

## چکیده

با توجه به خواص بتن و رفتار بتن مسلح تحت بارهای لرزه‌ای، سازه‌های بتن مسلح رفتار لرزه‌ای مناسبی از خود نشان نمی‌دهند. این نوع سازه‌ها شکل‌پذیر کم و استهلاک انرژی پایینی دارند و حلقه‌های هیستریزس این سازه‌ها باریک‌شدگی شدیدی دارند. هدف از انجام این تحقیق کمک به بهبود رفتار لرزه‌ای این نوع سازه‌ها و افزایش ظرفیت استهلاک انرژی در آنها می‌باشد. در این تحقیق از میراگر جاری شونده پانل برشی برای این منظور استفاده شده است. علت انتخاب این میراگر عملکرد خوب آن در آزمایشات صورت گرفته در سالهای اخیر و در عین حال سادگی ساخت و قیمت مناسب این قطعه می‌باشد. این تحقیق بر پایه تحلیل‌های عددی و با استفاده از نرم‌افزارهای ABAQUS و LS-DYNA انجام شده است. این تحلیل‌ها شامل تحلیل پوش‌آور و بارگذاری تغییر مکان چرخه‌ای می‌باشد. نتایج تحلیل و مطالعه نشان می‌دهد افزودن پانل برشی به قاب بتن مسلح رفتار این سازه را بطور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌بخشد. نمودارها و منحنی‌های بدست آمده از تحلیل‌ها نشان می‌دهد شکل‌پذیری سازه و ظرفیت استهلاک انرژی در این سازه افزایش یافته و باریک‌شدگی در منحنی هیستریزس آنها کاهش نشان می‌دهد.

## فهرست

صفحه	عنوان
۱	پیشگفتار
۲	فصل اول: مقدمه
۵	فصل دوم: رفتار لرزه‌های سازه‌های بتنی
۵	۱-۲ نگرشی بر رفتار لرزه‌ای سازه‌ها
۵	۱-۱-۲ مقدمه ای بر دینامیک سازه‌ها
۶	۲-۱-۲ خواص طیف پاسخ
۷	۳-۱-۲ تأثیر زمان تناوب و استهلاک سازه
۹	۴-۱-۲ تأثیر سختی بر رفتار لرزه‌ای سازه
۹	۵-۱-۲ تأثیر رفتار غیر ارتجاعی بر نیروی زلزله
۱۱	۲-۲ رفتار لرزه‌ای سازه‌های بتنی
۱۱	۱-۲-۲ خواص لرزه‌ای سازه‌های بتنی
۱۱	رفتار هیستریزیس و شکل‌پذیری مصالح
۱۱	بتن
۱۳	فولاد
۱۴	سازه‌های بتنی
۱۴	اندرکنش بتن و میلگرد
۱۴	اتصال بتن و میلگرد
۱۴	تأثیر قیدی (محصورکنندگی) میلگرد عرضی
۱۵	کمانش میلگردهای فشاری
۱۵	رفتار خمشی اعضای بتنی
۱۶	رفتار برشی اعضای بتنی

۱۷	اتصالات بتنی
۱۸	۲-۲-۲ عملکرد لرزه‌ای سازه‌های بتنی
۲۲	فصل سوم: میراگر پانل برشی
۲۲	۱-۳ سیستم های کنترل سازه
۲۳	۲-۳ سازه های مجهز به میراگر
۲۴	۳-۳ میراگرهای فلزی جاری شونده
۲۶	۴-۳ بررسی برخی از میراگرهای جاری شونده
۲۶	۱-۴-۳ میراگرهای ADAS و TADAS
۲۹	۲-۴-۳ بادبند کمانش تاب BRB
۳۱	۳-۴-۳ سیستم بادبند زانویی (KBF)
۳۲	۴-۴-۳ پانل برشی (SPS)
۳۳	۵-۳ بررسی رفتار و عملکرد پانل برشی
۳۳	۱-۵-۳ بررسی ضریب لاغری بر عملکرد پانل برشی
۳۳	رفتار هیستریزیس
۳۵	۲-۵-۳ بررسی نوع اتصال تیروستون، خواص مقاطع SPS، طول رابط
۳۵	مطالعه پارامتری
۳۶	طراحی نمونه‌ها
۳۶	تحلیل و بارگذاری
۳۷	نتایج عددی
۳۹	انرژی مستهلک شده
۴۱	۳-۵-۳ بررسی پانل برشی به عنوان قطعه مستهلک کننده انرژی
۴۲	طراحی اولیه SPS
۴۲	نمونه‌ها

۴۳	دستگاه و وسایل آزمایش
۴۴	آزمایش با بارگذاری یکنواخت
۴۵	آزمایش بارگذاری چرخه‌ای
۴۷	سختی و مقاومت الاستیک
۴۷	استهلاک انرژی
۴۹	<b>فصل چهارم: ارتقای عملکرد قاب بتنی</b>
۴۹	۱-۴ تاثیر میراگر جاری شونده ورق شیاردار بر قاب بتنی
۵۱	۲-۱-۴ روش آزمایش
۵۳	۲-۴ ارتقای عملکرد لرزه‌ای سازه قاب بتنی با استفاده از سیستم CBF
۵۳	۱-۲-۴ انتخاب نمونه‌های مورد آزمایش
۵۴	۲-۲-۴ طراحی و ساخت نمونه‌های مورد آزمایش
۵۶	۳-۲-۴ تنظیم آزمایش
۵۷	۴-۲-۴ نتایج خرابی نمونه‌های مورد آزمایش
۵۸	۵-۲-۴ رفتار هیستریزیس
۵۹	۶-۲-۴ کاهش سختی جانبی
۶۰	۷-۲-۴ استهلاک انرژی
۶۱	۳-۴ بررسی تاثیر میراگر TADAS بر سازه بتنی
۶۲	۱-۳-۴ نتایج تحقیق
۶۴	<b>فصل پنجم: مدلسازی پانل برشی در قاب بتنی</b>
۶۴	۱-۵ شرحی مختصر در مورد نرم افزارها و روشهای تحلیل
۶۶	۲-۵ مدل سازی قاب بتن مسلح همراه با پانل برشی تحت آنالیز پوش‌آور
۶۶	۱-۲-۵ مشخصات هندسی قاب بتنی
۶۷	۲-۲-۵ مدلسازی مصالح در قاب بتنی

۶۸	۳-۲-۵ المانهای مورد استفاده در بتن مسلح
۶۸	۴-۲-۵ شرایط مرزی و تکیه گاهی
۶۸	۵-۲-۵ صحت سنجی عملکرد مدل مورد مطالعه
۷۰	۶-۲-۵ انتخاب پانل برشی
۷۲	۷-۲-۵ مدلسازی کامل قاب همراه با پانل برشی
۷۳	۳-۵ تحلیل چرخه ای قاب بتنی مجهز به پانل برشی
۷۳	۱-۳-۵ مشخصات هندسی
۷۴	۲-۳-۵ مدلسازی مصالح
۷۵	۳-۳-۵ شرایط بارگذاری
۷۷	۴-۳-۵ انتخاب و مدل سازی پانل برشی مورد استفاده در قاب بتنی
۷۸	۴-۵ مدل قاب خمشی بتنی مجهز به پانل برشی تحت بارگذاری چرخه‌ای
۷۸	۱-۴-۵ مشخصات هندسی
۸۰	۲-۴-۵ بارگذاری مدل
۸۰	۳-۴-۵ نمونه های مورد بررسی
۸۲	<b>فصل ششم: تحلیل عددی قابهای بتنی مجهز به پانل برشی</b>
۸۲	۱-۶ نتایج تحلیل پوش آور انجام شده بر روی دو قاب خمشی و مهاربند شده
۸۲	۱-۱-۶ مقاومت و شکل پذیری
۸۳	۲-۱-۶ استهلاک انرژی و کرنش پلاستیک
۸۴	۳-۱-۶ توزیع تنش در دو نمونه
۸۵	۴-۱-۶ توزیع تنش و نحوه جاری شدن پانل برشی
۹۰	۲-۶ نتایج تحلیل تغییر مکان چرخه‌ای بر روی دو قاب خمشی تنها و مهاربند شده با پانل برشی
۹۰	۱-۲-۶ مقاومت و شکل پذیری
۹۴	۲-۲-۶ ظرفیت استهلاک انرژی

۹۵	۳-۲-۶ سختی نمونه ها
۹۶	۴-۲-۶ تنش در قاب بتنی
۹۹	۵-۲-۶ توزیع نیرو در میلگردها
۱۰۱	۶-۲-۶ بررسی ترکهای قاب بتنی
۱۰۵	۷-۲-۶ بررسی کرنش در پانل برشی
۱۰۹	فصل هفتم: نتایج حاصل از تحقیق
۱۰۹	۱-۷ کلیات
۱۰۹	۲-۷ نتیجه گیری
۱۱۱	۳-۷ پیشنهادات جهت ادامه تحقیقات
۱۱۲	مراجع

## پیشگفتار

در پایان نامه حاضر فصل اول شامل مقدمه است که در آن علت و اهمیت این تحقیق شرح داده شده است. فصل دوم با عنوان رفتار لرزه‌ای سازه‌های بتنی در مورد خواص مصالح و رفتار سازه‌های بتنی تحت اثر بارهای لرزه‌ای بحث می‌کند و نقاط ضعف این نوع سازه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. عنوان فصل سوم میراگر پانل برشی است و در این فصل روش‌های کنترل سازه و انواع میراگرها به اختصار توضیح داده شده و از این میان میراگر پانل برشی شرح داده شده و خلاصه برخی از آزمایشات معتبری که بر روی آن صورت گرفته آورده شده است. فصل چهارم به ارائه شرح چند آزمایش که جهت ارتقای عملکرد لرزه‌ای صورت گرفته اختصاص دارد. در این فصل سعی گردیده چند روش از جمله استفاده از میراگر جای شوونده مورد بررسی قرار گیرد. در فصل پنجم مدلها و روش تحقیق شرح داده شده است. در این فصل نوع تحلیلهای انجام گرفته و روند مدل سازی و بارگذاری‌های انجام شده و طریقه صحت سنجی رفتار مدلها در نرم افزارها توضیح داده شده است. فصل ششم به بررسی خروجی‌های بدست آمده از تحلیل و مقایسه آنها با یکدیگر اختصاص یافته است. در فصل هفتم نتایج بدست آمده از این تحقیق آورده شده است.

## فصل اول

### مقدمه

بخش عمده ای از مردم جهان در مناطق لرزه خیز شناخته شده زندگی می کنند. این جمعیت به دلیل رشد سریع شهرهایی که در این مناطق قرار دارند در حال افزایش است. در سالهای اخیر زلزله‌هایی مانند زلزله ۱۹۹۴ نورث ریچ و ۱۹۹۵ کوبه و ۲۰۱۰ هایتی خسارت‌های جبران ناپذیری به دنبال داشته است و لزوم ارتقای عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها و گسترش بکارگیری ضوابط تدوین شده در این خصوص را نشان می‌دهد.

در این راستا در سالهای اخیر تحقیقات و آزمایشات بسیاری انجام شده و روشهای گوناگونی ابداع گردیده است و سعی شده با توجه به هزینه‌های سنگین در بخش ساختمان، طرحهای کم هزینه و کارآمد عرضه گردد. با توجه به اینکه ظرفیت شکل پذیری سازه تاثیر بسزایی در عملکرد لرزه‌ای مناسب یک سازه دارد، یکی از طرحهای موفق که با استقبال خوبی روبرو شده افزایش شکل پذیری سازه‌ها در مقابل نیروی القا شده توسط زلزله می‌باشد. در این خصوص سازه‌های فولادی وضعیت بهتری نسبت به سازه‌های بتنی دارند زیرا فولاد از جمله مصالح مهندسی می‌باشد و رفتاری ایزوتروپیک دارد و از شکل‌پذیری مناسبی برخوردار است و با یک طرح مناسب می‌توان از خصوصیات فولاد در این زمینه استفاده کرد و رفتار لرزه‌ای یک سازه فولادی را به مراتب بهبود بخشید. اما در سازه‌های بتنی وضعیت متفاوت است. با توجه به خصوصیات بتن سازه‌های بتنی معمولاً سازه‌هایی سخت‌تر و شکننده می‌باشند. علت شکل پذیری کم سازه‌های بتنی خصوصیات بتن می‌باشد. رفتار بتن در فشار و کشش و برش یکسان نیست و می‌توان گفت فقط نیروی فشاری را بخوبی تحمل می‌نماید. این ضعف بتن با استفاده از میلگردهای فولادی تا حدود زیادی رفع گردیده است اما خود مشکلات دیگری به همراه دارد. با توجه به گستردگی استفاده از بتن در ساخت سازه‌های مختلف، ارائه طرحهایی که ظرفیت شکل پذیری این سازه‌ها را افزایش دهد به بهبود عملکرد و ایمنی این سازه‌ها کمک بسیار می‌کند.

در سالهای اخیر روشهای گوناگونی جهت بهبود عملکرد سازه‌های بتنی و همچنین مقاوم‌سازی سازه‌های قدیمی ارائه گردید و مورد آزمایش قرار گرفته است. برای مثال آزمایشات زیادی در خصوص استفاده از FRP و همچنین استفاده از سیستمهای کنترل فعال و غیر فعال صورت گرفته است. استفاده از سیستم‌های مهاربندی همگرا و واگرا نیز بسیار مورد توجه بوده و نمونه‌های بسیاری چه در حوضه تحقیقاتی و چه در حوضه کاربردی قابل ذکر است.

در سال ۲۰۰۰ آکیهیرو کونیسو و همکارانش با استفاده از یک میراگر جاری شونده سیستم مهاربندی را جهت تقویت قاب بتنی طراحی نمودند. در این آزمایش روشهای مختلفی جهت اتصال مهاربند به قاب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش نشان داد چنین سیستمی قادر است میرایی سازه و ظرفیت استهلاک انرژی را در سازه تا دو برابر افزایش دهد و خرابی‌ها را در سازه اصلی به حداقل برساند.

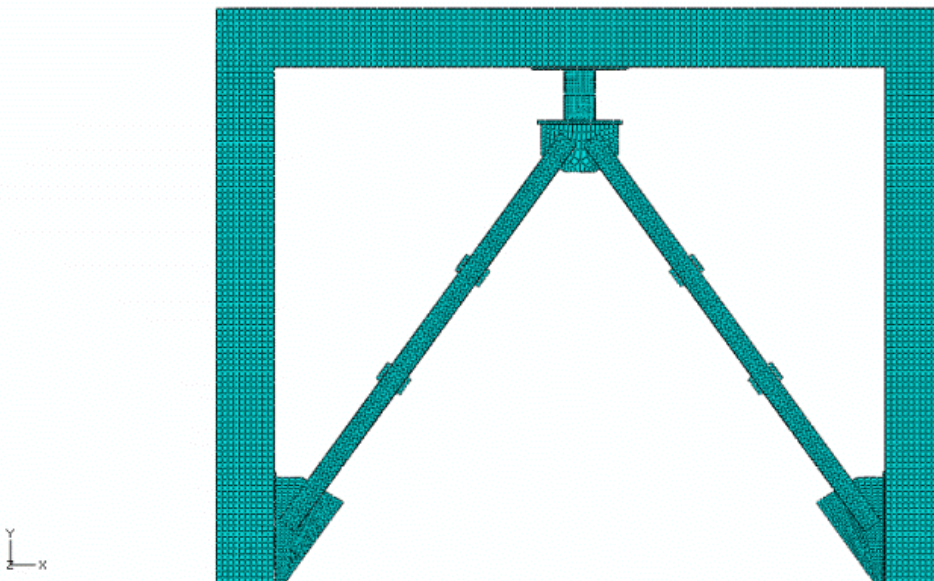


در یک تحقیق آزمایشگاهی توسط یوسف و غفارزاده در سال ۲۰۰۶ تاثیر بادبند همگرا بر روی عملکرد قاب بتن مسلح با استفاده از بارگذاری تغییرمکان چرخه‌ای مورد بررسی قرار گرفت که وجود بادبند همگرا باعث افزایش مقاومت و سختی قاب خمشی گردید. استهلاک انرژی نیز در این مدل تا حدی افزایش یافت.

در سال ۲۰۰۸ ژوان آندرس و همکارانش برای مهاربندی یک قاب بتنی ۱۰ طبقه از میراگر BRB استفاده کردند و تحلیل‌های متعددی با استفاده از شتاب نگاشت‌های مختلف انجام دادند. حاصل این استفاده از این میراگر افزایش ظرفیت استهلاک انرژی در سازه، به حداقل رسیدن خرابی در سازه اصلی و کاهش کار غیر الاستیک در قاب اصلی می‌باشد.

پارولکار و همکارانش در مرکز تحقیقات اتمی باهاما در هند در سال ۲۰۰۹ یک قاب سه طبقه بتنی در مقیاس یک سوم ابعاد واقعی را بر روی میز لرزان مورد آزمایش قرار دادند که نتایج این آزمایش کاهش ۳۰٪ در پاسخ سازه را نشان می‌دهد.

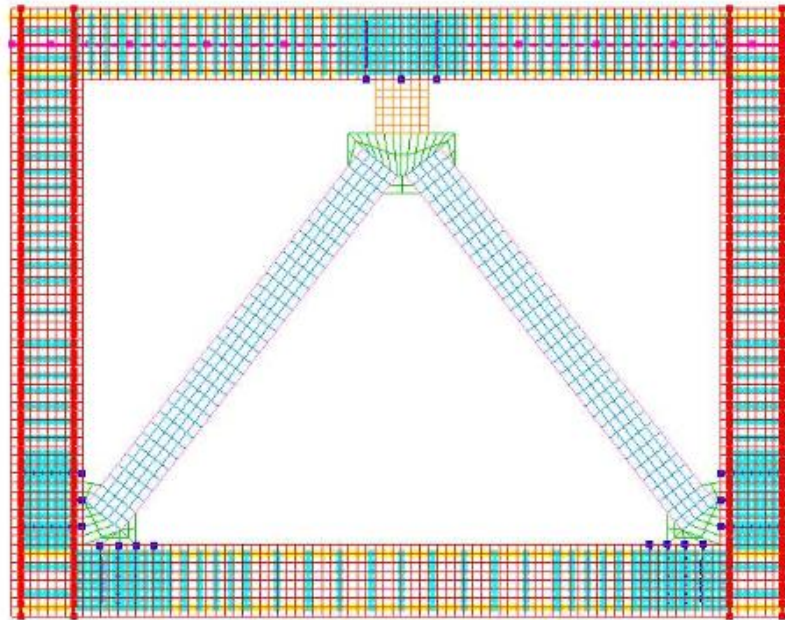
در پایان‌نامه حاضر از میراگر پانل برشی برای بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌های بتنی استفاده شده است. علت انتخاب این میراگر عملکرد خوب و در عین حال سادگی و کم هزینه بودن آن می‌باشد. در این پایان‌نامه دو قاب مورد بررسی قرار گرفت. یکی از قابها تحت آنالیز پوش‌آور قرار گرفت و عملکرد آن بدون میراگر و همراه با میراگر مقایسه شد. این قاب در اندازه‌های واقعی در نرم‌افزار ABAQUS مدل شد و تغییرمکان ۶ سانتیمتر به دو قاب اعمال گردید. تصویر قاب مش‌بندی شده قاب همراه با میراگر پانل برشی در شکل ۱-۲ آورده شده است.



شکل ۱-۲- قاب تحت بارگذاری پوش‌آور

در قاب دوم آنالیز تغییرمکان چرخه‌ای در دو حالت بدون میراگر و همراه با میراگر انجام شد و نتایج دو حالت مقایسه گردید. این قاب در مقیاس دو پنجم ابعاد واقعی در نرم‌افزار LS-DYNA مدل گردید. چهار نمونه از این مدل مورد بررسی قرار گرفت. نمونه اول قاب بتنی تنها می‌باشد، در نمونه دوم میراگر پانل برشی بوسیله تعدادی بولت به قاب متصل شده است، در نمونه سوم تعداد بولت‌ها افزایش یافته است و در نمونه چهارم علاوه بر افزایش تعداد بولت‌ها تعداد خاموت‌ها در محل اتصال میراگر به قاب دو برابر افزایش یافته است. در این تحلیل شش چرخه بارگذاری و باربرداری به قابها وارد شد و طی آنها روند ایجاد خرابی و

ترک در قاب بتنی و جاری شدن پانل برشی مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۲-۱ تصویر قاب همراه با پانل برشی بصورت مش بندی شده آورده شده است.



شکل ۲-۱- قاب تحت بارگذاری چرخه‌ای

در این پایان نامه فصل دوم به بررسی رفتار لرزه‌ای سازه‌ها بخصوص سازه‌های بتن مسلح اختصاص یافته است. در فصل سوم سیستم‌های کنترل سازه و میراگر پانل برشی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نمونه‌هایی از بهبود رفتار لرزه‌ای سازه‌های بتنی با استفاده از سیستم‌های مهاربندی و میراگرهای جاری شونده در فصل چهارم مرور شده است. در فصل پنجم روند مدل‌سازی و در فصل ششم نتایج بدست آمده از تحلیل بررسی شده است. در فصل هفتم نیز نتیجه‌گیری آورده شده است.

## فصل دوم

### رفتار لرزه‌ای سازه‌های بتنی

#### ۱-۲) نگرشی بر رفتار لرزه ای سازه ها

##### ۱-۱-۲) مقدمه ای بر دینامیک سازه‌ها

معادله عمومی حرکت دستگاه یک درجه آزادی خطی با استهلاك لزج تحت نیروی محرک هماهنگ  $F(t)$  بصورت زیر نوشته می شود:

$$m\ddot{\theta} + c\dot{\theta} + k\theta = P_0 \sin \bar{\omega}t \quad \text{رابطه (۱-۲)}$$

جواب کلی این معادله از ترکیب دو جواب عمومی و خصوصی بدست می آید. جواب عمومی این معادله دیفرانسیل یک تابع سینوسی با فرکانس  $\omega_D$  است که به علت استهلاك در طول زمان میرا می شود. اما جواب خصوصی معادله دیفرانسیل فوق یک تابع سینوسی با فرکانس  $\bar{\omega}$  می باشد که همان فرکانس محرک بوده و پایدار در طول زمان می باشد [۱].

$$\theta_h = e^{-\xi\omega t} (A \sin \omega_D t + B \cos \omega_D t) \quad \text{رابطه (۲-۲) جواب عمومی یا گذرا}$$

$$\theta_p = H(\bar{\omega}) \delta_s \sin(\bar{\omega}t - \phi) \quad \text{رابطه (۳-۲) خاص یا پایدار}$$

در روابط بالا  $\omega$ ،  $\omega_D$  و  $\bar{\omega}$  به ترتیب فرکانس طبیعی سازه بدون میرایی، فرکانس سازه با میرایی و فرکانس نیروی محرک وارد بر سازه می باشد. همچنین  $\delta_s$  و  $H(\bar{\omega})$  و  $\phi$  بصورت زیر می باشند:

$$\delta_s = \frac{p_0}{k} \quad \text{رابطه (۴-۲)}$$

$$H(\bar{\omega}) = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\bar{\omega}}{\omega}\right)^2\right]^2 + (2\xi\frac{\bar{\omega}}{\omega})^2}} \quad \text{رابطه (۵-۲)}$$

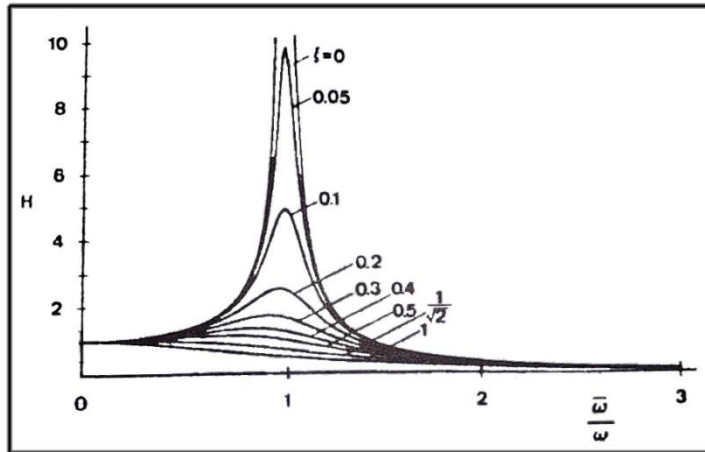
$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{2\xi\left(\frac{\bar{\omega}}{\omega}\right)}{1 - \left(\frac{\bar{\omega}}{\omega}\right)^2} \right) \quad \text{رابطه (۶-۲)}$$

رابطه (۵-۲) را تابع پاسخ سازه (response function) می نامند و جزو خصوصیات دینامیکی سازه محسوب می شود. نمودار  $H$  بر حسب نسبت  $\frac{\bar{\omega}}{\omega}$  را طیف پاسخ دستگاه می نامند که در شکل (۱-۲) دیده می شود. تابع پاسخ  $H(\bar{\omega})$  را ضریب ازدیاد دینامیکی  $D$ ، ضریب تشدید و ضریب بازتاب (dynamic magnification factor) نیز می گویند.

جواب کل از جمع جوابهای عمومی و خصوصی بدست می‌آید :

$$\vartheta = \vartheta_h + \vartheta \quad \text{رابطه (۷-۲)}$$

$$\vartheta = e^{-\xi\omega t} (A \sin \omega Dt + B \cos \omega Dt) + H(\bar{\omega}) \delta \sin(\bar{\omega}t - \phi) \quad \text{رابطه (۸-۲)}$$



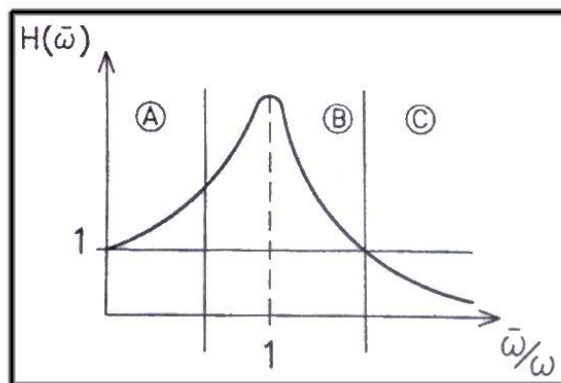
شکل (۱-۲) طیف پاسخ دستگاه یکدرجه [۱]

### ۲-۱-۲) خواص طیف پاسخ :

درک تابع پاسخ و طیف آن کمک زیادی به شناخت مسایل دینامیکی می‌کند. این طیف دارای خواص مهمی است که به بیان برخی از آنها می‌پردازیم :

الف) تابع پاسخ در واقع نسبت جابجایی یک دستگاه تحت نیروی  $P_0$  در حالت دینامیکی به استاتیکی می‌باشد. واضح است که اگر سرعت اعمال نیرو بسیار کم باشد یعنی  $\bar{\omega}$  به صفر نزدیک شود جابجایی‌های دینامیکی و استاتیکی یکسان شده و این نسبت برابر ۱ می‌شود [۱].

ب) طیف پاسخ را می‌توان به سه ناحیه تقسیم نمود: ناحیه سخت (A)، ناحیه تشدید (B) و ناحیه نرم (C) [۱].



شکل (۲-۲) تقسیم طیف پاسخ به نواحی سخت، تشدید و نرم [۱]

در ناحیه سخت، فرکانس محرک کمتر از فرکانس سازه است و در واقع سازه آنچنان سخت است که اگر آنرا از یک انتها با شتاب  $a$  حرکت دهیم انتهای دیگرش نیز با همان شتاب  $a$  حرکت می‌کند. در این حالت اثر رفتار دینامیکی قابل اغماض است و جابجایی‌های دینامیکی و استاتیکی به هم نزدیکند و تابع پاسخ اندکی بزرگتر از یک است. در ناحیه تشدید به علت نزدیک بودن فرکانس محرک و فرکانس طبیعی سازه، حالت تشدید اتفاق می‌افتد و هنگامی که این دو کاملاً برابر شوند از رابطه زیر داریم:

$$H(\bar{\omega}) = \frac{1}{\sqrt{[1-(1)^2]^2 + (2\xi)^2}}$$

$$H(\bar{\omega}) = \frac{1}{2\xi} \quad \text{رابطه (۹-۲)}$$

مثلاً یک سازه فولادی سخت با ضریب استهلاک  $0.01$  داریم:

$$H(\bar{\omega}) = 1/(2 \times 0.01) = 50$$

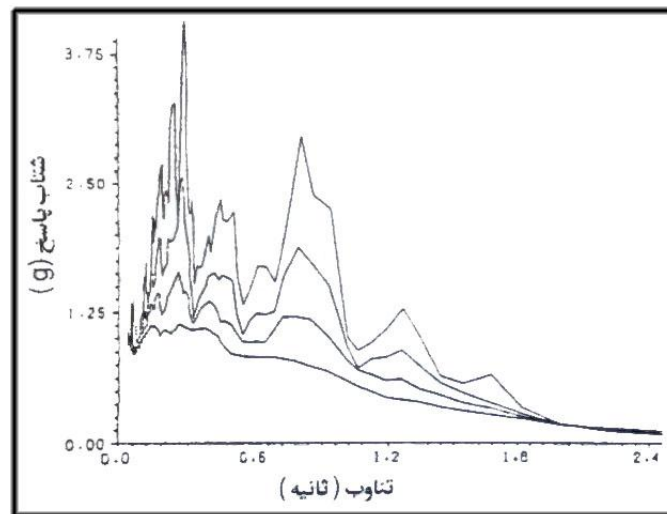
یعنی اگر دستگاه تحت یک نیروی معین در حالت استاتیکی یک سانتیمتر جابجا شود در حالت تشدید پنجاه سانتیمتر جابجایی دارد! بنابراین ناحیه تشدید از اهمیت خاصی برخوردار است و نقاط مجاور نقطه تشدید هم از ضرایب پاسخ بالایی برخوردارند. با کاهش فرکانس سازه، وارد ناحیه نرم می‌شویم جایی که بارگذاری آنقدر سریع است که سازه آنرا حس نمی‌کند. عبارت دیگر، همینکه سازه شروع به واکنش نماید و جابجایی آغاز شود، جهت نیرو عوض شده و حرکت معکوس می‌گردد و در نتیجه جابجایی از حالت استاتیکی کمتر می‌گردد. به همین دلیل است که سازه‌هایی که تناوب بالایی دارند شتابهای حاصل از زلزله را که مقدارشان بزرگ اما تناوبشان کم است را حس نمیکنند زیرا سرعت بارگذاری آنچنان زیاد است که پاسخ در ناحیه نرم قرار می‌گیرد [۱].

(ج) اگر چه تابع پاسخ عمدتاً به نسبت فرکانسهای محرک و سازه بستگی دارد و در اغلب موارد استهلاک نقش چندانی را بازی نمی‌کند اما در نقطه تشدید و نقاط مجاور آن بعکس استهلاک تعیین کننده است و بیشترین نقش را در کاهش پاسخ دینامیکی دارد [۱].

می‌توان نتیجه گرفت که سازه بطور طبیعی میزان تاثیر هماهنگی‌هایی را که در ناحیه تشدید قرار گیرند افزایش می‌دهد و با توجه به شکل ۲-۲ اصولاً هماهنگی‌هایی را که در ناحیه نرم واقعند حس نمی‌کند. اینجاست که تاثیر استهلاک هویدا می‌شود. زیرا اگر چه استهلاک در نواحی سخت و نرم تاثیر چندانی ندارد اما بعلاوه اثری که در ناحیه تشدید دارد می‌تواند نقش موثری در کاهش پاسخ دستگاه داشته باشد. بهمین جهت در مهندسی زلزله، شناسایی شیوه‌های افزایش ظرفیت جذب و استهلاک انرژی ارتعاشی از اهمیت خاصی برخوردار است [۱].

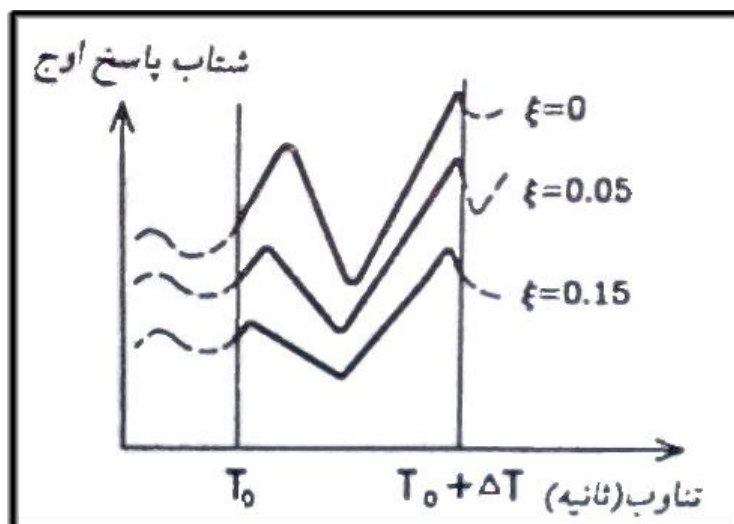
### ۲-۱-۳) تاثیر زمان تناوب و استهلاک سازه :

بسیار اتفاق می‌افتد که پس از وقوع یک زلزله کارشناسان از اینکه دو سازه نسبتاً مشابه رفتاری مختلف داشتند تعجب کرده و یکی را بطور قطعی ضعیف تر از دیگری می‌پندارند در حالیکه نیروهای زلزله در حوزه ارتجاعی بستگی زیادی به تناوب سازه دارد و همان طوریکه در طیف زلزله طیس شکل ۲-۳ دیده می‌شود شتاب پاسخ سازه ای با تناوب  $0.2$  و استهلاک  $0.05$  برابر  $1/96g$  و نیروی زلزله  $1/96W$  (که در آن  $W$  وزن سازه است) می‌باشد. حال اگر تناوب سازه به  $0.25$  ثانیه افزایش یابد شتاب پاسخ ناگهان، برابر  $2/5g$  و نیروی زلزله  $2/5W$  می‌گردد. به عبارت دیگر دو سازه کاملاً مشابه با تناوبهای اندکی متفاوت، می‌توانند نیروهای کاملاً متفاوتی را در حین زلزله دریافت نمایند [۲].



شکل (۳-۲) طیف شتاب زلزله طیس ۱۳۵۷ برای نسبت‌های استهلاک ۲، ۵، ۱۰، و ۲۰ درصد [۲]

شکل ۳-۲ نشان می‌دهد که گاهی تغییرات جزئی تناوب می‌تواند موجب تغییرات شدید در شتاب پاسخ و در نتیجه نیروی زلزله شود. مطابق شکل ۴-۲ این تغییرات علاوه بر تناوب به استهلاک هم بستگی دارند و با افزایش استهلاک از شدتشان کاسته می‌شود. افزایش استهلاک همواره موجب کاهش نیروهای زلزله است بنابراین به عنوان یک اصل کلی در مهندسی زلزله، افزایش استهلاک برای کاهش نیروهای زلزله مطلوب و مدنظر است. حساسیت نیروی زلزله به تغییرات کلی تناوب یکسان نیست. برای سازه‌های خیلی سخت، شتاب پاسخ تقریباً برابر شتاب زلزله است. با افزایش تناوب سازه وارد ناحیه تشدید شده و نسبت شتاب پاسخ به شتاب پی افزایش می‌یابد. پس از گذشتن از این ناحیه، به ناحیه نرم می‌رسیم که مختص سازه‌های با تناوب بالاست که نیروی نسبتاً کمی دریافت می‌کنند. از این جهت طیف پاسخ زلزله مشابه طیف پاسخ دستگاه یک درجه است که قبلاً در مورد آن صحبت شد. [۲]



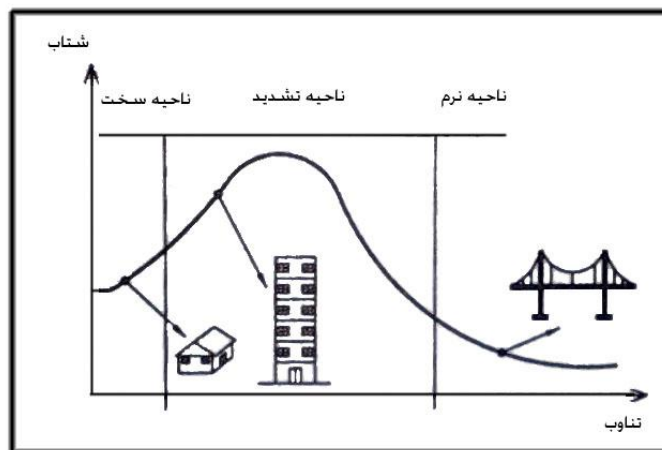
شکل (۴-۲) حساسیت موضعی نیروهای زلزله به تغییرات تناوب و استهلاک [۲]

مشکل اینجاست که نواحی سه گانه فوق برای زلزله‌های مختلف یکسان نیستند زیرا بستگی به عوامل متعددی دارند که از میان آنها دو عامل بیش از بقیه موثرند. یکی خواص اولیه زلزله که ناشی از عمق، بزرگی و ... است و دیگری خواص خاک ناحیه مورد

نظر می‌باشد. این دو در محتوای فرکانسی زلزله و در نتیجه در تعیین محدوده نواحی سه گانه فوق موثرند، بنابراین با توجه به نتایج زلزله‌های قبلی و شرایط زمین ساختی مناطق مختلف کشورمان می‌توان محدوده نواحی سه گانه فوق را مورد تحقیق قرار داد که مسلماً نتایج چنین تحقیقاتی می‌تواند بسیار سودمند واقع شود [۲].

## ۲-۱-۴) تاثیر سختی بر رفتار لرزه‌ای سازه :

افزایش سختی موجب کاهش تناوب می‌شود و در نتیجه با توجه به شکل ۲-۵ سازه را اگر در ناحیه نرم باشد به سمت ناحیه تشدید برده و شتاب پاسخ را افزایش می‌دهد. به عکس اگر سازه در ناحیه تشدید باشد، آن را به سمت ناحیه سخت برده و شتاب پاسخ را کاهش می‌دهد. بنابر این افزایش سختی روی شتاب پاسخ تأثیری دوگانه دارد. از آنجا که نواحی سه گانه جایگاه ثابتی ندارند نمی‌توان با قطعیت بیان کرد که آیا سخت کردن یک سازه به افزایش نیروهای زلزله می‌انجامد یا به کاهش آن، به همین دلیل نقش طبقه نرم در یک سازه مدتها مورد بحث و جدل بوده است. اول اعتقاد بر این بود که وجود طبقه نرم باعث کاهش سختی و در نتیجه کاهش نیروهای زلزله شده ولی بعد دیده شد این مسئله موجب تمرکز انرژی در یک طبقه و در نتیجه انهدام آن طبقه می‌شود. دانستن دو نکته به رد وجود طبقه نرم در سازه کمک می‌کند. یکی اینکه با کاهش سختی معلوم نیست که نیروهای زلزله کاهش یابد. دوم اینکه افزایش سختی که معمولاً با ایجاد عناصر باربر جانبی ایجاد می‌شود با افزایش مقاومت همراه است. حال حتی اگر بپذیریم که افزایش سختی موجب افزایش نیروی زلزله می‌شود مشخص نیست که این افزایش نیرو از آن افزایش مقاومت بیشتر است یا خیر. جهت رفع این ابهام باید ملاک را جابجایی سازه در نظر گرفت نه نیروی وارده. اگر با افزایش سختی، جابجایی‌ها کاهش یابند، سازه در جهت افزایش پایداری حرکت کرده است و برعکس [۲].



شکل (۲-۵) تغییرات نیروی زلزله نسبت به تناوب [۲]

## ۲-۱-۵) تاثیر رفتار غیر ارتجاعی بر نیروی زلزله :

با داشتن طیف شتاب یک زلزله میتوان نیروی وارد به سازه را از طریق ضرب شتاب طیف در وزن سازه بدست آورد. اما نکته قابل توجه این است که این نیروها از مقادیر توصیه شده در آیین نامه‌ها افزونترند. باید توجه داشت که این نیروها در حوزه ارتجاعی داده شده است زیرا تناوب سازه در ناحیه ارتجاعی بدست آمده است و با ورود به حوزه خمیری دیگر نمی‌توان از طیف

ارتجاعی استفاده کرد. پس این سوال مطرح می‌شود که سازه‌هایی که برای نیروهای آیین‌نامه‌ای طرح شده‌اند چگونه می‌توانند نیروهای بزرگ حاصل از زلزله را تحمل کنند. پاسخ را باید در رفتار غیر ارتجاعی جست [۲].

اگر در یک سازه نیروی وارده از سوی زلزله بیش از مقاومت آن باشد، سازه وارد محدوده غیر ارتجاعی می‌شود و جابجایی‌های خمیری حاصل می‌شود در این حال اگر نیاز نرمی یا شکل‌پذیری سازه (ductility demand) تامین شده باشد یا به عبارت دیگر ضریب نرمی مقدار مناسبی را دارا باشد، سازه به نحو مطلوبی از طریق تغییر شکل‌های پلاستیک، انرژی وارده را مستهلک می‌نماید و در عین حال پایداری خود را حفظ می‌نماید. اما اگر سازه از شکل‌پذیری مناسبی برخوردار نباشد توان مقابله با نیروی زلزله را نداشته و منهدم می‌گردد. هر سازه بسته به سیستم باربری جانبی، دارای شکل‌پذیری خاصی می‌باشد که آیین‌نامه‌ها با توجه به این موضوع از مقدار نیاز مقاومتی سازه (strength demand) در جهت اقتصادی می‌کاهند [۲].

همانگونه که از مطالب بالا استنتاج می‌شود خواص دینامیکی سازه تاثیر چشمگیری بر مقدار شتاب و نیروی ناشی از زلزله دارد. تاثیر این خواص یعنی نسبت میرایی و زمان تناوب در طیف پاسخ سازه به وضوح قابل مشاهده است. افزایش هر کدام از آنها به تنهایی و یا افزایش هم زمان آنها باعث کاهش شتاب وارد به سازه می‌شود. کاهش شتاب نیز موجب کاهش نیروی وارد به سازه می‌گردد.

در سالهای گذشته مهندسين سعی داشتند با افزایش مقاومت، سازه را در مقابل زلزله ایمن نمایند و سعی بر این بود که سازه را در ناحیه ارتجاعی نگه دارند. اما این افزایش مقاومت با افزایش سختی همراه بود که کاهش زمان تناوب و افزایش نیروی زلزله را موجب می‌شود. این عملکرد باعث افزایش هزینه‌های ساخت می‌گردد. از سوی دیگر به دلایل اقتصادی نمی‌توان سازه را برای بزرگترین زلزله ممکن طراحی نمود. اگرچه تشخیص مشخصات بزرگترین زلزله نیز غیر ممکن می‌باشد. بنابراین در زلزله-های بزرگ سازه وارد ناحیه غیر خطی می‌شود.

بنابر آنچه ذکر شد رویکرد مهندسی زلزله در سالهای اخیر بهینه کردن خواص دینامیکی سازه در جهت کاهش نیروی وارده به سازه و هدایت تغییرشکل‌های غیر ارتجاعی به محل‌های از پیش تعیین شده می‌باشد. از اینرو روش‌هایی جهت افزایش پریود طبیعی سازه مانند سیستم‌های جداساز لرزه‌ای و روش‌هایی جهت افزایش نسبت میرایی مانند میراگرهای جاری شونده ابداع شد.

در سالهای اخیر مطالعات گسترده‌ای بر روی روش‌های کنترل سازه‌ها در برابر زلزله انجام گرفته است. استفاده از سیستم‌های میراگر در سازه‌ها باعث بهبود رفتار سازه در مقایسه با سیستم‌های CBF بسیار سخت و MRF بسیار نرم می‌شود.

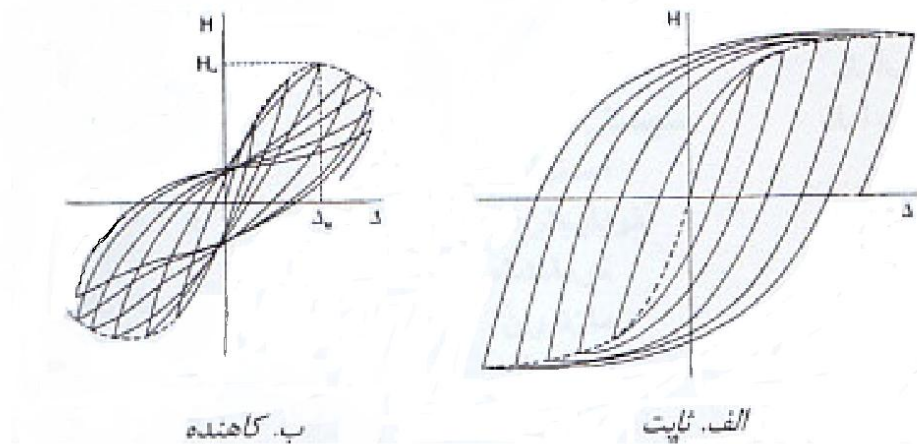
در ادامه سیستم‌های فوق‌الذکر با هم مقایسه شده‌اند.



## ۲-۲) رفتار لرزه‌ای سازه‌های بتنی

### ۱-۲-۲) خواص لرزه‌ای سازه‌های بتنی

رفتار یک سازه در برابر نیروی زلزله از پیچیدگی‌های خاصی برخوردار است و با تصویر سازه‌ای که از مجموعه ضوابط آیین نامه‌های زلزله تداعی می‌شود تفاوت بسیار دارد. در این میان خواص خود سازه، بویژه رفتار هیستریزیس ( hysteresis characteristics) و ظرفیت تغییر شکل سازه نقش تعیین کننده‌ای در پایداری سازه در برابر زلزله دارند. اگر مقاومت و سختی یک سازه تحت بارگذاری متناوب در حوزه غیر ارتجاعی ثابت بماند نوع رفتار هیستریزیس را ثابت می‌خوانند و اگر کاهش یابد آن را کاهشده می‌نامند. همچنین کاهشدهی سختی و مقاومت از پایداری لرزه‌ای کاسته و موجب افزایش جابجایی سازه در زلزله می‌شود. بنابراین در یک سازه هر قدر شکل‌پذیری بیشتر و خواص پسماند از ثبات زیادتری برخوردار باشد درجه ایستایی سازه در برابر زلزله زیادتر است [۲].



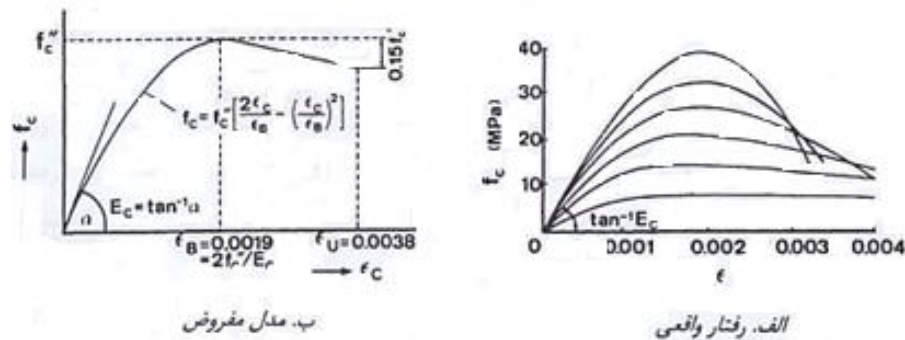
شکل ۲-۶ مقایسه رفتار پسماند ثابت و کاهشده [۲]

از این رو طی چند دهه اخیر تحقیقات گسترده‌ای برای تبیین خواص هیستریزیس سازه‌های مختلف انجام شده تا به کمک آن رفتار لرزه‌ای سازه‌ها شناسایی و کنترل شود. شکل‌پذیری و رفتار هیستریزیس یک سازه به نوع مصالح و نوع سازه بستگی دارد.

### رفتار هیستریزیس و شکل‌پذیری مصالح

بتن

مقاومت فشاری بتن را می‌توان از آزمایش استوانه‌ای به ارتفاع ۳۰ و قطر ۱۵ سانتیمتر بدست آورد و یا با شکستن مکعبی ۲۰ در ۲۰ سانتیمتر تعیین نمود. در شکل ۲-۷ نمودار سهمی گونه تنش-کرنش برای استوانه بتنی داده شده است.

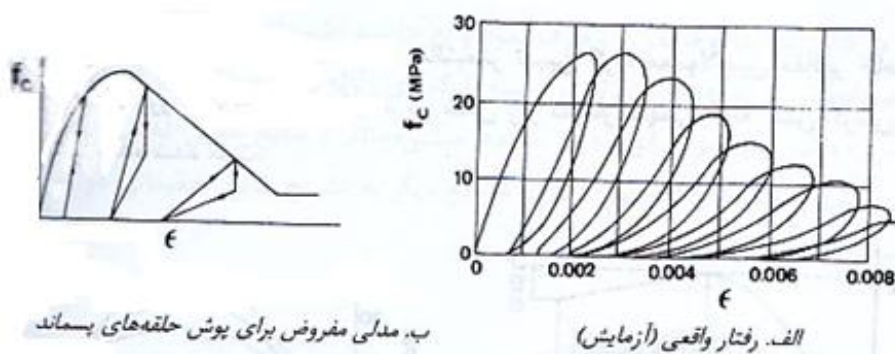


شکل ۷-۲ نمودار تنش - کرنش بتن تحت بار فشاری [۲]

ضریب ارتجاعی بتن را می‌توان  $E_c = 15100 \sqrt{f'_c}$  ( $\text{kg/cm}^2$ ) در نظر گرفت. تنش بیشینه معمولاً در کرنش ۰/۰۰۲ بدست می‌آید. کاهش تنش بعد از رسیدن به نقطه اوج بستگی به مقدار میلگرد عرضی دارد. جهت کاربردی کردن منحنی تنش-کرنش بتن مدل‌های متعددی ارائه شده که رفتار بتن را تا حدی ساده سازی کرده‌اند. برای مثال مدل هوگنشتاد با رابطه زیر ارائه شده است.

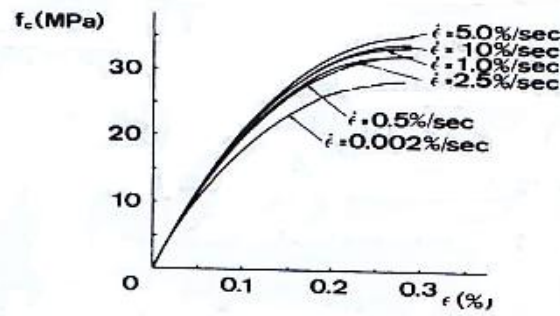
$$f_c = f_c^n \left[ \frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_B} - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_B} \right)^2 \right] \quad \text{رابطه (۱-۱)}$$

در شکل ۸-۲ رفتار بتن تحت بار تناوبی نشان داده شده است. در شکل الف نتایج آزمایش و در شکل ب مدل ساده شده‌ای برای پوش حلقه‌ها آورده شده است.



شکل ۸-۲ نمودار تنش - کرنش بتن تحت بارگذاری متناوب [۲]

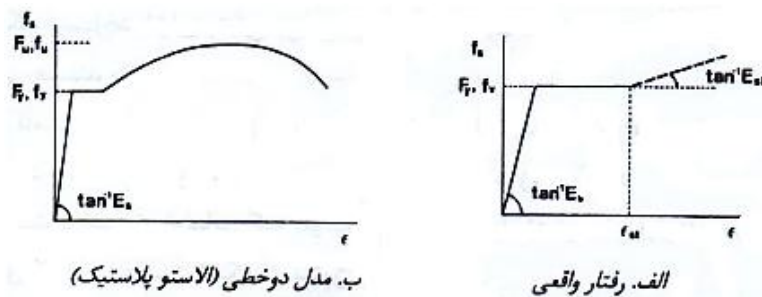
ACI مقاومت کششی بتن را  $2\sqrt{f'_c}$  ( $\text{kg/cm}^2$ ) و مقاومت کششی حاصل از آزمایش استونهای (تست برزیل) را ۵۰ تا ۷۵ درصد این مقدار توصیه کرده است. چون زمان از مؤلفه‌های بارگذاری لرزه‌ای می‌باشد تأثیر سرعت بر مقاومت از اهمیت زیادی برخوردار است. در شکل ۹-۲ تأثیر سرعت بارگذاری بر مقاومت در یک نمونه خاص نشان داده شده است.



شکل ۲-۹ تاثیر سرعت بارگذاری بر مقاومت بتن [۲]

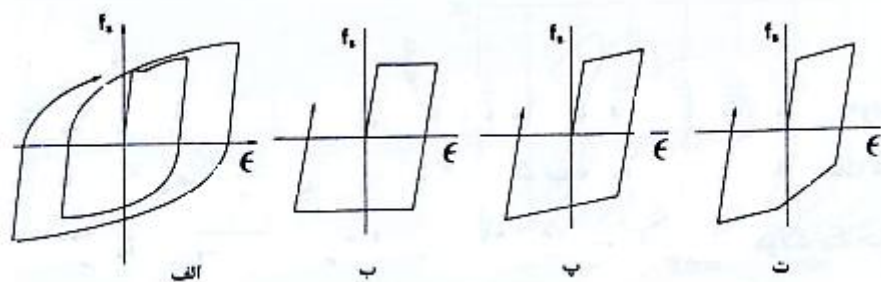
### فولاد

رفتار تنش- کرنش فولاد در شکل ۲-۱۰ الف نشان داده شده است. معمولاً رفتار فولاد به وسیله یک نمودار دو خطی مدل می‌شود. این مدل در شکل ۲-۱۰ ب آمده است. ضریب ارتجاعی فولاد  $E_s$  حدوداً برابر  $2.5 \times 10^6$  ( $\text{kg/cm}^2$ ) است. هر قدر نسبت تنش نهایی به تسلیم ( $F_u/F_y$ ) بزرگتر از یک باشد، فولاد شکل‌پذیری بیشتری دارد.



شکل ۲-۱۰ نمودار تنش - کرنش فولاد [۲]

رفتار هیستریزس فولاد تحت بارگذاری متناوب در شکل ۲-۱۱ نمایش داده شده است. در آزمایش‌هایی که بار با سرعت اعمال می‌شود، فولاد مقاومت بیشتری نشان می‌دهد.



شکل ۱۱-۱ رفتار هیستریزس فولاد. الف. رفتار واقعی، ب. مدل خمیری ارتجاعی، پ. مدل دو خطی، ت. مدل بوشینگر [۲]

## ۱-۲-۱) سازه‌های بتنی

با توجه به عملکرد ساختمان‌های بتنی در زلزله‌های مخرب مشخص می‌گردد که دارای نقطه ضعف‌هایی هستند مانند:

- عدم تأمین مقاومت برشی لازم در هر طبقه (توسط ستون‌ها و دیوارهای برشی)
  - شکست برشی تیرها و ستون‌ها که موجب تردی رفتار سازه می‌گردد
  - شکست برشی ستون‌هایی که طولشان به طور ناخواسته توسط دیوارها و سایر عناصر غیر سازه‌ای کوتاه شده است (شکست ستون کوتاه)
  - لغزش میلگردها در اتصال تیر به ستون
  - شکست برشی اتصال تیر به ستون
  - شکست ترد دیوارهای برشی که دارای بازشو هستند و با دیوارهایی که با اعضای افقی بهم متصلند (دیوار برشی درگیر)
  - پیچش ناشی از برون محوری
  - تمرکز تخریب در یک طبقه خاص بدلیل توزیع نامنظم سختی در ارتفاع
  - جدا شدن تیغه‌ها، دیوارها و نماسازی از سازه اصلی
- بعضی از این کاستی‌ها را با اصلاح طرح سازه‌ای و ارائه جزئیات مناسب قابل حل می‌باشند [۲].

## اندرکنش بتن و میلگرد

## اتصال بتن و میلگرد

اتصال بین بتن و میلگرد ناشی از دو عامل چسبندگی شیمیایی و اصطکاک می‌باشد. با شروع لغزش، چسبندگی شیمیایی از بین رفته و در لغزش‌های بعدی فقط عامل اصطکاک حضور دارد. در میلگرد آجدار، آج‌ها در داخل بتن گیر کرده و مانع از ادامه لغزش می‌گردند و در نتیجه مقاومت در برابر لغزش افزایش می‌یابد. تا زمانیکه بتن دور میلگرد خورد شود، وجود میلگرد عرضی باعث می‌شود میلگردهای طولی در بتن دیرتر دچار لغزش شوند [۲].

## تأثیر قیدی (محصورکنندگی) میلگرد عرضی

در یک نمونه تحت آزمایش قابل مشاهده است که با افزایش بار و نزدیک شدن تنش به حد مقاومت فشاری ترک‌های ایجاد شده در بتن در جهت عمود در راستای نیرو از هم باز می‌شوند. وجود میلگردهای عرضی که همان تنگه‌ها هستند مانع باز شدن سریع ترک‌ها می‌شود و باعث افزایش شکل‌پذیری و مقاومت در عضو بتنی می‌گردد. در شکل ۲-۱۱ تأثیر وجود تنگه‌ها بر روی میزان مقاومت عضو بتنی قابل مشاهده است. قابل مشاهده است که با کاهش فاصله میلگردهای عرض مارپیچ، حداکثر مقاومت عضو فشاری افزایش می‌یابد. همچنین افزایش این میلگردها سرعت و میزان کاهش مقاومت در اعضا را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. در شکل ۲-۱۲ نیز تأثیر تنگه‌های مربعی بر سرعت کاهش مقاومت پس از به اوج رسیدن آن آمده است. با افزایش میزان میلگرد عرضی مربع شکل، تغییر در میزان حداکثر مقاومت در این اعضا به چشم نمی‌خورد اما میزان و سرعت کاهش مقاومت کم می‌شود [۲].