

# بررسی ضوابط تحلیل لرزه ای چند جهته سازه ها

وحید والامنش<sup>i</sup>؛ همایون استکانچی<sup>ii</sup>

## چکیده

یکی از پیشرفتهای تحلیل لرزه ای همگام با گسترش علوم رایانه، تحلیل سه بعدی سازه با اعمال مولفه های لرزه در چند جهت برای سازه های مهم و یا با پیچیدگی های رفتاری دینامیکی است. با توجه به ماهیت لرزه و انتشار فضایی امواج در جهات مختلف، تحلیل تک جهته تا حدی با بارگذاری واقعی سازه متفاوت خواهد بود که در بسیاری از مواقع میتواند دقت و واقع بینانه بودن تحلیل های انجام شده را سؤال برانگیز نماید. آیین نامه های طراحی لرزه ای، تحلیل چند جهته برای سازه های مهم را لازم دانسته و روشهایی برای در نظر گرفتن پاسخ نهایی و ماکزیمم سازه با در نظر گرفتن اثرات مولفه های لرزه در جهات مختلف ارائه کرده اند. با این وجود به نظر می رسد که آیین نامه های لرزه ای نگرش یکسانی در ارزیابی سازه تحت مولفه های چند جهته لرزه ندارند. در این مقاله علاوه بر ارائه خلاصه ای از ضوابط موجود در آیین نامه های لرزه ای، به نقاط قوت و ضعف این ضوابط پرداخته و پیشنهادهایی در جهت کاربردی تر شدن این ضوابط ارائه شده است.

**کلمات کلیدی:** تحریک چند جهته دینامیکی، تحلیل سه بعدی سازه ها، اثر مولفه قائم لرزه، همبستگی مولفه های لرزه

<sup>i</sup> دانشجوی دکتری دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی عمران: vahidvsh@civil.sharif.edu

<sup>ii</sup> دانشیار دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی عمران: stkanchi@sharif.edu

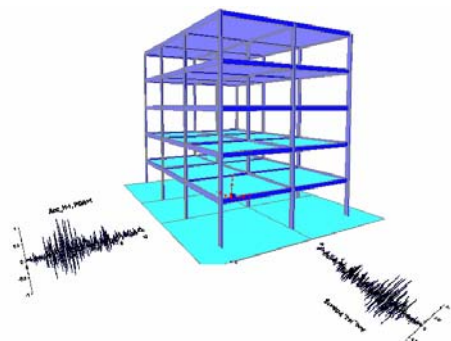
## ۱- مقدمه

لرزه دارای مولفه در جهات مختلف است و استفاده از رکورد لرزه در یک جهت خاص باعث بوجود آمدن اختلاف در نتایج می شود.

هر لرزه دارای سه مولفه انتقالی می باشد که برای منطقه آزاد، مستقیماً از شتابنگارها بدست می آید. همچنین سه مولفه دیگر لرزه که وابسته به ابعاد پی و سازه بوده و از روی سه مولفه انتقالی بدست می آید، حرکتی چرخشی و گهواره ای (Rocking Motion) هستند که می توانند در پاسخ سازه ای نقش داشته باشند، یکی از دلایلی که آیین نامه ها، ۵ درصد پیچش تصادفی را در تحلیل لرزه ای در نظر می گیرند، همین مسئله است [۱]. در این حالت آیین نامه های مختلف، پیشنهادهایی را جهت تحلیل سازه های

ارزیابی و تحلیل رفتار سازه تحت لرزه هایی که در آینده ممکن است بوقوع بپیوندد، نیازمند شناخت و پیش بینی لرزه محتمل و خصوصیات آن در منطقه و همچنین شناخت رفتار سازه تحت این لرزه می باشد. به طور کلی احتمال وقوع لرزه های مختلف را بر اساس شدت لرزه (IM) طبقه بندی می کنند که مهمترین و رایج ترین شاخص شدت لرزه همان طیف پاسخ شتاب (Sa) می باشد. روش معمول مهندسی سازه در بدست آوردن این طیف استفاده از رکورد لرزه بوقوع پیوسته در امتداد یکی از جهات افقی می باشد [۲۲]، اما همانطور که می دانیم

بدست آمده از تحلیل با سه زوج شتاب نگاشت مورد نظر خواهد بود.



شکل (۱). تحلیل دینامیکی سازه تحت مولفه های رکورد زلزله

همچنین بر اساس آیین نامه اگر به جای سه شتابنگاشت از هفت شتابنگاشت جهت تحلیل استفاده شود می توان متوسط مقادیر بازتاب را به عنوان بازتاب نهایی سازه در نظر گرفت.

در روش فوق اثر پیچش و پیچش تصادفی با در نظر گرفتن برون مرکزی نیروی جانبی واقعی طبقه و همچنین برون مرکزی اتفاقی طبقه بدست می آید. برون مرکزی اتفاقی به منظور به حساب آوردن احتمال تغییرات اتفاقی توزیع جرم و سختی از یکسو و نیروی ناشی از مولفه پیچشی زلزله از سوی دیگر در نظر گرفته می شود که در هر دو جهت برابر ۵ درصد بعد ساختمان در آن جهت است.

همانطور که اشاره شد با مقیاس نمودن ماکزیمم شتاب هر دو مولفه به مقدار یکسان، سعی شده است که اثر زاویه ورودی مولفه های زلزله در آن حذف گردد. همچنین این آیین نامه با در نظر گرفتن ضریب ۱,۴ برابر طیف آیین نامه، حاشیه ایمنی بیشتری در ارتباط با تحلیل چند جهته ایجاد می کند. در آیین نامه های دیگر این ضریب تا حدی کاهش داده شده است.

## ۲-۲-۲- آیین نامه ASCE 05-7

بر اساس آیین نامه ASCE تحلیل تاریخچه زمانی سازه ها بر پایه ضوابط زیر صورت می گیرد [۲]:

مهم تحت این مولفه های زلزله پیشنهاد کرده اند که در بخش بعد بدان اشاره خواهد شد.

بر اساس ضوابط آیین نامه برای سازه های منظم، کوتاه و با اهمیت کم، تحلیل دو بعدی و تحت زلزله در یک جهت کافی می باشد، اما در سازه های نامتقارن، بلند و پر اهمیت مانند سدها، پلها و نیروگاههای اتمی حتما باید تحلیل سه بعدی بر اساس تمامی مولفه های زلزله انجام شود [۲۲]. در این حالت بهترین روش، تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی سه بعدی تحت زلزله هایی است که در آن منطقه اتفاق افتاده و منطبق بر طیف طرح منطقه می باشید.

## ۲- ضوابط آیین نامه ها در تحلیل سه بعدی دینامیکی سازه ها

در زیر به بررسی ضوابط و توصیه های آیین نامه های مختلف در تحلیل سه بعدی سازه ها می پردازیم.

### ۲-۱- آیین نامه ۲۸۰۰ [۱]

در روش تاریخچه زمانی حداقل سه زوج شتابنگاشت متناسب با منطقه لازم است که کلیه این شتابها به مقدار حداکثر خود مقیاس می شوند، بدین معنی که شتاب حداکثر همه آنها برابر  $1g$  باشد. سپس طیف پاسخ هر زوج شتابنگاشت با استفاده از روش SRSS با یکدیگر ترکیب شده و یک طیف ترکیبی واحد برای هر زوج ساخته شود. در این حالت ضریب مقیاس (که در شتابنگاشتهای مورد نظر ضرب می گردد) چنان انتخاب می شود که متوسط طیفهای ترکیبی در محدوده دوره تناوبهای  $T=0,2$  و  $T=1,5$  در هیچ حالت کمتر از  $1,4$  برابر مقدار نظیر آن در طیف استاندارد نباشد.

بعد از مقیاس شتابنگاشتها، هر زوج شتابنگاشت به طور همزمان در دو جهت عمود بر یکدیگر در امتداد های اصلی سازه، به آن اثر داده می شود شکل (۱)، و بازتابهای سازه به صورت تابعی از زمان تعیین می شوند. بازتاب نهایی سازه در هر لحظه زمانی برابر با حداکثر بازتابهای

تعداد رکوردها کمتر از این مقدار باشد، مقادیر ماکزیمم بدست آمده ملاک طرح خواهد بود.

### ۲-۳- آیین نامه UBC1997 [۲۱]

برای تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی، شتابنگاشت‌های افقی باید منطبق بر طیف آیین نامه و یا طیف منطقه باشد و به طور کلی مولفه قائم از ضرب مولفه افقی زلزله در  $\frac{2}{3}$  بدست می آید، مگر اینکه مطالعات منطقه (پارامتر نزدیکی گسل  $N_a > 1$  باشد) عدد دیگری را نشان دهد.

در تحلیل سه بعدی حداقل باید سه زوج رکورد زلزله افقی واقعی یا مصنوعی منطبق بر طیف به نحوی مقیاس شوند که میانگین مجذور مربعات طیف پاسخ مولفه های آنها (SRSS) بیشتر از ۱۰ درصد کمتر از ۱,۴ برابر طیف پاسخ طراحی در محدوده ۲۰ درصد و ۱۵۰ درصد دوره تناوب اصلی سازه نشود. در این حالت دو مولفه افقی همزمان به سازه با در نظر گرفتن اثرات پیچش اعمال می شود.

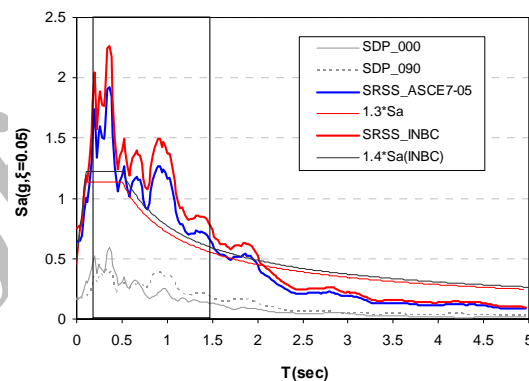
### ۲-۴- آیین نامه IBC 2003 [۲۳]

به طور کلی ترکیب مولفه های زلزله در تحلیلهای مختلف در این آیین نامه از آیین نامه ASCE 05-7 تبعیت می کند و این آیین نامه ضوابط جداگانه ای را در این مورد معرفی نمی کند.

### ۲-۵- آیین نامه Euro code 8-1998 [۱۰]

این آیین نامه، جهت تحلیل تاریخچه زمانی برای سازه های منظم، اعمال شتابنگاشت در یک جهت را کافی می داند، اما برای تحلیل سازه های نامنظم و بلند باید مولفه های افقی به طور همزمان به سازه اعمال گردد. در مورد مقیاس کردن شتابنگاشتها آیین نامه مربوط به ساختمانها اشاره خاصی نکرده است ولی در آیین نامه مربوط به پلها آیین نامه توصیه می کند که ضریب مقیاس به نحوی انتخاب شود که ترکیب SRSS طیف آنها از ۱,۳ برابر طیف طراحی کمتر نشود.

در تحلیل دو بعدی دینامیکی تاریخچه زمانی سازه ها، حداقل سه رکورد زلزله افقی لازم است که بر مبنای تاریخچه زلزله در منطقه و یا به طور مصنوعی تولید می شوند. در تحلیل سه بعدی حداقل باید سه زوج رکورد زلزله افقی واقعی یا مصنوعی منطبق بر طیف به نحوی مقیاس گردند که میانگین مجذور مربعات طیف پاسخ مولفه های آنها (SRSS) بیشتر از ۱۰ درصد کمتر از ۱,۳ برابر طیف پاسخ طراحی در محدوده ۲۰ درصد و ۱۵۰ درصد دوره تناوب اصلی سازه نشود. در شکل (۲) طیف برآیند بدست آمده بر اساس دو آیین نامه ASCE و ۲۸۰۰ برای زلزله Landers با یکدیگر مقایسه شده اند.



شکل (۲). مقایسه طیف برآیند در تحلیل دو جهته رکورد زلزله در آیین نامه ASCE05-7 و INBC برای سازه با  $T=1$  S

همانطور که در شکل مشاهده می شود، طیف پاسخ ترکیبی SRSS بر اساس آیین نامه ۲۸۰۰ به طور قابل ملاحظه ای بالاتر از طیف استاندارد است، به نظر می رسد که ضوابط ارائه شده در آیین نامه ۲۸۰۰ در تحلیل تاریخچه زمانی تا حد زیادی محافظه کارانه باشد به همین دلیل در آیین نامه های ASCE7-05 و سایر آیین نامه ها مورد استفاده قرار می گیرد، ضریب ۱,۴ تاحدی تعدیل شده است و طیف برآیند و در نتیجه ضرایب مقیاس پایین تری نسبت به آیین نامه ۲۸۰۰ خواهد داشت.

همانند آیین نامه ۲۸۰۰، اگر ۷ رکورد زلزله جهت تحلیل استفاده گردد میتوان مقدار میانگین نیروهای داخلی و تغییر مکان بدست آمده را مبنا قرار داد در حالی که اگر

## ۲-۷- مقایسه ضوابط آیین نامه ها در انتخاب رکوردهای زلزله

تقریباً در تمام آیین نامه ها تفاوت چندانی بین انتخاب رکورد زلزله در یک جهت و چند جهت وجود ندارد. استفاده از شتابنگاشت یکسان در دو جهت زلزله قابل قبول نمی باشد. حتی آیین نامه ASCE4-98 استفاده از یک شتابنگاشت در دو جهت را با وجود تاخیر فاز در یک جهت جایز نمی داند. در جدول (۱) ضوابط آیین نامه های طراحی در زمینه انتخاب رکوردهای زلزله که در تحلیل چند جهته مورد استفاده قرار می گیرند با یکدیگر مقایسه شده اند.

در این جدول خانه های پر شده بیانگر ملاک انتخاب در آیین نامه مورد نظر می باشد، همانطور که از جدول مشخص است، آیین نامه ASCE4-98 با سایر آیین نامه ها تفاوت مشخصی دارد که در آن شکل طیفی و وابستگی رکوردهای زلزله به یکدیگر ملاک انتخاب قرار گرفته است، در حالیکه در سایر موارد انتخاب رکورد زلزله بر مبنای مشخصات گسل و فاصله آن تا محل و همچنین نوع خاک منطقه انجام می گیرد.

در صورت عدم دسترسی به شتابنگاشتهای طبیعی، می توان از شتابنگاشتهای مصنوعی استفاده کرد که منطبق بر طیف آیین نامه باشد. با اعمال شتابنگاشتها به طور مستقل به سازه و با ترکیب SRSS یا مودی، پاسخ سازه بدست می آید. در این حالت برش پایه بر اساس برش پایه استاتیکی مقیاس می شود. در سازه های با دهانه بیش از ۲۰ متر، تیرهای طره ای، اعضای بتنی پیش تنیده و تیرهای حمال ستونها اعمال شتابنگاشت قائم همراه با مولفه های افقی الزامی می باشد. که به صورت زیر باید مقیاس گردد:

- برای سازه های با دوره تناوب کمتر از ۰٫۱۵ ثانیه، ۰٫۷، سازه های با دوره تناوب بیش از ۰٫۵ ثانیه، ۰٫۵ و برای سازه های با پریود مابین از درون یابی استفاده می شود. در این حالت تنها عضو مورد نظر به همراه اعضای متصل به آن تحت بار قائم قرار می گیرد و برای کل سازه در نظر گرفتن این مولفه لازم نیست.

## ۲-۶- آیین نامه FEMA368 (NEHRP) [۱]

این ضوابط از لحاظ تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی با آیین نامه ASCE7-05 مشابه است.

جدول (۱). تعریف مشخصات رکوردهای زلزله در آیین نامه های طراحی لرزه ای

آیین نامه	شدت زلزله	فاصله تا گسل	مکانیزم گسل	نوع خاک منطقه	مدت زمان زلزله	شکل طیفی	وابستگی مولفه های زلزله	حداقل تعداد رکوردهای زلزله	نوع شتابنگاشت	زاویه ورودی شتابنگاشت
۲۸۰۰	✓	✓	✓	✓	✓	✓		۳ (۷) <sup>۱</sup>	طبیعی-مصنوعی	۳
ASCE7-05	✓	✓	✓					۲ (۷)	طبیعی-مصنوعی	۳
ASCE4-98			✓	✓	✓	✓	✓	۱	طبیعی-مصنوعی	۲
FEMA368	✓	✓	✓					۳ (۷)	طبیعی-مصنوعی	۳
EC8		✓	✓	✓			✓	۳ (۷)	طبیعی-مصنوعی	۲
IBC2003		✓	✓	✓				۳ (۷)	طبیعی-مصنوعی	۳
UBC97		✓	✓	✓				۳ (۷)	طبیعی-مصنوعی	۳

۱- با استفاده از سه رکورد زلزله مقادیر ماکزیمم و استفاده از ۷ رکورد میانگین نتایج معیار خواهد بود.

۲- هر کدام از سه حالت می توانند به عنوان شتابنگاشت مورد استفاده قرار بگیرد.

۳- تنها در صورت موجود نبودن رکورد طبیعی استفاده از شتابنگاشتهای مصنوعی مجاز است.

طبیعی وجود دارد. در حالیکه آیین نامه های ۲۸۰۰، ASCE7-05، ASCE4-98، IBC و FEMA368 استفاده از

همچنین اختلافی بین آیین نامه ها در استفاده از رکوردهای مصنوعی زلزله و اصلاح شتابنگاشتهای

در هر صورت اولین معیار انتخاب رکورد زلزله برای تحلیل چند جهت، داشتن چند مولفه برای آن رکورد است. دوم بحث محتوای فرکانسی است که بستگی به دوره فرکانس ارتعاشی سازه ای دارد که مورد تحلیل قرار میگیرد. برای مثال برای سازه های با دوره تناوب بالا تعداد رکوردهای مناسب کاهش می یابد. سوم نحوه ثبت رکورد زلزله و فیلتر کردن است که تنها مربوط به رکوردها برای تحلیل چند جهت نبوده و برای رکوردهای تک جهت نیز صادق است.

### ۳-۱- انتخاب رکوردها بر اساس پارامترهای زلزله

بر اساس ضوابط آیین نامه ها در انتخاب رکوردهای زلزله بر اساس پارامترهای زلزله، سه پارامتر اصلی که عبارتند از بزرگا، فاصله تا گسل و خاک منطقه را باید ملاک انتخاب قرار داد، زیرا بسیاری از مهمترین خواص زلزله مانند محتوای فرکانسی، دامنه و شکل طیفی و مدت زمان زلزله به این سه پارامتر وابسته اند. شرایط خاک منطقه بر اساس سرعت موج برشی در بالاترین لایه خاک تعیین میشود. به جای انتخاب رکوردهای زلزله که در خاک منطقه ثبت شده باشد می توان از رکوردهای ثبت شده بر روی سنگ بستر که با استفاده از توابع انتقالی به رکوردهای در خاک منطقه تبدیل می شوند استفاده کرد. یکی دیگر از معیارهای انتخاب رکورد زلزله تابع اپسیلون  $\varepsilon(T_i)$  است [۵] که بیانگر شکل طیف در نزدیکی  $T_i$  است. در حالیکه مقادیر مثبت  $\varepsilon(T_i)$  بیانگر پیک طیف نسبت به نقاط مجاور است، مقدار منفی آن بیانگر پایین تر بودن طیف نسبت به نقاط دیگر مجاور می باشد. در حالیکه این پارامتر یکی دیگر از پارامترهای انتخاب مکانیزم گسل است، پیشنهاد شده است که می توان این پارامتر را در نظر نگرفت مگر اینکه با در نظر گرفتن این پارامتر بتوان تعداد بیشتری رکورد زلزله را مورد استفاده قرار داد [۷].

در هر حال اگر سطح خطر در یک منطقه بر اساس طیف طرح آیین نامه تعیین گردد، انتخاب رکوردهای زلزله بر

زلزله های واقعی را توصیه می کنند و استفاده از رکوردهای مصنوعی را در صورت نبود رکوردهای طبیعی مجاز می داند، آیین نامه EC8 استفاده از رکوردهای مصنوعی یا طبیعی را به طراح واگذار می کند. در هر صورت در تولید شتابنگاشت های مصنوعی، باید اثر وابستگی رکوردهای زلزله دیده شود.

در مورد وابستگی رکوردهای زلزله تنها آیین نامه ASCE4-98 ضابطه ای دارد که باید مولفه های زلزله که مورد استفاده قرار می گیرند مستقل از یکدیگر باشند. در این حالت اشاره میکند که برای استقلال دو مولفه از یکدیگر، ضریب همبستگی دو مولفه باید کمتر از ۰,۳ باشد. در مورد استقلال مولفه های زلزله در بخشهای بعد توضیحات بیشتری ارائه خواهد شد. در مورد زاویه اعمالی مولفه های شتابنگاشت، آیین نامه های ۲۸۰۰، ASCE4-98 و EC8 توصیه می کنند که مولفه های رکورد زلزله در جهات اصلی به سازه اعمال شوند اما توضیحی در مورد اینکه جهات اصلی برای سازه نامنظم چگونه تعیین می شوند نداده است. سایر آیین نامه های مورد بررسی، تنها اعمال شتابنگاشت ها در زاویه بحرانی را مجاز میدانند. در این حال برای بدست آوردن زاویه بحرانی معمولا جهت مولفه های زلزله را با زوایای ۱ یا ۵ درجه می چرخانند و پاسخ را در هر زاویه بدست آورده و ماکزیم آن را ملاک قرار می دهند.

بعد از تحلیل سازه تحت شتابنگاشت های زلزله، برآیند پاسخ سازه در دو جهت با ظرفیت سازه مقایسه و ملاک ارزیابی نهایی قرار خواهد گرفت. همچنین در آیین نامه ها اشاره شده است که اگر سه رکورد زلزله جهت تحلیل استفاده گردد، پاسخ ماکزیم و اگر ۷ رکورد جهت تحلیل استفاده شود، متوسط پاسخها ملاک ارزیابی خواهد بود.

### ۳-۲ انتخاب و مقیاس کردن رکوردهای زلزله

به طور کلی انتخاب رکوردهای زلزله بر مبنای دو پارامتر عمده انتخاب می شود. ۱- سناریوی زلزله به معنای انتخاب رکورد زلزله بر مبنای مشخصات گسل و منطقه، ۲- مشخصات طیف منطقه و مدت زمان زلزله.

اساس شرایط گسل عملا غیر ممکن خواهد بود، مگر اینکه پارامترهای زلزله بر اساس طیف طرح تعریف شوند.

### ۲-۳- انتخاب رکوردها بر اساس طیف طرح منطقه و مدت زمان زلزله

همانطور که اشاره شد اگر سطح خطر زلزله برای یک منطقه بر اساس طیف طرح استاندارد مشخص شده باشد، انتخاب رکوردها بر اساس طیف منطقه بسیار راحت تر از انتخاب بر اساس پارامترهای زلزله خواهد بود. با این حال از آنجا که مدت زمان زلزله به بزرگای و فاصله تا گسل بستگی دارد، استفاده از معیار زمان به عنوان پارامتر انتخاب برای چنین منطقه ای عملا ممکن نخواهد بود.

محققان راههای مختلفی برای انتخاب رکوردهای زلزله بر اساس طیف پیشنهاد کردند [۱۶] [۱۷]، با این حال استفاده از روش حداقل مجذور مربعات برای انتخاب رکورد زلزله استفاده می شود. رابطه ای به این منظور استفاده می شود که در زیر آمده است.

$$D_{rms} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \frac{Sa_R(T_i)}{PGA_R} - \frac{Sa_T(T_i)}{PGA_T} \right)^2} \quad (1)$$

در روابط فوق،  $Sa_R(T_i)$  و  $Sa_T(T_i)$  به ترتیب طیف پاسخ شتاب رکورد زلزله و طیف هدف در پریود  $T_i$ ،  $PGA_R$  و  $PGA_T$  ماکزیمم شتاب زلزله و شتاب طیف پاسخ در  $T=0$  و  $N$  تعداد پریودهای نوسانی انتخاب شده می باشد. روابط دیگری نیز برای در نظر گرفتن دوره تناوبهای مشخص پیشنهاد شده است که خارج از بحث می باشد [۶]. در تحلیلهای غیر خطی به دلیل افزایش دوره تناوب سازه پیشنهاد می شود که بازه طیف برای  $[T_m \cdot \sqrt{\mu_\Delta} T_1]$  در نظر گرفته شود، که در آن  $T_m$  پریود بالاترین مود ارتعاشی و  $\mu_\Delta$  ضریب شکل پذیری است.  $\sqrt{\mu_\Delta} T_1$  مربوط به دوره تناوب موثر است که در طراحی بر مبنای تغییر مکان تعریف می شود [۲۰].

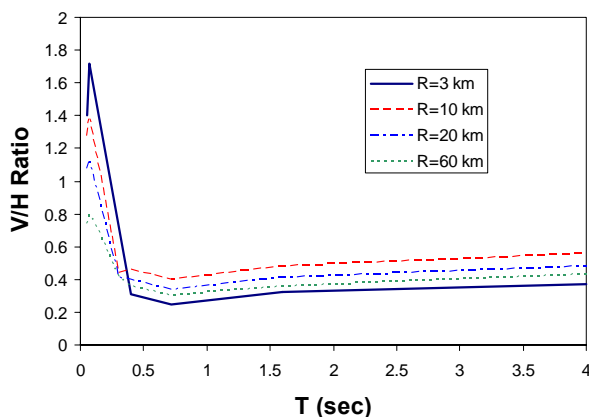
بر اساس تحقیقات صورت گرفته نشان داده شده است که انتخاب رکوردهای زلزله بر اساس طیف طرح به پراکندگی کمتری در نتایج منجر خواهد شد که از این لحاظ بر انتخاب رکوردهای زلزله بر اساس پارامترهای زلزله ارجحیت دارد. در این حالت تعداد کمتری رکورد زلزله برای ارزیابی سازه مورد نیاز خواهد بود [۱۲].

در بحث تعداد سیکلهای موثر و مدت زمان زلزله هنوز محققان به جمع بندی واحدی نرسیده اند [۱۲]، در عین حال تاثیر تعداد سیکلهای موثر بر پاسخ سازه تا حد زیادی به شاخص در نظر گرفته شده بستگی دارد، مثلا پارامتر خرابی تجمعی که برای تخمین خرابی در بتن مسلح در نظر گرفته میشود تا حد زیادی به تعداد سیکلهای موثر وابسته است. همچنین این پارامتر در مدلسازی مصالحی که با افزایش سیکلهای بارگذاری افت مقاومت پیدا می کنند تاثیر گذار است، که البته معمولا این نوع مدلسازی کار چندان راحتی نخواهد بود. همچنین نشان داده شده است که وابستگی مدت زمان زلزله و تعداد سیکلهای موثر ضعیف است و اگر وابستگی این دو و تاثیر آن بر روی رفتار سازه وجود داشت، در این صورت می توان گفت که در نظر گرفتن چنین پارامتری در انتخاب رکوردهای زلزله ضروری می نمود.

بر اساس تحقیقات انجام گرفته [۶] پاسخ سازه با انتخاب رکوردهای زلزله بر اساس سازگاری با طیف پاسخ، نسبت به انتخاب بر مبنای سناریوی زلزله بر اساس بزرگای، فاصله، تابع اپسیلون و دوره تناوب اصلی سازه، به ضریب تغییرات کمتری منجر می شود. در این حالت به تعداد رکورد کمتری برای رسیدن به پاسخ نهایی سازه نیاز خواهد بود.

### ۳-۳- روشهای محاسبه طیف برآیند مولفه های رکورد زلزله

به طور کلی چهار روش مقیاس کردن رکوردهای زلزله پیشنهاد شده است که عبارتند از میانگین هندسی (۲)، میانگین حسابی (۳)، پوش طیفی که برابر است با مقدار ماکزیمم طیف پاسخ هر مولفه و SRSS (۴).



شکل (۳). تاثیر فاصله از مرکز زلزله بر روی نسبت پاسخ زلزله قائم به افقی در خاک سخت (نوع D در آیین نامه) [۸].

در رابطه فوق  $Q_E$  نیروی اعضای ناشی از مولفه های افقی زلزله و  $0.2S_{DS}D$  نیروی ناشی از مولفه قائم زلزله است که  $S_{DS}$  طیف شتاب طراحی برای دوره تناوب ۰٫۲ ثانیه و  $D$  نیروی بوجود آمده در عضو تحت بار مرده است [۹].

#### ۴- بررسی مولفه های زلزله و همبستگی آنها

به طور کلی هر زلزله که به عنوان تابع ورودی به پی وارد می شود، دارای سه مولفه مستقل که مولفه های انتقالی آن می باشد و سه مولفه چرخشی است که از روی مولفه های انتقالی و ابعاد پی و یکسری مشخصات منطقه بدست می آید. این مولفه های چرخشی وابسته در موارد خاص مورد استفاده قرار میگیرند.

#### ۴-۱- همبستگی مولفه های زلزله و جهات اصلی

هر رکورد زلزله دارای جهات اصلی می باشد که مولفه های زلزله در آن راستاها از یکدیگر مستقل خواهند شد [۱۹]. اگر  $a_x, a_y, a_z$  به ترتیب دو مولفه افقی و قائم زلزله در راستای  $x, y, z$  باشند، می توان جهات اصلی را چنان تعیین کرد که همبستگی مولفه های آن از بین برود. ماتریس مجذور شدت زلزله را می توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$Sa_{GMxy}(T) = \sqrt{Sa_x(T) \cdot Sa_y(T)} \quad (2)$$

$$Sa_{AMxy}(T) = \frac{Sa_x(T) + Sa_y(T)}{2} \quad (3)$$

$$Sa_{SRSSxy}(T) = \sqrt{Sa_x^2(T) + Sa_y^2(T)} \quad (4)$$

استفاده از میانگین هندسی توسط محققان نسبت به سایر روشها توصیه شده است. با این حال در آیین نامه ها استفاده از روش SRSS جهت تعیین برآیند طیفی توصیه شده است.

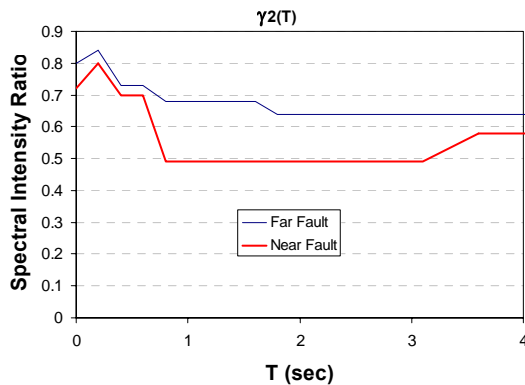
#### ۳-۴- اثر مولفه قائم زلزله

به طور کلی می توان گفت مولفه قائم زلزله در تحلیل توسط بسیاری از مهندسان در نظر گرفته نمی شود، زیرا اولاً مقدار آن کوچک می باشد، دوم خود سازه برای بار  $1g$  که توسط بارهای قائم به سازه اعمال می شود طرح می گردد و سوم معمولاً پیک شتاب قائم منطبق بر پیک مولفه افقی زلزله قرار ندارد و در یک فاز نیستند. در این حال مهندسین به عنوان یک قانون سر انگشتی که در آیین نامه UBC نیز آمده مولفه قائم را  $\frac{2}{3}$  مولفه افقی در نظر می گیرند [۲۱]. با این وجود در مناطق نزدیک منبع زلزله این تقریب صادق نمی باشد و ممکن است طیف پاسخ مولفه قائم از مولفه افقی بیشتر شود. در شکل (۳) نسبت حداقل مولفه قائم زلزله به مولفه افقی رسم شده است [۸]. از این نمودار کاملاً مشخص است که حداکثر نسبت پاسخ قائم به افقی در دوره تناوب بین ۰٫۰۵ تا ۰٫۱۵ ثانیه اتفاق می افتد که با افزایش دوره تناوب به شدت کاهش می یابد و برای دوره تناوب بالاتر از ۰٫۳ ثانیه به کمتر از ۰٫۵ کاهش می یابد. بنابراین نسبت  $\frac{2}{3}$  ذکر شده برای دوره تناوبهای بالا منطقی به نظر نمیرسد و کمتر از آن است.

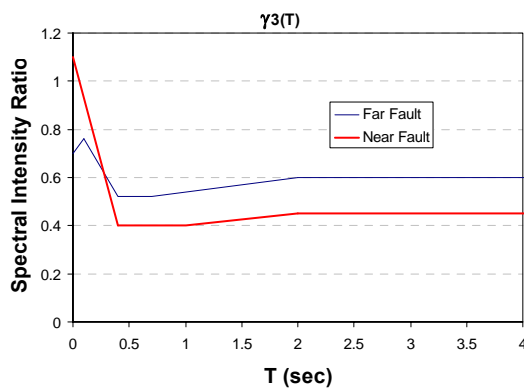
به طور کلی بجز در تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی که اثر مولفه قائم به طور همزمان در نظر گرفته می شود، اثر مولفه قائم زلزله را می توان به صورت زیر گرفت که در آیین نامه ASCE 07 نیز آمده است:

$$E = Q_E \pm 0.2S_{DS}D \quad (5)$$

از نمودارها مشخص است که مقدار  $\gamma_2$  بین ۰,۵ و ۰,۸ و مقدار  $\gamma_3$  بین ۰,۴ و ۱,۱ بسته به فاصله تا منبع زلزله تغییر می کند.



(الف)



(ب)

شکل (۴). نسبت طیف مولفه های زلزله به مولفه ماکزیمم افقی، الف) مولفه افقی مینیمم، ب) مولفه قائم [۱۵].

بر اساس تحقیقات انجام شده، نسبت طیف ماکزیمم مولفه افقی اصلی به رکورد ثبت شده افقی تقریباً برابر ۱,۰۶ و نسبت مولفه اصلی مینیمم افقی به مولفه افقی دوم ثبت شده برابر ۰,۹ می باشد. همچنین مولفه قائم ثبت شده تقریباً برابر با مولفه اصلی سوم زلزله می باشد [۱۴].

### ۳-۴- اثر زاویه اعمال شتابنگاشتها

همانطور که گفته شد، مولفه های انتقالی زلزله شامل دو مولفه افقی و یک مولفه قائم است که همانطور که در بخش [۴-۱] گفته شد، می توان جهات اصلی را برای مولفه های زلزله تعیین کرد. بر اساس تحقیقات انجام شده، با استفاده

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (6)$$

که در آن:

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{S} \int_0^S a_i(t).a_j(t).dt \quad (7)$$

و S مدت زمان زلزله است.

در این ماتریس آرایه غیر صفر بیانگر وجود همبستگی بین دو مولفه مربوط است. همبستگی دو مولفه بوسیله پارامتر ضریب همبستگی تعریف می شود که برابر است با:

$$\rho_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{(\sigma_{ii}.\sigma_{jj})^{0.5}} \quad (8)$$

ضریب همبستگی بین صفر و یک متغیر است و ضریب ۱ به معنای همبستگی کامل دو مولفه می باشد. رابطه بین مولفه زلزله در جهات اصلی با جهات X, Y و Z به صورت زیر است:

$$\begin{Bmatrix} a_1(t) \\ a_2(t) \\ a_3(t) \end{Bmatrix} = \Phi^T \begin{Bmatrix} a_x(t) \\ a_y(t) \\ a_z(t) \end{Bmatrix} \quad (9)$$

که در آن  $\Phi$  ماتریس بردارهای ویژه است.

### ۲-۴- رابطه بین مولفه های زلزله

برای زلزله های طبیعی توسط محققین مختلف محورهای اصلی بدست آمده و خصوصیات طیف پاسخ مولفه های محورهای اصلی بدست آمد. در این حال اگر نسبت طیف پاسخ مولفه افقی مینیمم به مولفه افقی ماکزیمم را در هر زمان  $\gamma_2$  و نسبت طیف پاسخ مولفه قائم (اگر چه این مولفه به طور کامل قائم نبوده و ممکن است زاویه صفر تا ۲۰ درجه را با محور قائم بوجود آورد) به مولفه افقی ماکزیمم را  $\gamma_3$  بنامیم، برای رکوردهای نزدیک و دور از گسل می توان  $\gamma_2$  و  $\gamma_3$  را بر حسب زمان تناوب مانند شکل (۴) رسم کرد [۱۵].



۲- استفاده از ضریب ۱,۴ برابر طیف آیین نامه که در آیین نامه ۲۸۰۰ توصیه شده است، تا حدودی محافظه کارانه بوده و مقدار ۱,۳ توصیه شده در آیین نامه های دیگر می تواند به نتایج واقعی تری منجر شود. استفاده از ضرایب محافظه کارانه موجب میشود که عملاً ضریب اطمینان موثر در تحلیل های تاریخچه زمانی که روش دقیقتری نسبت به روشهای استاتیکی هستند بر خلاف منطق مهندسی بالا تر بوده و در نتیجه تمایل به استفاده از مزایای بالقوه این روش تضعیف می شود. انتظار می رود در ویرایش های بعدی آیین نامه این ناسازگاری به نحوی تعدیل شود.

۳- علیرغم مطالعات فراوان جهت محاسبه زاویه بحرانی مولفه های زلزله، هنوز نتیجه قطعی در این ارتباط وجود ندارد و بهتر است با تغییر زاویه اعمال مولفه های زلزله با بازه مناسب پاسخ ماکزیمم سازه، به طور مستقیم محاسبه شود.

۴- در مورد تحلیل چند جهته در ناحیه غیر خطی هنوز اتفاق نظر جامعی بین متخصصین بوجود نیامده و تحقیقات وسیعتر کاربردی در این زمینه لازم و ضروری به نظر می رسد.

## ۶- مراجع

[۱] آیین نامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله. استاندارد ۲۸۰۰-۸۴. ویرایش سوم. مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، شماره ض-۲۵۳.

[۲] ASCE Standard, "Minimum design loads for buildings and other structures", ASCE/SEI 7-05

[۳] Athanopoulou. A.M, "Critical orientation of three correlated seismic components ", Engineering Structures 27 (2005) 301-312.

[۴] Baker J.W., C. A. Cornell, "Which Spectral Acceleration Are You Using?", Earthquake Spectra, Volume 22, No. 2, pages 293-312, May 2006.

[۵] Baker, J.W, and Cornell, C.A, (2005) "A vector-valued ground motion intensity measure consisting of spectral acceleration and epsilon" Earthquake eng. struct. dyn, 34, 1193-1217.

از روش طیفی، پاسخ سازه تحت رکوردهای زلزله در جهات اصلی آن منجر به پاسخ ماکزیمم سازه خواهد شد [۱۹]. با این حال برای تحلیل تاریخچه زمانی سازه تحت زلزله هنوز نتایج قطعی برای زاویه بحرانی اعمال شتابنگاشتها وجود ندارد، در عین حال بنا بر تحقیقات انجام گرفته [۱۳] زاویه بحرانی بر اساس یک شاخص خاص برای زلزله های مختلف متفاوت است و همچنین بر اساس یک زلزله خاص برای شاخصهای مختلف خرابی نیز متفاوت خواهد بود. همچنین پاسخ ماکزیمم سازه بر اساس زاویه بحرانی می تواند به اندازه قابل توجهی بیشتر از اعمال شتابنگاشتها در جهات اصلی باشد. با توجه به موارد فوق بهترین گزینه جهت تحلیل چند جهته سازه تحت رکوردهای زلزله اعمال شتابنگاشتها در زاویه های مختلف و تصمیم گیری در مورد ماکزیمم پاسخ سازه خواهد بود.

## ۵- نتیجه گیری

با توجه به مطالعات انجام شده می توان نتیجه گرفت که بحث تحلیل چند جهته هنوز جایگاه اصلی خود را در تحلیل و طراحی عملی سازه ها بدست نیاورده است و ضوابط آیین نامه ای در بسیاری موارد از جمله انتخاب رکوردهای زلزله، مقیاس نمودن مولفه های رکورد زلزله، نحوه اعمال مولفه های شتاب به سازه، تحلیل های غیر خطی و تعریف شاخصهای خرابی روش های یکسانی را ارائه نمی نمایند. تجربه و تحقیقات بیشتری در این زمینه برای رسیدن به راهکارهای جامع و کاربردی مورد نیاز است.

بر اساس مطالعات صورت گرفته برای تحلیل چند جهته، موارد زیر قابل توجه می باشند:

۱- در صورت وجود شتابنگاشتهای حقیقی سازگار برای منطقه مورد نظر، استفاده از شتابنگاشتهای موجود در تحلیل چند جهته در اغلب ضوابط توصیه می شود. در صورت عدم وجود شتابنگاشتهای سازگار با شرایط منطقه، می توان از شتابنگاشتهایی که منطبق با طیف طراحی منطقه باشند استفاده کرد.

- Lopez OA, Hrnandez JJ. Response spectra for two horizontal seismic components and application of the CQC3 rule. Proceeding of the 7th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Boston. 2002. [۱۵]
- Malhotra, P. K. [2003] "Strong-motion records for site-specific analysis," Earthquake spectra 19(3), 557–578. [۱۶]
- Naeim, F., Almoradi, A., and Pezeshk, S. [2004] "Selection and scaling of ground motion time histories for structural design using genetic algorithms," Earthquake Spectra 20(2), 413–426. [۱۷]
- Newmark, N.M. and Hall, W.J. 1982. Earthquake Spectra and Design, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, CA. [۱۸]
- Penzien J. Watabe M. Characteristics of 3-dimensional earthquake ground motion. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 1975; 3:365-374. [۱۹]
- Priestley, M. J. N., Calvi, G. M., and Kowalsky, M. J. [2007] Direct Displacement-based seismic Design of Structures, IUSS Press, Pavia (draft, book in preparation). [۲۰]
- Uniform Building Code*, 1997. [۲۱]
- Wilson, E.L., "Three dimensional static and dynamic analysis of structures", Computers and Structures, Inc. 1995, California, 94704 USA [۲۲]
- Beyer, K. and Bommer, J. J. (2007), "Selection and Scaling of Real Accelerograms for Bi-Directional Loading: A Review of Current Practice and Code Provisions", Journal of Earthquake Engineering, 11:13–45. [۲۳]
- Bommer, J. J. and Acevedo, A. [2004] "The use of real earthquake accelerograms as input to dynamic analysis," Journal of Earthquake Engineering 8 (special issue 1), 43–91. [۲۴]
- Campbell, K.W. and Bozorgnia, Y. 1999. "Vertical Ground Motion: Characteristics, Relationship with Horizontal Component, and Building-Code Implications;" in Proc. SMIP99 Seminar on Utilization of Strong-Motion Data, M. Huang, Ed., Sept. 15, San Francisco, pp. 23-49. California Strong Motion Instrumentation Program, Sacramento, CA). [۲۵]
- Chen, W. F. and Scawthorn, C. "Earthquake Engineering Handbook". CRC Press, Boca Raton London New York Washington, D.C.2003 [۲۶]
- Eurocode 8, "Design provisions for earthquake resistance of structures", DD ENV, 1998. [۲۷]
- Fema 368, "NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures", 2000 Edition. [۲۸]
- Hancock, J. and Bommer, J. J. [2006], "A state-of-knowledge review of the influence of strongmotion duration on structural damage," Earthquake Spectra 22(3), 827–845. [۲۹]
- International Building Code. 2003 [۳۰]
- Lopez OA., Hrnandez JJ., Bonilla, R., Fernandez, A. Response spectra for multicomponent structural analysis. Earthquake spectra, Volume 22. PP. 85-113(2006). [۳۱]