

تغییرات اقلیمی و زلزله: بررسی اثر متقابل این دو

مریم هدهدی^{*1}

1 گروه فیزیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران، hodhodi1355@pel.iaun.ac.ir

* نویسنده مسئول: مریم هدهدی

چکیده

با توجه به تغییرات شدید آب و هوایی در دهه‌های اخیر، تأثیرات آن بر فعالیت‌های زمین‌شناسی و به ویژه زلزله‌ها مورد توجه قرار گرفته است. زلزله‌ها نه تنها بر سطح و زیرزمین تأثیر می‌گذارند، بلکه می‌توانند بر لایه‌های بالای جو نیز اثر بگذارند. این مقاله به بررسی داده‌های علمی و نتایج تحقیقات پیشین می‌پردازد و نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی چگونه می‌توانند بر الگوهای زلزله تأثیر بگذارند و بالعکس. نتایج نشان می‌دهد که این دو پدیده به‌طور پیچیده‌ای با یکدیگر مرتبط هستند و موانع اصلی در مطالعه این رابطه شامل پیچیدگی سیستم زمین، کمبود داده‌ها، عدم شناخت کامل مکانیزم‌های ارتباطی و چالش‌های مرتبط با استنباط علیت است. ادغام مدل‌های پیش‌بینی زلزله با داده‌های اقلیمی می‌تواند به پیش‌بینی بهتر وقوع زلزله‌ها و درک عمیق‌تر از روابط بین این دو پدیده طبیعی کمک کند و در نهایت به کاهش خسارات ناشی از آن‌ها بینجامد.

واژه‌های کلیدی: تغییرات اقلیمی، پیش‌بینی زلزله، گرمایش جهانی.

Interactions Between Climate Change and Earthquakes: A Comprehensive Review

Maryam Hodhodi^{1*}

¹Department of Physics, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran ; hodhodi1355@pel.iaun.ac.ir

* Corresponding author: Maryam Hodhodi

ABSTRACT

In recent decades, geological processes and particularly earthquake occurrence have been affected significantly by increasingly climate change. Earthquakes not only affect the Earth's surface and subsurface but can also influence the upper layers of the atmosphere. This research comprehensively reviews previous studies on how climate change may impact earthquake patterns and vice versa. The results indicate a complex interrelationship between these two phenomena; Earth complexities, data inadequacy, unknown the related mechanisms, and challenges of causal inference are among the primary obstacles in studying these two facts. Integrating earthquake prediction models with climate data could enhance the forecasting of earthquake occurrences and deepen recognition of the relationships between these two natural phenomena. These measures can improve understanding and managing the interactions of climate change and earthquakes and lead to the reduction of damages caused by these phenomena.

Keywords: Climate changes, Earthquake prediction, Global warming.

1- مقدمه

در دنیای امروز تغییرات اقلیمی به یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های بشریت تبدیل شده است. این تغییرات نه تنها بر روی محیط زیست و اکوسیستم‌ها تأثیر می‌گذارند، بلکه می‌توانند بر پدیده‌های طبیعی دیگری همچون زلزله‌ها نیز تأثیر بگذارند. تغییرات اقلیمی می‌توانند از طریق افزایش بارش، تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی، و ذوب یخچال‌ها بر وقوع زلزله تأثیر بگذارند. این عوامل می‌توانند فشار و تنش‌های زمین‌شناسی را تغییر دهند و به تحریک زلزله‌ها کمک کنند. با این حال، این رابطه بسیار پیچیده است و عوامل زمین‌شناسی دیگری نیز در وقوع زلزله نقش دارند. بنابراین، نمی‌توان گفت که تغییرات اقلیمی دلیل اصلی وقوع زلزله‌ها هستند، اما ممکن است یکی از عوامل مؤثر در این پدیده باشند. زلزله‌ها نیز از طریق آزادسازی گازهای گلخانه‌ای، تغییرات در سطح آب‌های زیرزمینی، تغییرات در پوشش زمین و تغییرات در لایه‌های بالایی جو می‌توانند تأثیرات قابل توجهی بر محیط زیست و تغییرات اقلیمی داشته باشند؛ مطالعه و تحلیل این ارتباط پیچیده می‌تواند کمک کند تا به روش‌های جدیدی برای پیش‌بینی

زلزله، بهبود سیستم‌های ارتباطی و مطالعه جو زمین دست یافت. به طور کلی، ارتباط بین تغییرات اقلیمی و زلزله‌ها یک زمینه پژوهشی پیچیده و چندبعدی است که نیاز به مطالعات بیشتری دارد تا بتوان به درک بهتری از این پدیده‌ها دست یافت و برای کاهش خطرات ناشی از آن‌ها برنامه‌ریزی کرد. این مقاله با مرور مطالعات اخیر در این زمینه، به بررسی این رابطه پیچیده می‌پردازد و هدف آن شفاف‌سازی چگونگی تأثیرات متقابل این دو پدیده است.

2- روش های تحقیق در بررسی رابطه متقابل بین تغییرات اقلیمی و زلزله

برای بررسی رابطه متقابل بین تغییرات اقلیمی و زلزله، می‌توان از روش‌ها و ابزارهای متنوعی بهره برد. نخست، جمع‌آوری داده‌ها شامل اطلاعات لرزه‌نگاری، داده‌های اقلیمی مانند دما و بارش، و تصاویر ماهواره‌ای برای تحلیل تغییرات زمین‌شناسی ضروری است. سپس با استفاده از مدل‌های عددی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌توان به شبیه‌سازی رفتار زمین و پیش‌بینی زلزله‌ها کمک کرد. تحلیل آماری نیز شامل بررسی همبستگی و استفاده از مدل‌های رگرسیونی برای شناسایی عوامل مؤثر بر وقوع زلزله‌ها و تغییرات اقلیمی است. در این زمینه، فلوچارت‌ها و دیاگرام‌ها نیز برای نمایش مراحل تحقیق و تحلیل توزیع جغرافیایی زلزله‌ها و تغییرات اقلیمی کاربرد دارند. در نهایت، تحلیل داده‌های بزرگ با تکنیک‌های داده‌کاوی و یادگیری ماشین به درک بهتر ارتباطات پیچیده بین این دو پدیده کمک می‌کند و امکان دستیابی به پیش‌بینی‌های دقیق‌تر را فراهم می‌آورد. جدول (1) می‌تواند به عنوان یک مرجع سریع برای درک بهتر این روش‌ها و مثال‌های مربوط به مطالعه در این زمینه، مورد استفاده قرار گیرد.

جدول 1: روش‌ها و مثال‌های مربوط به مطالعه رابطه بین زلزله و تغییرات اقلیمی

مثال‌ها	توضیحات	روش مطالعه
تحلیل زلزله‌های بزرگ در کالیفرنیا و بررسی رسوبات دریاچه‌های محلی.	بررسی سوابق زلزله‌ها و تحلیل رسوبات در دریاچه‌ها برای شناسایی الگوهای ارتباطی.	تحلیل داده‌های تاریخی
مدل‌سازی رفتار زمین‌لرزه‌ها در اثر ذوب یخچال‌ها در گرینلند.	شبیه‌سازی حرکت صفحات تکتونیکی و تأثیر تغییرات آب و هوایی بر فعالیت‌های لرزه‌ای.	مدل‌سازی عددی
استفاده از رگرسیون چندگانه برای بررسی ارتباط بین دما و وقوع زلزله.	بررسی همبستگی بین داده‌های زلزله و تغییرات دما و بارندگی با استفاده از مدل‌های رگرسیونی.	تحلیل آماری
بررسی فعالیت‌های لرزه‌ای در مناطق کوهستانی و جمع‌آوری داده‌های میدانی.	پایش فعالیت‌های لرزه‌ای و بررسی مناطق فعال زمین‌شناسی برای درک بهتر ارتباطات.	مطالعات میدانی
تحلیل تغییرات سطح دریا در مناطق زلزله‌خیز با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای	استفاده از تصاویر ماهواره‌ای برای اندازه‌گیری تغییرات سطح دریا و ذوب یخچال‌ها.	داده‌های ماهواره‌ای

3- مرور مطالعات اخیر

ماجی و همکاران [1] در تحقیق خود به بررسی ارتباط میان افزایش دمای جهانی و وقوع زلزله‌ها پرداخته‌اند؛ نتایج نشان می‌دهد که ناهنجاری‌های دمای جهانی تأثیر قابل توجهی بر زلزله‌های کوچک (با شدت 2.0 تا 4.9) دارند. همچنین، با استفاده از آزمون علیت گرنجر، وجود یک رابطه دوطرفه بین وقوع زلزله‌ها و نوسانات دما تأیید شده است. این یافته‌ها می‌تواند به محققان در توسعه مدل‌های ریاضی برای پیش‌بینی تغییرات در این دو پدیده کمک کند. سعدخان و همکاران [2] به تحلیل شدت زلزله‌های جهانی به‌عنوان یک سری زمانی و بررسی ماهیت آن با استفاده از ابزارهای پردازش سیگنال آماری پرداختند، آن‌ها همچنین روندهای دمای جهانی را نیز به‌طور مشابه تحلیل کردند؛ نتایج نشان داد که هر دو دینامیک مشابه و نامانا (antipersistent) هستند. آزمون علیت گرنجر نشان داد که هر دو دینامیک ناشی از یکدیگر بوده و یکی با استفاده از داده‌های قبلی دیگری قابل پیش‌بینی است. همچنین آن‌ها [3] به بررسی تأثیرات گرمایش جهانی بر خواص مکانیکی و شیمیایی لایه‌های زمین پرداخته و فرضیه‌ای مبنی بر تأثیر تغییرات ملایم تنش و فشار سیال منفذی ناشی از عوامل اقلیمی بر لرزه‌خیزی ارائه کردند. این گروه، با استفاده از سه مدل شبکه عصبی عمیق شامل (Long Short-Term Memory; LSTM) ، (Bio- LSTM) و مدل‌های ترانسفورماتور برای پیش‌بینی بزرگی زمین‌لرزه‌ها در مناطق لرزه‌خیز

ژاپن، اندونزی و منطقه هندو-کوش کاراکورام استفاده کردند؛ نتایج نشان داد که این مدل‌ها در پیش‌بینی زلزله از پتانسیل خوبی برخوردارند. مولچانو [4] تغییرات آهسته دمای آب و هوا در منطقه اقیانوس آرام نزدیک به استوا و فعالیت لرزه‌ای در این منطقه را از سال ۱۹۷۳ تا ۲۰۰۸ مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. او نتیجه‌گیری کرد که رابطه واقعی بین تغییرات اقلیمی و زلزله وجود دارد و نوسانات اقلیمی و روندهای دما ممکن است تحت تأثیر تغییرات لرزه‌ای قرار گیرند. سابرامانیان و همکاران [5] تأثیر تغییرات اقلیمی بر لغزش‌های زمین در مناطق سرد فصلی مانند آلپ‌های فرانسه و هوکایدو در ژاپن را بررسی کردند. مدل ارائه‌شده توسط آن‌ها تعاملات بین جو، آب‌شناسی و مکانیک خاک را بررسی کرده و پیش‌بینی می‌کند که در صورت ذوب کند برف، احتمال لغزش‌ها ثابت می‌ماند، اما در صورت ذوب سریع، اندازه و تعداد لغزش‌ها به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. بعد از زلزله و سونامی در سوماترا در سال 2004، دماهای پایین و برف سنگین به طور مکرر مشاهده شد. دو نظریه وجود دارد که بیان می‌کند زلزله‌های اقیانوسی می‌توانند بر آب و هوا تأثیر بگذارند و جزر و مد‌ها نیز در این تغییرات نقش دارند. تحقیق یانگ و همکاران [6] به بررسی رابطه بین قوی‌ترین زلزله‌ها، قوی‌ترین جزر و مد‌ها، دماهای پایین و نوسانات دماهای اقیانوس آرام پرداخته است. کانگراک و همکاران [7] به بررسی پیش‌بینی بارش‌های شدید در آینده و تأثیر تغییرات آب و هوایی بر شکل‌زمین پرداخته‌اند؛ آن‌ها از تجزیه و تحلیل داده‌های ناسا با استفاده از مدل CAESAR-Lisflood نشان دادند که تغییرات زمین‌شناسی بعد از زلزله همچنان ادامه دارد و حدود ۲۷ سال (تا حدود سال ۲۰۳۵) طول می‌کشد تا شکل‌زمین پایدار شود. عثمان و همکاران [8] با جمع‌آوری و بررسی داده‌های لرزه‌ای از سال 1965 تا 2004 از اداره هواشناسی پاکستان و داده‌های رسوب‌گذاری از پروژه سد تربیلا نشان دادند که فرکانس زلزله‌ها برای بزرگی 4.1 تا 5.0 به‌طور تدریجی افزایش یافته است. متغیرهای مهم شناخته‌شده در طی دوره مطالعه، فرآیندهای زمین‌شناسی مختلف مرتبط با تغییرات اقلیمی هستند که پتانسیل تغییر بار در سراسر گسل‌ها را دارند و ممکن است منجر به افزایش فرکانس زلزله‌ها با تغییر و آزادسازی تنش‌ها در مقیاس محلی شوند؛ این تغییرات ممکن است به دلیل تغییرات آب و هوایی و تأثیرات آن بر زمین باشد که می‌تواند باعث افزایش زلزله‌ها شود. دانشور و همکاران [9] ضمن اشاره به افزایش مقدار حرارت نهان سطحی و بارش باران در برخی تحقیقات، ۳۹ زلزله بزرگ در خاورمیانه را بر اساس سری زمانی داده‌های سنجش از دور ناسا بررسی کرده و دریافتند که به‌طور متوسط، در روزهای قبل از زلزله‌ها، بارش حدود ۳۵ میلی‌متر و حرارت نهان تا ۱۱۵ وات بر متر مربع افزایش یافته است. همچنین نشان دادند بین زلزله‌ها و تغییرات جوی ارتباط قوی‌ای وجود دارد. در همین راستا، آنها [10] به بررسی تغییرات جوی که قبل از یک زلزله بزرگ در خاورمیانه رخ داد، پرداختند. زلزله‌ای که در 16 آوریل 2013 با قدرت 7.8 ریشتر اتفاق افتاد، اولین زلزله بزرگ در این منطقه در 40 سال اخیر بود. آن‌ها هشت نوع داده جوی را از ماه‌های مارس تا مه 2013 جمع‌آوری کردند و متوجه شدند که چند روز قبل از زلزله، تغییرات غیرعادی در رطوبت و باد وجود داشته است. همچنین، اثرات گلخانه‌ای و ابرهای غیرعادی نیز مشاهده شده است. در مطالعه دیگری، دانشور و همکاران [11] بررسی کردند که چگونه مسدودسازی جوی می‌تواند به پیش‌بینی زلزله‌ها در جنوب ایران کمک کند. آن‌ها شواهدی از یک مسدودسازی خاص در آوریل ۲۰۱۳ پیدا کرده که با تغییرات دما و بارش باران همراه بود. نهایتاً نتیجه گرفتند که تغییرات جوی و فشار پایین می‌توانند نشانه‌هایی از وقوع زلزله‌ها باشند و می‌توانند تا چند هفته قبل از وقوع زلزله‌ها قابل شناسایی باشند. دانشور و همکاران در مطالعه [12] به بررسی تغییرات جوی و یونوسفری پرداخته که قبل از زلزله بزرگ ایلاپل در شیلی در سپتامبر 2015 اتفاق افتاده‌اند. دانشمندان با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای متوجه شدند که تغییرات جوی خاصی 35 تا 40 روز قبل از زلزله رخ داده و همچنین یک سیکلون غیرمعمول شکل گرفته است. این تغییرات جوی و یونوسفری نشان‌دهنده وجود تنش‌هایی در زمین هستند که می‌توانند به وقوع زلزله کمک کنند. در ادامه، دانشور و همکاران [13] به‌صورت آماری نقش مسدودسازی جوی را به‌عنوان پیش‌زمینه‌ای برای رویدادهای زلزله بزرگ بررسی می‌کردند. نتایج نشان می‌دهد که بسیاری از زلزله‌های بزرگ در 14 روز بعد از مسدودسازی جوی رخ داده‌اند. فروند [14]، [15] به توضیح نشانه‌هایی مانند اختلالات در لایه‌ای از جو به نام یونوسفر، قبل از زلزله‌ها پرداخته است؛ این نشانه‌ها ممکن است به دلیل فعالیت الکترون‌ها در سنگ‌ها باشند که تحت فشار قرار دارند. این فعالیت می‌تواند باعث افزایش الکتریسیته در هوا شود و تغییراتی در رفتار حیوانات و نورهای غیرعادی در آسمان ایجاد کند. جریان مثبت یون‌ها می‌تواند ناپایداری‌هایی در لایه میانه جو ایجاد کند، به رعد و برق‌های میانه جو منجر شود، تغییراتی در محتوای الکترون کل (Total Electron Content; TEC) در لبه پایین یونوسفر ایجاد کند و به تلاطم‌های میدان الکتریکی منجر شود. پیشرفت در درک فرآیند زلزله تنها در یک روح چندرشته‌ای گسترده امکان‌پذیر است. دانشور و همکاران [16] به بررسی ارتباط بین بارش‌های غیرعادی و پنج زلزله با بزرگی‌های بیش از 8 در منطقه پرو و شیلی پرداخته‌اند. محققان داده‌های بارش و زلزله را از سال 2000 تا 2015 جمع‌آوری کردند و متوجه شدند که دو ماه قبل از این زلزله‌ها بارش‌ها به‌طور غیرعادی افزایش یافته است. این نشان می‌دهد قبل از وقوع زلزله‌ها، بارش بیشتری رخ می‌دهد که ممکن است به دلیل وجود طوفان‌ها باشد. این پدیده با نظریه فروند [14]، تأثیرات جوی و الکتریکی در ارتباط با تغییرات تنش منجر به وقوع شکست در منطقه کانونی زلزله، همخوانی دارد. سروان و همکاران [17] نشان داده‌اند جریان حرارت نهان سطحی (surface-latent heat flux; SLHF) و سیگنال‌های رادیویی در زلزله بزرگ توکاشی-اوکی در ۲۵ سپتامبر ۲۰۰۳ می‌توانند همدیگر را تکمیل کنند و این می‌تواند بعنوان هشدار زودهنگام قبل از وقوع زلزله استفاده شود. هانزل و همکاران [18] بر اساس مشاهدات خود از زلزله‌های ایزوله شده در زیر

کوه هوشتاوفن در آلمان دریافته‌اند که زلزله‌های ثبت شده با تغییرات فشار منفذی فضایی-زمانی محاسبه شده به خوبی همبستگی دارند و این رفتار با قوانین علمی که نحوه واکنش گسل‌ها را توضیح می‌دهند، مطابقت دارند. در مدل پیشنهادی هاسن و همکاران [19] افزایش فشار سیال در سطح به دلیل بارش زیاد، منجر به افزایش محلی فشار سیال در عمق می‌شود. با این کار، توانستند نفوذپذیری هیدرولیکی را با ترسیم فعالیت لرزه‌ای تحریک‌شده در یک نمودار زمان-عمق برآورد کنند. مقادیر نفوذپذیری هیدرولیکی در محدوده 0.01 تا 0.5 متر مربع بر ثانیه برای منطقه مورد مطالعه بدست آمد که با مطالعات قبلی در مورد زلزله‌های تحریک‌شده توسط سیالات همخوانی دارد و از ایده تحریک زلزله‌ها به دلیل بارش زیاد حمایت می‌کند. جیو و همکاران [20] به بررسی پیشرفت‌های اخیر در زمینه شناسایی تغییرات غیرعادی در داده‌های ماهواره‌ای نظیر ناهنجاری‌های حرارتی پرداخته‌اند؛ آن‌ها چگونگی استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و تکنیک‌های شناسایی ناهنجاری برای پیش‌بینی زلزله‌ها و همچنین، چالش‌ها و روندهای جدید در تحقیقات آینده را بررسی کرده‌اند. کرفت و همکاران [21] در منطقه ای خاص در جنوب شرقی آلمان که به دلیل اندازه کوچک زلزله‌ها و وجود یک سیستم پایش دائمی شرایط مطالعه خوبی دارد؛ به بررسی زلزله‌ها، سطح آب‌های زیرزمینی و بارش باران پرداختند. آن‌ها دریافته‌اند که افزایش بارش و سطح آب‌های زیرزمینی با وقوع زلزله‌ها ارتباط دارد؛ همچنین همبستگی خوبی بین تخمین میزان نفوذ آب در خاک با زلزله‌های رخ داده مشاهده کردند. لیپروسکی و همکاران [22] به بررسی اختلالات الکترومغناطیسی در زمان اتحاد جماهیر شوروی پرداخته و تأکید می‌کنند که تشکیل لایه‌ای منفرد به نام E اهمیت دارد. در انتها، یک مدل فیزیکی ارائه دادند که توضیح می‌دهد چگونه عوامل مختلف مانند تولید بار الکتریکی، انتشار گاز رادیواکتیو، تغییر دما و لرزش زمین می‌توانند به تشکیل این لایه کمک کنند. پولینتز و همکاران [23, 24] نشان دادند که چگونه یونیزه شدن هوا بر دما و رطوبت در لایه نزدیک به زمین تأثیر می‌گذارد. نتایج نشان می‌دهد که این تغییرات می‌توانند دما و رطوبت را قبل از زلزله‌ها تغییر دهند، و این یافته‌ها با مشاهدات ماهواره‌ای و آزمایش‌های انجام‌شده تأیید می‌شوند. پولینتز و همکاران [25] به بررسی پیش‌سازهای زلزله پرداختند و تلاش کردند تا بفهمند چه نشانه‌هایی در جو و محیط اطراف می‌توانند قبل از وقوع زلزله ظاهر شوند؛ آن‌ها بر این باورند که زلزله‌ها نتیجه حرکت صفحات زمین هستند و گازهایی که ناشی از حرکت زمین نشأت می‌گیرند، می‌توانند به ایجاد این نشانه‌ها کمک کنند. همچنین، تغییرات الکتریسیته جوی در مناطق زلزله‌خیز می‌تواند نشانه‌ای از وقوع زلزله باشد. این تحقیق مدل پیوند لیتوسفر-جو-یونوسفر (Coupling Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere; LAIC) را پیشنهاد می‌دهد که می‌تواند این نشانه‌ها را بهتر توضیح دهند و به پیش‌بینی زلزله‌ها کمک کنند. هدف نهایی این مقاله یک مفهوم یکپارچه برای اعتبارسنجی سیستماتیک انواع مختلف پیش‌سازهای زلزله است که بر اساس مبنای فیزیکی در یک نظریه مشترک متحد شده‌اند. کین و همکاران [26] به بررسی تغییرات حرارت نهان سطحی در پنج زلزله مختلف رخ داده در مناطق دریاچه‌ای، مرطوب و خشک چین، پرداخته‌اند. نتایج نشان داد که در ۸ تا ۳۰ روز قبل از زلزله‌ها، حرارت در نزدیکی نقاط زلزله به طور غیرعادی بالا بوده است. این تغییرات معمولاً در محل زلزله و اطراف آن اتفاق می‌افتد و به فصل سال نیز بستگی دارد. تحلیل کوزونو و همکاران [27] از تابش طول موج خروجی زمین (Outgoing Long wave earth Radiation; OLR)، نشان می‌دهد که تغییرات غیرعادی قبل از تعدادی از زلزله‌های متوسط تا بزرگ وجود دارد. جدیدترین آن مربوط به زلزله با بزرگی 9.0 در جزایر سوماترا و آندامان است که در ناحیه کانونی در تاریخ 21 دسامبر 2004، 5 روز قبل از وقوع زلزله، مشاهده شده است. اهمیت این مشاهدات با استفاده از داده‌های جدیدترین زلزله‌های شرق آسیا در دسامبر 2004 و سه زلزله دیگر مورد بررسی قرار گرفته است که نشان می‌دهد این تغییرات چند هفته قبل از زلزله اتفاق می‌افتند. پاروت و همکاران [28] به بررسی مشاهدات فضایی چندابزاری پرداخته‌اند تا مفاهیم فیزیکی پیوند لیتوسفر-جو-یونوسفر (LAIC) را در ارتباط با نشانه‌هایی که قبل از وقوع زلزله رخ می‌دهد، تأیید کنند. آن‌ها به بررسی زلزله‌های بزرگی در اندونزی و چین پرداخته و نشان داده‌اند که تغییرات خاصی در جو و یونوسفر نظیر: چگالی یونوسفر، نقشه‌های جهانی یونوسفر (GIM; Global Ionospheric Maps) از محتوای کل الکترون (TEC; Total Electron Content)، آنومالی‌های حرارتی مادون قرمز و داده‌های تابش طول موج خروجی (OLR)، قبل از این زلزله‌ها اتفاق می‌افتد که می‌تواند به پیش‌بینی زلزله‌ها کمک کند. موکو [29] در مطالعه خود، بارش باران را به عنوان منبع اصلی آب‌های زیرزمینی در نظر گرفته و نشان داده که در برخی مناطق شبه‌جزیره بالکان بارش‌های غیرعادی می‌تواند بر وقوع زلزله‌ها تأثیر بگذارد. او مطالعه دیگری [30] در ویرجینیای مرکزی انجام داد؛ با بررسی ارتباط بین بارش باران و وقوع زلزله‌ها در این منطقه نشان داد که بارش‌های شدید و آب باران می‌تواند باعث افزایش تنش در زمین شود و این می‌تواند منجر به زلزله‌ها شود که معمولاً سه ماه بعد از بارش‌های سنگین اتفاق می‌افتند. مسیح [31] تأثیر تغییرات اقلیمی ناشی از انسان بر افزایش دما و ارتباط آن با زلزله‌ها را بررسی کردند. نرخ ذوب یخچال‌ها به طور قابل توجهی افزایش یافته و باعث افزایش قابل توجهی در سطح دریا در سطح جهانی شده است. تغییرات اقلیمی می‌تواند فاجعه‌هایی مانند زلزله‌ها، فوران‌های آتشفشانی، سونامی‌ها و زمین‌لغزش‌ها را به دلیل ذوب یخچال‌ها و افزایش سطح دریا تحریک کند. وقتی یخچال‌ها ذوب می‌شوند، وزن عظیمی بر پوسته زمین کاهش می‌یابد و پوسته را به اصطلاح "بازگشت ایزواستاتیک" به عقب می‌برد. این فرآیند می‌تواند گسل‌ها را دوباره فعال کند و فشار را بر روی اتاقک‌های ماگما که به آتشفشان‌ها تغذیه می‌کنند، افزایش دهد و در نتیجه فعالیت زلزله‌ای را افزایش دهد. این مقاله به بررسی همبستگی بین افزایش دما ناشی از گرمایش جهانی و فراوانی زلزله‌ها با استفاده از

ضریب همبستگی پیرسون و تحلیل رگرسیون بر اساس یک مطالعه موردی از آلاسکا می‌پردازد. مگنان و همکاران [32] شماره ویژه‌ای درباره سیستم پیش‌بینی زلزله جهانی را بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که شواهد قوی برای تایید وجود نشانه‌های غیرزلزله‌ای قبل از زلزله‌های بزرگ وجود ندارد. بیشتر مطالعات به دلیل انتخاب داده‌های نادرست و مسائل آماری قابل اطمینان نیستند، اگرچه برخی از سیگنال‌های زمین‌شناسی وعده‌بخش به نظر می‌رسند. هدف نهایی این پروژه جمع‌آوری یک پایگاه داده جهانی، با استفاده از فناوری‌های جدید در زمینه ذخیره‌سازی داده و یادگیری ماشین، از نشانه‌هایی است که ممکن است به پیش‌بینی زلزله کمک کند، این تحقیق به دانشمندان کمک می‌کند تا با موضوعاتی که شاید قبلاً با آن‌ها آشنا نبوده‌اند آشنا شوند و پایه‌ای برای همکاری‌های بین رشته‌ای در پیش‌بینی زلزله فراهم می‌کند.

4- چالش‌ها، محدودیت‌ها و راهکارها

برای بررسی رابطه متقابل بین تغییرات اقلیمی و زلزله، چالش‌ها و محدودیت‌های متعددی وجود دارد. یکی از این چالش‌ها، عدم قطعیت داده‌هاست؛ به طوری که داده‌های اقلیمی و لرزه‌نگاری ممکن است ناقص یا نادرست باشند و این موضوع می‌تواند به نتایج غیرقابل اعتماد منجر شود. همچنین، پیچیدگی سیستم‌های طبیعی به این معناست که تأثیرات متقابل بین این دو پدیده به راحتی قابل شناسایی نیست. علاوه بر این، تفاوت در زمان‌بندی وقوع تغییرات اقلیمی و زلزله‌ها نیز می‌تواند تحلیل را دشوار کند؛ زیرا تغییرات اقلیمی معمولاً در مقیاس‌های زمانی طولانی مدت رخ می‌دهند، در حالی که زلزله‌ها به صورت ناگهانی اتفاق می‌افتند. مدل‌سازی و پیش‌بینی نیز ممکن است نتوانند به درستی تعاملات پیچیده بین این دو پدیده را شبیه‌سازی کنند. محدودیت‌های جغرافیایی در دسترسی به داده‌های زمین‌شناسی، تأثیرات انسانی ناشی از فعالیت‌های مانند استخراج منابع و ساخت و ساز، و همچنین عدم توافق علمی در مورد نوع و میزان تأثیرات متقابل، همگی می‌توانند موانع جدی در مسیر تحقیقات و تحلیل‌های مربوط به این رابطه ایجاد کنند [14]. برای بهبود این وضعیت، چندین راهکار مؤثر وجود دارد. اولاً، جمع‌آوری داده‌های بیشتر و دقیق‌تر از طریق فناوری‌های نوین مانند تصاویر ماهواره‌ای و حسگرهای زمینی می‌تواند به درک بهتر این تعاملات کمک کند. ثانیاً، تشویق همکاری‌های بین‌رشته‌ای میان دانشمندان زمین‌شناسی، اقلیم‌شناسی و مهندسی می‌تواند به شناسایی و تحلیل بهتر این روابط کمک کند. علاوه بر این، توسعه مدل‌های پیشرفته‌تر که قادر به شبیه‌سازی پیچیدگی‌های این تعاملات باشند، ضروری است. این مدل‌ها باید توانایی پیش‌بینی تأثیرات تغییرات اقلیمی بر وقوع زلزله‌ها و بالعکس را داشته باشند. در نهایت، افزایش آگاهی عمومی و آموزشی درباره تأثیرات متقابل این دو پدیده، می‌تواند جوامع را در برابر خطرات احتمالی بهتر آماده کند و به مدیریت بحران‌های ناشی از این تأثیرات کمک کند. این اقدامات می‌توانند به بهبود درک و مدیریت تأثیرات متقابل تغییرات اقلیمی و زلزله کمک کنند و به کاهش آسیب‌ها و خسارات ناشی از این پدیده‌ها منجر شوند [32].

5- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

مرور مطالعات نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی و زلزله‌ها ارتباطات پیچیده‌ای با یکدیگر دارند. تغییرات در الگوهای آب و هوایی، از جمله افزایش دما، تغییر سطح آب‌های زیرزمینی، تغییر در بارش و ذوب یخچال‌ها، می‌تواند تأثیرات مستقیمی بر استحکام و پایداری زمین داشته باشد. این عوامل می‌توانند احتمال وقوع زلزله‌ها را افزایش دهند. علاوه بر این، فعالیت‌های انسانی ناشی از تغییرات اقلیمی می‌تواند خطر زلزله‌ها را تشدید کند. از طرفی، زلزله‌ها نیز با ایجاد گسل‌ها، تغییر توپوگرافی زمین، فعال کردن آتشفشان‌ها و تخریب پوشش گیاهی می‌توانند بر الگوهای آب و هوایی و چرخه کربن تأثیر بگذارند. همچنین، زلزله‌های زیر دریایی با ایجاد سونامی، اکوسیستم‌های دریایی را تخریب کرده و بر چرخه کربن در اقیانوس‌ها اثر می‌گذارند؛ هر چند، این تأثیر در مقایسه با سایر عوامل مؤثر بر تغییرات اقلیمی، بسیار کمتر است و نیاز به تحقیقات بیشتری برای درک کامل این ارتباط وجود دارد. زلزله‌ها نه تنها بر سطح زمین، بلکه بر لایه‌های بالاتر جو نیز تأثیر می‌گذارند. بنابراین، تحلیل‌های دقیق و جامع در این زمینه ضروری است تا بتوان به پیش‌بینی‌های بهتری دست یافت و استراتژی‌های مؤثری برای کاهش خطرات ناشی از زلزله‌ها و تغییرات اقلیمی توسعه داد. در نهایت، همکاری بین محققان در حوزه‌های مختلف، از جمله اقلیم‌شناسی، زمین‌شناسی و مهندسی، می‌تواند به درک بهتر این ارتباطات و بهبود برنامه‌ریزی‌های پیشگیرانه کمک کند.

مراجع

- [1] Maji, C., Sadhukhan, B., Mukherjee, S., Khutia, S. & Chaudhuri, H., "Impact of climate change on seismicity: a statistical approach," Arabian Journal of Geosciences. 14. 10. 1007/s12518, 2021.
- [2] Sadhukhan, B., Mukherjee, S., Sarkar, D. & Samanta, R., "Investigating the relationship between earthquake occurrences and global temperature fluctuation patterns" Arabian Journal of Geosciences. 14. 10. 1007/s12517, 2021.

- [3] Maji, C., Sadhukhan, B., Mukherjee, S., Khutia, S. & Chaudhuri, H., " Climatic and seismic data-driven deep learning model for earthquake magnitude prediction," *Frontiers in Earth Science*, 11. 1-24, 2023.
- [4] Molchanov O., "About climate-seismicity coupling from correlation analysis," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10. 10.5194/nhess-10-299,2010.
- [5] Subramanian, S., Srikrishnan F., Xuanmei Y., Ali P., Asch, Th.W.J., Xu, Q., & Huang, R., "Envisaging post-earthquake snowmelt-induced shallow landslides under climate change," 10.5194/egusphere-egu, 2020.
- [6] Yang, D.,H., Yang, D.,B., Yang, X.,X., "The influence of tides and earthquakes in global climate changes" *Chinese Journal of Geophysics (Acta Geophysica Sinica)*. 54. 926-934. 10.3969/j.issn.0001-5733,2011.
- [7] Congrong L., Wang M., & Liu, K., & Coulthard, T., " Landscape evolution of the Wenchuan earthquake-stricken area in response to future climate change," *Journal of Hydrology*. 590. 125244. 10.1016/j.jhydrol,2020.
- [8] Usman, M., " A Study on the Enhancing Earthquake Frequency in Northern Pakistan: Is the Climate Change Responsible?," *Natural Hazards*. 82. 10.1007/s11069,2016.
- [9] Daneshvar MRM., Khosravi M., Tavousi T., "Seismic triggering of atmospheric variables prior to the major earthquakes in the Middle East within a 12-year time-period of 2002-2013," *Nat Hazards* 74(3): 1539–1553,2014a.
- [10] Daneshvar MRM., Tavousi T. & Khosravi M., "Synoptic detection of the short-term atmospheric precursors prior to a major earthquake in the Middle East," North Saravan M7.8 earthquake, SE Iran. *Air Qual Atmos Health* 7:29–39, 2014b.
- [11] Daneshvar MRM., Tavousi T. & Khosravi M., " Atmospheric blocking anomalies as the synoptic precursors prior to the induced earthquakes; a new climatic conceptual model," *Int J Environ Sci Technol* 12(5):1705–1718,2015.
- [12] Daneshvar MRM. & Freund FT., " Remote sensing of atmospheric and ionospheric signals prior to the Mw 8.3 Illapel Earthquake," Chile 2015. *Pure Appl Geophys* 174(1):11–45,2017.
- [13] Daneshvar MRM. & Freund FT., "Examination of a relationship between atmospheric blocking and seismic events in the Middle East using a new seismo-climatic index," *Swiss J Geosci* 112(2-3):435–451,2019.
- [14] Freund FT., Kulahci IG., Cyr G., Ling J., Winnick M., Tregloan-Reed J. & Freund MM. , "Air ionization at rock surfaces and preearthquake signals. *J Atmos Sol Terr Phys* 71(17-18):1824–1834,2009.
- [15] Freund FT. " Earthquake forewarning-a multidisciplinary challenge from the ground up to space," *Acta Geophys* 61(4):775–807,2023.
- [16] Daneshvar MRM. & Freund FT. , " Survey of a relationship between precipitation and major earthquakes along the Peru-Chilean trench (2000-2015)," *Eur Phys J Spec Top* 230:335–351,2021.
- [17] Cervone G., Maekawa S., Singh RP., Hayakawa M., Kafatos M. & Shvets A ., " Surface latent heat flux and nighttime LF anomalies prior to the Mw = 8.3 Tokachi-Oki earthquake," *Nat Hazards Earth Syst Sci* 6(1):109–114,2006.
- [18] Hainzl S., Kraft T., Wassermann J., Igel H. & Schmedes E., "Evidence for rainfall-triggered earthquake activity. *Geophys Res Lett* 33(19): L19303,2006.
- [19] Husen S., Bachmann C. & Giardini D., " Locally triggered seismicity in the central Swiss Alps following the large rainfall event of August 2005," *Geophys J Int* 171(3):1126–1134,2007.
- [20] Jiao ZH., Zhao J. & Shan X., " Pre-seismic anomalies from optical satellite observations: a review," *Nat Hazards Earth Syst Sci* 18: 1013–1036,2018.
- [21] Kraft T., Wassermann J., Schmedes E. & Igel H., " Meteorological triggering of earthquake swarms at Mt. Hochstaufen," SE-Germany. *Tectonophysics* 424(3-4):245–258,2006.
- [22] Liperovsky VA., Pokhotelov OA., Liperovskaya EV., Parrot M., Meister CV. & Alimov OA., " Modification of sporadic E-layers caused by seismic activity," *Surv Geophys* 21(5-6):449–486,2000.
- [23] Pulnits SA. & Boyarchuk K., "Ionospheric precursors of earthquakes "(p. 316), 2004. Berlin: Springer.
- [24] Pulnits SA., Ouzounov D., Karelin AV., Boyarchuk KA. & Pokhmelnikh LA., " The physical nature of thermal anomalies observed before strong earthquakes," *Phys Chem Earth* 31(4-9):143–153,2006
- [25] Pulnits SA. & Ouzounov D., "Lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling (LAIC) model: an unified concept for earthquake precursors validation," *J Asian Earth Sci* 41(4-5):371–382,2011.
- [26] Qin K., Guo GM., Wu LX., " Surface latent heat flux anomalies preceding inland earthquakes in China," *Earthq Sci* 22(5):555–562, 2009.
- [27] Ouzounov D., Liu D., Chunli K., Cervone G., Kafatos M. & Taylor P., "Outgoing long wave radiation variability from IR satellite data prior to major earthquakes," *Tectonophysics* 431(1-4):211–220, 2007.
- [28] Parrot M., Tramutoli V., Liu TJY., Pulnits S., Ouzounov D., Genzano N., Lisi M., Hattori K., & Namgaladze A., Atmospheric and ionospheric coupling phenomena associated with large earthquakes," *Eur Phys J Spec Top* 230:197–225,2021.
- [29] Muço B., " Statistical investigation on possible seasonality of seismic activity and rainfall-induced earthquakes in Balkan area," *Phys Earth Planet Inter* 114:119–127, 1999.
- [30] Muço B., "The atmospheric water as a triggering factor for earthquakes in the central Virginia seismic zone," *Nat Hazards* 71(1):135–150, 2014.
- [31] Masih A., " An enhanced seismic activity observed due to climate change: preliminary results from Alaska," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 167(1), 01,2018.
- [32] Mignan A., Ouillon G., Sornette D., & Freund F., " Global earthquake forecasting system (GEFS): the challenges ahead," *Eur Phys J Spec Top* 230:473–490. 2021.