

# روش طیف ظرفیت برای تحلیل غیرخطی سازه ها

تألیف و تدوین: عباس حق الهی، عضو هیأت علمی دانشکده عمران دانشگاه شهید رجایی  
عبدالرضا سروقد مقدم، استادیار پژوهشکده مهندسی سازه moghadam@dena.iiees.ac.ir

## ۱- چکیده

می‌شود. روش طیف ظرفیت حداکثر پاسخ را با در نظر گرفتن ظرفیت سازه و نیاز حرکت زمین بر مبنای طیفهای شتاب و تغییر مکان برآورد می‌کند (به همین دلیل نام طیف ظرفیت برای آن انتخاب شده است). استفاده از پارامترهای مشابه در برآورد ظرفیت و نیاز، امکان استفاده از یک روش حل گرافیکی را میسر می‌سازد و خصوصیات کلیدی مانند سختی، مقاومت و جذب انرژی (میرایی) در پاسخ لرزه ای سازه را مشخص می‌کند.

در این مقاله تصویری کلی از روش طیف ظرفیت به منظور تعیین حداکثر پاسخ زلزله ارائه شده است. مثالهایی که به صورت گرافیکی حل شده اند نحوه برآورد حداکثر پاسخ در برابر زلزله را برای مدل‌های ساده ساختمانهای جدید، موجود و قدیمی نشان می‌دهند. این توضیحات منحصر به محاسبه پاسخ کلی سازه می‌باشد. محاسبه پاسخ اعضای سازه ای، ارزیابی نیروها و تغییر مکانهای نهایی در آنها خارج از مجال این بحث می‌باشد. بیشتر مباحثی که در این مقاله بحث شده است از مباحث تئوری طیف ظرفیت [۲] و [۳] اتخاذ شده است.

## ۳- زمینه

در آیین نامه های موجود غالباً استفاده از روشهای خطی در طراحی سازه کفایت می‌کند (به استثناء ساختمانهایی که دارای سیستم جداگر در محل پی هستند). به موازات استفاده از تحلیل خطی، مطابق ضوابط، محدودیتهایی در مصالح مصرفی و شکل سازه اعمال و جزئیات خاصی توصیه می‌شود تا شکل پذیری لازم در سازه تأمین گردد. در روش تحلیل خطی آیین نامه ها، رفتار خطی سازه معمولاً با ضریب  $RW$  (یا  $R$ ) به رفتار غیرخطی سازه مرتبط می‌گردد. شکل (۱) نمای کلی از ترکیب عوامل مختلف در  $RW$  را نشان می‌دهد. در این شکل، پارامترها بر مبنای برش پایه تقسیم بر وزن ساختمان  $V/W$  (واحد شتاب) و نسبت به پیوند ترسیم شده است.

در این مقاله درباره روشهای تحلیل غیرخطی استاتیکی بحث، روش طیف ظرفیت برای محاسبه حداکثر پاسخ سازه تشریح و با ذکر چند مثال از ساختمانهای جدید، ساختمانهای موجود و ساختمانهای قدیمی نحوه کاربرد این روش مشخص گردیده است.

**کلیدواژه ها:** تحلیل غیرخطی، مدل الاستیک، ضریب رفتار، تغییر مکان هدف، منحنی بار تغییر مکان، طیف ظرفیت، تقویت سازه های قدیمی.

## ۲- مقدمه

رفتار سازه ها بعد از محدوده ارتجاعی، توسط روشهای تحلیل دینامیکی غیرخطی بررسی می‌گردد که در این روشها معمولاً از چند نمونه شتابنگاشت مربوط به زلزله های گذشته استفاده می‌شود. تحلیل دینامیکی غیرخطی بسیار پیچیده و وقت گیر است و به صورت یک روند محاسباتی کاربردی در دفاتر مهندسی قابل استفاده نمی‌باشد. بر این اساس، ایده تحلیل غیرخطی استاتیکی مطرح شده است. سه روش عمده برای تخمین تغییر مکان حداکثر در تحلیل غیرخطی استاتیکی وجود دارد که عبارتند از [۱]:

۱- استفاده از یک سیستم یک درجه آزاد معادل؛

۲- استفاده از مدل الاستیک سازه؛

۳- روش طیف ظرفیت.

در روش اول رفتار نهایی یک سیستم یک درجه آزاد معادل سیستم سازه ای مورد نظر محاسبه می‌گردد و تغییر مکان حداکثر سازه (تغییر مکان هدف) تعیین می‌گردد. در روش دوم با استفاده از یک مدل الاستیک سازه و با استفاده از روش تاریخچه زمانی یا روش طیفی، تغییر مکان هدف به دست می‌آید. در روش سوم که یکی دیگر از راههای تحلیل می‌باشد، ظرفیت سازه با نیاز حرکت شدید زمین مقایسه و بر اساس آن، حداکثر پاسخ سازه در برابر زلزله محاسبه -

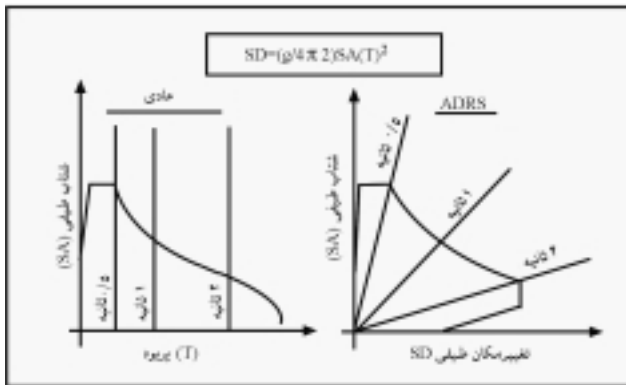
در مرجع [5] پیشنهاد شده است که حداکثر پاسخ در نقطه تعادل بین نیاز لرزش زمین و ظرفیت سازه اتفاق می افتد. این نقطه تعادل در شکل (۱) در محل تقاطع طیف هدف و منحنی ظرفیت سازه در محل پریود موثر ( $T_{eff}$ ) مشخص شده است.

برای تبدیل منحنی شتاب بر مبنای پریود به منحنی شتاب بر مبنای تغییرمکان می توان از رابطه (۱) استفاده کرد [6]:

$$SD = \left( \frac{g}{4\pi^2} \right) T^2 SA \approx 10T^2 SA \quad (1)$$

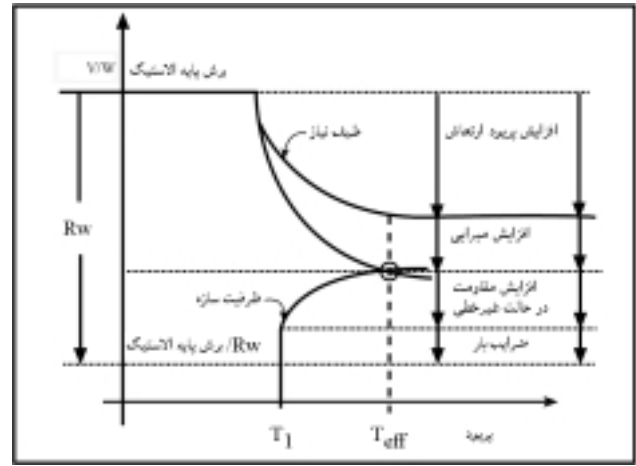
در این رابطه،  $SD$  تغییرمکان طیفی بر حسب سانتیمتر،  $g$  شتاب جاذبه برابر ۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه،  $T$  پریود سازه بر حسب ثانیه و  $SA$  شتاب طیفی بر حسب  $(g)$  می باشد.

منحنی طیف پاسخ شتاب-تغییرمکان (*Acceleration Displacement Response Spectrum*) در شکل (۲) نشان داده شده است. تمام پاسخهای حداکثر در این فرمتها مشخص می باشند. البته فرمت معمولی بر روی پریود و شتاب تأکید دارد؛ در حالی که در فرمت "ADRS" امکان مشاهده همزمان حداکثر شتاب و تغییرمکان طیفی وجود دارد که به طور خاص در تحلیل غیرخطی مفید می باشد.



شکل (۲): فرمهای ترسیم طیف پاسخ [۴]

در فرمت *ADRS* خطوط با پریود ثابت به صورت شعاعی از مرکز مختصات ترسیم می شوند. شکل (۳) همان شکل (۱) است که بر مبنای فرمت *ADRS* ترسیم شده است.  $D_u$  در شکل (۳) حداکثر تغییرمکان غیرخطی سیستم را نشان می دهد که از محل تقاطع منحنی طیف نیاز که بر اثر میرایی بیش از ۰.۵٪ اصلاح شده است و منحنی ظرفیت سیستم به دست می آید. شکل (۳) برآورد مناسبی از پاسخ غیرخطی یک سیستم را نشان می دهد.



شکل (۱): عوامل موثر در  $R_w$  [۴]

چهار عامل موثر در  $R_w$  عبارتند از:

- ۱- کاهش تأثیر زلزله به علت افزایش پریود سازه؛
- ۲- کاهش تأثیر زلزله به علت افزایش اتلاف انرژی (میرایی بیش از مقدار عادی که معمولاً ۰.۵٪ در نظر گرفته می شود)؛
- ۳- افزایش مقاومت از جاری شدن اسی مقاطع تا حد نهایی آنها (افزایش مقاومت)؛
- ۴- افزایش مقاومت از نیروهای طراحی تا تسلیم مصالح (ضرایب بار).

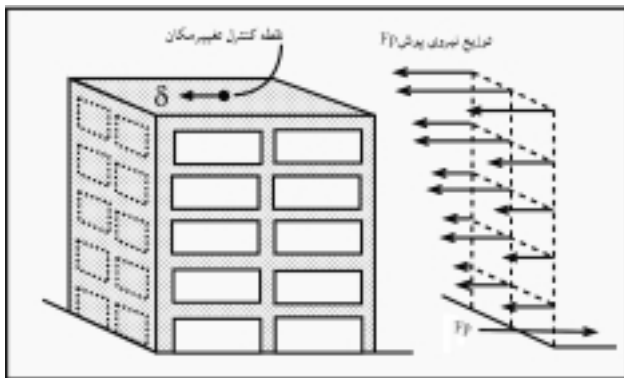
ترکیب سه عامل اول مربوط به توانایی سازه می باشد که بر پایه شکل پذیری استوار است. ضریب چهارم که مربوط به ضرایب بار می باشد فقط برای ساختمانهایی که با روش تنش مجاز طراحی می شوند منظور می گردد. در شکل (۱) ظرفیت سازه با یک منحنی نشان داده شده است که از پریود اولیه سازه ( $T_1$ ) شروع می شود و با این پریود باقی می ماند تا تعدادی از اعضای سازه به حد تسلیم برسند؛ پس از این وضعیت، پریود ارتعاش سازه در سطح پاسخ افزایش می یابد.

پریود اولیه سازه ( $T_1$ ) در شکل (۱)، پریود واقعی آن را نشان می دهد که مقداری بزرگتر از پریود سازه محاسبه شده بر اساس ضوابط آیین نامه ها می باشد. طیف "برش پایه الاستیک" در شکل (۱) نتیجه حاصل ضرب ضرایب زلزله بدون اثر  $R$  است. این طیف در پریودهای کوتاه، مقدار ثابتی است و در پریودهای بلند کاهش می یابد. مقادیر این طیف تقریباً معادل با طیف طرح آیین نامه با ۰.۵٪ میرایی می باشد.

طیف نیاز زلزله همان طیف "برش پایه الاستیک" نشان داده شده در شکل (۱) می باشد که برای پریودهای بالاتر از  $T_1$  کاهش یافته است.

اینرسی باشد که در هنگام پاسخ دینامیکی به سازه وارد می شود.  
 ۳- در حالت های خاص بکارگیری روال خاصی در تحلیل ضروری است. مانند زمانی که ساختمان غیرمستقر باشد یا تأثیرات مدهای پیچشی و یا نامنظمی پایه یا برخورد دو ساختمان مجاور و غیره در نظر گرفته شود. اگرچه این موضوع مرتبط با بحث می باشد، اما طرح جزییات آن در حوصله این مقاله نمی گنجد.

شکل (۴)، یک مثال از بارگذاری یک مدل ساختمانی ساده موجود را نشان می دهد. نیروهای پوش به مدل اعمال می شوند و نمودار نیرو (مثلاً نیروی برشی پایه) نسبت به تغییر مکان نقطه کنترل (مثلاً بام) ترسیم می گردد. این منحنی مبنای *Pushover* می باشد.



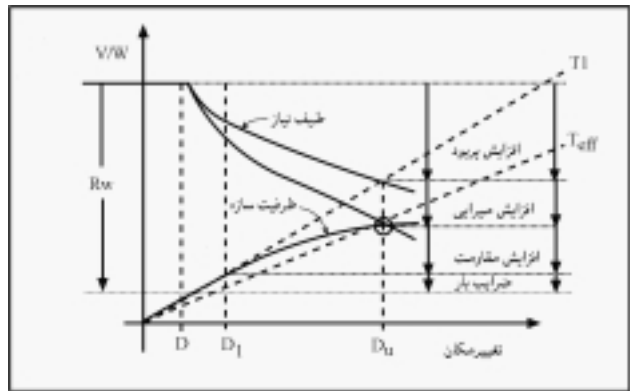
شکل (۴): یک نمونه بارگذاری روی یک ساختمان برای تحلیل غیرخطی استاتیکی [۴]

مراحل ترسیم یک منحنی *Pushover* به تعداد زیادی مراحل بارگذاری به صورت گام به گام نیاز دارد. در هر مرحله با افزایش نیروی پوش، تعداد تسلیم المانها (یا انهدام آنها) افزایش می یابد. شکل (۵) یکی از شیوه های رسم گام به گام به منحنی *Pushover* را نشان می دهد.

### ۵- روش طیف ظرفیت

در روش طیف ظرفیت، فرض می شود که حداکثر پاسخ غیرخطی سازه، معادل تغییر مکان یک سیستم معادل الاستیک با پریود مؤثر ( $T_{eff}$ ) و بر اساس محل تقاطع دو منحنی ظرفیت و نیاز مطابق شکل (۶) باشد. اولین گام برای ساختن منحنی های ظرفیت و نیاز، برگردان منحنی *Pushover* از دستگاه مختصات برش پایه در مقابل تغییر مکان به یک منحنی معادل ظرفیت در دستگاه مختصات طیف شتاب در مقابل طیف تغییر مکان است.

شکل (۷) تبدیل منحنی *Pushover* را به منحنی طیف ظرفیت نشان می دهد. فرمول تبدیل منحنی *Pushover* به طیف ظرفیت



شکل (۳): ضریب  $R_w$  با فرم ADRS [۴]

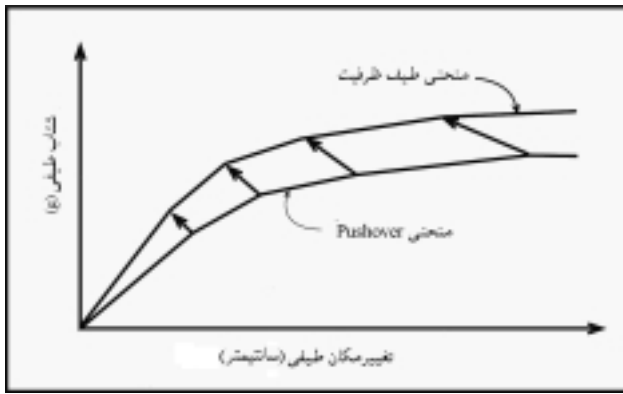
### ۴- تحلیل غیرخطی استاتیکی Pushover

تحلیل غیرخطی *Pushover* رفتار غیرخطی سازه را تحت اثر زلزله برآورد می کند. هرچند که نیروها به صورت استاتیکی اعمال می شوند، اما انتظار می رود برای بسیاری از ساختمانها، روش تحلیل غیرخطی استاتیکی، تخمین مناسبی از حداکثر دینامیکی پاسخ غیرخطی سازه را مشخص کند. برای این منظور لازم است که در محاسبه ظرفیت سیستم، سختی و مقاومت به طور مناسب مدل شوند و در محاسبه نیاز زلزله مقدار میرایی را که زلزله در سازه ایجاد می کند به کار برده شود. برای تعیین دقیق این مقادیر پارامترهای زیادی مورد نیاز است.

کفایت سیستم را با ساده سازی می توان بررسی نمود. به عبارت دیگر، از حداکثر تغییر مکان هر طبقه برای این منظور می توان استفاده کرد. به هر حال، مطلوب آن است که بتوان در روش *Pushover* به سادگی پاسخ کلی سیستم را به دست آورد. برای این منظور انجام مراحل کلیدی زیر ضروری است:

۱- برای انتخاب توزیع نیروهای پوش، لازم است مشخص شود که چند نوع از مدهای تسلیم باید بررسی و مطالعه شود. پاسخ این پرسش منوط به شناخت انواع حالات احتمالی انهدام سازه، می باشد. برای بعضی از ساختمانها فقط یک حالت شکست قابل تصور می باشد (مثل طبقه نرم در یک امتداد)؛ اما، سایر ساختمانها ممکن است چند حالت قابل تصور برای شکست داشته باشند. ساختمانهای بلند ممکن است نیاز به ارزیابی احتمال شکست در مدهای بالاتر را نیز داشته باشند.

۲- هر مد مختلف شکست یک بارگذاری خاص خود را خواهد داشت. در مراجع [۲] و [۳] راهنمایی خاصی برای انتخاب نوع نیروی اعمالی وجود دارد. هر نوع نیروی پوش باید مشابه با نیروی



شکل (۷): تبدیل منحنی Pushover به منحنی ظرفیت [۴]

$$\alpha_1 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^N W_i \phi_i \right]^2}{W \sum_{i=1}^N W_i \phi_i^2} \quad (۳)$$

$$\alpha_2 = \phi_{roof} \left[ \frac{\sum_{i=1}^N W_i \phi_i}{\sum_{i=1}^N W_i \phi_i^2} \right] \quad (۴)$$

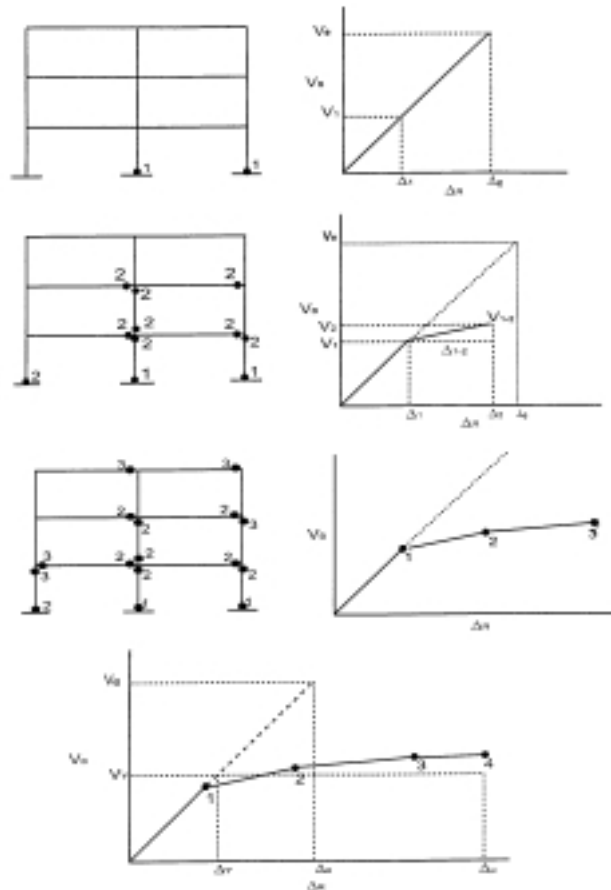
$$D = \delta_{roof} / \alpha_2 \quad (۵)$$

در این روابط،  $A$  شتاب طیفی بر حسب  $g$  در  $V$  برش پایه،  $D$  تغییر مکان طیفی به کیلوگرم در  $\delta_{roof}$  کل وزن ساختمان به کیلوگرم،  $\alpha_1$  قسمتی از جرم در مد Pushover،  $\alpha_2$  نسبت تغییر مکان مد Pushover در محل  $i$  ام،  $\phi_i$  شکل مد Pushover در محل  $i$  ام،  $\phi_{roof}$  شکل مد Pushover در بام،  $D$  تغییر مکان طیفی به سانتیمتر،  $\delta_{roof}$  تغییر مکان بام سازه به سانتیمتر،  $W_i$  وزن به کیلوگرم در محل  $i$  ام، و  $N$  تعداد طبقات ساختمان است.

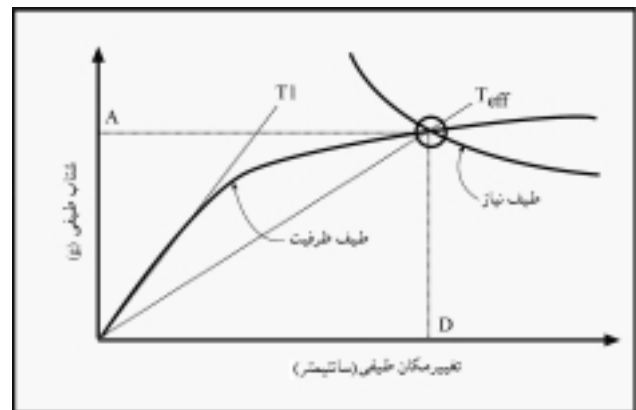
در معادلات (۲) تا (۵) زمانی که مد Pushover مانند یک سیستم یک درجه آزاد عمل می کند  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$  برابر ۱ هستند؛ در این حالت، منحنی طیف ظرفیت با منحنی Pushover یکی می شود.

دومین گام ساختن منحنی های طیفی ظرفیت و نیاز (شکل ۶)، به دست آوردن طیف نیاز از طیف طراحی با ۰.۵ میرایی می باشد. این محاسبات نیازمند برآورد ضریب میرایی موثر است. نمایانگر کل مکانیزم اتلاف انرژی در سازه است که با در نظر گرفتن دامنه و تداوم (تعداد سیکل)، پاسخ زلزله به دست می آید.

میرایی موثر وابسته به دامنه است. قبل از رسیدن به حد تسلیم، میرایی موثر معمولاً ۰.۵ مقدار میرایی بحرانی در نظر گرفته می شود. این مقدار می تواند بسته به نوع مصالح بزرگتر هم باشد. بعضی مقادیر میرایی پیشنهادی برای سازه ها در قبل از تسلیم در مرجع [۷] آمده است. برای مثال مقادیر تا ۰.۱۰ برای بتن مسلح و مقادیر تا ۰.۲۰ برای سازه های چوبی پیشنهاد شده است. پس از رسیدن به تسلیم،



شکل (۸): مراحل ترسیم منحنی بار تغییر مکان [۶]



شکل (۹): منحنی های ظرفیت و نیاز طیفی [۴]

مشابه با معادلات تحلیل دینامیکی خطی مودال می باشد که برای تبدیل برش پایه به نیروی مودال و تبدیل تغییر مکان بام به تغییر مکان مودال استفاده می گردد. تنها تفاوت، جایگزینی شکل مد Pushover (تغییر مکان های طبقات سازه در نقطه حداکثر پاسخ) به جای شکل مد دینامیکی است.

معادلات تبدیل Pushover به ظرفیت عبارتند از:

$$A = \left( \frac{V}{W} \right) \alpha_1 \quad (۲)$$

برابر ۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه، Area سطح به کیلوگرم- سانتیمتر (در یک حلقه کامل تغییر مکان در محدوده  $\pm D$  حاصل شود) و  $\kappa$  ضریب کاهش که برای کم کردن سطح زیر منحنی می باشد.

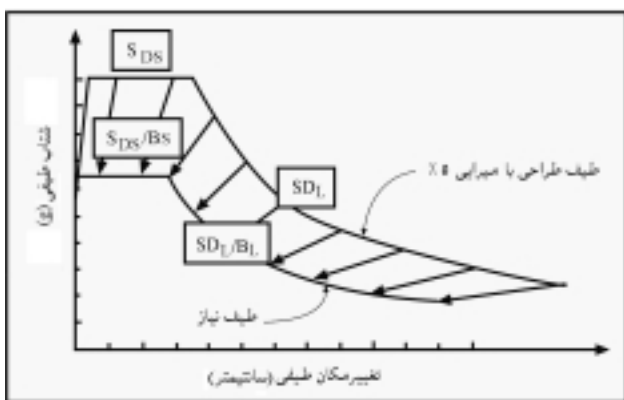
معادله تعیین میرایی موثر ( $\beta_{eff}$ ) بر اساس میرایی لزوج است (معادله 3.8.9 در مرجع [۸]). همچنین دو اصلاح زیر توسط ATC-40 پیشنهاد شده است:

- یک مقدار اسمی میرایی لزوج که ۰.۵٪ مقدار بحرانی است به میرایی هیسترتیک اضافه شود. بر این اساس رابطه میرایی همیشه یک مقدار میرایی حداقل ۰.۵٪ را به دست می دهد.

- یک ضریب کاهش ( $\kappa$ ) در رابطه میرایی برای کاهش سطح کل زیر منحنی هیسترتیزس وارد شود؛ زیرا، انتظار می رود زمان لرزش (تعداد سیکل های پاسخ زلزله) بر قابلیت اتلاف انرژی در سازه تأثیر بگذارد. برای حالتی که این کاهش وجود ندارد،  $\kappa = 1$  و در حالت حداکثر آن برابر صفر است که در این حالت  $\beta_{eff} = 0.05$  می باشد.

جدول (۱) مقادیر ضرایب کاهش دامنه طیف نیاز  $\beta_S$  و  $\beta_L$  از ATC-33 را مشخص کرده است و مقایسه آن با مقادیر پیشنهادی نیومارک و هال را نشان داده است.

ضریب کاهش دامنه طیف نیاز تابعی از دامنه و پیروید در طیف پاسخ است. ضرایب کاهش برای پیرودهای کوچک ( $\beta_S$ ) حدود ۰.۵۰٪ از میرایی پیرودهای بلند ( $\beta_L$ ) بیشتر است. اگر میرایی موثر به دامنه بستگی نداشت (که در حالت کلی واقعیت ندارد) آنگاه طیف با ۰.۵٪ میرایی باید با ضرایب ثابت کاهش می یافت (شکل ۹).

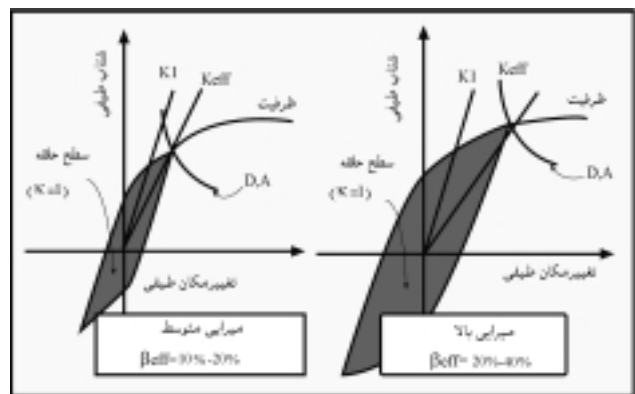


شکل (۹): ترسیم طیف هدف [۴]

پیروید موثر و میرایی موثر به دامنه بستگی دارند. تا رسیدن به

میرایی موثر سریعاً شروع به افزایش می کند که این افزایش بستگی به نحوه رفتار هیسترتیک اعضا در هنگام اتلاف انرژی در سیکل های پاسخ دارد.

میرایی بسته به دامنه پاسخ ممکن است افزایش یابد (افزایش سطح حلقه هیسترتیزس با دامنه)؛ اما، این مقدار هم ثابت نمی ماند و با افزایش تعداد سیکل های زلزله تغییر می کند (باریک شدن حلقه های هیسترتیزس یا کاهش سطح زیر آنها). شکل (۸) نمایانگر سختی موثر و میرایی در کل سازه می باشد.



شکل (۸): نمونه ای از سختی و میرایی موثر [۴]

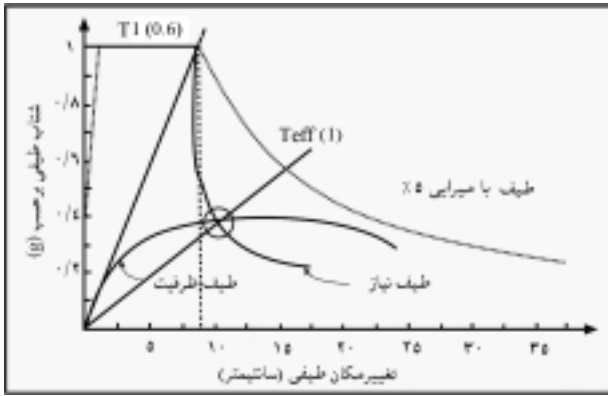
در این شکل مقادیر سختی و میرایی موثر سازه برای منحنی ظرفیت یکسان در دو سطح مختلف پاسخ نشان داده شده اند. سطح اول نشان می دهد که مقدار کمی رفتار غیرخطی در کل سازه وجود دارد. در این حالت، سختی موثر در حدود ۰.۶۷/سختی اولیه و میرایی موثر حدود ۱۰ تا ۲۰٪ میرایی بحرانی است.

در پاسخ سطح دوم، رفتار غیرخطی بیشتری مشاهده می شود. سختی موثر حدود ۰.۵/۳۳ تا ۰.۳۳/۳۳ سختی اولیه است و میرایی حدود ۲۰ تا ۴۰ درصد مقدار بحرانی است. این مقدار سختی بر اساس نظر گرفتن سطح کل حلقه های هیسترتیزس است. سختی و میرایی موثر با استفاده از رابطه های (۶) و (۷) محاسبه می شود:

$$K_{eff} = \frac{A}{D} \left( \frac{W}{g} \right) \quad (6)$$

$$\beta_{eff} = \frac{\kappa}{2\pi} \left( \frac{Area}{K_{eff} D^2} \right) + 0.05 \quad (7)$$

در این معادلات،  $K_{eff}$  سختی موثر به کیلوگرم بر سانتیمتر در تغییر مکان  $D$ ،  $\beta_{eff}$  میرایی موثر، نسبت میرایی بحرانی لزوج در تغییر مکان  $D$ ،  $A$  شتاب طیفی بر حسب  $g$  در تغییر مکان  $D$ ،  $D$  تغییر مکان طیفی به سانتیمتر،  $W$  کل وزن ساختمان،  $g$  شتاب جاذبه



شکل (۱۰): ساختمان جدید (خاک متراکم) [۴]

بر اساس خاک سخت با آن در شکل (۱۰) نشان داده شده است. قسمت تقریباً عمودی منحنی هدف نشان می‌دهد که در این مثال تغییر مکان غیرالاستیک تقریباً برابر با تغییر مکان الاستیک می‌باشد. شتاب طیفی مربوط به حد تسلیم برابر با  $2g$ ، مطابق با برش پایه  $15W$  (نیروی طراحی) و مقدار  $\alpha_1 = 75$  می‌باشد. شتاب طیفی نهایی برابر با  $4g$  معادل برش پایه  $3W$  (پلاستیک کامل) و ضریب افزایش مقاومت حدود ۲ را نشان می‌دهد. این خصوصیات برای یک ساختمان قاب بتن مسلح متوسط با رعایت حداقل ضوابط آیین نامه می‌باشد. حداکثر تغییر مکان نشان داده شده در شکل (۱۰) حدود ۱۰ سانتیمتر می‌باشد. تغییر مکان حداکثر ۱۰ سانتیمتر معادل تغییر مکان بام حدود ۱۲ سانتیمتر ( $\alpha_2 = 8$ ) می‌باشد. برای یک ساختمان پنج طبقه این تغییر مکان با فرض توزیع یکنواخت تغییر مکان در طبقات حدود  $2/5$  سانتیمتر در هر طبقه است. تغییر مکان  $2/5$  سانتیمتر برای هر طبقه موجب ایجاد ترک خواهد شد؛ اما، فقط مقدار کمی خسارت به قابهای ساختمان وارد می‌شود. یکی از مزایای استفاده از روش طیف ظرفیت آن است که اجازه می‌دهد از هر شکل طیف استفاده گردد. برای نمونه در مثال بعدی مجدداً از طیف هدف استفاده می‌شود تا در زمینهای متفاوت اثر خاک در تغییر مکان سازه مشخص گردد. شکل (۱۱) محل تقاطع منحنی ظرفیت ساختمان با طیف هدف که یک بار در یک ساختگاه با جنس سنگ قرار دارد و بار دیگر همین سازه بر روی خاک نرم قرار دارد را نشان داده است.

بر اساس آنچه گفته شد اجزاء شکل پذیرند و سختی، مقاومت و میرایی در زلزله طرح کاهش نمی‌یابد. شکل (۱۱) اختلاف قابل توجهی را در تغییر مکان ساختمان در خاکهای مختلف نشان می‌دهد. تغییر مکان طیفی برای ساختگاه سنگی فقط ۵ سانتیمتر می‌باشد؛ در حالی که، همین پارامتر در خاک نرم حدود ۱۵ سانتیمتر

تسلیم، پرید مؤثر ( $T_{eff}$ ) همان مقدار پرید اولیه ( $T_1$ ) است و میرایی مؤثر ( $\beta_{eff}$ ) معادل ۰.۵ میرایی بحرانی می‌باشد. پس از تسلیم، پرید مؤثر افزایش می‌یابد و میرایی مؤثر هم زیاد می‌شود تا تغییر مکان غیرالاستیک سازه افزایش یابد.

جدول (۱): ضرایب کاهش دامنه طیف نیاز [۴]

| میرایی مؤثر<br>$\beta_{eff}$ | ضرایب پرید کوتاه   |         | ضرایب پرید بلند    |             |
|------------------------------|--------------------|---------|--------------------|-------------|
|                              | نیومارک<br>و حال ۱ | $B_S^2$ | نیومارک<br>و حال ۱ | $B_T^{2,3}$ |
| $\leq 0.2$                   |                    | ۰/۸     |                    | ۰/۸         |
| ۰/۲                          | ۰/۷۸               |         | ۰/۸۱               |             |
| ۰/۵                          | ۱/۰                | ۱/۰     | ۱/۰۰               | ۱/۰         |
| ۰/۷                          | ۱/۱۲               |         | ۱/۰۹               |             |
| ۰/۱۰                         | ۱/۳۰               | ۱/۳     | ۱/۲۰               | ۱/۲         |
| ۰/۱۵                         | ۱/۵۴               |         | ۱/۳۹               |             |
| ۰/۲۰                         | ۱/۸۲               | ۱/۸     | ۱/۵۴               | ۱/۵         |
| ۰/۳۰                         | ۲/۳۸               | ۲/۳     | ۱/۷۹               | ۱/۷         |
| ۰/۴۰                         | ۳/۰۳               | ۲/۷     | ۲/۰۸               | ۱/۹         |
| ۰/۵۰                         | ۳/۸۵               |         | ۲/۳۳               |             |
| ۰/۵۰                         |                    | ۳/۰     |                    | ۲/۰         |

۱- ضرایب نیومارک و حال ۲- ضرایب NEHRP و ۳- ATC - ضرایب UBC

برای هر تغییر مکان (طیفی) در منحنی ظرفیت مقدار مشخصی برای میرایی مؤثر قابل محاسبه می‌باشد. از ضریب کاهش دامنه طیف نیاز وابسته به این مقدار میرایی مؤثر می‌توان برای ترسیم یک طیف مشخص هدف از طیف با ۰.۵ میرایی استفاده کرد. به مراحل انجام این کار در بخش ششم اشاره شده است. با داشتن این طیف و تقاطع دادن آن با طیف ظرفیت حداکثر پاسخ محاسبه می‌شود.

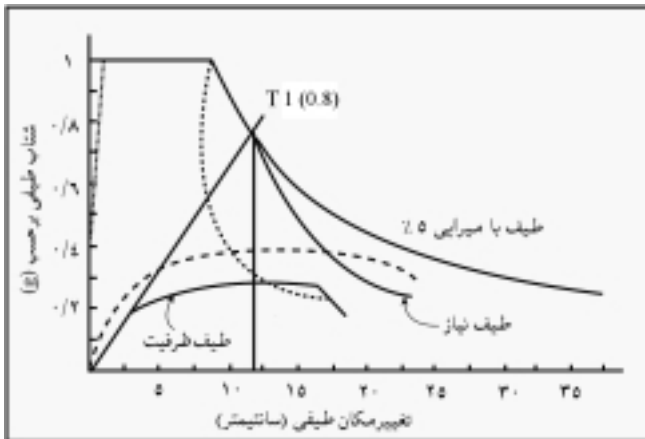
## ۶- مثالهای توضیحی

ایده و روشی که بحث شد با چند مثال در این قسمت واضح تر مطرح می‌شود. سعی شده است مثالها ساده باشند و به صورت واقع گرایانه برای مقادیر ظرفیت و نیاز مطالعه شوند.

### ۱-۶- ساختمان جدید

اولین مثال، یک ساختمان جدید است که پرید اولیه آن  $0.6g$  ثانیه است. طیف شتاب در حالت تسلیم مربوط به  $2g$  و طیف نهایی شتاب حدود  $4g$  می‌باشد. چون ساختمان جدید است اجزاء به صورت شکل پذیر در نظر گرفته می‌شوند و فرض می‌شود که سختی، مقاومت و میرایی در مدت زلزله طرح کاهش نیابند. منحنی ظرفیت این ساختمان و محل تقاطع منحنی طیف هدف

منحنی ظرفیت حدود ۰.۵٪ و مقاومت حدود ۰.۷٪ مشخصات یک ساختمان جدید در نظر گرفته شده است. مشخصات ساختمان جدید در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



شکل (۱۰): ساختمان موجود (خاک متراکم) [۴]

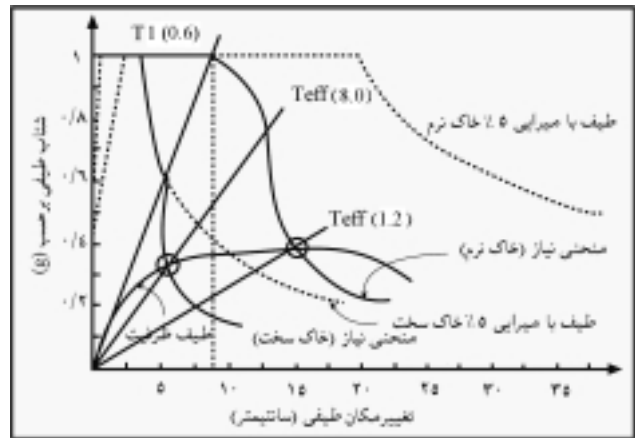
کاهش سختی و مقاومت برای ساختمانهایی که اعضای آنها در برش گسیخته می‌شوند، قابل انتظار است. مانند مثال قبل، میرایی مؤثر به میزان  $0.33/$  سطح منحنی هیستریزس کاهش یافت.

در این حالت بین طیف ظرفیت و طیف هدف تقاطعی وجود ندارد؛ لذا، روش طیف ظرفیت یک مسأله بالقوه ای را نشان می‌دهد. با این سطح از ظرفیت، دور از انتظار نیست که سازه آسیب مهمی ببیند و حتی ممکن است منهدم شود.

### ۳-۶- مقاوم سازی ساختمانهای موجود

در این قسمت برای نشان دادن روشهای ترمیم و تقویت ساختمانهای موجود دو مثال ارائه می‌شود (ساختمان شکل ۵ با مشخصات شکل ۱۳).

هدف، محدود کردن تغییرمکان به حدود ۱۰ سانتیمتر است (تغییرمکان یک ساختمان جدید در شکل ۱۰). یک مدل از ساختمان موجود که با دیوار برشی، قابهای جلوی آن تقویت شده است در شکل (۱۴) نشان داده شده است. شکل (۱۵) تأثیر افزایش سختی و مقاومت را برای این ساختمان نشان می‌دهد (حالت بدون تقویت با خط چین نشان داده شده است). با اضافه کردن دیوارهای برشی، سختی ساختمان (و تا حدودی میرایی) افزایش می‌یابد. علاوه بر آن، آثار غیرالاستیک زلزله هدف و مقاومت افزایش می‌یابد و ظرفیت سازه بیشتر می‌شود. این مثال استفاده از روش طیف ظرفیت را در برآورد مقدار سختی و مقاومتی که باید اضافه شوند تا ساختمان موجود به تغییرمکان هدف

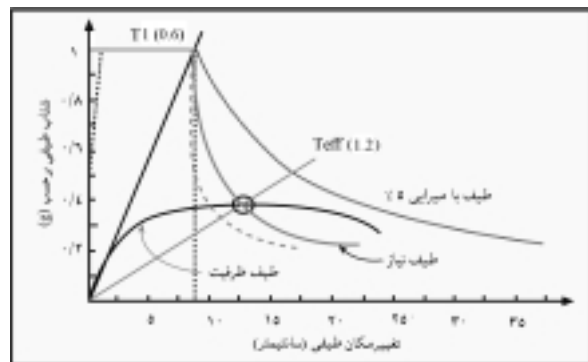


شکل (۱۱): ساختمان جدید (ساختمان سنگی و ساختمان با خاک نرم) [۴]

است. این موضوع در پاسخ غیرالاستیک جلب توجه می‌کند (تغییرمکان بزرگتر در خاک نرم نسبت به خاک سخت). این مسأله با مشاهدات خرابی و آسیب در ساختمانها سازگار است. منحنی هدف در سنگ و خاک نرم نشان می‌دهد که تغییرمکان غیرالاستیک لزوماً برابر با تغییرمکان الاستیک نمی‌باشد.

### ۲-۶- ساختمان موجود

شکل (۱۲) منحنی طیف ظرفیت و هدف برای یک ساختمان موجود را نشان می‌دهد. در ابتدا ظرفیت ساختمان مانند یک ساختمان جدید می‌باشد (شکل ۱۰) و فقط توانایی سازه در اتلاف انرژی (میرایی) متفاوت است (میرایی بر اساس حدوداً  $0.33/$  سطح زیر منحنی هیستریزس می‌باشد). محل تقاطع نشان می‌دهد حداکثر تغییرمکان از ۱۰ سانتیمتر به حدود ۱۵ سانتیمتر تغییر یافته است و برای هر طبقه تغییرمکان نسبی از  $2/5$  سانتیمتر به ۴ سانتیمتر افزایش یافته است (با فرض تغییرمکان نسبی یکنواخت). شکل (۱۲) همچنین نشان می‌دهد که زلزله هدف نزدیک به ظرفیت نهایی ساختمان می‌باشد.

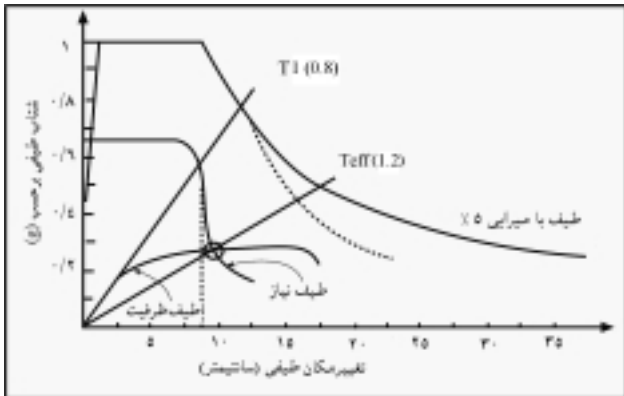


شکل (۱۲): ساختمان موجود (خاک متراکم) [۴]

برای یک ساختمان موجود احتمالاً سختی و مقاومت (مانند میرایی مؤثر) در طول زلزله کاهش می‌یابد (شکل ۱۳). در این مثال،

(۱۰ سانتیمتر) برسد را نشان می‌دهد.

میراگرها رفتار غیرالاستیک طیف زلزله را کاهش می‌دهد و این بدون افزایش سختی و مقاومت در ساختمان موجود انجام شده است. در این حالت روش طیف ظرفیت مقدار میرایی که باید به ساختمان موجود اضافه شود تا به تغییر مکان هدف برسد را نشان می‌دهد.



شکل (۱۱): مثال ساختمان شکل ۱۶ (خاک متراکم) [۴]

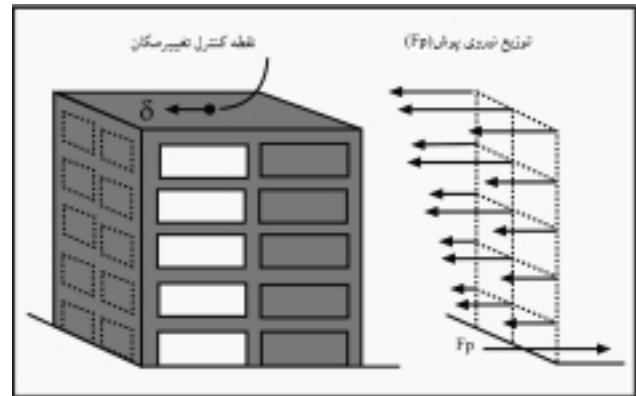
### ۷- نتیجه

در این مقاله ضمن بررسی روش تحلیل *Pushover*، خلاصه ای از روش طیف ظرفیت برای محاسبه حداکثر پاسخ زلزله در یک ساختمان بحث شد. مثالهایی که به صورت گرافیکی حل شدند نشان دادند که چگونه این روش تحلیل برای محاسبه حداکثر تغییر مکان و برای مدل سازه غیرخطی ساختمانهای جدید، موجود و قدیمی استفاده می‌شود. مزایای روش طیف ظرفیت نسبت به سایر روشهای تحلیل غیرخطی عبارتند از:

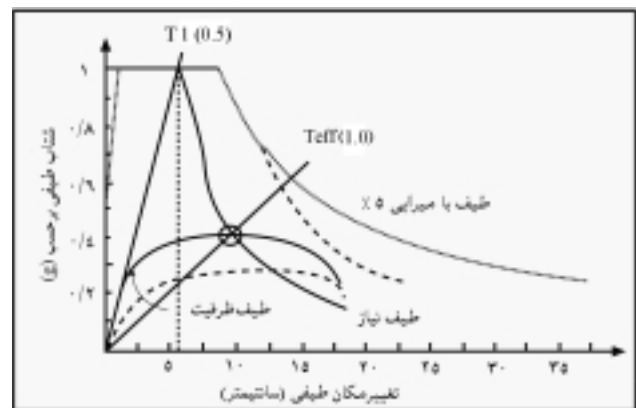
- ۱- لرزش زمین ناشی از زلزله با طیف پاسخ بیان می‌شود؛ بنابراین، تأثیرات انواع ساختگاهها و حالات منبع (مثلاً انواع خاکها) به طور واضح قابل بیان هستند.
- ۲- خصوصیات سیستم (مثل میرایی) در مدت وقوع زلزله در مراحل مختلف تعیین می‌گردد.
- ۳- حلهای ترسیمی نشان می‌دهد که ظرفیت ساختمان و نیاز زلزله می‌تواند به صورت ساده به وسیله مهندسیین طراح استفاده و برای تعیین میزان افزایش مورد نیاز سختی، مقاومت و یا میرایی در یک ساختمان در نظر گرفته شود.

### ۸- مراجع

1. Tso W. K. and Moghadam, A. S, 1998, "Pushover Procedure for Seismic Analysis of Buildings". Progress in Structural Engineering and Materials, Vol. 1 (3), pp. 337-344.

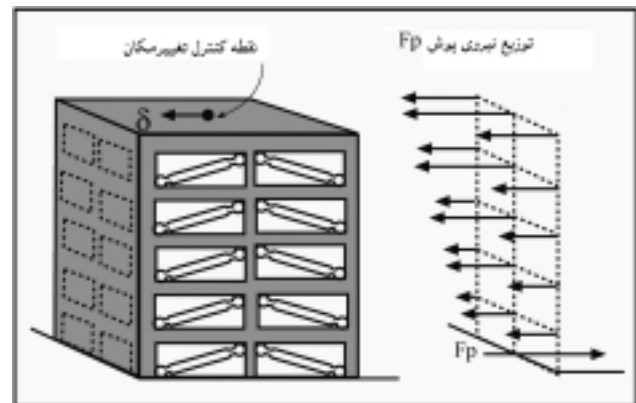


شکل (۱۴): یک نمونه بارگذاری روی ساختمان موجود با تقویت توسط دیوار برشی [۴]



شکل (۱۵): مثال ساختمان شکل ۱۴ (خاک متراکم) [۴]

مثال دوم مطابق شکل (۱۶) در رابطه با الحاق میراگر به سیستم سازه است. در این حالت، میراگرها فقط میرایی را افزایش-



شکل (۱۶): یک نمونه بارگذاری روی ساختمان موجود که با میراگر قطری تقویت شده است [۴]

می‌دهند (هرچند بعضی از میراگرها سختی و میرایی را افزایش می‌دهند). شکل (۱۷) آثار اضافه کردن میراگرها به یک ساختمان موجود را نشان می‌دهد (ساختمان موجود با خط چین نشان داده شده است). در این مثال چنانکه نشان داده شده است اضافه کردن



2. Applied Technology Council (ATC), 1996, NEHRP Guidelines and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, BSSC Ballot Version of FEMA 273, ATC-33, Redwood City, California.
3. Applied Technology Council (ATC), 1996, Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, Final Submittal of SSC 96-01 (Proposition 122), ATC-40, Redwood City, California.
4. Kircher C. A, 1996, "Capacity Spectrum Pushover Method: Seeing is Believing. Proceedings", 65th Annual Convention, Structural Engineers Association of California, pp. 5-15.
5. Structural Engineers Association of California (SEAOC), 1995, Recommended Lateral Force Requirements and Commentary, Sacramento, California.
6. Nicoletti, J., 1995, "Static Nonlinear Pushover Analysis", Appendix G in Vision 2000: Performance Based Seismic Engineering of Buildings, Structural Engineers Association of California.
7. Newmark, N. M, and Hall, W. J. 1982, "Earthquake Spectra and Design", Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California.
8. Chopra, Anil K, 1995, Dynamics of Structures, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. ◀