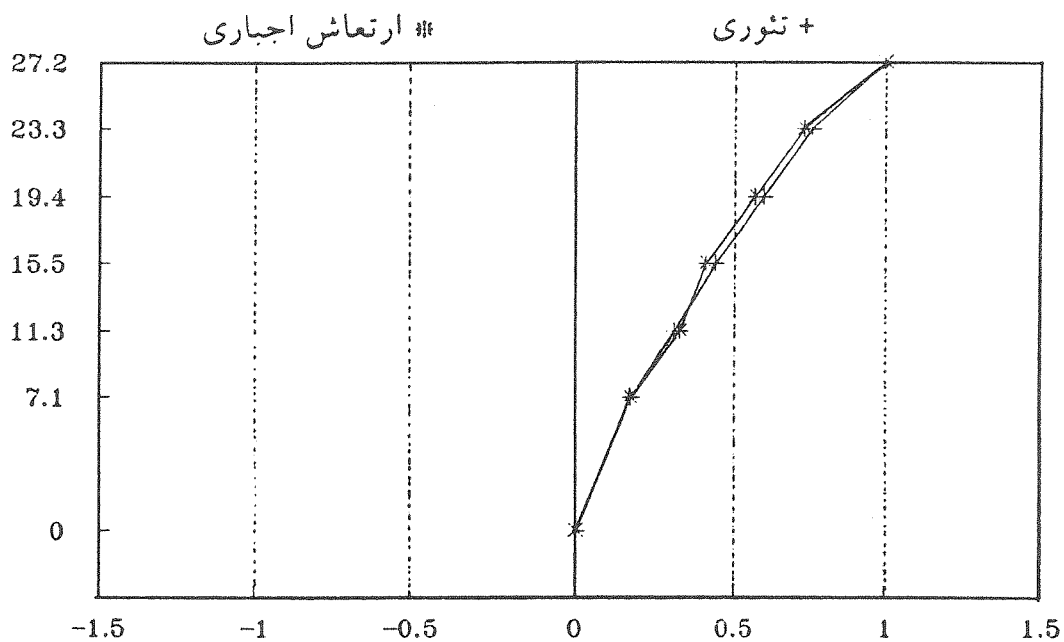
شکل (۱۰) مود سوم ارتعاشی ساختمان در جهت شمالی - جنوبی

MODE NO.4 (N-S)



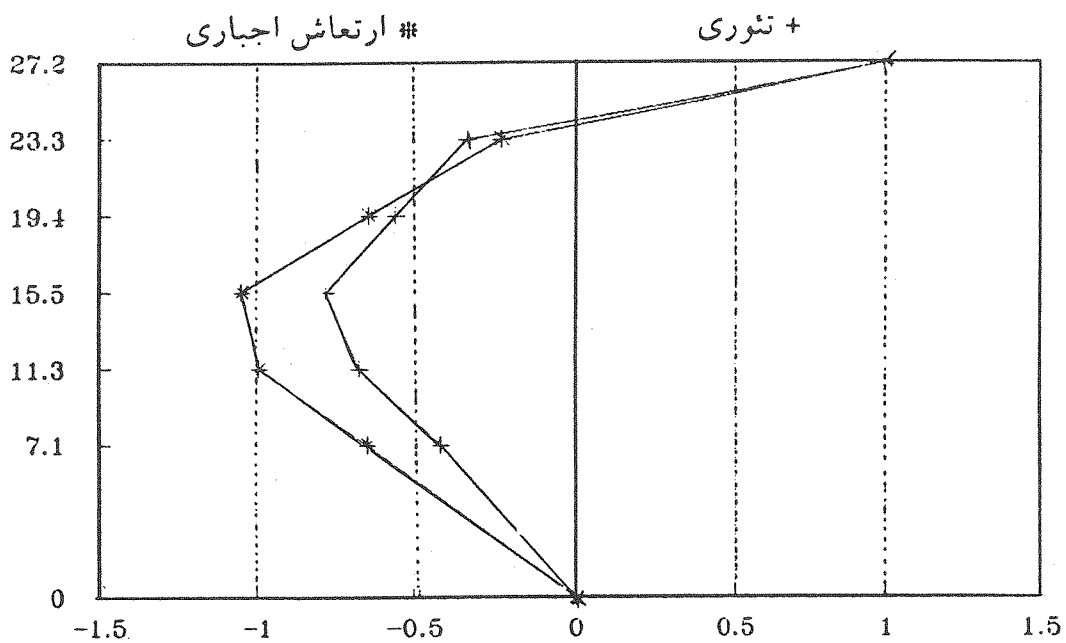
شکل (۱۱) مود چهارم ارتعاشی ساختمان در جهت شمالی - جنوبی

MODE NO.1 (E-W)



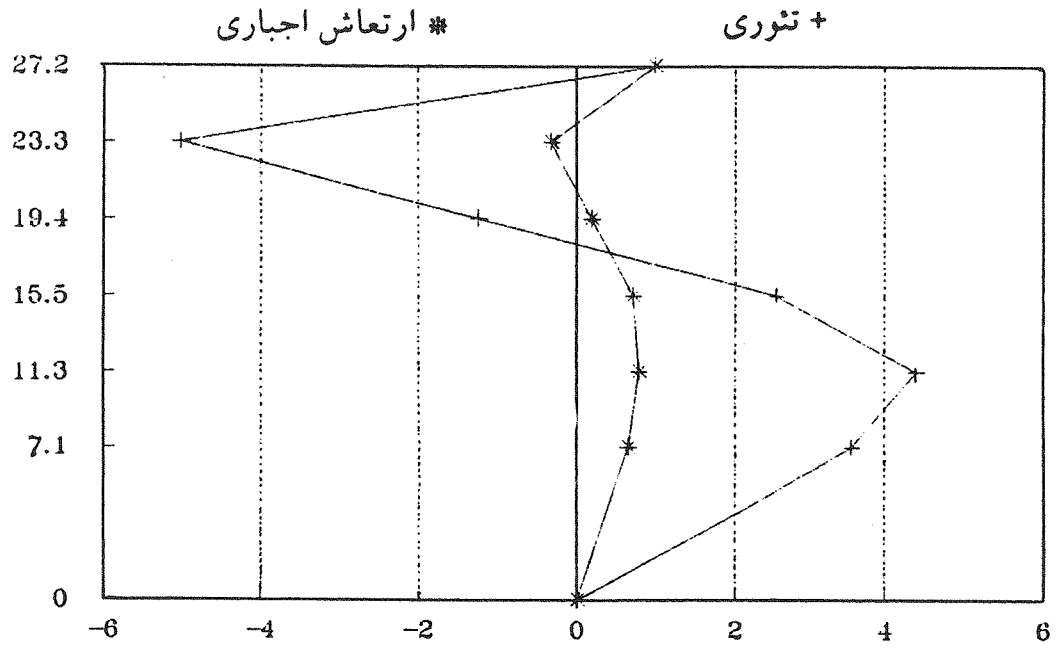
شکل (۱۲) مود اول ارتعاشی ساختمان در جهت شرقی - غربی

MODE NO.2 (E-W)



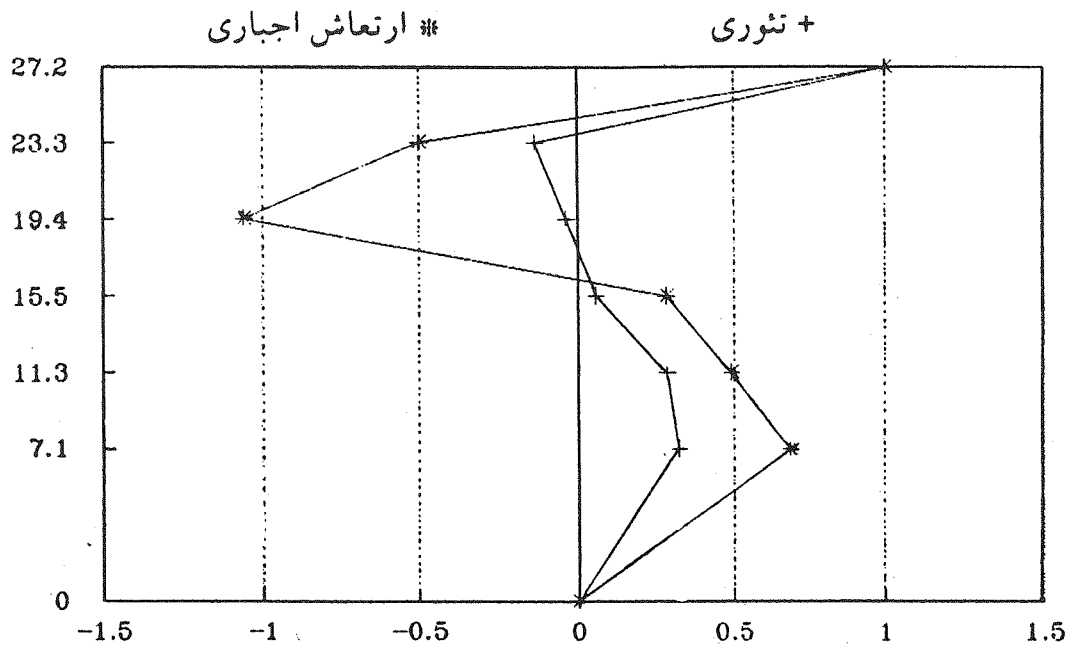
شکل (۱۳) مود دوم ارتعاشی ساختمان در جهت شرقی - غربی

MODE NO.3 (E-W)



شکل (۱۴) مود سوم ارتعاشی ساختمان در جهت شرقی - غربی

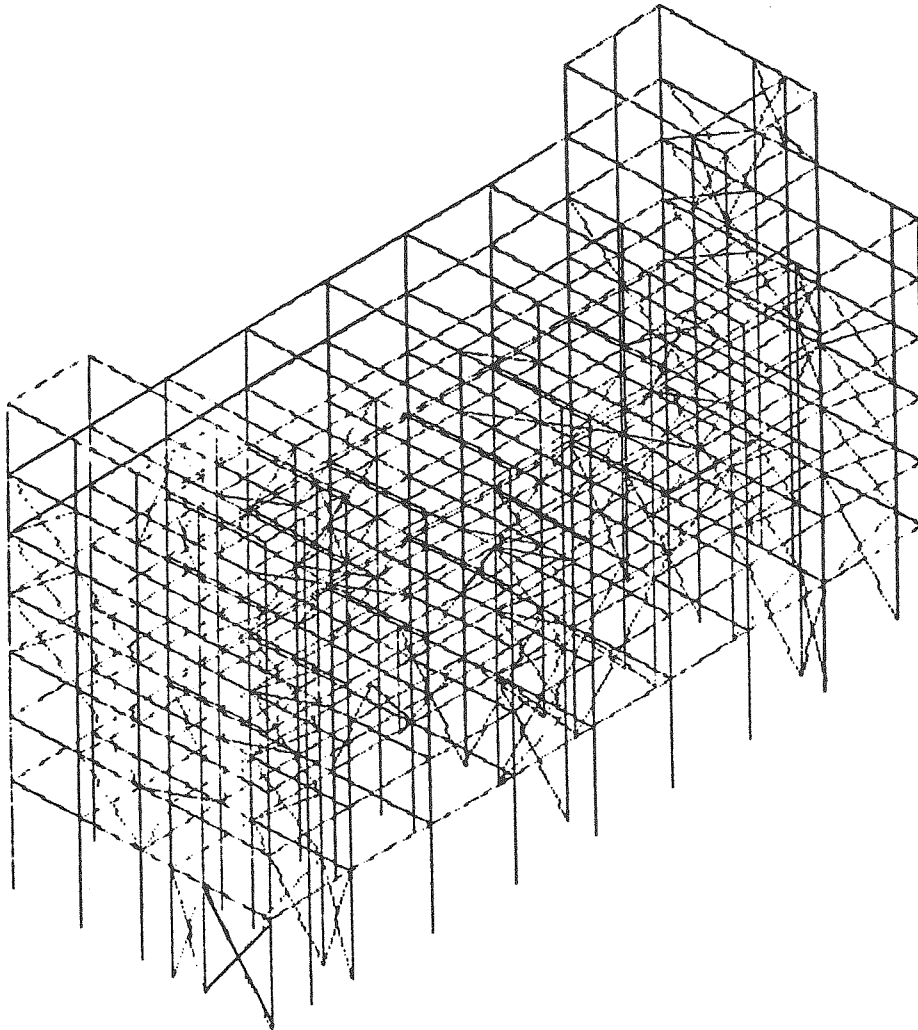
MODE NO.4 (E-W)



شکل (۱۵) مود چهارم ارتعاشی ساختمان در جهت شرقی - غربی

## ۷- تحلیل مدل ریاضی ساختمان

به منظور مقایسه نتایج حاصل از آزمایشات با نتایج تحلیلی، مدل ریاضی این ساختمان با استفاده از روش المانهای محدود و نرم افزار کامپیوتری تهیه شده و مورد تحلیل قرار گرفت. این مدل در شکل (۱۶) نشان داده شده است. در این مدل کفها صلب فرض شده و لذا برای هر طبقه سه درجه آزادی در نظر گرفته شده است که دو درجه آزادی متعلق به تغییر شکلهای ساختمان در جهات جانبی و یک درجه آزادی متعلق به پیچش حول محور قائم می باشد. با استفاده از این مدل فرکانسهای طبیعی ارتعاش و شکل مودهای ارتعاشی این ساختمان محاسبه شده اند. نتایج مذکور به همراه نتایج حاصل از آزمایشات در جداول (۱) الی (۳) و اشکال (۸) الی (۱۵) آمده اند.



شکل (۱۶) مدل المانهای محدود ساختمان جهت استفاده در تحلیل

## ۸- نتیجه گیری

مقایسه نتایج حاصل از آزمایشات و تحلیل ریاضی نشان می دهد که نتایج آزمایشات روند مورد انتظار را داشته و فرکانسهای طبیعی ارتعاش بدست آمده از دو روش توافق خوبی با یکدیگر دارند. در خصوص اشکال مودهای ارتعاشی نیز توافق کلی وجود دارد لیکن در دو مود اول این توافق بسیار رضایتبخش است. البته لازم به ذکر است که در ادامه این تحقیق، آزمایشات دیگر و تحلیل های ریاضی دیگری نیز انجام شده است [۵] و نتایج آنها نشان می دهد در حالتی که ساختمان تکمیل شده باشد اختلافاتی بین نتایج آزمایش و تحلیل مشاهده می شود که عمدتاً ناشی از فرضیات ساده کننده در تحلیل مدل ریاضی بوده و تأکیدی بر ضرورت انجام آزمایشات برای دستیابی به نتایج قابل اطمینان می باشد.

## ۹- قدردانی

این پروژه در چهارچوب یک پروژه تحقیقاتی و با استفاده از امکانات مؤسسه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله انجام پذیرفته است که بدینوسیله از مؤسسه مذکور تشکر و قدردانی می‌گردد.

در مجموع این تحقیق ضمن تبیین روش انجام آزمایشات ارتعاش اجباری، موفقیت این روش را در تعیین خواص دینامیکی سازه‌ها نشان می‌دهد. با استفاده از این روش می‌توان خواص مذکور در سازه‌های پیچیده را مورد بررسی قرار داده و به ارزیابی رفتار دینامیکی آنها تحت اثر بارگذاریهای مختلف پرداخت.

## پانویس

1- Free Vibration

2- Ambient Vibration

3- Forced Vibration

4- Shaker

5- Itohseiki

6- Accelerometer

7- Kinematics

8- Recorder

9- Resonance Curve

10- Band Width Method -

## مراجع

[1] Hudson, D.E. "Dynamic tests of full - scale structures", chapter 7, Earthquake Engineering, Edited by R.L. Wiegel, Prentice - Hall, 1970.

[2] Foutch, D.A. "A study of the vibrational characteristics of two multistory buildings", Ph.D. thesis, California Institute of Technology, 1977.

[3] Housner, G.W. "Selected earthquake engineering

papes of G.W. Housner", Chapter 8, ASCE, 1990.

[4] Clough, R.W. and Penzien J. "Dynamics of structures" Mc Graw - Hill, 1975.

[5] Aghakouchak, A.A. "Forced and ambient vibration tests on real buildings", Report No. 72-94-2, International Institute of Earthquake Engineering and seismology, 1994.