

تحلیل ریسک بروز روانگرایی در بخشی از جنوب غربی تهران

سیدمحسن حائری
استاد
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

امیر حمیدی
دانشجوی دکترا
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

محمد نوروز علیائی
دانشجوی دکترا
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

علی شیرازی
دانشجوی دکترا
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه مک گیل کانادا

علی بخشی
استادیار
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

چکیده

تحلیل خطر بروز روانگرایی در بخشی از جنوب غربی شهر تهران مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از نتایج آزمایشهای نفوذ استاندارد و روش ایواساکی، بروز در سطح روانگرایی در بزرگیهای مختلف زمین لرزه تعیین گردید. منحنی خطر لرزه‌ای تهران نیز با فرض بزرگی‌ها، دوره‌های بازگشت، و فواصل کانونی متفاوت محاسبه شد. با حذف شتاب بین منحنیهای خطر لرزه‌ای و منحنی تغییرات بروز روانگرایی در سطح زمین، احتمال افزایش از هر مقدار بروز روانگرایی تعیین شد. بدین ترتیب در برخی از حالات، احتمال بالایی برای وقوع بروز روانگرایی در سطح زمین تعیین شد. همچنین سطوحی از آب زیرزمینی که موجب عدم وقوع بروز روانگرایی در سطح می‌شوند مورد ارزیابی قرار گرفتند.

کلمات کلیدی

روانگرایی خاکهای ماسه‌ای، تحلیل ریسک، بزرگی زلزله، دوره بازگشت، فاصله کانونی، جنوب غربی تهران

Risk Analysis of Liquefaction Potential In South West Tehran

A. Hamidi
Ph.D. Candidate
Sharif University of Technology

S. M. Haeri
Professor
Sharif University of Technology

A. Shirazi
Ph.D. Candidate
Sharif University of Technology

M. Norooz Olyaei
Ph.D. Candidate
Mc. Gill University, Canada

A. Bakhshi
Assistant Professor
Sharif University of Technology

Abstract

Risk analysis of liquefaction potential was performed for an area in southwest Tehran. SPT blow counts were used besides Iwasaki method to determine the liquefaction potential in the area for different earthquake magnitudes. The seismic hazard curve of Tehran was also evaluated for different earthquake magnitudes, time periods and focal distances. Eliminating the peak horizontal acceleration (PHA), between the two sets of curves, the probability of exceedance was determined for different liquefaction potential values. According to the results, high probability values were determined for liquefaction occurrence in some regions. Finally the critical ground water levels to prevent liquefaction occurrence was studied in the studied region.

Key Words

Liquefaction of sandy soils, Risk analysis, Earthquake magnitude, Time period, Focal distance, Southwest Tehran

مقدمه

شهر تهران در میان گسل‌های مهمی واقع شده است که از توان لرزه‌ای بالایی برخوردارند. تنها در حوزه‌ای به شعاع ۱۰۰ km از مرکز شهر ۱۵ گسل بزرگ وجود دارد که دارای توان لرزه‌ای قابل انتظار با بزرگی بیش از ۷ هستند. مهمترین این گسلها عبارتند از گسل مشاء - فشم و گسل شمال تهران که در مرزهای شمال تهران واقع است. بنابراین بررسی خطرات ناشی از زلزله در تهران دارای اهمیت بسیار زیادی است.

یکی از پدیده‌های مخرب برای سازه‌هایی که روی آبرفتهای جوان ماسه‌ای با سطح آب زیرزمینی بالا بنا شده‌اند، پدیده روانگرایی است. در این پدیده فشار آب حفره‌ای لایه‌های ماسه‌ای جوان تحت اثر حرکات ناگهانی ناشی از زلزله بالا می‌رود و در نتیجه تنش مؤثر به شدت کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه در خاکهای دانه‌ای مقاومت برشی با تنش مؤثر ارتباط مستقیم دارد، با کاهش تنش مؤثر از مقاومت برشی کاسته می‌شود که خود باعث تغییر مکانهای ناگهانی و ناخواسته زیاد می‌شود و می‌تواند به سازه‌های موجود خسارات شدیدی وارد نماید. نمونه‌های زیادی از این پدیده در ایران و سایر کشورهای جهان مشاهده شده است. توجه به این پدیده بصورت جامع و وسیع برای اولین بار در دنیا پس از زلزله‌های ۱۹۶۴ نیگاتا و آلاسکا [۱] و در ایران پس از زلزله ۱۳۶۹ منجیل با وقوع این پدیده در آستانه اشرفیه و روستاهای اطراف صورت گرفت [۲] و تحقیقات در این زمینه همچنان ادامه دارد. همانگونه که ذکر گردید پدیده روانگرایی در مناطق لرزه‌خیز و در خاکهای ماسه‌ای اشباع محتمل است. با بررسیهایی که در تهران انجام شده است، انتظار می‌رود که در لایه‌های ماسه‌ای اشباع قسمتهایی از جنوب تهران احتمال وقوع روانگرایی وجود داشته باشد [۳].

برای ارزیابی پتانسیل روانگرایی می‌توان ضریب اطمینان را به صورت زیر با تقسیم نسبت مقاومت برشی تناوبی به نسبت تنش برشی تناوبی بدست آورد:

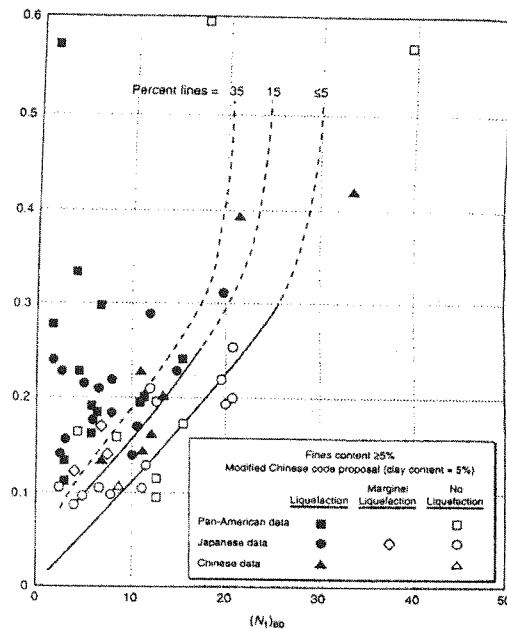
$$F = \frac{CRR}{CSR} \quad (1)$$

برای تعیین نسبت تنش برشی تناوبی، CSR، سید و ادیس در سال ۱۹۷۱ رابطه زیر را پیشنهاد نمودند [۴]:

$$CSR = 0.65 \times \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \times \left(\frac{\sigma_v}{\sigma_v'} \right) \times r_d \quad (2)$$

در این رابطه a_{max} شتاب حداکثر، σ_v تنش قائم کل و σ_v' تنش قائم مؤثر، r_d ضریب کاهش تنش ناشی از انعطاف‌پذیری خاک می‌باشد. دقت بر این نکته ضروری است که مقادیر نسبتهای تنش برشی تناوبی به ازای یک مقدار یکسان بزرگی زلزله با تعداد سیکلهای معادل و بصورت تنشهای یکنواخت در نظر گرفته می‌شوند.

CRR براساس یکی از مشخصه‌های مقاومتی خاک تعیین می‌گردد. سید و همکارانش در سال ۱۹۸۵ نموداری را برای تعیین این پارامتر براساس عدد نفوذ استاندارد اصلاح شده خاک ارائه نمودند [۵]. این نمودار در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به درصد ریزدانه در خاک و عدد نفوذ استاندارد اصلاح شده، مقدار نسبت مقاومت برشی تناوبی بدست می‌آید. مخاطرات ناشی از روانگرایی در صورتی اهمیت می‌یابد که اثرات این پدیده در زمین پدیدار گردد. این موضوع با محاسبه بروز روانگرایی در سطح تعیین می‌شود. ایواساکی در سال ۱۹۸۲ رابطه زیر را برای تعیین بروز روانگرایی در سطح پیشنهاد نمود [۶]:



شکل (۱) نمودار پیشنهادی Seed برای تعیین نسبت مقاومت تناوبی براساس عدد نفوذ استاندارد [۵].

$$P_L = \sum (1 - F_L) \times W(z) dz \quad (3)$$

در رابطه ۳، $W(z)$ تابع عمق است که مطابق رابطه ۴ تعریف می‌شود. پارامتر F_L بر اساس رابطه ۵ و با استفاده از ضریب اطمینان F محاسبه شده در رابطه ۱ بدست می‌آید.

$$W(z) = 10 - 0.5z \quad (4)$$

$$\begin{aligned} F \leq 1 &\Rightarrow F_L = 1 - F \\ F \geq 1 &\Rightarrow F_L = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

با محاسبه P_L احتمال بروز در سطح روانگرایی براساس رابطه زیر تعیین می‌شود:

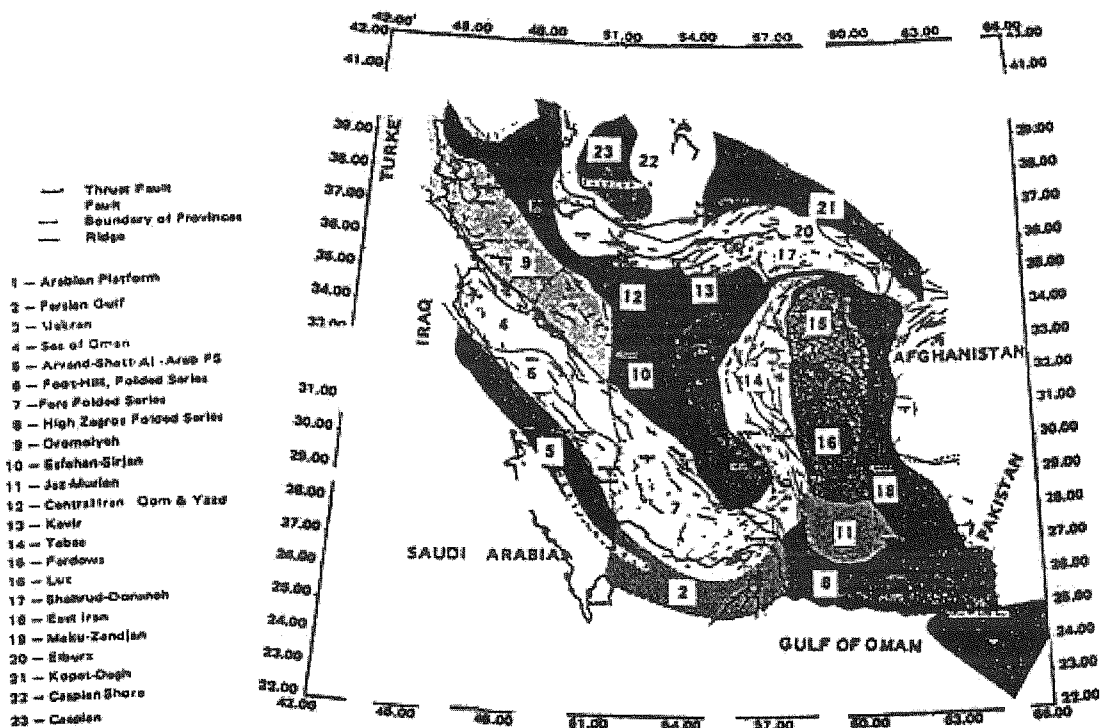
$$\begin{aligned} P_L < 5 & \text{عدم بروز آثار روانگرایی در سطح} \\ 5 < P_L < 15 & \text{بررسی بیشتر} \\ P_L > 15 & \text{بروز آثار روانگرایی در سطح} \end{aligned} \quad (6)$$

با توجه به عدم قطعیت کافی در این روش که در محدوده بروز در سطح ۵ تا ۱۵ وجود دارد، حد عدد ۵ بصورت محافظه کارانه برای تعیین محدوده حساس به روانگرایی در نظر گرفته می‌شود.

لرزه خیزی تهران

مناطق مختلفی از ایران دارای ریسک خطر لرزه‌ای بالا و احتمال وقوع زمین‌لرزه‌های شدید می‌باشند. بررسی لرزه‌خیزی ایران توسط نوروزی انجام شده است [۷]. محققین دیگر مثل روشندل و نعمت ناصر ریسک خطر لرزه‌ای را در قسمتهای مختلفی از ایران بررسی نموده‌اند [۸].

در تحقیقی که توسط احمدی، مستقل و نوروزی انجام شده است، با استفاده از توزیع پواسون، پراکندگی وقوع زمین‌لرزه‌ها و ریسک آنها در مناطق مختلف ایران ارائه شده است [۹]. این مناطق در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. با توجه به مشخصات تکتونیکی و لرزه‌ای قسمتهای مختلف ایران، خطر لرزه‌ای برای مقادیر شتاب حداکثر و دوره‌های زمانی متفاوت محاسبه شده است. همچنین منحنی‌های خطر لرزه‌ای برای شهرهای مختلف ایران در نواحی مختلف ارائه شده است. بدین ترتیب علاوه بر تعیین ریسک لرزه‌ای امکان انجام آنالیز حساسیت براساس پارامترهای مختلف لرزه‌ای امکان‌پذیر است. براساس نتایج این مطالعات، در محدوده زاگرس ریسک خطر لرزه‌ای زیادی برای شتابهای متوسط تا بالا وجود دارد. اما در محدوده البرز ریسک خطر لرزه‌ای شدیدی برای شتابهای بسیار بالا وجود دارد. این موضوع بار دیگر اهمیت و لزوم بررسی مخاطرات لرزه‌ای در شهرهای موجود در این محدوده را روشن می‌نماید. شهر تهران نیز در محدوده تأثیر ناحیه البرز قرار گرفته است. بدین ترتیب برای بررسی خطر روانگرایی در جنوب تهران از نتایج این مطالعات استفاده شده است.



شکل (۲) ناحیه‌بندی ایران برای تعیین ثوابت لرزه‌ای در رابطه گوتنبرگ - ریشر [۹].

براساس مدل پواسون احتمال وقوع n زمین‌لرزه با بزرگی بیشتر یا مساوی M در دوره بازگشت t از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$P_n(M, t) = \frac{(Nt)^n \exp(-Nt)}{n!} \quad (7)$$

N نرخ سالانه وقوع زمین‌لرزه‌ها است که بوسیله رابطه گوتنبرگ - ریشر با بزرگی M ارتباط می‌یابد:

$$\log(N) = a - bM \quad (8)$$

در این رابطه a, b پارامترهای ثابت لرزه‌ای می‌باشند. در مورد ناحیه البرز $a, 1/894$ و $b, 0/4944$ توصیه شده است [۹]. احتمال عدم وقوع زلزله در دوره بازگشت t نیز از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$P_0(M, t) = \exp(-Nt) \quad (۹)$$

با جایگزینی رابطه ۸ در رابطه ۹ خواهیم داشت:

$$P_0(M, t) = \exp(-t \times 10^{(a-bM)}) \quad (۱۰)$$

ارتباط بین شتاب حداکثر و بزرگی زلزله با فاصله کانونی توسط محققین مختلفی تعیین شده است. دونوان رابطه زیر را برای تعیین شتاب حداکثر بر پایه پارامترهای لرزه‌ای ارائه داد [۱۰].

$$a_g = 21.5 \exp(0.5M) \times (R + 25)^{-2.04} \quad (۱۱)$$

بررسیهای انجام شده بر این رابطه و دیگر روابط موجود در این رابطه که توسط احمدی و همکارانش انجام شده است، نشان می‌دهد که رابطه پیشنهادی دونوان برای کاربرد در ایران مناسبترین رابطه می‌باشد [۹]. بنابراین با حذف M بین روابط ۱۰ و ۱۱ خواهیم داشت:

$$P_0(a_g, t, R) = \exp \left[-t \times 10^{(a)} \times \left(\frac{a_g^2 (R + 25)^{2.64}}{1.21} \right) - 2.3b \right] \quad (۱۲)$$

احتمال خطر لرزه‌های بصورت احتمال وقوع حداقل یک زمین لرزه با شتاب مساوی یا بیشتر از a_g در دوره بازگشت t و فاصله کانونی R تعیین می‌شود. این مقدار از رابطه زیر بدست می‌آید [۹].

$$R(a_g, t, R) = 1 - P_0(a_g, t, R) \quad (۱۳)$$

مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی

منطقه مورد مطالعه در جنوب غربی تهران قرار دارد. مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی برای بررسی احتمال وقوع روانگرایی در این منطقه توسط حائری، شیرازی و حمیدی (۱۳۷۸) انجام شد [۱۱ و ۱۲]. برای انجام مطالعات ریزپهنه‌بندی در برابر روانگرایی، این منطقه به ده ناحیه مربعی شکل به ابعاد $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$ تقسیم گردید. در هر ناحیه یک گمانه به عمق ۲۰ متر حفر و در هر متر حفاری عدد نفوذ استاندارد ثبت گردید. ناحیه‌بندی منطقه مورد نظر، محل و ترتیب حفر گمانه‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. نمونه‌های دست خورده بدست آمده از هر عمق به آزمایشگاه انتقال یافته و آزمایشهای فیزیکی بر روی آنها انجام گرفت.

سطح آب زیرزمینی در گمانه‌های اول تا چهارم پایین‌تر از عمق ۲۰ متری، گمانه پنجم در عمق ۲۰ متری، گمانه‌های ششم، هفتم و هشتم، بین عمقهای ۱۲ تا ۱۴ متری، گمانه نهم پائین‌تر از بیست متر و در گمانه دهم در عمق ۵ متری قرار داشت. لازم به توضیح است که سطوح کنونی آب زیرزمینی به علت پمپاژ آب در نقاط مختلف مناطق مزبور توسط چاههای عمیق است و در صورتیکه این روند کند یا متوقف گردد، سطوح آب زیرزمینی بالاتر خواهند بود. از آنجا که با توجه به سطوح آب زیرزمینی کنونی امکان وقوع روانگرایی در هیچ یک از نواحی مورد مطالعه وجود ندارد، بررسی امکان وقوع روانگرایی در محل گمانه‌های اول تا نهم با سطح فرضی آب زیرزمینی ۵ و ۷ متری و در محل گمانه دهم با سطوح آب زیرزمینی فرضی ۲ و ۳ متری و سطح کنونی آب زیرزمینی ۵ متری انجام شد [۱۱ و ۱۲].



شکل (۳) ناحیه‌بندی منطقه مورد مطالعه و محل حفر گمانه‌ها [۳].

روند محاسبات

برای ارزیابی احتمال بروز پدیده روانگرایی در سطح زمین ابتدا باید مقادیر پتانسیل روانگرایی تعیین شوند. براساس مطالعات انجام شده بر روی ۱۰ گمانه موجود در شکل ۳، مقادیر پتانسیل روانگرایی برای گمانه‌های یک تا هشت با فرض تراز آب زیرزمینی ۵ متر و ۷ متر در جدول ۱ نشان داده شده است. با توجه به مقادیر مندرج در جدول ۱ مشاهده می‌شود که در تمامی موارد مقدار P_L کمتر از حد ۵ می‌باشد. در حالیکه این مقادیر برای گمانه‌های ۹ و ۱۰ در برخی موارد بیش از ۵ می‌باشد [۱۳]. بنابراین به علت کم بودن مقادیر بروز در سطح، تحلیل ریسک و آنالیز حساسیت فقط برای دو گمانه ۹ و ۱۰ انجام می‌شود. توجه شود که تراز آب زیرزمینی برای گمانه ۹ در اعماق ۵ متر و ۷ متر و برای گمانه ۱۰ در اعماق ۲ و ۳ و ۵ متر در نظر گرفته شده است.

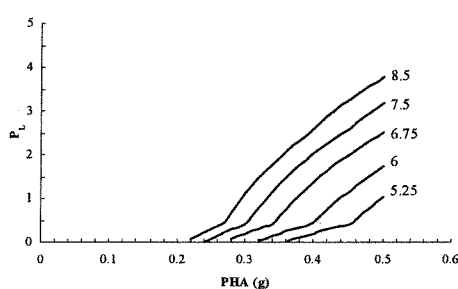
مقادیر بروز در سطح روانگرایی برای محل هر گمانه و برای هر سطح تراز آب زیرزمینی به ازای ۵ بزرگی زلزله (۵/۸، ۵/۵، ۶/۷، ۷/۵، ۶، ۵/۲۵) و مقادیر مختلف شتاب (صفر تا ۰/۵g با فواصل ۰/۱g) محاسبه شده است. \square_v و \square_v براساس مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی تعیین شده است [۱۳]. نسبت مقاومت تناوبی در هر عمق از شکل (۱) و با استفاده از مقادیر عدد نفوذ استاندارد اصلاح شده و براساس میزان ریزدانه خاک بدست آمده از آزمایش دانه‌بندی تعیین شده است [۱۴]. در نهایت با تقسیم نسبت مقاومت تناوبی بر نسبت تنش تناوبی، ضریب اطمینان در برابر روانگرایی برای اعماق مختلف بدست آمده و سپس با استفاده از روابط ۳ تا ۵ مقادیر بروز در سطح محاسبه شده است.

M=7.5

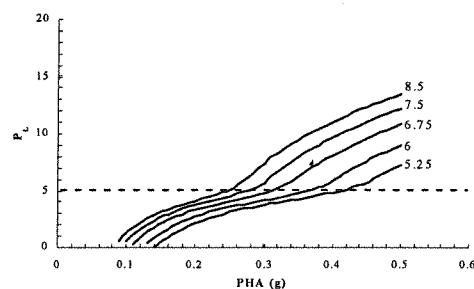
Borehole Number	G.W.T.=5m		G.W.T.=7m		
	$A_{max}=0.35g$	P_L	Liquefaction Potential	P_L	Liquefaction potential
BH-1		1.09	عدم بروز	1.02	عدم بروز
BH-2		1.62	عدم بروز	1.55	عدم بروز
BH-3		0.72	عدم بروز	0.30	عدم بروز
BH-4		4.72	عدم بروز	4.68	عدم بروز
BH-5		1.89	عدم بروز	1.63	عدم بروز
BH-6		1.20	عدم بروز	0.54	عدم بروز
BH-7		1.89	عدم بروز	1.82	عدم بروز
BH-8		0.00	عدم بروز	0.00	عدم بروز

تحلیل نتایج

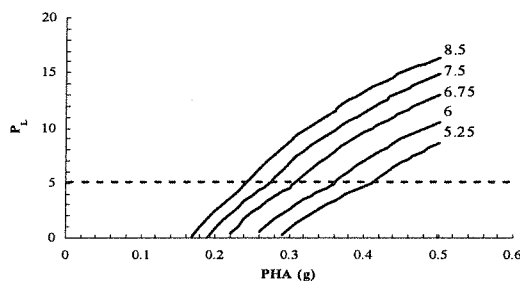
مقادیر بروز روانگرایی در سطح زمین در سطوح مختلف زمین‌لرزه در محل گمانه نهم با فرض قرار گرفتن تراز آب زیرزمینی در عمق‌های ۵ متری و ۷ متری از سطح زمین و در محل گمانه دهم در شکل‌های ۴ - الف تا ۴ - ب ترسیم شده است. همچنانکه در شکل ۴ - الف در مورد گمانه نهم با سطح آب زیرزمینی ۵ متر مشاهده می‌شود با افزایش سطح شتاب زلزله یا بزرگی آن احتمال بروز روانگرایی در سطح بیشتر می‌شود. با وقوع زلزله با بزرگی ۷/۵ ریشتر در صورتیکه شتاب ایجاد شده کمتر از $0.27g$ باشد پتانسیل روانگرایی حتماً از ۵ کمتر بوده و بنابراین روانگرایی در محل گمانه ۹ مشاهده نخواهد شد در صورتیکه بزرگی زمین‌لرزه ۸/۵ ریشتر باشد، شتابهای بیش از $0.245g$ ممکن است باعث بروز روانگرایی در سطح شود و در صورت کاهش بزرگی به $5/25$ ریشتر مقدار شتاب آستانه به $0.415g$ افزایش می‌یابد. اما در صورتیکه سطح آب زیرزمینی در محل گمانه نهم تا عمق ۷ متر پایین رود، حتی به ازای زمین‌لرزه‌ای با بزرگی ۸/۵ ریشتر روانگرایی در سطح پدیدار نخواهد شد. بنابراین در این مورد شتاب آستانه برای بروز در سطح وجود ندارد. این مطلب در شکل ۴ - ب نشان داده شده است.



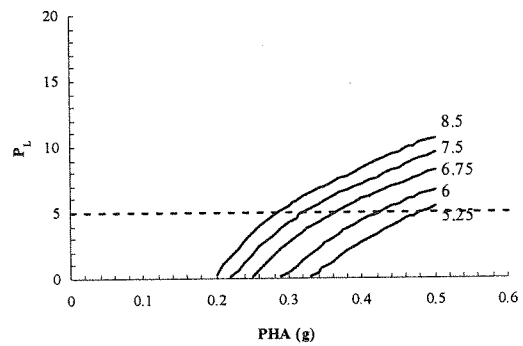
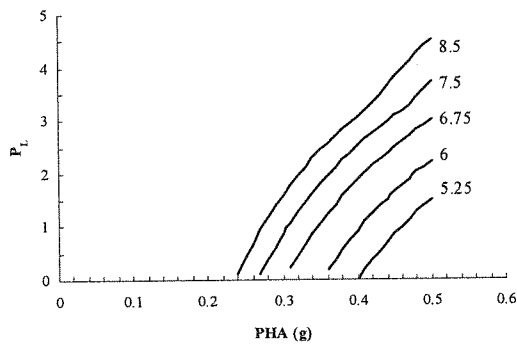
ب - گمانه نهم با سطح آب زیرزمینی ۷ متر



الف - گمانه نهم با سطح آب زیرزمینی ۵ متر

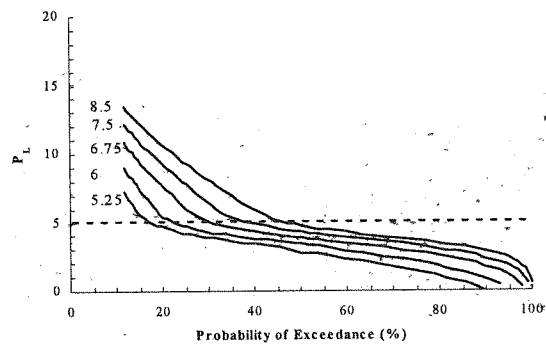
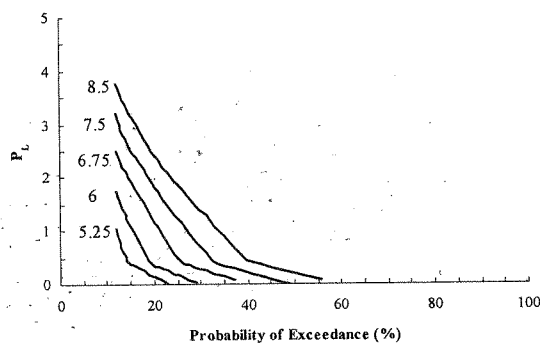


ب - گمانه دهم با سطح آب زیرزمینی ۲ متر.



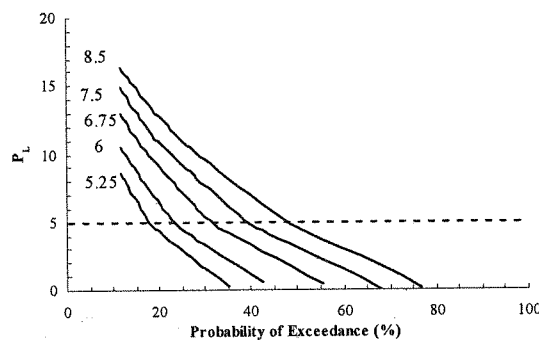
ت - گمانه دهم با سطح آب زیرزمینی ۳ متر. شکل (۴) مقادیر بروز در سطح در سطوح مختلف شتاب با فاصله کانونی ۳۰ کیلومتر و دوره بازگشت ۵۰ سال.

در گمانه دهم و با سطح آب زیرزمینی ۲ متر، براساس شکل ۴ - پ شتاب آستانه احتمال بروز روانگرایی در سطح زمین برای بزرگی ۵/۲۵ ریشتر، $0/41g$ می باشد. با افزایش بزرگی به ۸/۵ ریشتر مقدار این شتاب به $0/242g$ کاهش می یابد. در این حالت تنها در شرایطی که بزرگی زلزله ۸/۵ ریشتر بوده و حداکثر شتاب از $0/44g$ تجاوز نماید بروز روانگرایی در سطح زمین قطعی خواهد بود. در شکل ۴ - ت دیده می شود با پایین رفتن سطح آب زیرزمینی تا عمق ۳ متری، مقدار شتاب آستانه احتمال بروز روانگرایی در سطح به ازای بزرگی های ۵/۲۵ تا ۸/۵ ریشتر به ترتیب از $0/482g$ تا $0/284g$ کاهش می یابد. همچنانکه مشاهده می شود با پایین رفتن تراز آب زیرزمینی مقادیر شتاب آستانه احتمال بروز در سطح افزایش می یابد. در نهایت مطابق شکل ۴ - ت مشاهده می شود که با پایین رفتن تراز آب به عمق ۵ متر هیچ گونه بروز روانگرایی در سطح حتی به ازای بزرگی ۸/۵ نیز محتمل نخواهد بود.

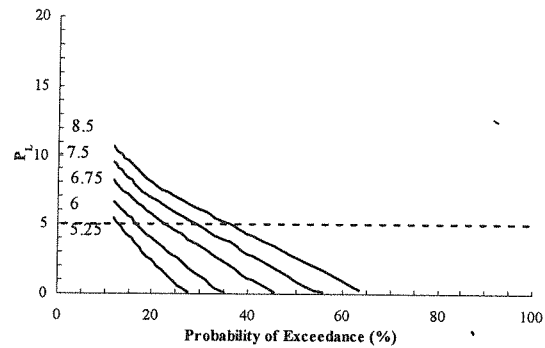
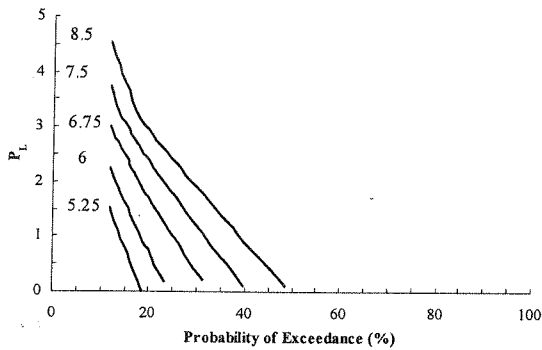


ب - گمانه نهم با سطح آب زیرزمینی ۲ متر.

الف - گمانه نهم با سطح آب زیرزمینی ۵ متر.



پ - گمانه دهم با سطح آب زیرزمینی ۲ متر.



ت - گمانه دهم با سطح آب زیرزمینی ۳ متر. ث - گمانه دهم با سطح آب زیرزمینی ۵ متر.
 شکل (۵) احتمال بروز در سطح در مقادیر مختلف بزرگی با فاصله کانونی ۳۰ کیلومتر و دوره بازگشت ۵۰ سال.

در گام بعدی، احتمال بروز روانگرایی در سطح زمین به ازای مقادیر مختلف بزرگی زلزله بادر نظر گرفتن دوره بازگشت ۵۰ سال که عمر مفید سازه فرض شده و فاصله کانونی ۳۰ کیلومتر بدست آمده است. نتایج این محاسبات در شکل های ۵ - الف تا ۵ - ث ارائه شده است. در مورد گمانه نهم با تراز آب زیرزمینی ۵ متر احتمال نیاز به بررسی بیشتر بروز روانگرایی در سطح برای زلزله ای با بزرگی ۵/۲۵، ۱۷/۵ درصد بدست آمده است. در صورت افزایش بزرگی زلزله به ۸/۵، این احتمال به ۴۷/۵ درصد افزایش می یابد. نتایج مربوط به این حالت در شکل ۵ - الف آمده است. در شکل ۵ - ب احتمال بروز روانگرایی در سطح برای همین گمانه ولی با سطح آب زیرزمینی ۷ متر آورده شده است. همانگونه که در شکل دیده می شود به ازای تمام مقادیر بزرگی زمین لرزه، عدد بروز در سطح کمتر از ۵ بوده و احتمال بروز روانگرایی در سطح صفر است.

شکل ۵ - پ نشان دهنده مقادیر بروز روانگرایی در سطح در محل گمانه دهم با سطح آب زیرزمینی ۲ متر می باشد. همانطور که از این شکل مشاهده می شود، احتمال نیاز به بررسی بیشتر بروز روانگرایی در سطح به ازای بزرگی ۵/۲۵ ریشتر، ۱۷/۵ درصد و با افزایش بزرگی به ۸/۵ ریشتر تا ۴۷/۵ درصد افزایش می یابد. نکته جالب توجه آن است که مقادیر پتانسیل روانگرایی برای گمانه نهم با تراز آب زیرزمینی ۵ متر مشابه گمانه دهم با تراز آب زیرزمینی ۲ متر به دست آمده است. با پایین رفتن سطح تراز آب زیرزمینی در گمانه دهم به ۳ متری سطح زمین، مقادیر احتمال مذکور به ازای بزرگی ۵/۲۵ ریشتر به ۱۳ درصد و به ازای بزرگی ۸/۵ ریشتر به ۳۶ درصد کاهش می یابد. این مطلب در شکل ۵ - ت نشان داده شده است. در نهایت با توجه به شکل ۵ - ث مشخص می شود، در صورتیکه تراز آب زیرزمینی تا ۵ متر پایین آید، احتمال بروز روانگرایی در سطح به ازای تمامی مقادیر بزرگی صفر است. لازم به ذکر است که تنها در حالتیکه زلزله ای با بزرگی ۸/۵ ریشتر به وقوع بپیوندد احتمال بروز قطعی روانگرایی در سطح زمین در حد ۱۵ درصد است.

با توجه به نتایج فوق مشاهده می شود که حداکثر احتمال بروز روانگرایی در سطح برای منطقه مورد نظر به ازای بزرگی ۸/۵، ۴۷/۵ درصد می باشد و در صورتی که فاصله تراز آب زیرزمینی تا عمق سطح زمین ۷ متر باشد این احتمال برابر صفر خواهد بود. ضمناً به دلیل محدود نمودن شتاب به ۰/۵g و فاصله کانونی به ۳۰ کیلومتر به ازای دوره بازگشت ۵۰ سال در هیچ مورد احتمال بروز روانگرایی در سطح کمتر از ۱۲ درصد بدست نیامده است.

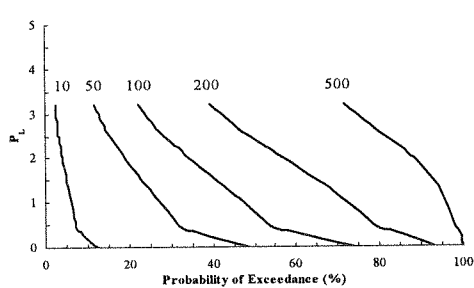
مقادیر احتمال بروز روانگرایی در سطح در مرحله قبل به ازای دوره بازگشت ۵۰ سال که عمر مفید یک سازه می باشد محاسبه شده است. در صورتیکه به هر دلیل دوره بازگشت بیشتر یا کمتری داشته باشیم، مقادیر احتمال تغییر خواهد کرد. نتایج مربوط به این حالت با در نظر گرفتن بزرگی زلزله ۷/۵ و فاصله کانونی ۳۰ کیلومتری برای هر دو گمانه نهم و دهم و به ازای مقادیر متفاوت سطح آب زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این محاسبات در شکل های ۶ - الف تا ۶ - ث ارائه شده است.

در مورد گمانه نهم با تراز آب زیرزمینی ۵ متر، احتمال نیاز به بررسی بیشتر برای بروز روانگرایی در سطح برای دوره بازگشت ۱۰ سال، ۹ درصد بدست آمده است. در صورت افزایش دوره بازگشت به ۵۰ سال، این احتمال به ۹۸/۵ درصد افزایش می یابد. نتایج مربوط به این حالت در شکل ۶ - الف آمده است. در شکل ۶ - ب احتمال بروز روانگرایی در سطح برای همین گمانه و با سطح آب زیرزمینی ۷ متر آورده شده است. همانگونه که در شکل دیده می شود، حتی با افزایش دوره

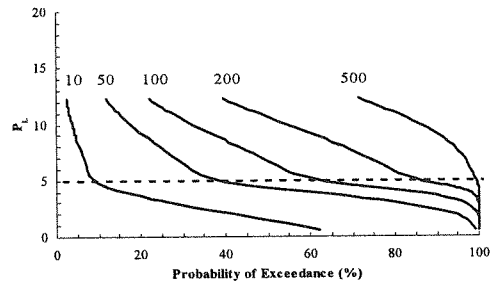
بازگشت به ۵۰۰ سال نیز عدد بروز در سطح کمتر از ۵ بوده و احتمال بروز روانگرایی صفر است.

شکل ۶ - پ نشان دهنده مقادیر بروز روانگرایی در سطح برای گمانه ۱۰ با سطح آب زیرزمینی ۲ متر می‌باشد. همانطور که از این شکل مشاهده می‌شود، احتمال نیاز به بررسی بیشتر برای بروز روانگرایی در سطح به ازای دوره بازگشت ۱۰ سال، ۹ درصد و با افزایش دوره بازگشت به ۵۰۰ سال این احتمال به ۹۹ درصد افزایش می‌یابد. در این مورد نیز مشاهده می‌شود که مقادیر احتمال نیاز به بررسی بیشتر برای بروز روانگرایی در سطح برای گمانه ۹ به ازای تراز آب زیرزمینی ۵ متر مشابه گمانه دهم با تراز آب زیرزمینی ۲ متر بدست آمده است. با پایین رفتن سطح تراز آب زیرزمینی در گمانه دهم تا ۳ متری سطح زمین، مقادیر احتمال به ازای دوره بازگشت ۱۰ سال به ۶/۵ درصد و به ازای دوره بازگشت ۵۰۰ سال به ۹۶/۵ درصد کاهش می‌یابد، این مطلب در شکل ۶ - ت نشان داده شده است. در نهایت با توجه به شکل ۶ - ث مشخص می‌شود، در صورتیکه تراز آب زیرزمینی تا سطح ۵ متر پایین آید، احتمال بروز روانگرایی در سطح به ازای تمامی مقادیر بزرگی صفر است.

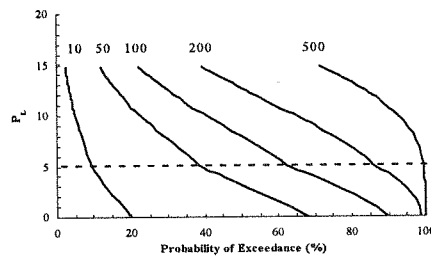
نکته مهم در مورد محل گمانه دهم آن است که افزایش تراز آب زیرزمینی از ۲ تا ۳ متر، تاثیر چندانی بر احتمال بروز روانگرایی در سطح محل این گمانه ندارد. در صورتیکه پایین رفتن تراز آب به ۵ متر باعث افت شدید در احتمال بروز روانگرایی می‌شود. این موضوع به دلیل وجود یک لایه حساس به روانگرایی بین عمق ۳ تا ۵ متری می‌باشد که با پایین رفتن تراز آب زیرزمینی و غیراشباع بودن آن افت شدیدی در مقدار بروز روانگرایی در سطح خواهیم داشت. در نهایت با توجه به نتایج فوق مشاهده می‌شود که حداکثر احتمال نیاز به بررسی بیشتر برای بروز روانگرایی در سطح برای منطقه موردنظر به ازای دوره بازگشت ۵۰۰ سال، ۹۹ درصد می‌باشد. اما اگر فاصله تراز آب زیرزمینی تا سطح زمین ۷ متر باشد، این احتمال برابر صفر خواهد بود که نشان دهنده عدم وقوع قطعی بروز روانگرایی در سطح در دوره بازگشت ۵۰۰ سال می‌باشد.



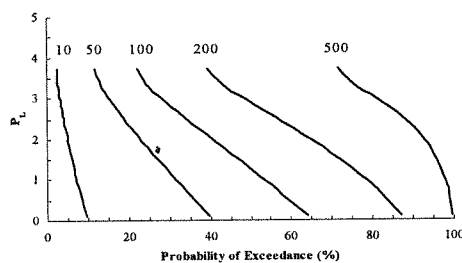
ب - گمانه نهم با سطح آب زیرزمینی ۷ متر.



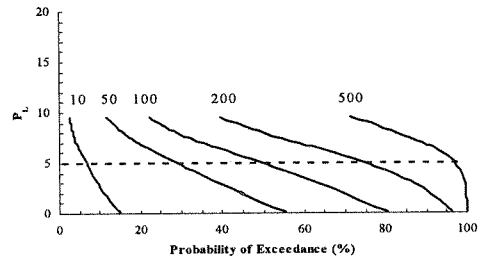
الف - گمانه نهم با سطح آب زیرزمینی ۵ متر.



ب - گمانه دهم با سطح آب زیرزمینی ۲ متر.

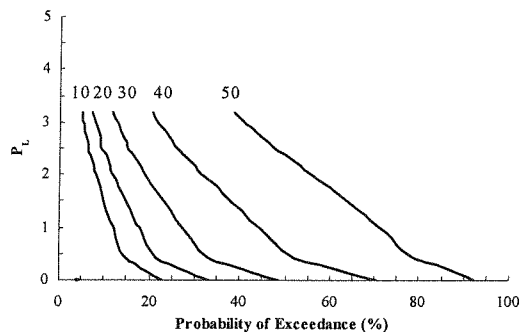


ث - گمانه دهم با سطح آب زیرزمینی ۵ متر.

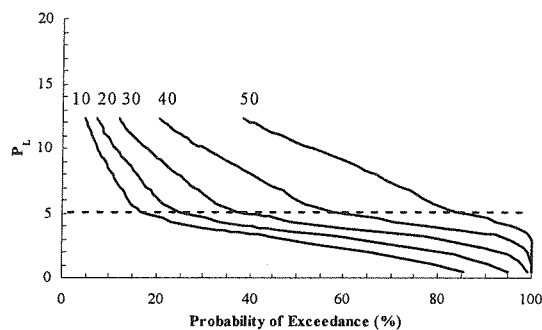


ت - گمانه دهم با سطح آب زیرزمینی ۳ متر.

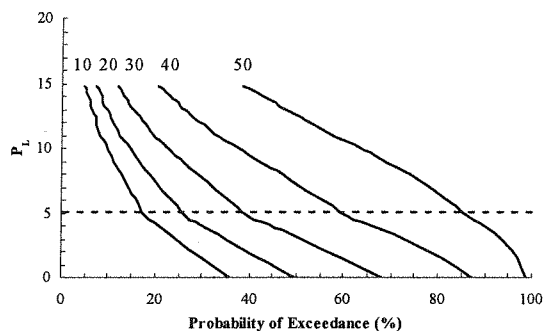
شکل (۶) احتمال بروز در سطح به ازای مقادیر مختلف دوره بازگشت با بزرگی ۷/۵ و فاصله کانونی ۳۰ کیلومتر.



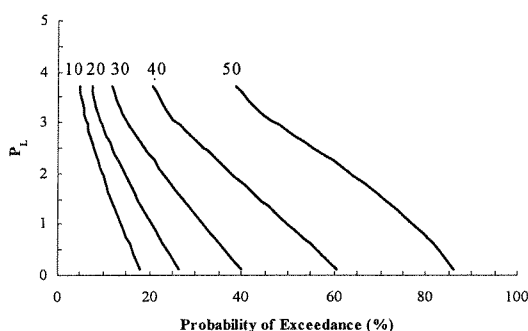
ب - گمانه نهم با سطح آب زیرزمینی ۷ متر.



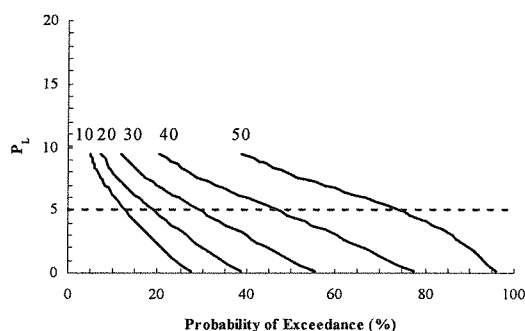
الف - گمانه نهم با سطح آب زیرزمینی ۵ متر.



پ - گمانه دهم با سطح آب زیرزمینی ۲ متر.



ث - گمانه دهم با سطح آب زیرزمینی ۵ متر.



ت - گمانه دهم با سطح آب زیرزمینی ۳ متر.

شکل (۷) احتمال بروز در سطح در مقادیر مختلف فاصله کانونی با بزرگی ۷/۵ و دوره بازگشت ۵۰ سال.

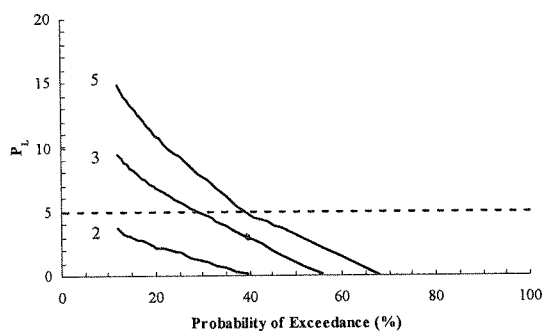
با توجه به شکل ۶ - پ مشاهده می‌شود که با فرض بزرگی ۷/۵ ریشتر و فاصله کانونی ۳۰ کیلومتر مقدار بروز روانگرایی در سطح کمتر از حد ۱۵ و به ازای همه دوره‌های بازگشت برابر ۱۴/۸ درصد می‌باشد. بنابراین در این حالت احتمال بروز قطعی روانگرایی در سطح منتفی است. ولی بدلیل نزدیکی مقدار بروز روانگرایی در سطح به حد ۱۵، با افزایش اندک بزرگی زلزله از ۵/۷ ریشتر و یا کاهش فاصله کانونی از ۳۰ کیلومتر در تمامی دوره‌های بازگشت زلزله احتمال قطعی بروز روانگرایی در سطح زمین وجود خواهد داشت. لازم به ذکر است که به دلیل محدود بودن شتاب در محاسبات به $g/0.5$ با بزرگی ۷/۵ ریشتر و فاصله کانونی ۳۰ کیلومتر، در هیچ یک از دوره‌های بازگشت احتمال بروز روانگرایی در سطح کمتر از ۲/۵ درصد بدست نیامده است.

مرحله بعدی، احتمال بروز روانگرایی در سطح زمین به ازای مقادیر مختلف فاصله کانونی با در نظر گرفتن دوره بازگشت ۵۰ سال و بزرگی زلزله ۷/۵ بدست آمده است. یکی از مشکلات تحلیل احتمالی خطر لرزه‌ای (PSHA) عدم تعیین حساسیت پاسخ مورد نظر نسبت به پارامترهای لرزه‌ای است [۱۵]. همانطور که در مراحل قبل نیز ذکر شد، از اهداف این تحقیق تعیین

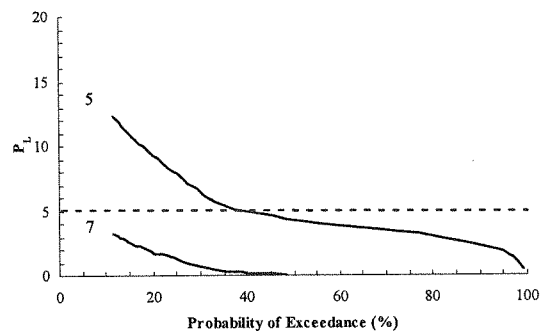
حساسیت عدد بروز در سطح نسبت به پارامترهای مختلف لرزه‌ای مثل بزرگی، دوره بازگشت و فاصله کانونی زمین‌لرزه تا محل موردنظر است. لذا تحلیل خطر لرزه‌ای برای فواصل کانونی ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ کیلومتر انجام شد. نتایج این محاسبات در شکل‌های ۷-الف تا ۷-ث ارائه شده است.

در مورد گمانه نهم با تراز آب زیرزمینی ۵ متر، احتمال نیاز به بررسی بیشتر بروز روانگرایی در سطح برای زلزله با فاصله کانونی ۱۰ کیلومتر ۸۵ درصد به دست آمده است. با افزایش فاصله کانونی به ۵۰ کیلومتر این احتمال به ۱۷/۵ درصد کاهش می‌یابد. نتایج مربوط به این حالت در شکل ۷-الف آمده است. در شکل ۷-ب، احتمال نیاز به بررسی بیشتر برای بروز روانگرایی در سطح برای همین گمانه ولی با سطح آب زیرزمینی ۷ متر ارائه شده است. همانگونه که در شکل دیده می‌شود، به ازای تمام مقادیر بزرگی‌های زلزله، عدد بروز در سطح کمتر از ۵ بوده و احتمال بروز روانگرایی در سطح صفر است.

شکل ۷-پ نشان دهنده مقادیر بروز روانگرایی در سطح، برای گمانه دهم با سطح آب زیرزمینی ۲ متر می‌باشد. همانطور که از این شکل مشاهده می‌شود، احتمال نیاز به بررسی بیشتر برای بروز روانگرایی به ازای فاصله کانونی ۱۰ کیلومتر ۸۵/۵ درصد و با افزایش فاصله به ۵۰ کیلومتر تا ۱۸ درصد کاهش می‌یابد. مقادیر احتمال نیاز به بررسی بیشتر بروز روانگرایی در سطح برای گمانه نهم با تراز آب زیرزمینی ۵ متر مشابه گمانه دهم با تراز آب زیرزمینی ۲ متر به دست آمده است. با پایین رفتن سطح تراز آب زیرزمینی در گمانه دهم تا ۳ متری سطح زمین مقادیر احتمال به ازای فاصله کانونی ۱۰ کیلومتر به ۷۴ درصد و به ازای فاصله کانونی ۵۰ کیلومتر به ۱۲/۵ درصد کاهش می‌یابد. این مطلب در شکل ۷-ت نشان داده شده است. در نهایت با توجه به شکل ۷-ث مشخص می‌شود در صورتیکه تراز آب زیرزمینی تا ۵ متر پایین آید احتمال نیاز به بررسی بیشتر بروز روانگرایی در سطح به ازای تمامی مقادیر فواصل کانونی، صفر است. با توجه به نتایج فوق مشاهده می‌شود که حداکثر احتمال نیاز به بررسی بیشتر بروز روانگرایی در سطح برای منطقه مورد نظر به ازای فاصله کانونی ۱۰ کیلومتر ۸۵/۵ درصد می‌باشد که احتمال بالایی است ولی در صورتیکه فاصله تراز آب زیرزمینی تا سطح زمین ۷ متر باشد، این احتمال به صفر خواهد رسید. با توجه به شکل ۷-پ مشاهده می‌شود که با فرض بزرگی ۷/۵ ریشتر و دوره بازگشت ۵۰ سال مقدار بروز روانگرایی در سطح کمتر از حد ۱۵ و به ازای همه مقادیر فاصله کانونی برابر ۱۴/۸ درصد می‌باشد. بنابراین در این حالت احتمال بروز قطعی روانگرایی در سطح منتفی است. ولی بدلیل نزدیکی مقدار بروز روانگرایی در سطح به حد ۱۵، با افزایش اندک بزرگی زلزله از ۷/۵ ریشتر و یا افزایش دوره بازگشت از ۵۰ سال در تمامی فواصل کانونی زلزله احتمال قطعی بروز روانگرایی در سطح زمین وجود خواهد داشت. در این حالت از تحلیل نیز به علت محدود نمودن شتابها به $0.15g$ با بزرگی ۷/۵ ریشتر و دوره بازگشت ۵۰ سال، به ازای تمامی فواصل کانونی حداقل احتمال بروز روانگرایی در سطح، ۵ درصد بدست آمده است.



ب - محل گمانه دهم.



الف - محل گمانه نهم.

شکل (۸) احتمال بروز در سطح به ازای مقادیر مختلف تراز آب زیرزمینی با بزرگی ۷/۵، دوره بازگشت ۵۰ سال و فاصله کانونی ۳۰ کیلومتر.

در نهایت نتایج تحلیل خطر لرزه‌ای برای گمانه‌های نهم و دهم به ازای دوره بازگشت ۵۰ سال، بزرگی ۷/۵ و فاصله کانونی ۳۰ کیلومتر با سطوح آب زیرزمینی مختلف در شکل‌های ۸-الف و ۸-ب ارائه شده است. شکل ۸-الف نتیجه محاسبات در

محل گمانه نهم را به ازای سطح آب زیرزمینی ۵ و ۷ متر نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل نشان داده شده است، حداکثر احتمال نیاز به بررسی بیشتر برای بروز روانگرایی در سطح به ازای تراز آب زیرزمینی ۵ متر، ۳۸ درصد می‌باشد. با پایین رفتن سطح آب زیرزمینی تا عمق ۷ متر احتمال وقوع روانگرایی در محل این گمانه به شدت کاهش یافته به صفر می‌رسد. شکل ۸- ب نیز نتیجه محاسبات در محل گمانه دهم به ازای سطوح آب زیرزمینی ۲،۳ و ۵ متر را نشان می‌دهد. همانگونه که از این شکل مشاهده می‌شود، حداکثر احتمال نیاز به بررسی بیشتر برای بروز روانگرایی در سطح به ازای تراز آب زیرزمینی ۲ متر، ۳۸ درصد می‌باشد. این حالت باز هم مشابه احتمال بدست آمده برای گمانه نهم با سطح آب زیرزمینی ۵ متر می‌باشد. همچنین با پایین رفتن سطح آب زیرزمینی تا ۳ متر در محل گمانه دهم، حداکثر این احتمال به ۲۸ درصد کاهش می‌یابد. در نهایت با رسیدن سطح آب زیرزمینی به ۵ متر احتمال بروز روانگرایی به شدت کاهش یافته و به صفر می‌رسد. با توجه به شکل ۸- ب مشاهده می‌شود که با فرض بزرگی $7/5$ ریشتر، دوره بازگشت ۵۰ سال و فاصله کانونی ۳۰ کیلومتر مقدار بروز روانگرایی در سطح کمتر از حد ۱۵ و برابر $14/8$ می‌باشد. بنابراین در این حالت احتمال بروز قطعی روانگرایی در سطح منتفی است. ولی بدلیل نزدیکی مقدار بروز روانگرایی در سطح به حد ۱۵، با افزایش اندک بزرگی زلزله از $7/5$ ریشتر، افزایش دوره بازگشت از ۵۰ سال و یا کاهش فاصله کانونی از ۳۰ کیلومتر با سطح آب زیرزمینی ۲ کیلومتر احتمال قطعی بروز روانگرایی در سطح زمین وجود خواهد داشت. در نهایت اینکه به دلیل محدود بودن شتاب در محاسبات به $0.05g$ ، با بزرگی $7/5$ ریشتر، دوره بازگشت ۵۰ سال و فاصله کانونی ۳۰ کیلومتر، در هیچ یک از سطوح آب زیرزمینی احتمال بروز روانگرایی در سطح کمتر از ۱۲ درصد بدست نیامده است.

از مطالب قبل می‌توان نتیجه گرفت که برای ایمن سازی این دو منطقه در برابر خطر وقوع روانگرایی باید با پمپاژ مداوم و پیوسته آب، سطح تراز آب زیرزمینی در محل گمانه نهم حداقل تا عمق ۷ متری و در محل گمانه دهم حداقل تا ۵ متری نگاه داشته شود. در غیر این صورت احتمال بروز روانگرایی در محل این گمانه‌ها و بروز خسارت به سازه‌ها و ابنیه قرار گرفته بر آنها وجود خواهد داشت.

نتیجه گیری

تحلیل ریسک و حساسیت خطر بروز روانگرایی در سطح برای منطقه‌ای از جنوب غربی تهران انجام شد. با استفاده از مقادیر عدد نفوذ استاندارد، مقاومت تناوبی خاک در برابر روانگرایی محاسبه و با تقسیم آن بر نسبت تنش برشی تناوبی ضریب اطمینان در برابر روانگرایی به دست آمد. مقادیر بروز روانگرایی در سطح با استفاده از روش ایواساکی و در دو ناحیه از منطقه مورد نظر محاسبه گردید. از طرف دیگر با استفاده از رابطه دونولن، توزیع پوآسون و ثوابت ارائه شده توسط احمدی و همکاران، منحنیهای خطر لرزه‌ای برای تهران به دست آمد. با ترکیب این داده‌ها منحنیهای خطر بروز روانگرایی در سطح برای دو ناحیه فوق در سطوح آب زیرزمینی مختلف، بزرگیهای مختلف زمین لرزه، فواصل کانونی مختلف و دوره‌های بازگشت متفاوت محاسبه گردید. شتاب آستانه برای محدوده نیاز به بررسی بیشتر برای بروز روانگرایی در سطح در موارد فوق تعیین گردید. مقادیر احتمال بروز قطعی و محتمل روانگرایی در مناطق مختلف بررسی شد و در نهایت نتیجه‌گیری گردید که حداقل عمق تراز آب زیرزمینی برای ایمن سازی ناحیه نهم در برابر روانگرایی ۷ متر و برای ناحیه دهم ۵ متر می‌باشد، بنابراین باید با پمپاژ مداوم و پیوسته، سطح تراز آب زیرزمینی پایین تر از این حدود قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

نگارندگان مقاله مراتب قدردانی خود را از شورای پژوهشهای علمی کشور، معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی شریف و تکنیسین‌های آزمایشگاه مکانیک خاک دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شریف اعلام می‌دارند.

مراجع

- [1] Kramer, S.L., (1996), "Geotechnical earthquake engineering", Prentice-Hall Inc., Sec.9.
- [2] Haeri, S.M., Zolfaghary, M.R. (1992), "On the earthquake induced liquefaction in Astaneh, Iran", Proceeding of 10th World Conference on Earthquake Engineering, Balkema, Rotterdam, PP. 129-134

- [۳] حائری، سیدمحسن، طرح ملی ریز پهنه‌بندی شهر تهران از دیدگاه ژئوتکنیک لرزه‌ای، ریز پهنه‌بندی جنوب غربی تهران در برابر روانگرایی، گزارش مراحل ۲ و ۳، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۷۷.
- [4] Seed, H.B., Idriss, I.M. (1971), "Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential", Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 107, No. SM9, PP. 1249-1274.
- [5] Seed, H.B., Tokimatsu, D., Harder, L.F., Chung, R.M. (1985), "Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluation," Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 112, No. GT11, PP. 1016-1032.
- [6] Iwasaki, T. (1982), "Microzonation for soil liquefaction potential using simplified method," Proc. 3rd Int. Conf. On Microzonation, Seattle, Vol. 3, pp. 1319-1330.
- [7] Nowroozi, A. A. (1976), "Seismotectonic provinces of Iran", Bull. Seism. Soc. Am. 66, 1249-1276.
- [8] Rowshandel, B., Nemat-Nasser, S., and Adeli, H. (1978), "Atentative study of seismic risk in Iran", Iranian J. Sci. Tech. 7, pp. 221-241.
- [9] Ahmadi, G., Mostaghel, N., Nowroozi, A. A. (1989), "Earthquake risk analysis of Iran-V: Probabilistic seismic risks for various peak ground acceleration", Iranian J. Sci & Tech., Vol. 13, Nos. 2&3, pp. 115-156.
- [10] Donovan, N.C. (1972), "Earthquake hazards for buildings", National Bureau of standard Build, Science Series 46, Building Practice for Disaster Mitigation, Boulder, Colorado.
- [۱۱] شیرازی، علی، ارزیابی پتانسیل روانگرایی در جنوب تهران با استفاده از عدد نفوذ استاندارد، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، (۱۳۷۸)
- [۱۲] حمیدی، امیر، ارزیابی پتانسیل روانگرایی در آبرفتهای ماسه‌ای بخشی از جنوب تهران با استفاده از روش حالت پایدار، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف (۱۳۷۸)
- [۱۳] حائری، سیدمحسن، طرح ملی ریز پهنه‌بندی شهر تهران از دیدگاه ژئوتکنیک لرزه‌ای، ریز پهنه‌بندی جنوب غربی تهران در برابر روانگرایی، گزارش مرحله ۶، دانشگاه صنعتی شریف، (۱۳۷۸)
- [۱۴] حائری، سیدمحسن، طرح ملی ریز پهنه‌بندی شهر تهران از دیدگاه ژئوتکنیک لرزه‌ای، ریز پهنه‌بندی جنوب غربی تهران در برابر روانگرایی، گزارش مراحل ۴ و ۵، دانشگاه صنعتی شریف، (۱۳۷۸)
- [15] Green, R.A., Hall, W.J. (1994), "An overview of selected hazard analysis methodologies", A Report on a Research Project Sponsord by the Department of Civil Engineering, Universtiy of Illinois at Urbana-Champaign.