

## روش های تبدیل موجک پیوسته و تحلیل فوریه در ارزیابی خصوصیات تحریک بحرانی

رضا کامگار<sup>۱\*</sup>، نوراله مجیدی<sup>۲</sup>، علی حیدری<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه شهرکرد، دانشکده ی فنی و مهندسی، شهرکرد، ایران  
<sup>۲</sup> کارشناس ارشد مهندسی عمران- سازه، دانشکده ی فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران  
<sup>۳</sup> دانشیار گروه مهندسی عمران دانشگاه شهرکرد، دانشکده ی فنی و مهندسی، شهرکرد، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۳-۲۷  
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۶-۰۹  
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۶-۱۰  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۶-۲۳

### کلمات کلیدی:

تحریک بحرانی  
قاب برشی  
تبدیل موجک  
تحلیل فوریه  
بهینه سازی

**خلاصه:** در طراحی سازه طراح می بایستی سازه را برای بیشینه باری که احتمال می رود سازه در طول عمر خود با آن مواجه شود، طراحی کند. در این مقاله به توجه به اطلاعاتی که از زمین لرزه های رخ داده در گذشته به دست می آید، تحریکات بحرانی قاب برشی مجهز شده به مهاربند بازویی، تحت دو حالت قیدی محاسبه می شوند. بدین منظور یک مسئله ی بهینه سازی غیرخطی حل می شود و در آن تابع هدف بیشینه سازی جابجایی بام سازه در نظر گرفته می شود. در هر حالت قیدی تحریکات بحرانی محاسبه و به ترتیب تحت عنوان تحریکات بحرانی اول و دوم شناخته می شوند. در حالت قیدی اول انرژی و بیشینه شتاب به عنوان قیود در نظر گرفته می شود در حالی که در حالت قیدی دوم، قید حد فوقانی طیف فوریه به این قیود اضافه می شود. در نهایت خصوصیات تحریکات بحرانی به همراه زلزله های استفاده شده جهت تولید تحریکات بحرانی با استفاده از روش تحلیل فوریه و تبدیل موجک پیوسته بررسی می شود. نتایج مثال عددی ارائه شده نشان می دهد که طیف فوریه ی زلزله ی بحرانی حالت اول در فرکانسی نزدیک به فرکانس مود اول ارتعاشی سازه ۶/۶۸ برابر بیشینه مقدار متناظر در سایر زلزله ها است و همین امر منجر به تولید زمین لرزه ای بحرانی تر شده است. همچنین با استفاده از منحنی زمان- فرکانس، نشان داده می شود که تقریباً زمان غالب فرکانس ها (زمانی که بیشتر فرکانس ها در آن زمان رخ می دهند) برای تمامی زلزله ها بیشتر از ده ثانیه است و همچنین مدت زمان حرکت قوی هر زلزله در داخل بازه ی زمانی مربوط به زمان غالب فرکانسی همان زلزله قرار دارد.

### ۱- مقدمه

طراحی سازه های مهم می شود زیرا که بایستی در این گونه سازه ها از ایجاد خرابی تحت زلزله های شدید خودداری شود [۱-۴]. در این میان، روش تحریک بحرانی روشی توانمند جهت در نظر گرفتن عدم قطعیت ذاتی موجود در زمین لرزه ها برای ساخت زمین لرزه های طراحی به شیوه ای منطقی است [۵]. وسترمو<sup>۱</sup> در سال ۱۹۸۵ از انرژی ورودی به ازای واحد جرم در طول زلزله به عنوان تابع هدف در مسئله ی تحریک بحرانی استفاده نمود [۶]. در این مقاله، وسترمو قیدی را بر روی انتگرال مربع شتاب ورودی اعمال نمود و نشان داد که شتاب ورودی بحرانی

در نظر گرفتن تغییرپذیری خصوصیات زمین لرزه طی زلزله های رخ داده در گذشته با توجه به لزوم طراحی سازه ها تحت بار زلزله امری مهم و ضروری است. آیین نامه ها و دستورالعمل های طراحی معمولاً با در نظر گرفتن دانش کسب شده از مشاهدات زلزله های رخ داده در گذشته با بینشی احتمالاتی ایجاد می شوند. به هر حال، عدم قطعیت موجود در رخداد زلزله، مکانیزم گسیختگی گسل، مکانیزم انتشار امواج، خصوصیات زمین لرزه و ... باعث ایجاد مشکلاتی در تعریف زلزله ی قابل قبول جهت

1 Westermo

\* نویسنده عهده دار مکاتبات: kamgar@sku.ac.ir



نسبتی از پاسخ سرعت است. تاکواکی<sup>۱</sup> در سال ۲۰۱۳ نشان داد که این حل الزاماً کامل و صریح نبوده زیرا که پاسخ سرعت اساساً تابعی از تحریک به دست آمده است [۳]. مصطفی<sup>۲</sup> در سال های ۲۰۰۶، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۱ مسئله ی مدل نمودن زلزله به صورت زلزله ی طراحی برای سازه های غیر الاستیک با چند درجه آزادی را مطرح نمود [۷-۹]. کامگار و رهگذر نیز مسئله ی طراحی لرزه ای سازه های بااهمیت را تحت زلزله ی بحرانی مورد بررسی قرار دادند [۱۰]. در پژوهش های دیگر کامگار و همکاران مسئله ی طراحی کنترل کننده های فعال [۱۱] و میراگر های جرمی غیرفعال [۱۲، ۱۳] را تحت بار بحرانی مورد بررسی قرار دادند.

از نظر تاریخی، تبدیل موجک روش جدیدی است که پایه های ریاضی آن به نظریه ی جوزف فوریه در قرن نوزدهم برمی گردد. در حقیقت فوریه با ارائه ی تئوری آنالیز فرکانسی خود گامی اساسی را در تجزیه و تحلیل سیگنال ها برداشت. اولین بار آلفرد هار در سال ۱۹۰۹ از اصطلاح موجک استفاده نمود [۱۴]. تحلیل فوریه، یک سیگنال را به امواج سینوسی و کسینوسی مختلف تقسیم می کند، و به طور مشابه در تحلیل موجک، یک سیگنال به سیگنال های مقیاس شده از موجک اصلی مادر تجزیه می شوند [۱۵]. برخی از محققین با استفاده از تبدیل موجک گسسته خصوصیات مهندسی زمین لرزه های قوی را تا ۵ مرحله برآورد نمودند [۱۶، ۱۷] و به این نتیجه رسیدند که با افزایش هر مرحله، مدت زمان آنالیز کاهش یافته در حالی که مقدار خطا افزایش یافته است. در این تحقیق آنان نشان دادند که تا سه سطح استفاده از تجزیه ی گسسته ی موجک ضمن کاهش حجم محاسبات، جواب ها نیز از دقت مناسبی برخوردار هستند. کاوه و مهدوی با استفاده از تبدیل موجک، پارامترهای حرکت زمین را اصلاح نمودند [۱۸] و از تبدیل موجک در مسائل بهینه سازی استفاده نمودند [۱۹، ۲۰]. نجف زاده نیز در پیش بینی مسائل مهندسی از تئوری موجک استفاده نمود [۲۱، ۲۲]. قلی زاده نیز از تبدیل موجک در بررسی مسائل بهینه سازی استفاده نمود [۲۳-۲۶].

در این مقاله، با استفاده از اطلاعات کسب شده از زمین لرزه های رخ داده در گذشته، تحریکات بحرانی سیستم قاب برشی بیست طبقه ی مجهز شده با استفاده از مهاربند بازویی محاسبه می شوند. برای این منظور، شتاب زلزله ی طرح به صورت سری فوریه با دامنه و زاویه ی

1 Takewaki  
2 Moustafa

فاز مجهول توسط تابع پوشی تعدیل شده، بیان می شود. در نهایت نیز با استفاده از روش تحلیل تاریخچه زمانی و برای گام های زمانی متفاوت، تحریک های بحرانی برای دو حالت قیدی متفاوت به گونه ای که جابجایی بام سازه (تابع هدف) را بیشینه می نمایند، محاسبه می شوند. از میان زلزله های محاسبه شده، زلزله ای که بیشینه قدر مطلق جابجایی بام را تولید می نماید، تحت عنوان تحریک بحرانی معرفی می شود. در حقیقت، جهت محاسبه ی تحریک بحرانی می بایستی یک مسئله ی بهینه سازی غیرخطی مقید حل شود. قیود در نظر گرفته شده شامل دو حالت قیدی می باشند. در حالت قیدی اول، انرژی و بیشینه شتاب به عنوان قیود در نظر گرفته می شوند در حالی که در حالت قیدی دوم، قید حد فوقانی طیف فوریه نیز به قیود فوق اضافه می شود. می بایستی توجه داشت که حالات قیدی اول و دوم به ترتیب منجر به تولید زلزله های بحرانی حالت اول و دوم می شوند. در نهایت با استفاده از تبدیل فوریه، زلزله های بحرانی محاسبه شده به همراه زلزله های اصلی تا پنج فرکانس غالب با یکدیگر مقایسه می شوند. نتایج مثال عددی ارائه شده نشان می دهد که طیف فوریه ی زلزله ی بحرانی حالت اول در فرکانسی نزدیک به فرکانس مود اول سازه (۰/۳۴ هرتز) از تمامی زلزله های مورد مطالعه بیشتر است که منجر به تولید زلزله ای بحرانی تر شده است. می بایستی توجه داشت که در فرکانس ۰/۳۴ هرتز مقدار طیف فوریه ی زلزله ی بحرانی اول  $6/68$  (m/sec) می باشد که نسبت به بیشینه مقدار متناظر در سایر زلزله ها  $6/68$  برابر است. همچنین بررسی مقادیر فرکانس های زلزله های اصلی و زلزله های بحرانی نشان می دهد که بیشینه یا کمینه بودن مقدار پنج فرکانس اول زلزله تأثیری در بحرانی بودن زلزله ندارد زیرا که با وجود بیشینه یا کمینه ی محض نبودن مقادیر پنج فرکانس اول زلزله ها ی بحرانی اول و دوم نسبت به سایر زلزله ها، این دو زلزله بحرانی می باشند. همچنین استفاده از تبدیل موجک پیوسته ی موج زلزله های اصلی و زلزله های حاصل از تحریکات بحرانی به صورت زمان-فرکانس نشان می دهد که زمان غالب فرکانس ها (زمانی که بیشتر فرکانس ها در آن زمان رخ می دهند) برای تمامی زلزله ها بیشتر از ده ثانیه است. در نهایت محاسبه ی مدت زمان حرکت قوی زلزله ها نشان می دهد که با وجود اینکه برخی از زلزله های اولیه دارای مدت زمان حرکت قوی کمتر از ۱۰ ثانیه می باشند، مدت زمان حرکت قوی زمین در زلزله های بحرانی تولیدی بیشتر از ۱۰ ثانیه می باشد و بنابراین

و محاسبه ی مقادیر انرژی، بیشینه شتاب ( ${}^2\text{PGA}$ )، بیشینه سرعت ( ${}^3\text{PGV}$ )، و طیف دامنه ی فوریه ی فوقانی ( ${}^4\text{UBFS}$ )  $M_2(\omega)$  تمامی زمین لرزه های انتخابی، مقادیر بیشینه انرژی و شتاب آن ها به ترتیب تحت عناوین  $E$  و  $M_1$  در نظر گرفته می شوند. جهت تعریف قیود طیف دامنه ی فوریه ی فوقانی زمین لرزه های انتخابی به گونه ای که شدت اریاس<sup>۵</sup> برابر با واحد را داشته باشند مقیاس می شوند [۲۸]. اگر تعداد زمین لرزه های انتخابی برابر با  $N_f$  باشد و زمین لرزه های مقیاس شده با شدت اریاس واحد را با  $\{\ddot{v}_{gi}(t)\}_{i=1}^{N_f}$  نمایش دهیم، قیود  $M_2(\omega)$  نیز به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$M_2(\omega) = E \max_{1 \leq i \leq N_f} |\bar{v}_{gi}(\omega)| \quad (2)$$

به گونه ای که  $\{\bar{v}_{gi}(\omega)\}_{i=1}^{N_f}$  انتقال فوریه ی  $\{\ddot{v}_{gi}(t)\}_{i=1}^{N_f}$  را نشان می دهد [۹].

همان گونه که پیش تر بیان شد، در این مقاله، قدر مطلق جابجایی بام سازه به عنوان تابع هدف در نظر گرفته می شود که می بایستی بیشینه شود. بدین منظور، با استفاده از انجام تحلیل تاریخچه زمانی خطی برای سازه ی موردبررسی (با استفاده از روش عددی نیومارک-بتا)، در هر گام زمانی بر مبنای قیودی که با توجه به اطلاعات موجود از زمین لرزه های رخ داده در گذشته کسب می شوند، شتاب نگاشتی که بیشینه تابع هدف را تولید می نماید، به عنوان تحریک بحرانی در نظر گرفته می شود. قیود مورد استفاده در این مقاله قیودی است که توسط مصطفی و منوهار<sup>۶</sup> به صورت زیر معرفی شده اند [۹، ۲۹].

$$\left[ \int_0^{T^*} \ddot{u}_g^2(t) dt \right]^{1/2} \leq E \quad \max_{0 < t < T^*} |\ddot{u}_g(t)| \leq M_1 \quad (3)$$

$$|\ddot{U}_g(w)| \leq M_2(\omega) \quad T_{\text{SGM}} \geq 10 \text{ (sec)}$$

به گونه ای که  $T^*$  مدت زمان زلزله و  $\ddot{U}_g(w)$  انتقال فوریه ی زمین لرزه ی  $\ddot{u}_g(t)$  است. همچنین قید  $T_{\text{SGM}} \geq 10 \text{ (sec)}$  برای اولین بار در این مقاله در نظر گرفته می شود. در حقیقت مطابق آیین نامه ی ۲۸۰۰ [۳۰]، مدت زمان حرکت شدید زمین در شتاب نگاشت هایی که برای تحلیل تاریخچه زمانی استفاده می شوند

زمین لرزه های تولیدی شبیه سازی شده (زلزله های بحرانی تولید شده) می توانند مطابق آیین نامه ۲۸۰۰، در مواردی که تعداد مورد نیاز از زوج شتاب نگاشت مناسب ثبت شده در دسترس نمی باشد، در تحلیل تاریخچه زمانی سازه ها مورد استفاده قرار گیرند. بر اساس نتایج حاصله می توان نتیجه گرفت که در تمامی زلزله ها و زلزله های بحرانی، زمان حرکت قوی زلزله و زمان غالب فرکانسی تقریباً در یک بازه ی زمانی رخ می دهند.

## ۲- تحریک بحرانی برای سیستم چند درجه آزادی

در این قسمت از مقاله، روش تعیین زلزله ی بحرانی تشریح می شود. بدین منظور، شتاب حرکت زمین به صورت حاصل ضرب سری فوریه و یک تابع پوش ( $e(t) = A_0(e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t})$ ،  $\alpha_2 > \alpha_1$ ) به صورت زیر بیان می شود:

$$\ddot{u}_g(t) = A_0(e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}) \sum_{i=1}^{N_f} R_i \cos(\omega_i t - \phi_i) \quad (1)$$

به گونه ای که ضرایب  $R_i$  و  $\phi_i$  ضرایب مجهول دامنه و زاویه ی فاز می باشند و  $\omega_i$   $i = 1, 2, \dots, N_f$  فرکانس هایی می باشند که محتوای فرکانسی حرکت زمین را نمایش داده و بر اساس تحقیقات گذشته مقادیری مابین ۰/۱ تا ۲۵ هرتز را دارا می باشند [۷-۱۱] و در این مقاله نرخ رشد فرکانس ها برابر با ۰/۱ هرتز در نظر گرفته می شود. مصطفی در سال ۲۰۱۱ نشان داد که بهتر است برخی از این فرکانس ها منطبق بر فرکانس های طبیعی الاستیک سازه در نظر گرفته شوند [۸]. همچنین پارامترهای  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$  در تابع پوش تمایل نا مانایی مشاهده شده در رکورد زلزله را اعمال نموده و ضریب  $A_0$  نیز ثابت مقیاس سازی نامیده می شود [۲۷]. بنابراین در این مقاله در بازه ی زمانی ۰/۱ تا ۲۵ هرتز (فرکانس نایکوئیست<sup>۱</sup>) و با در نظر گرفتن فرکانس های مودهای اول تا سوم سازه به عنوان فرکانس های ورودی با گام زمانی ۰/۱ هرتز محدوده ی فرکانسی مورد مطالعه ایجاد می شود.

در ساخت زلزله ی بحرانی، فرض می شود که تابع پیوسته ی  $e(t)$  کاملاً تعریف شده و هدف یافتن ضرایب مجهول  $R_i$  و  $\phi_i$  است به گونه ای که بیشینه مقدار تابع هدف (جابجایی بام سازه) تحت قیود مورد نظر در تمامی گام های زمانی حاصل شود. جهت تعریف مقادیر قیود، با در نظر گرفتن تعدادی زلزله منطبق با شرایط ساختگاه

1 Nyquist Frequency

2 Peak Ground Acceleration  
3 Peak Ground Velocity  
4 Upper Bound Fourier Spectrum  
5 Arias Intensity  
6 Manohar

### ۳- تحلیل فوریه و تئوری موجک پیوسته<sup>۲</sup>

#### ۳-۱- تحلیل فوریه

تحلیل فوریه سیگنال‌های ورودی را به سینوس‌ها و کسینوس‌های تشکیل‌دهنده‌ی فرکانس‌های مختلف تجزیه می‌نماید. برای بسیاری از سیگنال‌ها تجزیه‌ی فوریه بسیار مفید است، چون سیگنال با محتوای فرکانسی اهمیت زیادی دارد. شاید بزرگ‌ترین نقص تجزیه‌ی فوریه، از دست دادن اطلاعات زمانی است. به همین دلیل می‌بایستی از روش‌های دیگری مانند تحلیل موجک استفاده شود. در تبدیل موجک، پارامترهایی به نام مقیاس و انتقال وجود دارند. به وسیله‌ی پارامتر مقیاس می‌توان موج را فشرده و یا باز نمود. در حقیقت به وسیله‌ی مقیاس می‌توان موج را فشرده و جزئیات موج را نشان داد و به وسیله‌ی مقیاس زیاد می‌توان موج را باز نمود. در تئوری موجک، مقیاس زیاد متنظر با فرکانس پایین است و اطلاعات کلی موج را نشان می‌دهد و در طول مدت موج ادامه دارد، در حالی که مقیاس کم متنظر با فرکانس بالا است و جزئیات موج را نشان می‌دهد و در طول مدت موج ادامه ندارد. در جایی که اطلاعات فرکانس پایین دقیق‌تری مورد نیاز است، تجزیه و تحلیل موجک اجازه‌ی استفاده از فواصل زمانی طولانی را می‌دهد. همچنین زمانی که اطلاعات فرکانس بالا مورد نیاز است، به وسیله‌ی تبدیل موجک می‌توان نواحی کوتاه‌تر را رصد نمود. در تحلیل فوریه، یک سیگنال به امواج سینوسی و کسینوسی مختلفی تقسیم می‌شود، به‌طور مشابه در تحلیل موجک، یک سیگنال به سیگنال‌های مقیاس شده از موجک اصلی مادر تجزیه می‌شود [۱۵]. تبدیل فوریه ابزاری است که از توابع  $\sin$  و  $\cos$  به‌عنوان توابع پایه برای استخراج طیف فرکانسی امواج ورودی استفاده می‌کند، و توسط فرمول زیر تعریف می‌شود:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{j\omega t} dt, \quad \omega = 2\pi f \quad (5)$$

#### ۳-۲- تبدیل موجک پیوسته

تبدیل موجک پیوسته، مشابه تبدیل فوریه توسط فرمول زیر بیان می‌شود [۳۴-۳۶]:

$$X_{WT}(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\psi^*\left(\frac{t-\tau}{s}\right) dt \quad (6)$$

می‌بایستی بیشینه مقدار ۱۰ ثانیه یا سه برابر زمان تناوب اصلی سازه در نظر گرفته شود. همچنین روش تحریک بحرانی به‌کاررفته در این مقاله به علت محاسبه‌ی زلزله‌ی بحرانی بر اساس خصوصیات سازه و قیود در نظر گرفته‌شده، نسبت به روش‌های دیگر [۱، ۴، ۵] از ارجحیت برخوردار است زیرا که در این روش زلزله‌ی بحرانی مستقیماً بر اساس خصوصیات سازه و همچنین قیود در نظر گرفته‌شده محاسبه می‌شود در حالی که در روش‌های قبلی، تابع چگالی طیفی توان<sup>۱</sup> بر اساس قیود در نظر گرفته‌شده برای سازه و زلزله در فضای فرکانس محاسبه می‌شود که جهت انجام تحلیل تاریخچه زمانی نیاز به برگرداندن تابع چگالی طیفی توان از فضای فرکانس به فضای زمان و تولید شتاب نگاشت را دارد. از روش ارائه‌شده در این مقاله، می‌توان جهت تولید زلزله‌ی مصنوعی مطابق با ساختگاه مورد بررسی جهت آنالیز و طراحی سازه‌های بااهمیت در مواردی که تعداد مورد نیاز زوج شتاب نگاشت مناسب ثبت‌شده در دسترس نمی‌باشد، استفاده نمود.

مسئله‌ی مورد بررسی، مسئله‌ی بهینه‌سازی تحت قیود غیرخطی است که با استفاده از روش برنامه‌نویسی مرتبه‌ی دوم متعاقبی<sup>۲</sup> [۳۱] و الگوریتم بهینه‌سازی مرتبه‌ی دوم در برنامه‌ی متلب [۳۲] انجام می‌شود. همچنین در محاسبات عددی، جهت بررسی بهینه‌ی محلی یا بهینه‌ی کلی بودن نقاط محاسباتی، نقاط شروع متعددی برای ضرایب مجهول  $R_i$  و  $\phi_i$  در ناحیه‌ی ممکن انتخاب می‌شود و بیشینه‌ی پاسخ در نظر گرفته می‌شود [۳۳]. جهت بررسی همگرایی نیز روابط زیر در هر گام زمانی کنترل می‌شوند:

$$\left|f_j - f_{j-1}\right| \leq \varepsilon_1; \quad \left|y_{i,j} - y_{i,j-1}\right| \leq \varepsilon_2 \quad (4)$$

به‌گونه‌ای که  $f_j$  مقدار تابع هدف در  $i$  امین تکرار و  $y_{i,j}$  امین مقدار بهینه برای ضرایب مجهول  $R_i$  و  $\phi_i$  در  $i$  امین تکرار است. مقادیر  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  نیز مقادیر کوچکی می‌باشند که از پیش به‌عنوان معیار همگرایی در نظر گرفته می‌شوند. در این مقاله برای این مقادیر، عدد  $10^{-3}$  به‌عنوان مقدار کمی مناسبی جهت نرخ همگرایی در نظر گرفته می‌شود.

1 Power Spectral Density Function  
2 Sequential Quadratic Programming

سازه ها استفاده نمود که دارای خصوصیات زیر باشند:

۱- این شتاب نگاشت ها حتی الامکان بایستی نمایانگر حرکت واقعی زمین در محل احداث بنا در هنگام زلزله باشند که جهت نیل به این هدف مطابق پیشنهاد آیین نامه می بایستی حداقل سه زوج شتاب نگاشت متعلق به مؤلفه های افقی سه زلزله ی مختلف ثبت شده با ویژگی های زیر انتخاب شوند. لازم به ذکر است که در انتخاب زلزله های اولیه جهت تولید زلزله ی بحرانی، مطابق جدول ۱، ۱۸ زلزله انتخاب شده که از تعداد حداقل ضابطه ی آیین نامه ی ۲۸۰۰ به مراتب بیشتر است. مطابق آیین نامه ی ۲۸۰۰، شرایط انتخاب زلزله ها به صورت زیر می باشد:

الف) شتاب نگاشت ها متعلق به زلزله هایی باشند که شرایط طرح را ارضا کنند و در آن ها بزرگا، فاصله از گسل، سازوکار چشمه لرزا در نظر گرفته شده باشد. مطابق جدول ۱، مقدار کمیت Epic Dist تقریباً برای تمامی زلزله ها کمتر از ۳۰ کیلومتر بوده، بزرگای همگی نیز بیشتر از ۵ ریشتر بوده و همگی در خاک آبرفتی رخ داده اند و بنابراین دارای سازوکار تقریباً مشابهی می باشند.

ب) ساختگاه های شتاب نگاشت ها بایستی به لحاظ ویژگی های زمین شناسی، تکتونیکی، لرزه شناسی و بخصوص مشخصات لایه های خاک با زمین محل ساختمان، تا حد امکان، مشابهت داشته باشند. در انتخاب زلزله های اولیه مطابق جدول ۱، مشخص است که زلزله ها در خاک آبرفتی رخ داده اند و خصوصیات یکسانی از نظر خاک منطقه دارند. می بایستی توجه داشت که در تولید زلزله های بحرانی با توجه به این که اثر اندرکنش خاک و سازه در این تحقیق در نظر گرفته نشده است و همچنین زلزله ها در زیر پای سازه به سازه اعمال شده و تولید می شوند، مشخصات لایه های خاک ساختگاه، ویژگی های زمین شناسی و تکتونیکی در نظر گرفته نمی شود.

پ) مدت زمان حرکت شدید زمین در شتاب نگاشت ها حداقل برابر با ۱۰ ثانیه یا سه برابر زمان تناوب اصلی سازه، هر کدام که بیشتر است، باشد. در رابطه با محاسبه ی مدت زمان حرکت شدید شتاب نگاشت ها مطابق پیشنهاد آیین نامه ی ۲۸۰۰ می توان از روش های معتبر همانند روش توزیع تجمعی انرژی استفاده نمود و در مواردی که تعداد مورد نیاز از زوج شتاب نگاشت های مناسب ثبت شده در دسترس نباشد، می توان از زوج شتاب نگاشت شبیه سازی شده مناسب برای تکمیل تعداد آن ها استفاده نمود. این بند از آیین نامه نیز دقیقاً در انتخاب زلزله های اولیه رعایت شده است و تمامی زلزله های اولیه دارای مدت زمان حرکت قوی

به گونه ای که در آن  $X_{WT}(\tau, S)$  تابعی از پارامتر تبدیل  $\tau$  و پارامتر مقیاس  $S$  است. موجک مادر نیز توسط پارامتر  $1/\nu$  نشان داده می شود و \* بیانگر مزدوج مختلط استفاده شده در تبدیل موجک است. در این نوع تبدیل پارامترهای مقیاس و انتقال به صورت پیوسته تغییر می کنند [۳۷]. در حقیقت میزان تغییرات بسیار کوچک است، که سبب بالا رفتن حجم محاسبات می شود [۱۵].

#### ۴- مثال عددی

در این قسمت از مقاله، مجموعه ی ۱۸ شتاب نگاشت که از سایت COSMOS قابل دسترسی است [۳۸]، بر اساس طبقه بندی چاندلرز<sup>۱</sup> [۱۱، ۱۰] و مطابق با آیین نامه ی ۲۸۰۰ انتخاب و در جدول ۱ نمایش داده می شوند. انتخاب زمین لرزه ها بر این اساس است که تمامی طبقه بندی چاندلرز را پوشش دهد. در حقیقت مطابق طبقه بندی چاندلرز، زمین لرزه ها بر اساس نسبت بیشینه شتاب به بیشینه سرعت حرکت زمین مطابق رابطه ی (۷) به سه دسته تقسیم بندی می شوند. در این طبقه بندی، زلزله هایی که نسبت بیشینه شتاب به بیشینه سرعت بیشتر از  $1/2$  (g.sec/m) را دارا می باشند، برای سازه های سخت تر که دارای زمان تناوب کوچک تری هستند، بحرانی تر می باشند در حالی که زلزله هایی که نسبت بیشینه شتاب به بیشینه سرعت کمتر از  $0/8$  (g.sec/m) را دارا می باشند، برای سازه های با سختی کم که زمان تناوب بیشتری دارند، بحرانی تر هستند. از طرف دیگر، زلزله هایی که نسبت بیشینه شتاب به بیشینه سرعت مابین  $0/8$  تا  $1/2$  (g.sec/m) را دارا می باشند، دارای محتوای انرژی بالایی در محدوده ی وسیعی از فرکانس ها هستند. همچنین در زلزله هایی که نسبت بیشینه شتاب به بیشینه سرعت بیشتر از  $1/2$  (g.sec/m) می باشد، دامنه و فرکانس نوسانی بالایی مشاهده می شود. در نهایت برای زلزله های با بیشینه شتاب به بیشینه سرعت کمتر از  $0/8$  (g.sec/m)، بیشینه پاسخ سازه در پالس های شتاب با مدت زمان طولانی<sup>۲</sup> ایجاد می شود. با توجه به توضیحات فوق و جدول ۱ مشخص است جهت پوشش دادن تمامی خصوصیات ذکر شده در تولید زلزله ی بحرانی، هر سه ناحیه طبقه بندی چاندلرز در نظر گرفته می شود. همچنین مطابق بند ۲-۵-۳ آیین نامه ی ۲۸۰۰ [۳۰] شتاب نگاشت هایی را می توان در تحلیل دینامیکی

1 Chandler's Classification

2 Long-duration acceleration pulses

جدول ۱. اطلاعات زلزله های انتخابی ثبت شده در خاک آبرفتی [۱۱]  
 Table 1. Information on selected earthquakes recorded in alluvial soil [11]

Earthquake date	Magnitude	Epic.	Comp.	PGA (m/s <sup>2</sup> )	(PGA/PGV) (g.sec/m)	Energy* (m / s <sup>1.5</sup> )	Site
		Dist. (Km)					
Coalinga (05.02.1983)	۶/۵	۳۰/۱	۳۶۰	۲/۸۲	۱/۱۱	۲/۶۹	Cantua Greek
			۲۷۰	۲/۱۹	۰/۸۶	۲/۱۶	
Imperial Valley (10.15.1979)	۶/۶	۱۵/۴	S45W	۲/۶۸	۱/۲۴	۲/۳۱	Calexico
			N45W	۱/۹۸	۱/۰۶	۲/۱۶	
Loma Prieta (10.18.1989)	۷/۰	۹/۷	۹۰	۳/۹۱	۱/۲۹	۳/۸۵	Capitola
			۰	۴/۶۳	۱/۳۱	۵/۲۳	
Mammoth Lakes (05.25.1980)	۶/۲	۱/۵	۹۰	۴/۰۲	۱/۸۶	۳/۷۳	Convict Greek
			۱۸۰	۳/۹۲	۱/۷۴	۴/۰۲	
Morgan Hill (04.24.1984)	۶/۱	۴/۵	۲۴۰	۳/۰۶	۰/۷۸	۲/۳۳	Halls Valley
			۱۵۰	۱/۵۳	۱/۲۰	۱/۶۵	
Northridge (01.17.1994)	۶/۷	۵/۹	S16W	۳/۸۱	۰/۶۵	۴/۱۹	Canoga Park
			S74E	۳/۴۳	۱/۰۳	۳/۵۲	
Parkfield (12.20.1994)	۵/۰	۹/۱	۹۰	۲/۸۹	۲/۹۵	۱/۳۳	Parkfield fault
			۳۶۰	۳/۸۰	۴/۳	۱/۷۴	
San Fernando (02.09.1971)	۶/۶	۲۷/۶	N21E	۳/۰۹	۱/۸۵	۲/۰۸	Castaic Old Ridge
			N69W	۲/۶۵	۰/۹۶	۲/۴۸	
Westmorland (04.26.1981)	۵/۰	۶/۶	۱۸۰	۴/۶۶	۱/۳۲	۳/۴۴	Westmorland fire
			۹۰	۳/۷۷	۰/۸۷	۳/۳۰	

همچنین مقادیر انرژی محاسبه شده در جدول ۱، بر اساس رابطه ی (۸) که توسط اریاس در سال ۱۹۷۰ معرفی شد، محاسبه شده اند [۱۱].

$$E = \left[ \int_0^{\infty} \dot{v}_g^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

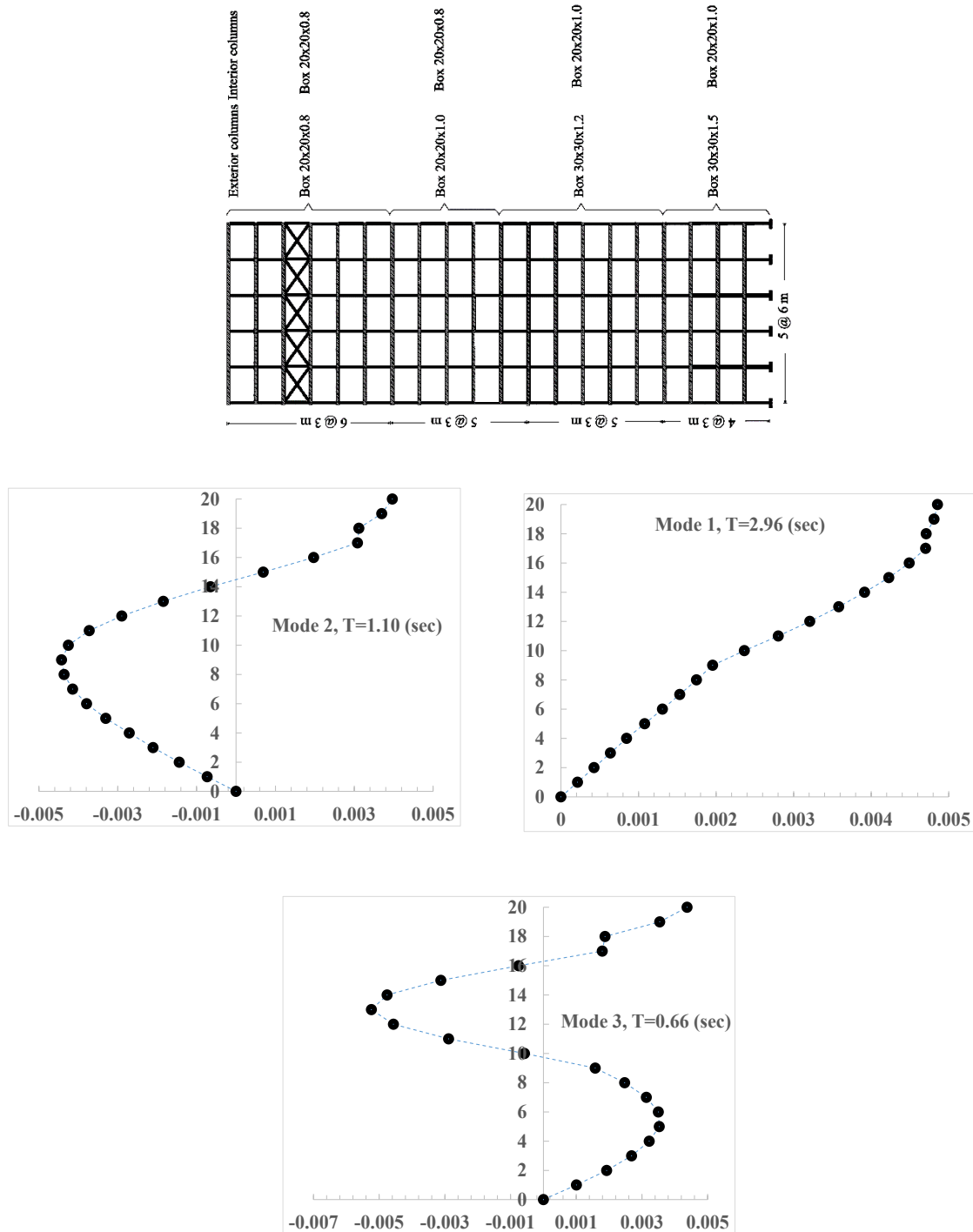
همچنین حد فوقانی طیف فوریه ی زلزله های انتخابی نیز مطابق رابطه ی (۲) محاسبه می شود.

قاب برشی بیست طبقه ای که در شکل ۱-الف نمایش داده شده است، مطابق مرجع [۱۱] انتخاب می شود. قاب برشی در طبقه ی ۱۸ خود توسط کمر بند خرابایی (سیستم کنترل غیرفعال) مقاوم سازی شده و همانند مرجع [۱۱] با استفاده از سیستم کنترل فعال بهسازی شده است. بنابراین همانند مرجع [۱۱] فرض می شود که سازه تحت باز زلزله در ناحیه ی خطی باقی مانده و رفتار الاستیک خطی از خود

بیشتر از ده ثانیه می باشند.

بر اساس مطالب بیان شده، مقادیر انرژی و بیشینه شتاب زلزله ها محاسبه و قیود E و M<sub>1</sub> محاسبه می شوند. مطابق جدول ۱ این مقادیر به ترتیب برابر با ۵/۲۳ (m/sec<sup>1.5</sup>) و ۴/۶۶ (m/sec<sup>2</sup>) در نظر گرفته می شوند. می بایستی توجه داشت که با تغییر زلزله های انتخابی به گونه ای که منجر به تغییر قیود انتخابی شود، متعاقباً زلزله های بحرانی تولید شده نیز تغییر خواهند کرد.

$$\begin{aligned} \frac{PGA}{PGV} < 0.8 \left( \frac{g \cdot sec}{m} \right) & \quad \text{low} \\ 0.8 \left( \frac{g \cdot sec}{m} \right) < \frac{PGA}{PGV} < 1.2 \left( \frac{g \cdot sec}{m} \right) & \quad \text{Normal} \quad (9) \\ 1.2 \left( \frac{g \cdot sec}{m} \right) < \frac{PGA}{PGV} & \quad \text{High} \end{aligned}$$



شکل ۱. الف. قاب برشی بیست طبقه ی مجهز شده به مهار بازویی در طبقه هجدهم [۱۱]. ب. سه مود اول ارتعاشی قاب برشی بیست طبقه  
**Fig. 1. A) A twenty-story shear building equipped with a belt truss system located on the eighteenth story [11]. B) The first three shape modes of the twenty-story shear building**

با  $19.91 \times 10^{10} (N/m^2)$  و  $76977.1 (N/m^3)$  در نظر گرفته می شود. مقدار نسبت میرایی تمامی مودها نیز برابر با ۰/۰۵ در نظر گرفته می شود. زمان تناوب سه مود اول ارتعاشی سازه ی مورد مطالعه به ترتیب برابر با  $۲/۹۶ (sec)$ ،  $۱/۱ (sec)$  و  $۰/۶۶ (sec)$  می باشد. شکل

نشان می دهد. ابعاد ستون ها و نمای قاب مورد مطالعه در شکل ۱-الف نمایش داده شده است. تمامی بادبندها دارای سطح مقطع برابر با ۰/۰۴۰ مترمربع می باشند و تمامی تیرها نیز دارای مقطع IPE400 می باشند. مدول یانگ و وزن مخصوص مصالح به ترتیب برابر

جدول ۲. حالات قیودی در نظر گرفته شده

Table 2. The considered constraint scenarios

حالت قیودی	قیدهای در نظر گرفته شده
اول	انرژی، مدت زمان حرکت قوی زلزله و بیشینه شتاب
دوم	انرژی، بیشینه شتاب، مدت زمان حرکت قوی زلزله و حد فوقانی طیف فوریه

جدول ۳. اطلاعات شتاب نگاشت های بحرانی برای حالات متفاوت قیدی

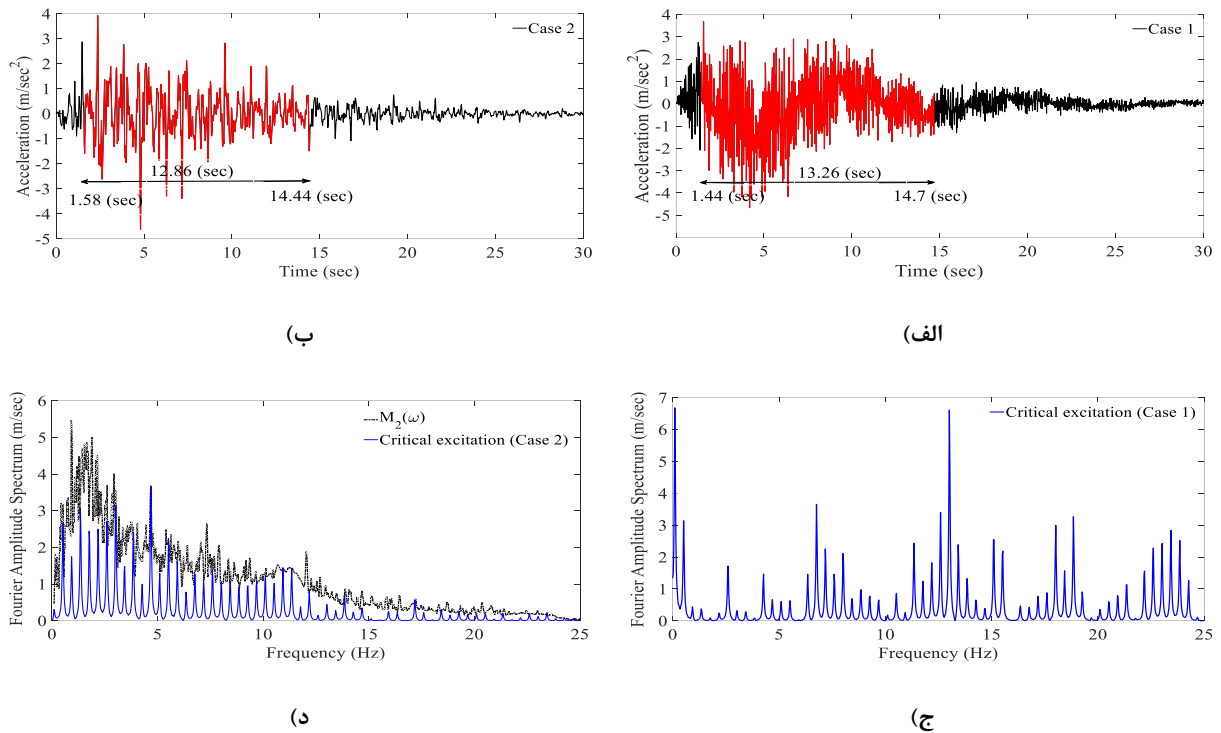
Table 3. Information on critical earthquakes for different constraint scenarios

حالت قیودی	شدت اریاس (m/sec <sup>1.5</sup> )	بیشینه شتاب (m/sec <sup>2</sup> )	بیشینه جابجایی بام (m)
اول	۵/۱۷	۴/۶۶	۰/۵۵
دوم	۳/۴۸	۴/۶۲	۰/۱۹
Coalinga 360	۲/۶۹	۲/۸۲	۰/۲۵
Coalinga 270	۲/۱۶	۲/۱۹	۰/۲۵
Imperial Valley S45W	۲/۳۱	۲/۶۸	۰/۱۶
Imperial Valley N45W	۲/۱۶	۱/۹۸	۰/۱۶
Loma Prieta 90	۳/۸۵	۳/۹۱	۰/۱۵
Loma Prieta 0	۵/۲۳	۴/۶۳	۰/۲۲
Mammoth Lakes 90	۳/۷۳	۴/۰۲	۰/۱۵
Mammoth Lakes 180	۴/۰۲	۳/۹۲	۰/۲۳
Morgan Hill 240	۲/۳۳	۳/۰۶	۰/۱۳
Morgan Hill 150	۱/۶۵	۱/۵۳	۰/۰۷
Northridge S16W	۴/۱۹	۳/۸۱	۰/۴۵
Northridge S74E	۳/۵۲	۳/۴۳	۰/۳۱
Parkfield 90	۱/۳۳	۲/۸۹	۰/۰۱
Parkfield 360	۱/۷۴	۳/۸۰	۰/۰۱
San Fernando N21E	۲/۰۸	۳/۰۹	۰/۰۷
San Fernando N69W	۲/۴۸	۲/۶۵	۰/۱۰
Westmorland 180	۳/۴۴	۴/۶۶	۰/۲۴
Westmorland 90	۳/۳۰	۳/۷۷	۰/۱۹

نظر گرفته می شود که برای هر حالت در مثال عددی زلزله ی بحرانی محاسبه می شود. تعداد جملات ( $N_f$ ) جهت همگرایی رابطه ی (۱) و تابع هدف برابر با  $N_f = 60$  در نظر گرفته می شود. با توجه به مطالب فوق، برای حالات مختلف قیدی مطابق با جدول ۲، زلزله های بحرانی محاسبه و در جدول ۳ و شکل ۲ خصوصیات آن ها ارائه می شود.

مودهای ارتعاشی سه مود اول سازه ی قاب برشی نیز در شکل ۱-ب نشان داده شده است. به منظور تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی، در این مقاله مقدار  $\Delta t$  برابر با ۰/۰۱ ثانیه و ضرایب  $\alpha_1$  و نیز به ترتیب برابر با ۰/۱۳ و ۰/۵ در نظر گرفته می شوند. مدت زمان زلزله های بحرانی نیز برابر با ۳۰ ثانیه فرض می شود. در مثال حاضر دو حالت قیدی مطابق جدول ۲ در





شکل ۲. زلزله های بحرانی محاسبه شده در حالات مختلف قیدی (الف) نمودار تاریخچه زمانی زلزله ی بحرانی حالت اول (ب) نمودار تاریخچه زمانی زلزله ی بحرانی حالت دوم به همراه قید  $M_2(\omega)$  بحرانی حالت دوم (ج) طیف فوریه ی زلزله ی بحرانی حالت اول (د) طیف فوریه ی زلزله ی بحرانی حالت دوم به همراه قید  $M_2(\omega)$

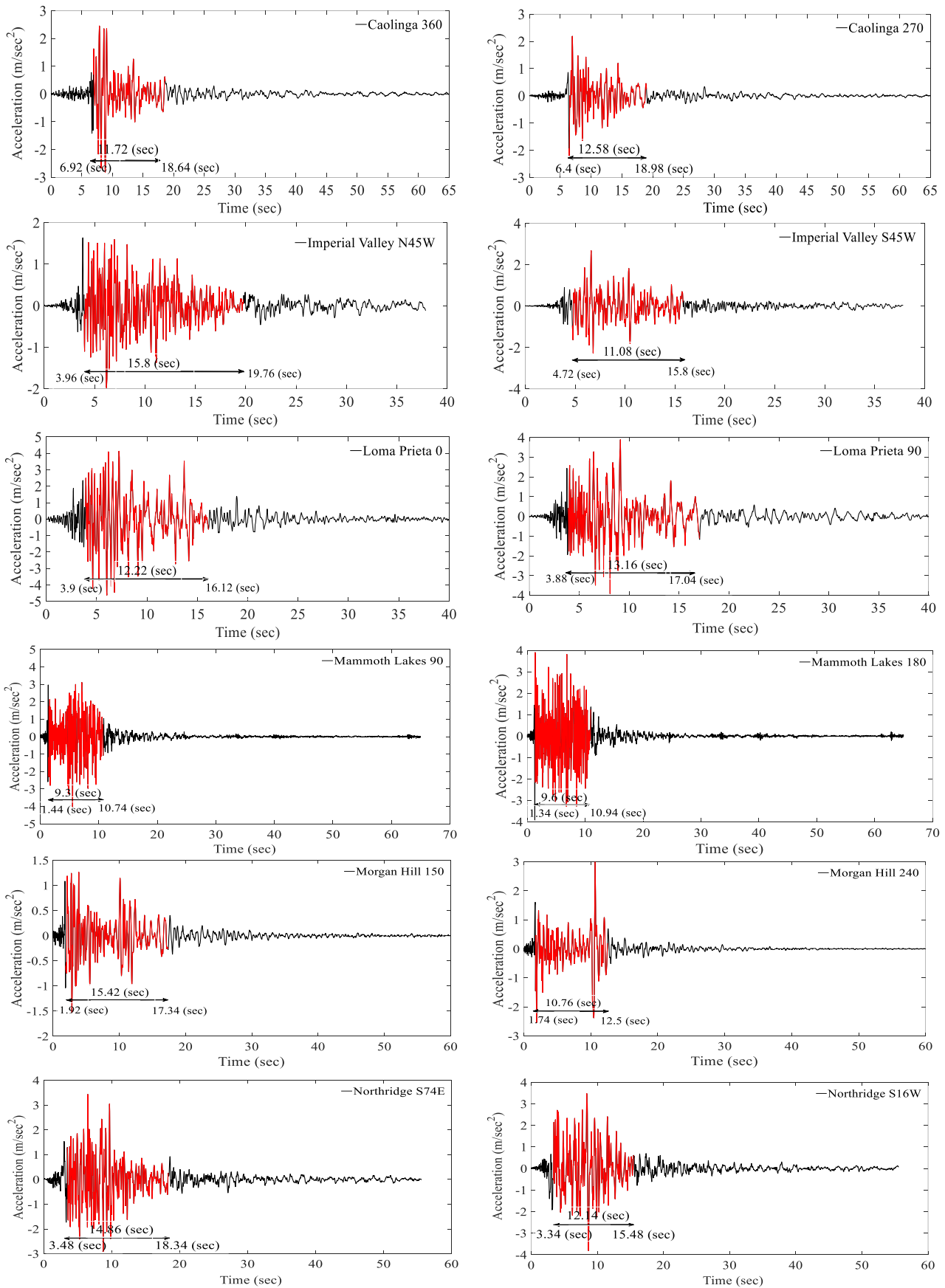
**Fig. 2. The critical earthquakes for different constraint scenarios A) Time history acceleration of critical earthquake for the first scenario B) Time history acceleration of critical earthquake for the second scenario C) Fourier spectrum of the critical earthquake for the first scenario d) Fourier Spectrum of the critical earthquake for the second scenario**

است به گونه ای که به عنوان مثال مقدار بیشینه جابجایی بام تحت زلزله های بحرانی حالت اول و دوم به ترتیب ۵/۵ و ۱/۹ برابر بیشینه جابجایی بام تحت زلزله ی سانفرانندو مؤلفه ی N69W می باشد. این امر نشان می دهد که زلزله ی بحرانی حالت دوم نیز توانسته است بیشینه جابجایی بام به مراتب بیشتر را نسبت به برخی از زلزله های اولیه تولید نماید. به عنوان مثال مقدار بیشینه جابجایی بام تحت زلزله های بحرانی اول و دوم به ترتیب ۵/۵ و ۱/۹ برابر بیشینه جابجایی بام تحت زلزله ی سانفرانندو مؤلفه ی N69W است و این نشان می دهد که در هر دو حالت زلزله ی بحرانی تولید شده است.

مطابق روش تریفیوناک و بردی<sup>[۳۹]</sup>، مدت زمان حرکت قوی زلزله ها در شکل ۳ با یکدیگر مقایسه و در جدول ۴ نشان داده شده است.

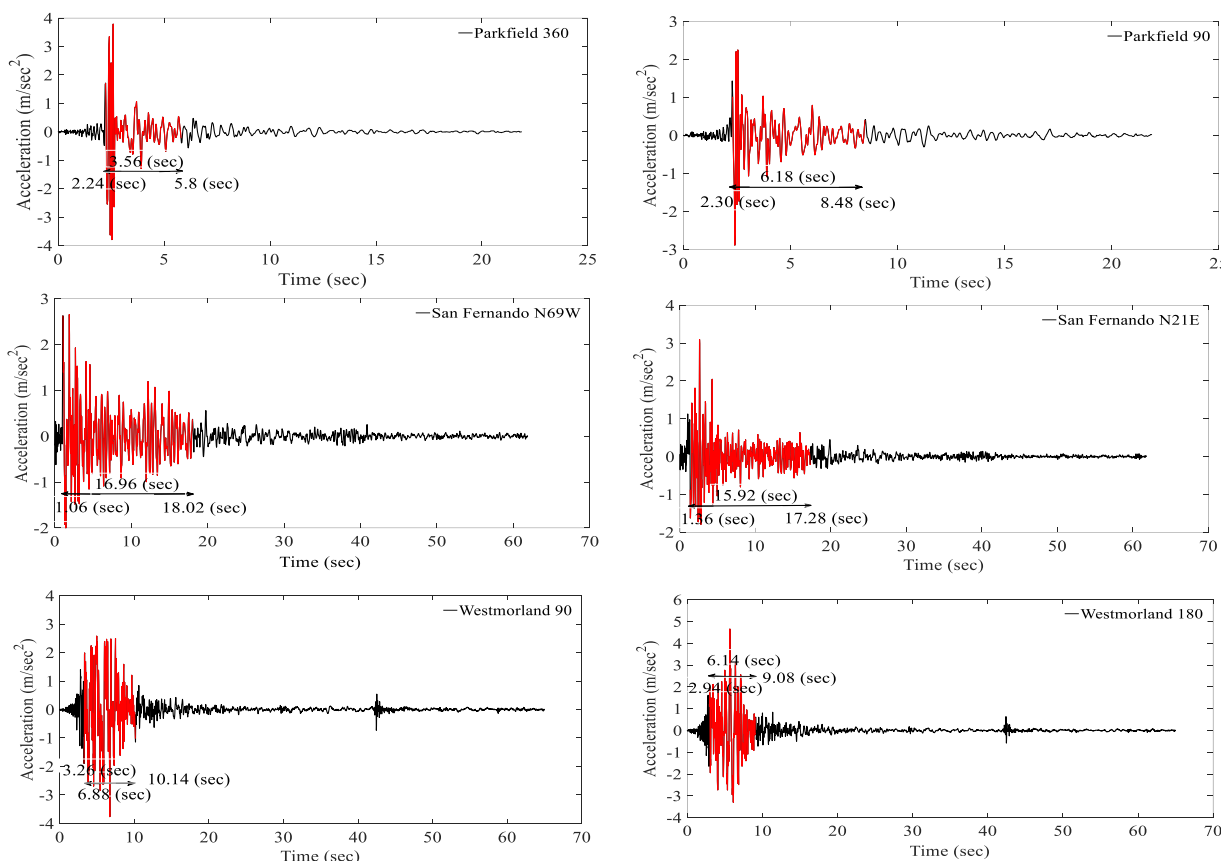
همچنین مطابق جدول ۴ و اشکال ۲ و ۳ مشخص است که باینکه برخی از زلزله های اولیه (به عنوان مثال Mammoth lakes, Parkfield

همان گونه که از نتایج موجود در جدول ۳ مشخص است، مقادیر بیشینه جابجایی بام سازه ی کنترل شده صرفاً با استفاده از مهاربند بازویی و کمربند خرپایی، در حالت قیدی اول بیشترین مقدار را دارا است. این امر بدین علت است که برای حالت قیدی اول، هیچ گونه قیدی برای محدوده ی طیف دامنه ی فوریه در نظر گرفته نشده است و همانند شکل ۲-ج، در فرکانسی نزدیک به فرکانس طبیعی الاستیک سازه ( $f=0.34$  Hz)، مقدار حداکثر در دامنه ی طیف فوریه رخ می دهد و سبب ایجاد زمین لرزه ای بحرانی تر شده است در حالی که به ازای حالت قیدی دوم، به دلیل وجود داشتن قیدی برای طیف دامنه ی فوریه، امکان تمرکز محتوای فرکانسی در یک فرکانس خاص وجود نداشته است. در فرکانس ۰/۳۴ هرگز مقدار طیف فوریه ی زلزله ی بحرانی اول  $6/68$  (m/sec) می باشد که نسبت به مقدار متناظر در زلزله ی بحرانی حالت دوم به طور قابل ملاحظه ای بیشتر است. در نهایت بایستی توجه داشت که زلزله ی بحرانی حالت دوم نیز زلزله ای بحرانی بوده و نسبت به اکثر زلزله های اولیه (مطابق جدول ۳) تابع هدف را بیشینه نموده



شکل ۳. مدت زمان حرکت قوی زلزله های موردبررسی مطابق روش تریفوناک و بردی

Fig. 3. Strong ground motion duration of earthquakes computed by Trifunac and Brady method



ادامه شکل ۳. مدت زمان حرکت قوی زلزله های مورد بررسی مطابق روش تریفوناک و بردی

Continued Fig. 3. Strong ground motion duration of earthquakes computed by Trifunac and Brady method

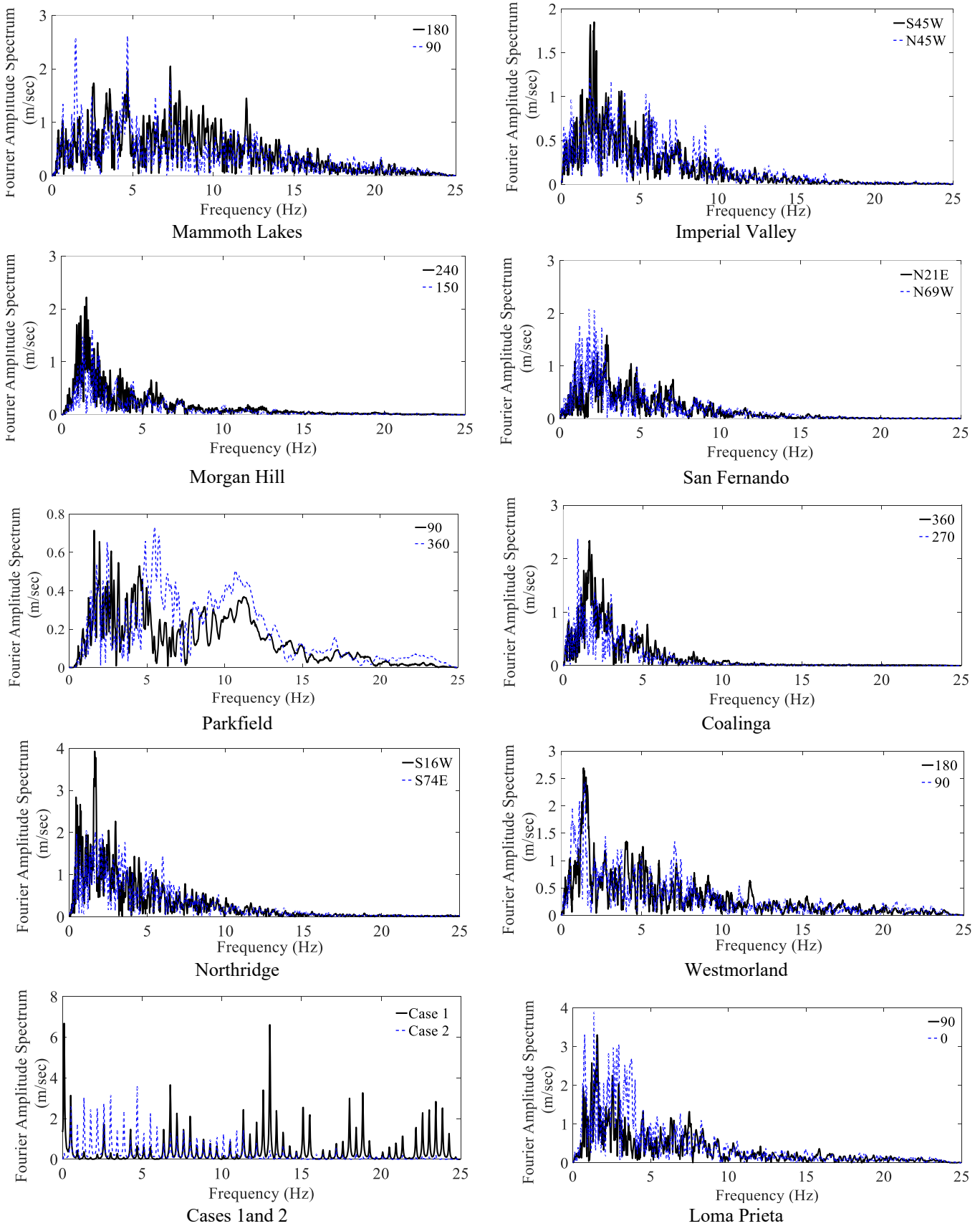
قیدی بر روی محتوای فرکانسی، مقدار طیف فوریه اش در فرکانسی نزدیک به فرکانس اصلی مود اول سازه ( $f=0.34$  Hz) بیشینه شده و سبب تولید زلزله ای بحرانی تر شده است. در فرکانس  $0.34$  هرتر مقدار طیف فوریه ی زلزله ی بحرانی اول  $6/68$  (m/sec) می باشد که نسبت به بیشینه مقدار متناظر در سایر زلزله ها  $6/68$  برابر است. می بایستی در نظر داشت که به علت وجود قید  $|\ddot{U}_g(w)| \leq M_2(w)$  برای زلزله ی بحرانی دوم (Case 2) و همچنین با توجه به رابطه ی (۲) و شکل ۲ هیچ گاه طیف فوریه ی زلزله ی بحرانی نمی تواند در هیچ فرکانسی از مقدار مربوطه در زلزله های مورد مطالعه بیشتر باشد. همچنین با توجه به اشکال ۴ می توان نتیجه گرفت که زلزله ی بحرانی اول برخلاف زلزله های مورد مطالعه، در بازه ی فرکانسی ۰ تا ۲۵ هرتر دارای طیف فوریه ی قابل ملاحظه ای بوده در صورتی که در سایر زلزله ها مقدار طیف فوریه در بازه ی فرکانسی ۰ تا ۲۵ هرتر در قیاس با زلزله ی بحرانی اول کم می باشد. در حقیقت در تمامی زلزله های اصلی و همچنین زلزله ی بحرانی اول حالت دوم در بازه ی فرکانسی ۲۰ تا

و Westmorland) دارای مدت زمان حرکت قوی کمتر از ۱۰ ثانیه هستند، اما مطابق با قید  $T_{SGM} \geq 10$  (sec) و همچنین مطابق با آیین نامه ی ۲۸۰۰ [۳۰]، مدت زمان حرکت شدید زمین در زلزله های بحرانی تولیدی بیشتر از ۱۰ ثانیه می باشد. بنابراین مطابق آیین نامه ی ۲۸۰۰، در مواردی که تعداد مورد نیاز از زوج شتاب نگاشت مناسب ثبت شده در دسترس نمی باشد، می توان از زلزله های شبیه سازی شده (به عنوان مثال زلزله های بحرانی تولید شده) جهت تکمیل داده ها استفاده نمود.

### ۵- بررسی طیف فوریه ی زلزله ی بحرانی

در این قسمت، طیف فوریه ی زلزله های اصلی به همراه زلزله های بحرانی در اشکال ۴ ترسیم می شوند.

همان گونه که از اشکال ۴ برداشت می شود، مطابق قید  $|\ddot{U}_g(w)| \leq M_2(w)$  تعریف شده در رابطه ی ۳ و شکل ۲، مشخص است که زلزله ی بحرانی اول (Case 1) به دلیل نداشتن چنین



شکل ۴. مقایسه ی طیف فوریه ی زلزله های جدول ۱ در مقابل زلزله های بحرانی

Fig. 4. A comparison between the frequency spectrum of earthquakes listed in Table 1 and critical earthquakes

جدول ۴. مقایسه ی زمان حرکت قوی و زمان غالب فرکانسی زلزله های انتخابی و زلزله ی بحرانی

Table 4. A comparison between the values of strong ground motion and time of dominant frequency for selected and critical earthquakes

نام زلزله	مؤلفه	جنبش نیرومند زمین			زمان غالب فرکانسها		
		شروع (sec)	پایان (sec)	مدت زمان (sec)	شروع (sec)	پایان (sec)	مدت زمان (sec)
Case 1	-	۱/۴۴	۱۴/۷۰	۱۳/۲۶	۰/۵۸	۱۴/۰۴	۱۳/۴۶
Case 2	-	۱/۵۸	۱۴/۴۴	۱۲/۸۶	۰/۴۶	۱۴/۸۲	۱۴/۳۶
Mammoth Lakes	۱۸۰	۱/۳۴	۱۰/۹۴	۹/۶۰	۰/۹۲	۱۲/۷۲	۱۱/۸۰
	۹۰	۱/۴۴	۱۰/۷۴	۹/۳۰	۱/۰۰	۱۲/۴۸	۱۱/۴۸
Morgan Hill	۲۴۰	۱/۷۴	۱۲/۵۰	۱۰/۷۶	۱/۰۲	۱۳/۳۰	۱۲/۲۸
	۱۵۰	۱/۹۲	۱۷/۳۴	۱۵/۴۲	۱/۳۴	۱۸/۵۶	۱۷/۲۲
San Fernando	N21E	۱/۳۶	۱۷/۲۸	۱۵/۹۲	۱/۱۹	۱۶/۴۶	۱۵/۲۷
	N69W	۱/۰۶	۱۸/۰۲	۱۶/۹۶	۰/۵۴	۱۸/۲۰	۱۷/۶۶
Parkfield	۹۰	۲/۳۰	۸/۴۸	۶/۱۸	۱/۷۶	۱۱/۷۶	۱۰/۰۰
	۳۶۰	۲/۲۴	۵/۸	۳/۵۶	۲/۰۴	۵/۸۶	۳/۸۲
Caolinga	۳۶۰	۶/۹۲	۱۸/۶۴	۱۱/۷۲	۶/۰۸	۱۹/۳۲	۱۳/۲۴
	۲۷۰	۶/۴	۱۸/۹۸	۱۲/۵۸	۵/۳۸	۱۹/۴۸	۱۴/۱۰
Northridge	S16W	۳/۳۴	۱۵/۴۸	۱۲/۱۴	۲/۵۰	۱۵/۶۸	۱۳/۱۸
	S74E	۳/۴۸	۱۸/۳۴	۱۴/۸۶	۲/۵۸	۱۸/۶۸	۱۶/۱۰
Westmorland	۱۸۰	۲/۹۴	۹/۰۸	۶/۱۴	۲/۳۲	۸/۲۸	۵/۹۶
	۹۰	۳/۲۶	۱۰/۱۴	۶/۸۸	۳/۲۰	۱۱/۵۲	۸/۳۲
Loma Prieta	۰	۳/۹۰	۱۶/۱۲	۱۲/۲۲	۲/۷۸	۱۷/۴۴	۱۴/۶۶
	۹۰	۳/۸۸	۱۷/۰۴	۱۳/۱۶	۲/۵۶	۱۷/۸۰	۱۵/۲۴

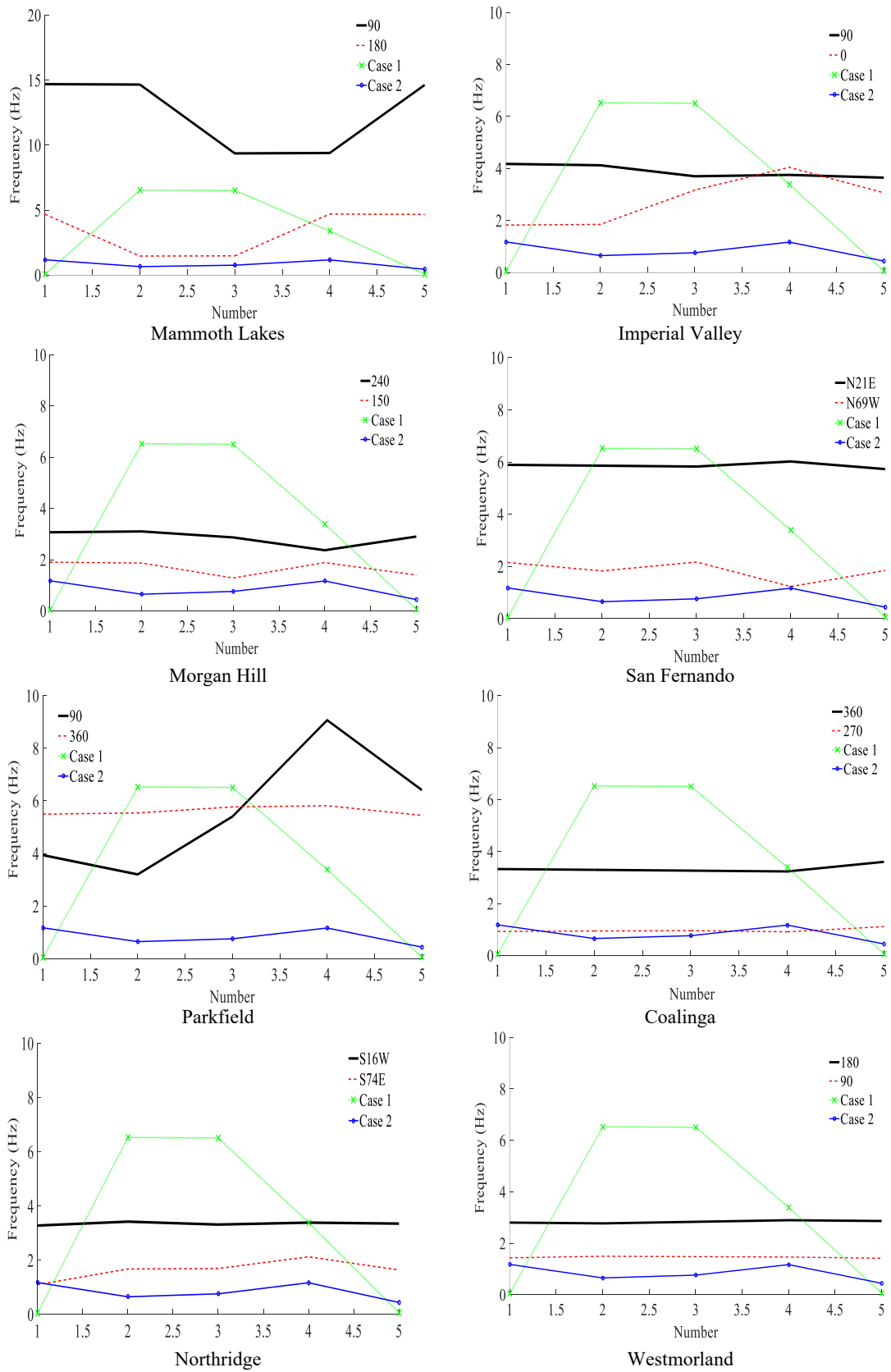
و ۳/۳۸۸ هرتز) از مقادیر مربوطه به تحریک بحرانی حالت دوم (۰/۶۵۰۹، ۰/۷۵۹۳ و ۱/۱۶۸ هرتز) بیشتر است. همچنین نتایج نشان می دهند که همیشه مقادیر پنج فرکانس اول تحریک بحرانی حالت اول از مقادیر مربوطه برای زلزله های انتخابی بیشتر نبوده و بالعکس، همیشه مقادیر پنج فرکانس اول تحریک بحرانی حالت دوم از مقادیر مربوطه برای زلزله های انتخابی کمتر نمی باشند. در حقیقت تنها مقدار فرکانس دوم زلزله ی بحرانی اول (۶/۵۲۵ هرتز) از مقدار مربوطه در تمامی زلزله ها بیشتر می باشد در حالی که بیشترین مقادیر فرکانس در سایر فرکانس ها مربوط به مؤلفه ی ۹۰ زلزله ی Mammoth Lakes است. باین حال با توجه به جدول ۳ مشخص است که زلزله ی بحرانی حالت اول بیشینه مقدار تابع هدف را ایجاد کرده است. در رابطه با مؤلفه ی N69W زلزله ی San Fernando که میزان

۲۵ هرتز مقدار طیف فوریه تقریباً صفر می باشد در حالی که در زلزله ی بحرانی حالت اول، مقدار طیف فوریه در این بازه تا مقدار ۳ (m/sec) افزایش داشته است.

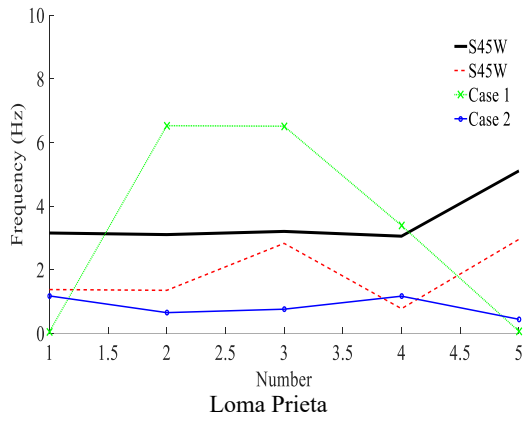
#### ۶- بررسی پنج فرکانس اول طیف فوریه

در این قسمت، پنج فرکانس اول زلزله های جدول ۱ و زلزله های بحرانی محاسبه و در اشکال ۵ با یکدیگر مقایسه می شوند. در تمامی اشکال ۵، برای زلزله ی بحرانی حالت اول (Case 1)، مقدار فرکانس اول زلزله ۰/۰۵۰۰۷ هرتز می باشد و چون در مقابل دیگر اعداد بسیار کوچک است، در نمودارها نزدیک به صفر دیده می شود.

با توجه به اشکال ۵ مشخص است که در تحریک بحرانی حالت اول مقادیر فرکانس های دوم، سوم و چهارم (۶/۵۲۵، ۶/۵۰۹

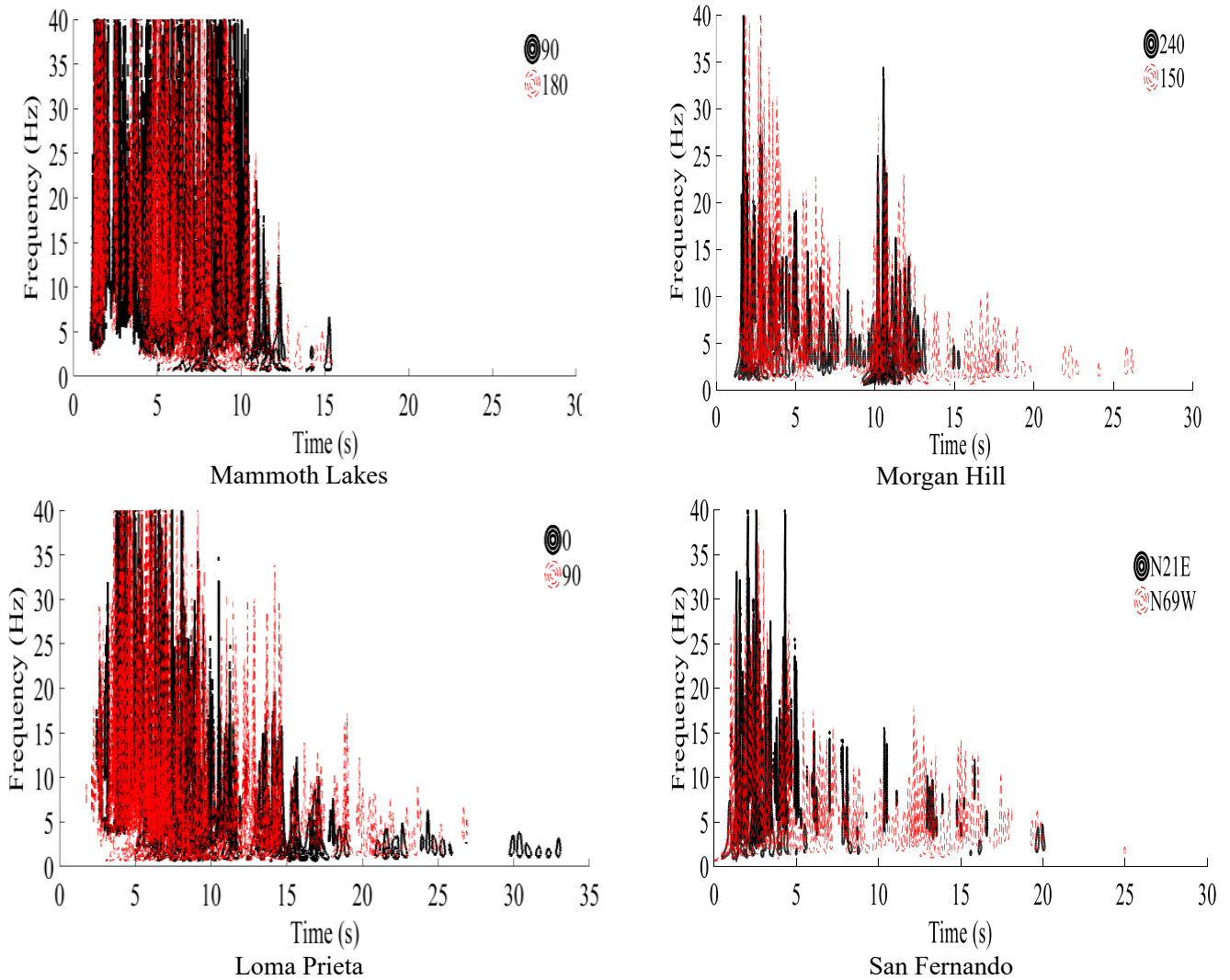


شکل ۵. مقایسه ی پنج فرکانس اول طیف فوریه ی زلزله های جدول ۱ در مقابل زلزله های بحرانی



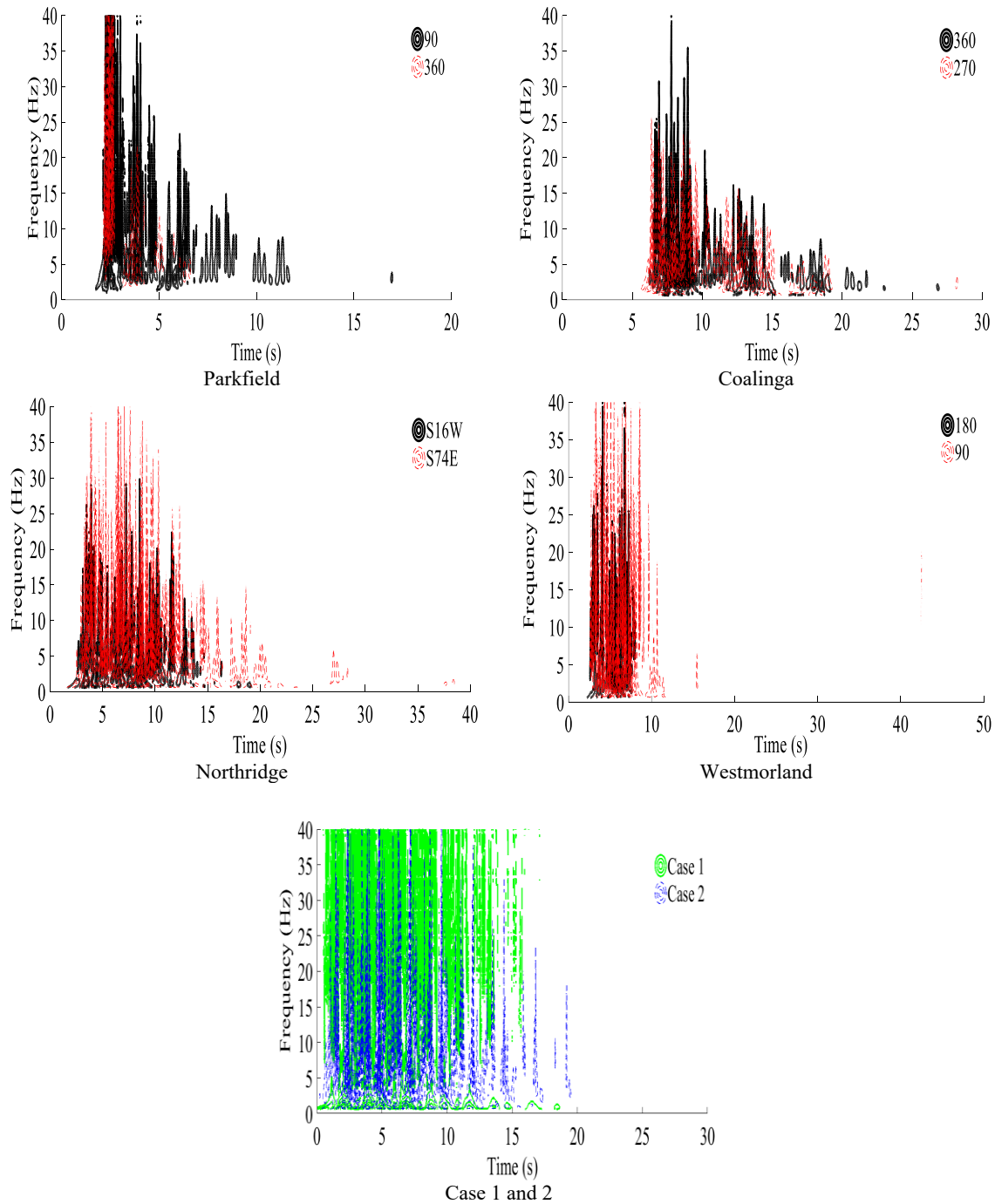
ادامه شکل ۵. مقایسه ی پنج فرکانس اول طیف فوریه ی زلزله های جدول ۱ در مقابل زلزله های بحرانی

Continued Fig. 5. A comparison between the first five frequencies of the frequency spectrum for the earthquakes listed in Table 1 and critical earthquakes



شکل ۶. مقایسه ی زمان فرکانس زلزله های جدول ۱ در مقابل زلزله های بحرانی

Fig. 6. A comparison between the time-frequency curve of earthquakes listed in Table 1 and critical earthquakes



ادامه شکل ۶. مقایسه ی زمان فرکانس زلزله های جدول ۱ در مقابل زلزله های بحرانی

می رسد بیشینه یا کمینه بودن مقدار پنج فرکانس اول زلزله تأثیری در بحرانی بودن زلزله ندارد زیرا که با وجود بیشینه یا کمینه نبودن مقادیر پنج فرکانس اول زلزله های بحرانی اول و دوم نسبت به سایر زلزله ها، این دو زلزله بحرانی می باشند.

بیشینه جابجایی بام آن ۰/۱۸ مقدار مربوطه تحت زلزله ی بحرانی حالت اول و ۰/۵۳ برابر مقدار مربوطه تحت زلزله ی بحرانی حالت دوم می باشد، مقادیر پنج فرکانس اول زلزله (۲/۱۶۸، ۱/۸۲۸، ۲/۱۵۲، ۲/۱۶۸ و ۱/۱۶۸ هرتز) می باشند. این امر نشان می دهد که به نظر



## ۷- بررسی زمان - فرکانس

به فرکانس طبیعی الاستیک سازه ( $f=0.34$  Hz)، مقدار حداکثر در دامنه ی طیف فوریه رخ می دهد و سبب ایجاد زمین لرزه ای بحرانی تر شده است درحالی که به ازای حالت قیدی دوم، به دلیل وجود داشتن قیدی برای طیف دامنه ی فوریه، زلزله ی بحرانی تولیدی تابع هدف کمتری را ایجاد نموده است. درنهایت بایستی توجه داشت که زلزله ی بحرانی حالت دوم نیز زلزله ای بحرانی بوده و نسبت به اکثر زلزله های اولیه تابع هدف را بیشینه نموده است به گونه ای که به عنوان مثال مقدار بیشینه جابجایی بام تحت زلزله های بحرانی حالت اول و دوم به ترتیب  $5/5$  و  $1/9$  برابر بیشینه جابجایی بام تحت زلزله ی سانفرانسیسکو مؤلفه ی N69W می باشد. این امر نشان می دهد که زلزله ی بحرانی حالت دوم نیز توانسته است بیشینه جابجایی بام به مراتب بیشتر را نسبت به برخی از زلزله های اولیه تولید نماید ضمن اینکه برای هر دو حالت زلزله ی بحرانی، مدت زمان حرکت قوی زلزله بیشتر از ده ثانیه بوده است. درنهایت با استفاده از روش تبدیل فوریه، زلزله های انتخابی به همراه تحریکات بحرانی محاسبه شده تا پنج فرکانس اول با یکدیگر مقایسه می شوند. نتایج مثال عددی ارائه شده نشان می دهد که طیف فوریه ی زلزله ی بحرانی حالت اول در فرکانسی نزدیک به فرکانس مود اول سازه از تمامی مقادیر مربوطه در زلزله های مورد مطالعه بیشتر است. بر اساس نتایج مشخص است که در تحریک بحرانی حالت اول مقادیر فرکانس های دوم، سوم و چهارم ( $6/525$ ،  $6/509$  و  $3/388$  هرتز) از مقادیر مربوطه در تحریک بحرانی حالت دوم ( $0/6509$ ،  $0/7593$  و  $1/168$  هرتز) بیشتر است. همچنین نتایج نشان می دهند که همیشه مقادیر پنج فرکانس اول تحریک بحرانی حالت اول از مقادیر مربوطه برای زلزله های انتخابی کمتر نمی باشند. در حقیقت تنها مقدار فرکانس دوم زلزله ی بحرانی اول ( $6/525$  هرتز) از مقدار مربوطه در تمامی زلزله ها بیشتر می باشد درحالی که بیشترین مقادیر فرکانس در سایر فرکانس ها مربوط به مؤلفه ی ۹۰ زلزله ی Mammoth Lakes است. باین حال با توجه به جدول ۳ مشخص است که زلزله ی بحرانی حالت اول بیشینه مقدار تابع هدف را ایجاد کرده است. در رابطه با مؤلفه ی N69W زلزله ی San Fernando که میزان بیشینه جابجایی بام آن  $0/18$  مقدار مربوطه تحت زلزله ی بحرانی حالت اول و  $0/53$  برابر مقدار مربوطه تحت زلزله ی بحرانی حالت دوم می باشد، مقادیر پنج فرکانس اول زلزله به ترتیب

در ادامه منحنی زمان- فرکانس زلزله های مختلف جدول ۱ و زلزله های بحرانی با یکدیگر در اشکال ۶ مقایسه می شوند. لازم به ذکر است که در ترسیم اشکال ۶ از تابع Bior1 در تبدیل موجک پیوسته استفاده شده است. همچنین با توجه به اشکال ۶ مشخص است که تقریباً مدت زمان وقوع فرکانس های غالب در تمامی زلزله ها بیشتر از ده ثانیه می باشد. مقدار زمان غالب فرکانسی زلزله های مورد مطالعه با توجه به اشکال ۶ در جدول ۴ نشان داده شده است. با توجه به اشکال ۳ و ۶ و همچنین جدول ۴ می توان نتیجه گرفت که در تمامی زلزله ها و زلزله های بحرانی، زمان حرکت قوی زلزله و زمان غالب فرکانسی تقریباً در یک بازه ی زمانی رخ می دهند. در حقیقت مدت زمان حرکت قوی زلزله که با استفاده از روش تریفیوناک و بردی محاسبه شده است، برای تمامی زلزله های مورد مطالعه در بازه ی زمانی زمان غالب فرکانسی رخ می دهد. همچنین مشخص است که تقریباً تمامی زلزله ها در هر دو مؤلفه ی افقی شان، به ازای یک بازه ی زمانی یکسانی توزیع محتوای فرکانسی را دارا می باشند.

## ۸- نتیجه گیری

در این مقاله، به ازای دو حالت قیدی مختلف، شتاب نگاشت های بحرانی برای قاب برشی بیست طبقه با رفتار خطی محاسبه می شوند. در حالت قیدی اول، قیود انرژی و بیشینه شتاب در نظر گرفته می شوند درحالی که به ازای حالت قیدی دوم، قید حد فوقانی طیف فوریه نیز به این قیود اضافه شده و به ترتیب منجر به تولید زلزله های بحرانی حالت اول و دوم می شوند. با توجه به نتایج به دست آمده مشخص شد که اعمال قیود مربوط به حدود فوقانی طیف دامنه ی فوریه سبب کاهش میزان جابجایی بام سازه (تابع هدف) به میزان  $65/45$  درصد می شود اما همچنان این قید توانسته است مقدار تابع هدف را نسبت به اکثر زلزله های انتخابی بیشینه نماید. همچنین در میان حالاتی که برای قیود در نظر گرفته شده است، قید حالت اول بیشترین جابجایی را ایجاد نموده و سبب ایجاد زمین لرزه ای بحرانی تر شده است، درحالی که قید حالت دوم جابجایی کمتری را ایجاد می نماید. این امر بدین علت است که برای حالت قیدی اول، هیچ گونه قیدی برای محدوده ی طیف دامنه ی فوریه در نظر گرفته نشده است و در فرکانسی نزدیک

- [3] R. Kamgar, R. Rahgozar, Critical excitation method for determining the best location of belt truss system in tall buildings, *Iranian Journal of Structural Engineering*, 4(2) (2018) 76-88.
- [4] I. Takewaki, A new method for non-stationary random critical excitation, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30(4) (2001) 519-535.
- [5] I. Takewaki, Nonstationary random critical excitation for acceleration response, *Journal of Engineering Mechanics*, 127(6) (2001) 544-556.
- [6] B. Westermo, The critical excitation and response of simple dynamic systems, *Journal of Sound and Vibration*, 100(2) (1985) 233-242.
- [7] A. Moustafa, Critical earthquake load inputs for multi-degree-of-freedom inelastic structures, *Journal of Sound and Vibration*, 325(3) (2009) 532-544.
- [8] A. Moustafa, Damage-based design earthquake loads for single-degree-of-freedom inelastic structures, *Journal of Structural Engineering*, 137(3) (2011) 456-467.
- [9] A.M. Abbas, Critical seismic load inputs for simple inelastic structures, *Journal of Sound and Vibration*, 296(4-5) (2006) 949-967.
- [10] R. Kamgar, R. Rahgozar, Determination of critical excitation in seismic analysis of structures, *Earthquakes and Structures*, 9(4) (2015) 875-891.
- [11] R. Kamgar, S. Shojaee, R. Rahgozar, Rehabilitation of tall buildings by active control system subjected to critical seismic excitation, *Asian Journal of Civil Engineering*, 16(6) (2015) 819-833.
- [12] R. Kamgar, P. Samea, M. Khatibinia, Optimizing parameters of tuned mass damper subjected to critical earthquake, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 27(7) (2018) e1460.
- [13] M. Khatibinia, H. Gholami, R. Kamgar, Optimal design of tuned mass dampers subjected to continuous stationary critical excitation, *International Journal of Dynamics and Control*, 6(3) (2018) 1094-1104.
- [14] A. Haar, Zur Theorie der orthogonalen Funktionssysteme, Inaugural-Dissertation. Von Alfred

برابر با ۲/۱۵۲، ۱/۸۲۸، ۲/۱۶۸، ۱/۱۶۸ و ۱/۸۴۵ هرگز می باشند. این امر نشان می دهد که به نظر می رسد بیشینه یا کمینه بودن مقدار پنج فرکانس اول زلزله تأثیری در بحرانی بودن زلزله ندارد زیرا که با وجود بیشینه یا کمینه نبودن مقادیر پنج فرکانس اول زلزله های بحرانی اول و دوم، این دو زلزله نسبت به سایر زلزله ها بحرانی می باشند. مطابق نتایج به دست آمده مشخص است که با وجود اینکه برخی از زلزله های اولیه (به عنوان مثال Mammoth lakes، Parkfield و Westmorland) دارای مدت زمان حرکت قوی کمتر از ۱۰ ثانیه می باشند، مطابق با قید  $T_{SGM} \geq 10$  (sec) و همچنین مطابق با آیین نامه ی ۲۸۰۰، مدت زمان حرکت قوی زمین در زلزله های بحرانی محاسبه شده بیشتر از ۱۰ ثانیه می باشد و بنابراین مطابق آیین نامه ۲۸۰۰، در مواردی که تعداد مورد نیاز از زوج شتاب نگاشت مناسب ثبت شده در دسترس نمی باشد، با توجه به شرایط ساختگاه می توان از زلزله های شبیه سازی شده (به عنوان مثال زلزله های بحرانی تولید شده) جهت تکمیل داده ها استفاده نمود. ضمن اینکه چون در این تحقیق اثرات بزرگای زلزله، فاصله از گسل، خصوصیات چشمه لرزا و ... در تولید زلزله ی بحرانی در نظر گرفته نشده است، پیشنهاد می شود که زلزله های اولیه منطبق با شرایط ساختگاه از نظر بزرگا، چشمه لرزا، شرایط تکتونیکی، مشخصات لایه های خاک و ... انتخاب شوند. همچنین نتایج نشان می دهد که برای تولید زلزله ی بحرانی تر می توان قید حالت اول را استفاده نمود. براساس نتایج بدست آمده با استفاده از تبدیل موجک پیوسته و همچنین روش تریفیوناک و بردی، مشخص است که در تمامی زلزله ها و زلزله های بحرانی، زمان حرکت قوی زلزله و زمان غالب فرکانسی تقریباً در یک بازه ی زمانی رخ می دهند. در حقیقت مدت زمان حرکت قوی زلزله که با استفاده از روش تریفیوناک و بردی محاسبه شده است، برای تمامی زلزله های مورد مطالعه در بازه ی زمانی مربوط به زمان غالب فرکانسی است. همچنین مشخص است که برای تمامی زلزله های مورد مطالعه، تقریباً زمان غالب فرکانس ها بیشتر از ده ثانیه می باشد.

## منابع و مراجع

- [1] I. Takewaki, Seismic critical excitation method for robust design: A review, *Journal of Structural Engineering*, 128(5) (2002) 665-672.
- [2] R.S. Stein, *Earthquake Conversations*, Scientific American, 288(1) (2003) 72-79.

- Mathematical Modelling, 35(2) (2011) 915-929.
- [25] E. Salajegheh, S. Gholizadeh, P. Torkzadeh, Optimal design of structures with frequency constraints using wavelet back propagation neural, *Asian Journal of Civil Engineering*, 8(1) (2007) 97-111.
- [26] S. Seyedpoor, J. Salajegheh, E. Salajegheh, S. Gholizadeh, Optimum shape design of arch dams for earthquake loading using a fuzzy inference system and wavelet neural networks, *Engineering Optimization*, 41(5) (2009) 473-493.
- [27] M. Shinozuka, Y. Sata, Simulation of nonstationary random process, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 93(1) (1967) 11-40.
- [28] A. Arias, *Measure of earthquake intensity: seismic design for nuclear power plants*, Cambridge, MA, 1970.
- [29] A. Abbas, C. Manohar, Critical spatially-varying earthquake load models for extended structures, *Journal of Structural Engineering*, 29(1) (2002) 39-52.
- [30] S.N. 2800, Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, 4rd edition, in, *Building and Housing Research Center Tehran, Iran*, 2014.
- [31] J.S. Arora, *Introduction to Optimum Design*, Elsevier, Academic Press, USA, 2012.
- [32] T. Coleman, M.A. Branch, A. Grace, *Optimization Toolbox For Use with MATLAB*, The MathWorks, Inc., USA, 1999.
- [33] I. Takewaki, A. Moustafa, K. Fujita, *Improving the Earthquake Resilience of Buildings: The Worst Case Approach*, Springer London, 2013.
- [34] S. Addison Paul, *The illustrated wavelet transform handbook: introductory theory and applications in science, engineering, medicine and finance*, Institute of Physics Publishing, 2002.
- [35] R. Polikar, *The Wavelet Tutorial*-<http://users.rowan.edu/~polikar/WAVELETS/WTpart1.html>, (1999).
- [36] M. Schneiders, v.d. Molengraft, M. Steinbuch, *Wavelets in control engineering*, Technische Universiteit Eindhoven, 2001.
- [37] O. Rioul, P. Duhamel, Fast algorithms for discrete and Haar, *Druck von Dieterich*, 1909.
- [15] M. Misiti, Y. Misiti, G. Oppenheim, J. Poggi, *Wavelet Toolbox: Computation, Visualization, Programming User's Guide*, Ver, 1.
- [16] A. Heidari, J. Raeisi, R. Kamgar, Application of wavelet theory in determining of strong ground motion parameters, *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, 8 (2018) 103-115.
- [17] A. Heidari, J. Raeisi, R. Kamgar, The application of wavelet theory with denoising to estimate the parameters of earthquake, *Scientia Iranica, International Journal of Science & Technology*, (2019).
- [18] A. Kaveh, V. Mahdavi, Modification of ground motions using wavelet transform and VPS algorithm, *Earthquakes and Structures*, 12(4) (2017) 389-395.
- [19] A. Kaveh, V. Mahdavi, Generation of endurance time acceleration functions using the wavelet transform, *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, 2(2) (2012) 203-219.
- [20] A. Kaveh, V. Mahdavi, A new method for modification of ground motions using wavelet transform and enhanced colliding bodies optimization, *Applied Soft Computing*, 47 (2016) 357-369.
- [21] M. Najafzadeh, M. Zeinolabedini, Derivation of optimal equations for prediction of sewage sludge quantity using wavelet conjunction models: an environmental assessment, *Environmental Science and Pollution Research*, 25(23) (2018) 22931-22943.
- [22] M. Zeinolabedini, M. Najafzadeh, Comparative study of different wavelet-based neural network models to predict sewage sludge quantity in wastewater treatment plant, *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(3) (2019) 1-25.
- [23] S. Gholizadeh, E. Salajegheh, P. Torkzadeh, Structural optimization with frequency constraints by genetic algorithm using wavelet radial basis function neural network, *Journal of Sound and Vibration*, 312(1-2) (2008) 316-331.
- [24] S. Gholizadeh, O. Samavati, Structural optimization by wavelet transforms and neural networks, *Applied*

[39] M.D. Trifunac, A.G.J.B.o.t.S.S.o.A. Brady, A study on the duration of strong earthquake ground motion, Bulletin of the Seismological Society of America, 65(3) (1975) 581-626.

continuous wavelet transforms, IEEE Transactions on Information Theory, 38(2) (1992) 569-586.  
[38] COSMOS, Consortium Organizations for Strong-Motion Observation Systems, in, 2009.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

R. Kamgar, N. Majidi, A. Heidari, Continuous Wavelet and Fourier Transform Methods for the Evaluation of the Properties of Critical Excitation, Amirkabir J. Civil Eng., 52(12)(2021)3125-3144.

DOI: [10.22060/ceej.2019.16575.6271](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16575.6271)

