طراحی و پیاده‌سازی نمونه اولیه نرم‌افزار کاربردی تعاملی گوشی هوشمند جهت ارزیابی لرزش و آسیب‌پذیری ساختمان‌ها

رضا خواجوی*: استادیار، دکترای تخصصی مهندسی سازه، مرکز تحقیقات زمین لرزه شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.

عارفه جوکار: کارشناسی ارشد ژئوفیزیک (زلزله شناسی)، مرکز تحقیقات زمین لرزه شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.

عماد صداقتی: کارشناسی ارشد ژئوفیزیک (زلزله شناسی)، مرکز تحقیقات زمین لرزه شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.

تاریخ دریافت:۱۴۰۰/۱/۲۸ تاریخ پذیرش:۱۴۰۱/۱۱/۱

چکیده

به دنبال رخداد زلزله، عموم مردم در پی یافتن اطلاعات مفید درباره آن، پس‌لرزه‌های احتمالی، و اطلاعاتی درباره آسیب‌پذیری ساختمان خود هستند. زمان و هزینه زیاد در بررسی خسارات و وضعیت ایمنی پس از وقوع زلزله و نبود یک سامانه تعاملی میان مردم و مسئولان در مدیریت بحران پس از زلزله، به‌ویژه در کلان‌شهرها، چالشی اساسی است. باتوجه‌به فراگیرشدن استفاده از گوشی هوشمند و نرم‌افزارهای آنها، می‌توان ضمن برقراری این تعامل، از طیف وسیعی از مردم اطلاعاتی مانند شدت احساس شده زلزله و وضعیت کلی آسیب وارده به ساختمان‌ها را کسب و آموزش‌های لازم را به آنها ارائه نمود. هدف از این پژوهش طراحی و پیاده‌سازی نمونه اولیه نرم‌افزار گوشی هوشمند جهت ارزیابی شدت زلزله و برآورد آسیب‌پذیری ساختمان‌های شهری با استفاده از روش مناسب تخمین خسارت و مطلع ساختن کاربران از وضعیت ایمنی ساختمان‌ها است. در این پژوهش، با پیروی از روش نظام‌مند طراحی نرم‌افزار، کاربران سامانه، نیازهای کارکردی آنها، و روش‌ها و فناوری‌های مناسب برای برآوردن آنها شناسایی، و نمونه اولیه نرم‌افزار گوشی هوشمند تهیه گردیده است. نرم‌افزار دارای قابلیت تعامل با کاربر عمومی برای دریافت برآورد شدت زلزله، اطلاعات ساختمان، گزارش‌دهی آسیب‌پذیری ساختمان، و امکان مشارکت دهی کاربران در ثبت رکورد پس‌لرزه‌هاست. با استفاده از اطلاعات دریافتی از کاربران می‌توان در زمانی کوتاه، بانک اطلاعاتی نسبتاً کاملی از وضعیت خسارت، شدت و میزان لرزش در هر نقطه شهر را داشت که در مدیریت بحران پس از زلزله و ایمن‌سازی شهر برای زلزله‌های پرخطر آینده کارآمد باشد.

کلمات کلیدی: ارزیابی لرزه‌ای ساختمان‌ها، زمین‌لرزه، گوشی هوشمند، نرم‌افزار کاربردی (اپلیکیشن) اندروید.

Design and Implementation of a Mobile-app Prototype for Assessment of Earthquake Shaking and Seismic Vulnerability of Buildings

Reza Khajavi*[1], Arefeh Jokar[2], Emad Sedaghati[3]

Abstract

After an earthquake, people are seeking for useful information about the mainshock and its possible aftershocks, and the vulnerability of their buildings to any future shakings. Actually, safety assessment of buildings after an earthquake is very costly and time-consuming, and lack of an interactive system between public and authorities for post-earthquake crisis management, especially in metropolitans, is a major challenge. Due to the widespread use of mobile-apps, information such as felt intensity of earthquakes and general structural status of buildings, as well as necessary trainings might be exchanged on an interactive cybernetic system. The purpose of this study is to design and implement a prototype software for earthquake intensity assessment and to give an overall rough estimation of seismic vulnerability of buildings by using a rapid damage estimation method. In this research, following a systematic method for software design, system users and their requirements, and possible solutions are identified, and a prototype system is implemented. The presented software is capable of interacting with public to receive earthquake intensity estimates and building information, as well as reporting building vulnerabilities, and may contribute volunteers to register aftershocks. Using data received from the users, the system can provide a nearly complete database for urban vulnerability, as well as real-time interactive DYFI(Did You Feel It?), shake and damage maps, which may efficiently be used for earthquake crisis management and securing urban regions for hazardous future earthquakes.

Keywords: Android application, Earthquake, Seismic Assessment of Buildings, Smartphone.

[1] *Assistant Professor, PhD of Structural Engineering, Earthquake Research Center, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.*

[2] *MSc of Geophysics (Earthquake Seismology), Earthquake Research Center, Ferdowsi University of Mashhad, Iran*

[3] *MSc of Geophysics (Earthquake Seismology), Earthquake Research Center, Ferdowsi University of Mashhad, Iran*

مقدمه

ارزیابی خسارت‌های سازه‌ای در زلزله‌های کم خطر به عنوان برآوردی ازآسیب‌پذیری شهری از سویی، و همچنین یافتن روش‌هایی برای مدیریت و کنترل آسیب‌های اجتماعی در چنین زلزله‌هایی، و در مرحله بعد، بازسازی خسارت‌های اقتصادی وارده از سوی دیگر، از ضروریات کنونی و نیازی مبرم در سازمان‌های شهری و مدیریت بحران ایران است. پژوهش در این حوزه به ویژه از آن رو حائز اهمیت است که تعداد زلزله‌های کم‌خطر در ایران قابل ملاحظه است و تجربه سالیان گذشته نیز نشان داده است که رخداد چنین زلزله‌هایی، به ویژه در حوزه آسیب‌های اجتماعی و مخصوصاً در شهرهای بزرگ و کلان‌شهرها، بسیار پرخطر و بحران‌زا است. آشکار است که مدیریت آسیب‌های اجتماعی در پی این گونه زلزله‌ها به اندازه زیادی منوط به اطلاع‌رسانی مناسب و آگاهی‌بخشی به توده مردم است؛ و البته، باز تجربه سال‌های گذشته به روشنی نشان داده است که فضای مجازی، در بسترهای مختلف وب و شبکه‌های اجتماعی، نقش بسزایی در مدیریت بحران‌های اجتماعی پس از زلزله و یا بر عکس بحران‌زایی و بحران‌آفرینی دارند. بر این اساس، به نظر می‌رسد که مراکز پژوهشی دانشگاهی، با توجه به برخورداری از پشتوانه اعتبار علمی از منظر عمومی، قابلیت تبدیل به مرجعیت اطلاع‌رسانی در هنگام رخداد زلزله‌ها را به منظور مدیریت افکار عمومی و کنترل بحران‌های اجتماعی، دست کم در زلزله‌های کم‌خطر، دارا می‌باشند.

چندی است که نویسندگان این مقاله در تلاشند تا با ایجاد بسترهایی به منظور تعامل با کاربران عمومی، زمینه‌های پایش زلزله در مناطق شهری، اطلاع‌رسانی پس از زلزله، و به تبع آن مدیریت بحران‌های اجتماعی فراهم گردد. آشکار است که ایجاد تعامل با کاربران نیازمند اعتمادسازی و آگاهی‌بخشی در زمینه‌های مورد نیاز کاربران عمومی در پی رخداد زلزله است. روشن است که به دنبال وقوع هر زلزله کم‌خطر، که تلفات جانی و مالی قابل توجه نداشته است، عموم مردم به دنبال یافتن اطلاعات مفید در مورد زلزله مورد نظر، امکان رخداد پس لرزه‌ها، و نیز اطلاعاتی درباره آسیب‌پذیری ساختمان محل سکونت خود می‌باشند. این پژوهش، بخشی از تلاش نویسندگان برای سامان‌دهی تعامل با عموم مردم به دنبال رخداد یک زلزله کم‌خطر و انجام موارد زیر است:

۱- ایجاد مرکز مجازی مرجع جهت اطلاع‌رسانی پس از زلزله، با هدف مدیریت آسیب‌های اجتماعی پس از زلزله‌های کم‌خطر از طریق اطلاع‌رسانی، آگاهی‌بخشی و اعتمادسازی.

۲- برآورد میزان آسیب‌پذیری شهری از طریق مشارکت همگانی و تهیه بانک اطلاعاتی از پاسخ لرزه‌ای شهری و وضعیت عملکردی ساختمان‌ها. یادآوری می‌کند که ارزیابی خسارات و آسیب های ناشی از زلزله برای پیش بینی تاثیرات اقتصادی ناشی از زلزله های آینده بسیار ضروری است. مدل‌های آسیب لرزه‌ای برای واکنش سریع در مواقع بحرانی و ارائه طرح‌های مدیریت بحران در زمان وقوع زلزله نیز بسیار مهم می‌باشند.

۳- مشارکت‌دهی کاربران در زمینه پایش شتاب، بیشینه شتاب، و شدت زلزله

۴- بسترسازی برای ایجاد مرکز مرجع راهنمایی و مشاوره مقاوم‌سازی و بهسازی لرزه‌ای

این پژوهش بر آن است تا با طراحی و پیاده‌سازی یک سامانه تعاملی در بستر گوشی همراه، ضمن دریافت اطلاعاتی از کاربران در زمینه شدت زلزله احساس شده و گونه ساختمان‌های مسکونی آنها، اطلاعاتی را درباره آسیب‌پذیری ساختمان آنها به ایشان ارائه کند. در پی این تعامل، انتظار می‌رود که بتوان کاربران را به کسب آگاهی و آموزش، و نیز مشارکت و ایفای نقش در زمینه مدیریت بحران پس از زلزله و گردآوری اطلاعات به ویژه در ثبت پس‌لرزه‌ها در قالب یک شبکه شتاب‌نگاری گوشی هوشمند ترغیب نمود.

لازم به ذکر است که تا کنون، عمده پژوهش‌های انجام گرفته درباره سامانه‌های مشارکت‌دهی همگانی در مدیریت بحران زلزله، عمدتاً به زلزله‌های پرخطر و جلب همکاری مردم در گردآوری اطلاعات تصویری و متنی پرداخته‌اند؛ زلزله‌های کم خطر از سویی، و به ویژه جلب مشارکت عمومی در ارزیابی لرزه‌ای ساختمان‌ها از سوی دیگر، کمتر کانون توجه محققین بوده است. این در حالی است که فراوانی رخداد زلزله‌های کم‌خطر با شدت پایین به ویژه در مناطق شهری در کشور ما بالاست، و عدم مدیریت مناسب به ویژه در مقیاس مردمی، گاه

پیامدهای ناگواری را به وجود آورده است. همچنین، رخداد یک زلزله کم‌خطر، به دلیل ایجاد برانگیختگی عمومی، بهترین فرصت برای کسب اطلاعات از بناهای شهری و آسیب‌پذیری آنها، جلب مشارکت مردمی در گردآوری داده، و افزایش آگاهی و آموزش همگانی در مواجهه با زلزله‌های پرخطر می‌باشد.

این پژوهش، بر آن است تا با سامان‌دهی یک سامانه بومی، برای نخستین بار، ارزیابی کیفی ساختمان‌ها را با مشارکت مردمی سامان بخشد. از آن جا که عمده اثرات زلزله در شهرها و نقاط تجمع جمعیتی عمدتاً به صورت کم‌خطر بوده است، ترجیح داده شد تا در گام نخست سامانه برای زلزله‌های کم‌خطر سفارشی شود. آشکار است که در صورت برآورد آسیب‌پذیری بالای ساختمان بر مبنای گزارش مردمی، لازم است پیش از هر گونه راهنمایی و اقدام در زمینه بهسازی لرزه‌ای ساختمان، ارزیابی تخصصی توسط نیروهای آموزش‌دیده صورت پذیرد. یادآوری می‌کند که بسترسازی جلب اعتماد عمومی از طریق ارائه اطلاعات مورد نیاز کاربران مردمی، هدف اصلی نویسندگان مقاله بوده است تا با افزایش مراجعه مردمی به سامانه پس از رخداد زلزله، تعامل جهت کسب اطلاعات مردمی از سویی و ارائه آموزش‌ها و افزایش آگاهی عمومی از سوی دیگر فراهم گردد.

پیشینه تحقیق

ارزیابی لرزه‌ای ساختمان‌ها و سازه‌های شهری موضوعی است که در دهه‌های اخیر مطرح شده و به طور قابل‌توجهی پیشرفت کرده است. با گسترش شهرها و تمرکز جمعیت و سرمایه در آن‌ها، اهمیت خطر زمین‌لرزه و به دنبال آن، ارزیابی لرزه‌ای سازه‌های شهری در کشور ما بیشتر شده است. ارزیابی لرزه‌ای ساختمان‌ها به‌ویژه ازآن‌رو دارای اهمیت است که بخش عمده‌ای از ساختمان‌های شهری کشور ما هنوز در رده ساختمان‌های آسیب‌پذیر به شمار می‌آیند[۱]. تا کنون، انواع مختلفی از روش‌ها برای ارزیابی آسیب‌پذیری ساختمان‌ها در برابر زلزله پیشنهاد شده‌اند که می‌توان آنها را به دودسته کلی کیفی و کمی (تحلیلی) تقسیم‌بندی کرد [۲,۳].

در روش‌های کیفی، باتوجه‌به شرایط لرزه‌خیزی و شرایط ساختمان‌سازی منطقه و همچنین بر اساس خسارات و تجربه‌های زمین‌لرزه‌های اتفاق افتاده، روابط ریاضیاتی ویژه‌ای تهیه می‌شوند. بازرسان ساختمان با استفاده از این روابط اطلاعاتی مانند سیستم مقاوم لرزه‌ای جانبی، سیستم باربر قائم، کیفیت اتصالات، نحوه ساخت، شکل‌پذیری اعضاء، وضعیت پی، و شرایط محل ساختمان را گردآوری نموده و در یک بانک اطلاعاتی ذخیره می‌کنند. از این روش‌ها می‌توان برای تخمین اولیه و تقریبی ظرفیت مقاومت لرزه‌ای ساختمان‌های یک منطقه استفاده کرد [۴]. برای ارزیابی کیفی آسیب‌پذیری ساختمان‌ها، مراکز مختلف علمی روش‌های مختلفی را پیشنهاد کرده‌اند که به‌عنوان نمونه می‌توان به دو نمونه روش ارزیابی آسیب‌پذیری (ATC)و روش ارزیابی آسیب‌پذیری آریا اشاره کرد [۵].

در روش‌های کمی، ساختمان‌ها بادقت بیشتر و جزئیات، موردمطالعه و بررسی قرار می‌گیرند. در این روش معمولاً تحلیل‌های دینامیکی و مدل‌سازی‌های کامپیوتری غیرخطی ساختمان و انجام آزمایش‌های دینامیکی روی اعضای سازه‌ای و غیرسازه‌ای در صورت لزوم ضروری است. شکل‌پذیری اعضاء و مقاومت ساختمان در برابر نیروهای جانبی از جمله پارامترهای مهم برای تعیین آسیب‌پذیری هستند که می‌توانند با آزمایش مدل‌ها و یا روش‌های تجربی تعیین شوند. در این روش‌ها پس از تعیین اطلاعات موردنیاز سازه‌ای ساختمان موردمطالعه شامل مشخصات اعضاء، اتصالات ستون، بادبند، تیر، دیوار برشی و به‌طورکلی کلیه اعضاء باربر، پاسخ سازه و ظرفیت آن (C)معمولاً با استفاده از روش تحلیل غیرخطی استاتیکی یا تحلیل دینامیکی تعیین شده و از مقایسه میزان ظرفیت Cبا میزان تقاضای D، میزان آسیب‌پذیری سازه‌ها با یک معیار کمی گزارش می‌شود [۶].

به‌منظور اتخاذ تصمیمات آگاهانه و برنامه‌ریزی برای بهبود شرایط پس از وقوع زلزله و همچنین به‌منظور کاهش صدمات و خسارات، نیاز به ارزیابی سریع و یافتن موقعیت مکانی و میزان آسیب وارده به ساختمان‌های شهری است. روش‌های کیفی معمولاً روش‌هایی سریع‌تر نسبت به روش‌های کمی، و البته درعین‌حال عینی، بوده و برای مطالعات آماری با تخمین آسیب‌پذیری ساختمان‌ها در ابعاد وسیع مناسب هستند. روش‌های کیفی عمدتاً برای هر دو مرحله پیش‌وپس از زلزله

استفاده می‌شوند. اما روش‌های کمی و تحلیلی، عمدتاً پیش از زلزله به کار می‌روند. این روش‌ها را بیشتر با نام ارزیابی خطر لرزه‌ای می‌شناسند و کارکرد آنها تهیه نمودارهای شکنندگی و پیش‌بینی آسیب‌پذیری لرزه‌ای سازه‌ها پیش از وقوع زمین‌لرزه است [۷].

البته در موارد خاص، امکان مدل‌سازی آسیب در سازه ساختمان و انجام تحلیل کمّی آسیب‌پذیری وجود دارد. به هر روی، امکان ارزیابی سریع پس زلزله به کمک روش‌های تحلیلی منتفی است، و ناگزیر باید به روش‌های کیفی (با وجود دقت کمتر و وابستگی به قضاوت بازرسی [۲]) بسنده کرد. هم‌اکنون، تلاش‌هایی در حال انجام است تا به کمک فناوری‌های نوینی مانند هوش مصنوعی، روش‌های کیفی ارزیابی سازه‌ای را بهبود بخشند [۸,۹]. در حوادثی مانند زلزله، ارزیابی سریع پس از رخداد بحران، پیش‌نیاز هرگونه تصمیم‌گیری در سطوح مختلف و در فرایند مدیریت بحران است. براین‌اساس، معمولاً روش‌های کیفی برای ارزیابی‌های سریع پس از بحران به کار می‌روند. در حال حاضر، روش معمول ارزیابی‌های پس از بحران، گسیل سریع تیم‌های بازرسی به محل‌های حادثه و انجام ارزیابی‌های چشمی و کیفی و بهره‌گیری از روش‌های Rapid Visual Screening (RVS)است. بازرسان آموزش‌دیده پس از وارسی میدانی، اطلاعات لازم را به‌صورت دستی در فرم‌های مخصوص وارد کرده، و در صورت نیاز، مستنداتی مانند عکس و تصویر را تهیه و به آنها پیوست می‌کنند. همان‌طور که پیش‌تر گذشت، برای ارزیابی کیفی آسیب‌پذیری ساختمان‌ها، مراکز مختلف علمی روش‌های مختلفی را پیشنهاد، و بر پایه آنها فرم‌های مناسبی را طراحی و تهیه کرده‌اند [۱۰,۱۱].به‌تازگی، تلاش‌هایی صورت‌گرفته تا تکمیل این فرم‌ها و مستندسازی آنها از روش سنتی دستی به الکترونیکی تغییر یابد [۱۲-۱۴]. در این پژوهش‌ها، سامانه یکپارچه‌ای تهیه می‌شود که به‌صورت یک نرم‌افزار گوشی همراه در اختیار بازرسان قرار می‌گیرد. فرم‌های بازرسی به‌صورت پنجره‌های تعاملی در این نرم‌افزار گنجانده شده‌اند و به کاربر این امکان را می‌دهد تا اطلاعات و برداشت‌های کیفی ارزیابی را در آنها وارد کرده و مستندات تصویری را به آنها پیوست کند.

سرعت ثبت، یکپارچگی اطلاعات، و امکان تعامل میان کاربران از برتری‌های مهم چنین سامانه‌ای در مقایسه با روش سنتی است.

در این جا، خوب است اشاره شود که همان‌طور که گفته شد، روش‌های کیفی و RVSبرای ارزیابی‌های پیش از زلزله نیز به کار می‌روند. این ارزیابی‌های پیش از زلزله نیز به کمک فناوری‌های مجازی تسهیل و بهسازی شده‌اند. برای نمونه، نصیرپور و همکاران نرم‌افزار گوشی همراه با نام SCOSSOرا توسعه دادند که جهت ارزیابی ساختمان‌های مدارس (پیش از رخداد زلزله) به کار می‌رود، و بنا به اطلاعات پایه‌ای که از بازرسی چشمی ساختمان به دست می‌آورد، شاخص آسیب‌پذیری بین ۰ تا ۱۰۰ را به ساختمان نسبت می‌دهد [۱۵].

به دلیل گستردگی یا پراکندگی آسیب‌ها در یک بحران، امکان حضور سریع نیروهای متخصص جهت بازرسی و ارزیابی فراهم نمی‌باشد. به‌تازگی تلاش‌هایی صورت‌گرفته است تا از توان مردمی و ساکنان جهت انجام ارزیابی سریع ساختمان‌ها استفاده شود. برای نمونه، BC Housingکوشیده است تا در قالب پروژه Rapid Damage Assessment (RDA)، با طراحی دوره‌های آموزشی ساده، مردم و ساکنان غیرمتخصص را جهت تصمیم‌گیری مناسب در بحران، و به‌ویژه حضور یا عدم حضور در محل سکونت آسیب‌دیده‌شان توانمند و راهنمایی کند [۱۶]. بااین‌همه، شرکت مردم در چنین دوره‌های آموزشی، پیش از رخداد بحران چندان آسان نمی‌نماید، و به نظر می‌رسد انگیزه کافی جهت مشارکت همگانی در این زمینه فراهم نیست. شاید بهترین زمان برای فراهم‌کردن امکان همکاری عمومی و مشارکت همگانی جهت ارزیابی آسیب‌ها و مدیریت بحران، بلافاصله پس از رخداد حادثه باشد.

با گسترش گوشی‌های هوشمند و فراگیرشدن رسانه‌های اجتماعی، بستری برای دریافت اطلاعات از همه اقشار مردم و مشارکت دهی آنها در مدیریت حوادث ناگهانی مانند زلزله فراهم شده است. هم‌اکنون، بهره‌گیری از ظرفیت‌های مردمی پس از رخداد بحران و در بستر فضای مجازی و فناوری‌های نوین مخابراتی، زمینه پژوهشی جدیدی است که به‌تازگی جهت شناسایی، ارزیابی و مدیریت بحران‌های گوناگونی چون زلزله و سیل و ... به کار گرفته شده است [۱۷].

مطالعاتی درباره فرصت‌ها و ملاحظات به‌کارگیری نرم‌افزارهای گوشی همراه و شبکه‌های اجتماعی در ارزیابی بحران و گردآوری اطلاعات بر پایه مشارکت همگانی صورت‌گرفته است [۱۸,۱۹]. نرم‌افزارهای مختلف گوشی همراه طراحی و پیاده‌سازی شده‌اند که اطلاعات مختلفی را نظیر رکوردهای زلزله [۲۰] شدت زلزله، وضعیت ترافیکی و ازدحام [۲۱] میزان آسیب‌های انسانی و سازه‌ای [۲۲] درخواست کمک [۲۳] ، تصویر، فیلم، متن، و ... از کاربران عمومی دریافت می‌کنند[۲۴-۲۶]. طی سالیان اخیر، این نرم‌افزارها رشد چشمگیری داشته و به سامانه‌های یکپارچه ارزیابی و مدیریت بحران‌های مختلف تبدیل شده‌اند که البته هنوز جای توسعه فراوان دارند [۲۷-۲۹].

همچنین، در حال حاضر، مطالعات وسیعی جهت بهره‌گیری از زیرساخت شبکه‌های اجتماعی به‌منظور شناسایی محل رخداد حوادث و ارزیابی شدت آنها، و نیز برآورد میزان خسارات وارده در حال انجام است [۳۰-۳۵]. این مطالعات عمدتاً از روش‌های متن‌کاوی جهت تحلیل پیام‌های ردوبدل شده میان کاربران شبکه‌های اجتماعی استفاده می‌کنند تا اطلاعات موردنیاز درباره ویژگی‌های بحران را استخراج کنند.

روش تحقیق

این مطالعه به‌صورت کاربردی و به روش توسعه‌ای اجرا شده است. روش سیستماتیک زیر جهت طراحی و پیاده‌سازی نرم‌افزار دنبال شده است [۳۶]

۱-تعریف مسئله

- تعریف اهداف و نیازهای کلی و بیان مسئله: در بخش مقدمه مقاله به آن پرداخته شد.
- تعریف کارکردهای سامانه و محدودیت‌های آنها (هزینه، حجم، زمان‌بری، طول عمر و ...)
- امکان‌سنجی (برنامه‌نویسان): در این مرحله، برنامه‌نویسان برآورد اولیه‌ای از منابع لازم جهت برآورده‌شدن نیازهای کارکردی نرم‌افزار (که در مرحله قبل مشخص شده‌اند) ارائه می‌دهند، و در صورت لزوم، از ذی‌نفعان می‌خواهند تا نیازهای کارکردی را تعدیل نمایند.

بدین ترتیب، طی فرایندی رفت و برگشتی، نیازهای کارکردی با امکان پیاده‌سازی مشخص می‌شوند.

۲- طراحی و پیاده‌سازی نمونه اولیه

- گزینش فناوری‌ها و الگوریتم‌ها (مهندسان زلزله، برنامه‌نویسان)
- پیاده‌سازی نمونه اولیه (برنامه‌نویسان)

۳- ارزیابی نمونه اولیه

- ارزیابی برآورده‌شدن نیازها (مهندسان زلزله، کاربران، سازمان مشتری)
- ارزیابی هزینه‌ها (سازمان مشتری)

۴- طراحی و ارزیابی نسخه آزمایشی

- اشکال‌زدایی از نمونه اولیه و طراحی و ساخت نسخه آزمایشی
- ارزیابی نسخه آزمایشی: انجام مانور؛ ارائه در اپاستور به‌عنوان نسخه آزمایشی

تست بتا در واقع اولین فرصت برای شماست تا از جامعه هدف خود بازخورد بگیرید. با این روش شما نه‌تنهای می‌توانید ریسک برنامه خود را کاهش دهید؛ بلکه احتمال دیده‌شدن خود را در مارکت‌های اپلیکیشن مانند اپاستور به شکل قابل‌توجهی می‌توانید افزایش دهید.

۵- پیاده‌سازی نسخه نهایی و انتشار آن

- اشکال‌زدایی از نسخه آزمایشی و طراحی و ساخت نسخه نهایی
- انتشار نسخه نهایی

در این مقاله، تنها دو بخش نخست انجام می‌پذیرد، و مراحل بعد در مقاله‌های آتی گزارش خواهد شد.

تعیین کارکردهای سامانه

پس از تعریف اهداف و نیازهای کلی و بیان مسئله که در بخش مقدمه مقاله بدان پرداخته شد، در گام بعد و به‌منظور تعیین کارکردهای سامانه، ضروری است تا گروه‌هایی که در سامان‌دهی و بهره‌برداری از این نرم‌افزار کاربردی دخیل‌اند، شناسایی گردند. این گروه‌ها عبارت‌اند از:

۱- مهندسان زلزله که طراحی مفهومی نرم‌افزار را برعهده دارند.

۲- برنامه‌نویسان که پیاده‌سازی رایانه‌ای را انجام می‌دهند.

۳- کاربران عمومی که از سامانه بهره‌برداری و با آن تعامل می‌کنند.

۴- سازمان مشتری (مانند شهرداری‌ها، سازمان‌های مدیریت بحران، پژوهشگاه‌های زلزله و ...) که از سامانه بهره‌برداری و با آن تعامل می‌کنند.

بدین ترتیب، بهره‌برداران سامانه، کاربران عمومی و سازمان‌های مشتری هستند. در این مقاله، نیازسنجی از کاربران مردمی و سازمان‌های مشتری بر اساس مطالعات کتابخانه‌ای صورت پذیرفته است. البته مناسب است که با مشخص‌شدن دقیق سازمان مشتری، نیازهای کارکردی بر اساس نظرسنجی و مطالعه آماری صورت پذیرد. در جدول ۱، نیازهای کارکردی کاربران و روش‌های ممکن برای برآوردن آنها گزارش شده‌اند.

جدول ۱ نیازهای کارکردی کاربران و روش‌های ممکن برای برآوردن آنها

کاربر	نیاز کارکردی	روش‌ها
کاربر عمومی	ارزیابی لرزه‌ای ساختمان	کیفی / کمی (تحلیلی)
	اطلاعات زلزله و لرزش	ایستگاه‌های لرزه‌نگاری / شبکه گوشی‌های همراه
	آموزش و راهنمایی جهت مدیریت بحران و بهسازی لرزه‌ای	آموزش از طریق تارنما اعزام تیم‌های تخصصی
سازمان مشتری	اطلاعات ساختمان (مکان/ ویژگی‌های سازه‌ای/ ارزیابی لرزه‌ای)	پایگاه‌داده‌ها (NoSQL / SQL)
	گزارش‌گیری از وضعیت لرزه‌ای شهری (نقشه‌های هم شتاب / هم‌شدت / هم خسارت)	APIهای نرم‌افزارهای رسم نقشه (برخط / برون‌خط)
	دریافت رکوردهای پس‌لرزه‌ها	شبکه گوشی‌های همراه

بر پایه این جدول، سه نیاز کارکردی برای کاربر عمومی سامانه ارائه شده است:

(۱) روش‌های مختلف ارزیابی لرزه‌ای ساختمان، در قالب روش‌های کیفی و کمی، گزارش شد و روش برگزیده برای به‌کارگیری در نرم‌افزار در بخش بعد معرفی خواهد شد.

(۲) اطلاعات زلزله بر مبنای داده‌های دریافتی از ایستگاه‌های لرزه‌نگاری جهانی و ایران قابل‌بازیابی است. بااین‌حال، اطلاعات لرزش محلی مانند بیشینه شتاب زمین (PGA)یا شدت لرزش در محل، به دلیل پراکندگی ایستگاه‌های لرزه‌نگاری چندان در دسترس نیست. با توسعه زیرساخت لرزه‌نگارهای شهری برای برخی کلان‌شهرها و یا با بهره‌گیری از شبکه گوشی‌های همراه که اخیراً توسعه مناسبی داشته‌اند، می‌توان اطلاعات لرزش محلی را به دست آورد. در شبکه گوشی‌های همراه از شتاب‌سنج‌های گوشی‌های همراه به‌عنوان لرزه‌نگار استفاده می‌شود. نرم‌افزار گوشی همراه در پس‌زمینه فعال بوده و با دریافت و تشخیص تحریک زلزله، رکورد را به همراه موقعیت گوشی به سرور مرکزی ارسال می‌کند. همچنین، اطلاعات شدت زمین‌لرزه با بهره‌گیری از گزارش مردمی و در قالب سامانه پیشنهادی این پژوهش، قابل‌ارزیابی و ارائه است.

(۳) با ایجاد ارتباط با کاربر مردمی از طریق ارائه خدمات اطلاعاتی، زمینه تعامل بیشتر و ارائه آموزش‌های لازم عمومی برای مدیریت بحران از طریق نرم‌افزار یا تارنما، و نیز در صورت لزوم، اعزام تیم‌های تخصصی ارزیابی ایمنی ساختمان و پیشنهاد طرح‌های بهسازی و مقاوم‌سازی فراهم خواهد شد.

کاربر دیگر این سامانه، سازمان مشتری است که عمدتاً سازمان‌های خدمات شهری درگیر در مدیریت بحران (مانند شهرداری‌ها، سازمان‌های مدیریت بحران، کنترل ترافیک، نهادهای دست‌اندرکار مسکن شهری، و ...) هستند. کارکرد عمده این سامانه برای چنین سازمان‌هایی، گردآوری داده و اطلاعات و تکمیل پایگاه‌های داده شهری و گزارش‌گیری از وضعیت لرزه‌ای شهر، و فراهم‌آوری امکان تعامل با کاربران عمومی جهت آموزش و راهنمایی و افزایش آگاهی و اطلاع‌رسانی به‌منظور مدیریت بهینه بحران است.

روش انتخابی برای ارزیابی سریع لرزه‌ای

در این پژوهش، از روش ارزیابی کیفی آریا که برای زیست‌بوم ساختمان‌سازی ایران سفارشی شده، و برای پیاده‌سازی بر بستر گوشی هوشمند نیز مناسب تشخیص داده شد، استفاده شده است. این روش بر اساس شدت‌های مختلف زلزله و برای هر پارامتر ساختمان، ضرایبی را ارائه کرده و در نهایت نسبت خسارت کل ساختمان از ترکیب این ضرایب جزئی محاسبه می‌شود [۱]. روش آریا در ارزیابی ساختمان‌های بتن مسلح و فولادی یا مختلط دارای محدودیت‌هایی است؛ ولی باتوجه‌به اینکه این روش قابلیت سازگاری با شرایط ساخت‌وساز متفاوت را دارا است، این محدودیت‌ها اصلاح گردید و به‌عنوان روش آریای تکمیل شده ارائه شده است [۴]. در این روش همانند روش‌های کیفی دیگر، ابتدا پرسش‌نامه‌های مربوطه تکمیل می‌گردد. از جمله پارامترهای اصلی این پرسش‌نامه‌ها می‌توان به نوع زمین، نوع سیستم سازه‌ای و کیفیت ساخت اشاره کرد. در مقابلِ هرکدام از این پارامترها به‌ازای شدت‌های زلزله ۷، ۸ و ۹ یک ضریب خسارت در نظر گرفته شده است. سپس با استفاده از یک رابطه ریاضی بین ضرایب خسارت، نسبت خسارت کلی ساختمان که عددی بین ۰ و ۱ است، به دست می‌آید. با داشتن نسبت خسارت می‌توان به درجه آسیب‌پذیری ساختمان پی برد.

از مزایای روش آریا می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۴]

۱- سهولت و سادگی در کاربرد برای تخمین آسیب‌پذیری ساختمان‌های یک منطقه وسیع شهری

۲- عدم نیاز به اطلاعات دقیق نقشه‌های معماری و محاسبات سازه‌ای و جزئیات اجرایی

۳- عدم نیاز به مشخصات دقیق مصالح مورداستفاده

۴- سازگاری نسبی با شرایط ساختمانی ایران

۵-در صورت وجود سیستم سازه‌ای که بعضی از جزئیات آن متفاوت با ساختمان‌های متداول باشد، روش آریا قابلیت تغییر و سازگاری با سیستم را دارد.

۶- باتوجه‌به این که ساختمان‌های موردنظر در حال بهره‌برداری و استفاده هستند و امکان دسترسی به جزئیات اجرایی و سازه‌ای و اطلاعات دقیق از اجزای ساختمان مقدور نمی‌باشد، امکان استفاده از روش‌های دقیق‌تر کمی، به‌خصوص باتوجه‌به اینکه اجرای این تحقیق در بستر گوشی هوشمند و در سطح وسیع شهری مدنظر است، وجود ندارد.

ازآنجاکه روش ارزیابی آریا، تابه‌حال در پروژه‌های تحقیقاتی دیگر در کشور (ارزیابی ساختمان‌های مناطقی از استان ایلام، جنوب خراسان، قزوین و...) استفاده شده، و نتایجی قابل‌قبول را ارائه داده است، می‌توان گفت که با شرایط ساخت‌وساز در کشور هماهنگی داشته و کاربرد آن برای تخمین آسیب‌پذیری ساختمان‌ها مناسب تشخیص‌داده‌شده است [۳۷].

جهت ارزیابی آسیب‌پذیری کیفی ساختمان‌ها به روش آریا، ابتدا با تکمیل یک پرسش‌نامه، اطلاعات درباره پارامترهای:

۱- شیب زمین، ۲- نوع زمین، ۳- نوع سیستم سازه، ۴- نوع سیستم کف طبقات، ۵- ارتفاع ساختمان، ۶- بازشوها و دیوارها، ۷- پیش‌آمدگی‌ها، ۸- شکل پلان ساختمان، ۹- نماکاری و ۱۰- کیفیت ساخت

جمع‌آوری می‌شود. وزن هریک از این پارامترها متفاوت بوده و با ضریب Fمشخص می‌شود. پس از مشخص‌کردن پارامترهای L_i و وزن‌های F_i، نسبت خسارت کل ساختمان را می‌توان با استفاده از معادله زیر محاسبه نمود:

$$LR = L_1 \times L_2 \times L_5 \times L_6 \times L_8 \times L_{10} \times L_{A1} \times L_{A2} \left(\frac{1}{4} \times \left[\left(F_3 \times L_3\right) + \left(F_4 \times L_4\right) + \left(F_7 \times L_7\right) + \left(F_9 \times L_9\right) \right] \right) \leq 1 \qquad (1)$$

که در آن ضرایب L_1 تا L_{10} با استفاده از جدول پیشنهادی آریا (جدول ۱) و متناسب با سطوح مختلف زلزله تعیین می‌گردند و ضرایب F_3 , F_4, F_7 و F_9 نیز به طور مناسب تعیین می‌شوند [۳۸]. در روش آریا، میزان آسیب با نسبت خسارت ساختمان (L_R) به‌صورت عددی بین ۰ تا ۱ تعیین می شود. اگر عدد به‌دست‌آمده برای L_R بیش از ۱ باشد، همان عدد ۱ برای L_R در نظر گرفته خواهد شد. خسارات وارده به ساختمان‌ها را در چهار گروه زیر می‌توان طبقه‌بندی کرد [۳۹].

۱- بیش از ۰.۷۵ ($L_R \geq 0.75$) : خرابی و ریزش ساختمان، وجود احتمال تلفات جانی، نیاز به نوسازی

۲- بین ۰.۵۰ تا ۰.۷۵ :خسارت زیاد، تخلیه‌ی اجباری ساختمان، نیاز به بازسازی و مقاوم‌سازی الزامی

۳- بین ۰.۲۵ تا ۰.۵۰ :خسارت به مقدار متوسط، نیاز به تعمیر و مرمت زیاد، تعمیرات پس از تخلیه ساختمان

۴- کمتر از ۰.۲۵ : خسارت کم، ساختمان قابل‌استفاده، تعمیرات جزئی بدون نیاز به تخلیه ساختمان از ساکنین

پرسش‌نامه در روش آریا کامل و تخصصی است و پاسخگویی به آن برای عموم مردمی که با واژگان تخصصی در زمینه مهندسی زلزله و ساختمان آشنا نیستند، مشکل و خطاپذیر است. ازاین‌رو، در این پژوهش، پرسش‌نامه ساده شده‌ای جهت کسب اطلاعات کلی ساختمان و نوع سازه طراحی گردید تا حتی‌الامکان عموم مردم به‌سادگی قادر به پاسخگویی پرسش‌نامه و دریافت وضعیت ایمنی ساختمان خود در یک زمین‌لرزه کم‌خطر باشند. در جدول ۲، فهرست پارامترها و زیر پارامترهای ارزیابی کیفی آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌ها به روش آریا، به همراه گزینه‌ها و زیر پارامترهای معادل در پرسش‌نامه ساده‌شده گنجانده در نرم‌افزار گزارش شده‌اند. باتوجه‌به کم‌خطر بودن زلزله، در جدول ۲ تنها ضرایب خسارت روش آریا مربوط به‌شدت ۷ آورده شده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، اطلاعات دریافتی از کاربر در پرسش‌نامه طراحی‌شده برای نرم‌افزار شامل: نوع نمای ساختمان، نوع سیستم سازه‌ای و اسکلت‌بندی، سیستم‌کف طبقات، ارتفاع ساختمان، و نوع پی‌ها و شناژها است، و ضرایب خسارت برای دیگر پارامترها به طور پیش‌فرض انتخاب شده‌اند. مقادیر پیش‌فرضِ ضرایب خسارت برای زیرپارامترهای پرسش‌نامه نرم‌افزار عمدتاً محافظه‌کارانه انتخاب شده‌اند. برای نمونه، مقادیر ضرایب خسارت L_6 تا L_9 در نرم‌افزار، برابر بیشترین مقدار ممکن منظور شده‌اند. البته علاوه بر امکان انتخاب مقادیر پیش‌فرض توسط نرم‌افزار به‌صورت محافظه‌کارانه، می‌توان گزینه‌های جایگزین دیگری چون امکان انتخاب کاربر و یا انتخاب توسط نرم‌افزار بر اساس سال ساخت بنا را نیز در نرم‌افزار گنجاند. آشکار است که مورد اخیر نیازمند انجام پژوهشی مناسب بر مبنای روش‌های آماری متقن است.

لازم به ذکر است که در پارامتر نوع زمین، از آن جا که ساختمان‌های مسکونی شهری عمدتاً بر روی خاک‌های نوع II یا III [۴۰] بنا می‌شوند، و کمتر ساختمان مسکونی شهری بر روی خاک نوع IV احداث می‌گردد، ضریب خسارت مربوطه به‌صورت محافظه‌کارانه برابر ۱.۱ انتخاب شده است. چنانچه در شهری، مطالعات مربوط به پهنه‌بندی نوع خاک صورت‌گرفته باشد، می‌توان ضرایب خسارت نوع زمین را بر مبنای آن سامان‌دهی کرد. همچنین در نوع سازه، انواع ساختمان‌های بنایی با یا بدون کلاف‌بندی در پرسش‌نامه نرم‌افزار، به دلیل دشواری تشخیص از سوی کاربر عمومی، تنها با عنوان ساختمان بنایی معرفی شده و ضریب خسارت به طور محافظه‌کارانه برابر ۱.۵ اختیار شده است. این شیوه ساده‌سازی در مورد سیستم‌های کف طاق ضربی و تیرچه‌بلوک نیز به‌کاررفته است. همچنین، در پرسش‌نامه ساده شده از برخی گزینه‌ها مانند سقف‌های چوبی، نمای گلی و یا ملاحظات توسعه ساختمان و درز انقطاع، به دلیل آن که مخاطب نرم‌افزار ساختمان‌های مسکونی شهری است، صرف‌نظر شده است. در نهایت، باتوجه‌به پاسخ‌های دریافتی از کاربر، ضرایب هر پرسش در فرمول خسارت روش آریا اعمال شده و پاسخ نهایی که شامل میزان خسارت حدودی وارده به ساختمان و نیازمندی ساختمان به انجام بهسازی لرزه‌ای است، برای کاربر نمایش می‌یابد.

جدول ۲ فهرست پارامترهای ارزیابی کیفی آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان به روش آریا[۳۸]
به همراه گزینه‌های و ضرایب خسارت انتخابی در نرم‌افزار

شاخص	پارامتر	زیرپارامتر	ضریب خسارت روش آریا (شدت ۷)	گزینه‌ها (زیرپارامترها) در پرسش‌نامه نرم‌افزار	ضریب خسارت در نرم‌افزار
L_1	شیب زمین	۱۵-۰	۱	-	۱
		۳۰-۱۶	۱		
		> ۳۰	۱		
L_2	نوع زمین	سخت (I)	۱	-	۱.۱
		متوسط (II)	۱		
		نرم (III)	۱.۱		
		روان (VI)	۱.۳		
LA_1	پی‌ها و شناژها	پی و شناژ مناسب	۱	پی و شناژ مناسب	۱
		پی و شناژ نامناسب	۱	پی و شناژ نامناسب	۱
		عدم اجرای پی و شناژ	۱.۰۵	عدم اجرای پی و شناژ	۱.۰۵
L_3	نوع سیستم سازه‌ای	اسکلت فلزی با بادبند	۰	اسکلت فلزی با بادبند	۰
		اسکلت فلزی بدون بادبند	۱	اسکلت فلزی بدون بادبند	۱
		اسکلت بتن مسلح	۱	اسکلت بتن مسلح	۱
		دیوار بنایی بدون کلاف با آجر	۱.۵	ساختمان بنایی	۱.۵
		دیوار بنایی با کلاف افقی با آجر	۱.۲		
		دیوار بنایی با کلاف افقی و قائم با آجر با اجرای مناسب	۱		
		دیوار بنایی با کلاف افقی و قائم با آجر و اجرای ضعیف	۱.۵		
		دیوار بنایی با کلاف افقی و قائم با بلوک سیمانی با اجرای مناسب	۰		
		دیوار بنایی با کلاف افقی با بلوک سیمانی	۱		
		دیوار بنایی با کلاف افقی و قائم با بلوک سیمانی با اجرای ضعیف	۱		
		دیوار بنایی بدون کلاف با بلوک سیمانی	۱.۵		
		نیمه اسکلت	۲.۵	-	-
L_4	سیستم کف طبقات	طاق ضربی با تکیه‌گاه مناسب	۱	طاق ضربی	۲
		طاق ضربی با تکیه‌گاه نامناسب	۲		
		تیرچه بلوک با شرایط عمومی و تکیه‌گاهی و پوشش میلگرد مناسب	۱	تیرچه بلوک	۱.۵
		تیرچه بلوک حالت قبل با پوشش میلگرد نامناسب	۱.۵		
		دال بتن مسلح	۰	دال بتن مسلح	۰
		سقف چوبی با پوشش سبک	۰	-	-
		سقف چوبی با مصالح بنایی	۲	-	-
		سقف فلزی سبک با مهاربند افقی	۰	-	-

جدول ۲ فهرست پارامترهای ارزیابی کیفی آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان به روش آریا[۳۸]
به همراه گزینه‌های و ضرایب خسارت انتخابی در نرم‌افزار

شاخص	پارامتر	زیرپارامتر	ضریب خسارت روش آریا (شدت ۷)	گزینه‌ها (زیرپارامترها) در پرسش‌نامه نرم‌افزار	ضریب خسارت در نرم‌افزار
L_5	ارتفاع ساختمان	یک طبقه ساختمان بنایی یا ساختمان با اسکلت فولادی و بتنی تا سه طبقه	۱	یک طبقه بنایی	۱
				اسکلت فولادی یا بتنی تا سه طبقه	۱
		دو طبقه ساختمان بنایی یا ساختمان با اسکلت فولادی یا بتنی بالاتر از ۳ طبقه	۱.۱	دو طبقه بنایی	۱.۱
				اسکلت فولادی یا بتنی بالاتر از سه طبقه	۱.۱
L_6	بازشو در دیوار با مصالح بنایی	رضایت‌بخش	۱	-	۱.۱
		متجاوز	۱.۱		
L_7	پیش‌آمدگی‌ها	رضایت‌بخش	۰	-	۱
		متجاوز	۱		
L_8	نامنظمی در پلان یا ارتفاع	منظم	۱	-	۱.۱
		نامنظم	۱.۱		
L_9	نما	(آجری/ سنگی) ثابت	۰	-	۱
		(آجری/ سنگی) غیرثابت	۱		
		نمای سیمان	۰		
		گل	۰.۵		
L_{10}	کیفیت ساختمان (با توجه به عمر ساختمان و شرایط اجرایی)	خوب	۰.۶	خوب	۰.۶
		متوسط	۰.۸	متوسط	۰.۸
		بد	۱	بد	۱
LA_2	توسعه ساختمان و ملاحظات درز انقطاع در ساختمان‌های بالای ۴ طبقه	تأثیر متقابل ساختمان جدید در رفتار اصلی زیاد (ساختمان ضعیف ارزیابی)	-	-	۱
		متوسط	۱.۱		
		کم	۱		
		بدون توسعه	۱		

طراحی و پیاده‌سازی سامانه تعاملی ارزیابی لرزه‌ای

طراحی منطقی ساختار سامانه

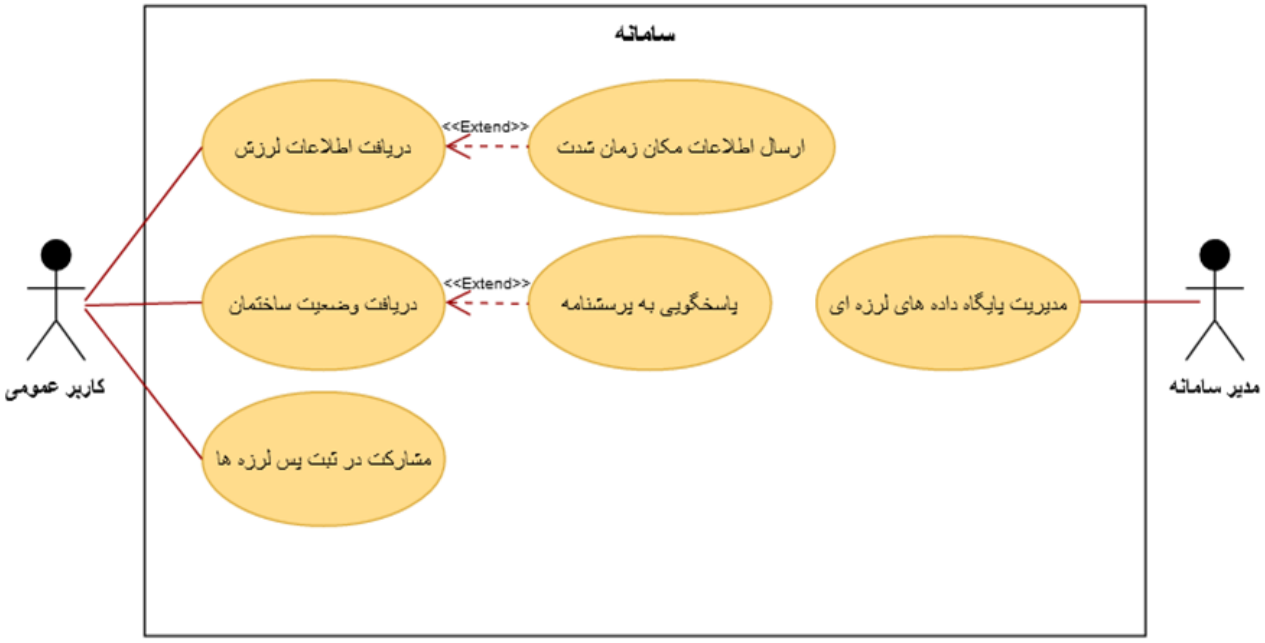
پس از مشخص‌شدن نیازهای کارکردی سامانه با قابلیت پیاده‌سازی، فرایند طراحی منطقی ساختار سامانه آغاز می‌شود [۴۱]. کاربران این سامانه، مدیر سامانه (به نمایندگی از سازمان مشتری) و کاربران عمومی هستند. نقش این کاربران در جدول ۳ مشخص شده است. بر پایه این نقش‌ها و باتوجه‌به نیازهای کارکردی گزارش شده در جدول ۱، موارد استفاده (use case) سامانه از سوی کاربران در جدول ۴ تعریف شده است. در این جدول، ضمن توصیف کارکرد و مورداستفاده، پیش‌نیاز لازم برای آن نیز فهرست شده است. براین‌اساس، نمودار مدل کارکردی کاربران (Use Case Model) سامانه به‌مانند شکل ۱ خواهد بود.

جدول ۳ تعریف کاربران سامانه

کاربر	نقش
مدیر سامانه	فرد مسئول مدیریت بانک اطلاعات لرزه‌ای و پشتیبان سامانه
کاربر عمومی	فرد غیرمتخصص که مایل به دریافت خدمات ارزیابی ای ساختمان است.لرزه

جدول ۴ تعریف کارکردهای کاربران سامانه

کارکرد	توصیف	کاربر	پیش‌نیاز
دریافت اطلاعات لرزش	دریافت بیشینه شتاب زمین (PGA) و شدت زلزله احساس شده در محل ساختمان از سوی کاربر عمومی	کاربر عمومی	• ارسال اطلاعات مکان ساختمان، زمان و شدت زلزله از سوی کاربر • تعیین PGA از سوی سامانه
دریافت وضعیت ارزیابی لرزه‌ای ساختمان	دریافت شاخص ارزیابی لرزه‌ای ساختمان، و ارائه پیشنهادهای کارکردی در مدیریت بحران و مقاوم‌سازی	کاربر عمومی	• تعیین شدت زلزله • پاسخ‌گویی به پرسش‌نامه ارزیابی به روش آریا
مشارکت در ثبت پس‌لرزه‌ها	فعال‌کردن شتاب‌سنج گوشی همراه کاربر و تشخیص رکورد پس‌لرزه و ارسال به سرور مرکزی	کاربر عمومی	• گوشی دارای شتاب‌سنج • نصب برنامه ثبت و تشخیص رکورد زلزله
مدیریت پایگاه‌داده	پشتیبانی، نگهداری و نظارت بر پایگاه‌داده اطلاعات لرزه‌ای، و گزارش‌گیری ازآن‌جهت ارسال برای سازمان مشتری	مدیر سامانه	



شکل ۱ نمودار مدل کارکردی کاربران سامانه

طراحی روندهای کاری

در این بخش، روندهای کاری و توالی فعالیت‌های مربوط به کارکردهای کاربران در قالب نمودارهای فعالیت (activity diagram) و دیگر توضیحات لازم ارائه خواهد شد.

دریافت اطلاعات لرزش

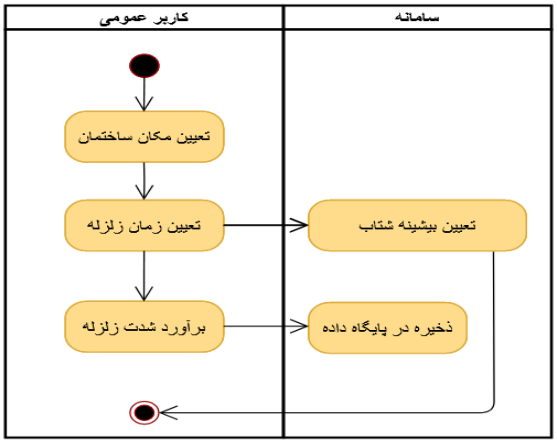
روند کاری فرایند دریافت اطلاعات لرزش، مطابق نمودار شکل ۲، به شرح زیر است:

۱- تعیین مختصات محل ساختمان کاربر از طریق GPS یا به‌صورت دستی

۲- تعیین زمان رخداد زلزله

۳- ارسال مکان و زمان زلزله به سرور جهت تعیین بیشینه شتاب زمین (PGA) در مختصات مکانی موردنظر و برای رویداد مربوطه و بازگردانی آن از سمت سرور به کاربر

۴- برآورد اندازه شدت زمین‌لرزه از سوی کاربر و ارسال آن به سرور (جهت ثبت نقطه جدید در پایگاه‌داده رویداد زلزله مربوطه و به‌روزرسانی منحنی هم‌شدت)



شکل ۲ نمودار فرآیند دریافت اطلاعات لرزش

در ادامه، برخی از موارد بالا به‌تفصیل توضیح داده می‌شوند.

تعیین موقعیت مکانی کاربر از طریق GPS

در شکل ۳ محیط کاربری دریافت مختصات جغرافیایی از طریق GPS گوشی و ارسال به سرور نشان‌داده‌شده است. با فعال‌شدن این صفحه (Activity)، الگوریتم تعیین مختصات جغرافیایی محل استقرار گوشی به طور خودکار به کار می‌افتد، و پس از چند لحظه، این مختصات شامل طول و عرض جغرافیایی در محل‌های مربوطه نوشته می‌شوند. همچنین، این مختصات با نشانگر مکان‌نما بر روی نقشه‌نمایش داده می‌شود. این امکان وجود دارد که کاربر مختصات موردنظر را به‌صورت دستی نیز وارد کند و یا با پیمایش در نقشه، مکان دلخواه خود را انتخاب و کلیک کند. با کلیک در نقطه جدید، مکان‌نما در جای جدید ظاهر می‌شود و مختصات جدید نیز در محل‌های نوشتاری طول و عرض جغرافیایی درج می‌گردد. با فشردن دکمه ارسال، مختصات درج شده به سمت سرور ارسال می‌شود.

شکل ۳ صفحه کاربری (Activity)دریافت موقعیت مکانی

برآورد شدت زمین‌لرزه از سوی کاربر

در شکل ۴، صفحه محیط کاربری (Activity) مربوط به تعیین شدت زمین‌لرزه از سوی کاربر نمایش‌داده‌شده است. البته بهتر است که این صفحه کاربری، به‌منظور درک آسان‌تر کاربر از شدت زمین‌لرزه، به‌صورت تصویری تهیه شود. شکل ۵، نمایشی از چنین صفحه مشابهی را مربوط به برنامه کاربردی گوشی هوشمند LastQuake [۴۲] نشان می‌دهد که کاربر بر مبنای شباهت تصویر نزدیک به موقعیت زلزله‌ای که تجربه کرده است، شدت زمین‌لرزه را تعیین می‌کند.

شکل ۴ صفحه کاربری دریافت شدت زمین‌لرزه از سوی کاربر

شکل ۵ نمونه تصاویر ارائه شده از سوی نرم‌افزار LastQuake [۴۲] ای کمک به کاربر در تشخیص شدت زمین‌لرزه

برنامه بازیابی PGA

در این پژوهش، فرض بر آن است که نقشه لرزش شهری پس از رخداد زمین‌لرزه، بر پایه برنامه نوشته شده در پایان‌نامه [۴۳] تهیه شده و در سرور موجود است. این نقشه بر مبنای اطلاعات موقعیت مکانی و بیشینه شتاب ثبت شده از سوی شتاب‌سنج‌های فعال در شبکه گوشی هوشمند رسم می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، در برنامه کاربردی این پژوهش، زمانی که کاربر شروع به استفاده از نرم‌افزار می‌کند، با استفاده از GPS گوشی هوشمند، طول و عرض جغرافیایی دریافت و به سرور ارسال می‌گردد. در سمت سرور، با استفاده از یک برنامه ساده Python به نام Interpolator.py، تابع درونیاب مربوط به بیشینه شتاب زمین (PGA) مجدداً محاسبه شده، و با جای‌گذاری مختصات موقعیت کاربر در این تابع، مقدار PGA تجربه شده از سوی کاربر مشخص و برای وی ارسال می‌گردد.

این برنامه از بخش‌های زیر تشکیل شده است:

۱- تشخیص رویداد با استفاده از Time ارسالی از سوی کاربر و فراخوانی فایل داده‌های مختصات و بیشینه شتاب (PGAs.csv - این فایل، بر مبنای برنامه نوشته شده در پایان‌نامه [۴۳] – مرکز تحقیقات زمینلرزه‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد – فایل موردنظر را پس از رخداد زلزله از طریق داده‌های ارسالی از سوی گوشی‌های فعال شبکه تهیه می‌کند.)

۲- فراخوانی مدل ریاضی نقشه لرزش: در این پژوهش، مدل ریاضی نقشه لرزش به‌صورت یک تابع درونیاب، مستقیماً از روی فایل داده‌های مختصات و بیشینه شتاب ساخته می‌شود.

۳- جایگزینی مختصات در مدل ریاضی نقشه لرزش و یافتن PGA برای مختصات موردنظر

۴- ذخیره PGA در یک فایل موقت در محل سرور تا از سوی برنامه مدیریت سرور، دریافت و برای کاربر ارسال گردد.

دریافت وضعیت ساختمان

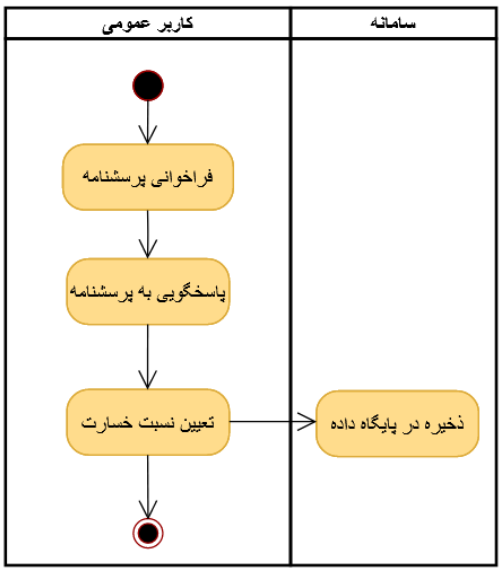
روند کاری فرایند دریافت وضعیت ساختمان، مطابق نمودار شکل ۶، به شرح زیر است:

۱- فراخوانی پرسش‌نامه و آغاز روند پاسخگویی کاربر به پرسش‌نامه ساده شده آریا

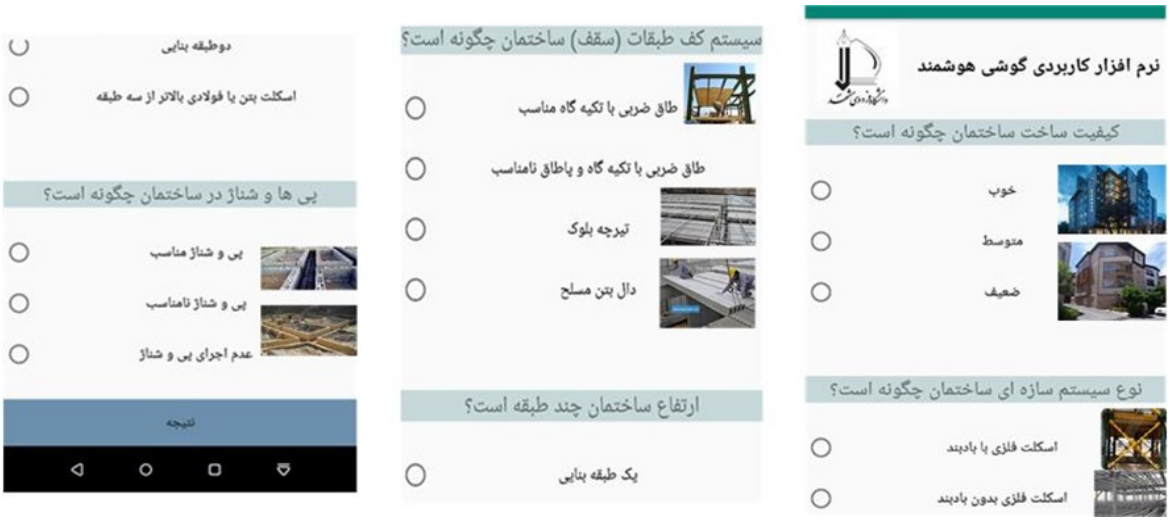
۲- تحلیل پاسخ‌های کاربر و ارزیابی آسیب‌پذیری ساختمان

۳- ارسال اطلاعات ارزیابی خسارت ساختمان (به همراه مختصات مکانی) به سرور و ذخیره در پایگاه‌داده

۴- نمایش پاسخ نهایی ارزیابی خسارت ساختمان (به همراه شدت و بیشینه شتاب زمین) برای کاربر.



شکل ۶ نمودار فرایند دریافت وضعیت ساختمان



شکل ۷ پرسش‌نامه ساده شده آریا تهیه شده بر روی گوشی هوشمند

در شکل ۷، بخش‌هایی از صفحات محیط کاربری مربوط به پرسش‌نامه ساده شده آریا نمایش داده شده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، کاربر در انتها، و پس از تحلیل پرسش‌نامه با روش آریا، پاسخ را در صفحه محیط کاربری نشان‌داده‌شده در شکل ۸ دریافت می‌کند. در همین صفحه است که درخواست فعال‌سازی شتاب‌سنج جهت ثبت پس‌لرزه‌ها و نیز سامان‌دهی به کاربر جهت بهره‌گیری از ارزیابی‌های لرزه‌ای ساختمان با روش‌های دقیق‌تر داده می‌شود. با فعال‌سازی شتاب‌سنج، برنامه کاربردی که پیش‌تر در پایان‌نامه [۴۳] در مرکز تحقیقات زمین لرزه‌شناسی نوشته شده است، اجرا می‌شود و عملاً شتاب‌سنج گوشی هوشمند این کاربر به مجموعه شبکه شتاب‌نگاری گوشی هوشمند افزوده می‌گردد. لازم به ذکر است که تحلیل کیفی لرزه‌ای روش آریا به طور کامل در سمت کاربر صورت می‌پذیرد و عملاً هیچ‌گونه تبادلی با سرور به‌منظور انجام ارزیابی لرزه‌ای صورت نمی‌پذیرد.

شکل ۸ صفحه کاربری اعلان نتیجه ارزیابی لرزه‌ای

مدیریت پایگاه‌داده‌های لرزه‌ای

در این پژوهش، نرم‌افزار سمت کاربر به‌صورت یک برنامه کاربردی گوشی هوشمند، و نرم‌افزار سمت سرور در اختیار مدیر سامانه و جهت مدیریت پایگاه‌داده‌های لرزه‌ای به‌صورت یک فایل Setup قابل‌نصب بر روی سرور و یک فایل PHP پیاده‌سازی شده است. در واقع، فایل‌های مختلف برنامه با استفاده از نرم‌افزار NSIS به‌صورت یک فایل نصبی (Setup.exe) درآمده و قابل‌استفاده در هر سیستم رایانه‌ای به‌عنوان سرور است. سامانه سمت سرور امکان پشتیبانی، نگهداری و نظارت بر پایگاه‌داده اطلاعات لرزه‌ای، و گزارش‌گیری ازآن‌جهت ارسال به سازمان مشتری را برای مدیر سامانه فراهم می‌آورد. شکل ۹ ساختار برنامه سمت سرور را به‌صورت مجموعه‌ای از پوشه‌ها و فایل‌ها نشان می‌دهد. این برنامه از اجزای زیر ساخته شده است:

۱- پایگاه‌داده رویدادهای لرزه‌ای (شاخه Events)

۲- برنامه مدیریت دریافت و ارسال داده (Main.php)

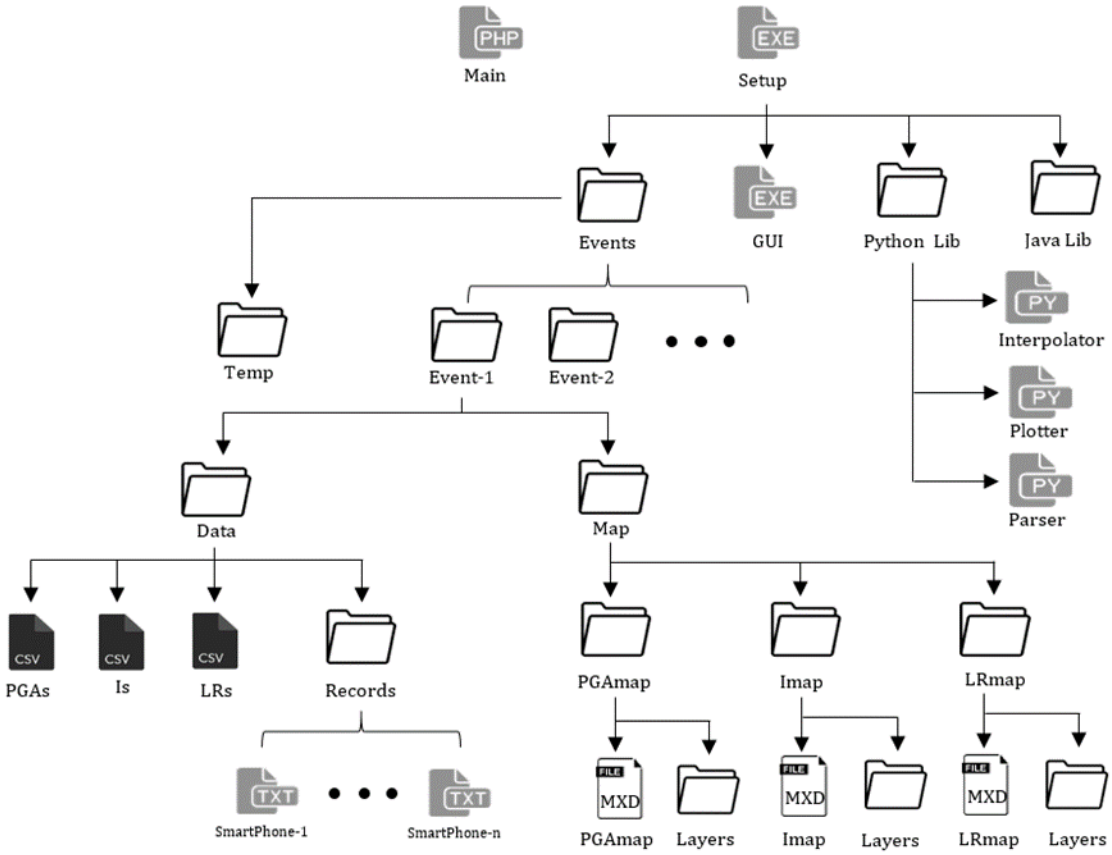
۳- برنامه رابط گرافیکی (GUI.exe)

۴- برنامه جداکننده اطلاعات رویدادها (Parser.py)

۵- برنامه رسم نقشه لرزش/ هم‌شدت / خسارت (Plotter.py)

۶- برنامه درون‌یابی مکانی PGA (Interpolator.py)

در ادامه، برخی از این اجزاء به تفکیک توضیح داده می‌شوند.



شکل ۹ ساختار برنامه مدیریت پایگاه‌داده رویدادهای لرزه‌ای در سمت سرور

پایگاه‌داده

در سامانه طراحی شده در این پژوهش، پایگاه‌داده NoSQL سندگرا، به‌صورت ساختار نشان‌داده‌شده در شکل ۹، به‌کاررفته است. پوشه Events شامل یک شاخه Temp و شاخه‌های مربوط به رویدادهای زلزله‌ها است. همان‌طور که پیش‌تر گذشت، اطلاعات ارسالی از سوی گوشی‌ها در فایل‌های موقتی در پوشه Temp ذخیره می‌شوند و با اجرای برنامه Parser.py از سوی مدیر سامانه، اطلاعات مربوط به رویدادها تفکیک شده و در پوشه‌های مربوطه قرار می‌گیرند. هر پوشه مربوط به یک رویداد زلزله دارای دو زیرشاخه Data و Map است. در زیرشاخه Data فایل‌های اطلاعات مربوط به PGA ها، شدت‌ها و ضرایب خسارت (با پسوند csv) قرار دارند که توسط برنامه Parser.py تهیه شده و در این محل بارگذاری شده‌اند. همچنین، رکوردهای شتاب مربوط به این زلزله (برداشت‌شده توسط شتاب‌سنج‌های گوشی‌های هوشمند) در زیرشاخه Records ذخیره شده‌اند. در پوشه Map، فایل‌های XMD تهیه شده توسط برنامه Plotter.py از روی فایل‌های csv موجود در زیرشاخه Data تهیه و ذخیره می‌شوند. لایه‌های مربوط به هر یک از نقشه‌ها نیز در پوشه Layers قرار می‌گیرند.

برنامه ها

برنامه مدیریت دریافت و ارسال داده

تعامل میان کاربر و سرور از طریق برنامه مدیریت دریافت و ارسال داده صورت می‌پذیرد. این برنامه طول و عرض جغرافیایی را به‌وسیله GPSگوشی هوشمند و همچنین مقدار شدت زلزله و زمان رخداد آن را از کاربر دریافت کرده و در فایل موقتی در زیرشاخه Temp از شاخه Events در سمت سرور ذخیره می‌کند. این داده‌ها جهت رسم نقشه هم‌شدت در سمت سرور (پس از جداسازی توسط برنامه Parser) به کار می‌رود. همچنین، این برنامه قابلیت آن را دارد که اطلاعات خسارت ساختمان (LR) را نیز از سوی کاربر دریافت کرده و باز به‌صورت فایل با نام مناسب در شاخه Temp ذخیره نماید.

در این برنامه، عملیات زیر صورت می‌گیرد:

۱- دریافت مختصات محل ساختمان، شدت برآورد شده از سوی کاربر، و زمان رخداد زلزله (lat,lon,I,Time)

۲- ذخیره داده‌های (lat,lon,I,Time) در فایل موقت پوشه Temp

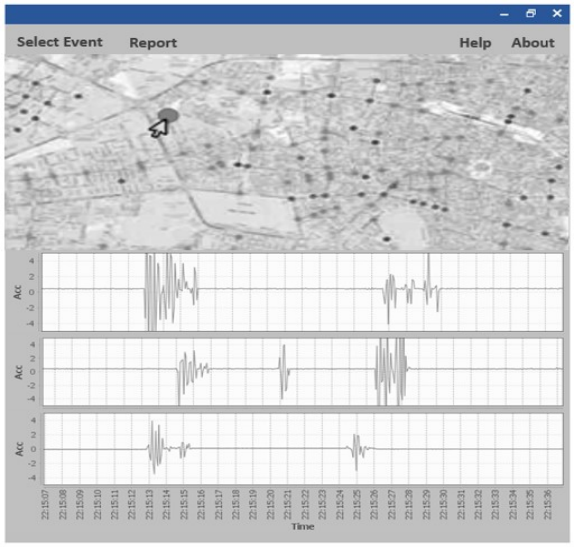
۳- ارسال طول و عرض جغرافیایی (lat,lon) به همراه زمان (Time) به برنامه Interpolator.py (شکل ۹) جهت بازیابی مقدار PGA مربوط به مختصات ساختمان از روی نقشه لرزش زلزله موردنظر (که با Time ارسالی مشخص می‌شود). این برنامه با انجام درون‌یابی مکانی، تابع PGA محدوده موردنظر را به دست می‌دهد که در ادامه، برای طول و عرض جغرافیایی ارسالی کاربر، مقدار PGA را به برنامه Main.php (شکل ۹) باز می‌گرداند. این کار با ذخیره PGA در یک فایل موقت در محل سرور صورت می‌گیرد.

۴- دریافت مقدار PGA گزارش شده از سوی برنامه (مرحله ۳) و ارسال آن به کاربر. پس از اجرای برنامه Interpolator.py، میزان بیشینه شتاب زمین در مختصات مکانی کاربر برای وی ارسال می‌گردد.

۵- دریافت مختصات محل ساختمان، خسارت برآورد شده ساختمان در سمت کاربر (LR)، و زمان رخداد زلزله (lat,lon,I,Time) و ذخیره آن در فایل موقت پوشه Temp.

برنامه رابط گرافیکی

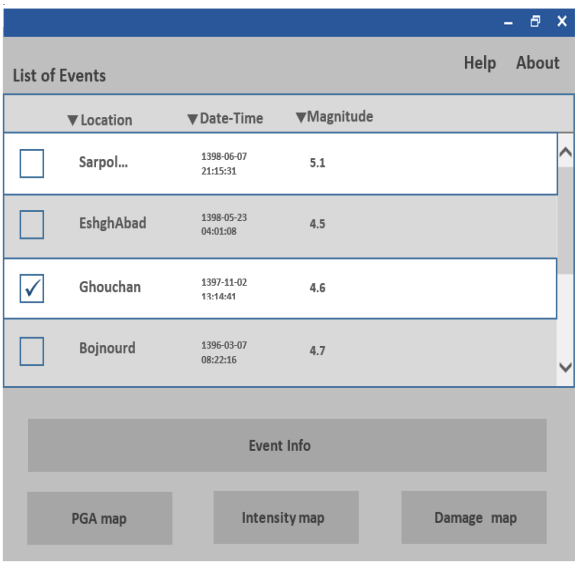
رابط گرافیکی (GUI) جهت دسترسی مدیر سامانه به شتاب‌سنج‌های فعال در شبکه شتاب‌نگاری گوشی هوشمند و نمایش اطلاعات و نقشه‌های مربوط به رویدادها طراحی شده است. با اجرای فایل رابط گرافیکی، پنجره تعاملی شکل ۱۰ بر صفحه نمایشگر ظاهر می‌شود.



شکل ۱۰ پنجره تعاملی رابط گرافیکی سمت سرور جهت دسترسی مدیر سامانه

بر روی نقشه شهری ظاهر شده در این پنجره، محل گوشی‌های فعال موجود در شبکه نمایش یافته‌اند. مدیر سامانه با کلیک بر روی هر نقطه، می‌تواند رکوردهای سه‌مولفه‌ای شتاب مربوط به شتاب‌سنج آن گوشی هوشمند را به‌صورت برخط در قاب زیرین نقشه مشاهده کند.

با انتخاب گزینه Select Event از منوی بالایی پنجره GUI، پنجره تعاملی نشان‌داده‌شده در شکل ۱۱ ظاهر می‌شود. در این پنجره، فهرست رویدادهای زلزله (که در پایگاه‌داده‌های Events موجود است) نمایش داده می‌شوند. با انتخاب هر رویداد زلزله و فشردن هر یک از دکمه‌های زیرین، عملیات مناسب انجام شده، و نتیجه در پنجره‌ای جدید ظاهر می‌شود. دکمه Event Info اطلاعات مربوط به رویداد زلزله موردنظر (شامل زمان، مکان (طول و عرض جغرافیایی و عمق)، بزرگی، و سازوکار کانونی) را نمایش می‌دهد. سه دکمه دیگر نیز نقشه‌های مربوطه را از پوشه Map در شاخه رویداد زلزله موردنظر فراخوانی کرده و برای مدیر سامانه نمایش می‌دهند.



شکل ۱۱ پنجره تعاملی انتخاب رویداد زلزله

برنامه جداکننده اطلاعات رویدادها

اطلاعات شدت، خسارت و بیشینه شتاب از سوی گوشی‌های هوشمند در زمان‌های مختلف به سمت سرور فرستاده می‌شوند. همه این اطلاعات در فایل‌های موقتی در پوشه Temp ذخیره می‌شوند. با اجرای برنامه جداکننده اطلاعات رویدادها به نام Parser.py، اطلاعات مربوط به رویدادهای جداگانه باتوجه‌به زمان وقوع آنها، از یکدیگر تفکیک شده و در پوشه‌های مربوط به آن رویداد به‌صورت فایل‌های PGAs.csv، Is.csv و LRs.csv ذخیره می‌شوند.

برنامه رسم نقشه

با استفاده از داده‌های بیشینه شتاب، شدت، و خسارت فرستاده شده از سوی گوشی‌های هوشمند که به ترتیب، به‌صورت فایل‌های PGAs.csv، Is.csv، و LRs.csv در پوشه رویداد مربوطه ذخیره شده‌اند، نقشه‌های لرزش، هم‌شدت و هم خسارت توسط برنامه Plotter.py رسم می‌گردند. برای رسم این نقشه‌ها، از نرم‌افزار ArcGIS استفاده شده است. ArcGIS نرم‌افزاری است که در زمینه سیستم‌های اطلاعات مکانی (GIS) کاربرد دارد و به کاربران امکان آن را می‌دهد که به‌سادگی اطلاعات مکانی و داده‌های توصیفی را برای ایجاد نقشه‌ها، جداول و نمودارها به کار گیرند. برنامه ArcGIS از زبان برنامه‌نویسی Python برای اجرا و استفاده از ابزارهای برنامه پشتیبانی می‌کند. اجرای برنامه Plotter.py برای نقشه‌های لرزش، هم‌شدت و هم خسارت به ترتیب از طریق دکمه‌های Shake map، Intensity map و Damage map در نرم‌افزار GUI سرور (شکل ۱۱) فراهم می‌گردد. برنامه Plotter نقشه لرزش را با استفاده از PGAهای ارسالی از سوی شتاب‌سنج‌های گوشی هوشمند، و نقشه‌های هم‌شدت و خسارت را با استفاده از داده‌های شدت (گزارش شده از سوی کاربران) و خسارت محاسباتی و نیز داده‌های مکانی گوشی‌ها، ایجاد می‌کند.

نگاه کلی به روند اجرای سامانه

روند کلی اجرای سامانه نرم‌افزاری در شکل ۱۲ نشان‌داده‌شده است که به‌قرار زیر است:

۱- با رخداد زلزله، اطلاع‌رسانی از طریق پیامک و ... صورت می‌گیرد تا کاربر به نصب برنامه کاربردی گوشی هوشمند ترغیب شود.

۲- پس از نصب برنامه از سوی کاربر، موقعیت مکانی، زمان رخداد و برآورد وی از شدت زلزله (I) به سرور ارسال می‌گردد. با فرض وجود نقشه لرزش (که پروژه دیگر درحال‌توسعه توسط نویسندگان است)، مقدار PGA مربوط به موقعیت مکانی کاربر به وی بازگردانی می‌شود.

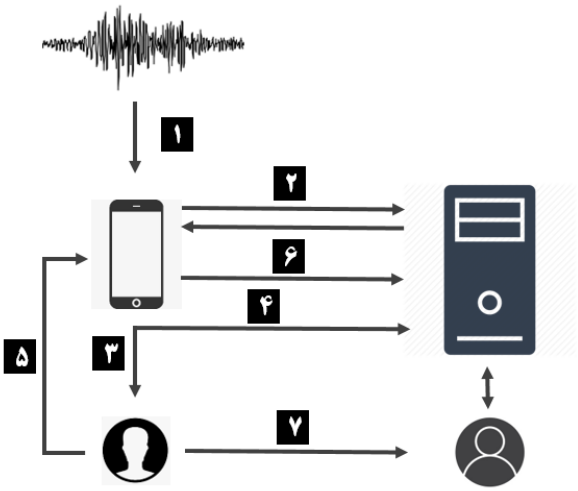
۳- کاربر پس از پاسخ‌گویی به پرسش‌نامه آریا، از درجه آسیب ساختمان خود اطلاع می‌یابد.

۴- درجه آسیب سازه (LR) به سرور ارسال می‌شود.

۵- کاربر، به‌منظور دریافت اطلاعات پس‌لرزه‌ها، به فعال‌سازی شتاب‌سنج گوشی هوشمند خود ترغیب می‌شود.

۶- شتاب‌سنج کاربر به شبکه شتاب‌نگاری گوشی هوشمند افزوده می‌شود، و در صورت وقوع پس‌لرزه قابل‌دریافت در محدوده حساسیت شتاب‌سنج گوشی، اطلاعات PGA را ارسال می‌کند. این بخش از برنامه پیش‌تر توسط صداقتی و خواجوی [۹] برنامه‌نویسی شده است.

۷- کاربر، پس از دریافت اطلاع از میزان خسارت گزارش شده توسط روش کیفی تقریبی آریا، به تماس با مدیر تارنما جهت انجام ارزیابی‌های دقیق‌تر لرزه‌ای تشویق می‌شود. لازم به ذکر است که بخش انجام ارزیابی‌های دقیق‌تر لرزه‌ای برای پژوهش‌های آتی برنامه‌ریزی شده است.



شکل ۱۲ روند کلی اجرای سامانه

نتیجه‌گیری

در یک جمع‌بندی، می‌توان دستاوردهای این پژوهش را در ساخت دو نرم‌افزار سمت کاربر و سرور به شرح ذیل خلاصه کرد:

۱- نرم‌افزار کاربردی (اپلیکیشن) برآورد شدت زلزله و دریافت اطلاعات ساختمان از کاربر غیرمتخصص و ارسال پاسخ ارزیابی ساختمان برای وی

۲- نرم‌افزار دریافت، پردازش و مدیریت داده‌های شتاب بیشینه، شدت و میزان آسیب ساختمان‌ها و ذخیره در بانک اطلاعاتی

با استفاده از GPS گوشی هوشمند مختصات دقیق مکانی کاربر دریافت می‌شود و به سرور ارسال می‌گردد و باتوجه‌به نقشه بیشینه شتاب PGA موجود در سمت سرور، شتاب بیشینه PGA در محدوده مکانی کاربر برای وی ارسال می‌شود.

همچنین، کاربران شدتی را که احساس کرده‌اند، از طریق نرم‌افزار سمت گوشی ارسال کرده و در سمت سرور نقشه هم شدت، که در مطالعات زلزله‌شناسی پرکاربرد است، رسم می‌شود. همچنین، در این پژوهش، با استفاده از پرسشنامه ساده‌ای که بر مبنای روش ارزیابی لرزه‌ای آریا برای مخاطب عام بر بستر گوشی هوشمند طراحی شده است، بستری به منظور ارزیابی آسیب‌پذیری ساختمان‌های شهری فراهم گردیده و در مواردی که ساختمان نا ایمن است، به کاربر هشدار داده شده و برای بررسی‌های دقیق‌تر در مورد آسیب‌پذیری ساختمان، راهنمایی می‌شود. بدین ترتیب، بر بستر این نرم‌افزار و با استفاده از داده‌های ارسال شده از طرف کاربران، بانک اطلاعاتی نسبتاً خوبی از بیشینه شتاب و شدت زلزله در نقاط مختلف شهر، و پراکندگی ساختمان‌های شهری از نظر آسیب‌پذیری لرزه‌ای، پس از وقوع زلزله با سرعت بالا و دقت مناسب در اختیار سازمان‌های مدیریت شهری و بحران قرار می‌گیرد. آشکار است که این نرم‌افزار، باتوجه‌به اطلاعات مناسبی که در اختیار کاربران قرار می‌دهد، قابلیت اطلاع‌رسانی همگانی و در نتیجه تسهیل روند مدیریت بحران را پس از وقوع زلزله (به‌ویژه زلزله‌های کم‌خطر) دارا است.

منابع

۱. محسنی، صادق (۱۳۸۷). مقایسه روش‌های ارزیابی کیفی آسیب‌پذیری لرزه‌ای و انتخاب روش مناسب ضمن برآورد آسیب‌پذیری کمی چند ساختمان شهر بندرعباس. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران- سازه، دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران.

2. Kassem, Moustafa Moufid, Nazri, Fadzli Mohamed, Noroozinejad Farsangi, Ehsan (2020). The seismic vulnerability assessment methodologies: A state-of-the-art. Ain Shams Engineering Journal, Vol. 11, 849–864.

۳. آریان‌پور، یاسر، احسان‌دوست، محمدرضا (۱۳۹۵). مطالعه ارزیابی آسیب پذیری لرزه‌ای ساختمانهای متداول شهری به روش آریا مطالعه موردی: قسمتی از شهرستان کازرون. پژوهشنامه زلزله شناسی و مهندسی زلزله، سال نوزدهم شماره ۲ (پیاپی ۷۲)، ۶۳-۷۴.

۴. غلامین، شهریار (۱۳۸۷). روش‌های کمی و کیفی ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای انواع ساختمان‌های متداول شهری در ایران. پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشکده فنی، دانشگاه تربیت معلم، تبریز.

۵. تابش‌پور، محمدرضا (۱۳۸۶). تفسیر مفهومی کاربردی آئین نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله. تهران، انتشارات گنج هنر.

۶. تسنیمی، عباسعلی، معصومی، علی (۱۳۷۸). شناسنامه فنی ساختمان‌های بتن مسلح و آجری. تهران، بنیاد مسکن و انقلاب اسلامی پژوهشکده سوانح طبیعی.

7. Hosseinpour, Vahid, Saeidi, Ali, Nollet, Marie-Jos´e, Nastev, Miroslav (2021). Seismic loss estimation software: A comprehensive review of risk assessment steps, software development and limitations. *Engineering Structures*, Vol. 232, 111866.

8. Harirchian, Ehsan, Aghakouchaki Hosseini, Seyed Ehsan, Jadhav, Kirti, Kumari, Vandana, Rasulzade, Shahla, Isık, Ercan, Wasif, Muhamad, Lahmer, Tom (2021). A review on application of soft computing techniques for the rapid visual safety evaluation and damage classification of existing buildings. *Journal of Building Engineering*, Vol. 43, 102536.

9. Sun, Han, Burton, Henry V., Huang, Honglan (2021). Machine learning applications for building structural design and performance assessment: State-of-the-art review. *Journal of Building Engineering*, Vol. 33, 101816.

10. FEMA 154 Report (2017). Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards: A handbook. U. S. Government Printing Office.

11. BC Housing (2021). Post-disaster building assessment guidelines *for* communities. British Columbia, Canada.

12. Xu, Zhen, Lu, Xinzheng, Cheng, Qingle, Guan, Hong, Deng, Li, Zhang, Zongcai (2018). A smart phone-based system for post-earthquake investigations of building damage. International Journal *of* Disaster Risk Reduction, Vol. 27, 214-222.

13. Setyawati, I., Munadi, K., Idris, Y., Syamsidik, S., Muchallil, S. (2019). Conceptual design of mobile application for post-disaster rapid assessment of damaged houses. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 273, 012050.

14. BC Housing (2019). *British Columbia Post -disaster building assessment program (GeoBC App)*. British Columbia, Canada.

15. Nassirpour, Arash, Galasso, Carmine, D'Ayala, Dina (2018). A mobile application for multi-hazard pysical vulnerability prioritization of schools. 16th European Conference on Earthquake Engineering, Thessaloniki, Greece.

16. https://www.bchousing.org/about/post-disaster-building-assessments/PDBA-training. Retrieved at 2021/9/19.

17. Tan, Marion Lara, Prasanna, Raj, Stock, Kristin, Hudson-Doyle, Emma, Leonard, Graham, Johnston, David (2017). Mobile applications in crisis informatics literature: A systematic review. International Journal of Disaster Risk Reduction,Vol. 24, 297-311.

18. Bland, H. M., Frost, J. D. (2012). Opportunities and considerations for smartphone applications and mobile social media in post extreme event reconnaissance data collection. 6th Congress on Forensic Engineering. San Francisco, California, United States.

19. Paul, Jonathan D., Bee, Emma, Budimir, Mirianna (2021). Mobile phone technologies for disaster risk reduction. Climate Risk Management, Vol. 32, 100296.

20. Revell, Timothy (2016). App turns phones into seismic sensors. NewScientist, Vol. 232 (3103), 21.

21. Yamazaki, K., Kawaguchi, A., Era, R. (2013). Information collecting measures during the earthquake disaster using smartphone and other tools. 20th ITS World Congress. Tokyo, Japan.

22. Han, R., Zhao, X., Yu, Y., Guan, Q., Peng, D., Li, M., Ou, J. (2016). Emergency communication and quick seismic damage investigation based on smartphone. Advances in Materials Science and Engineering, Article ID 7456182.

23. Schunke, Luana C., de Oliveira, Luiz Paulo L., Cardoso, Mauricio, Villamil, Marta B. (2015). D-Aid – An app to map disasters and manage relief teams and resources. Procedia Computer Science, Vol. 51, 2898 –2902.

24. Lwin, K. K., Murayama, Y. (2011). Web-based GIS system for real-time field data collection using personal mobile phone. Journal of Geographic Information System, Vol. 3 (4), 382–389.

25. Zhao, X., Yu, Y. (2016). Research on quick seismic damage investigation using smartphone. Proceedings of SPIE Smart Structures and Materials, Las Vegas Nevada, USA.

26. Shan, Weifeng, Feng, Jilin, Chang, Jianjun, Yang, Fan, Li, Zhonghua (2012). Collecting earthquake disaster area information using smartphone. International Conference on System Science and Engineering, Dalian, China.

27. He, Y., Zhang, D. J., Fang, Y. H. (2017). Development of a mobile post-disaster management system using free and open source technologies. International Journal of Disaster Risk Reduction, Vol. 25, 101-110.

28. Zhao, Xuefeng, Wang, Niannian, Han, Ruicong, Xie, Botao, Yu, Yan, Li, Mingchu, Ou, Jinping (2018). Urban infrastructure safety system based on mobile crowdsensing. International Journal of Disaster Risk Reduction,Vol. 27, 427 – 438.

29. Gulesan, Oya Benlioglu, Anil, Emrah, Boluk, Pinar Sarisaray (2021). Social media-based emergency management to detect earthquakes and organize civilian volunteers. International Journal of Disaster Risk Reduction, Vol. 65, 102543.

30. Kaigo, M. (2012). Social media usage during disasters and social capital: Twitter and the Great East Japan earthquake. Keio Communication Review, No. 34.17.

31. Mangalathu, Sujith, Burton, Henry V. (2019). Deep learning-based classification of earthquake-impacted buildings using textual damage descriptions. International Journal of Disaster Risk Reduction, Vol. 36, 101111.

32. Ahadzadeh, Sajjad, Malek, Mohammad Reza (2021). earthquake damage assessment based on user generated data in social networks. Sustainability, Vol. 13(9), 4814.

33. Boubiche, Djallel Eddine, Imran, Muhammad, Maqsood, Aneela, Shoaib, Muhammad (2019). Mobile crowd sensing – Taxonomy, applications, challenges, and solutions. Computers in Human Behavior, Vol. 101, 352-370.

34. Luna, Sergio, Pennock, Michael J. (2018). Social media applications and emergency management: A literature review and research agenda. International Journal of Disaster Risk Reduction, Vol. 28, 565-577.

۳۷. غلامین، شهریار، فلاحی، عبدالحسین (۱۳۹۰). ارزیابی کیفی آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌های متداول شهری در ایران (مطالعه موردی بر روی تعدادی از ساختمانهای شهر تبریز)، اولین کنفرانس ملی عمران و توسعه. رشت، دانشگاه آزاد اسلامی.

۳۸. زهرائی، مهدی (۱۳۹۲). ارزیابی کیفی آسیب‌پذیری ساختمان‌های شهر بندرعباس. نشریه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، دوره ۱۶، شماره ۲، ۲۳-۳۴.

39. Arya, A.S. (1967). Design and construction of masonry buildings in seismic areas. Bulletin of Indian Society of Earthquake Technology, Vol 4(2), 25-37.

۴۰. آیین‌نامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) - ویرایش چهارم (۱۳۹۳). مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.

41. Huda, M., Jasmi, K. A., Mustari, M. I., Basiron, B., Mohamed, A. K., Embong, W. H. W., Safar, J. (2017). Innovative E-therapy service in higher education: mobile application design. Internationa Journal of Interactive Mobile Technologies, Vol. 11 (4), 83-94.

42. Bossu, R., Roussel, F., Fallou, L., Landès, M., Steed, R., Mazet-Roux, G., Petersen, L. (2018). LastQuake: From rapid information to global seismic risk reduction. International Journal of Disaster Risk Reduction, Vol. 28, 32–42.

۴۳. صداقتی، عماد (۱۳۹۷). ایجاد شبکه شتابنگاری با استفاده از گوشی‌های هوشمند. پایان‌نامه کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، مرکز تحقیقات زمینلرزه‌شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد.