

## ارزیابی خطرپذیری لرزه‌ای شهر مشهد

سیدعلی رضویان امرئی<sup>۱\*</sup>، رامین جعفری<sup>۲</sup>، فرزاد علی دوست ابدی خواه<sup>۳</sup>

۱- استادیار، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

۲- کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

۳- کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

### چکیده

زلزله پدیده‌ای است که دانش بشری علی‌رغم کسب اطلاعات زیاد در ارتباط با منشاء و مکانیسم آن، تاکنون نتوانسته در خصوص پیش‌بینی زمان وقوع این رویداد پیشرفت قابل‌توجهی داشته باشد. لذا ضروری به نظر می‌رسد که به نحو منطقی و آماری و با توجه به شرایط موجود نسبت به پیش‌بینی تلفات و خسارات ناشی از وقوع زلزله احتمالی و شناخت کاستی‌های موجود در سیستم‌های سازه‌ای و شهری و مرتفع نمودن آن‌ها پیش از وقوع حادثه اقدامات لازم صورت پذیرد. به‌طور کلی هدف از این تحقیق ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌های شهر مشهد است به ترتیبی که با شناخت وضعیت حال حاضر ساختمان‌های موجود در شهر، بتوان میزان آسیب‌پذیری آن‌ها را در جهت افزایش ایمنی و بهبود شرایط موجود برآورد نمود. این تحقیق با استفاده از اطلاعات گردآوری شده از سازمان آمار و فناوری اطلاعات شهرداری مشهد نظیر نوع سازه‌ها، تعداد و مترائز طبقات، جمعیت نواحی، نوع خاک نواحی مختلف و سایر داده‌های موردنیاز و با روش هازیوس HAZUS انجام شده است. در این روش برای محاسبه عملکرد لرزه‌ای سازه، منحنی تقاضای انواع سازه‌ها با میرایی مختلف با منحنی پاسخ بر اساس نوع خاک قطع داده می‌شوند. خروجی‌های این تحقیق شامل زیربنای آسیب‌دیده به تفکیک نوع سازه، تلفات جانی احتمالی و خسارات مالی وارده تحت اثر زلزله طرح آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران می‌باشد. از نرم‌افزار GIS-10.2 نیز برای نمایش خروجی‌ها استفاده شده است. از نتایج بدست آمده می‌توان دریافت مناطق ۴، ۲، ۵، ۶ به ترتیب به دلیل آسیب‌پذیری بیشتر، به مقاوم‌سازی و توجه مضاعف نیازمند می‌باشند.

کلمات کلیدی: خطرپذیری، مشهد، SELENA، زلزله، خسارت.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2017.81346.1132	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2017.81346.1132	۱۳۹۷/۱۰/۳۰	۱۳۹۶/۰۵/۱۶	۱۳۹۶/۰۵/۱۶	۱۳۹۶/۰۴/۱۰	۱۳۹۶/۰۱/۱۶
			سیدعلی رضویان امرئی razavian@pnu.ac.ir		*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

## Seismic Risk Assessment of Mashhad

Seyed Ali Razavian Amrei<sup>1\*</sup>, Ramin Jafari<sup>2</sup>, Farzam Alidoost Abadikhah<sup>3</sup>

*1-Assistant professor, Civil Engineering Department, Payam-e-Noor University, Tehran, Iran*

*2-MSc in Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Payam-e-Noor University, Tehran, Iran*

*3- MSc in Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Payam-e-Noor University, Tehran, Iran*

### ABSTRACT

*Earthquake is a Natural phenomenon that human knowledge, despite achieving much information about the origin and mechanism of it; So, it is essential that the logical and statistical manner and in accordance with existing to forecast potential losses and damages caused by the earthquake and identifying shortcomings in the systems and urban structures And resolve them before the disaster measures applied. In general, the aim of this study was to assess the seismic vulnerability of buildings in Mashhad in order to understand the current state of existing buildings in the city that can be vulnerability them in order to increase safety and improve existing estimates. This study, using informations gathered by the Statistics and Information Technology Organization of Mashhad Municipality -like type of structures, number and size of floors, population of each regions, soil types and etc.- and is implemented with with "HAZUS" method and the risk analysis software "SELENA ver 6.0". In this method, for calculating the seismic performance of structures, the demand curve of various structures with different damping effects and the response curve based on soil type are crossed together. The outputs include damaged area by the type of structures, probable loss of life and damage to property, inflicted by the design earthquake of Iran 2800 code. GIS 10.2 was used for illustrate the results. From these results it can be understood the 4, 2, 5, 6 regions of Mashhad due to greater vulnerability, requires retrofitting and needs more attention.*

### ARTICLE INFO

Received: 05/04/2017

Revised: 01/07/2017

Accepted: 07/08/2017

### Keywords:

*Risk,  
Mashhad,  
Selena,  
Earthquake,  
Damage,*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2017.81346.1132

\*Corresponding author: Seyed Ali Razavian Amre

Email address: razavian@pnu.ac.ir

## ۱- مقدمه

مخاطرات طبیعی بخشی از رخدادهای اجتناب‌ناپذیر جهان اطراف ما هستند. سیل، طوفان، زمین‌لرزه، گردباد، کولاک، سونامی، آتش‌فشان، زمین‌لغزش، فروچاله و دیگر حوادث طبیعی را نمی‌توان کاملاً کنترل کرد. برخی از این حوادث ممکن است محیط بومی‌شناختی را نیز تغییر دهند. از این رو شناخت مخاطرات، راهی برای مقابله با این حوادث است. بررسی مخاطرات زمین‌شناختی به‌منظور کاهش آسیب‌پذیری جامعه و افزایش روند توسعه کشور بوده و در این راستا بررسی‌های پراکنده‌ای در زمینه زمین‌لرزه، رانش زمین و... در مناطق مختلف کشور انجام شده است. وقوع زلزله‌های شدیدی مانند زلزله بم، بوئین‌زهرا و طبس در ایران باعث به وجود آمدن خسارت‌های مالی و تلفات جانی و صدمات اجتماعی جبران‌ناپذیری شده که احتمال رخ دادن زلزله‌هایی مشابه باعث افزایش شتاب در استفاده از روشها و فناوری‌های جدید در ساختمان‌ها به جهت کاهش اثرات زلزله در کشور شده است [۱].

بر اساس آمار موسسه زمین‌شناسی آمریکا (USGS)<sup>۱</sup>، سالانه به‌طور متوسط حدود ۱،۴۴۴،۴۶۹ زلزله با بزرگی بیش از دو در مقیاس امواج درونی زمین در دنیا رخ می‌دهد که بزرگی ۱۴۴،۴۶۹ زمین‌لرزه بیش از سه ریشتر و بزرگی حدود ۱۴۷۰ زمین‌لرزه، بیش از پنج ریشتر است. در طول قرن بیستم حدود ۱۱۰۰ زلزله مرگبار در ۷۵ کشور جهان رخ داده و علاوه بر خسارات مادی عظیم، حداقل ۱/۵ میلیون نفر جان خود را بر اثر این رویداد طبیعی از دست داده‌اند [۲]. با توجه به آمار مرکز لرزه‌نگاری موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، به‌طور میانگین روزانه ۳۰ زلزله ایران را می‌لرزاند و به‌طور میانگین سالانه وقوع ده هزار زمین‌لرزه در کشور ثبت می‌شود. در ۲۵ سال گذشته، ۶ درصد از تلفات جانی کشور ناشی از زلزله بوده است [۳].

شهر مشهد به‌عنوان یکی از شهرهای بزرگ ایران در ناحیه‌ای بین کوه‌های چین خورده و رانده شده کپه داغ از سمت شمال و شمال شرق و کوه‌های چین خورده و رانده شده بینالود از سمت جنوب غرب قرار گرفته است. بررسی زمین‌لرزه‌های منطقه حکایت از فعالیت‌های شدید در قرن‌های گذشته، به ویژه در قرن هجدهم میلادی و برقراری آرامش نسبی بعد از آن دارد [۴]. در سال ۱۳۸۵، در مجموعه شهری مشهد ۲۷۵ ریزلرزه و زمین‌لرزه اتفاق افتاده است که از این تعداد ۳ زلزله بالاتر از ۴/۵ ریشتر بوده است که مهم‌ترین آن‌ها زمین‌لرزه مشهد با قدرت ۶/۶ در مقیاس ریشتر بوده است [۵]. وجود چنین مسئله‌ای و همچنین وجود بافت‌های قدیمی در مناطق مختلف شهر که پایداری اندکی در برابر زلزله دارند، موجب تشدید آسیب‌پذیری مناطق مختلف شهر شده است [۶]. این شهر یکی از قطب‌های گردشگری مذهبی کشور نیز محسوب می‌شود و طبق آمار سال ۱۳۹۴ سازمان گردشگری، هر ساله حدود ۲۰ میلیون زائر و گردشگر وارد آن می‌شوند که باعث افزایش جمعیت شهر می‌گردد. لذا در صورت وقوع زلزله، خسارات مالی و جانی زیادتری به‌جا خواهد گذاشت. لذا ضروری است با استفاده از راهکارهای مناسب، صدمات جانی را به حداقل رسانده و خسارات مالی را کاهش دهیم. به‌این‌ترتیب شناسایی مناطق آسیب‌پذیر و برآورد خسارات احتمالی زلزله در نواحی مختلف با توجه به وضعیت موجود سازه‌ها می‌تواند روشی در جهت برطرف کردن ضعف‌های موجود و در نتیجه کاهش خسارتها باشد. در این تحقیق با استفاده از روش تحلیل خطرپذیری لرزه‌ای به این مهم پرداخته شده است. همچنین می‌توان با استفاده از تحلیل‌های خطرپذیری، مقدار و مکان خسارات به وجود آمده به وجود آمده ناشی از زلزله احتمالی را بدست آورد و پیش از وقوع زلزله در جهت رفع نقاط ضعف موجود اقدام نمود. به‌عنوان مثال در صورت وقوع زلزله شدید و بروز خرابی‌های گسترده، جمع‌آوری و انتقال آوار باید در سریعترین زمان ممکن انجام شود، به این علت که اولاً راه‌های دسترسی باز شود و امداد رسانی به آسانی انجام گردد و ثانیاً آوار باعث آلودگی و شیوع بیماری‌های مختلف نگردد، که با بدست آمدن حجم آوار و نوع آن می‌توان مسیرها و گودهایی را در مکان مناسب جهت انتقال آوار پیش‌بینی کرد. ظرفیت ارگانهای امداد رسانی و آتش‌نشانی نیز باید با توجه به تلفات و صدمات پیش‌بینی شده ارتقا یابد. اگرچه تعیین دقیق زمان وقوع زلزله امکان‌پذیر نیست ولی بزرگای آن و شدت خسارت وارده با توجه به گسلها و سوابق لرزه‌ای منطقه قابل تعیین است. تعداد تلفات و خسارت اقتصادی سازه‌های ناشی از زلزله محتمل را می‌توان بر پایه اطلاعات دقیق و زیربنای آسیب‌دیده سازه‌های موجود بدست آورد. جهت تحلیل خطرپذیری یک ناحیه یا یک شهر، اطلاعاتی مانند مشخصات سازه‌ای، جمعیتی، نوع خاک، شتاب حرکت زمین و پارامترهای دیگر موردنیاز می‌باشد.

<sup>1</sup>United States Geological Survey

## ۲- بررسی تحقیقات انجام شده

امروزه اهمیت لرزه‌خیزی تا حدی است که تقریباً تمامی کشورهای زلزله‌خیز جهان با یک رویکرد واحد در جهت کاهش اثرات ویرانگر زلزله تلاش می‌کنند و با به اشتراک گذاشتن تحقیقات و یافته‌های خود، اطلاعاتشان را بروزرسانی می‌نمایند. در این راستا از سال ۱۳۸۸ طرح مدل زلزله خاورمیانه (EMME)<sup>۲</sup> با همکاری کشورهای مختلف منطقه از جمله ایران در قالب پروژه مدل جهانی زلزله در حال اجرا است و از اهداف این طرح می‌توان مطالعه کلی تاریخچه لرزه‌خیزی، وضعیت گسل‌ها و پهنه‌بندی خطر زلزله در منطقه، مطالعات کاهش آسیب‌پذیری در برابر زلزله و در نتیجه تهیه و بروزرسانی نقشه خطر زمین‌لرزه در سطح منطقه بیان کرد. طرح مذکور در چند شهر نمونه شامل مشهد، کراچی (پاکستان)، ایروان (ارمنستان)، تفلیس (گرجستان)، ایربد (عمان) و تیر (لبنان) انجام شده و در هر یک از این شهرها، اطلاعاتی در زمینه وضعیت ساختمان‌ها، تراکم جمعیت، شرایط خاک و... تهیه شده است. در راستای طرح مدل زلزله منطقه خاورمیانه، مدل ریزپهنه‌بندی خطر زلزله در شهر مشهد طراحی شده است [۷]. در سال ۱۳۹۴ تحقیقی توسط یونس غلامی و همکاران با روش توصیفی-تحلیلی با استفاده از مدل فازی در جی-آی-اس GIS<sup>۳</sup> مورد تحلیل قرار گرفت که هدف آن پیش بینی فضاهای آسیب‌پذیر شهر مشهد در هنگام وقوع زلزله بود. نظریه فازی اولین بار در سال ۱۹۶۵ توسط پروفیسور عسگرزاده، استاد دانشگاه برکلی آمریکا مطرح شد و پس از آن به صورت یک نظریه کاربردی برای علوم گوناگون مطرح گردید [۸]. در منطق فازی مقادیر بر اساس الگوریتم‌های مختلف، به عددی بین صفر و یک تبدیل می‌شود که معرف میزان عضویت فازی<sup>۴</sup> است [۸]. در سال ۲۰۱۱ نیز آژانس همکاری‌های بین‌المللی ژاپن (JICA)<sup>۵</sup> با همکاری مرکز مطالعات محیط زیست تهران بزرگ، شرایط موجود شهر تهران را به جهت تحلیل خطرپذیری، ارزیابی نمودند [۹]. روشی که در این گزارش برای بدست آوردن تابع آسیب استفاده شده، روش خسارت بر مبنای شدت زلزله است. این روش در بسیاری از مناطق کاربرد دارد ولی عموماً روشی است که بر مبنای اطلاعات گذشته و از تجربیات در زلزله‌های قبلی بدست می‌آید. روش دیگری که برای مطالعه شهر تهران در سال ۱۳۹۱ انجام شده، روش طیف جابجایی بود که بر خلاف روش قبلی، بیشتر مبتنی بر مشخصات مهندسی سازه است تا داده‌های قبلی [۱۰]. البته مبنای گزارش آژانس همکاری‌های بین‌المللی ژاپن نیز بر اساس تعداد سازه‌های آسیب‌دیده بود و نه مبتنی بر مساحت‌های آسیب‌دیده، که این امر ارزیابی خسارت اقتصادی را با مشکل مواجه می‌نماید. اما مبنای روش دوم که برای تهران انجام شد، مقدار زیربنای آسیب‌دیده است و آسیب‌های اقتصادی وارد شده بر حسب مترمربع بوده که قابل ارزیابی و تحلیل می‌باشند. در این مطالعه که بر روی شهر مشهد انجام گرفته از روش دوم (روش طیف جابجایی) استفاده شده است. در سال ۱۳۹۴ تحقیقی برای شهر قزوین بر مبنای همین روش انجام شده است [۲].

## ۳- روش تحقیق

این تحقیق با استفاده از نسخه ۶ نرم‌افزار سلنا (SELENA ver.6) انجام شده است. نرم‌افزار مذکور در سال ۲۰۰۷ و با همکاری کشورهای اسپانیا و نروژ بر پایه اصول روش هازیوس (HAZUS)<sup>۶</sup> نوشته شده و در سال ۲۰۱۳ نسخه ۶ آن ارائه گردیده است. نرم‌افزار با استفاده از برنامه متلب (MATLAB) و در محیط Dos اجرا می‌شود. این نرم‌افزار با استفاده از رویکرد درخت منطقی تهیه شده است و این امکان در آن وجود دارد که برای کاربر حالت‌های مختلف ورود داده‌ها و تحلیل همزمان آن‌ها با در نظر گرفتن وزن منطقی هر یک از داده‌ها میسر باشد. ورودی اطلاعات برای هر منطقه از شهر مشهد، از سازمان آمار و فناوری اطلاعات شهرداری مشهد بدست آمده است که این اطلاعات شامل نوع سازه، تعداد طبقات، نوع کاربری، مترای طبقات، جمعیت و... بوده که به صورت فایل اکسل (دیتا بیس نقشه GIS شهر) دریافت و تفکیک شدند. داده‌ها در حوزه‌های مختلف به صورت جداگانه استخراج و فایل‌های ورودی نرم‌افزار آماده گردید. فرضیات، ورودی‌ها و آیین‌نامه‌های استفاده شده در این تحقیق به شرح زیر می‌باشند:

<sup>۲</sup> Earthquake Model of the Middle East

<sup>۳</sup> Geographic Information System

<sup>۴</sup> Fuzzy Membership

<sup>۵</sup> Japan International Cooperation Agency

<sup>۶</sup> HAZARD US

۳-۱- معرفی سازه‌ها: در جدول (۱)، از ۳۶ نوع سازه موجود در روش هازبوس، ۱۷ نوع سازه برای شهر مشهد انتخاب شده است.

جدول ۱: انواع سازه‌های شهر مشهد در روش هازبوس.

ردیف	برچسب	توضیح	ارتفاع		
			محدوده	میانگین	ارتفاع
۱	S1L	سازه فولادی قاب خمشی ۱ تا ۳ طبقه	۱-۳	۲	۷/۲
۲	S1M	سازه فولادی قاب خمشی ۴ تا ۸ طبقه	۴-۸	۵	۱۸
۳	S1H	سازه فولادی قاب خمشی بیش از ۸ طبقه	+۸	۱۳	۴۶/۸
۴	S2L	سازه فولادی باد بندی ۱ تا ۳ طبقه	۱-۳	۲	۷/۲
۵	S2M	سازه فولادی باد بندی ۴ تا ۸ طبقه	۴-۸	۵	۱۸
۶	S2H	سازه فولادی باد بندی بیش از ۸ طبقه	+۸	۱۳	۴۶/۸
۷	S4L	سازه فولادی با دیوار برشی بتنی ۱ تا ۳ طبقه	۱-۳	۲	۷/۲
۸	S4M	سازه فولادی با دیوار برشی بتنی ۴ تا ۸ طبقه	۴-۸	۵	۱۸
۹	S4H	سازه فولادی با دیوار برشی بتنی بیش از ۸ طبقه	+۸	۱۳	۴۶/۸
۱۰	C1L	سازه بتنی قاب خمشی ۱ تا ۳ طبقه	۱-۳	۲	۷/۲
۱۱	C1M	سازه بتنی قاب خمشی ۴ تا ۸ طبقه	۴-۸	۵	۱۸
۱۲	C1H	سازه بتنی قاب خمشی بیش از ۸ طبقه	+۸	۱۳	۴۶/۸
۱۳	C2L	سازه بتنی با دیوار برشی ۱ تا ۳ طبقه	۱-۳	۱	۴/۵
۱۴	C2M	سازه بتنی با دیوار برشی ۴ تا ۸ طبقه	۳	۳	۱۰/۵
۱۵	C2H	سازه بتنی با دیوار برشی بیش از ۸ طبقه	+۸	13	46/8
۱۶	URML	سازه بنایی کوتاه	۱-۲	1	4/5
۱۷	URMM	سازه بنایی متوسط	۳	۳	۱۰/۵

### ۳-۲- انواع کاربری‌ها

تلفات جانی و خسارت‌های اقتصادی ناشی از زلزله، با توجه به نوع کاربری سازه‌ها متفاوت است. در این مطالعه ۶ نوع کاربری عمده برای سازه‌های شهر مشهد در نظر گرفته شده‌اند، که به شرح زیر می‌باشند:

مسکونی (RES)، تجاری (COM1)، بهداشتی (COM<sup>1</sup>)، خدماتی (COM3)، اداری (GOV)، آموزشی (EDU)

### ۳-۳- تعیین منحنی تقاضای<sup>۷</sup> سازه

#### الف- پارامترهای طیف پاسخ استاندارد طبق آیین‌نامه بین‌المللی ساختمان IBC - 2006<sup>۸</sup>

در این مطالعه از آیین‌نامه بین‌المللی ساختمان ۲۰۰۶ استفاده شده است [۱۱]. در این روش حرکت زمین با استفاده از شکل طیف پاسخ استاندارد شده که در این آیین‌نامه ارائه شده است به چهار قسمت تقسیم می‌گردد که عبارتند: از PGA، منطقه شتاب طیفی ثابت از صفر تا  $T_{AV}$ ، منطقه سرعت طیفی ثابت از  $T_{AV}$  تا  $T_{VD}$  و منطقه جابجایی طیفی ثابت که پریود بیشتر از  $T_{VD}$  می‌باشد. منطقه شتاب طیفی ثابت، توسط شتاب طیفی در پریود ارتعاشی  $0/3$  ثانیه تعریف می‌گردد. در منطقه سرعت طیفی ثابت، شتاب طیفی متناسب با  $1/T$  است و بر روی شتاب طیفی در پریود ارتعاشی  $1/0$  ثانیه ثابت شده است. در حالت کلی، طیف طراحی الاستیک ( $S_a(T)$ ) توسط روابط (۱) تا (۴) تعیین می‌شود.

$$S_a(T) = S_{a,0.3}(0/4 + T/T_A) \quad T < T_A \quad (1)$$

$$S_a(T) = S_{a,0.3} \quad T_A < T < T_{AV} \quad (2)$$

<sup>7</sup> Demand spectra

<sup>8</sup> International Building Code

$$Sa(T) = Sa_{1.0} / T \quad T_{AV} < T < T_{VD} \quad (3)$$

$$Sa(T) = Sa_{1.0} T_{AV} / T^2 \quad T_{VD} < T < 10 s \quad (4)$$

که در آن:  $Sa_{0.3}$  شتاب طیفی در پریود  $0.3$  ثانیه و  $Sa_{1.0}$  شتاب طیفی در پریود  $1.0$  ثانیه می‌باشد. پریود  $T_{AV}$  محل تقاطع دو منطقه شتاب طیفی ثابت و سرعت طیفی ثابت می‌باشد و مقدار آن با توجه به شتاب طیفی که این دو ناحیه را تعریف می‌کند، تغییر می‌نماید.

$$T_{AV} = Sa_{1.0} / Sa_{0.3} \quad (5)$$

پریود  $T_A$  نشان‌دهنده گوشه چپ نمودار طیفی می‌باشد که از رابطه (۶) بدست می‌آید.

$$T_A = 0.2T_{AV} = 0.2(Sa_{1.0} / Sa_{0.3}) \quad (6)$$

منطقه جابجایی طیفی ثابت، با  $1/T^2$  متناسب است و برای شتاب طیفی  $T_{VD}$  که محل تقاطع منطقه جابجایی طیفی ثابت و سرعت طیفی ثابت است، ثابت شده است. پریود  $T_{VD}$  با بزرگای لرزه‌ای متناسب است. این فرکانس توسط رابطه (۷) به‌عنوان تابعی از بزرگای گشتاوری تعیین می‌شود.

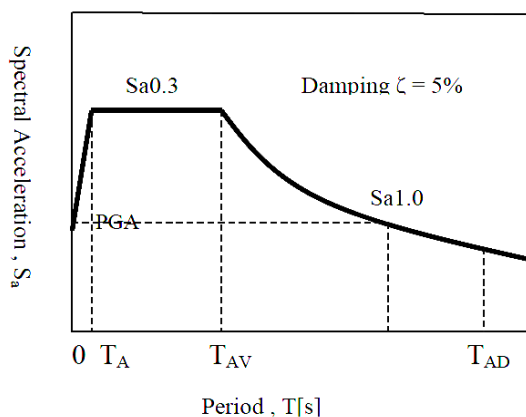
$$T_{VD} = 10^{(M-5)/2} \quad (7)$$

$T_{VD}$  زمانیکه بزرگای گشتاوری مشخص نباشد (در مطالعات احتمالی)،  $1.0$  ثانیه در نظر گرفته می‌شود و در حقیقت  $M=7$  فرض می‌شود. در صورتی که شتاب طیفی در پریود ارتعاشی  $0.3$  ثانیه و  $1.0$  ثانیه در دسترس نباشد این مقادیر با استفاده از بیشینه شتاب زمین با روابط (۸) و (۹) بدست می‌آید [۱۲].

$$Sa_{0.3} = Sa_s = 2.5 a^{PGA} \quad (8)$$

$$Sa_{1.0} = Sa_1 = a^{PGA} \quad (9)$$

طیف پاسخ استاندارد در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: طیف پاسخ استاندارد [۱۱].

ب- طبقه بندی خاک بر اساس موج برشی: تقویت حرکت زمین بر اساس نوع خاک (سرعت موج برشی) توسط ضرایب ذکر شده در آیین‌نامه بین‌المللی ساختمان ۲۰۰۶ انجام می‌گیرد [۱۱]. طبقه بندی خاک در این آیین‌نامه مطابق با جدول ۲ می‌باشد.

جدول ۲: طبقه بندی خاک بر اساس سرعت موج برشی طبق آیین نامه IBC-2006 [۱۱].

نوع منطقه	شرح	سرعت موج برشی
A	سنگ سخت، فقط مناطق شرق ایالات متحده	> 1500
B	سنگ	760-1500
C	خاک بسیار متراکم و سنگ نرم با خاک بسیار متراکم و سنگ نرم	360-760 180-360
D	خاک سفت	180-360
E	خاک نرم، با نیمرخ بزرگتر از ۳ متر رس نرم و به عنوان خاک با شاخص نرمی $PI < 20$ ، مقدار رطوبت $W < 40\%$	<180
F	خاک های نیاز به ارزیابی در مناطق خاص	--

در این روش، شتاب طیفی خاک سنگی (نوع B) توسط ضرایب جدول ۳ و رابطه (۱۰) اصلاح می گردد.

جدول ۳: ضرایب بازتاب خاک برای شتاب طیفی کوتاه و بلند آیین نامه IBC-2006 [۱۱].

نوع منطقه B	نوع منطقه				
	A	B	C	D	E
شتاب طیفی					
پریود کوتاه، $S_{AS}[g]$	ضریب تقویت پریود کوتاه، FA				
$\leq 0/25$	0/8	1	1/2	1/6	2/5
(0/25,0/50]	0/8	1	1/2	1/4	1/7
(0/50,0/75]	0/8	1	1/1	1/2	1/2
(0/75,1/0]	0/8	1	1	1/1	0/9
>1/0	0/8	1	1	1	0/9
پریود ثانویه، $S_{AL}[g]$					
<1/0	0/8	1	1/7	2/4	3/5
(0/1,0/2]	0/8	1	1/6	2	3/2
(0/2,0,3]	0/8	1	1/5	1/8	2/8
(0/3,0/4]	0/8	1	1/4	1/6	2/4
>0/4	0/8	1	1/3	1/5	2/4

$$a_i^{pga} = a^{pga} F_{Ai} \quad (10)$$

که پارامترهای آن به شرح زیر است:

$a^{pga}$ : شتاب بیشینه زمین (در واحد g)

$a_i^{pga}$ : شتاب بیشینه زمین برای منطقه i (در واحد g)

$F_{Ai}$ : ضریب بازتاب پریود کوتاه منطقه i دارای شتاب طیفی  $S_{AS}$

برای بدست آوردن طیف شتاب تقاضا که شامل اثر ساختگاه نیز می باشد از روابط (۱۱) تا (۱۲) استفاده می شود.

$$S_{ASi} = S_{AS} F_{Ai} \quad (11)$$

برای پریود ارتعاشی کوتاه :

$$S_{ALi} = S_{Ai} F_{Vi} \quad (12)$$

برای پریود ارتعاشی بلند:

پریود  $T_{AVi}$  که نشان دهنده نقطه گذار از محدوده شتاب طیفی ثابت به سرعت طیفی ثابت می باشد، تابعی از نوع خاک است و رابطه آن

$$T_{AVi} = (S_{AL}/S_{AS}) \times (F_{Vi}/F_{Ai}) \quad (13)$$

به صورت رابطه (۱۳) می باشد:

که در آن:

$S_{ASi}$ : شتاب طیفی پریود کوتاه برای خاک نوع  $i$  (در واحد  $g$ )

$S_{AS}$ : شتاب طیفی پریود کوتاه برای خاک نوع  $B$  (در واحد  $g$ )

$F_{Ai}$ : ضریب بازتاب پریود کوتاه برای خاک نوع  $i$  و مختص شتاب طیفی  $S_{AS}$

$S_{ALi}$ : شتاب طیفی پریود ارتعاشی ۱ ثانیه برای خاک نوع  $i$  (در واحد  $g$ )

$S_{AL}$ : شتاب طیفی پریود ارتعاشی ۱ ثانیه برای خاک نوع  $B$  (در واحد  $g$ )

$F_{Vi}$ : ضریب بازتاب پریود ارتعاشی ۱ ثانیه برای خاک نوع  $i$  و مختص شتاب طیفی  $S_{AL}$

$T_{AVi}$ : پریود ارتعاشی گذار از منطقه شتاب طیفی ثابت و سرعت طیفی ثابت برای خاک نوع  $i$  (در واحد ثانیه)

$T_{VD}$ : که نشان دهنده گذر از منطقه سرعت طیفی ثابت به جابجایی طیفی ثابت می باشد و تابعی از نوع خاک نیست.

برای ارزیابی آسیب سازه‌ای، نمودار طیف پاسخ سازه‌ای آن را بر مبنای شتاب طیفی و جابجایی طیفی رسم می‌کنیم. برای این تبدیل از رابطه (۱۴) استفاده می‌شود:

$$S_a/\omega = S_v = S_d \times \omega \quad \omega = 2\pi/T \quad (14)$$

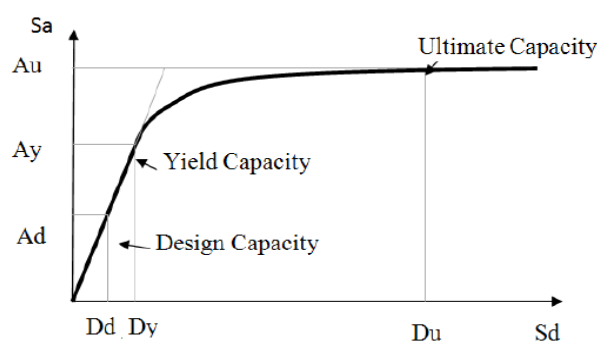
$\omega$ : فرکانس زاویه‌ای طبیعی تواتر می‌باشد. نتیجه نهایی، طیف پاسخ سازه در منطقه موردنظر با ۵ درصد میرایی خواهد بود.

### ۳-۴ - منحنی ظرفیت

طراحی و ارزیابی اغلب سازه‌ها به جای روش‌های غیرخطی و به جهت سهولت، به روش الاستیک خطی انجام می‌شود. در نتیجه پاسخ سازه بر مبنای مشخصات الاستیک خطی سازه و نیروهای لرزه‌ای متناسب که در طراحی استفاده شده‌اند، بدست می‌آید. برای طراحی سازه در حالت الاستیک، پاسخ‌های با ۵ درصد میرایی توسط ضریب کاهش  $R$  کاهش داده می‌شوند که این ضریب با توجه به سازه‌های مختلف متفاوت است. این ضریب کاهش با توجه به قضاوت مهندسی، توانایی تغییر شکل غیرالاستیک (شکل‌پذیری) سیستم سازه‌ای، اضافه مقاومت، میرایی بیش از ۵ درصد، تغییر شکل‌های زیاد و پارامترهای دیگری که در ظرفیت سازه مؤثر هستند، بدست می‌آید. اگر چه این روش که بر پایه نیرو استوار است از لحاظ تحلیل مهندسی معقول به نظر نمی‌رسد ولی با این وجود سازه‌های طراحی شده به این شکل در سالهای اخیر در اثر زلزله‌های رخ داده، پاسخ‌های قابل قبولی از خود نشان داده‌اند. آسیب سازه‌ای به جز در سیستم‌های غیر شکل‌پذیر، ترد و المانهای حساس به شتاب، اساساً بیشتر بستگی به جابجایی سازه دارد تا به نیروی وارد شده به سازه [۱۱]. در محدوده پاسخ غیرالاستیک سازه، افزایش آسیب از افزایش جابجایی ایجاد می‌گردد و این درحالی است که در این محدوده ممکن است نیرو ثابت باشد و یا حتی کاهش یابد. بنابراین ارزیابی صحیح آسیب لرزه‌ای، منوط به تعیین دقیق پاسخ سازه (جابجایی) در محدوده غیرالاستیک می‌باشد و این مورد با روش‌های خطی الاستیک بدست نمی‌آید. زیرا سازه برای بزرگایی که خطر سازه برای آن‌ها بررسی می‌شود به صورت غیرخطی عمل می‌کند و در محدوده غیرالاستیک است. منحنی ظرفیت سازه یک ابزار دقیق ساده و منطقی برای پیش‌بینی پاسخ (جابجایی) غیرخطی سازه به جهت تعیین آسیب وارد شده به آن می‌باشد. منحنی ظرفیت سازه (که به منحنی پوش آور<sup>۹</sup> معروف است) یک نمودار از بارچاقی وارده به سازه در مقابل جابجایی جانبی آن می‌باشد که می‌تواند از منحنی برش پایه در مقابل جابجایی سازه (مثلاً سقف آخر) بدست آید. به جهت مقایسه راحت‌تر طیف پاسخ، نیرو را به شتاب طیفی و جابجایی را به جابجایی طیفی تغییر می‌دهیم. چنین نموداری، جابجایی حقیقی سازه موردنظر را از طیف‌های پاسخ گوناگون ارائه می‌نماید. نمودار ظرفیت سازه که در این مطالعه از آن استفاده شده است بر اساس تحقیقات و آزمایش‌ها و قضاوت مهندسی بدست آمده است [۱۱]. این نمودار که در شکل ۲ نشان داده شده است، دارای سه نقطه کنترلی ظرفیت طراحی، ظرفیت تسلیم و ظرفیت نهایی می‌باشد که با این سه نقطه می‌توان نمودار منحصربفرد هر سازه را ترسیم کرد.

<sup>9</sup> Push Over Curve





شکل ۲: منحنی ظرفیت سازه [۱۱].

منحنی ظرفیت سازه بر اساس پارامترهای مهندسی معینی که بر ظرفیت طراحی، تسلیم و نهایی مؤثر هستند، بدست می‌آید. این پارامترها عبارتند از:

$C_s$ : ضریب مقاومت طراحی (نسبتی از وزن سازه)

$T_e$ : پرپود مد غالب الاستیک سازه (ثانیه)

$\alpha_1$ : نسبتی از وزن سازه که در مد پوش آور مؤثر است.

$\alpha_2$ : نسبتی از ارتفاع سازه در موقیت جابجایی پوش آور

$\gamma$ : ضریب اضافه مقاومت که برابر نسبت مقاومت نهایی به مقاومت تسلیم است.

$\mu$ : ضریب شکل پذیری

جدول ۴: پارامترهای منحنی ظرفیت - برای سطح طراحی آیین‌نامه‌ای متوسط (Moderate Code) [۱۱].

نوع سازه	ظرفیت تسلیم		ظرفیت نهایی	
	Dy(in)	Ay(g)	Du(in)	Au(g)
S1L	0/31	0/125	5/5	0/375
S1M	0/89	0/078	10/65	0/234
S1H	2/33	0/049	20/96	0/147
S2L	0/31	0/0	3/7	0/4
S2M	1/21	0/16	0/9	0/333
S2H	3/87	0/127	23/24	254
S4L	0/19	0/16	2/59	0/36
S4M	0/55	0/133	4/91	0/3
S4H	1/7	0/102	11/76	0/228
C1L	0/2	0/125	3/52	0/357
C1M	0/2	0/104	6/91	0/312
C2L	0/24	0/2	3/6	0/5
C2M	0/52	0/67	5/19	0/417
URML	-	-	-	-
URMM	-	-	-	-

جدول ۵: پارامترهای منحنی ظرفیت - برای سطح طراحی آیین‌نامه‌ای ضعیف (Low Code) [۱۱].

نوع سازه	ظرفیت تسلیم		ظرفیت نهایی	
	Dy(in)	Ay(g)	Du(in)	Au(g)
S1L	0/15	0/62	2/29	<b>0/187</b>
S1M	0/44	0/039	4/44	<b>0/117</b>
S1H	1/16	0/024	8/73	<b>0/73</b>
S2L	0/61	0/1	1/57	<b>0/2</b>
S2M	0/61	0/083	4/04	<b>0/167</b>
S2H	1/94	0/063	9/68	<b>0/127</b>
S4L	0/1	0/08	1/08	<b>0/18</b>
S4M	0/27	0/067	2/05	<b>0/15</b>

S4H	0/87	0/051	4/9	0/114
C1L	0/1	0/062	1/47	0/187
C1M	0/29	0/052	2/88	0/156
C2L	0/12	0/1	1/5	0/25
C2M	0/26	0/083	2/16	0/208
URML	0/24	0/2	2/4	0/4
URMM	0/27	0/111	1/81	0/222

### ۳-۵ - عملکرد سازه تحت بارهای لرزه‌ای

برای بدست آوردن عملکرد لرزه‌ای سازه، باید جابجایی طیفی سازه در راستای منحنی ظرفیت آن مورد بررسی قرار گیرد که برای این منظور باید منحنی ظرفیت سازه با منحنی تقاضای لرزه‌ای که برای اثرات غیرخطی سازه اصلاح شده است، قطع داده شود. در حال حاضر روش‌های مختلفی برای بدست آوردن نقطه عملکرد سازه بر روی منحنی ظرفیت آن وجود دارد. روش طیف ظرفیت CSM<sup>۱۰</sup> که در شورای فن‌آوری کاربردی ATC-40<sup>۱۱</sup> [۱۳] و نشریه شماره ۲۷۳ آژانس مدیریت بحران فدرال FEMA-273<sup>۱۲</sup> [۱۴] ذکر شده و روش طیف پاسخ شتاب جابجایی اصلاح شده MADRS<sup>۱۳</sup> که در نشریه شماره ۴۴۰ آژانس مدیریت بحران فدرال FEMA-440 [۱۵] و نشریه شماره ۳۵۶ آژانس مدیریت بحران فدرال FEMA-356 [۱۶] مطرح شده است، از جمله این روش‌ها می‌باشند. در این مطالعه از روش طیف پاسخ شتاب-جابجایی اصلاح شده استفاده شده است. روش طیف پاسخ شتاب-جابجایی اصلاح شده روشی است جهت اصلاح روش طیف ظرفیت که در نشریه شماره ۴۰ شورای فن‌آوری کاربردی ذکر شده است. زمانی که خطی سازی معادل به‌عنوان قسمتی از روش غیرخطی استاتیکی استفاده می‌شود، سازه به‌عنوان یک نوسانگر یک درجه آزادی مدل می‌شود که هدف از آن یافتن بیشینه جابجایی پاسخ سیستم غیرخطی با معادل سازی آن در سیستم خطی و استفاده از پرپود ارتعاشی مؤثر ( $T_{eff}$ ) و میرایی مؤثر ( $\beta_{eff}$ ) است [۱۵]. روش طیف پاسخ شتاب جابجایی اصلاح شده اساساً بر پایه بدست آوردن میرایی مؤثر ( $\beta_{eff}$ ) و پرپود ارتعاشی مؤثر ( $T_{eff}$ ) می‌باشد که با آن‌ها می‌توان جابجایی بیشینه را بدست آورد. از تقاطع پرپود مؤثر با منحنی تقاضای طیف پاسخ شتاب - جابجایی با میرایی مؤثر، جابجایی طیفی بدست می‌آید. پرپود ارتعاشی مؤثر از پرپود ارتعاشی تقاطع ( $T_{sec}$ ) که از رسم خطی از مرکز و نقطه متناظر ( $d_{max}$ ) روی منحنی ظرفیت بدست می‌آید، کمتر است. شتاب مؤثر ( $a_{eff}$ ) مفهوم خاصی ندارد چون شتاب بیشینه حقیقی باید روی منحنی ظرفیت و در راستای جابجایی بیشینه قرار داشته باشد. شتاب مؤثر برابر است با حاصل ضرب  $a_{eff}$  در یک ضریب اصلاحی که طبق رابطه (۱۵) است.

$$M = a_{max} / a_{eff} \quad (15)$$

با توجه به اینکه مقادیر شتاب با پرپودهای ارتعاشی متناظر در ارتباط هستند ضریب اصلاح از رابطه (۱۶) و (۱۷) بدست می‌آید:

$$M = (T_{eff} / T_{sec})^2 = (T_{eff} / T_0)^2 \times (T_0 / T_{sec})^2 \quad (16)$$

$$\left(\frac{T_0}{T_{sec}}\right)^2 = \sqrt{\frac{1 - \alpha(\mu - 1)}{\mu}} \quad (17)$$

سختی بعد از الاستیک  $\alpha$  و تقاضای شکل‌پذیری  $\mu$  از روابط (۱۸) و (۱۹) بدست می‌آید.

$$\alpha = \frac{\frac{d_{pi} - a_y}{d_{pi} - d_y}}{\frac{a_y}{d_y}} \quad (18) \quad \text{و} \quad \frac{d_y}{\alpha} = d_{pi} \quad (19)$$

عملیات خطی سازی معادل در عمل، بدست آوردن ضریبی است که این ضریب به طیف پاسخ با میرایی ۵ درصد اعمال شود و آن را به طیف پاسخ جدید در سطوح میرایی مؤثر تبدیل کند که به‌صورت رابطه (۲۰) و (۲۱) است: ( $\beta_{eff}$ ) برحسب درصد می‌باشد)

<sup>10</sup> Capacity Spectrum Method

<sup>11</sup> Applied Technology Council

<sup>12</sup> Federal Emergency Management Agency

<sup>13</sup> Modified Acceleration Displacement Response Spectrum

$$(S\alpha)\beta = (S\alpha)_{5\%}/B(\beta_{eff}) \quad (20) \quad B(\beta_{eff}) = 4/[5.6 - \ln(\beta_{eff})] \quad (21)$$

با توجه به اینکه پریود ارتعاشی مؤثر و میرایی مؤثر هر دو تابعی از ضریب تقاضای شکل پذیری می باشند، جابجایی بیشینه در روش خطی سازی معادل به صورت مستقیم بدست نمی آید و نیازمند روش های تکراری می باشد. میرایی مؤثر و پریود ارتعاشی مؤثر وابستگی زیادی به رفتار غیرالاستیک سازه دارند. در نشریه شماره ۴۴۰ آژانس مدیریت بحران فدرال، سه سیستم هیستریزیس غیرالاستیک که شامل هیسترتیک دوخطی، افت سختی و رفتار افت مقاومت برای بدست آوردن عملکرد، ذکر شده است. میرایی ویسکوز مؤثر ( $\beta_{eff}$ ) با توجه به ضریب تقاضای شکل پذیری، از روابط (۲۲) تا (۲۴) بدست می آید. (ضرایب A تا F از جدول ۶ بدست می آید)

$$\beta_{eff} = A(\mu - 1)^2 + B(\mu - 1) + \beta_s \quad \mu < 4 \quad (22)$$

$$\beta_{eff} = C + D(\mu - 1) + \beta_s \quad 4 \leq \mu \leq 6.5 \quad (23)$$

$$\beta_{eff} = E \left[ \frac{F(\mu-1)-1}{F(\mu-1)^2} \times \frac{T_{eff}}{T_o} \right] \quad \mu > 6.5 \quad (24)$$

جدول ۶: روابط میرایی مؤثر طبق نشریه شماره ۴۴۰ آژانس مدیریت بحران فدرال (FEMA-440) [۱۵].

[ $\alpha\%$ ]	A	B	C	D	E	F
0	5/1	-1/1	12	1/4	20	0/62
2	5/3	-1/2	11	1/6	20	0/51
5	5/6	-1/3	10	1/8	20	0/38
10	5/3	-1/2	9/2	1/9	21	0/37
20	5/6	-1	9/6	1/3	23	0/34

پریود ارتعاشی مؤثر ( $T_{eff}$ ) از روابط (۲۵) تا (۲۷) بدست می آید: (ضرایب G تا L از جدول ۷ بدست می آید)

$$T_{eff} = [G(\mu - 1)^2 + H(\mu - 1) + 1]T_o \quad \mu < 4 \quad (25)$$

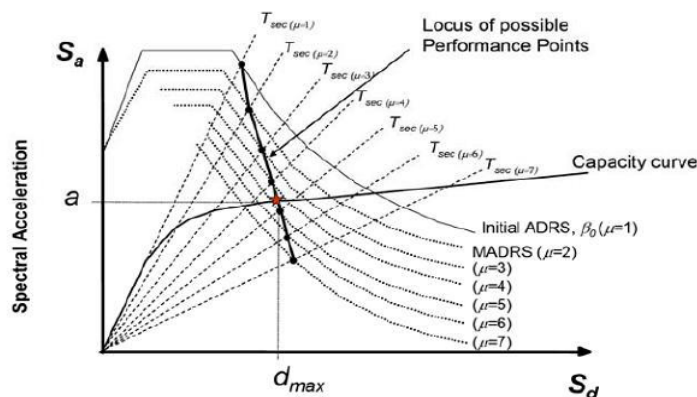
$$T_{eff} = [I + (\mu - 1) + 1]T_o \quad 4 \leq \mu \leq 6.5 \quad (26)$$

$$T_{eff} = \left\{ K \left[ \sqrt{\frac{(\mu - 1)}{1 + L(\mu - 1)}} - 1 \right] + 1 \right\} T_o \quad \mu > 6.5 \quad (27)$$

جدول ۷: روابط میرایی مؤثر طبق نشریه شماره ۴۴۰ آژانس مدیریت بحران فدرال (FEMA-440) [۱۵].

[ $\alpha\%$ ]	G	H	I	J	K	L
0	0/17	-0/032	0/10	0/19	0/85	0/00
2	0/18	-0/034	0/22	0/16	0/88	0/02
5	0/18	-0/037	0/15	0/16	0/92	0/05
10	0/17	-0/034	0/26	0/12	0/97	0/10
20	0/13	-0/027	0/11	0/11	1/00	0/20

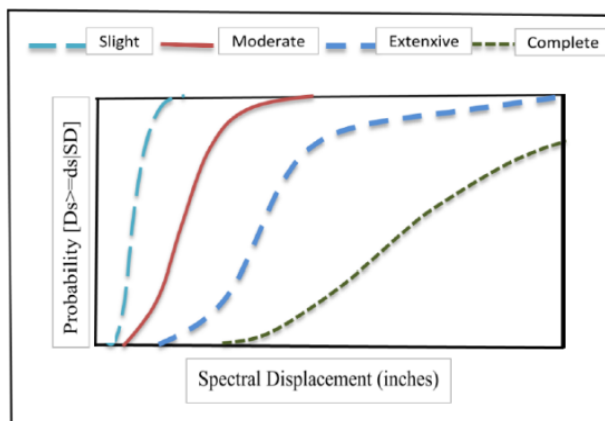
برای بدست آوردن نقطه عملکرد، نشریه شماره ۴۴۰ آژانس مدیریت بحران فدرال سه پیشنهاد دارد که هر سه آن ها بر مبنای کاهش مقادیر طیف پاسخ شتاب - جابجایی با میرایی ویسکوز مؤثر  $\beta_{eff}$  می باشند. یکی از روش ها، تعیین محل احتمالی نقطه عملکرد است. این کار با ایجاد چندین نمودار طیف تقاضا و طیف پاسخ شتاب - جابجایی اصلاح شده برای مقادیر مختلف  $\mu$  بدست می آید. همان طور که در شکل ۳ مشخص است نقطه عملکرد از قطع دادن طیف ظرفیت با خط احتمالی نقاط عملکرد که از اتصال نقاط عملکرد منحنی های تقاضاهای مختلف بدست آمده است، حاصل می شود.



شکل ۳: تعیین نقطه عملکرد سازه با روش تعیین محتمل آن [۱۵].

### ۳-۶- تابع آسیب

تابع آسیب به صورت منحنی شکنندگی نیمه لگاریتمی است و ارتباط سطح آسیب و پاسخ سازه (جابجایی در نقطه عملکرد) را نشان می‌دهد. سطح آسیب‌های سازه‌ای در چهار دسته خفیف<sup>۱۴</sup>، متوسط<sup>۱۵</sup>، گسترده (شدید)<sup>۱۶</sup> و کامل<sup>۱۷</sup> طبقه‌بندی شده‌اند [۱۷]. نمونه‌ای از منحنی آسیب (شکنندگی) در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴: منحنی شکنندگی [۱۱].

هر یک از منحنی‌های شکست توسط میانگین پارامترهای تقاضا (جابجایی طیفی) بدست آمده‌اند و نشان‌دهنده آستانه آسیب‌پذیری در آن سطح می‌باشند. در اغلب موارد می‌توان گفت، در منحنی شکست، انحراف معیار استاندارد  $\beta$  به‌عنوان یک پارامتر مشخص‌کننده تصادفی بودن داده‌ها تعریف می‌گردد [۱۱]. احتمال فرا گذشت از سطح آسیب مورد نظر با توجه به جابجایی طیفی (ds)، از رابطه (۲۸) بدست می‌آید [۱۷].

$$P\{ds|s_d\} = \varphi\left[\frac{1}{\beta_{ds}} \ln\left(\frac{s_d}{s_{d,ds}}\right)\right] \quad (28)$$

که در آن:  $s_{d,ds}$ : جابجایی طیفی میانگین می‌باشد که در آن، جابجایی سازه به آستانه آسیب می‌رسد.  
انحراف استاندارد لگاریتم طبیعی طیف جابجایی برای سطح خطر ds:

<sup>14</sup> Slight  
<sup>15</sup> Moderate  
<sup>16</sup> Extensive  
<sup>17</sup> Complete

Φ : تابع توزیع نرمال است.

در بررسی آسیب سازه در اثر حرکت زمین، از پاسخ طیفی بیشینه (جابجایی یا شتاب) برای بدست آوردن منحنی شکست استفاده می‌شود. پاسخ طیفی بیشینه سازه با توجه به مشخصات سازه متفاوت است. بنابراین بدست آوردن پاسخ بیشینه سازه با توجه به مشخصات سازه متفاوت است. لذا بدست آوردن پاسخ بیشینه سازه، نیازمند فهم صحیح رفتار سازه می‌باشد. پاسخ سازه‌ها بر اساس منحنی ظرفیت آن‌ها تعیین می‌شود. این منحنی‌ها، جابجایی پوش آور هر یک از انواع سازه‌ها را برای سطوح مختلف بارگذاری لرزه‌ای نشان می‌دهند.

جدول ۸ : پارامترهای منحنی شکنندگی برای سطح طراحی آیین‌نامه‌ای متوسط [۱۱].

نوع سازه	جابجایی طیفی (اینچ)							
	خفیف		متوسط		گسترده		کامل	
	متوسط	(Beta) بتا	متوسط	(Beta) بتا	متوسط	(Beta) بتا	متوسط	(Beta) بتا
S1L	1/300	0/80	2/240	0/75	5/080	0/74	12/960	0/88
S1M	2/160	0/65	3/740	0/68	8/460	0/69	21/600	0/87
S1H	3/370	0/64	5/830	0/64	13/210	0/71	33/700	0/83
S2L	1/080	0/93	1/870	0/92	5/040	0/93	12/960	0/93
S2M	1/800	0/70	3/120	0/69	8/400	0/69	21/600	0/89
S2H	2/810	0/66	4/870	0/64	13/100	0/69	33/700	0/80
S4L	0/860	0/96	1/500	1/00	4/040	1/03	11/340	0/92
S4M	1/440	0/75	2/500	0/72	6/730	0/72	18/900	0/94
S4H	2/250	0/66	3/900	0/67	10/500	0/70	29/480	0/90
C1L	0/900	0/89	1/560	0/90	4/200	0/90	10/800	0/89
C1M	1/500	0/70	2/600	0/70	7/000	0/700	18/000	0/89
C2L	0/720	0/91	1/520	0/97	4/170	1/03	10/800	0/87
C2M	1/200	0/81	2/530	0/77	6/950	0/73	18/000	0/91
URML	-	-	-	-	-	-	-	-
URMM	-	-	-	-	-	-	-	-

جدول ۹ : پارامترهای منحنی شکنندگی برای سطح طراحی آیین‌نامه‌ای ضعیف [۱۱].

نوع سازه	جابجایی طیفی (اینچ)							
	خفیف		متوسط		گسترده		کامل	
	متوسط	(Beta) بتا	متوسط	(Beta) بتا	متوسط	(Beta) بتا	متوسط	(Beta) بتا
S1L	1/300	0/77	2/070	0/78	4/380	0/78	10/800	0/96
S1M	2/160	0/68	3/440	0/78	7/30	0/85	18/000	0/98
S1H	3/370	0/66	5/370	0/70	11/380	0/76	28/080	0/92
S2L	1/080	0/96	1/730	0/89	4/320	0/86	10/800	0/98
S2M	1/800	0/70	2/880	0/73	7/200	0/85	18/000	0/98
S2H	2/810	0/66	4/490	0/67	11/230	0/74	28/080	0/92
S4L	0/860	1/05	1/380	0/98	3/470	0/89	9/450	0/98
S4M	1/440	0/76	2/310	0/78	5/780	0/90	15/750	0/99
S4H	2/250	0/70	3/600	0/75	9/010	0/90	24/570	0/98
C1L	0/900	0/95	1/440	0/91	3/600	0/85	9/000	0/97
C1M	1/500	0/70	2/400	0/74	6/000	0/86	15/000	0/98
C2L	0/720	1/04	1/370	1/02	3/550	0/99	9/000	0/95
C2M	1/200	0/82	2/290	0/81	5/920	0/81	15/000	0/99
URML	0/410	0/99	0/810	1/05	2/030	1/10	4/730	1/08
URMM	0/630	0/91	1/260	0/92	3/150	0/87	7/350	0/91

### ۳-۷- برآورد خسارات اقتصادی

زلزله علاوه بر تلفات جانی، خسارت اقتصادی بسیاری نیز دارد که این خسارات از آسیب‌های مستقیم و مشخص شروع شده و ممکن است تا چندین سال ادامه داشته باشد. خسارت می‌تواند شامل آسیب به سازه، آسیب به اجزای غیر سازه‌ای، آسیب دیدن لوازم درون ساختمان‌ها (که در این مورد بیمارستان‌ها و مراکز صنعتی بسیار حائز اهمیت است)، آسیب دیدن راه‌ها، بندرگاه‌ها و فرودگاه‌ها که نتیجه آن از بین رفتن رونق اقتصادی برای چندین سال است. لذا مطالعه در مورد خسارت اقتصادی یک مطالعه بسیار تخصصی و پیچیده می‌باشد که نیازمند

همکاری تخصصی چندجانبه است. خسارت‌های مستقیم، ناشی از آسیب سازه‌ای و غیر سازه‌ای می‌باشد که به دلیل عدم وجود داده‌های کافی برای سیستم‌های غیر سازه‌ای، در این مطالعه فقط به آسیب‌های سازه‌ای پرداخته شده است. خسارات اقتصادی برای بازسازی ساختمان و یا جایگزین نمودن آن (در شرایطی که خسارت به صورت کامل اتفاق افتاده باشد) از رابطه (۲۹) بدست می‌آید [۱۸].

$$L_{\text{sed}} = Cr \sum_{i=1}^{N_{ot}} \sum_{j=1}^{N_{BT}} \sum_{k=1}^{N_{ds}} A_{i,j} P_{j,k} C_{i,j,k} \quad (29)$$

که در آن:  $N_{ot}$ : تعداد کاربری‌ها،  $N_{BT}$ : تعداد نوع سازه‌ها و  $N_{ds}$ : تعداد سطوح آسیب می‌باشند. ضرایب دیگر به شرح زیر است:  
 $Cr$ : ضریب هزینه محلی، ضریبی است که اختلاف قیمت دو سازه مشابه در دو منطقه متفاوت را تعیین می‌کند که در این مطالعه برابر با یک در نظر گرفته شده است.

$A_{i,j}$ : زیربنای ساخته شده سازه نوع  $j$  با کاربری  $i$  (برحسب مترمربع)

$P_{j,k}$ : احتمال سطح آسیب نوع  $k$  برای سازه نوع  $j$

$C_{i,j,k}$ : هزینه بهسازی و ترمیم سازه نوع  $j$  با کاربری  $i$  و سطح آسیب  $k$  برای هر مترمربع در واحد پول رایج کشور.

### ۳-۸ - ارزیابی تلفات

در این قسمت، تلفات پیش‌آمده بر اساس خسارت وارده به سازه محاسبه می‌گردد. در زلزله‌های با شدت کمتر، تلفات غیر سازه‌ای تعیین‌کننده هستند و در زلزله‌های با شدت بیشتر، تلفات سازه‌ای سهم عمده‌ای از تلفات را موجب می‌شود. در این مطالعه فقط تلفات ناشی از آسیب‌های سازه‌ای مورد توجه قرار گرفته و عوامل مؤثر در تلفات مانند نوع کاربری، خطر فروریزش سازه‌ها، زمان اتفاق افتادن زلزله و سطح آسیب به وجود آمده بررسی شده است. میزان تلفات در زمان وقوع زلزله برای سه زمان از شبانه‌روز محاسبه می‌شوند که به شرح زیر است:

- رخداد زلزله مصادف با ساعت ۲ شب (پیش‌بینی می‌شود اکثر مردم در این زمان در منزل حضور دارند).

- رخداد زلزله مصادف با ساعت ۱۰ صبح (پیش‌بینی می‌شود در این زمان اکثر مردم در محل کار، دانشگاه یا مدرسه باشند).

- رخداد زلزله مصادف با ساعت ۵ بعدازظهر (پیش‌بینی می‌شود در این زمان اکثر مردم محل کار خود را ترک کرده و در مسیر یا محل سکونت باشند). توزیع جمعیت در محل مورد مطالعه در زمان‌های مختلف طبق روش هازيوس در جدول ۱۰ آمده است.

جدول ۱۰: توزیع جمعیت در محل مورد مطالعه در زمان‌های مختلف طبق هازيوس [۱۱].

Distribution of People in Census Tract			
Occupancy	2 : 00 a.m.	10:00 a.m.	5:00 p.m.
<b>Indoors</b>			
Residential	(0/999)0/99(NRES)	(0/7)0/75(DRES)	(0/7)0/5(NRES)
Commercial	(0/999)0/02(COMW)	(0/999)0/98(COMW)+ (0/8)0/20(DRES)+ 0/8(Hotel)+ 0/8(Visit)	0/98[0/50(COMW)+ 0/1(NRES)+ 0/70(HOTEL)]
Educational		(0/90)0/80(GRAD)+ 0/8(COLLEGE)	(0/8)0/5(COLEGE)
Industrial	(0/999)0/1(INDW)	(0/90)0/80(INDW)	(0/90)0/50(INDW)
Hotels	0/999(HOTEL)	0/19(HOTEL)	0/299(HOTEL)
<b>Outdoors</b>			
Residential	(0/001)0/99(NRES)	(0/30)0/75(DRES)	(0/30)0/50(NRES)
Commercial	(0/001)0/02(COMW)	(0/01)0/98(COMW)+ (0/20)0/20(DRES)+ (0/20)(VISIT) + 0/50(1-PRFIL)0/05(pop)	0/02[0/50(COMW)+ 0/1(NRES)+ 0/70(HOTEL)+ 0/5(1-PRFIL) [0/05(POP)-1/0(COMM)]
Educational		(0/10)0/80(GRADE)+ 0/20(COLLEGE)	(0/20)0/50(COLLEGE)
Industrial	(0/001)0/10(INDW)	(0/1)0/80(INDW)	(0/1)0/50(INDW)
Hoteles	0/001(Hotel)	0/01(HOTEL)	0/001(HOTEL)

در این جدول: Pop: کل جمعیت منطقه مورد مطالعه؛ DRES: جمعیت ساکن در روز؛ NRES: جمعیت ساکن در شب؛ COMM: جمعیتی که بین دو سازه (محل کار و منزل) در حال تردد هستند؛ COMW: جمعیت شاغل در مکان‌های تجاری؛ INDW: جمعیت شاغل در مکان‌های صنعتی؛ GRADE: تعداد دانش آموزان در هر منطقه؛ COLLEGE: تعداد دانشجویان در هر منطقه؛ HOTEL: تعداد افرادی که در هتل سکونت دارند.

۳-۹ - محاسبه نسبت خسارت متوسط (MDR)<sup>۱۸</sup>

تحلیل خطرپذیری لرزه‌ای دارای خروجی‌ها و نتایج متنوعی می‌باشد، تنوع بسیار زیاد نتایج و همچنین وجود سازه‌های مختلف با کاربری‌های متنوع اغلب باعث می‌شود که مقایسه منطقه آسیب‌دیده با مشکل روبرو گردد. لذا در نشریه آژانس مدیریت بحران فدرال نسبتی تعریف شده که نسبت خسارت متوسط نامیده شده است [۱۹]. به‌وسیله این نسبت، خسارت وارده به نوع سازه در مناطق مختلف شهرهای مختلف قابل مقایسه می‌باشند. این نسبت‌ها به‌صورت روابط (۳۰) تا (۳۳) می‌باشد.

نسبت خسارت متوسط (MDR) برای هر یک از مناطق از رابطه (۳۰) بدست می‌آید:

$$MDR_i^k = \frac{DR_S^k N_{Si}^k + DR_M^k N_{Mi}^k + DR_E^k N_{Ei}^k + DR_C^k N_{Ci}^k}{N_{Ti}^k} \quad (30)$$

که در آن:  $DR_j^k$ : نسبت آسیب نوع سازه (k نوع سازه، z سطح آسیب)  
 $N_{ji}^k$ : زیربنای آسیب سازه متناسب با سطح آسیب z برای سازه نوع k در منطقه i  
 $N_{Ti}^k$ : کل زیربنای ساخت سازه نوع k در منطقه i می‌باشد.  
 این نسبت برای مقایسه آسیب وارده به نوع خاص سازه و مقایسه آن با مناطق دیگر مناسب می‌باشد.

نسبت خسارت متوسط برای هر یک از مناطق از رابطه (۳۱) بدست می‌آید:

$$MDR_i = \frac{\sum_{k=1}^{mbt} DR_S^k N_{Si}^k + DR_M^k N_{Mi}^k + DR_E^k N_{Ei}^k + DR_C^k N_{Ci}^k}{N_{Ti}} \quad (31)$$

که در آن:  $DR_j^k$ : نسبت آسیب نوع سازه (k نوع سازه، z سطح آسیب)  
 $N_{ji}^k$ : زیربنای آسیب سازه متناسب با سطح آسیب z برای سازه نوع k در منطقه i  
 کل زیربنای ساخت سازه در منطقه i می‌باشد.  
 در این رابطه همه سازه‌ها محاسبه می‌شوند ( $k=1:mbt$ ).

نسبت خسارت متوسط برای هر یک از سازه‌ها در همه مناطق از رابطه (۳۲) بدست می‌آید:

$$MDR^k = \frac{\sum_{i=1}^{geounit} DR_S^k N_{Si}^k + DR_M^k N_{Mi}^k + DR_E^k N_{Ei}^k + DR_C^k N_{Ci}^k}{N_T^k} \quad (32)$$

که در آن:  $DR_j^k$ : نسبت آسیب نوع سازه (k نوع سازه، z سطح آسیب)  
 $N_{ji}^k$ : زیربنای آسیب سازه متناسب با سطح آسیب z برای سازه نوع k در منطقه i  
 کل زیربنای ساخت سازه نوع k در کل منطقه می‌باشد.  
 در این رابطه همه مناطق محاسبه می‌شوند ( $i=1:geounit$ )  
 این رابطه برای مقایسه آسیب دو نوع سازه مختلف در کل منطقه مورد مطالعه مناسب می‌باشد.

نسبت خسارت متوسط برای همه سازه‌ها در همه مناطق از رابطه (۳۳) بدست می‌آید:

$$MDR = \frac{\sum_{k=1}^{mbt} \sum_{i=1}^{geounit} DR_S^k N_{Si}^k + DR_M^k N_{Mi}^k + DR_E^k N_{Ei}^k + DR_C^k N_{Ci}^k}{N_T} \quad (33)$$

که در آن:  $DR_j^k$ : نسبت آسیب نوع سازه (k نوع سازه، z سطح آسیب)  
 $N_{ji}^k$ : زیربنای آسیب سازه متناسب با سطح آسیب z برای سازه نوع k در منطقه i

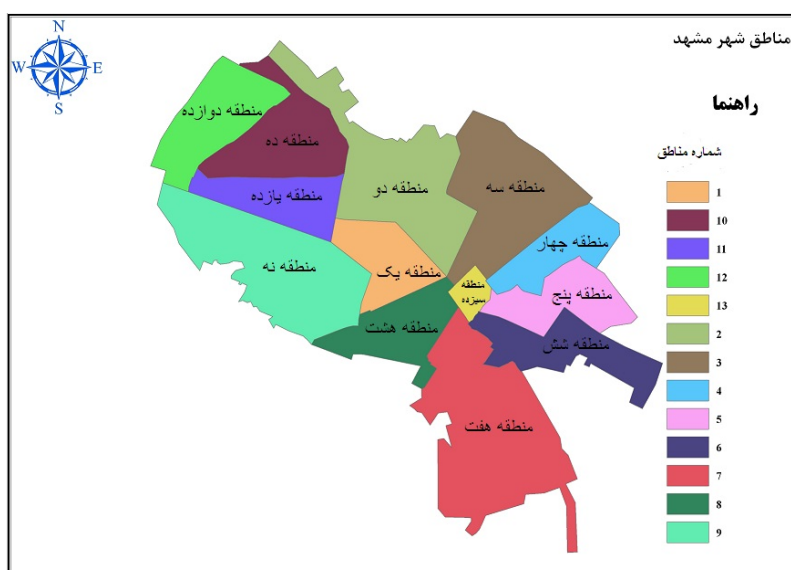
<sup>18</sup> Mean Damage Ratio Computation

کل زیربنای ساخت سازه کل منطقه مورد مطالعه

در این رابطه همه مناطق و همه سازه‌ها محاسبه می‌شوند ( $k=1:mbt$ ), ( $i=1:geounit$ ). این رابطه برای مقایسه آسیب کل سازه‌ها بین دو شهر مختلف مناسب می‌باشد.

### ۱۰-۳ - محدوده تحقیق و جامعه آماری

شهر مشهد به ۱۳ منطقه شهرداری تقسیم شده است که تحلیل و ارزیابی این تحقیق نیز به تفکیک این ۱۳ منطقه صورت گرفته است. آمارهای مورد نیاز اعم از نوع سازه، تعداد طبقات، نوع کاربری و مترای طبقات به صورت فایل دیتابیس جی‌آی‌اس از سازمان آمار و فناوری اطلاعات شهرداری مشهد دریافت و تفکیک شدند [۲۰]. در شکل ۵ مناطق شهرداری شهر مشهد نشان داده شده است.



شکل ۵: شماره مناطق شهر مشهد [20].

### ۱۱-۳ - زیربنای ساخت

به‌طور کلی سازه‌های موجود در شهر مشهد را می‌توان به صورت سه نوع سازه بتنی، فولادی و بنایی در نظر گرفت، البته ساختمان‌های قدیمی نیز در گروه سازه‌های بنایی قرار داده شده‌اند. زیربنای سازه‌ها در هر حوزه مطابق جدول ۱۱ می‌باشد.

جدول ۱۱: زیربنای سازه‌ها در مناطق سیزده‌گانه مشهد (مترمربع) [20].

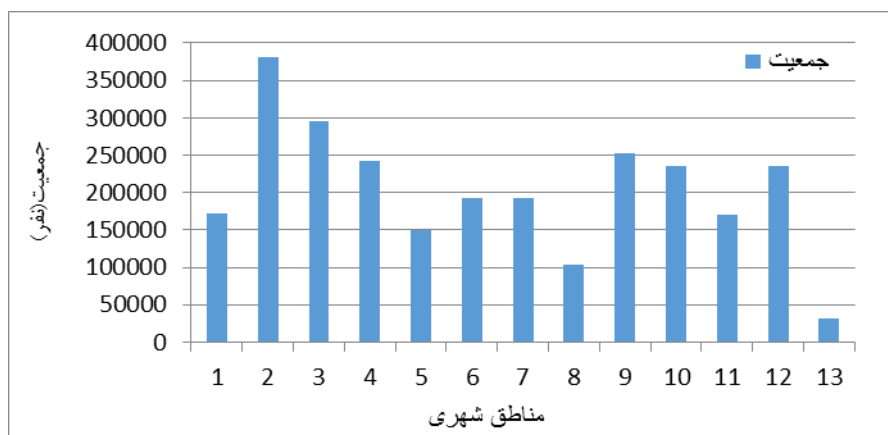
شماره	جمع زیربنای بتنی			جمع زیربنای فولادی			جمع زیربنای بنایی		
	۳-۱	-۴	+۸	۳-۱	-۴	+۸	۱+ طبقه	طبقه	+۱ طبقه
۱	۲۹۴۸۷	۸۵۳۸۴	۰	۳۰۵۸۵	۱۱۰۰۳	۱۲۹۵۷	۵۹۵۹۲	۵۹۰۹۲	۵۹۵۹۲
۲	۱۹۲۰۲	۳۷۵۹۱	۱۹۴۴۷	۶۷۳۱۰	۹۰۹۷۵	۸۵۴۵	۲۵۹۳۷۵	۱۹۸۱۲	۱۹۸۱۲
۳	۶۰۲۷	۰	۰	۱۰۴۶۵	۰	۰	۱۸۴۵۲۲	۱۲۸۴۸	۱۲۸۴۸
۴	۰	۰	۰	۲۶۵۰۶	۰	۰	۵۸۵۴۳۴	۲۰۷۶۷	۲۰۷۶۷
۵	۲۷۰۳	۰	۰	۳۶۵۹۲	۰	۰	۳۸۰۹۳	۱۷۵۰۳	۱۷۵۰۳
۶	۳۷۸۱۸	۰	۰	۰	۰	۰	۲۰۵۲۵	۲۸۹۱۰	۲۸۹۱۰
۷	۳۸۷۰۹	۰	۰	۱۳۶۰۴	۰	۰	۶۹۵۸۴۱	۲۶۰۱۱	۲۶۰۱۱
۸	۱۱۲۶۷	۰	۰	۲۸۹۷۱	۳۱۰۶۵	۰	۶۶۵۱۱	۳۰۱۶۰	۳۰۱۶۰
۹	۰	۳۱۵۷۴	۰	۴۹۴۰۱	۲۰۶۶۹	۰	۴۰۸۲۴۶	۱۷۷۲۱	۱۷۷۲۱
۱۰	۳۸۸۹۷	۰	۰	۸۸۱۵۶	۰	۰	۴۷۸۹۸	۷۲۴۶۵	۷۲۴۶۵
۱۱	۲۱۵۵۵	۵۲۳۹۴	۰	۵۲۰۵۳	۴۷۰۷	۰	۱۱۸۰۶۲۳	۸۱۲۲۵	۸۱۲۲۵



۱۲۰۵۷۲	۱۸۷۶۲	.	.	۶۸۵۵۳	.	.	۱۸۲۹۲	۱۲
۳۴۸۸۰۲	۱۴۸۶۵	.	.	۶۴۷۲۰	.	.	۳۸۱۰۸	۱۳

## ۱۲-۳ - جمعیت

شهر مشهد یکی از مراکز استان پرجمعیت می باشد. شکل ۶ نشان دهنده جمعیت و تراکم در مناطق مورد مطالعه است [۲۱].



شکل ۶: جمعیت مناطق سیزده گانه مشهد.

## ۱۳-۳ - نوع خاک و پارامترهای لرزه‌ای

طبق ویرایش چهارم آیین نامه زلزله ۲۸۰۰ [۲۲]، مشهد در پهنه با خطر نسبی زیاد قرار گرفته و بیشینه شتاب آن برابر  $g/3$  می باشد. طبق آیین نامه IBC-2006، سه پارامتر  $pga$ ،  $Sa_{0/3}$ ،  $Sa_{1/0}$  برای بدست آوردن طیف پاسخ، مورد نیاز می باشد. شتاب طیفی از رابطه (۳۴) بدست می آید.

$$S_a = A \times B \quad (34)$$

که در آن،  $A$  بیشینه شتاب طیفی زمین و  $B$  ضریب بازتاب ساختمان است. نوع خاک، طبق نقشه توزیع سرعت متوسط در عمق ۳۰ متری از استاندارد آیین نامه ۲۸۰۰ بدست می آید. پارامترهای لرزه‌ای برای انواع خاک‌ها در جدول ۱۲ آمده است.

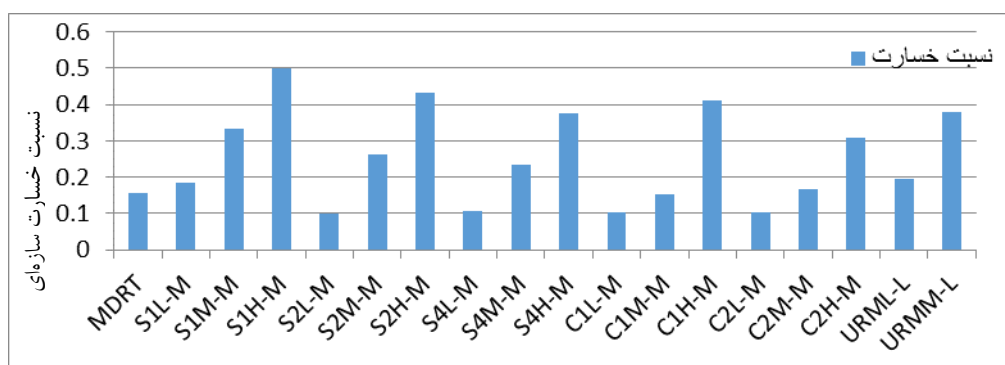
جدول ۱۲: پارامترهای لرزه‌ای با توجه به نوع خاک [۱۱]، [۲۲].

پارامترها	بیشینه شتاب زمین	ضریب بازتاب 0/3	ضریب بازتاب 1/0	شتاب طیفی پیروید ارتعاشی 0/3 ثانیه	شتاب طیفی پیروید ارتعاشی 1/0 ثانیه
نوع خاک	PGA	B	B	$Sa_{0/3}$	$Sa_{1/0}$
اول	0/3	2/5	1/3572	0/875	0/475۰2
دوم	0/3	2/5	1/5749	0/875	0/551215
سوم	0/3	2/75	2/۰919	0/9625	0/732165
چهارم	0/3	2/75	2/75	0/9625	0/9625

## ۴- آنالیز و تحلیل نتایج

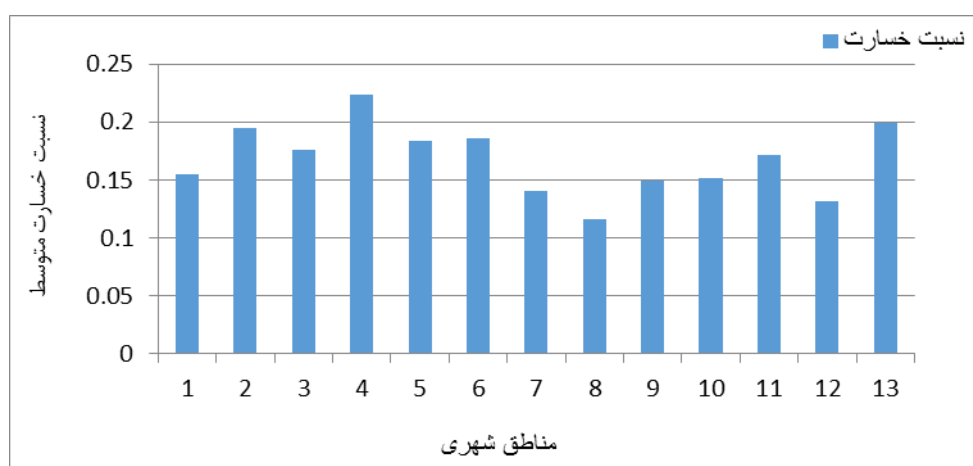
جهت تحلیل خطرپذیری یک سایت، ابتدا داده‌های ورودی مانند اطلاعات سازه‌ای، جمعیتی، نوع خاک، شتاب حرکت زمین و پارامترهای دیگر طبق فرمت‌های مورد نیاز نرم افزار آماده گردیده است. نتایج ارزیابی خطرپذیری لرزه‌ای شهر مشهد به روش هازيوس با استفاده از نرم افزار سلنا به صورت نسبت خسارت سازه‌ای به تفکیک نوع سازه، نسبت خسارت متوسط به تفکیک مناطق شهری، تلفات ناشی از زلزله طرح استاندارد آیین نامه ۲۸۰۰ ایران، خسارت اقتصادی زلزله احتمالی و مطابق با جداول و شکل‌های زیر بدست آمده است. در این تحقیق تأثیر اجزای غیر سازه‌ای با توجه به عدم وجود اطلاعات کافی، در نظر گرفته نشده است. قطعاً با لحاظ کردن تأثیر اجزای غیر سازه‌ای در

محاسبات، تلفات بسیار زیادتر خواهد شد. نسبت خسارت متوسط هر یک از سازه‌ها با توجه به نوع سازه و تعداد طبقات در شکل ۷ و همچنین نسبت خسارت متوسط در هر یک از مناطق شهر مشهد در شکل ۸ نشان داده شده است.



نوع سازه

شکل ۷: نسبت خسارت سازه‌ای به تفکیک نوع سازه.

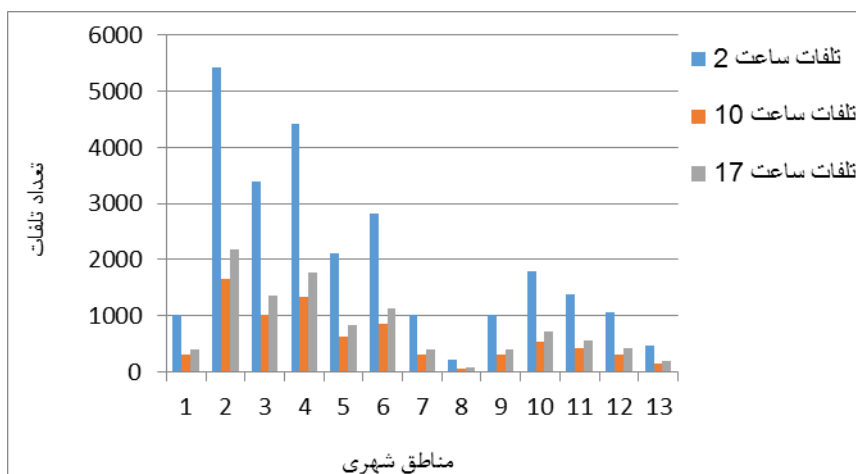


شکل ۸: نسبت خسارت متوسط به تفکیک مناطق شهری.

**تلفات:** تلفات ناشی از زلزله طرح استاندارد آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران در مناطق سیزده‌گانه شهر مشهد و در ساعت‌های دو بامداد، ده صبح و پنج عصر در جدول ۱۳ و شکل ۹ نشان داده شده است.

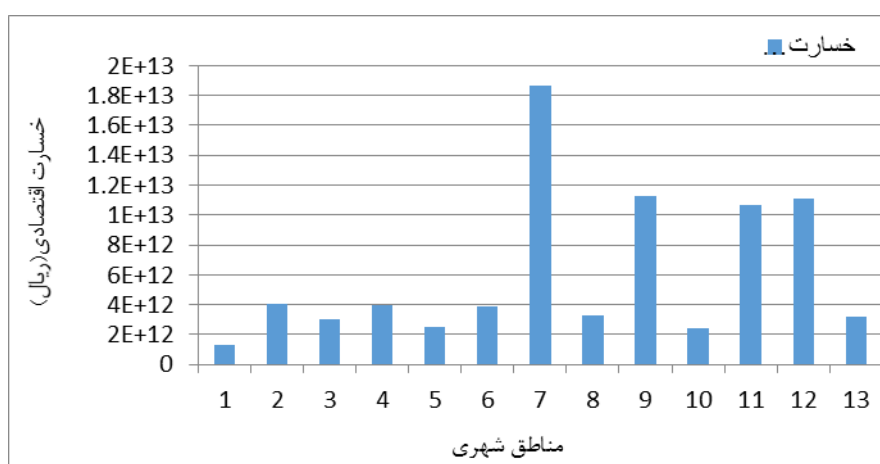
جدول ۱۳: تلفات تحلیل خطرپذیری لرزه‌ای مناطق شهر مشهد.

مناطق	تلفات در ساعت ۲:۰۰	تلفات در ساعت ۱۰:۰۰	تلفات در ساعت ۱۷:۰۰
1	1010.4	304.9	402.5
2	5430.9	1645.1	2171.5
3	3390.7	1025	1352.9
4	4421.1	1339.7	1768.5
5	2105.6	637.6	841.6
6	2809.2	850.9	1123.2
7	1014.9	304.3	401.7
8	224.4	66.5	87.8
9	1026.3	304.9	402.5
10	1793.7	540.3	713.2
11	1379.7	415.5	548.4
12	1061.3	317.8	419.4
13	472	142.9	188.6



شکل ۹: تلفات تحلیل خطرپذیری لرزه‌ای مناطق شهر مشهد در ساعت‌های مختلف.

**خسارت اقتصادی:** خسارت اقتصادی تحلیل خطرپذیری زلزله احتمالی شهر مشهد به تفکیک مناطق سیزده‌گانه، در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰: خسارت اقتصادی بر اثر زلزله طرح استاندارد آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران (ریال).

## تحلیل نتایج

بافت قدیم شهر مشهد، قسمت‌های مرکزی مناطق ۱ تا ۸ و منطقه ۱۳ (منطقه ثامن) است و همان‌طور که در خروجی‌های نرم‌افزار سلنا مشخص است، منطقه ۲ و ۴ بیشترین نسبت تلفات را نشان می‌دهد و این مناطق به همراه منطقه ۱۳، بیشترین نسبت خسارات را نیز به خود اختصاص داده است. بیشتر سازه‌ها در این منطقه، سازه بنایی است که آسیب‌پذیرترین نوع سازه در مقابل زلزله می‌باشد. وجود سازه بنایی در یک حوزه می‌تواند باعث به وجود آمدن تفاوت زیادی در نسبت خسارات و تلفات، نسبت به حوزه‌های دیگر شود. لذا برای کمتر کردن تلفات و خسارات در این مناطق می‌بایست چاره‌ای اندیشید. مناطق ۵، ۶، ۳ و ۱۱ نیز به ترتیب جزء مناطقی با نسبت خسارت بالا می‌باشند. نقطه مقابل این حوزه‌ها، مناطق ۷ تا ۱۲ (به جز منطقه ۱۱) شهرداری مشهد است که علی‌رغم اینکه این حوزه‌ها دارای بافت جدیدتری نیستند ولی اکثر سازه‌های آن دارای استانداردهای به‌روزرتری هستند و در تخمین خسارت دارای سهم کمتری می‌باشند. تراکم جمعیت نیز می‌تواند یکی دیگر از دلایل افزایش تلفات باشد. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود مناطق ۲ تا ۴ در رده‌های بالای نسبت تلفات می‌باشند بطوریکه این مناطق دارای بیشترین تراکم جمعیتی نیز هستند. معمولاً مناطقی که تراکم جمعیتی بیشتری دارند،

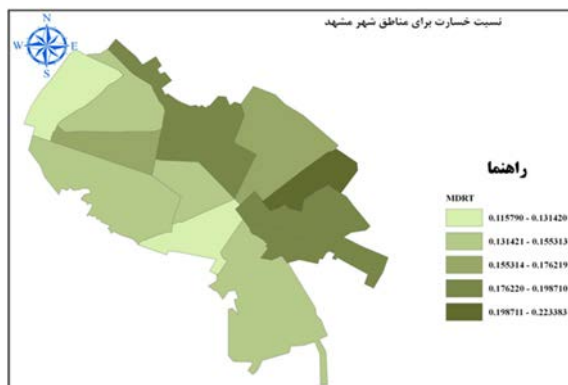
سازه‌ها نیز دارای ارتفاع بیشتری هستند و این افزایش ارتفاع می‌تواند در افزایش خسارات تأثیرگذار باشد. نوع خاک هم یکی از عوامل تأثیرگذار در میزان خسارات است. در سطوح مختلف خسارت، خاک تأثیری مستقیمی دارد، به این ترتیب که مناطق دارای خاک نوع یک، کمترین خسارت کامل و مناطق دارای خاک نوع چهار، بیشترین خسارت خفیف را دارا می‌باشد. با در نظر گرفتن این تأثیرگذاری در طراحی سازه‌ها می‌توان خسارات را به میزان قابل توجهی کاهش داد.

به طور کلی باید به هر زلزله به عنوان یک آزمایشگاه واقعی جهت بررسی و اعتبارسنجی روش‌های استفاده شده در پیش‌بینی آسیب‌ها و تلفات نگریست. بنابراین ارزیابی سالانه خطرپذیری لرزه‌ای و ایجاد ناحیه بندی‌های مختلف و بررسی جزئی‌تر آن‌ها برای رسیدن به یک مدل پیش‌بینی آسیب و برآورد تلفات دقیق، بسیار حائز اهمیت می‌باشد. همان‌طور که در نتایج این تحلیل خطرپذیری مشخص است در صورت وقوع زلزله، در بعضی مناطق خسارات مالی و جانی بسیار زیادی به جا خواهد ماند. به این ترتیب ما با شناختن مناطق آسیب‌پذیر می‌توانیم به روشی جهت برطرف کردن ضعف‌های موجود و در نتیجه کاهش خسارت‌ها دست‌یابیم. مقاوم‌سازی و ایمن کردن بناهای نایمن موجود، شناخت مناطق با خطرپذیری لرزه‌ای بالا، عدم ساخت‌وساز در مناطقی که دارای خطرپذیری بسیار زیادی هستند و ساختن بناهای جدید بر پایه آیین‌نامه‌های جدید طراحی در برابر زلزله می‌تواند راهی برای کم کردن اثرات زلزله باشد. در این رابطه می‌توان با آگاهی از شدت آسیب‌پذیری انواع سازه‌ها، در جهت تقویت آن‌ها اقدام شود. به طور مثال سازه‌هایی که قابلیت مقاوم‌سازی ندارند و یا احتمال آسیب رساندن به سازه‌های دیگر را دارند، تخریب شوند و یا با ساختمان‌های جدید مقاوم در برابر زلزله جایگزین شوند. راه دیگری که در کاهش تلفات، بسیار تأثیرگذار است کم کردن جمعیت در مناطقی است که در تحلیل خطرپذیری، آسیب‌پذیرتر نشان داده‌اند. به عنوان مثال انتقال مراکز دولتی، اداری، فرهنگی و... به مناطق با آسیب‌پذیری کمتر می‌تواند راهکار مناسبی باشد.

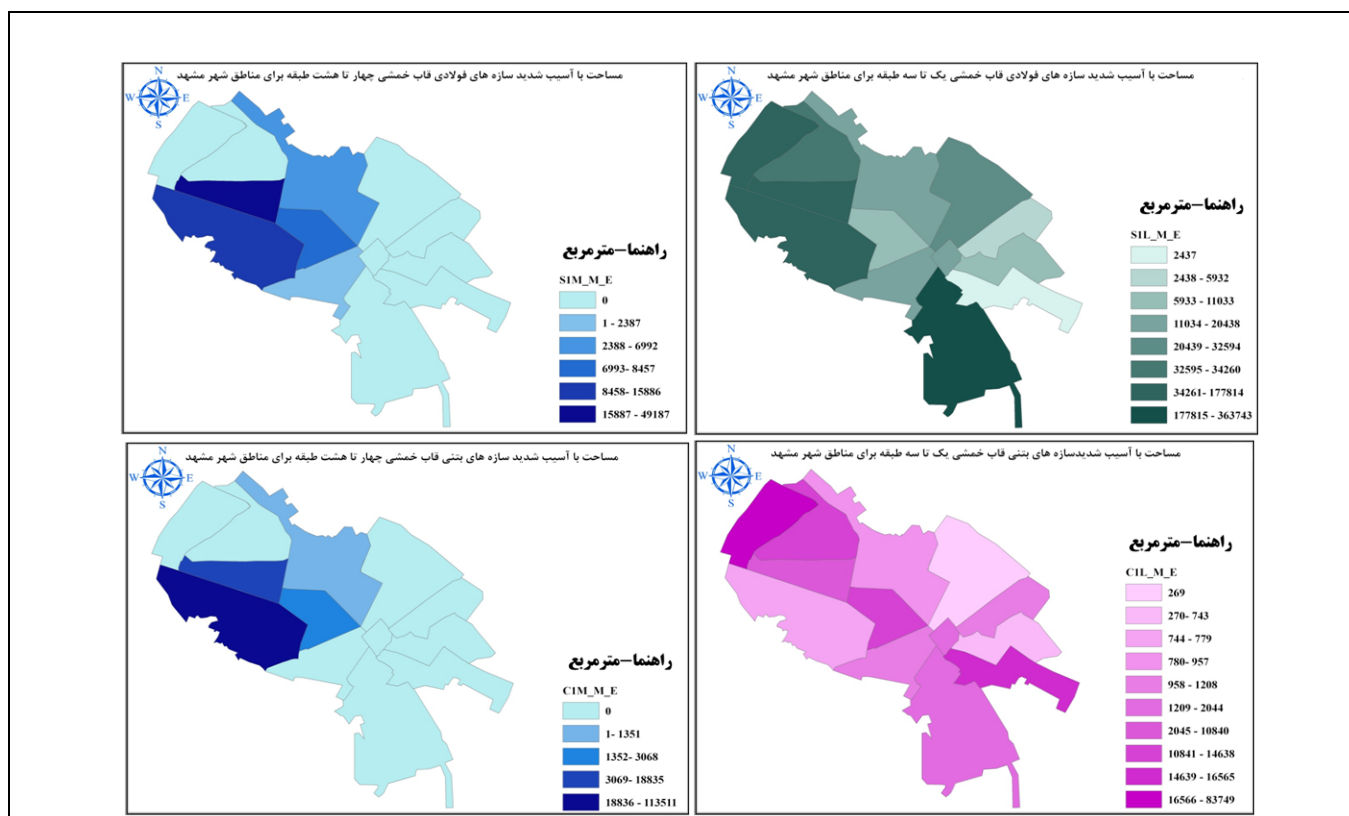
بررسی آسیب‌پذیری لرزه‌ای شبکه گازرسانی شهری نیز جهت یافتن نقاط ضعف شبکه و رفع آن‌ها، برای جلوگیری از آتش‌سوزی‌های جزئی و گسترده بعد از وقوع زلزله بسیار حائز اهمیت است و باید مورد مطالعه قرار گیرد. بررسی آسیب‌پذیری لرزه‌ای شبکه راه‌های استان‌ها و شهرها و یافتن نقاط ضعف و قوت آن‌ها نیز هر کدام به طور جداگانه جهت وجود دسترسی‌های امدادی، جابجایی افراد و مصدومان احتمالی و تخلیه آوار و... بعد از وقوع زلزله بسیار مهم است و باید مورد مطالعه قرار گیرد. بررسی خطرپذیری لرزه‌ای مراکزی که در ساعاتی از شبانه‌روز و یا به طور مداوم دارای جمعیت متمرکز هستند مانند مدارس، دانشگاه‌ها و بیمارستان‌ها بسیار حیاتی است و باید توسط سازمان‌ها و وزارتخانه‌های مربوطه مورد بررسی و مطالعه قرار گیرد.

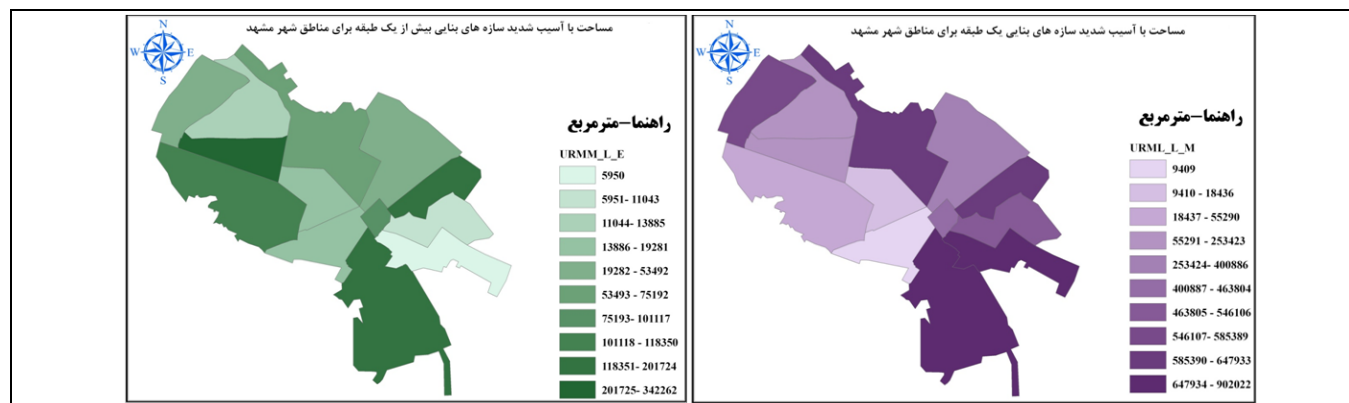
به این ترتیب به منظور کم کردن تلفات جانی، خسارات مالی و اثرات اجتماعی ناشی از زلزله، لازم است خطرپذیری لرزه‌ای شهرها بر اساس شرایط مختلف جغرافیایی، توپوگرافی، نوع و موقعیت گسل‌ها، نوع خاک و دیگر پارامترهای مؤثر مورد بررسی قرار گیرد تا بتوان بر اساس آن، نقاط ضعف نواحی مختلف را قبل، حین و بعد از وقوع زلزله مورد بررسی قرار داده و اقدامات پیشگیرانه‌ای را جهت جلوگیری از به وجود آمدن فاجعه انجام داد.

نسبت خسارت کل سازه‌های موجود در کل شهر مشهد به تفکیک هر منطقه در شکل ۱۱ آورده شده است. به این ترتیب که خسارت هر منطقه نسبت به کل مناطق، مورد بررسی قرار گرفته است. مساحت آسیب‌دیده یکی از چندین خروجی نرم‌افزار است که برای انواع سازه‌های بتنی، فولادی و بنایی برحسب نوع مقاومت جانبی سازه (قاب خمشی، دیوار برشی، مهاربندی و...) و تعداد طبقات موجود بیان می‌شود. همان‌طور که قبلاً ذکر گردید، انواع آسیب‌های سازه‌ای در چهار سطح خفیف، متوسط، گسترده (شدید) و کامل دسته‌بندی می‌شوند و دسته‌بندی تعداد طبقات برای انواع سازه‌های بتنی و فولادی به صورت یک تا سه طبقه، چهار تا هشت طبقه و هشت طبقه و بیشتر مورد تحلیل قرار گرفته و سازه‌های بنایی به صورت یک طبقه و بیشتر از یک طبقه ارزیابی می‌شوند. در شکل ۱۲ مساحت آسیب‌دیده با آسیب شدید برای سازه‌های بتنی با قاب خمشی، سازه‌های فولادی با قاب خمشی و سازه‌های بنایی هر کدام با توجه به تعداد طبقات موجود و از بین ۱۷ نوع سازه دسته‌بندی شده در روش هازبوس، به صورت نمونه آورده شده است. همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود مساحت‌های آسیب‌دیده برحسب مترمربع در مناطق سیزده گانه شهر مشهد و به تفکیک هر منطقه و با توجه به مساحت سازه‌های موجود بیان شده است.



شکل ۱۱: نسبت خسارت کل به تفکیک مناطق شهری.





شکل ۱۲: زیربنای با آسیب شدید سه نوع سازه در مناطق سیزده گانه شهر مشهد.

## مراجع

- [1] National Geoscience Database of Iran, (1395). Earthquake information.. URL: www.ngdir.ir. Contact Mail: Info@ngdir.ir.
- [2] Karimi Dehcheshmeh, M. (2015). “Seismic Risk Assessment in Qazvin”;Msc. Thesis. Azad University. Khorasan Branch. Iran.
- [3]Khakpoor, B. Hayati, S. Kazemi Biniaz, M. Rabbani Abolfazli, Gh.(1392). “Comparing adaptive analysis of amount urban textures against earthquake using fuzzy hierarchical analysis models (case study: Lamerd city). Preparation of Environment Quarterly, No. 22, pp. 38-21.
- [4] Berberian,M., Farshi,A,A, (1368). “Seismotectonic report, earthquake faulting and thermal – Powerhouse design engineering”. Ministry of Energy, Electrical Engineering Joint Stock Company(Mashanir). Neyshabour, Tehran.Iran
- [5]Akbari Motlagh, M. Abbas Zadeh, Gh. Aminian, A,A. (1391). “Mashhad urban complex vulnerability and crisis management in deal earthquake with an emphasis on international experiences”. Logistics and Sustainable Development Quarterly, No. 3, pp. 23-7.
- [6]Khakpoor, B. Zomorrodian, M,J. Sadeghi, S. Moghadami, A. (1390). “Vulnerability analysis, physical - skeletal from the perspective of seismicity in 9 region Mashhad ”. Journal of Geography and Regional Development ,Volume (8), No (16), Year (2011-7) , Pages (1-34).
- [7]Bananews-Momtaz. (1394). Building industry Country news, Civil Engineering - Architecture – Urban. URL: www.momtaznews.com. Contact Mail: Info@ BanaNews.ir .
- [8]Kainz, W., (2006), Fuzzy Logic and GIS. Vienna, Austria, Department of Geography and Regional Research University of Vienna.
- [9]Japan International Cooperation Agency (JICA), Centre for Earthquake and Environmental Studies of Tehran (CEST), Tehran Municipality,(2000)“The Study on Seismic Microzoning of the Greater Tehran Area in the Islamic Republic of Iran”,Pacific Consultants International OYO Corporation.
- [10] Khoshnevis, N. (2012). “Seismic Risk Assessment in Tehran”;Msc. Thesis. University of Science & Technology.Tehran. Iran.
- [11] International Building Code (IBC-2006). Technical report, International Code Council, United States, January 2006.
- [12]Molina,S,D.H. Lang ,C.D. Lindholm ,. Lingvall,F, (2010), “ User Manual for the Earthquake Loss Estimation Tool : SELENA ”, NORSAR and Universidad de Alicante.
- [13]Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. Technical report, Applied Technology Council (ATC), Redwood City, California, 1996. Report ATC-40.
- [14] Nehrp guidelines for the seismic rehabilitation of buildings. Technical report, Federal Emergency Management Agency (FEMA), Washington DC, October 1997. FEMA 273.
- [15]Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures. Technical report, Applied Technology Council (ATC), California, USA, 2005. FEMA-440.
- [16]Pre standard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. Technical report, Federal Emergency Management Agency (FEMA), Washington DC, 2000. FEMA-356.
- [17]Multi-hazard Loss Estimation Methodology, Technical manual.(2003) Federal Emergency Management Agency, Washington DC, USA.

- [18] S. Molina, D.H. Lang, C.D. Lindholm, (2010) "SELENA – An open-source tool for seismic risk and loss assessment using a logic tree computation procedure", Technical report, Applied Technology Council, Volume 36, Issue 3, March 2010, Pages 257-269.
- [19] Crowley H., Colombi M., Crempien J., Erduran E., Lopez M., Liu H., Mayfield M., Milanesi M. (2010), "GEM1 Seismic Risk Report, GEM Technical Report 2010-5, GEM Foundation", Pavia, Italy.
- [20] Organization for Statistics and Information Technology Mashhad Municipality (1394). "Database, GIS maps of Mashhad". Mashhad.Iran.
- [21] Organization for Statistics and Information Technology Mashhad Municipality (1394). "GIS map of population distribution in Mashhad Municipality". Mashhad.Iran.
- [22] BHRC, (2015). "Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings, standard No. 2800". 4rd Revision, Building & Housing Research Center, Tehran, Iran.