

# شتاب طیفی در استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش پنجم؛ از امواج لرزه‌ای تا نقشه‌های جدید طراحی

زلزله یکی از مخرب‌ترین پدیده‌های طبیعی است که هر ساله خسارات جانی و مالی فراوانی در نقاط مختلف جهان به‌ویژه کشورهای لرزه‌خیزی مانند ایران بر جای می‌گذارد. تجربه زلزله‌های گذشته نشان داده است که شدت خسارت تنها به بزرگی زلزله وابسته نیست، بلکه نحوه پاسخ سازه نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان آسیب‌پذیری ساختمان‌ها دارد. از همین رو، مهندسی زلزله همواره در تلاش بوده است تا با شناخت دقیق‌تر رفتار سازه‌ها، روش‌های طراحی را به واقعیت نزدیک‌تر کند.

در همین راستا، استاندارد ۲۸۰۰ ایران (ویرایش پنجم) یکی از مهم‌ترین تغییرات تاریخ خود را تجربه کرده است. در این ویرایش، رویکرد سنتی مبتنی بر شتاب اوج زمین (PGA) جای خود را به شتاب طیفی (Spectral Acceleration) داده است؛ رویکردی که رفتار واقعی سازه‌ها را با دقت بیشتری در محاسبات طراحی وارد می‌کند. برای درک اهمیت این تغییر، ابتدا باید بدانیم زلزله چگونه ایجاد می‌شود، امواج لرزه‌ای چه ویژگی‌هایی دارند و چگونه مفهوم طیف پاسخ به پیدایش شتاب طیفی منجر شده است.



## امواج لرزه‌ای؛ نقطه آغاز طراحی لرزه‌ای

زلزله در اثر آزاد شدن ناگهانی انرژی ذخیره شده در امتداد گسل‌های زمین ایجاد می‌شود. این انرژی به صورت امواج لرزه‌ای در تمام جهات منتشر شده و با رسیدن به سطح زمین باعث ارتعاش ساختمان‌ها می‌شود. بنابراین آنچه سازه را به حرکت درمی‌آورد، خود گسل نیست، بلکه امواجی هستند که از محل گسیختگی منتشر می‌شوند.

امواج لرزه‌ای به دو گروه اصلی تقسیم می‌شوند:

### ۱- امواج حجمی (Body Waves)

این امواج در داخل زمین حرکت می‌کنند و نخستین امواجی هستند که توسط دستگاه‌های لرزه‌نگاری ثبت می‌شوند.

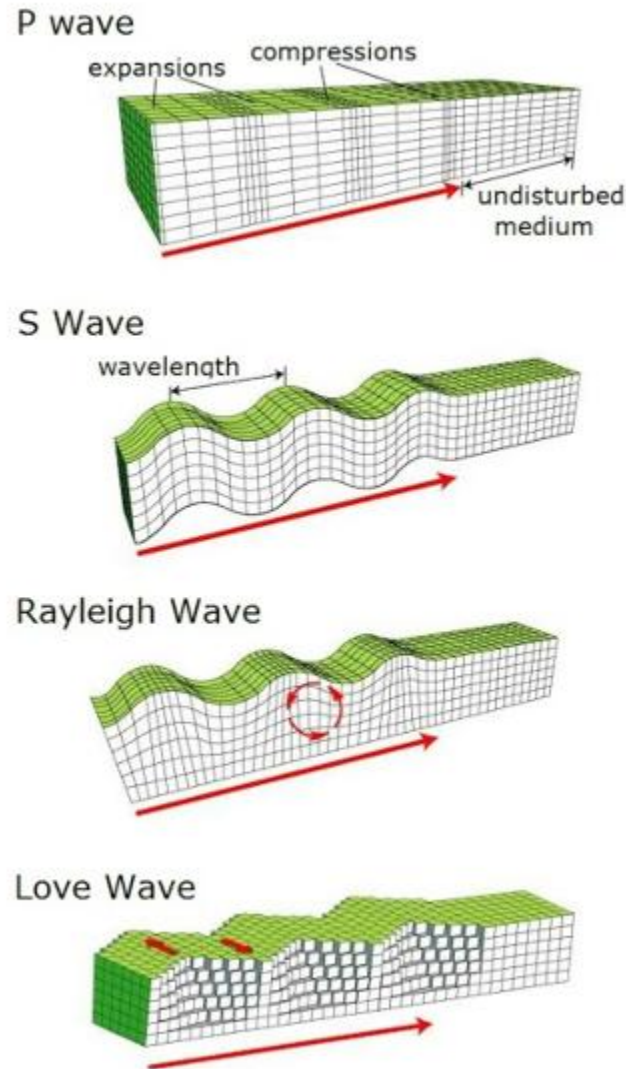
**موج P (Primary Wave)** سریع‌ترین موج لرزه‌ای است و حرکت ذرات در آن در راستای انتشار موج انجام می‌شود. این موج قادر است از جامدات، مایعات و گازها عبور کند و معمولاً اولین لرزشی است که افراد احساس می‌کنند. با وجود سرعت زیاد، سهم آن در ایجاد خسارت سازه‌ای نسبتاً محدود است.

پس از آن، **موج S (Secondary Wave)** به محل می‌رسد. در این موج، حرکت ذرات عمود بر جهت انتشار موج است و به همین دلیل تنش‌های برشی قابل توجهی در زمین ایجاد می‌شود. از آنجا که بیشتر اعضای سازه‌ای در برابر نیروهای جانبی و برشی حساس هستند، موج S نقش مهمی در ایجاد آسیب‌های سازه‌ای دارد. این موج تنها در محیط‌های جامد منتشر می‌شود و از مایعات عبور نمی‌کند.

## ۲- امواج سطحی (Surface Waves)

پس از عبور امواج حجمی، امواج سطحی در نزدیکی سطح زمین منتشر می‌شوند. این امواج شامل **Love** و **Rayleigh** هستند و به دلیل دامنه ارتعاش زیاد و مدت زمان طولانی‌تر، معمولاً بیشترین خسارت را به ساختمان‌ها وارد می‌کنند.

به همین دلیل، مهندسان زلزله هنگام طراحی سازه‌ها، اثر کلی این امواج را بر پاسخ ساختمان مورد بررسی قرار می‌دهند.



تصاویر انواع موج ها

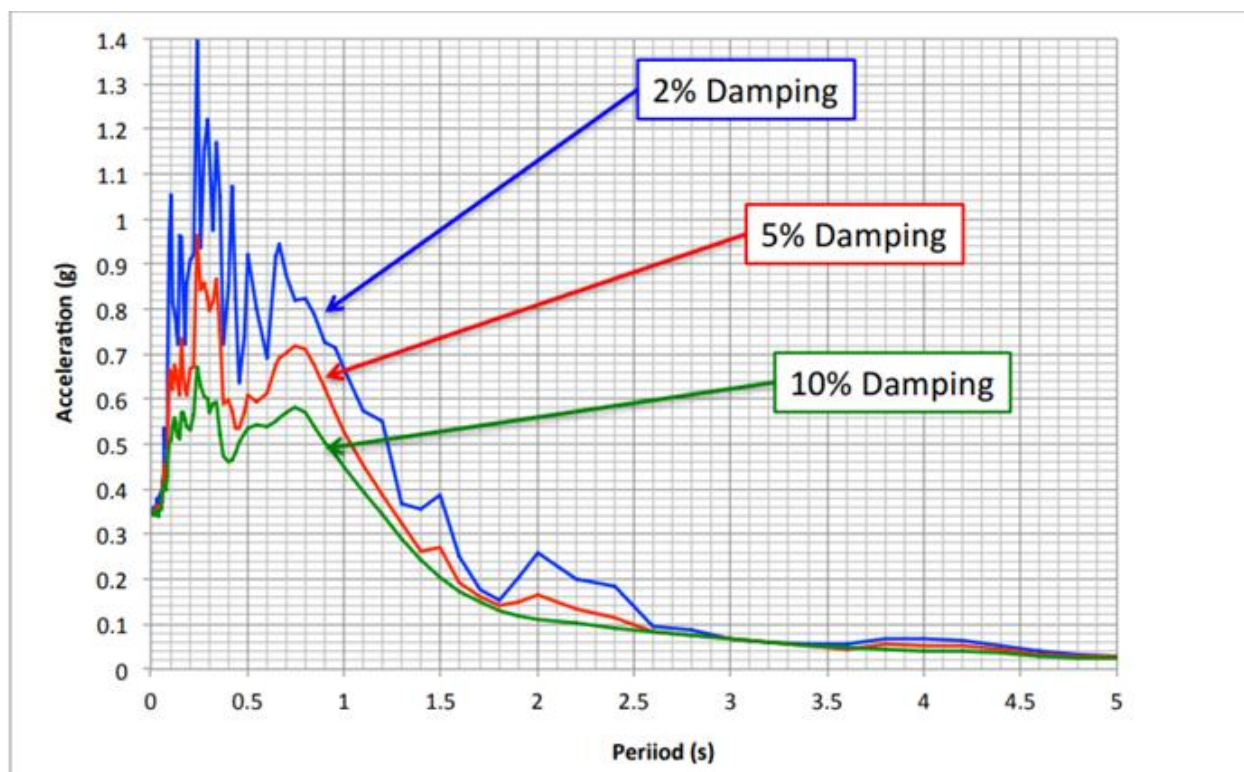
### چرا همه ساختمان ها رفتار یکسانی ندارند؟

اگر دو ساختمان با ارتفاع متفاوت در کنار یکدیگر قرار داشته باشند، لزوماً در یک زلزله رفتار یکسانی نخواهند داشت. ممکن است یک ساختمان تنها دچار ترک های جزئی شود، در حالی که ساختمان مجاور آسیب جدی ببیند.

علت این تفاوت، ویژگی‌های دینامیکی هر سازه است. هر ساختمان دارای سه ویژگی اصلی شامل جرم، سختی و میرایی است. ترکیب این سه پارامتر، دوره تناوب طبیعی سازه را تعیین می‌کند؛ یعنی زمانی که سازه برای انجام یک نوسان کامل نیاز دارد.

اگر دوره تناوب ساختمان به فرکانس غالب امواج زلزله نزدیک شود، پدیده تشدید (Resonance) رخ می‌دهد. در این حالت دامنه ارتعاشات به شدت افزایش یافته و نیروهای وارد بر سازه چندین برابر می‌شوند. بنابراین، شدت پاسخ ساختمان تنها به شدت زلزله وابسته نیست، بلکه به ویژگی‌های خود سازه نیز بستگی دارد.

این موضوع یکی از مهم‌ترین دلایلی بود که مهندسان را به سمت توسعه روش‌هایی سوق داد که بتواند رفتار ساختمان‌های مختلف را به صورت جداگانه ارزیابی کند.

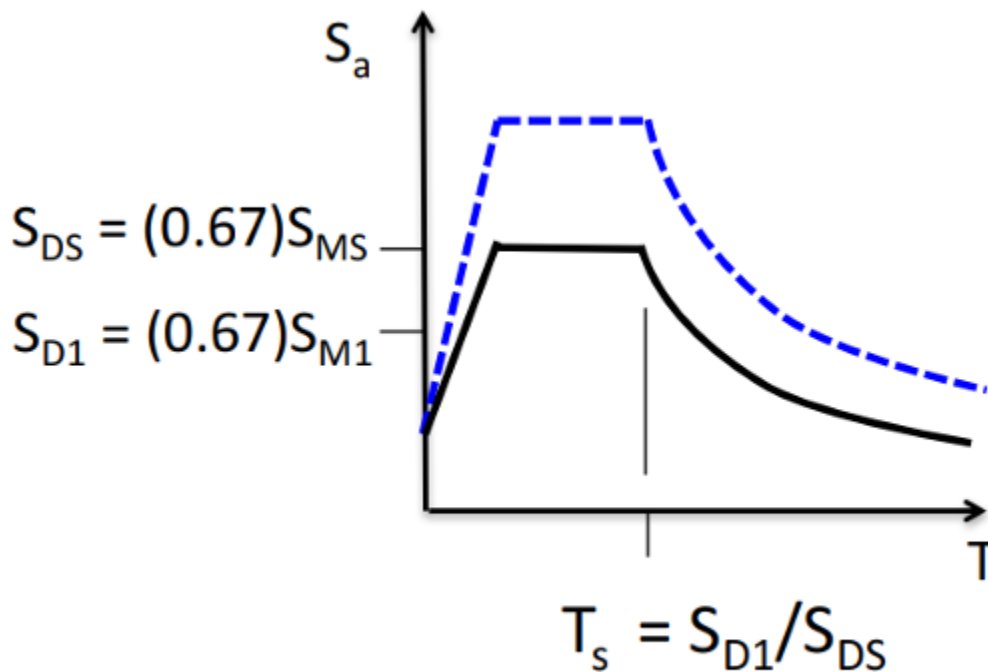


نمودار شتاب طیفی

## از پاسخ سازه تا طیف پاسخ

برای بررسی رفتار ساختمان‌ها در برابر یک زلزله، مهندسان از یک سازه خاص استفاده نمی‌کنند. در عوض، همان رکورد زلزله را به تعداد زیادی سیستم یک‌درجه آزادی (SDOF) با دوره‌های تناوب مختلف اعمال می‌کنند.

برای هر سیستم، بیشترین مقدار تغییر مکان، سرعت و شتاب ثبت می‌شود. اگر این مقادیر بر حسب دوره تناوب رسم شوند، نموداری به دست می‌آید که طیف پاسخ (Response Spectrum) نام دارد.



طیف پاسخ

به بیان ساده، طیف پاسخ نشان می‌دهد که یک زلزله مشخص، ساختمان‌هایی با دوره‌های تناوب مختلف را تا چه اندازه تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین، به جای آنکه تنها یک عدد برای بیان شدت زلزله داشته باشیم، مجموعه‌ای از پاسخ‌های سازه‌ای در اختیار خواهیم داشت که تصویر بسیار دقیق‌تری از رفتار سازه‌ها ارائه می‌دهد.

در میان پارامترهای مختلف طیف پاسخ، شتاب طیفی مهم‌ترین شاخص برای طراحی لرزه‌ای محسوب می‌شود؛ زیرا مستقیماً با نیروهای اینرسی وارد بر ساختمان مرتبط است و مبنای تشکیل طیف طرح در استانداردهای نوین طراحی لرزه‌ای قرار می‌گیرد.

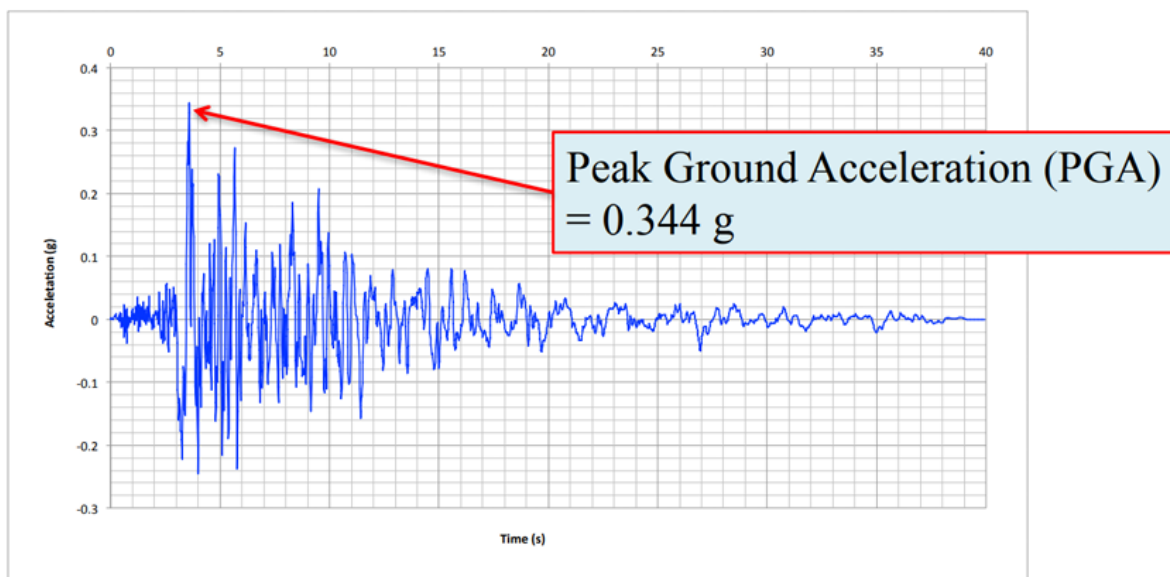
### شتاب طیفی؛ چرا جایگزین PGA شد؟

همان‌طور که گفته شد، طیف پاسخ بیشینه پاسخ سیستم‌های مختلف را در برابر یک زلزله نشان می‌دهد. یکی از مهم‌ترین پارامترهای استخراج‌شده از این طیف، شتاب طیفی (Spectral Acceleration) است.

شتاب طیفی، بیشترین شتابی است که یک سیستم یک‌درجه آزادی با دوره تناوب مشخص، در اثر یک رکورد زلزله تجربه می‌کند. به بیان دیگر، شتاب طیفی بیانگر پاسخ خود سازه است، نه صرفاً حرکت زمین.

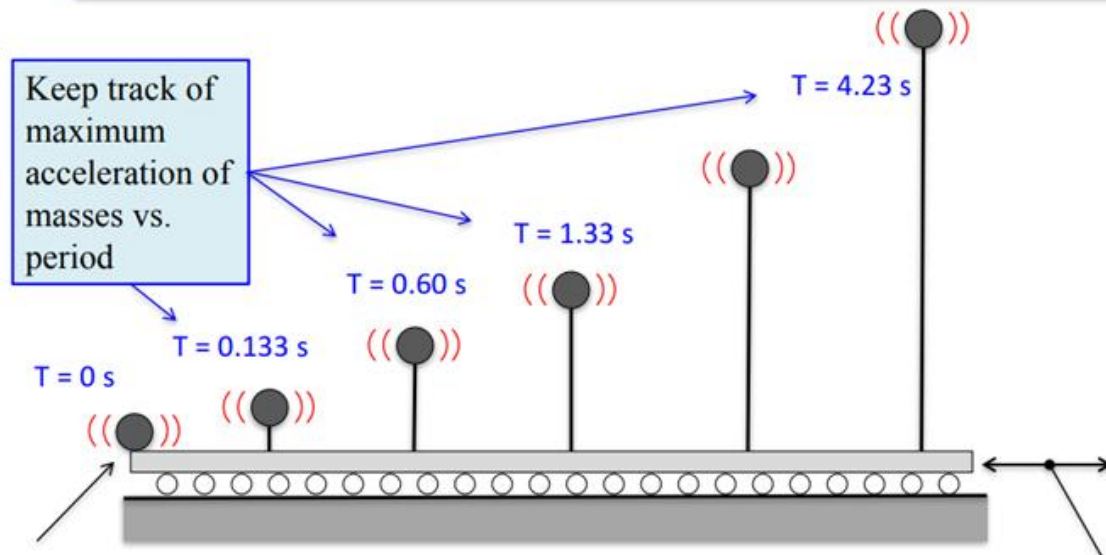
در ویرایش‌های گذشته استاندارد ۲۸۰۰، شدت خطر لرزه‌ای هر منطقه بر اساس شتاب اوج زمین (Peak Ground Acceleration یا PGA) تعریف می‌شد. هرچند PGA بیانگر بیشترین شتاب ثبت‌شده در سطح زمین است، اما نمی‌تواند رفتار واقعی تمامی ساختمان‌ها را توصیف کند.

علت این موضوع آن است که ساختمان‌ها دارای ارتفاع، سختی، جرم و دوره تناوب متفاوتی هستند و هر یک واکنش متفاوتی نسبت به یک زلزله مشابه از خود نشان می‌دهند.



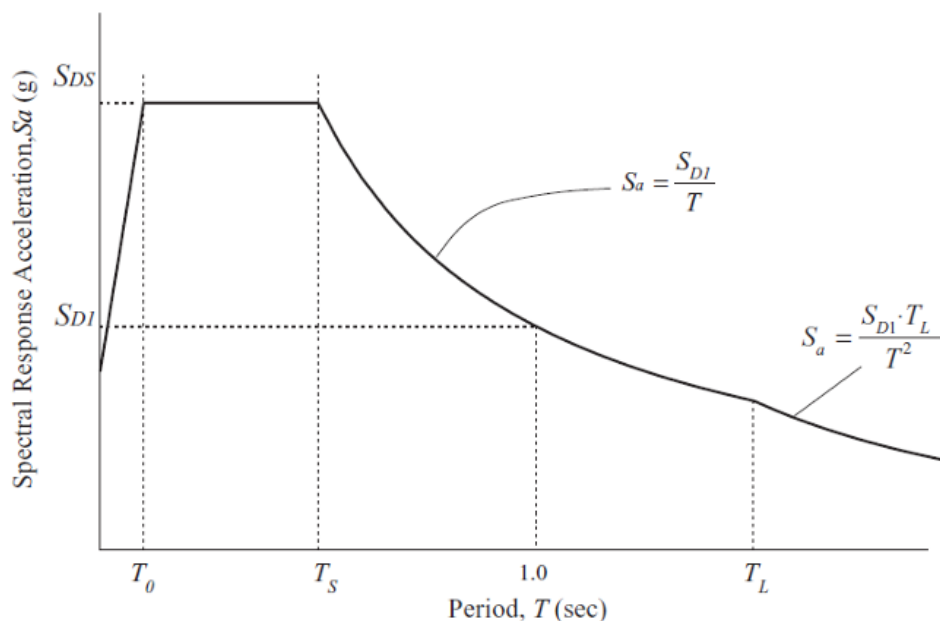
به عنوان مثال، ممکن است دو ساختمان در کنار یکدیگر قرار داشته باشند و هر دو یک مقدار PGA را تجربه کنند، اما ساختمان کوتاه‌مرتبه به دلیل دوره تناوب کم، پاسخ بسیار متفاوتی نسبت به یک ساختمان بلندمرتبه داشته باشد. بنابراین استفاده از یک عدد ثابت برای همه سازه‌ها، همواره نمی‌تواند بیانگر تقاضای واقعی لرزه‌ای باشد.

## Earthquake Acceleration Response Spectrum



دوره تناوت ساختمان ها با ارتفاع متفاوت

ویرایش پنجم استاندارد ۲۸۰۰ با پذیرش این واقعیت، مبنای تعیین خطر لرزه‌ای را از PGA به شتاب طیفی تغییر داده است. در این روش، اثر ویژگی‌های دینامیکی سازه نیز وارد محاسبات می‌شود و طیف طرح با دقت بیشتری تشکیل می‌شود. این تغییر، استاندارد ۲۸۰۰ را به آیین‌نامه‌های معتبر بین‌المللی مانند ASCE ۷ نزدیک‌تر کرده و دقت طراحی لرزه‌ای را افزایش داده است.



مقادیر طیف طرح در ASCE

## دو نقشه جدید شتاب طیفی در ویرایش پنجم استاندارد ۲۸۰۰

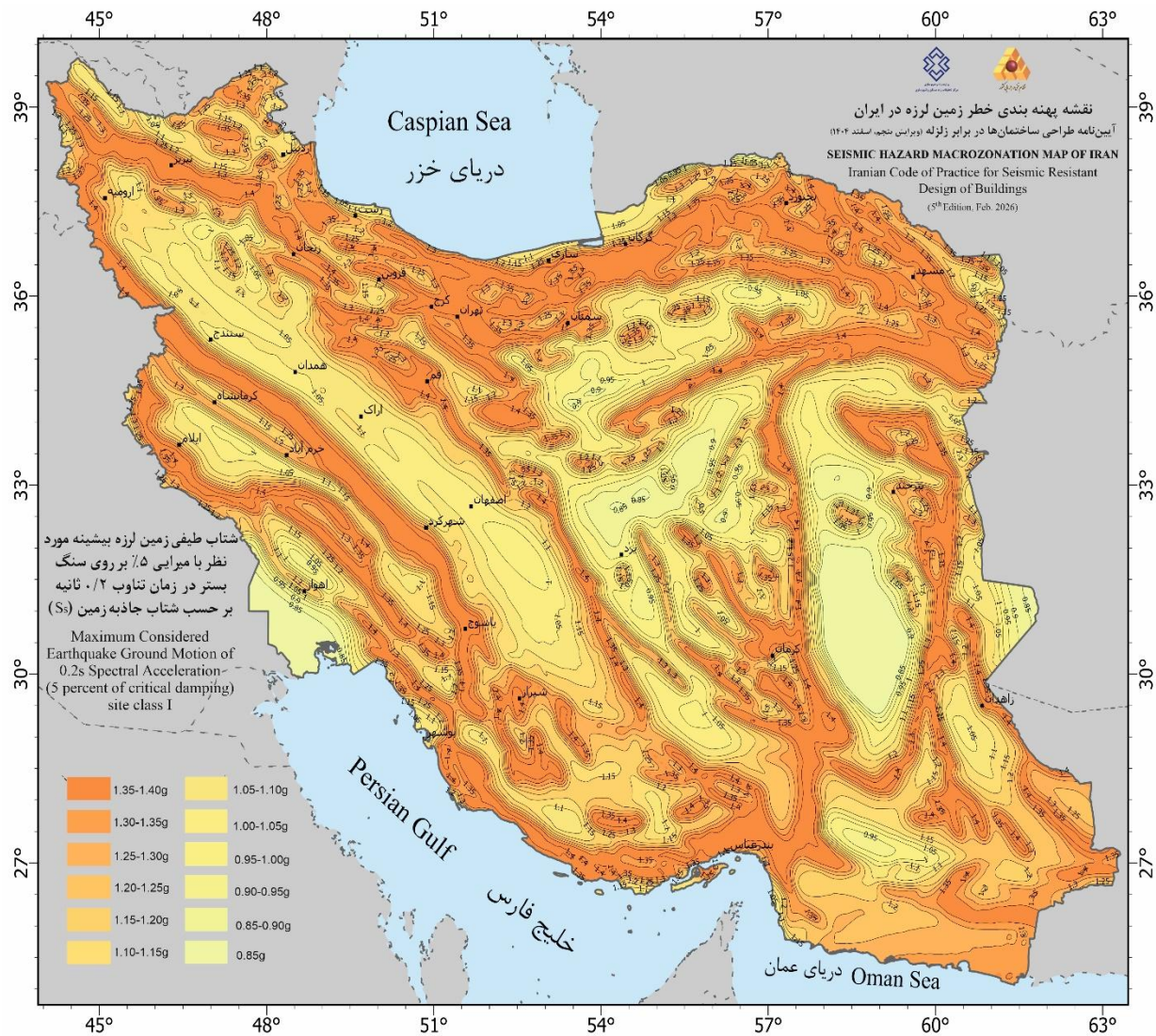
یکی از مهم‌ترین تغییرات ویرایش پنجم، حذف نقشه پهنه‌بندی مبتنی بر PGA و جایگزینی آن با دو نقشه شتاب طیفی است. این دو نقشه، رفتار ساختمان‌ها را در دو محدوده مهم از دوره تناوب پوشش می‌دهند.

### نقشه شتاب طیفی کوتاه‌دوره ( $S_s$ )

نقشه  $S_s$  بیانگر مقدار شتاب طیفی در دوره تناوب ۰.۲ ثانیه است. این دوره تناوب بیشتر به ساختمان‌های کوتاه‌مرتبه، صلب و دارای سختی زیاد مربوط می‌شود. بنابراین مقدار  $S_s$  نقش تعیین‌کننده‌ای در طراحی این دسته از سازه‌ها دارد.

در این نقشه، مقادیر شتاب طیفی برای نقاط مختلف کشور بر اساس مطالعات لرزه‌زمین‌ساخت، داده‌های گسل‌های فعال، رکوردهای زلزله و تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی تعیین شده است. هرچه

مقدار  $S_s$  در یک منطقه بیشتر باشد، ساختمان‌های کوتاه‌دوره در آن منطقه تحت تقاضای لرزه‌ای بیشتری قرار خواهند گرفت.

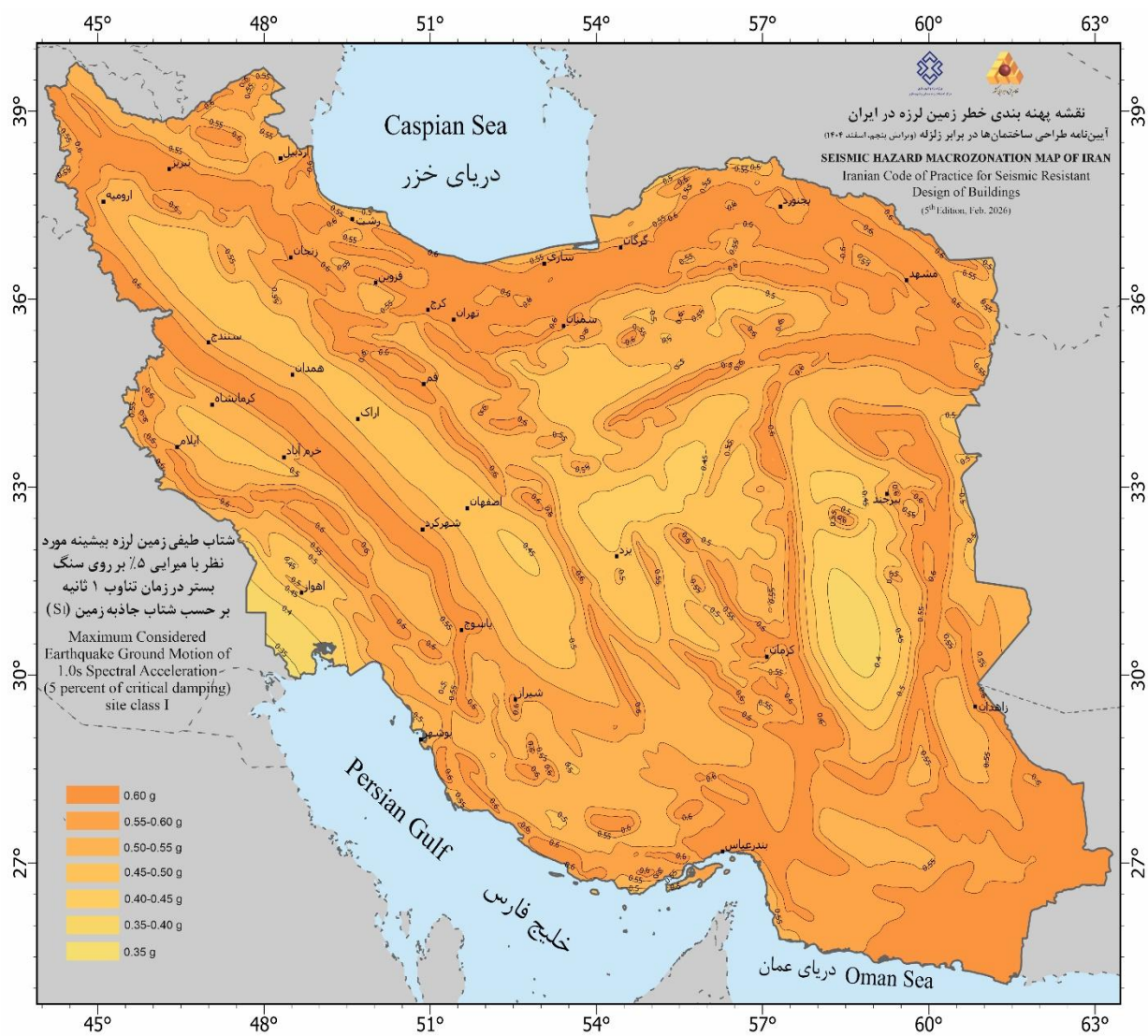


نقشه شتاب طیفی کوتاه‌دوره

نقشه شتاب طیفی یک ثانیه ( $S_1$ )

دومین نقشه،  $S_1$  است که مقدار شتاب طیفی را در دوره تناوب یک ثانیه نشان می‌دهد. این پارامتر بیشتر رفتار ساختمان‌های میان مرتبه و بلندمرتبه را کنترل می‌کند؛ زیرا این سازه‌ها دارای دوره تناوب بلندتری هستند و پاسخ آن‌ها با ساختمان‌های کوتاه تفاوت دارد.

وجود دو نقشه مستقل باعث شده است که استاندارد بتواند رفتار انواع سازه‌ها را با دقت بیشتری مدل‌سازی کند؛ موضوعی که در ویرایش‌های قبلی امکان‌پذیر نبود.

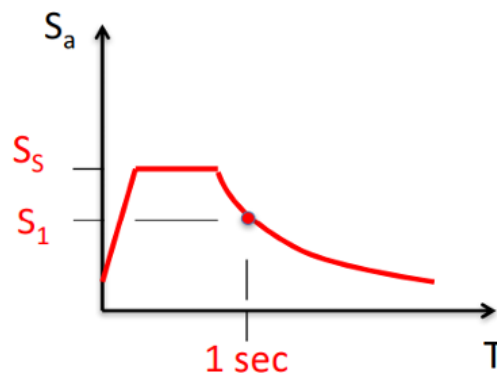
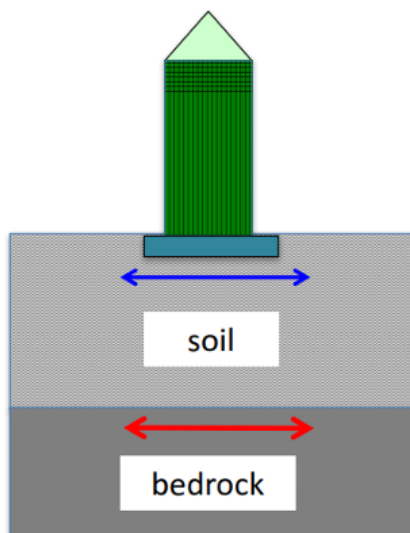


نقشه شتاب طیفی یک‌ثانیه

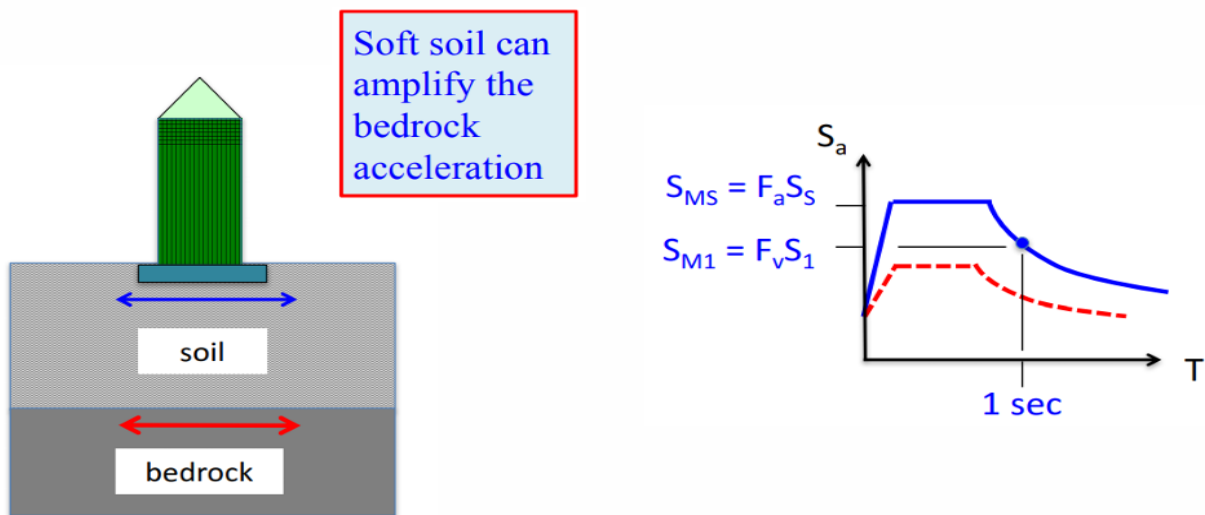
## از $S_s$ و $S_1$ تا طیف طرح

مقادیر استخراج شده از نقشه‌های  $S_s$  و  $S_1$  مستقیماً در طراحی استفاده نمی‌شوند. ابتدا باید اثر شرایط خاک محل پروژه در نظر گرفته شود؛ زیرا نوع خاک می‌تواند امواج زلزله را تقویت یا تضعیف کند.

به همین دلیل، استاندارد ضرایب  $F_s$  و  $F_1$  را معرفی کرده است. ضریب  $F_s$  برای اصلاح مقدار  $S_s$  و ضریب  $F_1$  برای اصلاح مقدار  $S_1$  به کار می‌رود.



نمودار شتاب طیفی در سنگ بستر



نمودار شتاب طیفی در پی ساختمان

و مقادیر آن بر اساس جداول زیر بدست می آید:

جدول ۱-۲ ضریب تاثیر نوع ساختمان در بازه زمان تناوب کوتاه ( $F_s$ )

| نوع زمین | مقادیر شتاب طیفی زلزله پیشینه مورد نظر برای زمان تناوب های کوتاه* |              |             |              |             |
|----------|-------------------------------------------------------------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
|          | $S_s \geq 1.5$                                                    | $S_s = 1.25$ | $S_s = 1.0$ | $S_s = 0.75$ | $S_s = 0.5$ |
| I**      | ۱٫۰                                                               | ۱٫۰          | ۱٫۰         | ۱٫۰          | ۱٫۰         |
| II       | ۱٫۰                                                               | ۱٫۰          | ۱٫۱         | ۱٫۲          | ۱٫۲         |
| III      | ۱٫۰                                                               | ۱٫۰          | ۱٫۱         | ۱٫۲          | ۱٫۳         |
| IV       | ۱٫۱                                                               | ۱٫۱          | ۱٫۳         | ۱٫۳          | ۱٫۶         |
| V        | ۱٫۲                                                               | ۱٫۲          | ۱٫۴         | ۱٫۴          | ۱٫۶         |
| VI       | طیف ویژه                                                          | طیف ویژه     | طیف ویژه    | طیف ویژه     | طیف ویژه    |

\* برای مقادیر میانی  $S_s$  از درون یابی خطی استفاده شود.

\*\* برای زمین نوع یک، در صورتی که سرعت موج برشی با استفاده از آزمایش های ژئوفیزیکی درون چاهی مطمئن (حداقل ۳ اندازه گیری) تعیین شده است، می توان ضرایب ۰٫۹ را جایگزین کرد.

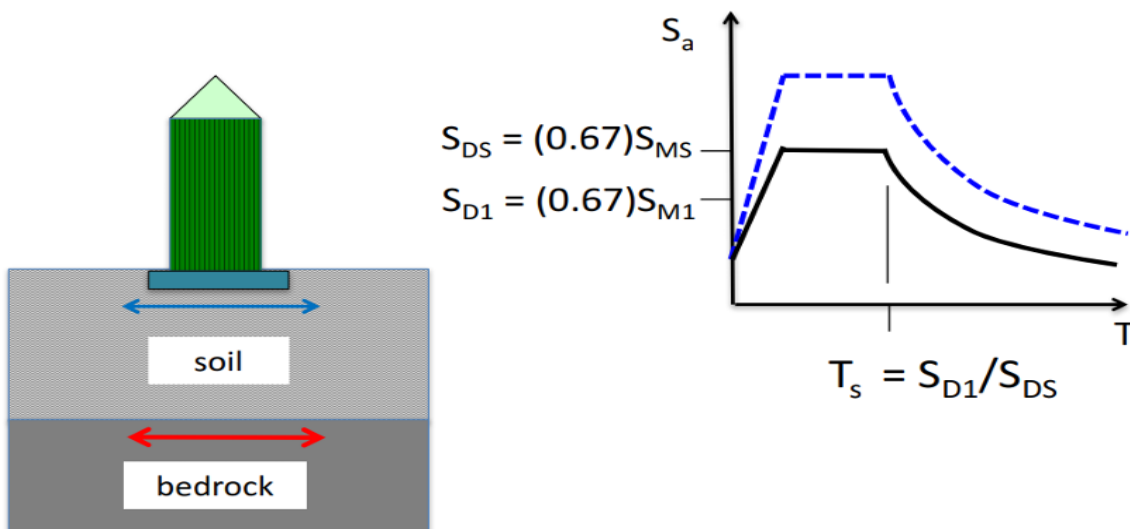
جدول ۲-۲ ضریب تاثیر نوع ساختگاه در زمان تناوب یک ثانیه ( $F_1$ )

| نوع زمین | مقادیر شتاب طیفی زلزله بیشینه مورد نظر برای زمان تناوب ۱ ثانیه* |             |             |             |             |
|----------|-----------------------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|          | $S_1 \geq 0.6$                                                  | $S_1 = 0.5$ | $S_1 = 0.4$ | $S_1 = 0.3$ | $S_1 = 0.2$ |
| I**      | ۱٫۰                                                             | ۱٫۰         | ۱٫۰         | ۱٫۰         | ۱٫۰         |
| II       | ۱٫۳                                                             | ۱٫۳         | ۱٫۳         | ۱٫۳         | ۱٫۵         |
| III      | ۲٫۱                                                             | ۲٫۱         | ۲٫۱         | ۲٫۱         | ۲٫۲         |
| IV       | ۲٫۸                                                             | ۲٫۸         | ۳٫۲         | ۳٫۳         | ۳٫۳         |
| V        | ۲٫۱                                                             | ۲٫۱         | ۲٫۱         | ۲٫۱         | ۲٫۲         |
| VI       | طیف ویژه                                                        | طیف ویژه    | طیف ویژه    | طیف ویژه    | طیف ویژه    |

\* برای مقادیر میانی  $S_1$  از درون یابی خطی استفاده شود.

\*\* برای زمین نوع یک، در صورتی که سرعت موج برشی با استفاده از آزمایش‌های ژئوفیزیکی درون چاهی مطمئن (حداقل ۳ اندازه‌گیری) تعیین شده است، می‌توان ضریب ۰٫۹ را جایگزین کرد.

پس از اعمال این ضرایب، مقادیر  $S_{MS}$  و  $S_{M1}$  محاسبه می‌شوند. در ادامه، مطابق ضوابط استاندارد، با اعمال ضریب دو سوم، مقادیر  $S_{DS}$  و  $S_{D1}$  به دست می‌آیند که مبنای تشکیل طیف طرح و محاسبه نیروهای زلزله هستند.



طیف پاسخ در طیف طرح

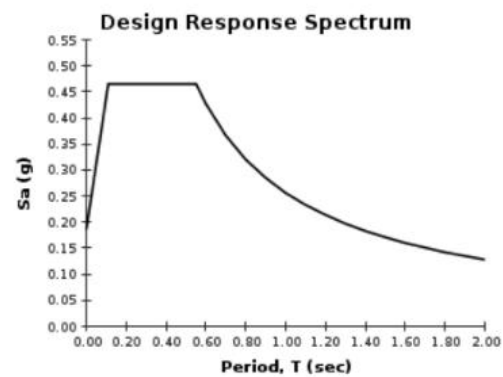
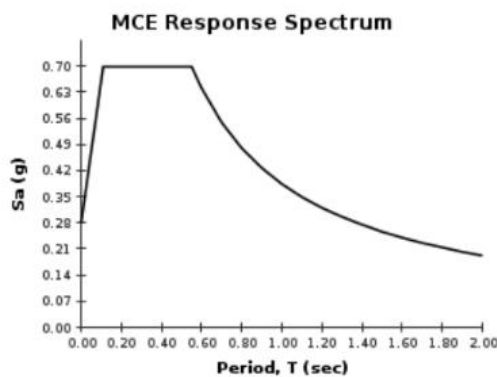
به این ترتیب، طیف طراحی هر پروژه متناسب با خطر لرزه‌ای منطقه، ویژگی‌های خاک و رفتار دینامیکی سازه تعیین می‌شود؛ موضوعی که نسبت به روش‌های گذشته، دقت بسیار بیشتری دارد.

### ۲-۴ مقادیر شتاب طیفی زلزله طرح، $S_{DS}$ و $S_{D1}$

مقادیر شتاب طیفی زلزله طرح در زمان تناوب‌های کوتاه،  $S_{DS}$ ، و در زمان تناوب یک ثانیه،  $S_{D1}$ ، به ترتیب با استفاده از روابط (۲-۲-الف) و (۲-۲-ب) بدست می‌آیند.

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad (۲-۲-الف)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} \quad (۲-۲-ب)$$



طیف پاسخ در زلزله طرح و بیشینه

### جمع‌بندی

ورود مفهوم شتاب طیفی به ویرایش پنجم استاندارد ۲۸۰۰ را می‌توان یکی از مهم‌ترین تحولات مهندسی زلزله در ایران دانست. این تغییر، حاصل سال‌ها پژوهش در زمینه رفتار دینامیکی سازه‌ها و تحلیل دقیق رکوردهای زلزله است. برخلاف روش گذشته که تنها بر شتاب اوج زمین (PGA)

تکیه داشت، رویکرد جدید با استفاده از طیف پاسخ، اثر دوره تناوب سازه را نیز در طراحی لحاظ می‌کند.

معرفی دو نقشه  $S_s$  و  $S_1$ ، امکان ارزیابی دقیق‌تر خطر لرزه‌ای برای ساختمان‌های کوتاه‌مرتبه و بلندمرتبه را فراهم کرده و در کنار ضرایب اصلاح خاک، مبنای تشکیل طیف طرح اختصاصی هر پروژه را ایجاد می‌کند. نتیجه این تحول، طراحی سازه‌هایی ایمن‌تر، اقتصادی‌تر و منطبق با رفتار واقعی آن‌ها در برابر زلزله است.

### دوره آموزش استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش پنجم

اگر علاقه مند به دیدن آموزش ویرایش پنجم استاندارد ۲۸۰۰ می باشید، می توانید این دوره را با تدریس فوق العاده حرفه ای مهندس توکلی از گروه مهندسی تاوات دریافت کنید. برای مشاهده جزئیات این آموزش و فهرست جلسات و ملاحظه کردن نمونه جلسه از آن به لینک زیر رجوع نمایید: <https://tavat.ir/product/package-2800>

### منابع

۱. استاندارد ۲۸۰۰ ایران، آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (ویرایش پنجم) .
۲. دوره آموزش استاندارد ۲۸۰۰ آموزش مهندس توکلی

