

# تجزیه و تحلیل خطر لرزه‌ی شهر تبریز با توجه به اثر پدیده‌ی حوزه‌ی نزدیک

مسعود یوسفی صبوری\* (دانشجوی کارشناسی ارشد)

تورج تقی‌خانی (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۴  
دوره‌ی ۲ - ۳۱، شماره‌ی ۲/۱، ص. ۳۳-۳۴

زمین‌لرزه‌های ثبت‌شده در نزدیکی گسل گسیخته‌شده، اغلب حاوی پالس در رکورد سرعت - زمان هستند، که می‌توانند تقاضای قابل توجهی را در سازه‌های این مناطق به وجود آورند. روش‌های تحلیل خطر موجود به خوبی نمی‌توانند اثر این پدیده را در طیف پاسخ به‌درستی پیش‌بینی کنند. شهر تبریز، یکی از شهرهای صنعتی و تاریخی ایران است، که گسل شمالی آن به‌عنوان فعال‌ترین گسل منطقه، در نزدیکی آن واقع شده است. لذا در این مطالعه، با استفاده از روابط پیشنهادی، نتایج حاصل از دو روش تحلیل خطر عادی و اصلاح‌شده‌ی شهر تبریز به‌صورت نقشه‌های هم‌تراز شتاب طیفی به‌دست آمده است. برای تعیین اثر پدیده‌ی حوزه‌ی نزدیک در میزان مشارکت پارامترهای مختلف دخیل در تحلیل خطر احتمالاتی، تجزیه‌ی خطر عادی و اصلاح‌شده‌ی این پارامترها برای نقاط مختلف شهر برای ۲ دوره‌ی بازگشت ۴۷۵ و ۲۴۷۵ ساله انجام و نقش پارامترهای منحصر به پدیده‌ی حوزه‌ی نزدیک مانند پالس و دوره‌ی تناوب آن مشخص شده است.

**واژگان کلیدی:** زمین‌لرزه‌ی حوزه‌ی نزدیک، پالس، تحلیل خطر لرزه‌ی، تجزیه‌ی خطر لرزه‌ی، شهر تبریز.

## ۱. مقدمه

ایران به‌عنوان یکی از مناطق لرزه‌خیز جهان، خسارات مالی و جانی بسیاری را به سبب رخداد زلزله تجربه کرده است. یکی از فعال‌ترین پهنه‌های لرزه‌ی ایران، منطقه‌ی آذربایجان است. رخداد ۱۲ زمین‌لرزه‌ی شدید، که شهر تبریز را کاملاً ویران کرده است، نشان‌دهنده‌ی فعالیت لرزه‌ی شدید این منطقه است. گسل شمال تبریز، که از بخش شمالی تبریز عبور می‌کند، به دلیل وقوع زمین‌لرزه‌های متعدد تاریخی، از گسل‌های شناخته‌شده‌ی ایران است؛ که در اثر گسترش ساخت و ساز بر روی حریم آن از میان شهرک‌های جدید و در حال احداث تبریز عبور می‌کند.<sup>[۱]</sup> مشاهدات به‌دست‌آمده از رکوردهای زلزله‌هایی که در ایستگاه نزدیک به منشأ آن ثبت شده است، نشان از شکل پالس‌مانند رکوردهای سرعت - زمان دارد. موج زلزله در مناطقی که رو به پارگی گسل قرار دارند، انرژی زیادی را به همراه دارد. دامنه‌ی طیف‌های شتاب در حوزه‌ی نزدیک در قیاس با طیف‌های شتاب در حوزه‌ی دور به علت وجود همین پالس‌ها در دوره‌های تناوب بالا، مقدار بسیار بیشتری نسبت به دوره‌های تناوب پایین دارد.<sup>[۲-۴]</sup> نزدیکی گسل شمال تبریز با این شهر باعث شده است تا بررسی اثرات حوزه‌ی نزدیک، که در سال‌های اخیر توجه پژوهشگران را به همراه داشته است، در این مطالعه مورد توجه قرار گیرد. با توجه به اهمیت شهر تبریز در شمال غربی ایران، در نظر گرفتن احتمال اثرات پدیده‌ی حوزه‌ی نزدیک گسل تبریز در خطر لرزه‌ی این منطقه حائز اهمیت ویژه‌ی است.

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۱/۱۲/۷، اصلاحیه ۱۳۹۲/۵/۲۶، پذیرش ۱۳۹۲/۶/۴.

تحلیل خطر لرزه‌ی احتمالاتی برای ارزیابی و کمی‌سازی عدم قطعیت‌هایی همچون موقعیت، اندازه و شدت لرزش زلزله‌های آینده روشی پذیرفته‌شده است. این روش که نخستین بار در سال ۱۹۶۸ معرفی شده است،<sup>[۵]</sup> امروزه در سطح گسترده‌ی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این‌حال، در این روش اثر پدیده‌ی پالس در برآورد شتاب نواحی که در نزدیکی سرچشمه‌ی لرزه‌زا هستند، در نظر گرفته نشده است. در سال‌های اخیر، مطالعات وسیعی بر روی اثرات حوزه‌ی نزدیک و نوع حرکات زمین در محدوده‌ی کانونی زلزله صورت گرفته است. در پژوهشی در سال ۲۰۰۸، به این نقص در مدل‌های پیش‌بینی لرزه‌ی رایج توجه و پیشنهاداتی در راستای اصلاح روابط و نگرش به تحلیل خطر در حوزه‌ی نزدیک ارائه شده است.<sup>[۶]</sup> این پیشنهاد در سال‌های اخیر با گسترش اطلاعات در مورد رکوردهای زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک توسط پژوهشگران مختلف،<sup>[۳]</sup> شکل عملی‌تری به خود گرفته است. این مطالعه تلاش دارد برای نخستین بار روابط پیشنهادی در مورد شهر تبریز را، که دارای منشأ لرزه‌زای غالب با امکان وقوع پدیده‌ی حوزه‌ی نزدیک است، به‌کار گیرد و نتایج حاصل را با نتایج تحلیل خطر معمول مقایسه کند.

لازم است تا در تکمیل نتایج تحلیل خطر لرزه‌ی احتمالاتی اصلاح‌شده نیز، سناریوی غالب در پارامتر مورد نظر تفکیک و مشخص شود تا درک صحیحی از نتایج حاصل ارائه شود. این مسئله برای مناطق حوزه‌ی نزدیک، اهمیت بیشتری دارد؛ زیرا در این نواحی تا به امروز، معیارهای مناسب برای سناریوی طراحی و انتخاب رکورد زمین‌لرزه بیان نشده است. همچنین در مواردی، سناریوهای طراحی و

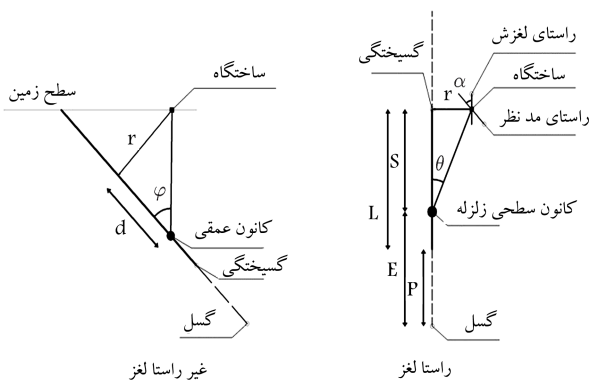
گسیختگی و  $E$  موقعیت کانون سطحی زلزله است، که در واقع بیانگر پارامتر  $Z$  در رابطه‌ی ۲ هستند. این پارامترها در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.

$$\lambda(S_a > x, pulse) = \lambda \cdot \int_{t_p} \int_m \int_l \int_p \int_e P(pulse|l, p, e) \cdot P(S_a > x|t_p, m, l, p, e, pulse) \cdot f_{(T_p|M,L,P,E)}(t_p|m) \cdot f_{(P,E|M,L)}(p, e|l) \cdot f_{(L|M)}(l|m) \cdot f_M(m) \cdot dt_p \cdot dm \cdot dl \cdot dp \cdot de \quad (4)$$

$$\lambda(S_a > x, nopulse) = \lambda \cdot \int_m \int_l \int_p \int_e P(nopulse|l, p, e) \cdot P(S_a > x|m, l, p, e, nopulse) \cdot f_{(P,E|M,L)}(p, e|l) \cdot f_{(L|M)}(l|m) \cdot f_M(m) \cdot dm \cdot dl \cdot dp \cdot de \quad (5)$$

در معادلات مذکور از پارامترهای جدیدی نسبت به تحلیل خطر عادی استفاده شده است، که به این شرح هستند: [۳]

- $P(pulse|l, p, e)$ ، احتمال وقوع پالس است. این پارامتر، تابعی از پارامترهای هندسی بین ساخت‌گاه تا گسل و مستقل از بزرگی و دوره‌ی تناوب پالس است.
- $P(S_a > x|t_p, m, l, p, e, pulse)$ ، نرخ فراگذشت  $S_a$ ، از سطح تعیین شده به شرط وقوع پالس برای یک زلزله‌ی رخ داده با بزرگی  $m$  و  $r$  است.
- $f_{(T_p|M,L,P,E)}(t_p|m)$ ، تابع چگالی احتمال دوره‌ی تناوب پالس است، که فقط وابسته به بزرگی زلزله است.
- $f_{(P,E|M,L)}(p, e|l)$ ، تابع چگالی احتمال توأم طول محل گسیختگی و کانون سطحی زلزله است، که فقط تابعی از طول گسیختگی است. در این مطالعه، از رابطه‌ی ولز - کاپراسمیت، [۹] استفاده و توزیع کانون سطحی زلزله بر روی گسل به صورت یکنواخت فرض شده است.
- $f_{(L|M)}(l|m)$ ، تابع توزیع طول گسیختگی است، که فقط تابعی از بزرگی است.



غیر راستا لغز

راستا لغز

$L$ ، طول گسیختگی،  $P$ ، موقعیت گسیختگی،  $E$ ، موقعیت کانون سطحی و  $r$  کمترین فاصله ساختمان تا گسل،  $\phi$  زاویه با شیب قائم گسل.  $\theta$  زاویه با راستای افقی خط گسل،  $S$  طول گسل گسیخته شده بین کانون سطحی گسل و ساختمان

(الف) گسل راستالغز؛ (ب) گسل غیر راستالغز.

شکل ۱. پارامترهای موردنیاز برای تطبیق رگرسیون منطقی. [۴]

زمین لرزه‌هایی که براساس احتمال شناسایی شده‌اند، برای مسائل کاربردی مهندسی از خود تحلیل خطر هم مهم‌تر هستند. [۴] به‌خصوص این مسئله می‌تواند در اصلاح آیین‌نامه‌ی طرح لرزه‌ی سازه‌ها در نزدیکی گسل‌های فعال و همچنین انتخاب رکورد زمین لرزه در تحلیل‌های دینامیکی کاربرد داشته باشد.

## ۲. تحلیل خطر لرزه‌ی اصلاح شده

معادله‌ی ۱، رابطه‌ی عمومی تحلیل خطر لرزه‌ی احتمالاتی معمول، که توسط آلن کورنل معرفی شده است، را بیان می‌کند؛ که در آن، پارامتر  $P(IM > x|m, r)$  با استفاده از مدل پیش‌بینی زمین لرزه به دست می‌آید و  $f_{M_i}(m)$  و  $f_{R_i}(r)$  توابع چگالی احتمال بزرگی و فاصله هستند.  $\lambda(M_i > m_{min})$ ، نرخ وقوع زمین لرزه‌های بزرگ‌تر از  $m_{min}$  و  $\lambda(IM > x)$  نرخ وقوع معیار شدت ( $IM$ ) که معمولاً شتاب است، برای  $IM > x$  ارائه می‌دهد. [۶] همچنین،  $r$  فاصله‌ی سایت از سرچشمه و  $m$  پارامتر بزرگاست.

$$\lambda(IM > x) = \sum_{i=1}^{n_{sources}} \lambda(M_i > m_{min}) \cdot \int_{m_{min}}^{m_{max}} \int_0^{r_{max}} P(IM > x|m, r) \cdot f_{M_i}(m) \cdot f_{R_i}(r) \cdot dr \cdot dm \quad (1)$$

با توجه به اینکه اثر جهت‌پذیری اساساً به هندسه‌ی منطقه‌ی بین منبع زلزله تا ساخت‌گاه موردنظر بستگی دارد، [۸] مدل زمین لرزه برای در نظر گرفتن اثر پالس‌ها، باید تابعی از هندسه‌ی منطقه بین منبع زلزله تا ساخت‌گاه، بزرگی و فاصله باشد. بنابراین مدل اصلاحی، که حرکت پالس‌گونه‌ی زمین را در نظر می‌گیرد، می‌تواند برای محاسبه‌ی احتمال فراگذشت،  $P^*(S_a > x|m, r, z)$ ، به‌کار رود. که در این عبارت،  $Z$  بیانگر مشخصات هندسی منطقه بین منبع زلزله تا ساخت‌گاه است. [۳] معادله‌ی ۲ به شکلی با اصلاح رابطه‌ی ۱، اثرات جهت‌پذیری را در تحلیل خطر احتمالاتی بیان می‌کند:

$$\lambda(S_a > x) = \sum_{i=1}^{\#Faults} \lambda_i \cdot \iiint P^*(S_a > x|m, r, z) \cdot f_{M_i}(m, r, z) \cdot dr \cdot dm \cdot dz \quad (2)$$

که در آن،  $S_a$  شتاب طیفی، و  $z$  مشخصات هندسی منطقه بین منبع زلزله تا ساخت‌گاه است.

با توجه به اینکه در تاریخچه‌ی زمانی، سرعت همه‌ی رکوردهای حرکت زمین در حوزه‌ی نزدیک پالس مشاهده نمی‌شود، این بحث مطرح می‌شود که همه‌ی رکوردهای زلزله در حوزه‌ی نزدیک، تقاضای لرزه‌ی غیرمعمول برای سازه ندارند. [۲] بنابراین، عبارت  $P^*(S_a > x|m, r, z)$  در رابطه‌ی تحلیل خطر احتمالاتی، که در معادله‌ی ۲ به آن اشاره شده است، در عمل باید به دو بخش پالس‌دار و بدون پالس تفکیک شود (رابطه‌ی ۳). [۴-۲]

$$\lambda(S_a > x) = \lambda(S_a > x, nopulse) + \lambda(S_a > x, pulse) \quad (3)$$

که در آن، پارامترهای  $\lambda(S_a > x, pulse)$  و  $\lambda(S_a > x, nonpulse)$  در معادلات ۴ و ۵ معرفی شده‌اند. در معادلات مذکور،  $L$  طول گسیختگی،  $P$  موقعیت

که در آن‌ها،  $Af$  ضریب تشدید اثر پالس است. با توجه به بررسی‌های شاهی و بیکر،  $\ln S_a^r$  که بیانگر شتاب طیفی رکورد بعد از حذف پالس است، برابر با شتاب طیفی حاصل از روابط کاهندگی است. [۲۱] بنابراین، می‌توان رابطه‌ی ۱۱ را به صورت رابطه‌ی ۱۲ بازنویسی کرد، که در آن،  $\ln S_{a,gmm}$  شتاب حاصل از روابط کاهندگی است:

$$\ln S_{a,pulse} = \ln Af + \ln S_{a,gmm} \quad (۱۲)$$

میانگین بیان‌شده برای ضریب تشدید  $Af$ ، به صورت رابطه‌ی ۱۳ است:

$$\mu_{\ln Df} = \begin{cases} ۱,۱۳۱ \cdot \exp(-۳,۱۱(\ln(\frac{T}{T_P})) + ۰,۰۵۸) & \text{if } T \leq ۰,۸۸ \\ ۰,۸۹۶ \cdot \exp(-۲,۱۱(\ln(\frac{T}{T_P})) + ۰,۲۵۵) & \text{if } T > ۰,۸۸ \end{cases} \quad (۱۳)$$

با توجه به اینکه مدل اصلاحی زمین‌لرزه‌ی ارائه‌شده فقط برای زمین‌لرزه‌های پالس‌دار است، این انتظار وجود دارد که انحراف معیار استاندارد در داخل این زیرمجموعه کمتر از میزان انحراف معیار کل بانک اطلاعاتی زمین‌لرزه‌ها، که هر دو زمین‌لرزه‌ی پالس‌دار و بدون پالس را شامل می‌شود، باشد که در رابطه‌ی ۱۴ بیان شده است: [۲۱]

$$\sigma_{\ln S_{a,pulse}} = Rf \cdot \sigma_{\ln S_{a,gmm}} \quad (۱۴)$$

که در آن،  $Rf$  ضریب کاهش است که طبق رابطه‌ی ۱۵ بیان می‌شود:

$$Rf = \begin{cases} ۱ - ۰,۲ \cdot \exp(-۰,۹۶ \cdot (\ln(\frac{T}{T_P}) + ۰,۱۵۶)^2) & \text{if } T \leq ۰,۲۱ \\ ۱ - ۰,۲۱ \cdot \exp(-۰,۲۴ \cdot (\ln(\frac{T}{T_P}) + ۰,۱۵۶)^2) & \text{if } T > ۰,۲۱ \end{cases} \quad (۱۵)$$

### ۳.۲. تقلیل شتاب طیفی به علت عدم وقوع پالس

برای اصلاح شتاب حاصل از رابطه‌ی کاهندگی برای حالتی که پالس رخ نمی‌دهد، همانند بخش قبلی عمل می‌شود (رابطه‌ی ۱۶): [۲۱]

$$\ln S_{a,no\ pulse} = \ln\left(\frac{S_{a,NoPulse}}{S_{a,gmm}} \cdot S_{a,gmm}\right) = \ln(Df \cdot S_{a,gmm}) = \ln Df + \ln S_{a,gmm} \quad (۱۶)$$

که در آن،  $Df$  ضریب کاهش،  $S_a$  میانگین ضریب کاهش متوسط، برای حالتی که  $T > ۱ \text{ sec}$  است، به صورت رابطه‌ی ۱۷ مدل شده است:

$$\mu_{\ln Df} = \begin{cases} \max[-۰,۰۹۰۵ \cdot g_m \cdot g_R \cdot (\ln T, \ln 2)] & SS \\ -۰,۰۲۹ \cdot \ln T \cdot g_m \cdot g_r & Nss \end{cases} \quad (۱۷)$$

که در آن،  $r_{zb}$  فاصله‌ی جویبر - بور<sup>۲</sup>، کمترین فاصله تا تصویر گسل روی سطح است، و همچنین  $g_M$  و  $g_R$  مطابق روابط ۱۸ و ۱۹ محاسبه می‌شوند: [۲۱]

$$g_M = \begin{cases} ۰ & \text{if } M < ۶ \\ \frac{M-۶}{۰,۵} & \text{if } ۶ \leq M < ۶,۵ \\ ۱ & \text{if } M > ۶,۵ \end{cases} \quad (۱۸)$$

$$g_R = \begin{cases} ۱ - r_{zb} & \text{if } r_{zb} \leq ۱۰ \text{ km} \\ ۰ & \text{if } r_{zb} \geq ۱۰ \text{ km} \end{cases} \quad (۱۹)$$

- $P(S_a > x | m, l, p, e, nopulse)$  نرخ فراگذشت  $S_a$ ، از سطح تعیین‌شده به شرط عدم وقوع پالس برای یک زلزله‌ی رخ داده با بزرگای  $m$  و  $r$  است.
- $P(pulse | l, p, e)$  احتمال وقوع پالس است. این پارامتر، تابعی از پارامترهای هندسی بین ساخت‌گاه تا گسل و مستقل از بزرگای دوره‌ی تناوب پالس است.
- $P(S_a > x | t_p, m, l, p, e, pulse)$  نرخ فراگذشت  $S_a$ ، از سطح تعیین‌شده به شرط وقوع پالس برای یک زلزله‌ی رخ داده با بزرگای  $m$  و  $r$  است.
- تابع چگالی احتمال توأم محل گسیختگی و کانون سطحی  $f_{(P,E|M,L)}(p, e | l)$ ، تابعی از طول گسیختگی است. در این مطالعه از رابطه‌ی ولز - کاپراسمیت، [۹] برای محاسبه‌ی طول گسیختگی استفاده و توزیع کانون سطحی زلزله بر روی گسل به صورت یکنواخت فرض شده است.
- تابع توزیع طول گسیختگی است، که فقط تابعی از بزرگاست.  $f_{(L|M)}(l | m)$
- $P(S_a > x | m, l, p, e, nopulse)$  نرخ فراگذشت  $S_a$ ، از سطح تعیین‌شده به شرط عدم وقوع پالس برای یک زلزله‌ی رخ داده با بزرگای  $m$  و  $r$  است.

### ۱.۲. تابع احتمال رخداد پالس

محققان، با استفاده از رکوردهای پالس‌گونه‌ی شناسایی‌شده، رابطه‌ی ۶ را به عنوان تابع احتمال رخداد پالس برای گسل‌های راستا لغز ارائه کرده‌اند. [۲۱] براساس این رابطه، دو کمیت  $r$  کمترین فاصله‌ی ساخت‌گاه تا گسل و  $S$  طول گسل گسیخته‌شده بین کانون سطحی گسل و ساخت‌گاه (شکل ۱)، بیشترین اهمیت آماری و کمترین مقدار AIC<sup>۱</sup> را دارند.

$$P(pulse | r, s) = \frac{۱}{۱ + e^{(۰,۶۲۴ + ۰,۱۶۷ \cdot r - ۰,۰۷۵ \cdot S)}} \quad (۶)$$

این رابطه با استفاده از الگوریتم پیشنهادی بیکر، [۱۰] برای شناسایی رکوردهای پالس‌گونه به دست آمده است. با استفاده از این الگوریتم، علاوه بر راستای عمود بر گسل، شاهی و بیکر توانسته‌اند رکوردهای پالس‌گونه را در راستاهای مختلف نسبت به گسل شناسایی کنند و احتمال وقوع پالس در راستاهای مختلف نسبت به گسل ( $\alpha$ ) را به دست آورند. رابطه‌ی ۷، احتمال وقوع پالس در راستای دلخواه نسبت به گسل راستا لغز و رابطه‌ی ۸، احتمال کلی وقوع پالس را بیان می‌کنند: [۲۱]

$$P(pulse \text{ at } \alpha | pulse) = \min[۰,۶۷, ۰,۶۷ - ۰,۰۰۴۱(۷۷,۵ - \alpha)] \quad (۷)$$

$$P(pulse \text{ at } \alpha) = P(pulse \text{ at } \alpha | pulse) P(pulse) \quad (۸)$$

### ۲.۲. تشدید شتاب طیفی به علت وقوع پالس

برازش به دست آمده از شتاب رکوردهای پالس‌دار و بدون پالس نشان می‌دهد که مدل‌های رایج زمین‌لرزه، که از آن‌ها در تخمین زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک استفاده می‌شود، زمین‌لرزه‌های پالس‌دار را کمتر از حد واقعی و زمین‌لرزه‌های بدون پالس را بیشتر از حد واقعی تخمین می‌زنند. بنابراین، لازم است که مدلی برای پیش‌بینی مشخصات پالس‌گونه‌ی زمین‌لرزه به شکل جداگانه ارائه شود. روابط ۹ الی ۱۱، شتاب طیفی را به دو بخش بدون پالس و با اثر افزایشی پالس تجزیه می‌کنند: [۲۱]

$$\ln S_{a,pulse} = \ln\left(\frac{S_{a,Pulse}}{S_a^r} \cdot S_a^r\right) \quad (۹)$$

$$= \ln(Af \cdot S_a^r) \quad (۱۰)$$

$$= \ln Af + \ln S_a^r \quad (۱۱)$$

## ۴.۲. دوره‌ی تناوب پالس

همان‌طور که در بخش‌های قبلی مشاهده شد، تشدید و تقلیل رخ داده بیش از هر چیز به دوره‌ی تناوب پالس بستگی دارد. شاهی و بیکر، توزیع لگ - نرمال را برای این پارامتر در نظر گرفته‌اند، که به همراه انحراف معیار در روابط ۲۰ و ۲۱ ارائه شده‌اند: [۲]

$$\mu_{\ln T_p} = -5.73 + 0.99 \times M \quad (20)$$

$$\sigma_{\ln T_p} = 0.56 \quad (21)$$

## ۳. صحت‌سنجی مدل عددی

### ۳.۱. صحت‌سنجی تحلیل خطر احتمالاتی عادی

برای صحت‌سنجی روند تحلیل خطر عادی مورد استفاده در این مطالعه، از یکی از نرم‌افزارهای مطرح در این زمینه با عنوان SEISRISK III استفاده و برای شبکه‌ی از نقاط مختلف، نتایج استخراج و مقایسه شده‌اند (شکل ۲). در این تحلیل از رابطه‌ی کاهندگی زارع (۲۰۰۶) استفاده شده است، [۱۱] زیرا انحراف معیار و ضرایب

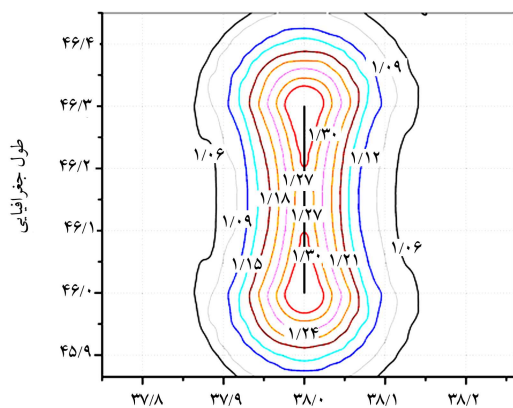
ثابتی دارد که متمایز از شتاب، بزرگا و... هستند و می‌تواند به‌سادگی در برنامه‌ی SEISRISKIII مدل شود.

مطابق شکل ۲ تطابق قابل قبولی میان نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل خطر عادی با استفاده از برنامه‌ی تدوین‌شده در این مطالعه و نرم‌افزار SEISRISKIII وجود دارد.

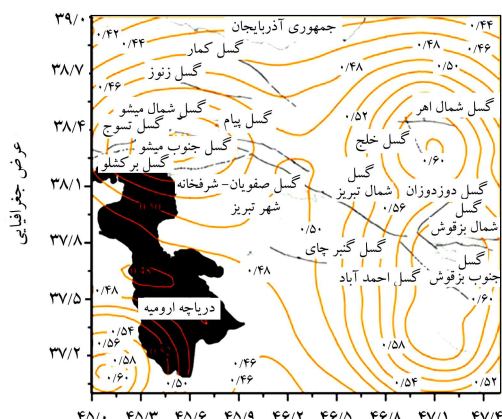
### ۳.۲. صحت‌سنجی تحلیل خطر احتمالاتی اصلاح‌شده

صحت‌سنجی تحلیل خطر احتمالاتی اصلاح‌شده به دلیل محدودیت مراجع مربوط کار ساده‌ی نیست. در این ارتباط می‌توان فقط به تنها مرجع و یا تنها تحقیقات موجود استناد نمود. شاهی و بیکر، [۳] برای یک گسل، با استفاده از تحلیل خطر احتمالاتی اصلاح‌شده، شتاب متناظر با دوره‌ی بازگشت ۲۴۷۵ ساله را برای شبکه‌ی از نقاط محاسبه کرده‌اند و نسبت شتاب‌های به‌دست‌آمده را به صورت منحنی‌های هم‌تراز تشدید رسم کرده‌اند.

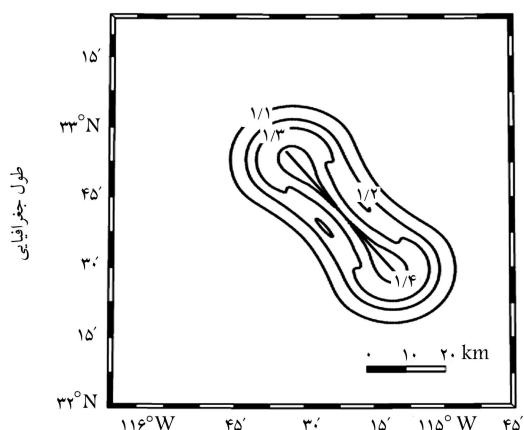
در این مطالعه، محاسبات مذکور برای یک گسل فرضی تکرار شده است و همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، تطابق قابل قبولی بین این دو شکل وجود دارد که نشان‌گر درستی برنامه‌ی نوشته‌شده است.



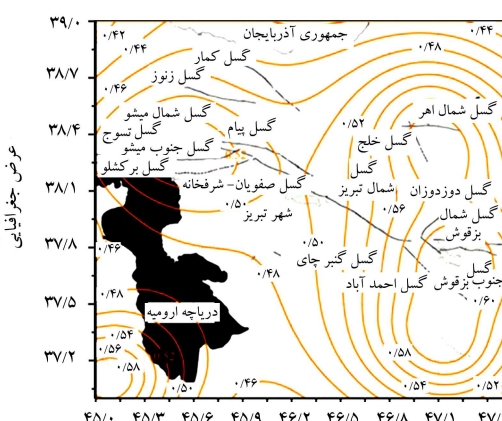
(الف) عرض جغرافیایی



(الف) طول جغرافیایی



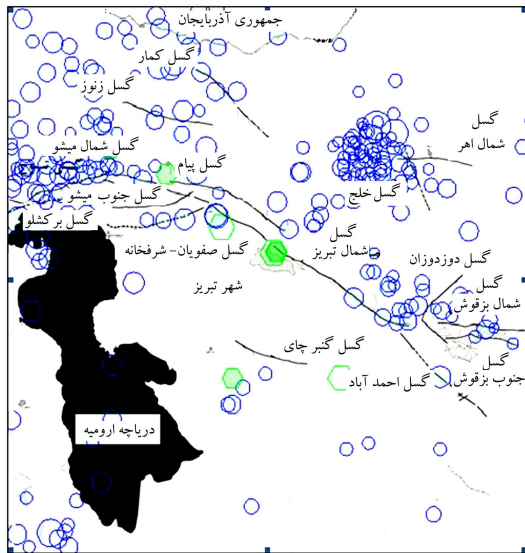
(ب) عرض جغرافیایی



(ب) طول جغرافیایی

شکل ۳. منحنی هم‌تراز تشدید شتاب طیفی متناظر با دوره‌ی بازگشت ۲۴۷۵ ساله: (الف) براساس برنامه‌ی نوشته‌شده و (ب) نمودار شاهی و بیکر. [۳]

شکل ۲. نمودار هم‌تراز شتاب متناظر با دوره‌ی بازگشت ۲۷۵ ساله‌ی محاسبه‌شده توسط: (الف) SEISRISKIII و (ب) برنامه MATLAB.



شکل ۴. نقشه‌ی گسل‌های اطراف منطقه به همراه توزیع زلزله‌های تاریخی و دستگاهی رخ داده در منطقه. [۱۶، ۱۷]

#### ۴. تعیین مشخصات لرزه‌خیزی

شهر تبریز در طول جغرافیایی ۴۶/۵ درجه و عرض جغرافیایی ۳۸/۱ درجه بر روی صفحه‌ی نکتونیک‌ی آذربایجان قرار دارد که قسمتی از صفحه‌ی اوراسیاست. ساز و کار زلزله‌ها در ناحیه‌ی شمال و شمال غربی آذربایجان به صورت امتداد لغز راست‌گرد با مؤلفه‌ی فشاری است. [۱۲] با توجه به گزارش‌های زمین‌شناسی موجود، گسل‌های اطراف شهر تبریز شناسایی شده‌اند و اسامی آن‌ها به همراه نوع گسلش، طول مؤثر و بیشینه‌ی بزرگایی که می‌توانند تولید کنند، در جدول ۱ ارائه شده است. موقعیت هر یک از گسل‌ها به همراه توزیع زلزله‌های دستگاهی و تاریخی در شکل ۴ نشان داده شده است.

فهرست زمین‌لرزه‌های تاریخی رخ داده در منطقه، پس از حذف پس‌لرزه به دست آمده و به همراه انحراف معیار نسبت داده شده به هر یک، برای محاسبات لرزه‌خیزی منطقه در برنامه‌ی کیکو ارائه شده است. با استفاده از این روش، نرخ وقوع سالانه‌ی زلزله ( $\lambda$ ) برابر با ۰/۰۸، شیب خط گوتنبرگ - ریشتر ( $b$ ) برابر با ۰/۳۹ و بیشینه‌ی بزرگای ( $Mw_{max}$ ) نیز برابر با ۷/۵ محاسبه شده است. برای محاسبات، از واحد بزرگای  $Mw$  استفاده شده است.

جدول ۱. گسل‌های اطراف تبریز به همراه طول مؤثر و بزرگ‌ترین بزرگای مرتبط به هر یک.

گسل	نوع گسل	طول گسل	طول مؤثر گسل	بزرگای بیشینه ( $M_s$ )		
				نوروزی *	نوروزی و اشجعی **	آمبرسین و ملوویل ***
شمال تبریز	راستا لغز	۱۵۰	۷۵	۷/۳	۷/۲	۷/۳
صفویان - شرفخانه	معکوس	۴۵	۳۰	۶/۸	۶/۹	۶/۷
گنبرچای	راستا لغز	۳۳	۲۵	۶/۷	۶/۷	۶/۶
احمد آباد	راستا لغز	۵۰	۳۵	۶/۹	۶/۹	۶/۸
شمال و جنوب میشو	راستا لغز	۴۰	۳۰	۶/۸	۶/۸	۶/۷
تسوج	معکوس	۶۰	۴۰	۷/۰	۷/۰	۶/۹
برکشلو	معکوس	۳۰	۲۰	۶/۶	۶/۸	۶/۵
برفوش شمال	معکوس	۵۵	۳۵	۶/۹	۶/۹	۶/۸
برفوش جنوبی	معکوس	۶۰	۴۰	۷/۰	۷/۰	۶/۹
کمار	راستا لغز	۲۸	۲۰	۶/۶	۶/۷	۶/۵
زونز	راستا لغز	۴۰	۳۰	۶/۸	۶/۸	۶/۷
پیام	راستا لغز	۶۵	۴۰	۷/۰	۷/۰	۶/۹
خلیج	راستا لغز	۲۶	۲۰	۶/۶	۶/۷	۶/۵
دوزدوزان	راستا لغز	۳۰	۲۰	۶/۶	۶/۷	۶/۵

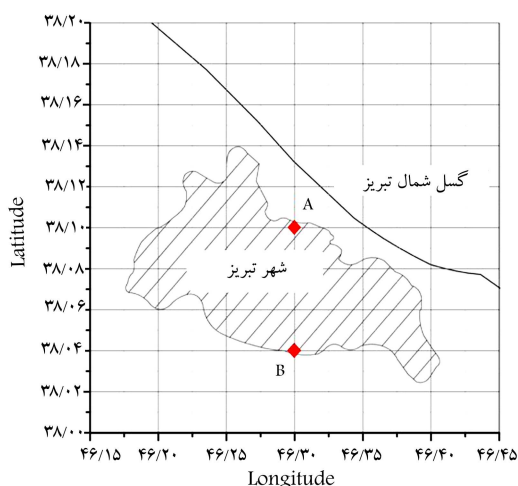
$$* M_S = 1.259 + 1.244 \log L (L \text{ is in meters})$$

$$** M_S = 5.4 + \log L$$

$$*** M_S = 4.642 + 1.432 \log(3 + 0.75L)$$

جدول ۲. زمین‌لرزه‌های تاریخی منطقه به همراه انحراف معیار هر یک. [۱۲، ۱]

تاریخ	$M_s$	$M$	انحراف معیار
۸۵۸/۱/۱	۶٫۰	۶٫۳	۰٫۵
۱۰۴۲/۱۱/۴	۷٫۳	۷٫۲	۰٫۵
۱۳۰۴/۱۱/۷	۶٫۷	۶٫۸	۰٫۴
۱۶۴۱/۲/۵	۶٫۸	۶٫۹	۰٫۴
۱۷۱۷/۳/۱۷	۵٫۹	۶٫۳	۰٫۳
۱۷۲۱/۴/۲۶	۷٫۳	۷٫۲	۰٫۳
۱۷۸۰/۱/۸	۷٫۴	۷٫۳	۰٫۳
۱۷۸۶/۱۰/۰	۶٫۳	۶٫۶	۰٫۳
۱۹۰۵/۱/۹	۶٫۲	۶٫۵	۰٫۲



شکل ۵. شهر تبریز و گسل شمال تبریز به همراه نقاط A و B.

است، برای  $T/T_p = ۱$  و در نواحی اطراف آن ایجاد می‌شود. کمینه‌ی ضریب کاهش انحراف معیار نیز برای  $T/T_p = ۰٫۲۱$  به دست می‌آید و مقدار آن برابر با  $۰٫۸۰$  است. با توجه به این دو نمودار مشخص می‌شود که با دوری  $T/T_p$  از مقادیر فوق، میزان ضریب تشدید شتاب و کاهش انحراف معیار به ۱ نزدیک می‌شوند.

برای دوره‌ی تناوب طیف برابر با صفر، نسبت  $T/T_p$  برابر با صفر می‌شود. طبق روابط ۱۴ و ۱۵ ضریب تشدید و ضریب کاهش انحراف معیار به ترتیب به مقدار  $۱٫۰۵$  و  $۱$  می‌رسد. در واقع، شتاب طیفی به دست آمده ۵٪ افزایش می‌یابد و انحراف معیار رابطه‌ی کاهندگی تغییر نسبت به تحلیل خطر عادی نمی‌کند. همچنین، با توجه به رابطه‌های ۷ و ۸، بیشینه‌ی میزان احتمال رخداد پالس نیز به  $۰٫۶۷$  می‌رسد (در ایده‌آل‌ترین شرایط). این احتمال در نرخ فراگذشت به شرط وقوع پالس ضرب می‌شود. از طرف دیگر، طبق پیشنهاد شاهی و بیکر، برای دوره‌ی تناوب کمتر از ۱ ثانیه تقلیل شتابی صورت نمی‌گیرد و برای حالت عدم رخداد پالس، نرخ فراگذشت محاسبه شده برابر با تحلیل خطر عادی فرض می‌شود. نرخ فراگذشت نهایی، ترکیب دو حالت رخداد و عدم رخداد پالس است. پس می‌توان نتیجه گرفت که برای دوره‌ی تناوبی صفر ثانیه، به علت پایین بودن میزان تشدید و همچنین تعدیل صورت گرفته به واسطه‌ی عدم رخداد پالس، شتاب برای دو حالت عادی و حوزه‌ی نزدیک تقریباً به یک میزان باید باشد.

## ۲.۵. نقشه‌ی هم‌تراز شتاب و تشدید

شکل ۸، نقشه‌ی هم‌تراز شتاب بیشینه‌ی زمین (PGA) را برای محدوده‌ی شهر تبریز در ۲ دوره‌ی بازگشت ۴۷۵ و ۲۴۷۵ ساله نشان می‌دهد. همان‌طور که در بخش پیشین اشاره شده است، در شتاب طیفی دوره‌ی تناوب صفر ثانیه (PGA)، به واسطه‌ی وقوع پالس تشدید رخ نمی‌دهد و شتاب به دست آمده توسط تحلیل خطر عادی و اصلاح شده در این دو ناحیه یکسان است. با توجه به شکل ۸، در دوره‌ی بازگشت ۴۷۵ ساله، PGA شهر تبریز بین  $g$  ۰٫۳۵ و در جنوب تا  $g$  ۰٫۵۶ در مرزهای شمالی شهر متغیر و بیشترین میزان شتاب بر روی گسل شمال تبریز به میزان  $g$  ۰٫۶۰ بوده است. برای بررسی بهتر اثر پالس، نمودار هم‌تراز شتاب طیفی در دوره‌های تناوب ۲ و ۴ ثانیه با ۲ روش عادی و اصلاح شده برای دوره‌ی بازگشت ۲۴۷۵ ساله به همراه میزان تشدید (نسبت دو شتاب حاصل) محاسبه شده است. با توجه به شکل ۹، میزان تشدید رخ داده به علت وقوع پالس، در محدوده‌ی شهر تبریز

در جدول ۲، فهرست زمین‌لرزه‌های تاریخی رخ داده در منطقه پس از حذف پس‌لرزه به همراه انحراف معیار نسبت داده شده به هر یک برای محاسبات لرزه‌خیزی منطقه در برنامه‌ی کیکو<sup>۳</sup> ارائه شده است. در تهیه‌ی این جدول سعی شده است زمین‌لرزه‌هایی که دقت و صحت کافی در مکان و زمان وقوع دارند، انتخاب شوند.

## ۵. نتایج تحلیل خطر لرزه‌ی احتمالاتی

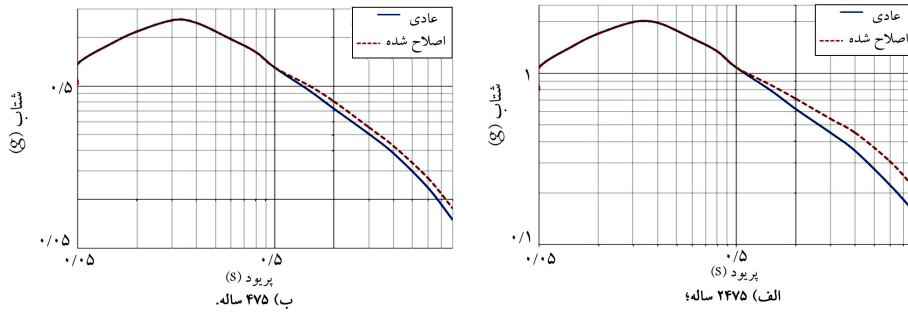
تحلیل خطر لرزه‌ی احتمالاتی برای دو حالت عادی و اصلاح شده در محدوده‌ی شهر تبریز بین طول جغرافیایی ۴۶/۱۵ و ۴۶/۴۵ و همچنین بین عرض جغرافیایی  $۳۸٫۰۰$  و  $۳۸٫۲۰$  درجه انجام شده است. برای تعیین شتاب از هر دو روش از دو رابطه‌ی کاهندگی بور - آنکینسون<sup>[۱۲]</sup> و کمپیل - بزرگ‌نیا<sup>[۱۳]</sup> استفاده شده است. براساس نتایج شجاع طاهری و همکاران<sup>[۱۵]</sup> روابط فوق سازگاری خوبی با لرزه‌خیزی ایران دارند و می‌توان از آنها در تحلیل خطر لرزه‌ی ایران استفاده کرد. محاسبات برای سنگ بستر انجام و در رابطه‌ی بور - آنکینسون از سرعت موج برشی  $V_{30} = ۱۰۰۰$  m/s و در رابطه‌ی کمپیل - بزرگ‌نیا از پارامترهای مرتبط با سنگ سخت استفاده شده است.

در بخش‌های بعد، نتایج میانگین به دست آمده از هر دو رابطه‌ی کاهندگی ارائه و محاسبات برای دو نقطه‌ی A به مختصات  $(۳۸٫۱۰$  و  $۴۶٫۳۰)$  در شمال شهر (نزدیکی گسل) و B به مختصات  $(۳۸٫۰۴$  و  $۴۶٫۳۰)$  در جنوب انجام شده است (شکل ۵).

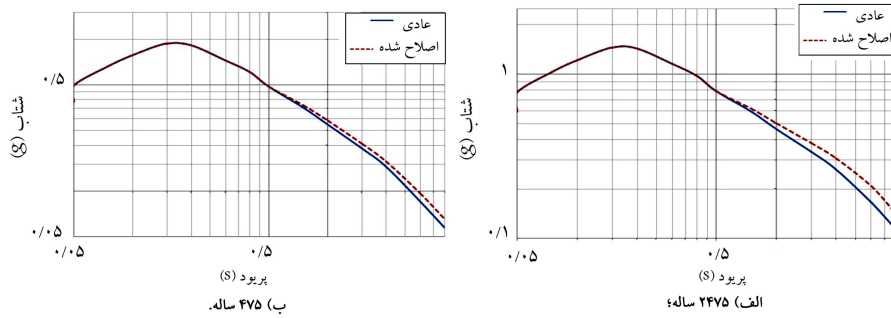
## ۱.۵. طیف خطر یکنواخت

طیف خطر یکنواخت برای دو دوره‌ی بازگشت ۴۷۵ و ۲۴۷۵ ساله برای دو حالت تحلیل خطر لرزه‌ی عادی و اصلاح محاسبه در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل‌های مذکور مشاهده می‌شود، تشدید طیف پاسخ به علت وقوع پالس، از حدود دوره‌ی تناوب ۰٫۶ ثانیه آغاز و با افزایش دوره‌ی تناوب طیف میزان این تشدید نیز بیشتر می‌شود. برای هر دو نقطه‌ی A و B، در دوره‌ی بازگشت ۲۴۷۵ ساله بیشترین میزان تشدید به ترتیب برابر با  $۱٫۴۰$  و  $۱٫۲۵$  و در دوره‌ی بازگشت ۴۷۵ ساله نیز به ترتیب برابر با  $۱٫۱۸$  و  $۱٫۱۴$  است، که در دوره‌ی تناوب طیف ۴ ثانیه رخ می‌دهد. همچنین با توجه به دو نمودار مذکور مشخص می‌شود که با دوری ساخت‌گاه از گسل شمال تبریز، تأثیر پالس و همچنین میزان تشدید کاهش پیدا می‌کند.

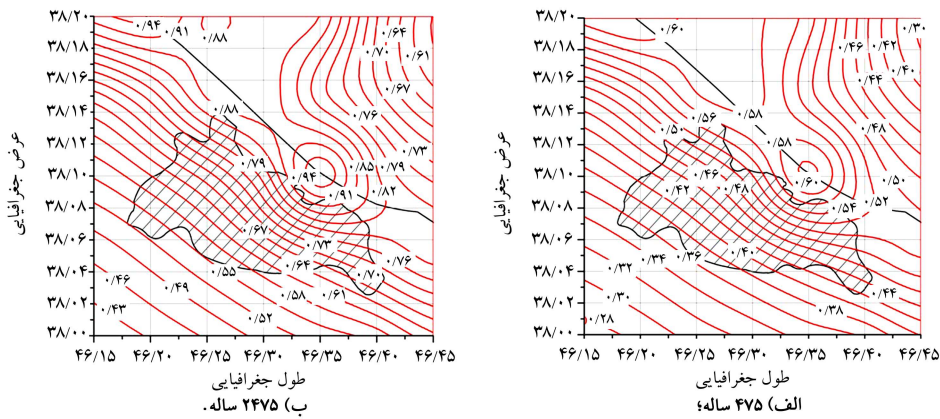
با توجه به روابط ۱۴ و ۱۵، بیشینه‌ی ضریب تشدید شتاب که برابر با  $۳٫۱$



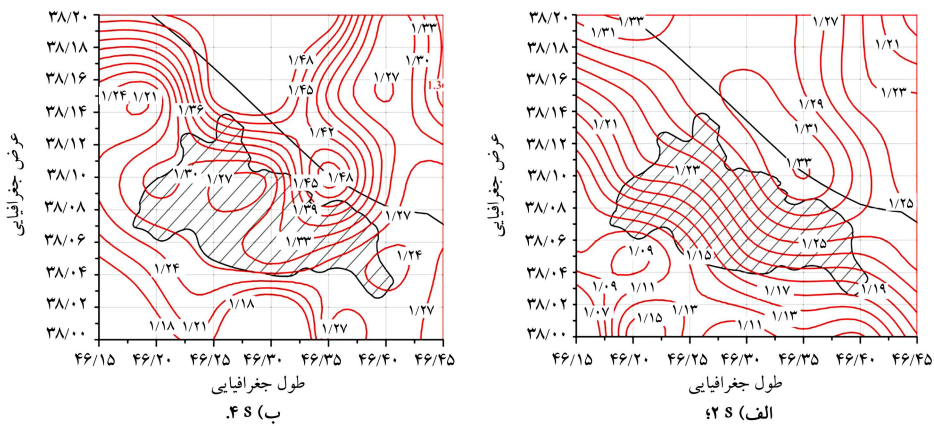
شکل ۶. طیف خطر یکنواخت به دست آمده در نقطه‌ی A از روش تحلیل خطر عادی و اصلاح شده بر حسب g برای ۲ دوره‌ی بازگشت.



شکل ۷. طیف خطر یکنواخت به دست آمده در نقطه‌ی B از روش تحلیل خطر عادی و اصلاح شده بر حسب g برای ۲ دوره‌ی بازگشت.



شکل ۸. نقشه‌ی هم‌تراز شتاب PGA شهر تبریز در ۲ دوره‌ی بازگشت.



شکل ۹. نمودار منحنی هم‌تراز تشدید رخ داده در دوره‌ی تناوب طیفی در شهر تبریز.

پالس کاهش پیدا می‌کند. در حالی که در دوره‌ی تناوب طیف ۳ ثانیه، با اعمال اثر پالس، مشارکت بزرگ‌های بزرگ‌تر افزایش می‌یابد.

دلیل افزایش مشارکت بزرگ‌های کوچک‌تر در دوره‌ی تناوب ۱ ثانیه با اعمال پالس را می‌توان به ارتباط بین بزرگ و  $T/T_p$  نسبت داد. در  $T = 1 \text{ sec}$  طبق رابطه‌های ۱۳ تا ۱۶، بیشترین میزان تشدید برای  $T/T_p$  مساوی با ۱ و نواحی نزدیک به آن به دست می‌آید. در این نسبت، میزان ضریب کاهش انحراف معیار، از کمترین میزان خود، که در  $T/T_p$  برابر با ۰/۲۱ ایجاد می‌شود، فاصله دارد و تأثیر کاهش آن در نرخ فراگذشت کم است. طبق رابطه‌ی ۲۰، بزرگای برابر با ۵/۸۰ می‌تواند دوره‌ی تناوب پالس را برابر با ۱ ثانیه ایجاد کند. بنابراین، بزرگ‌های نزدیک به ۵/۸۰ می‌توانند بیشترین نقش را در نرخ فراگذشت شتاب طیفی داشته باشند. میزان مشارکت بزرگ‌های بزرگ‌تر برای سطوح شتاب دوره‌های بازگشت ۴۷۵ و ۲۴۷۵ ساله زیادتر از بزرگ‌های کوچک‌تر هستند. بنابراین، به دلیل تأثیر پارامتر  $T_p$  برای حالتی که پالس در نظر گرفته شده است، میزان مشارکت بزرگ‌های بزرگ‌تر تعدیل می‌شود و هرچه این بزرگ‌ها بیشتر باشد، این اثر تعدیل نیز به علت فاصله‌ی بیشتر  $T/T_p$  از ۱ بیشتر می‌شود.

با مقایسه‌ی دو بخش الف و ب شکل ۱۰ می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش سطح شتاب، برای شتاب طیفی دوره‌ی تناوب ۱ ثانیه، تأثیر  $T/T_p$  در میزان مشارکت بزرگ‌های کوچک‌تر در تأثیر افزایش شتاب در میزان مشارکت بزرگ‌های بزرگ‌تر غلبه می‌کند. زیرا میزان مشارکت پالس در نرخ فراگذشت، با افزایش سطح شتاب افزایش می‌یابد و بنابراین، تأثیر پارامترهای دخیل در میزان تشدید ناشی از رخداد پالس، مانند دوره‌ی تناوب پالس، با افزایش سطح شتاب افزایش می‌یابد.

برای دوره‌ی تناوب طیف ۳ ثانیه طبق رابطه‌ی ۲۰، بزرگایی که می‌تواند دوره‌ی تناوب پالس ۳ ثانیه را ایجاد کند، برابر با ۶/۹ است. پس انتظار می‌رود که با اعمال پالس، اثر بزرگ‌های نزدیک ۶/۹، بیشتر شود. با این حال، نزدیکی این بزرگ‌ها به بزرگ‌های بزرگ مانند ۷/۴، برخلاف حالت شتاب طیفی دوره‌ی تناوب ۱ ثانیه باعث نشده است تا مشارکت بزرگای ۷/۴ خیلی کاهش یابد و مشاهده می‌شود که با اعمال پالس، مشارکت بزرگ‌های بزرگ‌تر بیشتر شود.

### ۲.۶. تجزیه‌ی خطر فاصله

برخلاف محاسبات انجام شده برای بزرگا مشاهده شده است که تأثیر پالس در مشارکت فواصل مختلف در دوره‌های تناوب مختلف دارای روند ثابتی است. از این رو، در این بخش برای بررسی اثر پالس فقط مشارکت فاصله در شتاب طیفی دوره‌ی تناوب ۳ ثانیه بیان می‌شود. منظور از فاصله در این محاسبات، نزدیک‌ترین فاصله‌ی ساخت‌گاه تا گسل است ( $r_{jb}$ )، که در رابطه‌ی کاهندگی بور - آنکینسون هم به کار رفته است. شکل ۱۲، مشارکت فواصل مختلف را در شتاب طیفی متناظر با دوره‌ی تناوب ۳ ثانیه در دو حالت وقوع و عدم وقوع پالس نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با اعمال اثر پالس، مشارکت فواصل کوتاه‌تر بیشتر می‌شود، که یکی از دلایل آن افزایش احتمال وقوع پالس با کاهش فاصله است (رابطه‌ی ۶).

### ۳.۶. تجزیه‌ی خطر اپسیلون ( $\epsilon$ )

اپسیلون، بیان‌گر میزان انحراف از مقدار پیش‌بینی شده (میان) با استفاده از رابطه‌ی کاهندگی است و در واقع، میزان تغییرپذیری مشاهده‌شده در شتاب را نشان می‌دهد. مقادیر مثبت  $\epsilon$ ، نتایج بیشتر از مقدار متوسط شتاب به دست آمده از رابطه‌ی کاهندگی و مقادیر منفی، میزان کمتر از مقدار متوسط شتاب را نشان می‌دهند.<sup>[۱۳]</sup> در شکل ۱۳

در شتاب طیفی دوره‌ی تناوب ۲ ثانیه از میزان ۱/۱۳ تا ۱/۲۹ متغیر و بیشترین میزان تشدید رخ داده بر روی گسل شمال تبریز به میزان ۱/۳۳ بوده است. همچنین، میزان تشدید رخ داده به علت وقوع پالس در شتاب طیفی دوره‌ی تناوب ۴ ثانیه، در محدوده‌ی شهر تبریز از میزان ۱/۲۴ تا ۱/۴۵ متغیر و بیشترین میزان تشدید رخ داده بر روی گسل شمال تبریز به میزان ۱/۴۸ بوده است. مطابق شکل‌های مذکور مشخص می‌شود که ساختمان‌های بلند و سازه‌های با دوره‌ی تناوب اصلی بزرگ‌تر در صورتی که شرایط حوزه‌ی نزدیک در طراحی آنها مدنظر قرار نگرفته باشد، بیشتر در معرض آسیب‌های ناشی از این پدیده خواهند بود و میزان این آسیب‌پذیری برای سازه‌های نزدیک به گسل شمال تبریز بیشتر است.

## ۶. تحلیل نتایج تجزیه‌ی خطر لرزه‌ی

با اعمال اثر پالس، پارامترهای جدیدی مانند دوره‌ی تناوب پالس وارد محاسبات می‌شود و با توجه به اهمیت این پارامتر در میزان تشدید و تقلیل رخ داده در سطح شتاب، نیاز به ارائه‌ی روابط برای تفکیک این پارامتر احساس می‌شود. همچنین با اعمال اثر پالس، شرایط جدیدی به وجود می‌آید و آن هم احتمال فراگذشت پارامتر موردنظر از سطح تعیین‌شده در حالتی است که پالس رخ داده یا اینکه پالس رخ نداده باشد.

احتمال اینکه شتاب طیفی ( $S_a$ ) برابر با  $x$  تحت تأثیر زمین‌لرزه‌ی پالس‌گونه به وجود آمده است را می‌توان با استفاده از قانون بیز، به صورت رابطه‌ی ۲۲ محاسبه کرد. در این رابطه، صورت و مخرج، نرخ وقوع زلزله هستند که برای به دست آوردن صورت کسر، فقط باید حالتی را در نظر گرفت که پالس رخ داده است.<sup>[۲۳]</sup>

$$P(\text{pulse} | S_a = x) = \frac{(S_a > x, \text{pulse})}{(S_a > x)} \quad (22)$$

دوره‌ی تناوب پالس پارامتر بسیار مهمی در تحلیل خطر احتمالاتی اصلاح شده است و پاسخ سازه‌ی ر را بسیار تحت تأثیر قرار می‌دهد. با محاسبه‌ی میزان مشارکت پالس در نرخ فراگذشت برای یک سطح شتاب، می‌توان توزیع دوره‌ی تناوب پالس را محاسبه کرد. رابطه‌ی ۲۳ می‌تواند تابع چگالی احتمال مشارکت دوره‌ی تناوب پالس در شتاب  $S_a$  برابر با  $x$  به دست می‌دهد.<sup>[۲۳]</sup>

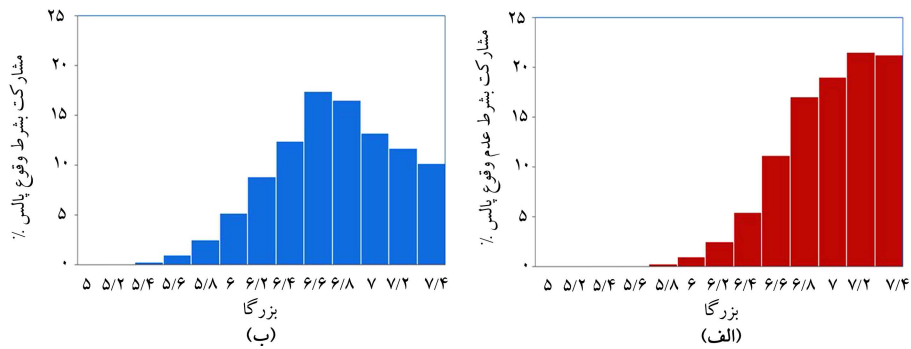
$$P(T_p | S_a = x, \text{Pulse}) = \frac{\lambda(T_p = t_p, S_a = x, \text{pulse})}{\lambda(S_a = x, \text{pulse})} \quad (23)$$

### ۱.۶. تجزیه‌ی خطر بزرگ

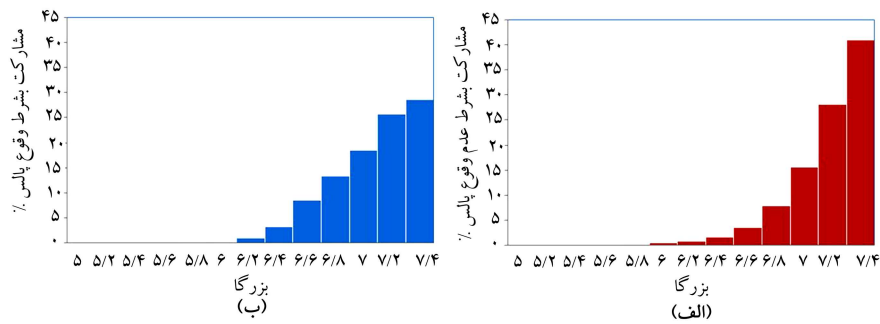
بزرگای زلزله یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در میزان شتاب حاصل از یک زلزله در ساخت‌گاه است. با توجه به تأثیر زیاد این پارامتر در نرخ فراگذشت شتاب طیفی، تجزیه‌ی خطر آن اهمیت زیادی به خصوص برای روش‌های تحلیل خطر لرزه‌ی حوزه‌ی نزدیک دارد.

برای بررسی اثر پالس در میزان مشارکت بزرگا، در نقطه‌ی  $A$  که نزدیک به گسل شمال تبریز است، تجزیه‌ی خطر بزرگا به شرط وقوع و عدم وقوع پالس در شتاب متناظر دوره‌ی بازگشت ۲۴۷۵ ساله به ترتیب در ۲ دوره‌ی تناوب ۱ و ۳ ثانیه محاسبه شده و در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با اثر پالس، روند متفاوتی در مشارکت بزرگا در دوره‌ی تناوب طیف‌های متفاوت رخ می‌دهد. در دوره‌ی تناوب طیف ۱ ثانیه با اعمال اثر پالس، مشارکت بزرگ‌های متوسط بیشتر می‌شود و میانگین و مود بزرگا نسبت به حالت عدم وقوع

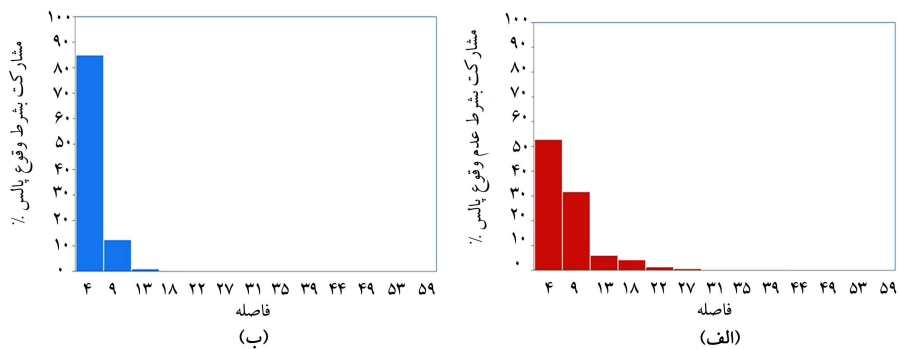




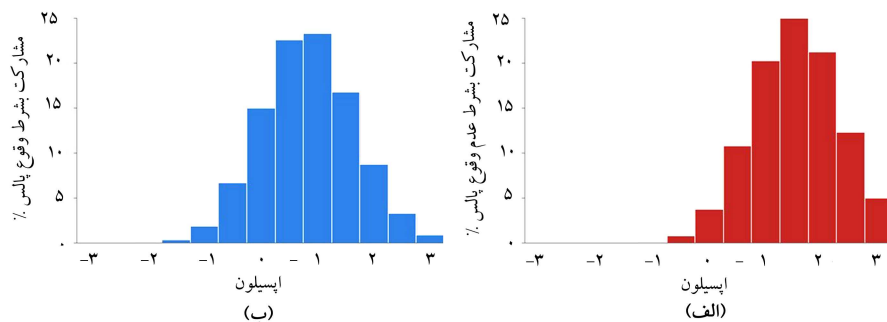
شکل ۱۰. تجزیه‌ی خطر بزرگا در موقعیت (۴۶,۳۰ و ۳۸,۱۰) برای شتاب دوری بازگشت ۲۴۷۵ ساله در دوری تناوب ۱ ثانیه به شرط: الف) عدم وقوع پالس و ب) وقوع پالس.



شکل ۱۱. تجزیه‌ی خطر بزرگا در موقعیت (۴۶,۳۰ و ۳۸,۱۰) برای شتاب دوری بازگشت ۲۴۷۵ ساله در دوری تناوب ۳ ثانیه به شرط: الف) عدم وقوع پالس و ب) وقوع پالس.



شکل ۱۲. تجزیه‌ی خطر فاصله در موقعیت (۴۶,۳۰ و ۳۸,۱۰) برای شتاب دوری بازگشت ۲۴۷۵ ساله در دوری تناوب ۳ ثانیه به شرط: الف) عدم وقوع پالس و ب) وقوع پالس.



شکل ۱۳. تجزیه‌ی خطر e در موقعیت (۴۶,۳۰ و ۳۸,۱۰) برای شتاب دوری بازگشت ۲۴۷۵ ساله در دوری تناوب ۳ ثانیه به شرط: الف) عدم وقوع پالس و ب) وقوع پالس.

آن نیز در گسل افزایش می‌یابد. بنابراین با افزایش میزان مشارکت بزرگ‌های بزرگ‌تر، طول بیشتری از گسل‌ها گسیخته می‌شود. برای یک ساخت‌گاه با فاصله‌ی معین از گسل ( $r$ )، با افزایش طول گسیختگی، میزان پارامتر  $s$  (فاصله‌ی کانون سطحی زلزله تا نقطه‌ی که کمترین فاصله را تا ساخت‌گاه دارد) افزایش می‌یابد (شکل ۱). همچنین، طبق رابطه‌ی ۶، احتمال رخداد پالس با افزایش پارامتر  $s$  افزایش می‌یابد. در نتیجه با افزایش احتمال رخداد پالس و یا کاهش احتمال عدم رخداد پالس، تشدید صورت‌گرفته به‌واسطه‌ی وقوع پالس سهم بیشتری را در نرخ فراگذشت خواهد داشت. البته برای دوره‌ی تناوب طیف ۱ ثانیه، همان‌طور که در بخش تجزیه‌ی خطر بزرگ مشاهده شد، با افزایش سطح شتاب، میزان مشارکت بزرگ‌های متوسط افزایش خواهد یافت. بنابراین در این دوره‌ی تناوب، شیب افزایش تابع مشارکت پالس، نسبت به دوره‌ی تناوب ۳ ثانیه کمتر است.

#### ۵.۶. تجزیه‌ی خطر دوره‌ی تناوب پالس

تجزیه‌ی خطر دوره‌ی تناوب پالس مرتبط با جهت‌پذیری در این بخش بیان شده است. طبق روابط ارائه‌شده، این پارامتر تأثیر زیادی در میزان تشدید رخداد در شتاب طیفی حاصل از روابط کاهندگی و همچنین میزان کاهش انحراف معیار آن دارد. در شکل ۱۵، تجزیه‌ی خطر دوره‌ی تناوب پالس در نقطه‌ی  $A$ ، در شتاب طیفی متناظر با دوره‌ی بازگشت ۲۴۷۵ ساله در ۲ دوره‌ی تناوب طیفی ۱ و ۳ ثانیه نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، میزان مشارکت دوره‌ی تناوب پالس‌های نزدیک به دوره‌ی تناوب طیف مد نظر، در هر دو حالت بیشتر از مشارکت سایر دوره‌ی

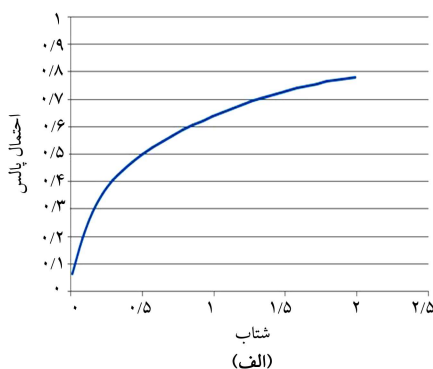
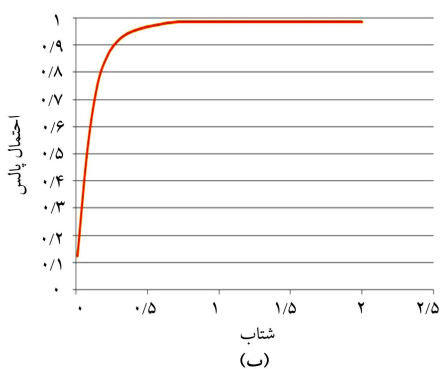
میزان مشارکت اپسیلون‌های مختلف در تحلیل خطر احتمالاتی به‌شرط وقوع و عدم وقوع پالس نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با اعمال اثر پالس میزان مشارکت اپسیلون‌های کوچک‌تر افزایش پیدا کرده است. علت این امر، تشدید رخداد به‌واسطه‌ی وقوع پالس در شتاب طیفی حاصل از روابط کاهندگی است، که باعث می‌شود اپسیلون‌های کوچک‌تر بتوانند در سطح شتاب ( $x$ ) مشارکت بیشتری یابند.

#### ۴.۶. تجزیه خطر احتمال وقوع پالس

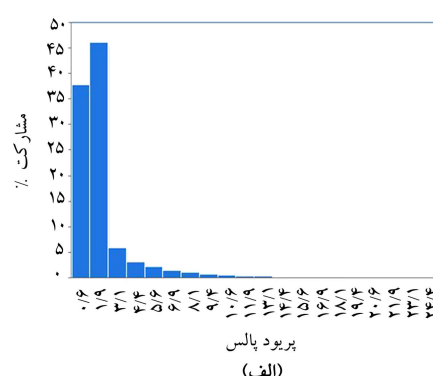
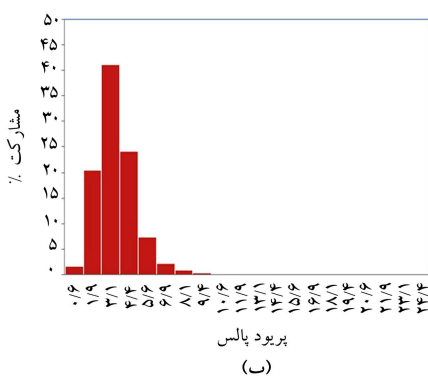
این پارامتر در واقع بیان‌گر مشارکت پالس در نرخ فراگذشت است که با استفاده از رابطه‌ی ۲۲ بیان می‌شود و متفاوت از تابع احتمال وقوع پالس است که در رابطه‌های ۷ و ۸ بیان شده است. احتمال رخداد پالس، که در این روابط بیان شده است، تابعی از شرایط هندسی منطقه است.

شکل ۱۴، میزان مشارکت پالس در نرخ فراگذشت شتاب از سطوح مختلف در نظر گرفته‌شده را برای دو دوره‌ی تناوب طیفی ۱ و ۳ ثانیه در نقطه‌ی  $A$  نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش سطح شتاب، میزان احتمال مشارکت پالس در نرخ فراگذشت بیشتر می‌شود. همچنین، شیب خط برای دوره‌ی تناوب ۳ ثانیه بیشتر از دوره‌ی تناوب ۱ ثانیه است، که بیانگر احتمال تأثیر بیشتر پالس در نرخ فراگذشت شتاب در دوره‌ی تناوب طیفی ۳ ثانیه نسبت به دوره‌ی تناوب طیفی ۱ ثانیه است.

با افزایش سطح شتاب، میزان مشارکت بزرگ‌های بزرگ‌تر افزایش می‌یابد. طبق رابطه‌ی ولز - کاپراسمیت<sup>[۹]</sup> هرچه بزرگای زلزله بیشتر شود، طول گسیختگی ناشی از



شکل ۱۴. میزان مشارکت پالس در موقعیت (۳۸/۱۰ و ۴۶/۳۰) برای نرخ فراگذشت شتاب در نقطه‌ی  $A$  در ۲ دوره‌ی تناوب: الف) ۱ ثانیه و ب) ۳ ثانیه.



شکل ۱۵. تجزیه‌ی خطر دوره‌ی تناوب پالس در موقعیت (۳۸/۱۰ و ۴۶/۳۰) برای شتاب متناظر دوره‌ی بازگشت ۲۴۷۵ ساله در ۲ دوره‌ی تناوب طیفی: الف) ۱ ثانیه و ب) ۳ ثانیه.

تحلیل خطر حوزه‌ی نزدیک افزایش می‌یابد. نرخ افزایش مشارکت پالس با افزایش سطح شتاب طیفی در دوره‌ی تناوب ۳ ثانیه بیشتر از دوره‌ی تناوب ۱ ثانیه است. به نحوی که برای شتاب طیفی دوره‌ی تناوب ۳ ثانیه، احتمال مشارکت پالس در سطوح پایین شتاب به بالای ۹۰٪ می‌رسد. در حالی که برای شتاب طیفی دوره‌ی تناوب ۱ ثانیه، احتمال مشارکت پالس در سطوح بالای شتاب کمتر از ۷۵٪ است.

با مقایسه‌ی نتایج تجزیه‌ی خطر بزرگ مشخص شده است که اعمال اثر حوزه‌ی نزدیک برای شتاب طیفی دوره‌ی تناوب ۱ ثانیه با دوره‌ی تناوب ۳ ثانیه متفاوت است. برای دوره‌ی تناوب ۱ ثانیه، اعمال اثر پالس باعث مشارکت بیشتر بزرگ‌های متوسط و کوچک می‌شود. در حالی که برای دوره‌ی تناوب ۳ ثانیه، اعمال اثر پالس باعث افزایش مشارکت بزرگ‌های متوسط و بزرگ می‌شود و انتظار می‌رود برای دوره‌های تناوب بلند، مشارکت بزرگ‌های بزرگ‌تر بیشتر شود. با تجزیه‌ی خطر فاصله مشخص شده است که با اعمال اثر پالس، مشارکت فواصل کوچک‌تر بیشتر می‌شود.

تجزیه‌ی خطر پالس برای ۲ شتاب طیفی دوره‌ی تناوب ۱ و ۳ ثانیه نشان داد که میزان مشارکت به ترتیب برای دوره‌ی تناوب پالس ۱/۹ ثانیه و ۳/۱ ثانیه بیشتر از سایر دوره‌ی تناوب پالس‌هاست. نتایج تجزیه‌ی خطر دوره‌ی تناوب پالس نشان می‌دهد که مشارکت دوره‌های تناوب پالس‌های برابر یا نزدیک به دوره‌ی تناوب طیفی، که تجزیه‌ی خطر برای آن انجام شده است، بیشتر از سایر دوره‌های تناوب خواهد بود. طبق نتایج به دست آمده برای مشارکت اپسیلون مشخص شده است که با اعمال اثر پالس، مشارکت اپسیلون‌های کوچک‌تر افزایش یافته است.

## پانویس‌ها

۱. این معیار با استفاده از رابطه‌ی  $AIC = 2k - 2 \ln L$  بیان می‌شود.  $k$  تعداد پارامترهای موجود در رابطه و  $\ln L$ ، لگاریتم احتمال مدل است. این رابطه دقت رابطه و مطابقت آن را سبک سنگین می‌کند.

2. Joyner- Boor
3. Kijikio
4. Bayes' rule

## منابع (References)

1. Zare, M. "The risk of construction in neighborhood of North Tabriz Fault and seismic active faults across Iran", *Earthquake Engineering and Seismology Bulletin Report*, No. 2&3 (2001) (in Persian).
2. Tothong, P., Cornell, C.A. and Baker, J.W. "Explicit-directivity-pulse inclusion in probabilistic seismic hazard analysis", *Earthquake Spectra*, **23**(4), pp. 867- 891 (2007).
3. Shahi, K.S. and Baker, J.W. "An empirically calibrated framework for including the effects of near-fault directivity in probabilistic seismic hazard analysis", *Bulletin of*

تناوب پالس‌هاست. این میزان نزدیکی، در شتاب طیفی دوره‌ی تناوب ۳ ثانیه بهتر مشاهده می‌شود، جایی که مد دوره‌ی تناوب پالس برابر با ۳/۱ ثانیه است، که به علت تأثیر زیاد پالس در این دوره‌ی تناوب طیفی است.

## ۷. نتیجه‌گیری

براساس نقشه‌ی هم‌تراز شتاب تحلیل خطر عادی و حوزه‌ی نزدیک مشخص می‌شود که در عرض‌های بالایی شهر تبریز میزان شتاب طیفی بیشتر از سایر نقاط این شهر است. علاوه بر این، براساس نقشه‌های هم‌تراز تشدید مشخص است که با بیشتر شدن میزان دوره‌ی تناوب طیفی، میزان تشدید رخ داده ناشی از اعمال تحلیل خطر حوزه‌ی نزدیک بیشتر می‌شود. از این رو ساختمان‌های بلندمرتبه واقع در قسمت‌های شمالی شهر در صورتی که برای شرایط حوزه‌ی نزدیک طراحی نشده باشند، بیشتر در معرض آسیب‌های ناشی از اثر حوزه‌ی نزدیک خواهند بود. طبق نتایج به دست آمده، تشدید طیف پاسخ، برای دوره‌های تناوب طیفی بیشتر از ۰/۶ ثانیه آغاز می‌شود و میزان این تشدید با بالا رفتن دوره‌ی تناوب طیف افزایش می‌یابد. همچنین مشخص است که تشدید رخ داده برای دوره‌ی بازگشت ۲۴۷۵ ساله بیشتر از تشدید رخ داده برای دوره‌ی تناوب طیف دوره‌ی بازگشت ۴۷۵ ساله است. تابع احتمال رخداد پالس (تابع مشارکت پالس)، در نقاط در نظر گرفته شده برای شتاب طیفی در ۲ دوره‌ی تناوب ۱ و ۳ ثانیه رسم شده است. طبق این نمودارها، برای نقاط در نظر گرفته شده و در هر ۲ دوره‌ی تناوب، با افزایش سطح شتاب، میزان مشارکت پالس در

*the Seismological Society of America*, **101**(2), pp. 742-755 (2011).

4. Chioccarelli, E. and Iervolino, I. "Near-source seismic hazard and design scenarios", *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, **42**(4), pp. 603-622 (2012).
5. Cornell, C.A. "Engineering seismic risk analysis", *Bull. Seism. Soc Am.*, **58**(5), pp. 1583-1606 (1968).
6. Iervolino, I. and Cornell, C.A. "Probability of occurrence of velocity pulses in near-source ground motions", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **98**(5), pp. 2262-2277 (2008).
7. Baker, J.W., *An Introduction to Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA)*, Version 1.3 (1st October 2008).
8. Somerville, P.G., Smith, N.F., Graves, R.W. and Abrahamson, N.A. "Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity", *Seismol. Res. Lett.*, **68**(1), pp. 199-222 (1997).
9. Wells, D.L. and Coppersmith, K.J. "New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **84**(4), pp. 974-1002 (1994).

10. Baker, J.W. "Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **97**(5), pp. 1486-1501 (2007).
11. Zare, M. and Sabzali, S. "Spectral attenuation of strong motions in Iran", in *Proceedings, Third International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, pp. 749-758 (2006).
12. Hessami, K., Pantosti, D., Tabassi, H. and et al. "Paleoearthquakes and slip rates of the North-Tabriz fault, NW Iran: Preliminary results", *Annals of Geophysics*, **46**(5), (2003).
13. Boor, M.D. and Atkinson, M.G. "Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01s and 10.0s", *Earthquake Spectra*, **24**(1), pp. 99-138 (2008).
14. Bozorgnia, Y. and Campbell, K.W. "The vertical-to-horizontal response spectral ratio and tentative procedures for developing simplified V/H and vertical design spectra", *Earthquake Engineering*, **8**(2), pp. 175-207 (2004).
15. Shoja-Taheri, J., Naserieh, S. and Hadi, G. "A test of the applicability of NGA models to the strong ground-motion data in the Iranian plateau", *Earthquake Engineering*, **14**(2), pp. 278-292 (2010).
16. <http://www.iiees.ac.ir> (August 2012).