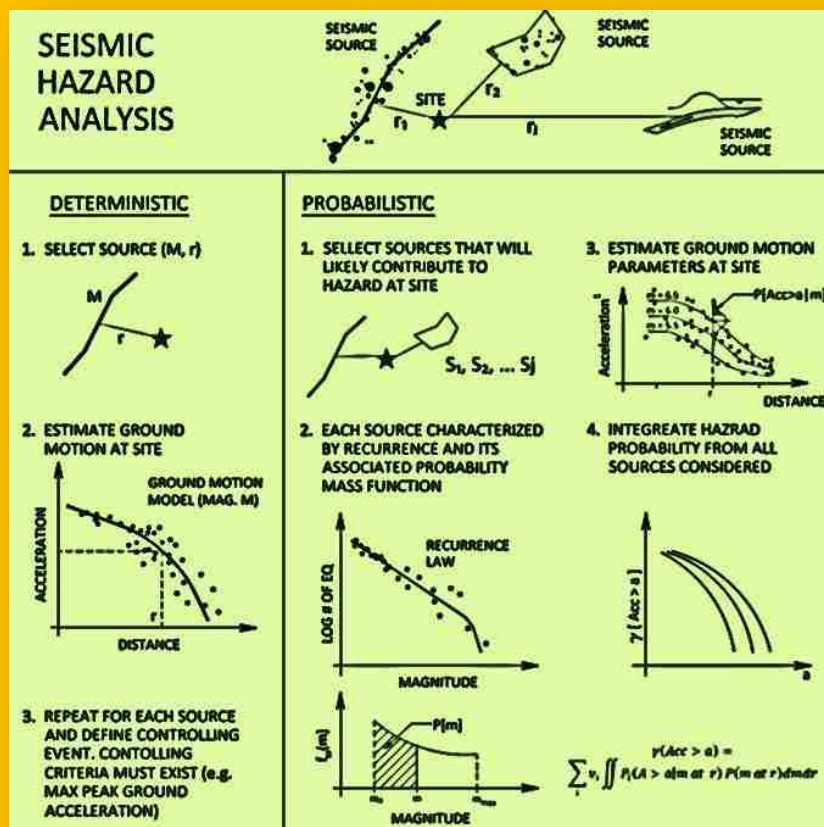


تحليل احتمالاتی خطر زلزله

با مثال های عددی



دکتر علی بیت اللهی

مقدمه:

برآورد خطر زمین لرزه تخمین پارامترهای جنبش زمین در یک ساختمان می باشد که از فعالیت چشمه های با پتانسیل لرزه ای در یک دوره زمانی مشخص نتیجه می شود و روشهای آن عبارتند از:

الف- روش تجربی-آماری: ساده ترین روش ارزیابی خطر زمین لرزه است و مبتنی برآمار زمین لرزه های روی داده در منطقه مورد مطالعه می باشد.

ب- روش قطعی: در این روش جنبش بدست آمده برای ساختمان مورد نظر تنها بوسیله زمین لرزه ای با بزرگی مشخص در یک چشمه به فاصله مشخص از ساختمان بیان می شود صرفنظر از اینکه احتمال وقوع زمین لرزه ای با خصوصیات متفاوت وجود داشته باشد. به همین دلیل برای ساختگاههای مهم، انجام برآورد خطر زمین لرزه با این روش قابل اطمینان نیست.

ج- روش احتمالاتی: در این روش برخلاف روش قطعی تمام بزرگی های ممکن (معمولاً بیش از M) حاصل از چشمه های مهم که در فواصل مختلفی از ساختمان قرار گرفته اند با در نظر گرفتن در صد احتمال وقوع بیان می شود. بنابراین در این روش تعیین جنبش زمین با یک احتمال مشخص برای ساختمان امکان پذیر است.

مراحل انجام برآورد خطر زمین لرزه به روش احتمالاتی در چهار مرحله به صورت زیر می باشد:

- تعیین چشمه های بالقوه زمین لرزه
- تعیین رابطه دوره بازگشت، توزیع بزرگی، فاصله و نرخ میانگین بارز رخدادها
- به کارگیری رابطه تضعیف مناسب
- محاسبه منحنی خطر برای ساختمان

یک فرض اساسی در تحلیل احتمالاتی خطر زمین لرزه این است که قانون بازگشت حاصل از لرزه خیزی گذشته قابل کاربرد در محاسبه روند لرزه خیزی آینده می باشد. مدلی که در برآورد خطر زمین لرزه از آن استفاده می شود براین فرض استوار است که بزرگی ها، مسافتها و اثر جنبش زمین ناشی از زمین لرزه بر روی ساختمان به صورت اتفاقی بوده و قابل تغییر می باشد. همچنین نشان می دهد که اندازه حقیقی محل دقیق و زمان وقوع زمین لرزه ای که در آینده به وقوع خواهد پیوست به صورت قطعی قابل پیش بینی نیست. به طور کلی مدلی که بیشتر در برآورد خطر زلزله مورد استفاده قرار می گیرد مدل پواسون است.

برای نمونه مراحل تحلیل خطر به روش احتمالاتی را برای یک چشمه خطی و ساختگاه فرضی، با مشخصات داده شده زیر به ترتیب بررسی و محاسبه می گردد.

۱- تعیین مشخصات چشمه :

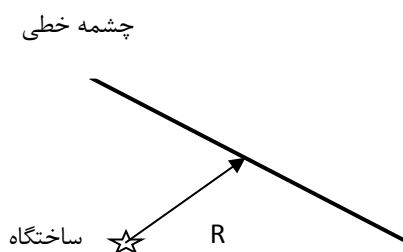
طول چشمه خطی $L = 100 \text{ km}$,

حداقل بزرگای زلزله $M. = 4$,

حداکثر بزرگای زلزله $M_{\max} = 7.5$,

فاصله چشمه تا ساختگاه $R = 20 \text{ km}$, $n = 1$

بازه زمانی کاتالوگ $T = 2013 - 1900 = 113 \text{ year}$



جدول ۱- مشخصات زلزله های چشمه خطی

Number (ردیف زلزله ها)	M (بزرگای زلزله)	N (فراوانی)
۱	۴	۳
۲	۴,۵	۳
۳	۵	۳
۴	۵,۵	۳
۵	۶	۳
۶	۶,۵	۳
۷	۷	۳
۸	۷,۵	۳

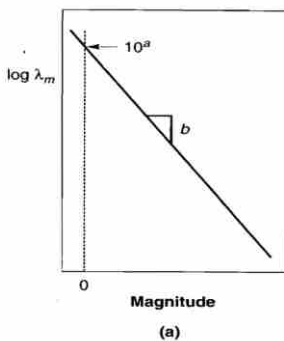
۲- تعیین رابطه دوره بازگشت، محاسبه تابع چگالی بزرگا، تابع چگالی فاصله و نرخ میانگین بارز رویدادها:

۲-۱- تعیین رابطه دوره بازگشت:

بزرگای زمین لرزه هایی که سرچشمه می تواند تولید کند متفاوت می باشد. برای تمام چشمه ها یک بزرگای بیشینه (M_{max}) وجود دارد که هر چشمه زمین لرزه هایی با بزرگای متفاوت تا بیشینه بزرگا ایجاد میکند. امکان وقوع زمین لرزه ای با بزرگای بیشتر از بزرگای بیشینه وجود ندارد. توزیع بزرگای زمین لرزه ها در یک دوره زمانی مشخص با یک قانون بازگشت به نام قانون گوتنبرگ ریشتر توضیح داده می شود. رابطه خطی گوتنبرگ ریشتر نحوه توزیع زلزله ها در بزرگای مختلف را نشان می دهد.

$$\log N_c(M) = a - bM \quad (1)$$

N: تعداد زمین لرزه های مساوی یا بزرگتر از M



A: (عرض از مبدا خط) ویژگی زمین ساختی ناحیه مرتبط

B: (شیب خط) هرچه مقدار b بیشتر باشد نمایانگر تعداد کمتر زلزله های با

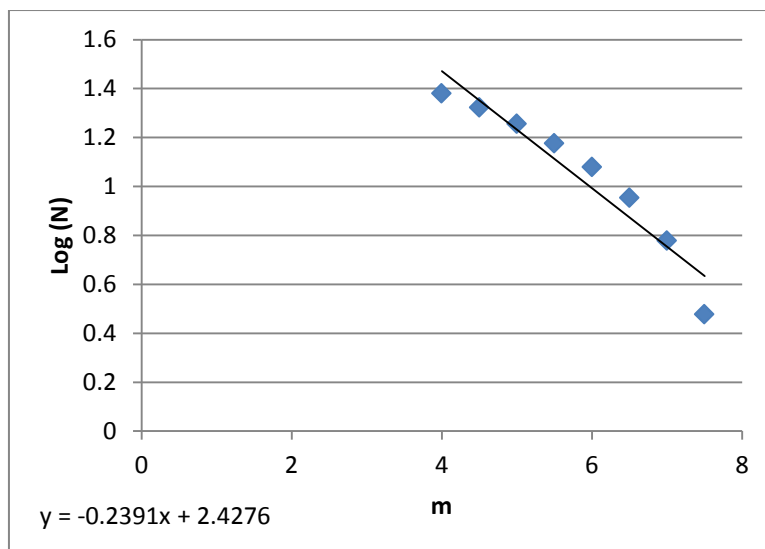
بزرگای بیشتر در آن ناحیه است.

برای بدست آوردن رابطه بازگشت قانون بازگشت گوتنبرگ ریشتر ابتدا جدول زیر را با توجه به مشخصات چشمه مورد نظر تکمیل می کنیم.

جدول ۲- اعداد مورد استفاده در رسم منحنی رابطه بازگشتی چشمه خطی

M (بزرگا)	N_c (فروانی)	$\log N_c$
$m \geq 4$	۲۴	۱,۳۸۰,۲۱۱
$m \geq 4,5$	۲۱	۱,۳۲۲,۲۱۹
$m \geq 5$	۱۸	۱,۲۵۵,۲۷۳
$m \geq 5,5$	۱۵	۱,۱۷۶,۰۹۱
$m \geq 6$	۱۲	۱,۰۷۹,۱۸۱
$m \geq 6,5$	۹	۰,۹۵۴,۲۴۳
$m \geq 7$	۶	۰,۷۷۸,۱۵۱
$m \geq 7,5$	۳	۰,۴۷۷,۱۲۱

منحنی (Log N) نسبت به بزرگای (m) را رسم می کنیم تا از روی معادله خط برازش شده بر روی منحنی، رابطه خطی قانون گوتنبرگ ریشتر را بدست بیاوریم.



شکل ۱- منحنی رابطه بازگشتی برای چشمه خطی

با توجه به معادله خط نمودار بالا و مقایسه آن با رابطه گوتنبرگ ریشتر مقدار ضرایب لرزه خیزی را بدست

می آوریم: $\log(N) = a - bm$, $Y = 2.427 - 0.239X$

$$a = 2.427, \quad b = 0.239$$

$$\log(N_m) = 2.427 - 0.239 m$$

تعداد رویداد با هر بزرگای تقسیم بر بازه زمانی کاتالوگ را آهنگ سالیانه میانگین رویداد (λ_m) می نامیم.

$$\lambda_m = N_m / T \quad (2)$$

رابطه خطی گوتنبرگ ریشتر را می توان به صورت زیر نیز بیان کرد:

$$\ln \lambda_m = \alpha - \beta m \quad (3), \quad \lambda_m = e^{\alpha - \beta m}$$

برای چشمه خطی مورد نظرها توجه به روابط زیره خواهیم داشت:

$$\alpha = \ln 10 \cdot a = 5.588, \quad \beta = \ln 10 \cdot b = 0.550$$

$$\ln \lambda_m = 5.588 - 0.550 m, \quad \lambda_m = e^{5.588 - 0.550 m}$$

۲-۲- محاسبه نرخ میانگین بارز رخدادها :

اختلاف بین آهنگ سالانه میانگین رویداد برای دو بزرگی حداقل و حداکثر را نرخ میانگین بارز رخدادها (۷)

$$v = [\lambda_{m0} - \lambda_{mmax}] \quad (4)$$

می نامیم.

آهنگ میانگین بارز رخدادها برای چشمه خطی طبق رابطه (۲) و (۴) به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$\lambda_{m0} = N_{m0} / T = 24 / 113 = 0,212389 \quad \lambda_{mmax} = N_{mmax} / T = 3 / 113 = 0,026549$$

$$v = 0,212389 - 0,026549 = 0,185841$$

۲-۳- محاسبه تابع چگالی فاصله :

از انجایی که پارامتر فاصله می تواند به صورتهای مختلفی (فاصله تا رو مرکز، فاصله تا گسیختگی سطحی ، فاصله کانونی ،.....) تعریف گردد. عدم قطعیت فضایی باید بر اساس پارامتر فاصله مناسب و مربوط به کار برده شود. عدم قطعیت فاصله چشمه تا ساختگاه با یک تابع چگالی احتمال $f_R(r)$ بیان می گردد. که به شکل چشمه لرزه ای بستگی دارد. معمولاً فرض بر این است که زمین لرزه ها به صورت همسان در یک پهنه چشمه مشخص توزیع شده اند یعنی احتمال وقوعشان در هر نقطه باهم برابر است

احتمال اینکه زلزله در فاصله r و $r+dr$ از ساختگاه بر روی چشمه روی دهد برابر است با احتمال اینکه زمین لرزه ای روی قطعه کوچکی از چشمه خطی بین l و $l+dl$ رخ دهد پس خواهیم داشت :

$$f_L(l) dl = f_R(r) dr \quad (12)$$

با فرض اینکه زمین لرزه ها به طور همسان در طول یک گسل به طول L توزیع شده اند:

$$f_L(l) = 1/L, \quad dl = L/n \quad f_L(l) dl = 1/L * L/n = 1/n$$

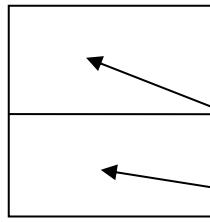
در نتیجه برای هر چشمه که به n قطعه مساوی تقسیم شده است. خواهیم داشت :

$$f_R(r) dr = 1/n \quad (13)$$

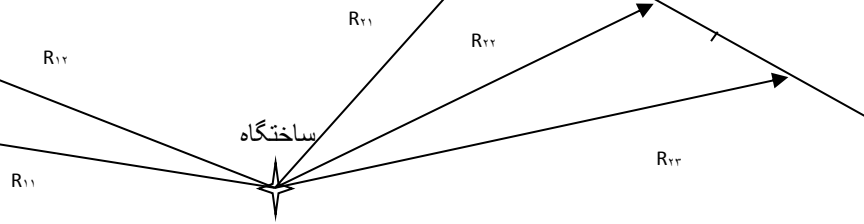
برای محاسبه چگالی احتمال فاصله برای چشمه خطی مورد نظر چون فقط یک فاصله از ساختگاه تا وسط چشمه داده شده است. پس $n=1$ می باشد و طبق رابطه (۱۳) خواهیم داشت:

$$f_R(r) dr = 1/n = 1/1 = 1$$

چشمه ناحیه ای (۱)



چشمه خطی (۲)



شکل ۲- فاصله ساختگاه تا چشمه ها

مثال: در شکل ۲ فاصله ساختگاه تا هر چشمه را داریم. تابع چگالی احتمال فاصله برای هر چشمه به صورت زیر محاسبه می گردد:

برای چشمه ناحیه ای که به ۲ قسمت مساوی تقسیم شده است خواهیم داشت :

$$f(r) dr = 1/n = 1/2 = 0.5$$

برای چشمه خطی که به ۳ قسمت مساوی تقسیم شده است. خواهیم داشت :

$$f(r) dr = 1/n = 1/3 = 0.33$$

۲-۴ - محاسبه تابع چگالی بزرگا :

تابع توزیع احتمال: در نظریه احتمال و آمار این تابع بیانگر احتمال هر یک از مقادیر متغیر تصادفی (در مورد متغیر گسسته) و یا احتمال قرار گرفتن متغیر در یک بازه مشخص (در مورد متغیر تصادفی پیوسته) میباشد.

تابع توزیع تجمعی احتمال یک متغیر تصادفی، تابعی است از دامنه آن متغیر بر بازه $[0, 1, \dots]$ به طوری که احتمال رخ دادن پیشامدهای با مقدار عددی کمتر از آن را نمایش می دهد. و به صورت دقیق به شکل زیر تعریف می شود :

$$F_X(x) = P [X \leq x] \quad (5)$$

تابع توزیع بزرگا برای قانون گوتنبرگ- ریشتر با حد زیرین را می توان به عنوان تابع توزیع تجمعی معرفی نمود. که مفهوم آن احتمال اینکه m کوچکتر از M رخ دهد به شرطی که m بزرگتر از m_0 باشد را نشان می دهد.

$$F_M(m) = P[M < m | m > m_0] = \lambda_m - \lambda_{m_0} / \lambda_{m_0} = 1 - e^{-\beta(m - m_0)} \quad (6)$$

تابع چگالی احتمال بزرگی از مشتق تابع توزیع تجمعی بدست می آید:

$$f_M(m) = d(F_M(m)) / dm = \beta e^{-\beta(m - m_0)} \quad (7)$$

در نتیجه تابع چگالی احتمال بزرگی که با یک بیشینه و کمینه بزرگی مشخص شده است به صورت زیر تعیین می گردد:

$$F_M(m) = P[M < m \mid m_{\min} \leq m \leq m_{\max}] = 1 - e^{-\beta(m - m_{\min})} / 1 - e^{-\beta(m_{\max} - m_{\min})} \quad (8)$$

$$f_M(m) = d(F_M(m)) / dm = \beta e^{-\beta(m - m_{\min})} \quad m_{\min} \leq m \leq m_{\max} \quad (9)$$

$$C = 1 / 1 - e^{-\beta(m_{\max} - m_{\min})} \quad (10)$$

برای این چشمه خطی مورد نظر که $m_{\max} = 7.5$, $m_{\min} = 4$ می باشد.

پس $4 \leq m \leq 7.5$ است و خواهیم داشت :

$$C = 1 / 1 - e^{-\beta(m_{\max} - m_{\min})} = 1 / 1 - e^{-0.55(7.5-4)} = 1.17$$

$$f_m(m) = 1.17 * 0.55 * e^{-0.55(m-4)}$$

حال برای بدست آوردن احتمال اینکه بزرگای یک مقدارمیان M_i بین دو مقدار با اختلاف ΔM باشد را از حاصل ضرب چگالی احتمال آن بزرگای در اختلاف بین دو بزرگای بدست می آوریم :

$$P(M_i - \Delta M/2 \leq M_i < M_i + \Delta M/2) \approx f(M_i) \Delta M \quad (11)$$

$$\sum f(M_i) \Delta M = 1$$

جدول زیر را با توجه به بزرگای زلزله های داده شده برای چشمه خطی مورد نظر را بدست می آوریم.

جدول ۳- محاسبه حاصلضرب چگالی احتمال بزرگای M_{mid} در $\Delta M = 0.5$

$M_i - \Delta M/2 \leq M_i < M_i + \Delta M/2$	$f(M_{mid})$	$P(M_i - \Delta M/2 \leq M_i < M_i + \Delta M/2) = f(M_{mid}) \Delta M$
$4 \leq 4.25 < 4.5$	0.060832	0.030416
$4.5 \leq 4.75 < 5$	0.0420993	0.02104965
$5 \leq 5.25 < 5.5$	0.0323072	0.0161536
$5.5 \leq 5.75 < 6$	0.0240776	0.0120388
$6 \leq 6.25 < 6.5$	0.0186685	0.00933425
$6.5 \leq 6.75 < 7$	0.0141801	0.00709005
$7 \leq 7.25 < 7.5$	0.0107708	0.0053854
		SUM = 0.99619 ≈ 1

۳- انتخاب رابطه کاهندگی و محاسبه PGA :

با دور شدن از چشمه لرزه ای جنبش زمین کمتر احساس می شود. که نشان دهنده میرایی جنبش زمین می باشد. میزان این میرایی در مناطق مختلف زمین متفاوت می باشد. که به بزرگای زمین لرزه ، فاصله تا ساختگاه، مشخصات چشمه و مسیر انتقال موج بستگی دارد. در نقاط مختلف دنیا مطالعات زیادی انجام شده و روابط کاهندگی مختلفی بدست آمده است. که از آنها می توان به روابط کاهندگی کرنل، کرامر و همکاران، بزرگنیا و بور اشاره کرد. در انتخاب رابطه کاهندگی مناسب باید به رژیم زمین ساختی ناحیه نیز باید توجه شود چرا که کاهندگی بیشینه شتاب در رژیم های مختلف زمین ساختی و بخشهای مختلف پوسته زمین به دلیل ویژگیهای زلزله شناختی متفاوت (از نظر دوام، محتوای فرکانسی و افت تنش) با هم متفاوت است. در صورتی که از بیش از یک رابطه استفاده کرده باشیم در نهایت از درخت منطقی برای نتیجه نهایی استفاده خواهیم کرد.

در اینجا به طور نمونه را بطه کاهندگی بور را معرفی می کنیم .

$$\log PGA = -0.038 + 0.216(M_{mid} - 6) - 0.777 \cdot \log(\sqrt{R^2 + 5.48^2}) \quad (14)$$

در رابطه بالا R فاصله ساختگاه تا چشمه می باشد و M_{mid} مقدار میانی بزرگی بین دو حد فاصل می باشد.

با توجه به مفروضات داده شده برای این چشمه سطحی مقدار PGA را برای m_{mid} های مختلف در فاصله

$R = 20 \text{ km}$ در رابطه کاهندگی بور (۱۴) قرار می دهیم و جدول زیر را خواهیم داشت :

جدول ۴- نتایج محاسبه شتاب PGA با استفاده از رابطه کاهندگی بور

m_{mid}	R(km)	Log PGA	PGA(g)
۴,۲۵	۲۰	-۱,۴۳۹۱۱	۰,۰۳۶۳۸۲
۴,۷۵	۲۰	-۱,۳۳۱۱۱	۰,۰۴۶۶۵۴
۵,۲۵	۲۰	-۱,۲۲۳۱۱	۰,۰۵۹۸۲۵
۵,۷۵	۲۰	-۱,۱۱۵۱۱	۰,۰۷۶۷۱۶
۶,۲۵	۲۰	-۱,۰۰۷۱۱	۰,۰۹۸۳۷۵
۶,۷۵	۲۰	-۰,۸۹۹۱۱	۰,۱۲۶۱۵
۷,۲۵	۲۰	-۰,۷۹۱۱۱	۰,۱۶۱۷۶۵

۴- منحنی خطر برای ساختگاه

۴-۱ - محاسبات مربوط به رسم منحنی خطر:

قضیه احتمال کلی: اگر یک فضای نمونه به n زیر فضا افراز شده باشد. رویداد A را می توان برحسب n رویداد که اشتراک دوه دوی آنها تهی و اتحادشان کامل است، بیان کرد:

$$P(A) = P(A \& E_1) + \dots + P(A \& E_n) \quad (15)$$

A یک فضای نمونه می باشد که به n رویداد تقسیم شده است.

E_i ها زیر فضا می باشد که نشان دهنده رویداد i ام از n رویداد می باشد.

با استفاده از قضیه احتمال شرطی داریم :

$$P(A \& E_i) = P(A | E_i) P(E_i) \quad P(A) = \sum_{i=1}^n P(A | E_i) P(E_i) \quad (16)$$

کاربرد قضیه کلی احتمال در تحلیل خطر احتمالاتی ، تفکیک خطر کلی به خطر ناشی از وقوع زلزله با بزرگای متفاوت در فواصل مختلف می باشد.

احتمال رویداد یک مقدار مشخص Y^* از پارامتر جنبش شدید زمین (Y) برای یک زمین لرزه در یک محل احتمالی چشمه را محاسبه می کنیم و سپس در احتمال اینکه زمین لرزه با بزرگای یاد شده در محل ساختگاه رخ دهد ضرب می شود.

احتمال اینکه پارامتر مشخص جنبش (Y) با مقدار مشخص Y^* رخ دهد را می توان با نظریه احتمال کلی مطابق محاسبه نمود.

$$P[Y > Y^*] = P[Y > Y^* | X] P[X] = \int P[Y > Y^* | X] f_X(x).dx \quad (17)$$

در این رابطه X بردار متغیرهای تصادفی است که به Y تاثیر می گذارد. که این متغیرها به بزرگای M و فاصله R محدود می شوند.

و با فرض مستقل بودن رویدادها احتمال رویداد را می توان به صورت رابطه زیر نوشت:

$$P[Y > Y^*] = \iint P[Y > Y^* | m, r] f_M(m) f_R(r).dm.dr \quad (18)$$

در رابطه بالا اگر بیشینه شتاب افقی زمین PGA را به جای پارامتر Y قرار دهیم و شتاب مشخص acc را به جای Y^* قرار دهیم خواهیم داشت :

$$P[PGA > acc | EQ] = \iint P[PGA > acc | EQ: m, r] f_M(m) f_R(r).dm.dr \quad (19)$$

و با تقریب خواهیم داشت :

$$(20)$$

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

در رابطه بالا $f_M(m)$ و $f_R(r)$ توابع چگالی احتمال به ترتیب برای بزرگا و فاصله می باشند. که در مراحل قبل (۲-۴ و ۳-۲) تعریف شده اند.

$P(PGA > acc|EQ: R, M)$: احتمال شرطی افزایش شتاب PGA از مقدار شتاب مورد نظر acc در صورت رویداد زمینلرزه ای با بزرگی M در فاصله R از ساختگاه را می باشد. و با استفاده از تابع Φ به صورت رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$P(PGA > acc | EQ : R, M) = 1 - \Phi \left(\frac{\log(acc) - \log(PGA)}{\sigma_{\log PGA}} \right) \quad (21)$$

در رابطه (۲۱)، Φ تابع توزیع استاندارد نرمال می باشد که با توجه به جدول توزیع نرمال استاندارد بدست می آید. در پیوست این جدول آورده شده است.

یکی از مهمترین توزیع های احتمالی پیوسته در نظریه احتمالات توزیع نرمال است. علت نام گذاری و همچنین اهمیت این توزیع، همخوانی بسیاری از مقادیر حاصل شده، هنگام نوسان های طبیعی و فیزیکی پیرامون یک مقدار ثابت با مقادیر حاصل از این توزیع است. دلیل اصلی این پدیده، نقش توزیع نرمال در قضیه حد مرکزی است. به زبان ساده، در قضیه حد مرکزی نشان داده میشود که تحت شرایطی، مجموع مقادیر حاصل از متغیرهای مختلف که هرکدام میانگین و پراکندگی متنهای دارند، با افزایش تعداد متغیرها، دارای توزیعی بسیار نزدیک به توزیع نرمال است. این قانون که تحت شرایط و مفروضات طبیعی نیز برقرار است، سبب شده که برابند نوسان های مختلف تعداد زیادی از متغیرهای ناشناخته، در طبیعت به صورت توزیع نرمال آشکار شود. تابع احتمال این توزیع دارای دو پارامتر است که یکی تعیین کننده مکان (μ) و دیگری تعیین کننده مقیاس (σ) توزیع هستند. همچنین میانگین توزیع با پارامتر مکان و پراکندگی آن با پارامتر مقیاس برابر است. منحنی تابع احتمال حول میانگین توزیع متقارن است.

مقدار σ در رابطه (۲۱) طبق فرمول زیر محاسبه می گردد:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}. \quad (22)$$

N تعداد داده ها می باشد که اگر مقدار آن از ۳۰ بیشتر باشد در فرمول بالا به جای $N-1$ از N استفاده می کنند.

$X_i = \log(PGA)$ با قرار دادن تک تک M_{mid} ها در رابطه (۱۴) برای چشمه خطی بدست می آید. که در جدول (۴) مقادیر آن مشخص گردیده است.

$\bar{X}$ میانگین مقادیری است که برای $\log(PGA)$ در جدول (۴) بدست آمده و برابر است با:

$$\bar{X} = 1.11511$$

با قرار دادن این مقادیر در رابطه (۲۲) مقدار $\sigma = 0.233$ بدست می آید.

در جداول (۵) مقدار acc را از $0.05g$ تا $0.70g$ در حد فاصل 0.05 قرار داده ایم تا از رابطه (۲۱) احتمال اینکه PGA از شتاب مورد نظر acc برای هر ترکیب بزرگا - فاصله افزایش یابد $P(PGA > acc | EQ: R, M)$ را بدست آورده و در جدول (۵) قرار می دهیم و طبق رابطه (۲۰) مقادیر بدست آمده را در چگالی احتمال بزرگا و فاصله ضرب کرده یعنی مقادیر بدست آمده برای $P(PGA > acc | EQ: R, M)$ را در $f(M_{mid}) \Delta M * f(R) dR$ ضرب کرده و اعداد بدست آمده را در جدولهای (۵) در ستون معرفی شده قرار می دهیم. تا احتمال فزونی شتاب PGA از مقدار مورد نظر acc برای هر زمین لرزه با بزرگای M_{mid} بدست آید. حال برای بدست آوردن احتمال فزونی شتاب PGA از مقدار مورد نظر acc برای یک زمین لرزه یعنی $P(PGA > acc | EQ)$ طبق رابطه (۲۰) مقادیر بدست آمده برای بزرگای مختلف قبل را برای هر شتاب مورد نظر acc ، با یکدیگر جمع می کنیم و اعداد بدست آمده را در جدولهای (۵) قرار می دهیم.

جدول ۵- نتایج تکرار محاسبات فزونی PGA از شتاب مورد نظر acc برای بزرگای مختلف

در صورت رویداد زمین لرزه ای با بزرگای M در فاصله R

m_{mid}	Log PGA	$P(PGA > 0.05 EQ: R, M)$ $= 1 - \Phi \frac{\log(0.05) - \log(PGA)}{\sigma}$	$P(PGA > acc EQ)$ $= f(M_{mid}) \Delta M * f(R) dR * P(PGA > 0.05 EQ: R, M)$	$P(PGA > 0.10 EQ: R, M)$ $= 1 - \Phi \frac{\log(0.10) - \log(PGA)}{\sigma}$	$P(PGA > acc EQ)$ $= f(M_{mid}) \Delta M * f(R) dR * P(PGA > 0.10 EQ: R, M)$
۴,۲۵	-۱,۴۳۹۱۱	۰,۲۷۷۶	۰,۰۷۷۸۴	۰,۰۳۰۰۵	۰,۰۰۸۴۳
۴,۷۵	-۱,۳۳۱۱۱	۰,۴۵۲۲	۰,۰۹۶۳۲	۰,۰۷۷۸	۰,۰۱۶۵۷
۵,۲۵	-۱,۲۲۳۱۱	۰,۶۲۹۳	۰,۱۰۱۸۱	۰,۱۷۱۱	۰,۰۲۷۶۸
۵,۷۵	-۱,۱۱۵۱۱	۰,۷۸۵۲	۰,۰۹۶۴۹	۰,۳۱۲۱	۰,۰۳۸۳۵
۶,۲۵	-۱,۰۰۷۱۱	۰,۸۹۶۱۷	۰,۰۸۳۶۵	۰,۴۸۸	۰,۰۴۵۵۵
۶,۷۵	-۰,۸۹۹۱۱	۰,۹۵۷۲۸	۰,۰۶۷۸۷	۰,۶۶۶۴	۰,۰۴۷۲۵
۷,۲۵	-۰,۷۹۱۱۱	۰,۹۸۸۷	۰,۰۵۳۲۴	۰,۸۱۳۳	۰,۰۴۳۸
			$\Sigma M = 0.57723$		$\Sigma M = 0.22763$

ادامه جدول ۵- نتایج تکرار محاسبات فزونی PGA از شتاب مورد نظر acc برای بزرگای مختلف

در صورت رویداد زمین لرزه ای با بزرگای M در فاصله R

m_{mid}	Log PGA	$P(PGA > 0.15 EQ: R, M)$ $= 1 - \Phi \frac{\log(0.15) - \log(PGA)}{\sigma}$	$P(PGA > acc EQ)$ $= f(M_{mid}) \Delta M * f(R) dR * P(PGA > 0.15 EQ: R, M)$	$P(PGA > 0.20 EQ: R, M)$ $= 1 - \Phi \frac{\log(0.20) - \log(PGA)}{\sigma}$	$P(PGA > acc EQ)$ $= f(M_{mid}) \Delta M * f(R) dR * P(PGA > 0.20 EQ: R, M)$
۴,۲۵	-۱,۴۳۹۱۱	۰,۰۰۴۵۳	۰,۰۰۱۲۷	۰,۰۰۱۳۵	۳,۷۸۵۶۷E-۰۴
۴,۷۵	-۱,۳۳۱۱۱	۰,۰۱۵	۰,۰۰۳۲	۰,۰۰۳۳۶	۰,۰۰۰۷۱۵۶۸
۵,۲۵	-۱,۲۲۳۱۱	۰,۰۴۳۶۳	۰,۰۰۷۰۶	۰,۰۱۲۵۵	۰,۰۰۲۰۳۰۴۶
۵,۷۵	-۱,۱۱۵۱۱	۰,۱۰۷۴۹	۰,۰۱۳۲۱	۰,۰۳۷۵۴	۰,۰۰۴۶۱۳۲۹
۶,۲۵	-۱,۰۰۷۱۱	۰,۲۱۷۷	۰,۰۲۰۳۲	۰,۰۹۳۴۲	۰,۰۰۸۷۱۹۸۲
۶,۷۵	-۰,۸۹۹۱۱	۰,۳۷۴۵	۰,۰۲۶۵۵	۰,۱۹۷۷	۰,۰۱۴۰۱۶۹۳
۷,۲۵	-۰,۷۹۱۱۱	۰,۵۵۵۷	۰,۰۲۹۹۲	۰,۳۴۸۳	۰,۰۱۸۷۵۵۹۶
			$\Sigma_M = ۰,۱۰۱۵۳$		$\Sigma_M = ۰,۰۴۹۲۳۰۷۱$

m_{mid}	Log PGA	$P(PGA > 0.25 EQ: R, M)$ $= 1 - \Phi \frac{\log(0.25) - \log(PGA)}{\sigma}$	$P(PGA > acc EQ)$ $= f(M_{mid}) \Delta M * f(R) dR * P(PGA > 0.25 EQ: R, M)$	$P(PGA > 0.30 EQ: R, M)$ $= 1 - \Phi \frac{\log(0.30) - \log(PGA)}{\sigma}$	$P(PGA > acc EQ)$ $= f(M_{mid}) \Delta M * f(R) dR * P(PGA > 0.30 EQ: R, M)$
۴,۲۵	-۱,۴۳۹۱۱	۰,۰۰۰۲۳۳	۶,۵۳۳۷۹E-۰۵	۳,۲E-۰۵	۸,۹۷E-۰۶
۴,۷۵	-۱,۳۳۱۱۱	۰,۰۰۱۳۵	۰,۰۰۰۲۸۷۵۵	۰,۰۰۰۲۳۳	۴,۹۶E-۰۵
۵,۲۵	-۱,۲۲۳۱۱	۰,۰۰۳۹۱	۶,۳۲۵۹۹E-۰۴	۰,۰۰۱۳۵	۲,۱۸E-۰۴
۵,۷۵	-۱,۱۱۵۱۱	۰,۰۱۳۹	۰,۰۰۱۷۰۸۱۷	۰,۰۰۵۵۴	۶,۸۱E-۰۴
۶,۲۵	-۱,۰۰۷۱۱	۰,۰۴۱۸۲	۰,۰۰۳۹۰۳۴۸	۰,۰۱۹۲۳	۱,۷۹E-۰۳
۶,۷۵	-۰,۸۹۹۱۱	۰,۱۰۲۰۴	۰,۰۰۷۲۳۴۶۴	۰,۰۵۳۷	۳,۸۱E-۰۳
۷,۲۵	-۰,۷۹۱۱۱	۰,۲۰۹	۰,۰۱۱۲۵۴۶۵	۰,۱۲۵۰۷	۶,۷۴E-۰۳
			$\Sigma_M = ۰,۰۲۵۰۸۶۴۲$		$\Sigma_M = ۱,۳۳E-۰۲$

ادامه جدول ۵- نتایج تکرار محاسبات فزونی PGA از شتاب مورد نظر acc برای بزرگهای مختلف

در صورت رویداد زمین لرزه ای با بزرگای M در فاصله R

m_{mid}	Log PGA	$P(PGA > 0.35 EQ: R, M)$ $= 1 - \Phi \frac{\log(0.35) - \log(PGA)}{\sigma}$	$P(PGA > acc EQ)$ $= f(M_{mid}) \Delta M * f(R) dR * P(PGA > 0.35 EQ: R, M)$	$P(PGA > 0.40 EQ: R, M)$ $= 1 - \Phi \frac{\log(0.40) - \log(PGA)}{\sigma}$	$P(PGA > acc EQ)$ $= f(M_{mid}) \Delta M * f(R) dR * P(PGA > 0.40 EQ: R, M)$
۴,۲۵	-۱,۴۳۹۱۱	۳,۲E-۰۵	۸,۹۷E-۰۶	۳,۴E-۰۶	۹,۵۳E-۰۷
۴,۷۵	-۱,۳۳۱۱۱	۰,۰۰۰۲۳۳	۴,۹۶E-۰۵	۳,۲E-۰۵	۶,۸۲E-۰۶
۵,۲۵	-۱,۲۲۳۱۱	۰,۰۰۱۳۵	۲,۱۸E-۰۴	۰,۰۰۰۲۳۳	۳,۷۷E-۰۵
۵,۷۵	-۱,۱۱۵۱۱	۰,۰۰۲۴	۲,۹۵E-۰۴	۰,۰۰۱۳۵	۱,۶۶E-۰۴
۶,۲۵	-۱,۰۰۷۱۱	۰,۰۰۹۱۴	۸,۵۳E-۰۴	۰,۰۰۴۵۳	۴,۲۳E-۰۴
۶,۷۵	-۰,۸۹۹۱۱	۰,۰۲۸۷۲	۲,۰۴E-۰۳	۰,۰۱۵۷۸	۱,۱۲E-۰۳
۷,۲۵	-۰,۷۹۱۱۱	۰,۰۷۶۳۶	۴,۱۱E-۰۳	۰,۰۴۶۴۸	۲,۵۰E-۰۳
			$\Sigma_M = ۷,۵۷E-۰۴$		$\Sigma_M = ۴,۲۶E-۰۳$

m_{mid}	Log PGA	$P(PGA > 0.45 EQ: R, M)$ $= 1 - \Phi \frac{\log(0.45) - \log(PGA)}{\sigma}$	$P(PGA > acc EQ)$ $= f(M_{mid}) \Delta M * f(R) dR * P(PGA > 0.45 EQ: R, M)$	$P(PGA > 0.50 EQ: R, M)$ $= 1 - \Phi \frac{\log(0.50) - \log(PGA)}{\sigma}$	$P(PGA > acc EQ)$ $= f(M_{mid}) \Delta M * f(R) dR * P(PGA > 0.50 EQ: R, M)$
۴,۲۵	-۱,۴۳۹۱۱	۳,۴E-۰۶	۹,۵۳E-۰۷	۳,۴E-۰۶	۹,۵۳E-۰۷
۴,۷۵	-۱,۳۳۱۱۱	۳,۲E-۰۵	۶,۸۲E-۰۶	۳,۲E-۰۵	۶,۸۲E-۰۶
۵,۲۵	-۱,۲۲۳۱۱	۰,۰۰۰۲۳۳	۳,۷۷E-۰۵	۰,۰۰۰۲۳۳	۳,۷۷E-۰۵
۵,۷۵	-۱,۱۱۵۱۱	۰,۰۰۱۳۵	۱,۶۶E-۰۴	۰,۰۰۰۲۳۳	۲,۸۶E-۰۵
۶,۲۵	-۱,۰۰۷۱۱	۰,۰۰۲۲۶	۲,۱۱E-۰۴	۰,۰۰۱۳۵	۱,۲۶E-۰۴
۶,۷۵	-۰,۸۹۹۱۱	۰,۰۰۸۸۹	۶,۳۰E-۰۴	۰,۰۰۵۲۳	۳,۷۱E-۰۴
۷,۲۵	-۰,۷۹۱۱۱	۰,۰۲۸۷۲	۱,۵۵E-۰۳	۰,۰۱۷۸۶	۹,۶۲E-۰۴

			$\Sigma M = 2,60E-03$		$\Sigma M = 1,03E-03$
--	--	--	-----------------------	--	-----------------------

ادامه جدول ۵- نتایج تکرار محاسبات فزونی PGA از شتاب مورد نظر acc برای بزرگهای مختلف

در صورت رویداد زمین لرزه ای با بزرگای M در فاصله R

m_{mid}	Log PGA	$P(PGA > 0.55 EQ:R,M)$ $= 1 - \Phi \frac{\log(0.55) - \log(PGA)}{\sigma}$	$P(PGA > acc EQ)$ $= f(M_{mid}) \Delta M * f(R) dR * P(PGA > 0.55 EQ:R,M)$	$P(PGA > 0.60 EQ:R,M)$ $= 1 - \Phi \frac{\log(0.60) - \log(PGA)}{\sigma}$	$P(PGA > acc EQ)$ $= f(M_{mid}) \Delta M * f(R) dR * P(PGA > 0.60 EQ:R,M)$
۴,۲۵	-۱,۴۳۹۱۱	$3E-07$	$8,41E-08$	$3E-07$	$8,41E-08$
۴,۷۵	-۱,۳۳۱۱۱	$3,4E-06$	$7,24E-07$	$3,4E-06$	$7,24E-07$
۵,۲۵	-۱,۲۲۳۱۱	$3,2E-05$	$5,18E-06$	$3,2E-05$	$5,18E-06$
۵,۷۵	-۱,۱۱۵۱۱	$0,000233$	$2,86E-05$	$3,2E-05$	$3,93E-06$
۶,۲۵	-۱,۰۰۷۱۱	$0,00135$	$1,26E-04$	$0,000233$	$2,17E-05$
۶,۷۵	-۰,۸۹۹۱۱	$0,00307$	$2,18E-04$	$0,00187$	$1,33E-04$
۷,۲۵	-۰,۷۹۱۱۱	$0,0113$	$6,09E-04$	$0,00734$	$3,90E-04$
			$\Sigma M = 9,87E-04$		$\Sigma M = 5,60E-04$

m_{mid}	Log PGA	$P(PGA > 0.65 EQ:R,M)$ $= 1 - \Phi \frac{\log(0.65) - \log(PGA)}{\sigma}$	$P(PGA > acc EQ)$ $= f(M_{mid}) \Delta M * f(R) dR * P(PGA > 0.65 EQ:R,M)$	$P(PGA > 0.70 EQ:R,M)$ $= 1 - \Phi \frac{\log(0.70) - \log(PGA)}{\sigma}$	$P(PGA > acc EQ)$ $= f(M_{mid}) \Delta M * f(R) dR * P(PGA > 0.70 EQ:R,M)$
۴,۲۵	- ۱,۴۳۹۱۱	$2E-07$	$5,61E-08$	$1E-07$	$2,80E-08$
۴,۷۵	- ۱,۳۳۱۱۱	$3E-07$	$6,39E-08$	$3E-07$	$6,39E-08$
۵,۲۵	- ۱,۲۲۳۱۱	$3,4E-06$	$5,00E-07$	$3,4E-06$	$5,00E-07$
۵,۷۵	- ۱,۱۱۵۱۱	$3,2E-05$	$3,93E-06$	$3,2E-05$	$3,93E-06$
۶,۲۵	- ۱,۰۰۷۱۱	$0,000233$	$2,17E-05$	$0,000233$	$2,17E-05$
۶,۷۵	- ۰,۸۹۹۱۱	$0,00135$	$9,07E-05$	$0,00135$	$9,07E-05$

۷,۲۵	- ۰,۷۹۱۱۱	۰,۰۰۴۸	۲,۵۸E-۰۴	۰,۰۰۳۱۷	۱,۷۱E-۰۴
			$\Sigma_M = ۳,۸۱E-۰۴$		$\Sigma_M = ۲,۹۳E-۰۴$

قبل از این مرحله همه محاسبات به شرط وقوع زلزله است. اکنون به یک مدل زمانی نیاز داریم که اطلاعاتی از توزیع وقوع زلزله در طی زمان به ما ارائه دهد. از آنجائیکه زمین لرزه ها به صورت تصادفی با زمان رخ می دهند. وقوع زمانی بین زمین لرزه ها با یک مدل پواسون توصیف می شود که بیانگر مقادیر یک متغیر تصادفی برای توصیف تعداد وقوع یک رویداد مشخص در یک دوره زمانی مشخص یا در یک ناحیه مشخص است.

طبق رابطه پواسون خواهیم داشت :

$$P[N=n] = \mu^n e^{-\mu} / n! \quad (۲۳)$$

μ متغیر تصادفی و n تعداد وقوع را نشان می دهد.

در رابطه پواسون اگر متغیر تصادفی را آهنگ سالیانه رویداد ضرب در زمان انتخاب کنیم. خواهیم داشت:

$$P[N=n] = (\lambda t)^n e^{-\lambda t} / n! \quad \mu = \lambda t \quad (۲۴)$$

احتمال وقوع حداقل یک رویداد به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$P[N \geq 1] = 1 - e^{-\lambda t} \quad (۲۵)$$

وقتی که رویداد مورد نظر، وقوع (فزونی) بزرگای زمین لرزه خاصی باشد. خواهیم داشت :

$$P[N \geq 1] = 1 - e^{-\lambda_m t}$$

همچنین برای λ_m خواهیم داشت :

$$\lambda_m = v * P(PGA > acc | EQ) \quad (۲۶)$$

مبنای ریاضی رابطه (۲۶) : اگر از رویداد پواسونی با احتمال P نمونه برداری شود رویداد جدید خود یک فرآیند پواسونی با نرخ وقوع P برابر نرخ رویداد اصلی است. وقوع زلزله در منطقه فرایندی پواسونی است، اما همه آنها منجر به افزایش (فراگذشت) یک پارامتر حرکت از یک مقدار معین نمیشود بلکه احتمال این پدیده P است. بنابراین در کل، نرخ فراگذشت برابر مقدار بالا خواهد بود.

در نتیجه احتمال وقوع حداقل یک زلزله با فزونی شتاب مورد نظر acc از شتاب PGA به صورت زیر محاسبه می گردد .

$$P(PGA > acc) = 1 - e^{-vP} \quad (۲۷)$$

که P همان رابطه (۲۰) می باشد که قبلا به صورت زیر معرفی شده است :

$$P = P(PGA > acc|EQ) = \sum_R \sum_M P(PGA > acc|EQ; M, R). f(M). \Delta M. f(R). \Delta R$$

با تقریب رابطه (۲۷) را به صورت زیر خواهیم داشت :

$$Approx: P(PGA > acc) = vP \quad (28)$$

میانگین فاصله زمانی بین دو بار وقوع متوالی زمین لرزه با بزرگای M دوره بازگشت (TR) نامیده می شود. و از رابطه عکس آهنگ سالانه رویداد برای یک بزرگای خاص بدست می آید.

$$TR = 1/\lambda_m \quad (29)$$

$$TR = 1/[1-(1-q)^{1/t}] \quad (30) \quad \text{همچنین داریم :}$$

در رابطه (۳۰)، q احتمال در صد فزونی و t بازه زمانی به سال می باشد.

با استفاده از روابط (۲۰، ۲۷، ۲۸) برای چشمه خطی مورد نظر محاسبات را انجام داده و در جدول (۶) قرار می دهیم. همانطور که قبلا محاسبه شده مقدار $v = 0.185841$ برای چشمه خطی بدست آمده که در روابط بالا جایگزین می گردد.

جدول ۶- احتمال رویداد یک زمین لرزه بر اثر جنبایی چشمه خطی

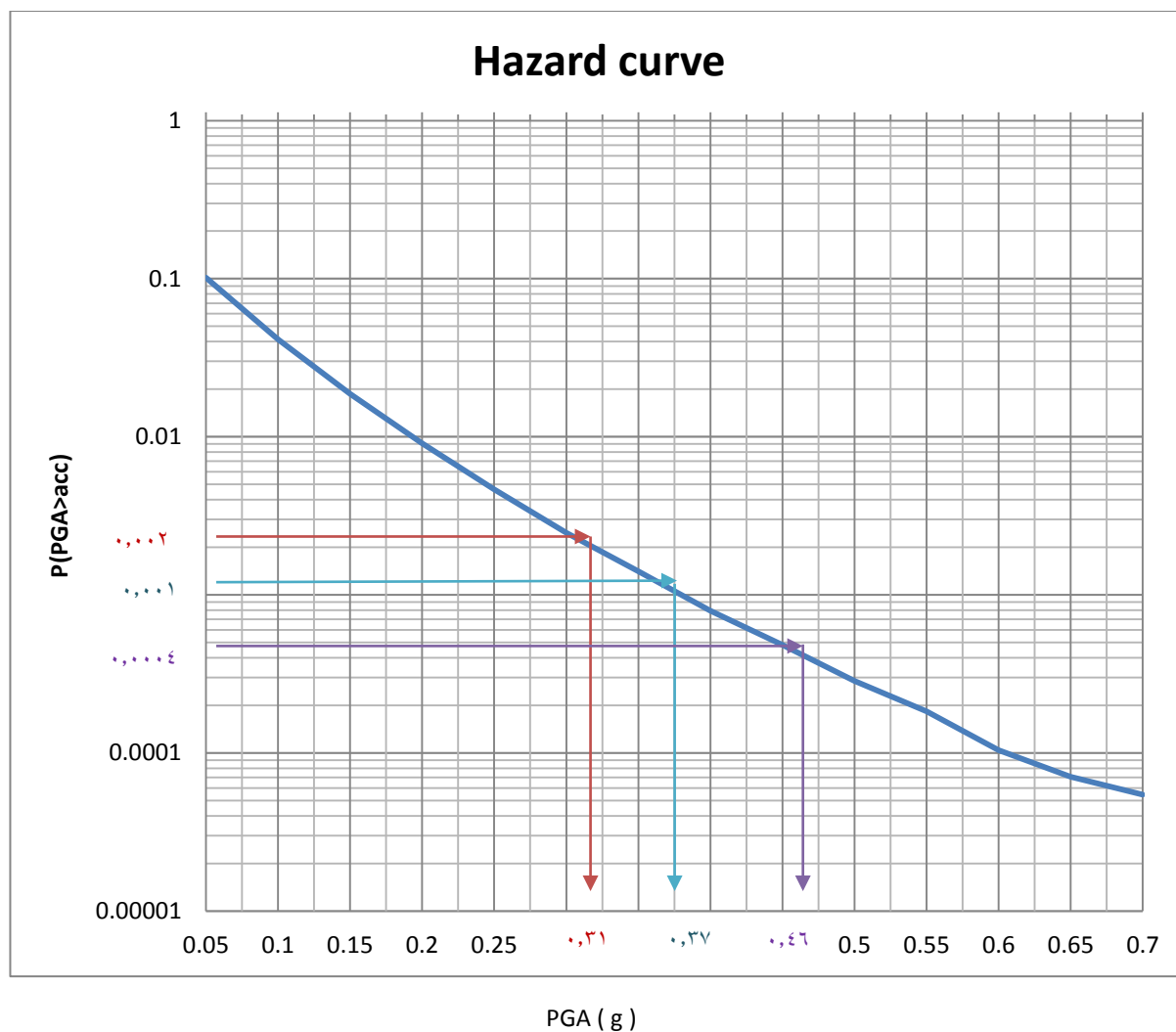
acc	$P(PGA > acc EQ)$ $= \sum_R \sum_M P(PGA > acc EQ; M, R). f(M). \Delta M. f(R). \Delta R$	$P(PGA > acc)$ $= 1 - e^{-vP}$	Approx: $P(PGA > acc)$ $= vP$
۰.۰۵g	۰.۰۵۷۷۲۳	۰.۱۰۱۷۲	۰.۱۰۷۲۷۳
۰.۱۰g	۰.۲۲۷۶۳	۰.۰۴۱۴۲	۰.۰۴۲۳۰۳
۰.۱۵g	۰.۱۰۱۰۳	۰.۰۱۸۶۹۲	۰.۰۱۸۸۶۸
۰.۲۰g	۰.۰۴۹۲۳۰۷۱	۰.۰۰۹۱۰۷۳۵۹	۰.۰۰۹۱۴۹۰۸۴
۰.۲۵g	۰.۰۲۵۰۸۶۴۲	۰.۰۰۴۶۵۱۲۳۵	۰.۰۰۴۶۶۲۰۸۶
۰.۳۰g	۱.۳۳E-۰۲	۰.۰۰۲۴۶۸	۲.۴۷E-۰۳
۰.۳۵g	۷.۵۷E-۰۳	۰.۰۰۱۴۰۶۴	۱.۴۱E-۰۳
۰.۴۰g	۴.۲۶E-۰۴	۰.۰۰۰۷۹۱	۷.۹۱E-۰۴
۰.۴۵g	۲.۶۰E-۰۴	۰.۰۰۰۴۸۳	۴.۸۳E-۰۴

۰,۵۰g	۵,۶۰E-۰۴	۰,۰۰۰۲۸۵	۲,۸۵E-۰۴
۰,۵۵g	۹,۸۷E-۰۴	۰,۰۰۰۱۸۳	۱,۸۳E-۰۴
۰,۶۰g	۵,۶۰E-۰۴	۰,۰۰۰۱۰۴	۱,۰۴E-۰۴
۰,۶۵g	۳,۸۱E-۰۴	۷,۰۷۲E-۰۵	۷,۰۷E-۰۵
۰,۷۰g	۲,۹۳E-۰۴	۵,۴۴E-۰۵	۵,۴۴E-۰۵

۴-۲- رسم منحنی خطر

منحنی های خطر زمین لرزه برحسب نمودار احتمال سالیانه رویداد $P(PGA > acc)$ نسبت به شتاب acc رسم می گردد و تا احتمال سالیانه رویداد یک زلزله با شتاب بیشینه PGA را بدست آوریم. می توان برای هر پهنه سرچشمه لرزه زا منحنی خطر را به طور مجزا بدست آورد و برای محاسبه خطر کلی در ساختگاه مورد نظر با هم ترکیب نمود.

حال برای رسم منحنی خطر نمودار چشمه خطی مورد نظر با توجه به اعداد بدست آمده از جدول (۶) نمودار $P(PGA > acc)$ را نسبت به acc رسم کرده و منحنی خطر به صورت زیر بدست می آید.



شکل ۳- منحنی خطر زلزله برای چشمه خطی

از روی این منحنی می توان از روی نمودار قائم آهنگ سالیانه رویداد و از روی نمودار افقی مقدار بیشینه شتاب را بدست آورد.

حال از روی منحنی شکل (۳) در دوره های بازگشت تعیین شده برای چشمه خطی مورد نظر ابتدا آهنگ سالیانه رویداد طبق رابطه (۲۹) محاسبه می گردد و با استفاده از منحنی خطر در نمودار بالا مقدار PGA بدست می آید.

$$TR = 475, \lambda_m = 1 / TR = 1 / 475 = 0.002105 \text{ (احتمال } 10\% \text{ در } 50 \text{ سال)}, PGA = 0.31 \text{ g}$$

$$TR = 975, \lambda_m = 1 / 975 = 0.001026 \text{ (احتمال } 5\% \text{ در } 50 \text{ سال)}, PGA = 0.37 \text{ g}$$

$$TR = 2475, \lambda_m = 1 / 2475 = 0.000404 \text{ (احتمال } 2\% \text{ در } 50 \text{ سال)}, PGA = 0.46 \text{ g}$$

۳-۴- محاسبه منحنی خطر کلی :

اگر چندین چشمه در اطراف یک ساختگاه داشته باشیم برآورد خطر ناشی از هر یک از چشمه ها با این فرض که چشمه ها از نظر آماری مستقل از همدیگر هستند، انجام می شود و از ترکیب آنها به صورت زیر منحنی خطر کلی بدست می آید.

$$P(PGA > acc) = 1 - \prod_k \{P(PGA < acc)_k\} \quad (31)$$

علامت $\prod$ نشان دهنده این است که جواب های بدست آمده از هر چشمه را باید با یکدیگر ترکیب کنیم.

$$P(PGA < acc) = 1 - P(PGA > acc) \quad (32)$$

از آنجایی که داریم :

برای هر کدام از چشمه ها مقدار $P(PGA > acc)$ را از رابطه (۲۷) بدست آورده و در رابطه زیر قرار می دهیم.

$$P(PGA > acc) = 1 - \{1 - P(PGA > acc)_1\} * \{1 - P(PGA > acc)_2\} * \dots \quad (33)$$

برای نشان دادن چگونگی استفاده از روابط بالا در این مرحله اعداد بدست آمده برای چشمه خطی مورد نظر طبق جدول (۶) را با اعداد بدست آمده از یک چشمه فرضی دیگر، در جدول (۷) جایگزین خواهیم کرد.

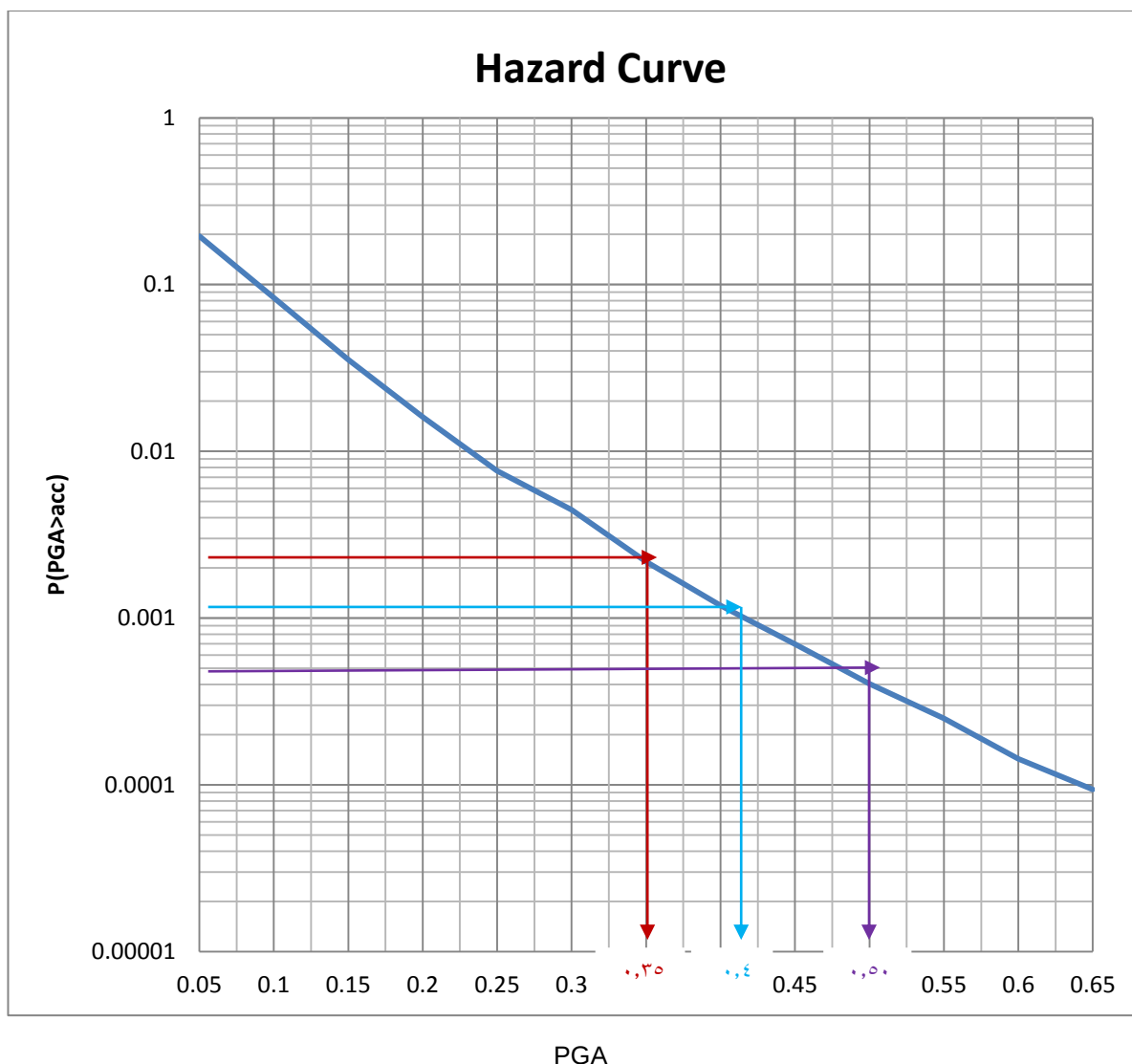
اعداد بدست آمده برای چشمه خطی مورد نظر و یک چشمه فرضی دیگر را در رابطه (۳۳) قرار داده و خواهیم داشت :

جدول ۷- احتمال رویداد یک زمین لرزه بر اثر جنبائی دو چشمه

	source (1)	source (2)	Combined
acc	$P(PGA > acc)$ $= 1 - e^{-vP}$	$P(PGA > acc)$ $= 1 - e^{-vP}$	$P(PGA > acc)$ $= 1 - \{1 - P(PGA > acc)_1\} * \{1 - P(PGA > acc)_2\} * \dots$
۰,۰۵g	۰,۱۰۱۷۲	۰,۱۰۴	۰,۱۹۵۱۴۱

۰,۱۰g	۰,۰۴۱۴۲	۰,۰۴۴	۰,۰۸۳۵۹۸
۰,۱۵g	۰,۰۱۸۶۹۲	۰,۰۱۷	۰,۰۳۵۳۷۴
۰,۲۰g	۰,۰۰۹۱۰۷۳۵۹	۰,۰۰۷	۰,۰۱۶۰۴۴
۰,۲۵g	۰,۰۰۴۶۵۱۲۳۵	۰,۰۰۳	۰,۰۰۷۶۳۷
۰,۳۰g	۰,۰۰۲۴۶۸	۰,۰۰۲	۰,۰۰۴۴۶۳
۰,۳۵g	۰,۰۰۱۴۰۶۴	۰,۰۰۰۷۷	۰,۰۰۲۱۷۵
۰,۴۰g	۰,۰۰۰۷۹۱	۰,۰۰۰۳۹۹	۰,۰۰۱۱۹
۰,۴۵g	۰,۰۰۰۴۸۳	۰,۰۰۰۲۱۴	۰,۰۰۰۶۹۷
۰,۵۰g	۰,۰۰۰۲۸۵	۰,۰۰۰۱۱۸	۰,۰۰۰۴۰۳
۰,۵۵g	۰,۰۰۰۱۸۳	۰,۰۰۰۰۶۶۹	۰,۰۰۰۰۲۵
۰,۶۰g	۰,۰۰۰۱۰۴	۰,۰۰۰۰۳۸۸	۰,۰۰۰۰۱۴۳
۰,۶۵g	۷,۰۷۲E-۰۵	۰,۰۰۰۰۲۲۹	۹,۳۶E-۰۵

در این مرحله طبق جدول (۷) نمودار احتمال رویداد سالانه $\text{Combina P(PGA} > \text{acc)}$ را بر حسب acc رسم کرده و منحنی خطر کلی به صورت شکل زیر بدست می آید.



شکل ۴- منحنی خطر کلی

طبق منحنی فوق در دوره های بازگشت داده شده بیشینه شتاب را بدست می آوریم .

$$TR = 475, \lambda_m = 1 / TR = 1 / 475 = 0.002105 \text{ (احتمال } 10\% \text{ در } 50 \text{ سال)}, PGA = 0.35 g$$

$$TR = 975, \lambda_m = 1 / 975 = 0.001026 \text{ (احتمال } 5\% \text{ در } 50 \text{ سال)}, PGA = 0.41 g$$

$$TR = 2475, \lambda_m = 1 / 2475 = 0.000404 \text{ (احتمال } 2\% \text{ در } 50 \text{ سال)}, PGA = 0.50 g$$

پیوست : جدول توزیع نرمال استاندارد

$$\Phi(u) = F_U(u) = \int_{-\infty}^u \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}x^2} dx$$

$$\Phi(-u) = 1 - \Phi(u)$$

u	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0	0.5000	0.5040	0.5080	0.5120	0.5160	0.5199	0.5239	0.5279	0.5319	0.5359
0.1	0.5398	0.5438	0.5478	0.5517	0.5557	0.5596	0.5636	0.5675	0.5714	0.5753
0.2	0.5793	0.5832	0.5871	0.5910	0.5948	0.5987	0.6026	0.6064	0.6103	0.6141
0.3	0.6179	0.6217	0.6255	0.6293	0.6331	0.6368	0.6406	0.6443	0.6480	0.6517
0.4	0.6554	0.6591	0.6628	0.6664	0.6700	0.6736	0.6772	0.6808	0.6844	0.6879
0.5	0.6915	0.6950	0.6985	0.7019	0.7054	0.7088	0.7123	0.7157	0.7190	0.7224
0.6	0.7257	0.7291	0.7324	0.7357	0.7389	0.7422	0.7454	0.7486	0.7517	0.7549
0.7	0.7580	0.7611	0.7642	0.7673	0.7704	0.7734	0.7764	0.7794	0.7823	0.7852
0.8	0.7881	0.7910	0.7939	0.7967	0.7995	0.8023	0.8051	0.8078	0.8106	0.8133
0.9	0.8159	0.8186	0.8212	0.8238	0.8264	0.8289	0.8315	0.8340	0.8365	0.8389
1	0.84134	0.84375	0.84614	0.84849	0.85083	0.85314	0.85543	0.85769	0.85993	0.86214
1.1	0.86433	0.86650	0.86864	0.87076	0.87286	0.87493	0.87698	0.87900	0.88100	0.88298
1.2	0.88493	0.88686	0.88877	0.89065	0.89251	0.89435	0.89617	0.89796	0.89973	0.90147
1.3	0.90320	0.90490	0.90658	0.90824	0.90988	0.91149	0.91309	0.91466	0.91621	0.91774
1.4	0.91924	0.92073	0.92220	0.92364	0.92507	0.92647	0.92785	0.92922	0.93056	0.93189
1.5	0.93319	0.93448	0.93574	0.93699	0.93822	0.93943	0.94062	0.94179	0.94295	0.94408
1.6	0.94520	0.94630	0.94738	0.94845	0.94950	0.95053	0.95154	0.95254	0.95352	0.95449
1.7	0.95543	0.95637	0.95728	0.95818	0.95907	0.95994	0.96080	0.96164	0.96246	0.96327
1.8	0.96407	0.96485	0.96562	0.96638	0.96712	0.96784	0.96856	0.96926	0.96995	0.97062
1.9	0.97128	0.97193	0.97257	0.97320	0.97381	0.97441	0.97500	0.97558	0.97615	0.97670
2	0.97725	0.97778	0.97831	0.97882	0.97932	0.97982	0.98030	0.98077	0.98124	0.98169
2.1	0.98214	0.98257	0.98300	0.98341	0.98382	0.98422	0.98461	0.98500	0.98537	0.98574
2.2	0.98610	0.98645	0.98679	0.98713	0.98745	0.98778	0.98809	0.98840	0.98870	0.98899
2.3	0.98928	0.98956	0.98983	0.99010	0.99036	0.99061	0.99086	0.99111	0.99134	0.99158
2.4	0.99180	0.99202	0.99224	0.99245	0.99266	0.99286	0.99305	0.99324	0.99343	0.99361
2.5	0.99379	0.99396	0.99413	0.99430	0.99446	0.99461	0.99477	0.99492	0.99506	0.99520
2.6	0.99534	0.99547	0.99560	0.99573	0.99585	0.99598	0.99609	0.99621	0.99632	0.99643
2.7	0.99653	0.99664	0.99674	0.99683	0.99693	0.99702	0.99711	0.99720	0.99728	0.99736
2.8	0.99744	0.99752	0.99760	0.99767	0.99774	0.99781	0.99788	0.99795	0.99801	0.99807
2.9	0.99813	0.99819	0.99825	0.99831	0.99836	0.99841	0.99846	0.99851	0.99856	0.99861
3	0.998650									
3.5	0.999767									
4	0.999968									
4.5	0.9999966									
5	0.9999997									

روش استفاده از جدول توزیع نرمال استاندارد :

ابتدا از روی محور قائم جدول عدد صحیح و رقم اول اعشار متغیر را مشخص کرده ، در مرحله بعد تا دو رقم اعشار متغیر را از روی محور افقی جدول پیدا می کنیم از تلاقی دو محور افقی و عمودی مقدار Φ متغیر از روی جدول بدست می آید.