



دانشکده فنی و مهندسی

گروه عمران

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران گرایش سازه

عنوان:

اثرات میراگر جرم فعال (AMD) بر روی سازه‌های بتنی

استاد راهنما:

دکتر محمد شوشتری

پژوهشگر:

رضا یارعلی

۱ مهر ماه ۱۳۹۲



دانشگاه بوعلی سینا
مشخصات رساله/پایان نامه تحصیلی

عنوان:

اثرات میراگر جرم فعال (AMD) بر روی سازه‌های بتنی

نام نویسنده: رضا یارعلی

نام استاد/اساتید راهنما: محمد شوشتری

دانشکده: مهندسی

گروه آموزشی: عمران

رشته تحصیلی: مهندسی عمران

گرایش تحصیلی: سازه

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد

تاریخ تصویب: ۹۰/۰۹/۲۱

تاریخ دفاع: ۱۳۹۲/۰۷/۰۱

تعداد صفحات: ۱۰۱

چکیده:

کنترل فعال سازه‌ها در دو دهه اخیر توجه بسیاری از محققان رشته سازه و زلزله را به خود اختصاص داده است لذا تحقیقات بعمل آمده الگوریتم‌های متعددی برای محاسبه پاسخ سازه و نیروهای کنترل اعمالی به سازه را در اختیار ما قرار می‌دهند. یکی از روش‌های کنترل فعال موسوم به AMD (میراگر جرم فعال) است که بر پایه استهلاک انرژی توسط جرم اضافی و فنر تعبیه شده در سازه و نیروی وارد بر جرم اضافی عمل می‌کند. سیستم AMD جز سیستم‌های هوشمند در کنترل ارتعاشات سازه است اما میزان تأثیر آن در کاهش پاسخ سازه نسبت به سیستم غیر فعال بسیار بیشتر است.

در این پایان‌نامه عملکرد میراگر جرم فعال و سیستم غیر فعال TMD (میراگر جرم هماهنگ شده) مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجا که تفاوت دو سیستم AMD و TMD در وجود نیروی کنترل است مقایسه پاسخ سازه در این دو سیستم ما را برای انتخاب سیستم با عملکرد بهتر و اقتصادی تر کمک می‌کند. در تحقیق آماده شده سختی میراگر متغیر در نظر گرفته شده است و پاسخ سازه توسط معادلات فضای حالت در حوزه آنالیز غیر خطی برای قاب‌های مسطح بتنی بدست می‌آید. نیروی کنترل وارده نیز توسط معادلات مدار بسته بهینه محاسبه می‌گردد. لازم به ذکر است که محاسبات در برنامه متلب (MATLAB) آماده شده و برای هر قاب بتنی دو بعدی قابل اجراست.

در ادامه نمودارهای پاسخ سازه برای سه قاب ۲ و ۴ و ۸ طبقه در هر سه حالت بدون حضور سیستم کنترل، با سیستم AMD و با سیستم TMD ترسیم شده و با هم مقایسه خواهند شد. با داشتن نسبت کم شدن جابجایی در سیستم AMD در بازه‌های زمانی مختلف نسبت به سیستم TMD و محاسبه نیروی مورد نیاز جک‌ها می‌توان فهمید استفاده از سیستم های AMD در سازه‌های بلند تأثیر بسیار زیادی بر کاهش جابجایی دارد. بدین ترتیب که جابجایی حداکثر سازه ۸ طبقه مجهز به سیستم AMD حدود ۳۲ درصد نسبت به سازه معمولی و ۲۰ درصد نسبت به سازه با سیستم TMD کاهش می‌یابد. همچنین جابجایی نسبی حداکثر نیز در حدود ۱۶ درصد نسبت به سازه با سیستم TMD کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: میراگر، AMD، TMD، نیروی کنترل، سازه بتنی

کلیه امتیازهای این پایان‌نامه به دانشگاه بوعلی سینا تعلق دارد. در صورت استفاده از تمام یا بخشی از مطالب این پایان‌نامه در مجلات، کنفرانس‌ها و یا سخنرانی‌ها، باید نام دانشگاه بوعلی سینا یا استاد راهنمای پایان‌نامه و نام دانشجو با ذکر مأخذ و ضمن کسب مجوز کتبی از دفتر تحصیلات تکمیلی دانشگاه ثبت شود. در غیر این صورت مورد پیگرد قانونی قرار خواهد گرفت. درج آدرس‌های ذیل در کلیه مقالات خارجی و داخلی مستخرج از تمام یا بخشی از مطالب این پایان‌نامه در مجلات، کنفرانس‌ها و یا سخنرانی‌ها الزامی می‌باشد.

....., Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

مقاله خارجی

..... گروه دانشکده دانشگاه بوعلی سینا، همدان.

مقاله داخلی

فهرست مطالب

فصل اول : کلیات

۱-۱	مقدمه	۲
۲-۱	مفهوم کنترل ارتعاش در سازه‌ها	۳
۳-۱	طبقه بندی روش‌های کنترل بر اساس دینامیک سازه‌ها	۴
۳-۱-۱	روش‌های کنترل مبتنی بر تغییر و تنظیم خواص دینامیکی	۴
۳-۱-۲	روش‌های کنترل مبتنی بر تغییر و تنظیم میرایی	۵
۴-۱	طبقه بندی روش‌های کنترل بر اساس نحوه عملکرد سیستم	۵
۴-۱-۱	روش‌های کنترل غیرفعال	۵
۴-۱-۲	روش‌های کنترل فعال	۶
۴-۱-۳	روش‌های کنترل ترکیبی یا مختلط	۷
۴-۱-۴	روش‌های کنترل نیمه فعال	۸
۵-۱	لازمه تحقیق	۹
۶-۱	لازمه تحقیق در ایران	۱۰
۷-۱	روش انجام تحقیق	۱۰

فصل دوم : مقدمه‌ای بر روش‌های کنترل ارتعاشات

۱-۲	مقدمه	۱۲
۲-۲	کنترل ارتعاشات	۱۲
۳-۲	طبقه بندی سیستم‌های کنترل	۱۳
۳-۲-۱	سیستم کنترل غیر فعال	۱۳
۳-۲-۲	سیستم کنترل فعال	۱۴
۳-۲-۳	سیستم کنترل مرکب	۱۵
۳-۲-۴	سیستم کنترل نیمه فعال	۱۶

۱۹	.....	میراگر جرمی تنظیم شده : (TDM)	۴-۲
۲۲	.....	معادلات بدست آمده برای سیستم TMD	۱-۴-۲
۲۳	.....	عملکرد سیستم TMD	۲-۴-۲
۲۴	.....	سیستم میراگر جرم فعال (AMD)	۵-۲
۲۵	.....	معادلات بدست آمده برای سیستم AMD	۱-۵-۲
۲۷	.....	عملکرد سیستم AMD	۲-۵-۲
۲۷	.....	آنالیز سازه‌های کنترل شده در حوزه غیر خطی	۶-۲
۲۷	.....	چرخه هیستریزیس	۱-۶-۲

فصل سوم : مکانیزم‌های کنترل ارتعاشات

۳۰	.....	مقدمه	۱-۳
۳۰	.....	جداساز پایه	۲-۳
۳۱	.....	کنترل غیر فعال سازه‌ها	۳-۳
۳۱	.....	میراگرهای فلزی	۱-۳-۳
۳۳	.....	میراگرهای اصطکاکی	۲-۳-۳
۳۴	.....	میراگرهای ویسکوالاستیک	۳-۳-۳
۳۵	.....	میراگرهای با سیال لزج	۴-۳-۳
۳۶	.....	میراگرهای جرمی تنظیم شده (TDM)	۵-۳-۳
۴۲	.....	میراگرهای مایع تنظیم شده (TLD)	۶-۳-۳
۴۳	.....	کنترل فعال سازه‌ها	۴-۳
۴۴	.....	الگوریتم‌های کنترل فعال	۱-۴-۳
۴۴	.....	الگوریتم کنترل بهینه ی خطی کلاسیک با LQR	۱-۱-۴-۳
۴۶	.....	مکانیزم‌های کنترل فعال	۲-۴-۳
۴۶	.....	سیستم کنترل با کابل فعال	۱-۲-۴-۳
۴۷	.....	سیستم میراگر جرمی فعال	۲-۲-۴-۳

۴۸	کنترل مرکب سازه‌ها	۵-۳
۵۰	کنترل نیمه فعال سازه‌ها	۶-۳

فصل چهارم : مطالعات و آنالیزهای انجام شده بر روی قاب‌های بتنی مجهز به AMD و

TMD

۵۵	مقدمه	۱-۴
۵۵	مدل هیستریزیس تاکدا	۲-۴
۵۶	نحوه استفاده از مدل تاکدا در برنامه نوشته شده	۱-۲-۴
۵۷	اطلاعات برنامه نوشته شده	۳-۴
۵۷	ویژگی‌های برنامه آماده شده	۱-۳-۴
۵۸	نحوه استفاده از برنامه و وارد کردن داده‌ها	۲-۳-۴
۶۱	روش محاسباتی مورد استفاده در برنامه	۳-۳-۴
۶۱	تشکیل ماتریس سختی	۴-۴
۶۱	ماتریس سختی موضعی برای عضو دو بعدی خمشی	۱-۴-۴
۶۲	روش هولزر برای تشکیل ماتریس سختی	۲-۴-۴
۶۴	معرفی مدل‌های مورد مطالعه	۵-۴
۶۴	سازه ۲ طبقه (دارای ۲ سقف)	۱-۵-۴
۶۶	تحریک اعمال شده به سازه	۱-۱-۵-۴
۶۶	مشخصات میراگر جرمی در حالت فعال و غیر فعال	۲-۱-۵-۴
۶۷	نمودار و جدول جابجایی حداکثر سازه	۳-۱-۵-۴
۷۰	محاسبه نیروهای وارد شده از طرف جک‌ها	۴-۱-۵-۴
۷۱	جابجایی نسبی طبقات (Drift)	۵-۱-۵-۴
۷۱	تشکیل مفاصل پلاستیک	۶-۱-۵-۴
۷۳	سازه ۴ طبقه (دارای ۴ سقف)	۲-۵-۴

- ۷۴ ۱-۲-۵-۴ تحریک اعمال شده به سازه
- ۷۵ ۲-۲-۵-۴ مشخصات میراگر جرمی در حالت فعال و غیر فعال
- ۷۵ ۳-۲-۵-۴ نمودار و جدول جابجایی حداکثر سازه
- ۷۸ ۴-۲-۵-۴ محاسبه نیروهای وارد شده از طرف جک ها
- ۷۸ ۵-۲-۵-۴ جابجایی نسبی طبقات (Drift)
- ۷۹ ۶-۲-۵-۴ تشکیل مفاصل پلاستیک
- ۸۱ ۳-۵-۴ سازه ۸ طبقه (دارای ۸ سقف)
- ۸۳ ۱-۳-۵-۴ تحریک اعمال شده به سازه
- ۸۳ ۲-۳-۵-۴ مشخصات میراگر جرمی در حالت فعال و غیر فعال
- ۸۴ ۳-۳-۵-۴ نمودار و جدول جابجایی حداکثر سازه
- ۸۶ ۴-۳-۵-۴ محاسبه نیروهای وارد شده از طرف جک ها
- ۸۷ ۵-۳-۵-۴ جابجایی نسبی طبقات (Drift)
- ۸۸ ۶-۴ نتیجه گیری از خروجی ها و مقایسه آنها
- ۸۸ ۱-۶-۴ انتخاب پارامترهای مناسب میراگرها
- ۹۰ ۲-۶-۴ مقایسه میزان جابجایی در قاب ها با سیستم های مختلف
- ۹۲ ۳-۶-۴ تأثیر جابجا کردن میراگر در طبقات بر پاسخ سازه
- ۹۴ ۴-۶-۴ مقایسه مقدار نیروی وارده از طرف جک ها در قاب های تحلیل شده

فصل پنجم : نتیجه گیری

- ۹۶ ۱-۵ نتایج حداکثر جابجایی در قاب های مورد مطالعه
- ۹۷ ۲-۵ نتایج بدست آمده از جابجایی میان طبقاتی
- ۹۸ ۳-۵ نیروهای وارد شده از طرف جک ها
- ۹۸ ۴-۵ تشکیل مفاصل پلاستیک در سازه
- ۹۹ ۵-۵ پیشنهاد تحقیقات آینده
- ۱۰۰ مراجع

فهرست شکل ها

- شکل ۱-۱ : سیستم جداسازی پایه ۴
- شکل ۲-۱ : سیستم بادبند با سختی متغیر ۴
- شکل ۳-۱ : سیستم کنترل (الف) غیرفعال (ب) فعال (ج) ترکیبی یا مختلط (د) نیمه فعال ۸
- شکل ۴-۱ : مقایسه عملکرد سیستم های کنترل (الف) غیرفعال (ب) فعال (ج) ترکیبی ۹
- شکل ۱-۲ : دیاگرام سیستم های کنترل سازه ۱۵
- شکل ۲-۲ : سیستم کنترل فعال مدار بسته ۱۹
- شکل ۳-۲ : سیستم کنترل فعال مدار باز ۱۹
- شکل ۴-۲ : جاذب بدون میرایی و جرم اصلی تحت بار هارمونیک ۲۰
- شکل ۵-۲ : سازه با سیستم TMD با n طبقه که مراگر در طبقه n قرار گرفته است ۲۲
- شکل ۶-۲ : سازه با سیستم AMD با n طبقه که مراگر در طبقه n قرار گرفته است ۲۶
- شکل ۷-۲ : مدل هیستریزیس کینماتیک ۲۸
- شکل ۸-۲ : مدل هیستریزیس تاکدا ۲۸
- شکل ۱-۳ : رفتار یک سازه بدون و با جداساز پایه ۳۱
- شکل ۲-۳ : هندسه میراگرهای فلزی (الف) تیر-پیچشی (ب) U شکل نواری ۳۲
- شکل ۳-۳ : میراگرهای فلزی (الف) X شکل (ب) ورق مثلثی ۳۲
- شکل ۴-۳ : المان ADAS ۳۳
- شکل ۵-۳ : میراگر اصطکاکی پال : (الف) نحوه ی اجرا در ساختمان ، (ب) هندسه ی میراگر ۳۴
- شکل ۶-۳ : نمونه ای از پیکربندی ویسکوالاستیک ۳۵

- شکل ۳-۷: میراگر سیال لزج تبلور ۳۶
- شکل ۳-۸: انواع TMD ۳۷
- شکل ۳-۹: حالت تغییر شکل یافته TMD ۳۸
- شکل ۳-۱۰: TMD مرکز سیتی کورپ در نیویورک ۳۸
- شکل ۳-۱۱: TMD برج بندر چیپا در ژاپن ۳۹
- شکل ۳-۱۲: TMD برج تن بوش در ناکاساکی ۳۹
- شکل ۳-۱۳: سیستم تاندون فعال برای پل بزرگراه ۴۷
- شکل ۳-۱۴: ساختمان کیوباشی سیوا و AMD بکار رفته در آن ۴۸
- شکل ۳-۱۵: ساختمان سانداگایا اینتز همراه با (HMD) ۴۹
- شکل ۳-۱۶: پلان از پیکربندی HMD بکار رفته در ساختمان سانداگایا اینتز ۴۹
- شکل ۳-۱۷: دیاگرام سیستم میراگر جرمی غیر فعال ، فعال و مرکب ۵۰
- شکل ۳-۱۸: سیستم کنترل نیمه فعال ارائه شده توسط کوپوری و همکارن ۵۱
- شکل ۳-۱۹: میراگر با روزنه ی متغیر ۵۱
- شکل ۳-۲۰: پل اوکلاهاما با سیستم روزنه متغیر ۵۲
- شکل ۴-۱: منحنی هیستریزیس تاکدا ۵۶
- شکل ۴-۲: نمونه آزمایشگاهی تاکدا ۵۷
- شکل ۴-۳: معرفی بخش های ورود داده ها ۵۸
- شکل ۴-۴: اطلاعات مربوط به هندسه سازه ۲ طبقه ۵۹
- شکل ۴-۵: مشخصات سازه ای قاب ۲ طبقه ۵۹
- شکل ۴-۶: بارهای وارد شده و ضرایب آن ۶۰
- شکل ۴-۷: مشخصات دینامیکی سازه ۲ طبقه ۶۰

- شکل ۴-۸ : مشخصات سیستم کنترل در سازه ۲ طبقه ۶۱
- شکل ۴-۹ : درجات آزادی مربوط به عضو خمشی در دو بعد ۶۲
- شکل ۴-۱۰ : لنگر خمشی و نیروی برشی در انتهای عضو ۶۲
- شکل ۴-۱۱ : سازه دو طبقه مورد آنالیز ۶۵
- شکل ۴-۱۲ : نمودار شتاب زمان (تاریخچه زمانی) زلزله کوبه ۶۶
- شکل ۴-۱۳ : نمودار جابجایی الف: بدون سیستم کنترل، ب: TMD، ج: AMD ۶۸
- شکل ۴-۱۴ : نمودار جابجایی در حالات مختلف ۶۹
- شکل ۴-۱۵ : نمودار نیروی وارد شده در سیستم AMD ۷۰
- شکل ۴-۱۶ : تغییر مکان طبقات در زمان وقوع حداکثر جابجایی در سازه ۲ طبقه ۷۱
- شکل ۴-۱۷ : محل تشکیل مفاصل پلاستیک در قاب دو طبقه در هر سه حالت ۷۲
- شکل ۴-۱۸ : منحنی هیستریزیس برای مفصل متشکل در ستون طبقه اول در سیستم AMD در ۷۲
- شکل ۴-۱۹ : منحنی هیستریزیس برای مفصل متشکل در ستون طبقه اول در سیستم TMD در ۷۲
- شکل ۴-۲۰ : منحنی هیستریزیس برای مفصل متشکل در ستون طبقه اول بدون سیستم کنترل در ۷۳
- شکل ۴-۲۱ : سازه چهار طبقه مورد آنالیز ۷۳
- شکل ۴-۲۲ : نمودار جابجایی الف: بدون سیستم کنترل، ب: TMD، ج: AMD در قاب ۴ طبقه ۷۵
- شکل ۴-۲۳ : نمودار جابجایی در حالات مختلف ۷۷
- شکل ۴-۲۴ : نمودار نیروی وارد شده در سیستم AMD ۷۸
- شکل ۴-۲۵ : تغییر مکان طبقات در زمان وقوع حداکثر جابجایی در سازه ۴ طبقه ۷۹
- شکل ۴-۲۶ : محل تشکیل مفاصل پلاستیک در قاب چهار طبقه ۸۰
- شکل ۴-۲۷ : منحنی هیستریزیس برای مفصل متشکل در ستون طبقه دوم در سیستم AMD ۸۰
- شکل ۴-۲۸ : منحنی هیستریزیس برای مفصل متشکل در ستون طبقه دوم در سیستم TMD ۸۰

- شکل ۴-۲۹: منحنی هیستریزیس برای مفصل متشکل در ستون طبقه دوم بدون سیستم کنترل ۸۱
- شکل ۴-۳۰: منحنی هیستریزیس برای مفصل متشکل در ستون طبقه سوم در سیستم AMD ۸۱
- شکل ۴-۳۱: نمودار جابجایی الف: بدون سیستم کنترل، ب: TMD، ج: AMD در قاب ۸ طبقه ۸۴
- شکل ۴-۳۲: نمودار جابجایی در حالات مختلف در قاب ۸ طبقه ۸۶
- شکل ۴-۳۳: نمودار نیروی وارد شده در سیستم AMD در قاب ۸ طبقه ۸۷
- شکل ۴-۳۴: تغییر مکان طبقات در زمان وقوع حداکثر جابجایی در قاب ۸ طبقه ۸۷
- شکل ۴-۳۵: جابجایی طبقه آخر در سیستم AMD که به ناپایداری و تخریب می انجامد ۸۸
- شکل ۴-۳۶: مقدار نیروی تولید شده در سازه ناپایدار ۸۹
- شکل ۴-۳۷: نمودار تغییرات جابجایی در قاب های مجهز به سیستم AMD ۹۰
- شکل ۴-۳۸: نمودار تغییرات جابجایی در قاب های مجهز به سیستم TMD ۹۱
- شکل ۴-۳۹: نمودار تغییرات جابجایی در قاب های بدون سیستم کنترل ۹۱
- شکل ۴-۴۰: مقایسه تغییر مکان با جابجا کردن میراگر در طبقات چهارم و هشتم ۹۳
- شکل ۴-۴۲: مقایسه نیروی وارد بر جرم میراگر در قاب های مختلف ۹۴

فهرست جداول

- جدول ۱-۳ : میراگرهای مختلف و نیر نوع آنها در کشور ژاپن ۵۳
- جدول ۱-۴ : بارهای وارد شده و ضرایب بارها در قاب ۲ طبقه ۶۵
- جدول ۲-۴ : مشخصات سازه ای قاب دو طبقه ۶۵
- جدول ۳-۴ : مشخصات زلزله کوبه ژاپن ۶۶
- جدول ۴-۴ : مشخصات میراگر سازه ۲ طبقه ۶۷
- جدول ۵-۴ : حداکثر جابجایی و زمان وقوع آن در سازه ۲ طبقه ۶۹
- جدول ۶-۴ : بارهای وارد شده و ضرایب بارها در قاب ۴ طبقه ۷۴
- جدول ۷-۴ : مشخصات سازه ای قاب ۴ طبقه ۷۴
- جدول ۸-۴ : مشخصات میراگر سازه ۴ طبقه ۷۵
- جدول ۹-۴ : حداکثر جابجایی و زمان وقوع آن در سازه ۴ طبقه ۷۷
- جدول ۱۰-۴ : بارهای وارد شده و ضرایب بارها در قاب ۸ طبقه ۸۲
- جدول ۱۱-۴ : مشخصات سازه ای قاب ۸ طبقه ۸۲
- جدول ۱۲-۴ : مشخصات زلزله کوبه ژاپن ۸۳
- جدول ۱۳-۴ : مشخصات میراگر در سازه ۸ طبقه ۸۴
- جدول ۱۴-۴ : حداکثر جابجایی و زمان وقوع آن در سازه ۸ طبقه ۸۵
- جدول ۱۵-۴ : افزایش جابجایی در تعداد طبقات با سیستم AMD ۹۲
- جدول ۱۶-۴ : افزایش جابجایی در تعداد طبقات با سیستم TMD ۹۲
- جدول ۱۷-۴ : افزایش جابجایی در تعداد طبقات بدون سیستم کنترل ۹۲

فصل اول

کلیات

۱-۱ مقدمه :

طراحی مطمئن یک سازه زمانی تضمین می‌شود که سه شرط اساسی مورد احتیاج در سازه برآورده شده باشد:

- ۱- در دست داشتن اطلاعات واقعی از نیروهای وارده به سازه ۲- در دست داشتن اطلاعات واقعی و درست از رفتار و مقاومت مصالح ساختمانی ۳- اخذ روش‌های مطمئن برای تحلیل و طراحی سازه
- ولی در عمل این سه شرط به سختی با هم تامین می‌شوند. بدین منظور جهت حذف تأثیر موارد مذکور مقادیر ضرایب اطمینانی در طراحی سازه‌ها در نظر گرفته می‌شود. در سال‌های اخیر با تولید مصالح جدید که مقاومت بالاتری داشته و رفتار آنها از قبل تعیین شده است؛ مانند فولاد با مقاومت بالا و یا بتن پیش تنیده، روش‌های تحلیل سازه نیز به همین منوال بهبود یافته‌اند. مهندسين سازه نیز قادر گشته‌اند تا با جرأت اقدام به ساخت سازه‌های بزرگ انعطاف پذیر از قبیل برج‌های مرتفع، پل‌های با دهانه بزرگ، برج‌های آنتن تلویزیون و سازه‌های دریایی کنند. با وجود این، شکل پذیری و میرایی کم این سازه‌ها منجر به برخی از مشکلات می‌شوند. از قبیل: (الف) - احتمال خرابی سازه‌ها در اثر بارهای طبیعی خارجی مانند باد و زلزله (ب) - ارتعاشات با دامنه زیاد سازه‌ها که می‌تواند باعث عدم آسایش ساکنین این سازه‌ها شود (ج) - خرابی بعضی از اعضای خاص این سازه‌ها مانند ترک در دیوارها و موارد دیگر. بعنوان مثال پل تاکوما که برای مقاومت در برابر بادهای با سرعت 100 mph طراحی شده بود، در اثر ناپایداری پیچشی که تحت اثر بادی با سرعت 42 mph ایجاد شده بود خراب گردید. پل گلدنگیت در اثر طوفان دچار نوسان‌های بسیار بزرگ غیرقابل قبولی شده بود که بعداً ناگزیر از تقویت بعضی قسمت‌های آن شدند. زوک همچنین گزارش کرده است که موقعی که لوزلاتین و همکارانش یک برج به ارتفاع 30 m و با شعاع متغیر $1/8 \text{ m}$ الی $2/7 \text{ m}$ طراحی کردند، در اثر بادی به سرعت 150 mph جابجایی به مقدار 75 cm را بالای برج ثبت کردند. به منظور محدود کردن جابه جایی به مقدار کمتر از 30 cm سازه باید تقویت می‌شد و این تقویت باعث می‌گشت که ابعاد مقاطع حداقل دو برابر ابعاد مقاطع اصلی شود. از این رو واضح است که هزینه زیادی جهت تقویت سازه‌های بسیار شکل پذیر جهت کاهش پاسخ سازه‌ای لازم است. به منظور اجتناب از این هزینه‌های زیاد و تامین پایداری و امنیت سازه و همچنین تامین آسایش ساکنین، مفهوم تئوری کنترل سازه‌ها به وجود آمده است. [10]

۱-۲ مفهوم کنترل ارتعاش در سازه‌ها

به طور کلی اعمال هرگونه نیرو به یک سازه سبب ایجاد ارتعاش در آن می‌گردد. نیروی وارده به سازه می‌تواند سرچشمه داخلی یا خارجی داشته باشد. وجود یک دستگاه مرتعش در داخل سازه به نحوی که تکیه‌گاه این دستگاه به یک عضو سازه ای نیرو وارد کند، می‌تواند سبب ارتعاش موضعی یا کلی سازه گردد. نیرویی نظیر باد، منشاء خارجی داشته و به طور مستقیم بر سازه وارد می‌گردد. از طرف دیگر، به هنگام زلزله ارتعاش از طریق زمین به پایه سازه منتقل می‌شود و انرژی ارتعاش از شالوده سازه به سایر طبقات انتقال می‌یابد که به این حالت، تحریک پایه^۱ گفته می‌شود. نتیجه اعمال نیرو به سازه، ارتعاش طبقات می‌باشد. طراحی مقاوم سازه در برابر بارهای وارده به آن، باید به نحوی صورت گیرد که ارتعاشات و نیروهای ایجاد شده ناشی از آن در اعضای سازه‌ای و غیرسازه‌ای، با تامین ایمنی و آرامش لازم برای کاربرد مورد نظر، تحمل شوند. [4]

مهم‌ترین معیار طراحی مقاوم یک سازه به خصوص طراحی مقاوم لرزه‌ای، معیار تغییرمکان نسبی طبقه^۲ است. سایر پارامترهای طراحی نظیر برش طبقه و نیروهای داخلی اعضاء به طور مستقیم با آن ارتباط دارند. چنانچه بتوان انرژی وارده به سازه را به نحوی کاهش داد که حداقل تغییرمکان نسبی در طبقات سازه حاصل شود، نیاز به مقاومت در اعضاء کاهش می‌یابد و می‌توان بر اساس آن نسبت ظرفیت به نیاز را به صورت تئوری برابر یک کرد. معمولاً با ایجاد یک حاشیه ایمنی (که می‌تواند با اعمال ضریبی افزایش یافته در مقدار بارهای وارده و یا ضریبی کاهش یافته در مقاومت اعضاء به وجود آید)، این نسبت بیشتر از یک خواهد شد. تا اثر عوامل نامعینی، اشکالات بارگذاری، طراحی و اجرا لحاظ شود و سازه در محدوده ایمن باقی بماند. کنترل ارتعاش سازه در اصل به تعدیل خصوصیات سازه‌ای اطلاق می‌شود تا پاسخ مناسب سازه تحت تاثیر بارهای وارده گرفته شود. به سازه‌ای که ارتعاش آن کنترل شود، سازه با پاسخ کنترل شده^۳ گفته می‌شود. در سال‌های اخیر طبقه بندی‌های مختلفی به منظور تفکیک روش‌های کنترل ارتعاشات در سازه‌ها صورت گرفته که در ادامه به مهم‌ترین آنها اشاره می‌شود. در ضمن تفکیک این روش‌ها در رشته‌های مختلف مهندسی نیز متفاوت است. به عنوان مثال این طبقه‌بندی در رشته مهندسی مکانیک کاملاً متفاوت است. هرگونه روش کنترل ارتعاش سازه‌های مهندسی عمران در یکی از گروه‌های زیر و یا ترکیبی از آنها خواهد بود.

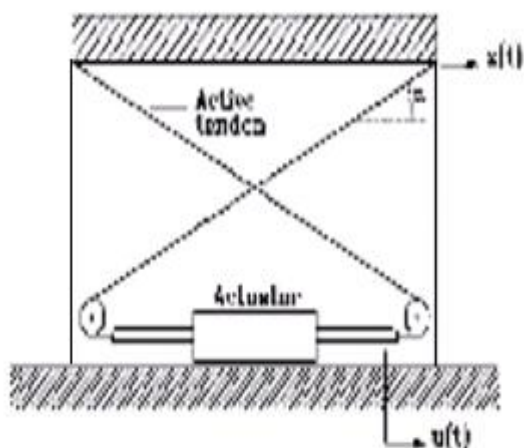
1 Base excitation

2 Story drift

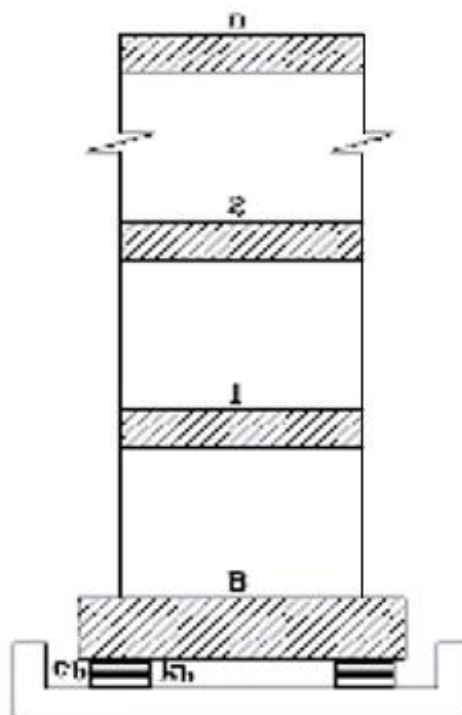
3 Response-controlled structure

۳-۱ طبقه‌بندی روش‌های کنترل بر اساس دینامیک سازه‌ها:

- ۱-۳-۱ روش‌های کنترل مبتنی بر تغییر و تنظیم خواص دینامیکی سیستم
- طبقه نرم^۱: که در آن، فلسفه کار بر مبنای جذب انرژی و تمرکز خرابی در طبقه‌ای خاص از سازه استوار بوده و در حال حاضر، جای خود را به روش جداسازی پایه که عملاً این کار را بدون ایجاد خرابی در اعضای سازه ای انجام می‌دهد، داده است.
 - جداسازی پایه^۲: که در آن، پریود طبیعی ارتعاش سازه با نصب جداکننده‌ها افزایش یافته و انرژی کمتری به سازه فوقانی وارد می‌شود. در نتیجه، شتاب طیفی وارده به سازه کاهش می‌یابد و خرابی متحمل در کل سازه به جذب و تمرکز خرابی موضعی در جداکننده‌ها تبدیل می‌شود (شکل ۱-۱).
 - روش باد بند با سختی متغیر^۳: در این مکانیزم، سختی سیستم به طور هم‌زمان به نحو مناسبی تغییر می‌یابد تا ارتعاش سازه به حداقل برسد. سختی سازه عملاً با ایجاد کشش و یا با آزاد سازی کابل‌هایی که به عنوان بادبند در سیستم عمل می‌کند تغییر می‌یابد (شکل ۲-۱).



شکل ۲-۱ سیستم بادبند با سختی متغیر [5]



شکل ۱-۱ سیستم جداسازی پایه [5]

1 Soft story
3 Variable stiffness brace

2 Base isolation

۱-۳-۲ روش‌های کنترل مبتنی بر تغییر و تنظیم میرایی سیستم در این روش، با تنظیم و تغییر میرایی سیستم پاسخ سازه در برابر بارهای خارجی کاهش می‌یابد. مثال این روش، استفاده از میراگرهای ویسکوالاستیک^۱ در سازه‌هایی که میرایی سیستم اندک است می‌باشد. این میراگرها را می‌توان در پایه ساختمان یا در محل اتصالات تیر با ستون اجرا کرد.

۱-۴-۴ طبقه‌بندی روش‌های کنترل بر اساس نحوه عملکرد سیستم:

این طبقه‌بندی، کلی‌ترین روش طبقه‌بندی بوده و معمولاً روش‌های کنترل ارتعاش یک سازه را با این طبقه‌بندی مقایسه می‌کنند که شامل موارد زیر است:

۱-۴-۱ روش‌های کنترل غیرفعال^۲

در اینگونه روش‌ها، عامل کنترل‌کننده ارتعاش در محل مناسبی از سازه قرار می‌گیرد و عملاً تا قبل از تحریک سازه، به صورت غیرفعال است (شکل ۱-۳ الف). با شروع تحریک (مثلاً زلزله)، سیستم کنترلی به کار افتاده و عملکرد کنترلی خود (اعم از تغییر سختی، پریرود، میرایی یا جرم) را در حین تحریک انجام می‌دهد. پس از خاتمه تحریک مجدداً به حالت غیرفعال باز می‌گردد که به دلیل جذب بخشی از انرژی ورودی به سازه، احتمالاً شاهد خرابی جزئی یا کلی در آن خواهیم بود. روش‌های زیادی از جمله روش معروف و مرسوم جداسازی پایه، میراگرهای اصطکاکی، میراگرهای ویسکوالاستیک، میراگرهای فلزی، جرم میراگر متوازن و مایع میراگر متوازن از جمله روش‌های کنترل غیرفعال محسوب می‌شوند. مشخصه اصلی این گونه سیستم‌ها آن است که عملاً در زمان تحریک سازه، نوع عملکرد سیستم کنترل غیرفعال عوض نشده و خواص آن خارج از سیستم قابل تغییر نمی‌باشد. استفاده از کنترل غیرفعال در بعضی موارد خالی از اشکال نیست.

بعنوان مثال تغییر مکان‌های زیاد جداکننده‌های سازه از تکیه‌گاه و نیز بلندشدگی سازه در ساختمان‌های بلند مرتبه باعث ایجاد گشتاورهای واژگونی قابل توجهی می‌گردد که کاربرد این گونه سیستم‌های غیرفعال را به سازه‌های کوتاه محدود می‌سازد. همچنین مشاهده می‌شود که این گونه سیستم‌ها به دلیل ثابت بودن خواص دینامیکی از جمله سختی، میرایی، جرم و فرکانس، به فرکانس و دامنه تحریک ورودی به سازه حساس بوده که در کاهش بازده آنها برای حالاتی مثل زلزله که تحریک ورودی به طور دقیق قابل پیش‌بینی نیست، تأثیر می‌گذارد. روش‌هایی از جمله استفاده از

1 Visco elastic dampers

2 Passive control

ترکیب این سیستم‌ها به منظور کاهش این حساسیت ابداع و به کار گرفته شده است و هم‌اکنون در بسیاری کشورها سازه‌های زیادی به روش غیرفعال کنترل می‌شوند. [11]

۱-۴-۲ روش‌های کنترل فعال^۱:

در این گونه روش‌ها، پاسخ سازه توسط اعمال نیروهایی در نقاط مختلف آن به صورت هم‌زمان و با توجه به شرایط لحظه‌ای سازه کنترل می‌شود (شکل ۱-۳ ب). این سیستم‌ها همواره آماده برای شروع فعالیت و کنترل ارتعاشات می‌باشند که اصطلاحاً فعال نامیده می‌شوند. سیستم‌های کنترل فعال را می‌توان به صورت عمده به دو بخش تعیین مکانیزم اعمال نیرو بر سازه و الگوریتم‌های محاسبه نیروی کنترل تقسیم نمود. در این گونه سیستم‌ها ضمن تعیین پاسخ سازه که می‌تواند شامل شتاب، سرعت و یا تغییرمکان در هر لحظه باشد و با استفاده از یک الگوریتم مشخص، نیروی کنترل مورد نیاز تعیین می‌گردد. سپس با استفاده از یک منبع انرژی خارجی نسبت به اعمال نیروهای محاسبه شده کنترلی بر سازه اقدام شده و این کار تا زمان کاهش پاسخ سازه به حد مورد نظر ادامه می‌یابد.

از مشکلات عمده این گونه سیستم‌ها هزینه زیاد اولیه از یک سو و عملیات تعمیر و نگهداری سنگین آنها برای ایجاد امکان استفاده در هر لحظه از سوی دیگر می‌باشد. نقص دیگر این سیستم‌ها آن است که به دلیل آنکه به سازه انرژی تزریق می‌نمایند، پتانسیل ناپایدار کردن سیستم را دارا می‌باشند. نحوه کار در آنها (مثلاً در مورد زلزله) معمولاً به این صورت است که حسگرهای دریافت کننده پاسخ سازه (در حالت کنترل با مدار بسته) و یا ارتعاشات زمین (در حالت کنترل با مدار باز و یا مدار بسته باز) در فاصله‌ای از سازه و در طبقاتی از سازه قرار گرفته و همگی به یک پردازنده مرکزی^۲ متصل می‌باشند. ارتعاشات زمین و طبقات سازه در هر لحظه به CPU منتقل شده و بر روی آنها پردازش صورت می‌گیرد. شروع فعالیت سیستم کنترلی لحظه‌ای است که دامنه ارتعاشات ثبت شده سازه و یا ورودی زلزله توسط حسگرها، برابر یا بیشتر از مقدار تعریف شده (که معمولاً آن سطح از ارتعاش است که عملاً سازه در آن نیاز به کنترل دارد) برای آن باشد. به این زمان، لحظه شروع می‌گویند.

به عنوان مثال چنانچه شتاب زمین بیش از مقدار مشخصی شده و یا تغییرمکان طبقات از حدود مشخصی خارج گردد، سیستم شروع به کار می‌کند. سپس پردازنده مرکزی با تجزیه و تحلیل اطلاعات و بر اساس برنامه‌ای که برای آن تعریف شده است، خواص بهینه را برای سیستم

1 Active control

2 CPU

کنترل کننده ارتعاش تعیین و فرمان‌هایی را به محرک‌ها می‌دهد که فعالیت خود را آغاز کنند. این محرک‌ها ممکن است جرمی را حرکت داده (مانند سیستم AMD)^۱ یا کابلی را به کشش وادارند (مانند کابل‌های فعال)^۲. در نهایت ارتعاشات سازه در حالت ایده‌آل باید به صفر برسد ولی عملاً دستیابی به چنین سیستم کنترلی به دلیل عواملی مانند تأخیر زمانی و یا اشکالات در تخمین صحیح نیروی کنترل کننده امکان پذیر نیست. مشخصاً در این نوع سیستم‌ها چون پاسخ دائماً در حال اندازه‌گیری و پایش است، کارایی بیشتری نسبت به سیستم‌های غیرفعال خواهند داشت. این روش در چند سال اخیر در ژاپن و آمریکا در بسیاری از سازه‌ها به خصوص سازه‌های بلند و سازه‌هایی که بر روی زمین‌های با خاک نرم بنا شده‌اند و امکان استفاده از تکنیکی مثل جداسازی پایه در آن وجود ندارد و همچنین برای کنترل ارتعاش سازه‌ها در برابر باد استفاده شده است که عملکرد مطلوبی از خود نشان داده است. بهینه‌سازی این روش‌ها همچنان ادامه دارد. البته این نوع سیستم نیز دارای مشکلاتی کاربردی هست. یکی از مشکلات عمده در سیستم‌های کنترل فعال، هزینه بیشتر آنها نسبت به سیستم‌های غیرفعال است. از سوی دیگر، برای سرکوب ارتعاشات لرزه‌ای، سیستم کنترل باید همواره آماده شروع به فعالیت باشد. این نکته این سوال را ایجاد می‌کند که «چنین سیستمی که باید برای مدت‌های طولانی در حالت آماده به خدمت بماند تا چه حد قابل اطمینان است؟». یکی دیگر از اشکالات روش کنترل فعال، پردازش اطلاعات و ارسال پیام‌ها به محرک‌ها^۳ و شروع به کار محرک‌ها می‌باشد. این اشکال به خصوص در ابتدای تحریک رخ می‌دهد و در این مرحله بازده سیستم کنترل فعال کاهش می‌یابد. به منظور دفع این نقص از ترکیب دو سیستم کنترل فعال و غیرفعال استفاده می‌گردد که سیستم مختلط نامیده می‌شود. [8]

۱-۴-۳ روش‌های کنترل ترکیبی یا مختلط^۴:

همان‌گونه که ذکر شد این روش شامل دو سیستم کنترل فعال و غیرفعال به صورت توأم می‌باشد. در ابتدای تحریک، کاهش ارتعاشات توسط سیستم غیرفعال صورت گرفته و پس از دفع تأخیر زمانی، سیستم فعال نیز وارد عمل می‌شود. در اینجا سیستم غیرفعال ممکن است به فعالیت ادامه داده و یا در صورت عدم نیاز به آن، از دور خارج شود (شکل ۱-۳ ج). شکل ۱-۴ نحوه عملکرد سه سیستم کنترل غیرفعال، فعال و ترکیبی را در کاهش ارتعاشات طبقه اول یک سازه بیست طبقه تحت اثر

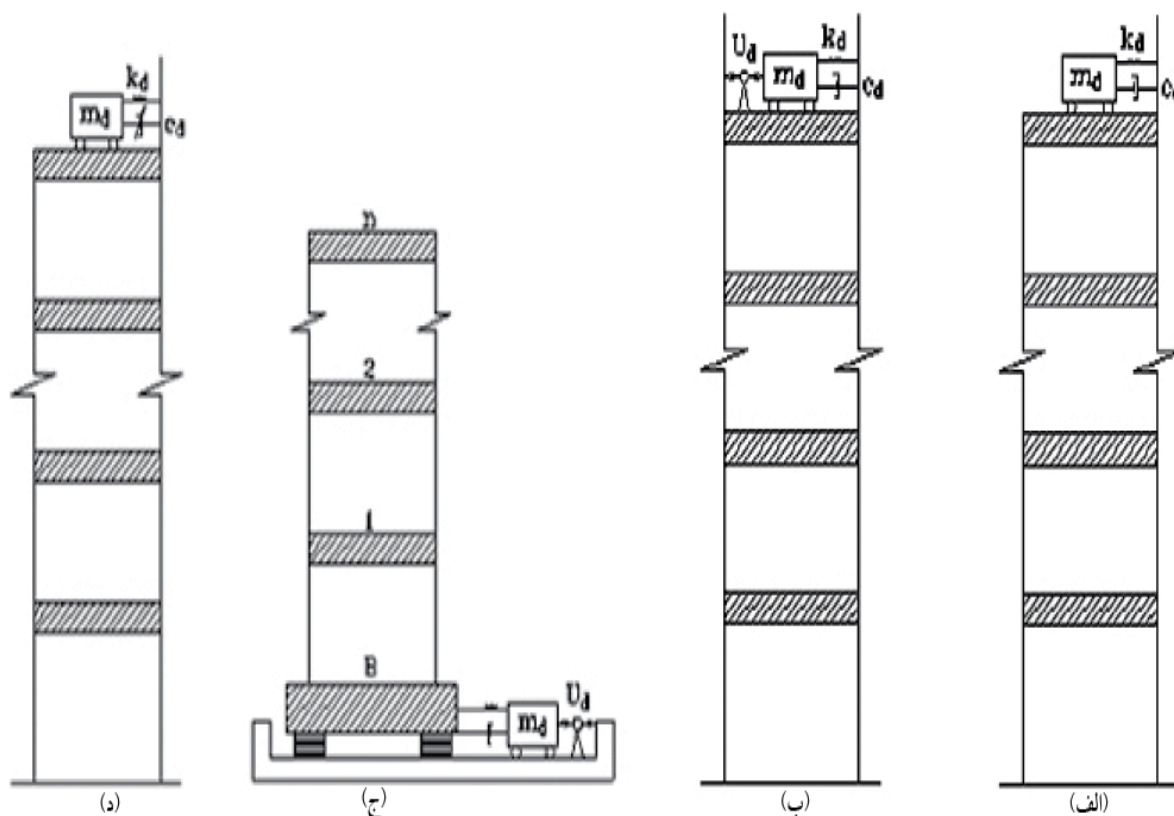
1 Active mass damper
3 Actuators

2 Active tendons
4 Hybrid control

زلزله با شتاب حداکثر برابر $0.3g$ را نشان می‌دهد. مقایسه نتایج با حالت بدون کنترل نشان‌دهنده عملکرد بهینه سیستم کنترل ترکیبی در کاهش ارتعاشات سازه می‌باشد. [11]

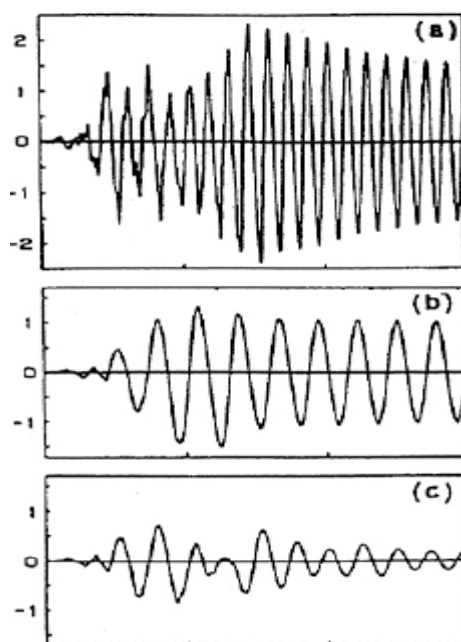
۴-۴-۱ روش‌های کنترل نیمه فعال^۱:

در کنترل نیمه فعال (شکل ۳-۱) ابزار مورد استفاده توانایی تغییر مشخصات دینامیکی خود را داشته و در نتیجه این نوع کنترل برای محدوده وسیع‌تری از بارگذاری‌ها کارآیی دارد. این ابزار معمولاً به انرژی کمی نیاز دارند و بنابراین لزوم وجود یک منبع انرژی خارجی بزرگ را از بین می‌برند. میراگرهایی از نوع دریچه متغیر^۲، ابزار با اصطکاک متغیر^۳ و میراگرهای با سختی متغیر از این دسته می‌باشند. [25]



شکل ۳-۱ سیستم کنترل (الف) غیرفعال (ب) فعال (ج) ترکیبی یا مختلط (د) نیمه فعال [5]

- 1 Semi-active control
- 2 Variable orifice dampers
- 3 Variable friction device



شکل ۱-۴ مقایسه عملکرد سیستم‌های کنترل (الف) غیرفعال (ب) فعال (ج) ترکیبی [11]

۱-۵ لازمۀ تحقیق

با توجه به زلزله‌های مخرب اخیر و با توجه به اهمیت زیاد مسئله مقاوم سازی ساختمان‌ها در مقابل نوسانات ناشی از نیروهای لرزه‌ای و طراحی بهینه ساختمان‌ها در مقابل زلزله، بحث جدیدی که در سال‌های اخیر میان دانشمندان مهندسين طراح سازه‌ها مطرح شده است، طراحی نوع جدیدی از ساختمان‌ها است که شامل یک سیستم مهاربند لرزه‌ای باشند که فقط در مقابل ارتعاشات مختلف ناشی از زلزله عمل نموده و در تحمل بارهای استاتیکی هیچ نقشی نداشته باشند. با تعریف اعضا جدیدی در سازه با نام میراگر (Damper) که عامل اتلاف انرژی لرزه‌ای هستند و اعمال نیروهای خارجی (در روش‌های کنترل فعال) می‌توانیم یک ساختمان بهینه‌سازی شده داشته باشیم. که در مقابل انواع بارهای دینامیکی ناشی از زلزله رفتاری مناسب و مطلوب از خود ارائه می‌دهد.

در سال‌های اخیر احداث ساختمان‌های بلند به ویژه در شهرهای بزرگ، که با مشکل کمبود فضای لازم برای ساخت مسکن مواجهند، مورد توجه بسیاری از دولت‌ها قرار گرفته است. توجه به این نکته حائز اهمیت است که عمدتاً در این ساختمان‌ها از مواد و مصالحی استفاده می‌شود که سبک بوده و از قابلیت انعطاف پذیری بالایی برخوردارند. کمبود نسبت میرایی و میزان جذب انرژی این سازه‌ها موجب ایجاد دامنه ارتعاشی بزرگ حتی در زلزله‌های با سطح متوسط می‌گردد. به این دلیل سرمایه گذاری نسبتاً هنگفت ساخت این سازه‌ها و میزان درآمد حاصل و پرداخت هزینه نه چندان گزاف استفاده از سیستم‌های کنترلی را توجیه می‌نماید.