

Study on the uncertainty of the recorded orientation of horizontal components of ground motions for critical scenarios of seismic evaluation of regular structures

Mahboobeh Pirizadeh^{1*}, Saleh Hamidi²

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, West Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- MSc in Earthquake Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, West Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

ABSTRACT

One of the uncertainties in the seismic evaluation of structures is how to select random seismic records and how to consider the orientation effects of horizontal components of ground motions in the time history analysis. The rotation of the recorded components can increase the seismic characteristics such as peak ground acceleration, response spectrum shape, or earthquake energy. Therefore, the effects of this issue on the most critical scenarios of seismic response of important structures are questionable. This study has evaluated three rotation methods proposed by previous studies, i.e., principal axes, maximum direction, and fault-normal and fault-parallel orientation, based on the data available in the Iranian Strong Motion Network. Then, the effects of these methods are assessed on the seismic response of two building types, low-rise and medium-rise regular steel moment frames, using the nonlinear time history analyses. According to the results, if the structure principal axes are along with the most critical orientation of the accelerometer installation, the magnification of the seismic response can be expected, especially in near-fault structures. So that for the studied structures, two structural response parameters including the maximum base shear and maximum inter-story drift ratio are increased between 10 and 120 percent under different rotated ground motions, depending on the earthquake type and the applied method of record rotation and also depending on the building height and its distance to the fault. According to the results, the selection of the most critical rotation method was a complicated and time-consuming process. Based on this research results, it is proposed to give priority to the rotation method which maximizes the value of peak ground acceleration and specific energy density of the seismic record to reduce the calculations of identifying the critical scenario for the rotation method of seismic ground motions in the time history analysis method.

ARTICLE INFO

Receive Date: 16 April 2023

Revise Date: 11 July 2023

Accept Date: 03 September 2023

Keywords:

Seismic evaluation
Rotation of horizontal
components of ground motions
Fault orientation
Response Spectrum
Time history analysis

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.393483.3093>

*Corresponding author: Mahboobeh Pirizadeh.

Email address: pirizadeh.mahboobeh@wtiau.ac.ir

بررسی عدم قطعیت زاویه ثبت مولفه افقی شتابنگاشت‌های لرزه‌ای برای سناریوهای بحرانی ارزیابی لرزه‌ای سازه‌های منظم

محبوبه پیری زاده^{*}، صالح حمیدی^۲

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب، تهران، ایران

۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران گرایش زلزله، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب، تهران،

ایران

چکیده

از جمله عدم قطعیت‌های موجود در ارزیابی لرزه‌ای سازه‌ها به روش تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی، موضوعاتی نظیر نحوه انتخاب و اعمال زوج مولفه افقی شتابنگاشت لرزه‌ای به سازه می‌باشد. با توجه به اینکه جهت استقرار سنسورهای دستگاه شتابنگار در خصوصیات لرزه‌ای داده‌های شتابنگاری ثبت شده مانند پیشینه شتاب زمین، طیف پاسخ و انرژی تاثیر قابل توجهی دارد لذا نحوه دوران شتابنگاشت لرزه‌ای برای دستیابی به سناریوهای بحرانی تر پاسخ سازه‌ها بر حسب درجه اهمیت آنها محل بحث است. در این تحقیق، بر اساس داده‌های ثبت شده در شبکه شتابنگاری ایران برای پنج زمین لرزه بارز در سه پهنه لرزه زمین ساخت زاگرس، ایران مرکزی و البرز، سه روش دوران پیشنهادی در تحقیقات قبلی شامل روش محورهای اصلی، روش جهت حداکثری و روش محورهای موازی و عمود بر گسل ارزیابی شده و تاثیر آنها در پاسخ لرزه‌ای دو تیپ ساختمانی قاب خمشی فولادی منظم کوتاه مرتبه (۴ طبقه) و میان مرتبه (۸ طبقه) با استفاده از روش تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی بررسی شده است. نتایج نشان داد که توجه به عدم قطعیت ناشی از زاویه استقرار سنسورهای دستگاه‌های ثبت شتابنگاشت در ایستگاه‌های شتابنگار لرزه‌ای تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌های کوتاه مرتبه و میان مرتبه مورد بررسی داشته است، به نحوی که افزایش بین ۱۰ تا ۱۲۰ درصدی پیشینه تغییر مکان نسبی طبقات و پیشینه برش پایه سازه در زلزله‌های مختلف بنابر نوع زلزله، دوری و نزدیکی ایستگاه، نوع روش دوران و ارتفاع سازه مشاهده شده است لکن انتخاب روش دوران برای رسیدن به بحرانی‌ترین سناریوی ممکن پیچیده بوده و بسته به دوری و نزدیکی سازه به گسل متفاوت می‌باشد. برای کاهش محاسبات شناسایی سناریوی بحرانی برای روش دوران شتابنگاشت‌های لرزه‌ای در روش تحلیل تاریخچه زمانی، اولویت دادن به روش دورانی که با اعمال آن، پارامترهای لرزه‌ای پیشینه شتاب و چگالی انرژی ویژه شتابنگاشت لرزه‌ای حداکثر شود به عنوان پیشنهاد مطرح گردید.

کلمات کلیدی: ارزیابی لرزه‌ای، دوران مولفه افقی شتابنگاشت لرزه‌ای، راستای گسل، طیف پاسخ، تحلیل تاریخچه زمانی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
https://doi.org/10.22065/jsce.2023.393483.3093	۱۴۰۲/۰۲/۳۱	۱۴۰۲/۰۶/۱۲	۱۴۰۲/۰۶/۱۲	۱۴۰۲/۰۴/۲۰	۱۴۰۲/۰۱/۲۷
10.22065/jsce.2023.393483.3093	محبوبه پیری زاده pirizadeh.mahboobeh@wtiau.ac.ir			*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

از اوایل قرن بیستم با نصب دستگاه‌های ثبت رکوردهای^۱ لرزه‌ای اعم از دستگاه‌های لرزه‌نگار و شتابنگار در کشورهای لرزه‌خیز و ایجاد و گسترش شبکه‌های شتابنگاری، تحول بزرگی در ثبت و پردازش داده‌های مربوط به پدیده زلزله به عنوان یکی از پرچالش‌ترین سوانح طبیعی مؤثر بر زندگی بشر در مناطق مختلف لرزه‌خیز جهان رخ داده است و به پیشرفت و توسعه آیین‌نامه‌های لرزه‌ای در طراحی و ارزیابی لرزه‌ای سازه‌ها و ایجاد رویکردی نظام‌مند برای کاهش خطرپذیری لرزه‌ای و کاهش خسارات بزرگ‌مقیاس در محیط شهرهای لرزه-خیز کمک بزرگی کرده است؛ لکن علیرغم اینکه در سه دهه اخیر، استفاده مستقیم از داده‌های ثبت شده از حرکت قوی زمین در تحلیل و طراحی سازه‌ها به روش‌هایی نظیر تحلیل تاریخچه زمانی خطی و غیرخطی با توجه به پیشرفت‌های نرم‌افزاری تسهیل شده است ولی همچنان عدم قطعیت‌های زیادی در برآورد نیاز و ظرفیت لرزه‌ای سازه‌ها به دلایل مختلفی مانند ماهیت تحریک لرزه‌ای و پیچیدگی شناسایی ویژگی‌های گسل‌های مسبب رخداد لرزه‌ای در طول زمان بهره‌برداری از سازه و نحوه انتخاب شتابنگاشت‌های لرزه‌ای ثبت شده موجود در شبکه شتابنگاری و از سوی دیگر، عدم قطعیت‌های موجود در برآورد ظرفیت اعضا سازه‌ای و فرضیات و محدودیت‌های روش‌های تحلیل وجود دارد که قابلیت اطمینان به برآورد پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها را به خصوص برای سازه‌های با کاربری‌های با اهمیت زیاد و بسیار زیاد تحت تاثیر قرار می‌دهد. یکی از این عدم قطعیت‌ها در بخش برآورد نیروی زلزله، موضوع نحوه ثبت مولفه‌های افقی شتابنگاشت‌های لرزه‌ای توسط سنسورهای دستگاه‌های شتابنگار می‌باشد. زمانی که امواج زلزله به دستگاه شتابنگار می‌رسند، معمولاً شتابنگاشت‌هایی تحت سه محور شامل دو محور افقی عمود بر هم و یک محور قائم که برای دستگاه تعریف شده است، ثبت می‌شود که به طور متداول، سنسورهای دستگاه شتابنگار به نحوی نصب می‌گردند که یک مولفه افقی در جهت شمال و یک مولفه در جهت شرق ثبت گردد [۱]. البته در شرایط خاص که دستگاه برای پایش حرکات یک گسل خاص نصب می‌گردد، ممکن است در زمان نصب دستگاه به راستای موازی و عمود بر گسل توجه شود و سنسورهای دستگاه در جهت این دو محور تنظیم گردند لکن در عموم موارد، نصب دستگاه فارغ از ویژگی‌های هندسی یک گسل خاص و با هدف ثبت عموم حرکات ناشی از گسل‌های متعددی در منطقه صورت می‌گیرد. به این ترتیب حرکت ثبت شده توسط سنسورهای دستگاه وابسته به جهت و زاویه نصب سنسور می‌باشد و با تغییر این زاویه، شتابنگاشت ثبت شده تغییر قابل توجهی خواهد داشت؛ این درحالی است که اگر دو مولفه افقی زمین‌دوران داده شوند، امکان تولید و ثبت شتابنگاشت‌هایی با شدت قوی‌تر وجود دارد و به همین منظور زاویه و آزیموت^۲ دو مولفه افقی متعامد ثبت شده توسط دستگاه شتابنگار می‌تواند در تخمین معیارهای شدت لرزه‌ای و پاسخ لرزه‌ای در مهندسی زلزله موثر باشد. در این مقاله، بر اساس داده‌های ثبت شده از برخی از زلزله‌های مهم کشور که از شبکه شتابنگاری کشور استخراج شده است به بررسی تاثیر این عدم قطعیت بر تغییر خصوصیات مهندسی رکورد لرزه‌ای پرداخته و سپس کارایی روش‌های پیشنهادی در تحقیقات و برخی آیین‌نامه‌های لرزه‌ای برای شناسایی زاویه بحرانی دوران شتابنگاشت لرزه‌ای با هدف دستیابی به بحرانی‌ترین سناریوها برای ارزیابی پاسخ لرزه‌ای سازه‌های دارای اهمیت زیاد مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مروری بر روش‌های دوران مولفه افقی شتابنگاشت‌های لرزه‌ای و دیدگاه آیین‌نامه‌های لرزه‌ای

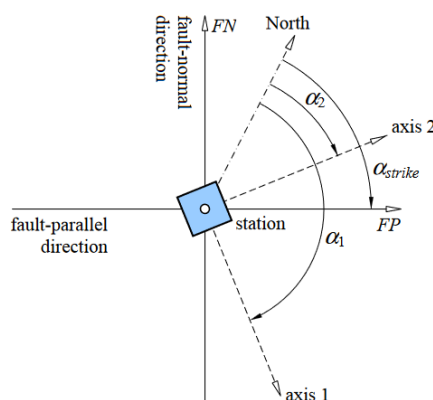
با بررسی پیشینه تحقیقات در خصوص پیدا کردن زاویه دوران (یا چرخش) بحرانی مولفه‌های افقی حرکات زمین‌لرزه در تحلیل‌های لرزه‌ای، این دسته بندی قابل احصا می‌باشد که در تحقیقات قبل از سال ۲۰۰۰ میلادی، تمرکز بر نحوه تطبیق روش‌های خطی و به خصوص تحلیل‌های دینامیکی طیفی با موضوع عدم قطعیت ناشی از ثبت رکورد توسط دستگاه موردتوجه محققین بوده است. به طوری که علیرغم اینکه اولین بار پنزین و واتابه در سال ۱۹۷۴ م. محورهای اصلی^۳ یک زوج مولفه افقی شتابنگاشت را به عنوان محور یا زاویه‌ای تعریف کردند که همبستگی بین دو مولفه افقی در آن به حداقل برسد [۲] لکن تا سال ۲۰۰۶ میلادی، این ایده چندان موردتوجه محققان در حوزه تحلیل‌های تاریخچه زمانی نبوده است بلکه در این دوره، مطالعات زیادی در خصوص زاویه برخورد شتابنگاشت با محورهای اصلی

¹ Records

² Azimuth

³ Principal axis

سازه به خصوص سازه‌های نامنظم انجام شده است که از جمله آنها می‌توان به مطالعات ویلسون و همکاران در سال ۱۹۹۵ م. و لویز و توریس در سال ۱۹۹۷ م. اشاره کرد که زاویه‌ای تحت عنوان زاویه بحرانی برای زوایای مختلف برخورد زوج شتابنگاشت نسبت به محورهای اصلی سازه تعریف گردید به نحوی که پاسخ بیشینه را نسبت به کلیه زوایای ممکن حاصل کند و سپس، روش تقریبی برای روش تحلیل خطی بر مبنای استفاده از مجذور مربعات طیف پاسخ دو مولفه شتابنگاشت و استفاده از قانون موسوم به ۱۰۰-۳۰ برای اعمال تقریبی اثر همزمان دو مولفه افقی به روش طیفی برای سازه‌های نامنظم در پلان ارائه شد [۳،۴]. لکن از سال ۲۰۰۰ میلادی به بعد، با توجه به پیشرفت‌های نرم افزاری در حوزه تحلیل سازه‌ها به روش تحلیل تاریخچه زمانی و با توجه به تمرکز تحقیقات بر خصوصیات زلزله‌های نزدیک گسل و لزوم ارزیابی لرزه‌های سازه‌های واقع در محدوده‌های نزدیک گسل، موضوع عدم قطعیت‌های ناشی از نحوه ثبت رکورد لرزه‌ای علاوه بر زاویه برخورد آن به سازه مورد تمرکز بخشی از محققان قرار گرفت که انعکاس آن در برخی آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های لرزه‌ای در دهه اخیر مشهود است. برای نمونه در تحقیقات متعددی موضوع لزوم چرخاندن رکوردهای ثبت شده در ایستگاه‌های نزدیک گسل، به زاویه‌ای که در دو راستای موازی و عمود بر گسل مطابق شکل ۱ باشد مورد بررسی قرار گرفته است [۵-۱۲] که در اکثر این تحقیقات از روش شناسایی راستای گسل مسبب و استخراج آزمون قرارگیری سنسورهای مولفه‌های افقی دستگاه شتابنگار ایستگاه مورد نظر با استفاده از اطلاعات موجود در داده‌های شبکه شتابنگاری و سپس چرخاندن آن به راستای موازی و عمود بر گسل استفاده شده است؛ لکن در تعدادی از این تحقیقات، از این فرض استفاده شده است که محورهای اصلی ماژور و مینور (بزرگ و کوچک) مطابق روش پنزین و واتابه (۱۹۷۵ م.) بیشترین همبستگی را با جهت‌های موازی و عمود بر گسل دارند و لذا چرخاندن شتابنگاشت به جهت‌های متناظر با محورهای اصلی را به عنوان جایگزین تقریبی شناسایی راستای گسل با مطالعات زمین‌شناسی میدانی برای شناسایی جهت بحرانی مورد استفاده قرار داده‌اند [۱۳-۱۵].



شکل ۱: دوران مولفه‌های افقی ثبت شده در ایستگاه به راستای موازی و عمود بر گسل (با فرض اینکه گسل مسبب راستای افقی داشته باشد) [۱۰]

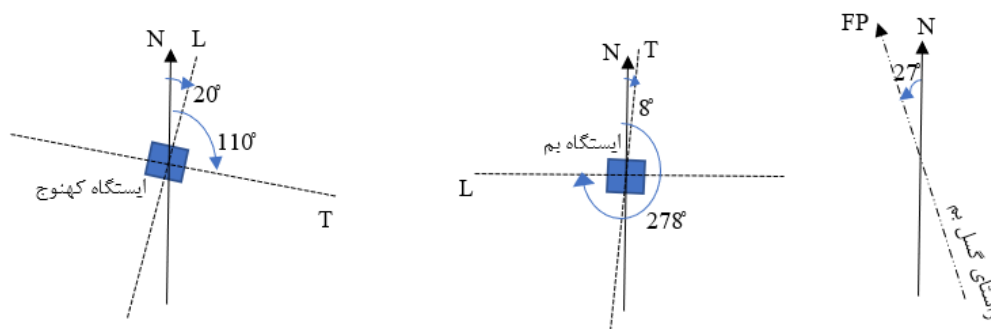
در حوزه مقررات نیز در آیین نامه لرزه‌ای ASCE7-10 [۱۶] و ویرایش‌های بعدی آن، الزام به چرخاندن هر جفت از مولفه‌های افقی شتابنگاشت لرزه‌ای در جهت‌های موازی و عمود بر راستای گسل (FN/FP) و اعمال آن به محورهای اصلی سازه در مدل سه بعدی اعمال شده است. از سوی دیگر، مطالعات بور و همکاران در سال‌های ۲۰۰۶ م. و ۲۰۱۰ م.، مبنای زاویه دوران بحرانی را بر بیشینه شدن طیف پاسخ الاستیک شتابنگاشت لرزه‌ای در زوایای دوران و زمان تناوب‌های مختلف قرار داده و زاویه دورانی که طیف پاسخ الاستیک شتابنگاشت را در زمان تناوب‌های مختلف به حداکثر میزان خود می‌رساند با دو روش پیشنهادی وابسته به زمان تناوب و غیروابسته به زمان تناوب به عنوان زاویه بحرانی دوران معرفی نموده است [۱۷،۱۸] که این تحقیقات منجر به این شده است که در آیین‌نامه لرزه‌ای-ASCE7-16 [۱۹] و ویرایش‌های بعدی آن، طیف جهت حداکثری (MD) جایگزین طیف میانگین مربعات دو مولفه (SRSS) برای مقیاس کردن شتابنگاشت‌های لرزه‌ای گردد و برای تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی سازه‌های دور از گسل، این الزام اعمال شده است که هر جفت شتابنگاشت در جهتی چرخانده شود که متوسط طیف کلیه رکوردهای اعمالی به هر جهت اصلی سازه بیش از ۱۰٪ با متوسط طیف پاسخ

کلیه رکوردها اختلاف نداشته باشد. در واقع برای سازه‌های دور از گسل سعی شده که دیدگاه تصادفی بودن زاویه شتابنگاشت نسبت به جهت‌های اصلی سازه لحاظ شود در حالی که در سازه‌های نزدیک گسل، الزام به چرخاندن همه رکوردها به راستای موازی و عمود بر گسل اعمال می‌گردد. لازم به ذکر است که در برخی از تحقیقات دهه اخیر نظیر مطالعه ون و همکاران در سال ۲۰۲۰ م، عدم قطعیت‌های بیشتری در این زمینه در زلزله‌های متوالی مورد بررسی قرار گرفته است و امکان تغییر زاویه بحرانی شتابنگاشت لرزه‌ای اصلی پس از وقوع برخی پس لرزه‌ها تا حدود ۳۰ درجه را محتمل اعلام نموده‌اند که البته فعلا در آیین‌نامه‌های لرزه‌ای به این موضوع اشاره‌ای نشده است [۲۰]. در نتایج تحقیق ریورا-فیگورا و مونتجو در سال ۲۰۲۳ م، نیز علیرغم اینکه اثر دوران رکورد لرزه‌ای بر افزایش نیاز لرزه‌ای غیرالاستیک تغییر مکان نسبی سازه‌های با هندسه پلان و سیستم باربر جانبی وابسته به آزمون تا حدود ۳۰ درصد حاصل شده است اما میانگین‌گیری پاسخ لرزه‌ای سازه تحت اثر تعداد رکوردهای لرزه‌ای بیش از ۱۱ رکورد به عنوان راهکاری برای کاهش اثرات این عدم قطعیت تا حدود ۱۰٪ مورد توجه قرار گرفته است [۲۱].

در ویرایش فعلی آیین نامه استاندارد ۲۸۰۰ ایران [۲۲] رویکردی به موضوع دوران یا عدم دوران رکورد لرزه‌ای در تحلیل‌های تاریخچه زمانی مشاهده نمی‌گردد و رکورد ثبت شده توسط دستگاه‌های ثبت زمین‌لرزه می‌تواند بعد از مقیاس نمودن با میزان خطر ساختگاه و بدون توجه به مساله دوران مستقیماً در تحلیل تاریخچه زمانی مورد استفاده قرار گیرد؛ بنابراین بررسی این موضوع با استفاده از اطلاعات ثبت شده از شتابنگاشت‌های لرزه‌ای در شبکه شتابنگاری کشور می‌تواند به تکمیل ضوابط لرزه‌ای ملاک عمل کمک نماید.

۳- بررسی میزان حساسیت خصوصیات اصلی شتابنگاشت لرزه‌ای به زاویه ثبت و میزان کارایی روش‌های مختلف دوران

در این تحقیق، بر اساس داده‌های ثبت شده در شبکه شتابنگاری ایران، پنج زمین لرزه بارز در سه پهنه لرزه‌زمین‌ساخت زاگرس، ایران مرکزی و البرز انتخاب شده است و برای هر زلزله، اطلاعات ثبت شده از زلزله اصلی برای زوج مولفه افقی L و T، در یکی از ایستگاه‌های نزدیک گسل و یکی از ایستگاه‌های دور از گسل مطابق جدول ۱ استخراج شده است. برای این منظور، ابتدا راستای گسل مسبب هر زلزله نسبت به شمال جغرافیایی بر اساس اطلاعات گزارش‌های سازمان زمین‌شناسی کشور [۲۳] بعد از وقوع زلزله‌های مورد بررسی استخراج شده و در ستون آخر جدول ۱ ارائه شده است. سپس برای هر یک از ایستگاه‌های مورد بررسی، آزمون دستگاه شتابنگار نصب شده در هر ایستگاه از سامانه شبکه شتابنگاری کشور [۲۴] برای هر دو مولفه افقی L و T استخراج شده که در ستون چهارم جدول ۱ ارائه شده است و برای نمونه در شکل ۲ برای زلزله بم نمایش داده شده است که البته در این شکل، امکان رعایت مقیاس در نمایش فاصله واقعی ایستگاه تا گسل وجود نداشته و به صورت شماتیک، فاصله ایستگاه تا گسل نمایش داده شده است. همچنین، مطابق اطلاعات سرعت موج برشی در محل هر ایستگاه که از سامانه شبکه شتابنگاری کشور [۲۴] استخراج و در ستون سوم جدول ۱ ارائه شده است اکثر ایستگاه‌های انتخابی بر روی خاک سخت (نوع I و II) قرار دارند. در انتخاب ایستگاه‌های نزدیک گسل، فاصله رومرکز کمتر از ۱۵ کیلومتر مطابق تعریف آیین‌نامه‌هایی نظیر ASCE7-10 [۱۶] و ویرایش‌های بعدی آن، ملاک قرار داده شده است. فقط در مورد زلزله سرپل ذهاب، علیرغم اینکه فاصله ایستگاه سرپل ذهاب از ۱۵ کیلومتر فراتر رفته است اما با توجه به اینکه نزدیکترین ایستگاه موجود به گسل مسبب زلزله بوده است و خصوصیات زلزله نزدیک گسل در آن تجربه شده است لذا اطلاعات این ایستگاه، در هر دو دسته نزدیک و دور از گسل لحاظ شده است.



شکل ۲: نمایش شماتیک نحوه استقرار مولفه L و T دستگاه شتابنگار دو ایستگاه بم و کهنوج نسبت به گسل مسبب زلزله بم

جدول ۱: مشخصات زلزله‌ها و ایستگاه‌های مورد مطالعه

نام زلزله	نام ایستگاه (نوع و فاصله رومرکزی تا گسل)	سرعت موج برشی در ایستگاه (m/s)	آزیموت مولفه‌های افقی (L, T)			زاویه دوران بحرانی مطابق سه روش دوران نسبت به موقعیت نصب دستگاه در ایستگاه مورد نظر*			راستای گسل مسبب نسبت به شمال جغرافیایی*
			L	T	روش اصلی	روش MD	روش FN/FP		
۵ دی ۱۳۸۳ (M _w =۶/۵)	بم (نزدیک گسل - 6km)	499	L=278°	T=8°	65.5°	140°	-62.1°	27.1°	
	کهنوج (دور از گسل - 137km)	1564	L=20°	T=110°	16.35°	160°	-		
۲۱ آبان ۱۳۹۶ (M _w =۷/۳)	سرپل ذهاب (هردو - 39km)	619	L=0°	T=90°	71.72°	61°	32°	31.9°	
	کرمانشاه (دور از گسل - 122km)	-	L=0°	T=90°	14.72°	9°	-		
۲۱ مرداد ۱۳۹۱ (M _w =۶/۲)	ورزقان (نزدیک گسل - 11km)	475	L=240°	T=330°	52.11°	65°	-12°	75°	
	اهر (دور از گسل - 27km)	-	L=352°	T=82°	71.51°	49°	-		
۸ خرداد ۱۳۸۳ (M _w =۶/۴)	پول (نزدیک گسل - 14km)	-	L=220°	T=310°	17.46°	6°	-50°	90°	
	طالقان (دور از گسل - 77km)	462	L=0°	T=90°	82.23°	88°	-		
۲۵ شهریور ۱۳۵۷ (M _s =۷/۴)	دیهوک (نزدیک گسل - 10km)	780	L=0°	T=90°	46.7°	24°	23°	23.4°	
	بشرویه (دور از گسل - 55km)	474	L=336°	T=66°	55.56°	146°	-		

* خلاف جهت عقربه‌های ساعت مثبت در نظر گرفته شده است.

به منظور بررسی تاثیر دوران بر روی خصوصیات اصلی شتابنگاشت، ابتدا نسبت به دوران شتابنگاشت‌های مورد نظر از زاویه ۰ تا ۱۸۰ درجه با فواصل ۱ درجه با استفاده از روابط (۱) و (۲) در یک برنامه کامپیوتری اقدام شد و تاثیر رنج کامل زاویه دوران بر روی خصوصیات شتاب بیشینه (PGA)، طیف پاسخ شبه‌شتاب ((S_A(T_{1,5%}))، سرعت بیشینه (PGA) و شدت آریاس^۴ (I_a) با استفاده از نرم افزار

⁴ Arias Intensity

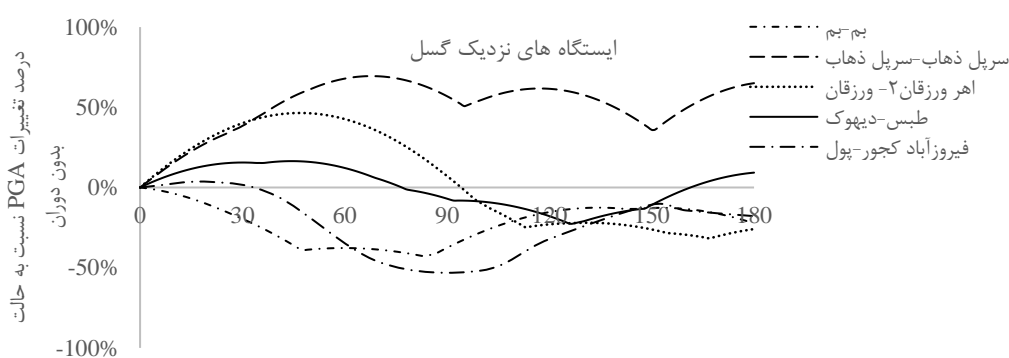
سایز موسیگنال^۵ [۲۵] مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است که در روابط (۱) و (۲)، پارامتر θ زاویه دوران (پادساعتگرد-مثبت) و $a_L(t)$ و $a_T(t)$ به ترتیب شتاب مولفه L و T رکورد لرزه‌ای قبل از دوران در طول زمان t رخداد زلزله مورد نظر و $a_{L'}(t)$ و $a_{T'}(t)$ مربوط به بعد از دوران می‌باشند.

$$a_{L'}(t) = a_L(t)\cos\theta + a_T(t)\sin\theta \quad (۱)$$

$$a_{T'}(t) = -a_L(t)\sin\theta + a_T(t)\cos\theta$$

(۲)

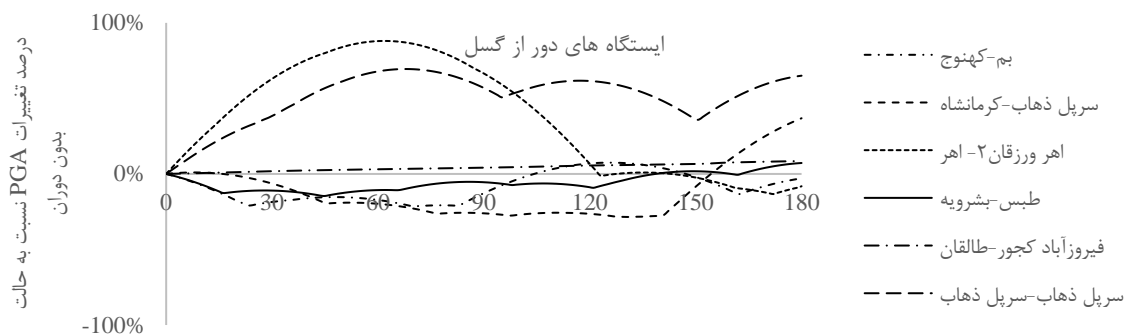
در شکل ۳، نمودار تغییرات شتاب بیشینه PGA برای مولفه L شتابنگاشت‌ها نسبت به حالت بدون دوران برای رکوردهای دور و نزدیک گسل نمایش داده شده است که محور افقی این نمودارها، زاویه دوران نسبت به موقعیت نصب دستگاه شتابنگار در هر ایستگاه می‌باشد و بنابراین زاویه صفر درجه متناظر با حالت بدون دوران است. مطابق این شکل، در اکثر ایستگاه‌های نزدیک گسل تغییرات شدیدی در میزان شتاب بیشینه شتابنگاشت در اثر دوران مولفه افقی رکورد مشاهده می‌شود که بعضاً تا افزایش بیش از ۵۰ درصدی هم مشاهده شده است لکن در اکثر ایستگاه‌های دور از گسل، این تغییرات کمتر از ۱۰ درصد بوده است. در بین نمودارهای شکل ۳-ب، تغییرات شدیدی در نمودار دو ایستگاه اهر و سرپل ذهاب نسبت به سایر ایستگاه‌ها مشاهده می‌شود که فاصله رومرکزی این ایستگاه‌ها تا گسل نسبت به بقیه، فاصله نسبی کمتری است؛ بنابراین می‌توان این فرضیه را مطرح نمود که با افزایش فاصله تا گسل و افزایش کاهندگی، حساسیت شتاب بیشینه رکورد به زاویه نصب و دوران این زاویه کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که بررسی سرعت بیشینه شتابنگاشت‌های مورد بررسی نیز هم همین روند را نشان داده است. با توجه به اینکه شاخصه شدت آریاس ارتباط نزدیکی با انرژی رکورد دارد لذا درصد تغییرات شدت آریاس مولفه L شتابنگاشت‌های زلزله‌های مورد نظر با تغییر زاویه دوران در شکل ۴ مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق این نمودارها، تغییرات این شاخص در تمامی ایستگاه‌های نزدیک گسل قابل ملاحظه بوده و در بحرانی‌ترین حالات به افزایش یا کاهش ۵۰ درصدی منجر شده است و در ایستگاه‌های دور از گسل نیز با افزایش فاصله ایستگاه تا گسل، حساسیت به دوران کاهش قابل توجهی یافته است. در مجموع، بررسی اشکال ۲ و ۳ نشان می‌دهد که روند افزایش یا کاهش شاخص شتاب بیشینه و شاخص شدت آریاس بر اثر تغییر زاویه سنسور هر شتابنگار تقریباً روند مشابهی دارد اما تغییرات شاخص شدت آریاس که مرتبط با انرژی رکورد می‌باشد روند منظم‌تری داشته و حساسیت موضعی کمتری نسبت به زاویه دوران داشته است. لازم به ذکر است که زاویه دوران متناظر با رخداد بیشینه شدن مقدار هریک از پارامترهای شتاب بیشینه، سرعت بیشینه و شدت آریاس همخوانی نزدیکی در اکثر شتابنگاشت‌های مورد بررسی داشته است.



زاویه دوران نسبت به موقعیت نصب دستگاه در ایستگاه، درجه

(الف)

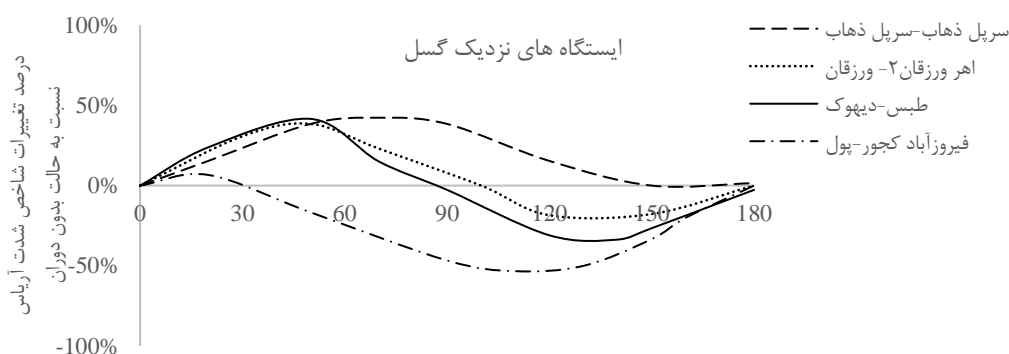
⁵ SeismoSignal



زاویه دوران نسبت به موقعیت نصب دستگاه در ایستگاه، درجه

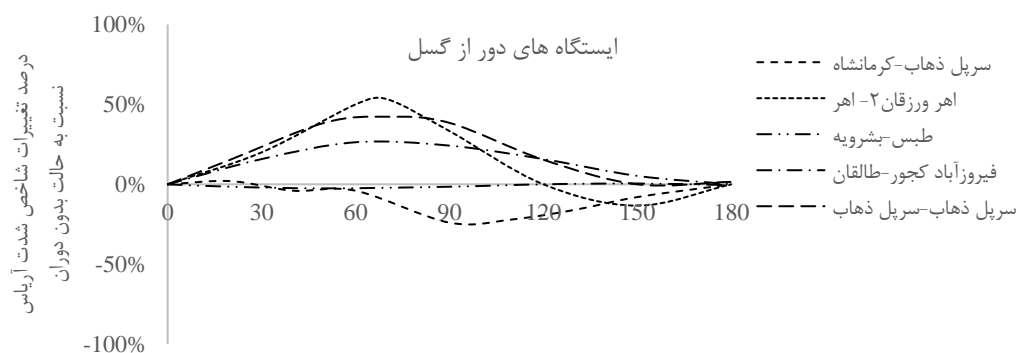
(ب)

شکل ۳: درصد تغییرات شتاب بیشینه مولفه L شتابنگاشت در زوایای دوران مختلف نسبت به حالت بدون دوران الف) ایستگاه‌های نزدیک گسل، ب) دور از گسل



زاویه دوران نسبت به موقعیت نصب دستگاه در ایستگاه، درجه

(الف)

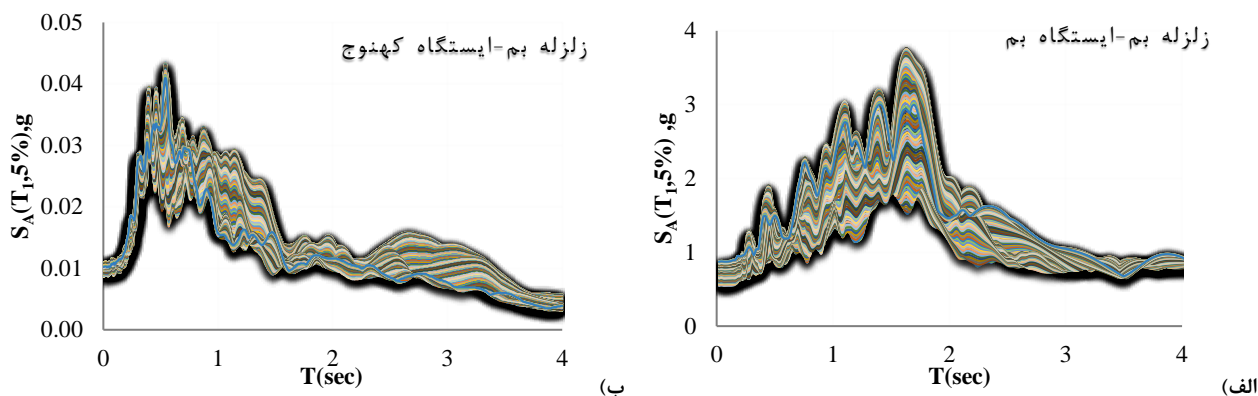


زاویه دوران نسبت به موقعیت نصب دستگاه در ایستگاه، درجه

(ب)

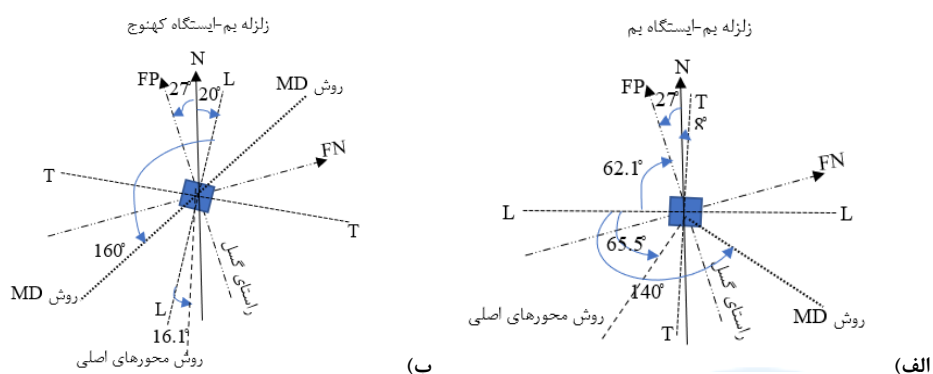
شکل ۴: درصد تغییرات شدت آریاس مولفه L شتابنگاشت در زوایای دوران مختلف نسبت به حالت بدون دوران الف) ایستگاه‌های نزدیک گسل، ب) دور از گسل

در ادامه، به بررسی تاثیر تغییرات زاویه دوران از صفر تا ۱۸۰ درجه با تغییرات یک درجه‌ای بر شکل طیف پاسخ شبه‌شتاب الاستیک ($S_A(T_1, 5\%)$) مولفه L شتابنگاشت‌های موردنظر پرداخته شد که برای نمونه در شکل ۵، تغییرات شکل طیف پاسخ زلزله بم در دو ایستگاه نزدیک گسل و دور از گسل نمایش داده شده است. بر اساس بررسی تمامی شتابنگاشت‌های موردبررسی، دامنه تغییرات شکل طیف پاسخ در ایستگاه‌های نزدیک گسل در اثر تغییرات زاویه دوران قابل توجه‌تر از ایستگاه‌های دور از گسل در رنج کامل زمان تناوب‌های موردبررسی بوده است که با توجه به اهمیت طیف پاسخ در تحلیل‌های دینامیکی، موضوع حایز اهمیتی است.



شکل ۵: تغییرات طیف پاسخ شبه شتاب مولفه L شتابنگاشت زلزله بم با تغییر زوایای دوران از ۰ تا ۱۸۰ درجه (الف) ایستگاه نزدیک گسل، (ب) ایستگاه دور از گسل

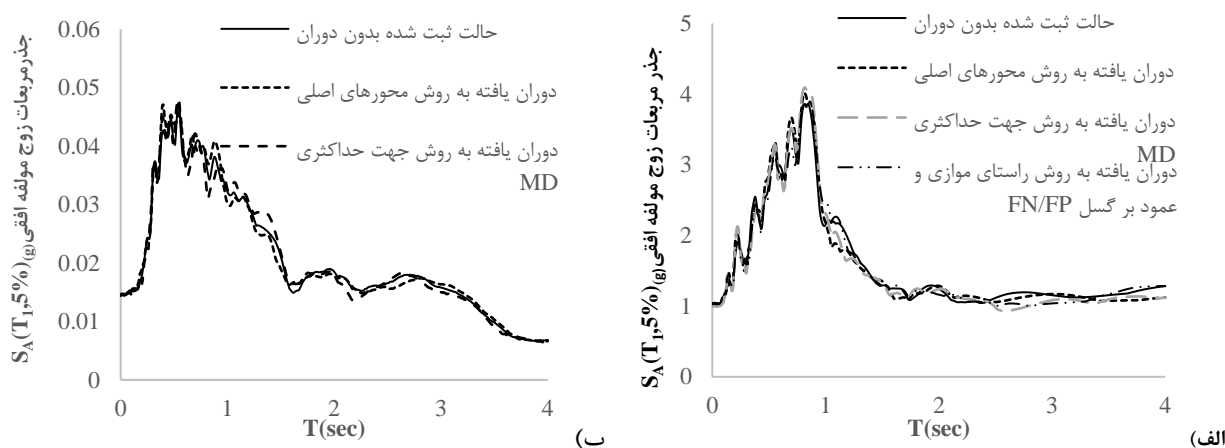
در ادامه، بر اساس توضیحات ارائه شده در بند ۲، زاویه بحرانی در سه روش پیشنهادی در تحقیقات قبلی شامل روش محورهای اصلی (Principle axes)، روش جهت حداکثری (MD) و روش محورهای موازی و عمود بر گسل (FN/FP) برای هریک از ایستگاه‌های مورد نظر استخراج گردید که این اطلاعات در ستون‌های پنجم تا هفتم جدول ۱ به صورت خلاصه ارائه شده است و به صورت شماتیک نیز در شکل ۶، برای یکی از زلزله‌های مورد بررسی (زلزله بم) نمایش داده شده است. مطابق این شکل و شکل ۲، مولفه L ثبت شده توسط دستگاه شتابنگار در ایستگاه نزدیک گسل بم و دور از گسل کهنوج به ترتیب با زاویه ۸ درجه (تقریباً شمالی-جنوبی) و ۲۷۸ درجه (تقریباً شرقی-غربی) نسبت به شمال جغرافیایی قرار داشته است. برای دوران شتابنگاشت‌های مورد نظر به روش جهت حداکثری (MD)، طیف پاسخ شتاب مولفه L شتابنگاشت مورد نظر در دو ایستگاه مورد نظر مطابق شکل ۵ در زوایای دوران ۰ تا ۱۸۰ درجه در فواصل ۱ درجه‌ای ترسیم شده و سپس، به کمک یک برنامه کامپیوتری زاویه دوران متناظر با بیشینه ممکن طیف پاسخ شتاب برای هر ایستگاه استخراج شده است. برای دوران مولفه L و T این شتابنگاشت‌ها به روش محورهای موازی و عمود بر گسل (FN/FP)، زاویه دوران مطابق روابط (۱) و (۲) نسبت به زاویه استقرار دستگاه به نحوی محاسبه شده که بعد از دوران، مولفه L در راستای گسل بم و مولفه T در راستای عمود بر گسل قرار گیرد (مطابق شکل ۶، زاویه دوران مولفه L برای ایستگاه بم برابر ۶۲/۱ درجه به صورت ساعتگرد و برای ایستگاه کهنوج، برابر ۱۶۰ درجه به صورت پادساعتگرد بوده است). برای دوران رکورد مورد نظر به روش محورهای اصلی (Principle axes)، زاویه دوران θ مطابق روابط (۱) و (۲) به نحوی در یک برنامه کامپیوتری محاسبه شده که مقدار کواریانس بین دو مولفه دوران داده شده $a_T(t)$ و $a_L(t)$ صفر شود که مقدار آن به ترتیب برای ایستگاه بم و کهنوج برابر با ۶۵/۵ درجه و ۱۶ درجه به صورت پادساعتگرد مطابق شکل ۶ و ستون پنجم جدول ۱ حاصل شده است.



شکل ۶: نمایش زوایای بحرانی روش‌های مورد مطالعه در شتابنگاشت افقی زلزله بم (الف) ایستگاه بم، (ب) ایستگاه کهنوج

برای سایر زلزله‌های مورد بررسی نیز به همین ترتیب زاویه دوران متناظر با سه روش دوران پیشنهادی در تحقیقات قبلی مطابق اطلاعات جدول ۱ استخراج شده است. لازم به ذکر است که برای ایستگاه‌های دور از گسل، از روش (FN/FP) با توجه به نتایج تحقیقات قبلی صرف نظر گردید و صرفاً از دو روش محورهای اصلی و روش جهت حداکثری استفاده گردیده است. حال، به بررسی این موضوع پرداخته شد که با استفاده از کدام روش می‌توان بحرانی‌ترین سناریوی دوران را بدون انجام رنج کامل تغییرات دوران یک درجه‌ای احصا نمود. نتایج حاکی از این بود که در اکثر ایستگاه‌های مورد مطالعه، زاویه متناظر با بیشینه شدن پارامترهای شتاب بیشینه، سرعت بیشینه و شدت آریاس، در زاویه‌ای رخ داده است که بیشترین نزدیکی را با زاویه بحرانی بدست آمده از روش محورهای اصلی (Principle axes) برای مولفه‌های افقی ایستگاه‌های مورد بررسی دارد لکن در صورتی که بیشینه شدن طیف در زمان تناوب‌های بین ۰/۵ تا ۲/۵ ثانیه به عنوان شاخص بررسی انتخاب شود در اکثر ایستگاه‌های دور از گسل مورد بررسی، روش جهت حداکثری (MD) متناظر با بحرانی شدن شاخص بوده است. در مورد ایستگاه‌های نزدیک گسل نیز نتایج این مطالعه نشان داد که با دوران به روش FN/FP، طیف پاسخ حاصل از دوران تک مولفه‌ای افقی حالت بحرانی‌تری را نسبت به بقیه حالات تجربه کرده است. ضمن اینکه فرضیه پیشنهادی برخی تحقیقات قبلی مبنی بر اینکه چرخاندن شتابنگاشت به جهت‌های متناظر با محورهای اصلی می‌تواند جایگزین روش محورهای موازی و عمود بر گسل (FN/FP) گردد برای ایستگاه نزدیک گسل مورد مطالعه از دقت کافی برخوردار نبوده و در اکثر موارد راستاهای ایجاد شده به وسیله زاویه بدست آمده از روش محورهای اصلی برای مولفه‌های افقی، باعث ایجاد راستاهای موازی و عمود بر گسل نشده است بنابراین شناسایی راستای گسل و در نهایت دوران به روش FN/FP می‌تواند مناسب‌ترین و در عین حال روشی مطمئن‌تر برای دوران مولفه‌های افقی زمین‌لرزه‌های نزدیک گسل باشد. در برخی از ایستگاه‌های مورد بررسی نظیر ایستگاه بم-زلزله بم و ایستگاه سرپل ذهاب-زلزله سرپل ذهاب، نحوه نصب دستگاه و ثبت مولفه L و T به گونه‌ای بوده است که بسیار نزدیک به راستای گسل مسبب زلزله بوده است و به همین لحاظ نیز حالت "بدون دوران" در اشکال ۲ تا ۵، حالت بحرانی‌تری بوده است. بنابراین اگر تا حد امکان نصب دستگاه همخوانی با راستای گسل مسبب داشته باشد عدم توجه به مساله عدم قطعیت ناشی از دوران، مشکلی ایجاد نخواهد کرد و رکورد ثبت شده، به بحرانی‌ترین حالت ممکن نزدیک است. در مجموع، استخراج زاویه بحرانی دوران نسبت به موقعیت نصب دستگاه در ایستگاه‌های مختلف مورد بررسی در این تحقیق با استفاده از سه روش پیشنهادی موجود در تحقیقات قبلی نشان داد که تفاوت قابل توجهی بین خروجی این روش‌ها وجود دارد و در واقع هر یک از این روش‌ها، بر مبنای بیشینه شدن یکی از خصوصیات رکورد لرزه‌ای در تحقیقات قبلی پیشنهاد شده‌اند. برای نمونه، زاویه بحرانی استخراج شده از روش محورهای اصلی با زاویه متناظر با بیشینه شتاب PGA در اکثر ایستگاه‌ها همخوانی دارد لکن زاویه بحرانی استخراج شده از روش MD، بیشتر با زاویه متناظر با بیشینه شتاب طیفی مد اول هماهنگی دارد.

در ادامه، با توجه به اینکه طیف پاسخ شتاب جذر مجموع مربعات زوج مولفه‌های افقی یا به عبارتی دیگر میانگین هندسی هر زوج مولفه به عنوان راه حلی برای مستقل کردن طیف پاسخ از زاویه دوران در اکثر آیین‌نامه‌های لرزه‌ای پذیرفته شده است لذا طیف مورد نظر بر اساس خروجی زاویه بحرانی سه روش پیشنهادی با طیف مربوط به اطلاعات رکورد اصلی (بدون دوران) برای کلیه شتابنگاشت‌های زلزله‌های مورد نظر مقایسه شده است که نمونه آن در شکل ۷ برای زلزله بم نمایش داده است. مطابق این شکل و بررسی مشابه برای طیف سایر رکوردهای لرزه‌ای، این نتیجه حاصل شده است که اگرچه استفاده از روش جذرمربعات تاثیر قابل توجهی در مستقل نمودن شکل طیف از اثر زاویه دوران داشته است اما در برخی زمان‌های تناوب (به خصوص بالای ۱ ثانیه) همچنان روش دوران می‌تواند بر طیف پاسخ اثرات افزایشی داشته باشد که توجه به این موضوع در زمان تهیه طیف پاسخ ویژه ساختگاه در نتایج روش‌های تحلیل طیفی سازه‌ها موثر است.



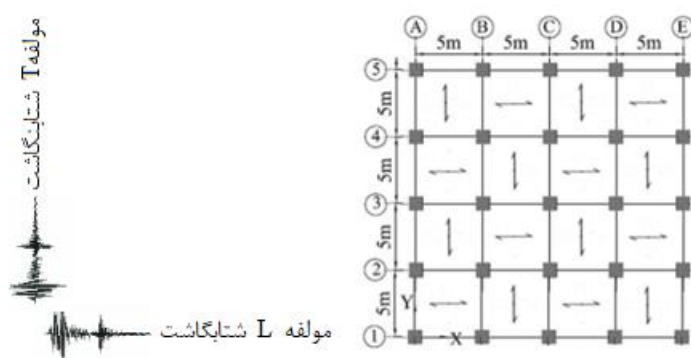
شکل ۷: تغییرات شکل طیف پاسخ الاستیک جذرمربعات زوج مولفه افقی شتابنگاشت زلزله بم قبل و بعد از دوران با زوایای بحرانی روش‌های پیشنهادی (الف) ایستگاه نزدیک گسل، (ب) ایستگاه دور از گسل

۴- بررسی سناریوی بحرانی در ارزیابی لرزه‌های سازه‌های منظم بر اساس روش‌های دوران مختلف رکورد

در بخش قبلی، تاثیر روش‌های مختلف دوران بر خصوصیات رکورد شتابنگاشت لرزه‌ای و طیف پاسخ شبه‌شتاب آن مورد بررسی قرار گرفت لکن این سوال مطرح است که در تحلیل‌های غیرخطی به روش تاریخچه زمانی، اثر عدم قطعیت ناشی از نحوه ثبت رکورد لرزه-ای تا چه میزان تاثیرگذار است و برای پیدا کردن سناریوی بحرانی روش دوران به خصوص در مورد سازه‌های خاص و با اهمیت زیاد و بسیار زیاد، تا چه میزان می‌توان از اثر روش دوران بر خصوصیات رکورد کمک گرفت و با تعداد تحلیل‌های کمتر و محاسبات سریع‌تر روش دوران بحرانی‌تر را اعمال نمود. برای بررسی این موضوع ابتدا تاثیر روش‌های دوران پیشنهادی در مراجع مختلف مطابق بخش قبل، بر پاسخ لرزه-ای دو تپ کوتاه مرتبه (۴ طبقه) و میان مرتبه (۸ طبقه) با کاربری مسکونی از نوع قاب خمشی فولادی با شکل‌پذیری متوسط با پلان منظم مطابق شکل ۸ به روش تاریخچه زمانی غیرخطی مورد بررسی قرار گرفت. در واقع، فرض بر این بوده است که سازه‌های موردنظر در محل ایستگاه‌های مورد بررسی در بند ۲ به نحوی بنا شده باشند که راستای اصلی X و Y سازه‌ها متناظر با راستای مولفه L و T سنسور شتابنگاشت هر ایستگاه قرار گرفته باشد. سازه‌های موردنظر با فرض شدن بر سایت با خطر نسبی بسیار زیاد و روی خاک نوع II، طراحی بهینه‌ای بر اساس ویرایش چهارم آیین نامه ۲۸۰۰ ایران [۲۲] و مبحث ششم و دهم مقررات ملی ساختمان [۲۶، ۲۷] داشته و لذا انتظار آسیب‌پذیر بودن در زلزله‌های مورد بررسی در این تحقیق برای آنها دارای احتمال کمی است. نوع سقف سازه‌های مورد بررسی از نوع تیرچه بلوک با دیافراگم صلب و مقاطع مورد استفاده برای ستون‌ها از نوع جعبه‌ای^۶ و مقاطع تیرها از نوع IPE بوده که جزییات آن در مرجع [۲۸] ارایه شده است. زمان تناوب مد اول سازه ۴ طبقه برابر ۰/۸ ثانیه و سازه ۸ طبقه برابر ۰/۹۷ ثانیه بوده است. مدلسازی رفتار غیرخطی اعضای سازه‌ای به صورت مدل رفتاری متمرکز در دو انتهای تیر و ستون‌ها بر اساس منحنی رفتاری روابط FEMA356 [۲۹] در نرم افزار Perform3d [۳۰] انجام شده است. برای اعمال رکوردهای لرزه‌ای به سازه، با توجه به تقارن پلان سازه، مولفه L و T به ترتیب به راستای X و Y سازه مطابق شکل ۸ اعمال شده است و برای هر یک از شتابنگاشت‌های نزدیک گسل، تحت چهار حالت رکورد بدون دوران، رکورد دوران یافته به روش محورهای اصلی، روش MD و روش FN/FP تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی تحت اثر اعمال همزمان دو مولفه L و T شتابنگاشت لرزه‌ای در هر حالت انجام شده است. برای شتابنگاشت‌های دور از گسل نیز به جز روش FN/FP، سه حالت دیگر اعمال شده است. لازم به ذکر است در اعمال رکوردهای زلزله‌های موردنظر هیچگونه ضریب مقیاسی به رکوردها اعمال نشده و هدف این بوده است که رفتار سازه تحت رکوردهای واقعی بدون اینکه به سطح خطر لرزه‌ای خاصی مقیاس شوند در حالات مختلف دوران برای یک رکورد مقایسه شود و مقایسه پاسخ بین رکوردها مدنظر این تحقیق نبوده است. نمونه نتایج در جدول ۲ برای مولفه T رکورد زلزله بم-بم ارائه شده است که مطابق این جدول، افزایش دررفت نسبی و برش پایه در همه روش‌های دوران رخ داده اما بیشترین افزایش در روش محورهای

⁶ Box

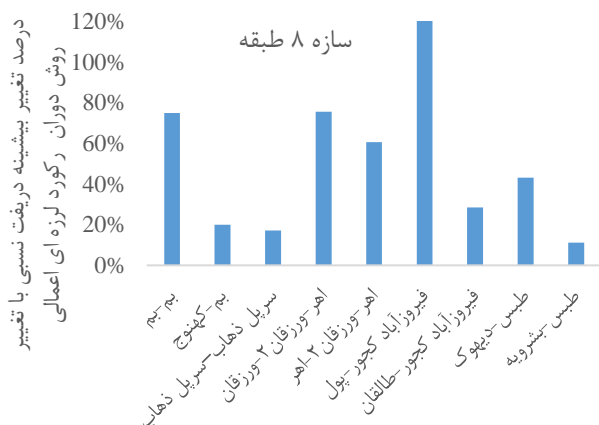
اصلی رخ داده است که مقدار افزایش آن نسبت به حالت رکورد "بدون دوران"، به ترتیب افزایش ۷۵ و ۷۲ درصدی برای سازه هشت طبقه بوده است. به همین ترتیب، بیشترین میزان افزایش رخ داده تحت اثر رکوردهای مختلف لرزه‌ای اعمال شده به سازه در حالات مختلف دوران و بدون دوران، برای شاخص بیشینه دریفت نسبی سازه در شکل ۹ و برای شاخص بیشینه برش پایه سازه در شکل ۱۰ ارائه شده است. مطابق این دو شکل، توجه به عدم قطعیت ناشی از زاویه استقرار سنسورهای دستگاه‌های ثبت شتابنگاشت در ایستگاه‌های شتابنگار لرزه‌ای تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌های کوتاه‌مرتبه و میان‌مرتبه مورد بررسی داشته است، به نحوی که افزایش بین ۱۰ تا ۱۲۰ درصدی بیشینه تغییر مکان نسبی طبقات و بیشینه برش پایه سازه در زلزله‌های مختلف مورد بررسی بنابر نوع زلزله، دوری و نزدیکی ایستگاه و نوع روش دوران مشاهده شده است که میزان افزایش مورد نظر در سازه میان‌مرتبه نسبت به سازه کوتاه‌مرتبه قابل توجه‌تر بوده است. در واقع در صورتی که جهت‌های اصلی سازه در راستای بحرانی‌ترین جهت استقرار سنسورهای شتابنگاشت قرار بگیرد، بزرگنمایی قابل توجه پاسخ سازه به خصوص در حالات اعمال شتابنگاشت‌های ثبت شده در ایستگاه‌های نزدیک گسل به سازه با ارتفاع بیشتر قابل انتظار است و عدم توجه به این موضوع در تحلیل‌های لرزه‌ای در خلاف جهت اطمینان است.



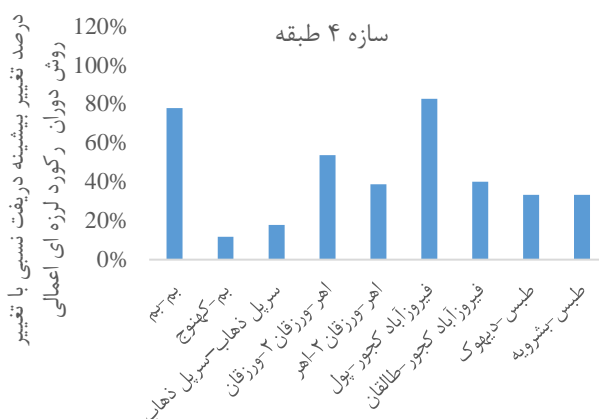
شکل ۸: پلان سازه‌های مورد بررسی و نحوه اعمال مولفه‌های شتابنگاشت‌های لرزه‌ای به سازه در حالات مختلف دوران

جدول ۲: نتایج پاسخ سازه برای مولفه T رکورد زلزله بم-بم

مشخصات اصلی رکورد	بدون دوران رکورد	روش دوران رکورد			
		روش محورهای اصلی	روش جهت حداکثری MD	روش موازی وعمود بر گسل (FN/FP)	
مشخصات اصلی رکورد	شتاب بیشینه	PGA(g)	۰/۸	۰/۶	۰/۷
	محتوای فرکانسی	v_{max}/a_{max} (sec)	۰/۳۸	۰/۴۵	۰/۴۷
		T_m (sec)	۰/۹۵	۱/۰۱	۱
	انرژی رکورد	Ia (m/sec)	۳۵/۲	۱۷/۸	۲۲/۵
SED (cm ² /sec)		۱۸۷۷۸۲	۴۰۳۷۴۲	۳۱۸۴۰۹	۴۱۷۲۴۳
سازه ۴ طبقه پاسخ	برش پایه ماکزیمم	tonf	۷۷۲	۶۰۵	۶۰۳
	دریفت نسبی ماکزیمم	-	% ۱/۶	% ۱/۲	% ۱/۲
سازه ۸ طبقه پاسخ	برش پایه ماکزیمم	tonf	۱۸۶۹	۱۳۹۳	۱۶۱۸
	دریفت نسبی ماکزیمم	-	% ۱/۴	% ۱	% ۱/۲

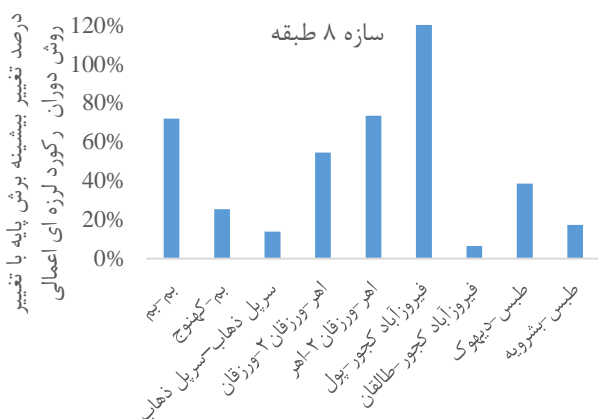


(ب)



(الف)

شکل ۹: بیشینه مقدار تغییر در وقت نسبی ماکزیمم با تغییر روش دوران رکورد لرزه ای اعمال شده به سازه: الف) سازه ۴ طبقه، ب) سازه ۸ طبقه



ب



(الف)

شکل ۱۰: بیشینه مقدار تغییر برش پایه ماکزیمم با تغییر روش دوران رکورد لرزه ای اعمال شده به سازه: الف) سازه ۴ طبقه، ب) سازه ۸ طبقه

در ادامه، به منظور بررسی نوع روش دوران بحرانی تر، بحرانی ترین روش دوران حاصل شده در نتایج این تحقیق برای هر یک از رکوردهای مورد بررسی در جدول ۳ به صورت خلاصه ارائه شده است. مطابق این جدول، کلیه روش‌های دوران مورد بررسی اعم از روش محورهای اصلی، روش جهت ماکزیمم MD و روش راستای گسل FN/FP پتانسیل ایجاد سناریوی پاسخ بحرانی در سازه‌های مورد بررسی بر حسب نوع زلزله و نوع ایستگاه را دارا بوده‌اند و در برخی موارد نیز سناریوی بحرانی متناظر با حالت بدون دوران شتابنگاشت ثبت شده در ایستگاه بوده است. در اکثر ایستگاه‌های مورد بررسی، پاسخ سازه‌های ۴ و ۸ طبقه در روش‌های دوران یکسانی به حداکثر مقدار رسیده‌اند و در واقع مشخصات زمان تناوب و ارتفاع سازه، تاثیر قابل ملاحظه‌ای در نوع روش دوران متناظر با سناریوی بحرانی نداشته است.

جدول ۳: روش دوران متناظر با بحرانی ترین سناریوی پاسخ سازه ۸ و ۴ طبقه به تفکیک ایستگاه‌های مورد مطالعه

نام زلزله	نام ایستگاه	فاصله ایستگاه تا گسل	نوع مولفه	روش دوران متناظر با بحرانی ترین سناریوی پاسخ
بم	بم	نزدیک گسل	L	سازه ۸ طبقه بدون دوران
			T	روش محورهای اصلی
کهنوج	کهنوج	دور از گسل	L	سازه ۴ طبقه بدون دوران
			T	روش محورهای اصلی
سرپل ذهاب	سرپل ذهاب	مرزی	L	روش FN/FP
			T	بدون دوران
کرمانشاه	کرمانشاه	دور از گسل	L	روش محورهای اصلی
			T	بدون دوران
اهورزقان ۲	ورزقان	نزدیک گسل	L	روش MD
			T	روش FN/FP
اهر	اهر	دور از گسل	L	روش MD
			T	بدون دوران
طیس	دیپوک	نزدیک گسل	L	روش محورهای اصلی
			T	بدون دوران
بشوریه	بشوریه	دور از گسل	L	روش MD
			T	روش محورهای اصلی
کجورفیروز اباد	پول	نزدیک گسل	L	روش MD
			T	روش FN/FP
طالقان	طالقان	دور از گسل	L	بدون دوران
			T	روش MD

با توجه به این نتایج، پیدا کردن ارتباطی بین تغییرات پارامترهای اصلی رکورد لرزه‌ای نظیر شتاب بیشینه، محتوای فرکانسی و انرژی ورودی به سازه در روش‌های مختلف دوران با پاسخ‌های ماکزیمم سازه مورد بررسی قرار گرفت با این هدف که بدون انجام چهار تحلیل تاریخچه زمانی در چهار روش دوران مختلف بتوان از ابتدا بدترین سناریوی اعمال مولفه افقی دوران یافته به سازه را تشخیص داد و با انجام یک تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی بتوان به بحرانی ترین پاسخ دست یافت. برای این منظور، مشابه جدول ۲ برای کلیه رکوردهای مورد بررسی، بیشینه شتاب (PGA)، شاخص‌های مرتبط با محتوای فرکانسی (شامل نسبت سرعت بیشینه به شتاب بیشینه و معیار زمان تناوب میانگین^۷، (T_m) [۳۱، ۳۲] و شاخص‌های مرتبط با انرژی رکورد (شدت آریاس و چگالی انرژی ویژه^۸ رکورد (SED)) مورد بررسی قرار گرفت و از خصوصیت زمان تداوم رکورد که وابسته به روش دوران نیست صرف نظر شد. بررسی این موضوع حاکی از این بوده است که در اکثر ایستگاه‌های مورد مطالعه سناریوی بحرانی روش دوران برای پاسخ دریافت نسبی سازه متناظر با ماکزیمم شدن مقدار پارامترهای شتاب بیشینه و چگالی انرژی ویژه ورودی رکورد به سازه در بین روش‌های مورد بررسی بوده است. برای نمونه، مطابق ردیف اول جدول ۲، با اعمال روش محورهای اصلی در دوران مولفه T رکورد زلزله بم، مقدار PGA رکورد مورد نظر به بیشترین مقدار در مقایسه با سه حالت دیگر رسیده است و با بررسی پاسخ سازه ۴ و ۸ طبقه تحت اثر رکورد دوران یافته به روشهای مختلف مطابق ردیف‌های آخر جدول ۲، مشاهده می‌شود که پاسخ بیشینه متناظر با اعمال روش دوران محورهای اصلی بوده است. این موضوع در بیشتر شتابنگاشت‌های مورد مطالعه در دو شاخص PGA و SED صادق بوده است ولی ارتباطی بین شاخص‌های مرتبط با محتوای فرکانسی و سناریوی بحرانی متناظر با بیشینه شدن پاسخ سازه مشاهده نگردید [۲۸]. به این ترتیب، سناریوی بحرانی روش دوران برای پاسخ لرزه‌ای سازه‌های ۴ و ۸ طبقه مورد بررسی

⁷ Mean Period⁸ Specific Energy Density

در این تحقیق، با بررسی مقدار پارامترهای شتاب بیشینه PGA و چگالی انرژی ویژه ورودی رکورد لرزه‌ای قبل از اعمال به سازه قابل تشخیص بوده است. لذا در مجموع با توجه به نتایج این بررسی می‌توان این نظریه را ارائه نمود که با احتمال زیادی برای پیدا کردن بحرانی ترین سناریوی پاسخ سازه‌های با پلان منظم با استفاده از روش تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی تحت اثر رکوردهای مولفه افقی زلزله، انتخاب روش دورانی که متناظر با ماکزیمم شدن پارامترهای لرزه‌ای شتاب بیشینه و انرژی رکورد لرزه‌ای باشد روشی در جهت اطمینان بوده و به کاهش محاسبات و تعداد تحلیل‌های غیرخطی کمک خواهد نمود. هرچند برای قطعیت دادن به این موضوع نیاز به تحقیقات کامل تری از نظر نوع و تعداد رکوردها، نوع سیستم باربر جانبی و ارتفاع سازه‌ها می‌باشد.

۱۰- نتیجه گیری

در این تحقیق، بر اساس داده‌های موجود در شبکه شتابنگاری کشور برای پنج زلزله مهم در سه پهنه لرزه زمین‌ساخت ایران به بررسی عدم قطعیت زاویه ثبت مولفه‌های افقی شتابنگاشت لرزه‌ای و تاثیر این موضوع بر خصوصیات مهندسی رکورد لرزه‌ای پرداخته شده و سپس امکان استخراج سناریوی بحرانی پاسخ دو تیپ سازه‌های منظم کوتاه مرتبه و میان مرتبه با استفاده از سه روش دوران شامل روش محوره‌های اصلی، روش جهت حداکثری و روش محوره‌های موازی و عمود بر گسل موردبررسی قرار گرفت که خلاصه نتایج به شرح ذیل ارائه می‌گردد که البته تعمیم آنها نیاز به تحقیقات بیشتر در حوزه تاثیر نوع سازوکار گسل و تنوع رکوردهای لرزه‌ای، نوع خاک ساختگاه و همچنین مواردی نظیر نوع سیستم باربر جانبی سازه و مساله زاویه برخورد در سازه‌های نامنظم دارد:

- ۱) دوران رکوردهای لرزه‌ای موردبررسی با زوایای بین ۰ تا ۱۸۰ درجه با تغییرات یک درجه‌ای نشان داد که با اعمال دوران، مشخصات شتاب بیشینه، سرعت بیشینه و شدت آریاس رکورد لرزه‌ای دچار تغییرات قابل ملاحظه‌ای بر حسب زاویه دوران می‌گردد به نحوی که میزان این تغییرات در برخی از رکوردها مانند مولفه افقی زلزله اهر-ورزقان ایستگاه اهر و ایستگاه سرپل ذهاب زلزله کرمانشاه به افزایش نزدیک به ۱۰۰ درصدی رسیده است.
- ۲) شکل طیف پاسخ الاستیک شتاب $S_A(T_1, 5\%)$ تک مولفه‌های افقی شتابنگاشت‌های لرزه‌ای موردبررسی حساسیت زیادی نسبت به تغییر زوایای چرخش رکورد از ۰ تا ۱۸۰ درجه نشان داد و افزایش بین ۱۰ تا ۱۰۰ درصدی مقادیر شتاب طیفی مد اول در زمان تناوب‌های مختلف رکوردهای مورد بررسی ملاحظه گردید که این موضوع در رکوردهای ثبت شده در ایستگاه‌های نزدیک گسل از شدت بیشتری نسبت به ایستگاه‌های دور از گسل برخوردار بوده است.
- ۳) استفاده از جذر مجموع مربعات طیف پاسخ زوج مولفه‌های افقی (میانگین هندسی طیف پاسخ) برای مستقل شدن طیف حاصله از اثر تاثیر زاویه دوران مطابق با رویکرد اکثر آیین‌نامه‌های لرزه‌ای در این تحقیق موردبررسی قرار گرفت و نتایج حاکی از این بود که علیرغم اینکه با استفاده از این رویکرد، حساسیت طیف پاسخ به عدم قطعیت زاویه دوران کاهش قابل توجهی دارد اما به طور کامل حذف نشده است.
- ۴) در بین ایستگاه‌های نزدیک گسل، در دو نمونه از زلزله‌های موردبررسی شامل زلزله طبس و سرپل ذهاب، روش محوره‌های اصلی راستایی نزدیک به راستای گسل (روش FN/FP) را به عنوان زاویه بحرانی ارائه نموده است لکن در سایر زلزله‌های موردبررسی این موضوع صادق نبوده است و زاویه بحرانی حاصل از روش‌های مزبور تفاوت زیادی با راستای گسل مسبب زلزله (روش FN/FP) دارد بنابراین به نظر می‌رسد برای زلزله‌های نزدیک گسل، شناسایی مستقیم راستای گسل برای استخراج زاویه بحرانی رکورد لرزه‌ای ضروری است و نتایج برخی تحقیقات قبلی مبنی بر اینکه جهت‌های اصلی مینور و ماژور (Principal axes) متناظر با جهت موازی و عمود بر گسل است از اعتبار کافی در همه موارد برخوردار نیست.
- ۵) توجه به عدم قطعیت ناشی از زاویه استقرار سنسورهای دستگاه‌های ثبت شتابنگاشت در ایستگاه‌های شتابنگار لرزه‌ای تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌های کوتاه مرتبه و میان مرتبه موردبررسی داشته است، به نحوی که افزایش بین ۱۰

تا ۱۲۰ درصدی بیشینه تغییرمکان نسبی طبقات و بیشینه برش پایه سازه در زلزله‌های مختلف موردبررسی بنابر نوع زلزله، دوری و نزدیکی ایستگاه، نوع روش دوران و ارتفاع سازه مشاهده شده است.

۶) نتایج این تحقیق نشان داد که با بررسی تغییرات خصوصیات شتاب بیشینه و چگالی انرژی ویژه رکورد لرزه‌ای ورودی به سازه در سه روش دوران محورهای اصلی، روش جهت ماکزیمم MD و روش راستای گسل FN/FP می‌توان قبل از انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی سناریوی بحرانی روش دوران را با دقت خوبی تشخیص داد.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از هم‌فکری تمام اعضای کمیته علمی انجمن مهندسی سازه ایران کمال سپاسگزاری را دارند.

مراجع

- [1] Nicknam, A., Mazarei, A. and Ganjvar, M. (2017) Assessment of Iran seismic design response spectra (Standard No. 2800) regarding site-distance effects particularly at near fault sites. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 49(3), 547-564. (in Persian)
- [2] Penzien, J., and Watabe, M. (1974). Characteristics of 3-dimensional earthquake ground motions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 3(4), 365-373.
- [3] Wilson, E.L., Suharwardy, I. and Habibullah, A. (1995). A clarification of the orthogonal effects in a three-dimensional seismic analysis. *Earthquake Spectra*, 11(4), 659-666.
- [4] López, O.A. and Torres, R., (1997). The critical angle of seismic incidence and the maximum structural response. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 26(9), 881-894.
- [5] Mavroeidis, G.P. and Papageorgiou, A.S. (2003). A mathematical representation of near-fault ground motions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(3), 1099-1131.
- [6] Bray, J.D. and Rodriguez-Marek, A. (2004). Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(11), 815-828.
- [7] Rigato, A.B. and Medina, R.A. (2007). Influence of angle of incidence on seismic demands for inelastic single-storey structures subjected to bi-directional ground motions. *Engineering Structures*, 29(10), 2593-2601.
- [8] Huang, Y.N., Whittaker, A.S. and Luco, N. (2008). Maximum spectral demands in the near-fault region. *Earthquake Spectra*, 24(1), 319-341.
- [9] Zamora, M. and Riddell, R. (2011). Elastic and inelastic response spectra considering near-fault effects. *Journal of Earthquake Engineering*, 15(5), 775-808.
- [10] Reyes, J.C. and Kalkan, E. (2015). Significance of Rotating Ground Motions on Behavior of Symmetric-and Asymmetric-Plan Structures: Part I. Single-Story Structures. *Earthquake Spectra*, 31(3), 1591-1612.
- [11] Gerami, M., Mashayekhi, A.H. and Siahpolo, N. (2016). Evaluation of seismic parameters of steel moment resisting frames based on "FEMA P-695" under near-field rotated ground motion, *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*, 3(2), 59-72. (in Persian)
- [12] Giannopoulos, D. and Vamvatsikos, D. (2018). Ground motion records for seismic performance assessment: To rotate or not to rotate?. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 47(12), 2410-2425.
- [13] Hong, H.P. and Goda, K. (2010). Characteristics of horizontal ground motion measures along principal directions. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 9(1), 9-22.
- [14] Goda, K. (2012). Comparison of peak ductility demand of inelastic SDOF systems in maximum elastic response and major principal directions. *Earthquake Spectra*, 28(1), 385-399.
- [15] Rupakhety, R. and Sigbjörnsson, R. (2013). Rotation-invariant measures of earthquake response spectra. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 11, 1885-1893.
- [16] ASCE Standard, ASCE/SEI7-10. (2010). *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures*. American Society of Civil Engineers, Season16.
- [17] Boore, D.M., Watson-Lamprey, J. and Abrahamson, N.A. (2006). Orientation-independent measures of ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(4A), 1502-1511.
- [18] Boore, D.M. (2010). Orientation-independent, nongeometric-mean measures of seismic intensity from two horizontal components of motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(4), 1830-1835.

- [19] ASCE Standard, ASCE/SEI7-16. (2016). *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures*. American Society of Civil Engineers, Season21.
- [20] Wen, W., Ji, D. and Zhai, C. (2020). Ground motion rotation for mainshock-aftershock sequences: Necessary or not?. *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 130, 1-5.
- [21] Rivera-Figueroa, A. and Montejo, L.A. (2023). Ground motion rotation effects on bidirectional inelastic response using seismic input compatible to a target RotD100 spectrum. *Journal of Structures*, 50, 97-107.
- [22] Building and Housing Research Center. (2015). *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings*. Standard No. 2800, Ed. 4, Iran. (in Persian)
- [23] Geological Survey & Mineral Exploration of Iran, (2023). *Reports*. [online] Available at: URL <https://gsi.ir/fa/reports>
- [24] Iran Strong Motion Network, (2023). *Stations*. [online] Available at: URL <https://smd.bhrc.ac.ir/Portal/fa/Search/Stations>
- [25] SeismoSoft, (2014). *SeismoSignal* (Version 4.3.0). SeismoSoft. Ltd., Inc., Earthquake Engineering Software Solutions., Pavia, Italy, [online].
- [26] Iranian National Building Codes Compilation Office (2014). *Iranian national building code, part 6: Loads on building*. Ministry of Housing and Urban Development (MHUD). (In Persian)
- [27] Iranian National Building Codes Compilation Office (2013). *Iranian national building code, part 10: Design and Construction of Steel buildings*. Ministry of Housing and Urban Development (MHUD). (In Persian)
- [28] Hamidi, S. (2021). *Influence of rotating horizontal components of ground motions on the response of regular steel frame structures in near-fault and far-fault fields*, MSc. Thesis, West Tehran Branch of Islamic Azad University. (in Persian)
- [29] Federal Emergency Management Agency, FEMA-356 (2000). *Prestandard and Commentary for Seismic Rehabilitation of Buildings*, Washington, DC.
- [30] Computers and Structures Inc. (CSI). (2006). *Nonlinear analysis and performance assessment of structures- user guide*, PERFORM-3D (Version 4.0.3), Berkeley, CA.
- [31] Tsoa, W.K., Zhua, T.J. and Heidebrechta, A.C. (1992). Engineering implication of ground motion A/V ratio. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 11(3), 133-144.
- [32] Rathje, E.M., Abrahamson, N.A. and Bray, J.D. (1998). Simplified frequency content estimates of earthquake ground motions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(2), 150-159.