

## بررسی مؤلفه‌های زلزله‌های دوگانه آذربایجان در امتدادهای اصلی

حیدر ملک‌زاده<sup>۱</sup> و حسین غفارزاده<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

### چکیده

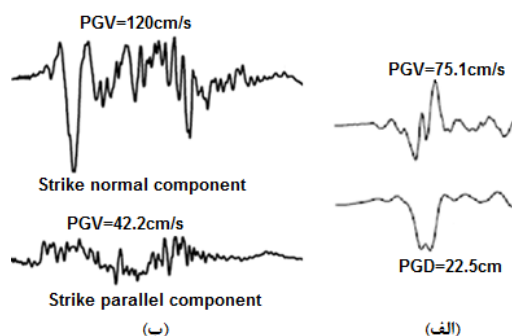
مدل‌سازی حرکت زمین به صورت چند بعدی برای تحلیل و تعیین پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها نیازمند آن است که محورهای اصلی انتشار زلزله شناسایی شوند. این محورهای اصلی، وضعیت انرژی زلزله را در امتدادهای عمود بر هم نشان می‌دهند. محورهای اصلی امتدادهایی هستند که در آن‌ها مؤلفه‌های شتاب دو به دو غیرهمبسته هستند. برای یافتن امتدادهای اصلی، بردارهای ویژه ماتریس کوواریانس شتاب زلزله در امتدادهای عمود بر هم محاسبه می‌شوند. هدف این مقاله بررسی مشخصه‌های رکوردهای زلزله‌های دوگانه یازدهم آگوست ۲۰۱۲ آذربایجان در ایستگاه‌های مختلف در امتدادهای اصلی و مقایسه زوایای محورهای اصلی در این دو زلزله می‌باشد؛ تا مشخص شود که این زلزله‌ها در کدام امتداد دارای بیشترین انرژی می‌باشند. این بررسی نشان می‌دهد که در اکثر ایستگاه‌ها که هر دو زلزله را ثبت کرده‌اند، امتداد محورهای اصلی زلزله دوم همان امتداد محورهای اصلی زلزله اول می‌باشد. در این تحقیق صحت تحقیقات پیشین مبنی بر این که یکی از محورهای اصلی، همان محور عمود بر سطح زمین می‌باشد به اثبات رسیده است. به دلیل اثرات جهت‌داری در زلزله‌های نزدیک گسل، معمولاً در امتداد عمود بر گسل، حرکت زمین دارای پالس‌های با انرژی بیشتر می‌باشد. در بررسی زلزله‌های آذربایجان ویژگی پالس‌داری در تاریخچه‌ی سرعت زلزله‌ی اول مشاهده می‌شود و پالس، تقریباً در همان امتدادی است که از طریق تحلیل محورهای اصلی به دست می‌آید. طیف‌های پاسخ الاستیک در امتدادهای اصلی هم، همبستگی خوبی با ویژگی جهت‌داری زلزله‌های نزدیک گسل دارند. **واژگان کلیدی:** امتدادهای اصلی، زمین لرزه، نزدیک گسل، محورهای غیر همبسته، زلزله آذربایجان.

### ۱- مقدمه

مطالعاتی بر مبنای تعریف Penzien و Watabe از محورهای اصلی انجام گرفته‌اند. از جمله بررسی مدل‌های تصادفی غیرایستا و ساخت مؤلفه‌های زمین‌لرزه‌های مصنوعی که از ویژگی‌های محورهای اصلی استفاده کرده‌اند [۲ - ۵]. ویژگی اصلی جنبش‌های زمین نزدیک گسل فرم پالسی موجود در نمودار تاریخچه زمانی سرعت و جابجایی است که بیشتر انرژی لرزه‌ای را در این شکل به سازه‌ها وارد کرده و باعث خسارات فراوانی در آن‌ها می‌شود. زلزله‌های معروف نزدیک گسل کالیفرنیا ۱۹۶۶ و ۱۹۷۱، توجه محققان را به خود جلب کرد و رویکردهای کلاسیک آیین‌نامه‌های طراحی که بر مبنای زلزله‌های دور از گسل تدوین شده بودند را به چالش کشید. تأثیر ویرانگر وقایع لرزه‌ای اخیر (مانند زلزله‌های نورتریج - کالیفرنیا ۱۹۹۴، کوبه - ژاپن ۱۹۹۵، ازمیر - ترکیه ۱۹۹۹) روی زیرساخت‌ها نیز در حالی بوده که گسل فعال مسبب آن‌ها در سطح اصلی مرکز شهر بوده‌اند [۶]. Bertero با مطالعه خود روی صدمات وارد به بیمارستان Olive View در طول رخداد زلزله، از اولین مهندسیین زلزله بود که این اثر بر روی سازه‌ها مورد توجه قرار داد [۷].

بررسی خصوصیات هر زلزله در راستاهای مختلف انتشار در زمین می‌تواند اطلاعات مفیدی در رابطه با آن زلزله و زلزله‌های بعدی و نحوه مقابله با زلزله‌ها ارائه دهد. طراحی مقاوم در برابر زلزله‌ی سازه‌های با اهمیت همانند سدها، پل‌ها، نیروگاه‌های هسته‌ای و سازه‌های دیگر اغلب نیاز به تحلیل دینامیکی سه بعدی با استفاده از حرکت سه مؤلفه‌ای زمین دارد. از طرفی مدل‌های تصادفی غیر ایستا که برای زلزله به کار می‌روند به شکل یک بعدی هستند. وقتی این مدل تصادفی غیر ایستا برای حالت دو و یا سه بعدی به کار می‌رود باید مسئله همبستگی بین مؤلفه‌ها در نظر گرفته شود. Penzien و Watabe یک دستگاه مختصات عمود بر همی را پیشنهاد دادند که مؤلفه‌های زلزله در امتداد محورهای این دستگاه حداکثر، حداقل و متوسط مقدار واریانس را داشته و دارای کوواریانس صفر هستند. به این صورت نیاز به محاسبه همبستگی بین مؤلفه‌ها در این دستگاه نیست. محورهای این دستگاه را محورهای اصلی می‌نامند [۱]. از طریق محورهای اصلی می‌توان امتدادهای دارای بیشترین و کمترین انرژی زلزله را تعیین کرد.

گسل ثبت شده بودند. این امر به خاطر عدم توسعه دستگاه‌های ثبت شتاب و عدم شناخت گسل‌های فعال موجود بود و دیدگاهی مبنی بر اهمیت جنبش‌های زمین نزدیک گسل به وجود نیامده بود. در این راستا آیین‌نامه‌های طراحی سازه‌ای رایج نیز بر مبنای همین دید کلاسیک به جنبش‌های زمین تدوین شده است. با وقوع دو واقعه زلزله کالیفرنیا یعنی زلزله‌های پارک فیلد ۱۹۶۶ و سن فرناندو ۱۹۷۱ که به عنوان نمونه‌های تاریخی مربوط به جنبش‌های زمین نزدیک گسل هستند، جنبش‌های زمین نزدیک گسل با رفتار متفاوتی که نسبت به جنبش‌های قبلی داشتند نظر محققین را به خود جلب کردند. ویژگی اصلی این رکودها فرم پالسی رکود سرعت در شروع آن‌ها بود که توسط Aki و Haskell مورد بررسی قرار گرفتند (شکل ۱).



شکل ۱- توصیف جنبش‌های زمین نزدیک گسل: الف) رکود ایستگاه ۲ (۲C) به دست آمده از زلزله پارک فیلد- کالیفرنیا ۱۹۶۶، ب) رکورد سد پاکوما (PCD) به دست آمده از زلزله سن فرناندو- کالیفرنیا ۱۹۷۱ [۱۲ و ۱۱]

معمولاً در محدوده نزدیک گسل خصوصیات زمین‌لرزه‌ها وابسته به سه عامل مکانیسم شکست، جهت انتشار شکست نسبت به ساختگاه و تغییر مکان‌های دائمی ناشی از لغزش گسل یا حرکت تکتونیکی می‌باشند. این پارامترها باعث ایجاد دو اثر به نام‌های راستاپذیری شکست<sup>۱</sup> و جابجایی پالسی ماندگار زمین<sup>۲</sup> می‌شوند. زمانی که یک گسل شروع به گسیختگی می‌کند، گسیختگی از نقطه‌ای بر روی امتداد گسل ایجاد شده و بسته به محل آغاز گسیختگی به ابتدا، انتها و یا هر دو جهت گسل گسترش می‌یابد. به گسترش گسیختگی در امتداد گسل اصطلاحاً راستا پذیری شکست گفته می‌شود. با توجه به دو

از آن پس ثبت وقوع رخداد‌های بزرگ نزدیک گسل و پتانسیل ویرانگر آن‌ها مورد اهمیت قرار گرفت. امروزه افزایش تدریجی تعداد شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده نزدیک منبع که اخیراً اتفاق افتاده، زلزله‌شناسان را قادر کرده تا تحلیل‌های زیاد و با دقت بالایی را از ویژگی جنبش‌های زمین نزدیک گسل انجام دهند و با فهم فیزیکی آن‌ها، هرچه بیشتر آن‌ها را کنترل کنند [۸].

در ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ مصادف با ۱۱ آگوست ۲۰۱۲ دو زلزله در منطقه آذربایجان رخ داد که اولی با بزرگای گشتاوری ۶/۴ در فاصله ۲۳ کیلومتری غرب اهر و دومی با بزرگای گشتاوری ۶/۳ در ۳۰ کیلومتری اهر و در حدود ۵۰ کیلومتری شمال شرق تبریز به وقوع پیوست. این زلزله‌ها با ژرفای کانونی حدود ۱۰ کیلومتر و سازوکار امتداد لغز بوده‌اند [۹]. این زلزله‌ها تعدادی کشته و مجروح برجای گذاشتند و باعث ویرانی تعداد زیادی از روستاها در محدوده هریس، اهر و ورزقان شدند.

بررسی وجوه تشابه بین این دو زلزله و ویژگی هر یک از این زلزله‌ها می‌تواند برای تحقیقات آتی در مورد لرزه خیزی این منطقه و سایر مناطق لرزه خیز مفید باشند. بنابر این ویژگی‌های شتاب نگاشت‌های به دست آمده از هر دو زلزله را که در ایستگاه‌های مختلف ثبت شده‌اند، می‌توان مقایسه نمود، که در اینجا داده‌های شتاب نگاشت در هر ایستگاه در امتداد محورهای اصلی دوران داده شده است و میزان دوران در دو زلزله مقایسه می‌شود و همچنین میزان این دوران در ارتباط با سایر ایستگاه‌ها، هم بررسی می‌شود.

با توجه به این که گسل مسبب زلزله‌ها آذربایجان تا حدودی ناشناخته است، از این رو بررسی اثرات جهت داری می‌تواند کمک بزرگی در شناسایی گسل ارائه دهد. در این پژوهش از یک روش جدیدی هم برای تعیین اثرات جهت‌داری بهره برده می‌شود و آن استفاده از امتداد‌های اصلی زلزله است، امتداد‌های که دارای انرژی حداکثر و حداقل هستند. در مطالعات مربوط به زمین لرزه‌های نزدیک گسل طیف پاسخ مربوط به مؤلفه عمود بر گسل شدیدتر از مؤلفه‌ی موازی گسل است [۱۰]. در این تحقیق هم طیف پاسخ مربوط به محورهای اصلی رفتاری مشابه رفتار مؤلفه‌های عمود و موازی گسل نشان داده‌اند. از این‌رو رکورد‌هایی هم که ویژگی پالسی دارند، تعیین می‌شود؛ و رفتار پالس گونه در ارتباط با امتداد‌های اصلی هم بررسی می‌شود.

## ۲- زلزله‌های نزدیک گسل

تا قبل از دهه ۱۹۷۰ نگاه محققین و پژوهشگران زلزله به جنبش‌های زمین مربوط به جنبش‌هایی بود که در فواصل دور از

1- Rupture directivity  
2- Fling step

که در امتداد این محورها مؤلفه‌های زمین‌لرزه دارای حداقل، متوسط و حداکثر مقدار واریانس و دارای کوواریانس صفر می‌باشند. کوواریانس بین مؤلفه‌های شتاب زلزله با فرض میانگین صفر بودن هر مؤلفه به صورت معادله (۱) تعریف می‌شود ( $E$ ) نماد امید ریاضی است) که می‌توان آن‌ها را به صورت ماتریسی هم نوشت:

$$v_{ij}(t, \tau) = E [a_i(t)a_j(t + \tau)] \quad i, j = x, y, z \quad (1)$$

$$v(t, \tau) = \begin{bmatrix} v_{xx} & v_{xy} & v_{xz} \\ v_{yx} & v_{yy} & v_{yz} \\ v_{zx} & v_{zy} & v_{zz} \end{bmatrix} \quad (2)$$

می‌توان نشان داد که مقادیر ویژه ماتریس فوق واریانس‌های اصلی و بردارهای متناظر با این مقادیر ویژه جهت‌های اصلی است [۱۶].

اگر طبق تعریف غیرهمبسته بودن محورهای اصلی، کوواریانس بین مؤلفه‌ها در امتداد محورهای اصلی  $x', y', z'$  صفر باشد، در آن صورت  $v_p$  (ماتریس کوواریانس در دستگاه محورهای اصلی) به صورت رابطه (۳) نوشته می‌شود که اعضای روی قطر اصلی واریانس‌های اصلی را شامل می‌شود.

$$v_p(t, \tau) = \begin{bmatrix} v_{x'x'} & 0 & 0 \\ 0 & v_{y'y'} & 0 \\ 0 & 0 & v_{z'z'} \end{bmatrix} \quad (3)$$

بنابراین می‌توان مقادیر ویژه ماتریس کوواریانس را حساب کرد. این مقادیر ویژه واریانس‌های اصلی و بردارهای متناظر با این مقادیر ویژه جهت‌های اصلی را مشخص می‌کنند.

در مورد انتشار امواج زلزله، بررسی‌ها نشان می‌دهند که در بیشتر موارد یکی از محورهای اصلی تقریباً عمود بر سطح زمین است [۱]. از آن جایی که دستگاه‌های شتاب‌نگاشت مؤلفه عمود بر سطح زمین را به صورت مجزا ثبت می‌کنند، مسئله تعیین محورها کمی راحت‌تر می‌شود و می‌توان با دوران مؤلفه‌های افقی ضریب همبستگی را تعیین نمود در زاویه‌ای که ضریب همبستگی صفر می‌شود، محورهای آن موقعیت جهت‌های اصلی خواهند بود. ضریب همبستگی بین مؤلفه‌ها به شکل معادله (۴) است که در آن  $\theta_{ax}(t)a_y(t)$  کوواریانس بین مؤلفه‌های شتاب در جهت  $x$  و  $y$  و  $\sigma_{ax}(t)$  و  $\sigma_{ay}(t)$  به ترتیب واریانس مؤلفه شتاب در جهت  $x$  و  $y$  می‌باشد.

فاکتور اول یعنی مکانیسم شکست و جهت انتشار شکست نسبت به ساختمان، جنبش‌های زمین در منطقه نزدیک گسل می‌توانند آثار دینامیکی راستاپذیری<sup>۱</sup> گسل را نشان دهند.

در نتیجه عامل سوم یعنی تغییر مکان‌های دائمی نیز، جنبش‌های زمین نزدیک به سطح گسیختگی ممکن است حاوی یک جابجایی استاتیکی دائمی عمده باشد که به نام جابجایی پالسی ماندگار زمین نام‌گذاری می‌شود. برای تخمین جنبش‌های زمین مربوط به یک سایت نزدیک به یک گسل فعال باید این جنبه‌های ویژه جنبش‌های زمین نزدیک گسل، مد نظر گرفته شوند [۶ و ۱۳].

در امتداد پیش رونده گسلش به سمت ساختمان، الگوی انتشار برشی جابجایی گسل باعث ایجاد پالس می‌شود که بیشتر به سمت عمود بر گسل است. ویژگی پالسی زمین لرزه‌های نزدیک گسل، سازه‌ها را در معرض انرژی ورودی بالایی قرار می‌دهد [۱۰ و ۱۴].

ویژگی رکوردهای پالس گونه از جمله زمان تناوب پالس، مورد توجه مهندسان زلزله و سازه است و تحقیقاتی برای استخراج پالس و تعیین زمان تناوب آن انجام گرفته است. در مطالعات Baker از تحلیل Wavelet برای طبقه‌بندی زمین لرزه‌های نزدیک گسل گونه استفاده شده است و از این طریق زمان تناوب پالس هم مشخص می‌شود [۱۵].

### ۳- محورهای اصلی زمین‌لرزه

حرکت زمین به صورت چند مؤلفه‌ای است. با چشم پوشی از مؤلفه‌های دورانی، دستگاه محورهای اصلی توسط Penzien و Watabe برای سه مؤلفه انتقالی زلزله تعریف شده است. در امتداد این محورها، مؤلفه‌های حرکت زمین غیرهمبسته هستند [۱].

محورهای اصلی، می‌تواند مشابه محاسبه بردارهای ویژه در مسئله مقادیر ویژه به دست آید. به سه طریق مختلف می‌توان محورهای اصلی را به دست آورد:

(۱) قطری‌سازی ماتریس انرژی کل

(۲) قطری‌سازی ماتریس کوواریانس

(۳) قطری‌سازی ماتریس طیف متقابل سه مؤلفه موج.

رایج‌ترین روش، قطری‌سازی ماتریس کوواریانس شتاب‌نگاشت زمین لرزه می‌باشد. در این روش مشابه انتقال متعامد تنش سه بعدی، دستگاه محورهای اصلی به دست می‌آید

نام‌گذاری محورهای اصلی بر اساس شدت آریاز<sup>۱</sup> تعیین می‌شود. محورهای اصلی به ترتیب میزان شدت آریاز از بزرگ به کوچک با نام‌های حداکثر<sup>۲</sup>، متوسط<sup>۳</sup> و حداقل<sup>۴</sup> نام‌گذاری می‌شود.

شدت آریاز به عنوان معیاری از انرژی کل به صورت معادله (۷) تعریف می‌شد [۱۸]. در این معادله،  $I_a$  شدت آریاز،  $tm$  زمان مربوط به انتهای شتاب نگاشت،  $a(t)$  شتاب ثبت شده در زمان  $t$  و  $g$  شتاب گرانشی زمین می‌باشد.

$$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_n} [a(t)]^2 dt \quad (7)$$

#### ۴- محورهای اصلی زمین لرزه آذربایجان در ایستگاه‌های مختلف

در این بررسی از رکوردهای مربوط به زلزله دوگانه آذربایجان (اهر و ورزقان) استفاده شده است که در سایت مرکز تحقیقات مسکن و ساختمان<sup>۵</sup> ارائه شده است. داده‌های شتاب نگاشت ابتدا به وسیله ابزارهای مناسبی اصلاح و مورد استفاده قرار گرفته است. برای اصلاح خط پایه سیگنال از چند جمله‌ای خطی استفاده شده است و به منظور حذف فرکانس‌های ناخواسته از سیگنال‌های ثبت شده از فیلتر نوع Butterworth با ویژگی میانگذر<sup>۶</sup> و از درجه ۴ و در بازه فرکانسی بین  $\text{Freq1}=0.1\text{Hz}$  و  $\text{Freq2}=25\text{Hz}$  استفاده شده است و سیگنال‌های خارج از این بازه فرکانسی حذف شده است [۱۹].

از میان شتاب‌نگاشت‌های ارائه شده، ایستگاه‌هایی که در آن‌ها شتاب هردو زلزله را ثبت نموده‌اند، استخراج شده است و در جدول (۱) این ایستگاه‌ها آورده شده است. شتاب‌نگاشت‌ها، شتاب افقی را در امتدادهای  $T$  و  $L$  ثبت نموده و این امتدادها به زاویه نصب شتاب نگاشت بستگی دارد. در ایستگاه‌های مختلف که هر دو زلزله آذربایجان را ثبت کرده‌اند، محاسبات مربوط به تعیین محورهای اصلی انجام گرفته است. برای مقایسه آسان امتدادهای اصلی، زاویه محور اصلی حداکثر نسبت به شمال تعیین شده است. در جدول (۱) این زاویه برای هردو زلزله آذربایجان در ۴۸ ایستگاه تهیه شده است. همچنین تفاوت زاویه محور حداکثر در دو زلزله در بازه ۰ تا ۹۰ آورده شده است.

$$\begin{aligned} \text{corr}(a_x(t), a_y(t)) &= \frac{V_{a_x(t)a_y(t)}}{\sigma_{a_x(t)}\sigma_{a_y(t)}} \\ &= \frac{\int_{\tau_1}^{\tau_2} a_x(t)a_y(t)dt}{\sqrt{\int_{\tau_1}^{\tau_2} a_x(t)^2 dt} \sqrt{\int_{\tau_1}^{\tau_2} a_y(t)^2 dt}} \end{aligned} \quad (4)$$

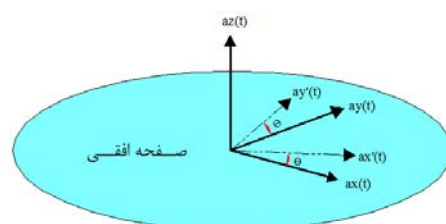
Watabe و Penzien [۱] این ضریب همبستگی را برای تعدادی از زلزله‌ها محاسبه نموده‌اند و در محاسبات خود مقدار  $\tau_1$  را برابر صفر و  $\tau_2$  را زمان مربوط به انتهای شتاب نگاشت قرار داده‌اند. ضریب همبستگی طبیعتاً به راستای ثبت زلزله بستگی دارد و با دوران مؤلفه‌های زلزله تغییر خواهد کرد.

مطابق شکل (۱) اگر مؤلفه‌های شتاب زلزله را در جهت‌های  $x$  و  $y$  به اندازه  $\theta$  در خلاف ساعت‌گرد دوران دهیم مؤلفه‌های جدید در راستای  $x'$  و  $y'$  به صورت معادل (۵) محاسبه می‌شود.

$$\begin{bmatrix} a_{x'}(t) \\ a_{y'}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x(t) \\ a_y(t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

با دوران شتاب‌های ثبت شده در زوایای مختلف، ضریب همبستگی نظیر هر زاویه هم محاسبه می‌شود و از این طریق در زاویه‌ای که ضریب همبستگی بین مؤلفه‌ها صفر شد، امتدادهای آن زاویه محورهای اصلی را مشخص می‌کنند. با بررسی‌ها ساده می‌توان نشان داد که زاویه دورانی که در آن مؤلفه‌ها غیر همبسته می‌شوند از معادله (۶) هم به دست می‌آید [۱۷].

$$\begin{aligned} \hat{\theta} &= \frac{1}{2} \left( \frac{2\text{corr}(a_x(t), a_y(t))\sigma_{a_x(t)}\sigma_{a_y(t)}}{\sigma_{a_x(t)}^2 - \sigma_{a_y(t)}^2} \right) + k \frac{\pi}{2} \\ k &= \text{int eger} \end{aligned} \quad (6)$$



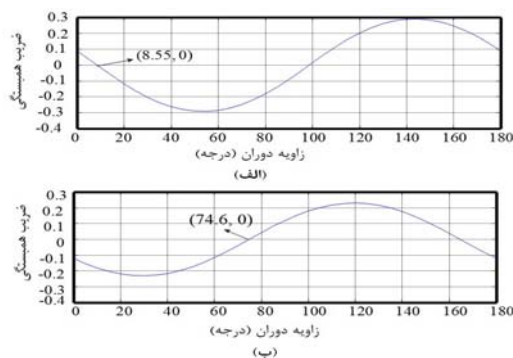
شکل ۲- دوران مؤلفه‌های عمود برهم افقی به اندازه  $\theta$  در خلاف جهت ساعت‌گرد

1- Arias intensity  
2- Major  
3- Intermediate  
4- Minor  
5- www.bhrc.ac.ir  
6- Bandpass

جدول ۱- زاویه محور پیشینه اصلی نسبت به شمال (به صورت ساعت‌گرد) در ایستگاه‌های ثبت کننده زلزله‌های آذربایجان

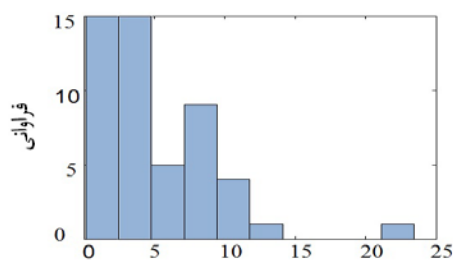
نام ایستگاه	زاویه محور حداکثر نسبت به شمال در زلزله ۱	زاویه محور حداکثر نسبت به شمال در زلزله ۲	تغییرات زاویه محور حداکثر	نام ایستگاه	زاویه محور حداکثر نسبت به شمال در زلزله ۱	زاویه محور حداکثر نسبت به شمال در زلزله ۲	تغییرات زاویه محور حداکثر
ورزقان	۵۷/۶۲	۱۱۲	۵۴/۳۸	سراب	۹۲/۲۴	۱۴/۶	۷۷/۶۴
اهر	۹۷/۴	۶۳/۵	۳۳/۹	ترکمانچای	۷۵/۲۵	۷۴/۴	۰/۸۵
هریس	۷۶/۴۵	۹/۷۲	۱۳/۲۷	زنوز	۳۳	۴/۵	۲۸/۵
خواجه	۰۴/۸۳	۱۱۱	۶/۱۷	عجب‌شیر	۹۱/۲۲	۹۹	۷/۷۸
دمیرچی	۲/۸۸	۳/۳	۰/۴۲	صوفیان	۷	۱۱۲/۵	۷۴/۵
نهند	۵۵/۸۹	۱۵۸	۷۷/۸۹	ارومیه ۱	۵	۲۴	۱۹
هوراند	۹۰	۹۱	۱	بند	۶۸	۷۹/۵	۱۱/۵
کلیبر	۵۶/۸۶	۱۰۳	۴۶/۱۴	زنجریه	۱۰۳/۴	۱۰۲/۴	۱
مشکین شهر	۱۳۶/۸۶	۵۶	۸۰/۸۶	مرد	۸۴	۳۹/۵	۴۴/۵
دوزال	۵۸/۱۷	۴۹	۹/۱۷	آمند	۱۵۸/۲	۱۴۶	۱۲/۲
روانق	۰	۱۷۷	۳	تیکمه‌داش	۵۰	۷۸	۲۸
تبریز ۴	۱۱۱	۸۸	۲۳	نقده	۷۲/۶	۶۸	۴/۶
زیوه	۱۵۱/۵	۱۷۶/۲۸	۲۴/۷۸	سیدتاج‌الدین	۱۱	۱۹/۲	۸/۲
تبریز ۵	۱۳۴/۸۳	۱۲۴/۷۷	۱۰/۰۶	پارس‌آباد	۱۲۵/۲	۱۴۸	۲۲/۸
شربیان	۱۴۰/۵	۱۴۲/۵	۲	نظر کهریزی	۹۸/۴	۱۱۹/۶	۲۱/۲
باسمنج	۴۰	۲۸	۱۲	هشترود	۶۲	۷۶/۲	۱۴/۲
لیقوان	۱۲	۴۶/۵	۳۴/۵	تسوج	۱۳/۲۶	۱۶۳	۳۰/۲۶
شرفخانه	۷۳/۴	۱۰۰	۲۶/۶	یکان کهریز	۵۱	۷۰	۱۹
خمارلو	۱۰۲/۸	۸۹	۱۳/۸	قوشچی	۹	۶۴/۴	۵۵/۴
لاهرود	۷۱/۲	۵۴	۱۷/۲	قره‌قشلاق	۱۱۳	۱۱۵/۷۷	۲/۷۷
تبریز ۶	۹۵	۹۱/۴	۳/۶	بران علیا	۱۷۵	۱۲۱	۵۴
هادی‌شهر	۱۷۴/۰۸	۱۴۳/۴	۳۰/۶۸	بستان‌آباد	۵۷	۱۴/۷	۴۲/۳
شبستر	۱۳۴/۶۵	۱۶۷	۳۲/۳۵	سلماس ۱	۱۷	۳۶	۱۹
آوین	۱۴۶/۴	۱۵۶	۹/۶	سیلاب	۹۲/۳	۱۰۱/۵	۹/۲

برای تشریح تحلیل محورهای غیر همبسته در صفحه افقی ضریب همبستگی بین مؤلفه‌های شتاب دوران داده شده بر اساس زوایای مختلف به دست آمده است. در شکل (۴) این کار برای رکوردهای زلزله اول در ایستگاه‌های هریس و اهر نشان داده شده است.

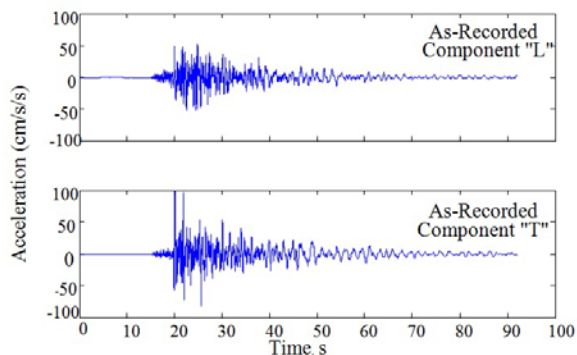


شکل ۴- ضریب همبستگی بین مؤلفه‌های شتاب دوران داده شده: الف) ایستگاه هریس، ب) ایستگاه اهر

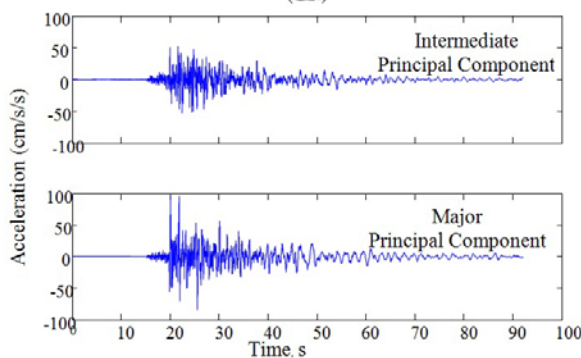
در ابتدا محورهای اصلی زلزله اول در سه امتداد محاسبه و شدت آریز در امتداد این محورها تعیین شدند. مطابق شکل (۳) مشخص شد که از ۴۸ رکورد مورد بررسی در ۳۰ مورد زاویه بین امتداد عمود بر زمین و امتداد محور اصلی حداقل، کمتر از ۵ درجه است یعنی مؤلفه اصلی حداقل تقریباً همان مؤلفه عمودی است.



شکل ۳- فراوانی زاویه محورهای حداقل نسبت به بردار عمود بر زمین در زلزله اول آذربایجان



(الف)

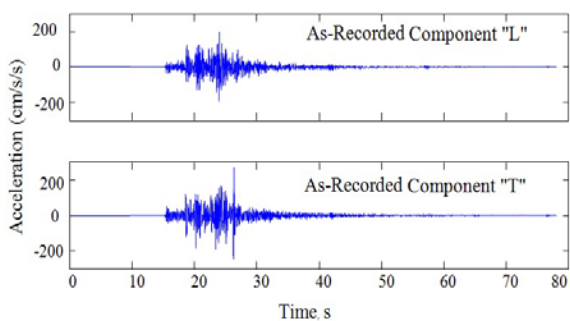


(ب)

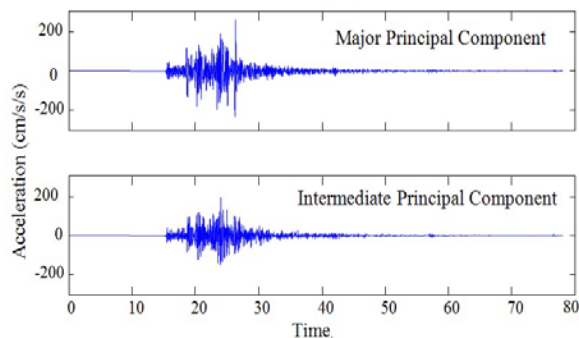
شکل ۷- الف) مؤلفه‌های افقی ثبت شده زلزله اول آذربایجان در

ایستگاه هریس، ب) مؤلفه‌های دوران داده شده در خلاف

ساعت گرد به اندازه ۸/۵۵ درجه



(الف)



(ب)

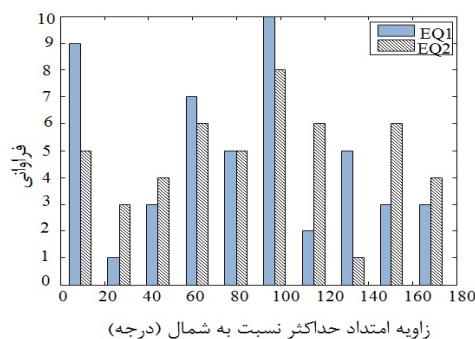
شکل ۸- الف) مؤلفه‌های افقی ثبت شده زلزله اول آذربایجان

در ایستگاه اهر، ب) مؤلفه‌های دوران داده شده در خلاف

ساعت گرد به اندازه ۷۶/۶ درجه

در شکل‌های (۷) و (۸) مؤلفه‌های شتاب ثبت شده ایستگاه‌های اهر و هریس نمایش داده شده است. هر جفت مؤلفه شتاب ثبت شده بر اساس زاویه غیر همبستگی به دست آمده در شکل (۴) به وسیله معادله (۵) دوران شده است.

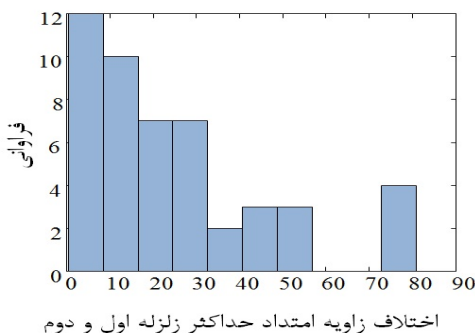
بعد از تعیین محورهای اصلی با تعریف‌های انجام شده، مؤلفه‌ی اصلی که شدت آریز در آن ماکزیمم است، مؤلفه اصلی حداکثر و دیگری مؤلفه اصلی متوسط نامیده می‌شود. یادآوری می‌شود که مؤلفه‌ی اصلی حداقل در امتداد عمود بر سطح زمین است. در شکل (۵) نمودار فراوانی زاویه محور اصلی حداکثر نسبت به شمال در ایستگاه‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد که بیشترین فراوانی مربوط به زوایای ۱۰ و ۱۰۰ درجه می‌باشد.



زاویه امتداد حداکثر نسبت به شمال (درجه)

شکل ۵- فراوانی زاویه‌های محورهای بیشینه نسبت به شمال در دو زلزله

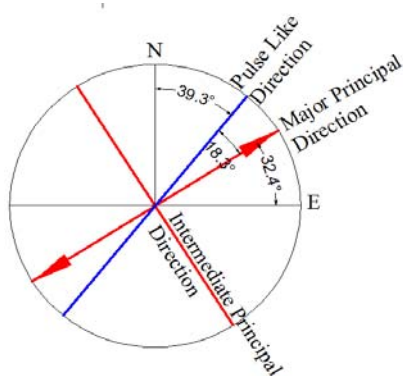
با استفاده از داده‌های جدول (۱) مقایسه‌ای بین زاویه محور حداکثر در دو زلزله آذربایجان انجام شده است. مشاهده می‌شود که در نیمی از ایستگاه‌ها مقدار تغییر این امتداد کمتر از ۲۰ درجه است. در شکل (۶) نمودار فراوانی میزان تغییرات در امتداد جهت اصلی زلزله دوم و زلزله اول در هر ایستگاه نشان داده شده است. در شکل (۹) نیز جهت‌های اصلی حداکثر به صورت پیکان در ایستگاه‌های اطراف کانون زلزله نمایش داده شده است.



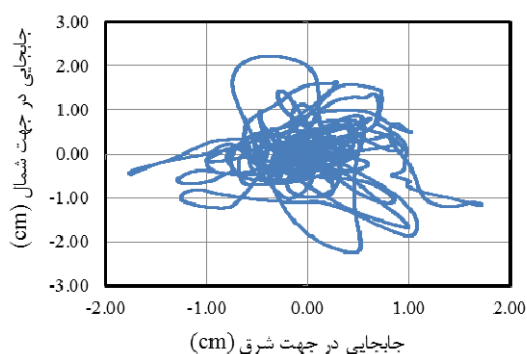
اختلاف زاویه امتداد حداکثر زلزله اول و دوم

شکل ۶- فراوانی اختلاف زاویه محور حداکثر هر ایستگاه در دو زلزله

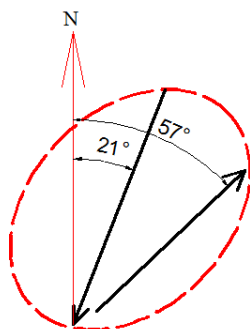
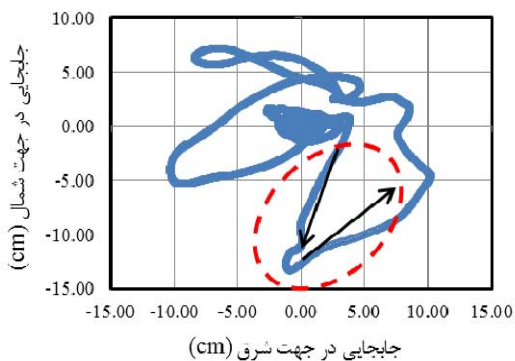




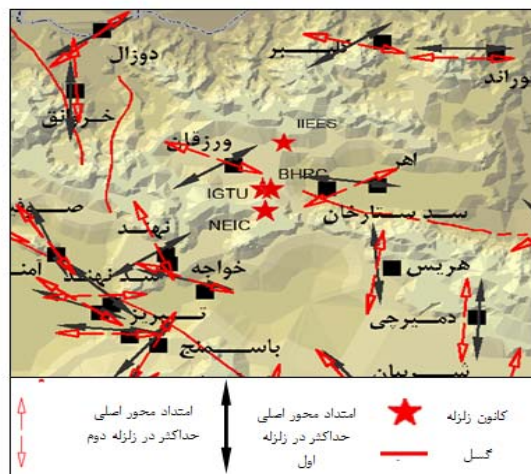
شکل ۱۰- امتدادهای اصلی زلزله و امتداد پالس دار در ایستگاه ورزقان در زلزله اول آذربایجان



شکل ۹- امتداد اصلی بیشینه در دو زلزله آذربایجان در چند ایستگاه نزدیک کانون زلزله



شکل ۱۱- نحوه جابجایی افقی زمین در ایستگاه هریس در زلزله اول به همراه امتدادهای جابجایی در بازه زمانی ۱۸/۸ تا ۲۰/۶ ثانیه



شکل ۱۲- نحوه جابجایی افقی زمین در ایستگاه ورزقان در زلزله اول

نمودار فرکانس- زمان موج سرعت در صورت وجود پالس آن را شناسایی می‌کند. بررسی رکوردها نشان داد که رکورد ثبت شده از زلزله اول در ایستگاه ورزقان دارای ویژگی پالسی می‌باشد. این پالس سرعت در امتداد شمال شرق- جنوب غربی و با زاویه  $39/3^\circ$  درجه نسبت به شمال و با زمان تناوب  $2/079$  ثانیه مشاهده می‌شود و در شکل (۱۰) امتداد حداکثر و امتداد پالس دار مقایسه شده است و در شکل (۱۱) نحوه جابجایی زمین در صفحه افقی برای ایستگاه هریس در زلزله اول رسم شده است و در شکل (۱۲) جابجایی زمین در صفحه افقی برای ایستگاه ورزقان رسم شده است. در این شکل بین ثانیه  $18/8$  تا  $20/6$  که حالت پالسی اتفاق می‌افتد به صورت مجزا نمایش داده شده است. همان‌طور که مشخص شده است، جابجایی زمین در حالت پالسی با زاویه  $21^\circ$  درجه نسبت به شمال شروع و با زاویه  $57^\circ$  درجه نسبت به شمال بر می‌گردد؛ و به طور میانگین، حرکت زمین در بازه زمانی که پالس اتفاق می‌افتد، در امتداد  $47^\circ$  درجه نسبت به شمال است. قابل ذکر است که محور اصلی محاسبه شده برای کل بازه زمانی وقوع زلزله در این ایستگاه در امتداد  $57/6^\circ$  درجه نسبت به شمال است و این در حالی است که محور اصلی در بازه زمانی بین  $18/8$  تا  $20/6$  ثانیه که حالت پالسی اتفاق می‌افتد، در امتداد  $46^\circ$  درجه نسبت به شمال است.

برای پردازش امواج در محیط زمان- فرکانس از ابزاری به نام تبدیل S می‌توان استفاده نمود [۲۰]. در اینجا تبدیل S به عنوان ابزاری قدرتمند برای شناسایی زلزله در محیط زمان- فرکانس بر روی تاریخچه سرعت زمین لرزه اعمال شده است.

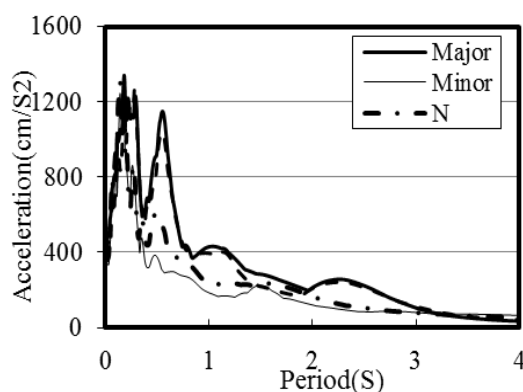
فرکانس و میرایی مشخص، تحت تأثیر یک شتاب نگاشت می‌باشد [۲۱].

Lopez و همکاران [۲۲] خصوصیات طیف‌های پاسخ مؤلفه‌های اصلی ۹۷ شتاب نگاشت از ۲۵ زلزله را بررسی کرده‌اند که در آمریکا، اروپا و آسیا بین سال‌های ۱۹۳۴ تا ۲۰۰۱ اتفاق افتاده است. این تحقیق نشان می‌دهد که مؤلفه‌های اصلی شکل طیف متفاوتی دارند و نسبت شدت طیفی بین دو مؤلفه اصلی بین ۰/۶۳ و ۰/۸۱ است. این نتیجه نشان می‌دهد که زلزله‌ها را بدون در نظر گرفتن منطقه، در امتدادهای اصلی با شدت‌های متفاوتی می‌توان مشخص کرد.

در تحقیقات قبلی از جمله مطالعات علوی و همکاران [۱۰] درباره زلزله‌های نزدیک گسل متوجه شده‌اند که در زلزله‌های با ویژگی پیش رونده، طیف پاسخ در امتداد عمود بر گسل شدید تر از سایر امتدادهاست.

در شکل‌های (۱۵) تا (۱۷) به ترتیب طیف‌های پاسخ شتاب، سرعت و جابجایی مربوط به شتاب نگاشت ایستگاه ورزقان با میرایی ۵ درصد در امتدادهای اصلی افقی و همچنین در امتدادهای شمال و شرق رسم شده است. در شکل‌های (۱۸) تا (۲۰) همین نتایج برای ایستگاه هریس هم رسم شده است.

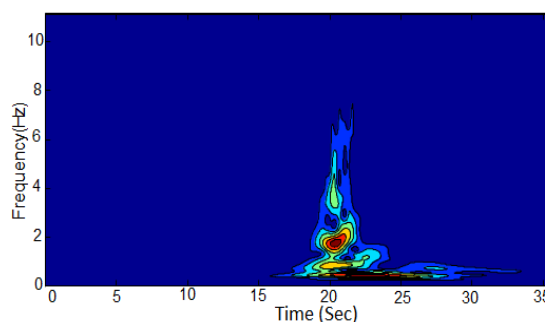
تفکیک پاسخ بین دو جهت عمود برهم در برخی زمان تناوب‌ها کاملاً مشهود است. به خصوص در طیف پاسخ جابجایی، که پاسخ در امتداد حداکثر، بیش از دو برابر پاسخ در امتداد عمود بر آن است. بنابراین در زلزله مورد بررسی ما هم طیف پاسخ امتداد حداکثر شدیدتر از سایر امتدادهاست؛ و به نظر می‌رسد که می‌توان با استفاده از محورهای اصلی امتدادهای دارای انرژی بیشتر زلزله و امتدادهای دارای ویژگی جهت داری را تشخیص داد.



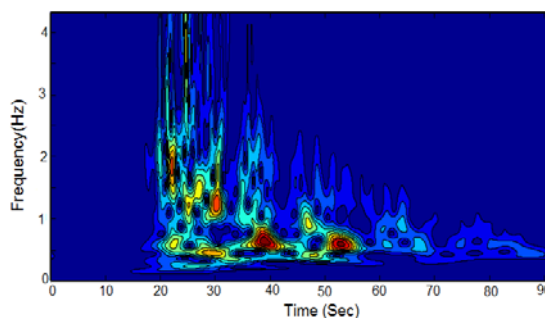
شکل ۱۵- طیف پاسخ شتاب زلزله اول آذربایجان در ایستگاه ورزقان

دو رکورد مربوط به ایستگاه‌های ورزقان و هریس در زلزله اول با استفاده از این تکنیک بررسی شده است.

در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) مقدار قدر مطلق مقادیر ماتریس حاصل از تبدیل S تاریخچه زمانی سرعت زمین لرزه‌ها به عنوان معیاری از انرژی موج به صورت ترازهایی نمایش داده شده‌اند. تبدیل S در واقع همانند تبدیل فوریه کوتاه، محتوای فرکانسی موج را در بازه‌های زمانی مختلف نشان می‌دهد. در این شکل‌ها برای نشان دادن نمودار فرکانس- زمان از کانتورهای رنگی بهره گرفته شده است. این نمودارها نحوه توزیع انرژی را در هر فرکانس در طول زمان نشان می‌دهند. با مقایسه شکل‌های (۱۳) و (۱۴) مشاهده می‌شود که در مناطق نزدیک گسل انرژی حداکثر زلزله در محدوده فرکانس‌های خاصی و در زمان کوتاهی به صورت پالس متمرکز می‌شود. حال آن که با فاصله گرفتن از گسل انرژی حداکثر زلزله در پهنای فرکانسی وسیعی پخش می‌شود.



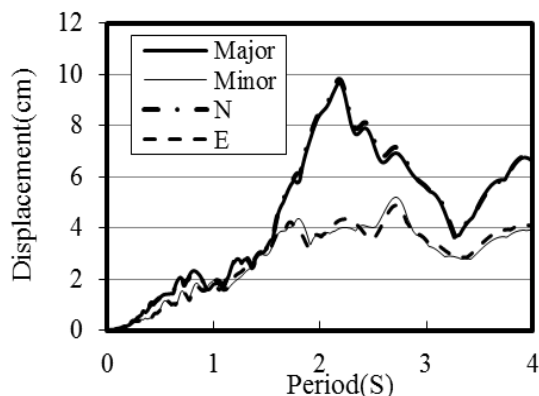
شکل ۱۳- تبدیل S تاریخچه زمانی سرعت زلزله اول ایستگاه ورزقان در حوزه زمان- فرکانس



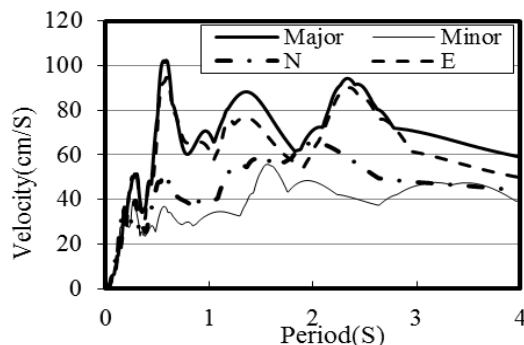
شکل ۱۴- تبدیل S تاریخچه زمانی سرعت زلزله اول ایستگاه هریس در حوزه زمان- فرکانس

۶- طیف پاسخ در امتدادهای اصلی در مقایسه با طیف پاسخ سایر امتدادها  
طیف پاسخ زلزله، حداکثر پاسخ سیستم تک درجه آزادی با

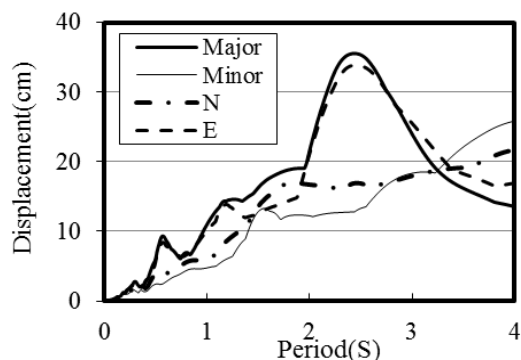




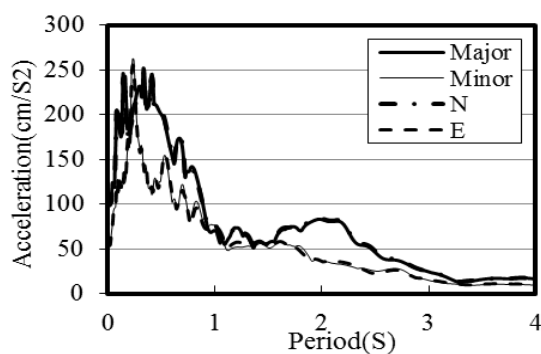
شکل ۲۰- طیف پاسخ جابجایی زلزله اول آذربایجان در ایستگاه هریس



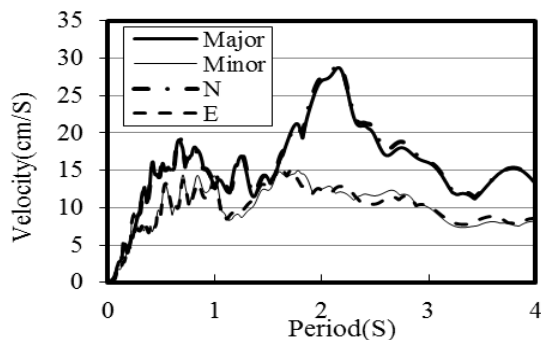
شکل ۱۶- طیف پاسخ سرعت زلزله اول آذربایجان در ایستگاه ورزقان



شکل ۱۷- طیف پاسخ جابجایی زلزله اول آذربایجان در ایستگاه ورزقان



شکل ۱۸- طیف پاسخ شتاب زلزله اول آذربایجان در ایستگاه هریس



شکل ۱۹- طیف پاسخ سرعت زلزله اول آذربایجان در ایستگاه هریس

#### ۷- نتایج

در بررسی رکوردهای زلزله‌های آذربایجان در این تحقیق در ایستگاه‌های مختلف، از یک رویکرد متفاوتی به نام محورهای اصلی استفاده شده است؛ و ارتباط بین امتدادهای اصلی حاصل از تحلیل محورهای اصلی و امتداد دارای ویژگی جهت‌داری مورد بررسی قرار گرفته است.

- محورهای اصلی زلزله کمک می‌کند تا فهم دقیقی از میزان انرژی زلزله در امتدادهای مختلف داشته باشیم و امتدادی که دارای بیشترین انرژی است می‌تواند در مسائل مهندسی مورد توجه قرار گیرد.

- از ۴۸ ایستگاه مورد بررسی که هر دو زلزله آذربایجان را ثبت کرده‌اند، در ۱۵ ایستگاه تغییر زاویه مؤلفه اصلی حداکثر کمتر از ۱۰ درجه و در ۱۱ ایستگاه این تغییر بین ۱۰ تا ۲۰ درجه است و این یعنی در ۵۴٪ ایستگاه‌ها زاویه محور اصلی حداکثر کمتر از ۲۰ درجه تغییر یافته است؛ و این در حالی است که در ۴۶٪ ایستگاه‌ها تغییرات زاویه بین ۲۰ تا ۹۰ درجه پراکنده شده است - جهت محورهای اصلی در هر ایستگاه تابعی از موقعیت آن ایستگاه نسبت به منبع زلزله و مکانیزم منبع زلزله می‌باشد. با توجه به نزدیک بودن کانون دو زلزله آذربایجان و همسانی در مکانیزم زلزله، جهت محورهای اصلی در بیشتر ایستگاه‌ها ثابت مانده است.

- در زلزله‌های دوگانه آذربایجان مشاهده می‌شود که امتداد عمود بر سطح زمین، جهت اصلی حداقل زمین لرزه محسوب می‌شود و جهت اصلی حداکثر یکی از دو امتداد افقی است.

- بررسی طیف‌های پاسخ شتاب نگاشت در یک ایستگاه نشان می‌دهد که تفاوت پاسخ در امتدادهای مختلف وابسته به زمان تناوب است، که در برخی زمان تناوب‌ها پاسخ‌ها در امتداد اصلی

- Engineering, 2004, 24, 815-828.
- [9] Zareh, M., Shahvar, M., "An Urgent Report on the 11 August 2012, Mw 6.2 and Mw 6.1; Ahar Twin earthquakes in East Azarbayjan Province of NW Iran", www.iiees.ac.ir, 2012.
- [10] Alavi, B., Krawinkler, H., "Effects of Near-Fault Ground Motions on Frame Structures", Blume Earthquake Engineering Center, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, Report NO.138, 2001, 1-301.
- [11] Aki, K., "Seismic Displacement near a Fault", Journal of Geophysics Research, 1968, 73, 5359-5376.
- [12] Haskell, N., A., "Elastic Displacements in the Near-Field of a Propagating Fault", Bulletin of Seismology Society of America, 1969, 59, 865-908.
- [13] Rodriguez-Marek, A., "Near Fault Seismic Site Response", PhD Thesis, University of California, Berkley, USA, 2000.
- [14] Somerville, P., "Development of an Improved Ground Motion Representation for Near Fault Ground Motions", SMIP98 Seminar on Utilization of Strong-Motion Data, Oakland, USA, 1998.
- [15] Baker, J. W., "Quantitative Classification of Near-Fault Ground Motions Using Wavelet Analysis", Bulletin of Seismology Society of America, 2007, 97, 1486-1501.
- [16] Phung, V., Lau, D., Hao, H., "Principal Axes of Strong Ground Motion Records of the 1999 Chi-Chi Taiwan Earthquake", 4<sup>th</sup> International Conference on Earthquake Engineering, Taiwan, 2006.
- [17] Rezaeian, S., Der Kiureghian A., "Simulation of Orthogonal Horizontal Ground Motion Components for Specified Earthquake and Site Characteristics", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2012, 41, 335-353.
- [18] Arias, A., "A Measure of Earthquake Intensity", In Seismic Design for Nuclear Powerplants, MIT Press, Cambridge, 1970.
- [19] Boore, D. M., Akkar, S., "Effects of Causal and Acausal Filters on Elastic and Inelastic Response Spectra", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2003, 32, 1729-1748.
- [20] Stockwell, R. G., Mansinha, L., Lowe, R. P., "Localization of the Complex Spectrum: The S Transform", IEEE Trans Signal Processing, 1996, 44, 998-1001.
- [21] Chopra, A., K., "Dynamic of Structures, Theory and Application to Earthquake Engineering", Prentice Hall, 1995.
- [22] Lopez, A. L., Hernandez, J. J., Bonilla, R., Fernandez, A., "Response Spectra for Multicomponent Structural Analysis", Earthquake Spectra, 2006, 22, 85-113.
- حداکثر، می‌تواند حتی بیشتر از دو برابر پاسخ در امتداد عمود بر آن هم باشد.
- طیف پاسخ‌های به دست آمده در این تحقیق در برخی زمان تناوب‌ها وابستگی زیادی به امتدادهای اصلی دارند؛ به طوری که در امتداد محور اصلی حداکثر، طیف پاسخ دارای بیشترین مقدار و در امتداد محور عمود بر آن دارای کمترین پاسخ است.
- طیف‌های پاسخ در زلزله‌های نزدیک گسل نشان می‌دهند که در امتداد عمود بر گسل شدیدتر از امتداد موازی گسل هستند. از طرف دیگر در تحلیل محورهای اصلی هم طیف پاسخ امتداد حداکثر شدیدتر است. بنابراین می‌توان با تحلیل محورهای اصلی در زلزله‌های نزدیک گسل، امتداد دارای ویژگی جهت‌داری را هم مشخص کرد.
- ۸- مراجع**
- [1] Penzien, J., Watabe, M., "Characteristics of 3-Dimensional Earthquake Ground Motions", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1975, 3, 365-373.
- [2] Kubo, T., Penzien J., "Simulation of Three-Dimensional Strong Ground Motions along Principal Axes, San Fernando Earthquake", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1979, 7, 279-294.
- [3] Smeby, W., Der Kiureghian, A., "Modal Combination Rules for Multicomponent Earthquake Excitation", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1985, 13, 1-12.
- [4] Yeh, C., Wen, Y., "Modeling of Nonstationary Earthquake Ground Motion and Biaxial and Torsional Response of Inelastic Structures", Civil Engineering Studies, Structural Research Series University of Illinois, 1989.
- [5] Heredia-Zavoni, E., Machicao-Barrionuevo, R., "Response to Orthogonal Components of Ground Motion and Assessment of Percentage Combination Rules", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2004, 33, 271-284.
- [6] Gillie, J. L., Rodriguez-Marek, A., Daniel, C. M., "Strength Reduction Factors for Near-Fault Forward-Directivity Ground Motions", Engineering Structures, 2010, 32, 273-285.
- [7] Bertero, V., Mahin, S. A., Herrera, R. A., "Aseismic Design Implications of Near-Fault San Fernando Earthquake Records", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1978, 6, 31-42.
- [8] Bray, J. D., Rodriguez-Marek, A., "Characterization of Forward-Directivity Ground Motions in the Near-Fault Region Abstract", Soil Dynamics and Earthquake