

## پیش بینی زلزله در ایران

مهدی زارع\*

### چکیده

مطالعات پیش‌بینی زلزله با روش‌های علمی مختلفی نظیر روش‌های آماری و پیش‌نشانگرهای زلزله و با اهداف خاصی به ویژه برای کاهش ریسک زمین‌لرزه در ۴۰ سال اخیر در دنیا دنبال می‌شود. این تحقیقات به‌عنوان فعالیتی پژوهشی در ایران نیز بر اساس برنامه‌ای درازمدت و پیوسته در محدوده فلات ایران و براساس اطلاعات و دانش معتبر دنبال شده و در این مطالعات تلاش می‌شود تا در مورد احتمال رخداد یک زلزله احتمالی پیش از وقوع آن، یافته‌های علمی توسعه یابد. دو راهبرد عمومی در این زمینه وجود دارد: یکی فعالیت‌های پیش‌بینی احتمالی (یا پیش‌یابی) و دیگری پیش‌بینی زلزله بر پایه مطالعه پیش‌نشانگرها. در این مقاله تلاش می‌شود تا تصویری کلی از این نوع مطالعات ارائه شود. بدین منظور، ابتدا روش‌های متعدد توسعه یافته جهت پیش‌بینی زلزله شرح داده شده و در ادامه، چالش‌های پیش‌روی مساله پیش‌بینی زلزله در ایران، توسعه برنامه‌ها و همچنین حوزه‌های تخصصی آن توضیح داده می‌شود. در پایان نیز به اندازه‌گیری تغییرات هیدروژئوشیمیایی به‌عنوان یک نمونه پیش‌نشانگر زلزله اشاره کوتاهی خواهد شد.

واژگان کلیدی: پیش‌بینی، زمین‌لرزه، پیش‌یابی، پیش‌نشانگر، ایران.

\* پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله و عضو وابسته شاخه زمین‌شناسی گروه علوم پایه فرهنگستان علوم جمهوری اسلامی ایران. تلفن: ۲۲۸۳۰۸۳۰ (+۹۸۲۱)، نمابر: ۲۲۲۸۹۴۵۵ (+۹۸۲۱)، پست الکترونیکی: mzare@iies.ac.ir

زمین لرزه‌ها، نبود لرزه‌ای در گره‌های لرزه‌خیز، الگوهای لرزه‌ای اختاردهنده و بی‌هنگار، رخداد پیش‌لرزه‌ها، تغییر نرخ لرزه‌خیزی و پارامتر  $b$ -value (مانند [۱])، تغییرات نسبت سرعت انتشار موج فشاری به موج برشی ( $VP/VS$ )، تغییرات ناهمسانگردی سرعت امواج لرزه‌ای (مانند [۲]، [۳]، [۴] و [۵])، مهاجرت کهلرزه‌ها، انتقال تنش‌های لرزه‌ای، ناهنجاری دماهای موج برشی و طیف افت تنش زمین‌لرزه‌های کوچک و ... را مورد مطالعه و تحقیق قرار داد.

- از روش‌های آماری پیشرفته در جهت مطالعه توزیع زلزله‌ها و نرخ لرزه‌خیزی مناطق ایران استفاده می‌گردد.

- با ایجاد همکاری با سازمان‌های دولتی تولیدکننده اطلاعات مکانی و مکان مرجع (GIS) مانند سازمان نقشه برداری کشور، سازمان زمین شناسی، سازمان ثبت اسناد و املاک کشور، سازمان فضایی ایران و مرکز آمار ایران، از داده‌های آن‌ها در ایجاد بانک اطلاعات و مطالعه پیش‌نشانگرها استفاده می‌گردد.

- مطالعات نظری مانند دینامیک غیرخطی لیتوسفر و ارتباط با آن با پیش‌بینی زلزله، به مطالعات پیش‌بینی زلزله در ایجاد یک پایه قوی تئوری بسیار کمک خواهد کرد.
- از اطلاعات تنوع زیستی انجام شده در ایران نیز استفاده می‌شود.

### چالش‌ها

مهم‌ترین عوامل به عنوان مانع در راه پیش‌بینی زلزله در ایران، مشکلات سازمان‌دهی و تصمیم‌گیری بین مراکز علمی، عدم ارتباطات موثر بین مراکز مسئول که در زمینه پیش‌بینی زمین لرزه فعالیت دارند و همچنین اختصاص نیافتن بهینه و به‌موقع بودجه در این زمینه است.

قابل ذکر است که مهمترین فعالیت‌های علمی در زمینه پیش‌بینی زلزله در کشورهای ایالات متحده و روسیه در قالب ساختارهای مدیریتی آن کشورها بوده و به نحوی انجام می‌شود که امکان الگو برداری مستقیم از آن‌ها برای ایران بسیار مشکل و پیچیده می‌نماید. به‌عنوان مثال، در آمریکا سازمان زمین شناسی آمریکا (USGS)، مسئول ارائه نظرات کارشناسی

یکی از قدیمی‌ترین فعالیت‌های انسان در تمدن‌های باستانی (مانند چین) پیش‌بینی زلزله بوده است. در چین باستان، برای هر مساله طبیعی به دنبال راه‌حل بوده‌اند و برای زلزله نیز به پیش‌بینی آن و اطلاع از وقوع زلزله قبل از رخداد آن به عنوان راه‌حل نگاه می‌کردند. امروزه اما، پیش‌بینی زلزله با ماموریت خاصی به ویژه در ۴۰ سال اخیر در دنیا دنبال می‌شود. در ایران نیز، هماهنگ با این نگاه بین‌المللی به پیش‌بینی زلزله با توجه به اولویت‌ها زیر پرداخته می‌شود:

- لزوم و اهمیت پیش‌بینی زلزله به‌عنوان یکی از روش‌های کاهش ریسک زلزله در ایران
- مطالعه و دستیابی به پیش‌نشانگرهایی که پیش از وقوع برخی از زلزله‌ها قابل رصد و سنجش هستند.

- پیش‌بینی زلزله‌های شدید (با بزرگای گشتاوری ۶ یا بیش‌تر) که کمک مهمی به کاهش تلفات و خسارات خواهد کرد.

- پیش‌بینی زلزله برپایه تشکیل یک شبکه علمی از دانشمندان ایرانی و خارجی که تمایل به فعالیت و همکاری در این زمینه را دارند.

- براساس تجربیات ملی و بین‌المللی، امکان ایجاد مرکزی فعال در سطح بین‌المللی برای این موضوع در کشور وجود دارد.

- ساماندهی، تجمیع و ایجاد زیرساخت اطلاعاتی از داده‌های موجود، بر پایه یک تلاش سازمان یافته به صورت یک پایگاه داده دقیق، صحیح، به‌هنگام، مکان مرجع و قابل استفاده و دسترسی و دارای قابلیت به اشتراک گذاری.

- توانایی رصد، تحلیل و پیش‌بینی زمین‌لرزه‌های دارای پیش‌نشانگرهای قابل ثبت.

### روش‌ها

تاکنون پژوهش‌ها و مطالعات متعددی درمورد روش‌های پیش‌بینی زلزله انجام شده است که از میان آن‌ها به موارد مهم زیر می‌توان اشاره کرد:

- از آن‌جا که داده‌های لرزه‌ای با حجم و کیفیت خوبی در دسترس می‌باشد، می‌توان پیش‌نشانگرهای لرزه‌ای مانند: تغییر احتمال رخداد

- ۱- سردرگمی مسئولان برای اخذ نظر کارشناسی قاطع و ایجاد بحران‌های اجتماعی و مالی ناشی از انتشار اخبار علمی
- ۲- دخالت مستقیم برخی سازمان‌های اجرایی در امور تخصصی و پژوهشی
- ۳- اتلاف بودجه و اجرای نامناسب پروژه به علت عدم وجود توانمندی و بودجه کافی
- ۴- عدم استفاده از همکاری‌های بین‌المللی و نامناسب جلوه دادن چهره تحقیقاتی و علمی کشور
- ۵- بهره‌دهی یک طرفه به طرف‌های خارجی در همکاری‌های بین‌المللی
- ۶- عدم استفاده از تجربیات سایرین و تکرار خطاهای مشابه
- ۷- موازی کاری و تکرار بی‌فایده تحقیقات
- ۸- ایجاد مشکلات شخصی و فردی میان متخصصان و صاحب‌نظران

تدوین و توسعه برنامه‌های پیش‌بینی زلزله در ایران

به موارد زیر می‌توان به عنوان برنامه پیش‌بینی زلزله در ایران اشاره کرد:

- ۱- ساماندهی فعالیت‌های شبکه‌ای پیش‌بینی زلزله براساس طرح شفاف‌سازی مسأله پیش‌بینی زلزله و کارهای انجام شده و آنچه که در حال حاضر انجام می‌شود و همچنین موضوعاتی که به نظر می‌رسد در حد توانایی موجود در کشور باشد، تشکیل یک شبکه علمی برای پیش‌بینی زلزله ضروری است. پژوهش و توسعه نظری و آکادمیک در زمینه پیش‌بینی زلزله در این شبکه علمی برای تعریف مسأله پیش‌بینی زلزله در ایران و تلاش برای حل مرحله‌ای مسأله، فوق‌العاده ویژه و مهم می‌باشد. از سوی دیگر، با ادامه این روند می‌توان در زمینه نوآوری در سطح بین‌المللی هم امیدوار بود، و تلاش کرد که برای مسأله‌ای که هنوز در سطح بین‌المللی راه حل قطعی برای آن یافته نشده، با ارائه راه‌حل‌های منطقی و مرحله‌ای برای پیش‌بینی زلزله‌های با پیش‌نشانگرهای قابل ثبت، نسبت به کاهش تلفات زلزله در ایران و امکان صدور خدمات فنی و مهندسی مربوطه در سطح بین‌المللی اقدام شود.

در ارتباط با پیش‌بینی زلزله برای دولت آمریکا است که نتایج مطالعات و فعالیت‌های علمی مراکز مختلفی مانند برنامه ملی کاهش خطرات زلزله در آمریکا (NEHRP)، آژانس مدیریت بحران فدرال (FEMA)، مؤسسه ملی استانداردها و فناوری (NIST) و بنیاد ملی علوم (NSF) را سازمان‌دهی می‌کند. در کشور روسیه نیز، شورای عالی پیش‌بینی زلزله متشکل از دانشمندان برجسته آکادمی علوم روسیه و متخصصان وزارتخانه‌های مختلف مانند وزارت شرایط اضطراری روسیه و ادارات قوه قضائیه است. در ایران، مهم‌ترین سازمان‌هایی که حداقل به صورت بخشی در زمینه پیش‌بینی زلزله در کشور فعال هستند، شامل پژوهشکده سوانح طبیعی، سازمان زمین‌شناسی کشور، مرکز ملی پیش‌بینی زلزله، سازمان پیشگیری و مدیریت بحران شهر تهران، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، برخی از دانشگاه‌ها، مرکز مطالعات پیش‌نشانگرهای زلزله و برخی از پژوهشکده‌ها می‌باشند. بنابراین گرچه در ایران نیز سازمان‌های متعددی در امر پیش‌بینی زلزله فعالیت دارند اما مسأله مهم آن است که این فعالیت‌ها به صورت یکپارچه، مرتبط، مداوم و سازماندهی نمی‌باشد. دلایل عدم وجود همکاری تیمی و بین‌سازمانی در ایران را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- ۱- همسان بودن تقریبی تشکیلاتی تمام سازمان‌های فوق
- ۲- مأموریت‌ها و علاقمندی‌های مشابه و موازی
- ۳- عدم شفافیت مرزهای عملکرد و وظایف سازمان‌ها
- ۴- عدم نظارت جامع‌نگر به تشکیل مراکز و سازمان‌های نوپا
- ۵- عدم اطلاع‌رسانی سازمان‌های ذیربط از فعالیت‌های یکدیگر که به موازی کاری و صرف بودجه مضاعف جهت انجام امور مشابه منجر می‌گردد.
- ۶- عدم تخصیص به موقع بودجه

قابل ذکر است که خسارت ناشی از عدم وجود همکاری تیمی و بین‌سازمانی در کشور به صورت زیر بروز می‌نماید:

## پیش بینی زلزله در ایران

میزان علاقه یک سازمان به ورود به بحث مورد نظر صورت گیرد. ایجاد مجمع راهبردی و تصمیم گیر متشکل از تمام مراکز و سازمان‌های مرتبط، نیازمند عزم سازمان‌ها و همکاری تمام سازمانها و امکان جذب بودجه توسط آن‌ها خواهد بود.

### حوزه‌های تخصصی:

هم اکنون تلاش می‌شود تا فعالیت‌های علمی در زمینه پیش‌بینی زلزله در حوزه‌های تخصصی ذیل ساماندهی شود:

الف: ساماندهی داده‌های پیش‌نشاندگی زلزله و تهیه بانک پیش‌نشاندگی‌های زلزله در ایران:

در این زمینه، کاتالوگ‌های لرزه‌ای و شکل موج زمین لرزه‌های ثبت شده در ایران و پیش‌نشاندگی‌های غیرلرزه‌ای زلزله سامان می‌یابد تا با کاربرد روش‌های آماری و یافتن روابط تحلیلی و تجربی و براساس ضرایب قابل محاسبه از لرزه خیزی و همچنین الگوهای قابل تشخیص از شکل موج زلزله‌ها، استفاده از اطلاعات این بانک ممکن شده و عملیاتی گردد. این حوزه تخصصی، شامل مراحل زیر می‌باشد:

• تعریف خصوصیات یک پیش‌بینی موفق و علمی زلزله و معرفی پیش‌نشاندگی‌های لرزه‌ای به عنوان کارآمدترین پیش‌نشاندگر ایران با توجه به پایگاه‌های داده در ایران.

• بحث در مورد محدودیت‌های روش‌های آماری که نیازمند به حل یک تابع سه مجهولی با متغیرهای مکان، زمان و بزرگای است و عدم امکان بکارگیری معادلات دیفرانسیلی در زمینه پیش‌بینی زمین لرزه.

• با توجه به محدودیت‌های فوق، پیشنهاد اعمال یک شبکه عصبی بر کاتالوگ لرزه‌ای با حجم بالای زمین لرزه.

• استفاده از روش‌های پیش‌بینی و داده‌کاوی و دسته بندی راهبرد های فوق در رده‌های شاخه ای

• توجه به اصول انتخاب راهبردی مناسب براساس داده‌های موجود و روش‌هایی که واجد آن راهبرد باشند.

• دسته بندی راهبرد های پیش‌بینی به روش‌های آماری و قضاوتی

۲- تبیین پیش‌بینی زلزله در سطح کلان و تعریف مسأله پیش‌بینی زلزله در ایران:

با توجه به اهمیت پیش‌بینی رخداد زلزله‌های شدید تا بزرگ و با در نظر گرفتن اینکه در ایران، زلزله‌ها در عمق کم در پوسته قاره‌ای رخ می‌دهند، مسأله پیش‌بینی برای زلزله‌های با بزرگای ۶ تا حدود ۸ و در ژرفای حدود ۸ تا حدود ۲۵ کیلومتر مدنظر است. این موضوع باید براساس پژوهش‌های پایه و بنیادی در زمینه‌های گوناگون این موضوع به تدریج تبیین شده و توسعه یابد.

۳- استفاده از روش‌های ریاضی برای تشخیص الگو و تعیین خوشه‌های آتی رخداد احتمالی زمین‌لرزه جهت پیش‌بینی زلزله بایستی از روش‌های ریاضی برای تشخیص الگو و تعیین خوشه‌های آتی رخداد احتمالی زمین‌لرزه مانند شبیه‌سازی کاتالوگ لرزه‌خیزی، روش ژئوماتیکس و آنومالی (ناهنجاری) های مشاهده شده در ایران پیش از رخداد زلزله‌های گذشته و یافتن روندهای فعال گسیختگی‌ها (خطواره‌های ژئومغناطیس) که نمایانگر مکان رخداد زلزله‌های بعدی هستند، استفاده گردد.

۴- برآورد مکان‌ها و زمان‌های پر بحران برای رخداد یک زلزله

به عنوان شروع برای مطالعات فیزیک نظری در مورد پیش‌بینی زلزله، چنین برنامه‌ای ضروری است. کاربرد ریاضیات غیرخطی و روش‌های فراکتال برای پیش‌بینی زلزله برای توسعه مکان‌ها و زمان‌های بحرانی رخداد زلزله و همچنین برآورد عدم قطعیت در مکان، زمان و شدت زمین‌لرزه‌ها باید به‌طور خاص مد نظر قرار گیرد.

۵- ایجاد یک شورا یا کمیته ارزیابی پیش‌بینی با مسئولیت و حجت تام

ساماندهی مطالعات، همکاری‌های بین‌سازمانی و بین‌المللی برای بررسی امکان ایجاد یک سازمان که تمامی سازمان‌ها و مراکز فعلی تحت مدیریت واحد قرار گیرند در دستور این برنامه است. برقراری توافق‌های دو به دو سازمان‌ها برای مرزبندی مأموریت‌ها باید بر اساس بودجه و

• پیشنهاد استفاده از روش‌های علمی و قضاوتی بر اساس سامانه‌های تخصص محور برای سری‌های پیوسته با داده‌های واقعی.

ب: توسعه مطالعه بر روی پیش‌نشانگرهای زیستی: از پایش رفتار موجودات زنده می‌توان برای پیش‌بینی زلزله بهره گرفت. مروری بر پیش‌نشانگرهای زیستی بر اساس رفتار میکروارگانیسم‌ها نشان از امکان پیش‌بینی زلزله به کمک این نوع شواهد زیستی دارد. یعنی آنچه که در رفتار برخی جانداران به هنگام یا پیش از وقوع زلزله‌ها یافت می‌شود و نشانگر آن است که می‌توان پژوهش‌های مهمی را در این زمینه ساماندهی نمود.

• شناسایی تمام پیش‌نشانگرهای زیست‌شناختی  
• بررسی چگونگی پاسخ سلولی موجود زنده به پیام‌های ژئوفیزیکی قبل از رخداد زمین‌لرزه و تأثیرگذاری تغییرات میدان‌های الکترومغناطیسی محلی و ناحیه‌ای بر تبدلات یونی غشاء سلولی که خود سبب ایجاد خاصیت الکتریکی در غشاء سلولی می‌گردد؛ این تغییرات به نوبه خود تحت سازوکارهای مختلف توسط قوای حسی موجود زنده دریافت و به واکنش غیرعادی و فعال‌سازی الگوی رفتاری بقا در موجود زنده می‌انجامد.  
• باکتری‌ها و سخت‌پوستانی که دارای تغییرات شدت نور ساعت شده در اثر تغییر میدان الکترومغناطیسی و مغناطیسی هستند را می‌توان با کمک قابلیت کنترل و بیولومینوسانس فرایینی این تغییرات از طریق مطالعه تصاویر ماهواره‌ای و اعمال فیلترهای مختلف بررسی نمود.

• توجه به این مساله که باکتری‌های اسیدلاکتیکی در اثر تغییر میدان الکترومغناطیسی دستخوش تغییرات رشد و تولیدمثل کولونی می‌گردند.  
• تحلیل موارد مختلف (Case Study) در زمینه پیش‌نشانگرهای رفتاری جانداران و در نهایت بررسی ژنتیک رفتاری.  
• نتیجه: لزوم تعیین اولویت مطالعات توسط پژوهشگران، پیشنهاد طراحی وب‌سایت با ایجاد خط مستقیم در نقاط فعال.

ج: ساماندهی پیش‌نشانگرهای ژئوفیزیکی و ژئودتیکی تغییراتی که در نشانه‌های ژئوفیزیکی و ژئودتیکی

قابل ثبت زیرزمینی، زمینی و جوی دیده می‌شود، در زلزله‌های قبلی ثبت شده کاربرد مناسبی داشته است. این تغییرات در مغناطیس و گرانی زمین و همچنین تغییرات در دمای خاک در نزدیکی سطح زمین قبل از رخداد زلزله‌ها شناخته شده و می‌توان با ساماندهی آن‌ها به پیش‌بینی زلزله کمک نمود. مانند:

• تغییرات امواج الکترومغناطیسی با فرکانس بسیار پایین در اثر پدیده‌های طبیعی نظیر طوفان، رعد و برق و زمین‌لرزه.

• بررسی انواع روش‌های فرایینی بر اساس ناهنجاری‌های مغناطیسی، الکتریکی و الکترومغناطیسی و درجه اعتبار کنونی آن‌ها مانند روش Van که هم‌اکنون منسوخ شده است یا روش فرکانس بسیار پایین (ELF) و فرکانس فوق‌العاده پایین (ULF) که دارای اعتبار علمی هستند.

• استفاده از امواج الکترومغناطیسی به عنوان پیش‌نشانگر قبل از وقوع زمین‌لرزه.  
• لزوم استفاده از تجهیزات موردنیاز مانند گیرنده‌های ELF، ULF (قابلیت حذف نویزها (ارتعاشات نامطلوب) مربوط به رعد و برق و زمینه) و دستگاه ساده Ione detector (برای دقیق‌تر ساختن سامانه فرایینی).

• مطالعه پیش‌نشانگرهای ژئودتیک بر اساس تغییر هندسه و یا فیزیک زمین و کرنش حاصل شده از اعمال نیرو به مقوله پیش‌بینی می‌پردازد.

• لزوم انجام گرانی‌سنجی جهت تعیین ارتفاع، ترازیبسی هندسی، تعیین محل گسل‌های مدفون از طریق حل روابط معکوس و فرایینی تغییرات شتاب‌جاذبه در زمان برای پیش‌بینی زمین‌لرزه.

• توجه به مزایای استفاده از روش پردازش تداخل‌سنجی دهانه رادار ترکیبی (InSAR) از جمله دقت مکانی بالا و وسعت مکانی بالا جهت مطالعه حرکات زمین‌ساختی.

• امکان به‌کارگیری روش گراویمتری در کنار روش‌های تکمیلی دیگر به جای لرزه‌نگاری در مناطق شهری برای تشخیص گسل‌های زیرسطحی.

د: تغییرات اقلیمی و احتمال ارتباط آن‌ها با مساله رخداد زمین‌لرزه:

در مطالعات قبلی دیده شده است که تغییر حرارتی کلان در سطوح زمین (نظیر ذوب یخ‌های قطبی و

و: ترکیب داده ها، و ساماندهی فعالیت های پیش بینی با هدایت فعالیت ها و تلفیق اطلاعات: ترکیب اطلاعات و داده های گوناگون با استفاده از داده های ورودی مختلف و بهره گیری از مدل های شناخته شده، و الگوریتم های غیرخطی و فراکتال در ترکیب داده ها از نیازهای اصلی در بحث پیش بینی زلزله است: در این خصوص باید موارد ذیل مورد توجه قرار گیرد:

- بررسی مدل های مختلف و موفق بین المللی و لزوم همکاری و سازماندهی مشارکت سازمان های پژوهشی؛
- تهیه مدل مفهومی برای پیش بینی زلزله در ایران؛
- ایجاد سامانه پشتیبان تصمیم گیری، سامانه های هوشمند و سامانه های اطلاعات مکانی (GIS)؛
- استفاده از روش های مختلف محاسبات نرم (شامل منطق فازی، شبکه های عصبی، الگوریتم ژنتیک، مجموعه های راف، تبدیل موجک، ...) در تحلیل، تلفیق و مدل سازی اطلاعات زمین لرزه؛
- استفاده از روش های مختلف اطلاعات کاوی در کشف الگوهای زمین لرزه؛
- تقسیم بندی روش های Fusion بر اساس سطح دقت سنجنده های مورد نیاز.

### مروری بر یک پیش نشانگر شناخته شده: آب

پیش نشانگرهای هیدروژئوشیمیایی توسط محققان مختلفی مورد بررسی قرار گرفته اند (مانند [6]، [7]، [8]، [9] و [10]).

در سال ۲۰۰۵ هارتمن و لوی [۱۱]، موارد ذیل را از پارامترهای مهم پیش نشانگرهای آب شناختی برشمردند: انتشار و خروج گازها (مانند: دی اکسید کربن، رادون، آرگون، هیدروژن، نیتروژن، هلیوم، متان، آلکان های مختلف، هیدروکربن های خوشبو، آلکیل ها و فلزات شدیداً فرار مانند جیوه و قلع)، در محل گسل های فعال بر اثر فرایندهای مختلف حرارتی، رادیوژنیک و ژئودینامیکی، تغییرات و ناپایداری های موقت در سطح آب زیرزمینی و دبی چشمه ها و تغییرات ناپایدار درجه حرارت و میزان یون های محلول در آب.

در سال ۲۰۱۴، محققان به منظور بررسی ارتباط بین تغییرات در خواص شیمیایی آب و سطح آب زیرزمینی

همچنین خشکسالی های بزرگ) می توانند دارای پیامدهایی نظیر رخداد زلزله ها باشند. احتمال ارتباط پدیده های تغییرات اقلیمی در بحث های آغازین مطرح شده و موضوعی تخصصی است که با تلاش در آن می توان به پیش بینی زلزله کمک نمود. بنابراین باید به موارد زیر توجه نمود:

- در ۵۰ سال اخیر، تغییرات دمایی در شمال شرق ایران به اندازه ۴ درجه سانتیگراد بوده است که این رقم در مقایسه با مطالعات جهانی بسیار بالا است و هشدار دهنده افزایش دما با شیب تندی می باشد.
- تغییرات اقلیمی در سطح زمین مانند آب شدن یخ ها و ارتباط آن با زلزله ها.

ه: استفاده از فناوری های فضایی در پیش بینی زلزله:

مطالعه اطلاعات فضایی از جمله عکس ها و تصاویر هوایی و فضایی به منظور فراهم آوردن اطلاعات پایه برای پیش بینی زلزله مفید است. همچنین اطلاعات برخط حاصل از ماهواره ها که از جنبه های مختلف به پایش دائمی زمین می پردازند، در سال های اخیر از سوی کشورهای مختلف در مورد پیش بینی مورد استفاده قرار گرفته است. در این خصوص نیز باید به نکات ذیل توجه نمود:

- کارآمدی مطالعه آنومالی (ناهنجاری) های الکترومغناطیسی در باند طیفی ELF، ULF و VLF که متأثر از اغتشاشات یونسفری قبل، در حین و پس از وقوع زلزله هستند.
- امکان فرابینی فضایی از طریق نصب سنجنده های ویژه هر نوع آنومالی بر روی ماهواره ها.
- انجام سنجش از دور به دو طریق فعال و غیرفعال.
- محصول نهایی پایش فضایی ناهنجاری های مرتبط با زمین لرزه به ۳ صورت قابل ارائه است: تصاویر تک بانده سیاه و سفید، تصاویر چند بانده و تصاویر ابر طیفی.
- امکان پذیری تشخیص جابجایی های زمین ساختی در پوسته زمین از طریق تصاویر ماهواره ای.
- ایجاد سیستم های تحت وب از شبکه های اطلاعات سنجنده های زمینی و فضایی به صورت بلادرنگ جهت اخذ، تبادل، به اشتراک گذاری و تحلیل اطلاعات زمین لرزه ها.

آنومالی‌های هیدروژئوشیمیایی، زیست‌شناختی و ... اشاره شد. سپس چالش‌های پیش‌روی پژوهش‌های پیش‌بینی زلزله در ایران نظیر مشکلات سازمان‌دهی و تصمیم‌گیری بین مراکز علمی، عدم ارتباطات موثر بین مراکز مسئول در زمینه پیش‌بینی زمین لرزه و همچنین اختصاص نیافتن بهینه و به‌موقع بودجه تشریح گردید. در ادامه، تدوین و توسعه برنامه‌های پیش‌بینی زلزله در ایران و ساماندهی حوزه‌های تخصصی توضیح داده شد و در نهایت به اندازه‌گیری تغییرات هیدروژئوشیمیایی به‌عنوان یک نمونه پیش‌نشانگر زلزله اشاره کوتاهی گردید.

### منابع

- [1] Wang, J.H. (2016). A Mechanism Causing b-Value Anomalies Prior to a Mainshock, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.106, No.4, PP.1663-1671. doi:10.1785/0120150335.
- [2] Scuderi, M.M., Marone, C., Tinti, E., Di Stefano, G. & Collettini, C. (2016). Precursory changes in seismic velocity for the spectrum of earthquake failure modes, Nature Geoscience, Vol.9, PP.695-700. doi:10.1038/ngeo2775.
- [3] Kaproth, B.M. & Marone, C. (2013). Slow earthquakes, preseismic velocity changes and the origin of slow frictional stick-slip, Science, Vol. 341, PP.1229-1232.
- [4] Chen, J. H., Froment, B., Liu, Q. Y. & Campillo, M. (2010). Distribution of seismic wave speed changes associated with the 12 May 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake, Geophysical Research Letters, Vol.37, PP.2008-2011.
- [5] Niu, F., Silver, P. G., Daley, T. M., Cheng, X. & Majer, E. L. (2008). Preseismic velocity changes observed from active source monitoring at the Parkfield SAFOD drill site, Nature, Vol.454, PP.204-208.
- [6] Ingebritsen, S. E. & Manga, M. (2014). Earthquakes: Hydrogeochemical precursors, Nature Geoscience, Vol.7, PP.697-698. doi:10.1038/ngeo2261.
- [7] Bräuer, K., Kämpf, H. & Strauch, G. (2009). Earthquake swarms in non-volcanic regions: What fluids have to say, Geophysical Research Letters, Vol.36, No.17, doi: 10.1029/2009GL039615.
- [8] Claesson, L., Skelton, A., Graham, C., Dietl, C., Mörth, M., Torssander, P. & Kockum, I. (2004). Hydrogeochemical changes before and after a major earthquake, Geology, Vol. 32, No.8 PP. 641-644, doi: 10.1130/G20542.1.
- [9] Igarashi, G., Saeki, S., Takahata, N., Sumikawa, K., Tasaka, S., Sasaki, Y., Takahashi, M., Sano, Y. (1995). Ground-Water Radon Anomaly Before the Kobe Earthquake in Japan, Science, Vol.269,

با مساله زمین‌لرزه، به بررسی ایزوتوپ‌های پایدار موجود در چاه‌های در هوساویک ایسلند پرداختند [۱۲]. به این منظور، به مدت پنج سال هر هفته عناصری که در آب تجمع می‌افتند به دقت مورد مطالعه قرار می‌گرفتند و تغییرات عمده‌ای در شیمی آب، ۶-۴ ماه قبل از دو زلزله مشاهده شد و بدین ترتیب، زلزله اول در ۲۱ اکتبر ۲۰۱۲ با بزرگای ۵,۶ و زلزله دوم در ۲ آوریل ۲۰۱۳ با بزرگای ۵,۵ رخ داد. قبل از هر کدام از این زمین‌لرزه‌ها، مقدار سدیم و هیدروژن افزایش چشمگیری را نشان داده بودند. مشاهده تغییرات مشابه در آب‌های زیرزمینی قبل از زمین‌لرزه ۱۷ ژانویه ۱۹۹۵ کوبه ژاپن با بزرگای ۶,۹ و زمین‌لرزه ۲۸ ژوئیه ۱۹۷۶ تانگشان چین با بزرگای ۷,۵ نیز دیده شده بود. سطوح تجمع مواد معدنی محلول و گازها در دوران‌هایی که از لحاظ لرزه‌خیزی غیرفعال هستند، تقریباً ثابت است، ۸-۲ روز قبل از وقوع زمین‌لرزه افزایش چشمگیری در میزان این مواد دیده می‌شود. این ناهنجاری‌ها در غلظت گاز و مواد معدنی بعد از زمین‌لرزه از بین می‌رفتند. از مشاهدات به عمل آمده تاکنون نتایج زیر حاصل شده است: سطح آب‌های زیرزمینی در طول ماه‌ها یا سال‌های قبل از زلزله به تدریج کم می‌شود، چند هفته قبل از زلزله سطح آب به طور تصاعدی کاهش می‌یابد، در روزها یا ساعت‌های قبل از زلزله، سطح آب دوباره به حالت اول برمی‌گردد و به سرعت افزایش می‌یابد، در زلزله منطقه تانگشان در ۱۹۷۶، سطوح آب در سال‌های قبل از زلزله آن قدر کاهش یافت که بسیاری از چاه‌ها به طور کامل خشک شدند و ساعت‌هایی قبل از زلزله، بسیاری از چاه‌ها تبدیل به چاه آرتزین شدند. مثال‌های دیگری از این تغییر سطح آب قبل از وقوع زلزله وجود دارد که می‌توان به عنوان یک هشدار نسبتاً معتبر که در آن‌جا بایستی چاه‌های عمیق مورد بررسی دقیق قرار گیرند، از آن استفاده نمود.

### نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، ابتدا به روش‌های علمی جهت پیش‌بینی زلزله مانند روش‌های آماری و پیش‌نشانگرها از جمله تغییر در الگوی لرزه‌خیزی، تغییرات سرعت موج و تنش‌های لرزه‌ای،

## پیش بینی زلزله در ایران

- [12] Skelton, A., Andrén, M., Kristmannsdóttir, H., Stockmann, G., Mörth, C.M., Sveinbjörnsdóttir, A., Jónsson, S., Sturkell, E., Guðrúnardóttir, H.R., Hjartarson, H., Siegmund, H. & Kockum, I. (2014). Changes in groundwater chemistry before two consecutive earthquakes in Iceland, *Nature Geoscience*, Vol.7, PP. 752–756, doi:10.1038/ngeo2250.
- [10] Tsunogai, U. & Wakita, H. (1995). Precursory Chemical Changes in Ground Water: Kobe Earthquake, Japan, *Science*, Vol. 269, No. 5220, PP. 61-63. doi:10.1126/science.269.5220.61.
- [11] Hartmann, J. and Levy, J. K. (2005). Hydrogeological and gasgeochemical earthquake precursors – a review for application, *Natural Hazards*, Vol. 34, PP. 279–304.