دومین کنفرانس عمران، معماری و شهرسازی کشورهای جهان اسلام
تبریز – دانشگاه تبریز
۱۳۹۸

تحلیل خطر زلزله به روش احتمالاتی و مقایسه روابط کاهندگی

مهرداد صانعی[۱]، منصور قلعه نوی[۲*]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش زلزله دانشگاه فردوسی مشهد، mehrdad_sanei@mail.um.ac.ir

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران دانشگاه فردوسی مشهد، ghalehnovi@um.ac.ir

چکیده

امروزه با توجه به کثرت روابط کاهندگی و اثرگذاری عامل‌های مختلف بر نتایج حاصل از این روابط ، بررسی این عامل‌های تاثیرگذار اهمیت می‌یابد. پژوهش حاضر انجام تحلیل خطر زلزله برای شهر تهران می‌باشد. با توجه به پایتخت بودن و اهمیت این شهر و بزرگی آن و اجرای سازه‌های مهم در این منطقه انجام تحلیل خطر زلزله برای شهر تهران امری لازم و ضروری به نظر می‌رسد. البته ریزپهنه‌بندی شهر تهران که وزارت مسکن و شهر سازی منتشر کرده است ، این کار انجام شده، اما در آن شناسایی سرچشمه‌های لرزه زا در فاصله ۱۰۰ کیلومتری صورت گرفته است که ما در این تحقیق شناسایی سرچشمه‌های لرزه‌زا در شعاع ۳۰۰ کیلومتری مورد بررسی قرار داده‌ایم و در انتها با رسم منحنی خطر کلی چهار رابطه کاهندگی مورد استفاده در این پژوهش، به مقایسه آن ها با یکدیگر پرداخته‌ایم.

واژه‌های کلیدی: تحلیل خطر احتمالاتی، روابط کاهندگی، بزرگای زلزله، زلزله، تهران.

۱ – مقدمه

در قرن گذشته تعداد زیادی زلزله در کشور رخ داده‌است که در اثر آن‌ها جمعیت زیادی از مردم ایران جان خود را از دست داده‌اند و این زلزله‌ها خسارات مالی و جانی زیادی را وارد کرده‌است. بدین منظور و با توجه به تراکم جمعیتی در برخی از نقاط کشور باید کاری جدی و موثر برای کاهش تخریب‌پذیری شهرها انجام شود.[۱] بدون شک قدم اول برای این امر نیز چیزی جزء تحلیل و ارزیابی خطرات ناشی از زلزله و بدست آوردن تخمین مناسبی از نیروهای ناشی از زلزله نیست. به عبارت دیگر تمام این حقایق اثبات کننده اهمیت تحقیقاتی است که در آن‌ها به تحلیل و ارزیابی خطر زلزله پرداخته می‌شود و طبیعتاً مقاله حاضر نیز در زمره همین تحقیقات قرار خواهد گرفت.[۲] پیچیدگی‌های پدیده‌های طبیعی به طور عام و پدیده‌ای مثل زلزله به طور خاص، سبب شده‌است که با دانش کنونی نتوان این گونه پدیده‌ها را کنترل کرد و به صورت دقیق، موقعیت و بزرگی زلزله‌های آینده را مشخص نمود. در چنین مواردی، استفاده از علم آمار و احتمالات، احتمالاً تنها گزینه ممکن و کاربردی در تحلیل این گونه پدیده‌هاست. از ترکیب مفاهیم احتمالات با علم ژئوتکنیک لرزه‌ای، روش تحلیل احتمالاتی خطر لرزه‌ای (Probabilistic Seismic Hazard Analysis) به وجود آمده است که رایج‌ترین، کامل‌ترین و برترین راهکار جهت برآورد خطر لرزه‌ای محسوب می‌شود. هدف از تحلیل احتمالاتی خطر لرزه‌ای، یک تخمین منطقی از احتمال وقوع پارامترهای وابسته به جنبش زمین در ساختگاهی مشخص می‌باشد.[۳] با چنین پیش زمینه‌ای می‌توان به راحتی هدف و اهمیت تحقیق حاضر را تبیین نمود. در این مقاله تلاش شده است که با استفاده از روش تحلیل احتمالاتی خطر زلزله، نسبت به ارزیابی خطر زلزله در گستره استان تهران اقدام شود.[۴] تحلیل احتمالاتی خطر زلزله شامل چهار گام اساسی زیر می‌باشد:

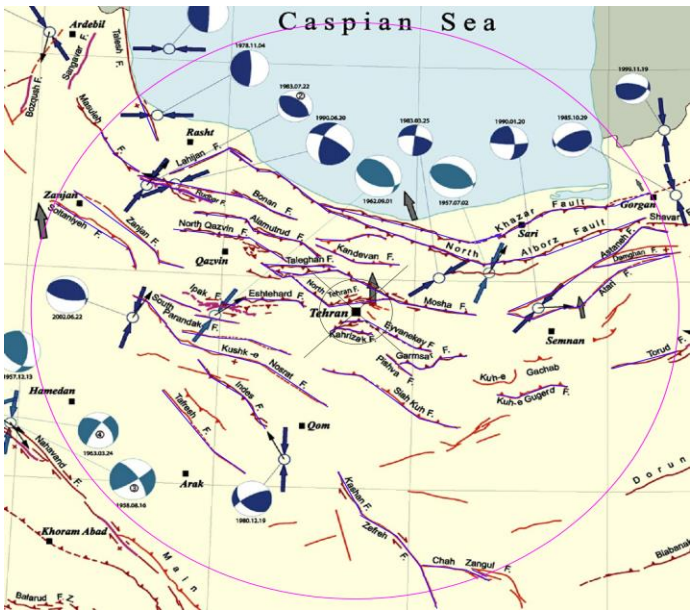
گام اول) مطالعه‌ی لرزه زمین ساخت و مدل سازی چشمه‌های لرزه‌ای.
گام دوم) توسعه‌ی مدل لرزه خیزی و بدست آوردن پارامترهای لرزه‌ای.
گام سوم) انتخاب رابطه‌ی کاهندگی یا مدل برآورد جنبش‌های قوی زمین.
گام چهارم) تحلیل خطر احتمالاتی زلزله.

۲- ویژگی‌های زمین ساختی گستره مطالعه

منطقه مورد مطالعه گستره‌ای به شعاع ۳۰۰ کیلومتری به مرکزیت تهران است . تهران در پهنه‌ای بین دو وادی کوه و کویر و در دامنه‌های جنوبی البرز گسترده شده‌است. از دید ناهمواری‌های طبیعی، تهران به دو ناحیه کوهپایه‌ای و دشتی تقسیم می‌شود. از کوهپایه‌های البرز تا جنوب شهر ری، تپه‌های کوچک و بزرگ پرشماری وجود دارند. تهران در برابر بسیاری از رخدادها و خطرات طبیعی از جمله زمین‌لرزه آسیب‌پذیر است. بررسی‌های زمین‌شناسی انجام شده بیانگر آن است که شهر تهران روی گسل‌های زیادی قرار دارد. با گسترش فضای شهر، ساخت‌وسازهایی نیز در حریم یا روی گسل‌های بزرگ و لرزه‌خیز انجام شده‌است. افزون بر آن، دشت تهران و شهر ری دارای شکستگی‌هایی است که ممکن است به هنگام لرزش گسل‌های بزرگ، دچار لغزش و جابه‌جایی شوند.

۳ – چشمه‌های لرزه‌زا

پیش نیاز بنیادین برای انجام تحلیل خطر زلزله، جمع آوری و توسعه یک بانک داده یکپارچه و جامع از چشمه‌های لرزه‌ای منطقه مورد مطالعه است. هر یک از عناصر تشکیل دهنده بانک اطلاعاتی، پیش از قرار گرفتن در کنار سایر داده‌ها، باید به صورت کامل از جنبه‌های گوناگون مورد پردازش قرار گیرد. تعیین ساز وکار گسل‌ها، هندسه پهنه‌های لرزه‌زا، طول گسیختگی و حداکثر زلزله منتسب به هر چشمه، خروجی اصلی این بخش است. پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله ایران[۵] نقشه گسل‌های فعال ایران را با مقیاس $\frac{1}{2500000}$ در اختیار مهندسین قرار داده است که با استفاده از نرم افزار AutoCad گسل‌های فعال تا شعاع ۳۰۰ کیلومتری تهران شناسایی گردید. (شکل ۱)



شکل ۱: گسل‌های فعال ایران در شعاع ۳۰۰ کیلومتری از تهران

۴ – کاتالوگ لرزه‌خیزی

برای شناخت سرچشمه لرزه‌ای و الگوی لرزه‌خیزی منطقه باید اطلاعات تمام زلزله‌های رخداده در محدوده لازم جمع‌آوری شود. محدوده مورد اشاره الزاماً محصور به مرزهای جغرافیایی ایران نخواهد بود . داده‌ها به دو دوره (زلزله‌های تاریخی) قبل از ۱۹۰۰ میلادی و (زلزله‌های معاصر یا دستگاهی) بعد از سال ۱۹۰۰ میلادی تقسیم بندی می‌شود. از تجمیع داده‌های تاریخی و دستگاهی کاتالوگ لرزه‌خیزی منطقه آماده می‌گردد.

۴-۱- زلزله‌های تاریخی

محدوده‌ی مورد مطالعه شامل دو ایالت لرزه‌زمین ساخت البرز و ایران مرکزی است . اولین زلزله ثبت‌شده در تاریخ برای شهر تهران مربوط به ۴۰۰ سال پیش از میلاد است که این زلزله با بزرگی ۷/۷ ریشتر، ری و ایوانکی را لرزانده است.

۴-۲- زلزله‌های معاصر

تمام داده‌های زلزله بعد از سال ۱۹۰۰ میلادی در گستره مطالعه باید جمع آوری و اطلاعات آن‌ها از جمله زمان رخداد، مکان تخمینی رومرکزی، موقعیت رومرکز، بزرگای ثبت شده و عمق رخداد را ثبت کرد. ما در این تحقیق از داده‌های پایگاه معتبر پژوهشگاه بین‌المللی لرزه‌شناسی و مهندسی زلزله (IIEES) استفاده کرده‌ایم.[۵] این پایگاه اطلاعات ۸۸ زمین‌لرزه روی داده در گستره طرح ($M > 5$) در فواصل زمانی سال‌های بین ۱۹۰۲ تا ۲۰۱۷ یعنی ۱۱۵ سال را به ما داد. البته در این داده‌ها، عمق کانونی بعضی از زمین‌لرزه‌ها ثبت نشده است که در صورت لزوم درجهت اطمینان ۱۰ کیلومتر درنظر گرفته می‌شود.

واحدهای متنوعی برای توصیف بزرگای زلزله مورد استفاده قرار گرفته است. برای تجمیع و تدوین کاتالوگ، لازم است با بهره‌گیری از روابط مناسب تبدیل بزرگا، به یک بیان یکنواخت از بزرگا (مثلا بزرگای گشتاوری M_w) دست یافت. بزرگای گشتاوری یکی از مناسب‌ترین معیارهایی است که ماهیت فیزیکی داشته و مستقل از دستگاه‌های لرزه‌نگاری است. برای تبدیل M_s و M_b و M_L به M_w می‌توان از روابط (۱) تا (۴) استفاده کرد:

تبدیل M_s به M_w ، (EMME,2011)

$$M_w=0.66M_s+2.11 \quad 2.8\leq M_s<6.2 \qquad (۱)$$

$$M_w=0.93M_s+0.45 \quad 6.2\leq M_s\leq 8.2 \qquad (۲)$$

تبدیل m_b به M_w (Scordilis.2006)

$$M_w=0.85m_b+1.03 \quad 3.5\leq m_b\leq 6.2 \qquad (۳)$$

تبدیل M_L به M_w (Shoja-taheri, 2007)

$$M_L=3.73\, ln\,(M_w) -0.51 \quad 4.5\leq M_L\leq 7.5 \qquad (۴)$$

۵ – برآورد بیشینه بزرگای منتسب به گسل‌های موجود در گستره طرح

با توجه به اطلاعات زلزله‌های تاریخی یا قبل از ۱۹۰۰، بیشینه بزرگای زلزله با توجه به اطلاعات تاریخی را ۷/۷ بیان کرده‌ایم. حال باید ببینیم پتانسیل لرزه‌زایی گسل‌های منطقه چه مقدار است، حداکثر مقدار زلزله‌های تاریخی و زلزله‌های آماری

بعلاوه ۰/۵ و زلزله‌های بدست آمده از روابط (۵) تا (۸) را به عنوان بیشینه بزرگا انتخاب می‌کنیم. برای محاسبه بیشینه بزرگا برای هر گسل روابط متعددی ارائه شده است که ما از روابط مهاجر- اشجعی- نوروزی، زارع، نوروزی و مقدم استفاده کرده‌ایم:

مهاجر- اشجعی- نوروزی:

$$M_{max} = 5.4 + Log\ (L) \quad , \quad L = 0.5L_F \tag{۵}$$

زارع:

$$M_{max} = 3.66 + 0.91ln\ (L) \ , \ L = 0.37L_F \tag{۶}$$

نوروزی:

$$M_{max} = 1.259 + 1.244Log\ (L) \tag{۷}$$

مقدم:

$$M_{max} = 4.63 + 1.43Log\ (L) \tag{۸}$$

$$\begin{cases} \text{If} \quad L_F < 100\ \text{Km} \quad \rightarrow \quad L = 0.5L_F \\ \text{If} \quad L_F \geq 100\ \text{Km} \quad \rightarrow \quad L = 0.3L_F \end{cases}$$

جدول۱: بیشینه پتانسیل لرزه‌زایی هرگسل با استفاده از چهار رابطه

نام گسل	L_F (not scale)	L_F (Km)	M_{max} (Ashajaei & Norozi)	M_{max} (Zare)	M_{max} (Norozi)	M_{max} (Moghadam)
soltaniyeh	110	51.8	6.8	6.3	3.0	6.7
zanjan	273	128.5	7.2	7.2	3.5	6.9
masuleh	120	56.5	6.9	6.4	3.1	6.7
talesh	102	48.0	6.8	6.3	3.0	6.6
rudbar	150	70.6	6.9	6.6	3.2	6.8
lahijan	190	89.4	7.1	6.8	3.3	7.0
bonan	245	115.3	7.2	7.1	3.4	6.8
alamutrud	280	131.8	7.2	7.2	3.5	6.9
north qazvin	250	117.6	7.2	7.1	3.5	6.8
taleghan	150	70.6	6.9	6.6	3.2	6.8
mosha	420	197.6	7.4	7.6	3.7	7.2
kandevan	200	94.1	7.1	6.9	3.3	7.0
khazar	692	325.6	7.6	8.0	4.0	7.5
north alborz	915	430.6	7.7	8.3	4.2	7.6
astaneh	375	176.5	7.3	7.5	3.7	7.1
damghan	160	75.3	7.0	6.7	3.2	6.9
atari	360	169.4	7.3	7.4	3.7	7.1
north tehran	285	134.1	7.2	7.2	3.5	6.9
eshtehard	170	80.0	7.0	6.7	3.3	6.9
torud	132	62.1	6.9	6.5	3.1	6.8
kuhe gugerd	145	68.2	6.9	6.6	3.2	6.8
ipak	170	80.0	7.0	6.7	3.3	6.9
kahrizak	85	40.0	6.7	6.1	2.9	6.5
eyvanekey	200	94.1	7.1	6.9	3.3	7.0
garmsar	150	70.6	6.9	6.6	3.2	6.8
pishva	70	32.9	6.6	5.9	2.8	6.4
indes	207	97.4	7.1	6.9	3.4	7.0
south parandak	220	103.5	7.1	7.0	3.4	6.8
kushke nosrat	470	221.2	7.4	7.7	3.8	7.2
tafresh	245	115.3	7.2	7.1	3.4	6.8
kashan	110	51.8	6.8	6.3	3.0	6.7

zefreh	270	127.1	7.2	7.2	3.5	6.9
chah zangul	150	70.6	6.9	6.6	3.2	6.8
siah kuh	312	146.8	7.3	7.3	3.6	7.0

جدول۲: بیشینه پتانسیل لرزه‌زایی کل

M_{max}	بزرگ‌ترین زلزله آماری+0.5	بزرگ‌ترین زلزله تاریخی	بیشینه M
6.8	7.7	7.7	7.7
7.2	7.7	7.7	7.7
6.9	7.7	7.7	7.7
6.8	7.7	7.7	7.7
6.9	7.7	7.7	7.7
7.1	7.7	7.7	7.7
7.2	7.7	7.7	7.7
7.2	7.7	7.7	7.7
7.2	7.7	7.7	7.7
6.9	7.7	7.7	7.7
7.6	7.7	7.7	7.7
7.1	7.7	7.7	7.7
8.0	7.7	7.7	8.0
8.3	7.7	7.7	8.3
7.5	7.7	7.7	7.7
7.0	7.7	7.7	7.7
7.4	7.7	7.7	7.7
7.2	7.7	7.7	7.7
7.0	7.7	7.7	7.7
6.9	7.7	7.7	7.7
6.9	7.7	7.7	7.7
7.0	7.7	7.7	7.7
6.7	7.7	7.7	7.7
7.1	7.7	7.7	7.7
6.9	7.7	7.7	7.7
6.6	7.7	7.7	7.7
7.1	7.7	7.7	7.7
7.1	7.7	7.7	7.7
7.7	7.7	7.7	7.7
7.2	7.7	7.7	7.7
6.8	7.7	7.7	7.7
7.2	7.7	7.7	7.7
6.9	7.7	7.7	7.7
7.3	7.7	7.7	7.7

با توجه به مقادیر جدول۲، حداکثر توان لرزه‌زایی مربوط به گسل البرزشمالی با مقدار ۸/۳ ریشتر و بعد از آن گسل خزر با مقدار ۸ ریشتر می‌باشد. حال با توجه به زمین‌لرزه‌های تاریخی و زلزله‌های آماری بعلاوه ۰/۵ و حداکثر توان لرزه‌زایی گسل‌های منطقه مورد مطالعه، می‌توان بیشینه زلزله در گستره مورد مطالعه را سه مقدار زیر درنظر گرفت :

$M_{1(max)} = 8.3$
$M_{2\,(max)} = 8$
$M_{3\,(max)} = 7.7$

۶ – استخراج پارامترهای لرزه‌خیزی منطقه

برای کمی‌سازی لرزه‌خیزی یک پهنه مشخص، روابط مختلفی با استفاده از نحوه توزیع زلزله‌ها و بزرگای آن‌ها ارائه شده است. یکی از معتبرترین آن‌ها، رابطه گوتنبرگ - ریشتر کلاسیک است:

$$ln\,\lambda_m = \alpha - \beta m \qquad (۹)$$

$$ln\,N_m = \alpha - \beta m \qquad (۱۰)$$

در این روابط N_m تعداد زلزله‌های بزرگ‌تر از M و λ_m نرخ رخداد یا زلزله‌های بزرگ‌تر از M است. α و β ثابت‌های لرزه‌ای چشمه پهنه‌ی موردنظر هستند. α و β از تحلیل آماری داده‌های لرزه‌ای بدست می‌آیند. در صورتی که رابطه‌ی $ln\,\lambda_m = \alpha - \beta m$ را معادل رابطه $Y = A + BX$ درنظر بگیریم (یعنی $ln(\lambda_m) = Y$ و $m = X$) با استفاده از روش حداقل مربعات ضرایب می‌توان مقدار A و B را از روابط زیر محاسبه کرد: (جدول۳)

$$B = \frac{n\sum(X.Y) - \sum X.\sum Y}{n\sum X^2 - (\sum X)^2} \qquad (۱۱)$$

$$A = \frac{\sum(Y) - b\sum X}{n} \qquad (۱۲)$$

که n تعداد کل زلزله‌های مورد بررسی است.

جدول۳: محاسبات ضرایب رابطه بزرگا

M_W	Nc	N	X=(-M)	Y=(LogN)	XY	X^2
4.5	88	0.765	-4.5	-0.116	0.523	20.25
4.6	86	0.748	-4.6	-0.126	0.581	21.16
4.7	84	0.730	-4.7	-0.136	0.641	22.09
4.8	84	0.730	-4.8	-0.136	0.655	23.04
4.9	84	0.730	-4.9	-0.136	0.668	24.01
5	83	0.722	-5	-0.142	0.708	25
5.1	83	0.722	-5.1	-0.142	0.722	26.01
5.2	77	0.670	-5.2	-0.174	0.906	27.04
5.3	75	0.652	-5.3	-0.186	0.984	28.09
5.4	63	0.548	-5.4	-0.261	1.411	29.16
5.5	54	0.470	-5.5	-0.328	1.806	30.25
5.6	47	0.409	-5.6	-0.389	2.176	31.36
5.7	37	0.322	-5.7	-0.492	2.807	32.49
5.8	25	0.217	-5.8	-0.663	3.844	33.64
5.9	16	0.139	-5.9	-0.857	5.054	34.81
6	15	0.130	-6	-0.885	5.308	36
6.1	11	0.096	-6.1	-1.019	6.218	37.21
6.2	9	0.078	-6.2	-1.106	6.860	38.44
6.3	9	0.078	-6.3	-1.106	6.971	39.69
6.4	7	0.061	-6.4	-1.216	7.780	40.96
6.5	6	0.052	-6.5	-1.283	8.337	42.25
6.6	6	0.052	-6.6	-1.283	8.465	43.56
6.7	5	0.043	-6.7	-1.362	9.124	44.89
6.8	5	0.043	-6.8	-1.362	9.260	46.24
6.9	5	0.043	-6.9	-1.362	9.396	47.61

7	3	0.026	-7	-1.584	11.085	49
7.1	1	0.009	-7.1	-2.061	14.631	50.41
7.2	1	0.009	-7.2	-2.061	14.837	51.84
SUM			-163.8	-21.973	141.756	976.5

برای تعیین نرخ سالیانه می‌توان از فرمول زیر استفاده کرد:

$$N=\frac{N_c}{T} \quad (۱۳)$$

که N_c فراوانی تجمعی زلزله‌هایی با بزرگی M و T تعداد سال‌های جمع‌آوری اطلاعات است که با اطلاعات موجود مقدار آن ۱۱۵ سال است. باید متذکر شویم که m ها همگی همسان‌سازی و به M_w تبدیل شده‌اند. با جایگذاری در رابطه۹ داریم :

$$\alpha=7.937 \quad و \quad \beta=1.666$$

$$Ln\,(\lambda_m) = 7.937 - 1.666M \quad (۱۴)$$

بنابراین رابطه‌ی گوتنبرگ – ریشتر (۱۴) برای منطقه‌ی موردنظر تکمیل گردید.

۷ – انتخاب روابط کاهنگی یا روابط برآورد جنبش شدید زمین

یکی از عناصرکلیدی در برآورد احتمالی خطر در یک ساختگاه، روابط کاهندگی انتخابی است. براساس یافته‌های تحقیقاتی، انتخاب روابط کاهندگی بیشترین عدم قطعیت نهایی در برآورد خطر در ساختگاه را رقم می‌زند. بنابراین برخورد مناسب با این عدم قطعیت که جنس آن از نوع عدم قطعیت ذاتی است، کاملا ضروری است. در این پژوهش ما از چهار رابطه کاهندگی زیر استفاده نموده‌ایم :[۶]

۱) رابطه کاهندگی جوینر-بور-فومال:

$$\log(PGA)=-0.038+0.216(M_{mid}-6)-0.777\log(\sqrt{R^2+30.03}) \quad (۱۵)$$

۲) رابطه کاهندگی قدرتی:

$$\ln(PGA)=4.15+(0.623\times M_{mid})-0.96\ln(R) \quad (۱۶)$$

۳) رابطه کاهندگی آل قریوتی ۲۰۰۸:

$$\log(PGA)=-3.45092+(0.49802\times M_{mid})-0.38\log(R)-0.00253 \quad (۱۷)$$

۴) رابطه کاهندگی کرنل و همکاران:

$$\ln(PGA)=-0.152+0.89(M_{mid})-1.803\ln(R+25) \quad (۱۸)$$

که در روابط فوق PGA حداکثر شتاب زلزله برحسب g، R فاصله از گسل برحسب کیلومتر و M بزرگای زلزله می‌باشند.

۸ – تحلیل خطر احتمالاتی

با در نظر داشتن طبیعت احتمالاتی توابع کاهندگی، تابع توزیع بزرگا برای هر چشمه، توزیع احتمال فاصله نقطه آغاز گسلش زمین تا محل ساختگاه و بهره‌گیری از تئوری احتمال کل می‌توان برهم نهی نظام‌مندی از آثار گسل‌های مختلف ترتیب

داد و درنهایت احتمال فراگذشت سالیانه پارامترهای جنبش زمین را در هر سطح دلخواه محاسبه و به صورت "منحنی خطر " ترسیم نمود. احتمال فراگذشت پارامتر جنبش زمین از یک سطح مشخص را از رابطه زیر می‌توان بدست آورد:

$$P(IM>x)=\sum_{i=1}^{n_{sources}}\lambda(M_i>m_{min})\int_{m_{min}}^{m_{max}}\int_{0}^{r_{max}}P(IM>x|m,r)f_{M_i}(m)f_{R_i}(r)dr\,dm \qquad (۱۹)$$

در رابطه‌ی فوق $\lambda(M_i>M_{min})$ نرخ رخداد زلزله‌های بزرگتر از M_{min} برای چشمه‌ی iام است. $P(IM>x)$ احتمال رخداد سالیانه $IM>x$ است که IM پارامتر جنبش زمین موردنظر است (مثلا شتاب حداکثر زمین یا شتاب طیفی در پریود مشخص و ...) و عکس آن بیانگر دوره بازگشت رخداد زلزله‌های بزرگتر از آن است.

با محاسبه نرخ رخداد سالیانه سطوح مختلف پارامتر جنبش زمین با استفاده از فرآیند انتگرال‌گیری فوق و ترسیم نتیجه حاصل، منحنی موسوم به منحنی خطر حاصل می‌شود. این فرآیند برای تمامی گسل‌ها و با چهار رابطه کاهندگی ذکر شده در بالا در اکسل محاسبه شده و در ادامه خلاصه‌ای از محاسبات و نتایج حاصل از گسل سلطانیه با رابطه کاهندگی جوینر – بور – فومال قرار داده می‌شود و برای بقیه گسل‌ها و روابط کاهندگی، فقط منحنی تحلیل خطر کلی آن‌ها گنجانده می‌شود.

۱-۸- محاسبات تحلیل خطر احتمالاتی برای گسل سلطانیه

مشخصات گسل به صورت زیر می‌باشد:

جدول۴: مشخصات گسل سلطانیه

نام گسل	*LF (Km)*	*R1*	*R2*
soltaniyeh	52	274	222

جدول۵: محاسبات بزرگای میانه تمام گسل‌ها به جزء گسل خزر و البرز شمالی

All fault without North Alborz & Khazar		
M(max)= **7.7**	*M*	*M(mid)*
M(min) = **5**	5	5.135
n = 10	5.27	5.405
Δm= **0.27**	5.54	5.675
	5.81	5.945
	6.08	6.215
	6.35	6.485
	6.62	6.755
	6.89	7.025
	7.16	7.295
	7.43	7.565
	7.7	----

با توجه به فرمول۱۴ و α= 7.937 و β=1.666 که از جدول۳ بدست آمد:

$$\lambda=e^{7.937-1.666M} \qquad (۲۰)$$

تابع چگالی احتمال بزرگا به صورت زیر است :

$$f_M(m)=\frac{\beta exp[-\beta(m-m_0)]}{1-exp[-\beta(m_{max}-m_0)]} \quad (۲۱)$$

با جایگذاری در رابطه‌ی ۲۱ داریم :

$$f_M(m)=1.685\ exp[-1.666\ (M-5)] \quad (۲۲)$$

۲-۸- تخمین جنبش شدید زمین با استفاده از رابطه کاهندگی جوینر- بور- فومال

شتاب بر اساس بزرگا در مرکز هر حدفاصل در فاصله‌های مختلف ساختگاه تا گسل در جدول۶ محاسبه شده است (اعداد بر حسب g هستند):

جدول۶: شتاب براساس بزرگا در مرکز هر حدفاصل در فاصله‌های مختلف ساختگاه تا گسل سلطانیه

Median *PGA (g)*		
soltaniyeh		
	R1	*R2*
M(mid)	274	222
5.135	0.008	0.009
5.405	0.009	0.010
5.675	0.010	0.012
5.945	0.011	0.013
6.215	0.013	0.015
6.485	0.015	0.018
6.755	0.017	0.020
7.025	0.019	0.023
7.295	0.022	0.026
7.565	0.025	0.030

شتاب مورد نظر (acc) در حد بین 0.05g تا 0.65g با افزایش‌های مرحله‌ای 0.05g دراینجا مورد استفاده قرار می‌گیرد. احتمال اینکه PGA از شتاب موردنظر برای هر ترکیب بزرگا - فاصله افزایش یابد، باید تعیین گردد. (جداول۷ و۸)

$$P(PGA>acc\ /EQ:R.M)=1-\emptyset\left(\frac{\log(acc)-\log PGA}{\sigma_{\log PGA}}\right) \quad (۲۳)$$

جدول۷: نتایج حاصل از احتمال *PGA* بزرگتر از شتاب 0.05g

P (PGA > 0.05g | EQ : R , M)					
soltaniyeh					
----------	*R1*	*R2*	----------		
M(mid)	274	222	SUM	$f_m.\Delta m$	PL_i
5.135	3.3E-05	1.4E-04	1.7E-04	0.363	3.1E-05
5.405	1.1E-04	3.9E-04	5.0E-04	0.232	5.8E-05
5.675	3.1E-04	1.1E-03	1.4E-03	0.148	1.0E-04
5.945	8.6E-04	2.7E-03	3.5E-03	0.094	1.7E-04
6.215	2.2E-03	6.1E-03	8.3E-03	0.060	2.5E-04
6.485	5.1E-03	1.3E-02	1.8E-02	0.038	3.5E-04
6.755	1.1E-02	2.7E-02	3.8E-02	0.024	4.6E-04
7.025	2.3E-02	4.9E-02	7.2E-02	0.016	5.6E-04
7.295	4.3E-02	8.6E-02	1.3E-01	0.010	6.4E-04
7.565	7.6E-02	1.4E-01	2.2E-01	0.006	6.9E-04
				PL	3.3E-03

جدول۸: نتایج حاصل از احتمال *PGA* بزرگتر از شتاب 0.65g

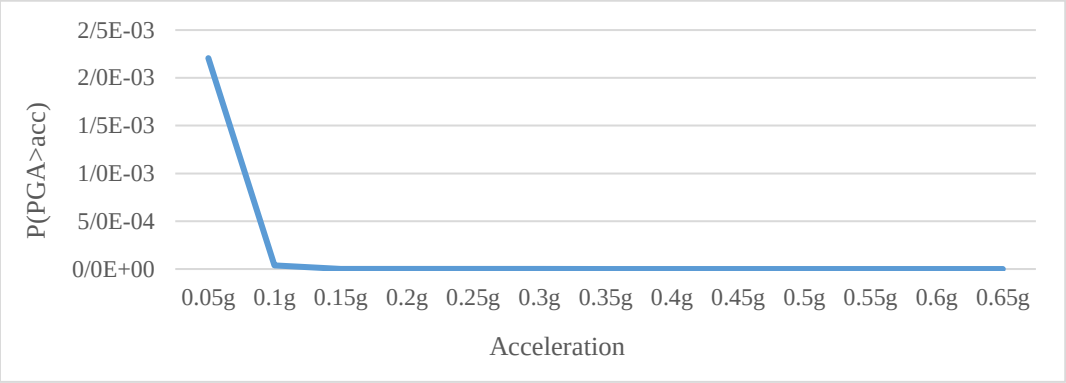
P (PGA > 0.65g | *EQ : R , M)*					
soltaniyeh					
----------	*R1*	*R2*	----------		
M(mid)	274	222	SUM	$f_m.\Delta m$	PL_i
5.135	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.363	0.0E+00
5.405	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.232	0.0E+00
5.675	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.148	0.0E+00
5.945	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.094	0.0E+00
6.215	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.060	0.0E+00
6.485	0.0E+00	9.9E-15	9.9E-15	0.038	1.9E-16
6.755	6.0E-15	8.6E-14	9.2E-14	0.024	1.1E-15
7.025	5.4E-14	7.0E-13	7.5E-13	0.016	5.9E-15
7.295	4.4E-13	5.3E-12	5.7E-12	0.010	2.8E-14
7.565	3.4E-12	3.6E-11	4.0E-11	0.006	1.3E-13
				PL	1.6E-13

۳ – ۸ – احتمال رویداد یک زمین‌لرزه بر اثر جنبایی سرچشمه

در نهایت در جدول۹ احتمال رویداد یک زمین‌لرزه بر اثر جنبایی سرچشمه‌های خطی با شتاب‌های مختلف برای گسل سلطانیه بیان شده است :

جدول۹: احتمال رویداد یک زمین‌لرزه بر اثر جنبایی سرچشمه‌های خطی با شتاب‌های مختلف برای گسل سلطانیه

$\lambda 3 = 0.667$			
acc	P(PGA>acc|EQ)	P(PGA>acc), approx	P(PGA>acc)
acc	PL	$\lambda = \lambda i.PL$	APE=1-exp(-λ)
0.05g	3.3E-03	2.2E-03	2.2E-03
0.1g	5.7E-05	3.8E-05	3.8E-05
0.15g	2.6E-06	1.7E-06	1.7E-06
0.2g	2.0E-07	1.3E-07	1.3E-07
0.25g	2.1E-08	1.4E-08	1.4E-08
0.3g	3.0E-09	2.0E-09	2.0E-09
0.35g	5.2E-10	3.4E-10	3.4E-10
0.4g	1.0E-10	6.9E-11	6.9E-11
0.45g	2.4E-11	1.6E-11	1.6E-11
0.5g	6.0E-12	4.0E-12	4.0E-12
0.55g	1.7E-12	1.1E-12	1.1E-12
0.6g	5.0E-13	3.3E-13	3.3E-13
0.65g	1.6E-13	1.1E-13	1.1E-13



شکل۲: منحنی خطر زلزله برای گسل سلطانیه

۴ – ۸ – ترکیب احتمالات

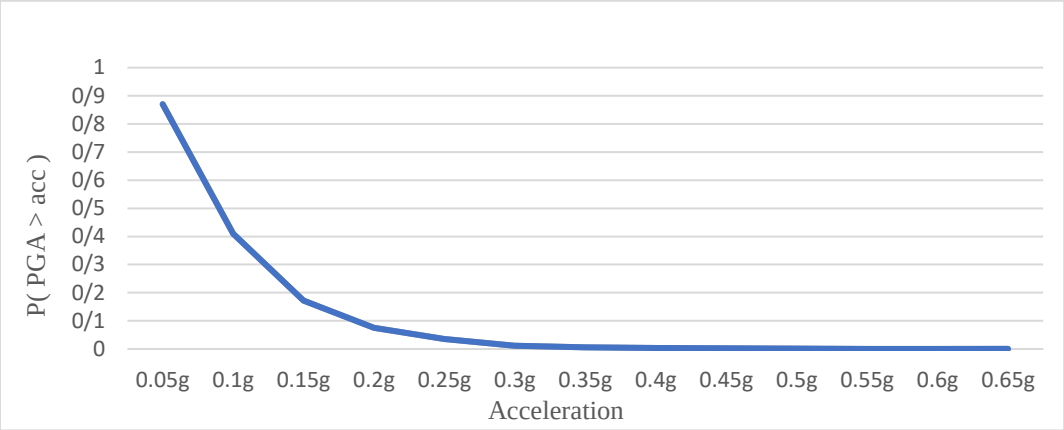
نتایج احتمالات محاسبه شده برای تمامی گسل‌ها با رابطه‌ی۲۴ با هم ترکیب شدند و در جدول۱۰ قرار داده شدند:

$$P(PGA>acc)=1-\prod(PGA<acc) \qquad (۲۴)$$

جدول۱۰: احتمال محاسبه شده برای رابطه کاهندگی جوینر- بور- فومال

نتایج احتمال های محاسبه شده برای شتاب های مورد نظر	
acc (g)	*P(PGA>acc)*
0.05g	0.870048
0.1g	0.409529
0.15g	0.171824
0.2g	0.075338
0.25g	0.035465
0.3g	0.011431
0.35g	0.006074
0.4g	0.003379
0.45g	0.001952
0.5g	0.001164
0.55g	0.000713
0.6g	0.000698
0.65g	0.000447

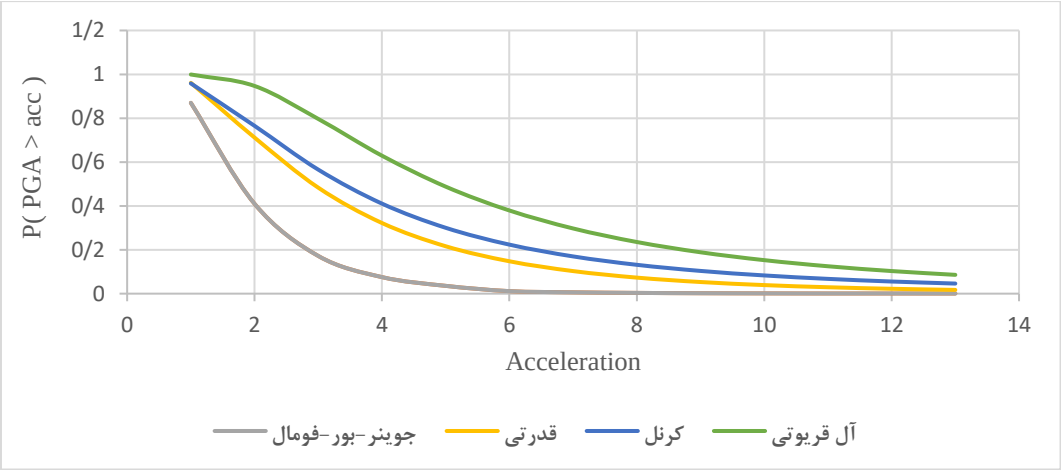
حال منحنی خطر کلی را می‌توان رسم کرد : (شکل۳)



شکل۳: منحنی خطر کلی زلزله رابطه کاهندگی جوینر- بور- فومال

۹ – نتیجه گیری

به منظور تحلیل خطر برای گستره تهران، بعد از تعریف این گستره، محدوده طرح انتخاب گردید. گستره مورد مطالعه به شعاع ۳۰۰ کیلومتری اطراف شهر تهران به گونه‌ای انتخاب شد که تمام عوامل لرزه‌زایی که احتمال دارد این گستره را تحت تاثیر قرار دهند، در آن لحاظ شده باشند. با تعریف چشمه‌های لرزه‌زا و بدست آوردن پارامترهای لرزه‌خیزی لازم برای تحلیل خطر درمورد هریک از این چشمه‌ها، امکان تحلیل خطر لرزه‌ای در این گستره فراهم آمد. سپس با استفاده از چهار رابطه کاهندگی جوینر- بور- فومال، آل قریوتی، کرنل و همکاران، قدرتی منحنی خطر کلی هرکدام را رسم و بروی یک نمودار مطابق شکل۴ قرار داده‌ایم :



شکل۴: منحنی خطر کلی زلزله چهار رابطه کاهندگی

با تعیین بیشینه شتاب با احتمال $P(PGA > acc)$ از جدول‌های۱۱ تا ۱۴، برای زلزله بهره‌برداری و زلزله طرح، نتایج حاصل به صورت زیر بدست می‌آیند:

زلزله بهره برداری: T_R=10 year → $\lambda = 0.1$

زلزله طرح: T_R=475 year → $\lambda = 0.0021$

جدول۱۱: احتمال محاسبه شده برای رابطه کاهندگی جوینر- بور- فومال

نتایج احتمال های محاسبه شده برای شتاب های مورد نظر	
acc (g)	*P(PGA>acc)*
0.05g	0.870048
0.1g	0.409529
0.15g	0.171824
0.2g	0.075338
0.25g	0.035465
0.3g	0.011431
0.35g	0.006074
0.4g	0.003379
0.45g	0.001952
0.5g	0.001164
0.55g	0.000713
0.6g	0.000698
0.65g	0.000447

طبق نتایج بدست آمده از جدول۱۱ و درون‌یابی برای $\lambda = 0.1$ و $\lambda = 0.0021$ مقدار *acc* به ترتیب برابر با 0.19g و 0.44g بدست آمد.

جدول۱۲: احتمال محاسبه شده برای رابطه کاهندگی قدرتی

نتایج احتمال های محاسبه شده برای شتاب های مورد نظر	
acc (g)	*P(PGA>acc)*
0.05g	0.96128
0.1g	0.71161
0.15g	0.48318
0.2g	0.32205
0.25g	0.21613
0.3g	0.14758
0.35g	0.10282
0.4g	0.07309
0.45g	0.05293
0.5g	0.03900
0.55g	0.02918
0.6g	0.02214
0.65g	0.01701

طبق نتایج بدست آمده از جدول۱۲ و درون‌یابی برای $\lambda = 0.1$ و $\lambda = 0.0021$ مقدار *acc* به ترتیب برابر با 0.35g و 0.79g بدست آمد.

جدول۱۳: احتمال محاسبه شده برای رابطه کاهندگی کرنل و همکاران

نتایج احتمال های محاسبه شده برای شتاب های مورد نظر	
acc (g)	*P(PGA>acc)*
0.05g	0.95866
0.1g	0.76514
0.15g	0.56537
0.2g	0.41048
0.25g	0.30024
0.3g	0.22348
0.35g	0.16971
0.4g	0.13143
0.45g	0.10361
0.5g	0.08297
0.55g	0.06736
0.6g	0.05534
0.65g	0.04594

طبق نتایج بدست آمده از جدول۱۳ و درون‌یابی برای $\lambda = 0.1$ و $\lambda = 0.0021$ مقدار *acc* به ترتیب برابر با 0.45g و 0.88g بدست آمد.

جدول۱۴: احتمال محاسبه شده برای رابطه کاهندگی آل قریوتی

نتایج احتمال های محاسبه شده برای شتاب های مورد نظر	
acc (g)	*P(PGA>acc)*
0.05g	0.99919
0.1g	0.94692
0.15g	0.79660
0.2g	0.62894
0.25g	0.48796
0.3g	0.37918
0.35g	0.29719
0.4g	0.23545
0.45g	0.18861
0.5g	0.15269
0.55g	0.12485
0.6g	0.10301
0.65g	0.08570

طبق نتایج بدست آمده از جدول۱۴ و درون‌یابی برای $\lambda = 0.1$ و $\lambda = 0.0021$ مقدار *acc* به ترتیب برابر با 0.6g و 0.89g بدست آمد.

با استناد به نتایج حاصل از استفاده چهار رابطه کاهندگی متفاوت در این پژوهش، به نظر می‌رسد که جهت ارزیابی خطر لرزه‌ای در یک منطقه، استفاده از روابطی که جهت تعیین آن‌ها از اطلاعات آن منطقه استفاده شده باشد، محافظه‌کارانه‌تر است. با این حال همان‌طور که در شکل۴ و اعداد محاسبه شده در جدول‌های ۱۱ تا ۱۴ مشاهده می‌شود، رابطه کاهندگی جوینر- بور- فومال نتایج محافظه‌کارانه‌تری نسبت به بقیه روابط کاهندگی مورد استفاده در این پژوهش داده است.

۱۰- قدردانی

نویسندگان این مقاله برخود واجب می‌دانند تا این فرصت را برای قدردانی و کمال تشکر از زحمات جناب آقای مهندس محمدعلی سلیمی و جناب آقای مهندس امیرحسین صعصعی مغتنم شمارند.

مراجع

[۱] گرشاسبی، س. تحلیل خطر زلزله و مقایسه کیفی روابط کاهندگی محلی و ناحیه‌ای، اولین کنگره ملی مهندسی ساخت و ارزیابی پروژه‌های عمرانی، گرگان، ۱۳۹۳.

[2] Aemillas I. Forwards methodology for seismic risk mitigation in urban planning: pilot work in Mexico City. UNCNCS Report, Japan, 1989.

[3] Loh CH, Jean WY, Penzien J. Uniform- hazard response spectra - an alternative approach. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 23(4): 433-445, 1994.

[۴] معاوی، م.، مکوندی، م. تحلیل احتمالاتی خطر لرزه‌ای در گستره استان خوزستان و تعیین طیف‌های خطر یکنواخت برمبنای نقشه پهنه‌بندی خطر شتاب طیفی، کنگره بین‌المللی دستاوردهای نوین در عمران، معماری، محیط زیست و مدیریت شهری، تهران، ۱۳۹۴.

[5] Web source, http://www.iiees.ac.ir/fa/eqcatalog.

[۶] زارع، م. تحلیل خطر زمین‌لرزه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی، چاپ اول، ۱۳۷۹.