

امکان‌سنجی طراحی شبکه هشدار سریع زلزله تهران

مسعود مجرب

گروه بنیان زمین (دانش‌بنیان)، بخش تحقیق و توسعه

محمد پورمحمد شاهوار*

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، شبکه ملی شتاب‌نگاری

مهدی پورویس

گروه بنیان زمین (دانش‌بنیان)، بخش تحقیق و توسعه

نازی نوروزی

گروه بنیان زمین (دانش‌بنیان)، بخش تحقیق و توسعه

زینب اسدی

گروه بنیان زمین (دانش‌بنیان)، بخش تحقیق و توسعه

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۳/۱۹ - تاریخ پذیرش ۱۳۹۶/۵/۱۱)

چکیده

افزایش جمعیت و مهاجرت بی‌رویه به شهر تهران و در پی آن گسترش ساخت‌وساز، مواجهه این کلان‌شهر با مخاطرات طبیعی را افزایش داده است. فرارگیری تهران با بافت‌های تاریخی و فرسوده گسترده در دامنه‌های جنوبی البرز و دارا بودن گسل‌های فعال، سبب افزایش مخاطره ناشی از رخداد یک زمین‌لرزه بزرگ شده است که ممکن است پیامدهای جبران‌ناپذیری داشته باشد. کلانشهرهایی چون تهران در پی رخداد یک زمین‌لرزه بزرگ، با مخاطراتی چون آتش‌سوزی، فروریزش، نشت آب و از کار افتادن بسیاری از خدمات روبه‌رو خواهند بود. سیستم‌های هشدار سریع زلزله، یکی از راه‌های کاهش مخاطرات زمین‌لرزه در کلانشهرهاست که در دو دهه اخیر در جهان مطرح شده و همچنان موضوعی در حال تحقیق است. تعداد محدودی از کشورها مانند ژاپن، آمریکا، مکزیک و رومانی، سیستم هشدار را به‌طور کامل به اجرا درآورده‌اند که در حال بهره‌برداری است و برخی کشورهای دیگر مانند ایتالیا، سوئیس، ترکیه، کره جنوبی و چین در حال اجرای نمونه پایلوت، راه‌اندازی یا تحقیق در این زمینه‌اند. به‌منظور کاهش مخاطرات احتمالی زلزله‌های بزرگ، مقاله حاضر به بررسی ممکن بودن یا نبودن به‌کارگیری یک سامانه هشدار سریع برای شهر تهران پرداخته است. در این مطالعه، امکان‌پذیری یک شبکه ایده‌آل بررسی شده است. همچنین به بحث امکان‌سنجی سامانه هشدار سریع زلزله تهران و اینکه آیا اساساً هشدار وقوع زمین‌لرزه در تهران با توجه به گسل‌های اطراف امکان‌پذیر است، پرداخته شده است. همچنین حساسیت برخی از پارامترهای مورد استفاده در سامانه‌های هشدار سریع تجزیه و تحلیل شده و در برخی از پارامترها، مقدار بهینه و برای دیگر پارامترها میزان حساسیت آنها برای شبکه هشدار سریع بیان شده است. در نهایت این نتیجه حاصل شد که با توجه به گسل‌های اطراف تهران، برای بسیاری از زمین‌لرزه‌های مخرب امکان هشدار، حداقل برای چند ثانیه وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: تهران، زمان هشدار، سامانه هشدار سریع زلزله، کاهش مخاطرات، ناحیه کور.

مقدمه

شهر تهران به دلیل دارا بودن موقعیت سیاسی و اقتصادی، در طول زمان از نظر جغرافیایی و جمعیتی گسترش داشته است. در پی این گسترش روزافزون، بسیاری از مناطق شهری و اقتصادی آن هم‌اکنون بر روی گسل‌های فعال یا نزدیک آنها قرار گرفته است. از این رو یافتن راهکارهایی متناسب با این افزایش جمعیت و افزایش ریسک وقوع زمین‌لرزه، از ملزومات مهم برای کاهش مخاطرات احتمالی زلزله در تهران است. هنگامی که زمین‌لرزه‌ای رخ می‌دهد، موج‌های مختلفی منتشر می‌شود. این امواج شامل موج‌های فشاری یا P، موج‌های برشی یا S و موج‌های سطحی است. موج P سریع‌ترین آنهاست، اما قدرت تخریبی کمتری دارد، در حالی که موج‌های S و سطحی قدرت تخریبی بیشتری دارند، اما سرعت انتشارشان کمتر از موج P است. سامانه‌های هشدار سریع از این تفاوت سرعت و همچنین تفاوت سرعت موج‌های لرزه‌ای و سیگنال‌های الکترونیکی برای رسیدن به هدف خود بهره می‌برند. هدف اصلی سامانه‌های هشدار سریع کاهش خسارات جانی و مالی در هنگام رخداد یک مخاطره است. در واقع می‌توان با به‌کارگیری روش‌های نوین مخاطرات را مدیریت کرد و در جهت کاهش آن کوشید [۱].

عبارت سامانه هشدار سریع زلزله (Earthquake Early Warning) به سامانه‌های زمان‌واقعی هشداردهنده زمین‌لرزه گفته می‌شود که امکان هشدار را قبل از لرزش شدید زمین دارند. این توانایی با تشخیص سریع انرژی آزادشده از گسیختگی زمین‌لرزه و برآورد لرزش زمین ممکن است که دیرتر در همان محل یا محلی دیگر رخ خواهد داد. فرصت هشدار از چند ثانیه تا کمی بیش از یک دقیقه متغیر است و بیش از هر چیزی به فاصله کاربر تا مرکز زمین‌لرزه وابسته است [۲]. ایده اولیه را کوپر در سال ۱۸۶۸ مطرح کرد [۳]، اما حدود دو دهه است که ابزار لازم و روش‌های تحلیل، توسعه یافته‌اند. به‌ویژه در سال‌های اخیر شتاب سنجی در توسعه و استفاده از هشدار سریع زلزله مشاهده شده است. عوامل اصلی این رشد، توسعه شبکه‌های لرزه‌نگاری، توسعه روش‌های تحلیل، آگاهی از خطر زمین‌لرزه و تمایل جامعه زلزله‌شناسی برای کاهش این خطر بوده است [۲]. روش‌های هشدار سریع زلزله به سه دسته اصلی تقسیم می‌شوند.

تشخیص پیشاپیش (Front)

همه سامانه‌های هشدار سریع زلزله ابتدا باید زمین‌لرزه‌های مخرب را تشخیص دهند تا بتوانند هشدار مفید و به‌موقع را ارسال کنند. ساده‌ترین راه تشخیص زمین‌لرزه مخرب، تشخیص لرزش قوی زمین در یک محل و ارسال هشدار سریع‌تر از انرژی زمین‌لرزه است. این روش را تشخیص پیشاپیش می‌نامیم که نیازمند شناخت خوب از محل وقوع زمین‌لرزه‌های آینده است [۲].

در اواخر دهه ۶۰ میلادی، راه‌آهن ژاپن لرزه‌نگارهایی را در طول خطوط ریلی خود قرار داد که وقتی شدت لرزش زمین از آستانه مشخصی فراتر می‌رفت، تحریک می‌شد و جریان برق قطارها را قطع می‌کرد. این روش با استفاده از «لرزه‌نگارهای هشداردهنده (Alarm-seismometers)» فقط وقتی لرزش بزرگی شروع می‌شد، هشدار را فراهم می‌کرد. در ادامه با قرار دادن برخی دستگاه‌ها در طول ساحل شرقی ژاپن، بین زمین‌لرزه‌های بزرگ فراساحلی و خطوط ریلی، امکان ایجاد فرصت هشدار بیشتری فراهم شد [۴]. در این روش، تنها هنگامی که چشمه‌های لرزه‌زا از نواحی پرجمعیت دور باشد، تشخیص پیشاپیش می‌تواند فرصت هشدار شایان توجهی در حدود ده‌ها ثانیه فراهم کند. از جمله این روش‌ها می‌توان به سامانه هشدار زلزله مکزیکوسیتی (The Seismic Alert System for Mexico City) اشاره کرد که از تشخیص پیشاپیش استفاده می‌کند.

هشدار ناحیه‌ای (Regional)

هدف یک سامانه هشدار سریع، تخمین سریع و قابل اعتماد امکان خرابی زمین‌لرزه است قبل از اینکه لرزش بزرگ زمین به سایت هدف برسد. برای سامانه‌های ناحیه‌ای این هدف از طریق روش کلاسیک که هیتون (۱۹۸۵) معرفی کرده است به دست می‌آید و شامل چهار مرحله است [۵، ۶]: ۱. تشخیص زمین‌لرزه و محل وقوع آن؛ ۲. برآورد بزرگا؛ ۳. پیش‌بینی جنبش شدید زمین در سایت هدف؛ ۴. اعلان هشدار.

هشدار در محل (Onsite)

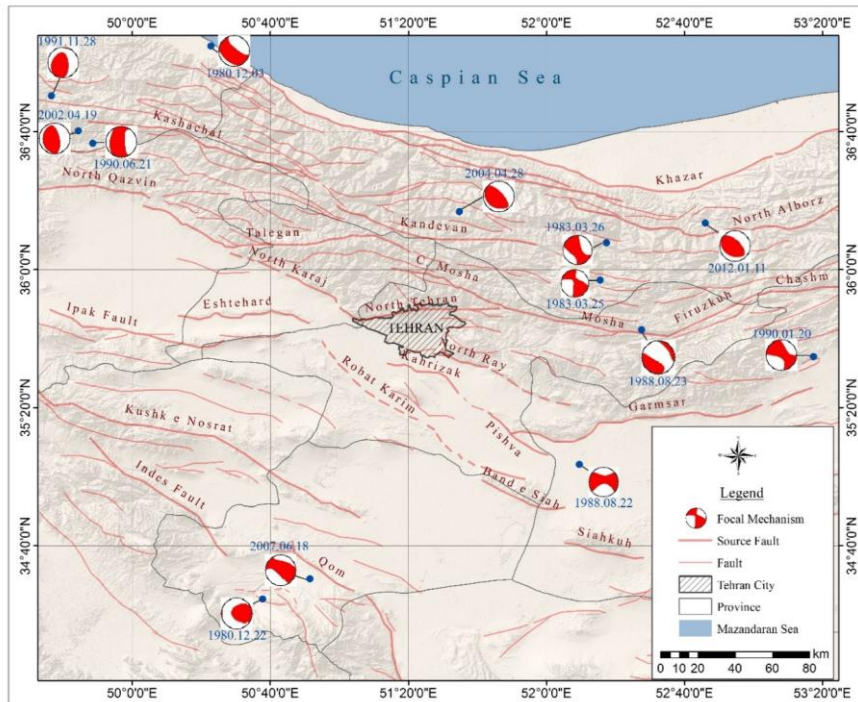
برخلاف روش ناحیه‌ای هشدار زمین‌لرزه، تکنیک هشدار در محل به‌نوعی سراسر است و قابل فهم است، زیرا هدف آن فقط تخمین لرزش محتمل زمین مربوط به موج‌های سطحی یا S به‌طور مستقیم براساس لرزش‌های ثبت‌شده از روی ابتدای سیگنال موج P است. این کار نیز از طریق رگرسیون تجربی بین مقادیر اندازه‌گیری‌شده در چند ثانیه اول و لرزش نهایی زمین انجام می‌گیرد. با وجود این، روش‌های مشخص در محل وجود دارد که محل (یا فاصله رومرکزی) و بزرگا را تخمین می‌زنند. از این روش‌ها گاهی برای پشتیبانی سامانه‌های ناحیه‌ای هشدار سریع استفاده می‌شود تا زمان هشدار را کاهش و ناحیه تحت پوشش را گسترش دهند [۶].

مبنای هشدار در محل یا هشدار تک‌ایستگاهی این است که انرژی لرزه‌ای در یک محل شناسایی شده و هشدار لرزش زمین در حال رسیدن به همان محل فراهم شود، یعنی موج P شناسایی و لرزش بیشینه پیش‌بینی شود. این راه با استفاده از ترکیبی از پارامترهای موج P ممکن است. ساده‌ترین روش، جست‌وجو برای رابطه ریاضی بین دامنه موج P و بیشینه لرزش زمین است. با توجه به اینکه ممکن است زمین‌لرزه‌های با بزرگای کم دامنه خیلی بزرگ و

فرکانس بالا داشته باشند، ترکیب دامنه و اطلاعات فرکانسی روش پایدارتری است. دامنه‌های بزرگ با فرکانس‌های پایین به معنای بزرگای بزرگ‌تر است و در نتیجه باید هشدار منتشر شود [۲]. از مهم‌ترین روش‌های این نوع هشدار می‌توان به روش‌های معرفی‌شده توسط وو و کاناموری (۲۰۰۵)، بوسه و همکاران (۲۰۰۹) و به‌تازگی، میر و همکاران (۲۰۱۵) اشاره کرد [۹]، [۷]، [۸]. در جدول ۱ خلاصه شبکه‌های اجراشده در کشورهای مختلف ارائه شده است.

جدول ۱. خلاصه وضعیت سامانه‌های هشدار سریع در کشورهای مختلف جهان

کشور	نوع سامانه	نام سامانه	سال راهاندازی	نوع چشمه لرزه‌ای	نوع دستگاهها	تعداد دستگاهها	نوع ارتباط	الگوریتم	وضعیت سامانه	وضعیت هشدار	میزان تأخیر (ثانیه)	منوی
ژاپن	ترکیبی	J-alert	۲۰۱۱	فوری مشاب‌نگار لرزه‌نگار GPS	۲۰۲۱	رادیویی اینترنتی مجازه	JMA Hybrid S-wave	فعال - سراسری	فعال - عمومی	سراسری	۰-۱	JMA NIED
ژاپن	ترکیبی	-	۲۰۰۶	مشخص مشاب‌نگار لرزه‌نگار تک اقلیوسی	۵۱۱	رادیویی اینترنتی مجازه	Epiams2 PRESTO VS	فعال - استانبول	هشدار در محل	-	۵-۶	KOERI
کازاخستان	ترکیبی	ShakeAlert	۲۰۱۰	مشخص و پراکنده مشاب‌نگار لرزه‌نگار GPS	۲۰۷	رادیویی اینترنتی مجازه	Epiams2 VS FINDER T-Pd	فعال - کالیفرنیا	محدود	-	۰-۱	CISN
ایتالیا	شبکه‌ای	-	۲۰۰۶	پراکنده مشاب‌نگار	۶	رادیویی اینترنتی	PRESTO T-Pd	فعال - جنوب ایتالیا	محدود	-	۰-۱	RAN
رومانی	ترکیبی	-	۲۰۰۶	مشخص مشاب‌نگار	۱۱	اینترنتی رادیویی	PRESTO T-Pd	فعال - سراسری	محدود	-	۰-۱	INFP



شکل ۱. گسل‌های فعال گستره استان تهران

در تحقیق حاضر ابتدا امکان‌پذیری یک شبکه ایده‌آل بررسی شد و سپس به امکان‌سنجی سامانه هشدار سریع زلزله تهران با توجه به گسل‌های فعال اطراف آن (شکل ۱) پرداخته شد.

سامانه هشدار سریع شهر تهران

در این بخش تحلیل، ارزیابی و امکان‌سنجی وضعیت یک سامانه هشدار سریع در تهران بررسی می‌شود. حال سؤال این است که آیا با توجه به شرایط تکتونیکی شهر تهران، با فرض حالت ایده‌آل برای طراحی سامانه هشدار شهر تهران، اساساً امکان هشدار برای تهران وجود دارد؟ ابتدا به حساسیت‌سنجی پارامترهای مختلف (بدون در نظر گرفتن شرایط تکتونیکی و ساختگاه‌های هدف) پرداخته شده و پارامترهای بهینه برآورد شد. در مرحله بعد امکان‌سنجی فرصت‌های هشدار براساس تکتونیک منطقه تهران و گسل‌های اطراف آن براساس شبکه فرضی و پارامترهای روش انتخابی، محاسبه و ارائه شد.

شعاع کور و فرصت هشدار دو کمیتی است که در طراحی سامانه هشدار سریع با آنها سروکار داریم. شعاع کور عبارت است از شعاع ناحیه‌ای که موج‌ها و لرزش مخرب زمین‌لرزه قبل از اعلان هشدار به آن ناحیه رسیده است. یعنی عملاً در محدوده‌ای به مرکزیت زمین‌لرزه و دایره‌ای به این شعاع امکان اعلام هشدار وجود ندارد. این مفهوم برای موقعیت زمین‌لرزه تعریف می‌شود و با وقوع زمین‌لرزه‌های متفاوت در نقاط مختلف، پهنه‌بندی‌های ناحیه کور نیز تغییر می‌کند. بیشترین عوامل اثرگذار بر شعاع کور عبارت‌اند از چینش و تراکم شبکه، مدت زمان تأخیر انتقال داده، زمان پردازش و محاسبه هشدار (الگوریتم انتخابی) و عمق زمین‌لرزه.

فرصت هشدار با مدت زمان بین اعلام هشدار در یک سایت و رسیدن موج برشی زمین‌لرزه به آن سایت تعریف می‌شود. اگر مقدار محاسبه‌شده برای فرصت هشدار در یک سایت منفی باشد، یعنی امکان اعلام هشدار در سایت مورد نظر وجود ندارد، به عبارت دیگر موج مخرب زمین‌لرزه قبل از هشدار به سایت رسیده است که در این حالت فرصت هشدار منفی است. هر چه این زمان بیشتر باشد امکان واکنش و تصمیم‌گیری برای سازمان‌ها، کارخانه‌ها، شریان‌های حیاتی و عموم مردم بیشتر است. پس مطلوب یک سامانه هشدار سریع این است که تا حد ممکن فرصت هشدار را افزایش دهد تا حدی که بر درستی و قابل اعتماد بودن گزارش هشدار اعلام‌شده اثر منفی نداشته باشد. مهم‌ترین عوامل مؤثر بر مقدار فرصت هشدار، فاصله چشمه از ساختگاه هدف، تراکم شبکه ایستگاهی، تأخیرها در انتقال داده، الگوریتم محاسبه مشخصات زمین‌لرزه و اعلام هشدار هستند.

زمان و دقت، چالش یک سامانه هشدار سریع

پارامتر اصلی برای یک سامانه هشدار سریع، زمان است. هرچه زمان بیشتری قبل از وقوع فاجعه در سایت هدف در دسترس باشد، اقدامات مؤثر و پیشگیرانه بیشتری انجام‌پذیر است. زمان هشدار در سامانه‌های هشدار سریع، به طور معمول بین چند ثانیه تا چند ده ثانیه، بسته به فاصله سایت هدف تا کانون زمین‌لرزه است. حتی با این مقادیر کم از زمان برخی اقدامات پیشگیرانه و از پیش برنامه‌ریزی‌شده امکان‌پذیر است، مثل کاهش سرعت وسایل نقلیه تندرو، بستن خودکار شیرهای گاز برای کاهش حوادث ثانوی بعد از زمین‌لرزه، خاموشی کنترل‌شده کارخانه‌های حساس، حفاظت کامپیوترهای حساس و پایگاه داده‌ها، توقف آسانسورها در نزدیک‌ترین طبقه، اقدامات لازم برای بیمارستان‌ها و اتاق‌های عمل، و حتی محافظت دانش‌آموزان از سر و گردن خود.

همیشه یک دادوستد بین زمان هشدار و میزان اعتماد اطلاعات زمین‌لرزه به‌دست‌آمده از

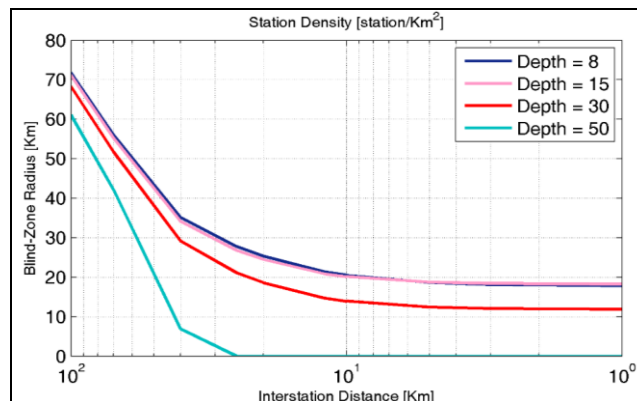
سامانه هشدار برقرار است. هرچه داده‌های بیشتری بعد از رخداد زمین‌لرزه جمع شود، هشدار دقیق‌تری امکان‌پذیر است و احتمال هشدار خطا کمتر می‌شود. اما این دقت به بهای از دست دادن زمان هشدار خواهد بود [۶].

حساسیت‌سنجی و تعیین پارامترهای بهینه برای تأمین فرصت هشدار

در این بخش تغییرات پارامترهای مختلفی همچون تراکم ایستگاهی (فاصله بین ایستگاهی)، عمق زمین‌لرزه، تعداد ایستگاه فعال شده برای اعلان هشدار (N_s)، زمان تأخیر ناشی از پردازش داده (t_d)، سرعت موج برشی (V_s) و وابستگی پارامترهای یادشده به شعاع کور و فرصت هشدار، برای شبکه هدف براساس تحقیق کویوک و همکاران (۲۰۱۴) بررسی شده است [۱۰]. به این منظور یک شبکه متشکل از زمین‌لرزه‌های فرضی به فاصله یک کیلومتر که کل حالت‌های ممکن زمین‌لرزه‌های تهران را شامل می‌شود، در نظر گرفته شد. عمق این زمین‌لرزه‌ها از ۸ تا ۵۰ کیلومتر متغیر فرض شد. همچنین یک شبکه مربعی از ایستگاه‌ها که فاصله بین ایستگاهی در آنها از ۱ تا ۱۰۰ کیلومتر متغیر است نیز فرض شد و محاسبه شعاع کور و فرصت هشدار برای این چیدمان‌ها (زمین‌لرزه و ایستگاه‌ها) انجام گرفت. در ادامه نتایج حساسیت‌ها برای پارامترهای مختلف ارائه شده است.

حساسیت شعاع ناحیه کور و زمان هشدار برای تراکم ایستگاهی و عمق

شکل ۲ نمودار نتایج تحلیل‌های مختلف محاسبه شعاع ناحیه کور برای تراکم ایستگاهی مختلف را برای چند عمق زمین‌لرزه نشان می‌دهد. با کاهش فاصله بین ایستگاهی چنانکه انتظار می‌رود مقدار شعاع کور کمتر می‌شود. این تغییر در شعاع کور با شیب تندی شروع می‌شود، برای مثال برای عمق ۸ کیلومتر، افزایش ده‌برابری تراکم ایستگاهی، یعنی فاصله بین ایستگاه از ۱۰۰ به ۳۰ کیلومتر، شعاع کور ۵۷ درصد کم می‌شود، یعنی از ۷۳ به ۳۲ کیلومتر؛ اما اثر تغییر تراکم بر شعاع کور با شیب کندی ادامه پیدا می‌کند؛ به طوری که کاهش فاصله بین ایستگاهی به کمتر از ۱۰ کیلومتر، تأثیر ناچیزی بر شعاع کور دارد. در زمین‌لرزه‌های عمیق‌تر حتی این شیب تغییرات تندتر هم هست، به طوری که برای مثال برای عمق ۵۰ کیلومتری تغییر فاصله بین ایستگاهی از ۱۰۰ به ۴۰ کیلومتر شعاع کور سریع کم می‌شود و عملاً کم کردن فاصله ایستگاه‌ها به کمتر از ۳۰ کیلومتر اثری بر شعاع کور ندارد.



شکل ۲. تغییرات شعاع کور برحسب فاصله بین ایستگاهی برای عمق‌های مختلف

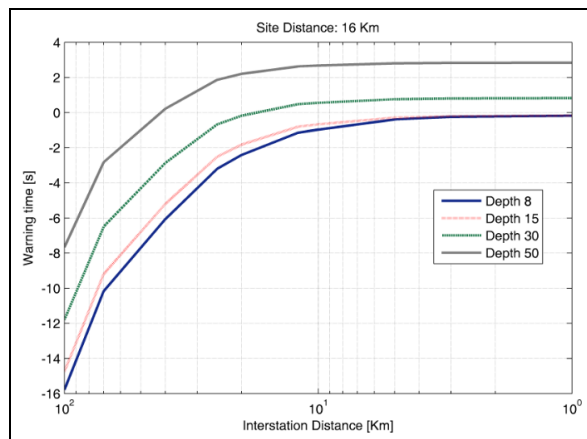
با افزایش عمق زمین‌لرزه شعاع کور کاهش می‌یابد، اما در زمین‌لرزه‌های کم‌عمق، مثلاً ۸ و ۱۵ کیلومتر، عمق اثر چندانی بر شعاع کور ندارد. بنابراین فرض عمق ۸ کیلومتر برای ادامه محاسبات عملاً هم محافظه‌کارانه است و هم زمین‌لرزه‌های متداول کم‌عمق را پوشش می‌دهد. برای این بازه عمق، شعاع کور حدود ۲۰ کیلومتر است.

شکل ۳ نشان می‌دهد که در ساختگاه‌های هدف نزدیک به چشمه زمین‌لرزه، در اینجا ۱۶ کیلومتر، فرصت هشدار مقداری منفی است که با افزایش عمق زمین‌لرزه به ۵۰ کیلومتر، فرصت هشدار تا حدود ۳ ثانیه افزایش می‌یابد. مقدار منفی نشان می‌دهد که ساختگاه در ناحیه کور واقع شده است و امکان ارسال هشدار به آن ساختگاه برای این چشمه زمین‌لرزه وجود ندارد. نتیجه محاسبات در شکل ۴ مشابه شکل ۳ است، اما این بار برای ساختگاه هدف در فاصله دورتری، ۵۰ کیلومتری، چشمه زمین‌لرزه را نشان می‌دهد. این نمودار نشان می‌دهد که الزاماً با افزایش عمق زمین‌لرزه، فرصت هشدار بیشتر نمی‌شود. در فاصله‌های دورتر افزایش عمق زمین‌لرزه سبب می‌شود که مدت زمان رسیدن موج P به ایستگاه بیشتر شود و در این فاصله موج زمین‌لرزه به ایستگاه نیز نزدیک‌تر شده است. البته این کاهش فرصت هشدار در ساختگاه‌های دور دست نگران‌کننده نیست، چراکه به علت فاصله کافی ساختگاه از چشمه، فرصت هشدار قابل قبولی وجود خواهد داشت.

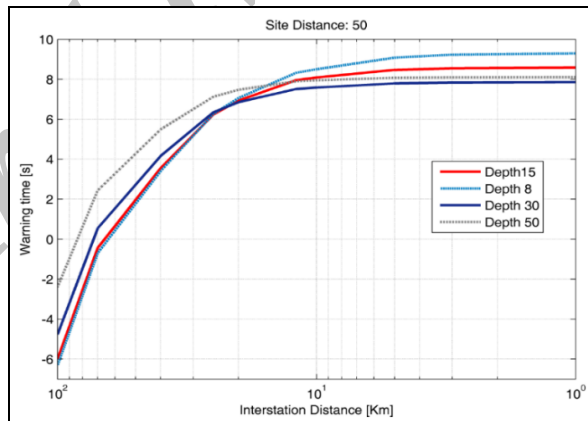
حساسیت شعاع ناحیه کور و زمان هشدار نسبت به سرعت موج

شکل نمودار تغییرات شعاع کور را برحسب تراکم شبکه ایستگاهی و تغییرات سرعت موج فشاری نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است با افزایش ۰/۵ واحدی (کیلومتر بر ثانیه)

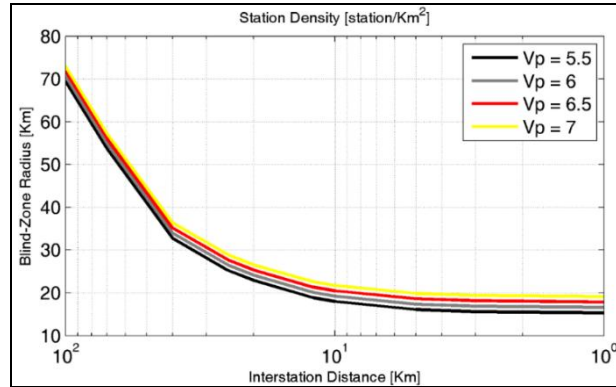
سرعت موج فشاری، حدود ۲ کیلومتر به شعاع کور اضافه می‌شود و از آنجا که نهایت خطای برآورد سرعت انتقال موج در منطقه مد نظر ۰/۵ واحد است، این تغییرات به راحتی با کاهش اندک تراکم دستگاهی جبران پذیر است. همچنین به ازای تغییرات سرعت موج فشاری و محاسبه حساسیت زمان هشدار، مشخص شد که به ازای کاهش ۰/۵ واحدی سرعت موج فشاری، ۱ ثانیه به زمان هشدار اضافه خواهد شد (شکل ۶).



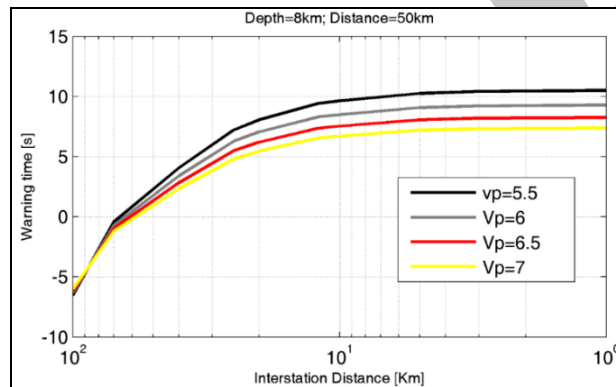
شکل ۳. تغییرات فرصت هشدار در فاصله ۱۶ کیلومتری بر حسب فاصله بین ایستگاهی برای عمق‌های مختلف



شکل ۴. تغییرات فرصت هشدار در فاصله ۵۰ کیلومتری بر حسب فاصله بین ایستگاهی برای عمق‌های مختلف

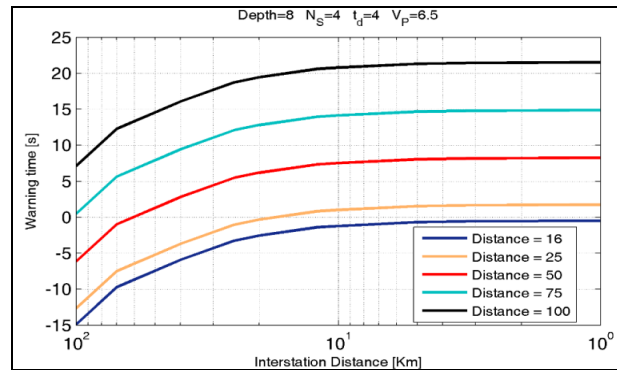


شکل ۵. تغییرات شعاع کور بر حسب فاصله بین ایستگاهی برای سرعت‌های مختلف موج فشاری



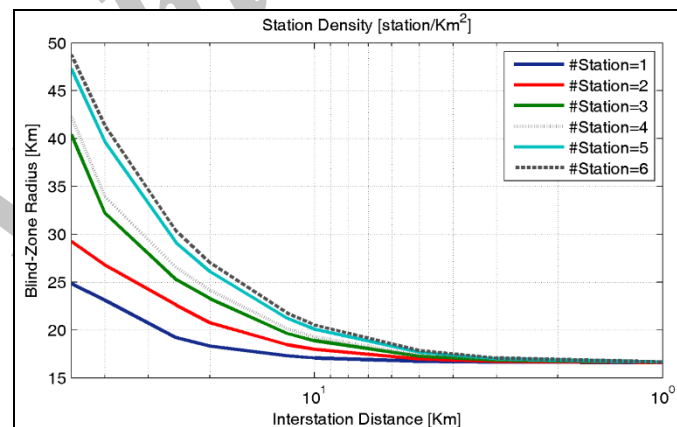
شکل ۶. تغییرات زمان هشدار بر حسب فاصله بین ایستگاهی برای سرعت‌های مختلف موج

حساسیت زمان هشدار نسبت به تراکم ایستگاهی و فاصله ساختگاه
 شکل ۷، نمودار تغییرات دیگر پارامتر اساسی طراحی شبکه، یعنی فرصت هشدار را بر حسب تراکم شبکه ایستگاهی نشان می‌دهد. با افزایش تراکم شبکه تا فاصله بین ایستگاهی ۱۰ کیلومتر، فرصت هشدار روند افزایشی دارد، اما از آن به بعد افزایش تراکم شبکه ایستگاهی تأثیر چندانی بر فرصت هشدار ندارد. همچنین مطابق انتظار، با فاصله گرفتن ساختگاه هدف از چشمه زمین‌لرزه، فرصت هشدار بیشتر می‌شود. این نمودار نتیجه محاسبه بر مبنای زمین‌لرزه با عمق ۸ کیلومتر است. برای فاصله ایستگاهی ۱۰ کیلومتر، فرصت هشدار برای ساختگاه‌های نزدیک، ۱۶ کیلومتری، تقریباً صفر است؛ یعنی عملاً امکان هشدار در فاصله‌های تا این محدوده وجود ندارد. با افزایش فاصله تا ۱۰۰ کیلومتر فرصت هشدار به ۲۳ ثانیه می‌رسد.



شکل ۷. تغییرات فرصت هشدار برحسب فاصله بین‌ایستگاهی برای ساختگاه‌های مختلف

حساسیت شعاع کور نسبت به تراکم ایستگاهی و تعداد ایستگاه فعال شده مورد نیاز در شکل ۸ نتایج تحلیل وابستگی شعاع کور به حداقل تعداد ایستگاه‌های مورد نیاز یک الگوریتم هشدار سریع نشان داده شده است. هرچه الگوریتم هشدار سریع به تعداد ثبت‌های موج P در ایستگاه‌های کمتری نیاز داشته باشد شعاع کور کمتر می‌شود. البته باید توجه داشت که این کاهش شعاع کور به بی‌دقتی در برآورد مشخصات زمین لرزه با استفاده از یک ایستگاه و افزایش تعداد هشدارهای خطا می‌انجامد. با افزایش تراکم شبکه ایستگاهی اختلاف فاصله شعاع کور محاسبه‌شده با حداقل تعداد ایستگاه‌های لازم، کم می‌شود، به طوری که فرض استفاده از دست‌کم چهار ایستگاه شعاع کور را زیاد افزایش نمی‌دهد، اما نتایج قابل اعتمادتری به دست می‌دهد.



شکل ۸. تغییرات شعاع کور برحسب فاصله بین‌ایستگاهی برای حداقل ایستگاه‌های لازم در الگوریتم

امکان‌سنجی فرصت‌های هشدار براساس تکتونیک منطقه تهران

در این بخش امکان‌سنجی فرصت‌های هشدار برای گسل‌های اطراف تهران بر مبنای شبکه فرضی متراکم و نیمه‌متراکم ارائه شده است. در ابتدا فرضیه‌های در نظر گرفته‌شده برای برآورد شعاع نواحی کور و زمان هشدار بیان شده است و سپس شعاع‌های ناحیه کور برای کل محدوده و سپس به‌طور مجزا برای هر گسل با در نظر گرفتن چینش شبکه فرضی برآورد و ارائه شده است. سپس میزان زمان هشدار برای سه ساختمان شمال، مرکز و جنوب تهران برآورد و بیان شده است. همچنین در نهایت امکان صدور هشدار برای سناریوهای مختلف زمین‌لرزه به‌طور احتمالاتی برآورد و نتایج ارائه شده است.

تعداد ایستگاه فعال مورد نیاز و زمان تأخیر و محاسباتی الگوریتم

همچنین مجموع تأخیرهای سامانه هشدار شامل تأخیر ناشی از حجم داده‌ها، دورنگاری، پردازش و تصمیم‌گیری الگوریتم هشدار برای صدور هشدار براساس تحقیق براون و همکاران (۲۰۱۱) و آلن و همکاران (۲۰۰۹) و تجربه الگوریتم ElarmS2 (کویوک و آلن، ۲۰۱۳) در کالیفرنیا ۴ ثانیه فرض شده است [۱۲، ۱۱، ۲]. حداقل تعداد ایستگاه لازم نیز برای ثبت موج P و محاسبات موقعیت و بزرگای نیز چهار ایستگاه در نظر گرفته شده است.

مدل سرعت منطقه

مطالعات مختلفی برای مدل پوسته ناحیه تهران و اطراف آن انجام گرفته که در این پروژه، مدل تغییرات سرعت موج فشاری پوسته براساس تحقیق اشتري و همکاران (۲۰۰۵) انتخاب شده است که به شرح جدول ۲ است [۱۳].

جدول ۲. مدل سرعت پوسته برگرفته از تحقیق اشتري و همکاران (۲۰۰۵) [۱۳]. نسبت سرعت موج P به S برابر ۱/۷۳ است.

P-Velocity (km/s)	Depth (km)
۵/۴۰	۰/۰
۵/۷۰	۲/۰
۶/۰۰	۸/۰
۶/۳۰	۱۲/۰
۸/۰۰	۳۵/۰

در مورد عمق موهو نیز، آنالیز توابع گیرنده با داده‌های ثبت‌شده آرایه ایلپا (Iranian Long Period Array) عمق موهو را در جنوب غرب تهران ۴۶ کیلومتر برآورد کرده است [۱۴]. همچنین تحلیل توابع گیرنده مربوط به نیمرخ لرزه‌ای در عرض البرز مرکزی توسط رجائی و همکاران (۲۰۱۰) نشان‌دهنده ضخامت ۵۴ کیلومتری موهو در قسمت جنوبی البرز مرکزی است [۱۵]. آنالیز توابع گیرنده با به‌کارگیری داده‌های ۱۱ ایستگاه کوتاه دوره شبکه لرزه‌نگاری نشان‌دهنده ضخامت تقریباً ۵۱ تا ۵۴ کیلومتری پوسته در البرز مرکزی است [۱۶]. همچنین عمق زمین‌لرزه‌های سناریو ۸ کیلومتر در نظر گرفته شده که عمق کنترل‌کننده است.

چیدمان ایستگاهی

با توجه به نتایج حساسیت‌سنجی مشخص شد که انتخاب فاصله بین ایستگاهی به کمتر از ۱۰ کیلومتر عملاً تأثیر ناچیزی در کاهش شعاع کور و در نتیجه افزایش زمان هشدار دارد. البته از آنجا که افزایش فاصله بین ایستگاهی از ۱۰ به ۲۰ کیلومتر می‌تواند تأثیر ۱۵ درصدی در افزایش شعاع کور داشته باشد، اما هزینه دستگاهی را تا چهار برابر کاهش دهد، گزینه مناسب دیگری خواهد بود؛ از این‌رو در این مرحله چیدمان ایستگاهی یکنواخت مستطیلی به فاصله‌های بین ایستگاهی ۱۰ و ۲۰ کیلومتری در نظر گرفته شد.

معرفی ساختگاه‌ها برای امکان‌سنجی فرصت هشدار

برای محاسبه فرصت هشدار گسل‌های در محدوده شهر تهران، سه ساختگاه در شمال، مرکز و جنوب تهران به‌عنوان ساختگاه‌های مبنا در نظر گرفته شده که در جدول ۳ مشخصات ساختگاه‌های مذکور آمده است.

جدول ۳. مشخصات ساختگاه‌های در نظر گرفته‌شده برای محاسبه فرصت هشدار

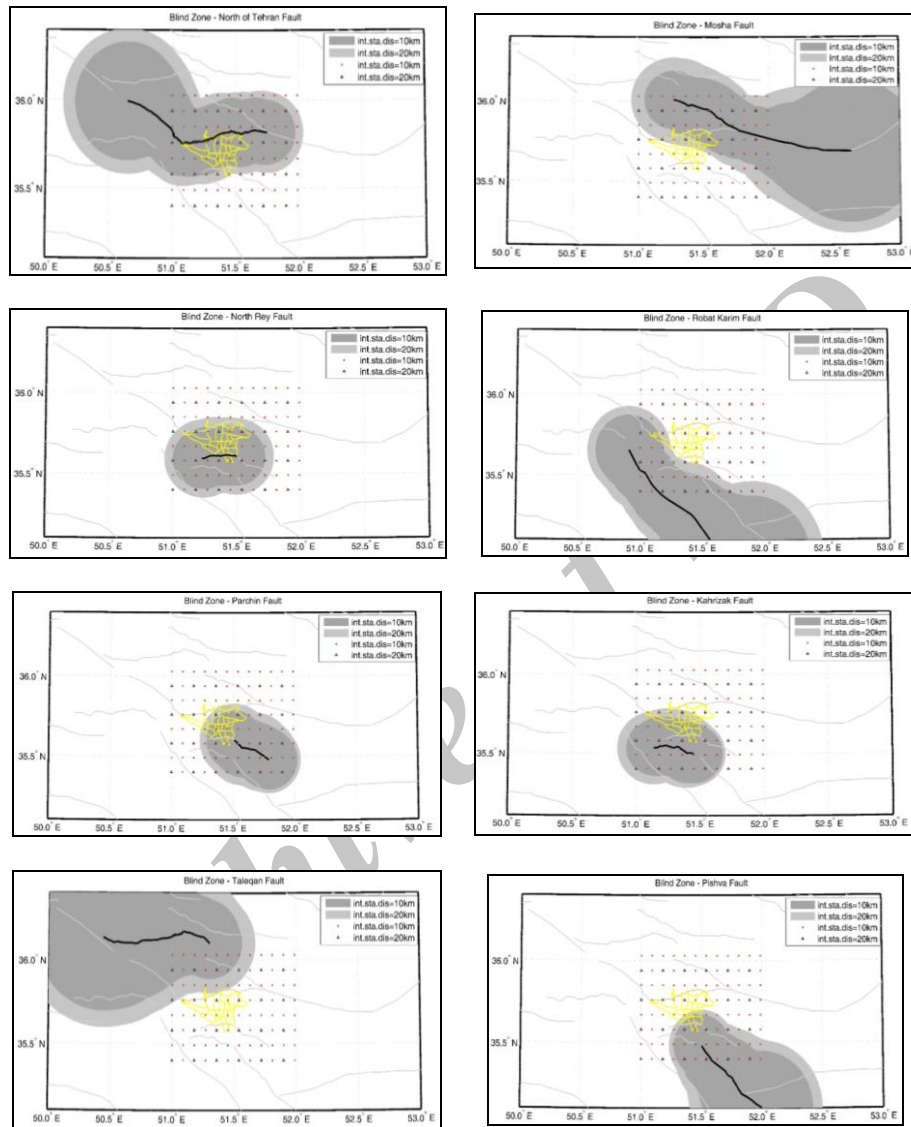
شماره	نام ساختگاه	نام انگلیسی	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
۱	شمال تهران - میدان تجریش	North of Tehran (Tajrish Sq)	۵۱/۴۲۲	۳۵/۸۱۸
۲	جنوب تهران - پالایشگاه تهران	South of Tehran	۵۱/۴۲۵	۳۵/۵۴۰
۳	مرکز تهران - میدان فردوسی	Centre of Tehran (Ferdowsi Sq)	۵۱/۴۱۹	۳۵/۷۰۲

پهنه‌بندی شعاع کور برای تهران

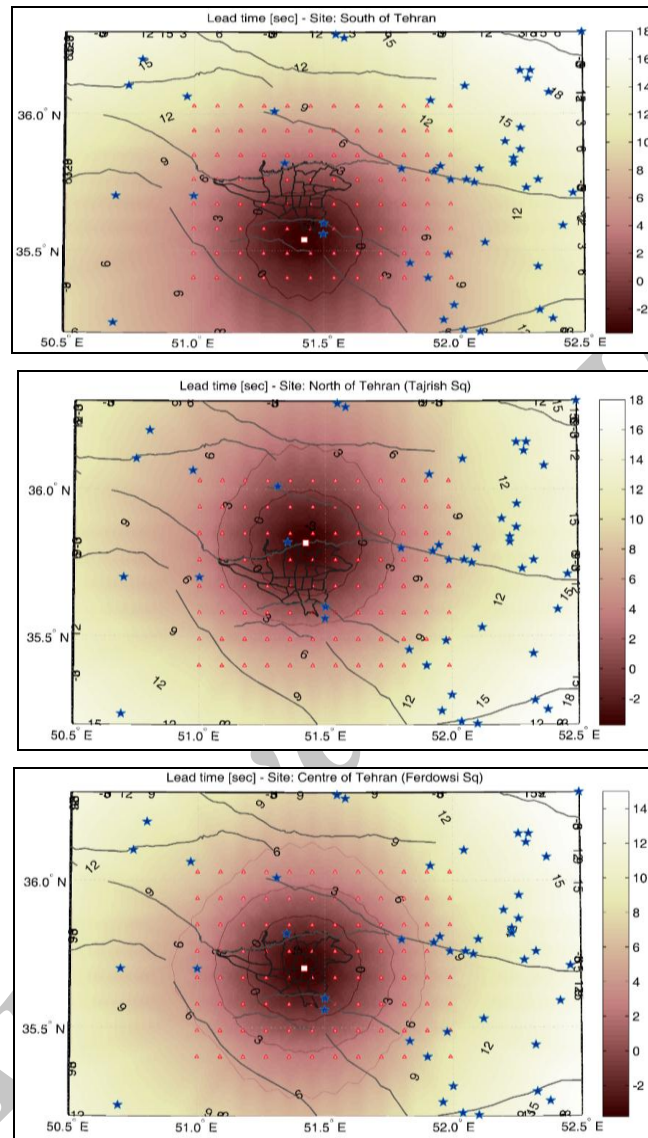
میزان شعاع کور برای گسل‌های تهران با پوشش یکنواخت دستگاهی با فاصله بین دستگاهی ۱۰ و ۲۰ کیلومتر به تفکیک محاسبه شد. شکل ۹ بیانگر نواحی‌ای هستند که امکان صدور هشدار در صورت وقوع زمین‌لرزه در آن گسل، وجود ندارد. محدوده انتخاب‌شده برای شبکه یکنواخت (در محدوده تهران) به دلیل آن است که امکان‌سنجی کیفی برای مناطق کور گسل‌های نزدیک تهران انجام گیرد. پرواضح است که برای نقاط دورتر، بی‌تردید امکان هشدار میسر است. در ادامه شعاع کور برای تمامی رویدادهای ممکن با فاصله ۱ کیلومتر، برای چیدمان‌های ۱۰ و ۲۰ کیلومتری و فرضیه‌های گفته‌شده، محاسبه شده است که به صورت نقشه‌های پهنه‌بندی آمده است.

پهنه‌بندی فرصت هشدار برای تهران

در این قسمت نیز زمان‌های فرصت هشدار برای تمامی رویدادها با بازه ۱ کیلومتر، برای چیدمان‌های ۱۰ و ۲۰ کیلومتری و زمان تأخیر ۴ ثانیه برای ساختگاه‌های هدف محاسبه شده است که در ادامه آمده است. عمق رویدادها ۸ کیلومتر در نظر گرفته شده و حداقل ایستگاه مورد نیاز چهار ایستگاه در نظر گرفته شد. شکل ۱۰ بیانگر میزان فرصت هشدار برای ساختگاه‌های انتخابی برای زمین‌لرزه‌هاست. از آنجا که زمین‌لرزه‌های روی داده در منطقه (تاریخی و دستگاهی) دارای پراکندگی زیاد و نداشتن دقت و پوشش کافی مکانی است و همچنین به دلیل آنکه زمین‌لرزه‌های در نظر گرفته‌شده در این قسمت، کل پهنه با فاصله ۱ کیلومتر، از وزن یکسانی برخوردارند (اما در واقعیت هر کدام از آنها پتانسیل ایجاد شدتی متفاوت با احتمال وقوع متفاوت را دارند)، نمی‌توانند بیانگر کارایی یا ناکارایی سامانه هشدار سریع برای تهران باشند؛ به این معنا که نمی‌توان نتیجه گرفت که الزاماً در مکان‌هایی که دارای زمان هشدار کافی یا برعکس دارای زمان هشدار منفی (عدم امکان هشدار) هستند، زمین‌لرزه‌های مخرب روی خواهد داد. از این رو باید نتیجه‌گیری نهایی بر مبنای سناریوهای واقعی‌تر و برحسب میزان شدت احتمالی صورت پذیرد. از این رو مطالعه احتمالاتی سناریوهای براساس احتمال وقوع در دوره ۳۰ سال مشابه با مطالعه آلن (۲۰۰۶) برای منطقه انجام گرفت [۱۷].



شکل ۹. ناحیه کور (ممکن نبودن هشدار) برای زمین‌لرزه‌های ناشی از گسل‌های اطراف تهران. نواحی کور برای فاصله بین ایستگاهی ۱۰ کیلومتر (مثلث‌های قرمز) به صورت پررنگ و نواحی کور ناشی از چیدمان با فاصله بین ایستگاهی ۲۰ کیلومتر (مثلث‌های آبی) به صورت کم‌رنگ نشان داده شده است. شهر تهران نیز با خطوط زرد روی شکل نشان داده شده است.



شکل ۱۰. نقشه زمان فرصت هشدار برای ساختگاه جنوب تهران، پالایشگاه تهران (مربع توپر)، فاصله بین ایستگاهی ۱۰ کیلومتر، زمان تأخیر ۴ ثانیه و حداقل رسید موج به چهار ایستگاه. اعداد نشان داده شده و رنگها بیانگر زمان هشدار برای هر نقطه از نقشه در صورت وقوع زمین لرزه در همان نقطه است که به ثانیه بیان شده است. ایستگاهها توسط مثلث توپر نشان داده شده است.

نتیجه‌گیری

در دو دهه اخیر موضوع هشدار سریع زمین‌لرزه در دنیا مطرح شده و همچنان موضوعی در حال تحقیق است. تعداد معدودی از کشورها مانند ژاپن و مکزیک سیستم‌هایی را به اجرا درآورده‌اند و از آنها بهره‌برداری می‌کنند و برخی کشورهای دیگر مانند آمریکا، ایتالیا، سوئیس و ترکیه در حال اجرای نمونه پایلوت، راه‌اندازی یا تحقیق در این زمینه‌اند.

در تحقیق حاضر بدون در نظر گرفتن نوع سامانه انتخابی یا الگوریتم‌های لازم و همچنین تعداد دستگاه‌های لازم، به بررسی نظری این امکان‌پذیری پرداخته شد. تحلیل‌های مختلفی همچون تحلیل‌های احتمالاتی برای کانون‌های فرضی زمین‌لرزه و توزیع فرضی ایستگاه‌های لرزه‌ای با تراکم شبکه ایستگاهی مختلف انجام گرفت. با فرضیه‌هایی برای نوع الگوریتم پردازش مشخصات زمین‌لرزه، جمع‌بندی نتایج به شرح زیر است:

مطالعات تحلیلی نشان داد که فاصله بین ایستگاهی کمتر از ۱۰ کیلومتر تأثیری بر شعاع کور و زمان فرصت هشدار ندارد؛

۱. افزایش فاصله بین ایستگاهی از ۱۰ به ۲۰ کیلومتر حدود ۱۵ درصد شعاع کور را افزایش می‌دهد؛

۲. شعاع کور برای همه زمین‌لرزه‌های ممکن و شبکه ایستگاهی متراکم از ۱۸ تا ۴۲ کیلومتر متغیر است؛

۳. فرصت هشدار برای همه زمین‌لرزه‌های ممکن و شبکه ایستگاهی متراکم حدوداً از منفی ۶ تا ۳۷ ثانیه برای تهران متغیر است.

۴. با توجه به محاسبات احتمالاتی، در صورت وجود یک شبکه متراکم، برای بیشتر ساختمان‌ها برای بیش از ۹۰ درصد رویدادهای با شدت بیشتر از ۵ دارای زمان هشدار بیشتر از صفر است.

۵. با توجه به وجود زمان‌های هشدار بزرگ‌تر از صفر، طراحی یک شبکه ناحیه‌ای هشدار سریع برای پوشش برخی از زمین‌لرزه‌ها امکان‌پذیر است.

۶. با توجه به وجود تعدادی گسل در داخل شهر تهران و نزدیک شهر و نظر به اینکه میزان شعاع کور، بخش اجتناب‌ناپذیر سامانه‌های هشدار سریع است، در صورت وقوع هر زمین‌لرزه‌ای بر روی این گسل‌ها امکان هشدار برای بخش‌هایی از شهر میسر نیست.

در مواقعی که ایجاد فرصت هشدار توسط سامانه ناحیه‌ای ممکن نیست، می‌توان با استفاده از ایستگاه‌های شبکه ناحیه‌ای یا نصب برخی تک‌ایستگاه‌ها در محل‌های شریان‌های حیاتی یا

مراکز پرجمعیت عمومی همچون متروها، سیستم هشدار در محل ایجاد کرد. کارایی این نوع سیستم‌ها در صورت وجود یک سیستم هشدار ناحیه‌ای بسیار مطمئن خواهد بود و از خطای سیستم هشدار در محل کاسته خواهد شد.

۷. نظر به موقعیت اقتصادی و سیاسی شهر تهران و خطر زیاد زمین‌لرزه و مخاطرات آن، وجود یک سامانه هشدار سریع ضروری و نشانه‌ای از پیشرفت کشور در منطقه و جهان است.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران و همچنین از نقدها و مشاوره‌های آقایان دکتر انصاری و دکتر حیدری و حمایت‌های آقایان دکتر ساسان بصیر، دکتر مهدی آشتیانی و آقای مهندس نظری سپاسگزارند.

منابع

- [۱]. مقیمی، ابراهیم (۱۳۹۴). دانش مخاطرات. چ دوم. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- [2]. Allen, R.M.; Gasparini, P.; Kamigaichi, O.; Bose, M. (2009). "The Status of Earthquake Early Warning around the World: An Introductory Overview". *Seismological Research Letters*. Vol. 80. No. 5.
- [3]. Cooper, J. D. (1868). Letter to Editor. San Francisco Daily Evening. Bulletin, Nov. 3.
- [4]. Nakamura, Y. (1984). "Development of the earthquake early-warning system for the Shinkansen, some recent earthquake engineering research and practical in Japan". The Japanese National Committee of the International Association for Earthquake Engineering, 224-238.
- [5]. Heaton, T.A. (1985). "Model for a seismic computerized alert network". *Scienc*: 228 (4702), 987-90.
- [6]. Satriano, C.; Wu, Y.M.; Zollo, A.; Kanamori, H. (2011). "Earthquake early warning: Concepts, methods and physical grounds". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. Vol. 31(2): 106-118.
- [7]. Wu, Yih-Min; Hiroo Kanamori (2005) "Experiment on an onsite early warning method for the Taiwan early warning system". *Bulletin of the Seismological Society of America* 95.1: 347-353.
- [8]. Bose, M.; Hauksson, E.; Solanki, K.; Kanamori, H.; Wu, Y. M.; Heaton, T. H. (2009). "A new trigger criterion for improved real-time performance of onsite earthquake early warning in Southern California". *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 99 (2A): 897-905.
- [9]. Meier, M. A.; Heaton, T.; Clinton, J. (2015). "The Gutenberg Algorithm: Evolutionary Bayesian Magnitude Estimates for Earthquake Early Warning with

- a Filter Bank". *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 105 (5): 2774-2786.
- [10]. Kuyuk, H. S.; Allen, R. M.; Brown, H.; Hellweg, M.; Henson, I.; Neuhauser, D. (2014). "Designing a network- based earthquake early warning algorithm for California: ElarmS-2". *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 104, No. 1: 162-173.
- [11]. Brown, H.M.; Allen, R.M.; Hellweg, M.; Khainovski, O.; Neuhauser, D.; Souf, A. (2011). "Development of the ElarmS methodology for earthquake early warning: Realtime application in California and offline testing in Japan". *Soil Dynam. Earthq. Eng.* Vol. 31: 188-200.
- [12]. Kuyuk, H. S.; Allen, R.M. (2013). "Optimal seismic network density for earthquake early warning: A case study from California". *Seismological Research Letters*. Vol. 84 (6): 946-954.
- [13]. Ashtari, M.; Hatsfeld, D.; Kamalian, N. (2005). "Microseismicity in the region of Tehran". *Tectonophysics*. Vol. 395: 193-208.
- [14]. Doloei, Javan; Roland Roberts. (2003). "Crust and uppermost mantle structure of Tehran region from analysis of teleseismic P-waveform receiver functions". *Tectonophysics*. 364.3: 115-133.
- [15]. Radjaee, A.; Rham, D.; Mokhtari, M.; Tatar, M.; Priestley, K.; Hatzfeld, D. (2010). "Variation of Moho depth in the central part of the Alborz Mountains, northern Iran". *Geophysical Journal International*. 181(1): 173-184.
- [16]. Sodoudi, F.; Yuan, X.; Kind, R.; Heit, B.; Sadidkhouy, A. (2009). "Evidence for a missing crustal root and a thin lithosphere beneath the Central Alborz by receiver function studies". *Geophys. J. Int.* Vol. 177: 733-742.
- [17]. Allen, R.M. (2006) "Probabilistic warning times for earthquake ground shaking in the San Francisco Bay Area". *Seismological Research Letters*. Vol. 77 (3): 371-376.