

## به دست آوردن منحنی های طیف طراحی برای سایت سد کرخه به کمک الگوریتم نویسی روش تحلیل خطر احتمالاتی در MATLAB

محمد عرب پناهان<sup>۱\*</sup>، حمید زعفرانی<sup>۲</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی زلزله، دانشگاه تهران، [arabpanahan@alumni.ut.ac.ir](mailto:arabpanahan@alumni.ut.ac.ir)

۲- دکترای مهندسی زلزله، استادیار پژوهشگاه بین المللی زلزله و لرزه شناسی، [hamzafarani@yahoo.com](mailto:hamzafarani@yahoo.com)

### چکیده

امروزه هدف بسیاری از مهندسان زلزله حصول اطمینان از تحمل پذیری سازه ها در یک سطح عملکرد دلخواه، در مقابل تحركات قوی زمین می باشد. به منظور پیش بینی و ارزیابی این تحركات، حجم وسیعی از عدم قطعیت ها در رابطه با مکان سازه، فاصله سازه تا منبع لرزه، بزرگی زلزله ها و انواع منابع لرزه وجود دارد. با توجه به اهمیت سدها از حیث کاربردی، تبیین ریسک وقوع حوادث لرزه ای به عنوان پیشامدهای تصادفی در رخدادهای آینده ضروری می باشد. به همین منظور، سد کرخه در ایران برای تحلیل و ارزیابی خطر لرزه ای انتخاب گردیده است. در این مقاله، روش تحلیل خطر لرزه ای احتمالاتی (PSHA) برای کمی سازی عدم قطعیت ها با الگوریتم نویسی در محیط MATLAB پیاده سازی شده است. به منظور حصول پارامترهای رابطه ی رویداد، کاتالوگ لرزه ای بعد از حذف حوادث وابسته تدوین و مورد استفاده قرار گرفته است. از آنجاییکه سد کرخه توسط گسل های خطی بسیاری احاطه شده است، رابطه ی کاهندگی استفاده شده در تحلیل، شامل ملاحظات اثر زمین لرزه های حوزه ی نزدیک می باشد. بر همین اساس، طیف های طراحی یک سیستم یک درجه آزادی برای سایت مزبور در حوادث با دوره های بازگشت ۷۵، ۴۷۵، ۲۲۵ و ۲۴۷۵ ساله حاصل و ارائه گردیده است.

واژه های کلیدی: تحلیل خطر - عدم قطعیت - منبع لرزه - طیف پاسخ - سد کرخه

### ۱- مقدمه

آگاهی و اطمینان از میزان تحمل پذیری سازه ها و همچنین عملکرد آنها در مقابل زمین لرزه ها یکی از دغدغه های مهندسان و محققان می باشد. به همین منظور، لازم است که پیش بینی و ارزیابی کاملی روی اثرات جنبش های نیرومند زمین بر سازه به عمل آورد. در حین این بررسی با حجم وسیعی از عدم قطعیت ها در رابطه با مکان سازه، فاصله سازه تا منبع لرزه، بزرگی زلزله ها و انواع منابع لرزه روبرو خواهیم بود. از طرفی برای سازه های مهم در سایت های بحرانی از حیث نزدیکی به منابع لرزه نمی توان به ضوابط طرح لرزه ای آئین نامه های موجود اکتفا نمود؛ بنابراین برای سازه های با اهمیت لازم است تا تحلیل ریسک وقوع حادثه انجام بگیرد. بنابراین با توجه به اهمیت سدها از حیث کاربردی، تبیین ریسک وقوع حوادث لرزه ای به عنوان پیشامدهای تصادفی در رخدادهای آینده ضروری می باشد. به همین منظور، سد کرخه در ایران برای تحلیل و ارزیابی خطر لرزه ای انتخاب گردیده است. سد مخزنی و نیروگاه برق آبی کرخه در فاصله ۳۴ کیلومتری شمال غرب دزفول در استان خوزستان (در جنوب غربی ایران) احداث گردیده است. این پروژه در ۴۸ درجه و ۸/۷ دقیقه طول شرقی و نیز ۳۲ درجه و ۶/۲۹ دقیقه شمال در منطقه کرخه واقع شده است. رودخانه کرخه در بالادست محور سد ۹۰ درجه تغییر جهت داده و در نتیجه دریاچه سد در سمت راست محور سد واقع گردیده است.

در این مقاله، از روش تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی (PSHA) برای کمی‌سازی عدم قطعیت‌ها استفاده گردیده‌است. همچنین علیرغم وجود بسیاری از نرم‌افزارهای تحلیل خطر احتمالاتی، الگوریتم تحلیل خطر در محیط MATLAB [۱] پیاده‌سازی شده‌است. حُسن این مورد در این است که بسیاری از تأثیرات، مانند اثر زلزله‌های حوزه نزدیک می‌تواند در الگوریتم تحلیل مدنظر قرار گیرد. همچنین به منظور حصول پارامترهای رابطه‌ی رویداد، کاتالوگ لرزه‌ای بعد از حذف حوادث وابسته تدوین و مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به احاطه شدن سد کرخه توسط گسل‌های خطی بسیار، رابطه‌ی کاهندگی استفاده شده در تحلیل، شامل ملاحظات اثر زمین‌لرزه‌های حوزه‌ی نزدیک می‌باشد. درنهایت، منحنی‌های خطر لرزه‌ای به همراه طیف‌های طراحی یک سیستم یک درجه آزادی برای سایت مذکور در حوادث با دوره‌های بازگشت ۷۵، ۴۷۵، ۲۲۵ و ۲۴۷۵ ساله حاصل و ارائه گردیده‌است.

## ۲- حصول پارامترهای لرزه‌خیزی سایت براساس حوادث گذشته

### ۲-۱- جمع‌آوری حوادث پیرامون سایت:

به این منظور لازم است که بازای شعاع معینی به مرکزیت سایت سد کرخه، زمین‌لرزه‌های معاصر و تاریخی برداشت شوند. در این پروژه، زلزله‌ها به شعاع ۲۰۰ کیلومتر از سایت و از سایت پژوهشگاه بین‌المللی زلزله ایران (IIIEES) انتخاب گردیده‌اند [۲]. تعداد این حوادث از سال ۱۹۰۹ تا ۲۰۱۲/۳/۲۵ برابر با ۲۱۴۷ به دست آمد.

### ۲-۲- تبدیل بزرگ‌ها:

در تحلیل خطر و علی‌الخصوص در برآورد پارامترهای لرزه‌ای لازم است که بزرگ‌ها را به یک بزرگ‌ای مشترک تبدیل کرد. این بزرگ‌ها، همان بزرگ‌ای گشتاوری می‌باشد که ویژگی بارز آن، عدم اشباع شدن آن در زلزله‌ها با انرژی زیاد می‌باشد. از آنجاییکه در اطلاعات خام اولیه بزرگ‌ها در سه نوع  $M_b$ ،  $M_L$  و  $M_S$  (به ترتیب بزرگ‌های موج حجمی، محلی و سطحی) می‌باشد، بنابراین با بهره‌گیری از روابط اسکوردیلیس<sup>۱</sup> تبدیل بزرگ‌ها صورت می‌پذیرد [۳].

### ۲-۳- حذف حوادث وابسته:

از آنجاییکه همه‌ی حوادث برداشت شده‌ی اولیه از یکدیگر مستقل نمی‌باشند و هر حادثه دارای پیش و پس‌لرزه می‌باشد بنابراین باید به طریقی این حوادث را حذف نمود.

در این پروژه از روش پنجره‌های زمانی و مکانی نوپوف<sup>۲</sup> استفاده می‌شود [۴]. به همین منظور از نرم‌افزار ZMap [۵] برای حذف این حوادث وابسته استفاده شده‌است و پارامترهای اولیه‌ی این داده‌ها در شکل ۱ نشان داده می‌شود. در ادامه و در شکل ۲، موقعیت تصویری تمامی زلزله‌ها (پیش از حذف حوادث وابسته) به همراه سایت و همچنین موقعیت رخداد زلزله‌ی با بزرگ‌ای ماکزیمم مشخص شده‌است. همانگونه که از شکل پیداست، اکثریت حوادث در عمق زیر ۸۰ کیلومتر رخ داده‌اند. در ادامه با انتخاب نوع پنجره نوپوف، حذف حوادث وابسته صورت می‌گیرد. با این عمل تعداد ۱۲۳۳ حادثه از مجموع ۲۱۴۷ حادثه‌ی کلی، به عنوان حوادث وابسته شناخته شده‌اند که معادل ۵۷/۴۳٪ حوادث می‌باشند. ۹۱۴ حادثه نیز به عنوان حوادث مستقل شناخته شده‌اند.

<sup>1</sup> Scordilis

<sup>2</sup> Knopoff

**EQs in catalog:** 2147

**Plot Big Events with:** 7.206

**Bin Length in days:** 28

**Beginning year:** 1909.0606

**Ending year:** 2012.2309

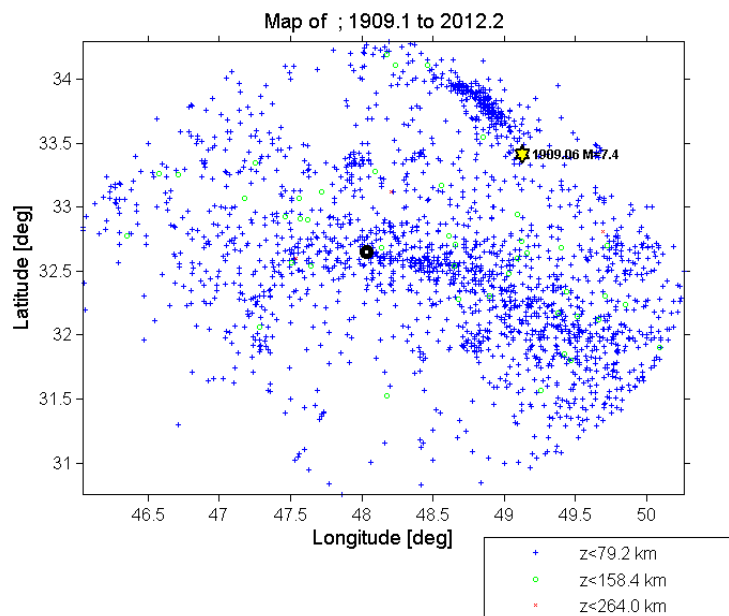
**Minimum Magnitud:** 3.0125

**Maximum Magnitud:** 7.406

**Min Depth Max Depth**  
 0 264

Info Go cancel

شکل ۱: پارامترهای اولیه داده‌ها



شکل ۲: موقعیت حوادث (معاصر)

## ۴-۲- تخمین پارامترهای لرزه‌ای

پیش از انجام آن، لازم است حدود کامل بودن را برای زلزله‌ها و دوره‌های زمانی معاصر به دست آوریم، علت در نظر گرفتن حدود کامل بودن بزرگا به شرح زیر می‌باشد:

۴-۲-الف- یکسان نبودن فاصله زمانی میان رویدادها: زمان مشاهده رخدادها با بزرگای بیشتر بزرگتر از زمان مشاهده رخدادها با بزرگای کوچکتر است. این مسئله لازم است تا در روش برآورد پارامترهای مختلف لحاظ گردد.

۴-۲-ب- عدم کامل بودن کاتالوگ در بزرگاهای مختلف: به مرور زمان امکان ثبت لرزه‌های با بزرگای کوچک نیز فراهم آمد. با توجه به این موضوع، اطلاعات لرزه‌ای در مورد زلزله‌های با بزرگای کوچک تنها در سه دهه اخیر موجود می‌باشد. بنابراین کاتالوگ زلزله به‌ازای بزرگاهای کوچک تنها در چند دهه اخیر کامل می‌باشد زلزله‌ها با بزرگای بزرگتر (موجود در کاتالوگ) از اعتبار و خاصیت کامل بودن بالاتری برخوردارند.

بر اساس موارد فوق، کاتالوگ به چند قسمت که هر کدام از آنها برای یک دوره‌ی زمانی خاص کامل (معتبر) می‌باشند تقسیم می‌شوند.

بنابراین باید دوره‌های کامل بودن و همچنین دوره‌ی تاریخی مشخص شود. ۳ دوره‌ی کامل بودن (Comp) و یک دوره‌ی تاریخی (Hist) تعریف می‌شود که در جدول زیر نشان داده می‌شود.

جدول ۱: تعریف دوره‌های کامل بودن و دوره‌ی تاریخی

دوره	از ابتدای سال:	تا انتهای سال:	حد کامل بودن بزرگا
Comp1	1900	1934	5
Comp2	1935	1980	4
Comp3	1981	2012	3
Hist	پیش از شروع قرن بیستم		

در نهایت حصول پارامترهای لرزه‌ای با استفاده از نرم‌افزار Kijko و استفاده از روش بیشینه تمایل صورت پذیرفته است.

### RESULTS

$$\beta = 1.73 \pm 0.03$$

$$\lambda = 16.84 \pm 0.59$$

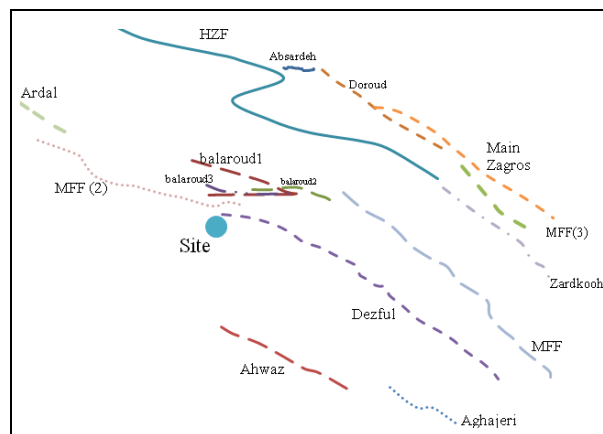
$$M_{max} = 7.52 \pm 0.50$$

در روابط فوق  $\beta$  شیب نمودار گوتنبرگ ریشتر بوده و  $\lambda$  نرخ وقوع نظیر به حداقل بزرگا می‌باشد.

### ۳- تحلیل خطر لرزه‌ای

#### ۳-۱- تعیین موقعیت گسل‌ها:

شکل ۳ نشان‌دهنده‌ی موقعیت گسل‌های پیرامونی سایت سد کرخه می‌باشند.



شکل ۳: موقعیت گسل‌های اطراف سایت

#### ۳-۲- انتخاب رابطه‌ی کاهندگی:

از جمله مهم‌ترین مراحل در آنالیز ریسک انتخاب رابطه کاهندگی می‌باشد بگونه‌ای که با شرایط ساختگاهی سازگار بوده و تا حد زیادی، پارامترهای حرکتی (PGA, PGV and PGD) زلزله را در ناحیه‌ی مورد نظر، نزدیک به میزان تجربی بدست آورد.

در این پروژه از رابطه کاهندگی، کمپیل<sup>۱</sup> و بزرگ نیا<sup>۲</sup>، ۲۰۰۳ [۶] استفاده شده است. آنها با در نظر گرفتن اثرات زلزله های حوزه ی نزدیک روابطی را برای بیشینه شتاب افقی، بیشینه سرعت، بیشینه جابجایی و شتاب طیفی، برای سازه یک درجه آزادی با میرایی ۵٪ و پریودهای بین ۰/۵ تا ۴ ثانیه ارائه نمودند.

### ۳-۳- تعیین توابع چگالی احتمال برای بزرگا (M) و مسافت (R)

با توجه به مقدار حداقل و حداکثر بزرگا که بعد از تهیه ی کاتالوگ و از نرم افزار کیجکو به دست آمد، اکنون به منظور ساده سازی روند تحلیل، حداقل این دو کران بزرگاها را به چند بازه به طول ۰/۵ ریشتر تقسیم می کنیم، با این راهکار تابع چگالی احتمال که جلوتر تعریف می شود به حالت گسسته مبدل می شود.

$$\Delta M = 0.5$$

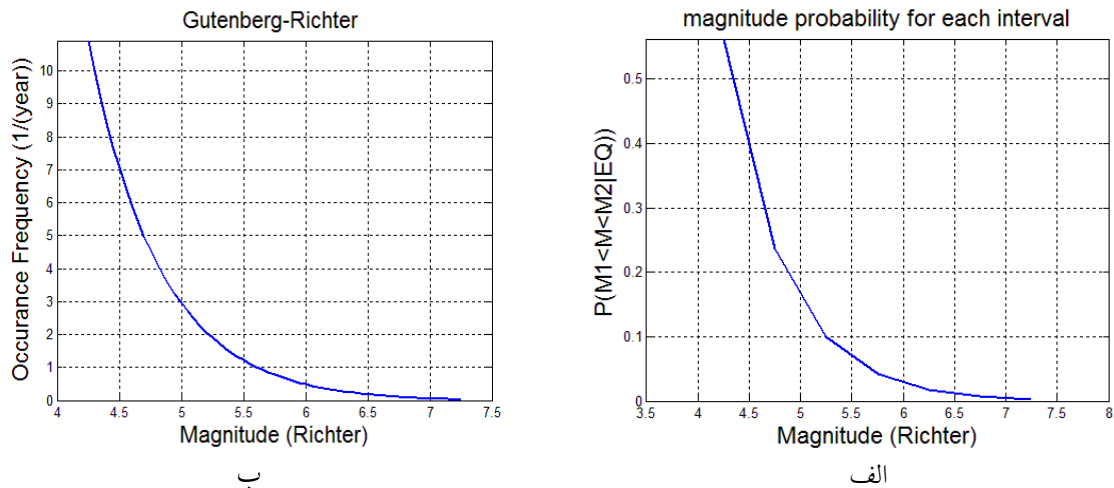
$4.0 < M < 4.5$	$M_{\text{interval}} = 4.25$
$4.5 < M < 5.0$	$M_{\text{interval}} = 4.75$
$5.0 < M < 5.5$	$M_{\text{interval}} = 5.25$
$5.5 < M < 6.0$	$M_{\text{interval}} = 5.75$
$6.0 < M < 6.5$	$M_{\text{interval}} = 6.25$
$6.5 < M < 7.0$	$M_{\text{interval}} = 6.75$
$7.0 < M < 7.5$	$M_{\text{interval}} = 7.25$

حال تابع چگالی احتمال بزرگا مطابق رابطه ی ۱ ارائه می شود.

$$f(M) = c \cdot \beta e^{-\beta(M - M_{\min})} \quad (1)$$

$$c = \frac{1}{1 - e^{-\beta(M_{\max} - M_{\min})}} \quad (2)$$

در رابطه ی فوق  $M$  بزرگا در مرکز هر دسته،  $M_{\min}$  حداقل بزرگا و  $\beta$  پارامتر لرزه ای کاتالوگ می باشد.



شکل ۴: احتمال رویداد در هر بازه به شرط وقوع (الف) و رابطه گوتنبرگ-ریشتر (ب)

در نهایت احتمال رخداد یک زلزله ی تصادفی در یک بازه ی دلخواه از روابط زیر بدست می آید:

$$P(M_{\text{interval}} - \frac{\Delta M}{2} < M < M_{\text{interval}} + \frac{\Delta M}{2}) = f(M_{\text{interval}}) \cdot \Delta M \quad (3)$$

<sup>1</sup> Campbell  
<sup>2</sup> Bozorgnia

شکل ۴(الف) نشان دهنده ی منحنی احتمال قرار گرفتن یک رویداد تصادفی در هر بازه از بزرگاها می باشد. مرحله ی بعد شامل تعیین تابع چگالی احتمال برای فاصله ( $R$ ) می باشد که بسیار ساده است. به این ترتیب که برای هر قطعه از یک گسل مقدار آن متفاوت و برابر با نسبت طول آن قطعه به طول کل آن گسل خطی می باشد، یادآور می شود که همهی منابع در این پروژه خطی در نظر گرفته شده اند:

$$f(R) \cdot \Delta R = \frac{\Delta L_i}{L} \quad (۴)$$

در رابطه ی بالا،  $\Delta L_i$  طول یک قطعه ی دلخواه از گسل خطی و  $L$  طول گسل خطی است.

### ۳-۴- رابطه ی گوتنبرگ ریشتر:

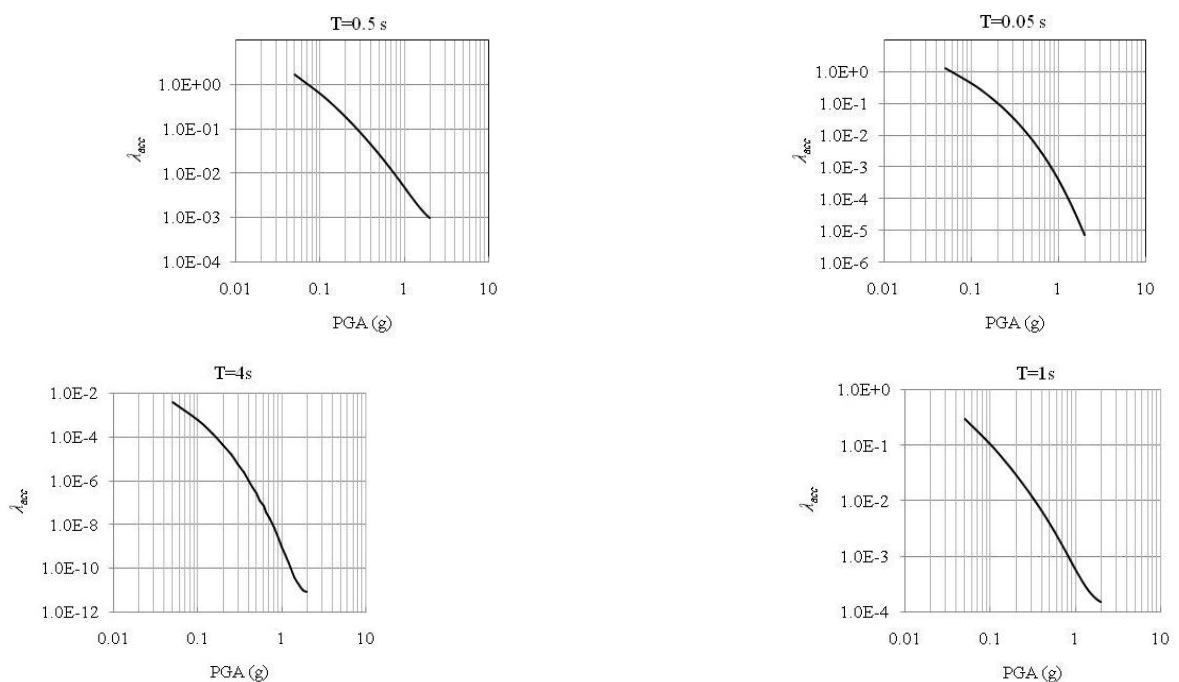
این رابطه بیانگر نرخ و یا فرکانس وقوع زلزله در یک منطقه بازای یک بزرگای خاص می باشد (شکل ۴ (ب)).

### ۳-۵- روند محاسبه ی احتمال خطر:

این روابط مطابق با روش ارائه شده توسط بیکر<sup>۱</sup> [۷] به ترتیب زیر می باشند:

$$P(PGA > acc | EQ) = \sum_R \sum_M P(PGA > acc | EQ : M, R) f(M) \Delta M f(R) \Delta R \quad (۵)$$

$P(PGA > acc | EQ)$  احتمال تجاوز از یک شتاب معین ( $acc$ ) برای یک گسل خطی به ازای یک حادثه با بزرگا و مسافت مورد نظر است ( $M$  و  $R$ ). بقیه پارامترها قبلاً تعریف شده اند.



شکل ۵: منحنی های خطر لرزه ای برای سایت سد کرخه

برای حصول منحنی خطر لرزه ای کل (شکل ۵)، باید نرخ وقوع زلزله ی کلی را بشرح زیر محاسبه نمود (دفعات وقوع زلزله در سال)

<sup>1</sup> Baker

$$\lambda_{acc} = \sum_{N_s} \sum_R \sum_M \lambda_{N_s} P(PGA > acc | EQ : M, R) f(M) \Delta M f(R) \Delta R \quad (6)$$

در رابطه‌ی بالا،  $\lambda_{acc}$  نرخ تجاوز سالیانه وقوع از مقدار دلخواه شتاب  $acc$  بوده و  $\lambda_{N_s}$  میزان حداقل نرخ وقوع به ازای سهمیه‌ی هر منبع خطی است.

همانگونه که از شکل ۵ روشن است بازای یک نرخ وقوع ثابت برای تمامی پیوندها، یک روند منطقی در تغییرات شتاب مبنا (شتاب به ازای یک مقدار ثابت از نرخ تجاوز سالیانه) قابل مشاهده است:

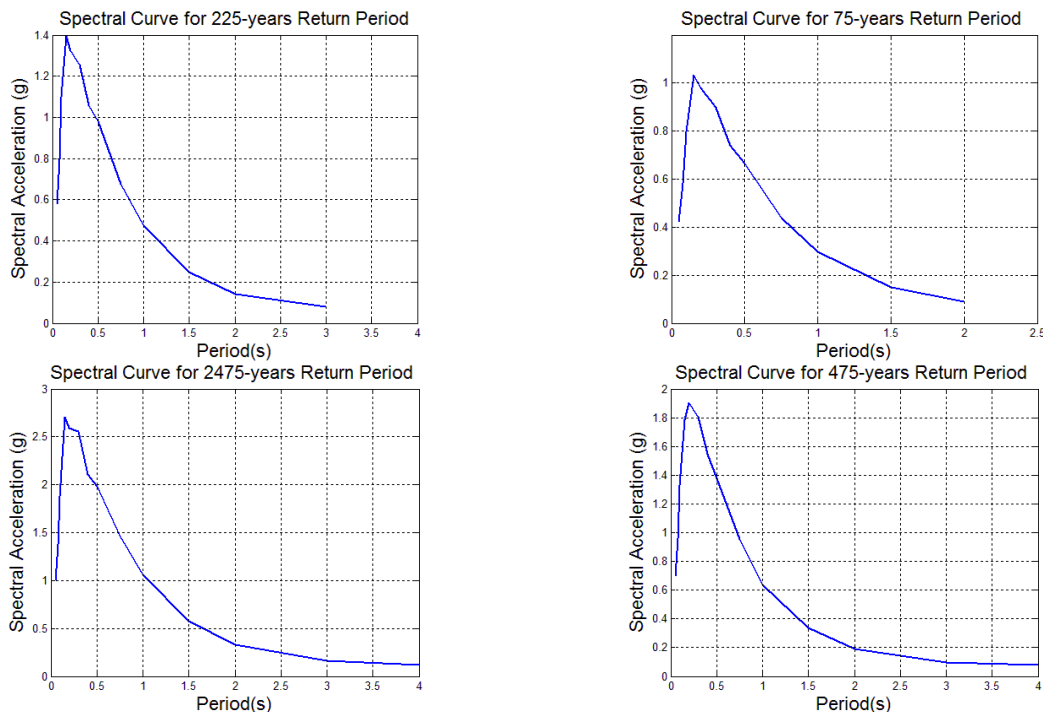
(۱) ابتدا با افزایش پیوند، شتاب مبنا نیز افزایش می‌یابد

(۲) سپس بازای افزایش در پیوند، میزان شتاب مبنا به یک حد ثابت می‌رسد

(۳) مقدار ثابت فوق پایدار نبوده و از این پس روند کاهشی در شتاب مبنا بازای افزایش در پیوند حکمفرما می‌شود.

### ۳-۵- روند حصول منحنی‌های طیف:

انگیزه‌ی اصلی از حصول طیف برای یک سازه، اولاً سطح اهمیت آن سازه و ثانیاً جوابگو نبودن منحنی‌های طیف ارائه شده در آئین‌نامه‌های طراحی می‌باشد. به همین منظور با توجه به سطح خطر مورد و با در نظر گرفتن نرخ وقوع متناظر با آن، به منحنی‌های خطر رجوع نموده و شتابی که از این منحنی‌ها قرائت می‌شود، همان شتابی است که در طیف‌ها تحت عنوان شتاب طیفی ( $S_a$ ) از آن یاد می‌شود. این روند تکراری باید با رجوع به منحنی‌های خطر لرزه‌ای برای هر پیوند انجام شود. زلزله‌ی ۵۰ درصد در ۵۰ سال معادل با یک زلزله‌ی با دوره‌ی بازگشت ۷۵ ساله، ۲۰ درصد در ۵۰ سال همان زلزله‌ی ۲۲۵ ساله، ۱۰ درصد در ۵۰ سال زلزله‌ی ۴۷۵ ساله (سطح مبنای آئین‌نامه‌ای) و زلزله‌ی ۲ درصد در ۵۰ سال معادل با زلزله‌ی ۲۴۷۵ ساله سطوح خطر انتخابی می‌باشند که در طراحی بر مبنای عملکرد معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرند.



شکل ۶: منحنی‌های طیف پاسخ سیستم یک‌درجه آزادی برای سایت سد کرخه

همانگونه که از شکل ۶ مشخص است، با افزایش دوره ی بازگشت برای سایت سد کرخه با دو پدیده روبرو هستیم؛ اول اینکه هر چه دوره ی بازگشت کمتر می شود، تغییرات شتاب طیفی به ازای پریود برای یک سیستم یک درجه آزادی ملایم تر شده و در واقع از شدت این تغییرات کاسته می شود. ثانیاً زلزله هایی با دوره بازگشت بالاتر، مقدار بیشینه ی شتاب مورد پیش بینی را نیز بسیار بالا نشان می دهند، به طوریکه میزان ماکزیمم شتاب طیفی حاصل از زلزله ی ۲۲۵ ساله حدود ۰.۳۷٪، زلزله ی ۴۷۵ ساله حدود ۰.۸۶٪ و بالاخره زلزله ی ۲۴۷۵ ساله حدود ۱.۶۴٪ نسبت به ماکزیمم شتاب طیفی حاصل از زلزله ی ۷۵ ساله افزایش داشته اند.

#### ۴- نتیجه گیری

با توجه به محتویات این مقاله، نتایج زیر قابل استخراج است:

- ۱- برای طراحی یا دریافت پاسخ سازه های با اهمیت مثل سدها نمی توان به طیف های آئین نامه ای موجود بسنده کرد، بلکه نیاز به حصول طیف های حاصل از تحلیل خطر لرزه ای است.
- ۲- در منحنی های خطر برای سایت مشخص شد که ابتدا با افزایش پریود، به ازای یک نرخ وقوع ثابت، شتاب متناظر به آن نیز افزایش می یابد سپس به ازای افزایش در پریود، میزان این شتاب به یک حد ثابت می رسد که پایدار نبوده و از این پس روند کاهشی در شتاب مینا بازای افزایش در پریود حکمفرما می شود.
- ۳- در منحنی های طیف مشخص است که هرچه دوره بازگشت زلزله بیشتر باشد شتاب طیفی حداکثر آن بالاتر است، اما این شتاب به سرعت با افزایش پریود رو به زوال می گذارد؛ در حالیکه برای زلزله ها با دوره بازگشت کمتر، طیف شکل پایداری از خود نشان می دهد.
- ۴- مقادیر نسبتاً زیاد برای بیشینه شتاب افقی حاصل از منحنی های طیف با دوره ی بازگشت بالاتر، ما را بر آن می دارد که در هموار نمودن آن برای استفاده های طراحی محافظه کارانه تر رفتار کنیم.

#### مراجع

- [1] MATLAB 7.10 (MATrix LABoratory), R2010a, MathWorks, Retrieved 2010.
- [2] www.iiees.ac.ir/ International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran
- [3] E. M. Scordilis, Empirical global relations converting  $M_s$  and  $m_b$  to moment magnitude, Journal of Seismology, 10: 225–236, 2006
- [4] J. K. Gardner and L. Knopoff: Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian? Bulletin of the Seismological Society of America, October 1974, 64: 1363-1367
- [5] ZMAP—a software package to analyze seismicity. Wiemer S. , 2000
- [6] K. W. Campbell and Y. Bozorgnia. Updated Near-Source Ground-Motion (Attenuation) Relations for the Horizontal and Vertical Components of Peak Ground Acceleration and Acceleration Response Spectra. Bulletin of the Seismological Society of America, 93 (1): 314–331, February 2003
- [7] J. W. Baker. An introduction to probabilistic seismic hazard analysis (PSHA). White paper, version 1.3, 2008